

# STUDY ON EFFECTIVE TROUBLESHOOTING OF MULTI-COMPONENT DEPOSITS

JIANG Guo-bin<sup>1,2</sup>, CHEN Zhong-hao<sup>2</sup>

( 1. State Key Lab of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. National Research Center of Papermaking and Pollution Control, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Deposit problems at a mill will often have components from multiple sources including mechanical pulp, recycled fiber, coated broke, and process additives. In these deposits, there is often one component serving as both a primary trigger for deposition as well as a binder for other materials. Identification and treatment of this trigger can significantly decrease deposition and also help to identify secondary deposit problems more effectively. In the middle of a severe deposit outbreak, however, it can be difficult to identify a primary trigger. Consideration of a mill's deposit history, its furnish, and the texture and composition of the deposit itself can help to establish a solid methodology for efficiently identifying the primary trigger of deposition in current and future deposit problems.

**Key words:** multi-component deposit; secondary deposit; primary trigger; deposition

**CLC Number:** TS727<sup>+</sup>.2                      **Document Code:** A

## 0 Introduction

A severe paper machine deposit outbreak places tremendous pressure on a mill more than ever in today's challenging economic times. Solving this deposit problem requires solid troubleshooting methodology within a highly stressful environment in order to identify the trigger for deposition. Unfortunately, the number of potential triggers for deposition has increased significantly over the last decade<sup>[1]</sup>. For example, the increasing usage of mechanical pulp in the furnish can lead to wood pitch deposits. Usage of recycled fiber has brought the appearance of synthetic binders, adhesives, and waxes into deposits, and the creation of new process additives further widens the possibility of observable materials.

Consequently, a machine superintendent can send out the same deposit to four different labs and receive in return four different assessments of what's triggering the deposition and where it comes from. Is it the ASA size hydrolyzate? Is it wood pitch? Is it the coating latex? Is it slime? Is it coming from my mechanical pulp, my sulfite pulp, or my recycled fiber? How does the superintendent know which one to focus on when the chances of making the production budget are rapidly slipping away? This paper discusses how consideration of a mill's deposit history, it's furnish, and the deposit's texture and composition can help to establish a solid methodology for efficiently identifying the primary trigger of deposition in current and future deposit problems.

\* 收稿日期:2009-10-07

作者简介:蒋国斌(1977-),男,广西壮族自治区南宁市人,在读博士生,研究方向:造纸化学品

## 1 Consideration of a Mill's Furnish and Deposit History

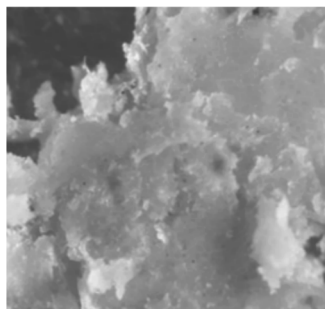
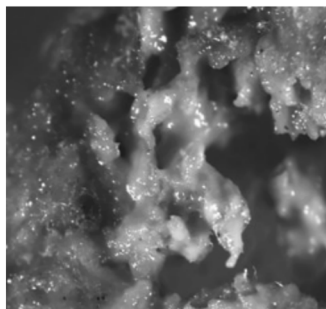
In troubleshooting a mill's deposit problems, a review of the mill's furnish and its deposit history can be invaluable in helping to effectively troubleshoot deposit problems. A review of the furnish can identify the possible sources of deposit materials, and an examination of the mill's deposit history can provide supporting evidence in confirming the deposition trigger.

For example, a mill making specialty grades experienced severe deposition in its press section. The analysis of the deposit identified it as aluminum resinate. The first question asked by the machine superintendent was "Where is this aluminum resinate coming from?". A review of the machine furnish identified wood pitch resin acids from its mechanical pulp and also resin acids used in its rosin sizing program as sources of resin acids that can react with alum to form aluminum resinate. These two potential sources presented vastly different corrective actions. Confirmation of the mechanical pulp as the source would put the focus on pulp mill operations and pitch control solutions, while rosin sizing would require an examination of variables such as pH optimization, product addition points, and dosage control.

The first step of any good troubleshooting methodology involves verifying and gathering information about the problem. This was accomplished by talking to the operators with first hand knowledge of the problem, taking a look at actual deposit samples, checking log books, etc. As part of the information gathering process, the operators indicated that the deposit problems always increased when internally sized grades were being produced.

The next step in the troubleshooting methodology involved the analysis. In this situation, a comparison of the resin acid profiles of the deposit with resin acid profiles of wood pitch from the mechanical pulp and the rosin size was generated using gas chromatography<sup>[2]</sup>. This analysis effectively identified the rosin size as the main source of the resin acids in the uhle box deposit. This analysis result identifying the rosin size as the source of the deposition is supported by the operator's comments indicating that the deposit problems are typically observed during the production of rosin-sized grades.

Collectively, this information allowed the mill to focus efforts on maximizing retention of rosin size rather than wasting time, effort, and money on investigating pulp mill operations.



**Fig. 1 Photomicrographs of press section doctor blade deposits**

## 2 Consideration of a Deposit's Texture

The texture of a machine deposit is often reflective of the composition of its major components<sup>[3]</sup>. For example, a press dusting deposit may be light and fluffy reflecting a high concentration of fiber, fines, and filler. A stickies deposit, on the other hand, may be tacky and elastic reflecting the presence of contact

adhesives. When there is only one organic component such as a wax, an adhesive, or microbial slime, present in a deposit, the associated texture is readily apparent. However, when multiple organic components are present in various amounts in a deposit, the observed texture can be useful in determining

which component is the more dominant one and is likely serving as the trigger for deposition.

As an example, consider the following two photomicrographs of press section doctor blade deposits from an alkaline fine paper mill shown below in Fig. 1.

The photo on the left depicts a deposit that is primarily comprised of tacky wood pitch steryl/triterpenyl esters from its hardwood Aspen pulp. The photo on the right depicts a deposit that is primarily comprised of waxy ASA size hydrolyzate in its calcium soap form. While a texture analysis cannot fully substitute for an instrumental analysis, the observation of a deposit's texture can suggest whether tacky wood pitch or waxy ASA hydrolyzate is the focal point of the deposition.

3 Use of FT-IR Spectroscopy

With the potential for multiple materials present in the deposit, the use of instrumental analyses such as FT-IR spectroscopy can help breakdown a deposit comprised of several materials. However, even with the individual components identified, infrared analysis is mainly regarded as a qualitative tool for identifying what components are present in a sample as opposed to determining the concentrations of the individual components.

Consequently, an analysis report describing the presence of ASA hydrolyzate and wood pitch in a deposit based on an FT-IR analysis will inevitably lead to the question “Is this more an ASA issue or a wood pitch issue?”. Yet while FT-IR analysis will not

typically yield quantitative results, an examination of the spectrum complemented by the troubleshooting methodology and observations of the deposit's texture can be very effective in identifying the main driver in a deposit problem.

As an example, let's revisit the two press section doctor blade deposits whose photos are displayed on the previous page. The infrared spectrum of the tacky wood pitch deposit shown in the left-hand photo is displayed below in Fig. 2 along with reference spectra of wood pitch steryl/triterpenyl esters and ASA hydrolyzate in its calcium soap form.

In examining the above spectrum, the presence of wood pitch steryl/triterpenyl esters are readily observed in the above spectrum based on the presence of characteristic peaks at approximately 2 924, 2 854, 1 730, 1 664, 1 247, and 1 167  $\text{cm}^{-1}$  in the spectrum of the deposit. At the same time, a less intense peak at approximately 1 554  $\text{cm}^{-1}$  characteristic of ASA hydrolyzate in its calcium soap form can be observed.

The infrared spectrum of the waxy press section deposit shown in the photo on the right hand side is

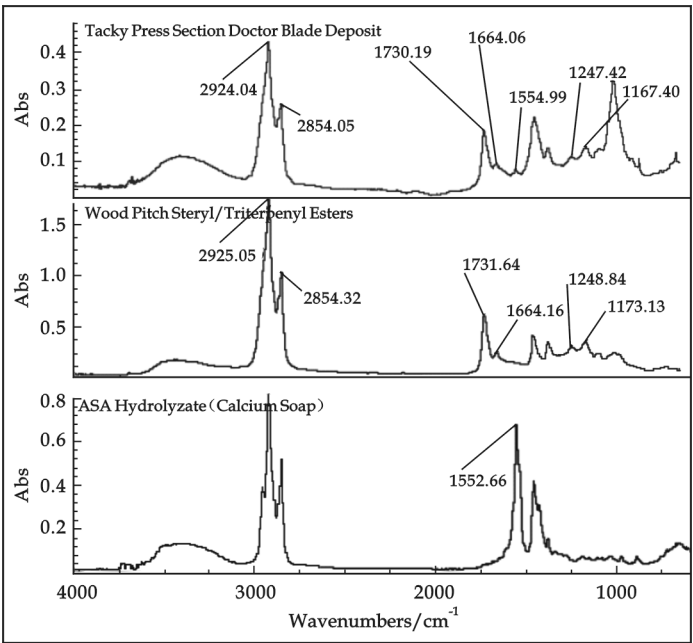
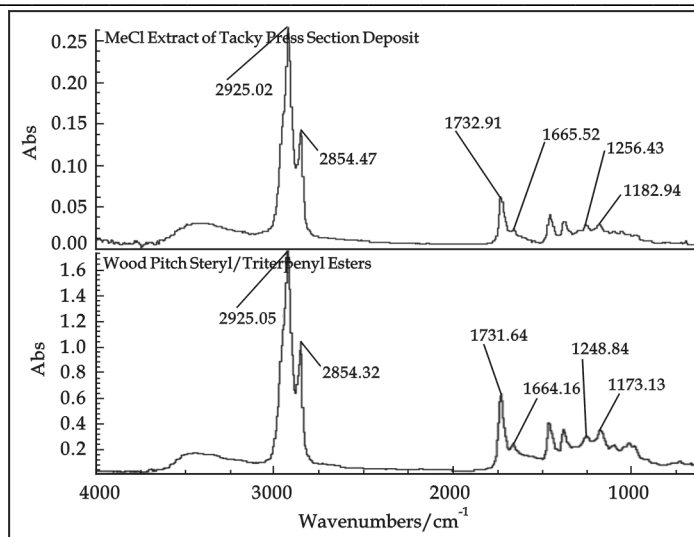
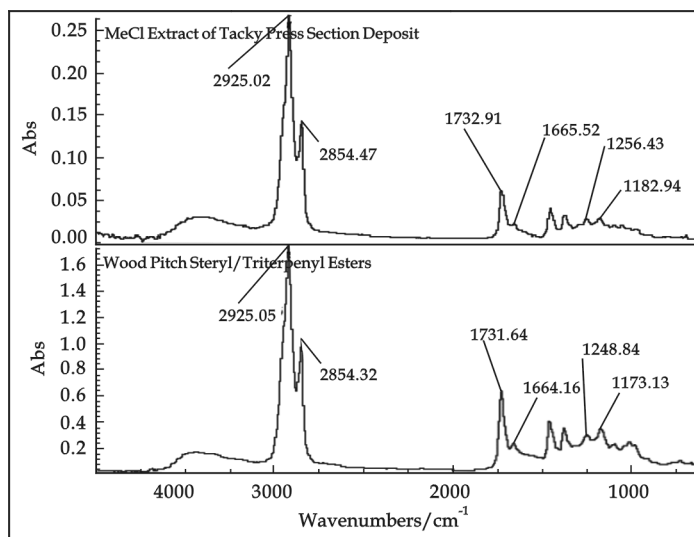


Fig. 2 Infrared spectrum of tacky press section doctor blade deposit with reference spectra of wood pitch steryl/triterpenyl esters and ASA hydrolyzate (calcium soap)



**Fig. 3** Infrared spectrum of waxy press section doctor blade deposit with reference spectra of wood pitch steryl/triterpenyl esters and ASA hydrolyzate (calcium soap)



**Fig. 4** Infrared spectrum of methylene chloride extracts of tacky press section deposit along with reference spectrum of wood pitch steryl/triterpenyl esters

displayed below in Fig. 3 along with reference spectra of wood pitch steryl/triterpenyl esters and ASA hydrolyzate in its calcium soap form.

In examining these spectra, the spectral features of the calcium soap of ASA hydrolyzate in its calcium soap form are readily apparent based on characteristic peaks at approximately 2 953, 2 922, 2 852, 1 556, and 970  $\text{cm}^{-1}$  in the spectrum of the deposit. At the same time, a barely observable peak at approximately 1 733  $\text{cm}^{-1}$  is characteristic of the wood pitch steryl/triterpenyl esters. This peak assignment is confirmed based on the methylene chloride extract of this waxy deposit shown below in Fig. 4.

The presence of the wood pitch steryl/triterpenyl esters in the methylene chloride extractables of the waxy press section deposit is confirmed based on the appearance of characteristic peaks at approximately 2 925, 2 854, 1 732, 1 665, 1 256, and 1 182  $\text{cm}^{-1}$  in the spectrum. (Note: the calcium soap of ASA hydrolyzate is insoluble in methylene chloride and other solvents).

Consequently, the infrared analysis of the tacky and the waxy press section deposits would describe each deposit as a combination of the calcium soap of ASA hydrolyzate along with wood pitch steryl/triterpenyl esters.

However, the textures of these two deposits differ substantially and their infrared spectra are quite different also with respect to the relative peak intensities for ASA hydrolyzate and wood pitch steryl/triterpenyl esters. Based on these observations, it is fair to say that although these two deposits contain the same materials, the tacky deposit is primarily wood pitch, while the waxy one is primarily ASA hydrolyzate. These distinctions can allow the mill to troubleshoot either the pulp mill or sizing operations as the primary source of the deposition. In gathering information as part of the troubleshooting methodology, it may come out that the pulp mill was experiencing some upsets around the time of the tacky deposition, or perhaps the ASA storage tank was almost empty and the hydrolyzate was concentrated at the bottom of the tank. Again, this fact-finding information can complement the texture



observations and the instrumental analyses to allow the paper maker to more effectively troubleshoot deposition problems.

4 Conclusion

With greater usage of mechanical pulp, recycled fiber, and new process additives, today's paper machine deposits contain multiple materials, many of which can effectively serve as a trigger for deposition. The presence of multiple materials in these deposits leads to different sources of corrective actions as machine superintendents must consider operations in the pulp mill and recycle plant in addition to functional chemistry operation and mechanical issues such as screening/cleaning. With downtime becoming more and more costly in this ultra-competitive market, the need for effective troubleshooting of complex deposit problems has never been greater. By considering a mill's deposit history and furnish and evaluating the deposit's texture and composition, the deposit component most likely to be driving the deposition can be more readily identified and the appropriate corrective actions can be implemented.

References

[1]Blazey, M. A. , Chen, G. C. , Grimsley, S. A. . Effective Use of FT-IR Spectroscopy in Troubleshooting Spot and Deposit Problems [C]. Tappi 1997 Engineering & Papermakers Conference Proceedings, Atlanta: Tappi Press, GA, 1997: 993.  
[2]Hardell, H. L. Characterization of impurities in pulp and paper products using pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry, including direct methylation[J]. J. Anal. Appl. Pyrolysis,1993,27(1): 73.  
[3]Grimsley, S. A. , Chen, G. C. Troubleshooting paper sports and deposits[J]. Tappi,1994,77(4): 262-265.  
[4]Colthup, N. B. , Daly, L. H. , Wiberly, S. E. . Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy(3rd. Ed. )[M]. San Diego: Academic Press, CA, 1990: 228-232.

关于有效解决多组分沉积物问题的研究

蒋国斌<sup>1,2</sup>, 陈中豪<sup>2</sup>

( 1. 华南理工大学制浆造纸国家重点实验室, 广东 广州 510640;2. 华南理工大学造纸与污染控制国家工程研究中心, 广东 广州 510640)

**摘 要:**纸厂中的沉积物通常含有多种组分,其主要来源于机械浆、回用纤维、涂布损纸以及过程添加剂等多种原料. 通常这些沉积物中某一组分可作为沉积作用的主要引发剂,同时也可作为其他原料之间的粘合剂,因此对这种引发剂进行鉴定和处理对减少胶粘物的沉积具有重要意义. 另一方面,在胶粘物沉积现象严重的过程中,其还可以帮助有效地鉴别二次胶粘物. 然而,要准确鉴别这种引发剂还有一定的难度. 作者对纸厂胶粘物的沉积、浆料、沉积机理以及沉积物本身的组成等进行了研究,以期建立一种可靠的方法,有效地鉴别目前以及将来引发沉积物沉积的引发剂.

**关键词:**多组分沉积物; 二次沉积物; 引发剂; 沉积

**中图分类号:**TS727<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0006-06

# LABORATORY INVESTIGATION OF PROPPANT TRANSPORTABLE CROSS-LINKED ACID FRACTURING FLUID SYSTEM

WANG Hai-tao<sup>1</sup>, LI Xiang-fang<sup>1</sup>, YI Xiang-yi<sup>2</sup>, LU Yuan<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Performances of acid system have significant influence on acid fracturing technology for oil/gas reservoir stimulation. A new proppant-transportable cross-linked acid fluid system has been studied on the basis of laboratory experiment. Based on the demand of temperature tolerance, anti-shearing and sand-carrying properties, the performances of rheological properties, frictional resistance, filtrate loss, corrosion inhibition, proppant sedimentation and gel breaking to the cross-linked acid system have been tested respectively. Through the research, this new acid system shows good adaptability to the acid fracturing with sand-carrying field requirements; meanwhile, it enables the combination of acid carrying sand filling fracture technique with acidizing technique. Upon field practical examination, the cross-linked acid system is help to accomplish the proppant-carrying and easy to gel-breaking-flow-back; thereby, improved technique of acid fracturing has ensured the reservoir stimulation effect.

**Key words:** acid fracturing; proppant-carrying; cross-linked acid; laboratory test; filed practice

**CLC Number:** TE357.2

**Document Code:** A

## 0 Introduction

Acid fracturing as an effective technique in oil/gas reservoir stimulation has achieved great development. However, followed the enhanced exploitation in low permeability, high temperature and high pressure (HTHP) reservoirs, the performance requirement of acid fracturing fluid system has also been improved. The HTHP reservoir request the fluid can be adaptable to bearing high temperature, anti-shearing, low frictional resistance, and low filtrate loss, corrosion inhibition, rapid gel break, and even transporting proppant. In order to enhancing these physical chemistry performances in the process of acid fracturing injection, a new cross-linked acid fluid system has been presented. The key parts of the acid fluid system contain one kind of thickener and one kind of cross-linking agent; meanwhile, the other additive we choose such as the hydrochloric acid, corrosion inhibitor, cleanup additive, frother and Fe stabilizer are fetched from Changqing oilfield to achieve the field use. Through the laboratory research, the unique performances of this new acid fracturing fluid system have been discussed.

## 1 Mechanism of Acid Fracturing with Proppant

### 1.1 Conventional acid fracturing process and its problems

\* 收稿日期:2009-09-29

作者简介:王海涛(1982—),男,新疆维吾尔自治区阿克苏市人,在读博士生,研究方向:油气田开发工程

Acid fracturing is commonly used in the carbonate reservoir stimulation by: (1) pumping the acid fluid system above the formation breakdown pressure, creating a hydraulically induced fracture, just like proppant fracturing; (2) after gel acid broken, HCl-based acids will etch the fracture faces in a non-uniform way to form corrosional grooves, the reaction between acid and rock faces are followed:



The major difference between acid and propped fractures is that conductivity is obtained by etching the fracture faces instead of by using proppant to prevent the fracture from closing. Because of rock heterogeneity and fingering of the acid through the wider previously etched channels, which results in numerous horizontal “pillars” supporting the channels between them; therefore, when the formation begins closing, the fracture can remain a certain conductivity. The conductivity can be expressed by the Nierodo-Kruk's empirical equation<sup>[1]</sup>:

$$(\omega K)_{\text{eff}} = C_1 \exp(-C_2 \sigma_c) \quad (3)$$

$$\text{Where: } C_1 = 2.94 \times 10^{-4} \left( \frac{\omega_{\text{ideal}}^3}{12} \right)^{0.822}, \omega_{\text{ideal}} = \frac{XV}{2(1-\phi)h_f L_f}$$

$$C_2 = \begin{cases} (36.82 - 1.885 \ln S_{RE}) \times 10^{-3} & 0 \text{ MPa} < S_{RE} < 138 \text{ MPa} \\ (9.1 - 0.406 \ln S_{RE}) \times 10^{-3} & 138 \text{ MPa} < S_{RE} < 3450 \text{ MPa} \end{cases}$$

Where  $\sigma_c$  is the effective stress in MPa;  $S_{RE}$  is the rock embedment strength in MPa; and  $(\omega K)_{\text{eff}}$  is the effective conductivity in  $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ ;  $\omega_{\text{ideal}}$  is the ideal fracture width, m;  $X$  is the acid dissolving capacity;  $V$  is the consumable acid volume;  $\phi$  is the formation porosity;  $h_f$  is the fracture height in m;  $L_f$  is the fracture length in m.

We can see from the above relational expression that the fracture width and permeability are contributed to conductivity which is the key to stimulation effect. Actually, the fracture width induced by acid fracturing is lower than that of propped fracture, and the resultants of rock-acid reaction will block the fracture and the etched channel; thereby, the acid fracturing is not always so successful.

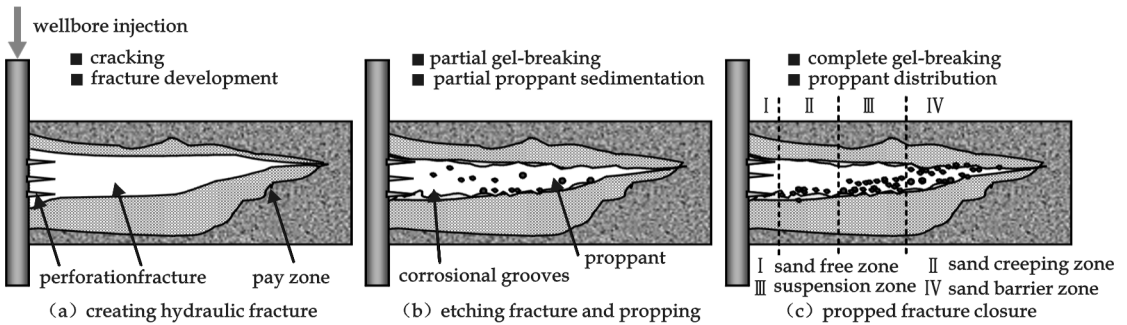


Fig. 1 Process of acid fracturing added with proppant

## 1.2 Acid transporting proppant fracturing process

In order to enlarge the etched fracture, we have adopted a new acid fracturing process<sup>[2]</sup> (Fig. 1): (1) injecting high viscous pad above the formation breakdown pressure, creating hydraulic fracture; (2) injecting the mixed slurry (cross-linked acid system added with proppant) to the fractured zones, partly gel-broken-acid etches the fracture faces forming corrosional grooves, meanwhile, partly sedimentary proppant help to supporting the fracture; (3) after the gel-breaking completely, HCl-based acid will etch fracture faces extensively, and more proppant will fill up the fracture to propping the fracture.

Success to the above technical thinking mainly depends on the acid performances and reaction kinetics between acid and formation rock to a great extent, apart from the lithomechanics features of forma-

tion rock. Therefore, a special cross-linked acid fluid system and its properties have been studied in this paper, which could enable the need of proppant transportation.

2 Experiment and Evaluation of Cross-linked Acid Fluid System

Using as reference the experiences on acid fracturing fluid system development at home and abroad, we have solved the problems in temperature resistance and cross-linking under the circumstance of super acid; a new-type thickener and a new-type cross-linking agent as the core parts of the new acid fracturing fluid system have been synthesized<sup>[3]</sup>.

2.1 Basic properties of cross-linked acid system

(1)Thickener (CZY-2). According to the request of high polymer chemistry theory and acidizing technique, the thickener should have good stability, viscosifying action, compatibility and deliquescence. We choose the cationic monomer, anionic monomer, acrylamide and other adjuvant as the raw material after preliminary screening test. Furthermore, the thickener can be obtained by polymerization treatment.

(2)Cross-linking agent (JZY-1). Through the screening experiment, we have determined the organic copper as the main element of the cross-linking agent, which can obtain a good cross-ling effect by composed with other accessory cross-linking agent, such as, imidazole, N-aminoethyl piperazine.

Blending the thickener and the cross-linking agent with 20% HCl according to a certain proportion: 20% HCl+0.8% CZY-2+1.5% JZY-1, the main properties of the hybrid acid system can be seen in Tab. 1.

Tab. 1 Main characteristic parameters of cross-linked acid system

Object	Technical description
Extrinsic feature	Colourless、Transparent、Be hanging、Gelatinous fluid
Cross-linked viscosity/mPa · s	800~1 000
Adaptive temperature/℃	15~125

From the Tab. 1 we can see that the cross-linked acid system has achieved basic requirements of fracturing fluid, the specific performances of which presented as followings.

2.2 Performances test and evaluation on cross-linked acid system

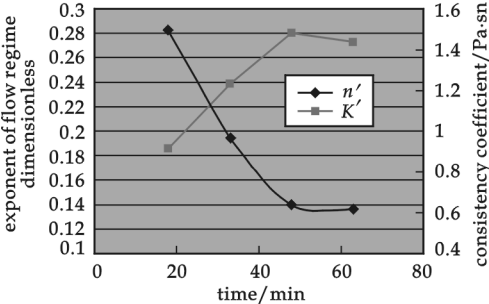


Fig. 2  $n'$  and  $K'$  range of cross-linked acid system

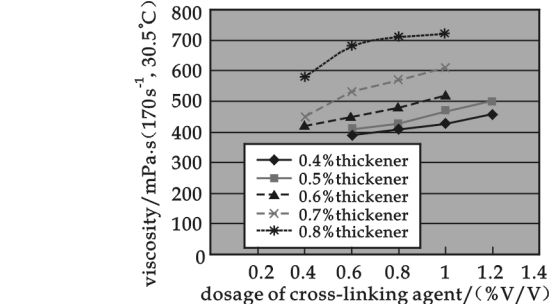


Fig. 3 Influence of cross-linking agent concentration to viscosity in defferent thickener proportion

(1)Rheological properties. Rheological properties of cross-linked acid includes rheological parameter, temperature tolerance and anti-shear property, relevant test procedure refers to the petroleum industry standard<sup>[4]</sup> (SY/T 5107-2005). It can be seen that the exponent of flow regime( $n'$ ) and consistency coefficient( $K'$ ) of cross-linked acid fluid system has been tested by Brookfield DV-Ⅲ rheometre under the constant temperature (100 ℃) circumstance (Fig. 2), which has the conspicuous non-Newtonian characteristics. The apparent viscosity also be tested under the room temperature (30.5 ℃) with the

shearing rate is  $170\text{ s}^{-1}$ , in different proportion of chemical ingredients. Which can be seen (Fig. 3) that the thickener proportion has more prominent viscosifying action than that of cross-linking agent.

For further investigating the temperature tolerance and anti-shear property of this fluid system, we change the proportion of HCl, thickener and cross-linking agent to form three chemical component:(a) 20% HCl+0.6% thickener +0.5% cross-linking agent;(b)20% HCl+0.7% thickener +1.0% cross-linking agent;(c) 20% HCl+0.8% thickener +1.5% cross-linking agent; the component (b) and (c) display good temperature tolerance than component (a), especially the component (c) can retain the viscosity at about  $100\text{ mPa}\cdot\text{s}$  in  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which enables transporting proppant in field use (Fig. 4). Moreover, adding different proportion (1%, 1.5%, and 2%) of corrosion inhibitor HJF-94 into the acid system which shows good viscosity-temperature and viscosity-time behavior in  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  condition with the viscosity retentivity is 81.9%~88.6%.

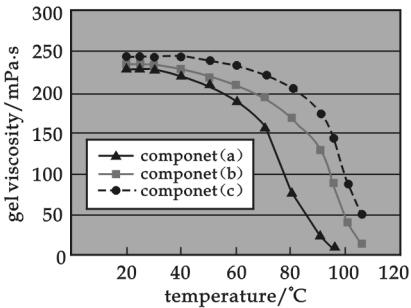


Fig. 4 Viscosity-temperature relation curve of cross-linked acid system

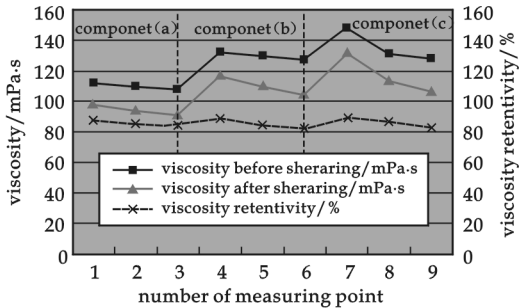


Fig. 5 Anti-shear property of cross-linked acid system with different component proportion

(2)Frictional resistance. The friction resistance related to well depth, injection schedule, delivery rate, even the types of thickener and its performances after cross-linked. We adopt anionic thickener as one of the main components of cross-linked acid system, which has good performance in friction reduction (Tab. 2). The laboratory findings have tested by the multi-purpose flowloop device.

Tab. 2 Contrast on friction of different cross-linked acid component to the clear water

Discharge rate/( $\text{m}^3/\text{min}$ )	Friction of cross-linked acid/( $\text{MPa}/100\text{ m}$ )			Percentage of the friction corresponding to clear water/%
	component (a)	component (b)	component (c)	
2.5	0.469	0.674	0.946	59.8
3.0	0.539	0.742	1.092	73.5

(3)Filtrate loss. The filtrate loss mechanism has direct relationship with acid-rock reaction rate, mass transfer coefficient of  $\text{H}^+$ , acid type, flow rate, and confinement pressure. We use the true core from lower paleozoic carbonate of Changqing oilfield, comparatively studied the filtration characteristics of cross-linked acid system, gelled acid system and the common acid system by the HTHP static filtration detector. The cross-linked acid displayed lower filtrate loss performance (Fig. 6). Moreover, the low acid-rock reaction rate and low mass transfer coefficient reaction kinetics behaviors on the new cross-linked acid will do good for reducing the acid filtration and achieving the goal of deep acid fracturing treatment<sup>[3]</sup>.

(4)Corrosion inhibition property. Conventionally, the acid system should be added with corrosion inhibitor for the sake of decreasing corrosion on the well tubing and pumping pipe. However, the corrosion inhibitor has negative impact on gelatinizing and gel-breaking, which goes against proppant transportation. So, we have tested the corrosion inhibition property of cross-linked acid system with no corrosion inhibitor by HTHP dynamics-static anticorrosion instrument. The results (Fig. 7) show that this

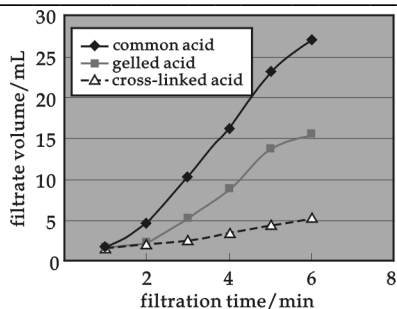


Fig. 6 Filtrate volume of different acid

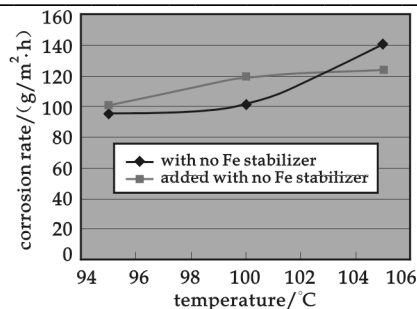


Fig. 7 Corrosion inhibition property testing

acid multisystem has good corrosion inhibition added with Fe stabilizer (citric acid) under 95~105 °C conditions, achieved the field demand.

(5) Proppant carrying. Proppant carrying ability can help to check the viscoelastic behavior and cross-linking strength of cross-linked acid system. The lower sedimentation rate, the stronger proppant carrying ability has. The results (Fig. 8) show that this cross-linked acid system has good suspension force to the ceramsite with the size of 20/40 meshes and 40/60 meshes, especially to the smaller sized ceramsite (40/60 meshes) apparently.

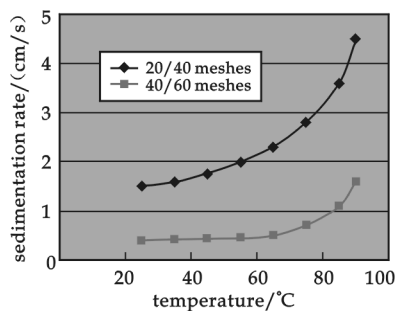


Fig. 8 Proppant carrying ability of cross-linked acid under different temperature

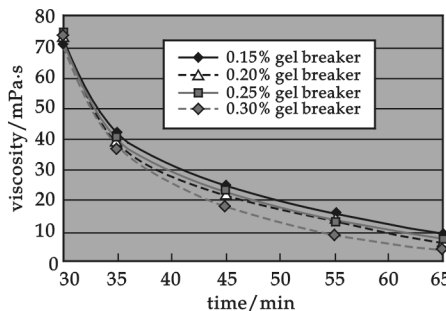


Fig. 9 Gel breaking curve under different gel breaker proportion

(6) Gel breaking. The viscosity of cross-linked acid system after gel broken is crucial to proppant sedimentation and fracture filling, the lower viscosity, the higher flowback efficiency the acid system has; in other word, the acid fracturing is more successful. The results (Fig. 9) show that viscosity of this acid system decreased to 3~7 mPa · s after 65 min with the constant shearing rate is 170 s<sup>-1</sup>; following the increased breaker proportion, the viscosity becomes lower, which reveals good gel breaking property.

### 3 Application of Proppant-carrying Cross-linked Acid Fracturing

On the basis of laboratory investigation of cross-linked acid fluid system, which shows good performances on high temperature bearing, anti-shearing, low frictional resistance, low filtrate loss, corrosion inhibition, rapid gel break, and proppant carrying. Using cross-linked acid fluid system carrying proppant to accomplish acid fracturing, this measurement combines the acid carrying sand filling fracture with acidizing effect after viscosity broken, aims at creating higher flow conductivity acid etching-propped composite fracture and extending the flowing channel.

After the field testing in high-purity dolomite formation of Jingbian gas field in Changqing oilfield, 11 wells field treatment results<sup>[5]</sup> indicates that the success ratio reaches 100%, the maximum proppant volume is 25.1 m<sup>3</sup>, average flowback efficiency is above 82%, average well test AOF is above 12×10<sup>4</sup>

m<sup>3</sup>/d, and the maximum AOF reaches 37.023 6×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d. Compared with stimulation effect of adjacent wells by other techniques, this cross-linked acid carrying proppant fracturing treatment has certain superiority.

4 Conclusions

(1)Conventional acid fracturing techniques cannot always satisfy the oil & gas reservoir stimulation need, because of the smaller-scale fracture volume and lower fracture conductivity than that of the hydraulic fracturing with proppant. The countermeasure to which is combining the acid carrying sand filling fracture with acidizing effect organically.

(2)Through the laboratory performances test, the new cross-linked acid fluid system has good properties of corrosion control, low filtrate loss, fracture initiation, proppant-carrying and easy to flow-back, which enable the filed acid fracturing with proppant needs.

(3)The field practice shows that cross-linked acid fluid system can obtain the stimulation effect as good as the conventional hydraulic fracturing in the sand-carrying-filling fracture process. The advantages of proppant-carrying acid fracturing are intensified width generation capacity and prolonged fracture close. Especially, this technique is more adapted to the high-purity carbonate.

References

[1] Economides M. J. , Nolte K. G. Reservoir Stimulation (Third Edition)[M]. USA: Johm Wiley & Sons Ltd. , 2000:212-214.  
[2] Wang H. T. Application of cross-linking acid fracturing with proppant technique in redevelopment of dolomite reservoirs[D]. Cheng University of Technology,2007.  
[3] Wang H. T. , Yi X. Y. , Li X. F. , *et al.* Study on reaction kinetics behaviors of new cross-linked acid with dolomite[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2009,30(3):346-348.  
[4] SY/T 5107-2005, Recommended practices on measuring the properties of water-based fracturing fluid[S],2005.  
[5] Yi X. Y. , Lu Y. , Song Y. , *et al.* Acid fracturing technology practice of cross-linking acid fluid in dolomite reservoir of Jingbian gas field[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2008,15(6):92-94.

可携砂酸压交联酸酸液体系的室内研究

王海涛<sup>1</sup>, 李相方<sup>1</sup>, 伊向艺<sup>2</sup>, 卢 渊<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:**酸液体系的性能对于油气藏酸化压裂增产至关重要. 在室内实验的基础上, 对新型可携砂交联酸体系进行了研究. 根据携砂酸压工艺在耐温、抗剪切及携砂方面的要求, 分别针对交联酸酸液体系的流变性、减阻性、滤失性、缓蚀性、单砂体颗粒沉降性及酸液体系破胶性等基本性能进行了测试分析. 实验表明, 这种新型酸液体系适应于现场携砂酸压的具体要求. 同时, 该酸液体系确保了酸液携砂裂缝充填工艺与酸化作用的有机结合. 最后, 经交联酸携砂酸压现场实践表明, 该酸液体系具有良好的携砂性能和酸液破胶返排性能, 从而确保了油气藏增产改造效果.

**关键词:**酸化压裂; 携砂; 交联酸; 室内测试; 现场实践

**中图分类号:**TE357.2

**文献标识码:**A



\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0012-04

# NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT OF CONVERGING-DIVERGING PLATE WITH SPACED TWISTED-TAPE

HE Zhao-hong, DENG Xian-he, LI Zi-wei

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Heat transfer and flow characteristics of the converging-diverging plate with spaced twisted-tapes have been obtained by numerical simulation. Swirl flow is produced by spaced twisted-tapes which can reduce thickness of boundary layer, and increase the turbulent intensity for enhancing the heat transfer rate. The local Nusselt number and local friction factor decrease along the main flow direction for the range of  $Re$  from 19 000 to 36 000. And the heat transfer efficiency indexes increase firstly and decrease later along the main flow direction. The numerical results indicate that the cosine of the angle of velocity and gradient of temperature for converging-diverging plate inserted with spaced twisted-tape increases, compared to the smooth plate. Synergy between velocity and temperature fields in the converging-diverging plate with twisted-tapes can improve.

**Key words:** spaced twisted-tape; converging-diverging plate; heat transfer enhancement; synergy

**CLC Number:** TK124                      **Document Code:** A

## 0 Introduction

Energy conservation has become pressing issue, and many methods of enhancing heat transfer had been researched. The spaced twisted-tape insert is one of the most useful enhancing heat transfer techniques, which is as passive heat transfer enhancement device. And the spaced twisted-tape has the advantages of simple configuration, steady performance and is easy in conjunction with other enhancing heat transfer techniques. So it has been great progress recently. Saha *et al.*<sup>[1,2]</sup> had studied the heat transfer and friction characteristics of the laminar and turbulent flow in the spaced twisted-tape inserted smooth tube. And the results indicated that the method of spaced twisted-tape inserts enhanced the heat transfer obviously. Zimparov<sup>[3,4]</sup> investigated the characteristics of heat transfer and friction factor in the single-start spirally corrugated tubes with twisted tape. Hong *et al.*<sup>[5,6]</sup> studied heat transfer performance of the combination of the smooth tube and converging-diverging (CD) tube with spaced twisted-tape respectively. Using the two methods, the heat transfer was enhanced better. And the combination of CD tube and spaced twisted-tape was utilized simultaneously which is known as compound heat transfer enhancement, to produce an enhancement larger than that produced by the smooth tube with spaced

\* 收稿日期:2009-09-28  
作者简介:何兆红(1983-),女,山东省临沂市,在读博士生,研究方向:传热与节能  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(20776046)



twisted-tape. CD tube bundle supported by twisted-leaves in shell-and-tube heat exchangers was proposed by Wang *et al*<sup>[7]</sup>. The results predicted that the twisted-leaf also enhanced heat transfer in the shell side. For 270-20.3 twisted-leaf, the conjunction of CD tubes bundle and twisted leaf contributed to greater values of heat transfer enhancement valuation factors compared to the corresponding values for the CD tubes bundle supported by ring by 18% when the Reynolds number was in the range from 2 000 to 20 000 for air turbulent flow.

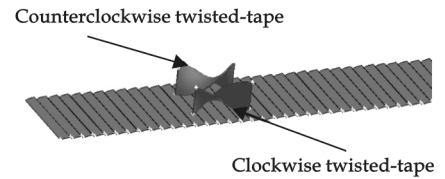
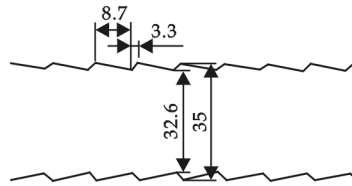
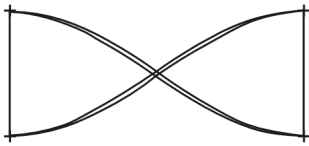
A method of compound heat transfer enhancement using a converging-diverging (CD) plate inserted with spaced twisted-tapes is presented by numerical simulation. And the heat transfer and friction in the channel is studied in this paper. It is believed that the combination of the converging-diverging plate and spaced twisted-tapes is of great significance.

## 1 Model Description

Fig. 1 shows the schematics of the twisted-tape. The characteristic parameters of the twisted-tapes are listed in Tab. 1, such as twist ratio  $y$ , and rotation angle  $\alpha$ . The twist ratio is defined as:

$$Y = \frac{H}{b} \quad (1)$$

Which  $H$  is the pitch for  $180^\circ$  rotation of the twisted-tape, and  $b$  is width of the twisted-tape. And  $y, \alpha$  and  $H$  of twisted-tape used in this paper are 4.2,  $180^\circ$  and 126 mm, respectively.



**Fig. 1 Structural scheme of twisted-tape**

**Fig. 2 Schematics of converging-diverging plate**

**Fig. 3 Schematics of converging-diverging plate with spaced twisted-tapes**

Fig. 2 shows the schematics of the CD plate.

Fig. 3 shows the simulation model. Two parallel CD plates are inserted with two twisted-tapes which are clockwise and counterclockwise. And the distance between the twisted-tapes is 45 mm.

The air in the model is treated as incompressible turbulent fluid with constant physical properties. And the governing equations are as followed:

$$\text{Continuity equation:} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$\text{Momentum equation:} \quad \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$$\text{Energy equation:} \quad \rho C_p \left( u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \right) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

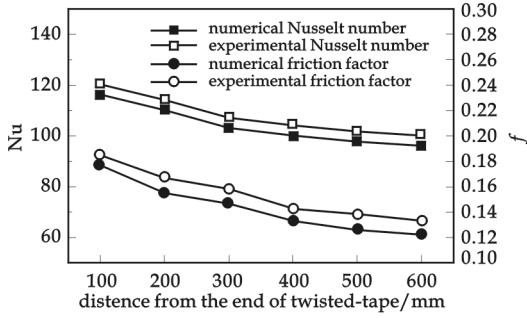
The RNG (Renormalization Group)  $k-\epsilon$  turbulence model is chosen to simulate the turbulent flow and heat transfer. The SIMPLEC algorithm is selected for the velocity-pressure coupling. And the numerical model is solved by a commercial computational fluid dynamics code.

The boundary conditions are as follows. The plate wall and twisted-tape are no-slip condition, and uniform wall temperature is selected for simulation and no heat flux for the twisted-tapes wall is proposed. Because the spaced twisted-tapes are clockwise and counterclockwise, the fluid in the model can flow symmetrically when fluid reach the domain of twisted-tapes. Therefore, symmetry condition is selected for two sides of the model. At the same time, the inlet and outlet are velocity inlet condition and

pressure outlet condition respectively.

## 2 Model Verification

The experiment is applied to verify the accuracy of numerical simulation. The results of simulation are compared with the experimental data on heat transfer and flow resistance, and the comparison is provided in Fig. 4 for  $Re=19\ 071$ . It can be seen that the simulation results of the Nusselt number and friction factor agree well with the experimental results, with the Nusselt number deviation being 6% and the friction factor deviation being 10%. So the agreement between numerical and experimental results is



**Fig. 4 Comparison of Nusselt number and friction factor between the numerical results and experimental data**

acceptable, and proves the model and method of simulation is accurate and the simulation results are reliable.

## 3 Results and Discussion

### 3.1 Heat transfer and friction factor

The characteristics of heat transfer and friction factor of spaced twisted-tapes in the CD plates are shown in Fig. 5 for  $Re=19\ 071, 27\ 285, 35\ 553$ . The domain of twisted-tape is regarded as one position ( $z/b=0$ ) in the Fig. 5. In all cases, the Nusselt number and friction factor decrease as the  $z/b$  increases. In the domain of the

spaced twisted-tape, swirl flow is produced which can reduce thickness of boundary layer, and enhances

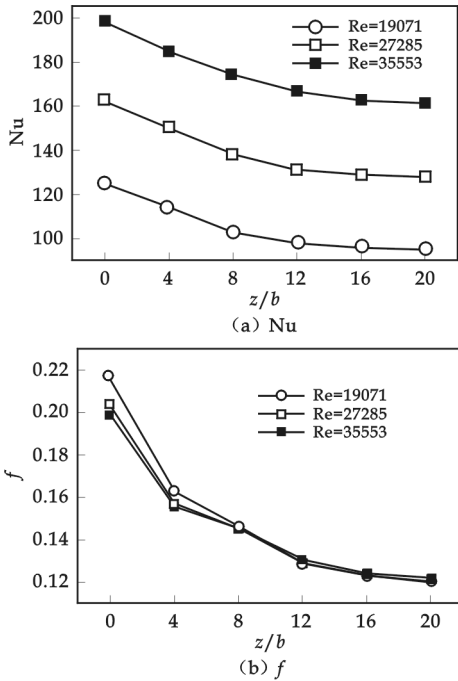
the heat transfer. And the intensity of tangential velocity and vortices are the strongest in the section. Therefore, the Nusselt numbers for  $z/b=0$  are the highest. Meanwhile, the friction factors also get the highest values because more friction less is included by the swirl mixing and the spaced twisted-tape inserts. When the flow leaves the twisted-tape, the free swirl flow decays along the main flow direction. Therefore, the Nusselt number and the friction decrease as the value of  $z/b$  increases.

### 3.2 Performance evaluation

A method of heat transfer efficiency index was proposed by Webb<sup>[8]</sup>, which consists of the heat transfer and flow resistance. The heat transfer efficiency index is defined from

$$\eta = \frac{Nu/Nu_s}{(f/f_s)^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

It means that the technique of CD plates inserted with twisted-tape has better performance than that of using smooth plate alone as  $\eta > 1$  in this paper.  $\eta < 1$  means that the technique of CD plate inserted with twisted-tape has lower



**Fig. 5 Nusset number and friction factor on different  $Re$  vs.  $z/b$**

performance than that of using smooth plate alone. Fig. 6 shows the variation of heat transfer efficiency index with  $z/b$  for the CD plate inserted with twisted-tapes, compared to the smooth plate. It is obvious that as the  $z/b$  increases, the efficiency indexes of twisted-tapes increase firstly and then decrease. The heat transfer is enhanced well but the friction factor can get the highest value in the domain of twisted-

tape. So the efficiency index in the domain of twisted-tape is not the highest value during the studied region. And it also indicates that it has the best performance in the three cases as  $Re=19\ 071$ .

3.3 Field synergy analysis

Guo *et al.*<sup>[9]</sup> proposed new mechanism analysis of heat transfer enhancement—field synergy analysis. And Meng *et al.*<sup>[10]</sup> found the field synergy principle of convection heat transfer was available for turbulent convection heat transfer. It is defined from

$$\frac{Nu}{Re \cdot Pr} = 0.25 \cdot \iiint_{\Omega} \bar{U} \cdot \nabla T dV \tag{6}$$

$$\bar{U} \cdot \nabla T = |\bar{U}| \cdot |\nabla T| \cdot \cos\theta \tag{7}$$

And it indicates that the angle of velocity and gradient of temperature in the channel is important for heat transfer. When the cosine of the angle increases, heat transfer can be improved.

Field synergy analysis of twisted-tapes in the CD plates is present in Fig. 7, when  $Re=19\ 071$ . It is shown that the cosine of the angle of velocity and gradient of temperature in the channel increases, compared to the smooth plate. The swirl flow produced by twisted-tape leads to the variety of distribution of velocity and temperature fields. Therefore heat transfer of spaced twisted-tape inserted with the CD plate is improved. So the fundamental mechanism of heat transfer enhancement with CD plates and twisted-tape is the improvement of synergy between velocity and temperature fields.

4 Conclusions

A method of heat transfer enhancement is present in the present research. Numerical simulation in the range of Reynolds number for heat transfer and friction factor have been carried out in the case of twisted-tape in the CD plate. The heat transfer efficiency indexes are the highest when  $Re=19\ 071$ . And the fundamental mechanism of heat transfer enhancement with CD plates and twisted-tape is the improvement of synergy between velocity and temperature fields.

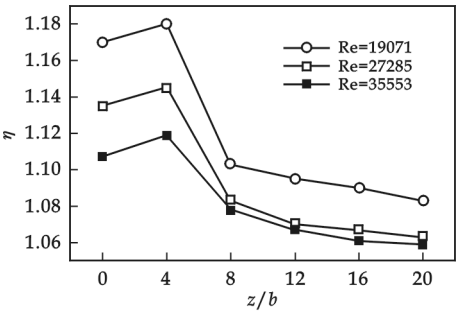


Fig. 6 Heat transfer efficiency index on different  $Re$  vs.  $z/b$

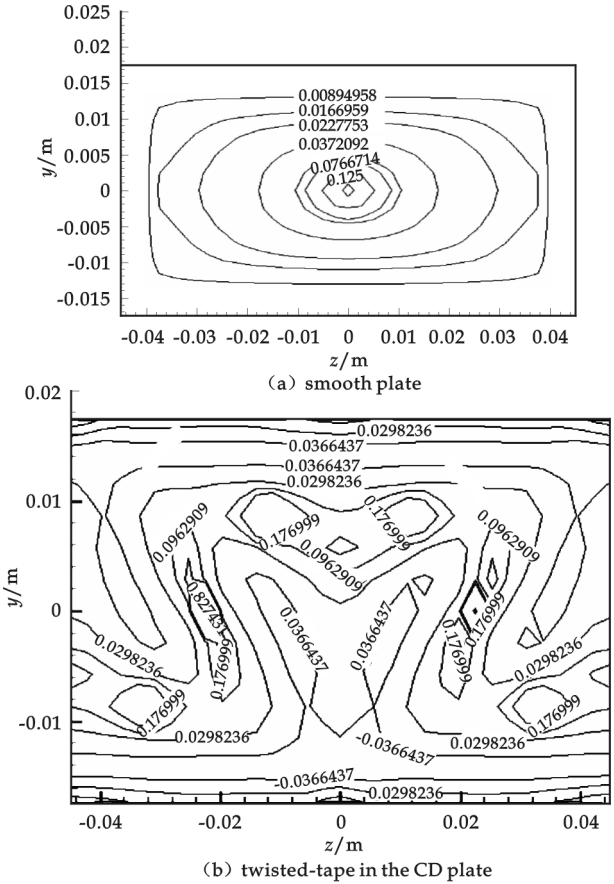


Fig. 7 Cosine of the angle of velocity and gradient of temperature in the cross section

References

[1] Saha S K, Dutta A. Thermohydraulic study of laminar swirl flow through a circular tube fitted with twisted tapes[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 2001, 123(2): 417-427.

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0016-07

# RESEARCH OF HPAM INJECT CHARACTERISTIC FOR LOW PERMEABILITY ROCK CORE

HE Feng-guo, YUE Xiang-an, ZHANG Li-juan, WANG Nan

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Polymer HPAM flooding technology has been widely used in oil fields and achieved tremendous economic benefits. At present low permeability reservoir polymer flooding adaptability in the exploratory stage, how to carry out low-permeability reservoir polymer HPAM injection feasibility study has important application value. The German manufactured RS-600 rheometer DG41 Ti double-slit measurement system being used to research rheology characteristic of HPAM polymer in low permeability reservoir core. According injection pressure changes of different concentration polymer HPAM solution injecting and successive water injecting, the resistance coefficient and residual resistance coefficient were measured to research the feasibility of low-permeability reservoir polymer HPAM injection. The experimental result shows that HPAM solution cation shielding effect should reduce solution apparent viscosity and shear dilute properties. In process of low-permeability cores inject into HPAM solution, injection pressure of cores rise rapidly and attain stability, HPAM long-chain molecules had been cut, viscosity reduced and resistance coefficient decreased gradually with HPAM solution injection rate increase, the pressure is non-linear relationship with flow rate. The residual resistance coefficient of HPAM solution concentration 750 mg/L is higher than HPAM solution concentration 1 000 mg/L in process of low-permeability core inject into HPAM solution.

**Key words:** HPAM; low permeability; rheology; injection pressure; resistance coefficient; residual resistance coefficient

**CLC Number:** TE357.46

**Document Code:** A

## 0 Introduction

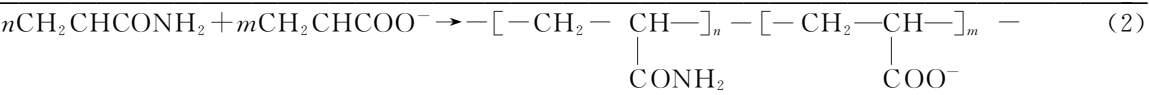
Polyacrylamide and its partially hydrolyzed product HPAM have been played an important role in tertiary oil recovery in oilfield<sup>[1]</sup>. The main material acrylic amide and acroleic acid have reacted to generate copolymerize polyacrylamide through NaOH to adjust pH value in water solvent. The radical copolymerization had happened to gain carboxylic polyacrylamide production at definite original temperature and initiator influence<sup>[2]</sup>. The reaction equation<sup>[3]</sup>:



\* 收稿日期:2009-10-11

作者简介:贺丰果(1980—),男,四川省南充市人,在读博士生,研究方向:油气藏开发

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)“化学驱和微生物驱提高石油采收率的基础研究”(2005CB221300)



With Chinese oil field main area had been polymer water flooding, the industrial block for polymer flooding become less and less. The Chinese researchers have formed sub-layers polymer flooding supporting mature technology through many years sub-layers reservoirs (the low-permeability, medium thickness oil reservoirs) indoor and field test<sup>[4,5]</sup>. But how to use HPAM inject third types of oil (effective thickness less than 1 m, effective permeability is less than  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) need to be further researched. Many literatures demonstrate that high molecular weight polymer should be choose to apply third types of oil reservoir polymer flooding to achieve better displacement characteristics<sup>[6,7]</sup>. Reposing above concept, the molecular weight 10 000 000 of HPAM being selected to experiment low-permeability reservoir indoor polymer flooding research.

Tab. 1 Simulated experiment water salinity

1 Experimental Material and Condition

(1)The experimental material: HPAM (molecular weight 10 000 000, from the Daqing Oil Field in low-permeability reservoir polymer flooding pilot site), on-site formation clear water, the simulated formation water, as Tab. 1.

	simulation of water	simulated formation water			
water samples salinity/(mg/L)	L0701	L0702	L0703	L0704	
$\text{K}^+, \text{Na}^+$	260.3	3 776.08	5 545.05	6 355.61	
$\text{Ca}^{2+}$	43.47	1 079.91	1 698.42	1 970.16	
$\text{Mg}^{2+}$	18.04	58.12	12.02	24.05	
$\text{Cl}^-$	10.94	6.08	7.03	6.08	
$\text{SO}_4^{2-}$	17.73	460.98	806.72	921.96	
$\text{HCO}_3^-$	33.62	0	0	4.8	
$\text{CO}_3^{2-}$	121.55	2 066.38	2 856.47	3 129.96	
	14.94	104.61	164.39	298.6	

(2)Experimental temperature: 45 ℃.

(3)The experimental apparatus and equipments: electronic balance, positive infinitely variable mixer, incubator, tranquil flow pump, manual high-pressure metering pumps, vacuum pumping. RS-600 rheometer (made in Germany Harker Company, multi measurement system, adopting DG41 Ti double-slit measurement system to ensure measurement accuracy at low shear rate).

2 HPAM Solution Apparent Viscosity Measurement

(1)The HPAM solution with 1 000 mg/L, 750 mg/L, 500 mg/L concentration were prepared by simulated formation water samples L0701 (distilled water), L0702, L0703 and L0704 to obtain certain concentration different salinities(salinities 260.3, 3 776.08, 5 545.05, 6 355.61)HPAM solution.

(2)The apparent viscosity of above-mentioned HPAM solution had been measured with RS-600 rheometer.

From Fig. 1 we can see that HPAM solution apparent viscosity curve indicate HPAM solution fluid performance being close to Newtonian fluid<sup>[8]</sup>. The HPAM solution apparent viscosity is reduce with shear rate and formation water salinity increase, it's in direct proportion to solution concentration. With salt content increasing, HPAM solution cationic shielding effect increase, molecular clew dimensions diminish, intermolecular mutual twist opportunity decrease, solution rheological characteristic being reflected non-Newtonian behavior weaken<sup>[9]</sup>. The HPAM solution apparent viscosity is sensitive to formation water salinity, especially the divalent  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , it reduce solution shearing dilute properties. Sample L0702 contain more divalent  $\text{Ca}^{2+}$  to formed considerable impact of viscosity.

Tab. 2 Apparent viscosity of HPAM solution confected by formation water and distilled water

concentration/(mg/L)	distilled water preparation/mPa · s	formation water preparation /mPa · s	viscosity loss/%
500	67	7.8	88
750	109	18	83
1 000	178	32	82

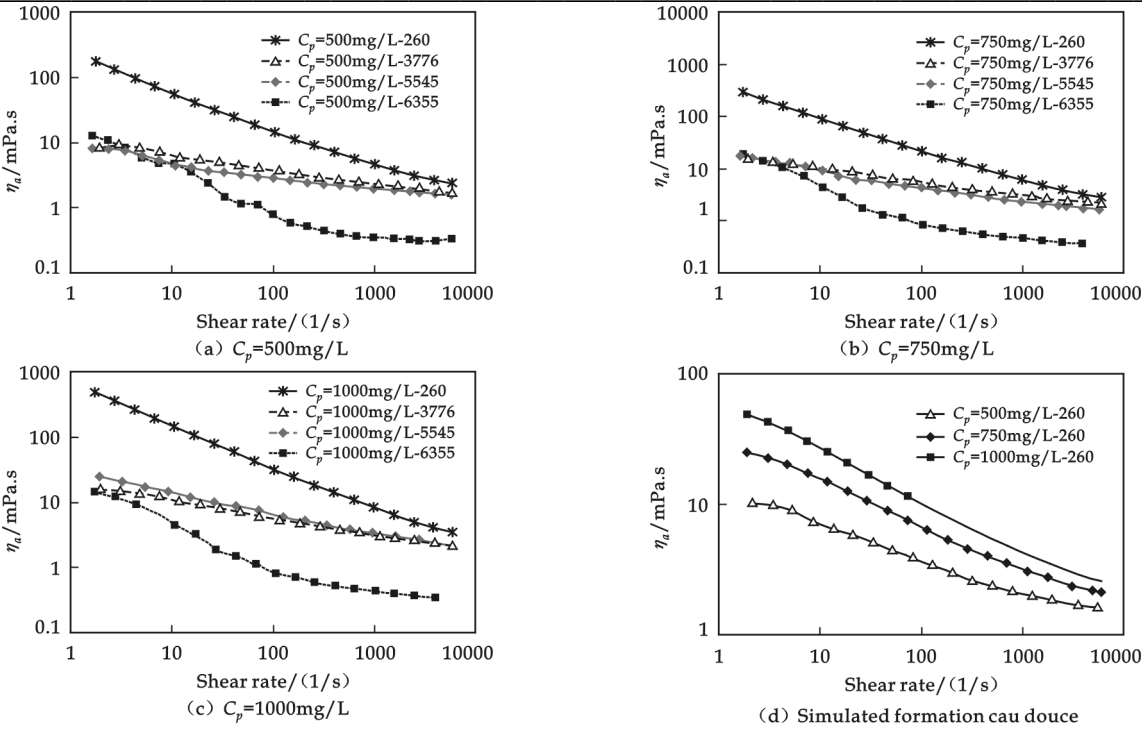


Fig. 1 HPAM solution apparent viscosity at different concentration and salinity

From Tab. 2, it could be seen that HPAM solution prepared by simulated formation water viscosity loss is quite high when measure solution viscosity's benchmark shearing rate is  $7.3\text{ s}^{-1}$ . HPAM solution concentration 500 mg/L, 750 mg/L, 1 000 mg/L viscosity loss all are reach more than 80%. HPAM concentration 500 mg/L solution is low viscosity and low concentrations of HPAM had less been used on-site, the following experiments only use HPAM concentration 750mg/L solution , 1 000 mg/L prepared by simulated formation water to research HPAM influent characteristics.

3 HPAM Inject Characteristics of Low-permeability Rock

3.1 Experimental steps

(1)Preparing equipment and pipelines, vacuumize, adding confining pressure to ensure it always higher than injection pressure 2~3 MPa.

(2)The process contains four steps: ①Saturate rock cores with formation brine and measure aqueous phase permeability. ②Inject simulated formation water slug. ③Inject HPAM solution and determine resistance coefficient. ④Inject formation saline and determine residual resistance factor.

Inject HPAM solution with different flow rate to monitor dynamic changes of pressure. Cores were suppressed according to the physical parameters of scene cores, the basic parameters in Tab. 3.

Tab. 3 Basic parameters of core

cores	HPAM/ (mg/L)	diameter /cm	length /cm	permeability/ $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$	porosity/%
MK1	750	2.52	8.312	9.20	22
MK2	1 000	2.53	8.353	9.76	27.83

3.2 HPAM inject characteristic

(1)Inject characteristic of HPAM concentration 750 mg/L solution

Fig. 2(a) shows that core pressure rise quickly and stable with HPAM concentration 750 mg/L solution inject at different velocity. The core pressure stabilized at 2.5 MPa when flow rate is low at 0.3

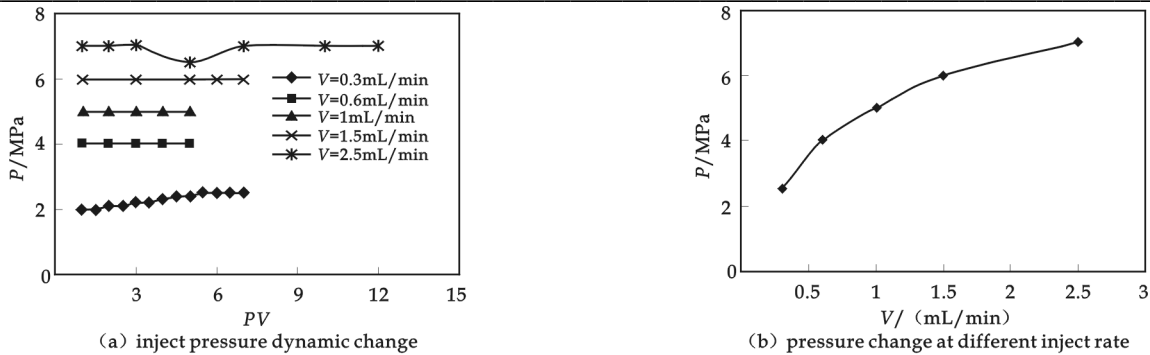


Fig. 2 HPAM concentration 750 mg/L solution inject pressure change

mL/min and core pressure stabilized at 7.1 MPa when flow rate is high at 2.5 mL/min. From Fig. 2(b) we can see that core pressure is non-linear relationship with flow velocity, injection pressure is higher correspond with higher flow velocity. The injection pressure increased speed gradually slow down with flow velocity increase. HPAM concentration 750 mg/L solution has capability to inject into the rock core with low-permeability  $9.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

(2)Inject characteristic of HPAM concentration 1 000 mg/L solution

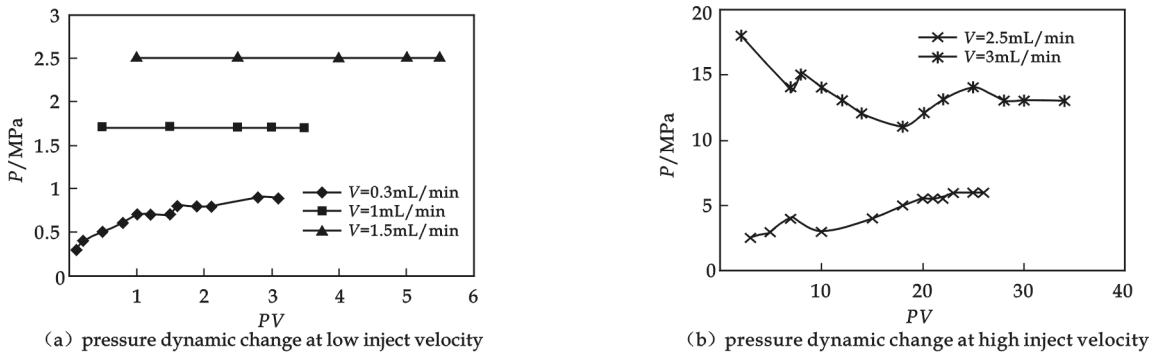


Fig. 3 HPAM concentration 1 000 mg/L solution inject pressure dynamic change

From Fig. 3 we can see that inject pressure dynamic change of HPAM concentration 1 000 mg/L solution. The injection pressure of core-side gradually increased with the injection of HPAM solution. The higher flow rate correspond higher pressure. The core side entrance become blockage when flow rate at 3 mL/min and pressure increase sharply to 17 MPa.

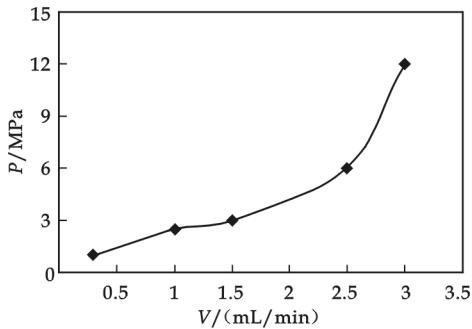


Fig. 4 HPAM concentration 1 000 mg/L solution pressure change at different inject rate

The core side entrance congestion degree gradually alleviate with HPAM solution continuous injection. HPAM molecular chains structure were damaged partly at high flow rate and it can be enter into internal core. Due to HPAM solution molecular chain in a state of extension fluxion at high velocity, therefore there is a high pressure loss and the final injection pressure stabilized at 12.5 MPa.

HPAM concentration 1 000 mg/L solution flow pressure change in low permeability core MK2 was showed in Fig. 4. Injection pressure change was not in conformity with the law of Darcy flow. It flow event present two distinct stages; the first stage, HPAM in low permeability core aperture act extensional flow, viscoelastic effects caused additional resistance increase. HPAM long molecular chain a-

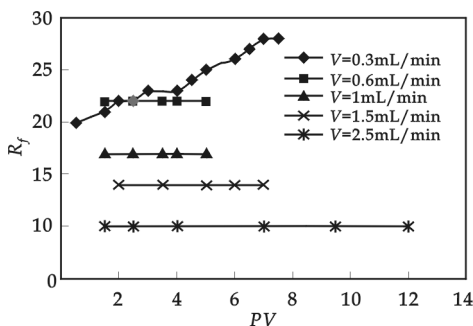
long core aperture orientation slowly and don't accumulate core upstream side at low velocity, so inject pressure ascend slowly in the first stage<sup>[10]</sup>. The second stage, HPAM molecular chain can't along core aperture orientation timeliness and accumulate core upstream side rapidly with number of injection  $PV$  and flow rate increase<sup>[11]</sup>. The HPAM injection incremental pressure rises rapidly. In addition, HPAM viscoelastic effect also leads to higher injection pressure at high velocity extensional flow. However, the injection pressure ascending gradient is not greatly since lower injection rate. So HPAM concentration 1 000 mg/L solution can be injected into rock core with  $9.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  low-permeability at relatively low flow rate.

### 3.3 Resistance coefficient $R_f$

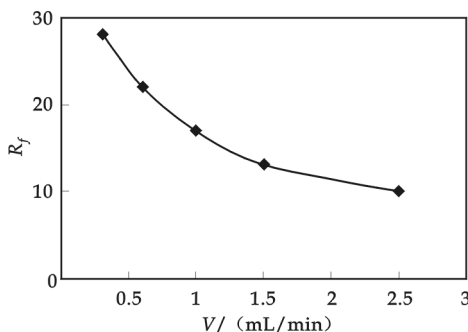
Resistance coefficient symptomatic polymer decrease mobility ratio capability, it is ratio of water mobility divide polymer mobility:

$$R_f = \lambda_w / \lambda_p = (K_w / \mu_w) / (K_p / \mu_p)$$

(1) HPAM concentration 750 mg/L solution resistance coefficient change



(a) resistance coefficient dynamic change

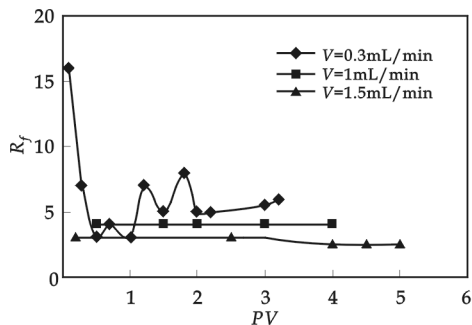


(b) resistance coefficient change at different inject rate

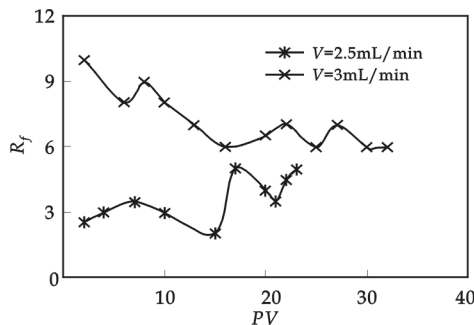
**Fig. 5 HPAM concentration 750 mg/L solution inject resistance coefficient change**

Fig. 5(a) shows that HPAM concentration 750 mg/L solution resistance coefficient  $R_f$  is high at low inject velocity. The resistance coefficient  $R_f$  increased with number of inject  $PV$  increase at flow velocity 0.3 mL/min. When the flow rate increase, resistance coefficient  $R_f$  depress evidently. It is likely to HPAM long molecule chain were cut at high flow velocity, result in viscosity and resistance coefficient  $R_f$  reduce. From Fig. 5(b) we can see that resistance coefficient  $R_f$  decreased from 28 to 10 with HPAM solution inject velocity increase.

(2) HPAM concentration 1 000 mg/L solution resistance coefficient change



(a) resistance coefficient dynamic change at low inject velocity



(b) resistance coefficient dynamic change at high inject velocity

**Fig. 6 HPAM concentration 1 000 mg/L solution inject resistance coefficient dynamic change**

From Fig. 6 we can see that high concentration HPAM solution isn't correspond higher resistance coefficient  $R_f$ . When flow velocity  $v < 1.5$  mL/min, resistance coefficient reduce with inject  $PV$  number



increase and stabilize at 3~6. When flow velocity  $v > 2.5$  mL/min, resistance coefficient increase and greater than 6.

Fig. 7 shows that HPAM concentration 1 000 mg/L solution resistance coefficient  $R_f$  being first decrease and then increases with injection velocity increase in the injection process of low-permeability cores. The resistance coefficient  $R_f$  minimum value is 3.4. So we can get conclusion that the HPAM molecular weight of 10 million, solution concentration of 1 000 mg/L resistance coefficient is less than concentration of 750 mg/L resistance coefficient in the low-permeability core injection experiment.

3.4 Residual resistance coefficient

Residual resistance coefficient  $R_K$  token polymer reduce the permeability capability, which is aqueous phase permeability ratio before and after polymer flooding, that is decreased permeability coeffiient.

Tab. 4 Residual resistance coefficient of experimental core

HPAM/(mg/L)	permeability( $K_{wb}$ )/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	permeability( $K_{wu}$ )/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	residual resistance coefficient( $R_K$ )
750	9.20	3.775 8	2.717 2
1 000	9.76	4.684 515	2.083 46

$$R_K = K_{wb} / K_{wu}$$

Calculate the residual resistance coefficient after the polymer flooding, get Tab. 4. From Tab. 4 we know that low-permeability reservoir cores, the HPAM solution concentration 750 mg/L residual resistance coefficient  $R_K$  is higher than concentration 1 000 mg/L residual resistance coefficient  $R_K$ .

4 Conclusions

- (1)Studied salinity impacts apparent viscosity of HPAM polymer solution. HPAM solution cation shielding effect increase gradually and HPAM molecules reciprocally enwind opportunity reduce with salinity increase. Formation water salinity will be significantly reduce HPAM solution apparent viscosity and solution shear dilute properties, divalent cations has the greatest impact to HPAM solution apparent viscosity and hear dilute properties.
- (2)In process of low-permeability cores inject into HPAM solution, injection pressure of cores rise rapidly and attain stability with HPAM solution injection rate increase, the pressure is non-linear relationship with flow rate.
- (3)HPAM solution concentration 750 mg/L long-chain molecules had been cut, viscosity reduced and resistance coefficient decreased gradually with injection rate increase. HPAM concentration 1 000 mg/L solution resistance coefficient  $R_f$  being first decrease and then increases with injection velocity increase. The resistance coefficient  $R_f$  minimum value of HPAM solution concentration 1 000 mg/L is less than HPAM solution concentration 750 mg/L.
- (4)The residual resistance coefficient of HPAM solution concentration 750 mg/L is higher than HPAM solution concentration 1 000 mg/L in process of low-permeability core inject into HPAM solution.

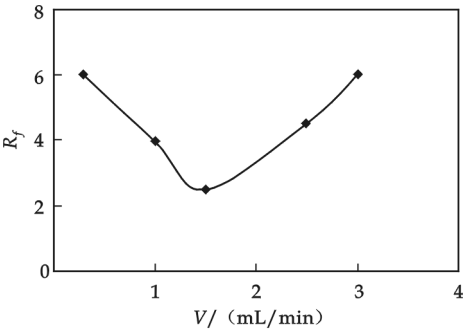


Fig. 7 HPAM concentration 1 000 mg/L solution resistance coefficient change at different inject rate

## References

- [1] ZHAO Xiao-fei, LIU Li-xin, WANG Yu-chan, *et al.* Influences of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) residue on the flocculation behavior of oily wastewater produced from polymer flooding[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 62(1): 199-204.
- [2] Magny Bjørsvik, Harald Høiland, Arne Skauge. Formation of colloidal dispersion gels from aqueous polyacrylamide solutions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 317(1-3):504-511.
- [3] ZHANG Li-juan, YUE Xiang-an. Mechanism for viscoelastic polymer solution percolating through porous media[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(2):241-248.
- [4] DENG Shu-bo, BAI Ren-bi, J. Paul Chen, *et al.* Produced water from polymer flooding process in crude oil extraction: characterization and treatment by a novel crossflow oil-water separator[J]. Separation and Purification Technology, 2002, 29(3):207-216.
- [5] A. Ouibrahim, D. H. Fruman. Characteristics of HPAM dilute polymer solutions in three elongational flow situations[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1982, 7(4): 315-331.
- [6] HOU Ji-rui, LIU Zhong-chun, ZHANG Shu-fen, *et al.* The role of viscoelasticity of alkali/surfactant/polymer solutions in enhanced oil recovery[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47(3-4): 219-235.
- [7] A. Ouibrahim. Anomalous “defect” pressure in laminar orifice flows of HPAM polymer solutions[J]. Mechanics Research Communications, 1979, 6(6): 349-352.
- [8] G. Chauveteau, M. Tirrell, A. Omari. Concentration dependence of the effective viscosity of polymer solutions in small pores with repulsive or attractive walls[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1984, 100(1): 41-54.
- [9] Matthew W. Liberatore, Anthony J. McHugh. Dynamics of shear-induced structure formation in high molecular weight aqueous solutions[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2005, 132(1-3): 45-52.
- [10] Ph. Gramain, Ph. Myard. Adsorption studies of polyacrylamides in porous media[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1981, 84(1):114-126.
- [11] A. Audibert, J. Lecourtier. Stability of water-soluble polymers in the presence of corrodible materials [J]. Polymer Degradation and Stability, 1993, 40(2):151-165.

# 聚合物 HPAM 对低渗岩心的注入特性研究

贺丰果, 岳湘安, 张立娟, 王楠

(中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 聚合物 HPAM 驱技术已广泛地应用于油田并取得了巨大的经济效益. 目前低渗油藏对聚合物驱的适应性正处于探索阶段, 开展低渗油藏注聚可行性的研究具有重要的应用价值. 采用德国 RS-600 流变仪双狭缝 DG41 Ti 测量系统, 针对低渗油藏聚合物驱的 HPAM 流变性进行了研究, 根据注入不同浓度的聚合物和后续注水压差的变化, 测定了阻力系数和残余阻力系数, 研究了低渗油藏注聚的可行性. 实验结果表明: HPAM 溶液阳离子屏蔽效应会降低溶液视粘度, 减小溶液剪切稀释特性. 随着 HPAM 溶液注入速度升高, 岩心的注入压力很快上升并达到稳定, 压力随流速呈非线性关系; HPAM 长链分子被剪断, 粘度降低, 阻力系数逐渐下降. 对低渗透率岩心, HPAM 浓度 750 mg/L 的残余阻力系数高于浓度 1 000 mg/L.

**关键词:** TE357.46; 低渗透; 流变性; 注入压力; 阻力系数; 残余阻力系数

**中图分类号:** TE357.46

**文献标识码:** A

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0023-06

# CORRELATIONS BETWEEN THERMAL, CRYSTAL AND TEXTURAL PROPERTIES OF RICE GELS MADE BY SOUTHERN EARLY LONG-GRAIN PADDY

LIANG Lan-lan<sup>1</sup>, WU Jun-hui<sup>2</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, WANG Ya-jun<sup>2</sup>, CHEN Jia-dong<sup>2</sup>,  
NING Zheng-xiang<sup>1</sup>

(1. College of Light Industry & Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Institute of Cereal Science, Guangzhou 510050, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to find out correlations between thermal, crystal and textural properties of rice gels made by 27 varieties of southern early long-grain paddy. Those rice gels were mainly moderate hardness (4 000~5 000 g), low adhesiveness ( $<300 \text{ g} \cdot \text{s}$ ) and moderate firmness (1 000~2 000 g) ones. Amylose significantly ( $P<0.01$ ) improved firmness of rice gels, but had no effect on hardness ( $P>0.05$ ). Thermal properties of rice starch affected textural properties of rice gels. Relationships between DSC area ( $P<0.05$ ), delta  $H$  ( $P<0.01$ ) and firmness, relationships between onset-temperature ( $P<0.05$ ), area ( $P<0.01$ ), delta  $H$  ( $P<0.01$ ) and work of shear of rice gels were found. A significantly ( $P<0.05$ ) relationship was found between submicrocrystal degree of rice starch and adhesiveness of rice gels.

**Key words:** rice gels; textural properties; amylose; thermal properties; crystal properties; correlation analysis

**CLC Number:** TS210.1

**Document Code:** A

## 0 Introduction

Studies on rice noodles showed that high amylose content was good for a better textural qualities<sup>[1-3]</sup>, because amylose was important for gel net structure<sup>[4]</sup>. Studies also showed that textural properties of rice noodles were affected by swelling power, RVA viscosity of rice starch. Relationships between rice gel consistency, gelatinization degree and broken percent of rice noodles were also found<sup>[5,6]</sup>. Ding<sup>[7]</sup> reported a cutting test of rice noodles made by 10 varieties of paddy under same processing condition. The cutting test was carried out by TA2i texture analyser. Correlation analysis showed that amylose content affected mostly on textural properties of rice noodles, while gel consistency and swelling power affected less. Studies on textural properties of rice noodles made by same kind of paddy with different storage showed that textural properties difference of rice noodles were not the result of amylose content changes ( $P>0.05$ ), but the results of thermal properties and crystal properties changes of rice starch ( $P<0.01$ )<sup>[8]</sup>. The purpose of this study was to determine effects of thermal properties and crystal properties of rice starch on textural properties of rice gels, made by different varieties of paddy with same storage.

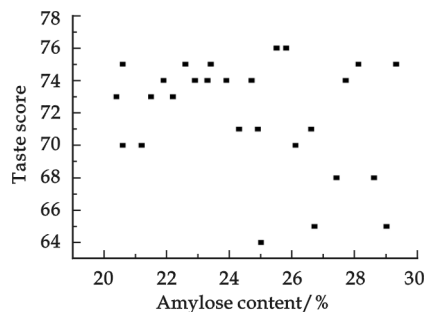
\* 收稿日期:2009-10-03

作者简介:梁兰兰(1973—),女,广东省广州市人,高级工程师,在读博士生,研究方向:粮油食品加工  
基金项目:粤港关键领域重点突破项目(2008A024200005)、广东省科技计划项目(2006B20901004)

## 1 Materials and Methods

### 1.1 Paddy

One hundred and forty-five varieties of early long-grain paddy were obtained from 18 cities in Guangdong province, China. After stored under same condition for 12 months, paddy was tested for amylose content, gelconsistency, chalky kernels percentage, total chalky size percentage of sample, ratio of length to width by GB/T 17891-1999 method. Twenty-seven-variety samples of amylose content between 20%~30% with clear files were selected for further tests (Fig. 1).



**Fig. 1 Amylose content and taste scores of 27 varieties**

### 1.2 Rice flour

Paddy was milled (SATAKE-THU35C) and grounded (FSJ-1 Sample Mill) through a 0.20 mm sieve, then grounded (FOSE TECATOR) through a 0.17 sieve immediately prior to analysis.

### 1.3 Preparation of rice gel

Rice flour (8.0 g, 12% moisture) was weighted in an aluminum pan ( $\Phi=50$  mm) and distilled water (12 mL) was added to gave a water-to-flour ratio of 1.5 : 1 (w/w). Stir and streamed for 5 min.

### 1.4 Textural analysis

Texture qualities of rice gels were determined in compression test and cutting test, using TA-XT2i Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Surrey, UK). Rice gels were placed for 10 min before testing.

#### 1.4.1 Compression test

P/36 probe was used. Pre-test speed, testing speed were both 1 mm/s. Post testing speed was 10 mm/s. Start distance before testing was 5 cm. Strain was set at 50%. According to Charles's method<sup>[9,10]</sup>, hardness (g) was maximum force, adhesiveness ( $\text{g} \cdot \text{s}$ ) was negative area and chewiness was positive area ( $\text{g} \cdot \text{mm}$ ). Each sample was tested for 8 times. And reported value was the mean of 6 testing results and its standard deviation, without the maximum and minimum values.

#### 1.4.2 Cutting test

HDP/LKB was used. Pre-test speed was 2.0 mm/s, testing speed was 0.8 mm/s, post testing speed was 10.0 mm/s. Cutting strain was set as 100%. According to Lai's method<sup>[11]</sup>, firmness (g) was the maximum force, work of shear ( $\text{g} \cdot \text{cm}$ ) was the positive area. Each sample was tested for 8 times. And reported value was the mean of 6 testing results and its standard deviation, without the maximum and minimum value.

### 1.5 Thermal properties

DSC (Perkin Elmer Diamond, USA) was used to determine thermal properties of rice starch. 30% rice solution was sealed in a tube, placed for 24 h. Sample was determined in a high pressure pan. The scanning temperature was from 30 °C to 100 °C. Temperature increased at 10 °C/min<sup>[12]</sup>.

### 1.6 Crystal properties

#### 1.6.1 Preparation of rice starch

Long-grain rice was washed and soaped in water under room temperature for 24 h. Grounded and placed for 24 h, then filtered. The upper liquid was discarded. The remains were hot-air dried at 40 °C to moisture under 13%. Crude rice starch was obtained after grounding through a 0.20 mm sieve firstly and through a 0.17 sieve at last<sup>[13]</sup>.

1.6.2 Crystal degree of rice starch

Wide-angle X ray diffractometer (D/Max-Ⅲ A, Rigaku, Japan) was used. Five grams rice starch was determined for its microcrystal degree, submicrocrystal degree and crystal degree. Voltage was 30 kV, electric current was 30 mA, scanning speed was 8°/min, paper speed was 4 cm/min and time constant was 1 s. Starting angle was 4°, end angle was 60°. XRD curve was obtained by Microcal Origin 6.0. Microcrystal zone, submicrocrystal zone was determined according to Zhang's method<sup>[14]</sup>.

1.7 Statistical analysis

Statistical analyses were performed by SPSS17.0 for correlation coefficient and *P* value (both sides).

2 Results and Discussion

2.1 General report of rice gels textural properties

Textural properties of 27 samples were determined for hardness, adhesiveness, chewiness, firmness and work of shear. Determination results were showed in Tab. 1.

Tab. 1 Textural properties range of rice gels

Hardness /(×10 <sup>3</sup> g)		Adhesiveness /g·s		Chewiness /(×10 <sup>3</sup> g·mm)		Firmness /(×10 <sup>3</sup> g)		Work of shear /(×10 <sup>3</sup> g·cm)	
Range	Percentage /%	Range	Percentage /%	Range	Percentage /%	Range	Percentage /%	Range	Percentage /%
1.0~1.9	3.7	100	25.9	1.0~1.9	7.4	1~9.9	7.4	0.40~0.49	3.7
2.0~2.9	7.4	101~199	25.9	2.0~2.9	33.3	1.0~1.9	66.7	0.50~0.59	14.8
3.0~3.9	3.7	200~299	25.9	3.0~3.9	11.1	2.0~2.9	25.9	0.60~0.69	18.5
4.0~4.9	44.5	300~399	11.1	4.0~4.9	33.3			0.70~0.79	14.8
5.0~5.9	14.8	400~499	3.7	5.0~5.9	14.8			0.80~0.89	22.2
6.0~6.9	18.5	500~599	7.4					0.90~0.99	18.5
7.0~7.9	7.4							1.0~1.9	3.7

Results in Tab. 1 showed that hardness of 27 varieties rice gels mainly ranged from 4 000 g to 5 000 g, sample percentage was 44.5%. Sample percentage from 5 000 g to 7 000 g was 33.3%, while few samples with hardness below 4 000 g and over 7 000 g were determined. Adhesiveness of 27 varieties rice gels mainly ranged below 300 g·s, sample percentage was 77.7%. Chewiness mainly ranged between two zones: one was 2 000 to 2 900 g·mm, another was 4 000 to 4 900 g·mm, with same percentage as 33.3%. Few samples with low chewiness (<2.0 g·mm) and high chewiness (>5.0 g·mm) were found. Firmness mainly ranged between 1 000 g to 2 000 g with percentage as 66.7%. Less sample percentage (25.9%) of high firmness (2 000~3 000 g) was found. And work of shear mainly ranged from 500 to 1 000 g·cm, sample percentage was 92.6%. Few samples with low work of shear (<500 g·cm) was found, as well as ones with high work of shear (>1 000 g). In a word, rice gels made by southern early-grain paddy appeared medium hardness (4 000~5 000 g), low adhesiveness (<300 g·s) and medium work of shear (1 000~2 000 g), when its amylose content ranged from 20% to 30%.

Tab. 2 Correlation coefficient between textural properties and chemical properties of rice gels

	Hardness	Adhesiveness	Chewiness	Firmness	Work of shear
Amylose content	0.257	-0.091	0.046	0.536**	0.202
Chalky kernels percentage	-0.027	-0.179	-0.087	0.339	0.315
Total chalky size percentage of sample	-0.101	-0.192	-0.163	0.256	0.300
Gelconsistency	-0.323	0.220	-0.116	-0.584**	-0.334
Ratio of length to width	-0.110	0.164	-0.017	-0.060	-0.283

\* :*P*<0.05; \*\* :*P*<0.01.

2.2 Correlations between textural properties and chemical properties of rice gels

Analysis was carried out for correlations between textural properties and chemical properties of rice gels. Results were showed in Tab. 2.

A significant relationship was found between firmness and amylose content, while no significant relationship was found between that and hardness, adhesiveness, chewiness and work of shear. Although amylose was important for rice gel net structure<sup>[4]</sup>, rice gels made by varieties with higher amylose content seemed only got more firmness ( $R=0.536, P<0.01$ ). However, varieties with higher amylose content were preferred in rice noodles making, as higher firmness of rice gel would lower the percentage of broken rice noodle under same processing condition. Another significant relationship was found between firmness and gelconsistency ( $R=0.584, P<0.01$ ). As gelconsistency was affected by amylose content, it might be the result of amylose changes.

2.3 Correlations between textural properties and thermal properties of rice gels

Thermal properties of rice gels made by 27 varieties were determined. The correlation between textural properties and thermal properties of rice gels was showed in Tab. 3.

**Tab. 3 Correlation coefficient between textural properties and thermal properties of rice gels**

	Hardness	Adhesiveness	Chewiness	Firmness	Work of shear
Onset temperature	-0.186	-0.065	-0.210	-0.283	0.388*
Peak temperature	-0.090	0.119	-0.142	0.061	0.079
End temperature	-0.079	0.071	-0.129	-0.061	-0.001
Peak area	0.221	0.159	0.176	0.387*	-0.495**
Delta H	-0.375	-0.249	-0.392*	-0.638**	0.740**

\* :  $P<0.05$ ; \* \* :  $P<0.01$ .

Results showed that firmness was affected by DSC peak area ( $R=0.387, P<0.05$ ) and delta H ( $R=-0.638, P<0.01$ ). Work of shear was affected by gelatinization onset temperature ( $R=0.388, P<0.05$ ), DSC

peak area ( $R=-0.495, P<0.01$ ) and delta H ( $R=0.740, P<0.01$ ). Studies on textural properties of rice noodles made by same varieties under different storage conditions showed that work of shear was affected by DSC gelatinization onset temperature, peak temperature, peak area, delta H ( $P<0.05$ ) and peak height ( $P<0.01$ )<sup>[8]</sup>. It could be inferred that thermal properties were important for textural properties of rice gels, made by paddy with whatever varieties and storage conditions. And it would be possible to forecast textural properties of rice noodles by thermal properties determination of rice flour.

2.4 Correlations between textural properties and crystal properties of rice gels

Crystal properties of rice starch made from 27 varieties were determined for its microcrystal degree, submicrocrystal degree and crystal degree. Correlation coefficients between textural properties of rice gels and crystal properties were showed in Tab. 4.

**Tab. 4 Correlation coefficient between textural properties and crystal properties of rice gels**

	Hardness	Adhesiveness	Chewiness	Firmness	Work of shear
Microcrystal degree	-0.209	0.364	-0.055	-0.053	-0.271
Submicrocrystal degree	0.078	-0.386*	-0.021	0.258	-0.070
Crystal degree	0.004	-0.259	-0.041	0.240	-0.166

\* :  $P<0.05$ ; \* \* :  $P<0.01$ .

Only one significant relationship was found between adhesiveness and submicrocrystal degree ( $R=-0.386, P<0.05$ ), while no significant relationship was found between other properties. Studies on textural properties of rice noodles made by same varieties under different storage conditions showed that

maximum stretch force was affected by submicrocrystal degree and crystal degree ( $P < 0.01$ ). It also showed that firmness and work of shear were affected by those two factors ( $P < 0.05$ )<sup>[8]</sup>. It could be inferred that for rice gels made by different varieties and under same storage conditions, submicrocrystal degree difference caused by varieties was the important factor, while recrystallization happened in paddy storage was not important any more. However, submicrocrystal degree was still important for adhesiveness of rice gels. Higher submicrocrystal degree of rice starch lead to lower adhesiveness of rice gels.

### 3 Conclusions

Studies on textural properties of rice gels made by different southern long-grain paddy showed that most of rice gels were medium hardness (4 000~5 000 g), low adhesiveness ( $< 300 \text{ g} \cdot \text{s}$ ) and medium firmness (1 000~2 000 g) ones. A significant relationship was found between firmness and amylose content, while no significant relationship was found between that and hardness, adhesiveness, chewiness and work of shear. Firmness was affected by DSC peak area ( $R = 0.387$ ,  $P < 0.05$ ) and  $\Delta H$  ( $R = -0.638$ ,  $P < 0.01$ ). Work of shear was affected by gelatinization onset temperature ( $R = 0.388$ ,  $P < 0.05$ ), DSC peak area ( $R = -0.495$ ,  $P < 0.01$ ) and  $\Delta H$  ( $R = 0.740$ ,  $P < 0.01$ ). Only one significantly relationship was found between adhesiveness and submicrocrystal degree ( $R = -0.386$ ,  $P < 0.05$ ), while no significant relationship was found between other properties.

### References

- [1] Juliano, B. O., Sakurai, J. Miscellaneous Rice Products[R]. In B. O. Juliano, Rice: Chemistry and Technology(2<sup>nd</sup> ed). St. Paul, Minnesota: AACC, 1985: 592-599.
- [2] Tungtrakul, P. Quality and Physicochemical Properties of Rice Related to Rice Noodles[R]. Report of the National Food Research Institute. Bangkok, Thailand, 1998.
- [3] W. H. Wu, Y. Zhang, H. Q. Xiao, *et al.* Correlations between properties of rice noodles and characteristics of rice[J]. Cereal and Feed Industry, 2005, (9) 21-24.
- [4] Mestres, C., Collonna, P., Buleon, A. Characteristics of starch networks within rice flour noodles and mungbean starch vermicelli[J]. Journal of Food Science, 1988, (53): 1 809-1 812.
- [5] Bhattacharya, M., Ze, S. Y., Corke, H. Physicochemical properties related to quality of rice noodles[J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(6): 861-867.
- [6] Yoenyongbuddhagal, S., Noohorm, A. Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality[J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(4): 481-485.
- [7] Ding, W. P., Wang, Y. H., Ding, X. L. Study on the mechanism of gelatinization and retrogradation of rice starch[J]. Cereal & Feed Industry, 2003, (3): 11-14.
- [8] Liang, L. L., Zhao, Z. M., Wu, J. H. Effect of paddy ageing on characteristics of rice noodles[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, (6): 46-50.
- [9] A. L. Charles. Study of wheat flour-cassava starch composite mix and the function of cassava mucilage in Chinese noodles[J]. Food Hydrocolloids, 2007, (21): 368-378.
- [10] G. E. Inglett. Rheological, textural, and sensory properties of Asian noodles containing an oat cereal hydrocolloid[J]. Food Chemistry, 2005, (90): 1-8.
- [11] H.-M. Lai, S.-C. Hwang. Water status of cooked white salted noodles evaluated by MRI[J]. Food Research International, 2004, (37): 957-96.
- [12] Dong, Y. C., Li, Y., Li, J. G. Comparative study of properties between normal millet and waxy millet[J]. Food Science and Technology, 2009, (3): 24-26.
- [13] Xiong, S. B., Zhao, S. M., Yao, N. A study on the gelatinization properties of rice starch[J]. Cereal & Feed Industry, 2001, (5): 14-16.
- [14] Zhang, B. S., Zhang, Y. Q., Yang, L. S., *et al.* Submicrocrystalline structure of starches[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2001, 29(6): 27-30.

# 华南籼稻早造稻米品质特性与米粉凝胶质构的相关性研究

梁兰兰<sup>1,2</sup>, 吴军辉<sup>2</sup>, 陈 威<sup>2</sup>, 王亚军<sup>2</sup>, 陈嘉东<sup>2</sup>, 宁正祥<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省粮食科学研究所, 广东 广州 510050)

**摘要:**研究了用 27 个华南籼稻早造稻米为原料制作的米粉凝胶质构特性与大米淀粉热特性、晶体特性之间的相关性。结果表明:上述米粉凝胶主要呈现中等硬度(4 000~5 000 g)、低粘性( $<300 \text{ g} \cdot \text{s}$ )、中等剪切力(1 000~2 000 g)的特点;凝胶最大剪切力和米粉直链淀粉含量极显著正相关,而和硬度不显著相关;米粉凝胶抗剪切特性受到大米淀粉热特性的显著影响,其中米粉凝胶最大剪切力与 DSC 峰面积显著相关,与热焓值极显著负相关;剪切功与米粉糊化起始温度显著相关,与峰面积极显著负相关,与热焓值极显著正相关;米粉凝胶粘性与大米淀粉亚微晶相相对结晶度显著相关。

**关键词:**米粉凝胶; 质构特性; 直链淀粉; 热特性; 晶体特性; 相关分析

**中图分类号:**TS210.1

**文献标识码:**A

(上接第 15 页)

- [2] Saha S. K., Gaitonde U. N., Date A. W. Heat transfer and pressure drop characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements[J]. *Exp. Ther. Fluid Sci.*, 1990, 3(6): 632-640.
- [3] Zimparov V. Enhancement of heat transfer by a combination of a single-start spirally corrugated tubes with a twisted tape [J]. *Exp. Ther. Fluid Sci.*, 2002, (25): 535-546.
- [4] Zimparov V. Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts(I). Friction factors[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, (47): 589-599.
- [5] Hong Meng-na, Deng Xian-he, Huang Kuo, *et al.* Compound heat transfer enhancement by inserting spaced twisted tapes in converging-diverging tube[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 36(3): 16-19.
- [6] Hong Meng-na, Deng Xian-he, Huang Kuo, *et al.* Compound heat transfer enhancement of a converging-diverging tube with evenly spaced twisted-tapes[J]. *Chin. J. Ch. E.*, 2007, 15(6): 814-820.
- [7] Wang Yang-jun, Deng Xian-he, Li Zhi-wu. Compound heat transfer enhancement of converged-diverged tube supported by twisted-leaves[J]. *J. Ch. Ind. E.*, 2007, 58(9): 2 190-2 193.
- [8] Webb R. L., Eckert E. R. G. Application of rough surfaces to heat exchanger design[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1972, (15): 1 647-1 658.
- [9] Guo Zeng-yuan, Huang Su-yi. Field Synergy Principle and New Technology of Heat Transfer Enhancement[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [10] Meng Ji-an, Chen Ze-jing, Li Zhi-xin, *et al.* Field coordination analysis and convection heat transfer enhancement in duct [J]. *Journal of Engineering Thermaphysics*, 2003, 24(24): 652-654.

## 旋流片内插缩放板的强化传热数值模拟

何兆红, 邓先和, 李自卫

(华南理工大学传热强化与工程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**对旋流片插入平行缩放板的传热与流阻性能进行了数值模拟研究。结果表明:旋流片产生的螺旋流能够减薄边界层, 增加流体的湍流度, 从而进行强化传热。在  $19\,000 < Re < 36\,000$  时, 局部努赛尔数和阻力系数都沿着流体流动方向减小, 而局部综合传热因子的变化趋势是先增大而后降低。数值模拟结果还表明, 与空的平板相比, 在缩放板内插旋流片流道中速度与温度梯度夹角的余弦值变大, 速度场和温度场的协同程度有所增大。

**关键词:**旋流片; 缩放板; 强化传热; 场协同

**中图分类号:**TK124

**文献标识码:**A



\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0029-03

# 纤维素酶处理对阔叶木浆打浆性能的影响

刘姗姗<sup>1</sup>, 徐永建<sup>1</sup>, 王志杰<sup>1</sup>, 付英娟<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学造纸工程学院, 陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室, 陕西 西安 710021; 2. 山东轻工业学院制浆造纸工程重点学科, 山东 济南 250353)

**摘要:**就纤维素酶处理对漂白阔叶木浆打浆性能的影响进行了研究. 结果表明, Novozym476 处理阔叶木浆, 在相同的打浆转数下可以提高打浆度, 在转数为 30 000 r 时打浆度提高了 7.3%. 在相同的打浆转数下, 经纤维素酶处理后浆料的裂断长、撕裂指数和耐破指数都比未经酶处理的浆料有所下降, 而松厚度有所增加.

**关键词:**纤维素酶; 打浆度; 打浆性能

**中图分类号:**TS743      **文献标识码:**A

## 0 引言

生物技术的发展为造纸工业降低能耗、清洁生产开辟了新的天地, 是制浆造纸工业中的一个新的重大研究开发领域, 用酶进行漂白<sup>[1]</sup>、打浆节能<sup>[2-5]</sup>、树脂控制、一次纤维处理<sup>[6]</sup>等方面的研究也在进行中. 用酶对木浆改性已不再是新鲜的事情, 酶处理不但能够改善纸浆的磨浆性能、滤水性能以及改进其成纸的物理性能、提高薄页纸的柔软性, 还可以改善纤维的柔韧性和纤维压缩性, 因此寻找出对打浆特性改善显著且对纸浆强度无损伤或损伤较小的酶制剂, 将对今后制浆造纸工业的发展产生深远的影响.

近年来, 阔叶木用于制浆得到了飞速的发展, 这种树种具有生长周期短、所制得纸浆应用范围广的优点, 但其导管大而硬, 正常的打浆过程很难使之破碎, 因此会给成纸性能带来一些不良的影响, 且其适印性能较差. 当然通过进一步的打浆能够提高导管的细碎化和柔韧性, 但会使纸浆的滤水性下降. Honshu Paper 公司的一项专利指出, 商品纤维素酶能够提高阔叶木导管的柔韧性, 酶法处理能够使导管脱落程度降低 80%, 而同时纸浆的滤水性、平滑度和抗张强度都得到了提高. 本文以漂白阔叶木商品浆为原料, 对其进行含有纤维素吸附区的单组分纤维素内切酶 Novozym476 预处理, 然后进行打浆, 分析了阔叶木浆的打浆性能及物理性能的变化情况.

1 实验

表 1 纤维素酶制剂及其特性

酶	酶活	最适 pH	最适温度/℃	酶成分
Novozy476	5000ECU/g*	6~9	50~55	EG5、CBD

1.1 原料与试剂

本实验所用的原料为俄罗斯商品漂白阔叶木浆板, 取自济南银星纸业集团. 将浆板撕成小片, 平衡水分备用.

实验用酶制剂由丹麦诺和诺德公司(Novo Nordisk P. R China)提供, 其特性见表 1.

1.2 实验方法

1.2.1 碎浆

将 90 g 绝干浆用 70 ℃ 的热水配成浆浓为 10% 的浆料, 放入碎浆机碎解 10 min, 然后加入所需酶液,

\* 收稿日期:2009-10-16

作者简介:刘姗姗(1983-), 女, 山东省德州市人, 在读硕士生, 研究方向:低污染制浆及溶剂制浆技术、功能性纤维素

再继续碎解 30 min. 前 10 min 碎解机转速为 1 500 r/min, 后 30 min 转速为 900 r/min. 在此过程中保持浆料的温度为 50~55 ℃, 以保持酶的活性.

1.2.2 抄纸

手抄片定量为 60 g/m<sup>2</sup>. 在浆料碎解时每份浆料加入 1.613 8 g 碳酸钙, 碎解后加入 0.1% 的 CPAM, 反应 5 min 后开始抄纸.

1.2.3 纸张的物理性能检测

采用国家标准规定的方法进行.

2 结果与讨论

2.1 未经酶处理的漂白阔叶木浆打浆性能研究

本文首先研究了未经酶处理的漂白阔叶木浆在不同打浆转数下的各种性能, 结果见表 2.

表 2 不同打浆转数下未经酶处理的漂白阔叶木浆的性能指标

浆种	转数 /r	打浆度 /°SR	白度 /%ISO	裂断长 /km	伸长率 /%	撕裂指数 /mN·m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	耐破指数 /kPa·m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	松厚度 /cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>
1	10 000	22	79.8	3.76	3.56	7.35	2.18	2.19
2	20 000	34	79.1	4.09	3.59	7.65	2.75	2.03
3	25 000	36	79.5	4.05	3.90	8.03	2.63	1.95
4	30 000	41	79.7	4.29	4.05	8.94	2.84	1.83
5	35 000	44	78.7	4.45	3.30	8.38	3.06	1.75
6	40 000	54	78.2	4.72	3.54	8.01	2.83	1.66

由表 2 可见, 随着打浆转数增加, 纸浆的打浆度不断升高, 裂断长、伸长率、撕裂指数、耐破指数均有所增加, 但白度和松厚度有所下降.

2.2 纤维素酶 N476 处理对漂白阔叶木浆打浆性能的影响

本文采用纤维素酶 N476 对阔叶木浆进行预处理, 然后进行打浆. 实验采用的酶用量为 0.5 ECU/g, 实验结果如图 1~图 6 所示.

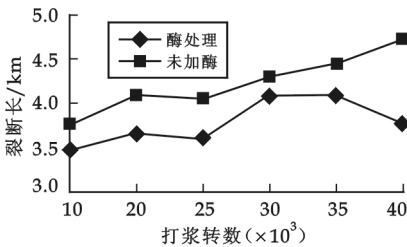


图 1 未加酶和酶 N476 对裂断指数的影响

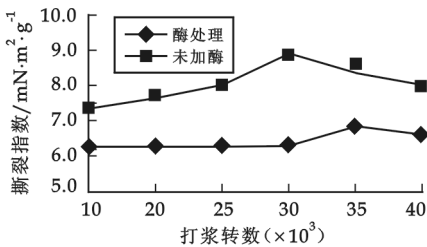


图 2 未加酶和酶 N476 对撕裂指数的影响

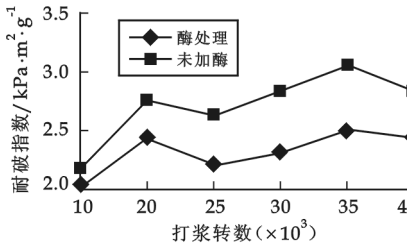


图 3 未加酶和酶 N476 对耐破指数的影响

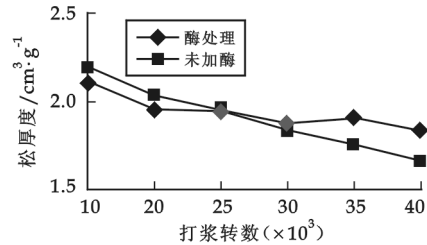


图 4 未加酶和酶 N476 对松厚度的影响

由图 1 可见, 随着打浆度的提高, 未经酶处理的纸浆和经酶 N476 处理的纸浆的裂断长都有所增加, 但酶 N476 处理后对纤维有一定的损伤, 所以它的裂断长比未经酶处理的低. 在打浆 30 000 r 时裂断长降低得最少, 为 4.67%; 在打浆 40 000 r 时降低得最多, 为 20.55%; 在打浆 25 000 r 时裂断长降低了 11.36%.

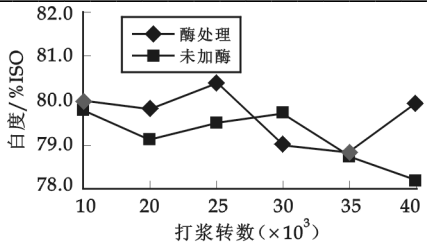


图 5 未加酶和酶 N476 对白度的影响

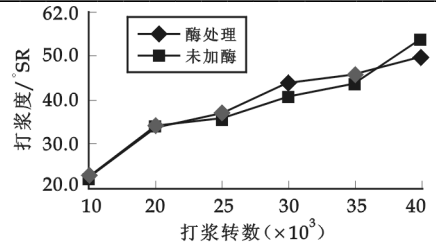


图 6 未加酶和酶 N476 对打浆度的影响

图 2 表明,随着打浆度的提高,未经酶处理的纸浆的撕裂指数先升高后降低,经酶 N476 处理的纸浆的撕裂指数呈升高趋势,但酶 N476 处理后对纤维有一定的损伤,所以它的撕裂度比未经酶处理的低.在打浆 30 000 r 时撕裂指数降低得最多,为 29.53%.

图 3 表明,随着打浆度的提高,未经酶处理的和经酶 N476 处理的纸浆耐破指数均先升高后降低再升高,但酶 N476 处理后对纤维有一定的损伤,所以它的耐破度比未经酶处理的低.在打浆 30 000 r 时耐破指数下降得最多,为 18.66%.

图 4 表明,随着打浆度的提高,未经酶处理的和经酶 N476 处理的纸浆的松厚度均呈降低趋势.在打浆转数低于 25 000 r 时,未加酶纸浆的松厚度较高;在打浆转数高于 25 000 r 时,经酶 N476 处理的纸浆的松厚度较高.

图 5 表明,随着打浆度的提高,未经酶处理的和经酶 N476 处理的纸浆的白度均先降低后升高再降低,但经酶 N476 处理的纸浆的白度比未经酶处理的高,在打浆 25 000 r 时白度最高,为 80.4%ISO.

图 6 表明,随着打浆转数的增加,纸浆的打浆度不断升高.在 10 000~30 000 r 之间,经酶处理的纸浆打浆度升高较快,在 30 000 r 以上打浆度上升又较缓慢.在相同的打浆转数下,经酶处理的纸浆比未经酶处理的纸浆打浆度高,在 35 000 r 以上低于未经酶处理纸浆的打浆度.在打浆 30 000 r 时纸浆打浆度升高的幅度最大,为 6.8%.

显然,打浆度的增加是纤维素的酶解造成的.No<sup>[5]</sup>等人认为是酶处理过程中内部和外部细纤维化的结果.

总之,经纤维素酶处理的阔叶木浆的打浆度比未经酶处理的高,但裂断长、伸长率、撕裂指数、耐破指数都有所降低,而白度和松厚度有所增加.纸浆裂断长是纤维间结合力、纤维内在强度和纤维长度综合影响的结果.随着打浆度的增加,纤维间结合力增大,从而表现出裂断长增加.但纤维素酶处理引起纤维强度和长度有较大下降时,裂断长不再增加而有所下降,说明酶处理可能导致纤维长度的下降.

### 3 结束语

(1)含有纤维素吸附区的单组分纤维素内切酶 Novozym476 处理阔叶木浆,在相同的打浆转数下可以提高打浆度,在打浆 30 000 r 时,纸浆打浆度可提高 7.3%,这主要是纤维素的酶解造成的,因此在相同的打浆度下可以降低打浆能耗.

(2)在相同的打浆度下,经纤维素酶处理后浆料的裂断长、撕裂指数、耐破指数都比未经酶处理的浆料有所下降,但松厚度有所增加.

### 参考文献

- [1] Nomura, Y. Japanese Paten Application, 1968: 126,395/85.
- [2] Bar-Lev, S. S., Kirk, T. K., Chang, M. M. Fungal treatment can reduce energy requirements for secondary refining of TMP[J]. TAPPI J., 1982, 65 (10): 111.
- [3] Barnoud, F., Comtal, J., Joseleau, J. P., et al. Interest in the enzymatic hydrolysis of xylans for modifying the structure of pulp fibres[C]. Third Int. Conf. Biotechnol. Pulp Paper Ind., SluclclmLn, Sweden, 1986: 70.

# 大豆蛋白对涂布白板纸涂料性能的影响

尤 鹏<sup>1</sup>, 吕新莲<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266042; 2. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042)

**摘 要:**涂料的流变性能是影响涂布加工纸质量的重要因素之一,对涂布加工过程中涂层的均匀性以及获得良好的涂层性能具有决定性影响. 本实验针对涂布白板纸涂料进行了研究,通过添加大豆蛋白改善涂料的流变性能及涂层的表面性能. 结果表明,大豆蛋白使涂料低剪切粘度增加,剪切稀化作用增大,改善了涂料的触变性能,并且使涂布白板纸表面粗糙度下降、适印性能提高,同时涂层的表面强度也有一定的提高.

**关键词:**涂料; 流变性; 剪切稀化; 表观粘度; 表面强度

**中图法分类号:**TS727<sup>+</sup>.3

**文献标识码:**A

## 0 引言

纸张涂料是一种典型的非牛顿型流体,其粘度随剪切速率的变化而改变,涂料的流变性是影响涂布加工纸质量的重要因素之一. 涂料是由颜料、胶粘剂和水组成的分散体系,这种体系可看作悬浮体的多相体系,在剪切力作用下,其结构形态的改变及流动规律具有特殊的性质. 涂料在加工纸上的涂布过程,特别是刮刀涂布,都属于涂料在受较高剪切条件下进行的薄膜流动<sup>[1,2]</sup>,此时涂料在剪切速率下的流体动力学特性对涂布加工纸质量和涂布工艺的设计都具有重要的影响. 因此,研究涂料在中高剪切速率下的流动是造纸和涂料工业的热门课题<sup>[3-5]</sup>.

涂布白板纸涂布大多数为刮刀涂布,刮刀涂布要求其涂料在受到刮刀的高速剪切应力条件下具有良好的剪切稀化作用,以达到较高的涂布操作性能,这就要求涂料具有良好的流变性能<sup>[6]</sup>. 本论文针对涂布白板纸涂料配方,研究了涂料中添加大豆蛋白对涂料流变性能及涂布后纸页表面性能的影响,并分析了涂料在中低剪切速率条件下流变性能的变化情况.

## 1 实验

### 1.1 实验原料与仪器

重质研磨碳酸钙(GCC,取自浙江金鸡化工有限公司),高岭土,DC分散剂,润滑剂(取自广州威达高纸业有限公司),大豆蛋白(取自上海某厂),羧基丁苯胶乳(浙江金鸡化工有限公司).

GFJ-0.4型高速分散机, Brookfield DV-II粘度计, JB90-D型电动搅拌机, Malvern Nano ZS (Red badge) ZEN3600粒度仪, YM-20型油墨吸收性测定仪, PPS测定仪, IGT C2-5型印刷适性测定仪, TA AR550转矩流变仪.

\* 作者简介:尤 鹏(1977-),男,山东省潍坊市人,讲师,博士,研究方向:造纸涂料、加工纸及造纸化学品  
基金项目:青岛科技大学科研启动基金项目

1.2 实验方法

1.2.1 颜料的粒径表征

将适量浓度的涂布颜料以水为分散介质用超声波分散仪分散 10 min,然后用 Malvern Nano ZS (Red badge) ZEN3600 激光衍射粒度仪测定颜料的粒径.

1.2.2 涂布配方

底涂配方:GCC 60 份,高岭土 40 份,分散剂 0.2%,胶乳 15%,其他助剂.  
面涂配方:GCC 40 份,高岭土 60 份,分散剂 0.2%,胶乳 15%,其他助剂.  
在上述涂料配方条件下,按照大豆蛋白用量的不同进行实验.涂料固含量 60%,pH 值调至 8.5~9.0.涂布量:底涂 8~12 g/m<sup>2</sup>,面涂 12~15 g/m<sup>2</sup>.

1.2.3 涂料流变性能的检测

用 Brookfield DV-II + 粘度计测定涂料的表观粘度,然后用 AR550 转矩流变仪检测涂料在中高高剪切条件下的流变性能.

1.2.4 涂料流变性能的评价

本实验将涂布白板纸涂料看作理想的假塑性流体进行评价,假塑性流体的剪切粘度与剪切速率之间存在下列关系<sup>[7]</sup>:

$$\eta = K \cdot \gamma_w^{n-1} \text{ 或 } \lg \eta = \lg K + (n-1) \lg \gamma_w$$

式中, $\eta$  为涂料的表观粘度; $K$  为稠态指数; $\gamma_w$  为剪切速率; $n$  为流态系数,当  $n < 1$  时,为剪切稀化流体,并且  $n$  值越小,涂料剪切稀化越明显.根据上面的关系式研究不同流变助剂对涂料流变性能的改善作用,通过曲线拟合得出  $K$  和  $n$  值.

2 结果与讨论

2.1 涂布颜料的粒径表征

实验所应用的两种颜料的粒径分布如图 1 所示.  
由图 1 可以看出,GCC 和高岭土的粒径分布比较均匀,GCC 的平均粒径为 370 nm,高岭土的平均粒径为 454 nm.颜料粒子粒径的大小与分布是衡量颜料质量的重要指标,将影响涂料的分散、涂布纸的光泽度、平滑度等指标以及涂布操作性能.

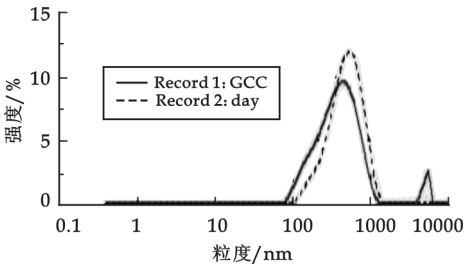


图 1 GCC 与高岭土粒径的分布

2.2 大豆蛋白的应用研究

2.2.1 大豆蛋白对涂料流变性能的影响

大豆蛋白可作为涂料的辅助胶粘剂,其不但具有一定胶粘能力,同时还具有较好的保水性和良好的润滑能力.大豆蛋白由 20 个随机排列的氨基酸组成,含有阴性和阳性两种电荷.两性大豆蛋白与带负电荷的颜料之间相互起作用,部分大豆蛋白被吸附到颜料表面,其余的则存在于液相中.液相中的大豆蛋白提供了有利于流变性能的液相粘度构筑物以及良好的保水能力和润滑能力;吸附部分的大豆蛋白则促进涂层的快速固化,增加具有高孔隙容积的涂层结构.含大豆蛋白的涂料一般显示出假塑性与触变行为<sup>[7]</sup>.大豆蛋白对改善涂布白板纸的吸墨均匀性和油墨干燥速度有相当的帮助<sup>[8]</sup>.表 1 为不同大豆蛋白用量的涂料低剪切表观粘度.

表 1 不同大豆蛋白用量的涂料低剪切表观粘度

大豆蛋白 用量/份	底涂涂料粘度 /mPa·s	面涂涂料粘度 /mPa·s
0	842	939
0.5	1 139	1 223
1.0	1 632	1 846

由表 1 可以看出,大豆蛋白的加入引起了涂料的 Brookfield 粘度增加,具有增稠作用,这是由大豆蛋白的自身性质决定的. 由于大豆蛋白的两性性质,其既能够使涂料的液相增稠,又能够与带有负电荷的颜料粒子反应使粘度增加.

图 2、图 3 所示为不同大豆蛋白用量对底涂和面涂涂料剪切表观粘度的影响.

表 2 不同大豆蛋白用量下涂料的稠态指数  $K$  和流态系数  $n$

大豆蛋白 用量 / 份	底涂涂料				面涂涂料			
	$\eta = K \cdot \gamma_w^{n-1}$	$R^2$	$K$	$n$	$\eta = K \cdot \gamma_w^{n-1}$	$R^2$	$K$	$n$
0	$\eta = 1.514\gamma_w^{-0.61}$	$R^2 = 0.989$	1.514	0.39	$\eta = 1.169\gamma_w^{-0.57}$	$R^2 = 0.993$	1.169	0.43
0.5	$\eta = 2.210\gamma_w^{-0.59}$	$R^2 = 0.997$	2.210	0.41	$\eta = 6.252\gamma_w^{-0.72}$	$R^2 = 0.998$	6.252	0.28
1.0	$\eta = 11.61\gamma_w^{-0.74}$	$R^2 = 0.999$	11.61	0.26	$\eta = 5.201\gamma_w^{-0.64}$	$R^2 = 0.993$	5.201	0.36

由图 2、图 3 和表 2 可以看出,随着大豆蛋白的加入,涂料的稠态指数  $K$  及粘度增大,流态指数  $n < 1$ , 涂料具有剪切稀化的性质. 对底涂涂料而言,加入 0.5 份大豆蛋白反而使剪切稀化作用有所降低,而加入 1 份大豆蛋白后又改善了涂料的剪切稀化作用;对面涂涂料,加入 0.5 份大豆蛋白使涂料的流变性能得到改善,而加入 1 份大豆蛋白反而减缓了改善涂料流变性能的趋势,这可能是由于底涂与面涂配方中 GCC 和高岭土的差异引起的. 从稠态指数  $K$  的变化可以证明,大豆蛋白的加入使涂料的表观粘度增加. 由于大豆蛋白在涂料中作为辅助胶粘剂和粘度调节剂使用,对含有不同配比 GCC 和高岭土的涂料的流变性能影响比较复杂,因此在涂料中的加入量应适当.

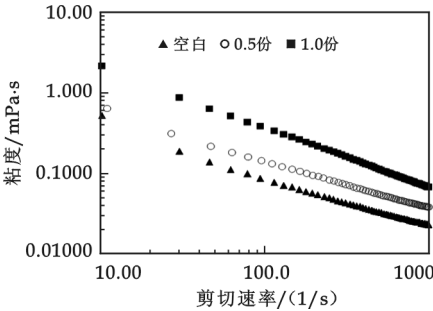


图 2 大豆蛋白对底涂涂料流变性能的改善

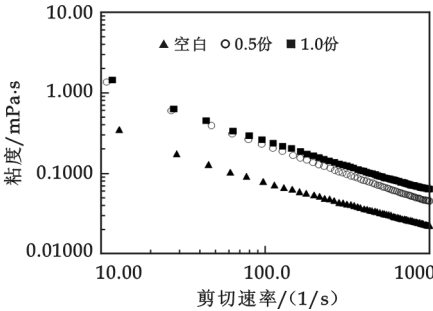


图 3 大豆蛋白对面涂涂料流变性能的改善

2.2.2 大豆蛋白对涂布纸性能的影响

分别改变底涂涂料和面涂涂料中大豆蛋白的用量,检测大豆蛋白的加入对涂布纸表面性能的影响,实验检测结果如表 3 所示.

表 3 大豆蛋白用量对涂布纸表面性能的影响

涂料 编号	底涂涂料大豆 蛋白用量/份	面涂涂料大豆 蛋白用量/份	白度 /%	平滑度 /s	K&N 值/%	IGT /(m/s)	PPS /μm
a	0	0	85.9	153	24.6	1.52	1.75
b	0.5	0.5	85.1	166	24.8	1.51	1.33
c	0.5	1.0	84.9	164	24.6	1.47	1.36
d	1.0	0.5	84.5	162	25.2	1.49	1.31
e	1.0	1.0	84.7	167	24.9	1.42	1.40

由表 2 可以看出,大豆蛋白的加入使纸板的白度略有下降,对涂布纸的油墨吸收性影响不大,同时大豆蛋白的加入使涂布纸的平滑度增加,涂层的表面粗糙度较对比试样明显降低,这与涂料本身的

性能密切相关,涂布纸的表面粗糙度与涂料的流平性及触变性有关<sup>[9]</sup>. 可知大豆蛋白的加入改善了涂料的流变性能,提高了涂料的流平性与触变性从而使涂层的粗糙度降低,但添加大豆蛋白使涂层的表面强度有所降低.



3 结论

- (1)大豆蛋白的加入使涂料的剪切表观粘度增加,具有增稠作用,涂料的稠态指数  $K$  增大.
- (2)大豆蛋白的加入改善了涂料的流变性能,但从流态指数  $n$  来看,对于含有不同 GCC 和高岭土组成的底涂和面涂涂料而言,涂料的剪切稀化作用不同.
- (3)添加大豆蛋白使涂布纸板表面的平滑度、粗糙度有所提高,当用量超过 0.5 份时纸张的表面强度有所降低.

参考文献

[1] Houssni Ei-Said, Altaf H. Basta. Some aspects of the rheological properties of paper coating suspension and its application[J]. Polymer, 1995, 36(22): 4 267-4 274.

[2] 张 恒. 纳米组分对涂料流变性能及涂布性能的影响及机理研究[D]. 广州:华南理工大学博士论文,2004: 45-48.

[3] 陈克复, 颜进华. 在高剪切涂布过程中涂料流变性的研究[J]. 中国造纸, 1998,(1): 44-48.

[4] Rich Y. Ryu, Richard D. Gilbert. Influence of cationic additives on the rheological, optical, and printing properties of ink-jet coatings[J]. TAPPI Journal, 1999, 82(11): 128-134.

[5] 肖秀芝. 涂料性能及其测试[J]. 湖北造纸, 2003,(1):26-28.

[6] 马 路, 郑炽嵩, 陈克复, 等. 涂布白板纸高浓低粘涂料组成优化和特性的研究[J]. 广东造纸, 1998,(6): 5-13.

[7] 曹邦威译. 纸张颜料涂布和表面施胶[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 180.

[8] 钱鹭生, 曹丽云, 凌永龙, 等. 涂布加工纸技术手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 102.

[9] 胡开堂, 苏求凤. 豆酪素在涂料配方中的应用、问题及对策[J]. 天津造纸, 1990,(Z2): 8-15.

INFLUENCE OF SOY PROTEIN ON COATED  
WHITE PAPERBOARD COATINGS

YOU Peng<sup>1</sup>, LV Xin-lian<sup>2</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;  
2. College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** The rheological properties of paper coatings is one of the important influencing factors of coated paper quality, it has a decisive influence on how to uniformly coat on paper and achieve well coat layer. In this paper, the coatings of coated white paperboard was studied by the addition of soy protein to improve the rheological properties and the surface properties of coating layer. The results show that the soy protein made higher apparent viscosity of coating, increased the shear-thinning action and improve the rheological properties, at the same time, the smoothness and printability were improved, the surface strength of coated paper had a certain increasing.

**Key words:** coatings; rheological properties; shear-thinning; apparent viscosity; surface strength

\* 文章编号:1000—5811(2009)06—0036—04

# 不同助剂对提高不锈钢衬纸耐高温性能的比较

杜 敏, 李新平

(陕西科技大学造纸工程学院, 陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室, 陕西 西安 710021)

**摘 要:**不锈钢衬纸在使用过程中要求具有一定的耐高温性能,为此可以通过添加某种耐高温助剂来达到目的.通过实验比较了两种无机耐高温助剂和一种有机耐高温助剂对纸页耐高温性能及强度性能的影响,以寻求合适的耐高温助剂及其适当的应用性能.研究表明,无机耐高温助剂具有较好的耐高温效果,但会对纸页的强度性能造成一定的损失;有机耐高温助剂耐高温效果不很明显,但不会影响纸页的物理强度.两者结合使用可以获得较好的耐高温效果和强度性能,其中无机耐高温助剂的质量分数为 5%,有机耐高温助剂的质量分数为 8%时可以达到进口不锈钢衬纸的耐高温性能指标.

**关键词:**不锈钢衬纸;耐高温;助剂;强度性能

**中图分类号:**TS762.4 **文献标识码:**A

## 0 引言

不锈钢衬纸是在冷轧高档不锈钢板卷取过程中为防止不锈钢板之间的摩擦而插入的一种专用纸,冷轧温度一般在 180 ℃左右,有时高达 200 ℃<sup>[1]</sup>,因此要求纸张要有较好的耐温性能,以防止部分纤维的热降解或碳化,不会出现因纸张强度下降而影响隔离效果<sup>[2-4]</sup>.随着不锈钢板冷轧及卷取速度的不断加快,在高温下维持纸张物理强度不变,更是成为不锈钢衬纸的重要性能.

在不锈钢衬纸的生产过程中,添加耐高温助剂是使其获得耐高温效果的有效方法.本文主要对 3 种不同的耐高温助剂对不锈钢衬纸的耐高温性能做了比较研究.

## 1 实验部分

### 1.1 纸样

进口不锈钢衬纸(由广州某特种纸厂提供).

### 1.2 浆料

未漂硫酸盐针叶木浆板,经 FPI 磨浆,打浆度 45 °SR.

### 1.3 助剂

耐高温助剂 SR-00A,耐高温助剂 SR-00M,耐高温助剂 SR-8001,这 3 种助剂都由广州某公司提供,其中 SR-00A 和 SR-00M 为白色粉末状固体,SR-00A 过 800 目,SR-00M 过 1 200 目.SR-00A 和 SR-00M 属无机物质;SR-8001 为无色透明液体,固含量为 35%,属有机高分子化合物.其他助剂有六偏磷酸钠、聚乙烯醇、聚丙烯酸钠、瓜尔胶等,瓜尔胶也由广州某公司提供,其他药品都为外购分析药品.

\* 收稿日期:2009-10-18

作者简介:杜 敏(1976—),女,浙江省嵊州市人,讲师,硕士,研究方向:低污染制浆技术、特种纸  
基金项目:陕西科技大学校级自选科研项目(ZX07-03)



1.4 实验方法

未漂硫酸盐针叶木浆板经 FPI 磨浆,达到要求的打浆度,在自动纸页成形器中进行抄片,定量为 60 g/m<sup>2</sup>. 无机耐高温助剂先分散在水中,然后按一定比例添加到纸浆中. 有机耐高温助剂在湿纸页成形后以表面喷淋的方法添加. 纸页干燥后经 200 ℃ 高温处理 2 h,用灼烧法测定助剂留着率. 纸张的物理性能检测按照国家相关标准进行.

2 结果与讨论

2.1 不锈钢衬纸纸样分析

对进口不锈钢衬纸的耐高温性能进行检测,其高温处理前后的抗张指数和耐破指数如表 1 所示.

表 1 不锈钢衬纸物理性能指标

定量 /g · m <sup>-2</sup>	原始抗张指数 /N · m · g <sup>-1</sup>	高温后抗张指数 /N · m · g <sup>-1</sup>	抗张指数 变化率/%	原始耐破指数 /K · Pa · m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup>	高温后耐破指数 /K · Pa · m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup>	耐破指数 变化率/%
42	23.01	22.36	-2.82	3.16	3.02	-4.43

由表 1 可见,进口不锈钢衬纸经高温处理后抗张指数仅下降了 2.82%,耐破指数下降了 4.43%,具有较好的耐高温性能.

2.2 无机耐高温助剂效果比较

2.2.1 分散性能比较

两种无机耐高温助剂都为白色粉末状固体,SR-00A 过 800 目筛,SR-00M 过 1 200 目筛. 由于无机耐高温助剂是在浆内添加,所以固体颗粒在浆料中的均匀分散是应用的前提条件. SR-00A 能够很容易地分散在浆料中,所以不存在分散的问题. SR-00M 由于颗粒细,比表面积大,在水溶液中的润湿分散比较困难. 本实验选择了几种不同的分散剂在超声波作用下进行分散处理,所用分散剂分别为六偏磷酸钠、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酸钠(PAAS),用量为 0.5%. 用浊度表征其分散效果,实验结果如图 1 所示.

由图 1 可见,SR-00M 由于颗粒小,比表面积大,在水中的润湿分散性差,大部分漂浮在液体表面,分散在水中的数量有限,所以其悬浮液的浊度较小;当加入分散剂后,增加了 SR-00M 的润湿分散性,其在悬浮液中的数量增加,表现为体系的浊度增加. 由图 1 可知,六偏磷酸钠的分散效果最好,悬浮液浊度最大,表面上基本不见漂浮的白色颗粒,所以本实验就以六偏磷酸钠作为 SR-00M 在水中的分散剂,用量为 0.5%.

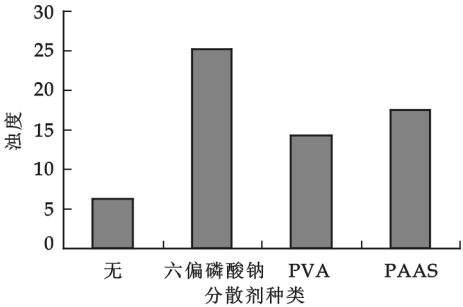


图 1 不同分散剂对无机耐高温助剂 SR-00M 分散效果的影响

2.2.2 耐高温性能比较

两种无机耐高温助剂分别按照 5%、10%、15% 的添加量进行添加,以瓜尔胶作为助留剂,瓜尔胶用量为 0.2%,抄纸定量为 60 g/m<sup>2</sup>. 通过灼烧法测得 SR-00A 的留着率为 68.6%,SR-00M 的留着率为 71.2%. 纸页高温处理前后的物理指标如表 2 所示.

由表 2 可知,添加无机耐高温助剂后纸张的抗张指数和耐破指数都下降,添加量越大,下降幅度越大,但同时耐高温性能有了明显的提高. 以 SR-00A 为例,未添加助剂时高温处理后抗张指数下降 8.07%,耐破指数下降 10.19%,添加 5% 助剂后再高温处理,抗张指数较高温处理前只下降 5.45%,耐破指数仅下降 7.65%. 当添加量为 15% 时,高温处理后抗张指数较高温处理前仅下降 1.39%,耐破指数仅下降 3.35%,物理强度受高温的影响已经大大降低,添加助剂 SR-00M 也是如此. 这主要是因为这两种物质都具有强吸热性,在热量吸收到一定程度后发生分解,生成一种惰性物质,此惰性物质也能够吸收大量热能,

并释放出水分,这样就使受热纸张纤维不会因高温被糊化,从而保证了纸张强度<sup>[5]</sup>.

另外从表 2 可以看出,在同样的添加量下,助剂 SR-00M 的耐高温效果更好,当其添加量在 10% 时高温处理前后抗张指数的变化率仅为 -2.78%,与进口纸样的变化率 -2.82% 基本一致,但此时其原始抗张指数较未添加助剂时下降 12.42%,强度损失太大,必须添加其他增强助剂.

表 2 无机耐高温助剂耐高温效果的比较

添加量		抗张指数/ $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$			耐破指数/ $\text{K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$		
		未高温处理	高温处理后	变化率/%	未高温处理	高温处理后	变化率/%
空白	0	44.27	39.47	-8.07	4.32	3.88	-10.19
SR-00A	5%	42.87 (-3.16%)	40.53	-5.46	4.05 (-6.25%)	3.74	-7.65
	10%	39.07 (-11.75%)	37.64	-3.66	3.81 (-11.80%)	3.59	-5.77
	15%	32.41 (-26.79%)	31.96	-1.39	3.28 (-24.07%)	3.17	-3.35
SR-00M	5%	42.40 (-4.22%)	40.52	-4.43	4.09 (-5.32%)	3.82	-6.60
	10%	38.77 (-12.42%)	37.69	-2.78	3.80 (-12.03%)	3.65	-3.94
	15%	32.53 (-26.52%)	32.19	-1.04	3.05 (-29.40%)	2.99	-1.97

2.3 有机耐高温助剂效果分析

有机耐高温助剂为无色透明黏稠液体,稀释一定倍数后直接喷淋在达到一定干度的湿纸页上,分别按照 5%、8%、10% 的用量添加,在纸页干燥器中干燥后进行耐高温实验,结果如图 2 所示.

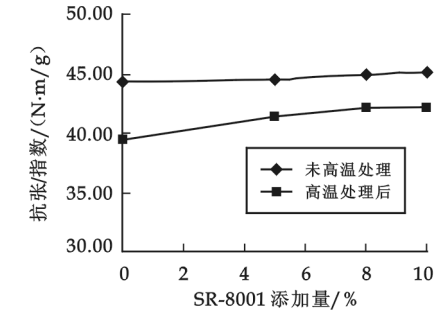


图 2 有机耐高温助剂的作用效果

由图 2 可见,添加有机耐高温助剂 SR-8001 后,成纸的抗张指数基本保持不变,当添加量为 5%、8%、10% 时,纸页高温处理前后抗张指数的变化率分别为 -7.06%、-6.51%、-6.60%,与未添加时的变化率 -8.07% 差别不大.由此可见,有机耐高温助剂的耐高温效果不如无机耐高温助剂,但它不会造成纸页原始强度损失.

2.4 结合使用效果比较

无机耐高温助剂虽然具有较好的耐高温性能,但会对纸页强度性能造成较大损失;有机耐高温助剂虽然耐高温效果不如无机耐高温助剂,但不会影响纸页的原始强度,所以接下来将无机耐高温助剂和有机耐高温助剂结合起来使用,比较分析其最佳应用效果.根据以上实验结果,选择无机耐高温助剂的用量为 5% (质量分数,下同),有机

耐高温助剂的用量为 8% 进行实验,实验结果如表 3 所示.

表 3 无机耐高温助剂和有机耐高温助剂结合使用效果比较

添加量		抗张指数/ $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$		
		未高温处理	高温处理后	变化率/%
空白	0	44.27	39.47	-8.07
A+C*	5%+8%	42.93(-3.02%)	41.61	-3.07
B+C*	5%+8%	42.85(-3.21%)	41.62	-2.87

\* A 为 SR-00A, B 为 SR-00M, C 为 SR-8001.

由表 3 可知,在上述用量下,当 SR-00A 和 SR-8001 结合使用时抗张指数较未添加助剂时只下降了 3.02%,而高温处理前后抗张指数变化率为 -3.07%;当 SR-00M 和 SR-8001 结合使

用时抗张指数较未添加助剂时只下降了 3.21%,而高温处理前后抗张指数变化率为-2.87%,可见在纸页原始物理强度下降不大的情况下基本达到了进口不锈钢衬纸的耐高温性能指标。

### 3 结论

(1)无机耐高温助剂 SR-00M 较 SR-00A 具有较好的耐高温性能,但使用 SR-00M 时必须添加分散剂,其中六偏磷酸钠分散效果最好。

(2)无机耐高温助剂具有较好的耐高温效果,但会造成纸页物理性能下降;有机耐高温助剂不会影响纸页的物理强度,但耐高温效果不如无机耐高温助剂。两者结合使用效果较好,其较佳用量为 5%的无机耐高温助剂和 8%的有机耐高温助剂。

### 参考文献

[1] 王立梅. 影响冷轧不锈钢的质量、性能因素及预防措施[J]. 潍坊学院学报,2005,3(2):62-64.  
[2] 杨 飞,陈克复. 耐高温不锈钢工艺垫纸的研制[J]. 中国造纸,2007,26(5):11-13.  
[3] 杨仁党,廖旭深. 耐高温不锈钢材隔离纸的研制[J]. 纸和造纸,2008,27(5):33-35.  
[4] 王福纪,李西宝. 高温热压垫层纸的生产工艺[J]. 中国造纸,2007,26(10):70-71.  
[5] 万洪安. 耐高温不锈钢材衬纸的研制与生产[J]. 纸和造纸,2003,11(6):22-23.

## COMPARISON OF SEVERAL ADDITIVES ON IMPROVING INTERLEAVING PAPER'S HEAT RESISTANT PROPERTY

DU Min, LI Xin-ping

(School of Pulp and Papermaking Engineering, the Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development of Shaanxi, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Interleaving paper needs to meet heat resistant property in use, and it can be realized by adding some heat resistant additives. By comparing heat resistant property of two kinds of inorganic heat resistant additives and a kind of organic heat resistant additive, to search the appropriate additive for interleaving paper. It indicates that inorganic heat resistant additive has the better heat resistance while loses paper's strength, and organic heat resistant additive is helpful to paper's strength but has no significant contribution to heat resistance. The together of inorganic and organic heat resistant additive is good to heat resistance and strength.

**Key words:** interleaving paper; heat resistance; additive; strength

# 蜂胶对酸奶保鲜效果的研究

杨芙莲, 党云刚, 朱媛娜

(陕西科技大学生命科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**在乳制品中,酸奶的微生物污染常常被人们所忽视.作者研究了不同浓度的蜂胶水溶液对酸奶的保鲜效果.实验结果表明,蜂胶水溶液浓度越大,对酵母菌的抑制作用越强,即对酸奶的保鲜效果也越好.添加浓度为0.05%的蜂胶水溶液在延长酸奶保存期的同时,还能保证酸奶自身的品质,因此蜂胶可以作为天然的食品保鲜剂.该研究为蜂胶对各种乳制品的保鲜应用提供了参考.

**关键词:**蜂胶;酸奶;保鲜剂

**中图分类号:**TS252.54

**文献标识码:**A

## 0 引言

蜂胶(propolis)是蜜蜂从植物幼芽与树干上采集来的树脂,并混入它的上腭腺分泌物和蜂蜡等加工而成,被誉为“紫色黄金”.蜂胶无毒无害,具有多种保健作用,对病原真菌、细菌及病毒都有很强的抑制作用,是一种天然的抗菌剂<sup>[1]</sup>.家养蜜蜂几万只蜂群居,空间狭小、阴暗,但蜂巢内没有任何变霉的东西,就连蜂尸也长期不腐败,证明蜂胶有很强的抗菌能力<sup>[2,3]</sup>.蜂胶的抑菌杀虫功能主要来源于其中所含的黄酮、芳香酸及其脂类化合物<sup>[4,5]</sup>.

乳制品营养丰富,水分活性高,在生产、加工、贮藏、运输和销售中易受到环境因素的影响而被微生物污染,发生腐败变质.酸奶作为常见的乳制品,由于酸度高,所受到的霉菌、酵母污染问题长期被人们所忽视<sup>[6]</sup>,但其保鲜问题一直为人们所关注.目前,合成的防腐保鲜剂具有高效、廉价的特点,在食品中被广泛应用,但存在严重的安全隐患,因此研究开发天然、安全的食品保鲜剂已经成为食品科学的一个重要发展方向.蜂胶以其显著的抗菌、防霉、防腐、抗氧化作用和医疗、保健功能受到了人们的广泛关注.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

水溶性蜂胶(propolis)浓液(配料:蜂胶萃取物、蒸馏水):购于陕西老蜂农蜂业有限责任公司;酸奶:蒙牛牌原味酸牛奶;啤酒酵母菌:安琪酵母股份有限公司.

氢氧化钠:天津市北方天医化学试剂厂;葡萄糖:天津市北方天医化学试剂厂;95%乙醇:天津市百世化工有限公司;氯化钠:天津市登丰化学制品有限公司;琼脂粉:北京奥博星生物技术有限公司;酚酞指示剂及邻苯二甲酸氢钾等.

### 1.2 主要仪器与设备

SW-CJ-1D(实用垂直新颖)单人净化工作台:苏州净化设备有限公司;DK-98-1 电热恒温水浴锅:天津

\* 收稿日期:2009-10-22

作者简介:杨芙莲(1965-),女,陕西省延安市人,教授,硕士,研究方向:功能性食品的研究与开发

市泰新特仪器有限公司; BS323S 电子分析天平:赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; 2×C2A 双目生物显微镜;上海伦捷机电仪表有限公司;KQ-250DE 数控超声波清洗机:昆山市超声仪器有限公司;手提式不锈钢蒸汽消毒器:上海医疗器械有限公司。

1.3 实验方法

经活化后的啤酒酵母菌用无菌水稀释至浓度为  $6.12\times10^8$  个/mL 备用。在 5 个装有 25 mL 酸奶的试管中分别添加蜂胶,配成 0、0.05%、0.1%、0.2%、0.3% 等浓度的酸奶混合液,用保鲜膜封口。再将 5 个试管置于超声波振荡器中震荡摇匀,每组分别加入 5  $\mu$ L 啤酒酵母菌悬液,振荡摇匀,最后用杀菌后的棉塞牛皮纸封口,放入 2  $^{\circ}$ C 冰箱中保藏,定期进行感官评定并测定酸度及酵母菌总数。

酸度的测定采用酸碱滴定法<sup>[7]</sup>,酵母菌数的测定按照国家标准检测方法进行<sup>[8]</sup>。

2 结果与分析

2.1 蜂胶添加量对酸奶酸度的影响

酸奶在 2  $^{\circ}$ C 条件下保存,在保质期第 15 d 测得的酸度为 103.5  $^{\circ}$ T,色泽乳白,气味正常,状态均匀一致。图 1 为蜂胶添加量分别为 0%、0.05%、0.1%、0.2%、0.3% 时酸度变化的曲线图。

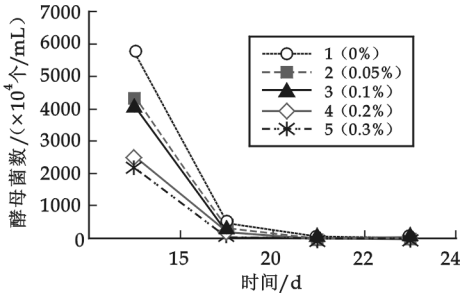
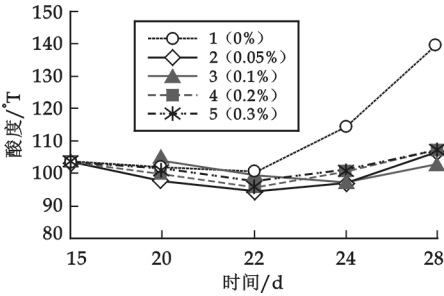


图 1 蜂胶不同添加量下的酸度变化曲线

图 2 蜂胶不同添加量下的酵母菌数变化曲线

由图 1 可知,不添加蜂胶的酸奶在一定期限内其酸度变化比较缓和,但保存期达到 22 d 后酸度变化明显,且迅速升高,导致酸奶变质。而添加蜂胶的酸奶比不添加蜂胶的酸奶酸度变化更为缓和,且蜂胶添加量越多,酸度变化越缓和,保存期也越长。当保存期达到 28 d 时,酸奶仍未变质(正常的酸乳酸度在 70~110  $^{\circ}$ T 之间),说明在酸奶中添加蜂胶对酸奶的保鲜有很好的效果。

2.2 蜂胶添加量对酸奶中酵母菌数的影响

由图 2 可以看出,酸奶在贮藏过程中,乳酸菌作为优势菌种能够抑制啤酒酵母菌等其他杂菌的生长繁殖,添加蜂胶比不添加蜂胶抑制效果更好,且添加量越大对酵母菌的抑制效果越好。

2.3 蜂胶添加量对酸奶各项指标的影响(表 1)

表 1 酸奶保存 24 d 测得的各项指标

编号	蜂胶添加量/%	色泽	状态	气味	酸度/ $^{\circ}$ T	酵母菌数/( $10^6$ 个/mL)	保存期/d
1	0	乳白	乳清析出	淡酒味	114.2	4.86	22
2	0.05	白	均匀一致	正常酸乳味	97.4	3.47	28
3	0.1	微黄	均匀一致	酸乳加微蜂胶味	97.4	1.93	30
4	0.2	微黄	均匀一致	淡蜂胶味	100.4	1.75	31
5	0.3	黄	均匀一致	浓蜂胶味	101.2	0.35	34

由表 1 可知,蜂胶对酵母菌有很好的抑制效果,加入蜂胶组的酸奶保存期延长,且随着加入量的增多保存期也越长。然而,蜂胶的加入会影响酸奶的色泽和气味,随加入量的增多酸奶会呈现出黄色且会混入蜂胶的气味。综合比较,在对酸奶品质影响最小的情况下,以加入浓度为 0.05% 的蜂胶水溶液保鲜效果最好。

### 3 结束语

由上述实验分析可知,酸奶在 2 ℃ 条件下保存,添加蜂胶的酸奶保存期明显延长,且蜂胶的添加量越高,酸度变化越缓和,对酵母菌的抑制作用也越明显,保存期也随之延长.可见,蜂胶具有较强的抑菌及杀菌能力,可作为酸奶的保鲜剂.综合考虑酸奶各项指标要求及原料的成本问题等,以加入浓度为 0.05% 的蜂胶水溶液保鲜效果为好,可将保质期延长 6 d 左右.将蜂胶添加在乳制品中,既可达到食疗的效果,又发挥了其防腐保鲜、抗氧化的作用.蜂胶抑菌谱广,发挥作用受 pH 值影响小,同时还能增加乳品的附加值.我国是养蜂大国,蜂胶资源丰富,用作保鲜剂无需大的设备投入,且投资少、技术简单,比同类产品生产成本低,所以大力开发蜂胶保鲜防腐剂有着极为广阔的应用前景.

### 参考文献

- [1] 付英娟,张建新.蜂胶提取物的抑菌效果研究[J].食品研究与开发,2007,28(5):3-5.
- [2] A Fernandes, JR L Leomil, A A H Fernandes, *et al.* The antibacterial activity of propolis produced by *Apis mellifera* L. and Brazilian stingless bees[J]. J Venom Anim Toxins, 2001, 7(2): 173-182.
- [3] M Popova, S Silici, O Kaftanoglu, *et al.* Antibacterial activity of Turkish propolis and its qualitative and quantitative chemical composition[J]. Phytomedicine, 2005, 12 (3): 221-228.
- [4] SALOMAO K, DANTAS A P, BORBA C M, *et al.* Chemical composition and micorbicidal activity of extracts from Brazilian and Bulgarian propolis[J]. Lett Applt Micorbiol, 2004, 38: 87-92.
- [5] KESKIN N, HAZIR S, BASER K H, *et al.* Antibacterial activity and chemical composition of Turkish propolis [J]. Z Naturforsch, 2001, 56: 112-115.
- [6] 王 翎.草莓酸奶霉菌酵母污染现状及工艺分析[J].食品科学, 1995, (7): 8-12.
- [7] 食品卫生国家标准汇编[M].北京:中国标准出版社, 1989: 401.
- [8] 食品理化检验方法指南[M].北京:北京大学出版社, 1989: 153.

## RESEARCH ON THE PRESERVATIVE EFFECT OF PROPOLIS ON YOGURT

YANG Fu-lian, DANG Yun-gang, ZHU Yuan-na

(School of Life Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The study discussed different concentration of propolis solution with fresh-keeping effect on yogurt which was always neglected about the pollution of microbe in the milk products. The results of the experiment showed that, the greater concentration of propolis solution, the better antibacterial activity about yeast in yogurt, meanwhile, having bitter preservation effect to yogurt. Adding the propolis solution of 0.05% can confirm the self-quality of yogurt while extending the storage time. So propolis is a natural preservative of food, and this essay provided theoretical reference for application in kinds of milk products preservation.

**Key words:** propolis; yogurt; preservative



\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0043-04

# 木枣低温贮藏过程中品质变化规律的研究

许牡丹, 曾令军, 刘红梅

(陕西科技大学生命科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**研究了木枣在 4 ℃、相对湿度 95% 的低温条件下贮藏期间贮藏品质的变化. 实验结果表明木枣在贮藏 60 d 软果率达到 46.5%, 有机酸含量较鲜枣上升了 14.3%, 总糖含量由 22.4% 下降至 18.05%, Vc 含量为 298.56 mg/100 g, 而乙醇含量则达到 0.24%.

**关键词:**木枣; 低温; 贮藏品质

**中图分类号:**TS255.3

**文献标识码:**A

## 0 引言

枣系中国的特色果品,集药、食、补于一体,具有很高的功能价值和开发前景,但是枣含有约 80% 的水分,不易保存. 据近十年资料统计,鲜枣每年因腐烂而损失的数量高达 20%~30%. 木枣主要分布于陕西省榆林地区和山西省吕梁地区黄河沿岸,为当地主栽品种,栽培面积也仅次于金丝小枣,年产鲜枣  $1.3 \times 10^8$  kg 以上<sup>[1]</sup>,由于产量大导致木枣的贮藏存在问题. 冷藏是绝大多数果蔬贮藏保鲜的基础贮藏方式,本文就木枣在低温下贮藏的品质变化进行了研究,以期延长木枣的加工期提供参考数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

(1)鲜枣:陕西省佳县木枣.

(2)包装材料:PE 保鲜袋,厚度为 0.03 mm.

(3)药品与试剂:2,6-二氯靛酚(美国 Sigma 公司)、重铬酸钾(天津市福晨化学试剂厂)、硫酸铜(天津市舜明化学试剂厂)、邻苯二胺(广州科伦化玻仪器有限公司)、抗坏血酸(陕西西安化玻站化学厂)、硫代硫酸钠(西安化学试剂厂)、碘化钾(天津天泰精细化学品有限公司)等,以上试剂均为分析纯.

### 1.2 仪器与设备

GY-1 水果硬度计(浙江乐清市艾力仪器有限公司)、BS224s 电子天平(北京赛多利斯仪器系统有限公司).

### 1.3 实验方法

实验木枣于 2008 年 10 月 9 日上午手工采于陕西榆林佳县黄河滩,为完熟期全红枣,果柄保存完好. 木枣用厚度 0.03 mm 的 PE 保鲜袋免口包装,每袋装果 1.5 kg,重复 5 次,置于 +2 ℃、相对湿度 95% 条件下贮藏 60 d. 贮藏期间每隔 10 d 测试木枣硬度、果肉褐变指数、总糖、总酸、Vc 含量、乙醇含量、腐烂率、软果率等.

### 1.4 检测方法

(1)硬度:GY-1 型硬度计法.

\* 收稿日期:2009-09-28

作者简介:许牡丹(1963—),女,陕西省泾阳县人,教授,硕士,研究方向:农产品加工与贮藏  
基金项目:陕西省科技攻关项目(2008K03—15)

- (2)总糖:直接滴定法.
- (3)Vc:荧光法.
- (4)总酸:直接滴定法.
- (5)乙醇含量:重铬酸钾氧化法<sup>[2]</sup>.
- (6)果肉褐变指数:按果肉的颜色进行分级,分级标准如下:浅绿色(0级),白绿色(1级),浅黄色(2级),褐色(3级). 每次取果 10 个,褐变指数 =  $\frac{\sum \text{颜色级别} \times \text{该级别果数}}{\text{褐变最高级别} \times \text{调查总果数}}$ , 每次随机抽查 20 颗枣.
- (7)软果率:已具有酒味或表面皱缩的枣果占所调查果的比例.
- (8)腐烂指数:每次随机取 100 个木枣,按果实表面腐烂的面积分 5 级,结果见表 1.

表 1 木枣腐烂等级划分

腐烂等级	等级描述
0 级	果面无腐烂
1 级	腐烂面积<1/4 果面
2 级	腐烂面积(1/4 ,1/2)果面
3 级	腐烂面积(1/2,3/4)果面
4 级	腐烂面积>3/4 果面

腐烂指数 =  $\frac{\sum (\text{腐烂级别} \times \text{该级别果数})}{\text{腐烂最高级别} \times \text{调查总果数}} \times 100$

2 结果与讨论

2.1 木枣贮藏过程中感官性状变化

枣在贮藏过程的成熟衰老通过感官变化表现出来,其硬度会因原果胶、纤维素等的水解而不断下降;果肉的色泽由于叶绿素的不断降解及多酚氧化酶催化酚类物质不断形成褐变产物而使果肉颜色不断褐变. 枣极易失水,发生乙醇积累,外观上表现为果皮皱缩,闻起来有酒味,同时由于不断衰老,抵抗微生物侵入的能力也会下降,从而发生霉变腐烂. 因此,用硬度、褐变指数、软果率、腐烂指数这几个指标即可反映枣衰老的程度,并可以从感官上判断枣贮藏效果的好坏.

表 2 木枣贮藏过程中的感官性状变化

感官指标	贮藏天数/d						
	0	10	20	30	40	50	60
硬度/10 <sup>5</sup> Pa	14.3	13.8	13.1	12.3	10.4	9.2	7.3
褐变指数	0	0.05	0.12	0.23	0.35	0.55	0.72
软果率/%	0	0	2.5	10	22.5	35	46.5
腐烂指数	0	0	0	2.5	3	9.5	17

从表 2 可以看出,枣的硬度随着贮藏时间的延长而逐渐下降. 在贮藏的前 30 d 内,木枣的硬度下降相对缓慢,之后迅速下降. 褐变指数与硬度变化类似,在低温贮藏的前期变化幅度较小,从 30 d 之后变化幅度开始增大,贮藏结束时褐变指数达到 0.72. 软果率从第 20 d 开始就迅速增加,贮藏结束时软果率高达 46.5%. 木枣的腐烂指数在贮藏 40 d 后迅速上升,但到贮藏结束时腐烂指数并不高,仅为 17,这可能是由于实验用枣为手工采摘,带有果柄,无机械伤,再加上木枣的果皮相对比较厚,不容易被微生物感染.

2.2 木枣贮藏过程中总糖的变化

红枣总糖包括半乳糖、鼠李糖、葡萄糖及蔗糖等. 红枣总糖含量在贮藏过程中是一个动态的变化过程,会因枣的呼吸作用而消耗一部分糖,也会因淀粉等多糖在贮藏过程水解而补充一部分. 木枣低温贮藏过程中的总糖变化情况如图 1 所示.

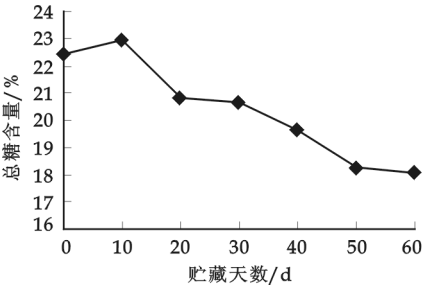


图 1 木枣总糖含量的变化

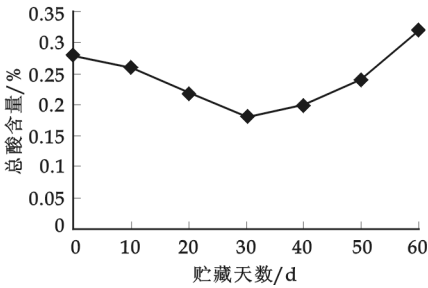


图 2 木枣总酸含量的变化

从图 1 可以看出,在贮藏的前 10 d,木枣的总糖含量有所上升,这可能是枣中淀粉、纤维素等水解为单糖的量大于枣呼吸所消耗的糖的量. 10 d 之后,果实中的单糖不断被消耗,而消耗的部分不足以通过淀



粉、纤维素等水解为糖来补充,因此总糖含量不断下降.到贮藏结束时,枣中总糖含量下降到 18.05%.

### 2.3 木枣贮藏过程总酸的变化

鲜枣主要含有苹果酸、柠檬酸、*t*-顺乌头酸、琥珀酸、延胡索酸等有机酸.在贮藏过程中,这些酸参与到三羧酸循环中,从而不断被消耗.木枣低温贮藏过程中总酸变化情况如图 2 所示.

从图 2 可以看出,在贮藏的前 30 d,木枣总酸的含量逐渐下降,之后又缓慢地上升,贮藏 50~60 d 又有一个明显的上升,贮藏结束时总酸含量反而比开始时高出了 14.3%.翟金兰<sup>[3]</sup>等在研究新疆冬枣低温贮藏品质的变化时也发现其可滴定酸含量出现了较大回升的现象.孙丽娜<sup>[4]</sup>发现冬枣的丙酮酸含量在低温冷藏过程中是逐渐升高的,此外果蔬会因无氧呼吸而产生乳酸,因此本实验中木枣贮藏 30 d 后有机酸含量呈上升趋势,很可能是由于其中丙酮酸或是乳酸上升造成的.

### 2.4 木枣贮藏过程中 Vc 的变化

枣中 Vc 含量丰富,居所有栽培水果之首,有“Vc 之王”的美称,而 Vc 在果蔬中易氧化降解.木枣低温贮藏过程中 Vc 含量的变化如图 3 所示.

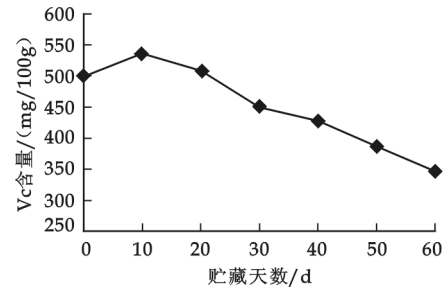


图 3 木枣 Vc 含量的变化

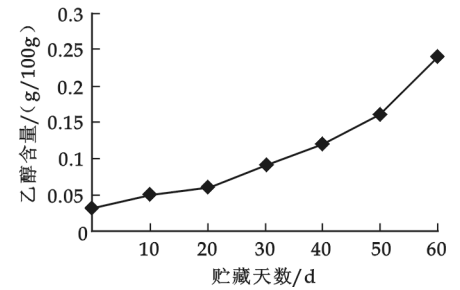


图 4 木枣乙醇含量的变化

从图 3 可以看出,在贮藏的第 10 d 木枣的 Vc 含量比开始增长了 6.8%,之后随着贮藏期的延长,木枣的 Vc 含量不断下降.到贮藏结束时,木枣的 Vc 含量下降了 30.5%.在贮藏前期和后期木枣的 Vc 含量下降相对缓慢,这可能与枣中有机酸含量后期有所上升有关,因为 Vc 在酸性的环境下下降相对稳定,与有机酸的种类关系不大<sup>[5]</sup>.

### 2.5 木枣贮藏过程中乙醇含量的变化

许多研究表明,枣在贮藏中最容易发生的问题就是枣由于果肉结构紧密,在贮藏过程中容易发生无氧呼吸而产生乙醇.木枣低温贮藏过程中乙醇含量的变化如图 4 所示.

从图 4 可以看出,木枣的乙醇含量随着贮藏期的延长而增高,在贮藏的前 30 d,乙醇的含量增长缓慢,之后则迅速增加,在贮藏后期乙醇含量高达 0.24%.本实验乙醇含量在贮藏 30 d 时明显增加,这和总酸含量上升相一致.前面的分析表明枣中总酸含量的上升可能是丙酮酸或乳酸含量上升所致,而乳酸和乙醇都是枣无氧呼吸的产物,这说明从第 30 d 开始枣发生了无氧呼吸.从贮藏过程中木枣乙醇含量与其他枣乙醇含量的比较来看,木枣的乙醇含量明显高于其他枣,这说明木枣在贮藏过程中更容易发生无氧呼吸.

## 3 结束语

木枣在本实验过程中腐烂率低,但很容易发生失水皱缩,果肉褐变,在储藏后期容易发生无氧呼吸,产生乙醇积累.贮藏 60 d 软果率达到 46.5%,在贮藏结束时其有机酸含量较鲜枣上升了 14.3%,总糖含量由 22.4%下降至 18.05%,Vc 含量依然有 298.56 mg/100 g,而乙醇含量则达到 0.24%.以上结果可以为木枣的加工和保鲜提供一些参考数据.

## 参考文献

[1] 王文生,姬迁龙,杨绍艳.山西临县木枣贮藏保鲜试验研究[J].保鲜与加工,2007,41(4):16-18.

- [2] 陈锦屏,刘兴华.果品保鲜贮藏[M]. 西安:陕西科学出版社,1986.
- [3] 翟金兰,周 红,杨艳彬,等.新疆冬枣低温贮藏过程中品质的变化研究[J]. 食品科技,2008,(5):415-418.
- [4] 孙丽娜,刘孟臣,朱树华,等.一氧化氮处理对冬枣贮藏期间乙醇代谢及相关品质的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(12): 27-28.
- [5] 都凤华,田兰英,王 晶,等.沙棘汁中维生素 C 稳定性的研究[J]. 食品工业科技,2005,27(1):81-83.

## STUDY OF CHANGES IN THE QUALITY OF MUZAO JUJUBE UNDER LOW TEMPERATURE

XU Mu-dan, ZENG Ling-jun, LIU Hong-mei

(School of Life Science and Technology, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The study of changes in the quality of Muzao jujube under 4 °C temperature and 95% relative humidity has been carried out. The result shows that the soft rate of Muzao jujube was 46.5% at 60 d, organic acid content increased by 14.3% compared with fresh dates, the total sugar content decreased from 22.4% to 18.05%, Vc content was 298.56 mg/100 g, while the ethanol content was up to 0.24%.

**Key words:** Muzao jujube; storage under low temperature; quality

(上接第 31 页)

- [4] Kobayashi, Y., Matsuo, I. Cellulose Chem[J]. Technol., 1981,(15):649.
- [5] Noe, P., Chevalier, J., Mora, F., *et al.* Action of xylanases on chemical pulp fibres part II. Enzymatic beating[J]. Wood Chem., 1986,6(2):167.
- [6] Bhardwaj, N. K., Bajpai, P., Bajpai, P. K. Use of enzymes to improve drainability of secondary fibres[J]. APPITA, 1995,48(5): 378.

## IMPACT OF BEATABILITY OF HARDWOOD PULP BY CELLULASE ENZYME TREATMENT

LIU Shan-shan<sup>1</sup>, XU Yong-jian<sup>1</sup>, WANG Zhi-jie<sup>1</sup>, FU Ying-juan<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper, School of Papermaking Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Provincial Key Discipline of Pulp and Papermaking, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250353, China)

**Abstract:** The impact of beatability of bleached hardwood pulp by cellulase enzyme beating was studied in this article. The results showed that the beating degree was improved at the same revolutions with hardwood pulp dealt with Novozym476, the beating degree increased 7.3% when the beating revolution was 30 000. With the same beating revolution, the breaking factor length, tear index and burst index of the pulp with cellulase enzyme treatment decreased, but the bulkiness increased.

**Key words:** cellulase; beating degree; beatability

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0047-03

# 米曲霉降解牛乳中乳糖的研究

徐娟, 吕嘉枋, 杨帆

(陕西科技大学生命科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**以牛乳为原料,通过米曲霉的发酵降解乳糖,实验得出的米曲霉在牛乳中的最适培养条件为:接种量3%,温度 $28\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,装液量30 mL/250 mL,培养箱转速180 r/min,发酵60 h.在此条件下培养,米曲霉发酵液中乳糖分解率可达31.4%,米曲霉粗酶液乳糖分解率可达41.4%~55.0%.通过对发酵乳中乳糖组成进行薄层层析分析,也证明米曲霉可降解乳糖.

**关键词:**米曲霉;牛乳;乳糖分解率

**中图分类号:**Q555<sup>+</sup>4

**文献标识码:**A

## 0 引言

牛乳中的主要碳水化合物是乳糖,世界上有相当大的人群属乳糖不耐症,因此开发低乳糖牛乳对于满足乳糖不耐症人群的乳品消费需求和促进我国乳品工业的发展有重要意义.近几十年来,已经对 $\beta$ -半乳糖苷酶的水解特性进行了广泛研究,如用 $\beta$ -半乳糖苷酶水解乳糖生产低乳糖牛奶,并且有报道在低乳糖牛奶中发现了有特殊生理功能物质的存在<sup>[1,2]</sup>,如低能量、可调节肠道菌群平衡、抗衰老等等,这些生理功能使得低聚半乳糖的酶法生产越来越受到重视.水解牛奶比普通牛奶更具优点,如可改善口味、提高营养价值,因此对牛奶中的乳糖进行水解具有非常重要的意义.本文利用米曲霉降解牛乳中的乳糖,以期通过微生物发酵的方法降解牛乳中的乳糖,生产出适合乳糖不耐症人群的乳产品.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

- (1)菌种:米曲霉(*Aspergillus oryzae*),由陕西科技大学生命科学与工程学院微生物菌种室提供.
- (2)市售鲜牛乳:符合GB 377-87质量要求.
- (3)主要仪器设备:HZA-F160 震荡培养箱(哈尔滨市东联电子技术开发有限公司);乳成份分析仪(德国GERBER公司);TG-S1型通风柜(杨凌天工实业有限公司)等.
- (4)主要试剂:乳糖标准品、D-葡萄糖、D-半乳糖等,均为分析纯.

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 孢子发芽率的测定<sup>[3]</sup>

按ST/T 10316-1999方法测定.

#### 1.2.2 菌种活化与菌悬液制备

将米曲霉接种到斜面培养基上于 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养一周,孢子长成黄绿色.用无菌生理盐水洗下孢子,并将其浓度调整为 $10^7$ 个/mL.

#### 1.2.3 摇瓶发酵

分别将菌悬液按3%(v/v)的量接种到30 mL发酵培养基中(250 mL三角瓶),于 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、180 r/min培

\* 收稿日期:2009-09-13

作者简介:徐娟(1985—),女,山东省菏泽市人,在读硕士生,研究方向:生物化工

养 60 h.

1.2.4 牛乳中乳糖含量的测定

- (1) 牛乳样品处理:在 250 mL 三角瓶中装新鲜牛乳 30 mL,115 ℃ 灭菌 10~15 min,备用.
- (2) 牛乳中乳糖含量的测定:用乳成分分析仪测定.
- (3) 发酵乳中乳糖含量的测定及乳糖标准曲线的绘制<sup>[4]</sup>:按 SN/T0871-2000 方法测定.

1.2.5 发酵液中糖组成的分析

采用薄层层析法分析<sup>[5,6]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 孢子发芽率的测定

测定结果如图 1 所示.由图 1 可以看出,米曲霉孢子在 6 h 内几乎全部发芽,发芽率达 98%,说明实验中所用米曲霉符合实验要求.

2.2 乳糖标准曲线的绘制

实验测得的乳糖质量浓度-吸光度标准曲线如图 2 所示.

2.3 米曲霉对鲜乳及发酵乳中乳糖含量的影响

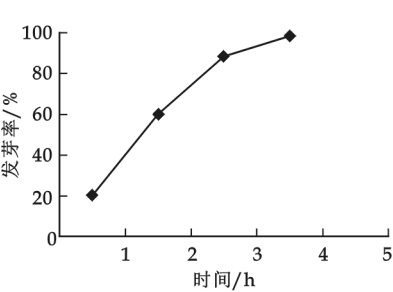


图 1 米曲霉孢子发芽率测定结果

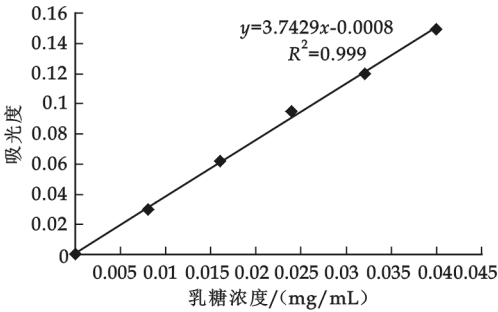


图 2 标准曲线

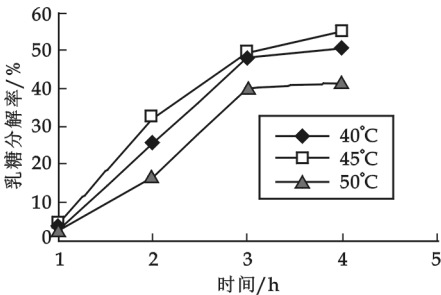


图 3 不同酶解温度下乳糖分解率与时间的关系曲线

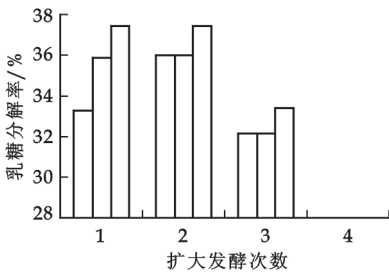


图 4 3 次扩大发酵的结果

1. 标准样(a. 标准葡萄糖,b. 标准半乳糖,c. 标准乳糖),2. 牛乳样品,3. 发酵 6 h 后的牛乳,4. 发酵后继续升温的发酵样品

表 1 乳糖含量表

组别	1	2	3
牛乳乳糖含量/%	5.02	5.02	4.95
发酵乳乳糖含量/%	3.41	3.40	3.51

在 250 mL 三角瓶中装入 30 mL 经过 115 ℃ 灭菌 10~15 min 的新鲜牛乳,待牛乳冷却至 30 ℃ 左右接入米曲霉菌悬液,接种量为 3%,摇床转速为 180 r/min,在 28 ℃ ± 1 ℃ 下发酵 60 h,测定乳糖含量.平行测 3 次.

通过这种方法测定牛乳中乳糖的含量与乳成份分析仪测定(乳糖含量约为 5.03%)结果差别不大.经过计算,牛乳中乳糖含量为 5%,经 60 h 发酵后牛乳中的乳糖含

量为 3.44%，所以乳糖分解率为 31.4%。

2.4 粗酶液对乳糖的降解

在 250 mL 三角瓶中装入 30 mL 经过 115 ℃ 灭菌 10~15 min 的新鲜牛乳，待牛乳冷却至 30 ℃ 左右接入米曲霉菌悬液，接种量为 3%，摇床转速为 180 r/min，在 28 ℃ ± 1 ℃ 下发酵 60 h。然后滤掉菌丝体，将滤液作为粗酶液，将 5 mL 粗酶液加入 50 mL 灭菌后的牛乳中，分别在 40 ℃ ± 2 ℃，45 ℃ ± 2 ℃，50 ℃ ± 2 ℃ 下每隔 2 h 测定一次乳糖含量，结果如图 3 所示。

微生物的生命活动是由一系列的生物化学反应组成的，而这些化学反应受温度的影响又极其明显，因此微生物的生长均有其特定的温度范围，在适宜温度范围内培养微生物能够促进其生长和代谢活动。由图 3 并经过计算可以得出粗酶液在 45 ℃ ± 2 ℃ 时经过 8 h 降解，乳糖分解率最高可以达到 55.0%，说明 β-半乳糖苷酶的最适反应温度为 45 ℃。这可能是由于温度过低菌株生长不适，使乳糖酶产量降低；而温度过高则影响菌株代谢使孢子数减少，同时影响乳糖酶的稳定性，导致酶活力下降。

2.5 扩大发酵

将培养好的菌丝体及发酵液按一定的量加入经 115 ℃ 灭菌 10~15 min 的新鲜牛乳中，进行扩大发酵。本实验设计了 3 次扩大培养，第一次扩大发酵采用 500 mL 三角瓶，装液量为 120 mL，接种量为 6% (v/v)；第二次扩大发酵采用 1 000 mL 三角瓶，装液量为 220 mL，接种量为 6% (v/v)；第三次扩大发酵采用 3 000 mL 三角瓶，装液量为 600 mL，接种量为 6%。测定乳糖分解率，结果如图 4、图 5 所示。

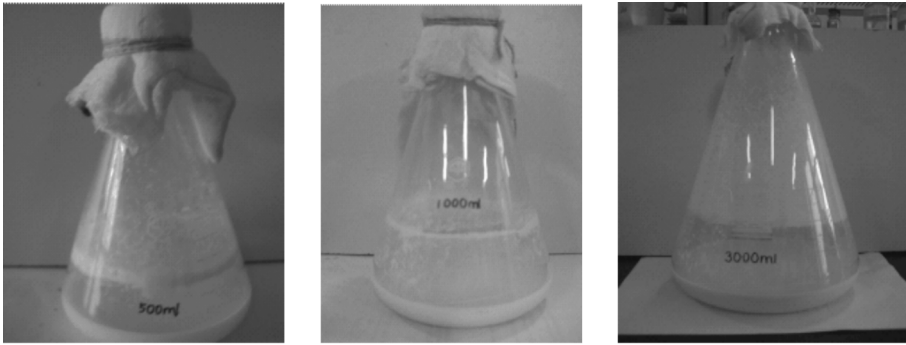


图 5 3 次扩大发酵的发酵液

由图 4、图 5 可知，本实验通过 3 次扩大发酵，发现米曲霉在牛乳中生长正常，获得了代谢旺盛、数量足够的种子，说明米曲霉可以作为发酵牛乳的菌种，该工艺条件适合于扩大化生产。

2.6 鲜乳及发酵液中单糖的变化

通过薄层层析分析新鲜牛乳、发酵 60 h 后的牛乳以及经 60 h 发酵后继续升温至 50 ℃ 时的发酵乳中单糖的变化，结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出，牛乳中只有乳糖，牛乳经米曲霉发酵 60 h 后仍然能看到乳糖的点，当升温发酵后可以看到有葡萄糖和半乳糖的点出现。这可能是由于升温后米曲霉停止了生长，在液态培养过程中分泌的 β-半乳糖苷酶发挥作用，将乳糖分解为葡萄糖和半乳糖。由此可见米曲霉能降解牛乳中的乳糖，可用于生产低乳糖乳。

3 结束语

本文研究了米曲霉对牛乳中的乳糖降解情况，乳糖分解率可达 31.4%，并进行了粗酶液降解乳糖实验，乳糖分解率最高可以达到 55.0%；通过薄层分析可以看出，升温发酵后有葡萄糖和半乳糖的点出现，说明可用微生物发酵法降解乳糖，这有助于解决我国目前因使用进口昂贵的乳糖酶而严重制约了低乳糖乳大规模生产的问题<sup>[7]</sup>。

(下转第 53 页)

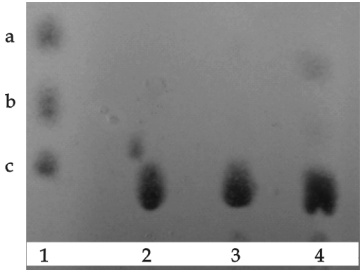


图 6 单糖薄层分析结果

1. 标准样(a. 标准葡萄糖, b. 标准半乳糖, c. 标准乳糖), 2. 牛乳样品, 3. 发酵 60 h 后的牛乳, 4. 发酵后继续升温的发酵样品

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0050-04

# 膜分离技术在谷氨酸分离与浓缩中的应用

邵文尧, 陈亚兰, 陈成泉  
(厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005)

**摘 要:**简要介绍了谷氨酸传统发酵工艺中存在的问题以及膜分离技术,研究了超滤膜与纳滤膜分离技术在谷氨酸发酵液去除蛋白及菌丝体过程中的应用,通过对超滤膜通量、超滤膜质量、废液的排放情况以及超滤系统工艺的适应性、超滤浓缩倍数和滤渣含水量、超滤收率、系统的可恢复性能、纳滤浓缩情况等指标的综合研究,同时综合考虑经济效益和环保效益,得出了超滤膜及纳滤膜分离技术在对谷氨酸提取工艺改进方面具备可行性的结论。

**关键词:**膜分离; 谷氨酸; 膜通量; 死端过滤; 纳滤膜

**中图分类号:**TQ028.8      **文献标识码:**A

## 0 引言

发酵法生产谷氨酸钠是国内外普遍使用的一种方法,谷氨酸发酵液中主要包括谷氨酸、无机离子、菌体、蛋白、发酵代谢产物、铵离子和残糖等<sup>[1]</sup>.国内味精厂从发酵液中提取谷氨酸时一般受目前已有的设备和工艺的限制,并不先分离菌体,而直接从含有菌体和蛋白质的发酵液中提取谷氨酸.由于发酵液中存在的菌体不利于谷氨酸结晶的分离,所以都存在着收率难以提高、质量不易控制、废水污染严重的缺点<sup>[2]</sup>.传统的工艺流程如图1所示.

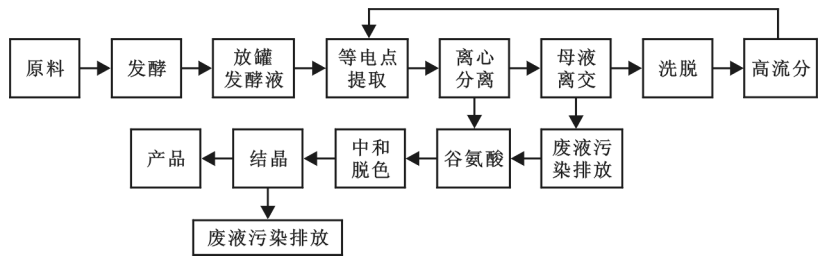


图1 传统味精提取工艺流程图

若能将发酵液中菌体和蛋白预先分离,就可降低发酵液黏度和杂质的含量,从而有利于谷氨酸发酵液的浓缩纯化和结晶分离,提高产品收率和纯度,同时分离出的菌体和蛋白由于未受污染可烘干用作饲料,或者进一步用于制造核苷酸制品等.传统的分离方法主要有高速离心机分离、加垫沉淀和添加絮凝剂的方法,但它们都存在着各种缺陷,而难以推广,为此我们采用膜分离技术对谷氨酸提取工艺进行了改进.

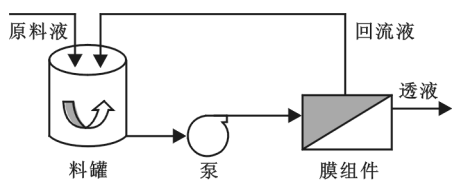


图2 膜分离操作基本工艺流程

膜是具有选择性分离功能的材料.利用膜的选择性分离实现料液不同组分的分离、纯化、浓缩的过程称作膜分离.根据其

\* 收稿日期:2009-09-25  
作者简介:邵文尧(1980—),男,福建省厦门市人,工程师,在读硕士生,研究方向:膜分离工程和发酵工程

孔径的不同(或称为截留分子量 NWCO),可将膜分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜和反渗透膜等<sup>[3-5]</sup>. 根据其构件的不同,可分为平板膜、卷式膜、管式膜<sup>[6]</sup>.

膜分离的基本工艺原理较为简单(见图 2),它与传统死端过滤的不同在于膜分离是一种错流过滤,过滤介质平行通过膜,在过滤过程中料液通过泵的加压以一定流速沿着滤膜的表面流过,大于膜截留分子量的物质分子不透过膜流回料罐,形成回流液,小于膜截留分子量的物质或分子透过膜,形成透析液,因此膜系统都有两个出口,一个是回流液(浓缩液)出口,另一个是透析液出口. 在单位时间(h)单位膜面积( $\text{m}^2$ )透析液流出的量(L)称为膜通量(LMH),即过滤速度.

1 实验材料与方法

1.1 实验仪器与材料

平板超滤膜、纳滤膜(美国某公司提供,配备膜芯)、谷氨酸发酵液(福建某味精厂提供).

1.2 实验方法

用超滤设备对一定量的发酵液进行过滤分离,过滤后剩下的滤渣用适量水分几次清洗,透过液由纳滤设备进行浓缩,流程如图 3 所示.

2 实验结果与分析

2.1 实验结果如表 1~表 5 所示实验数据

2.2 数据分析

(1)超滤膜通量:影响膜通量的因素主要有料液含固量、粘度、操作条件(特别是操作温度),一般其膜通量为 50~200 LMH. 如操作温度为 32 ℃时膜通量为 90 LMH;当温度上升到 50 ℃后膜通量可达到 150 LMH,可见操作温度的影响很大. 实验中 4 批次平均膜通量在 150 LMH 左右(温度 60 ℃).

(2)超滤滤液质量:从滤液直接调等电点结晶来看,产品质量明显好于常规工艺得到的晶体,晶体白色且饱满,纯度上升.

(3)废液排放情况:全流程实现了无废液操作,与传统工艺的大量废液污染排放有着明显差别.

(4)超滤浓缩倍数和滤渣含水量:浓缩倍数达 20~30 倍,滤渣含水达 76.9%~80%.

(5)超滤系统工艺适应性:超滤膜分离完全能适应谷氨酸发酵液过滤,存在主要的问题是谷氨酸发酵液在放罐后放置太久会发生“酸倒降”. 若把谷氨酸发酵液放罐加热到 60 ℃再用超滤系统过滤,则在操作时间 5.5 h 内,谷氨酸

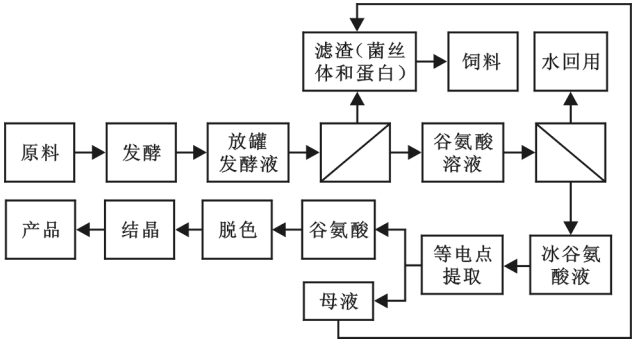


图 3 用膜分离技术对谷氨酸的分离和浓缩工艺流程图

表 1 谷氨酸发酵液超滤实验数据(批次 1)

料液	体积 /L	含酸量 /kg	加水量 /L	收率(以滤 液计)/%	平均操作 温度/℃	平均膜通 量/LMH
发酵液	300	8.71				
加水	10					
滤液	273	9.09	10	96.72	64	183
洗渣液	7	6.54				
滤渣	20	5.54				

表 2 谷氨酸发酵液超滤实验数据(批次 2)

料液	体积 /L	含酸量 /kg	加水量 /L	收率(以滤 液计)/%	平均操作 温度/℃	平均膜通 量/LMH
发酵液	290	8.52				
滤液	270	8.66				
洗渣液			0	94.63	60	150
滤渣	20	8.13				

注:滤渣没有用水冲洗,滤渣中酸量达 6.58%.

含量没有明显下降,说明对谷氨酸发酵液进行加温处理可以有效抑制谷氨酸含量的下降,并能提高过滤速



度.

表 3 谷氨酸发酵液超滤实验数据(批次 3)

料液	体积 /L	含酸量 /kg	加水量 /L	收率(以滤 液计)/%	平均操作 温度/℃	平均膜通 量/LMH
发酵液	600	8.58				
滤液	575	8.61				
洗渣液	45	3.76	40	99.64	62	164
滤渣	20	3.23				

表 4 谷氨酸发酵液超滤实验数据(批次 4)

料液	体积 /L	含酸量 /kg	加水量 /L	收率(以滤 液计)/%	平均操作 温度/℃	平均膜通 量/LMH
发酵液	164.9	8.67				
滤液	135	8.61				
洗渣液	30.2	6.24	0	94.5%	58	135
滤渣	20					

注:料液太少,滤渣中损失量大.

表 5 纳滤浓缩实验数据

超滤透 析液	平均操作 温度/℃	操作压力(进/ 出压力)/ $\times 10^5$ Pa	平均膜通 量/LMH	浓缩 倍数	加水 倍数
批次 1	28	36/28	95.0	1.4	5.0
批次 2	34	49/44	73.0	2.0	6.0
批次 3	40	44/38	145.0	2.0	4.3
批次 4	25	34/27	72.0	1.5	6.2

了产品的质量.

3.2 从环保效益来看

超滤和纳滤系统能实现谷氨酸提取工艺的废水零排放,若只用超滤系统,也能最大限度地减少菌丝体、蛋白、谷氨酸的排放,使废液中的 COD、BOD 大大下降.

(6)超滤收率:实验表明,料液量大,则可减少滤渣中酸量损失的影响.在正常工业生产中,料液量都很大,基本可控制滤渣中酸量损失的影响,收率一般都在 99%以上.

(7)系统的可恢复性能:超滤系统在每一批次生产结束后,只需经过简单的清洗,即配制一定量的清洗剂,在 50℃时循环,清洗 30~60 min,膜的水通量即可得到恢复,说明系统具有良好的可恢复性能.

(8)纳滤浓缩情况:平均膜通量约为 60~70 LMH,色素脱出率在 50%左右,酸量损失 1%以下.

3 结论

3.1 从经济效益看

超滤系统可变废为宝,充分利用菌丝体和蛋白作为动物饲料,也减少了废液的排放和排污费的支出,同时谷氨酸滤液质量明显提高,可大大提高一步等电结晶收率,约可提高 50%.滤液质量的提高,能得到理想的  $\alpha$ -型结晶,提高

参考文献

[1] 冯容保.发酵谷氨酸生产新工艺对比[J].发酵科技通讯,2003,(1):28-29.  
[2] 李华玮,苏庆辉.谷氨酸生产行业现状综合分析[J].农产品加工·学刊,2005,(8):11-3.  
[3] 张 雯.膜分离技术简介[J].化工设计,1996,(4):14-19.  
[4] 王佳基.膜分离技术及其工业化[J].化学世界,1994,(7):341-344.  
[5] 严希康.膜分离技术及其在生物工程中的应用[J].中国医药工业杂志,1995,26(10):472-478.  
[6] 王 熊,郭 宏.高新技术在现代食品工业中的应用——膜分离技术[J].食品科学,1998,19(10):4-6.

APPLICATION OF MEMBRANE SEPARATION TECHNOLOGY  
IN SEPARATION AND CONCENTRATION OF GLUTANIC ACID

SHAO Wen-yao, CHEN Ya-lan, CHEN Cheng-quan

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** It was given the problems in the tradition fermentation of glutamic acid and an out-



line of membrane separation technique, studied the application of ultrafiltration membrane and nanofiltration membrane separation technologies in the fermentation broth of glutamic acid on deleting protein and mycelium. By the studies of those index: membrane flux, quality, the discharge of waste liquor, the suitability of ultra filtration system techniques, cycle of concentration moisture content of the cake, the yield of ultra filtration, the restorability of the system, the concentration of nanofiltration. While from the aspects of economic and environmental benefits, it found that ultra filtration and nanofiltration membrane separation technologies on the extraction of glutamic acid with the feasibility of improvement.

**Key words:** membrane separation; glutamic acid; membrane flux; dead-end filtration; nanofiltration membrane

(上接第 49 页)

### 参考文献

- [1] 陈洪兴. 乳糖和乳糖不耐症[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2002, 1(3): 32-33.
- [2] 李玉强. 米曲霉  $\beta$ -半乳糖苷酶的性质及其水解作用[J]. 中国食品添加剂, 2002, (11): 34-37.
- [3] ST/T 10316-1999: 孢子发芽率的测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [4] SN/T 0871-2000: 进出口乳及乳制品中乳糖的测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [5] 张惟杰. 糖复合物生化研究技术(第二版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [6] 章育中, 郭希升. 薄层层析法和薄层扫描法[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1990.
- [7] 孙国庆, 康小红, 胡新宇, 等. 不同来源乳糖酶在液体奶中的应用研究[J]. 农产品加工, 2008, (2): 88-89.

## STUDY ON THE DEGRADATION OF LACTOSE IN THE MILK BY *ASPERGILLUS ORYZAE*

XU Juan, LV Jia-li, YANG Fan

(School of Life Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Using the milk as testing material, degradation of lactose by the fermentation of *Aspergillus oryzae*, the cultural conditions were: inoculation size 3%, at a temperature of  $28^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , medium volume 30 mL/250 mL, shake flask, 180 r/min and fermentation 60 h. Under these conditions, the hydrolysis rate of lactase from fermentation can reach on 31.4%; through the degradation of crude extract of *Aspergillus oryzae*, hydrolysis rate of lactose can reach on 41.4%~55.0%. The composition of milk lactose by fermentation using thin-layer chromatography analysis, but also explain biodegradable lactose.

**Key words:** *Aspergillus oryzae*; raw milk; hydrolysis rate of lactase

# 白腐真菌对造纸黑液脱色效果的研究

李海红, 同 帆, 龚文姣

(西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**脱色是造纸废黑液处理工艺中的一个重要环节,作者应用白腐真菌对造纸黑液进行了脱色处理,探讨了影响脱色效果的因子,并确定出最佳脱色条件.白腐真菌系从自然界腐朽木材上分离和纯化培养得到,研究了木质素溶液质量浓度(污染负荷)、pH 值、搅拌速度、碳源和氮源质量浓度、 $[\text{Fe}^{2+}]$ 质量浓度变化对造纸黑液脱色效果的影响.实验确定的白腐真菌对造纸黑液脱色的最佳条件为:木质素质量浓度为 153 mg/L, pH 为 5 左右,搅拌速度为 250 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L,  $[\text{Fe}^{2+}]$ 质量浓度为 0.08 mg/L,在此条件下白腐真菌对造纸黑液的脱色率最高可达 65%.

**关键词:**白腐真菌; 脱色率; 造纸黑液

**中图分类号:**X793

**文献标识码:**A

## 0 引言

造纸工业是工业水污染的主要行业之一,环境工程上对造纸废水处理的难点是造纸黑液色度的去除,此部分占污染物总负荷的 90%左右<sup>[1]</sup>,因此往往将降低其色度作为衡量处理效果的一项重要指标.造纸黑液的主要成分是木质素,这是一种天然高分子聚合物,结构极其复杂.在众多的处理方法中,生物降解法正逐渐被人们重视.

白腐真菌作为自然界中降解木质素能力最强的一类微生物,其在处理各种造纸废水、印染废水和降解复杂有机物方面的优势越来越引起人们的广泛关注<sup>[2]</sup>.尤其在降解木质素方面,白腐真菌可通过自身分泌的各种胞外酶,并通过一系列的自由基链式反应来实现对复杂有机物的降解<sup>[3]</sup>.目前对白腐真菌降解有机废水的研究多集中于漂白废水<sup>[4]</sup>,而对利用其降解造纸黑液中木质素的研究较少.本研究对影响白腐真菌对造纸黑液脱色效果的一系列因素进行了分析,以期用白腐真菌处理造纸黑液中相关工艺条件参数的选择提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及仪器

原水取自西安周边造纸厂蒸煮黑液, pH 为 13.

主要试验仪器:PYX-DHSP50×65 隔水式电热恒温培养箱(上海市跃进医疗器械一厂),Motic SFC-18 光学显微镜(麦克迪实业集团有限公司),DHG-9247A 电热恒温干燥箱(上海精宏试验设备有限公司),

\* 收稿日期:2009-10-04

作者简介:李海红(1971—),女,陕西省西安市人,副教授,硕士,研究方向:工业废水处理

基金项目:陕西省科技厅自然科学基金资助项目(2009JM3019)

HV-50 高压灭菌气锅(浙江科通仪器有限公司)及 722N-可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司)等。

## 1.2 菌种的分离

### 1.2.1 菌种的培养

菌种采自陕西南部秦岭深山的腐败朽木之上。本实验室将含菌腐败木屑用无菌水浸泡 24 h,搅匀后以此为菌原液接种于培养皿中。

采用的专用培养基配方为:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0 g,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  0.2 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.5 g,  $\text{V}_{\text{B1}}$  0.1 mg,  $\text{CaCl}_2$  0.1 mg,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.4 mg,  $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.2 mg,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  1.4 mg, 琼脂 20 g, 葡萄糖和酒石酸铵适量<sup>[5]</sup>。培养接种前于 121 °C 下灭菌 20 min,置于 39 °C 恒温培养箱中培养,培养 3 d 后培养基上生长出 2 种类型的菌落。

### 1.2.2 菌种的分离与鉴定

将培养皿中各菌落分别刮下,用无菌水配成孢子悬浮液,采用稀释平板分离法及划线平板分离法进行分离。分离后主要获得 2 种菌,A 种菌落为绿色绒粒状,B 种菌落为白色绒状。

菌种鉴定从 2 方面入手,一方面通过显微镜观察菌体形态,另一方面利用白腐真菌的特征进行变色反应<sup>[6]</sup>,具体方法是在 1.2.1 专用培养基中加入琼脂及少量单宁酸,观察菌落外侧是否形成肉眼可见的褐色晕环。

## 1.3 试验方法

本研究通过在白腐真菌降解木质素的过程中改变某一单因子,同时保持其他降解条件不变,以造纸黑液的脱色率为唯一判定标准对比降解效果,选出最佳条件。

$$\text{脱色率 } x = (A_1 - A_2) / A_1 \times 100\%$$

式中:  $A_1$ —降解前造纸黑液的吸光度,  $A_2$ —降解后造纸黑液的吸光度。

### 1.3.1 脱色时间的确定

在最初的预脱色试验中自 0 h 开始计时,每隔 20 h 对造纸黑液的脱色率进行 1 次测算。随着时间的增加,溶液中色度的变化趋势逐渐趋缓,至 140 h 后脱色效果基本无变化,因此在试验中选取 140 h 作为脱色周期。

### 1.3.2 不同单因素对脱色率的影响

以造纸黑液在第 140 h 的脱色率为判定指标进行单因素试验,最终确定木质素质量浓度、pH 值、搅拌速度、碳源和氮源质量浓度以及  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度的最佳脱色条件组合。

(1)木质素质量浓度. 将 4 个锥形瓶分为 1,2,3,4 组,各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液(质量浓度为 7.006 6 g/L),pH 为 6,搅拌速度为 500 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度为 0.10 g/L,  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度为 0.4 mg/L。分别在瓶中加入 2,4,8,14 mL 原木质素溶液,使木质素质量浓度分别为 28.7、46.0、153.0、212.0 mg/L,在 39 °C (白腐真菌的生化培养温度)培养降解 140 h,每隔 20 h 测算 1 次脱色率。

(2)pH 值<sup>[7]</sup>. 在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液,木质素质量浓度为 153.0 mg/L,搅拌速度为 500 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度为 0.10 g/L,  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度为 0.4 mg/L。调节 pH 值分别为 5,6,7,8.5,于 39 °C 培养降解 140 h,每隔 20 h 测算 1 次脱色率。

(3)搅拌速度. 在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液,木质素质量浓度为 153.0 mg/L,pH 为 5,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度为 0.10 g/L,  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度为 0.4 mg/L,使搅拌速度分别为 150、250、500、1 500 r/min,于 39 °C 培养降解 140 h,每隔 20 h 测算 1 次脱色率。

(4)碳源质量浓度. 一般认为葡萄糖是普适碳源。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液,木质素质量浓度为 153.0 mg/L,pH 为 5,搅拌速度为 250 r/min,酒石酸铵质量浓度为 0.10

g/L,  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度为 0.4 mg/L. 使锥形瓶中葡萄糖质量浓度分别为 1、2、5、10 g/L, 于 39 °C 培养降解 140 h, 每隔 20 h 测算 1 次脱色率.

(5) 氮源质量浓度. 试验选取培养基中的酒石酸铵作为氮源. 在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液, 木质素质量浓度为 153.0 mg/L, pH 为 5, 搅拌速度为 250 r/min, 葡萄糖质量浓度为 1 g/L,  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度为 0.4 mg/L. 调节酒石酸铵质量浓度分别为 0.08、0.10、0.20、0.50 g/L, 于 39 °C 培养降解 140 h, 每隔 20 h 测算 1 次脱色率.

(6)  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度. 微量元素对微生物生长具有多方面的作用, 或是酶的活性基组成成份, 或是酶的激活剂.  $[\text{Fe}^{2+}]$  是细菌所含十大生物元素之一, 是细胞色素的成分, 也是过氧化酶、细胞色素氧化酶的组分. 试验在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液. 木质素质量浓度为 153.0 mg/L, pH 为 5, 搅拌速度为 250 r/min, 葡萄糖和酒石酸铵质量浓度分别为 1 g/L 和 0.20 g/L, 调节瓶中  $[\text{Fe}^{2+}]$  质量浓度依次为 0.04、0.08、0.10、0.14 mg/L, 于 39 °C 培养降解 140 h, 每隔 20 h 测算 1 次脱色率.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 菌株形态

试验分离出的 A 种菌落为绿色绒粒状, 镜检观察有大量孢子, 初步认为是绿色木霉. B 种菌落为白色绒状, 镜检为长丝状, 初步认为是白腐真菌. 对 A、B 两种菌分别进行的变色反应结果显示: B 种菌有褐色轮环, 而 A 种菌没有, 因此判定 B 菌为白腐真菌.

### 2.2 木质素质量浓度对脱色率的影响

从图 1 可以看出, 在处理 0~20 h 时造纸黑液脱色率增加十分明显, 此后脱色率增速趋缓. 分析原因是由于白腐真菌的菌丝具有一定的吸附作用, 这种现象在木质素质量浓度较高的情况下尤为明显, 其 140 h 后 1、2、3、4 组的最终脱色率分别为 36.5%、31.2%、53.1%、41.9%. 分析试验结果可以看出, 当木质素质量浓度为 153.0 mg/L 时的脱色率是 4 组试验中最优的, 因此在随后的脱色试验中木质素的质量浓度均取 153.0 mg/L.

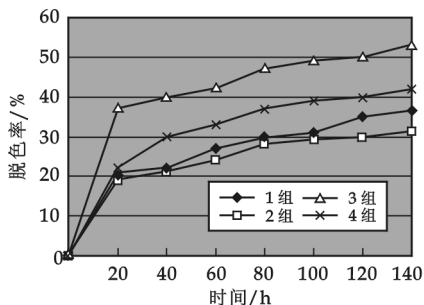


图 1 不同木质素质量浓度对脱色率的影响

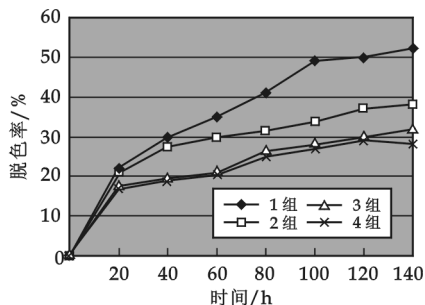


图 2 不同 pH 值对脱色率的影响

### 2.3 pH 值对脱色率的影响

从图 2 可以看出, pH 值越低, 脱色率越高, 其中当 pH=5 时脱色效果较好, 其最终脱色率为 52.2%, 相对于 pH 为 6、7、8.5 时分别高出 13.9%、20.4% 和 24.1%, 说明白腐真菌适合在低 pH 环境下对造纸黑液进行脱色, 由此可以确定在本试验条件下白腐真菌对造纸黑液脱色的最佳 pH 值是 5. 另外还发现, 在试验中各组的 pH 均有所变化, 这是因为微生物的代谢活动可以改变系统中  $\text{H}^+$  的浓度, 但是这种微生物的自我调节仅发生在一定的 pH 值范围内, 超过阈值则会引起微生物的死亡.

### 2.4 搅拌速度对脱色率的影响

从图 3 中可以看出, 当搅拌速度为 250 r/min 时, 处理 140 h 其最终脱色率为 55.3%, 明显优于其他

3 组. 分析原因得出: 过于剧烈的搅拌严重抑制了酶的产生从而影响了脱色效果; 适当的搅拌有助于物质之间的传递并促进脱色, 故后续试验中搅拌速度以 250 r/min 为宜.

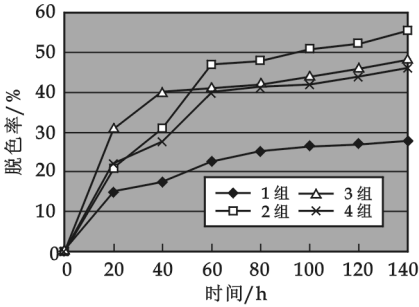


图 3 不同搅拌速度对脱色率的影响

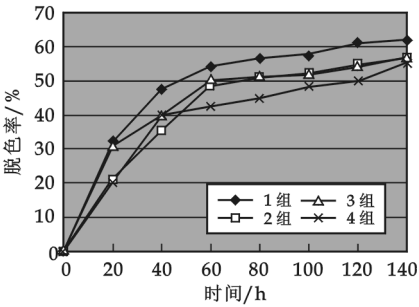


图 4 碳源质量浓度对脱色率的影响

2.5 碳源和氮源对脱色率的影响

2.5.1 碳源质量浓度的影响

由图 4 中 140 h 的脱色率可知, 当葡萄糖质量浓度为 1 g/L 时的脱色率最高, 可达 62%. 这是由于适当的含碳量对提高菌丝的综合性能(包括酶的活性)最为有利, 且培养得到的菌丝对污染物的吸附能力强, 机械强度也较好, 故葡萄糖的质量浓度以 1 g/L 为宜.

2.5.2 氮源质量浓度的影响

由图 5 可知, 当酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L 时白腐真菌对造纸黑液的脱色效果最好, 其脱色率最高可达 64.6%.

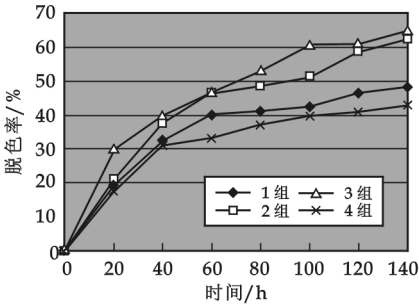


图 5 氮源质量浓度对脱色率的影响

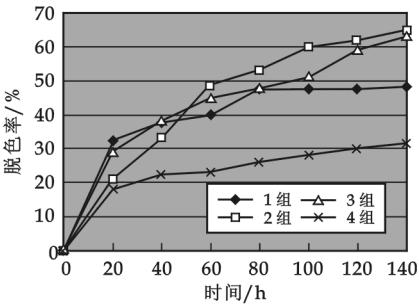


图 6 不同 $[Fe^{2+}]$ 质量浓度对脱色率的影响

由图 4 和图 5 可知, 当葡萄糖质量浓度为 1 g/L、酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L 时造纸黑液的脱色率最高. 由此推断, 适宜的碳氮比对白腐真菌的生长有利, 否则将不利于白腐真菌的生长, 从而也就不利于脱色.

2.6  $[Fe^{2+}]$ 质量浓度对脱色率的影响

从图 6 中可以看出, 当  $[Fe^{2+}]$  质量浓度为 0.08 mg/L 时脱色效果最佳, 第 140 h 的脱色率为 65%. 适合的  $[Fe^{2+}]$  质量浓度可以促进酶的活性, 从而提高脱色率;  $[Fe^{2+}]$  质量浓度过低则会导致白腐真菌生长所需微量元素不足, 影响其正常降解能力; 浓度过高则会导致酶蛋白与  $Fe^{2+}$  结合, 引起蛋白质变性, 抑制白腐真菌降解木质素. 本研究中  $[Fe^{2+}]$  的最适质量浓度为 0.08 mg/L.

由图 6 还可知, 当  $[Fe^{2+}]$  质量浓度为 0.08 mg/L, 其他条件(木质素质量浓度、pH、搅拌速度、碳源和氮源质量浓度)均满足本试验中的最佳条件组合时, 白腐真菌对造纸黑液的脱色率最高为 65%.

3 结论

(1) 白腐真菌对造纸黑液的脱色有一定效果, 其最终脱色率可达 65%.

(2)影响造纸黑液脱色效果的主要因素有:木质素质量浓度、pH、搅拌速度、葡萄糖质量浓度、酒石酸铵质量浓度、 $[\text{Fe}^{2+}]$ 质量浓度.

(3)白腐真菌对造纸黑液的最佳脱色条件是:木质素质量浓度为 153 mg/L,pH 为 5 左右,搅拌速度为 250 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L, $[\text{Fe}^{2+}]$ 质量浓度为 0.08 mg/L.

### 参考文献

- [1]张玉仙,姚芳,杜书田,等.造纸废水治理技术进展[J].天津造纸,2008,3(1):20-23.
- [2]楚广诣,胡力华,刘莉,等.造纸废水生物处理的研究进展[J].黑龙江造纸,2007,12(3):34-35.
- [3]徐海娟,梁文芷.白腐菌处理漂白废水工艺及脱色机理探讨[J].广东造纸,1999,6(1):121-125.
- [4]张业录,李群,谭国民,等.固定化白腐菌技术在漂白废水处理中的应用[J].工业水处理,2000,20(12):5-7.
- [5]李海红,同帆,全攀瑞.玉米秸秆发酵生产蛋白饲料[J].西北大学学报(自然科学版),2003,33(7):22-25.
- [6]徐晓峰,何北海,石海强,等.降解木片树脂的白腐菌菌种选育与脱除树脂过程[J].中国造纸学报,2006,21(1):29-32.
- [7]高大文,文湘华,周晓燕,等.pH 值对白腐真菌液体培养基抑制杂菌效果的影响[J].环境科学,2005,26(6):173-179.

## STUDY ON THE EFFECTS OF DECOLORIZATION IN THE BLACK LIQUOR BY WHITE-ROT FUNGI

LI Hai-hong, TONG Zhi, GONG Wen-jiao

(School of Environmental & Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:**Decolorization is one of important point in black liquor treatment process. Use the white-rot fungus to decolorize black liquor. Explore the influence factors of white-rot decolorize black liquor, and make sure the optimal decolorization conditions. Use special culture medium to separate and purify white-rot fungus which has been separated from the rotten wood and cultured. Analyze the influence of degradation effect by the following ingredient: different lignin consistency, pH value, stirring speed, consistency of carbon and nitrogen source, and  $\text{Fe}^{2+}$  consistency, so as to choose the best conditions of white-rot fungi for decolorization. Result of experiment show the best conditions are: lignin=153 mg/L, pH=5, the rotate speed is 250 r/min, glucose=1 g/L, ammonium tartrate=0.20 g/L,  $\text{Fe}^{2+}$ =0.08 mg/L. Under these conditions, the decoloring rate of white-rot fungus decolorize the black liquor up to 64.38%.

**Key words:**white-rot fungus; decoloring rate; degradation of black liquor

文章编号:1000-5811(2009)06-0059-05

# 三维电极对酸性大红 G 的脱色研究

马宏瑞, 王立璇, 任 健, 马炜宁

(陕西科技大学资源与环境学院, 陕西 西安 710021)

**摘 要:**采用石墨极板,固定极板间距 4.0 cm,通过正交试验考察了填料、槽电压、时间、pH、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  投加量和酸性大红浓度等因素对脱色效果的影响.实验得出的最佳脱色条件为:电解时间 150 min、槽电压 25 V、填料为活性炭/玻璃珠(体积为 2 : 1)、pH 为 2、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  投加量 2.0 g/L,进水初始浓度 500 mg/L.在此条件下,三维电极反应器对酸性大红 G 模拟废水的脱色率达 82.11%,电解后废水的  $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$  由 0.20 提高到 0.33,数据拟合结果表明该反应是一级反应.

**关键词:**三维电极;酸性大红 G;脱色率

**中图法分类号:**X791;TQ151

**文献标识码:**A

## 0 引言

染料废水中有机污染物含量高、色度大、难以生物降解,主要来源于生产过程中的中间体及流失的染料,每年大约有 10%<sup>[1]</sup>左右的染料经各种途径进入水体及土壤.染料废水的色度主要是由污染物结构中的发色基团引起的,脱色的常用方法主要有絮凝法、吸附法、氧化法和生化处理法等<sup>[2]</sup>.电化学法具有氧化降解能力强、无须添加化学药品、不产生二次污染、能在常温常压下进行、操作简单等优点,日益受到人们的重视<sup>[3]</sup>.而三维电极是在传统的二维电极的基础上,在平板电极间填加粒状或碎屑状电极材料,在平板电极两端施加电压,使粒子电极带电,成为新的一级即第三极.据报道,近年来研究者对三维电极处理苯酚废水<sup>[4,5]</sup>、印染废水<sup>[6]</sup>、酸性红 B<sup>[7]</sup>进行了研究,取得了较好的效果,但三维电极对染料废水的脱色处理仍具有研究价值.

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

电解实验装置如图 1 所示.直流稳压电源为上海三派工业自动化有限公司生产的电解水处理试验机 MODEL-II;槽体由有机玻璃制成,规格为 18.0 cm×17.0 cm×20.0 cm,总体积约 6 L;石墨电极(阴极和阳极)有效面积为 12.5 cm×13.0 cm,填料选用粒状活性炭及绝缘颗粒(玻璃珠)为-10 目~+18 目,填充量为 600mL.

分光光度计:上海天美科学仪器有限公司 UV2300 紫外可见分光

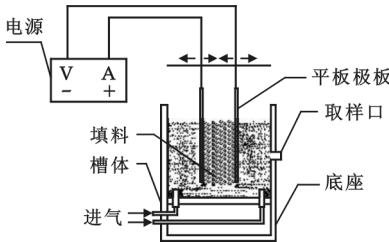


图 1 电解实验装置

\* 收稿日期:2009-10-19  
作者简介:马宏瑞(1963—),男,山西省太原市人,教授,博士,研究方向:轻工业废水处理  
基金项目:陕西科技大学研究生创新基金资助项目

光度计,光度值范围:−2.000~3.000.

1.2 活性炭的预处理

将活性炭用蒸馏水浸泡 24 h,冲洗数次后煮沸 15 min,排出气泡,静置冷却后滤去水分.然后用酸、碱清洗活性炭颗粒,用蒸馏水反复冲洗,直至排出的水呈中性,滤干水分.为了去除活性炭吸附的影响,使活性炭达到吸附饱和,电解实验前将清洗完毕的活性炭浸泡在不同质量浓度的酸性染料模拟废水中,该废水浓度与欲处理的废水浓度一致.每 4 h 测定浸泡前后废水浓度的变化,除去废水,重新加入新鲜废水,直至浸泡前后废水质量浓度基本一致为止.

1.3 电解实验

供试用水:称取一定量的工业级酸性大红 G 固体,溶于 4.0 L 蒸馏水中.

实验过程:根据探索性实验结果,阴、阳两极选用石墨平板电极,固定极间距为 4.0 cm,采用正交试验法设计实验,按正交表  $L_{25}(5^6)$  进行实验,如表 1 所示.电解槽中加入 4.0 L 不同质量浓度的酸性大红 G 模拟废水及不同质量的支持电解质  $Na_2SO_4$ ,调整好极板间距,在两个平板电极上施加一定的槽电压,同时曝气开始实验.测定不同实验条件下电解处理前后废水的吸光度.

表 1 正交试验表

水平	因素					
	填料	槽电压/V	时间/min	pH	$Na_2SO_4$	模拟废水质量浓度
	(活性炭/玻璃珠体积比)				投加量/(g/L)	/(g/L)
1	无	5	30	3	0.5	0.5
2	1 : 1	10	60	5	1.0	0.75
3	1 : 2	15	90	7	1.5	1
4	2 : 1	20	120	9	2.0	1.25
5	活性炭	25	150	11	2.5	1.5

1.4 脱色率测定方法

将样品通过 UV2300 分光光度计在 200~800 nm 波长范围内进行扫描,结果显示在 400~800 nm 可见光区,506 nm 处有最大吸收峰,此时对应的吸光度最大,以 506 nm 处对应的吸光度计算色度去除率,即:

脱色率=  $\frac{A_t - A_0}{A_0} \times 100\%$

式中: $A_0$ —电解前废水在 506 nm 处吸光度, $A_t$ —电解  $t$  时刻废水在 506 nm 处吸光度.

2 结果与讨论

2.1 模拟废水的吸光度与质量浓度的关系

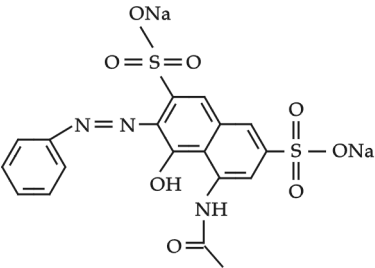


图 2 酸性大红 G 的结构式

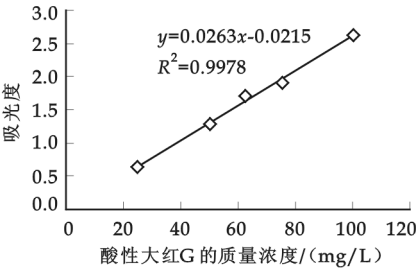


图 3 吸光度与酸性大红 G 的质量浓度关系曲线

配一系列不同质量浓度的酸性大红 G 模拟废水,考察吸光度与质量浓度的关系.由于实验用水采用人工配水,酸性大红 G 的发色基团为 −N=N−(如图 2 所示),若吸光度与酸性大红 G 的质量浓度存在线性关系,则可用酸性大红 G 模拟废水的吸光度代替酸性大红 G 在废水中的浓度.实验结果如图 3 所示,由



图3可知,吸光度与酸性大红 G 的质量浓度呈良好的线性关系,因此可由吸光度计算废水中酸性大红 G 的摩尔浓度。

## 2.2 正交试验结果及讨论

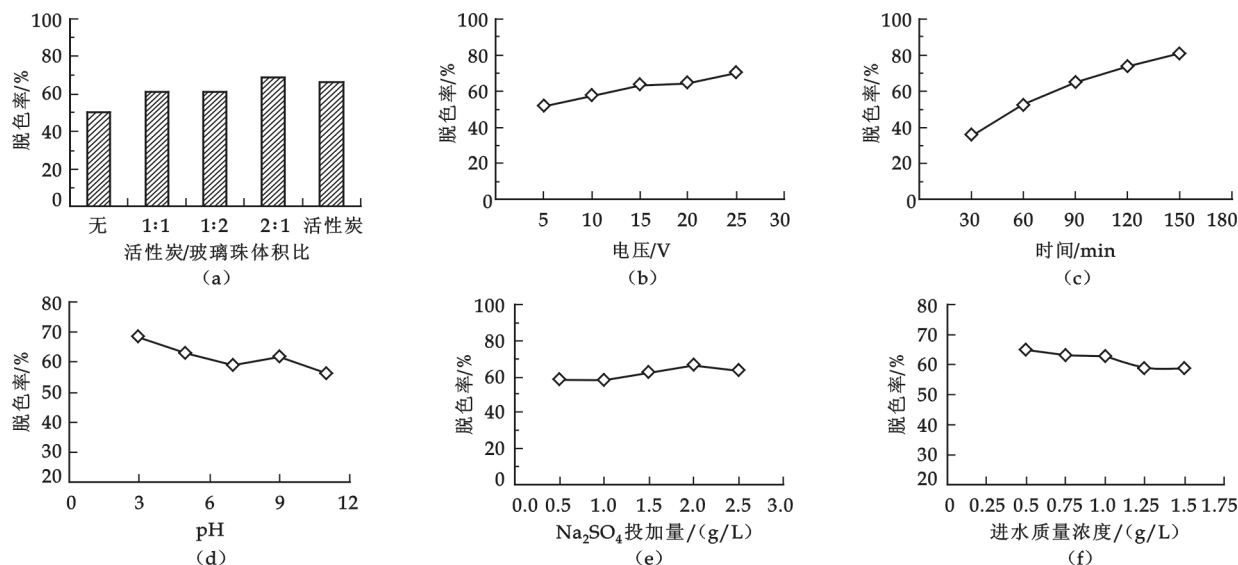


图4 实验各影响因素与废水脱色率趋势图

图4是三维电极处理效果的影响因素趋势图。由图4(a)可知,三维电极反应器(有填料)比二维电极反应器(无填料)能够更加有效地去除酸性大红 G 模拟废水的色度。当主电极即平板电极两端施加电压时,填加的粒子电极表面带电,颗粒两端一段带正电,一端带负电,成为新的一极(第三极)。粒子电极能够增加单位槽体积的电极表面积,以较低的电流强度提供较大的电流密度,同时减小了反应物迁移距离,提高了电解效率,因此三维电极反应器比二维电解反应器电解效率更高,随填料中活性炭与玻璃珠体积比的变化,脱色率逐渐升高,但是当填料全部为活性炭时,脱色率略有下降。在电解反应过程中,活性炭颗粒携带电荷形成无数个微电解池,起到了传输电荷的作用,若填料全部是活性炭,其颗粒之间排列紧密,则不能很好的实现微电解池作用。当在活性炭颗粒中掺杂绝缘颗粒(玻璃珠),活性炭颗粒之间被绝缘颗粒隔开,则总电流中反应电流的比例增加,电化学反应速率提高,能够更好的实现其微电极作用;但掺入的绝缘颗粒使活性炭颗粒形成的微电池数量减少,微电极作用被削弱。实验结果显示当活性炭和玻璃珠的体积比为2:1时,脱色率最好。

槽电压对酸性大红 G 脱色效果的影响见图4(b)。槽电压是电解反应的动力,槽电压的大小直接影响有机物的降解效率。图4(b)表明酸性大红 G 模拟废水的脱色率随槽电压的增大而增大,这是因为槽电压越大,废水中的电流也越大,活性炭的复极化程度增强,反应电流增加,有利于发色基团 $-\text{N}=\text{N}-$ 的断裂,因此脱色率随槽电压的增大而增加。

电解时间对酸性大红 G 处理效果的影响如图4(c),随着电解时间的延长,脱色率逐渐增加,当时间为150 min时,脱色率可达80.92%。在电解处理酸性大红 G 的反应历程中,有机物首先被氧化成一系列的中间产物,不是一步氧化成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 等无机物,而是中间产物结构越来越简单,最后被彻底无机化。发色基团 $-\text{N}=\text{N}-$ 的键能低于苯环、萘环的键能,因此脱色率逐渐增加。

图4(d)显示电解法对酸性大红 G 模拟废水的处理效果随pH的变化而变化。三维电极对酸性大红 G 是直接电解,酸性条件下电极表面有少量强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 生成<sup>[8]</sup>,同时酸性条件下空气中的氧气氧化性较强<sup>[9]</sup>,有利于酸性大红 G 的脱色,因此酸性条件下脱色率较高。碱性条件下,酸性大红 G 的存在形式发生变化<sup>[10]</sup>,极板上发生的副反应剧烈与有机物产生竞争,不利于有机物降解,导致脱色率降低。

由图 4(d)可知,酸性条件下更有利于酸性大红 G 模拟废水的脱色处理.

由图 4(e)可知,随着  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  投加量的增大,废水脱色率略有提高,当  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  投加量超过 2.0 g/L 时,脱色率略有下降.投加支持电解质  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的主要目的是为了提高废水的电导率,增强废水的导电能力,促进有机物降解.随着电导率的增大,总电流变大,析氢等副反应加剧,产生大量的气泡,影响传质过程,不利于电解反应的进行,且副反应的加剧使电解的电耗增加,电流效率降低.

酸性大红 G 进水质量分数对脱色效果的影响如图 4(f)所示,废水脱色率随酸性大红 G 进水质量浓度的增大而略有降低,电解法降解酸性大红 G 模拟废水时,电化学反应的氧化降解多以中间产物的氧化为主<sup>[11]</sup>,电解过程中产生的中间产物继续被氧化,与酸性大红 G 产生竞争,因此当酸性大红 G 质量分数为 500 mg/L 时处理效果好.

对正交试验结果进行极差分析,结果表明各因素对脱色效果影响的主次顺序依次为:电解时间、槽电压、填料、pH、无水硫酸钠投加量和进水初始质量浓度,最佳条件为:电解时间 150 min、槽电压 25 V、填料为活性炭/玻璃珠体(积比为 2 : 1)、pH 为 3、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  投加量 2.0 g/L、进水初始浓度 500 mg/L.依据正交试验结果确定的最佳实验条件进行 3 次验证实验,验证实验结果表明三维电极度酸性大红 G 的脱色率分别为 82.11%、81.10%、80.27%.

2. 3 反应历程探讨

最佳实验条件下三维电极反应器处理酸性大红 G 模拟废水,分别在 5 min、10 min、30 min、60 min、90 min、120 min、150 min 取样,扫描得到不同电解时间的 UV-Vis 吸收光谱(如图 5 所示).酸性大红 G (结构式见图 2)结构中由苯环、萘环通过偶氮键连接,是单偶氮的酸性染料. UV-Vis 吸收光谱在 400~800 nm 的可见光区有两个吸收峰,可见光区的吸收峰由发色基团—N=N—及助色基团引起,近紫外区的吸收带由苯环、萘环及杂环化合物引起.图 5 说明三维电极能够使酸性大红 G 结构中的偶氮键断裂,有效去除发色基团,同时对苯环、萘环及杂环化合物也有一定的去除效果.模拟废水中的大分子物质转变为小分子物质,部分小分子物质被彻底无机化,降解为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等无机物.酸性大红 G 模拟废水经三维电极反应器处理 150 min 后,其  $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$  由电解前的 0.20 提高到 0.33,为保障后续生化处理的高效运行起到了重要作用.

测定不同电解时间样品的吸光度,计算得废水中酸性大红 G 的摩尔浓度,作  $c\sim t$ 、 $\ln c\sim t$ 、 $1/c\sim t$  关系图,并进行线性分析,结果如表 2 所示.

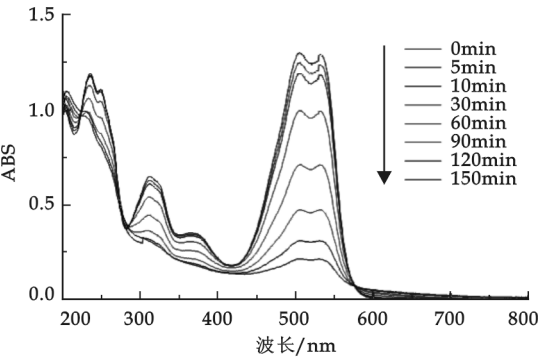


图 5 UV-Vis 吸收光谱

表 2 表应级数与相关系数

项目	回归方程	相关系数
零级反应	$c = -0.000\ 6t + 0.091\ 4$	0.988\ 0
一级反应	$\ln c = -0.012\ 6t - 2.295\ 7$	0.997\ 3
二级反应	$\frac{1}{c} = 0.356t + 5.664\ 3$	0.955\ 4

由表 2 可知,三维电极反应器对酸性大红 G 模拟废水的脱色处理属于一级反应,反应速率与废水初始浓度及反应时间有关.则由一级反应速率方程  $-\frac{dc_t}{dt} = kc_t$  可

得:

$$c_t = c_0 e^{-kt}$$

式中: $k$ —反应速率常数, $k=0.029\ \text{min}^{-1}$ ;  $c_0$ —反应前废水的摩尔浓度, mol/L;  $c_t$ —反应  $t$  时刻废水的摩尔浓度, mol/L.

### 3 结论

采用三维电极反应器处理酸性大红 G 模拟废水能够有效去除废水的色度,提高模拟废水的可生化性,保障后续生化处理的高效运行,为实现染料废水的达标排放奠定了基础。

由正交试验结果可知,三维电极反应器处理酸性大红 G 模拟废水是一级反应,反应速率常数  $k=0.029\text{ min}^{-1}$ ;最佳条件为:电解时间 150 min、槽电压 25 V、活性炭/玻璃珠体积比为 2 : 1、pH 为 2、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  投加量 2.0 g/L,进水初始浓度 500 mg/L,废水脱色率可达 81% 左右。

### 参考文献

- [1] Esther Forgacs, Tibor Cserhati, Gyu Oros. Removal of synthetic dyes from wastewaters; a review[J]. Environment international, 2004(30):953-971.
- [2] 毕韶丹,沈春旭. 复合絮凝剂对染料废水的脱色作用[J]. 工业水处理, 2009, 29(7):57-59
- [3] 汪群慧,张海霞,马 军,等. 三维电极处理生物难降解有机废水[J]. 现代化工, 2004, 2(10):56-59.
- [4] Comniellis C. Anodic oxidation of phenol for wastewater treatment[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2001(21):703-708.
- [5] Ventura A, Jacquet G, Bermond A, *et al.* Chemical generation of the fenton's reagent: application to atrazine degradation[J]. Water Research, 2002(36):517-522.
- [6] 何国建,刘晓波,汪 德. 三维电极法处理印染废水[J]. 化工环保, 2004, 24(2):124-127.
- [7] 王爱民,曲久辉,姜桂兰. 电化学方法降解酸性红 B 研究[J]. 环境科学, 2003, 24(2):108-111.
- [8] 王爱民,曲久辉,葛建团,等. 电化学法去除有机污染物机理研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(10):10-13.
- [9] 王海荣,李 勉,刘秉涛. 活性炭纤维电极电解法处理墨绿 B 染料废水[J]. 化学研究, 2007, 18(2):90-92.
- [10] 薛松宇. 三维电极反应器处理染料废水的研究[D]. 天津:天津大学硕士研究生论文, 2005:27.
- [11] 李亚峰,赵 娜,班福忱. 三维电极法处理硝基苯废水[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1):148-151.

## STUDY ON DECOLORATION OF ACID RED-G WITH THREE -DIMENSIONAL ELECTRODE REACTOR

MA Hong-rui, WANG Li-xuan, REN Jian, MA Wei-ning

(School of Resource & Environment, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The influence of filler, cell voltage, time, pH, dosing quantity of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , the concentration of acid red-G on the chroma removal ratio of simulated wastewater by orthogonal experiment when the graphite was used as plates and the distance of which was fixed as 4.0 cm. The results shows that, the optimum parameters of the test are: the electrolysis time is 150 min, the cell voltage is 25 V, the filler is consisted of activated carbon and glass bead and the volume ratio of activated carbon to glass bead is 2 : 1, pH is 2, the dosing quantity of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  is 2.0 g/L, the concentration of influent is 500 mg/L. Under such operation parameters, the removal ratio of chroma of the simulated wastewater can reach 82.11%, meanwhile, the  $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$  of wastewater increases ranging from 0.20 to 0.33 after electrolysis. Carries on the data fitting to the experimental findings, the reaction is first order reaction.

**Key words:** three dimensional electrode; acid red-G; chroma removal ratio

# 高岭石声化学插层的 XRD 研究

王新震<sup>1,2</sup>, 黄剑锋<sup>1,2</sup>, 曹丽云<sup>2</sup>

(1. 浙江省温州轻工研究院, 浙江 温州 325003; 2. 陕西科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**以乙二醇、二甲基甲酰胺、二甲基亚砷及双氧水/冰醋酸等为插层剂,采用声化学法对高岭石进行了插层研究,考察了插层剂种类对高岭石插层率的影响.在此基础上,重点研究了以二甲基亚砷作为插层剂的情况下超声波功率、插层时间及插层剂的质量分数等工艺因素对插层率的影响,并采用 XRD 分析方法测试了高岭石的插层效率.结果表明:二甲基亚砷作为插层剂时插层率最高,插层率可达 100%,二甲基甲酰胺和乙二醇次之,双氧水/冰醋酸插层率最低,插层率仅为 14.9%.以二甲基亚砷为插层剂时,随着超声功率的增大,插层率先升高后降低;随着插层时间的延长,插层率呈增长趋势,而二甲基亚砷的质量分数对插层率的影响不大.在二甲基亚砷质量分数为 75%、超声功率为 300 W、插层时间为 2 h 的条件下,插层率达到 100%,高岭石层间距从 0.71 nm 被有效增大到 1.10 nm.

**关键词:**高岭石; 声化学法; 插层

**中图分类号:**O741<sup>+</sup>.4

**文献标识码:**A

## 0 引言

高岭石( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )是 1:1 型层状结构的硅酸盐,由一层铝氧八面体 $[\text{AlO}_2(\text{OH})_4]$ 和一层硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]$ 在 C 轴方向上周期性重复排列构成,层与层之间通过铝氧面的羟基和硅氧面的氧形成氢键连接.目前,高岭石被广泛用于纸张的填料和涂布料、陶瓷原料、橡胶填充剂、油漆和漆料的添加剂等.随着材料科学与纳米技术的发展,高岭石/有机物插层纳米复合材料以其优异的性能和应用前景<sup>[1,2]</sup>引起了人们的广泛关注.

由于高岭石空间结构和物理化学性能的特殊性,和其他层状硅酸盐如蒙脱石等相比,高岭石插层比较困难.传统的插层方法为机械球磨和浸泡法<sup>[3]</sup>,这些方法容易造成高岭石结构的破坏,且插层时间长(通常为几天乃至几个月)<sup>[4,5]</sup>、工艺复杂、效率低.近年来,声化学法为高岭石插层提供了一条新的途径<sup>[6]</sup>.声化学法插层是指在超声波提供的特殊环境中,将有机分子插入到高岭石层间,形成高岭石/有机物纳米复合材料.在声化学法制备插层复合材料的过程中,插层率主要受插层剂浓度、插层时间及超声功率等工艺因素的影响.

为了提高有机插层剂在高岭石中的插层率,本文以不同物质为插层剂对高岭石进行了插层研究,在此基础上,以二甲基亚砷为插层剂,讨论了各工艺因素对插层效果的影响.

## 1 实验

### 1.1 原料和样品制备

实验选用高岭石为原料,乙二醇、二甲基甲酰胺、二甲基亚砷、冰醋酸及双氧水均为分析纯.

首先对高岭石进行处理,将高岭石粉碎,过 280 目筛后,将其浸泡于 0.1 mol/L 的  $\text{NiCl}_2$  溶液中,通

\* 收稿日期:2009-10-22

作者简介:王新震(1984—),男,山东省德州市人,在读硕士生,研究方向:硅酸盐保温涂层研究  
基金项目:温州市科技局科技计划项目(H20070023)

过离子交换,把钙基高岭土改性成为镍基高岭土,烘干后待用.

将镍基高岭土、插层剂和水混合均匀,配成一定的悬浊液,将超声发生头置于该液体中. 在一定的超声功率和温度条件下反应一定时间,抽滤,洗涤,干燥.

分别以乙二醇、二甲基甲酰胺、二甲基亚砷、冰醋酸/双氧水做插层剂进行插层实验,研究插层剂的种类对插层率的影响. 在此基础上,以插层效率相对较好的二甲基亚砷为插层剂,研究插层剂质量分数、插层时间、超声功率对插层率的影响.

### 1.2 仪器及表征

用日本理学 D/MAX-2200PC 型 X-衍射仪对样品进行测试. 插层率计算采用衍射峰的面积比来表示<sup>[7]</sup>,如式(1)所示:

$$Q=\frac{A_1}{A_0+A_1}\times 100\% \tag{1}$$

式中, $Q$  表示插层率, $A_0$  表示插层前高岭石(001)晶面原有衍射峰的面积, $A_1$  表示插层后高岭石(001)晶面新的衍射峰的面积.

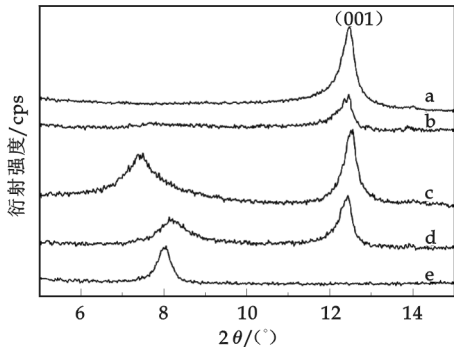


图 1 高岭石及其被不同插层剂插层后的 XRD 图谱

(a. 高岭石, b. 双氧水/冰醋酸插层后, c. 二甲基甲酰胺插层后, d. 乙二醇插层后, e. 二甲基亚砷插层后. 超声功率:300 W, 插层剂质量分数:75%, 插层时间:2 h)

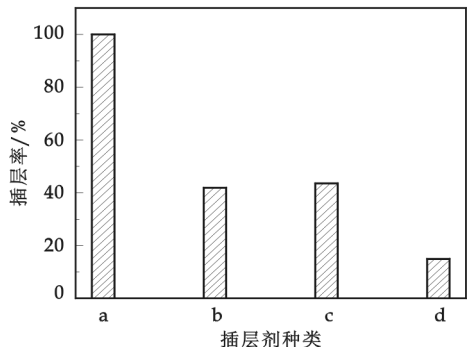


图 2 不同插层对高岭石的插层效果比较图

(a. 二甲基亚砷, b. 乙二醇, c. 二甲基甲酰胺, d. 双氧水/冰醋酸. 超声功率:300 W, 插层剂质量分数:75%, 插层时间:2 h)

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 插层剂种类对插层效果的影响

高岭石插层复合物的制备需要合适的插层剂,插层剂的选择不仅影响高岭石的层间距被膨胀的大小,还会影响到插层效率. 图 1 为高岭石及其被不同插层剂插层后的 XRD 图谱. 从图中可以看出,采用双氧水和冰醋酸为插层剂时其(001)晶面衍射峰几乎没有发生位移,只是其强度有所降低,峰形出现分叉,这说明其很难插入高岭石层间,插层比较困难. 采用乙二醇和二甲基甲酰胺为插层剂时其(001)晶面衍射峰强度有所减弱,此外,在  $2\theta$  角为  $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$  附近出现了一个新的衍射峰,这说明部分插层剂已经插入了高岭石层间,其部分层间距已被撑大,形成了新的衍射峰. 当采用二甲基亚砷为插层剂时,高岭石的  $2\theta=12.5^{\circ}$  左右的衍射峰已经完全消失,在  $2\theta=8^{\circ}$  处出现了一个新的衍射峰,这说明高岭石的层间已经完全被其撑大,通过计算,可知高岭石的层间距由 0.71 nm 增大到 1.10 nm,这与 Wang 和 Zhao<sup>[8]</sup> 等的研究结果基本相同.

图 2 为不同插层剂对高岭石的插层效果比较图. 从图中可以看出,二甲基亚砷的插层率最高,可达 100%,二甲基甲酰胺和乙二醇次之,双氧水/冰醋酸最差. 结合图 1 可知,使用二甲基亚砷为插层剂时可达 100%的插层率,但从衍射峰的漂移程度来看,二甲基甲酰胺可更为有效的增大高岭石的层间距.

### 2.2 工艺因素对插层率的影响

#### 2.2.1 超声功率对插层效率的影响

图 3 为不同超声功率下二甲基亚砷插层后高岭石的 XRD 图谱. 从图中可知,在不同超声功率作用下,在  $2\theta=8^{\circ}$  处均出现了很强的新衍射峰,说明层间距被不同程度的撑大. 图 4 为超声功率对插层效率的影响

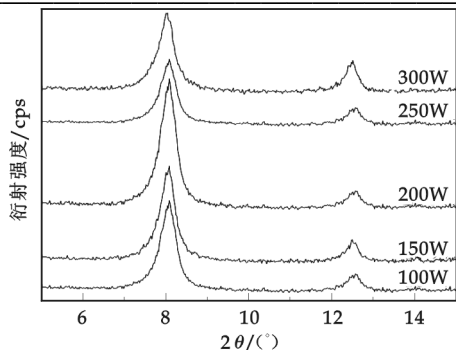


图 3 二甲基亚砷插层后高岭石的 XRD 图谱  
(插层时间:1 h,二甲基亚砷质量分数:75%)

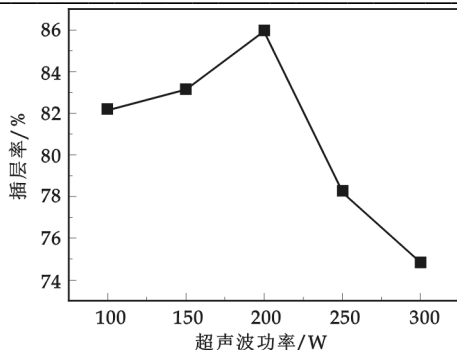


图 4 超声功率对高岭石插层率的影响  
(插层时间:1 h,二甲基亚砷质量分数:75%)

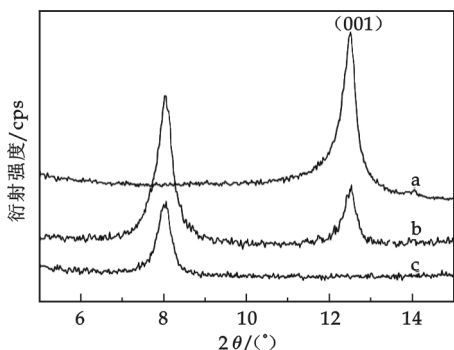


图 5 不同插层时间插层后  
插层高岭石的 XRD 图谱

(a. 未插层, b. 插层 1 h, c. 插层 2 h. 超声功率:300 W,二甲基亚砷质量分数:75%)

图. 从图中可知,当超声功率为 200 W 时,二甲基亚砷对高岭石的插层效率最高. 这是由于在超声波作用下,在溶液中产生了空化作用,为二甲基亚砷进入高岭石层间提供了能量,有利于插层率的提高. 但是当超声功率超过 200 W 后,空化作用过于强烈,会引起部分已插层到高岭石层边缘的部分二甲基亚砷脱嵌,使插层率反而降低. 由此可见,为了获得较高的插层率,还应合理控制超声波的功率.

## 2.2.2 插层时间对插层效率的影响

图 5 为不同插层时间插层后高岭石的 XRD 图谱. 从图中可以看出,采用二甲基亚砷为插层剂经过 1 h 插层后已有大部分层间距被撑大,经计算,这时插层率达到 74.8%. 而经过 2 h 插层后,其  $2\theta=12.5^\circ$  处的衍射峰完全消失,这时插层率达到 100%,高岭石的层间距被有效的从 0.71 nm 撑大到 1.10 nm,这说明在超声波作用下插层时间被大大缩短,且插层率较高,插层反应比较完全.

## 2.2.3 插层剂质量分数对插层效率的影响

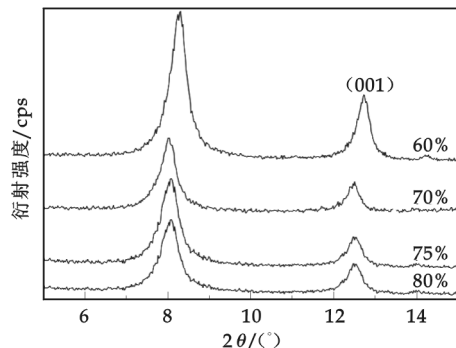


图 6 不同二甲基亚砷质量分数插层  
高岭石的 XRD 图谱

(插层时间:1 h, 超声功率:300 W)

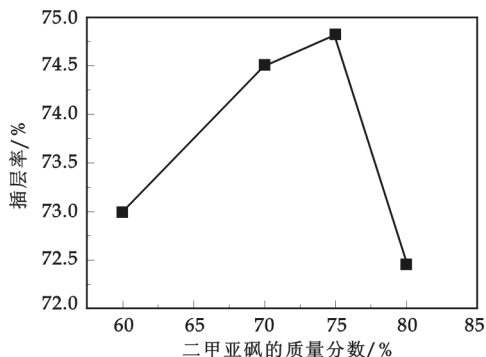


图 7 二甲基亚砷质量分数对  
高岭石插层率的影响

(插层时间:1 h, 超声功率:300 W)

图 6 是不同二甲基亚砷质量分数插层高岭石的 XRD 图谱. 从图中可以看出,随着插层剂质量分数的提高,插层后的两个衍射峰强度均有所降低,且质量分数增加时衍射峰有向低角度方向偏移的趋势,这说明增大二甲基亚砷质量分数后有利于获得更大的高岭石层间距. 图 7 是二甲基亚砷质量分数对高岭石插层率的影响,从图中可以看出,随着二甲基亚砷浓度的增加,高岭石的插层率呈现先增加后降低的趋势,但总体来说插层率在 72%~75%之间,变化不明显.

### 3 结论

采用声化学法可以将有机单体有效插入到高岭石层间,制备出高岭石-有机物复合材料。

(1)在实验工艺条件下,二甲基亚砷作为插层剂时插层率最高,插层率可达 100%,二甲基甲酰胺和乙二醇次之,双氧水/冰醋酸插层率最低,插层率仅为 14.9%。

(2)以二甲基亚砷为插层剂时,随着超声功率的增大,插层率先升高后降低;随着插层时间的延长,插层率呈增长趋势;而二甲基亚砷的质量分数对插层率的影响不大。

(3)在二甲基亚砷质量分数为 75%、超声功率为 300 W、插层时间为 2 h 的条件下,高岭石的插层率可达到 100%,层间距从 0.71 nm 被有效增大到 1.10 nm。

### 参考文献

- [1] Kerstin B. Brandt, Tamer A. Elbokl, Christian Detellier. Intercalation and interlamellar grafting of polyols in layered aluminosilicates. D-Sorbitol and adonitol derivatives of kaolinite[J]. Journal of Materials Chemistry, 2003, (13): 2 566-2 572.
- [2] Wang Bao-xiang, Zhao Xiao-peng. Electrorheological effect coordinated by kaolinite-carboxymethyl starch hybrid materials [J]. Journal of Materials Chemistry, 2002, (12): 2 869-2 871.
- [3] John G. Thompson, Neil Gabbittas, Philippa J. R. Uwins. The intercalation of kaolinite by alkali halides in the solid state: a systematic study of the intercalates and their derivatives[J]. Clays and Clay minerals, 1993,41(1): 73-86.
- [4] Ray L. Frost, J. Theo Klopogge, Janos Kristof, *et al.* Deintercalation of hydrazine-intercalated low-defect kaolinite[J]. Clays and Clay Minerals, 1999, 47(6): 732-741.
- [5] Shigenobu Hayashi. Nmr study of dynamics and evolution of guest molecules in kaolinite/dimethyl sulfoxide intercalation compound [J]. Clay and Clay minerals, 1997, 45(5): 724-732.
- [6] 林 喆,冯 莉,王永田,等. 超声法制备高岭土/二甲基亚砷插层复合物的影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 653-658.
- [7] 陈组熊,颜 卫,王 坚,等. 胍对高岭土插层的研究(I)——胍溶液浓度对插层的影响[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(2): 151-155.
- [8] B. X. Wang, X. P. Zhao. Electrorheological behavior of kaolinite-polar liquid intercalation composites[J]. Journal of Materials Chemistry, 2002, (12): 1 865-1 869.

## XRD RESEARCH ON INTERCALATION OF KAOLINITE BY A SONOCHEMICAL PROCESS

WANG Xin-zhen<sup>1,2</sup>, HUANG Jian-feng<sup>1,2</sup>, CAO Li-yun<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Wenzhou Research Institute of Light Industry, Wenzhou 325003, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Kaolite was intercalated by a sonochemical process using glycol, dimethyl formamide, dimethyl sulphoxide and hydrogen peroxide/acetic acid as intercalator. The effect of intercalator type on intercalation efficiency was researched. Base on this research, the influences of ultrasonic power, intercalation time and intercalator mass concentration on the intercalation efficiency were particularly investigated. Intercalation efficiency was tested by XRD analyses. Results show that intercalation efficiency reaches the maximum value 100% when using dimethyl sulphoxide as intercalator, secondly is dimethyl formamide and glycol. Intercalation efficiency arrives to the lowest value 14.9% when using peroxide/acetic as intercalator. When using dimethyl sulphoxide as intercalator, with the increase of ultrasonic power, intercalation efficiency firstly increase and then decrease; intercalation efficiency increase with the increase of intercalated time. Mass concentration of dimethyl sulphoxide has little effect on the intercalation efficiency. intercalation efficiency will reach 100% when dimethyl sulphoxide mass concentration reaches 75%, ultrasonic power is 300 W and intercalation time is 2 h. And the interlayer distance of kaolinite is effectively increased from 0.71 nm to 1.10 nm.

**Key words:** kaolinite; sonochemical process; intercalation



# $\beta$ -SiC 微粉溢流过滤分级实验研究

谢 斌<sup>1</sup>, 邓丽荣<sup>2</sup>, 刘向春<sup>2</sup>, 王晓刚<sup>2</sup>, 张 倬<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学材料科学与工程学院(临潼), 陕西 西安 710600; 2. 西安科技大学材料科学与工程学院(西安), 陕西 西安 710054)

**摘 要:**采用湿法水力溢流过滤的方法对  $\beta$ -SiC 微粉进行分级, 达到了溢流分级与过滤分级的双重功效. 通过实验研究了溢流流量及床层高度对溢流过滤分级效果的影响, 并对分级后的产品进行了粒度分析及 SEM 电镜分析. 研究表明, 溢流过滤分级法可以实现  $5\text{ }\mu\text{m}$  以下  $\beta$ -SiC 颗粒的精密分级; 能稳定获得 W5、W3.5、W2.5、W1.5 的分级产品, 而且分级精度较好、产率较高, 达到了对  $\beta$ -SiC 微粉窄级别稳定分级的新要求.

**关键词:**磨料微粉; 溢流; 过滤分级; 分离效率

**中图分类号:**TD921<sup>+</sup>.5

**文献标识码:**A

## 0 引言

超细颗粒粒度的细微性、均匀性对产品的性能有极大的影响, 粉体技术的发展正朝着粒度组成向极窄级别发展, 这就要求粉体具有很细的粒度和很窄的粒度分布<sup>[1]</sup>.  $\beta$ -SiC 微粉在集成电路、高温结构陶瓷、复合材料、国防尖端技术等方面有着极为广泛的应用<sup>[2]</sup>.  $\beta$ -SiC 粉体虽具有优良的性能和价格优势, 但是很难工业化大批量生产, 用机械粉碎法制得的初级特种粉体产品由于粉碎极限的存在而使得其粒度分布要比所要求的范围大, 大多数难以满足市场需求, 同时通过单一粉碎过程制备窄级别超细粉体的方法无法达到所要求的指标<sup>[3]</sup>, 因此  $\beta$ -SiC 微粉的高效高质量分级问题已成为制约其发展的关键. 与干式分级相比, 以液体为分离介质的湿式分级其流量、压力、流速等参数更易控制<sup>[4]</sup>. 采用溢流过滤分级对  $\beta$ -SiC 微粉进行分级处理时, 分级结果用分级产品粒径  $D_{50}$  和分级精度  $S$  来评价,  $S = D_{25}/D_{75}$ ,  $S$  越接近于 1, 分级效果越好, 一般认为  $S > 0.5$  即达到了较好的指标<sup>[5]</sup>.

## 1 实验

### 1.1 原料

实验原料选用西安科技大学多芯炉中试实验室采用无限微热源法合成的  $\beta$ -SiC 微粉, 原料粒度为  $0\sim 18\text{ }\mu\text{m}$ , 比表面积为  $1.76$ . 利用质量分数为  $0.1\%$  的三聚磷酸钠作为分散剂, 当量直径为  $1\text{ mm}$ , 空隙率为  $53.2\%$  的刚性小球作为溢流过滤介质, 介质粒度为同一级配.

### 1.2 方法及其原理

在湿法分级中, 作为介质的水本身就是一种较好的分散剂, 且易于添加表面活性剂, 流场易于控制<sup>[6]</sup>. 根据斯托克斯沉降及粉体颗粒在介质床层中的流动一般为层流状态的原理, 采用溢流过滤分级法对  $\beta$ -SiC 微粉进行湿式分级. 颗粒周边的流态处于层流的状态, 服从 Stokes 阻力定律, 简化了紊流产生的不稳定状态. 在逆流的条件下进行, 溢流过滤分级的好处在于使细颗粒的运动方向与流体的运动方向相反, 从而可

\* 作者简介: 谢 斌(1986—), 男, 陕西省西安市蓝田人, 在读本科生, 研究方向: 碳化硅微粉分级

基金项目: 陕西省“13115”科技创新工程重大科技项目(2007ZDKG46), 陕西省自然科学基金项目(SJ08ZT05—7), 陕西省教育厅专项项目(08JK349)



使流体中的粗粒与细粒彻底分离<sup>[7,8]</sup>。

1.3 测试

利用丹东 BT1000 粒度测试仪对过滤介质进行粒度测试和空隙率测试,利用 UB203i 双日照相显微镜观察其分散效果。分级所得料浆经过微波超声后采用广东珠海 DLS-900 粒度分析仪进行测试分析,利用 JSM-6700F 扫描电镜对分级后的产品进行 SEM 形貌观察。

2 实验结果分析与讨论

2.1 分级前后 β-SiC 微粉粒度分析

由原料粒度图(图 1a)可以看出其分数在 0~18 μm 之间,粒度分布较宽,出现了多个谷峰,粒度在 5 μm 处出现了断层。从累积分布曲线可看出,0~5 μm 的颗粒质量分数为 52%。

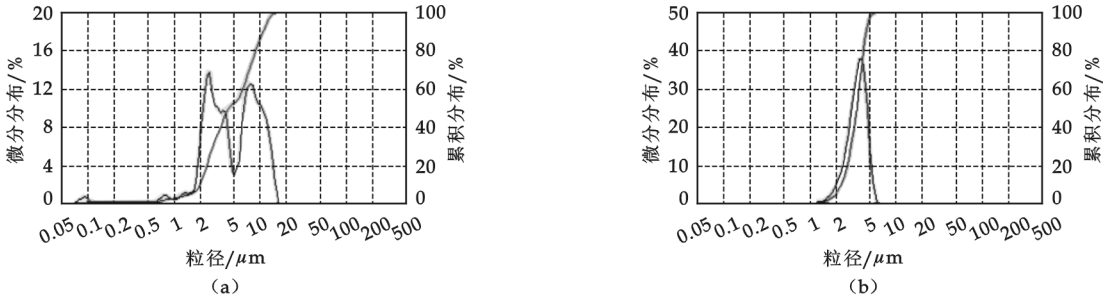


图 1 分级前后 β-SiC 粒度分布图

原料为质量分数为 1% 的料浆,溢流流量为 4 370 mL/min,处理量达 2.6 kg/h。由溢流过滤分级后的产品粒度分布曲线(图 1b)可以看出,细粒 0~2.5 μm 的含量少于 15%,避免了离心分级由于浆料横流产生的分级不完全而使粗颗粒产品中带有大颗粒,也避免了旋流器由于分级力场不足而使分级粒度的下限难以继续减小<sup>[9]</sup>。3.5~5 μm 的颗粒其质量分数为 75%,整个分布曲线呈单峰分布,粒度分布窄而均匀。

2.2 二次溢流过滤分级流量与分级结果的关系

无论颗粒在床层中的流动还是在滤层以上的流动,分级的关键在于力场的合理设计<sup>[14]</sup>。料浆的浓度以及过滤介质床层的厚度对于颗粒在床层间的流动影响显著。对于较小粒度的原料浆,当颗粒浓度增加时颗粒间易产生干扰,共沉降作用明显,在分级过程中细颗粒间相互作用,易引起共同沉降,使分级效率降低<sup>[10,11]</sup>。通过多次实验研究,在层流条件下确定原料的质量分数为 4%,床层介质的高度为 20 cm。在力场稳定、层流的条件下,为获得产率较高的 W2.5 产品,原料质量分数仍定为 4%,床层厚度设计为 40 cm,这样流体在层流区的渗透、扩散比较稳定,在此基础上研究进料流量的大小对溢流过滤分级效果的影响,结果如表 1 所示。

从表 1 中可看出,当流量控制在 1 500 mL/min 时, $D_{95}$  为 4.21 μm。由粒度分布图(图 2a)可看出,最粗粒含量为 0,基本粒 3.5~5 μm 含量为 40%,细粒 0~2.5 μm 含量为 8%,符合国家 W5 磨料产品标准(表 2)。流量为 1 425 mL/min 时同样可得到 W3.5 产品,产率较高。流量在 1 345 mL/min

表 1 一次溢流过滤分级结果

床层高度 /cm	流量 /(mL/min)	$D_5$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{95}$	K	产率/%
20	1 500	1.51	2.33	2.91	3.46	4.21	0.67	27.8
	1 425	1.18	1.98	2.58	3.19	4.06	0.62	23.5
	1 350	0.75	1.63	2.24	2.77	3.51	0.59	21.8
	900	0.78	1.36	1.77	2.12	2.55	0.64	18.7
	750	0.95	1.38	1.68	1.95	2.30	0.71	16.3
40	1 345	1.01	1.88	2.45	3.05	3.97	0.62	22.7
	900	0.96	1.10	1.23	1.40	2.03	0.76	16.2
	600	0.73	0.92	1.12	1.30	1.50	0.71	12.3
	450	0.42	0.71	0.82	0.98	1.20	0.76	8.9

时, $D_{95}$ 为 $3.97\text{ }\mu\text{m}$ .由粒度分布图(图 2b)可看出,最粗粒 $5\sim7\text{ }\mu\text{m}$ 含量为 0,基本粒 $3.5\sim2.5\text{ }\mu\text{m}$ 为 45%,细于 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 不多于 15%,得到 W2.5 产品(图 2c),分级精度 $D_{25}/D_{75}$ 为 0.62,表明分级精度较高,床层厚度为 40 cm.由流量与分级结果的关系(图 3a)可知,随流量的下降产率亦下降,这是由于流体上升过程流速减小,致使颗粒透过床层的初速度减小,大量的颗粒被介质所拦截,从而使床层空隙率减小,溢流速度减小,分级效率降低,分级精度随流量的增大先下降后上升.

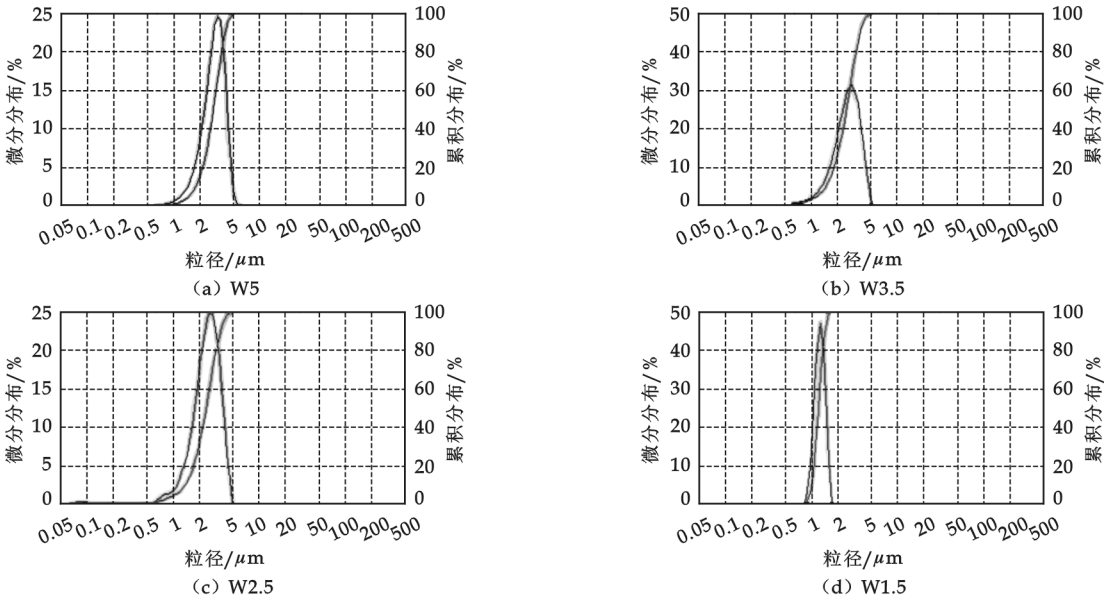


图 2 W5、W3.5、W2.5、W1.5 产品的粒度分布图

表 2 国家磨料标准<sup>[12]</sup>

粒度	最粗粒		粗粒		基本粒		混合粒		细粒	
	尺寸范围	允许颗粒	尺寸范围	质量%不多于	尺寸范围	质量%不少于	尺寸范围	质量%不多于	尺寸范围	质量%不多于
W7	14~10	2	10~7	20	7~5	40	7~3.5	70	细于 3.5	10
W5	10~7	3	7~5	20	5~3.5	40	5~2.5	70	细于 2.5	10
W2.5	7~5	0	5~3.5	20	3.5~2.5	40	3.5~1.5	70	细于 1.5	16

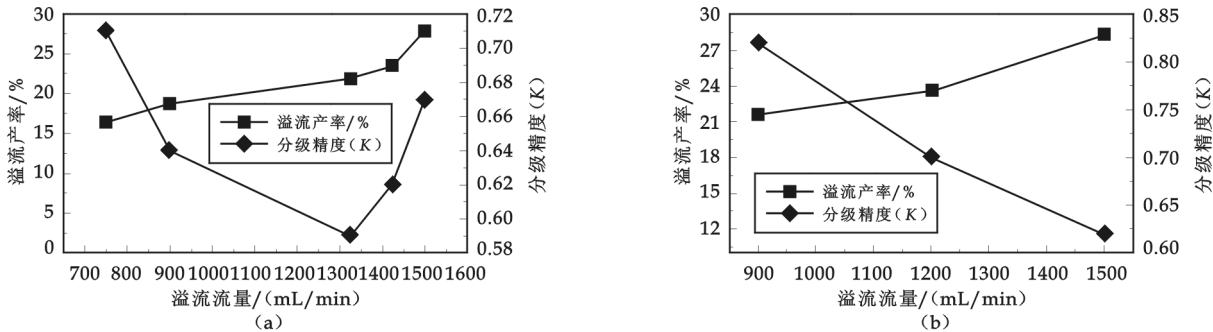


图 3 流量与产率及分级精度 K 的关系曲线

2.3 二次溢流过滤分级流量与分级结果的关系

表 3 二次溢流过滤分级结果

流量/(mL/min)	$D_5$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{95}$	K	产率/%
1 500	0.82	1.23	1.58	1.97	2.48	0.62	28.3
1 200	0.74	0.97	1.17	1.38	1.73	0.70	23.6
9 00	0.94	1.06	1.19	1.30	1.50	0.82	21.6

将一次溢流分级所得的 W5 粉料配制成浓度为 1% 的料浆,床层高度设计为 20 cm.由溢流过滤分级结果(表 3)可知,当溢流流量为 900 mL/min

时,  $D_{95}$  为  $1.5\ \mu\text{m}$  时分级精度可达 0.82, 精度很高. 由粒度分布累计曲线(图 2d)可知最粗粒  $2\ \mu\text{m}$  以上含量为 0, 基本粒  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  为 90%, 细粒  $0\sim 1\ \mu\text{m}$  含量为 10%, 得到 W1.5 产品. 通过二次溢流过滤分级实验, 滤层很好地对小颗粒进行了拦截, 二次分级产率较大, 由流量与分级结果的关系图(图 3b)可知分级精度和产率随流量的减小而升高, 分级效果比较好.

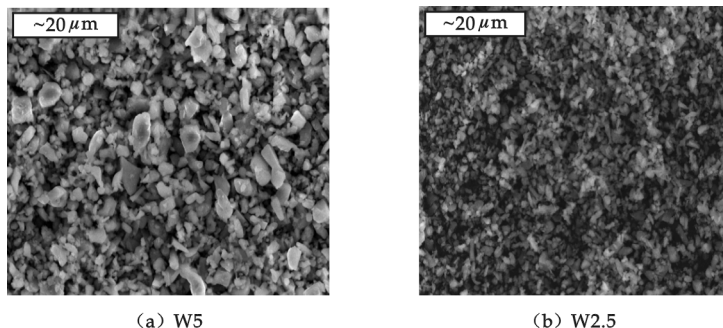


图 4 W5、W2.5 产品的扫描电镜照片( $\times 1\ 000$ )

#### 2.4 分级料浆的 W5、W2.5 的 SEM 分析

实验对分级后得到的 W5、W2.5 产品进行了 SEM 形貌分析, 目的是考察该溢流过滤分级装置对微粉颗粒的分级效果, 分级后产品的电镜照片如图 4 所示. 从电镜照片中可以看到该装置对  $0\sim 18\ \mu\text{m}$  的微粉原料的分级结果中没有其他粒度范围的混杂的现象, 无团聚物存在. 其中 W5 产品的基本粒分布较均匀、清晰可辨, 颗粒呈条状、片状、多角状、粒状, 球形比较少, 在基本粒中夹杂着较少的细小颗粒; W2.5 产品颗粒多呈针尖状、粒状、多角状, 颗粒整体分布比较均匀, 颗粒的分散性较好.

### 3 结论

溢流过滤分级是一种比较好的分级  $\beta$ -SiC 粉体的方法, 分级的关键在于力场的设计以及床层高度、原料浓度的配比. 在分级过程中, 流量的大小对于颗粒粒度的分布有显著影响.

(1) 溢流流量的大小对分级后产品的细度以及产率影响比较大, 流量越大颗粒的粒度越大, 产率越大; 流量越小产率越低, 分级效率越低, 适当的溢流流量可以得到比较理想的粒度分布产品.

(2) 该实验装置可稳定获得 W5、W3.5、W2.5、W1.5 的产品, 可以限制粒群分布的两侧, 得到粒度分布极窄的产品.

(3) 在多峰模式设置的情况下得到分级后料浆的粒度分布为单峰曲线, 说明分级后的产品粒度分布比较均匀, 粒度分布曲线越窄则粒度范围越窄.

### 参考文献

- [1] Dr.-Ing. C. Wadenpohl. Production of powder coatings with defined size distribution by grinding and inline classification[J]. Int. J. Miner. Process, 2004, (74S): 155-164.
- [2] 付信涛. 中国超细粉体材料应用市场综述[J]. 中国粉体工业, 2006, (03): 3-5.
- [3] 王瑾昭, 田长安, 赵娣芳, 等. 超细粉体的应用与分级[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2009, (02): 46-49.
- [4] 蒋 阳, 程继贵. 粉体工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2003: 258-261.
- [5] LAI Wei-hsiang, LU Wei-fu, CHEN Chia-chin. The new expression of the effectiveness of powder classification[J]. Advance Powder Technology, 2005, 16(6): 611-620.
- [6] 陈振兴. 特种粉体[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 151-152.
- [7] 陈 玮, 王庆伟, 陈 燕, 等. 水力溢流分级在超细  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉体中的应用研究[J]. 中国粉体技术, 2006, (2): 21-23.
- [8] 林建凌, 黄宪君, 陈志强, 等. 超细硅酸锆湿法分级应用研究[J]. 中国粉体技术, 2002, 8(5): 21-23.
- [9] 李茂林, 卢寿慈. 湿式微细粒分级设备发展动态与分析[J]. 中国粉体技术, 2000, (S1): 136-139.
- [10] 李化建, 黄佳木, 梁保卫, 等. 硅酸锆超微粉的湿法分级实验研究[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(S0): 112-115.

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0072-05

层间接触条件对沥青路面高温性能的影响

李 欣

(山西省交通建设工程监理总公司, 山西 太原 030012)

**摘 要:**通过力学计算和室内试验研究了层间接触条件对沥青路面高温性能的影响.应用 BISAR 计算了不同层间接触条件下的沥青面层剪应力,通过直剪试验测定了洒布不同粘层材料的复合马歇尔试件的抗剪强度,采用车辙试验测定复合式车辙板的 DS 和总变形量.研究表明:完全光滑的层间接触条件大幅提高了沥青面层的最大剪应力,并加速了沥青面层发生剪切破坏而出现车辙;粘层提高了层间抗剪强度,不同的粘层材料对层间接触条件的改善效果不同;高抗剪强度的层间接触能提高复合式车辙板的高温性能;采取适当措施改善层间接触条件,对提高沥青路面的高温性能具有重要意义.

**关键词:**道路工程; 高温性能; 层间接触条件; 粘层油; 复合式车辙

**中图分类号:**U416. 217 **文献标识码:**A

0 引言

随着公路运输量日益增长和运输向重型化发展,尤其是高等级公路渠化交通的运行,沥青路面车辙已成为主要的病害类型<sup>[1-3]</sup>.半刚性基层沥青路面的车辙有压密性车辙和失稳性车辙,而失稳性车辙是主要的.失稳性车辙是指在荷载反复作用下产生的剪切力超过沥青混合料的抗剪强度,使流动变形累积成车辙,也叫流动性车辙<sup>[4]</sup>.因此,若要提高沥青路面的抗车辙性能有两种途径:一是优化路面结构设计,尽量降低沥青面层在荷载作用下的剪应力,如采取必要措施改善层间接触条件等;二是优化材料设计,提高沥青混合料的抗剪强度,包括原材料的优化选择、合理的配比设计等.本文主要讨论前一个问题.

表 1 中海 70# A 级沥青技术指标

技术指标	实测值	规范值	试验依据
25 ℃ 针入度/0.1 mm	68.4	60~80	T0604
针入度指数 PI	-0.95	-1.5~+1.0	T0604
软化点/℃	49.2	≥45	T0606
10 ℃ 延度/cm	46	≥20	T0605
15 ℃ 延度/cm	>100	≥100	T0605
60 ℃ 动力粘度/Pa·s	225.6	≥160	T0620
RTFOT	质量损失/%	±0.8	T0610
	针入度比/%	≥61	
	10 ℃ 延度/%	≥6	

我国采用多层弹性层状体系理论设计沥青路面结构,假定层间接触条件为完全连续.但实际道路中层间接触状态非常复杂,如粘层油的材料类型及用量都会影响层间的联结.如果忽视层间结合的结构要求,或者没有有效的材料与施工工艺来实现层间粘结处理,层间结合面就会成为路面整体结构的薄弱环节,导致路面结构的实际受力状况发生变化,加速路面发生永久变形等破坏<sup>[5]</sup>.

本文首先计算了在不同层间接触条件下的沥青面层剪应力的变化规律,从剪应力角

度分析了沥青路面发生车辙的潜在趋势,然后应用不同的粘层材料处理上下层厚均为 5 cm 的复合式车辙板,并测定了复合式车辙板的动稳定度 DS 和总变形量 l,分析了层间接触条件对混合料高温性能的影响.

\* 收稿日期:2009-08-13  
作者简介:李 欣(1973-),男,山西省太原市人,工程师,研究方向:道路材料

1 试验原材料

为了在室内验证层间接触条件对沥青路面高温性能的影响,进行上、下层厚均为 5 cm 的复合板车辙试验.在上、下层间洒布不同的粘层材料以模拟不同的层间接触状况,所用的粘层材料为中海 70<sup>#</sup> A 级沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性乳化沥青,技术指标如表 1、表 2、表 3 所示.复合车辙板上面层采用 AC-16(最佳油石比为 4.85%),下面层采用 AC-20(最佳油石比为 4.6%),按照规范级配中值设计,沥青统一采用中海 70<sup>#</sup> A 级沥青,粗集料为玄武岩.

表 2 SBS 改性沥青技术指标

技术指标	实测值	规范值	试验依据
25 ℃ 针入度/0.1 mm	76.6	60~80	T0604
针入度指数 PI	0.25	≥-0.4	T0604
5 ℃ 延度/cm	45.4	≥30	T0605
软化点/℃	81.5	≤55	T0606
135 ℃ 运动粘度/Pa·s	2.7	≥3	T0625
溶解度/%	99.6	≥99	T0607
弹性恢复(25 ℃)/%	94.2	≥65	T0662
离析,48 h 软化点差/℃	1.2	≥2.5	T0661
RTFOT	质量损失/%	0.48	≥1.0
	针入度比/%	80.1	≤60
	10 ℃ 延度/%	26.4	≤20

表 3 SBR 改性乳化沥青技术指标

技术指标	实测值	规范值	试验依据
25 ℃ 针入度/0.1 mm	75.3	60~80	T0604
针入度指数 PI	0.26	≥-0.4	T0604
5 ℃ 延度/cm	46.8	≥30	T0605
软化点/℃	64	≤55	T0606
135 ℃ 运动粘度/Pa·s	2.4	≥3	T0625
溶解度/%	99.3	≥99	T0607
弹性恢复(25 ℃)/%	87.2	≥65	T0662
离析,48 h 软化点差/℃	1.8	≥2.5	T0661
RTFOT	质量损失/%	0.31	≥1.0
	针入度比/%	73.5	≤60
	10 ℃ 延度/%	22.6	≤20

2 层间接触条件对面层剪应力的影响分析

2.1 计算结构及计算图式

采用我国广泛使用的半刚性基层路面结构,各层的厚度、材料参数如表 4 所示.

计算轴载采用标准轴载 BZZ-100,双轮组,轴重  $P=100\text{ kN}$ ,轮胎接地压强  $p=0.7\text{ MPa}$ ,单轮传压面当量圆直径  $2\delta=21.3\text{ cm}$ ,两轮中心距为  $1.5d$ .计算剪应力时计算图示如图 1 所示,要求计算 B、D、E、C 这 4 点,将最大值作为最大剪应力.

2.2 层间接触条件设置

将层间接触条件设置为完全连续和完全光滑两种,以对比分析不同层间接触条件对面层剪应力的影响.采用 Shell 设计法的 BISAR3.0 程序计算分析沥青面层的最大剪应力,该程序不仅可以计算任何一点的应力、应变和位移,还能设置不同的层间接触条件,既有连续,又有滑动. BISAR3.0 软件通过层间摩擦函数定义层间接触条件,该函数取决于轮载半径、接触面上的模量及接触面上的泊松比.具体计算时,BISAR3.0 中提供了两个定义层间接触条件的函数,一个是“标准剪切弹簧模型”,另外一个

表 4 路面结构计算参数

层位	材料	厚度 /cm	抗压模量 /MPa	泊松比
上面层	细粒式沥青混凝土	4	1 200	0.3
中面层	中粒式沥青混凝土	5	1 000	0.3
下面层	粗粒式沥青混凝土	6	800	0.3
基层	水泥稳定碎石	30	1 500	0.25
底基层	二灰碎石	20	1 300	0.30
	土基	—	40	0.35

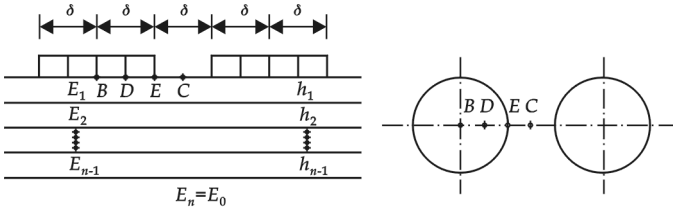
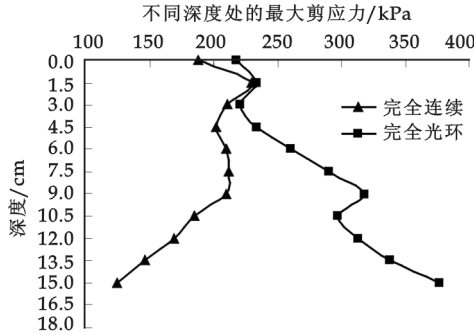


图 1 力学计算图式

另外一个是“简化的剪切弹簧模型”.本文采用后一种模型,该模型将摩擦系数函数简化为单变量函数,变量



为轮载半径的倍数,其值从 0 变化到 100 倍的轮载半径,其范围覆盖了从完全连续到完全光滑.



2.3 计算结果分析

分别计算不同深度处的  $B$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $C$  4 点(如图 1 所示),将最大值作为该深度处的最大剪应力,以 1.5 cm 作为一个计算深度,计算结果如图 2 所示. 由计算结果可知,当层间完全连续时,最大剪应力随深度的增大先增大后逐渐减小,最大值出现在距路表 1.5 cm 处;当层间完全光滑时,最大剪应力总体上随着深度的增加而逐渐增大,最大值出现在 15 cm 处;进一步分析,层间完全连续时上面层的平均剪应力是完全光滑时的 1.07 倍,中面层的为 1.32 倍,下面层的为 2.19 倍.

由此可知层间接触条件对沥青面层的剪应力影响很大,不良的层间接触条件能大幅度地提高面层的最大剪应力,导致沥青面层发生剪切破坏而加速出现车辙.

3 层间接触条件对复合式车辙板高温性能的影响

3.1 不同粘层材料的层间抗剪强度

为了有效区分不同粘层材料的层间粘结强度(层间接触条件),进行层间抗剪强度测试. 试验时先成型 5 cm 厚的 AC-20 车辙板,等冷却 16 h 后洒布粘层油,室温下放置 3 h 后待粘层油冷却,套上上层车辙板模子并加铺 5 cm 的 AC-16 混合料,碾压成型总厚度为 10 cm 的复合式车辙板. 复合式车辙板可直接用作  $DS$  试验,当需要进行剪切试验时,还需对复合式车辙板钻芯:使用钻芯机取样,芯样尺寸为  $\Phi 10 \times 10$  cm,每块复合车辙板可钻取 4 个试件,粘层材料统一采用  $0.6 \text{ kg/m}^2$ .

表 5 不同粘层油的抗剪强度

层间状况	无粘层油	中海 70 <sup>#</sup>	SBS 改性	改性乳化
层间抗剪强度 /MPa	0.072	0.085	0.135	0.156

采用直剪仪进行剪切试验,剪切速度为 50 mm/min,不施加正应力,试验温度为 60 ℃,试验结果如表 5 所示. 由表 5 可知,不同粘层材料的层间抗剪强度差别很大,其大小排序为改性乳化>SBS 改性>中海 70<sup>#</sup>>无粘层油,加改性乳化沥青的是无粘层油的 2 倍,说明采用适当的粘层材料能显著改善层间接触状况.

3.2 不同层间状况下的复合式高温车辙试验

与层间抗剪强度相同的复合式车辙板进行车辙试验,并测定  $DS$ 、总变形量,试验结果如表 6 所示.

表 6 不同层间接触条件的车辙试验结果

层间状况	动稳定度/(次/mm)				总变形量/mm			
	测量值	均值	标准差	变异系数	测量值	均值	标准差	变异系数
无粘层油	850	936.7	85.0	9.1	11.345	10.7	0.6	5.8
	1 020				10.104			
	940				10.75			
中海 70 <sup>#</sup>	1 230	1 224.7	124.1	10.1	9.546	9.6	0.5	5.0
	1 098				10.109			
	1 346				9.147			
SBS 改性	1 567	1 724.7	164.4	9.5	8.871	8.0	0.9	11.7
	1 712				8.179			
	1 829				7.016			
改性乳化	1 996	2 236.7	298.7	13.4	7.413	6.7	0.6	8.6
	2 142				6.349			
	2 571				6.467			

动稳定度  $DS$  代表沥青混合料每增加 1 mm 变形需要行走的次数,其值越大,说明沥青混合料的抗车

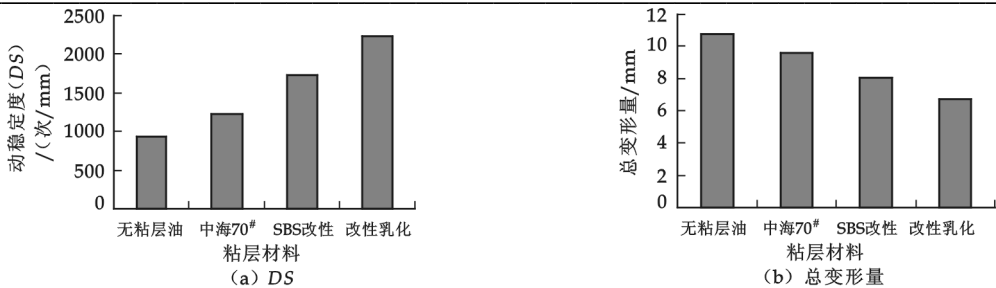


图 3 不同层间接触条件的车辙试验

辙能力越强. 由图 3(a)可知,不同层间接触条件下 DS 的大小排序为改性乳化>SBS 改性>中海 70#>无粘层油,与层间抗剪强度的变化趋势一致,说明复合式车辙板的高温性能随着层间接触条件的改善而逐渐提高. 进一步分析可知,复合式车辙板 DS 与层间抗剪强度  $\tau$  满足线性关系:  $DS = 14.090\tau - 47.426$  ( $R^2 = 0.9687$ ),说明层间抗剪强度越大得到的 DS 就越高.

总变形量  $l$  为车辙板在规定作用次数下的竖向累积变形,其值越小说明混合料抗荷载作用的能力就越强,即高温性能越好. 由图 3(b)可知,不同层间接触条件的总变形量  $l$  的大小排序为改性乳化<SBS 改性<中海 70#<无粘层油,与层间抗剪强度的排序相反,这也说明复合式车辙抵抗荷载的变形能力随着层间接触条件的改善而变强. 进一步分析可知,总变形量  $l$  与层间抗剪强度  $\tau$  满足线性关系:  $DS = -43.25\tau + 13.619$  ( $R^2 = 0.9735$ ),说明层间抗剪强度越大,总变形量  $l$  就越小.

#### 4 结束语

- (1)层间接触条件对面层最大剪应力的影响很大,完全光滑的层间接触条件大幅提高了沥青面层的最大剪应力,加速沥青面层发生剪切破坏而出现车辙.
- (2)粘层油提高了层间抗剪强度,即改善了层间接触条件;不同粘层材料的对层间接触条件的改善效果不同,效果最优的为改性乳化沥青,SBS 改性沥青次之,基质沥青的最差.
- (3)复合式车辙板的高温性能随层间抗剪强度的增大而得到提高,改善层间接触条件能提高复合式车辙板的高温性能.
- (4)采取适当的措施改善层间接触条件,对提高沥青路面的高温性能具有重要意义.

#### 参考文献

[1] 吴瑞麟,石立万,余海洋,等. 影响沥青路面全厚度车辙关键因素的试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2009,30(1):58-61.  
[2] 谭忆秋,宋宪辉,纪 伦,等. 粗集料性能对沥青混合料高温性能的影响[J]. 中国公路学报, 2009,22(1):29-33.  
[3] 马荣贵,沙爱民,宋宏勋. 路面车辙多路传感器检测误差分析[J]. 长安大学学报(自然科学版),2007,27(3):34-41.  
[4] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.  
[5] 胡小弟,孙立军,刘兆金. 沥青路面非均布荷载下层间接触条件不同时力学响应的三维有限元分析[J]. 公路交通科技,2003,20(3):1-4.

## INFLUENCE OF DIFFERENT INTERLAYER TOUCH TYPES ON HIGH-TEMPERATURE PERFORMANCE OF ASPHALT PAVEMENT

LI Xin

(Transportation Construction Project Supervision Company of Shanxi Province, Taiyuan 030012, China )

**Abstract:** The influence of different interlayer touch types on high-temperature of asphalt pavement was discussed. The influence of different interlayer touch types on shear stress of



asphalt pavement was studied with the soft of BISAR, and the anti-shear strength of compound Marshall sample bonded with different tack coats was tested with the method of direct shear test. At last, the DS and total deformation of compound rutting sample was tested by the rutting test. The results showed that: the shear stress of asphalt surface increased substantially when the interlayer touch type was smooth, and as a result, the rutting was easier to occurred; the tack coat improved the anti-shear strength of interlayer and different materials had different effect; the interlayer touch with high anti-shear strength would help to improve the high-temperature of compound sample; it is meaningful to take appropriate measures to improve the interlayer touch condition for improving high temperature performance of asphalt pavement.

**Key words:** road engineering; high temperature performance; interlayer touch type; tack coat; compound rutting

---

(上接第 71 页)

[11] LAI W. H. , LU W. F. , CHOU M. C. Sorting of fine powder by gravitational classification chambers[J]. Advanced Powder Technology, 2009, (20):177-184.

[12] GB/T 2477-1983. 磨料粒度及其组成[S],1983.

## EXPERIMENTAL STUDY ON OVERFLOW FILTRATION CLASSIFICATION OF $\beta$ -SiC POWDER

XIE Bin<sup>1</sup>, DENG Li-rong<sup>2</sup>, LIU Xiang-chun<sup>2</sup>, WANG Xiao-gang<sup>2</sup>, ZHANG Zhuo<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China; 2. College of Material Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:**  $\beta$ -SiC powders have been classified by hydraulic overflowing filtering method, the dual function of the overflowing and filtering classification have been reached. Then the influence of overflowing flux and bed height on filtering classification has been studied, and the products classified have been analyzed by granulometer and SEM. The new results shows, the W5, W3.5, W2.5, W1.5 products can be achieved steadily, and the classification precision and productivity are satisfactory, so the new requirements of narrow-level stable classification for  $\beta$ -SiC powder have been reached.

**Key words:** abrasive powder; overflow; filter classification; classification accuracy

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0077-03

# 五轴联动高速主轴铣头的设计与运动仿真

赵月娥<sup>1,2</sup>, 文怀兴<sup>1</sup>

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 陕西工业职业技术学院机械工程系, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:**利用现代设计理论与方法,提出了高速数控机床五轴联动铣头的结构方案,实现了 A/C 两轴的联动功能;采用 SolidWorks 三维软件对五轴联动铣头进行了三维建模及运动仿真,验证了设计参数的合理性,为五轴联动铣头的结构设计提供了指导。  
**关键词:**五轴联动铣头; 双导程蜗杆; SolidWorks 三维软件; 运动仿真  
**中图分类号:**TH16                      **文献标识码:**A

## 0 引言

五轴联动数控机床是加工叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴等零件的重要装备。五轴联动铣头作为五轴数控机床的关键部件,一直是机床制造企业市场竞争的焦点之一。发达国家五联动铣头的制造技术已较成熟,由于各种原因,国内在五联动数控铣头功能部件的设计制造方面还有不少差距。为了满足市场需要,机床行业积极组织各方面的力量研究开发,力争在短时间内研制出自己的产品<sup>[1]</sup>。为此,本文针对高速数控龙门铣床设计了用于该机床的五轴联动铣头结构,此结构可实现 A/C 两轴联动,同时采用双导程蜗杆传动技术解决了普通蜗杆传动在啮合过程中齿廓磨损这一缺陷,提高了机床的加工精度。

## 1 五轴联动铣头的设计思路

根据设计任务的要求,收集有关技术资料进行调研分析,拟定系统的设计方案,确定运动参数;采用 SolidWorks 设计软件进行五轴联动铣头的三维建模、虚拟装配,并进行运动仿真。其主要的设计过程流程如图 1 所示。

## 2 五轴联动铣头的结构设计

### 2.1 五轴联动铣头的总体方案<sup>[2]</sup>

龙门式五轴联动高速数控机床是当代机械制造业的主流设备,五轴联动铣头是这类机床的核心部件。目前,在五轴联动铣头中,意大利意萨(ISA)公司和德国西泰克(CyTec)公司的产品具有竞争优势,国内桂林机床股份有限公司也开发出了产品。综合现有产品资料,五轴联动铣头有 3 种设计方案。

方案 1:五轴联动铣头的 A/C 轴全采用“零传动”结构,直接由力矩电机(Torquer Motor)驱动。德国西泰克(CyTec)公司产品属此类结构,如图 2 所示。

方案 2:五轴联动铣头采用纯机械结构,A 轴由双导程蜗杆驱动,C 轴也由双导程蜗杆驱动。

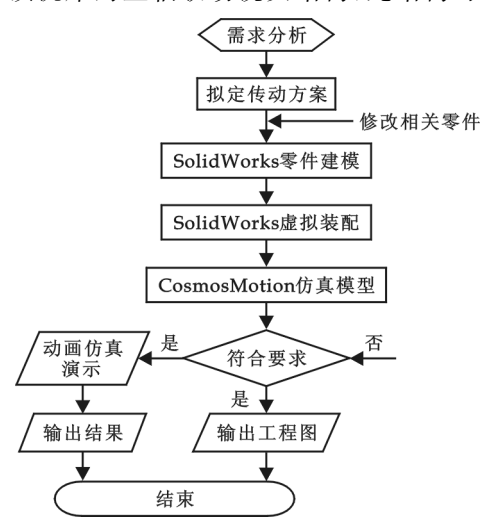


图 1 开发流程图

\* 收稿日期:2009-10-17  
作者简介:赵月娥(1978—),女,陕西省咸阳市人,讲师,在读硕士生,研究方向:数控加工与高速切削



图 2 西泰克五轴头

方案 3:采用纯机械结构,A 轴由双导程蜗杆驱动,C 轴由精密齿轮啮合驱动。

上述 3 种方案中,方案 1 结构紧凑、体积小、加工精度高,缺点是造价过于昂贵;方案 2 与方案 1 相比,加工精度偏低,且体积较大,外观造型比较笨重;方案 3 的结构特点介于方案 1 与方案 2 之间,体积相对较小,而且成本相对较低。通过以上方案的对比分析,本文采用方案 3 的结构设计。

## 2.2 五轴联动铣头的运动参数

通过对国内外机床市场的调研,在收集大量相关资料的基础上,借鉴桂林机床股份有限公司的摆动式 A/C 轴联动铣头资料,结合我国机床发展现状,作者确定了五轴联动铣头产品的运动参数:

(1)A 轴摆动角度为 $\pm 100^\circ$ ,轴回转角度为 $\pm 370^\circ$ (连续分度)。

(2)A 轴摆动速度为 $0\sim 10(\text{r/min})$ ,C 轴回转速度为 $0\sim 20(\text{r/min})$ 。

## 2.3 五轴联动铣头的动作实现

根据五轴联动铣头总体方案及运动参数,设计出五轴联动铣头机械结构,如图 3 所示。其结构特点为:A 轴与 C 轴的传动都嵌在 Z 轴滑枕内,且 A 轴传动在铣头套内完成,并相对于 C 轴运动结构独立。五轴联动铣头主要是实现两轴联动动作,其中 C 轴回转运动传动路线为:C 轴伺服电机 2→小齿轮 3→大齿轮 4→铣头套 5;A 轴摆动运动传动路线为:A 轴伺服电机 6→同步带轮 7→齿轮同步带 8→同步带轮 9→双导程蜗杆 10→双导程蜗轮 11→电主轴套 12→内藏式电主轴 13。C 轴回转运动是由一对标准精密直齿圆柱齿轮传动来实现,A 轴摆动运动是由一对双导程蜗杆传动实现。

## 2.4 双导程圆柱蜗杆的选用<sup>[3]</sup>

双导程蜗杆传动中,其啮合原理与一般蜗轮副啮合原理相同,蜗杆的轴向截面仍相当于基本齿条,蜗轮则相当于与之啮合的齿轮。蜗杆轮齿两侧面导程数值不同,相应的左、右齿面模数也存在一个差值,因而蜗杆的齿厚就不再是定值,而是沿轮齿螺旋线方向逐渐变化,形成了渐变的齿厚,因此又有了渐厚蜗杆之称。正因为双导程蜗杆具有这种齿厚从蜗杆的一端到另一端逐渐增大或减小的特征,所以可用蜗杆的轴向移动来调整蜗杆副的齿侧间隙,使之得到所要求的侧隙,而无须增加新的结构或改变中心距,同时在运转磨损后还可以根据实际侧隙的变化调整蜗杆轴向位置,以保持所要求的侧隙,保证传动精度,延长蜗杆副的使用寿命。

双导程蜗杆传动与单导程蜗杆传动相比,其主要优点是在不改变中心距的情况下,可通过调整蜗杆的轴向位置来调整蜗杆副的侧隙,因此当蜗杆副磨损后可将蜗杆沿轴向调整,以重新获得其适当的侧隙,从而保证传动精度。根据实际经验,侧隙可调整至 $0.01\sim 0.015\text{ mm}$ 。由于双导程蜗杆传动保持了正确的啮合关系,所以传动稳定,精度保持性好。因而,双导程蜗杆传动常用在运动精度要求较高的机构中,如机床分度机构、读数机构等。

理论上讲,双导程蜗杆的齿形也可以按普通圆柱蜗杆那样分类,其中,以阿基米德(ZA)和法向直廓(ZN)这两种齿形因制造工艺性好而最常见。本文采用法向齿廓(ZN)双导程圆柱蜗杆,且蜗杆右齿面模数 $m_R > \text{公称模数 } m > \text{蜗杆左齿面模数 } m_L$ 。

鉴于双导程蜗杆的制造方法,在蜗轮副严重磨损而需要更换时最好是成对更换,因为只更换蜗杆或蜗轮而要保证更换后的蜗轮副有良好的接触精度,无论对测绘还是对制造来说都是很困难的。双导程蜗杆的

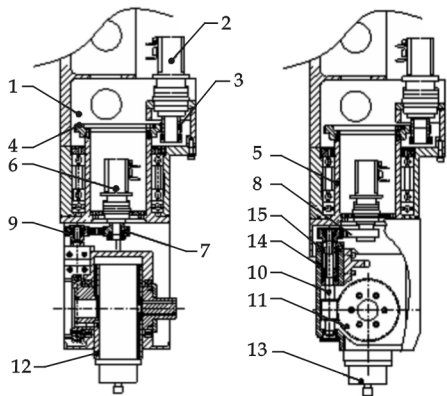


图 3 五轴联动铣头结构图

1—Z 轴滑枕,2—C 轴伺服电机,3—小齿轮,4—大齿轮,5—铣头套,6—A 轴伺服电机,7—同步带轮 1,8—齿轮同步带,9—同步带轮 2,10—双导程蜗杆,11—双导程蜗轮,12—电主轴套,13—内藏式电主轴,14—蜗杆座,15—蜗杆套

调整结构应该保证调整方便,连接可靠,常见采用剖分式调整垫结构的较多(如图 4 所示).当产生齿侧隙需要调整双导程蜗杆时,将螺钉松开,取下剖分式垫圈 3,将蜗杆轴向移动至齿侧隙消除,根据此时蜗杆的位置尺寸配磨垫圈 3 至满足这个尺寸,再装上即可.

3 五轴联动铣头的运动仿真<sup>[4]</sup>

计算机仿真技术的运用已成为机构运动分析的一种重要手段.在进行机构设计工作的同时,充分利用计算机仿真技术,对机构进行运动学和力学分析,能够极大地提高对所设计的系统方案可能存在问题的预见性,从而使设计工作更科学、合理,更全面迅速.

3.1 五轴联动铣头三维装配模型的建立

在 SolidWorks 中,基于参数化、变量化及相关性的原则,可以方便地建立五轴联动铣头的三维装配模型.此物理模型被称为主模型,是仿真分析的基础.创建运动分析方案时,运动分析模型自动复制主模型的装配文件,并建立一系列不同的运动分析方案,就可直接更新装配主模型以反映优化设计的结构,这也是相关性设计优点的体现.

3.2 五轴联动铣头的运动学仿真

本设计通过 Solid Works 软件中 COSMOS Motion 插件来进行五轴联动铣头的运动仿真分析.通过对这个运动仿真模型进行运动分析,动态地观察整机机构的运动状况,验证该运动机构设计的合理性,并且可以将各个构件的位移、速度、加速度和力的变化情况以图表的形式输出,同时可以方便地修改仿真模型的参数,驱动实体模型的更新,以达到优化设计的目的.运动仿真是在产品设计组件环境下进行的.

(1)在 Solid Works 工作环境中,调用 COSMOS Motion 插件.将 COSMOS Motion 设置为“活动插件”,在左侧的管理窗口中将增加一项 Motion 的选项卡,然后点击菜单栏上 COSMOS Motion 可进入 COSMOS Motion 的编辑窗口.

(2)定义运动模型,驱动与仿真.点击 COSMOS Motion 根目录下的“智能运动构建器”菜单,弹出“智能运动构建库”对话框,通过该向导的分步执行,可以把装配体节点转换为运动节点,进行系统的力学参数设置及运动仿真,观察运动仿真结果.

(3)结构优化.从结构上分析仿真过程中出现的各种情况并借此优化各个零部件的结构和尺寸,尤其是在初始设计时初估的尺寸,经过反复修改设计使其达到预期的效果.

(4)仿真结果输出.获取分析结果,其中包括动画播放、位移、速度、加速度、驱动力矩及轨迹曲线等.图 5 的(a)和(b)分别为五轴联动铣头在仿真运动过程中不同时刻的两幅截图.

4 结束语

五轴联动铣头一直是五轴联动龙门式数控机床的瓶颈,本文设计出高效实用的五轴联动铣头结构,具有 A/C 轴功能,其中 C 轴采用精密齿轮传动结构,A 轴采用双导程蜗杆传动形式,该结构具有轴向间隙补偿功能,弥补了其他普通蜗杆传动形式因蜗杆啮合磨损而造成的轴向间隙问题,有效的提高了机床的加工精度.该铣头广泛应用于叶片、叶轮、模具、航空和船舶工业等各种类型的复杂曲面零件加工.

(下转第 83 页)

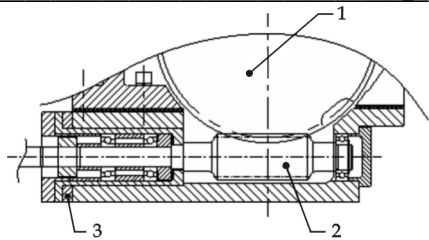


图 4 双导程蜗杆的剖分式调整垫结构  
1-蜗轮,2-蜗杆,3-调整垫圈

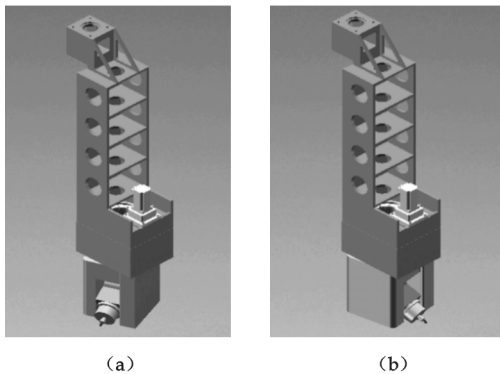


图 5 五轴联动铣头运动仿真截图

# 数控机床误差补偿的数控指令修正方法研究

李耀明, 沈兴全, 王爱玲

(中北大学机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051)

**摘要:**数控机床的加工是通过数控指令来实现的,理想的数控指令可得到理想的刀具轨迹,但在实际加工中,由于运动误差,实际轨迹与理想轨迹有差异,致使这些指令不能得到理想的轨迹.作者结合数控机床各部件间的运动形式,对数控指令修正方法进行了研究,通过对数控指令加以修正,使加工轨迹控制在理想轨迹附近,改善了加工的质量,并以三轴数控机床为对象进行了实验验证,结果证明该修正方法有效的提高了机床加工精度.

**关键词:**数控机床;误差补偿;数控指令

**中图法分类号:**TG659;TH161

**文献标识码:**A

## 0 引言

数控机床软件误差补偿是根据对误差的检测分析,在加工过程中从软件上对这种误差进行修正,达到降低误差,提高加工精度的目的,比较灵活通用.通过软件进行误差补偿,对数控机床进行现场测试,得出机床的实际运动轨迹(含有误差),再将这些数据存入计算机中,对理想轨迹进行修正,即可提高数控机床的加工精度.此方法无需对数控机床本身进行数控改造,却能提高加工精度<sup>[1]</sup>.

## 1 数控指令修正算法

数控指令有理论数控指令和实际数控指令之分.理论数控指令是指根据机床理想运动模型对刀具路线编写的一套指令,实际数控指令是指实际驱动伺服电机的指令,它是可以修正的.如果用理论指令直接驱动电机,由于机床运动过程中的误差没有得到补偿,往往造成加工误差过大,不能满足产品精度需要.相反,如果根据机床运动误差变化情况对理论指令进行适当的修正,用修正后的数控指令驱动电机则能减小加工误差,实现精加工的目的<sup>[2,3]</sup>.理论数控指令的生成并不难,而能够实现精加工的数控指令的生成则相对困难,它需要找出正确的数控指令修正算法,而该算法必然要正确反映机床运动链中的各种误差因素,因此建立起数控指令修正的算法模型是软件误差补偿的关键环节之一<sup>[4]</sup>.

由数控机床的运动模型可以知道,设数控机床刀具坐标系为  $O-x_t y_t z_t$ ,刀具上成形点  $P$  在坐标系  $O-x_t y_t z_t$  中的坐标为:

$$P_t = (x_t, y_t, z_t, 1)^T \quad (1)$$

当机床做理想成形运动时, $P$  在工件坐标系  $O-x_w y_w z_w$  的坐标为:

$$P_w = [A](x_t, y_t, z_t, 1)^T \quad (2)$$

矩阵  $A$  是机床各部件的理想静止特征矩阵与理想运动特征矩阵,只是不同机床模型所对应的矩阵  $A$  不同.上式是理想成形函数的一般形式,选择不同的机床后要设置不同的参数,其中包括理想情况下和有误差情况下的参数方程.

\* 收稿日期:2009-09-24

作者简介:李耀明(1977—),男,吉林省四平市人,讲师,在读博士生,研究方向:先进制造技术

基金项目:山西省青年自然科学基金资助项目(2009021022-2)、山西省2008年研究生优秀创新资助项目

在实际加工过程中,由于存在误差,所以在标准的数控指令下刀具的运动轨迹不符合所要求的轨迹,要通过数控指令的修改来获得需要的轨迹。

数控指令修正的直接算法就是通过确定的数学模型关系式,直接计算出能实现误差补偿的数控指令。数控机床成形运动模型为直接计算实际数控指令提供了一个可行途径,可以根据该运动模型建立起刀具路线、数控指令与刀具轨迹之间的精确关系式,从而十分方便地直接计算出实际数控指令,其直接计算流程如图1所示。

以下对流程图中的各个环节加以说明。

### (1) 刀具路线至数控指令的理想关系式

对于三轴立式 FXYZ 数控机床,理想的刀具成形点位置运动约束方程如下:

$$P_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_w \\ 0 & 1 & 0 & -y_w \\ 0 & 0 & 1 & -z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \\ 1 \end{pmatrix}$$

可以得到刀具路线至数控指令的理想关系式:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{wx} \\ P_{wy} \\ P_{wz} \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix}$$

### (2) 刀具路线至数控指令的实际关系式

对于三轴立式 FXYZ 数控机床,实际运动的刀具成形点的位置约束方程为:

$$P_w = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\gamma_w & -\Delta\beta_w & -\Delta x_w \\ -\Delta\gamma_{wd} & 1 & \Delta\alpha_w & -\Delta y_w \\ \Delta\beta_{wd} & -\Delta\alpha_w & 1 & -\Delta z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_w \\ 0 & 1 & 0 & -y_w \\ 0 & 0 & 1 & -z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_x & \Delta\beta_x & \Delta x_x \\ \Delta\gamma_x & 1 & -\Delta\alpha_x & \Delta y_x \\ -\Delta\beta_x & \Delta\alpha_x & 1 & \Delta z_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{xy} & 0 & 0 \\ \Delta\gamma_{xy} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_y & \Delta\beta_y & \Delta x_y \\ \Delta\gamma_y & 1 & -\Delta\alpha_x & \Delta y_y \\ -\Delta\beta_x & \Delta\alpha_y & 1 & \Delta z_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta\beta_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & -\Delta\alpha_{yz} & 0 \\ -\Delta\beta_{xz} & \Delta\alpha_{yz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_z & 0 & 0 \\ \Delta\gamma_z & 1 & -\Delta\alpha_t & \Delta y_z \\ -\Delta\beta_z & \Delta\alpha_z & 1 & \Delta z_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_t & \Delta\beta_t & \Delta x_t \\ \Delta\gamma_t & 1 & -\Delta\alpha_t & \Delta y_t \\ -\Delta\beta_t & \Delta\alpha_t & 1 & \Delta z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \\ 1 \end{pmatrix}$$

### (3) 实际数控指令的生成计算

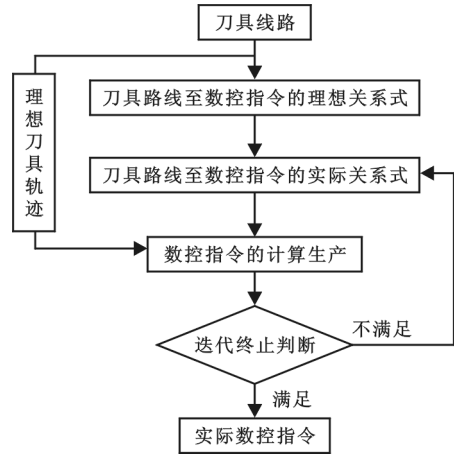


图1 软件误差补偿中实际数控指令的直接计算流程

观察机床刀具路线与数控指令的实际关系式,在等式右侧都包含了数控指令值,不能直接计算出刀具路线上的点所对应的实际数控指令,因此需用数值迭代法.

数控指令初值就是理论数控指令:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{wx} \\ p_{wy} \\ p_{wz} \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \\ 1 \end{pmatrix}$$

(4) 迭代终止判断

当满足下列迭代终止条件时,迭代终止,输出最后一次计算得到的数控制令:

$$\left. \begin{aligned} |p_{wxk} - p_{wxk-1}| &\leq \epsilon_x \\ |p_{wyk} - p_{wyk-1}| &\leq \epsilon_y \\ |p_{wzk} - p_{wzk-1}| &\leq \epsilon_z \end{aligned} \right\}$$

2 试验分析

实验是在一台配备有华中型数控系统的 XHK 加工中心上进行的,采用球杆仪对机床进行了测量分析.测量范围为 X 轴 0~500 mm,Y 轴 0~400 mm,Z 轴 0~200 mm 的矩形区域,每条测量线上取 10 个测量点,选取位移误差的测量间隔为 20 mm,在每个测量点上重复测量 5 次,取平均值.通过对数控指令的修正,可使加工获得误差补偿,补偿的测量分析结果如图 2 所示.

补偿后机床的误差数据:(1)圆度:65.4 μm;(2)max: +23.1 μm,0 度;(3)min: -43.3 μm,272.2°.

主要误差项目:(1)18%Y 方向垂直度;(2)15%X 方向垂直度;(3)16%X 方向直线度;(4)12%Y 方向直线度;(5)7%比例不匹配.

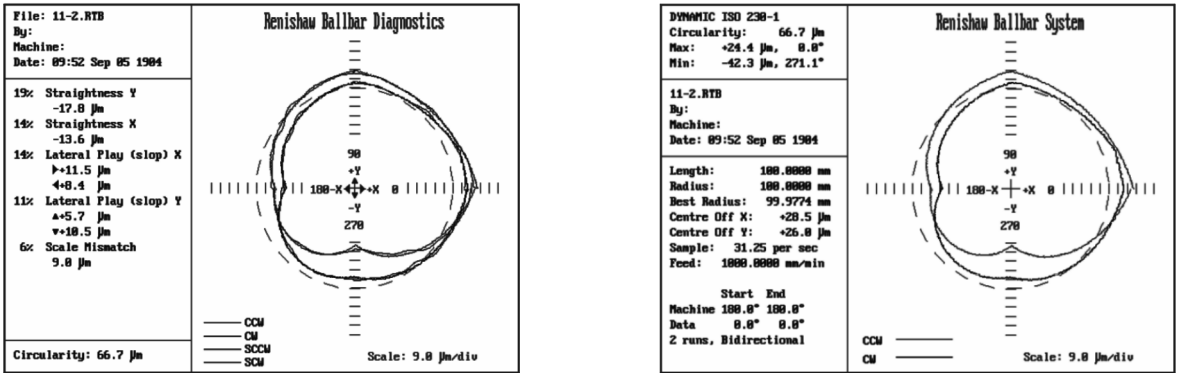


图 2 补偿后的球杆仪测量综合分析结果

由分析结果可见,误差补偿后机床的圆度误差减小到了 62.3 μm,各单项误差都有所降低,机床的主要误差项为 X 和 Y 方向的垂直度误差.

3 结束语

本文结合数控机床各部件间的运动形式,研究了数控机床运动的数控指令修正方法,规范了数控机床软件的补偿方法,该方法具有通用性强、灵活性高、实用性强的特点,无需对数控机床本身进行数控改造却能提高加工精度,具有广泛的应用前景.

参考文献

[1]朱洪海.工艺系统误差综合误差补偿原理及其应用[J].制造技术与机床,2001,(12): 30-31.



[2] 范普伟. 数控机床几何误差补偿关键技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2005, (5): 19-22.

[3] 沈兴全, 张清. 三坐标数控机床精度检测与误差补偿[J]. 测试技术学报, 2005, (3): 266-268.

[4] R. Ramesh, M. A. Mannan, A. N. Poof. Error compensation in machine tool-A review part II: thermal errors[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, (5): 1257-1284.

## STUDY ON THE METHOD OF THE CORRECTING NC COMMAND FOR THE ERROR COMPENSATION OF NC MACHINE

LI Yao-ming, SHEN Xing-quan, WANG Ai-ling

(School of Mechanical Engineering and Automation, North University of China, Tai yuan 030051, China)

**Abstract:** NC machining achieves the ideal of NC commands by NC control command to available to the ideal, but in actual processing, due to motion error, there are differences between the actual trajectory and the ideal trajectory, these instructions can not be the ideal trajectory, by the movement between the various components of the NC machine, the Method of the Correcting NC Command have been studied in the paper, so that processing of trajectory control in the vicinity of the ideal trajectory, improving the processing quality. And to three-axis CNC machine tools as experimental object, and test results verify that the correction method effectively improves machining accuracy.

**Key words:** NC machine; error compensation; NC command

(上接第79页)

### 参考文献

[1] 高俊. 五轴数控高速铣削加工中心的仿真研究——虚拟建模和模态分析[R]. 上海: 同济大学, 2007.

[2] 高平, 王科社. 力矩电机驱动双摆头的结构设计[J]. 制造技术与机床, 2007, (4): 111-112.

[3] 谈嘉祯. 机械设计[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001, 8: 237-245.

[4] 郑长松, 郭军. SolidWorks 2006 中文版机械设计高级应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 215-252.

## DESIGN AND MOTION SIMULATION OF FIVE- AXIS HIGH-SPEED SPINDLE MILLING HEAD

ZHAO Yue-e<sup>1,2</sup>, WEN Huai-xing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** The use of modern design theory and methods, developed the structure of programs of high-speed five-axis CNC machine tools milling head to achieve the A/C 2-axis of the linkage functions; the use of Solidworks 3D software for five-axis milling head for a three-dimensional modeling and its motion simulation to verify the design parameters is reasonable, for the structural design of five-axis milling head to provide guidance.

**Key words:** five-axis milling head; dual-lead worm; Solidworks 3D software; motion simulation

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0084-03

# 齿轮传动最小油膜厚度分析及改善润滑的措施

王宁侠<sup>1</sup>, 蒋新萍<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 常州轻工职业技术学院机械工程系, 江苏 常州 213164)

**摘要:**根据弹性流体动力润滑理论,通过对齿轮传动中形成动压油膜的参数分析,得出齿面最小油膜厚度发生在小齿轮齿根与大齿轮齿顶开始啮合点的位置,认为应以此处的润滑状态作为齿面润滑状态的判断依据,同时给出了一些改善齿轮传动润滑状态的措施。  
**关键词:**弹性流体动力润滑; 起始啮合点; 油膜厚度  
**中图分类号:**TH132.41      **文献标识码:**A

## 0 引言

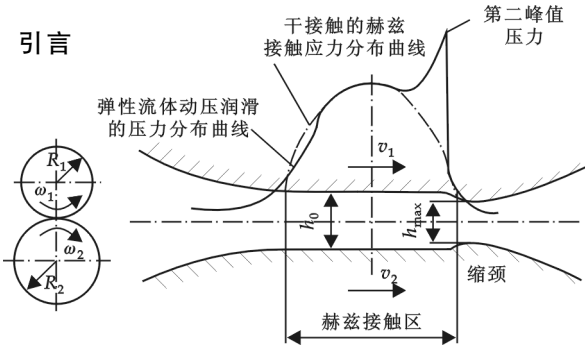


图1 弹性流体润滑时的油膜厚度及压力分布

齿轮传动除节点外各啮合点处均有相对滑动,因此齿面的润滑是必不可少的,而齿面的润滑状态与齿面的失效形式密切相关.根据弹性流体润滑理论,点、线接触的运动副其表面的润滑油膜厚度与材料的弹性变形、流体动压和粘压关系、两接触表面的平均速度、所受载荷大小等有关,微接触区内油膜厚度及油压的变化如图1所示,其最小油膜厚度的计算公式,即道森-希金森方程如下<sup>[1]</sup>:

$$h_{\min} = 2.65\alpha^{0.54}(\eta_0 v)^{0.7}R^{0.43}E'^{-0.03}W^{-0.13} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为润滑油的粘压系数; $\eta_0$ 为大气压下的粘度; $v$ 为两接触表面沿相对运动方向的平均速度; $R$ 为接触点的综合曲率半径, $R=R_1R_2/(R_1+R_2)$ ;  $W$ 为单位接触宽度上的载荷; $E'$ 为当量弹性模量, $\frac{1}{E'} = \frac{1}{2}(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2})$ ,  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 分别为两接触体材料的弹性模量和泊松比.

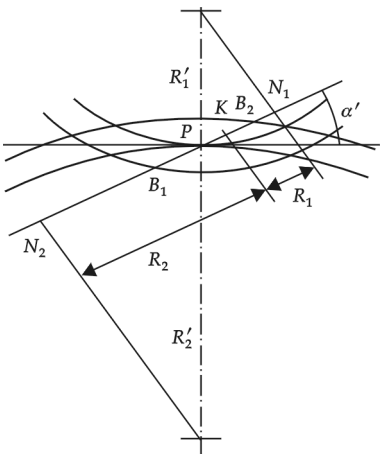


图2 齿轮啮合的几何参数

如图2所示的渐开线直齿圆柱齿轮传动中,两齿廓接触于任一点K,接触点K处两齿廓的曲率半径分别为 $R_1$ 、 $R_2$ ,此时可看成是半径分别为 $R_1$ 、 $R_2$ 的两圆柱体相接触,根据(1)式可分析该点处的最小油膜厚度.齿轮的啮合传动过程是很复杂的,轮齿在传动中不断地进入啮合、脱离、啮合,接触线在齿面上的位置不断变化,接触处的几何形状(曲率半径)和运动速度随接触位置的变化而变化.啮合区内各点的最小油膜厚度是变化的,那么最小油膜厚度的最小值发生在什么位置?判断齿面润滑状态时应以哪一点的最小油膜厚度为依据?以下

通过分析确定最小油膜厚度发生的位置.

\* 收稿日期:2009-09-26  
作者简介:王宁侠(1963—),女,陕西省扶风县人,教授,研究方向:机械制造与设计

## 1 齿轮传动最小油膜厚度计算分析

在齿轮传动中,齿轮和润滑油确定后,当量弹性模量  $E'$ 、 $\alpha$  和  $\eta_0$  可作为常数加以考虑,故令常数<sup>[2]</sup>

$$C = 2.65\alpha^{0.54}\eta_0^{0.7}E'^{-0.13} \quad (2)$$

则(1)式简化为:

$$h_{\min} = C \cdot v^{0.7} \cdot R^{0.43} \cdot W^{-0.13} \quad (3)$$

由(3)式可以看出:最小油膜厚度  $h_{\min}$  随速度  $v$  及综合曲率半径  $R$  的增加而增加,随单位接触线长度上载荷  $W$  的增大而减小.一对齿的啮合过程中,啮合点位置是变化的,啮合点的  $v$ 、 $R$  也随之变化,由于重合度的影响,也使  $W$  在啮合过程中随啮合位置而发生变化.因此,在啮合区内各点的油膜厚度是变化的,需分析最小油膜厚度发生的位置.

### 1.1 综合曲率半径分析

由图2可知,一对齿廓从  $B_2$  点进入啮合,从  $B_1$  点脱离啮合, $P$  点为节点, $N_1N_2$  为理论啮合线,设其长度为  $L$ .若齿廓任一瞬时相切接触于  $K$  点处,大、小齿轮齿廓在  $K$  点的曲率半径分别为  $R_2$ 、 $R_1$ ,则有:

$$R_1 + R_2 = L \quad (4)$$

任一点接触的综合曲率半径为:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 - \frac{R_1^2}{L} \quad (5)$$

将  $R$  对  $R_1$  分别求一次导数、二次导数,分析得知,当  $R_1 = L/2$  时  $R$  取极大值,记为  $R_{\max} = L/4$ ;当  $R_1 < L/2$  时, $R$  随  $R_1$  的增大而增大;当  $R_1 > L/2$  时, $R$  随  $R_1$  的增大而减小.设两轮齿数比  $Z_2/Z_1 = i$ ,则节点  $P$  啮合时有:

$$R_{2P} = iR_{1P}, R_{1P} = \frac{L}{1+i}, R_P = \frac{iL}{(1+i)^2} \quad (6)$$

当  $i > 1$  时,  $R_{1P} < L/2$ , 则  $R_P < R_{\max}$ ,  $B_2$  点为起始啮合点,又有  $R_{1B2} < R_{1P}$ , 故  $R_{B2} < R_P$ ,  $B_2$  点的综合曲率半径  $R_{B2}$  为最小.

### 1.2 齿面卷吸速度

设两齿轮角速度分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ , 则齿廓任一点接触时对润滑油的卷吸速度为<sup>[3]</sup>:

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = \frac{1}{2}(\omega_1 R_1 + \omega_2 R_2) = \frac{\omega_1}{2i}[L + (i-1)R_1] \quad (7)$$

齿面动压油膜的厚度随卷吸速度的增加而增大,而速度又是  $L$ 、 $i$ 、 $\omega_1$ 、 $R_1$  的函数,将(7)式分别对各变量求导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial R_1} = \frac{\omega_1}{2i}(i-1) \\ \frac{\partial v}{\partial i} = -\frac{\omega_1}{2i^2}(L-R_1) \\ \frac{\partial v}{\partial L} = \frac{\omega_1}{2i} \\ \frac{\partial v}{\partial \omega_1} = \frac{1}{2i}[L + (i-1)R_1] \end{cases} \quad (8)$$

分析(8)式,由于一般传动  $i > 1$ , 且有  $L > R_1$ , 所以可以看出  $v$  随  $R_1$ 、 $L$ 、 $\omega_1$  的增大而单调增大,随  $i$  的增大而单调减小.在齿轮传动中,一般  $L$ 、 $\omega_1$ 、 $i$  均为定值,故  $v$  仅随  $R_1$  而变化,在起始啮合点  $B_2$  处  $R_{1B2}$  最小,故卷吸速度  $v_{B2}$  最小.

### 1.3 最小油膜厚度分析

根据以上分析,起始啮合点  $B_2$  处的综合曲率半径  $R_{B2}$  和卷吸速度  $v_{B2}$  皆为啮合过程中的最小值,现在考虑载荷  $W$  的影响.在齿轮传动中,一般有  $1 < \epsilon_a < 2$ , 因此,  $B_2$  点处于双齿啮合区,考虑到动压油膜传递载荷的作用,  $B_2$  处作用的载荷  $W_{B2}$  将小于节点  $P$  处的载荷  $W_P$ .但是,由于载荷对油膜厚度的影响很小(指数为  $-0.13$ ), 因此,即使按  $W_{B2} = W_P/2$  进行计算,所得到的最小油膜厚度  $h_{\min B2}$  的值也仅比按  $W_{B2} = W_P$

所得到的结果  $h_{\min B_2}'$  稍大一点 ( $h_{\min B_2} = 1.094 \ 3 h_{\min B_2}'$ ).

显然,这种影响和  $R$ 、 $v$  对最小油膜厚度的影响相比是很微小的,其综合影响的结果仍然是小齿轮齿根与大齿轮齿顶开始啮合点的油膜厚度最小. 以一对  $m=4 \text{ mm}$ ,  $i=4$ ,  $Z_1=25$  的标准直齿圆柱齿轮传动为例进行计算,节点处载荷按  $W$  计算,  $B$  点处载荷按  $W/2$  计算,可得到  $h_{\min B_2} = 0.681 \ 7 h_{\min P}$ .

综上所述,可以得到以下结论:

(1) 一对直齿轮传动中,小齿轮齿根与大齿轮齿顶开始啮合点  $B_2$  处的最小油膜厚度最小,故应以此点的油膜厚度作为整个齿轮传动是否出现弹性流体动压润滑的判据;

(2)  $B_2$  点处的最小油膜厚度取决于小齿轮上该点的曲率半径  $R_{1B_2}$ 、理论啮合线的长度  $L$ 、传动比  $i$  小齿轮转动角速度  $\omega_1$ . 当  $R_{1B_2}$ 、 $L$ 、 $\omega_1$  愈大,  $i$  愈小,则  $h_{\min B_2}$  愈大;当  $L$ 、 $\omega_1$ 、 $i$  为定值时,减小齿轮模数或做成短齿皆有利于增大  $R_{1B_2}$ ,从而有利于增大油膜厚度.

## 2 齿面润滑状态分析

对于不能形成完全动压润滑的摩擦表面,通常用膜厚比来判断润滑状态,齿轮传动一般用节点  $P$  处的膜厚比  $\lambda_P$  来确定:

$$\lambda_P \approx \frac{h_{\min P}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (9)$$

式中  $R_{a1}$ ,  $R_{a2}$  分别为两齿轮齿面的粗糙度;  $h_{\min P}$  为节点的最小油膜厚度. 一般认为当  $\lambda_P < 1$  时为边界润滑状态;当  $\lambda_P > 3$  时为流体润滑状态;而当  $1 \leq \lambda_P \leq 3$  时为混合润滑状态.

## 3 结束语

由于齿轮传动各啮合点中,以小齿轮齿根与大齿轮齿顶啮合处的最小油膜厚度为最薄,因此应以此处的润滑状态来衡量整个传动的润滑状态. 而为了改善此处的润滑状态,可采取以下措施:

- (1) 在保证弯曲强度的条件下,尽量取较小的模数;
- (2) 采用短齿直齿轮传动;
- (3) 提高齿面加工质量,降低粗糙度值,特别注意提高小齿轮齿根和大齿轮齿顶的光洁度;
- (4) 采用变位齿轮正传动,以较小的小齿轮变位系数有效增大起始啮合点的曲率半径,从而达到增大最小油膜厚度,改善润滑的目的.

## 参考文献

- [1] 张鹏顺, 陆思聪. 弹性流体动力润滑及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [2] 孙 恒. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] 王宁侠. 机械设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

# LOWEST OIL FILM THICKNESS ANALYSIS OF AEAR DRIVE & IMPROVE IUBRICATION MEASURE

WANG Ning-xia<sup>1</sup>, JIANG Xin-ping<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Light Industry Technology, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** By elasto-hydrodynamic lubrication theory, the location of lowest oil film thickness is obtained at parameter analysis of dynamic pressure oil film. The place of lowest oil film thickness is determined at the contact point of pinion dedendum with gear top, that the lubricant should be here to judge the state as a basis for lubrication, and the measure is advanced for improving lubricating condition of gear drive.

**Key words:** elasto-hydrodynamic lubrication; original mesh point; oil film thickness

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0087-04

# 不同载体端面造型的催化转换器数值模拟

许建民<sup>1</sup>, 袁志群<sup>1</sup>, 戴腾清<sup>2</sup>

(1. 厦门理工学院机械工程系, 福建 厦门 361024; 2. 广州风神汽车有限公司设备动力科, 广东 广州 510800)

**摘要:**用 CFD 软件 FLUENT 对 3 种不同载体端面造型的催化转换器的速度场、压力场进行了三维稳态流动数值模拟, 模拟结果显示: 载体端面造型对催化转换器的气流分布有很大影响, 采用球形端面载体和锥形端面载体不仅可减少入口扩张管的气流分离, 而且可以使其内部速度分布更均匀。

**关键词:**CFD; 催化转换器; 载体端面造型; 速度场; 压力场

**中图分类号:**TH311; U464.136<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A

## 0 引言

随着汽油机电控燃油喷射系统的不断完善和无铅低硫汽油的使用, 采用三元催化转化器成为控制汽车燃气排放最理想和最重要的装置。常规结构的催化转化器在其扩张管段上, 由于气流的扩散, 导致流速分布不均匀, 管道中心的流速高, 使得气体流动集中在载体中心区域, 从而使该区域的流速过快, 温度过高; 而载体边缘气流量小, 温度又较低, 这就使得载体中心区域的催化剂老化加快, 而边缘区域的催化剂却不能充分发挥作用。其结果既降低了催化转化器的转化效率, 又缩短了其使用寿命。另外, 由于温度分布不均匀, 导致载体截面产生热应力, 容易使载体损坏<sup>[1-3]</sup>。因此, 利用计算流体力学(CFD)软件改进目前的催化转化器结构对于获得较好的流动均匀性和较低的压力损失, 从而减小对发动机动力性、经济性的影响, 改善催化转化器的转化效率、加快其起燃、延长其使用寿命等具有重要的理论意义和实际价值。在催化转化器流动计算中, 常用的计算软件有 STAR-CD、PHOENICS、FLUENT、STAR-CD、CFX、ANSYS 等<sup>[1,4]</sup>。本文采用 FLUENT 软件进行了仿真分析, 考察了无化学反应和热传导的稳定流动问题, 采用数值模拟的方法研究了催化器流场的速度分布特性和压力损失情况。

## 1 流动数学模型

### 1.1 流动控制方程

对稳定可压多维流动, 有以下雷诺平均的质量、动量恒方程<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_{ij}} + s_i \tag{2}$$

其中  $s_i$  为源项, 这里表示催化器载体阻力;  $\tau_{ij}$  为应力张量, 对牛顿流有:

$$\tau_{ij} = 2\mu \left( s_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \bar{\rho} \overline{u'_i u'_j} \tag{3}$$

\* 收稿日期:2009-10-23

作者简介:许建民(1981—),男,湖南省邵阳市人,助教,硕士,研究方向:汽车节能与排放控制  
基金项目:厦门市科技计划项目(项目编号:3502Z20073030)

式中,  $\mu$  为分子动力粘性系数;  $\delta_{ij}$  为 Kroneker 数;  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  为雷诺应力张量;  $s_{ij}$  是流体变形速率张量, 由下式给出:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

1.2 湍流模型

采用标准的  $\kappa\epsilon$  模型计算雷诺应力来封闭上述流动控制方程, 即有:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -2\mu_t s_{ij} + \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij} \tag{5}$$

式中  $\mu_t$  为湍流粘性系数, 由下式给出:

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho \kappa^2}{\epsilon} \tag{6}$$

$\kappa$ 、 $\epsilon$  分别为湍动能和湍能耗散率, 它们的输运控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \mu_j \kappa - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) = \mu_t s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \kappa \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \mu_j \epsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} \left\{ \mu_t s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \kappa \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} - c_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} + c_{\epsilon 4} \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{8}$$

表 1 湍流模型中有关经验系数的确定

$c_\mu$	$\sigma_\kappa$	$\sigma_\epsilon$	$c_{\epsilon 1}$	$c_{\epsilon 2}$	$c_{\epsilon 4}$
0.09	1.0	1.22	1.44	1.92	-0.33

式中,  $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ;  $c_\mu$ 、 $\sigma_\kappa$ 、 $\sigma_\epsilon$ 、 $c_{\epsilon 1}$ 、 $c_{\epsilon 2}$  和  $c_{\epsilon 4}$  各项经验系数按表 1 确定<sup>[2]</sup>.

1.3 催化转换器载体流动模型

本文仅对目前最常用的陶瓷蜂窝载体进行模拟和分析. 蜂窝载体是由许多大小相同的方形管道组成, 要详细了解这些管内的流动分布,

就须对其进行多维模拟, 这种方法的优点是可以精确地模拟载体内的气流. 但由于载体管道太细(约 1 mm<sup>2</sup>)、太多(孔密度为 400 目/in<sup>2</sup>、直径为 100 mm 的载体就有约 4 870 个管道), 要对这么多个细管道所生成的多维网格进行流动计算, 则超出了一般计算机的容量, 是不可取的<sup>[2]</sup>. 事实上, 从工程的角度看, 人们更多的是关心载体整体性能及其对气流的影响. 由于蜂窝载体的管道具有相同的几何形状, 并且管道的直径远小于载体的直径, 从而使得人们可以把蜂窝载体作为多孔介质, 用当量连续法(Equivalent Continuum Approach)进行模拟. 由于载体管道尺寸非常小, 因此载体内的气流可以认为是定常不可压层流. 当多孔介质具有很大阻力时, 可以忽略动量方程的对流项和扩散项, 这时动量方程就简化为:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -K_i u_i \tag{9}$$

$$K_i = \alpha_i |V| + \beta_i \tag{10}$$

式中,  $K_i$  为渗透率, 与当地速度大小  $|V|$  成正比;  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  为经验常数, 在气流方向由试验确定, 在径向和周向取为  $1 \times 10^5$ , 即认为气流只沿轴向流动, 在其他两个方向没有质量交换<sup>[1,6,7]</sup>.

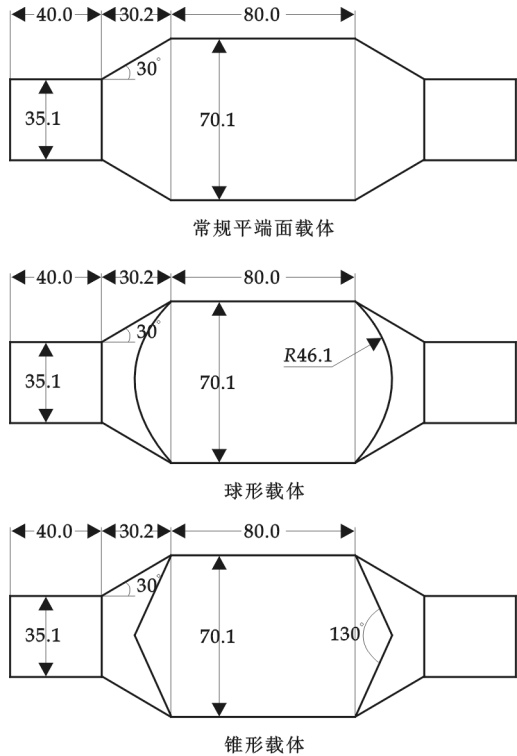


图 1 3 种载体催化转换器的几何结构示意图  
图(图中单位尺寸为 mm)

2 计算结果分析

2.1 研究对象

本文在一标准催化转化器几何结构的基础上对载体前后端面进行造型,其几何结构示意图如图 1 所示。

2.2 3 种不同载体端面造型的催化转换器流场计算结果分析

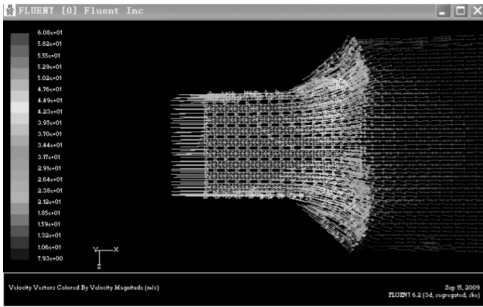


图 2 催化器入口扩张管的局部放大速度矢量图

因为催化器的轴对称性,这里仅给出催化器的二维流动结果.图 2 为催化器圆锥扩张管的局部放大速度矢量图,从图中可以清楚地看出,在锥管壁面附近气流出现了分离,并产生涡流.涡流一方面造成气流的局部压力损失;另一方面造成催化器气体流动分布不均匀,从而对催化器转化效率和使用寿命带来不利影响。

图 3 为催化器流场的压力等值图,从等压图的分布可以看出,在载体内气流压力是层层递减的,说明载体造成了压力损失。

为了研究载体端面造型对催化器流动的影响,对图 1 所示结构的催化器保持其他结构尺寸不变,仅改变载体前后端面造型(一种为常规平端面,一种为球端面,一种为锥形端面)进行数值模拟.从速度云图(图 4)和速度矢量图(图 5)可看出,常规平端面载体的扩张管内存在较大的流动分离区<sup>[8,9]</sup>,对载体的入流有较大的挤压作用,使得载体内的流动主要集中在载体的中间部分,并使得载体中心区域气流高速区增加.与常规平端面载体相比,采用载体前后端面造型后球形和锥形面深入扩压管内,对入流起到一定的导流作用,可明显减小扩张管内的流动分离,载体前端处入流较均匀。

从压力云图(图 6)可看出,载体前端的中心位置处静压与静压梯度较大,由于造型载体前端深入到扩压器内部,使得其前端的静压略有升高.计算结果得出:常规平端面载体、球形端面载体和锥形端面载体催化转换器的压力损失分别为 3 405 Pa、3 752 Pa 和 3 433 Pa,说明前后端造型对催化器的压力损失影响不大.对于球形端面载体,在相同条件下,其压力损失比常规平端面载体有比较大的升高,而锥形端面载体与常规平端面载体的压力损失一

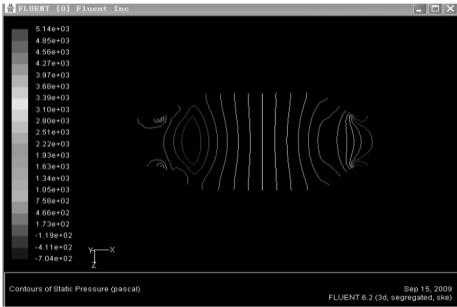
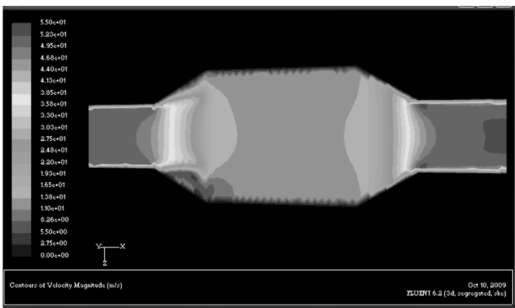
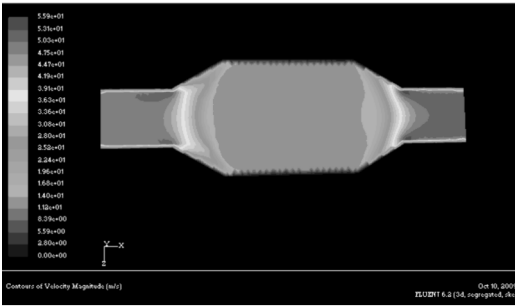


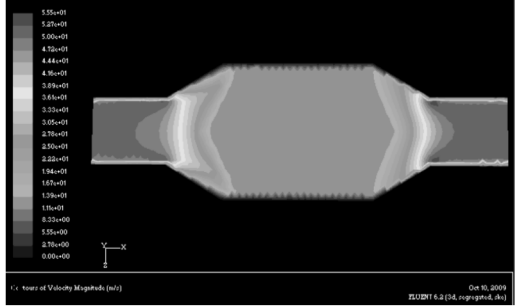
图 3 催化器流场的压力等值图



常规平端面载体



球端面载体

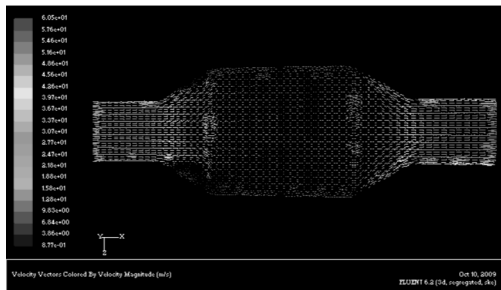


锥形端面载体

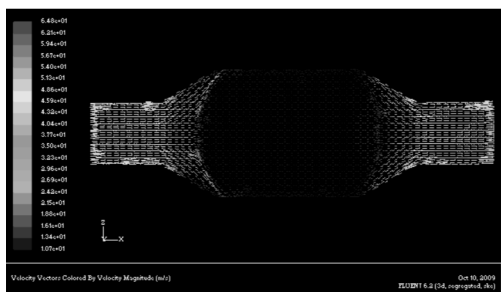
图 4 3 种载体端面造型的催化转换器速度云图



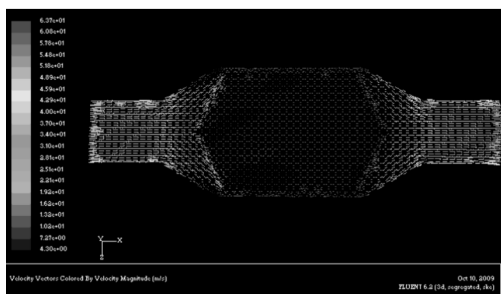
致. 相对而言, 锥形端面载体催化转化器在保证均匀流速分布的同时, 其压力损失与常规平端面载体催化转换器相比没有增加, 因此锥形端面载体是一种比较合理的催化转换器载体造型.



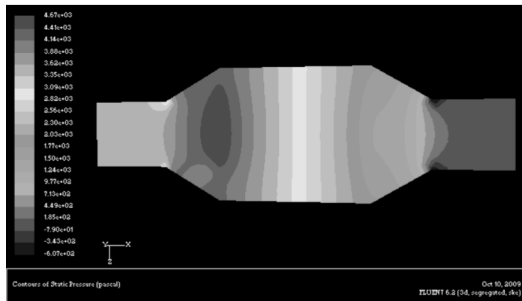
常规平端面载体



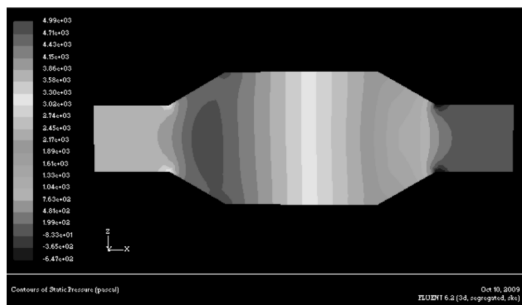
球端面载体



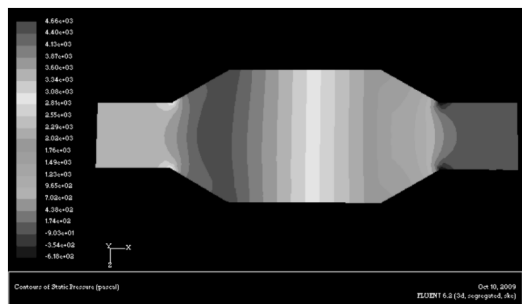
锥形端面载体



常规平端面载体



球端面载体



锥形端面载体

图 5 3 种载体端面造型的催化转换器速度矢量图

图 6 3 种载体端面造型的催化转换器压力云图

### 3 结论

(1) 通过对催化转换器结构进行优化设计来改善流场的分布是提高催化转换器转化效率和使用寿命的重要措施.

(2) 计算结果表明, 与常规平端面载体相比, 采用载体前后端造型后可明显减小扩张管内的气流分离, 使得载体前端入流均匀, 这可以作为改进目前催化转换器载体形状的依据.

### 参考文献

- [1] 梁 呈. 汽油车催化转换器流场研究与结构优化设计[D]. 长沙: 湖南大学硕士研究生学位论文, 2003: 12-18.
- [2] 帅石金, 王建昕, 庄人隽. CFD 在车用催化转换器结构优化设计中的应用[J]. 汽车工程, 2000, 22(2): 129-133.
- [3] 帅石金, 王建昕, 庄人隽. 斜扩张管催化器流场三维数值模拟和结构优化设计[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(3): 298-301.
- [4] 刘 军. 汽车排气催化转化装置气流特性分析[J]. 车用发动机, 2001, 134(4): 25-28.

(下转第 104 页)

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0091-03

# 三片式平行分度凸轮传动装置参数化绘图系统的建立

甄久军, 徐 锋, 贺 炜, 肖 卫  
(南京工业职业技术学院机械系, 江苏 南京 210046)

**摘 要:**在 AutoCAD2006 平台上,利用其二次开发工具开发出了三片式平行分度凸轮传动装置的参数化绘图系统.该系统由 AutoLISP 控制程序、联接程序及一系列绘图程序组成,采用下拉菜单和 DCL 对话框技术实现参数化绘图,并使绘图过程达到了可视化、交互性、易用性.  
**关键词:**三片式平行分度凸轮; DCL; AutoLISP; 参数化绘图  
**中图分类号:**TH112                      **文献标识码:** A

## 0 引言

三片式平行分度凸轮机构是一种较为复杂的平面共轭凸轮机构,该类机构可将凸轮轴的连续转动转换为输出轴的停歇转动或移动.由于该类机构较棘轮、槽轮等传统间歇机构具有高转速与高分度精度等特点,所以该装置在自动机和自动线上得到了广泛的应用,该装置在国外已成为标准化、系列化的产品.为了缩短该产品的设计周期,提高设计效率,有必要开发一套平行分度凸轮传动装置的参数化绘图系统,采用参数化的绘图技术可以大大提高绘图速度,节约存储空间,使得机械产品的设计实现自动化. AutoCAD 软件是当今世界上使用最多的通用绘图软件之一, AutoLISP 语言内嵌于 AutoCAD,实现了计算与绘图的统一,基于此作者在 AutoCAD 软件平台上利用 AutoLISP 语言进行了零部件参数化绘图的二次开发<sup>[1-3]</sup>.

## 1 设计思路

DCL(Dialog-box Control Language)是 AutoCAD 新增的一种对话框控制语言,本系统由 DCL 对话框、AutoLISP 绘图程序和联接程序组成. DCL 对话框部分包括 DCL 界面设计和驱动程序设计以实现对零件的可视化选择, AutoLISP 绘图程序部分进行零件的参数化绘图,联接程序将二者有机结合,最后将该系统嵌入 AutoCAD 下拉菜单中.对话框界面程序文件名为“DH. dcl”,对话框驱动程序文件名为“hard1. lsp”,联接程序文件名为“xiao. vlx”.

## 2 DCL 对话框设计

### 2.1 对话框界面的设计

AutoCAD2006 允许用户定制自己的弹出式对话框,窗口操作是目前最先进、最流行的人机交互界面,它向用户提供了图形与文字共存的可视化环境,使操作更为自然、简便和快捷.在本系统中我们即利用 DCL 语言编程,将对话框设计成如图 1 所示的界面.

### 2.2 图标库的制作

为了利用对话框直观绘图,首先应建立各个零件

\* 收稿日期:2009-10-26  
作者简介:甄久军(1974—),男,河北省唐山市人,讲师,硕士,研究方向:机电控制及自动化、CAD/CAM  
基金项目:南京工业职业技术学院重大基金项目(YK07—01—01)



图 1 DCL 对话框界面

指定的任务,只有以 PDB 函数为基础,用 AutoLISP 程序来驱动才能实现特定的功能.对话框驱动程序流程图如图 2 所示.

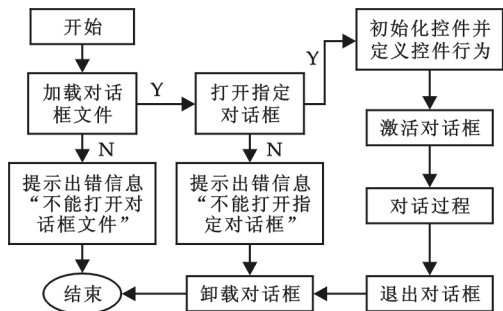


图 2 DCL 对话框驱动程序流程图

的图标库(幻灯片),读者可参考其他书籍或者查看 AutoCAD 中 mslide 和 slidelib 命令的相关帮助.应注意的是,绘制幻灯片文件时,基点处最好插入一醒目标志(如红色十字),增加可视性,使绘制时能够准确定位.

### 2.3 对话框驱动程序

用 DCL 语言编写的对话框只是一个简单的界面描述,它不能独立显示,也不能完成任何用户

## 3 AutoLISP 绘图程序

关于 AutoLISP 绘图程序,不是本文讲的重点,但应注意几点:

为使图形大小合适及定位准确,各个程序模块应加入 3 个基本参数,即选择图幅大小、输入绘图基准点和绘图比例,各模块起始部分应关闭 AutoCAD 中的对象捕捉功能.

## 4 联接程序

联接程序主要实现对话框与外部 AutoLISP 绘图程序之间的联接,保证绘图程序的正确调用,其联接程序如下:

```
(defun C:hard1()
  (new_dialog "hard1" (load_dialog "hard1"))
  (if (= 1 (start_dialog))
    (progn
      (new_dialog "dh" (load_dialog "dh.dcl"))
      (start_image "slide")
      (slide_image 0 0 (dimx_tile "slide") (dimy_tile "slide") "a1")
      (end_image)
      (action_tile "ljlb" "(hard4)")
      (action_tile "js" "(setq js1 (get_tile "js"))")
      (action_tile "ksjs" "(hard5)")
    ))
    (if (= 1 (start_dialog))
      (progn
        (load "huitu")
        (huitu)
      )))
)
```

该程序的运行过程为:

首先,加载简要介绍对话框,即 hard1.dcl,如果鼠标点击对话框上的“确定”则进入主对话框界面,即 dh.dcl,此界面如图 1 所示.如果鼠标点击对话框上的“取消”则退出主对话框界面,下面紧接着给此对话框加载默认的幻灯片.例如此程序默认的幻灯片名为 a1,hard4 则使 dh.dcl 对话框中的零件列表和幻灯片对应起来,致使当选定零件列表中一个选项时使名与果对应,hard5 使用户可以直接输入零件名来选定要绘制的零件.当此界面选定后,如果鼠标点击“确定”则进入绘图阶段,也就是调用“huitu”,此程序包括选定零件的 AutoLISP 程序,如果刚才鼠标点击此对话框上“取消”,则退出接下来的绘图阶段,并退出对话框.

程序打包,此过程主要包括打开 Visual LISP 界面、在文件下拉菜单中选定生成程序、选择加载目录和打包文件名、加载对话框程序和零件图绘制程序。

### 5 将系统嵌入 AutoCAD 下拉菜单

- (1)找到 AutoCAD 安装目录下 support 文件夹内的“acad. mnu”文件,并将其用记事本打开。
- (2)找到“[&. 工具]”行,在“[&. 工具]”行下插入“[三片式平行分度凸轮传动装置参数化绘制]·C·C (load “xiao. vlx”)”,然后存盘退出。

### 6 系统的调入

- (1)将所有文件(包括 AutoLISP 绘图程序、菜单程序、DCL 界面程序、DCL 驱动程序、联接文件)拷贝到 AutoCAD 安装目录下的 support 文件夹内。
- (2)进入 AutoCAD,在命令行输入“menu”,弹出对话框,选择“acad. mnu”,点击确定,即可实现该系统调入,调入后的 AutoCAD 主菜单界面如图 3 所示。

### 7 结束语

AutoCAD 软件具有强大的二次开发功能,利用它所提供的下拉菜单、DCL 对话框、Visual LISP 集成开发环境,用户可以开发出适合自己的软件操作界面、AutoLISP 程序和本厂产品零部件参数化绘图系统等,这样大大减轻了设计人员的劳动强度,提高了工作效率和工作质量,使用户可以将更多的时间用于创造性设计之中。



图 3 将系统嵌入 AutoCAD2006 主菜单后的界面

### 参考文献

[1] 贺 炜,李思益.计算机辅助设计[M].北京:机械工业出版社,2004.  
[2] 陈伯雄,冯 伟. Visual LISP for AutoCAD 2000 程序设计[M].北京:机械工业出版社,2000.  
[3] 贺 炜,刘俊生,吴文仁,等.常用机构运动简图的参数化绘图系统的建立[J].机床与液压,2003,(6):134,135,178.

## DEVELOPMENT ON PARAMETRIC DRAWING SYSTEM OF THE PARALLEL INDEXING CAM DRIVEN UNITS

ZHEN Jiu-jun, XU Feng, HE Wei, XIAO Wei

(Department of Mechanics, Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210046,China)

**Abstract:**Parametric drawing system of three pieces parallel divided cam driven units on AutoCAD2006 is introduced, it is developed by using the second development system of AutoCAD2006 and the language of AutoLISP. The system drawing based on menu and DCL dialog technique, including controlling programs, linking programs and a series of drawing programs. It is parametric, visible, interactive and more convenient.

**Key words:**three pieces parallel divided cam; DCL; AutoLISP; parametric drawing

# 对霍尔传感器组件测量线性度的改进

刘飞航, 宁 铎, 郭飞飞, 强金铨

(陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘 要:**针对霍尔传感器组件测量位移量与输出电压量线性度较差的问题进行了分析研究,并提出了有效的改进方案,通过反馈随动控制的方法对霍尔传感器的输出电压进行归零调整,以反馈量的变化来反映实际的位移变化情况,从而很好的解决了电压量对位移量的线性跟踪问题。

**关键词:**位移测量;霍尔传感器;反馈控制;线性度

**中图分类号:**TP212.13

**文献标识码:**A

## 0 引言

在现代仪器或者控制系统中检测位移量常用的传感器有电阻式、容栅式等,但是,对于陕西省重点新产品“MSW-YD4 型数字式皮革收缩温度测定仪”的设计来说<sup>[1,2]</sup>,一次需同时检测 4 个皮革试样且其在受热后会产生收缩形变(位移),在这种情况下最好选择线性霍尔传感器作为其位移传感器,以便利用其非接触的特点满足整机设计要求。

但是在实际应用中发现该仪器检测位移数据比较大时存在一定误差,虽然对于本仪器来说这种误差相对于检测标准影响不大,因为国家测量标准规定的有效位移变化范围仅为 0~3 mm,然而作为一个成熟的测量分析仪器,该仪器不但需要显示收缩温度这一个“点”,而且根据实际需要还经常要在上位机监视器上显示皮革试样在整个受热过程中位移(收缩形变)与温度之间的关系<sup>[3]</sup>,所以在更大位移变化范围内减小误差,提高测量精度就成为当务之急。

经过对位移信号采集、放大、A/D 转换以及显示等信号处理电路环节的反复对比试验,结果证明:线性霍尔传感器的线性度差是产生误差的主要原因。

## 1 问题分析

霍尔传感器的电压输出大小与磁感应强度成正比关系: $V_H = S_H \times B \times I$ ,其中  $V_H$  代表传感器输出电压,  $S_H$  为霍尔传感器的乘积灵敏度,  $B$  是传感器所在的磁场的磁感应强度,  $I$  是流过霍尔传感器的电流,所以要实现线性的电压输出就必须提供线性渐变的磁场<sup>[4]</sup>,但是实际上要实现理想的线性渐变磁场是有很大的难度的。

在数字式皮革收缩温度测定仪系统中,检测位移信号的霍尔传感器组件(如图 1 所示)利用圆柱形磁钢来实现线性渐变磁场。霍尔传感器感应表面正对的  $N$  磁极,霍尔传感器固定不动,磁钢和位移执行件固定在一起,通过磁钢的移动在霍尔传感器的周围产生一个渐变的磁场,并且通过霍尔传感器将这种位移变化转换成电压输出的变化。

\* 收稿日期:2009-09-25

作者简介:刘飞航(1979—)男,陕西省礼泉县人,在读硕士生,研究方向:系统故障分析诊断与容错控制

基金项目:陕西省科学技术发展计划项目;MSW-YD4 数字皮革收缩温度测定仪的研制(项目编号:2007xcp-07)

但是实际磁钢周围的磁场分布(如图 2 所示),通常在磁极附近磁场最强,距离增加,强度减小.图 2 中流量密度代表磁感应强度,箭头代表磁场方向.通过实验分析发现,圆柱磁钢的磁场分布并不能达到线性渐变的理想要求,例如对于一个直径为 7.25 mm 的铝镍钴圆柱磁钢,假设在其表面线 B 位置有 0.07 T 高斯的磁感应强度,在从表面线 B 到表面线 A 相距 7.25 mm 的空间内磁感应强度大致可降为 0.17 T 高斯,但不是线性下降的.磁钢轴线的截面沿轴线的位移与磁感应强度之间关系的函数曲线如图 3 所示,从图中 3 曲线可以明显看出,在距离大于 3 mm 以后输出电压与位移表现出了较强的非线性.

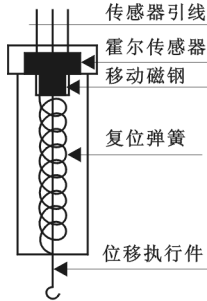


图 1 霍尔器件型位移传感器结构图

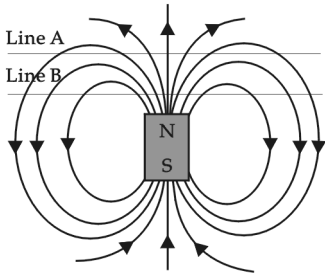


图 2 磁缸周围的磁场分布

综上所述,由磁钢提供的非线性磁感觉强度变化是客观存在的,但是通过实验可发现霍尔传感器在磁钢产生的磁场中的位置与磁感应强度分布规律(如图 4 所示).该图表明霍尔元件和磁钢之间的相对水平位置发生改变可以引起霍尔输出电压的改变,但在霍尔传感器正对磁钢轴线时输出电压量最小,并表现出一定的稳定性<sup>[5]</sup>.根据以上分析,可以改进霍尔元件的放置位置和增加一定的补偿单元,以便对由磁钢提供的电磁场中存在的非线性进行补偿校正,从而实现位移与输出电压量之间线性关系的目标.

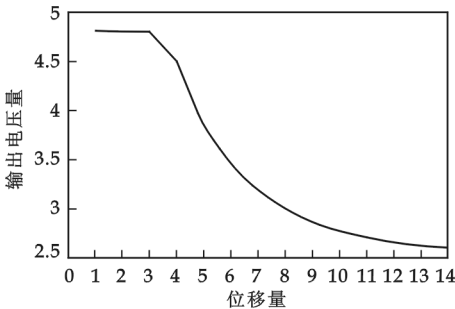


图 3 输出电压-位移关系曲线

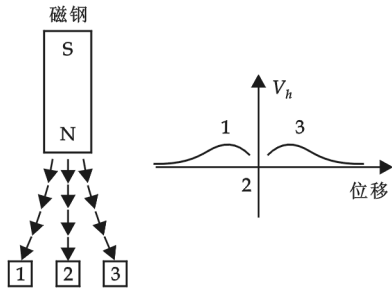


图 4 霍尔传感器在磁场中的位置分布及对应的霍尔电压

## 2 改进方案

### 2.1 改进原理

针对以上在实验中发现的规律,结合现代的控制技术,作者提出了以下改进原理图(如图 5 所示).

以单片机为核心组成控制电路,输入通道由调零放大模块和 A/D 转换模块组成,输出通道由 D/A 转换器与电压-电流转换器组成.其中输入通道中的前置放大级采用运算放大器与霍尔元件一起组成霍尔传感器探头,固定在随动机构上,与随动机构一起通过反馈电流来调节输出.其测量原理为:静止时,把霍尔元件置于位置 2(见图 4),此时霍尔元件的输出为零,调整调零放大器使其输出为零. CPU 在无输入的情况下亦无控制电流的信号输出,随动机构处于自由平衡状态.当磁缸移动  $X'$  时,与霍尔元件之间有相对位移,霍尔元件产生电压输出  $V_H$ ,该输出经放大器放大、A/D 转换并送 CPU 处理.根

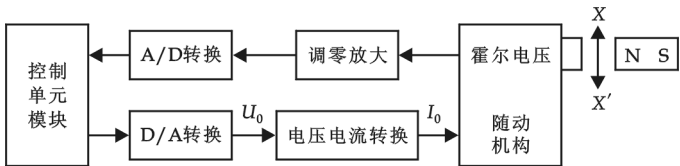


图 5 改进的位移测量原理图

据处理结果,CPU 送出推动随动机构运动的驱动电压,经 D/A 转换后得驱动电压  $U_0$ ,经电压-电流转换后得到驱动电流  $I_0$ , $I_0$  推动随动机构的运动,带动霍尔传感器探头跟随磁缸的移动而移动,直到霍尔元件与磁钢的相对位置又回到位置 2,使其输出重新为零.显然,此时霍尔元件的移动量  $X$  就等于磁钢移动量  $X'$ ,电流  $I_0$  就可代表磁钢的位移量.同时,电压-电流转换过程是线性的, $U_0$  可代表电流  $I_0$ ,即  $U_0$  可代表磁钢的位移量.从图中可看到,只要随动机构能及时带动霍尔元件回到平衡点,测量的精度就可保证.随动机构的动态范围实际上就是测量范围.

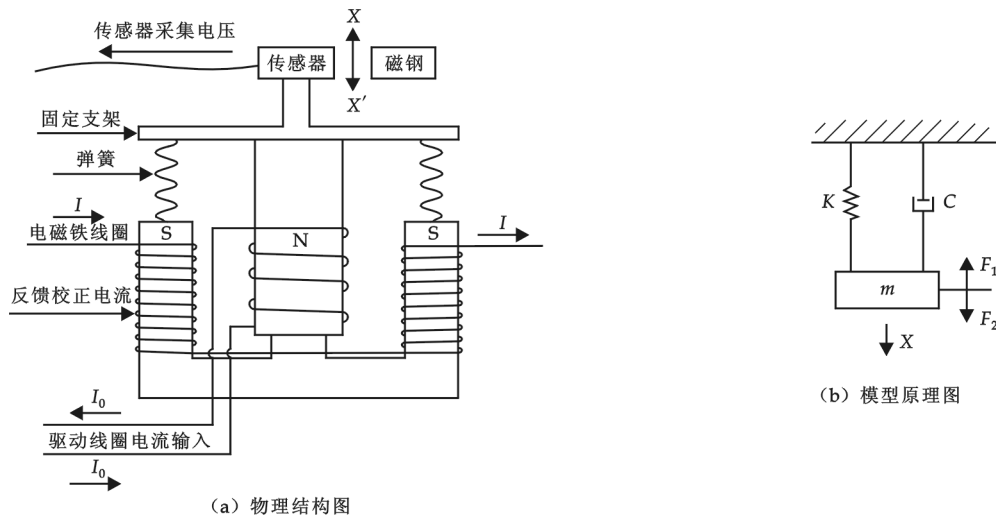


图 6 力平衡发生器

## 2.2 随动机构设计分析

随动机构称为力平衡发生器(如图 6 所示),它主要由反馈线圈和励磁线圈组成<sup>[6]</sup>.反馈线圈置于励磁线圈的磁场中并由 4 条弹簧固定,霍尔元件则装在反馈线圈上面的支架上,当反馈线圈流过电流时线圈产生电磁力,电磁力使得反馈线圈在磁场中运动,并带动霍尔元件产生相应的移动.而在位移的作用下,弹簧产生一个与电磁力反向的平衡力,该平衡力阻止反馈线圈进一步的运动.因此,反馈线圈及霍尔元件就停留在由驱动电流产生的电磁力和由弹簧产生的平衡力所确定的平衡点上.显然,驱动电流越大,位移就越大.为了分析位移与驱动电流之间的关系,把反馈线圈、支架等活动部分看成一个刚体,系统的运动可用一个二阶微分方程描述<sup>[7]</sup>:

$$m(d^2 X/dt^2) + C(dX/dt) + KX = F_2 \quad (1)$$

式中: $m$ —运动部分的质量, $C$ —等效阻尼系数, $K$ —弹簧的弹性系数.

令  $W_n = \sqrt{K/m}$ ,  $\xi = C/\sqrt{m/K}$ , 则

$$F_2 = K_c I_0 \quad (2)$$

故(1)式可变形为:

$$(d^2 X/dt^2) + 2\xi W_n(dX/dt) + W_n^2 X = \frac{W_n^2}{K} K_c I_0 \quad (3)$$

式中: $W_n$ —随动机构的固有频率, $\xi$ —阻尼比.

在位移  $X$  变化频率远小于固有频率  $W_n$  时,可忽略(3)式中的微分项并将其改写为:

$$X = \frac{K_c}{K} I_0 \quad (4)$$

此式表明驱动电流  $I_0$  与霍尔元件位移  $X$  之间呈线性关系.由于  $U_0$  与  $I_0$  之间为线性关系,故可得最终结果:

$$X = K_a U_0 \quad (5)$$

## 3 数据分析



3.1 建立回归模型

根据以上讨论问题的解决方案,采用千分尺的螺杆推动磁钢移动,磁钢的位移量由千分尺读出,反馈的调整电压从万用表读出,4 组数据分别是在不同的位移段得出的,对每一个位移段建立一元线性回归模型函数<sup>[8]</sup>:

$$Y=a+bx+\epsilon,\epsilon\sim N(0,\sigma^2)$$
(6)

其中  $a$  和  $b$  是线性部分的常数值, $\epsilon$  是随机的误差变量,是不可控量,它满足均值为 0,方差为  $\sigma^2$  的正态分布。

3.2 模型参数估计

应用最小二乘法对回归模型的参数进行估计,估计参数均按照以下公式求得:

$a$ 、 $b$  估计量  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$  按以下公式求出:

$$\hat{b}=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}$$
(7)

$$\hat{a}=\bar{y}-\hat{b}\bar{x},\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nx_i,\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^ny_i$$
(8)

$\sigma^2$  的无偏估计量  $\bar{\sigma}^2$  如下:

$$\bar{\sigma}^2=\frac{1}{n-2}[S_{yy}-\hat{b}S_{xy}],S_{yy}=\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2,S_{xy}=\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})$$
(9)

3.3 测量数据分析

测量及实验分析数据如表 1、表 2 所示.

表 1 测量数据的统计分析

第一组						第二组				
位移量/mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
电压值/mV	4.71	4.58	4.44	4.31	4.18	4.06	3.90	3.78	3.64	3.52
估	$\hat{a}$					4.843				
计	$\hat{b}$					-0.266				
值	$\bar{\sigma}^2$					0.000 037				

表 2 测量数据的统计分析

第三组						第四组				
位移量/mm	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
电压值/mV	3.38	3.25	3.14	2.99	2.85	2.73	2.59	2.46	2.34	2.22
估	$\hat{a}$					4.838				
计	$\hat{b}$					-0.264				
值	$\bar{\sigma}^2$					0.000 15				

从以上数据来看,传感器在每个 5 mm 区域段工作的线性拟合系数很接近,尤其是在前 3 组,也就是位移在 0~7.5 mm 范围内,其位移变化量和霍尔输出电压已满足很高的线性要求,完全可以认为传感器是按照线性变化过程来工作的.

#### 4 结束语

反馈随动控制方法确实能够在有限的范围内实现霍尔传感器的测量位移与控制电压的线性输出,从而为高精度的测量提供了技术依据.我们设计的传感器组件的位移工作范围是 0~5mm,因此从以上的实验数据及线性拟合结果可以看出,该改进设计完全可以满足工作线性度的要求.

#### 参考文献

- [1] 宁 铎,王蒙军.新一代非接触式皮革收缩温度检测仪的开发与研制[J].中国皮革,2007,36(13):32-35.
- [2] 宁 铎,侯艳艳,马建中,等.对皮革收缩温度测量仪的改进[J].中国皮革,2008,37(5):18-21.
- [3] 王蒙军. MSW-YD4 数字式皮革收缩温度测定仪的开发和研制[D],西安:陕西科技大学硕士研究生论文,2007.
- [4] 袁海文,吕洪林.基于分布磁场的电磁铁位移传感器的研究[J].电工技术杂志,1999,(2):17-50.
- [5] 董永贵. 传感技术与系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [6] 黄长艺. 机械工程测试技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [7] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:国防技术出版社,2004.
- [8] 盛 骤,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

## IMPROVEMENT OF MEASURING IINEARITY OF HALL SENSOR GROUPWARE

LIU Fei-hang, NING Duo, GUO Fei-fei, QIANG Jin-cheng

(School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** This article focuses on the improvement of the linear degree between displacement and output voltage coming from the Hall sensor groupware. It is based on the method of feedback servo-control. And this method suggests making a zero adjustment to the output voltage coming from the Hall sensor and reflecting the real displacement change through the change of the feedback. The linear tracking between the voltage and the displacement is well realized.

**Key words:** displacement measurement; hall sensor; feedback control; degree of linearity

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0099-03

# 基于 DSP 的新型超声流量计

杨 萍, 张玉杰, 兀旦晖

(陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘 要:**精度较低是传统超声波流量计亟需解决的问题. 通过对超声波流量测量物理模型的分析, 本设计采用了相位差法来测量流量, 关键是把声速对流量的影响也考虑在内, 并且通过声速校正鉴相电路对声速进行了修正, 同时还采用了 TI 公司高性能的 DSP 芯片 TMS320VC5402 作为处理器, 从而大大提高了测量的精度. 通过实际测量证明该设计方案测量精度高、快速、可靠性高.

**关键词:**DSP; 相位差; 超声波流量计

**中图分类号:**TN741                      **文献标识码:**A

## 0 引言

工业生产和科学实验都离不开对工质数量的了解或对各种物质(原料)配比的控制. 为了保证产品质量和进行经济核算, 需对单位时间内物料的输送量(流量)或某段时间内物料的总输送量进行精确计量和控制, 并要求能及时地发出反映流量大小的信号. 流量测量, 不管是以计量为目的, 还是用于过程控制, 几乎涉及所有的领域. 非接触式流量计只需将超声波换能器夹装在被测管道的外侧就可测量管道内的液体流量, 由于其测量时不扰动管道内流动的流体和无介质泄漏而得到了广泛的应用, 但时差法等超声波流量计测量精度低是一个亟待解决的问题. 本设计方案采用了相位差法来测量流量, 同时把声速对流速的影响也考虑在内, 从而提高了测量的精度.

## 1 相位差法流量测量原理

超声波技术应用于流量测量主要是依据超声波入射到流体后, 在流体中传播的超声波就载有流体流速的信息, 利用接收到的超声波信号就可以测量流体的流速和流量.

在该超声波流量计的设计中, 流量的获取主要来源于测定固定直径管道的中心流速(轴向), 虽然测量管道内的流场分布模型难以精确建立, 但其中心流速和总的流量之间有一固定的函数关系(对于同一种流体而言), 那么测得该流速, 并通过适当的曲线拟合方法即可寻找到一条联系流量与流速之间关系的较精确的曲线, 其主要物理模型如图 1 所示.

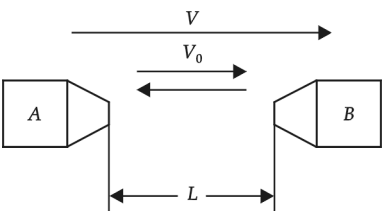


图 1 超声波流量测量物理模型

图中 A、B 是两性能相同的超声波传感器,  $V$  是流体流速, 方向固定为 A 到 B,  $V_0$  为流体中的声速,  $L$  为 A、B 两传感器的端面距离. 由于流速  $V$  的存在, 超声波从 A 传到 B 及其相反过程中, 在传播时间上将有一个差值  $a$ , 通过对  $a$  的精确测量, 即可求出中心流速, 并进一步求得流体流量.

\* 收稿日期:2009-10-08  
作者简介:杨 萍(1979—), 女, 陕西省西安市人, 讲师, 硕士, 研究方向:数字信号处理  
基金项目:陕西省工业攻关项目(2006K05-G18)

在静止的液体中,连续的超声波在距离为  $L$  的  $A$  点和  $B$  点将有着固定的相位差  $\beta$ ,当流体沿着某一方向(假设从  $A$  到  $B$  方向)流动时,固定频率的超声波在顺流和逆流发射的传播时间内的变化在空间上表现为流体中波形的拉伸(顺流)和压缩(逆流),从而导致在定长  $L$  内波形数的变化,但必须保证满量程波形数变化不大于 1;在接收端表现为发射波和接收波相位差的变化(相当于  $A$ 、 $B$  点的相位差),由  $\beta \pm \Delta\beta$  就直接导致本设计方案中采用相位差法求得流速和流量。

由于固定频率为  $f$  的声波的声速为  $V_0 = f * \lambda$ ,其中  $\lambda$  是波长,于是流体中距离为  $L$  的空间上分布的波形  $N = L/\lambda$  将和声波的传播速度成反比。设静止流体中  $L$  上的波数为非整数  $n$ ,当流体以速度  $V$  由  $A$  到  $B$  流动时,顺流声速  $V_{0AB} = V_0 + V$ ,逆流声速  $V_{0BA} = V_0 - V$ ,则顺流时  $L$  上的波数为  $N_{AB} = n * V_0 / (V_0 + V)$ ,逆流时  $N_{BA} = n * V_0 / (V_0 - V)$ 。于是逆、顺流分别发射超声波时, $L$  空间上的波数差  $\Delta n = N_{BA} - N_{AB} = \frac{V}{V_0 - V} * n - \frac{V}{V_0 + V} * n = \frac{2V_0 V}{V_0^2 - V^2} n$ ,其中  $n = L/\lambda_0 = Lf/\lambda_0$ ,所以  $\Delta n = \frac{2LfV}{V_0^2 - V^2}$ ,则相位差

$$\Delta\beta = \Delta n * 360^\circ = \frac{720^\circ LfV}{V_0^2 - V^2} \quad (1)$$

由于声速  $V_0$  随环境变化,其修正方法仍依赖于振荡器,且(1)式中分母比分子高一阶,可见晶振温漂对测量效果的影响。由于  $V_0 \gg V$ ,则(1)式可以忽略分母的影响,相位差与流速成一次线性关系。由于最终将采用标定拟合的方法求出流量与相位差的关系式,因此超声波的频率不必严格于 1 MHz,但必须保证其稳定性。为保证仪器适用于不同压力及环境温度,甚至适用于不同性质的介质,必须对声速进行实时修正。由(1)式可知,声速对测量结果有很大的影响,现采用声波的传播时间法来测得声速。

假设集流管内流场均匀分布,超声波频率为 1 MHz,声速为 1 500 m/s,集流管内径为 31 mm(实际内径 25 mm,但因有效距离及入水口等因素,折算为 31 mm),设计流量计的量为 700 m<sup>3</sup>/d。为避免多置型,在单边 180°鉴相的前提下,顺逆流相位差  $\Delta\beta$  不应大于 360°,也就是  $a \leq 1 \mu s$ ,即  $2LV/(V_0^2 - V^2) \leq 1 \mu s$ ,由量程 700 m<sup>3</sup>/d 求出  $V$  后就可确定  $L$ 。令  $S$  为集流管有效截面积,则  $VS = V * 3.14 * (10^{-3} * 33/2)^2 = 700/24/3\ 600$ ,得到  $V = 10.73$  m/s,于是由  $2LV/(V_0^2 - V^2) \leq 1 \mu s$ ,推出  $L \leq 10.48$  cm。

## 2 设计方案

根据以上分析的测量原理,设计出如图 2 和图 3 所示的超声流量计电路框图。

本方案中传感器材料选用聚砒,其声学性能很好。驱动信号源是后续测量的基础,所以只能采用幅值尽量高、波形近似正弦的驱动信号,以达到较大的发射功率,经过声波发射、接收换能器的双重选频、

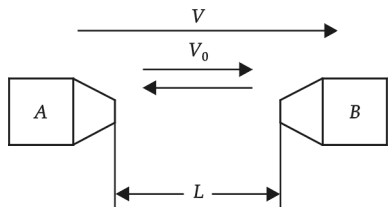


图 2 流速鉴相电路框图(单向)

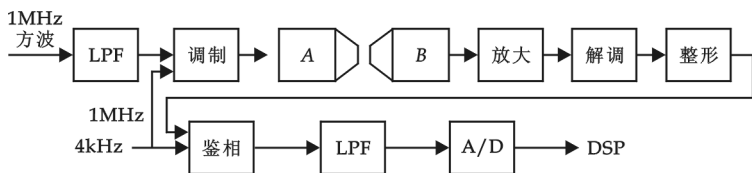


图 3 声速校正鉴相电路框图(单向)

滤波作用,接收信号波形无畸变,最终选择南京 120 pF 压电片串联 220  $\mu$ H 电感产生谐振。

超声波发射接收通道控制开关组主要完成超声波的发射以及接收电路在  $A$ 、 $B$  两个传感器上的切换及声速

修正的低频调制功能,控制逻辑由门电路及模拟开关共同产生。经过多次实验最终采用分立 8 路开关 ADG419、ADG418,其原则是参与接收回路的模拟开关完全不接触发射信号,其电路如图 4 所示。

驱动信号经 4 kHz 调制后,接收信号是周期为 4 kHz 的含 1 MHz 载波的声波列,其压差信号经放大至 2~3 V 可使检波二极管在很快的时间内导通,减小声速误差。解调出的包络信号送反向比较器整形后与原调制信号鉴相可得正比于传播时间的相位差(数字脉冲占空比),其具体实现电路如图 5 所示。

无论是流速相位差还是声速修正相位差均由发射(或经调制)信号与接收信号(或解调信号)鉴相产生,产生的鉴相脉冲经低通网络(带宽 3.7 Hz)滤波后得到正比于相位差的直流电平送 A/D 转换。本方案

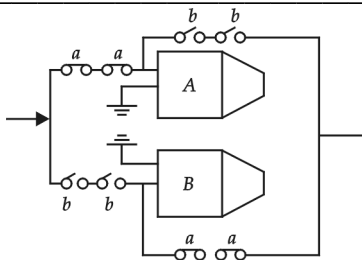


图 4 超声波发射接收通道控制开关

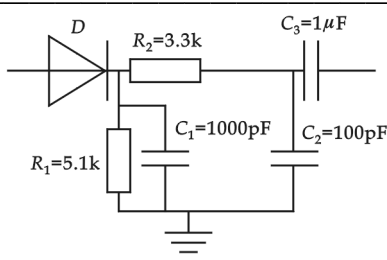


图 5 解调电路

采用沿鉴相,即只与信号的上升沿有关,而与占空比无关,使用鉴相器 4046 取得了很好的线性和测量精度。

A/D 转换器一般主要考虑的因素就是字长和速度。一般来讲 SNR 与字长有以下规律  $SNR(dB) = 6.02n + 1.76$ ,  $n$  为字长。实际超声系统中一般 SNR 的范围在 47~70 dB 之间。如果  $SNR = 70$  dB,则字长不小于 12。本设计选用 BB 公司的 ADS803 芯片,DSP 芯片选用 TI 公司 16 位的 TMS320VC5402,可以保证测量的精度。

在实测时通过顺、逆流发射经低频 4 kHz 调制的 1 MHz 超声波来实现。在接收端将解调出的 4 kHz 与原始调制信号比较鉴相即可求出声波的传播时间,并将正反向的时差相加以扣除流速的影响。本流量计的量程设定为 700 m<sup>3</sup>/d,实际量程为 690 m<sup>3</sup>/d,理论分辨率为 0.15 m<sup>3</sup>/d,实测值为 0.2 m<sup>3</sup>/d。

现传感器安装距离  $L = 10$  cm,声速为 1 500 m/s,理论上双向相位差之和为 192°,实测相位差约 195°,误差仅为 1%。按照上述方法连续测量 100 次,误差基本上都在 1%左右,真正保证了流量测量的高精确性。

### 3 结束语

超声波流量计具有测量精度高、重复性好、量程比较宽、抗干扰能力强、维修量小和可测双向流等优点,可以广泛应用于天然气工业的贸易输送计量、气体分配、调合、控制和检漏等场合,还可用于工厂排放液、液化天然气流量测量等,也可作为常规贸易计量仪表的标准表。总而言之,可广泛应用到各种精度要求高的流量测量中。

### 参考文献

- [1] 段秋风,张徐文. 基于处理的科里奥利力质量流量计设计[J]. 石油机械,2005, 25(3): 28-30.
- [2] 张雄伟,陈 亮. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社,2005:62-414.
- [3] 薛国民. 相关技术应用于油井多相流测量[J]. 油气田地面工程,2005,(4):24-26.
- [4] 朱 勇,虞鹤松. 多功能超声流量检测系统的研制[J]. 计算机测量与控制,2003, 11(11):836-838.

## NEW ULTRASONIC FLOWMETER BASED ON DSP

YANG Ping, ZHANG Yu-jie, WU Dan-hui

(School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Accuracy is the urgent question for the traditional ultrasonic flowmeter. The phase difference method is used to measure the flow in this design through analyzing the physical model of ultrasonic flowmeter. The key is analysis how the speed of sound impacts on flow. Not only the speed of sound is adjusted using the correction phase circuit, but also the TI's high performance DSP chip TMS320VC5402 is used as the processor. So the accuracy of measurement is improved greatly. It can be seen that the method is high measurement accuracy, rapid and high reliability through the actual measurement.

**Key words:** DSP; phase difference; ultrasonic flowmeter

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0102-03

# 破坏性键合拉力测试方法分析

陆君福, 张方辉, 席俭飞

(陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**分析了在双键合点引线拉力试验中造成测试值与引线实际抗拉力值存在差值的原因, 讨论了引线键合拉力测试过程中吊钩位置、弧线长度以及测量过程中金属引线存在的弹塑性变形对测试准确性的影响, 指出采用单键合点引线拉力测试可以比较准确地测得引线的实际抗拉力值。

**关键词:**引线键合; 拉力测试; 键合强度

**中图法分类号:** TN305.94      **文献标识码:** A

## 0 引言

根据焊接原理的不同, 键合工艺可分为热压焊 (Thermo compression Bonding)、超声焊 (Ultrasonic Bonding) 和热超声焊 (Thermo sonic Bonding) 3 种。键合过程中, 引线在热量、压力或超声能量的共同作用下, 与焊盘金属发生原子间扩散以达到键合的目的。键合强度的大小是衡量引线键合质量的重要标准之一, 所以对键合强度进行客观准确的测量是十分重要的。键合强度试验分为破坏性和非破坏性键合拉力试验<sup>[1]</sup>, 破坏性键合拉力试验又分单键合点引线和双键合点引线拉力试验。影响键合拉力测试结果的因素有工艺参数、引线参数等<sup>[2-4]</sup>, 工艺参数包括键合温度、键合时间、超声功率和键合压力等, 引线参数包括材质、直径、强度和刚度等。双键合点引线拉力的破坏性试验由于其良好的可操作性已成为目前最重要的键合质量检测手段之一, 但在双键合点引线拉力试验中测试结果还与吊钩位置、弧线长度以及测量过程中金属引线存在的弹塑性变形等有关, 因此测试值与实际键合强度的大小具有较大的差别<sup>[5]</sup>。本文讨论了当前双键合点引线拉力试验中所存在的问题, 分析了吊钩位置、弧线长度以及测量过程中金属引线存在的弹塑性变形对测试结果的影响, 并指出单键合点引线拉力测试有利于键合强度的准确测量。

## 1 双键合点引线拉力测试的理论分析

双键合点引线拉力测试的方法是: 把一个半圆形金属吊钩放在两焊点间的引线上, 再用不超过每秒 2 克的恒速率垂直向上拉。图 1 为两个键合点在同一水平面的引线拉力测试情形, 假定两键合点  $B_1$ 、 $B_2$  之间的距离为  $C$ , 测量点  $E$  距第一键合点的距离为  $X$ , 拉钩给的力为  $F$  且沿着键合引线的方向分解成两个分力  $F_1$  和  $F_2$ ,  $F$  与  $F_1$ 、 $F_2$  的夹角(锐角)分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 。根据力分解法则可知, 当  $X$  等于  $C/2$  即测试点在两键合点中间时,  $\theta_1 = \theta_2$ ,  $F_1 = F_2$ ; 当  $X$  小于  $C/2$  时,  $\theta_1 < \theta_2$ ,  $F_1 > F_2$ ; 当  $X$  大于  $C/2$  时,  $\theta_1 > \theta_2$ ,  $F_1 < F_2$ 。

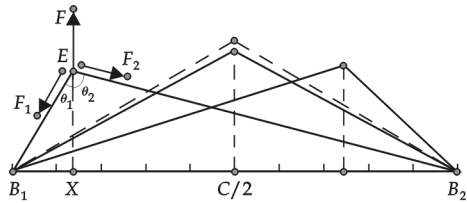


图 1 双键合引线拉力示意图(两键合点在同一水平面上)

假定  $F_M$  为引线所能承受的拉力最大值, 由此可以得到吊钩拉力  $F$  的分段表达式:

\* 收稿日期:2009-09-14  
作者简介:陆君福(1985—),男,浙江省东阳县人,在读硕士生,研究方向:平板显示



$$\begin{cases} F = \frac{C}{C-X} F_M \cos \theta_1 & 0 \leq X \leq \frac{C}{2} \\ F = \frac{C}{X} F_M \cos \theta_2 & \frac{C}{2} \leq X \leq C \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F = \frac{C}{C-X} F_M \cos \theta_1 & 0 \leq X \leq \frac{C}{2} \\ F = \frac{C}{X} F_M \cos \theta_2 & \frac{C}{2} \leq X \leq C \end{cases} \quad (2)$$

假定引线长度为  $kC(k>1)$ , 则(1)、(2)式可变为:

$$\begin{cases} F = F_M C \frac{\sqrt{k^2-1} \sqrt{(k^2-1)C^2+4CX-4X^2}}{(k^2-1)C^2+(3-k^2)CX-2X^2} & 0 \leq X \leq \frac{C}{2} \\ F = F_M C \frac{\sqrt{k^2-1} \sqrt{(k^2-1)C^2+4CX-4X^2}}{(k^2+1)CX-2X^2} & \frac{C}{2} \leq X \leq C \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F = F_M C \frac{\sqrt{k^2-1} \sqrt{(k^2-1)C^2+4CX-4X^2}}{(k^2-1)C^2+(3-k^2)CX-2X^2} & 0 \leq X \leq \frac{C}{2} \\ F = F_M C \frac{\sqrt{k^2-1} \sqrt{(k^2-1)C^2+4CX-4X^2}}{(k^2+1)CX-2X^2} & \frac{C}{2} \leq X \leq C \end{cases} \quad (4)$$

从式(3)、(4)中可以看出  $X$  和  $k$  值的大小都会影响测量值  $F$

的大小. 理论上测量点  $X$  应在引线的中间且引线长度为  $\frac{2\sqrt{3}}{3}C$ , 这样才能保证试验过程中吊钩与其两边的引线均呈  $120^\circ$  角, 以保证施加的力与吊钩两边引线所受到的拉力相等. 然而在实际操作过程中, 操作人员只凭目测放置吊钩的位置, 使其大约在引线的中央, 而且引线长度未必是  $\frac{2\sqrt{3}}{3}C$ , 这样就会造成测量值与引线的实际抗拉力值间的偏差. 另外, 如图 1 虚线所示, 由于金属丝在试验过程会发生弹塑性变形, 导致引线长度增长, 吊钩与其两边引线的角度( $\theta_1$ 、 $\theta_2$ )减小, 会造成测试值  $F$  的增大. 因此, 对于两个键合点在同一水平面上的双键合点引线拉力测试所能做到的就是在测试过程中让测试点  $X$  尽量处于引线中间, 以使吊钩两边引线所受到的拉力相等.

对于两键合点不在同一水平面上的双键合点引线拉力测试而言, 如图 2 所示, 假设两键合点的高度差为  $h$ , 且  $k > \sqrt{1+\frac{h^2}{C^2}}$ , 则拉力  $F$  的表达式为:

$$\begin{cases} F = \frac{C \cos \theta_1 + h \sin \theta_1}{C-X} F_M & 0 \leq X \leq \frac{1}{2} \left( C - \frac{h}{\sqrt{k^2-1}} \right) \\ F = \frac{C \cos \theta_2 - h \sin \theta_2}{X} F_M & \frac{1}{2} \left( C - \frac{h}{\sqrt{k^2-1}} \right) \leq X \leq C \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} F = \frac{C \cos \theta_1 + h \sin \theta_1}{C-X} F_M & 0 \leq X \leq \frac{1}{2} \left( C - \frac{h}{\sqrt{k^2-1}} \right) \\ F = \frac{C \cos \theta_2 - h \sin \theta_2}{X} F_M & \frac{1}{2} \left( C - \frac{h}{\sqrt{k^2-1}} \right) \leq X \leq C \end{cases} \quad (6)$$

理想的情况自然是吊钩与其两边的引线均呈  $120^\circ$  角, 使测试值  $F$  与两边引线所受拉力  $F_1$ 、 $F_2$  相等, 然而经分析可以知道只有当测试点  $E$  在  $X = \frac{1}{2} \left( C - \frac{h}{\sqrt{k^2-1}} \right)$  时才能使吊钩与其两边引线所成角度相等, 且从中可以看出其  $X$  值随着  $k$  值大小的变化而变化, 因此在实际测量中能使吊钩与其两边引线所成角度相等的测量点  $E$  的位置很难把握, 因为它不再是两键合点水平位置的中点且会随着引线长度的改变而改变.

基于以上分析, 如果采用单键合点引线拉力测试, 只需在键合点上方用不超过每秒 2 克的恒速率垂直向上拉就能比较准确地测得引线的实际抗拉力值, 因为吊钩施加的力的方向与引线所受力的方向始终在同一直线上, 测量点的位置、引线的长度、测量过程中引线存在的弹塑性变形都不会造成测试值与引线实际抗拉力值的偏差.

## 2 结束语

在双键合点引线拉力试验中, 吊钩位置、弧线长度都会造成测试值与实际键合强度的大小的偏差, 另外金属丝在试验过程会发生弹塑性变形, 造成引线长度增长, 因此吊钩与其两边引线的角度( $\theta_1$ 、 $\theta_2$ )会减

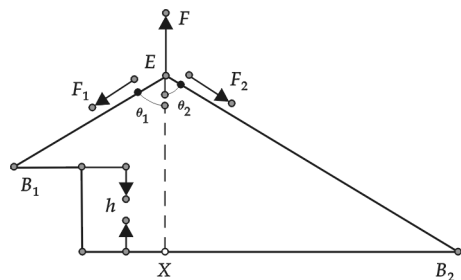


图 2 键合拉力示意图(两键合点不在同一水平面上)



小,测试值  $F$  会增大,如果采用单引线键合拉力的测试方法就可以避免这些弊端,只需在键合点上方用不超过每秒 2 克的恒速率垂直向上拉就可以比较准确地测知引线键合的实际抗拉强度,从而对键合的质量进行更加客观的分析.

### 参考文献

- [1] Aashish Shah, Jaesik Lee, Michael Mayer, *et al.* Online methods to measure breaking force of bonding wire using a CMOS stress sensor and a proximity sensor[J]. *Sensors and actuators A*, 2008,148:426-471.
- [2] 杨文建,李小平,李朝晖,等.超细间距引线键合第一键合点工艺参数优化试验研究[J].*半导体技术*,2005,30(4):20-23.
- [3] 吕 磊.引线键合工艺介绍及质量检验[J].*电子工业专用设备*,2008,37(3):53-60.
- [4] 晁宇晴,杨兆建,乔海灵.引线键合技术进展[J].*电子工艺技术*,2007,28(4):205-210.
- [5] 刘春芝,贺 玲,刘 笛.键合拉力测试点对键合拉力的影响分析[J].*电子与封装*,2008,8(5):9-11.

## ANALYSIS OF DESTRUCTIVE BOND PULLING TEST METHODS

LU Jun-fu, ZHANG Fang-hui, XI Jian-fei

(School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In this paper, causes leading to the difference between test value and actual value in the double bond wire pulling test were analyzed. The effects of test point position, wire length and elasto-plastic deformation of metallic wire existing in the process of testing on accuracy of wire bond pulling test were discussed. It is pointed out that single bond wire pulling test could test actual wire bond strength more accurately.

**Key words:** wire bond; pulling test; bond strength

(上接第 90 页)

- [5] 方瑞华,苏清祖.车用催化器载体蜂窝孔内气流分析[J].*汽车工程*,2001,23(2):124-126.
- [6] 陈明华,司传胜.基于 CFD 的车用催化转化器的结构优化设计[J].*中国制造业信息化*,2006,23(17):71-77.
- [7] 赵继业,陈觉先,朱国朝,等.利用 CFD 分析催化转化器不同设计因素的影响[J].*小型内燃机与摩托车*,2001,30(3):23-28.
- [8] 陈晓玲,张武高,黄 震.催化器载体前端造型对其流动特性的影响[J].*上海交通大学学报*,2007,41(4):537-540.
- [9] 修 岩,何 立.端面造型载体催化器结构优化设计[J].*机械设计与制造*,2009,(3):42-44.

## NUMERICAL SIMULATION OF AUTOMOTIVE CATALYTIC CONVERTERS BASED DIFFERENT SHAPES OF THE MONOLITH

XU Jian-min<sup>1</sup>, YUAN Zhi-qun<sup>1</sup>, DAI Teng-qing<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Power Equipment Branch, Guangzhou Fengshen Motor Co. Ltd., Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** In this article, multi-dimensional numerical simulation about velocity field and pressure field of steady flows in the catalytic converters for three different shapes of the monolith ends was performed by using computational fluid dynamic method (CFD). Simulation results show that: the shapes of the monolith ends have a great impact on the flow of catalytic converters. Using the sphere-shaped monolith and cone-shaped monolith, not only reduce flow separation of entrance expansion tube, but also make more uniform velocity.

**Key words:** CFD; catalytic converters; shapes of the monolith ends; velocity field; pressure field

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0105-03

# 基于 Xilinx SOPC 的 TFT-LCD 控制器设计与实现

高一沅

(福州大学至诚学院, 福建 福州 350002)

**摘要:**根据 TFT-LCD 的工作原理,采用 Xilinx 公司的 Microblaze 微处理器软核,提出了一种基于嵌入式 FPGA SOPC 平台的 TFT-LCD 控制器方案,并验证了该方案的可行性.该控制器为进一步在嵌入式 FPGA 片上系统进行图像和多媒体开发提供了一个稳固的平台.

**关键词:**现场可编程门阵列; Microblaze; TFT-LCD; 控制器

**中图分类号:**TN873<sup>+</sup>.93;TP302.1      **文献标识码:**A

## 0 引言

目前 TFT (Thin Film Transistor, 薄膜场效应晶体管)液晶已经广泛应用于信息显示系统,但是这些系统运算能力和工作效率较低,难以适应图像高速处理和数据传输的需求.

基于最新 FPGA 嵌入式设计方法,作者提出了一种 TFT-LCD 显示控制器的设计方案,采用 Xilinx 公司的 MicroBlaze 32 位微处理器软核,充分利用 FPGA 的高速处理和片内大容量逻辑资源,设计了一个基于FPGA可编程片上系统(SOPC, System On Programmable Chip)的 TFT 彩屏液晶显示控制器.

## 1 系统主要硬件结构介绍

系统硬件主要部分如图 1 所示.在该系统中,Xilinx 公司的 Spartan-3E XC3S500E<sup>[1]</sup> FPGA 作为主控芯片,外部存储器分别采用 Micron 公司的 32Mx16 DDR SDRAM 芯片 MT46V32M16 和 Intel 公司的 JS28F128J3D75 Strata Flash 芯片.

系统采用一片基于 Himax HX8347D<sup>[2]</sup> 驱动芯片的 2.4" TFT液晶显示模块,支持 QVGA(320×240 像素)显示分辨率,该芯片内置 1 382 400 bits 显示数据 GRAM,支持最高 262 144 色的显示.

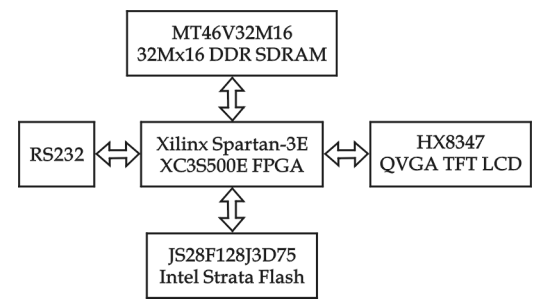


图 1 系统硬件连接框图

## 2 SOPC 系统及 TFT-LCD 控制器的设计

SOPC 系统“嵌入式硬件平台”设计在 Xilinx 嵌入式开发套件 EDK (Embedded Development Kit) 软件内完成.利用 EDK 的集成开发环境 XPS (Xilinx Platform Studio),生成 Microblaze<sup>[3]</sup> 基本系统构架. Microblaze 处理器采用 IBM Core Connect 总线架构的 OPB 总线 (On-Chip Peripheral Bus, 片上外围总线)<sup>[4]</sup> 与外设相连,由于 TFT-LCD 控制器不是系统的标准预置可定制外围设备,因此需设计一个 TFT-LCD 控制器 IP 核与 OPB 总线接口连接,并导入系统.

TFT-LCD 显示系统的硬件模块如图 2 所示, Microblaze 微处理器软核作为核心处理器,通过 OPB 总

\* 收稿日期:2009-09-29  
作者简介:高一沅(1979—),男,福建省福州市人,助教,硕士,研究方向:模拟和数字信号处理及其应用

线与片内外的终端相连, TFT-LCD 控制器通过 OPB 总线 IP 接口与 OPB 总线相连, 所有的这些模块均在 FPGA 内实现, 另外 TFT-LCD 控制器通过输出使能信号开启/关闭显示模块的背光。

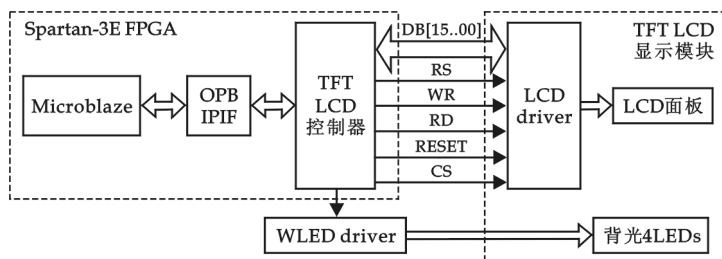


图 2 TFT-LCD 显示系统的硬件模块框图

TFT-LCD 控制器 IP 核内同时集成了 LCD 初始化模块, 这样整个 SOPC 系统上电初始化的同时也初始化了显示模块, 有利于快速显示。模块的初始化过程如图 3 所示。

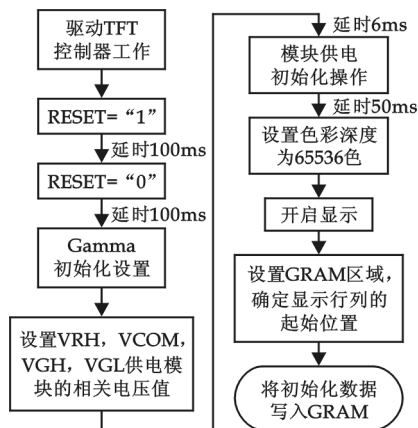


图 3 LCD 模块的初始化过程

以上设计完成后, 经过综合、布局布线无误后生成 bit 文件, 下载到开发板上, 作为进一步开发调试的硬件平台使用。

### 3 软件部分设计

在完成 SOPC 虚拟硬件平台设计后, 在 SDK (Software Development Kit) 集成开发环境中进行 TFT-LCD 模块控制器应用程序的设计。

在导入自行设计的 TFT-LCD IP 核后, EDK 会自动生成该 IP 核的基本驱动库, 将 TFT-LCD 控制器作为寄存器进行各项操作。利用这些底层 API 函数, 根据功能需要, 作者编写了 LCD 下列几个显示功能函数, 供后续进一步图形显示开发使用。部分主要函数及其功能说明如下:

(1) void LCD\_Cmd(Xuint32 reg)

功能: 设置寄存器地址, 在对显示模块传送寄存器地址时, LCD 控制器驱动 FPGA 芯片向 TFT 显示模块的 CS、RS、WR 引脚输出低电平, 完成后再将 WR 引脚电平拉高。

(2) void LCD\_Data(Xuint32 data)

功能: 送参数到寄存器中或者送显示数据到 GRAM 中, 在对显示模块传送寄存器地址时, LCD 控制器驱动 FPGA 芯片向 TFT 显示模块的 CS、RS、WR 引脚输出高电平信号, 完成后再将 WR 引脚电平下拉。

(3) void LCD\_Reg\_Set1(Xuint32 reg, Xuint32 data)

功能: 把数据送到特定的寄存器, 通过调用上面的两个函数完成。当 RS 输出为低电平时, 写寄存器地址; 当 RS 输出为高电平时, 写寄存器的设置参数。

(4) void LCD Pixel(Xuint16 x, Xuint16 y, Xuint32 color)

功能: 将指定颜色的像素在屏幕指定位置显示的函数。

基于以上针对像素操作的函数, 可以构建任何高级功能显示函数, 如显示字符函数 void display\_char (BYTE p) 和显示位图函数 void Display\_Bitmap(Xuint32 \* pic)。

## 4 系统测试运行

SOPC 系统的 OPB 总线时钟频率设定为 50 MHz, Microblaze 片上的高速缓存设为 8 kB, 面板内部显示帧速率设为 60 Hz, 显示分辨率为 320×240, 色彩显示深度 16 bit (65 536 色)。

经过对软件程序的编译、汇编和链接, 生成可执行文件, 进行在线联机调试并调试成功后, 在 XPS 中

将软件设计中生成的软件镜像同硬件设计中生成的配置文件合并,生成最终的 FPGA 下载配置文件,下载到芯片中上电运行.

测试时,将要显示的图形和字符预先存储在 DDR SDRAM 指定的地址区间,然后将其读出送给 TFT-LCD 显示,具体的工作流程如图 4 所示.测试结果表明图形和字符结果均正常显示,表明系统可以正常稳定工作.

5 结束语

实际运行表明,基于 Xilinx SOPC 系统的 TFT-LCD 除了具有良好的显示效果外,其最大的优点在于与传统 FPGA 设计 LCD 控制器的方法相比,今后进一步进行图形设计时只需在此基础上调用当前设计的显示功能子函数即可进行高层的应用程序设计.由于使用的微处理器软核、系统高速外围总线和控制器 IP 都是在整个 FPGA 芯片上实现,因此整个系统的速度和稳定性有了很大提高,系统使用的大容量 DDR SDRAM 可以进行大量数据的存储和处理,为今后在此平台上进一步进行多媒体开发提供了良好而又坚实的基础.

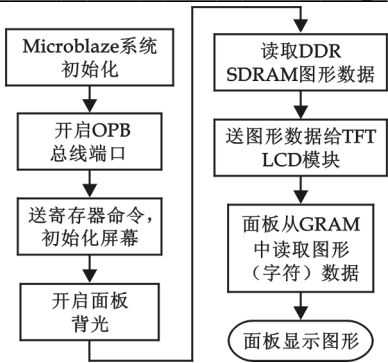


图 4 系统显示流程图

参考文献

[1] Xilinx. Spartan-3E FPGA Family Data Sheet[EB/OL]. www. xilinx. com, 2008.  
[2] Himax. HX8347-D(T) 240RGB×320 Dot, 262K Color with Internal GRAM, TFT Mobile Single Chip Driver Version 01[EB/OL]. www. himax. com. tw, 2008.  
[3] Xilinx. Microblaze Processor Reference Guide v6. 3[EB/OL]. www. xilinx. com, 2006.  
[4] IBM. On-Chip Peripheral Bus Architecture Specifications Version 2. 1[EB/OL]. www. ibm. com, 2001.  
[5] 杨强浩. 基于 EDK 的 FPGA 嵌入式系统开发[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.

DESIGN AND REALIZATION OF TFT-LCD CONTROLLER  
BASED ON XILINX SOPC

GAO Yi-yuan

(Zhicheng College, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** According to the principle of TFT-LCD, it was introduced a TFT-LCD controller method utilizing Xilinx Microblaze microprocessor soft IP core based on embedded FPGA SOPC platform. The whole design was verified. This controller provides a steady platform for further image and multimedia development based on embedded FPGA SoC.

**Key words:** FPGA; Microblaze; TFT-LCD; controller

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0108-04

# 矩阵条件数应用于 FBG 传感器多参数测量研究

王晓霞<sup>1</sup>, 赵 晓<sup>1</sup>, 吴春英<sup>1</sup>, 王卫林<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 中国航天科技公司九院第十六研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**建立并确定了基于 FBG 传感器多参数同时测量系统数学模型,提出用矩阵条件数结合测量公式导出矩阵条件数与温度、压力测量公式间的矩阵的关系式,利用该关系式可以去除病态矩阵参数并可以找出最佳镀层材料及厚度以此来提高 FBG 传感器的测量精度. 实验表明,当镀有不同厚度铜,且  $r_2 \leq 0.4\text{mm}$  时 FBG 测量温度和压力都具有较高的灵敏度.

**关键词:**矩阵条件数; FBG 传感器; 多参数测量  
**中图法分类号:**TP212.1      **文献标识码:**A

## 0 引言

在测量中采用把复合物和一些金属物镀在传感器表面来保护光纤传感器,使其 FBG 能正常工作,这种改进方法称为光纤镀层(如图 1 所示)光纤镀层传感器比无镀层传感器有诸多优点,如能大大提高光纤的耐久力,防止测量信号受环境噪音的影响,更重要的是能大大提高测量的灵敏度<sup>[1,2]</sup>. 目前关于高灵敏度传感器的研究十分热门,但是如何确定压力、温度公式中的各参数使同时测量压力和温度都有较佳灵敏度? 为此本文结合应用矩阵理论与测量公式,提出用矩阵条件数来描述和确定理论公式中各系数的关系.

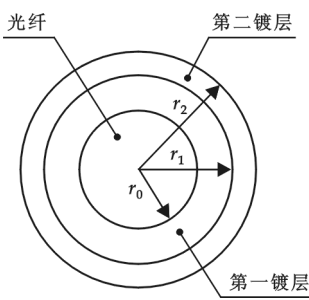


图 1 镀层半径

## 1 理论分析

### 1.1 FBG 压力和温度测量公式及参数的确定<sup>[3-5]</sup>

(1)无镀层 FBG 已知各材料的属性如表 1 所示,本论文中无镀层 FBG 是石英光纤,第一层镀层材料为环氧树脂,第二层材料需要研究确定,石英光纤各参数值分别为:  $p_{11}=0.12$ ,  $p_{12}=0.27$ ,  $n_0=1.465$ , 由表 1 及公式可得<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = K_{p0} \Delta p + K_{T0} \Delta T \tag{1}$$

式中:  $K_{p0}$  为压力测量系数;  $K_{T0}$  温度测量系数.

$$K_{p0} = -\frac{(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E}(1-2\nu)(2p_{12} + p_{11}) = -0.002\ 196 \tag{2}$$

$$K_{T0} = \alpha_0 + \xi_0 = 8.61 \times 10^{-6} \tag{3}$$

式(2)中  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为弹光张量分量(Pockel 系数),  $\nu$  为光纤材料的泊松比. 式(3)中:  $\alpha$  为热膨胀系数,

\* 收稿日期:2009-10-14  
作者简介:王晓霞(1977—),女,山西省运城人,讲师,硕士,研究方向:电子信息系统及网络计算机应用  
基金项目:陕西省教育厅专项研究计划项目(08JK223),陕西科技大学自然科学基金资助项目

$\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$  为热光系数.

(2)有镀层 FBG(无镀层 FBG 半径  $r_0$  为  $62.5\ \mu\text{m}$ ):

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = K_{p1} \Delta p + K_{T1} \Delta T \tag{4}$$

$$m = \alpha_1 (1 + \nu_1) - \alpha_0 (1 + \nu_0) \tag{5}$$

$$n = \alpha_2 (1 + \nu_2) - \alpha_1 (1 + \nu_1) \tag{6}$$

$$K_{T1} = \frac{2\nu_2 E_1 [2m(1 - \nu_1^2)r_0^2 + n(1 + \nu_1)((1 - \nu_1)r_0^2 + r_1^2)]r_1^2(r_1^2 - r_0^2)}{(1 + \nu_1)^2[(1 - 2\nu_1)r_0^2 + r_1^2][r_0^2 + (1 - 2\nu_1)r_1^2] - 4(1 - \nu_1^2)^2r_1^2r_0^2(r_2^2 - r_1^2)} + E_2\alpha_2 \quad r_0 \leq r \leq r_1 \tag{7}$$

$$\begin{aligned} K_{p1} &= -\frac{(1 - 2\mu_0)}{E_0} + \frac{n_0^2}{2E_0}(1 - 2\mu_0)(2p_{12} + p_{11}) + \frac{2\mu_1\mu_2r_2^2}{E_2\mu_1(r_2^2 - r_1^2) + E_1\mu_2(r_1^2 - r_0^2)} \\ &= 0.002\ 196 + \frac{0.4\mu_2r_2^2}{0.2E_2(r_2^2 - r_1^2) + \mu_2(r_1^2 - r_0^2)} \quad r_0 \leq r \leq r_1 \end{aligned} \tag{8}$$

由公式(4)~(8)可知要求出最佳精度需要确定  $\alpha_2, \mu_2, E_2, r_2$  这 4 个未知数间的关系或值.

表 1 材料属性参数表

材料	线膨胀系数/( $10^{-6}/\text{K}$ )	杨氏弹性模量( $E$ )/MPa	泊松比
石英光纤	0.55	70	0.17
环氧树脂	63	1	0.2
铝	23.5	69.00	0.21
铜	17	180.00	0.338
镍	13.3	199.00	0.27
金	14.2	77.91	0.33, 0.28
锡	23	41.00	0.33

1.2 矩阵条件数确定

数值分析中,将矩阵  $A$  的范数  $\|A\|$  与它的逆矩阵的范数  $\|A^{-1}\|$  之积称为这个矩阵  $A$  的条件数,记为  $\text{cond}(A)$ .  $\text{cond}(A)$  越小或者越接近于 1 引起的解的相对误差就越小<sup>[6,7]</sup>.

$$\text{其中: } \|A\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \text{ (称为 } A \text{ 的行范数)} \tag{9}$$

$$\|A\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n |a_{ij}| \text{ (称为 } A \text{ 的列范数)} \tag{10}$$

$$\|A\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(A^T A)} \text{ (称为 } A \text{ 的 2-范数)} \tag{11}$$

结合无镀层测量公式(1)和有镀层测量公式(4),可知

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_B} \\ \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_B} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta T \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中矩阵系数

$$K = \begin{bmatrix} K_{p01} & K_{p1} \\ K_{T0} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.003 & K_{p1} \\ 8.61 * e^{-6} & K_{T1} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$K^{-1} = \frac{1}{-(3K_{T1} - 8.61 * 10^{-3})K_{p1}} \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{p1} \\ 0.008\ 61 & -3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\text{cond}_{\infty}(K) = \|K\|_{\infty} * \|K^{-1}\|_{\infty} \tag{15}$$

$$\text{cond}_2(K) = \|K\|_2 * \|K^{-1}\|_2 = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(K^T K)}{\lambda_{\min}(K^T K)}} \tag{16}$$

$$\text{cond}_1(K) = \|K\|_1 * \|K^{-1}\|_1 \tag{17}$$

$$K^TK = \begin{bmatrix} 0.003^2 + (8.61 * e - 6)^2 - 0.003K_{p1} + 8.61 * e - 6K_{T1} \\ -0.003K_{p1} + 8.61 * e - 6K_{T1}K_{p1}^2 + K_{T1}^2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

求出  $\lambda_{\max}(K^TK)$ ,  $\lambda_{\min}(K^TK)$ , 并分别求出  $\text{cond}_1(K)$ ,  $\text{cond}_2(K)$ ,  $\text{cond}_\infty(K)$ , 并使  $\text{cond}(K)$  值接近 1, 最后根据公式(9)、(10)、(11)、(14) 导出矩阵条件数  $\text{cond}(K)$  与  $\alpha_2, \mu_2, E_2, r_2$  这 4 个未知数间的关系式, 由于公式较繁, 此处不一一列出。

### 3 实验验证<sup>[6]</sup>

实验中采用 1 530 nm 的反射波长, ASE 宽带光源, 用高能量激光通过相位掩模照射光纤在中心生成 FBG 传感器, 用位相干涉仪进行信号解调, 由于信号解调有三相, 因此需要 3 个光检出器把光信号转化为模拟信号, 信号经 A/D 转换器被转换为数字信号, 再将数字信号输入到电脑里。无镀层 FBG 半径  $r_0$  为 62.5  $\mu\text{m}$ , 测量系统如图 2 所示。实验中用 FFT(快速傅立叶变换算法)进行 A/D 转换, 并编写程序求出温度变化与引起波长漂移间的关系。

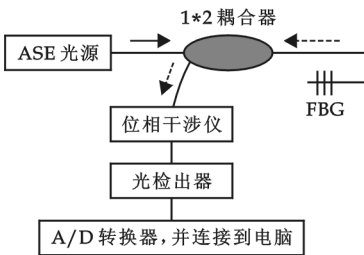


图 2 测量实验系统

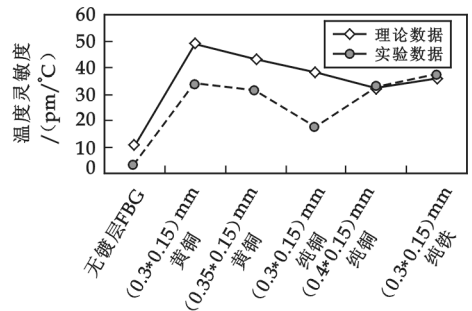


图 3 理论与实验温度灵敏度的比较

图 3 中数字(0.3 \* 0.15)对应( $r_2 * r_1$ ), 表示第一层厚度为  $150 - 62.5 = 87.5 \mu\text{m}$ , 第二层厚度为  $300 - 150 = 150 \mu\text{m}$ , 其他依次对应。

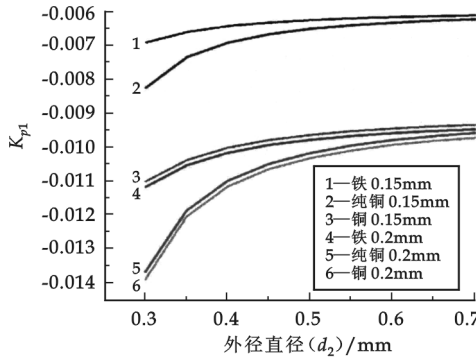


图 4 不同材料和镀层厚度 FBGs 的波长漂移与压力变换间的关系

为了获得较高的精确度和良好的线性关系, 我们把 FBG 放入持续加热的烤箱中来测量温度, 实验中用压力容器结合抽水泵来测量压力. 由于给 FBG 表层镀金属技术难度较大, 而实验中需要比较多个镀有不同材料和厚度的 FBGs, 为降低成本, 实验中采用 FBG 插入不同尺度的金属套管, 中间用环氧树脂粘贴, 这样可将 FBG 传感器温度灵敏度的测量研究转换为被镀两层材料 FBG 的温度灵敏度研究. 第一层镀的是环氧树脂, 第二层是金属套管, 第一层的厚度与金属套管尺度有关系. 图 3、图 4 分别为实验温度、压力灵敏度的比较, 由图 3、图 4 可知: 当镀有不同厚度铜, 且  $r_2 \leq 0.4 \text{ mm}$  时 FBG 测量温度和压力都具有较高灵敏度. 图 4 中标明的 1~6 分别为  $r_1$  半径, (0.3 mm \* 0.15 mm) 表示内外镀层半径的单位均为 mm.

下面数据前者为理论数据, 后者为实验数据:

无镀层 FBG 温度灵敏度分别是: 10.15 pm/°C, 2.64 pm/°C; (0.3 \* mm0.15mm) 黄铜为 49.35p m/°C, 33.79 pm/°C; (0.35 mm \* 0.15 mm) 黄铜为 43.25 pm/°C, 31.29 pm/°C (0.3 mm \* 0.15 mm) 纯铜为 38.67 pm/°C, 17.15 pm/°C; (0.4 mm \* 0.15 mm) 纯铜为 32.22 pm/°C, 32.59 pm/°C; (0.3 mm \* 0.15 mm) 纯铁为 35.98 pm/°C, 37.398 pm/°C.

把实验得到的各参数用矩阵条件数关系式来验证, 得出该矩阵属于良性矩阵, 误差较小。



#### 4 结束语

本文根据矩阵、线性代数等相关理论推导出同时测量温度和压力时镀层材料及厚度的关系式,并结合实验进行了验证和判断,可知当镀有不同厚度铜,且  $r_2 \leq 0.4$  mm 时 FBG 测量温度和压力都具有较高的灵敏度。利用本研究成果使用户可以根据实际测量环境结合材料各属性关系式选择出合适的材料和最佳厚度,今后多参数测量传感器的设计加工具有指导意义。

#### 参考文献

- [1] S. T. Vohra, A. Dandridge, C. C. Chang, *et al.* High sensitivity pressure sensors utilizing advanced polymer coatings[J]. OFS, 1999, 13(1):557-560.
- [2] 山手 勉, RT. Ramos and R. J. Schroeder. 用光纤传感器进行油井探查[J]. Optronics, 2000, 3(2):112-117.
- [3] Y. Liu, Z. Gou, Y. Zhang, *et al.* Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber bragg grating[J]. Electro. Lett, 2000, 36(6):564-566.
- [4] 高嶋 昭一. FBG sensorを用いた坑井内压力、温度 and 流速测量系统研究[D]. 日本仙台:日本东北大学环境科学研究博士研究生学位论文, 2003:50-100.
- [5] 王晓霞, 刘 炜, 王卫林, 等. 镀层材料对 FBG 传感器温度灵敏度的影响与研究[J]. 材料导报, 2009, 23(5):56-58.
- [6] <http://www.tyut.edu.cn/kecheng/jisff/dzja/ch3/ch3-6.htm>(条件数)[EB/OL].
- [7] <http://hi.baidu.com/oswlh/blog/item/ffebb51143fe23c4a7ef3f2e.html/cmtid/2c4c88b4911efc798ad4b251>(范数)[EB/OL].
- [8] <http://www.shuxuecheng.com/gaosuzk/content/lljx/wzja/12/12-6.htm>(逆矩阵)[EB/OL].

## RESEARCH OF THE CONDITION NUMBER OF MATRIX IN MULTI-PARAMETER MEASUREMENT FBGS

WANG Xiao-xia<sup>1</sup>, ZHAO Xiao<sup>1</sup>, WU Chun-ying<sup>1</sup>, WANG Wei-lin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. The 16th Research Institute of Ninth Research Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The FBG sensor based on multi-parameter mathematical model of simultaneous measurement of the system was established and determined. The condition number of matrix was proposed to deduced the relationship between the formula of coated-thickness and coated-materials and the condition number of matrix. The ill-conditioned matrix parameters can be removed, and the best coated-material and coated-thickness with improving the measurement accuracy of FBG sensors was found. As indicated by the experiment, the FBGs sensitivities is higher with coated with different thickness of copper, and  $r_2 \leq 0.4$  mm.

**Key words:** condition number of matrix; FBG sensor; multi-parameter

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0112-04

# 一种基于优胜劣汰的多粒子群替代优化算法的设计

陈建成<sup>1</sup>, 屠昂燕<sup>2</sup>

(1. 浙江工业职业技术学院计算机系, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院计算机系, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:**微粒群算法是一种新颖的优化算法,已成功应用于许多优化问题,但该算法容易陷入局部极值. 针对这种缺陷,提出了一种基于优胜劣汰的多粒子群替代算法,该算法先通过多个种群彼此独立地搜索解空间,增强全局搜索能力;各种群每次进化完成后,核心种群中的最差微粒与其他种群的最好微粒互相替代. 通过对 3 种常用测试函数进行测试和比较,结果表明该算法比标准微粒群算法具有更低的平均最好适应值,可快速收敛到全局最优解,优化效率明显提高.

**关键词:**PSO; 优化; 群智能; 多粒子群

**中图分类号:**TP301.6

**文献标识码:**A

## 0 引言

微粒群优化算法(PSO)是一种基于群智能的新型优化计算方法,最早是由美国心理学家 James Kennedy 和电气工程师 Russell Eberhart 于 1995 年共同提出的<sup>[1]</sup>,它通过模拟鸟群的捕食行为来实现对问题的求解. 近几年来,该算法已在系统设计、模式识别、信号处理、决策制定和人工网络等方面得到了应用,但标准微粒群优化算法会出现早熟收敛,甚至不收敛的现象. 针对这种情况,很多研究者提出了改进微粒群算法,如混合粒子群优化算法<sup>[2-4]</sup>、多微粒群优化算法<sup>[5]</sup>. 本文借鉴生物学中“优胜劣汰”的自然现象,提出了一种基于优胜劣汰的多粒子群间粒子互相替代的优化算法,各个种群各自独立进化后,当前种群的最差微粒分别用对方种群的最好微粒替代,在一定程度上提高了收敛精度,有效地克服了早熟收敛现象. 本文用经典测试函数进行了仿真实验,并将结果与标准 PSO 进行了比较,证明该算法的有效性.

## 1 标准微粒群算法

微粒群优化算法不像其他演化算法对个体普遍使用演化算子,而是将每个个体看作  $D$  维搜索空间的一个没有体积的粒子,由  $m$  个微粒组成的微粒群在搜索空间中以一定的速度飞行. 粒子的飞行速度由它本身的飞行经验以及同伴的飞行经验进行动态调整,其中第  $i$  个微粒的当前位置为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ ,第  $i$  个微粒的当前速度为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ ,第  $i$  个微粒的所经历的历史最好位置为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

将微粒的当前位置作为优化问题的潜在解代入到优化目标函数,计算出相应的适应值,根据适应值的大小衡量微粒的优劣,也就是说将微粒  $i$  所经历过的具有最好适应值的位置称为个体历史最好位置. 所有微粒所经历过的位置中的最好位置称为全局历史最好位置,即:

$$P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$$

微粒群算法中微粒  $i$  的飞行由下式决定:

\* 收稿日期:2009-09-19

作者简介:陈建成(1973—),男,浙江省绍兴市人,讲师,硕士,研究方向:模式识别、智能算

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(P_{gi}(t) - x_{ij}(t)), i=1, \dots, s; j=1, \dots, m \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2)$$

式(1)中  $\omega$  称为惯性权重,下标“ $j$ ”表示微粒的  $j$  维,下标“ $i$ ”表示第  $i$  个微粒, $t$  表示进化到第  $t$  代, $c_1$ 、 $c_2$  为加速常数, $r_1$ 、 $r_2$  是两个在此  $[0,1]$  范围内变化的随机数<sup>[6-9]</sup>.

式(1)中由 3 部分组成,第一部分是微粒的先前速度的惯性部分.第二部分为认知部分,表示微粒自身的经验,即自身的思索;第三部分为“社会”部分,表示微粒间的信息共享和相互合作.在整个搜索过程中,微粒的下一步行动是由先前速度的惯性、微粒本身的最好经验和整个群体的最好经验共同影响的结果.微粒群进行搜索时,微粒的位置受最大位置所限制,如果它的位置超出最大位置,则微粒的位置就被设置为最大位置,同时微粒的速度受最大速度所限制;如果它的速度超过最大速度,则微粒的速度就被设置为最大速度.在算法运行过程中,微粒的最好位置  $P_i$  和微粒群的最好位置  $P_g$  被不断地更新,当达到足够好的适应值或达到一个预设最大迭代次数时,算法结束.

## 2 多粒子群替代优化算法

多粒子群替代优化算法(MEPSO)的思想如图 1 所示: $N$  个种群组成的群体首先都独立进化,每次迭代结束后保存每个种群的最好微粒和最差微粒.独立进化到一定代数后,分别把核心种群中的最差微粒改成其他种群当前的最好微粒,即核心种群的最差微粒替代成第二个种群的最好微粒,把第二个种群的最差微粒替代成核心种群的最好微粒;再把核心种群的最差微粒替代成第三个种群的最好的微粒,把第三个种群的最差微粒替代成核心种群的最好微粒.依此类推,核心种群的最差微粒替代成第  $N$  个种群的最好的微粒,把第  $N$  个最差微粒替代成核心种群的最好微粒,这样各个种群既能充分利用自身的值进行搜索,不会迷失自己的方向,又能得到其他种群的最好微粒,淘汰自身种群的最差微粒,以此改善微粒群算法的收敛性.

算法描述:首先分别初始化  $N$  个种群,得到每个种群的全局最好位置、最差位置和对应的最好的适应值、最差适应值,每个种群独立运行标准微粒群算法,进行适应值的计算和各个种群的进化.各个种群在进化过程中只更新自己的最好位置、最差位置和对应的最好的适应值、最差适应值,并把每个种群的最好微粒和最差微粒分别保存到全局变量中.独立进化到一定代数后,种群 1 和其他种群的最差微粒分别替代对方种群的最好微粒.循环迭代,直到满足最大进化代数,算法停止.

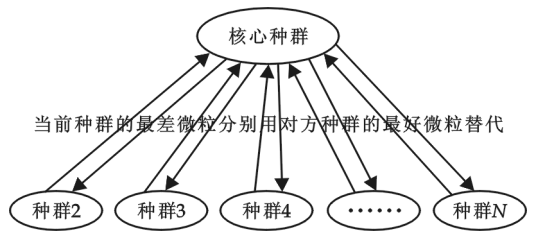


图 1 多粒子群替代优化算法(MEPSO)思路

多粒子群交换优化算法的伪代码描述如下:

```
main( )
{
    for(j = 0 ; j < 20 ; j++)
    {
        initiate(); //初始化 n 个微粒群中的每个微粒,包括微粒群的随机位置、适应值和速度
        得到每个微粒群的全局最好值及对应适应值.
        for(i = 0 ; i < 进化总限制次数 ; i++)
        {
            w 线性减少;
            for(m = 0 ; m < 种群数 ; m++)
            {
                每个种群独立进化;
                保存每个种群的最好微粒和最差微粒的相应值和个数;
            }
        }
        for(u = 1 ; u < 种群数 ; u++)
```

```
if(if (i% 迭代替代周期==0)
{
    种群 1 和其它种群进行交换;
    计算种群 1 的最好微粒和最差微粒;
}
}
对微粒群的最好适应值求和;
}
求出平均最好适应值;
}
```

3 仿真实验

采用下面 3 个典型的多峰函数作为测试函数.

3.1 测试函数

(1)Rosen brock 函数

$$f_1(X)=\sum_{i=1}^n100(x_{i+1}^2-x_i)^2+(1-x_i)^2 \quad -30\leqslant x_i\leqslant 30$$

又称为香蕉函数,为非凸、病态函数,在  $x_i=1$  时达到极小值.

(2)Rastrigin 函数

$$f_2(X)=\sum_{i=1}^n(x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10) \quad -5.12\leqslant x_i\leqslant 5.12$$

是一个多峰函数, $f_2(X)$  在  $x_i=0$  ( $i=1,\cdots,n$ ) 时达到全局极小点,在  $S=\{x_i\in(-5.12,5.12),i=1,2,\cdots,n\}$  范围内大约存在  $10n$  个局部极小点.

(3)Griewank 函数

$$f_3(X)=\frac{1}{4\,000}\sum_{i=1}^nx_i^2-\prod_{i=1}^n\cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}})+1 \quad -10\leqslant x_i\leqslant 10$$

$f_3(X)$  的全局极小在  $x_i=0$  ( $i=1,\cdots,n$ ) 时达到,局部极小值在  $x_i\approx\pm k\cdot\pi\sqrt{i},i=1,2,\cdots,n;k=0,1,2,\cdots,n$  时到达.

3.2 实验结果及分析

(1)Rosenbrock 函数:PSO 进化代数 为 1 000,种群规模为 20,维数 10,算法的实验次数为 20,MEP-SO 算法种群数为 5,每个种群的微粒个数为 20,仿真实验结果如表 1 及图 2 所示.

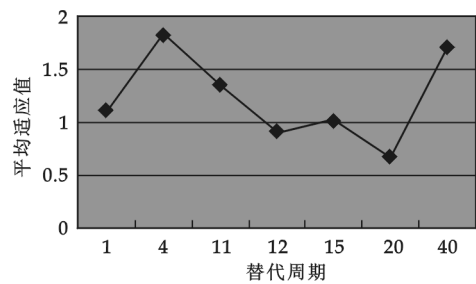


图 2 Rosenbrock 函数

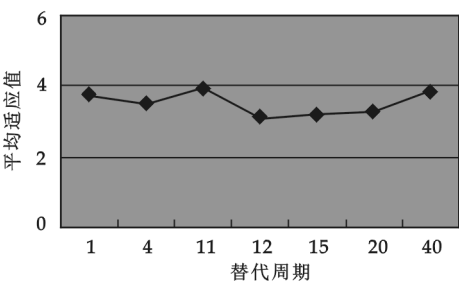


图 3 Rastrigin 函数

表 1 函数  $f_1$  的测试结果

函 数	替代周期	PSO	MEPSO
		平均适应值	平均适应值
$f_1$	1	25.580 373	1.114 711
$f_1$	4		1.833 779
$f_1$	11		1.350 116
$f_1$	12		0.904 199
$f_1$	15		1.017 371
$f_1$	20		0.660 146
$f_1$	40		1.705 823

表 2 函数  $f_2$  的测试结果

函 数	替代周期	PSO	MEPSO
		平均适应值	平均适应值
$f_2$	1	26.078 207	3.780 844
$f_2$	4	3.134 121	3.482 356
$f_2$	11		3.979 834
$f_2$	12		3.134 121
$f_2$	15		3.183 869
$f_2$	20		3.283 364
$f_2$	40		3.880 339

(2)Rastrigin 函数:PSO 进化代数 为 2 000,种群规模为 20,维数 20,算法的实验次数为 20,MEPSO 算法种群数为 5,每个种群的微粒个数为 20 ,仿真实验结果如表 2 及图 3 所示.

(3)Griewank 函数:PSO 进化代数 为 1 000,种群规模为 20,维数 20,算法的实验次数为 20,MEPSO 算法种群数为 5,每个种群的微粒个数为 20,仿真实验结果如表 3 及图 4 所示.

表 3 函数  $f_3$  的测试结果

函 数	替代周期	PSO	MEPSO
		平均适应值	平均适应值
$f_3$	1	0.186 731	0.097165
$f_3$	4		0.095 19
$f_3$	11		0.100 482
$f_3$	12		0.093 718
$f_3$	15		0.093 346
$f_3$	20		0.098 64
$f_3$	40		0.096 924

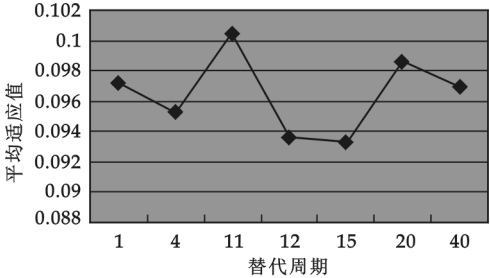


图 4 Griewank 函数

分析实验数据,对于  $f_1$  函数平均最好适应值有了大幅度的减小,即标准微粒群的平均最好适应值为 25.580 373,而使用 MEPSO 算法的平均最好适应值为 0.660 146,平均最好适应值改善了 39 倍左右.分析实验数据, $f_1$  函数的迭代替代周期数为 20 时,平均最好适应值达到最小, $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  函数的迭代替代周期数为 15 左右时平均最好适应值达到最小,这个测试函数当迭代周期数大于 15 时平均最好适应值有所增加,即 MEPSO 算法迭代替代周期增加到一定值  $y$ ,平均最好适应值达到最小,大于该迭代替代周期时平均最好适应值有所增加.图 2、图 3、图 4 的曲线表示迭代替代周期数为 12~15 时,曲线趋于稳定,其余范围有较大幅度变化,这是因为迭代替代周期较大时最好适应值不能得到及时的替代,影响算法的收敛性,因此迭代替代周期取合适值时能有效地改善算法的收敛性,取得较好的效果.

4 结束语

本文提出的多粒子群替代优化算法是一种改进的微粒群优化算法,它能较好地搜索到全局最优值.通过 3 个测试函数所做的仿真实验结果显示,该优化算法的优化效率明显比基本微粒群算法有所提高.进一步研究的方向是从理论上探讨该算法的优缺点和相应的改进措施,并研究如何把该算法运用到实际应用工程上,讨论该算法在实际应用中存在的各种问题.

参考文献

[1] Kennedy J,Eberhart R. Particle swarm optimization[A]. Proc of Int'l Conf on Neural Networks[C]. Piscataway:IEEE Press,1 995: 1942-1 948.  
[2] S. A. HAMDAN. Hybrid particle swarm optimiser using multi-neighborhood topologies[J]. Journal of Computer Science ,2008, (7):36-44.

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0116-05

# 基于 Matlab 的弹簧振子简谐振动研究

肖波齐

(三明学院物理与机电工程系, 福建 三明 365004)

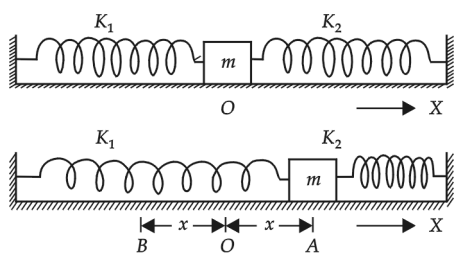
**摘要:**研究了弹簧振子的简谐振动并用 Matlab 处理实验数据,结果表明 Matlab 语言在曲线拟合方面有很大的优势,通过曲线拟合可以得到一条符合实验要求的光滑曲线,使得结果简便、直观,并精确验证了振子振动周期与振子质量呈线性关系,最后讨论并总结了简谐振动的特征.

**关键词:**Matlab; 弹簧振子; 简谐振动

**中图法分类号:**O32      **文献标识码:**A

## 0 引言

物理实验不仅可以检验物理理论的正确性,而且还可以总结出物理现象的规律性.而实验数据的正确处理,关系到是否能达到实验目的,得出正确的结论.大学物理实验的数据处理常用到列表法、作图法、最小二乘法、逐差法等.与作图法相比,最小二乘法是一种比较精确的曲线拟合方法,但由于最小二乘法计算量大且繁琐,采用传统的数据处理方法易造成大学生在作图纸上人工拟合曲线的主观随意性,导致由此所确定的特征值可能出现较大的误差,且没有建立起由这些点构成曲线的数学模型.随着科技的发展,计算机在处理实验数据中越来越显现出无与伦比的优势.相对其他高级语言,Matlab 语言具有简单、易读、易学的特点,仅需要简单语句便可实现对数据编辑、整理、统计分析以及图表的绘制,其数据处理能力、强大的扩展功能和操作的简易性为我们提供了广阔的应用空间<sup>[1,2]</sup>.本文以大学普通物理实验中的“简谐振动”为研究对象进行数据处理,利用 Matlab 语言内置函数和绘图命令语句绘制曲线并进行比较,计算偏差,验证周期公式,并将实验数据及计算结果通过 save 函数存储到数据库中,分析实用性.运用计算机可实现数据的快捷化处理,用精确的函数图形表示实验结果,提高实验效率和实验进度,整体优化教学直观性.



## 1 实验原理

如图 1 所示,在水平气轨上的滑块两端联接两根相同的弹簧,两弹簧的另一端分别固定在气轨的两端,取水平向右为  $X$  轴的正方向.两弹簧的倔强系数分别为  $K_1$  和  $K_2$ , $O$  点为平衡位置.当滑块在  $A$  位置时使弹簧变形  $x$ ,则左边弹簧被拉长,恢复力指向  $O$  点,大小为  $K_1x$ ,右边的弹簧被压缩,恢复力也指向  $O$  点,此时滑块受力为<sup>[3-5]</sup>:

图 1 弹簧的伸长与弹性恢复力实验

\* 稿日期:2009-09-19

作者简介:肖波齐(1980—),男,湖北省孝感市人,讲师,硕士,研究方向:大学物理实验及纳米流体性质

基金项目:福建省省属高校科研专项基金项目(JK2009039),三明学院服务海西建设重点工程项目(HX200804),三明学院科学发展基金项目(B0704/Q)

$$F=-(K_1+K_2)x$$

(1)

(1)式中负号说明力与位移反方向,令  $K=K_1+K_2$ ,则  $F=-KX$ .若不考虑振动过程中的阻尼,依据牛顿运动定律:

$$F=ma=md^2x/dt^2,md^2x/dt^2=-Kx$$

(2)

令  $K/m=\omega^2$ ,则:

$$d^2x/dt^2+\omega^2=0$$

(3)

该微分方程的解为:

$$x=A\cos(\omega t+\varphi)$$

(4)

(4)式中  $A$  为振幅,  $(\omega t+\varphi)$  为相位,  $\omega=\sqrt{K/m}$  为振动系统的固有频率. (4)式即为简谐振动的运动学方程,式中  $A$  和  $\varphi$  由振动的初始条件决定,即:

$$A=\sqrt{x_0^2+V_0^2/\omega_0^2},\quad \tan\varphi=-V_0^2/(\omega_0x_0)$$

(5)

从简谐振动的运动方程可知,每增加  $2\pi$  时,滑块的振动位相重复出现 1 次,将物体作简谐振动周而复始完全振动一次所需的时间称为振动的周期,则周期与圆频率的关系可以表示为:

$$T=2\pi/\omega=2\pi\sqrt{m/(K_1+K_2)},\omega=2\pi/T$$

(6)

2 振动周期  $T$  与振子质量  $m$  的关系及 Matlab 实验数据处理

在安装有 Matlab 6.5 的 Microsoft Windows XP Professional 操作系统中,打开 Matlab 6.5 程序,进行以下操作:(1)利用函数文件,选择在“File”下新建“M-file”,建立 average 函数用于计算矢量中单元的平均值,将文件存盘,缺省状态下自动存储为 average.m 的函数,以备后面数据处理时调用函数. (2)在“File”下新建“M-file”,为课题研究内容创建新任务,进行绘制图形曲线程序的编写与修改,同时选择“View”菜单下的“Dock command window”命令即可使 Matlab 的命令行窗口内嵌在 Matlab 的用户界面中,以便系统自动显示检测到程序编写时出现的函数名拼写、表达式书写或词法与文法的错误. (3)对生成的图形曲线进行命名,通过 save 函数将文件与图形保存于 Microsoft Access DataBase Toolbox 数据库. (4)通过“Edit”菜单下的“Copy Figure”命令,将图形窗口中的内容拷贝到应用的程序里.

计数器记录 10 个周期时间,根据周期公式  $T=2\pi\sqrt{m/K}$ ,以  $T_i^2$  为纵坐标,  $m_i$  为横坐标,利用最小二乘法和曲线拟合,借助 Matlab 语言内置函数编写程序,作  $T_i^2$ - $m_i$  图,观察  $T_i^2$  与  $m_i$  之间的关系是否为一直线,并求出斜率  $k=4\pi^2/K$ ,截距  $b=(4\pi^2/K)m_0$  ( $m_0$  为弹簧的有效质量).

(1)打开程序,新建一个 M-file 下编写“计算”实验数据的程序.用 Matlab 程序进行振子振动周期  $T$  与振子质量  $m$  测量数据的计算,计算结果如表 1 所示.

表 1 振子振动周期  $T$  与质量  $m$  的实验数据

$m/g$	20	40	60	80	100
$\bar{T}/\text{ms}$	8.646 2e+003	0.881 9e+004	9.139 8e+003	0.935 3e+004	0.968 2e+004
$T/\text{ms}$	864.618 8	0.881 9e+003	913.980 0	0.935 3e+003	0.968 2e+003
$T^2/(\text{ms})^2$	7.475 7e+005	7.777 5e+005	8.353 6e+005	8.747 9e+005	9.374 9e+005

$m/g$	120	140	160	180	200
$\bar{T}/\text{ms}$	0.995 0e+004	1.026 2e+004	1.047 6e+004	1.066 9e+004	1.095 3e+004
$T/\text{ms}$	0.995 0e+003	1.026 2e+003	1.047 6e+003	1.066 9e+003	1.095 3e+003
$T^2/(\text{ms})^2$	9.901 0e+005	1.053 1e+006	1.097 5e+006	1.138 3e+006	1.199 7e+006

(2)验证振动周期  $T^2$  随振子质量  $m$  变化是否呈线性关系.利用 Matlab 语言内置函数,实现振子周期  $T$  与质量  $m$  之间的关系的程序编写并进行一次线性拟合曲线,绘制  $T^2$ - $m$  实验曲线(如图 2 所示),并计算出劲度系数  $K$  与振子的有效质量  $m_0$  和标准偏差  $S_k$  与  $S_b$  及曲线拟合的程度  $\hat{r}$ .

考虑到简谐振动系统中的弹簧并不是无质量的理想弹簧,它的惯性质量可利用物理天平测量出来.根



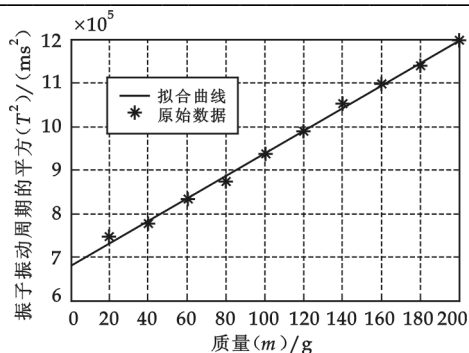


图 2 振子振动周期的平方  $T^2$  与质量  $m$  之间的关系曲线

质量  $m$  呈线性关系,符合(8)式.由最小二乘法,求得截距  $b$ ,即可求出弹簧的有效质量  $m_0$ ,与物理天平测量出的弹簧惯性质量  $m$  值相比,得出弹簧有效质量理论系数  $1/c = m/m_0 = 48.18/16.0780 = 2.9964$ ,说明弹簧振子系统中弹簧的惯性质量对小振动系统的简正周期(或简正频率)有影响,其振动的弹簧有效质量理论系数在误差允许的范围内与理论值相一致,其相对误差由  $\epsilon_r = (|x_{\text{实}} - a_{\text{理}}|/a_{\text{理}}) \times 100\%$  计算,结果如表 2 所示.

表 2 计算机计算结果与理论值的比较

	计算机计算结果	理论值	相对误差
劲度系数 $K/(\text{N/m})$	$1.540e+004$	$1.550e+004$	0.645 2
有效质量 $m_0/\text{g}$	16.078 0	16.060 0	0.112 1
弹簧的有效质量系数 $1/c$	2.996 4	3	0.120 0
拟合程度 $\hat{r}$	0.995 4	1	0.460 0

$m$  呈线性关系.

### 3 简谐振动的特征

根据(6)式可以求出简谐振动的圆频率  $\omega$ ,则可由已知振幅  $A$  为 20.0 cm,圆频率  $\omega = 7.6552 \text{ rad/s}$ ,利用 Matlab 语言内置函数,键入位移、速度、加速度函数,即  $x = A\cos(\omega t + \varphi)$ ,  $V(t) = -A\omega\sin(\omega t + \varphi)$ ,  $a(t) = -A\omega^2\cos(\omega t + \varphi)$ ,分别绘出简谐振动在初相位为两种情况( $\varphi = 0$  与  $\varphi = \pi/2$ )时的振动图像,如图 3、图 4 所示.

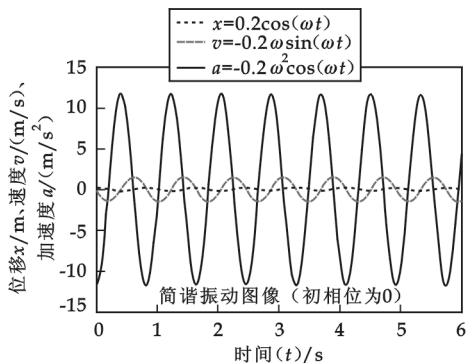


图 3  $\varphi = 0$  时的简谐振动图像

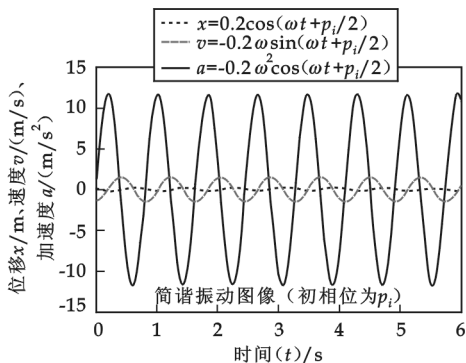


图 4  $\varphi = \pi/2$  时的简谐振动图像

由图 3、图 4 所示的简谐振动图像可以得到如下结论:

(1) 简谐振动是周期性运动,图像描述了作简谐运动的质点的位移、速度、加速度随时间变化的规律,但不是物体的运动轨迹.

据文献[6] 弹簧振子周期公式  $T = 2\pi\sqrt{(M+m/3)/K}$ ,其中  $m$  为弹簧的惯性质量,  $K$  为弹簧的倔强系数,  $M$  为振子的质量,当把弹簧惯性质量的  $1/3$  加到弹簧振子的质量上时,则可将弹簧振子视为理想的振动系统.令  $m = m_1 + m_0, m_2 + m_0, \dots, m_i + m_0$ ,其中  $m_i = m' + m''$  ( $m'$  为滑块质量,  $m''$  为砝码质量),则把(6)式中的  $T$  变为  $T^2$  形式:

$$T^2 = (4\pi^2/K)m_i + (4\pi^2/K)m_0 \quad (7)$$

令  $k = 4\pi^2/K, b = (4\pi^2/K)m_0$ , 则(7)式变为:

$$T^2 = km_i + b \quad (8)$$

如图 2 所示,在进行曲线拟合后,略去个别误差较大的点,拟合出一条较光滑的直线,显示振子的振动周期  $T^2$  与振子质量

从以上结果可见,Matlab 语言在实现实验曲线的拟合上占有很大的优势,通过一次曲线拟合,易寻得一条符合实验要求的光滑曲线,使得结果简便、直观,更精确地验证了振子振动周期  $T^2$  与质量

(2) 从振动图像直接得到振幅的大小,根据(4)式知道质点在任一时刻相对平衡位置的位移、速度、加速度的情况.当  $t=0$  时,物体位移为  $x_0$ ,速度为  $V_0=0$ ,表明物体恰处于最大位移,  $|x_0|$  即为振幅;若  $t=0$  时,物体在平衡位置,  $x_0=0$ ,而  $V_0$  不为 0,则  $A=|V_0/\omega_0|$ ,表明速度越大,振幅越大.

(3) 从振动图像的时间轴上可知振动一个周期所需的时间  $T$  的值,根据(6)式可知振子振动的圆频率  $\omega$  的值.

(4) 初相位  $\varphi=0$  时,简谐振动的速度比加速度相位落后  $\frac{\pi}{2}$ ,位移又比速度相位落后  $\frac{\pi}{2}$ ,据此分析得到加速度对时间的积累才获得速度,速度对时间的积累才获得位移.

(5) 弹簧振子在弹性力作用下运动,弹性力与加速度同相位.由振动图像即知质点在任一时刻的回复力和加速度的方向是同向的,总是指向平衡位置.

(6) 从振动图像可判断出质点在任一时刻的速度方向,其斜率为正值时速度为正,斜率为负值时速度为负.或让观察者站在坐标原点处沿着  $t$  轴正向去看,所看图形为上坡段对应的时刻质点向上振动,所看图形为下坡段对应时刻质点向下振动,即“上坡向上,下坡向下”.

(7) 弹簧振子的动能与势能分别为  $E_k=\frac{1}{2}KA^2\sin^2(\omega t+\varphi)$ ,  $E_p=\frac{1}{2}KA^2\cos^2(\omega t+\varphi)^{[7-9]}$ ,表示弹簧的动能和势能按余弦或正弦的平方随时间变化,在 Matlab 软件中绘制图形如图 5 所示,表示当初相位  $\varphi=0$  时动能和势能随时间变化的曲线.显然,动能最大时,势能最小;动能最小时,势能最大;振动的过程正是动能和势能相互转换的过程.简谐振动总能为  $E=\frac{1}{2}KA^2$ ,即弹簧振子的总能取决于劲度系数和振幅<sup>[7-9]</sup>,利用简谐运动图像可判断出某段时间内振动物体的速度、加速度、回复力大小变化及动能、势能的变化情况.

4 结束语

基于 Matlab 软件强大的计算功能,利用它处理和分析物理实验数据可以减少实验结果的误差影响及繁琐的数据计算步骤,它的图表功能使得根据实验目的绘制曲线变得简单易行,对简谐振动的实验结果用曲线表示可得到更为直观的效果,并可以从图形中掌握更全面以及简单明了的信息,直接由图像分析出各变量之间的变化关系,同时绘制多条曲线进行对比分析,区分异同点及存在的联系,加深对知识的理解性.本文用 Matlab 研究了弹簧振子简谐振动,通过研究发现 Matlab 语言在曲线拟合方面有很大的优势,通过曲线拟合容易得到一条符合实验要求的光滑曲线,使得结果简便、直观,并且精确验证了振子振动周期与振子质量呈线性关系,最后对简谐振动图像进行了讨论并总结了简谐振动的特征.

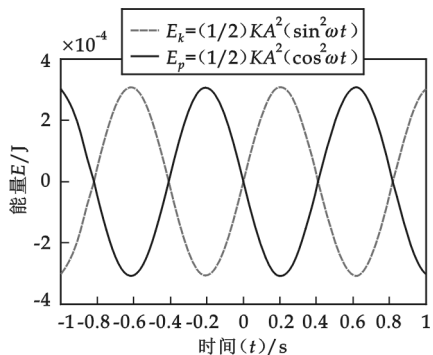


图 5 简谐振动的能量图像

参考文献

[1] 刘卫国. Matlab 程序设计与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2006.  
[2] 林雪松,周 婧. MATLAB7.0 应用集景[M]. 北京:机械工业出版社,2006:168-211.  
[3] 杨述武. 普通物理实验(1):力学及热学部分[M]. 北京:高等教育出版社,2000:119-124.  
[4] 黄建群,胡险峰,雍志华. 大学物理实验[M]. 成都:四川大学出版社,2005:89-94.  
[5] 王亚辉. 气轨上简谐振动测弹簧劲度系数[J]. 大学物理实验,2006,19(3):11-13.  
[6] 黄兆梁. 弹簧质量对振动的影响[J]. 大学物理,1998,17(3):12-16.  
[7] 田维钊. 简谐振动系统的能量表达式推导[J]. 遵义师范学院学报,2004,6(4):86-88.  
[8] 臧涛成. 弹簧系统能量计算[J]. 大学物理,2005,24(2):5-7.  
[9] 刘景竖. 竖直弹簧振子振动势能的初等解法[J]. 渤海大学学报,2005,26(3):271-273.

## RESEARCH ON SIMPLE HARMONIC VIBRATION FOR SPRING OSCILLATOR BASED ON MATLAB

XIAO Bo-qi

(Department of Physics and Electromechanical Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China)

**Abstract:** Simple harmonic vibration for spring oscillator is studied and experimental data is processed by using Matlab. It is found that there is a major advantage for curve fitting from research. It is easy to get a fitting experimental smooth curve by using curve fitting, which leads to a convenient and visual results. The linear relation of vibration period and mass of spring oscillator is verified precisely. The characteristic of simple harmonic vibration is discussed and summarized finally.

**Key words:** Matlab; spring oscillator; simple harmonic vibration

(上接第 115 页)

- [3] 夏桂梅, 曾建潮. 基于锦标赛选择遗传算法的随机微粒群算法, 计算机工程与应用, 2007, 43(4): 51-53, 84
- [4] 李荣钧, 常先英. 一种新的混合粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2009, (5): 1 700-1 704.
- [5] 李爱国. 多粒子群协同优化算法[J]. 复旦大学(自然科学版), 2004, 43(5): 923-925.
- [6] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[A]. Proc of Int'l Symposium on MicroMachine and Human Science[C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1 995: 39-43.
- [7] K. E. Parsopoulos, M. N. Vrahatis. Recent Approaches to Global Optimization Problems Through Particle Swarm Optimization [M]. Nature Computing Kluwer Academic Publishers, 2002: 235-306.
- [8] 周阳花, 黄 麟, 奚茂龙, 等. 随机选择最优个体的量子粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2009, (6): 1 554-1 558.
- [9] 曾建潮, 介 婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

## ONE REPLACEMENT OPTIMIZATION OF MULTI- PARTICLE SWARMS BASED ON THE SURVIVAL OF THE FITTEST

CHEN Jian-cheng<sup>1</sup>, TU Ang-yan<sup>2</sup>

(1. Dept. of Computer, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China; 2. Dept. of Computer, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** PSO algorithm is relatively a new optimization algorithm, it has been successfully used in many ptimization problems, but the algorithm is vulnerable to local extreme. One Replacement Optimization of Multi-Particle Swarms is proposed. Particle swarms are employed to search in the solution space independently that enhances the global searching ability. After each particle swarms evolutions, the worst particles are replaced by the other swarm's best particles. It makes the particle escaped from the premature convergence and improves the stability of the algorithm. Through testing and comparison with the three kinds of commonly used test functions, the results show that the average of the best fitness of the algorithm is lower than the standard PSO algorithm, it can rapidly converge to the global optimal solution, the optimization efficiency is increased significantly.

**Key words:** PSO; optimization; swarm intelligence; multi-particle swarms

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0121-04

单级倒立摆系统分析与设计

吕庆莉

(陕西中医学院基础课部, 陕西 咸阳 712046)

**摘要:**倒立摆系统以其自身的不稳定性为系统的平衡提出了难题,也因此成为自动控制实验中验证控制算法优劣的极好实验装置. 作者对倒立摆系统的非线性模型进行了线性化处理,通过利用全状态反馈和线性二次型最优控制两种方法对系统进行控制以满足设计指标,最后设计仿真实验软件平台以方便对比参数设置和系统性能之间的关系.

**关键词:**倒立摆; 全状态反馈; 线性二次型最优控制

**中图法分类号:**TP273      **文献标识码:**A

0 引言

倒立摆系统(Inverted Pendulum System)是一种广泛应用的物理模型<sup>[1-3]</sup>,由倒立摆控制理论所产生的方法和技术在半导体及精密仪器加工、机器人技术、导弹拦截控制系统、航空器对接控制技术等领域有着广阔的应用前景.

本文以单级倒立摆为控制对象,运用牛顿动力学方法为其建立数学模型,在此基础上对倒立摆的运动方程在设定点进行局部线性化,并在给定输入、输出和状态量的条件下推出其状态空间方程,接着分析了倒立摆系统的稳定性以及能控性和能观性,分别使用全状态反馈控制<sup>[4]</sup>和线性二次型最优控制方法<sup>[5]</sup>对其系统状态空间进行了综合,最后设计并实现了基于两种控制方法的单级倒立摆控制仿真实验软件平台.

1 倒立摆系统建模

惯性参考系下只有一个自由度的单级倒立摆的物理建模是容易的,如图 1 所示,一个带有摆杆的小车在平面上运动,构成了一个倒立摆系统,该系统受到重力、驱动力和摩擦阻力 3 个外力的共同作用,这里驱动力  $F$  是由连接小车的传动装置提供. 控制倒立摆的稳定实际上就是依靠控制驱动力  $F$  使小车在水平面上做与倒立摆运动相关的特定运动,系统的各个参量与给定赋值如表 1 所示.

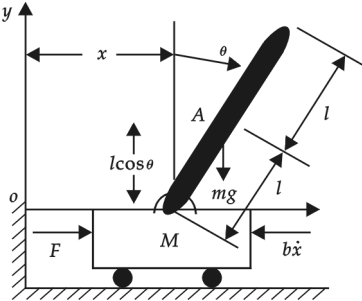


图 1 单级倒立摆系统

表 1 参量列表

参量	含义	大小
$M$	小车质量	0.5 kg
$m$	摆杆质量	0.5 kg
$b$	小车摩擦因数	0.1
$l$	摆杆长度的一半	0.3 m
$I$	摆杆的转动惯量	0.006 kg · m <sup>2</sup>
$F$	加在小车上的力	
$x$	小车的位置	
$\theta$	摆杆与垂直方向的夹角	

\* 收稿日期:2009-10-04  
作者简介:吕庆莉(1975—),女,山东省龙口市人,副教授,硕士,研究方向:计算机控制

运用牛顿动力学方法可得式(1):

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \\ (I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

## 2 系统状态空间方程的建立

考虑到摆杆在设定点  $\mu = 0$  附近做微小振动,对式(1)进行局部线性化<sup>[4]</sup>,即用  $\sin\theta = \theta$ ,  $\cos\theta = 1$ ,  $\dot{\theta}^2\theta = 0$  做近似处理后可得:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} = F \\ (I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\theta = -ml\ddot{x} \end{cases} \quad (2)$$

输入量  $u = F$ , 状态量  $s = [\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}]^T$ , 输出量  $y = [x, \theta]^T$ , 所以系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{s} = A \cdot s + B \cdot u \\ y = C \cdot s + D \cdot u \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mgl(M+m)}{MI + Mml^2 + mI} & 0 & 0 & \frac{bml}{MI + Mml^2 + mI} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{m^2gl^2}{MI + Mml^2 + mI} & 0 & 0 & \frac{-b(I + ml^2)}{MI + Mml^2 + mI} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-ml}{MI + mI + Mml^2} \\ 0 \\ \frac{I + ml^2}{MI + mI + Mml^2} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

带入表 1 的数据可得:  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 51.5789 & 0 & 0 & 0.5263 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -7.7368 & 0 & 0 & -0.1789 \end{bmatrix}; B = [0 \quad -5.2632 \quad 0 \quad 1.7895]^T.$

## 3 系统特性分析

由 A、B、C 和 D 阵可知系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\begin{bmatrix} 1.7895s^2 - 51.5789 \\ s^4 + 0.1789s^3 - 51.5789s^2 - 5.1579s \\ -5.2632s^2 \\ s^4 + 0.1789s^3 - 51.5789s^2 - 5.1579s \end{bmatrix}}{\quad} \quad (4)$$

系统矩阵 A 的特征值为:

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 7.1430 > 0, \lambda_3 = -7.2220, \lambda_4 = -0.0999$$

所以系统不稳定,系统的零极点如图 2 所示.

由于  $\text{rank}[B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B] = 4$ , 所以系统能控. 又由于  $\text{rank}[C \quad CA \quad CA^2 \quad CA^3]^T = 4$ , 所以系统能观.

## 4 系统的状态空间综合

由以上推导可知,系统的特征值有正实部,因而系统是不稳定的,所以在这里要设计状态反馈控制器使系统达到稳定并改善系统的性能. 具体的性能指标如表 2 所示.

表 2 系统的性能指标列表

系统参数	大小
对 $x$ 的过渡过程时间 $t_{sx}$	小于 5 s
对 $\theta$ 的过渡过程时间 $t_{s\theta}$	小于 5 s
$x$ 的上升时间 $t_{rx}$	小于 0.5 s
$\theta$ 的最大摆度 $h_\theta$	小于 0.35 rad

#### 4.1 全状态反馈控制设计

对于典型的二阶单输入单输出连续时间线性时不变系统<sup>[1]</sup>:

$$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dy}{dt} + y = u \quad (5)$$

其中,  $y$  为输出,  $u$  为输入,  $T$  为时间常数,  $\zeta$  为阻尼系数. 相应的系统特征方程根为一对共轭复数:

$$s_1, s_2 = -\frac{1}{T}\zeta \pm j \frac{1}{T}\sqrt{1-\zeta^2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (6)$$

对于式(6),通过相应推导,可导出其时间域性能指标和系统参数的显示关系:

超调量:  $\sigma = e^{-\xi\pi\sqrt{1-\xi^2}}$ ; 过渡过程时间:  $t_s \approx \frac{3-\ln\sqrt{1-\xi^2}}{\xi\omega_n}$ , 误差范围取为 5% 稳态值; 上升时间:  $t_r \approx \frac{1}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \left[ \pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right) \right]$ .

为满足表 2 的性能指标,现在设计  $\xi=0.3, \omega_n=7$ ,此时主导极点为:

$$s_1, s_2 = -2.1 \pm j6.6776 \quad (7)$$

其他极点设定为:

$$s_3, s_4 = -16.8 \pm j6.67757 \quad (8)$$

得到系统的特征方程:

$$D(s) = s^4 + 46.2s^3 + 7.1099 \times 10^2 s^2 + 4.0975 \times 10^3 s + 2.3794 \times 10^4 \quad (9)$$

对  $x$  和  $\theta$  的过渡过程时间为 1.451 0 s, 对  $x$  的上升时间为 0.280 9 s,  $\theta$  的最大摆度为 0.004 42, 全部符合性能指标要求.

改变极点后系统的阶跃响应如图 3 所示.

系统状态反馈增益矩阵为:

$$K = [-301.7337 \quad -35.7879 \quad -461.3105 \quad -79.5409]$$

状态反馈系统方程为:

$$\dot{s} = (A - BK)s + Bv \quad (10)$$

#### 4.2 线性二次型最优控制设计

线性二次最优调节器是针对原系统,寻找一状态反馈控制律,使得控制性能指标  $J$  达到最小:

$$J = \frac{1}{2} x^T(t_f) S x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t)] dt \quad (11)$$

其中  $Q$  为正半定对称矩阵,  $R$  为正定对称矩阵,  $Q, R$  分别表示了对状态变量和输入变量的加权值. 最优控制律为:  $K = R^{-1} B^T P$ , 其中  $P$  是如下 Riccati 方程的非负定对称解:

$$-\dot{P}(t) = P(t)A + A^T P(t) + Q - P(t)BR^{-1}B^T P(t) \quad (12)$$

在这里我们设计:

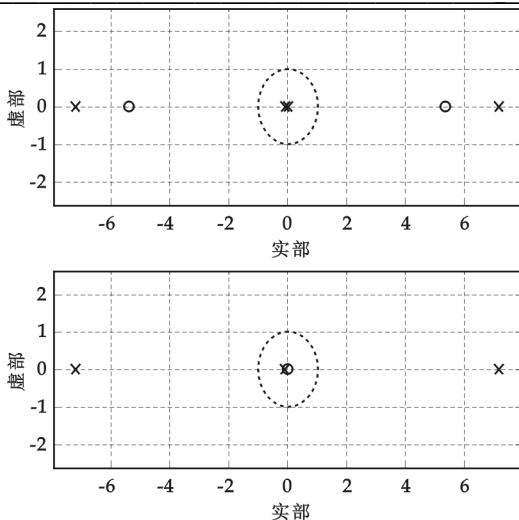


图 2 未加控制的系统零极点图

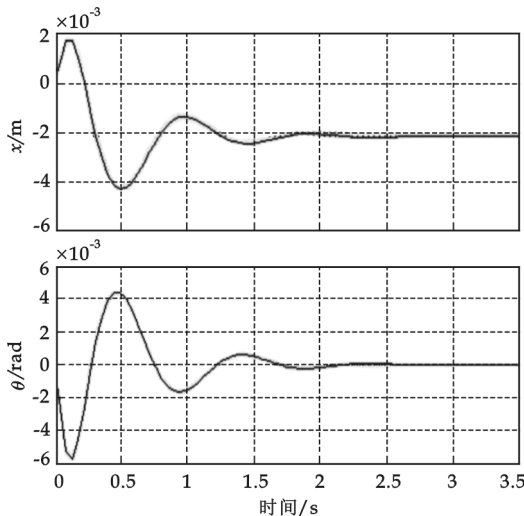


图 3 加入全状态反馈控制后系统的阶跃响应

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad R = 0.005$$

Matlab 中提供了专门的求解工具  $\text{lqr}()$  来求取  $K$ , 可得系统最优状态反馈增益阵为:  $K = [-94.3415 \quad -10.3448 \quad -10 \quad -13.2356]$ , 其性能指标满足表 2 要求。

## 5 单级倒立摆控制仿真实验平台的软件 GUI 实现

本仿真实验平台实现了对上述两种控制方法的性能测试, 通过不断进行参数调整可以直观地看到性能指标的变化, 方便我们进行系统综合。

表 2 所述的初始参数设置在实验平台的 GUI 实现如图 4 所示。

仿真实验平台通过选择“无控制状态”、“全状态反馈控制”、“线性二次型最优控制”3 种控制状态, 设置必要参数, 运行后显示系统的稳定性分析、能控能观性分析以及冲击响应、阶跃响应结果, 达到分析系统性能的目的。图 5 和图 6 分别是采用全状态反馈控制和线性二次型最优控制得到的系统性能显示。

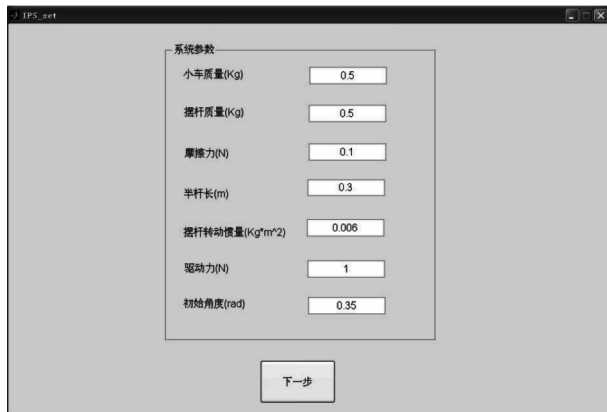


图 4 参数设置情况

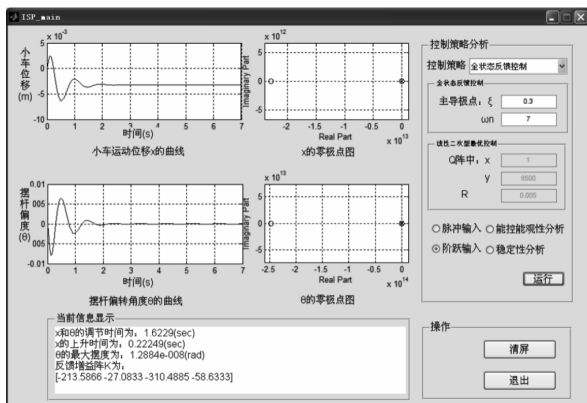


图 5 加入全状态反馈控制后的系统阶跃响应(主导极点的阻尼比 0.3, 无阻尼自然频率 7)

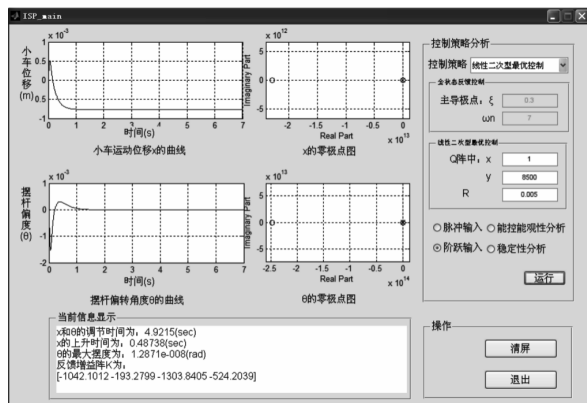


图 6 加入线性二次型最优控制后的系统阶跃响应

## 6 结束语

本文以单级倒立摆为控制对象, 在建立其数学模型的基础上推导出了系统的状态空间方程, 并对其进行了运动分析、能控能观性分析和稳定性分析。针对一组特定的性能指标, 对系统分别使用全状态反馈控制和线性二次型最优控制两种方法进行了仿真实验, 结果均达到了预定要求, 最后设计了仿真 GUI 界面, 以进一步调整适当的参数达到更好的应用效果。

## 参考文献

- [1] 刘 豹. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 郭钊侠, 方建安, 苗清影. 倒立摆系统及其智能控制研究[J]. 东华大学学报, 2003, 29(2): 122-126.



\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0125-04

# 基于 Galerkin 变分的渗流场有限元模型修正算法

卓 颖

(西北工业大学声学工程研究所, 陕西 西安 710072)

**摘 要:**首先用 Galerkin 变分法分析了地下水稳定渗流,推导出了二维渗流方程的 Galerkin 变分方程,编写了有限元通用程序,计算得到了水头函数场,在此基础上采用达西速度近似算法求解出节点的达西速度,并利用有限元解的下限性质求解出有限元方程的修正系数,修改原程序后计算得到最终水头函数场和达西速度分布.计算结果与算例解析解比较,其水头速度误差不超过 0.11%.

**关键词:**渗流场;有限元;修正系数

**中图分类号:**O241.82      **文献标识码:**A

## 0 引言

在环境保护、给水排水、水利、石油、地质、采矿等部门,渗流理论得到了广泛的应用,其中渗流方程的求解长期以来一直受到关注,求解手段也多种多样,有经典解析法、数值差分法、边界元法和有限元法.由于有限元方法具有边界适应能力强、程序通用性好以及计算精度高等优点,因此许多学者采用有限元方法来求解渗流方程<sup>[1-5]</sup>.文献[4]采用混合有限元法,文献[5]采用三角单元离散区域有限元法均获得了较好的模拟效果,但同时也遇到了若结果精度要求高、边界为复杂曲线以及用 Hermite 形状函数求解达西速度时剖分单元较多、计算量较大等问题,为此本文采用 Galerkin 变分法构造了二维稳定渗流方程的有限元方程,并利用形式简单的 Lagrange 等参元剖分区域,编写了二维稳定渗流方程有限元求解的修正程序,计算得到了几种稀疏网格剖分条件下的水头函数场分布,算例表明该程序具有很高的求解精度.

## 1 二维稳定地下水渗流方程

研究的渗流模型,假设满足以下条件:(1)通过渗流模型某一断面的流量与实际渗流通过该断面的真实流量相等;(2)渗流模型某一确定作用面上的渗流压力与实际渗流在该作用面上的真实压力相等;(3)渗流模型的阻力与真实渗流的阻力相等<sup>[6]</sup>.

设在渗流场中任取一点  $M$ ,它的渗流速度为  $u$ ,在 2 个坐标轴上的投影分别为  $u_x$  和  $u_y$ ,由渗流模型可知假设渗流区内的全部空间均被连续的水流充满则渗流的连续性和其他水流的连续性一样,故二维稳定地下水渗流连续性微分方程为

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}(T\frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T\frac{\partial H}{\partial y}) = f & (x,y) \in \pi \\ H(x,y) |_{\tau_1} = \bar{h} & (x,y) \in \tau_1 \\ \frac{\partial h}{\partial n} |_{\tau_2} = u_\tau & (x,y) \in \tau_2 \end{cases} \quad (1)$$

\* 收稿日期:2009-10-10

作者简介:卓 颖(1978—),女,陕西省西安市人,副教授,博士,研究方向:新型有限元方法与应用

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB724100),中国博士后基金项目(20070411141),国家自然科学基金项目(50805114)

其中  $T$  为导水系数,  $f$  为源函数,  $H$  为水头, 达西速度  $u_x = -T \frac{\partial H}{\partial x}$ ,  $u_y = -T \frac{\partial H}{\partial y}$ .

### 1.1 水头函数的有限元方程

令  $V^H$  为有限元子空间, 基函数系为  $|\varphi_i|, i=1, 2, \dots, NG$ , 则所求的水头函数近似解为:

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^{NG} \varphi_i h_i \quad (2)$$

式中  $h_i$  为节点上的水头函数值.

如果将这一近似解代入微分方程中必然得到一个残量  $\Delta H$  并且不为零:

$$\Delta H = L\bar{H} - f \neq 0 \quad (3)$$

为了使残量最小, Galerkin 法提出由残量  $\Delta H$  正交与基函数系得到有限元方程组:

$$\langle \Delta H, \varphi_i \rangle = 0, i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

上述方程组中对于某一个基函数, 相应的内积展开为:

$$\langle \Delta H, \varphi_i \rangle = \iint_{\pi} \varphi_i \operatorname{div}(\operatorname{grad} h) dx dy - \iint_{\pi} \varphi_i f dx dy = 0 \quad (5)$$

通过分步积分法, 利用 Gauss 积分变换得到:

$$\langle \Delta h, \varphi_i \rangle = h_j \left( - \iint_{R_{ij}} \operatorname{grad} \varphi_i \cdot \operatorname{grad} \varphi_j dx dy + \int_{\tau} u_{\tau} \varphi_i \vec{l} dl - \iint_{R_{ij}} f \varphi_i dx dy \right) = 0 \quad (6)$$

其中  $R_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  的影响区域的交集,  $R_{ij}$  是节点  $i$  的影响区域, 上述积分是在离散化之后的有限个小单元上进行的, 故可以采用高斯加权积分求得.

由于不同的  $i$  和  $j$  进行组合, 上式构成一个总刚度矩阵, 令

$$k_{ij} = \iint_{R_{ij}} \operatorname{grad} \varphi_i \cdot \operatorname{grad} \varphi_j dx dy + \int_{\tau} u_{\tau} \varphi_i \vec{l} dl \quad (7)$$

右端列阵

$$f_i = \iint_{R_{ij}} f \varphi_i dx dy \quad (8)$$

构成一个有限元代数方程组:

$$k_{ij} \cdot h_j = f_j \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

求解代数方程组(9), 得到每一个基函数所对应的系数  $h_i$ , 从而由式(2)求得水头函数的近似解.

### 1.2 有限元子空间的选择

由(6)式可知, 定解问题(5)有限元解的总刚度矩阵为:

$$k_{ij} = \iint_{\pi} \operatorname{grad} \varphi_i \cdot \operatorname{grad} \varphi_j dx dy = \sum_{R_{e_i} \in R_{ij}} \left( \iint_{R_{e_i}} \operatorname{grad} \varphi_i \cdot \operatorname{grad} \varphi_j + \int_{R_{e_i}} u_{\tau} \varphi_i \vec{l} dl \right) \quad (10)$$

其中  $\varphi_i, \varphi_j$  为选用单元的形状函数. 则

$$K_{N_i N_j}^{e_i} = \iint_{R_{e_i}} \operatorname{grad} \varphi_i \cdot \operatorname{grad} \varphi_j dx dy + \iint_{R_{e_i}} u_{\tau} \varphi_i \vec{l} dl \quad (11)$$

称为  $R_{e_i}$  的单元刚度矩阵, 而总刚度矩阵

$$k_{ij} = \sum_{R_{e_i} \in R_{ij}} K_{N_i N_j}^{e_i} \quad (12)$$

论文采用 Lagrange 型八节点等参元四边形元素建立有限元网格.

单元形状函数为:

$$\begin{cases} \psi_i(\zeta, \eta) = (1 + \zeta_i \zeta)(1 + \eta_i \eta)(\zeta_i \zeta + \eta_i \eta - 1)/4 & i=1, 2, 3, 4 \\ \psi_i(\zeta, \eta) = (1 - \zeta^2)(1 + \eta_i \eta)/2 & i=5, 7 \\ \psi_i(\zeta, \eta) = (1 - \eta^2)(1 + \zeta_i \zeta)/2 & i=6, 8 \end{cases} \quad (13)$$

其中  $(\zeta, \eta)$  为参数坐标, 它与直角坐标之间的关系为:

$$x = \sum_{i=1}^{NG} x_i \psi_i, \quad y = \sum_{i=1}^{NG} y_i \psi_i$$

(14)

$(\zeta, \eta_j)$  是 8 个节点的直角坐标,而与这 8 个节点对应的等数坐标值为  $(x, y)$ .

1.3 达西速度的近似算法

若各节点的水头函数值  $H_i$  已得,可以利用台劳公式近似求得:

$$\begin{cases} u_x(x_i, y_i) = \frac{H(x_{i+1}, y_{i+1}) - H(x_i, y_i)}{x_{i+1} - x_i} \\ u_y(x_i, y_i) = \frac{H(x_{i+1}, y_{i+1}) - H(x_i, y_i)}{y_{i+1} - y_i} \end{cases}$$

(15)

利用上式可以快速求出达西速度.

1.4 修正系数

由有限元解的下限性质<sup>[7]</sup>,设区域剖分为  $n$  个单元,节点  $\Delta$  上的水头函数值为  $h_n^\Delta$ ,令  $h_n^\Delta = (1 + \eta)^n h_1^\Delta$ ,  $\eta$  为修正系数,  $0 \leq \eta \leq 1$ ,得:

$$\eta = \left(\frac{h_n^\Delta}{h_1^\Delta}\right)^{1/n} - 1$$

(16)

将(16)式代入(9)式得修正有限元方程为:

$$(1 + \eta)^{-1} \cdot k_{ij} \cdot h_j = f_j$$

(17)

2 算例

考虑面积源补给情况,假设在区域  $\pi\{(x, y) \mid 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$  上入渗量的分布可以用函数  $2(x(1 - x) + y(1 - y))$  来表示,亦即在区域中心处  $(1/2, 1/2)$  补给量最大,越向边界入渗量越小,如果考虑均质承压含水层,则此问题可以用下面的定解问题来描述:

$$\begin{cases} -\Delta H = 2(x(1 - x) + y(1 - y)) & (x, y) \in \pi \\ H|_{\tau=0} & (x, y) \in \pi \end{cases}$$

此问题的解析解为  $H = xy(1 - x)(1 - y)$ .

把区域  $\pi$  等分成 6 个四边形 8 节点等参元,分别用解析解和修正有限元法求出水头计算结果,结果如表 1 所示.

从表 1 可以看出,水头最大绝对误差为 0.11%,与文献[4]结果相比水头函数计算精度有较大提高.该算例表明作者编制的有限元程序是完全可靠的,文献[4]的计算取 100 个单元 121 个节点且运算时间较长,而采用作者编制的程序只采用了 6 个单元 40 个节点且收敛速度快,这说明本文所采用的方法和程序结构紧凑且在复杂形状边界下利用稀疏网格也能保持较高的精度.

3 结束语

本文针对二维稳定渗流问题,基于渗流模型采用 Galerkin 变分法推导出了有限元方程,对复杂形状边界利用四边形 8 节点等参元剖分区编编制了通用的有限元修正程序,算例模拟证实了算法的可靠性.

表 1 计算结果

节 点	解析解 $\bar{H}_{ij}$	本方法解 $H_{ij}$	误差 $\bar{H}_{ij} - H_{ij}$
(1/6, 1/3)	0.031	0.032 08	0.001 1
(1/3, 1/3)	0.049	0.048 90	0.000 1
(1/3, 1/2)	0.056	0.056 93	0.000 1
(1/3, 2/3)	0.049	0.048 90	0.000 1
(1/3, 5/6)	0.031	0.032 08	0.001 1
(1/2, 1/3)	0.056	0.056 93	0.000 1
(1/2, 2/3)	0.056	0.056 93	0.000 1
(2/3, 1/6)	0.031	0.031 21	0.001 1
(2/3, 1/3)	0.049	0.048 90	0.000 1
(2/3, 1/2)	0.056	0.055 69	0.000 1
(2/3, 2/3)	0.049	0.048 90	0.000 1
(2/3, 5/6)	0.031	0.031 21	0.000 1

算例的边界是给定边界的水头函数值,若考虑边界上的水流速以及对于非稳定渗流问题的求解,则此方法有待进一步的研究。

### 参考文献

- [1] N. Coli, G. Pranzini. Evaluation of rock-mass permeability tensor and prediction of tunnel inflows by means of geostructural surveys and finite element seepage analysis[J]. Engineering Geology, 2008, 101: 174-184.
- [2] A. Arudainayagam, C. Vani. Wavelet-Galerkin method for integro-differential equations[J]. Applied Numerical Mathematics, 2000, 32: 247-254.
- [3] W. Dahmen. Wavelet methods for PDES, some recent developments[J]. Journal of Computational Applied Mathematics. 2001, 128: 133-185.
- [4] 谢春红, 张 勤. 稳定渗流的有限元计算新方法[J]. 水利学报, 1995, (12): 62-64.
- [5] 吕克璞. 地下水渗流问题及其有限元数值模拟[J]. 西北师范大学学报, 1998, (2): 57-59.
- [6] 闻德蓀. 工程流体力学(水力部分)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [7] 桂利川. 有限元近似解方法在流体机械内部流场计算中应用[J]. 工程热物理学报, 1987, (4): 41-44.

## IMPROVED FINITE ELEMENT METHOD BASE ON GALERKIN VARIATION AND IT'S APPLICATION IN SEEPAGE ANALYSIS

ZHUO Jie

(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** This paper describes how to solve a sort of 2-D seepage equation, based on Galerkin variation and improved finite element methods. The general form of algorithm is presented in details. In order to overcome the integral difficulty that the traditional finite element methods have, we propose coefficients matrix and a general format to Galerkin variation by employing improved parameters in finite element equations. An example of 2-D seepage field solution indicates that current method has desirable precision.

**Key words:** seepage; finite element method; improved parameter

(上接第 124 页)

- [3] 邢景虎, 陈其工, 江 明. 基于 LQR 的直线一级倒立摆最优控制系统研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007, (6): 3-5.
- [4] 丛 爽, 张冬军, 魏衡华. 单级倒立摆三种控制方法的对比研究 2001, 23(11): 47-49.
- [5] 易 杰. 基于状态反馈控制的倒立摆系统分析和设计[J]. 国外电子元器件, 2008, (8): 20-22.

## DESIGN AND ANALYSIS OF THE SINGLE INVERTED-PENDULUM SYSTEM

LV Qing-li

(Section of Basic Courses, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China)

**Abstract:** Inverted-pendulum system is difficult to control because its instability, it becomes the wonderful experiment device to verify how about the control strategy in automatic control experiments. This paper linearizes the single inverted-pendulum system, using the pole-placement method and the LQR method to meet the design specifications. Finally, we design a simulating experiment platform in order to better find the connection between parameter settings and system performance.

**Key words:** control system; pole-placement; LQR

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0129-04

# 一类具功能反应的食饵与捕食系统的极限环

彭 煜, 窦霁虹, 王新秀  
(西北大学数学系, 陕西 西安 710127)

**摘 要:**讨论了捕食者无密度制约,而食饵具有非线性密度制约的功能反应食饵-捕食者系统,利用微分方程定性理论分析了系统的正平衡点的性态,获得了系统解的有界性,得出了系统的极限环不存在的充分条件和极限环存在的充分条件.

**关键词:**功能反应; 非线性密度制约; 极限环

**中图法分类号:**O175.12 **文献标识码:**A

## 0 引言

对于具功能反应的食饵与捕食系统  $\dot{x} = xg(x) - y\varphi(x)$ ;  $\dot{y} = y(-\delta + k\varphi(x))$ , 其中  $\delta > 0, k > 0, g(x)$  表示食饵种群的相对增长率,  $\varphi(x)$  为 holling 型功能反应的函数, 许多文章已经研究了其极限环的存在性<sup>[1-5]</sup>. 本文受文献[5]的启发研究了功能反应函数为  $\varphi(x) = \frac{\alpha x^n}{1 + \beta x^n}$  (其中  $0 < n \leq 2, n$  为有理数) 的食饵-捕食系统, 即研究如下系统

$$\begin{cases} \dot{x} = x(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - y \frac{\alpha x^n}{1 + \beta x^n} \\ \dot{y} = (y - \delta + k \frac{\alpha x^n}{1 + \beta x^n}) \end{cases} \quad (1)$$

其中  $a, b, c, k, \alpha, \beta, \delta$  均为正常数,  $0 < n \leq 2, n$  为有理数. 由于模型的实际意义, 只需在  $G = \{(x, y) \mid x > 0, y > 0\}$  或  $\bar{G} = \{(x, y) \mid x \geq 0, y \geq 0\}$  内讨论系统(1)解的有界性、奇点的性态及极限环的存在性, 从而推广了文献[5]的结论.

作时间变换  $(1 + \beta x^n)d\tau = dt$ , 并仍以  $t$  记为  $\tau$ , 则系统(1)化为

$$\begin{cases} \dot{x} = x(1 + \beta x^n)(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - \alpha x^n y \\ \dot{y} = y[(k\alpha - \delta\beta)x^n - \delta] \end{cases} \quad (2)$$

令  $x = \bar{x}, \alpha y = \bar{y}, k\alpha - \delta\beta = \omega$ , 并仍以  $x, y$  记为  $\bar{x}, \bar{y}$ , 则系统(2)化为

$$\begin{cases} \dot{x} = x(1 + \beta x^n)(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - x^n y \triangleq X(x, y) \\ \dot{y} = y(\omega x^n - \delta) \triangleq Y(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

则系统(1), (2), (3)是等价的.

## 1 平衡点性态分析

分析系统(3), 很显然  $O(0, 0)$  是系统(3)的奇点, 设  $x_0 = \sqrt[n]{\frac{\delta}{\omega}}$ , 则  $y_0 =$

\* 收稿日期:2009-09-13

作者简介:彭 煜(1984—),女,陕西省丹凤县人,在读硕士生,研究方向:常微分方程定性理论与分支理论  
基金项目:西北大学研究生创新基金资助项目(08YZZ31)

$\frac{(1+\beta x_0^n)(a-cx_0-bx_0^2-e^{x_0}+1)}{x_0^{n-1}}$ , 则仅在  $\omega > 0$  且  $l = a - cx_0 - bx_0^2 - e^{x_0} + 1 > 0$  时系统(3)才有唯一正平衡点  $M_0(x_0, y_0)$ .

设  $H(x) = cx + bx^2 + e^x - (a+1)$ , 则  $H'(x) = c + 2bx + e^x > 0$  ( $x > 0$ ) 且  $H(0) = -a < 0$  而  $\lim_{x \rightarrow +\infty} H(x) = +\infty$ , 所以由介值定理知  $H(x)$  在  $(c_0, +\infty)$  上有唯一的正零点  $x_1$  (其中  $x_1$  是  $H(x) = cx + bx^2 + e^x - (a+1) = 0$  的解), 所以系统(3)有非正平衡点  $M_1(x_1, 0)$ .

**引理 1** (1) 当  $\omega \leq 0$  时, 系统(3)在  $\bar{G}$  上有两个奇点  $O(0, 0)$  和  $M_1(x_1, 0)$ .

(2) 当  $\omega > 0$  且  $l > 0$  时, 系统(3)在  $\bar{G}$  上有 3 个奇点  $O(0, 0)$ 、 $M_1(x_1, 0)$  和  $M_0(x_0, y_0)$ .

**引理 2** (1)  $O(0, 0)$  是系统(3)的鞍点.

(2) 当  $\omega \leq 0$  时,  $M_1(x_1, 0)$  是系统(3)的稳定结点.

(3) 当  $\omega > 0$  且  $l > 0$  时, ①  $x_1 > x_0$  时,  $M_1(x_1, 0)$  是系统(3)的鞍点. ②  $0 < x_1 < x_0$  时,  $M_1(x_1, 0)$  是系统(3)的稳定结点. ③  $x_1 = x_0$  时,  $M_1(x_1, 0)$  是系统(3)的鞍结点.

**证明** 系统(3)的 Jacobi 矩阵为

$$D(x, y) = \begin{pmatrix} f(x, y) & -x^n \\ n\omega x^{n-1}y & \omega x^n - \delta \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中  $f(x, y) = (1 + \beta x^n)(a - cx - bx^2 - e^x + 1) + n\beta x^n(a - cx - bx^2 - e^x + 1) + x(1 + \beta x^n)(-c - 2bx - e^x) - nx^{n-1}y$

将  $O(0, 0)$ 、 $M_1(x_1, 0)$  代入(4)式很容易得出引理 2(1)、(2)及(3)的①、②结论. 当  $x_1 = x_0$  时,  $\det(D(x, y)) = 0$ , 则  $M_1(x_1, 0)$  是系统(3)的高阶奇点.

为了判断奇点的类型作平移变换  $\bar{X} = x - x_0$ 、 $\bar{Y} = y$ , 仍以  $x, y$  记  $\bar{X}, \bar{Y}$ , 则系统(3)化为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax - By + p_1(x, y) \triangleq Q(y, x) \\ \dot{y} = y(\omega x^n + \omega n x^{n-1}x_0 + \cdots + \omega n x) \triangleq p(y, x) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $A = a + 1 - 2cx_0 - 3bx_0^2 + \beta(a+1)(n+1)x_0^n - c\beta(n+2)x_0^{n+1} - b\beta(n+3)x_0^{n+2}$ ,  $B = x_0^n = \frac{\delta}{\omega}$ ,  $p_1(x, y) = Q(y, x) - Ax - By$ , 系统(3)的奇点由  $(x_0, 0)$  平移到  $(0, 0)$  把  $x, y$  互换, 则系统(4)转化为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ay - Bx + p_1(y, x) \triangleq (x, y) \\ \dot{y} = x[\omega y^n + \omega n y^{n-1}x_0 + \cdots + \omega y] \triangleq P(x, y) \end{cases}$$

其中  $(0, 0)$  是 Lyapunov 奇点.

利用文献[6]的方法, 令  $y = h(x) = m_1x + O(x^2)$ , 由  $Q(x, h(x)) = 0$  可知  $m_1 = \frac{B}{A}$ , 将其代入  $p(x, h(x)) = \omega x[m_1x + O(x^2)] = \omega m_1x^2 + O(x^3)$ , 由此可看出  $m = 2, g = \omega m_1$ , 所以  $M_1(x_1, 0)$  是鞍结点. 由此就证明了引理 2 中(3)的③成立.

**引理 3** 令  $h = (n-1)(a+1) - (n-2)cx_0 - (n-3)bx_0^2 - (a\beta + \beta)x_0^n + 2c\beta x_0^{n+1} + 3b\beta x_0^{n+2} + e^{x_0}[x_0 + \beta x_0^n + \beta x_0^{n+1} - (n-1)]$

则当  $\omega > 0$  且  $l > 0$  时, (1)  $h > 0$  ( $< 0$ ) 时,  $M_0(x_0, y_0)$  是稳定(不稳定)的焦点或结点. (2)  $h = 0$  时,  $M_0(x_0, y_0)$  是中心型平衡点.

**证明** 将  $M_0(x_0, y_0)$  代入(4)式可知  $\text{tr}(D(x, y)) = h, \det(D(x, y)) = n\omega x_0^{2n-1}y_0 > 0$ , 所以引理的结论成立.

## 2 主要结论

**定理 1** 系统(1)满足  $(x(0), y(0)) \in G = \{(x, y) \mid x > 0, y > 0\}$  的解是有界的.

**证明** 因为直线  $x = 0$  和  $y = 0$  是系统(1)的解, 由解的唯一性知, 系统(1)的所有满足正初始条件的解不超出  $G = \{(x, y) \mid x > 0, y > 0\}$ .

首先证明  $x(t)$  的有界性, 分两种情形加以讨论:

情形(1): 当  $x(0) < x_1$  时, 对于任意的  $t \geq 0$ , 总有  $x(t) < x_1$ .

事实上,如果结论不成立,则  $\exists t_0 > 0$  使得  $x(t_0) = x_1$ , 即当  $t \in [0, t_0]$  时, 有  $x(t) < x_1$ . 由系统(1) 的第一个方程有  $\frac{dx}{dt} \Big|_{t=t_0} < 0$ , 所以  $\exists \epsilon > 0$ , 当  $t \in \cup (t_0, \epsilon)$  时, 有  $\frac{dx}{dt} < 0$ , 取  $\epsilon$  充分小, 当  $0 < t_0 - \epsilon < t < t_0$  时, 有  $x(t) > x(t_0) > x_1$  矛盾.

情形(2): 当  $x(0) \geq x_1, x(t) \geq x_1$  时, 有  $\frac{dx}{dt} < 0, x(t)$  是单调递减的, 所以  $x(t) < x(0)$  对任意的  $t \geq 0$  成立, 因而  $x(t)$  有界.

再证  $y(t)$  的有界性, 令  $m(t) = kx(t) + y(t)$ , 则对任意的  $t \geq 0$  有

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= k \frac{dx(t)}{dt} + \frac{dy(t)}{dt} = k[x(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - \frac{\alpha x^n y}{1 + \beta x^n}] + y(-\delta + k \frac{\alpha x^n}{1 + \beta x^n}) \\ &= kx(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - \delta y \\ &= kx(a - cx - bx^2 - e^x + 1) + \delta kx - \delta(y + kx) \\ &\leq \eta - \delta(y + kx) = \eta - \delta m(t) \end{aligned}$$

所以  $m(t) \leq |\delta x(0) + y(0)| \leq M$ . 由此可知:  $y(t)$  有界, 因此系统(1) 满足  $(x(0), y(0)) \in G = \{(x, y) \mid x > 0, y > 0\}$  的解是有界的.

**定理 2** 当  $\omega \leq 0$  时, 则系统无极限环,  $M_1(x_1, 0)$  是全局渐近稳定的结点.

**证明** 从系统(3) 可以看出直线  $x=0$  和  $y=0$  是系统(3) 的轨线, 而在  $\omega \leq 0$  时, 系统(3) 在  $\bar{G}$  上只有两个奇点  $O(0, 0)$  和  $M_1(x_1, 0)$ , 易知这两个奇点的外围不可能存在闭轨线, 否则此轨线必与直线  $x=0$  和  $y=0$  相交, 这与轨线的不相交性矛盾. 由文献[7] 可知, 若不存在极限环时, 系统的奇点是全局渐近稳定的, 因此,  $M_1(X_1, 0)$  是全局渐近稳定的结点.

定理 2 的生物意义: 当系统的参数满足  $\omega \leq 0$  时, 捕食者种群将濒临灭绝, 而食饵种群数量最终趋于稳定.

**定理 3** 当  $\omega > 0, l > 0$  且  $h > 0, x_1 > x_0$  时,  $M_0(x_0, y_0)$  是全局渐近稳定的.

**证明** 从(4)式可知, 特征方程为

$$\lambda^2 + p\lambda + q = 0 \tag{6}$$

其中

$$\begin{aligned} p &= (n-1)(a+1) - (n-2)cx_0 - (n-3)bx_0^2 - (a\beta + \beta)x_0^n + 2c\beta x_0^{n+1} + 3b\beta x_0^{n+2} \\ &\quad + e^{x_0}[x_0 + \beta x_0^n + \beta x_0^{n+1} - (n-1)] = h \\ q &= n\omega x_0^{2n-1} y_0 \end{aligned}$$

要保证  $M_0(x_0, y_0)$  渐近稳定, 则(6) 式的特征根均有负实部, 即  $p > 0$  且  $q > 0$ , 而  $p = h > 0, q = n\omega x_0^{2n-1} y_0 > 0$ , 在定理 3 的条件下, 由引理 2 知  $O(0, 0), M_1(x_1, 0)$  均为鞍点,  $M_0(x_0, y_0)$  是第一象限内唯一的全球吸引子, 则  $M_0(x_0, y_0)$  是全局渐近稳定的奇点.

定理 3 的生物意义: 当参数  $\omega > 0, l > 0$  且  $h > 0, x_1 > x_0$  时, 食饵与捕食者种群长期稳定共存, 种群数量最终分别趋于各自的平衡点  $x_0$  和  $y_0$ , 均不会灭绝.

**定理 4** 当满足下列条件

- (1)  $\omega > 0$  且  $l > 0, h \geq 0$  时,
- (2)  $0 < n \leq 2, n$  为有理数, 且  $a\beta + \beta - r\beta < 0$ ,

其中

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{n\omega x_0^{n-1}} [(n-2)c + 2(n-3)bx_0 + n(a\beta + \beta)x_0^{n-1} - 2(n+1)c\beta x_0^n - 3(n+2)b\beta x_0^{n+1} \\ &\quad - e^{x_0}(x_0 + n\beta x_0^{n-1} + (n+2)\beta x_0^n + \beta x_0^{n+1} - (n-2))] \end{aligned}$$

成立时, 系统(3) 在  $\bar{G}$  内不存在极限环.

**证明** 取 Dulac 函数  $B(x, y) = x^{-n}y^{-r-1}, D = \frac{\partial BX}{\partial x} + \frac{\partial BY}{\partial y} = -y^{-r-1}x^{-n}[(n-1)(1 + \beta x^n)(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - n\beta x^n(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - (1 + \beta x^n)(-cx - 2bx^2 - e^x x) + r(\omega x^n - \delta)] = -y^{-r-1}x^{-n}[(n-1)(a+1) - (n-2)cx - (n-3)bx^2 - (a\beta + \beta)x^n + 2c\beta x^{n+1} + 3b\beta x^{n+2} + e^x(x + \beta x^n + \beta x^{n+1} - (n-1)) + r(\omega x^n - \delta)] \stackrel{\Delta}{=} B(x, y)\phi(x).$

注意到  $\phi(x_0) = h > 0$ , 而  $\phi'(x) = -(n-2)c - 2(n-3)bx - n(a\beta + \beta)x^{n-1} + 2(n+1)c\beta x^n + 3(n+1)$



2)  $b\beta x^{n+1} + e^x(x + n\beta x^{n-1} + (n+2)\beta x^n + \beta x^{n+1} - (n-2)) + nr\omega x^{n-1}$ , 则  $\phi'(x_0) = 0$ , 所以当  $x > x_0$  时,  $\phi'(x) > 0$ ; 当  $0 < x < x_0$  时,  $\phi'(x) < 0$ .

所以当  $x > 0$  时,  $\phi(x) > \phi(x_0) = h > 0$ , 则  $D \leq 0$ , 于是定理得证.

**定理 5** 当  $\omega > 0, l > 0$  且  $h > 0, x_1 > x_0$  时,  $M_0(x_0, y_0)$  的外围至少存在一稳定的极限环.

**证明** 作直线  $L_1 = x - x_1 = 0$  和直线  $L_2 = y + \omega x - s = 0$ ,  $\frac{dL_1}{dt}|_{L_1=0} = -x_1^n y < 0, (y > 0)$ ,

$\frac{dL_2}{dt}|_{L_2=0} = y(\omega x^n - \delta) + \omega x(1 + \beta x^n)(a - cx - bx^2 - e^x + 1) - \omega x^n y = -\delta(s - \omega x) + \omega x(1 + \beta x^n)(a - cx - bx^2 - e^x + 1)$ .

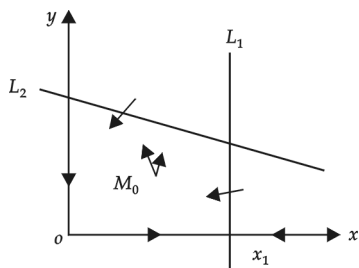


图 1 庞加莱环域图

由于  $0 < x < x_1$ , 所以只要  $s$  充分大, 则有  $\frac{dL_2}{dt}|_{L_2=0} < 0$ , 而直线  $x = 0$  和  $y = 0$  是系统 (3) 的轨线, 这样直线  $x = 0$  和  $y = 0, L_1 L_2$  构成外境界线 (如图 1 所示), 而在定理 5 的条件下,  $M_0(x_0, y_0)$  是不稳定的平衡点, 根据 Bendixson 环域定理, 定理得证.

### 3 结束语

本文主要研究了一类具一般型的功能反应函数系统的解的有界性、奇点的性态以及极限环的存在性. 由定理 1、定理 2 和定理 5 可知, 我们可以根据实际的策略使得两种群的数量保持稳定, 从而达到生态平衡. 与文献 [1]~[5] 相比, 本文的研究更为全面.

### 参考文献

- [1] 程荣福, 蔡淑云. 一个具功能反应的微分生态系统的定性分析[J]. 东北师范大学学报, 2005, 37(1): 11-15.
- [2] 邱树林, 吴承强, 陈江彬. 具有非线性密度制约的 Holling II 类功能反应的食饵与捕食者模型的定性分析[J]. 福州大学学报, 2006, 34(1): 14-18.
- [3] 王晓琴, 王玉萍. 一类具功能反应的食饵-捕食系统的定性分析[J]. 陕西科技大学学报, 2006, 24(5): 124-128.
- [4] Wang Yu-quan, Ma Jun-ying. Qualitative analysis on a class of predator-prey model with Holling III function response[J]. 生物数学学报, 2004, 19(4): 395-402.
- [5] 匡奕群, 邱梅青. 一类具 Holling II 型功能反应的捕食者-食饵系统的极限环[J]. 周口师范学院学报, 2004, 21(5): 21-23.
- [6] 罗定军, 张祥, 董梅芳, 等. 动力系统的定性理论与分支理论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 247-253.
- [7] Kar K T, Pahari J K. Non-selective harvesting in prey-predator models with delay[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2006, 11: 499-509.
- [8] 张芷芬, 丁同仁, 黄文灶, 等. 微分方程定性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 258-300.
- [9] 何德明, 窦雯虹, 彭书新. 一类生物捕食系统在参数变化下的定性分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 177-180.

## LIMIT CYCLES OF SYSTEM FOR PREDATOR-PREY WITH FUNCTION RESPONSE

PENG Yu, DOU Ji-hong, WANG Xin-xiu

(Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** In this paper, we consider a system for predator-prey of function response with nonlinear density dependent for prey and predator without density dependent, by using the qualitative theory of ordinary equations, the quality of the equilibrium point for the system is analysed and the boundary of the solutions, the sufficient conditions of nonexistence, existence of a limit cycle of the system are obtained.

**Key words:** function response; onlinear density dependent; imit cycle

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0133-04

# 一类新的极小惯量任意符号模式矩阵

王 鹏, 梅银珍  
(中北大学数学系, 山西 太原 030051)

**摘 要:**如果一个惯量任意符号模式的任意非零元被零取代后所得到的符号模式不是惯量任意的, 那么这个惯量任意符号模式称为极小惯量任意符号模式. 作者利用有固定惯量矩阵的特征多项式系数的一些性质对一类低价的惯量任意模式的极小性进行了讨论, 并证明该模式是极小惯量任意符号模式.

**关键词:**符号模式; 惯量任意; 极小惯量任意

**中图法分类号:**O157.5      **文献标识码:**A

符号模式矩阵(Sign pattern matrix)是指元素取自集合 $\{+, -, 0\}$ 或 $\{1, -1, 0\}$ 的矩阵, 简称为符号模式(Sign pattern). 用 $Q_n$ 表示全体 $n$ 阶符号模式所组成的集合, 对任意 $S \in Q_n$ , 所有与 $S$ 有相同符号模式的实矩阵组成的集合

$$\{A \in M_n(R) \mid \text{sign}(a_{ij}) = s_{ij}, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$$

称为由 $S$ 所决定的定性矩阵类, 记为 $Q(S)$ . 如果对于任意一个满足 $n_1 + n_2 + n_3 = n$ 的非负三元整数组 $(n_1, n_2, n_3)$ , 都存在一个实矩阵 $M \in Q(S)$ , 使得 $i(M) = (n_1, n_2, n_3)$ , 则称符号模式 $S$ 是惯量任意的, 记为 $IAP$ . 如果 $S$ 中的一个或多个非零元被零替换后所得到的模式不是 $IAP$ , 则称符号模式 $S$ 是极小惯量任意符号模式(Minimal Inertially Arbitrary Pattern), 记为 $MIAP$ . 设

$$S_{2k+1} = \begin{bmatrix} - & - & - & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ + & + & + & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & - & - & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & - & 0 & 0 & - & \cdots & \cdots & \cdots \\ - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & - & - \\ 0 & - & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & - \\ - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

文献[1]中, 作者证明了 $S_{2k+1} (k \geq 2)$ 是惯量任意符号模式矩阵并证明了 $S_5, S_7$ 是极小惯量任意符号模式矩阵, 最后猜想 $S_{2k+1} (k \geq 4)$ 也是极小惯量任意符号模式矩阵, 本文论证了 $k=5$ 时是正确的.

设 $A$ 是 $n$ 阶矩阵,  $p_A(x) = x^n + r_1x^{n-1} + r_2x^{n-2} + \cdots + r_{n-1}x + r_n$ 是 $A$ 的特征多项式, 由根与系数的关系显然有如下性质:

- 性质 1** 令 $A$ 是一个 $n \times n$ 矩阵, 若 $i(A) = (0, n, 0)$ , 那么当 $j = 1, \dots, n$ 时, 有 $r_j > 0$ .
- 引理 2**<sup>[1]</sup>: 当 $k \geq 2$ 时, 符号模式 $\phi_{2k+1}$ 不是蕴含幂零的.
- 下面我们来验证 $\phi_{11}$ 的极小性. 给出下面的定理:
- 定理** 符号模式 $S_{11}$ 是 $MIAP$ .
- 证明** 设 $A \in Q(S_{11})$ , 令:

\* 收稿日期:2009-08-24  
作者简介:王 鹏(1977—), 男, 山西省太原市人, 讲师, 在读博士生, 研究方向:计算数学

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -b_1 & -d_1 & & & & & & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & -c_3 & -d_3 & & & & & & \\ 0 & -b_4 & & 0 & -c_4 & 0 & & & & & \\ -a_5 & 0 & & & 0 & -c_5 & -d_5 & & & & \\ 0 & -b_6 & & & & 0 & -c_6 & 0 & & & \\ -a_7 & 0 & & & & & 0 & -c_7 & -d_7 & & \\ 0 & -b_8 & & & & & & 0 & -c_8 & 0 & \\ -a_9 & 0 & & & & & & & 0 & -c_9 & -d_9 \\ 0 & -b_{10} & & & & & & & & 0 & -c_{10} \\ -a_{11} & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

这里  $a_j, b_j, c_j, d_j$  是正的.

经过计算得到

$$\begin{aligned} r_1 &= a_1 - b_2 \\ r_2 &= a_2 b_1 - b_2 a_1 \\ r_3 &= a_5 d_1 d_3 - b_4 c_2 c_3 \\ r_{11} &= a_{11} (b_1 c_2 - d_1 b_2) \prod_{i=3}^{10} c_i \end{aligned}$$

讨论:

[a]  $a_1$  和  $b_2$  都不能为零, 否则  $\mathbf{A}$  的积或负或正, 则  $\mathbf{A}$  取不到惯量  $(0, 0, 11)$ .

[b]  $a_{11}, c_i (i=3, \dots, 10)$  均不为零, 否则  $r_{11}$  为零, 则  $\mathbf{A}$  取不到惯量  $(0, 11, 0)$ .

[c]  $a_2$  不能取零, 否则  $r_2 < 0$ , 则由引理 2(b)  $\mathbf{A}$  取不到惯量  $(11, 0, 0)$ .

[d]  $d_1$  不为零, 否则  $r_{11} < 0$ , 则  $\mathbf{A}$  不能取到惯量  $(0, 0, 11)$ .

[e]  $b_1, c_2$  均不为零, 否则  $r_{11} > 0$ , 则  $\mathbf{A}$  不能取到惯量  $(0, 0, 11)$ .

[f]  $a_5$  和  $d_3$  不能取到零, 否则  $r_3 \leq 0$ , 则  $\mathbf{A}$  不能取到惯量  $(0, 11, 0)$ ;  $b_4$  也不能为零, 否则  $r_3 > 0$ ,  $\mathbf{A}$  不能取到惯量  $(11, 0, 0)$ .

由以上讨论可知  $b_1 c_i \neq 0 (i=2, \dots, 10)$ , 故由正对角相似下矩阵的特征值不变的性质, 不妨设

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -1 & -d_1 & & & & & & & & \\ a_2 & b_2 & 1 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -d_3 & & & & & & \\ 0 & -b_4 & & 0 & -1 & 0 & & & & & \\ -a_5 & 0 & & & 0 & -1 & -d_5 & & & & \\ 0 & -b_6 & & & & 0 & -1 & 0 & & & \\ -a_7 & 0 & & & & & 0 & -1 & -d_7 & & \\ 0 & -b_8 & & & & & & 0 & -1 & 0 & \\ -a_9 & 0 & & & & & & & 0 & -1 & -d_9 \\ 0 & -b_{10} & & & & & & & & 0 & -1 \\ -a_{11} & 0 & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

下证  $b_{10}, a_9, d_9, b_8, d_7, a_7, b_6, d_5 \neq 0$ . 否则若  $b_{10}, a_9, d_9, b_8, d_7, a_7, b_6, d_5 = 0$ , 此时  $\mathbf{A} = \mathbf{U}$  且  $\mathbf{U}$  是惯量任意的, 则  $(0, 10, 1) \in I(\mathbf{U})$ , 即  $\mathbf{U}$  由零度 1, 所以由引理 2 的证明可知  $\mathbf{U}$  的元素必是以下 3 种情形之一:

(i)  $a_2 = a_1 + a_{11}, b_2 = 1, d_1 = 1$ ; (ii)  $a_2 = a_1 - a_{11}, b_2 = 1, d_1 = 1$ ; (iii)  $a_2 = a_1, b_2 = 1, d_1 = 1$ . 而此时由性质 1 得  $r_j > 0, j=1, \dots, 10$ . 对于 (ii) 的情形, 有  $r_2 = -a_{10} < 0$ , 对于 (iii) 的情形, 有  $r_2 = 0$ , 矛盾, 故  $\mathbf{U}$  一定是如情形 (i) 的矩阵. 下面分情况讨论.

[1] 若  $b_{10} = 0$ , 则  $r_{10} = -a_{11} < 0$ , 矛盾, 即取不到  $(0, 10, 1)$ , 故  $b_{10} \neq 0$ .

[2] 若  $a_9 = 0$ , 则由

$$r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0$$

$$r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_5 - d_7) + a_{11}d_9 - b_{10} > 0$$

$$r_8 = a_{11}(b_{10} - 1)(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_5 + d_7) + b_8a_{11} > 0$$

可得

$$r_7 = -a_{11}(b_{10} - 1)d_3d_5d_7 + (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) - b_8a_{11}(d_3 + d_5) - b_8$$

$$\stackrel{r_8 > 0}{<} a_{11}(b_{10} - 1)(d_3^2d_5 + d_3^2d_7 + d_3d_5^2 + d_3^2d_7 + d_3d_5d_7) - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3^2 + d_3d_5 + d_5^2) - b_8$$

$$\stackrel{r_9 > 0}{<} -a_{11}(b_{10} - 1)(d_3^3 + d_5^3 + d_3^2d_5 + d_3d_5^2) - b_8 < 0$$

矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $a_9 \neq 0$ .

[3] 若 $d_9 = 0$ ,则由 $r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0$ 可得 $r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_5 - d_7) - b_{10} < 0$ 矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $d_9 \neq 0$ .

[4] 若 $b_8 = 0$ ,则由

$$r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0$$

$$r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_5 - d_7) + a_{11}d_9 - b_{10} > 0$$

可得

$$r_8 = a_{11}(b_{10} - 1)(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_5 + d_7) - a_9$$

$$\stackrel{r_9 > 0}{<} -a_{11}(b_{10} - 1)(d_3^2 + d_3d_5 + d_3d_7 + 2d_5d_7 + d_7^2) - a_9 < 0$$

矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $b_8 \neq 0$ .

[5] 若 $d_7 = 0$ ,则由

$$r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0$$

$$r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_5) + a_{11}d_9 - b_{10} > 0$$

$$r_8 = a_{11}(b_{10} - 1)d_3d_5 - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_5) + b_8a_{11} - a_9 > 0$$

可得

$$r_7 = (a_{11}d_9 - b_{10})d_3d_5 + (a_9 - b_8a_{11})(d_3 + d_5) - b_8$$

$$\stackrel{r_8 > 0}{<} a_{11}(b_{10} - 1)d_3d_5(d_3 + d_5) + d_3d_5(a_{11}d_9 - b_{10}) - (d_3 + d_5)^2(a_{11}d_9 - b_{10}) - b_8$$

$$\stackrel{r_9 > 0}{<} -a_{11}(b_{10} - 1)(d_3^3 + d_3^2d_5 + d_3d_5^2 + d_5^3) - b_8 < 0$$

矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $d_7 \neq 0$ .

[6] 若 $a_7 = 0$ ,则由

$$r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0$$

$$r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_5 - d_7) + a_{11}d_9 - b_{10} > 0$$

$$r_8 = a_{11}(b_{10} - 1)(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_5 + d_7) + b_8a_{11} - a_9 > 0$$

$$r_7 = -a_{11}d_3d_5d_7(b_{10} - 1) + (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) + (d_3 + d_5)(a_9 - b_8a_{11}) + d_7a_9 - b_8 > 0$$

$$r_6 = -d_3d_5d_7(a_{11}d_9 - b_{10}) - d_3d_5(a_9 - b_8a_{11}) - (d_3 + d_5)(d_7a_9 - b_8) + a_{11}b_6 > 0$$

可得

$$r_5 = d_3d_5(d_7a_9 - b_8) - a_{11}d_3b_6 - b_6$$

$$\stackrel{r_6 > 0}{<} d_3^2(b_8 - d_7a_9) + d_3^2d_5(a_{11}b_8 - a_9) - d_3^2d_5d_7(a_{11}d_9 - b_{10}) - b_6$$

$$\stackrel{r_7 > 0}{<} d_3^3[-a_{11}(b_{10} - 1)d_5d_7 + (a_{11}d_9 - b_{10})(d_5 + d_7) - (a_{11}b_8 - a_9)] - b_6$$

$$\stackrel{r_8 > 0}{<} d_3^4[a_{11}(b_{10} - 1)d_5 - (a_{11}d_9 - b_{10})] - b_6$$

$$\stackrel{r_9 > 0}{<} -a_{11}(b_{10} - 1)d_3^4(d_3 + d_7) - b_6 < 0$$

矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $a_7 \neq 0$ .

[7] 若 $b_6 = 0$ ,则由

$$r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0, r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_5 - d_7) + a_{11}d_9 - b_{10} > 0$$

$$r_8 = a_{11}(b_{10} - 1)(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_5 + d_7) + b_8a_{11} - a_9 > 0$$

$$r_7 = -a_{11}d_3d_5d_7(b_{10} - 1) + (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7) + (d_3 + d_5)(a_9 - b_8a_{11}) + d_7a_9 - b_8 > 0$$

可得

$$r_6 = d_3d_5(b_8a_{11} - a_9) - (a_{11}d_9 - b_{10})d_3d_5d_7 + (d_3 + d_5)(b_8 - d_7a_9) - a_7$$

$$\stackrel{r_7 > 0}{<} d_5^2[-a_{11}(b_{10} - 1)d_3d_7 + (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_7) - (a_{11}b_8 - a_9)] - a_7$$

$$\stackrel{r_8 > 0}{<} d_5^2[-a_{11}d_3d_7(b_{10} - 1) - d_5(a_{11}d_9 - b_{10}) + a_{11}(b_{10} - 1)(d_3d_5 + d_3d_7 + d_5d_7)] - a_7$$

$$\stackrel{r_9 > 0}{<} -a_{11}d_5^4(b_{10} - 1) - a_7 < 0$$

矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $b_6 \neq 0$ .

[8] 若 $d_5 = 0$ ,则由

$$r_{10} = a_{11}(b_{10} - 1) > 0, r_9 = a_{11}(b_{10} - 1)(-d_3 - d_7) + a_{11}d_9 - b_{10} > 0$$

$$r_8 = a_{11}(b_{10} - 1)d_3d_7 - (a_{11}d_9 - b_{10})(d_3 + d_7) + b_8a_{11} - a_9 > 0$$

$$r_7 = (a_{11}d_9 - b_{10})d_3d_7 + d_3(a_9 - b_8a_{11}) + d_7a_9 - b_8 > 0$$

$$r_6 = d_3(b_8 - d_7a_9) + a_{11}b_6 - a_7 > 0$$

可得 $r_5 = -d_3(a_{11}b_6 - a_7) - b_6 < 0$ ,矛盾,即取不到 $(0, 10, 1)$ ,故 $d_5 \neq 0$ .

综上所述,我们可以证得 $S_{11}$ 是极小惯量任意符号模式(MIAP).

## 参考文献

- [1] In-Jac Kim, D. D. Olesky, P. van den Driessche. Inertially arbitrary sign patterns with no nilpotent realization[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2007, 421: 264-283.
- [2] T. Britz, J. J. McDonald, D. D. Olesky, *et al.* Minimal spectrally arbitrary sign patterns[J]. SIAM J. Matrix Anal. Appl, 2004, 26: 257-271.
- [3] M. S. Cavers, I. -J. Kim, B. L. Shader, *et al.* On determining minimal spectrally arbitrary patterns[J]. Electronic Journal of Linear Algebra, 2005, 13: 240-248.
- [4] M. S. Cavers, K. N. Vander Meulen. Spectrally and inertially arbitrary sign patterns[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2005, 394: 53-72.
- [5] Y. Gao, Y. Shao. Inertially arbitrary patterns[J]. Linear Multilinear Algebra, 2001, 49: 161-168.

## SOME NEW MINIMALLY INERTIALLY ARBITRARY SIGN PATTERNS

WANG Peng, MEI Yin-zhen

(Dept. of Mathematics, North China University, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A sign pattern  $S$  is minimally inertially arbitrary if it is inertially arbitrary but is not inertially arbitrary if any nonzero entry (or entries) of  $S$  is replaced by zero. The paper considers a class of matrix of the lower order and prove it is minimally inertially arbitrary by means of the known properties of the coefficients of the characteristic polynomial of an arbitrary matrix.

**Key words:** sign pattern; inertia arbitrary; minimally inertially arbitrary

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0137-06

# Banach 空间中的 1 阶 Bessel 列的扰动

王秋芬<sup>1</sup>, 曹怀信<sup>1</sup>, 武海辉<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学数学与信息科学学院, 陕西 西安 710062; 2. 西北大学数学系, 陕西 西安 710127)

**摘 要:**用算子论的方法讨论了 Banach 空间中的  $p(1 \leq p \leq \infty)$  阶 Bessel 列, 研究了  $p(1 < p < \infty)$  阶 Bessel 列扰动成  $q$  阶  $\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q}\right)$  Bessel 列的条件, 并给出了 1 阶 Bessel 列扰动成 1 阶和  $\infty$  阶 Bessel 列的充分条件, 从而得到了一些有趣的结果.

**关键词:**1 阶 Bessel 列; Banach 空间; 扰动

**中图法分类号:**O177.1

**文献标识码:**A

## 0 引言

框架是小波分析的一个重要概念, Bessel 列是框架概念的推广. 文献[1]在空间  $L^2(R)$  中引入了 Bessel 列的概念; 文献[2]将这些方法和概念拓展到 Banach 空间  $L^p = L^p(R^s)$  中; 文献[3]在一般的 Hilbert 空间  $H$  中引入并研究了 Bessel 列、框架、Riesz 基, 给出了它们的一系列等价刻画; 文献[4]、[5]研究了  $L^2(R)$  中的 Weyl-Heisenberg 系; 文献[6]研究了一般 Banach 空间中的  $\infty$  阶 Bessel 列, 文献[7]研究了 Banach 空间中的 1 阶 Bessel 列. 本文在前人的基础上研究了 Banach 空间中的  $p(1 < p < \infty)$  阶 Bessel 列扰动成  $q$  阶 Bessel 列的条件, 继续讨论了 1 阶 Bessel 列扰动成 1 阶和  $\infty$  阶 Bessel 列的条件, 得到了一些有趣的结果.

全文将采用以下记号:  $\mathbf{F}$  表示复数域  $\mathbf{C}$  或实数域  $\mathbf{R}$ ;  $X, Y$  表示定义在数域  $\mathbf{F}$  上的 Banach 空间,  $X^*$  为其对偶空间;  $I$  表示自然数集  $\mathbf{N}$  或正整数集  $\mathbf{Z}$ ,  $F(I)$  表示  $I$  的所有有限子集之集.

$$S_X(I) = \left\{ \{f_n\}_{n \in I} : f_n \in X (\forall n \in I) \right\}$$

$p, q$  为一对共轭指数, 即满足  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1 (1 < p < \infty)$ ;  $l^p = l^p(I)$  表示数  $\mathbf{F}$  域中的  $p (1 < p < \infty)$  次可和序列构成的空间.  $l^p_i(X)$  表示 Banach 空间  $X$  中的所有  $p$  次可和的序列  $\{f_i\}_{i \in I}$  构成的 Banach 空间, 其中  $1 < p < \infty$ , 且  $\|f\|_{l^p_i(X)} = \left( \sum_{i \in I} \|f_i\|^p \right)^{1/p}, \forall f = \{f_i\}_{i \in I} \in l^p_i(X)$ .

$B(X, Y)$  表示  $X$  到  $Y$  中的所有有界线性算子构成的 Banach 空间,  $B(X) = B(X, X)$ .

**定义 0.1** 设  $f = \{f_i\}_{i \in I} \in S_X(I)$ , 若存在正常数  $M_f$  使得  $\forall x^* \in X^*$ , 都有

$$\sum_{i \in I} |\langle x^*, f_i \rangle|^p \leq M_f \|x^*\|^p$$

则称  $f = \{f_i\}_{i \in I}$  为  $X$  中的  $p (1 \leq p < \infty)$  阶 Bessel 列.

**定义 0.2** 设  $f = \{f_i\}_{i \in I} \in S_X(I)$ , 若存在正常数  $M_f$  使得  $\forall x^* \in X^*$ , 都有

$$\sup_{i \in I} |\langle x^*, f_i \rangle| \leq M_f \|x^*\|$$

则称  $f = \{f_i\}_{i \in I}$  为  $X$  中的  $\infty$  阶 Bessel 列.

用  $B_X^p(I)$  表示  $X$  中所有以指标集  $I$  标号的  $p (1 \leq p \leq \infty)$  阶 Bessel 列之集. 对任意的  $f = \{f_i\}_{i \in I}$ ,

\* 收稿日期:2009-09-28

作者简介:王秋芬(1983—),女,河南省焦作市人,在读硕士生,研究方向:算子理论与小波分析

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10571113, 10871224)

$g = \{g_i\}_{i \in I} \in B_X^p(I) \ (1 \leq p \leq \infty), \forall \alpha, \beta \in F$  定义

$$\alpha f + \beta g = \{\alpha f_i + \beta g_i\}_{i \in I}, 0 = \{0, 0, \dots, 0, \dots\}$$

$$\|f\|_p = \sup_{\|x^*\| \leq 1} \left( \sum_{n \in I} |\langle x^*, f_i \rangle|^p \right)^{1/p} \ (1 \leq p \leq \infty), \|f\|_\infty = \sup_{\|x^*\| \leq 1} \sup_{i \in I} |\langle x^*, f_i \rangle|$$

显然,  $\|f\|_p \leq (M_f)^{\frac{1}{p}}$ . 易证上述运算下,  $B_X^p(I) \ (1 \leq p \leq \infty)$  为  $X$  上的一个向量空间, 且  $\|\cdot\|_p \ (1 \leq p \leq \infty)$  成为  $B_X^p(I) \ (1 \leq p \leq \infty)$  上的一个范数, 从而  $(B_X^p(I), \|\cdot\|)$  为数域  $F$  上的赋范线性空间.  $\forall f = (f_i)_{i \in I} \in B_X^p(I)$ , 定义算子

$$T_f: X^* \rightarrow l^p, x^* \mapsto \{\langle x^*, f_i \rangle\}_{i \in I}$$

则  $T_f \in B(X^*, l^p)$  且  $\|T_f\| = \|f\|_p$ , 称  $T_f$  为  $p \ (1 \leq p \leq \infty)$  阶的 Bessel 算子.

**命题 0.1**<sup>[6]</sup>  $B_X^\infty(I)$  为 Banach 空间.

**命题 0.2**<sup>[7]</sup>  $B_X^1(I)$  为 Banach 空间.

## 1 扰动定理

**引理 1.1** 设  $\alpha = \{\alpha_j\}_{j=1}^\infty \in S_F(N), 1 < q < \infty, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ , 则以下等价:

(1) 对任一  $f = \{f_j\}_{j=1}^\infty \in B_X^q(N)$ , 级数  $\sum_{j=1}^\infty \alpha_j f_j$  收敛;

(2)  $\alpha = \{\alpha_j\}_{j=1}^\infty \in l_N^p(F)$ .

**证明** (1)  $\Rightarrow$  (2): 设 (1) 成立. 定义  $T_n: B_X^q(N) \rightarrow X$  为

$$T_n f = \sum_{j=1}^n \alpha_j f_j, \forall f = \{f_j\}_{j=1}^\infty \in B_X^q(N)$$

则  $T_n$  是线性的.  $\exists x^* \in X^*$ , 且  $\|x^*\| = 1$ , 使得

$$\begin{aligned} \|T_n f\| &= \langle x^*, \sum_{j=1}^n \alpha_j f_j \rangle = \left| \sum_{j=1}^n \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle \right| \\ &\leq \left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left( \sum_{j=1}^\infty |\langle x^*, f_j \rangle|^q \right)^{\frac{1}{q}} \\ &\leq \left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \|f\|_q \end{aligned}$$

可见  $T_n \in B(B_X^q(N), X) \ (n=1, 2, \dots)$ .  $\forall f \in B_X^q(N)$ , 由级数  $\sum_{j=1}^\infty \alpha_j f_j$  收敛知,  $\{T_n f\}_{n=1}^\infty$  收敛. 由 Banach Steinhaus 定理知,  $\exists T \in B(B_X^q(N), X)$  使得  $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n f = T f$  且  $M := \sup_{n \geq 1} \|T_n\| < \infty, \forall z \in F$ , 设  $\text{sgn} z$

$= \begin{cases} \frac{|z|}{z}, z \neq 0 \\ 0, z = 0 \end{cases}$ , 令  $\lambda_j = \text{sgn} \alpha_j \cdot |\alpha_j|^{p-1}$ . 任取  $e \in X, \|e\| = 1, f_j = \begin{cases} \lambda_j e, 1 \leq j \leq n \\ 0, j > n \end{cases}$ , 令  $f = \{f_j\}_{j=1}^\infty$ , 则  $f \in B_X^q(N)$  且  $\forall x^* \in X^*$  有

$$\begin{aligned} \|f\|_q &= \sup_{\|x^*\| \leq 1} \left( \sum_{j=1}^n |\langle x^*, f_j \rangle|^q \right)^{1/q} = \sup_{\|x^*\| \leq 1} \left( \sum_{j=1}^n |\lambda_j|^q |\langle x^*, e \rangle|^q \right)^{1/q} \\ &= \sup_{\|x^*\| \leq 1} \left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p |\langle x^*, e \rangle|^q \right)^{1/q} = \left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \right)^{1/q} \end{aligned}$$

从而,  $\|f\|_q = \left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \right)^{1/q}$ .  $\forall x^* \in X^*, \|x^*\| = 1$ , 有

$$\begin{aligned} \|T_n f\| &\geq |\langle x^*, T_n f \rangle| = \left| \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot \lambda_j \langle x^*, e \rangle \right| = |\langle x^*, e \rangle| \cdot \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \\ \|T_n f\| &\leq \|T_n\| \cdot \|f\|_q \leq M \cdot \|f\|_q = M \cdot \left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \right)^{1/q} \end{aligned}$$

可见,  $\left( \sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p \right)^{1/p} \cdot |\langle x^*, e \rangle| \leq M, \forall x^* \in X^*, \|x^*\| = 1$ , 对  $x^*$  取上确界得:



$$\left(\sum_{j=1}^n |\alpha_j|^p\right)^{1/p} \leq M \quad (n=1, 2, \dots)$$

因此,  $\{\alpha_j\}_{j=1}^\infty \in l_N^p(\mathbf{F})$  且  $\|\alpha\|_{l_N^p(\mathbf{F})} \leq M = \sup_{n \geq 1} \|T_n\|$ .

(2)  $\Rightarrow$  (1): 设 (2) 成立.  $\forall f \in B_X^q(\mathbf{N}), \forall m > n \geq 1$ , 取  $x^* \in X^*, \|x^*\| = 1$ , 使得:

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{j=n}^m \alpha_j f_j \right\| &= \left| \langle x^*, \sum_{j=n}^m \alpha_j f_j \rangle \right| = \left| \sum_{j=n}^m \alpha_j \langle x^*, f_j \rangle \right| \\ &\leq \left( \sum_{j=n}^m |\alpha_j|^p \right)^{1/p} \left( \sum_{j=n}^m |\langle x^*, f_j \rangle|^q \right)^{1/q} \\ &\leq \left( \sum_{j=n}^m |\alpha_j|^p \right)^{1/p} \cdot \|f\|_q \rightarrow 0 \quad (m, n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

可见,  $\sum_{j=1}^\infty \alpha_j f_j$  收敛. 证毕.

下面给出 Banach 空间中的  $p$  阶 Bessel 列扰动成  $q$  阶 Bessel 列的条件.

**定理 1.1** 设  $\beta_i = \{\alpha_j^{(i)}\}_{j=1}^\infty \in S_F(\mathbf{N}), \forall i \in \mathbf{N}, 1 < q < \infty, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ , 如果

$$\sum_{i=1}^\infty \sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}|^q < \infty \quad (1.1)$$

则

(1)  $\forall f = \{f_j\}_{j=1}^\infty \in B_X^q(\mathbf{N})$ , 级数

$$g_i = \sum_{j=1}^\infty \alpha_j^{(i)} f_j \quad (\forall i = 1, 2, \dots) \quad (1.2)$$

收敛, 且  $g = \{g_i\}_{i=1}^\infty \in B_X^q(\mathbf{N})$ ;

(2)  $Af = g$  定义的算子  $A: B_X^p(\mathbf{N}) \rightarrow B_X^q(\mathbf{N})$  是有界线性的, 且  $\|A\| \leq \left\| \{\|\beta_i\|_q^q\}_{i=1}^\infty \right\|_1^{1/q}$ .

**证明** (1) 设  $f = \{f_i\}_{i=1}^\infty \in B_X^p(\mathbf{N})$ , 则由 (1.1) 知  $\sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}|^q$  收敛, 从而根据引理 1.1 知级数 (1.2)

收敛. 因为  $\forall x^* \in X^*, \sum_{j=1}^\infty |\langle x^*, f_j \rangle|^p \leq \|f\|_p^p \|x^*\|^p$ , 所以,  $\forall x^* \in X^*$  有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^\infty |\langle x^*, g_i \rangle|^q &= \sum_{i=1}^\infty |\langle x^*, \sum_{j=1}^\infty \alpha_j^{(i)} f_j \rangle|^q = \sum_{i=1}^\infty \left| \sum_{j=1}^\infty \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle \right|^q \\ &\leq \sum_{i=1}^\infty \left( \sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}| |\langle x^*, f_j \rangle| \right)^q \leq \sum_{i=1}^\infty \left( \sum_{j=1}^\infty |\langle x^*, f_j \rangle|^p \right)^{\frac{q}{p}} \left( \sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}|^q \right) \\ &\leq \|f\|_p^q \cdot \sum_{i=1}^\infty \left( \sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}|^q \right) \cdot \|x^*\|^q \end{aligned}$$

由条件 (1.1) 知  $g \in B_X^q(\mathbf{N})$ , 且

$$\|g\|_q \leq \left( \sum_{i=1}^\infty \left( \sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}|^q \right) \right)^{1/q} \|f\|_p \leq \left\| \{\|\beta_i\|_q^q\}_{i=1}^\infty \right\|_1^{1/q} \|f\|_p \quad (1.3)$$

(2) 由结论 (1) 知: 算子  $A: B_X^p(\mathbf{N}) \rightarrow B_X^q(\mathbf{N})$  定义合理. 显然,  $A$  是线性的. 根据 (1.3) 可知  $A: B_X^p(\mathbf{N}) \rightarrow B_X^q(\mathbf{N})$  是有界的, 且  $\|A\| \leq \left\| \{\|\beta_i\|_q^q\}_{i=1}^\infty \right\|_1^{1/q}$ . 证毕.

下面我们来讨论 1 阶和  $\infty$  阶 Bessel 列的扰动.

**定理 1.2** 设  $\beta_i = \{\alpha_j^{(i)}\}_{j=1}^\infty \in S_F(\mathbf{N}), \forall i \in \mathbf{N}$ , 如果

$$M_1 = \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{j \in \mathbf{N}} |\alpha_j^{(i)}| < \infty \quad (1.4)$$

则:

(1)  $\forall f = \{f_j\}_{j=1}^\infty \in B_X^1(\mathbf{N})$ , 级数

$$g_i = \sum_{j=1}^\infty \alpha_j^{(i)} f_j \quad (\forall i = 1, 2, \dots) \quad (1.5)$$

收敛, 且  $g = \{g_i\}_{i=1}^{\infty} \in B_X^1(N)$ ;

(2)  $Af = g$  定义的算子  $A: B_X^1(N) \rightarrow B_X^1(N)$  是有界线性的, 且  $\|A\| \leq M_1$ .

**证明** (1) 先证级数收敛.  $\forall f \in B_X^1(N), \forall m > n \geq 1$ , 取  $x^* \in X^*$  且  $\|x^*\| = 1$ , 则  $\forall i \geq 1$ .

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} f_j \right\| &= |\langle x^*, \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \left| \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle \right| \\ &\leq \left( \sup_{n \leq j \leq m} |\alpha_j^{(i)}| \right) \cdot \left( \sum_{j=n}^m |\langle x^*, f_j \rangle| \right) \\ &\leq \left( \sup_{n \leq j \leq m} |\alpha_j^{(i)}| \right) \cdot \|f\|_1 \rightarrow 0 \quad (m, n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

可见,  $\forall i \geq 1, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j$  收敛. 因为  $\forall x^* \in X^*, \sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, f_j \rangle| \leq \|f\|_1 \cdot \|x^*\|$ , 所以,  $\forall x^* \in X^*$ , 有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\infty} |\langle x^*, g_i \rangle| &= \sum_{i=1}^{\infty} |\langle x^*, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \sum_{i=1}^{\infty} \left| \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle \right| \\ &\leq \sum_{i=1}^{\infty} \left( \sum_{j=1}^{\infty} |\alpha_j^{(i)}| |\langle x^*, f_j \rangle| \right) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \left( \sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, f_j \rangle| \right) \cdot \left( \sup_{j \in \mathbb{N}} |\alpha_j^{(i)}| \right) \\ &\leq \left( \sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, f_j \rangle| \right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \left( \sup_{j \in \mathbb{N}} |\alpha_j^{(i)}| \right) \leq \|f\|_1 \cdot M_1 \cdot \|x^*\| \end{aligned}$$

由条件(1.4)知  $g \in B_X^1(N)$  且

$$\|g\|_1 \leq M_1 \cdot \|f\|_1 \quad (1.6)$$

(2) 由结论(1)知: 算子  $A: B_X^1(N) \rightarrow B_X^1(N)$  定义合理. 显然,  $A$  是线性的. 根据(1.6)可知  $A: B_X^1(N) \rightarrow B_X^1(N)$  是有界的, 且  $\|A\| \leq M_1$ . 证毕.

**例 1.1** 取  $\alpha_j^{(i)} = \frac{1}{i^2 j^2} (\forall i, j \in \mathbb{N})$ , 再取单位向量  $e \in X$ . 易见,  $f = \{f_j\}_{j=1}^{\infty} = \{j^{-2} e\}_{j=1}^{\infty} \in B_X^1(N)$ ,

级数  $g_i = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j (\forall i = 1, 2, \dots)$  收敛. 因为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\infty} |\langle x^*, g_i \rangle| &= \sum_{i=1}^{\infty} |\langle x^*, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{i^2 j^2} \langle x^*, f_j \rangle \right| \leq \sum_{i=1}^{\infty} \left( \sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, \frac{1}{j^2} e \rangle| \right) \cdot \left( \sup_{j \in \mathbb{N}} \frac{1}{i^2 j^2} \right) \\ &\leq \left( \sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, \frac{1}{j^2} e \rangle| \right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \left( \sup_{j \in \mathbb{N}} \frac{1}{i^2 j^2} \right) \leq \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cdot \|x^*\| \end{aligned}$$

可见  $g \in B_X^1(N)$ .

**定理 1.3** 设  $\beta_i = \{\alpha_j^{(i)}\}_{j=1}^{\infty} \in S_F(N), \forall i \in \mathbb{N}$ , 如果

$$M_2 = \sup_{i \in \mathbb{N}} \sup_{j \in \mathbb{N}} |\alpha_j^{(i)}| < \infty \quad (1.7)$$

且  $\forall i \geq 1, \lim_{j \rightarrow \infty} \alpha_j^{(i)} = 0$ , 则

(1)  $\forall f = \{f_j\}_{j=1}^{\infty} \in B_X^1(N)$ , 级数

$$g_i = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \quad (\forall i = 1, 2, \dots) \quad (1.8)$$

收敛, 且  $g = \{g_i\}_{i=1}^{\infty} \in B_X^{\infty}(N)$ ;

(2)  $Af = g$  定义的算子  $A: B_X^1(N) \rightarrow B_X^{\infty}(N)$  是有界线性的, 且  $\|A\| \leq M_2$ .

**证明** (1) 先证级数收敛.  $\forall f \in B_X^1(N), \forall m > n \geq 1$ , 取  $x^* \in X^*$  且  $\|x^*\| = 1$  则  $\forall i \geq 1$ .

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} f_j \right\| &= |\langle x^*, \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \left| \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle \right| \\ &\leq \left( \sup_{n \leq j \leq m} |\alpha_j^{(i)}| \right) \cdot \left( \sum_{j=n}^m |\langle x^*, f_j \rangle| \right) \\ &\leq \left( \sup_{n \leq j \leq m} |\alpha_j^{(i)}| \right) \cdot \|f\|_1 \rightarrow 0 \quad (m, n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

可见,  $\forall i \geq 1$ ,  $\sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j$  收敛. 因为  $\forall x^* \in X^*$ ,  $\sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, f_j \rangle| \leq \|f\|_1 \cdot \|x^*\|$ , 所以,  $\forall x^* \in X^*$ , 有

$$\begin{aligned} \sup_{i \in \mathbb{N}} |\langle x^*, g_i \rangle| &= \sup_{i \in \mathbb{N}} |\langle x^*, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \sup_{i \in \mathbb{N}} |\sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle| \\ &\leq \sup_{i \in \mathbb{N}} (\sum_{j=1}^{\infty} |\alpha_j^{(i)}| |\langle x^*, f_j \rangle|) \leq \sup_{i \in \mathbb{N}} (\sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, f_j \rangle|) \cdot (\sup_{j \in \mathbb{N}} |\alpha_j^{(i)}|) \\ &\leq (\sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, f_j \rangle|) \cdot \sup_{i \in \mathbb{N}} \sup_{j \in \mathbb{N}} |\alpha_j^{(i)}| \leq \|f\|_1 \cdot M_2 \cdot \|x^*\| \end{aligned}$$

由条件(1.7)知  $g \in B_X^\infty(\mathbb{N})$  且

$$\|g\|_\infty \leq M_2 \cdot \|f\|_1 \quad (1.9)$$

(2) 由结论(1)知: 算子  $A: B_X^1(\mathbb{N}) \rightarrow B_X^\infty(\mathbb{N})$  定义合理. 显然,  $A$  是线性的. 根据(1.9)可知  $A: B_X^1(\mathbb{N}) \rightarrow B_X^\infty(\mathbb{N})$  是有界的, 且  $\|A\| \leq M_2$ . 证毕.

**例 1.2** 取  $\alpha_j^{(i)} = \frac{1}{ij}$  ( $\forall i, j \in \mathbb{N}$ ), 再取单位向量  $e \in X$ . 易见,  $f = \{f_j\}_{j=1}^\infty = \{j^{-2}e\}_{j=1}^\infty \in B_X^1(\mathbb{N})$ , 级数  $g_i = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j$  ( $\forall i = 1, 2, \dots$ ) 收敛. 因为

$$\begin{aligned} \sup_{i \in \mathbb{N}} |\langle x^*, g_i \rangle| &= \sup_{i \in \mathbb{N}} |\langle x^*, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \sup_{i \in \mathbb{N}} |\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{ij} \langle x^*, \frac{1}{j^2} e \rangle| \\ &\leq (\sum_{j=1}^{\infty} |\langle x^*, \frac{1}{j^2} e \rangle|) \cdot \sup_{i \in \mathbb{N}} \sup_{j \in \mathbb{N}} \frac{1}{ij} \leq \sum_{j \in \mathbb{N}} \frac{1}{j^2} \cdot \|x^*\| \end{aligned}$$

可见  $g \in B_X^\infty(\mathbb{N})$ .

**定理 1.4** 设  $\beta_i = \{\alpha_j^{(i)}\}_{j=1}^\infty \in S_F(\mathbb{N})$ ,  $\forall i \in \mathbb{N}$ , 如果

$$M_3 := \sup_{i=1}^\infty \sum_{j=1}^\infty |\alpha_j^{(i)}| < \infty \quad (1.10)$$

则:

(1)  $\forall f = \{f_j\}_{j=1}^\infty \in B_X^\infty(\mathbb{N})$ , 级数

$$g_i = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \quad (\forall i = 1, 2, \dots) \quad (1.11)$$

收敛, 且  $g = \{g_i\}_{i=1}^\infty \in B_X^\infty(\mathbb{N})$ ;

(2)  $Af = g$  定义的算子  $A: B_X^1(\mathbb{N}) \rightarrow B_X^\infty(\mathbb{N})$  是有界线性的, 且  $\|A\| \leq M_3$ .

**证明** (1) 先证级数收敛.  $\forall f \in B_X^\infty(\mathbb{N})$ ,  $\forall m > n \geq 1$ , 取  $x^* \in X^*$  且  $\|x^*\| = 1$ , 则  $\forall i \geq 1$ .

$$\begin{aligned} \|\sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} f_j\| &= |\langle x^*, \sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = |\sum_{j=n}^m \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle| \\ &\leq (\sup_{n \leq j \leq m} |\langle x^*, f_j \rangle|) \cdot (\sum_{j=n}^m |\alpha_j^{(i)}|) \\ &\leq (\sum_{j=n}^m |\alpha_j^{(i)}|) \cdot \|f\|_\infty \rightarrow 0 \quad (m, n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

可见,  $\forall i \geq 1$ ,  $\sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j$  收敛. 因为  $\forall x^* \in X^*$ ,  $\sup_{j \geq 1} |\langle x^*, f_j \rangle| \leq \|f\|_\infty \cdot \|x^*\|$ , 所以,  $\forall x^* \in X^*$ , 有

$$\begin{aligned} \sup_{i \geq 1} |\langle x^*, g_i \rangle| &= \sup_{i \geq 1} |\langle x^*, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \sup_{i \geq 1} |\sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} \langle x^*, f_j \rangle| \\ &\leq \sup_{i \geq 1} (\sum_{j=1}^{\infty} |\alpha_j^{(i)}| |\langle x^*, f_j \rangle|) \\ &\leq \sup_{i \geq 1} (\sup_{j=1}^\infty |\langle x^*, f_j \rangle|) (\sum_{j=1}^{\infty} |\alpha_j^{(i)}|) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq (\sup_{i \geq 1} \sum_{j=1}^{\infty} |\alpha_j^{(i)}|) \cdot (\sup_{i \geq 1} |\langle x^*, f_j \rangle|) \\ &\leq \|f\|_{\infty} \cdot M_2 \cdot \|x^*\| \end{aligned}$$

由条件(1.10) 知  $g \in B_X^{\infty}(N)$  且

$$\|g\|_{\infty} \leq M_3 \cdot \|f\|_{\infty} \quad (1.12)$$

(2) 由结论(1) 知: 算子  $A: B_X^{\infty}(N) \rightarrow B_X^{\infty}(N)$  定义合理. 显然,  $A$  是线性的. 根据(1.12) 可知  $A: B_X^{\infty}(N) \rightarrow B_X^{\infty}(N)$  是有界的, 且  $\|A\| \leq M_3$ . 证毕.

例 1.3 取  $\alpha_j^{(i)} = \frac{1}{ij^2}$  ( $\forall i, j \in N$ ), 再取单位向量  $e \in X$ . 易见,  $f = \{f_j\}_{j=1}^{\infty} = \{j^{-1}e\}_{j=1}^{\infty} \in B_X^{\infty}(N)$ ,

级数  $g_i = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j$  ( $\forall i = 1, 2, \dots$ ) 收敛. 因为

$$\begin{aligned} \sup_{i \in N} |\langle x^*, g_i \rangle| &= \sup_{i \in N} |\langle x^*, \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j^{(i)} f_j \rangle| = \sup_{i \in N} |\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{ij^2} \langle x^*, \frac{1}{j} e \rangle| \\ &\leq (\sup_{i \in N} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{ij^2}) \cdot (\sup_{j \in N} |\langle x^*, \frac{1}{j} e \rangle|) \leq \sum_{j \in N} \frac{1}{j^2} \cdot \|x^*\| \end{aligned}$$

可见  $g \in B_X^{\infty}(N)$ .

## 参考文献

- [1] Chui C K. Shift-invariant bi-inner product functional are inner product[J]. Journal of Approximation Theory and Applications, 1999, 15(1): 103-110.
- [2] Chui C K, Shi X L. Bounded linear operators that commute with shifts are scaled identity[J]. Journal of Approximation Theory and Applications, 1999, 15(3): 1-13.
- [3] Cao Huai-xin. Bessel sequence in a Hilbert space[J]. Journal Engineering Mathematics, 2000, 17(2): 92-98.
- [4] Casazza P G, Christensen O. Wely-Heisenberg systems and Riesz Bases in  $L^2(\mathbf{R})$ [J]. Journal of Duke Mathematics, 1997, 89(3): 237-281.
- [5] Ron A, Shen Z. Wely-Heisenberg frames for subspace of  $L^2(\mathbf{R})$ [J]. Proceedings of the American Mathematical Society, 2001, 129(1): 145-154.
- [6] 虞志坚, 曹怀信. Banach 空间中的  $\infty$  阶 Bessel 列[J]. 陕西师范大学学报, 2001, 29(3): 20-23.
- [7] 虞志坚, 曹怀信. Banach 空间中的 1 阶 Bessel 序列[J]. 陕西师范大学学报, 2005, 33(4): 26-28.

# PERTURBATIONS OF BESSEL SEQUENCES OF ORDER 1 IN A BANACH SPACE

WANG Qiu-fen<sup>1</sup>, CAO Huai-xin<sup>1</sup>, WU Hai-hui<sup>2</sup>

(1. College of Mathematics and Information Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** In this paper, Operator Theory to discuss perturbations of Bessel sequences of order  $p$  ( $1 \leq p \leq \infty$ ) in a Banach space is used, the sufficient conditions of that Bessel sequences of order  $p$  ( $1 \leq p \leq \infty$ ) become to Bessel sequences of order  $q$  under perturbation are obtained and the sufficient conditions of that Bessel sequences of order 1 become to Bessel sequences of order 1 and  $\infty$  by perturbate are given, and then some useful results are obtained.

**Key words:** Bessel sequences of order 1; Banach space; perturbation

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0143-06

# 天然高分子聚合物在造纸工业中的应用研究进展

李佩燊<sup>1</sup>, 张美云<sup>1</sup>, 林春涛<sup>1</sup>, 李丽阁<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学造纸工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安中轻造纸机械集团有限公司, 陕西 西安 710086)

**摘 要:**介绍了甲壳素及壳聚糖和多糖类聚合物、木质素、大豆蛋白纤维等其他天然高分子聚合物在造纸工业中的应用现状与研究进展. 合理利用天然高分子聚合物, 不仅可为造纸化学品的研发提供新的方向, 而且作为绿色高科技新材料在造纸工业中也具有巨大的开发潜力和应用前景.

**关键词:**天然高分子聚合物; 甲壳素及壳聚糖; 多糖类聚合物; 木质素; 大豆蛋白纤维

**中图分类号:**TS727<sup>+</sup>. 2      **文献标识码:**A

## 0 引言

随着造纸工业的快速发展, 为了保证连续性生产、提高产品质量, 各种造纸助剂的使用日益加大. 与合成聚合物相比, 天然聚合物最大的特点是“取之不尽, 用之不竭”和“可生物降解”, 这在倡导绿色生产的今天显得尤为重要. 本文介绍了甲壳素及壳聚糖在造纸工业中的应用现状, 同时对多糖类聚合物、木质素和大豆蛋白纤维等其他天然高分子聚合物在造纸工业中的应用开发和研究进展进行了论述.

## 1 甲壳素及壳聚糖

甲壳素是 1811 年由法国学者布拉克诺发现, 1823 年由欧吉尔从甲壳动物外壳中提取的, 命名为 chitin, 译名为几丁质. 自然界中, 甲壳素存在于低等植物菌类、藻类的细胞、高等植物的细胞壁以及甲壳动物虾、蟹、昆虫的外壳等, 每年其生物合成资源量达 1 000 亿吨, 是地球上仅次于植物纤维的第二大生物资源.

壳聚糖(chitosan, (1, 4)-2-氨基-2-脱氧-β-D-葡聚糖)是甲壳素脱乙酰基的产物. 一般而言, 甲壳素与壳聚糖之间没有严格的界限, 通常把能溶于稀酸水溶液的甲壳素称为壳聚糖, 其脱乙酰度一般大于 60%<sup>[1]</sup>. 甲壳素化学结构的最新提法为, 由 1→4 连接, 2-乙酰氨基-2-脱氧-β-D-吡喃葡萄糖和 2-氨基-2-脱氧-β-D-吡喃葡萄糖、二元线性共聚物组成, 其结构式如图 1 所示. 由于壳聚糖与作为造纸原料的植物纤维素有十分相似的化学结构(见图 2), 因此引起了造纸工作者的关注, 近年来不断有壳聚糖及其衍生物、复配物应用于造纸工业的报道<sup>[2]</sup>.

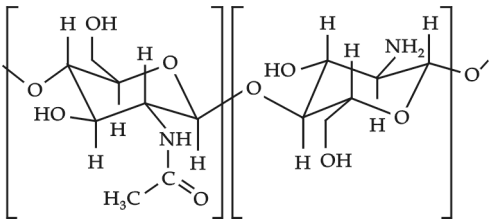


图 1 甲壳素、壳聚糖的化学结构

### 1.1 用于纸张增强剂

壳聚糖作为纸张增强剂, 目前一般认为它能从 3 个方面提高纸张的机械强度、即干强度、湿强度及初始湿强度.

(1)干强剂. 甲壳素及壳聚糖是自然界唯一存在的带有正电性的高分子聚合物. 壳聚糖加入到浆料中

\* 收稿日期:2009-09-20  
作者简介:李佩燊(1981—), 女, 陕西省宝鸡市人, 讲师, 在读博士生, 研究方向:高端及特种纸结构与性能

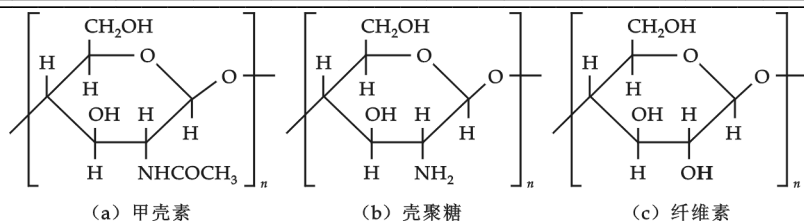


图 2 甲壳素、壳聚糖、纤维素的化学结构单元

后首先被带负电的纤维素表面吸附,成纸时填充于纤维之间,这种填充作用必将增加纤维间的结合面积,同时分子上的众多基团与纤维表面上的基团彼此间形成相应的氢键、化学键(共价键、离子键)。在干燥过程中,水分的蒸发为壳聚糖-纤维素分子间的化学作用提供了更多的机会,即可形成更多的氢键,从而提高纸张的强度。Lertsutthiwong 等人<sup>[3]</sup>系统地研究了用壳聚糖制备纸张的干增强剂,研究表明壳聚糖的添加量从 0% 到 1% 均能提高纸张的机械强度,而且壳聚糖添加量在 0%~0.5% 时纸张强度增长的幅度比添加量在 0.5%~1% 时的增长幅度大,且与 pH 值无关,因此不论是在酸性、中性还是在碱性条件下壳聚糖都是一种优良的增干强剂。美国专利<sup>[4,5]</sup>报道,在壳聚糖上接枝丙烯酰胺或二烯丙基单体后生成的接枝聚合物可使成纸的干强度有明显的提高。

(2)湿强剂。壳聚糖也能增加成纸的湿强度。浆料经漂白等氧化作用后纤维素、半纤维素分子上含有一定的醛基,这些醛基在一般的纸抄造过程中就能与壳聚糖上的氨基作用,生成 Schiff 碱,从而提高了成纸的湿强度。此外,壳聚糖在碱性条件下沉积于浆料表面上时也能大幅度提高成纸的湿强度。曹丽云等<sup>[6]</sup>通过测量加入壳聚糖-丙烯酰胺接枝共聚物后纸张的湿强度等物理性能的变化规律并通过 IR、SEM 等手段对其增强机理进行了研究与探讨,结果表明接枝共聚物分子中的氨基和纤维表面的羧基之间形成了牢固的离子键结合。

(3)初始湿强剂。初始湿强度是指纸页在未干燥之前湿纸幅所具有的强度。最早发现,将壳聚糖喷洒在从未干燥过的纸片上时湿纸幅强度明显提高<sup>[7]</sup>。因此,壳聚糖既可提高成纸的物理机械性能,又能改善纸机设备运行效率,特别适合碱性造纸体系。

## 1.2 用于造纸助留助滤剂

季铵化的壳聚糖和酸性溶液中的壳聚糖都是聚阳离子高分子化合物,可通过电荷中和作用几乎完全吸附于浆料中的纤维、细小纤维、溶解性的半纤维素及亲脂抽出物等胶体状物的表面之上,并与溶解性的碳水化合物,如  $\beta$ -纤维素、 $\gamma$ -纤维素间生成聚电解质复合物;与无机填料存在静电中和、桥联、镶嵌及氢键作用,并使之絮凝,因而可提高浆料中的细小纤维、填料以及各种助剂的留着率。

## 1.3 用于成纸表面施胶剂或辅助施胶剂

草类纤维抄造出的纸张品质一般较差,而壳聚糖强度高、成膜性好,与纤维素间的作用大,因而将壳聚糖用作草浆纤维纸张的表面施胶剂更有实际意义,可大幅度改善纸张性能。研究表明 0.1~1 g/m<sup>2</sup> 壳聚糖涂布于成纸表面上能提高纸张的表面强度、柔软性及印刷性能<sup>[8]</sup>。壳聚糖类施胶剂适合于多种浆料所抄纸张,可作为半化学浆、亚硫酸盐浆、硫酸盐浆、棉纤维、亚麻纤维纸张的表面施胶剂<sup>[9]</sup>。

壳聚糖及其衍生物也可用于浆内施胶剂的增效。用烷基二烯酮(AKD)施胶时,浆料中壳聚糖(醋酸或盐酸溶液)加入量为 0.1%~0.4% 时能有效提高 AKD 的留着率、填料的留着率及施胶度<sup>[10]</sup>。这是由于壳聚糖及其衍生物加入到浆料中后壳聚糖阳离子被吸附到阳性 AKD 乳胶的阴离子部位,使 AKD 乳粒带上了正电荷,可与带负电荷的纤维吸附,从而提高了 AKD 的留着率。

## 1.4 用于絮凝剂

目前造纸工业废水大多采用有机絮凝剂和无机絮凝剂配合使用进行处理,其中最主要的絮凝剂为聚合铝盐类和阳离子聚丙烯酰胺类化合物。壳聚糖分子链上分布着大量的游离氨基,在稀酸溶液中质子化可使其分子链上带上大量的正电荷,成为聚电解质,因此是一种典型的阳离子型絮凝剂<sup>[11]</sup>。

### 1.5 用于纸张整理剂

用壳聚糖对纸张表面进行处理可进一步提高其抗油、抗水、机械强度和光泽度.研究表明羟甲基甲壳素和水溶性壳聚糖有很好的效果,羧甲基壳聚糖比海藻酸钠和羧甲基纤维素更为有效<sup>[11]</sup>.

壳聚糖涂布纸页可提高喷墨打印纸的光泽度<sup>[12,13]</sup>.用二丁酰基甲壳素和壳聚糖涂布纸张,其抗油和密封性能极好,机械强度也有很大提高<sup>[14]</sup>.

### 1.6 用于特种纸

以壳聚糖为主要材料或配以适当的纸浆,按纸张的抄造方法制备各种特种纸,有的已实现了工业化生产<sup>[15]</sup>,如医用功能材料、肠衣、抗菌食用纸和食品包装纸<sup>[16]</sup>.

壳聚糖具有良好的成囊性能,能用于无碳复写纸的制作中.将壳聚糖溶液与囊芯材经乳化剂乳化后凝聚、固膜,即可得到无碳复写纸用微囊. Dawy 等人<sup>[17]</sup>研究发现水解的甲壳素与纤维素复合能够提高纸的绝缘性.复印纸产生静电后会严重降低复印图像的质量,在复印纸表面涂上壳聚糖后纸张的抗静电性可增强1万倍以上,复印质量得到了大幅度提高<sup>[18]</sup>.

### 1.7 用作其他助剂

壳聚糖与氢氧化钠、硅酸钠和过氧化氢等配合用于废纸脱墨,得率92%,白度53.1%ISO<sup>[19]</sup>.壳聚糖可很好地吸附金属离子<sup>[8]</sup>,加入少量壳聚糖即可排除金属离子对漂白的干扰,从而提高浆的白度.有专利报道<sup>[20]</sup>,选择性磺化壳聚糖是一种优良的打浆/精磨助剂,这种壳聚糖磺酸酯能有效降低打浆能耗,并且有较好的增强效果.此外,壳聚糖也可用作卷烟纸的粘合剂.

壳聚糖及其改性物对草类纤维的施胶、增强,特别是助留、助滤均优于对漂白木浆的相应作用<sup>[1]</sup>.阳离子化的壳聚糖与微粒子、纳米粒子组成的二元复式控制系统将是非常有开发价值的助留助滤体系.壳聚糖的无毒、抗菌、可生物降解的优良品质给加工纸、特种纸(可食性包装纸、抗菌纸等)的生产提供了更为广阔的前景,可缓解我国纸制品种类单一的现状<sup>[8]</sup>.

## 2 多糖类聚合物

### 2.1 淀粉

由于淀粉和纤维素均由葡萄糖单元组成,结构相近,相互间有良好的亲和作用,加上淀粉具有资源广泛、价格低廉、供应稳定、使用方便、可化学改性及生物降解等优点,尤其是经变性处理的淀粉能赋予纸张优异的性能,因此在各类造纸化学品中变性淀粉用量最大、用途最广,是最重要的一种造纸化学品,其用量约占造纸精细化学品总量的80%,主要用于湿部添加、层间喷涂、表面施胶和涂布粘合.目前淀粉类助剂的研究应重视变性淀粉的协同应用技术,重视与其相关的其他化学品的协同效应及协同应用机理<sup>[21]</sup>,结合变性淀粉在造纸过程中的应用情况及有关应用理论和机理,研究开发出技术含量更高、经济效益更好、应用效果更佳的绿色环保型变性淀粉.

### 2.2 魔芋葡甘聚糖

魔芋(Konjac),属田南星科魔芋属(*Amorphophallus blume*)多年生草本植物,其主要成分是葡甘聚糖,它是由葡萄糖和甘露糖以 $\beta$ -1,4 苷键结合而形成的一种高分子化合物.魔芋葡甘聚糖易溶于水,不溶于甲醇、乙醇、丙酮、乙醚等有机溶剂,同时还具有多种独特的理化性质.它不仅具有良好的保水性、胶凝性、增稠性和成膜性等,而且对人体还具有多种保健作用.它具有40多种理化特性,可广泛应用于食品、医药、化工、造纸、纺织、石油等工业,有“保健食品”和“工业味精”之称.魔芋精粉可以用于造纸,经化学处理、加工,可制作电影拷贝、照相用胶卷、录音带及化妆品,且无副作用.由魔芋生成的 $\beta$ -甘露聚糖酶可与木聚糖酶协同作用,提高纸浆的漂白度、打浆性与抗撕裂性.

有专利<sup>[22]</sup>报道,以魔芋精粉为原料,可制备成本低、生产工艺简单,无毒无污染、稳定性好,实用性强的多功能造纸助剂,它作为非木纤维造纸增强剂能用非木浆抄造出高档纸.



## 2.3 海藻酸钠

海藻酸钠又称海藻胶、褐藻酸钠或海带胶,是从褐藻类的海带或马尾藻中提取碘和甘露醇以后的副产品.海藻酸钠是天然高分子化合物海藻酸的可溶性盐,属多糖类线型天然高分子物质,由 D-甘露糖醛酸链段和 L-古洛糖醛酸链段交替结构组成.在水溶液中它的分子具有  $\text{COO}^-$ ,是具有负电荷的聚阴离子高分子化合物,该水溶液还具有胶体特性、增稠性、稳定性、乳化性和成膜性<sup>[23]</sup>.

研究表明<sup>[24]</sup>,海藻酸钠制备的纸用微囊在耐压、耐热、稳定性等方面均能满足纸用要求,并具有很好的抗渗透性和可涂布性.刘文波等研究<sup>[25]</sup>得出,以海藻酸钠和壳聚糖为壁材,由复合凝聚法制造无碳复写纸用微囊的最佳工艺条件是:壁材比例(壳聚糖/海藻酸钠)为 1:1,转速为 3 000 r/min,海藻酸钠加入时间 15 min,乳化剂 SSDG 用量 6.0%,稀释倍数 1.5,固化剂为戊二醛,其用量为 10 mL,固化时间为 60 min.蒯亚娟等<sup>[26]</sup>研究了聚酰胺环氧氯丙烷-海藻酸钠二元系统对纸张的增强效果,结果表明,采用 PAE/SA 二元纸张增强系统后纤维间的结合力提高,纸张的抗张强度、耐折度、耐破度和湿强度均显著增强,但撕裂强度降低,纸张紧度没有明显变化.同时发现 PAE/SA 二元增强系统对不同打浆度的纸浆均有增强效果,但打浆度不同,增强幅度亦不同.

## 2.4 田菁胶及其衍生物

田菁胶来源于一年生豆科田菁种子的内胶乳.著胶分子主链是  $\beta$ -1,4 苷键连接的甘露糖,并含有  $\alpha$ -1,6 苷键连接的半乳糖侧链,且甘露糖与半乳糖之比为 2:1,田菁胶的相对分子质量在 23 万左右.田菁胶为白色或淡黄色无结块粉末状物质,细度可达 3 000 目以上,细度越细,其在水中的溶解速度就越快.工业用田菁胶只要求过 120 目标标准筛的百分数  $\geq 99\%$ ,水分含量 9% 左右,水不溶物含量 22%~26%,其 1.0% 水溶液的表现粘度为 180 mPa·s<sup>[27]</sup>.

田菁胶及其衍生物可作为增强剂用于卷烟纸和纸袋纸生产,它的主要作用一是可提高纸张的匀度,二是能提高纸张的裂断长等强度指标,三是可提高细小纤维的留着率.它还可作为处理中段废水的絮凝剂,絮凝效果好,并且没有毒副作用<sup>[28]</sup>.

## 2.5 瓜尔胶及其衍生物

瓜尔胶是从豆科植物瓜尔豆中提取的一种高纯化天然多糖.瓜尔胶就其分子结构来说是一种非离子多糖,它以聚甘露糖为分子主链,D-吡喃甘露糖单元之间以  $\beta$ -1,4 苷链连接,而 D-吡喃半乳糖则以  $\alpha$ -1,6 苷键连接在聚甘露糖主链上.瓜尔胶中甘露糖与半乳糖单元之摩尔比为 2:1,其相对分子质量为 20~30 万.

瓜尔胶为白色至淡黄色无结块粉末状物质,含水率 9.5% 左右,水不溶物含量约 20%,1% 浓度表现粘度为 309 mPa·s.瓜尔胶的表现粘度是所有植物胶中最大的,所以曾一度被誉为植物胶中的“王牌胶”.国外有 1/3 的瓜尔胶用于造纸工业,使用最多的是经过改性的阳离子瓜尔胶和两性瓜尔胶,作为湿部添加剂它可增加纸张的强度和不透明度,提高白度和耐油度,改善印刷性、滤水性和填料留着率<sup>[29]</sup>.其中阳离子瓜尔胶在黑液存在下仍能有效地发挥作用,能适应造纸废水零排放的要求<sup>[30]</sup>.我国瓜尔胶在卷烟纸和滤嘴棒纸生产中的应用比较成熟,用它代替 CMC 与淀粉一起使用有很好的效果,但大部分依赖进口,价格偏高.阴离子型瓜尔胶可增加纸张的强度和不透明度,提高白度和耐油度,改善印刷性能、滤水性和填料的留着率,可用于不同类型纸张的制造.

## 3 木质素

根据蒸煮工艺条件和木素提取方式的不同,工业木素可以分为 4 大类<sup>[31]</sup>,具体如下:

水解木素:其溶解性和反应活性很低,大部分已发生缩合,用途受到限制.

碱木素:来自硫酸盐法、烧碱法和烧碱-蒽醌法制浆过程,可溶于碱性介质,具有较低的硫含量(小于 1.5%)和较高的反应活性.

木素磺酸盐(LS):主要来自亚硫酸盐法制浆和其他改性亚硫酸盐法制浆过程,其硫含量比较高,常为

10%左右,有很好的水溶性和广泛的应用途径。

其他木素:如通过溶剂法制浆所得的木素(Allcell 木素等)和蒸汽爆破木素(Angi-olin 木素)。

工业木素的共性是都具有甲氧基、酚羟基及羧基等官能团,可以利用这些活性基团进行化学改性,开发出具有高附加值的产品。木素和木素衍生物作为一种特殊的化学品在造纸工业中可以用作纸页增强剂、纸页染料、助留助滤剂和树脂控制剂、纸页施胶剂等,开发木素型造纸化学品的研究工作才刚刚起步,已经显示出广阔的发展前景<sup>[31]</sup>。

### 3.1 改性木素用作纸页施胶剂

用改性木素施胶可得到较好的施胶效果,且纸页物理强度亦有所增加<sup>[32]</sup>。同时,铵化木素的不溶部分可作为填料使用,增加纸页的物理强度及施胶度。

### 3.2 改性木素用作纸页增强剂

化学改性的酸沉淀木素具有多功能造纸助剂特性,不同的改性木素类型对纸页强度影响程度不同。添加改性木素都使纸页强度有不同程度的增加,在改性木素添加量为6%时,纸页强度达到了最大值,随后继续增加木素,纸页强度降低。其原因可能是由于木素在纸页中的留着率降低所致。

研究发现<sup>[32]</sup>在打浆到相同的打浆度时,添加改性木素可以节约打浆能量。在打浆前添加3%~5%的改性木素,可以节约10%~15%的打浆能量,同时纸页强度提高20%~25%。在打浆后添加4%~6%的改性木素,可提高纸页强度约10%~16%。在抄纸过程中添加改性木素,可改善细小微粒在纸页上的留着率,当其添加量为5%时,细小微粒的留着率达到最大值。

### 3.3 用作填料

用木素代替部分炭黑来造纸,不仅为木素找到了一条可以被大量使用的出路,也可用以代替较贵的炭黑而降低造纸的成本。木素本身无毒,对光敏、氧敏的农药能起到稳定作用,同时具有防虫作用。影响水果外观色泽的主要原因就是紫外线对水果的照射,而木素属于芳香族的天然高分子聚合物,具有吸收紫外线的的能力。实验表明用木素来代替部分炭黑作为苹果外袋纸的填料在一定程度上能够避免日灼<sup>[33]</sup>。

### 3.4 用作助留助滤剂

利用木素及其衍生物与聚氧化乙烯(PEO)共用组成新型的助留助滤系统,在显著提高纤维留着率的同时,纸页性能也有所改善,为木素的工业利用开辟了新的领域<sup>[32]</sup>。木素或改性木素作为辅助助剂有许多优点:木素的结构与酚醛树脂相类似,可以起到与酚醛树脂相同的作用,其可以从制浆黑液中提取,是一种丰富的可再生资源。

研究发现,纯碱木素及其改性物都能提高纤维的留着,并显著提高纸张的不透明度、撕裂指数和灰分,而且成本比较低,不过纸张的白度有所下降。木素酚醛树脂(LPF)与PEO并用,与PEO/非离子性的酚醛树脂(PFR)体系对纤维的助留效果差不多,甚至有超过的趋势。

## 4 大豆蛋白质纤维

大豆分离蛋白是一种来源丰富的植物蛋白,其分子中存在大量的氢键、疏水键和离子键等,它们是维持大豆分离蛋白高级结构所必需的。大豆蛋白质纤维是从榨掉油脂(25%~30%)后的大豆豆粕中提取球蛋白,经过改性,与含羟基和氰基化合物接枝或共混而成的再生大豆蛋白质短纤维,这种纤维具有蚕丝般的光泽、羊绒般的手感以及棉的吸湿导湿性,并且干强度接近于棉,湿强度较高,纤维本身带有微黄色,具有一定的抗菌保健功能,它能与其他纤维混合,交织开发多种多样的特种用纸<sup>[34]</sup>。由于大豆蛋白质纤维的上述特性,由此抄造的纸张完全能达到特种用纸强度高、表面光泽、手感柔软等的要求。大豆蛋白质纤维的开发给造纸业提供了丰富和干净清洁的原料,解决了制浆过程中形成的严重污染问题,也给造纸业注入了一种新的活力。此外,袁超等研究得出<sup>[35]</sup>,大豆蛋白胶粘剂作为瓦楞纸箱、纸盒等纸制品的胶粘剂可使纸箱的主要性能指标提高,且无腐蚀,完全符合绿色环保要求。

## 5 结束语

天然高分子聚合物以其良好的可再生性及生物降解性能在造纸工业中的应用越来越广泛. 合理利用天然高分子聚合物, 开发出新型改性产品, 不仅可为造纸化学品的研发提供新的方向, 而且减少了环境污染, 作为绿色高科技新材料在造纸工业中具有巨大的开发潜力和应用前景.

## 参考文献

- [1] 蒋挺大. 壳聚糖[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 马永生, 邱化玉. 壳聚糖类造纸化学品的应用现状及研究进展[J]. 中国造纸, 2004, 23(8): 52-55.
- [3] Lertsutthiwong P. Chitosan as dry strength agent for paper[J]. Appita Journal, 2002, 55(3): 208-212.
- [4] Robert, Clayton Slagel. Chitosan graft copolymer for making paper products of improved dry strength[P]. United States Patent, 3770673, 1973-11-06.
- [5] Slagel. Process for making paper products of improved dry strength[P]. United States Patent, 4056432, 1977-11-01.
- [6] 曹丽云, 黄剑锋, 张光华. 壳聚糖-丙烯酸酰胺接枝共聚物的增强机理[J]. 中国造纸, 2001, (2): 17-19.
- [7] Allan G G, Krumpos J D. Fiber-polymer interaction in water saturated fiber assemblies[C]. Am. Chem. Soc. Meeting in Atlanta, GA, 1981.
- [8] 刘成金, 黎厚斌, 柯贤文, 等. 壳聚糖类造纸助剂的作用机理及应用进展[J]. 造纸化学品, 2006, 18(2): 22-27.
- [9] Belenkaya N G, Alekseeva TV, Plisko EA. Effect of chitosan on properties of paper of different compositions[J]. Khim. Drev, 1979, (1): 109-114.
- [10] Hasegawa M. Alkaline sizing with alkylketene dimers in the presence of chitosan salts[J]. Journal of Pulp and Paper Science, 1997, 23(11): 528-531.
- [11] Joyce M K, Gibert R D, Khan S A. The influence of carboxymethylated chitosan on the structure, rheology, and dewatering properties of clay[J]. Tappi J, 1997, 80(5): 185-190.
- [12] Mamoru S, Mifune H, Masahiko H, et al. Printing paper with good surface gloss and printability by water-thinned inks and ink-jet printing[P]. JP, 1 996 337 999, 1996-12-24.
- [13] Kazuo A, Katsumi H. Lightweight printing paper with good mechanical strength and its manufacture[P]. JP, 1 999 174 719, 1999-07-02.
- [14] Wizorek, Anna. Application of chitin derivatives and their composites to biodegradable paper coating[J]. Adv. Chitin Sci, 1997, (2): 890-896.
- [15] Masashi N, Jun H. Chitosan-containing webs and their manufacture[P]. JP, 1 990 200 894, 1990-08-09.
- [16] Lee CH, An D S, Park H J, et al. Wide-spectrum antimicrobial packaging materials incorporating nisin chitosan in the coating[J]. Packaging Technology & Science, 2003, 16(3): 99-106.
- [17] Dawy M. Physicochemical properties of hydrolyzed and blended chitin[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2001, 40(5): 745-752.
- [18] 严瑞宣. 水溶性高分子[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [19] Yuichi I, Yoshitaka M, Hiromichi T. Agents and method for dinking of recycled paper by the floatation process[P]. JP: 1 998 102 390, 1998-04-21.
- [20] Hayashi. Method of refining wood chips or beating wood pulp with a selectively sulfonated chitosan[P]. United States Patent, 5454907, 1995-10-03.
- [21] 王永宏, 张占柱. 造纸工业用变性淀粉现状及发展趋势[J]. 湖北造纸, 2006, (3): 26-29.
- [22] 许 辉, 张德云. 一种造纸用助剂及其生产方法[P]. 中国, CN1109535, 1995-10-04.
- [23] 魏福祥, 王新辉, 杨晓宇, 等. 天然高分子海藻酸盐成膜研究[J]. 日用化学工业, 1998, (1): 22.
- [24] 于 钢, 刘文波, 钱学仁, 等. 海藻酸钠作纸用微囊壁材[J]. 中国造纸, 2001, (5): 29-32.
- [25] 刘文波, 宋湛谦, 于 钢. 以壳聚糖-海藻酸钠为壁材制备纸用微囊[J]. 中国造纸, 2005, 24(10): 17-19.
- [26] 蔺亚娟, 王高升, 张吉宏, 等. 聚酰胺环氧氯丙烷-海藻酸钠二元系统对纸张的增强效果[J]. 中国造纸, 2008, 27(2): 25-28.
- [27] 王伟义, 刊寸口忠. 田著胶的理化性能[J]. 中国胶粘剂, 2000, 10(5): 35-37.
- [28] 杜 敏, 王志杰. 植物胶在造纸工业中的应用研究[J]. 纸和造纸, 2003, 11(63): 62-66.

(下转第 167 页)

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0149-05

# 纺织企业融资方式创新研究

高民芳, 张 程, 邓瑞芳

(西安工程大学管理学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:**近年来,由于融资方式落后,融资渠道狭窄,融资难问题一直困扰着国内纺织企业的运行和发展,解决纺织企业融资瓶颈问题已成为当务之急.作者以 2005~2008 年的面板数据为依据,从纺织企业融资现状出发,指出了纺织上市公司融资方面存在的问题,同时提出了 8 种适合纺织企业融资的创新方式,分析了各种融资方式的特点及其适用的条件,进而提出了创新融资方式的合理建议,有利于纺织企业准确地开发和利用各种创新的融资方式,快速有效地筹集资本.

**关键词:**纺织企业;融资渠道;融资方式;创新

**中图分类号:**F830

**文献标识码:**A

## 0 引言

作为传统产业,纺织一直都是我国国民经济的支柱产业和民生产业,经过一个世纪,特别是建国后和改革开放以来的发展,我国已经成为当今世界纺织第一生产大国和第一出口大国,为我国经济建设和社会发展做出了巨大的贡献<sup>[1]</sup>.但是,作为劳动密集型产业的代表,我国的纺织工业也存在着很多问题,比如,在现有的纺织企业中,我国自有品牌只有 10%左右,大部分纺织企业在做定牌、贴牌的工作,劳动力整体水平较低,自主创新能力较弱.究其原因,融资渠道狭窄、融资方式单一、融资难、资金紧张是阻碍我国纺织企业发展壮大的重要因素.在此次国际金融危机中,由于受全球市场需求萎缩、人民币升值等一系列因素的影响,纺织企业利润空间不断被挤压,许多企业由于亏损严重、资金链断裂而被迫停产倒闭,规模较大的纺织企业也是不断减产,步履维艰<sup>[2]</sup>.因此,解决好对纺织企业的融资问题对于改善纺织企业融资困境、提升企业价值具有重要的现实意义.

## 1 纺织企业的融资现状

融资方式是指企业筹集资本所采取的具体形式和工具,体现着资本的属性和期限.对于我国纺织企业的融资问题,不少学者都是通过分析资本结构即融资方式进行研究的,得出了许多有用的启示,如徐海霞、马玉超(2003)对纺织、服装和皮毛行业上市公司的资本结构现状进行了分析,得出纺织类上市公司偏好股权融资的结论;潘立军(2006)对我国纺织行业上市公司的资本结构进行了研究,得出资本结构与企业获利能力呈正相关等结论;方光正(2007)对纺织服装行业上市公司的资本结构进行了研究,得出服装类上市公司存在资产负债率总体偏低、资本结构综合治理效应偏低等结论;张丽丽(2008)通过对 51 家纺织上市公司 2002~2006 年的融资结构数据进行分析,得出了纺织上市公司权益类融资比重大于债务类融资的结论.

本文同样从融资方式(即融资结构)入手来研究我国纺织上市公司的融资现状,把企业资本按照筹集

\* 收稿日期:2009-10-10

作者简介:高民芳(1973—),女,山西省永济市人,副教授,硕士,研究方向:公司理财与会计

方式的不同细分为盈余融资、股权融资和债权融资 3 类,选取 2006 年以前上市的纺织上市公司为研究对象,剔除被特别处理的 8 家公司,样本公司共有 69 家.数据的选取范围限定在 2006~2008 年间,这样,3 类资本在观测期间的样本值均为 207,然后通过简单公式计算,在运用 SPSS 数据处理软件对其进行描述性统计后得出结果如表 1 所示.

表 1 描述性统计结果(%)

项 目	盈余融资比重	股权融资比重	债权融资比重
最小值	-807.59	-95.55	-131.00
最大值	193.19	473.88	433.71
均值	34.92	29.12	35.96
方差	123.28	76.89	73.06

资料来源:据国泰安数据库相关数据计算,结果保留两位小数.

重 35.96%.也就是说,目前我国纺织上市公司依然倾向于通过权益类融资方式取得资金.虽然从理论上讲企业的融资渠道很多,但是在实践中,由于种种条件的限制,我国纺织企业融资方式单一、融资渠道狭窄,这严重影响了我国纺织工业的发展壮大.

2 纺织企业融资难的成因

根据净收益理论和 MM 理论,企业负债价值与企业价值有关,即负债越多,企业价值越大;由等级筹资理论可知,企业在使用资金时,当内部资金不足时,外部融资首选债权融资.然而,我国纺织上市公司融资方式的选择正好与其相反,更偏好通过权益类融资方式进行融资,这主要是由我国纺织上市公司的业绩不佳、获利能力低所致.

表 2 2005~2008 年纺织上市公司销售净利

年份	销售收入/百万元	净利润/百万元	销售净利润率/%
2005	112 307.46	1 316.15	1.17
2006	133 068.64	3 399.30	2.55
2007	163 423.51	11 404.18	6.98
2008	168 567.16	2 080.28	1.23

资料来源:根据国泰安数据库相关数据计算而来.

重仅为 0.35%,净资产仅占 1.0%,净利润仅占 2.16%,这一系列数据都表明,我国纺织上市公司总体呈现出获利能力较低的特征.

然而,纺织是一个竞争非常激烈的行业,纺织上市公司较低的获利能力无法给企业带来更多的盈余资金,没有充足的资金也就无法对技术、设备等进行更新改造,从而影响利润的创造和下一轮技术、设备的更新改造或企业规模的进一步扩大,最终导致恶性循环的形成.要扭转这种局面,必须解决纺织企业的资金短缺问题.纺织企业较低的获利能力势必会影响银行的贷款决定;而发行债券的条件又较为严格,纺织上市公司想以这种形式从大众手中筹集资金有着更大的困难.因此,对我国目前的纺织企业而言,创新融资方式、拓宽融资渠道势在必行.

3 纺织企业融资方式的创新

为了使纺织企业充分利用各种融资渠道,走出发展壮大过程中的资金困境,政府部门、金融机构等应积极推出新的政策,开发多种多样的金融工具;而纺织企业则应大胆创新融资方式,合理地开发和利用各种融资方式,实现各种融资方式的最佳组合,有效地筹集资本.

3.1 申请专项基金

除了以财政拨款形式直接对国有企业提供帮助外,国家还出资建立了多种基金,为企业提供融资帮

表 1 中的盈余融资是指企业当年取得的净利润扣除分配的股利后的余额;股权融资是指扣除盈余融资后,本年比上年增长的所有者权益;债权融资涵盖的范围比较广,包括所有的债权类融资,如银行贷款、商业信用等.从表 1 均值行可知,2006~2008 年纺织上市公司权益融资所占比重平均为 64.04%,大于债权融资平均所占比

2008 年公布的年报显示,纺织上市公司平均毛利率仅为 12.51%,处于全国制造业的低水平位置.由表 2 计算得知,2005~2008 年间纺织上市公司的平均销售净利润率只有 2.98%.截止 2008 年末,纺织上市公司家数占沪深两市公司总数的 5.4%,但总资产在沪深两市总资产中的比

助. 目前,为鼓励纺织产业的发展,国家和地方各级政府共同设立了纺织专项基金,如国家从 2006 年起设立了“纺织行业结构调整转变增长方式专项资金”,它专门为“纺织关键技术和装备的研发创新、环境保护和节能降耗、纺织新纤维的研发及产业化、行业创新公共服务平台建设、应用基础研究及共性技术研究”等项目提供资金<sup>[3]</sup>. 还有一些专项基金虽然没有直接投入纺织企业,但是其形成的技术、研究成果等有利于纺织企业改善经营状况,对纺织企业今后的发展能起到很大的促进作用. 因此,对符合条件的纺织企业来说,积极申报专项基金项目并获得资助不失为一种很好的融资方式.

3.2 利用商业拆借或商业信用

2005~2008 年公布的年报中,纺织上市公司的“短期借款——拆入资金”科目余额都为 0,这说明企业间的商业拆借在我国的纺织上市公司中并没有发挥融资的作用,这主要是由企业间的借款利息高于银行贷款利息等原因造成的,但是在没有其他融资渠道的时候,企业间的拆借还是需要考虑的,特别是对于那些资金紧张的纺织企业,商业拆借不失为一种方便快捷的融资方式.

商业信用是指商品交易中的延期付款或延期交货所形成的借贷关系,主要形式有赊购商品、预收货款和商业汇票等,这种筹资方式比较灵活,具有一定商业信用基础的企业均可使用. 从实践来看,商业信用不啻是一种成本低廉、易于实现的融资方式. 由表 3 可知,商业信用在

表 3 2005~2008 年纺织上市公司商业信用运用

年份	应付票据 /百万元	应付账款 /百万元	预收账款 /百万元	三项之和占负债 总额的比例/%
2005	6 474. 88	9 434. 60	5 475. 31	27. 77
2006	6 584. 20	11 933. 29	6 879. 93	27. 46
2007	6 162. 26	13 924. 93	10 204. 33	25. 51
2008	7 957. 45	14 773. 25	10 160. 22	25. 69

资料来源:根据国泰安数据库有关年报数据计算而来.

纺织上市公司间的应用是非常广泛的,但在具体操作时纺织企业一定要注意商业信用的融资额度不能超出自身的债务承受能力,否则一旦到期信用无法兑现就会败坏企业的信誉,严重的还会变成商业诈骗.

3.3 扩大抵押物范围

抵押贷款是指借款人以其所拥有的财产作为抵押,获得银行等金融机构贷款的一种资金筹措方式. 可以抵押的财产包括不动产、动产、无形资产等. 以往金融机构多以房产、土地为抵押发放贷款,2007 年 10 月 1 日正式实施的《物权法》为应收账款作抵押财产进行融资提供了有力的法律保障和操作依据. 由表 4 可知,近年来应收账款在纺织上市公司资产中均占有较大的比例,如果纺织企业将应收账款用作抵押财产行使权力,就可以拓宽向银行等金融机构融资的渠道,为企业筹集更大数额的资金.

3.4 融资租赁

融资租赁就是变“融资”为“融物”,是目前已经开展此项业务的 80 多个国家中最受欢迎的一种融资方式,它已经成为企业更新设备仅次于银行信贷的主要融资手段之一. 目前,融资租赁业务除了直接租赁、售后租赁、杠杆租赁等比较成熟的操作模式外,还出现了一些更加灵活、更加适应市场需求的模式,如上海融联租赁股份有限

表 4 2005~2008 年纺织上市公司应收账款占有量

年份	应收账款净额 /百万元	占流动资产 比例/%	占总资产 比例/%
2005	13 816. 40	19. 99	9. 17
2006	14 879. 00	18. 79	8. 53
2007	11 495. 17	11. 46	4. 86
2008	11 994. 85	10. 73	5. 09

资料来源:根据国泰安数据库有关年报数据计算而来.

公司签署的投资分成、两头在外(即贷款银行、承租人与出租人分在三地)的医疗设备融资租赁合同,为银行贷款支持异地租赁项目做了成功的探索<sup>[4]</sup>. 融资租赁方式具有许多优点:(1)可以帮助公司在不改变自身资本结构和举债能力的情况下得到设备.(2)可以利用租赁费的税盾效应减轻企业的税负.(3)以融资租赁方式租入的固定资产不承担设备陈旧过时带来的风险,能避免通货膨胀的影响,减少投资风险. 因此,对于产品过时、设备陈旧、工艺技术落后的纺织上市公司来说,利用融资租赁方式融资是非常明智的选择.



### 3.5 推进公司改组

这里的公司改组主要有申请银行控股、联合上下游企业控股和公司职工集资 3 种. 第一种主要通过银行债转股或向银行出售部分股权的方式, 银行派出专人对企业的投融资等业务提供指导或监督, 这种方式由于权益增加、资产负债率降低, 不仅降低了债务人的投资风险而且有利于下一轮的债务融资, 我国广大中小纺织企业均可采用此方式达到融资的目的. 第二种是指将企业的股权转让给上下游产业链中的企业, 尤其是与专门的投资公司和资金比较充足的国营企业或上市公司合作, 因为这些企业往往较容易筹集到资金, 与它们的合作可以提升纺织企业自身的融资能力<sup>[5]</sup>. 当然, 如果能吸收国外投资就更好了, 因为国外资金到位的同时还会给企业带来先进的设备、技术及管理方法等, 可为企业更好的发展奠定良好的基础. 如果纺织企业考虑改组为外商投资企业还可以谋求到国际商业贷款, 因为一般内资企业是不允许借用国际商业贷款的<sup>[1]</sup>. 第三种职工集资, 是以公司股份换取员工手中的资金, 不仅可以短时间筹集大量资金, 而且因为年底分红与企业绩效挂钩, 员工们会更努力地工作, 有利于企业向更好的方向发展, 但是职工集资应当按照规定, 如果违法, 就得不偿失了.

### 3.6 吸收风险投资

风险投资是指由职业金融家将风险资本投向新兴的、迅速成长的、有巨大竞争潜力的公司, 在承担很大风险的基础上, 为融资人提供长期股权资本和增值服务, 培育企业快速成长, 数年后通过上市、并购或其他股权转让方式撤出投资并取得高额回报的一种投资方式. 风险投资人可以分为风险资本家、风险投资公司、产业附属投资公司和天使投资人 4 类, 但是不管是哪一类, 都只有那些含有先进技术的企业才能获得风险投资人的青睐. 20 世纪 90 年代后, 随着大批国际风险投资基金和公司涌入中国, 在为刚起步的中国风险投资业注入新的资金的同时又带来了西方全新的风险管理技术和规范化的风险运作机制, 从而促进了我国风险投资业的发展. 据统计, 截止 2006 年底, 我国风险资本总量超过 583.85 亿元人民币, 比 2005 年底高出 32.31%. 2006 年新筹资风险资本规模高达 240.85 亿元, 风险投资总量再创历史新高, 达到 143.64 亿元, 比 2005 年增加了 22.17%<sup>[6]</sup>. 因此, 从事高新技术创新活动的中小纺织企业应抓住这个机遇, 成功吸收风险投资.

### 3.7 创新金融工具

目前, 上市公司比较流行的是发行可转换债券和分离交易式可转换债券. 前者是指在一定时期内, 可以按规定的价格或一定的比例, 由持有人自由地选择转换为普通股的债券. 可转换债券的利率一般低于同期银行存款利率, 为发行公司提供了较低的筹资成本, 而且可转换债券可附提前赎回等条件, 有利于上市公司调节债权和股权的比例, 使上市公司对融资结构的调整更加容易. 后者是一种附认股权证的公司债. 分离交易式可转换债券的优点是可以为上市公司筹集更多的资金, 因为投资者在购买债券时支付了一定的资金, 当公司的股票市价高于认股权证行权价时投资者就会再次出资认购股票, 这就能又一次为公司争取到资金. 自 2006 年末出台的《上市公司证券发行管理办法》将分离交易式可转换债券列为上市公司再融资品种以来, 这一创新性的金融工具迅速升温, 获得了不少上市公司的青睐. 虽然这两种金融工具发行的条件比较多而且严格, 但因为可以为企业筹集更多的资金, 有实力的纺织上市公司可以借鉴这一创新方式进行融资<sup>[3]</sup>.

此外, ABS 项目融资方式也可供纺织企业使用. ABS 项目融资是资产证券化融资(asset backed securitization)的简称, 它是继 BOT 方式之后又一个被引入的先进融资工具. 它是以要投资项目所拥有的资产为基础, 以该项目资产的未来预期收益为保证, 通过在国际资本市场发行高档债券来筹集资金的一种项目融资方式. ABS 项目融资的特点是利率低, 但投资回报率要高于普通储蓄的利率, 并且因为出售的是资产预期收入而不是负债, 所以公司在获得资金的同时不会改变其负债权益结构<sup>[7]</sup>, 但是要运用 ABS 方式融资必须要有较好的项目支持. 目前, 该融资方式已经在国有大型纺织化纤企业试行, 其他大型纺织公司也可以使用该先进的金融工具融资<sup>[1]</sup>.



3.8 争取境外上市

国外证券市场发展成熟,市场容量大,利用境外资本市场可以满足纺织企业大规模融资的需求.具有雄厚资本实力和良好经营业绩的纺织企业可以考虑境外上市,以提高其知名度,打造国际品牌,如 2007 年 6 月韩国证券交易所发布公告,批准中国华丰纺织国际集团有限公司在韩国证券交易所上市.目前,在多地上市在华丰纺织已成为中国最可靠和深受信赖的纺织品供货商之一<sup>[3]</sup>.

4 结束语

近几年,我国政府出台了各种优惠政策和指导性的建议,银行等金融机构也积极响应国家号召放宽了贷款等政策,这在很大程度上改善了企业的融资环境.纺织企业应结合自身实际,开发和利用各种创新的融资方式,拓宽融资渠道.但是,融资方式的创新只是一种手段,纺织企业只有苦练内功,提高经营管理水平,建立健全内部控制制度并注重智力资本的建设和管理,才能切实提高自身的融资能力,各种创新的融资方式才能真正发挥作用,融资难问题才能得到彻底的解决.

参考文献

[1] 郭 琴.加入 WTO 后我国纺织企业的融资问题研究[D].成都:西南财经大学硕士研究生论文,2002:14,27.  
[2] 赵晶琴.我国纺织企业应如何应对金融危机[J].消费导刊,2009,(7):63-64.  
[3] 张丽丽.基于可持续成长观的我国纺织企业融资问题研究[D].天津:天津工业大学硕士研究生论文,2008:31、32.  
[4] 姜荣春.大力发展融资租赁产业拓宽中小企业融资渠道[J].商业文化,2009,(4):64.  
[5] 陈怀瑜.中小企业的融资渠道的一些办法[J].科技资讯,2009,(9):253-254.  
[6] 龚国光.风险投资业发展再思考[J].会计之友(下旬刊),2008,(4):67-68.  
[7] 广东省税务局.何为 ABS 融资[EB/OL].1998,3. <http://portal.gd-n-tax.gov.cn/web/vfs/gd/content/ContentTemplate.jsp?CategoryId=497&ContentId=20817>.

STUDY ON INNOVATION OF FINANCING  
METHOD FOR TEXTILE ENTERPRISES

GAO Min-fang, ZHANG Cheng, DENG Rui-fang

(School of Management, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In recent years, because of simple financing methods and restricted financing channels, problem of financing is around textile enterprises. Therefore, the top priority is to resolve the problem of financing. Based on the data between 2005~2008, the paper analyzes the current situation and problem of financing in listed textile company, then, puts forward eight innovative financing methods for textile enterprises. After analyzing the characters and applicable conditions of each method, some relevant suggestions are offered. It will help textile enterprises to develop and utilize innovative financing methods accurately to raise capital quickly and efficiently.

**Key words:** textile enterprise; financing channels; financing methods; innovate

# 论城市综合体的开发

冯 硕

(同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

**摘 要:**城市综合体是城市发展到一定阶段的必然产物。作者阐述了城市综合体的概念、类型及其特征,从外部条件和内部条件两方面分析了城市综合体开发成功的必备要素,并以上海五角场万达广场为例予以说明,分析了其开发成功的经验,同时探讨了其不足之处,提出了改进的方向。

**关键词:**城市综合体; 开发; 成功要素; 万达广场

**中图分类号:**F291.1

**文献标识码:**A

## 0 引言

随着城市的发展及城市区域开发进程的深入,新的建筑形式不断涌现。20 世纪 70 年代以来,全世界多个城市开始对城市建设尤其是中心区建设进行了深刻反思和改造实践,为了避免以往城市开发功能单一、建筑分散无序的问题,很多城市在旧城改造或新城建设过程中,为了达到中心区功能完整、建筑统一的目标,将城市综合体作为了一种新的区域地产开发模式。在我国,近年来商业地产不断升温,城市综合体的开发在北京、上海、深圳等大中城市纷纷涌现,万达、华润、新世界等知名地产企业均在各地布局建设了具有不同特色的城市综合体。城市综合体的产生和发展有其必然性,它的成功开发需具备一定条件,同时其开发过程中也会出现一些问题。本文结合上海五角场万达广场实例,探讨了城市综合体开发的成功经验和不足之处,以期进一步充实和完善对城市综合体开发模式的研究。

## 1 城市综合体及其特征

### 1.1 城市综合体及其类型

城市综合体(HOPSCA)是指将城市活动中不同的功能空间如酒店、写字楼、公共空间、购物中心、文化娱乐休闲设施、公寓等进行组合,通过一栋或一组建筑来完成,并与城市交通协调,不同功能间相互依存、价值互补,从而形成一个多功能、高效率的综合体<sup>[1]</sup>。

城市综合体可划分为以下一些类型:按所处位置分为城市成熟中心区、新中心区、卫星城的综合体;按土地性质分为旧城改造、带特定条件产业园区的综合体;按内部物业配比为商业核心、商务核心、商业商务双核心、住宅核心的综合体;按配套的主打优势点分为地铁概念综合体、CBD 概念综合体、产业概念综合体等。不同类型的城市综合体在其开发和运营过程中有不同的侧重,但都体现出“综合”这一核心概念。

### 1.2 城市综合体的特征

在国外,城市综合体已经发展成为一种成熟的商业地产模式;在国内,城市综合体作为一种新兴的区域地产开发模式正在不断发展和完善。纵观国内外成功的城市综合体开发案例,不论何种类型的城市综合

\* 收稿日期:2009-09-29

作者简介:冯 硕(1987—),女,陕西省榆林市人,在读硕士生,研究方向:房地产投资与评估、土地经济与利用规划

体都具备自身构成和社会影响两方面的特征<sup>[2,3]</sup>。

首先,自身构成特征主要有:(1)超大的空间尺度.从平面上来讲,城市综合体一般为占地规模庞大的建筑群落,如日本的MM'21中心占地面积高达186公顷;从空间上来讲,城市综合体的开发是为了最大限度利用土地资源,尽可能使建筑向高空、地面、地下三向发展,空间尺度大。(2)协调的建筑风格.从较大范围来看,城市综合体建筑群与外部整体城市环境协调统一;从较小范围来看,城市综合体建筑设计以城市设计为基础,其中各单体建筑相互配合、衬托、影响和联系,形成统一风格。(3)立体的交通体系.城市综合体交通包括外部交通及内部交通,由地面交通、地下交通、人行天桥等多种方式构成立体交通体系.车辆和行人对道路的使用保持平衡,一般鼓励步行系统和街面活动,鼓励公共交通,各种交通方式协调共存。(4)现代的景观设计.城市综合体建筑群内部及外部环境景观设计协调优美,多具人性化考虑,尊重城市传统文化,顺应城市发展趋势,城市综合体景观和城市景观相融,体现了现代设计思路。(5)复合的功能配置.建筑群落内部实现完整的工作生活服务供应,不同功能间相互依存、价值互补,如瑞典斯德哥尔摩中心改建时将行政办公建筑布置在商业和娱乐设施之上,使得该综合体功能多样化、互补化。

其次,社会影响特征主要有:(1)城市名片和文化象征.城市综合体通常会被规划定位为城市地标性建筑,承担城市文化象征的使命,建成后作为城市名片被广为人知,并融入城市对外宣传,吸引各地旅游者,如纽约的洛克菲勒中心、东京的六本木等。(2)区域和城市经济增长极.城市综合体作为一种可实现投资回报的商业地产开发模式,其刺激经济、带动就业的功用明显,使之成为区域和城市经济发展中新的增长极。(3)政府参与度高.城市综合体建筑空间尺度的巨大和功能的综合要求政府必须参与其中,以便高效配置社会各项资源.世界各地政府对城市综合体的开发均大量投入和参与,如巴黎德方斯的开发是由法国总统亲自倡导、由法国政府出面组织建设的。

## 2 城市综合体开发成功的要素分析

### 2.1 城市综合体开发成功的外部条件

城市综合体要开发成功,必须具备特定要素,从外部看,需具备以下条件<sup>[4,5]</sup>:

(1)城市综合经济实力强.城市综合体一般建筑规模都在数十万平方米以上,如此大规模的商业集群要求所在城市经济要达到一定的水平.城市综合体是与城市经济发展相伴生的,城市经济水平要能支撑高度集约的商务办公、酒店消费、休闲购物以及高档居住等终端消费,城市的人均消费水平只有达到一定指标,才能使城市综合体实现良性运营。

(2)区域经济聚集效应突出.以长三角、珠三角、环渤海为代表的城市群聚集效应日益显著,区域一体化的经济格局为城市空间多中心化的发展提供了可能,城市乃至整个区域对城市综合体的市场需求增加.作为城市功能集中体现的城市综合体,对区域经济具有标识性、对城市中心具有强化作用。

(3)项目选址合理.城市综合体的开发对项目选址的要求非常高,根据商圈理论以及国内外成功案例的实践,城市综合体应建在地段优越、交通畅达、商业繁荣的地方,因此城市综合体一般选址于城市中心、交通枢纽地段或城郊大型居住区,通常位于城市主力商圈,区域内有商业、办公需求,有足够的消费人群,其大型购物中心能以城市消费力做支撑,以保障成功运营。

(4)开发商实力雄厚、经验丰富.城市综合体的建筑规模大、投资周期长、物业类型多、管理难度大,其开发建设从最初定位和前期规划设计,到中期开发建设,再到后期运营管理,每个环节都需要极强的专业能力,因此对开发商的资金实力和运营经验要求很高,需要由高水平的商业地产开发、运营团队来完成。

### 2.2 城市综合体开发成功的内部条件

(1)交通有保障.城市综合体对交通,尤其是公共交通的依赖性较强,须具备交通便捷的区位优势,并有多种交通的组合,以保证综合体与城市保持快捷联系,为商业、办公、居住等各项活动提供通达的交通组织。

(2)业态有关联.城市综合体各种业态之间的相互关联性非常重要,包括两方面的关联和互补:一是时段互补,不同业态运营有各自特定的时间范围,将不同功能在不同时段有序组织起来形成互补,以保持繁

荣、彰显价值;二是功能互补,包括设施互补、客源互补和服务互补,不同功能相互联系、相互支撑,从而更具整体性、更有活力。

(3)动线设计合理.城市综合体的动线包括人流动线、车流动线和物流支线.综合体内不同业态应有其独立人流动线系统,同时需考虑从高私密性到低私密性的转移;车流动线应考虑 5 种情况:临时落客、正常行驶、出租车等候、临时停车、地下停车;物流动线应考虑物流服务系统的分离性、隐蔽性等.合理的动线设计是保证城市综合体高效运转的必备条件。

(4)满足商业优先原则.商业与人们日常生活紧密相关,能充分满足各类阶层的消费需求,而且具有最高的竞租能力,因此开发时需首先满足商业的需求,从而更好地吸引人流,创造出更高的物业价值,促进项目整体形象的提升。

2.3 上海五角场万达广场开发成功的要素分析

本例万达广场位于上海市五角场地区,是由大连万达集团开发的典型城市综合体项目.项目基本情况如表 1 所示。

表 1 上海五角场万达广场基本情况

地理位置	位于五角场圈,东临淞沪路,南靠邯郸路,北依政通路,西侧为国宾路
交通可及性	交通便捷,可及性好,20 余条公交线路在此设立站点,如 55 路、61 路、133 路、139 路、538 路、749 路、817 路、910 路、937 路等
建筑面积	40 万平方米
物业构成	商业(26 万平方米)、办公
开业时间	2006 年
开发商	大连万达集团
市场定位	中高档
业态组合	餐饮、服饰、电影院、超市、KTV、食品、黄金珠宝、电器、家具、数码产品、培训中心、书店、服务设施
主力租户	巴黎春天、沃尔玛、黄金珠宝城、第一食品、宝大祥、大歌星、上海书城、万达国际影城、和乐家居
主要零售品牌	SWATCH、WATSONS、SASA、UNIQLO、BURGER KING、STARBUCKS、PIZZAHUT、KFC、味千拉面等

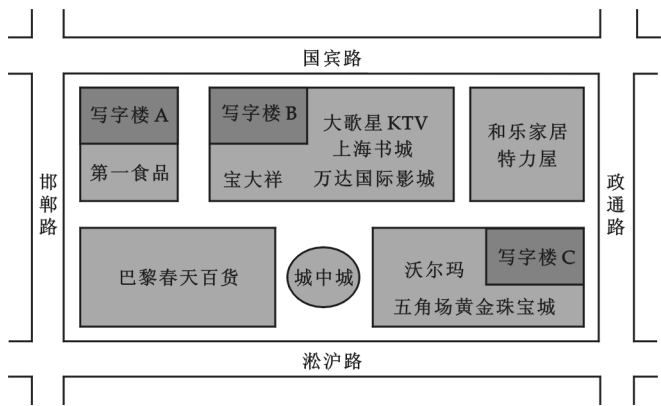


图 1 五角场万达广场平面布局图

五角场万达广场由中、美、日、澳 4 国著名设计公司联合设计,广场平面呈“品”字形布置,划分为 5 幢大型业态的商用群楼和 3 幢甲级高层办公楼,其平面布局如图 1 所示。

结合前文所述城市综合体开发成功的要素分析,从外部条件来看,首先,本项目所在城市上海为国际化大都市,城市综合经济水平高;其次,上海处于长三角城市群区域内的龙头地位,区域经济聚集效应突出;再次,项目选址于五角场,是上海市 4 个市级商业副中心之一,已发展成为较成熟的商圈,交通畅达、商业繁荣;最后,项目开发商大连万达集团拥有专

业的商业地产建设团队,坚持“每个万达广场就是一个城市中心”的理念,其雄厚的实力和丰富的经验保证了万达广场的成功开发。

从内部条件来看,首先,20 余条公交线路在此设立站点,项目周边交通极为便利;其次,项目中业态组合的关联性高,可实现时段互补和功能互补,从而保持繁荣、彰显价值;再次,物业布局 and 动线设计合理,同时体现了商业优先原则,具体表现在以下几个方面:(1)写字楼分布于外部沿街位置,有利于疏导办公人流和车流,且办公人流和商业人流互不干扰;(2)主力店巴黎春天百货位于两条主干道邯郸路和淞沪路交界处,能很好地吸引、聚集人流,同时使项目更加醒目;(3)主干道淞沪路沿线布置黄金珠宝城,彰显项目品

味;(4)第一食品及和乐家居是具有专门特色的商业,分落在广场内部两角,便于组织人流;(5)大歌星、上海书城、万达国际影城为休闲娱乐类商业,集中布置在广场内部中间区域,并通过城中城的空间对外部显示;(6)地下布置颐高数码广场、屈臣氏、运动城等专业市场,并有各种类型和档次的餐饮配套,以服务不同需求和阶层的消费人群;(7)广场内部沿街以及角落布置主力店,餐饮穿插小型购物围绕广场布置,引导消费者围绕室外步行街流动,使项目各部分之间得以融合。最后,项目整体建筑外观出众,颇具现代感和时尚感,不同主力店外立面设计不同且各具特色,整个建筑群风格协调统一,高低错落有致,显示出丰富的层次感,成为五角场地区的新地标。

万达广场具备了上述城市综合体开发成功的必备要素,总体上说是相当成功的,其成功经验值得借鉴,但在实地调研过程中,笔者也发现其中尚存一些不足之处,有待进一步改进:(1)文化元素的欠缺。本项目设计以商业为主,商业气氛浓厚,但与文化的联系较少,与国外先进城市综合体所做到的人文关怀尚存差距。(2)指引标识醒目性和分布不足。本项目建筑群规模较大,所涉及的经营业态和不同门店较多,如果没有足够醒目和足够数量的指引标识,会使购物目的明确的消费者产生抵触情绪。本项目仅在地上各出入口处设立了指引标识,广场内部指引标识不足,地下空间部分这一问题尤其严重。(3)景观生态因素不足。本项目环境营造较为舒适,但绿色的体现尚显不足,仅在广场内部沿街有少量分布,且在生态环境管理的即时性上存在一定问题,这使消费者购物体验的自然感不足,有待改进。

### 3 结束语

城市综合体的开发建设与城市发展思路、规划方向、人口构成、消费水平、文化传统、风俗习惯、开发商资金实力、团队能力和管理水平等均密切相关,若开发成功将成为城市名片甚至城市的文化象征而广为传播,其对区域和城市经济增长的拉动作用非常明显,同时作为一种新兴的商业地产开发模式必将实现投资回报,因此城市综合体的开发值得关注和研究,国内的开发实践可借鉴国外成功案例的先进经验,从规划定位、设计理念、运营模式等多方面取得突破,在不断发展中走向成熟和完善,从而使我国的商业地产开发迈向新的水平。

### 参考文献

- [1] 王 琳. 城市综合体——新的商业地产模式[J]. 城市开发, 2008,(3):83-84.
- [2] 邓雨男. 城市综合体的开发模式[J]. 中国房地产, 2008,(11):50-52.
- [3] 凌常峰,张 红. 都市综合体建设的国际经验及对北京的借鉴[J]. 城乡建设, 2002,(1):50-51.
- [4] 郭向东. 城市综合体交通组织的运行和管理[J]. 中国物业管理, 2008,(1):50-51.
- [5] 郭向东. 城市综合体环境的营造和管理[J]. 城市开发, 2008,(5):72-73.

## STUDY ON CITY COMPLEX DEVELOPMENT: A CASE FROM WUJIAOCHANG WANDA PLAZA IN SHANGHAI

FENG Shuo

(School of Economic and Management, Tongji University, Shanghai 200092,China)

**Abstract:**City complex is a necessary product when the development of the city comes to a certain stage. The author introduces the definition,types and characteristics of the city complex at the beginning of the article, illustrates the essential factors of the success of city complex development in both external condition and internal condition aspects, and carries out demonstration research to the development of Wujiaochang Wanda Plaza in Shanghai, putting forward its successful key point and deficiencies, providing practical methods to improve the development and management.

**Key words:**city complex; development; successful factor; Wanda Plaza

# 基于 SWOT 分析的泉州市旅游形象定位研究

陈均亮

(泉州师范学院资源与环境学院, 福建 泉州 362000)

**摘 要:**城市旅游形象的定位对城市旅游业的发展有着极其重要的意义. 作者在分析泉州旅游形象现状和存在问题的基础上, 借鉴国内外城市旅游形象设计的成功经验, 运用 SWOT 分析法对泉州旅游业的发展现状进行了深入的分析, 并在此基础上提出了基于大尺度空间范围目标客源市场的泉州市旅游形象定位: “山海泉州、文化泉州、品牌泉州”, 以期对泉州旅游形象的宣传和旅游业的发展起到一定的推动作用.

**关键词:**城市; 旅游形象; SWOT 分析; 泉州

**中图分类号:**F592.7

**文献标识码:**A

## 0 引言

城市旅游形象应从两个层面理解, 第一个层面基于供给角度, 主要是指目的地所宣传的自我形象, 这是城市营销者所期望的理想化形象. 第二个层面基于需求角度, 指消费者所持有的感知形象, 即消费者对目的地信念、想法和印象的总和<sup>[1]</sup>. 旅游形象是旅游目的地的生命, 也是形成竞争优势的最有力的工具. 在旅游目的地旅游规划中, 旅游形象的研究与策划是核心问题.

城市旅游定位源自地方独特性, 是旅游城市的自然环境和人文地理典型特征的集中揭示, 也是一种综合性、地域性的自然地理基础、历史文化传统和社会心理积淀的三位时空组合<sup>[2]</sup>.

根据泉州市旅游总体规划, 2015 年前泉州市的旅游业发展的总体定位是以海湾旅游为核心, 充分利用泉州历史文化特色和新兴商贸旅游资源, 形成融自然、文化、商贸为一体的新型独特的现代海滨休闲都市旅游, 将泉州建成一流的旅游地. 要实现这个目标, 泉州需要一个明确的能够获得大量潜在旅游者肯定的旅游形象定位, 面向的市场应该是大尺度空间范围的省外和国际市场, 而不是省内市场或者本市市民. 本文在对泉州旅游业进行 SWOT 分析的基础上, 对泉州的城市旅游形象予以定位, 期望对泉州旅游形象的宣传和旅游业的发展起到一定的推动作用.

## 1 目前国内外比较成功的城市旅游形象定位和泉州旅游形象现状分析

### 1.1 目前国内外比较成功的城市旅游形象定位

城市旅游形象是一座城市在人们心目中综合形成的大众认同的独特的使之区别于其他城市旅游的较稳定持久的总体印象和评价. 城市旅游形象定位, 则是将该城市旅游产品、品牌经过总结概括和提炼升华, 用精辟语言向社会传播并得到社会检验认同, 从而在人们心中确定的形象位置, 例如新加坡的城市旅游形象设计——“无限的新加坡, 无限的旅游业”, 香港——“魅力香港, 万象之都”, 大连——“浪漫之都”, “纯净新西兰”, 杭州——“人间天堂”. 城市旅游形象定位对于塑造城市形象, 扩大知名度, 增强吸引力, 拓展客源市场, 激发当地居民归属感并主动宣传和参与均具有积极意义<sup>[3]</sup>.

\* 收稿日期: 2009-09-17

作者简介: 陈均亮(1972—), 男, 福建省泉州市人, 讲师, 硕士, 研究方向: 旅游发展规划和旅游管理

基金项目: 福建省高校服务海西建设重点项目( A104)、泉州师范学院 2007 年度科技课题(2007KJ018)



## 1.2 泉州城市旅游形象现状分析

目前泉州旅游业发展存在的主要问题是组团外出旅游的人数多,而到泉州旅游的人数、人均停留天数和旅游消费都较少,主要原因是泉州没有拳头旅游产品,旅游景点小而且分散,形象地说游客到泉州旅游看到的是“满天繁星、没有月亮”,至今没有统一、明确的旅游主题定位。近年来,泉州的旅游形象定位不断变换,最早的定位“地下看西安、地上看泉州”,意在突出泉州是历史文化名城,但是这种模仿跟随定位没有突出“最”字和独特性,当然也就吸引不了多少游客;接着是“海上丝绸之路的起点”,虽然突出了独特性,但是这个定位不够通俗,无法用简单明了的几句话来概括它的含义,从泉州旅游局的政府网站到旅行社的接地线路再到专门导游都很难看到和海丝有关的内容便说明了这一点,这样也就只能吸引一部分学者型的游客,而对大部分国内外中长距离的游客没有吸引力;之后泉州又打出了“南音、南戏、南少林”的品牌定位,喜欢“南音和南戏”的目标客源市场人数肯定不会很多,而南少林的名气再怎样也比不过嵩山少林寺;再后来泉州又打出了“海峡西岸名城、多元文化宝库”的城市宣传口号,这倒是突出了泉州地处海西和多元文化特色,但是海西并不是泉州独有,这个定位很难竞争得过附近名气比较响的厦门市,不符合避强定位的原则,而只提多元文化同样也存在着只能吸引一部分对文化感兴趣游客的问题;最近泉州又把“郑成功”的品牌作为一个主打品牌,不管是面对境内旅游市场还是台湾旅游市场,这个定位同样没有考虑到是否能吸引到大量的游客,所以从市场营销的角度看肯定也不能获得成功。在学者、专家的研究中,唐礼智将泉州旅游形象总体定位为:国家级历史文化名城——华南生态旅游地——福建省商务旅游区<sup>[4]</sup>,笔者认为这个定位的可操作性也不强。

一条好的旅游线路应该是金字塔型的,分为3个层次,处于金字塔顶端的是一到两个拳头产品,中间是几个能够吸引游客的重要产品,最下面则有一些点缀的附属产品。这条线路要有一定的层次性和互补性,比如既有观光型的自然风光,又有参与性和体验性的人文旅游资源与民俗风情。泉州旅游业目前存在的最大问题就是没有处于金字塔顶端的拳头产品来吸引中长距离的国内外游客,而要有拳头产品首先就要做好城市旅游形象定位,这样可以根据定位集中资源一方面加大对拳头特色旅游产品的投入,另一方面加大旅游产品的营销工作。

## 2 泉州旅游业 SWOT 分析

### 2.1 优势 S 分析

#### 2.1.1 优越的地理位置和丰富的山海旅游资源

泉州处于海峡西岸经济区,与珠江三角洲和长江三角洲经济区毗连。海峡西岸经济区是我国未来经济发展中的一个增长极,而其相邻的两个地区是我国经济最发达的地区。泉州气候温和,湿润多雨,四季常青,夏长无酷暑,冬短无严寒,溪流多,水资源较丰富,海岸线总长逾 500 km,深水良港数量众多,拥有许多优质的滨海旅游资源。泉州还拥有安溪、永春、德化几个后花园,安溪具有开发茶叶农业旅游的条件;永春有号称“闽南西双版纳”的牛姆林,德化则有国家地质公园和国家森林公园。

#### 2.1.2 丰富的闽南文化及历史资源

泉州是国务院首批公布的我国 24 个历史文化名城之一,文化积淀深厚,素有“海滨邹鲁”、“世界宗教博物馆”、“光明之城”的美誉。这里历史文化积淀丰厚,名胜古迹星罗棋布,文物瑰宝举世瞩目。泉州还拥有 11 项国家级、45 项福建省级非物质文化遗产,其中包括高甲戏、惠安石雕、泉州花灯、提线木偶艺术、南音、梨园戏、惠女服饰、木偶戏、拍胸舞等。惠安女和木偶表演在全国具有很高的知名度。目前,南音剧团的南音艺苑、梨园剧古典剧院已经投入使用,木偶剧院也进入选址阶段。

#### 2.1.3 工业企业品牌众多、经济发达

泉州本地知名企业众多,居民的收入水平逐步提高。晋江的鞋业、石狮的服装、泉港的化工与造船、惠安的建材和石雕、安溪的茶叶和德化的陶瓷等都是全国享有盛名的产品和产业,单单在品牌之都晋江市,截止 2008 年底就拥有中国驰名商标 81 件、中国名牌产品 24 项、中国出口名牌 2 项、国家免检产品 88 项,



获得了中国鞋都、世界茄克之都等 14 项“国字号”区域品牌,这些品牌企业不但增加了泉州的知名度,旅游业也能够和这些品牌企业合作开展工业旅游和休闲购物旅游。

泉州整体经济发达,2008 年地区生产总值(GDP)以 2 705.29 亿元在福建省各市中保持首位,并占全省的 26.12%,在全国 212 个地级市中位居前三名,2009 年 1~7 月泉州经济平稳上升,上半年完成地区生产总值 1 289.42 亿元,与去年同比增长 8.9%,全市城、乡居民收入分别为 12 357 元和 4 270 元,与去年分别同比增长 7.4%和 8.5%。

## 2.2 劣势 W 分析

### 2.2.1 旅游品牌优势不明显

泉州市区作为中心城市,旅游功能尚不完善,服务体系不健全,尤其泉州没有拳头旅游产品,旅游景点小而且分散,景点之间缺少联系。游客到泉州旅游看到的只是“满天繁星、没有月亮”,至于旅游的主题定位则根本没有统一而明确的定位,所以很多人只是顺道看看泉州,并非真正把泉州当作了旅游目的地。由此可见,泉州还不具备旅游集散地的功能,也远未形成真正的旅游品牌,这与泉州在商贸领域品牌突出的优势形成了鲜明对比,其中关键的原因就是旅游品牌定位不清。

### 2.2.2 可进入性差

铁路和航空等大交通的滞后对泉州旅游市场的拓展是有制约的。铁路方面,目前泉州只有到武昌和赣州两趟直达列车;航空方面,目前泉州晋江机场受到了来自厦门和福州航空业的竞争,能有效吸纳的游客数量也被瓜分。在小交通方面泉州现在基本没有制约,沿海高速公路泉三高速公路以及即将建成的福厦高铁等都给泉州旅游市场的发展带来了机遇。

### 2.2.3 资源开发利用不足

泉州的旅游资源丰富,种类齐全,但是对于旅游资源的开发利用却显得明显不足。主要表现在两个方面:一是没有致力于优势品牌的打造,没有形成在市场上有影响力的旅游产品;二是旅游产品相对分散没有形成体系,导致游客在泉州的停留时间偏少,没有有效拉动其他产业的发展。

### 2.2.4 特色旅游资源的没落

泉州的特色旅游资源逐步淡出了人们的视线,例如我国现存最早、最古老的具有阿拉伯建筑风格的伊斯兰教清真寺目前游客数量稀少;受台湾同胞和闽南居民敬仰的天后宫为我国现存建筑规格较高、年代较早、规模较大的一座妈祖庙,其现状却是人迹罕至。

### 2.2.5 景点单一分散,游客停留时间短

目前,泉州的旅游产品结构仍以单一的静态观光旅游为主。旅游资源分散经营管理,没有形成一个统一的旅游品牌。长期以来,泉州各景点各自为政,各打各的品牌,缺乏针对客源市场的调查。适销对路的旅游产品少之又少,使旅游产品很难得到消费者的认同和信任。

据 2007 年旅游部门统计,泉州半数以上饭店是接待散客,其余饭店接待的团队与散客比为 1:5,游客在泉州平均逗留时间为 1.5 天,而厦门为 2.5 天,福州为 6.5 天,可见游客在泉州的逗留时间偏短,泉州没有更好地引导游客的消费,因此旅游业及其上下游的关联产业经济效益不高。

## 2.3 机会 O 分析

### 2.3.1 海西经济区的建立

2009 年 5 月 14 日,《国务院关于支持福建省加快建设海峡西岸经济区的若干意见》正式颁布,给泉州旅游业带来了难得的发展机遇。

### 2.3.2 海峡两岸合作交流日趋深入

泉州地缘相近、血缘相亲、文缘相承、商缘相连、法缘相循,开展旅游合作具有天时、地利、人和的优势。海峡西岸经济区的建立势必会使对台旅游更上一层楼,进行两岸文化旅游的合作,互补互利,必定会给泉州市的旅游业带来良好的发展空间。

### 2.3.3 与侨、港、澳及台湾拥有广泛的血脉联系

泉州是全国著名的侨乡和台湾汉族同胞的主要祖籍地之一。目前全球泉州籍华侨有 620 多万人,港澳同胞中 75 万人,台湾汉族同胞中约 900 万人祖籍源自泉州。泉州籍海外侨胞主要集中在东南亚各国。泉州人民与台湾同胞血缘相亲,语言相通,习俗相近,文化相同。侨、港、澳及台湾同胞为加强泉州与海内外经济文化交流、推动泉州侨乡经济建设和社会发展做出了巨大贡献,成为泉州与世界密切联系的重要桥梁和纽带。

## 2.4 威胁 T 分析

### 2.4.1 周边城市的竞争与合作

厦门独特的地理区位、优越的自然环境和良好的可达性以及国家对经济特区的扶植,使得相比较而言泉州的旅游资源乃至旅游产业在竞争能力上明显偏弱。2008 年“十一”黄金周期间,厦门主要景点累计接待人数 93.7 万人次,门票收入 1 414.12 万元。而泉州共接待境内外游客 76.2 万人次,旅游总收入达 6.32 亿元。泉州应主动融入福建旅游体系并加强与周边地区龙岩、漳州、武夷山等地的合作,与周边地区实现双赢。

### 2.4.2 旅游形象松散及其外延性差

泉州素有“海滨邹鲁”、“世界宗教博物馆”、“光明之城”的美誉,但是在其旅游产品的设计与包装的过程中没有很好的形成一个统一完整的体系。由于泉州各个旅游景点相对分散,又没有形成一个完善的旅游体系,因此对其旅游形象的外延性扩展产生了消极的制约。

### 2.4.3 基础设施相对落后

景区基础设施是否齐备,对发展旅游至关重要。基础设施作为公共设施,属非营利项目,只能靠地方财政投资。其主要投向包括直接为旅游景区配套的旅游道路、垃圾污水处理设施供水供电设施以及景区厕所、停车场、游客中心等配套基础设施、自然环境和文化遗产保护设施建设等<sup>[5]</sup>。例如:泉州各个景区公厕数量极少和卫生状况不到位的情况令旅游消费者尴尬不已,成为旅游消费者反映的热点问题之一。至 2007 年初,全市有旅游饭店 62 家,客房总数为 5600 间以及各类旅行社 73 家,可同时容纳大量游客。但是酒店和旅行社从业人员的服务与专业水平参差不齐,还需进一步提高。

## 3 泉州市旅游形象定位

根据 SWOT 分析的结果,作者提出的泉州旅游形象定位是“山海泉州、文化泉州、品牌泉州”:山海泉州——有山有海的泉州特色;文化泉州——文化底蕴深厚且多元文化共存;品牌泉州——利用泉州品牌之都的特色发展工业旅游和休闲购物游,这 3 个方面是紧密结合的有机整体。

### 3.1 山海泉州——有山有海的泉州特色

这一定位把东部蓝色滨海旅游带和西部绿色生态旅游带有机结合起来,充分体现了泉州的自然旅游资源优势。东部蓝色滨海旅游带包括深沪湾、围头湾、崇武古城、西沙湾、青山湾等,西部绿色生态旅游带包括安溪茶文化生态旅游区、永春牛姆林生态文化旅游区和德化陶瓷文化生态旅游区。

这样,对于大尺度的旅游目标客源市场来说,有山有海,泉州沿海的“蓝色旅游带”与安、永、德“绿色旅游带”形成了优势互补,对于不管是内陆城市的客人或者是沿海城市的客人都具有了一定的吸引力。

### 3.2 文化泉州——深厚的文化底蕴

文化泉州这一定位包含了两方面的含义,一方面泉州的文化底蕴深厚,泉州的风俗习惯和地方艺术既有中原传统悠久的历史渊源,又有土生土长的闽越遗风,中国音乐活化石南音、妙趣横生的木偶戏、“丑”名远扬的高甲戏、鬼斧神工的惠安石雕、风情万种的惠女、安溪怡人的茶道……,这些都体现了泉州深厚的文化底蕴;第二方面是指泉州是一个多元文化并存的历史文化名城,泉州现有各级重点文物保护单位 600 多处,其中国家级 14 处,省级 44 处,拥有现存最古老、最完好的伊斯兰圣迹,最早的伊斯兰教寺,最多的祈风石刻群,最早的海港大石桥,建筑规格最高、规模最大、年代最久远的妈祖神庙,最长的古石桥,最高的石塔以及独一无二的摩尼教寺庙。

### 3.3 品牌泉州——有众多知名品牌,有利于发展工业旅游

品牌泉州包含了几个方面的含义,一是指泉州经济发达,可以大力发展购物休闲游;二是指泉州名牌很多,适合开发工业旅游.游客到泉州可以参观购买的产品既有恒安、七匹狼、安踏、柒牌、利郎、特步、九牧王、劲霸、富贵鸟等日常用品,又有铁观音、德化陶瓷、惠安石雕等地方特色产品.

目前,泉州已形成了以纺织服装鞋帽、石油化工、建材陶瓷、食品饮料、建筑房产、旅游服务业 6 大支柱产业为主导的产业体系,拥有一大批闻名省内外的名牌产品,如恒安、七匹狼、安踏、柒牌、利郎、特步、九牧王、劲霸、富贵鸟、木林森、海天国际、鸿星尔克、旗牌王、三六一度(中国)体育用品、亲亲食品、雅客食品、喜多多食品等.随着国际旅游业的发展,以生产场景、高科技生产设施、厂区环境和企业文化为资源的工业旅游在我国许多地区蓬勃兴起,并成为旅游行业的一个新亮点.工业旅游不同于传统旅游,它以科技含量和企业文化为卖点,企业通过游客的参观游览,向社会展示了企业形象,并获得了更多的社会影响力和企业知名度,可谓“名利双收”,目前国内做得比较好的有以汾酒、竹叶青酒闻名的山西杏花村汾酒集团以及燕京啤酒集团、三精制药等企业.

泉州要建设一批工业旅游点和旅游购物点,把制造业基地、商贸基地的优势充分挖掘出来,使客人到了泉州,看工业旅游点、购买地方特色产品成为必备的程序.

## 4 结束语

本文在分析泉州旅游形象现状和存在问题的基础上,借鉴国内外城市旅游形象设计的成功经验,运用 SWOT 分析法对泉州旅游业的发展现状进行了深入的分析,提出了泉州的旅游形象定位为“山海泉州、文化泉州、品牌泉州”.需要指出的是,本文侧重于泉州城市旅游形象的设计和塑造等前期基础性的研究,对于泉州城市旅游形象的推广将另文探讨.

## 参考文献

- [1]高 静.旅游目的地形象、定位及品牌化——概念辨析与关系模型[J].旅游学刊,2009,(2):25-29.
- [2]陈瑞霞,金 丽.论旅游城市的形象定位——以天津为例[J].北京城市学院学报,2006,(1):44-45.
- [3]朱世香.基于 SWOT 分析的日照旅游发展战略研究[J].区域经济与产业经济,2008,(5):28-29.
- [4]唐礼智.泉州市旅游形象定位与设计研究[J].现代城市研究,2002,(4):56-60.
- [5]张广宇,简王华.旅游地形象定位的理论与方法浅析[J].旅游市场,2009,(4):32-35.

## BASED ON SWOT ANALYSIS OF QUANZHOU TOURISM IMAGE ORIENTATION

CHEN Jun-liang

(School of Resources & Environmental Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Urban tourism image orientation is very important to urban tourism development. By applying SWOT analysis of tourism development on the current situation of Quanzhou tourism, and based on the the domestic tourist market, the tourism image orientation of Quanzhou will be : “Mountain and Sea, Culture Quanzhou, Brand Quanzhou”. I hope this paper can promote the tourism image of Quanzhou.

**Key words:** cities; tourism image; SWOT analysis; Quanzhou

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0163-05

# 论传统文化中色彩元素与视觉传达的关系

李文凤, 弓太生

(陕西科技大学设计与艺术学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**传统文化包含众多的元素,作者对传统文化元素中的色彩元素在现代视觉传达设计中的运用与影响进行了研究,分别就中国传统色彩在包装设计、标志设计以及环境设计中的运用进行了论述,并阐释了如何实现现代元素与传统文化元素在现代视觉传达设计中的完美统一,最终达到在现代视觉传达设计中传承和发展优秀传统文化的目的。

**关键词:**传统文化; 色彩元素; 现代视觉传达设计

**中图分类号:**J524.1

**文献标识码:**A

## 0 引言

中国数千年来形成了自己独特的传统文化,作为传统文化众多元素之一的色彩元素在现代设计领域中发挥着重要的作用.在科学技术高度发达的现代社会中,这些优秀的传统文化并没有过时,而是以其持久的生命力和独特魅力影响着现代社会的每一个角落.那么传统色彩元素对现代视觉传达设计到底有着怎样的影响,我们又该如何去继承发展呢?

对于传统文化的解释,著名民艺家张授一先生认为“传”即传播和流传,“统”即一脉相承的系统,总的来说是指一个国家或民族由历史沿传来的思想、道德、人伦、风格、艺术、制度等,概括起来主要是表现在文化方面<sup>[1]</sup>.而对于传统文化如何继承这个问题上,张道一先生的看法是“张果老倒骑驴,骑在驴上向后看上下几千年,纵横数万里,形形色色,五花八门,在比较中鉴别,在现象中归纳,理出一条思路,驴儿驮着往前走,走向新的时代,不是固守于旧的迂腐不化,而是创造者开拓新的未来。”

## 1 传统文化对现代视觉传达设计的影响

现代视觉传达设计是建立在文化基础之上的,传统文化的审美追求潜移默化地影响着现代设计的思想,而现代设计的思想反过来又影响着传统文化的审美观念.在现代视觉传达设计中,无论是图形要素、色彩要素、文字要素,还是其他的一些要素都包容于文化之中,这决定了其设计也被深深地烙上了民族文化的印迹.传统文化元素的应用有助于现代设计的发展,作为设计师,我们有必要将其在现代设计的领域中传承并发扬光大.

视觉传达设计(Visual Communication Design)是以视觉生理和心理为机能,以图形符号和色彩为主要视觉元素,以二维、三维和多维等形态为载体并基于不同目的的视觉化设计.设计既然是让人由目入心地去欣赏、去接受的,那么它就是有气质、有魅力、有生命力的,换句话说它有自己的精神面貌,有自己的神韵.视觉传达设计的神韵决定其它生命力的长短,而这个神韵却往往来源于传统文化.

中国传统文化的神韵体现在很多方面,如构思上的“以一当十”、“以少胜多”,构图上的“计白当黑”

\* 收稿日期:2009-09-02

作者简介:李文凤(1979—),女,山东省潍坊市人,在读硕士生,研究方向:设计艺术学

等<sup>[2]</sup>,这些都为现代设计提供了大量的营养.此外,其讲究均衡和内在的节律,以及我国篆刻艺术中常用的所谓“疏可走马,密不透风”的布局法则,符合科学上相对的原理,也符合艺术上形式美的规律.同时它突破了自然主义和形式主义的片面性,是一种经过高度提炼的美的精华,是积淀了内容要求的形式之美.正因为如此,它才具有无穷的生命力.

在传统文化的神韵传承中,高明的设计师不是直接引用符号,而是将传统文化的表达形式、意蕴、审美方式综合起来,形成自己独特的设计方法,从而再达到与传统“神似”的目的,这些对于现代设计都有着非常重要的参考和效仿意义,从而使我国的平面设计产生了一系列设计准则和方法,比如动与静、疏与密、多样统一、宾主呼应、虚实相生、纵横曲直、黑白对比、重叠交错等等.由此看来中国传统文化的传统神韵美学观对现代设计自始至终都产生着深刻的影响.

## 2 传统色彩在现代视觉传达设计中的运用

色彩在现代设计形式传达中起着先声夺人的作用,它既是一种感受,又是一种信息.在传统文化影响下,现代色彩返璞归真,原始而真情,并呈现出多样化的特点.

色彩作为一种抒情表意的元素,作为对美的一种追求,参与了一个民族的发展,也折射出一个国家的文明表现.它促使我们更深入地探索传统色彩的无限疆域,通过借鉴传统的色彩组合,在现代视觉传达设计中创造更符合时尚的色彩<sup>[3]</sup>.传统色彩在现代视觉传达设计中的运用体现了一种文化心理状态,影响着现代视觉传达设计的发展并为现代视觉传达设计提供了丰富的视觉语言.脱离了对传统色彩的运用,那么现代视觉传达设计将会黯然失色.

### 2.1 中国传统色彩“五色观”

在以《周易》阴阳五行为基础形成的中国传统哲学观念的影响下,色彩被纳入阴阳五行学说的理论体系.古代的中国以阴阳五行之说解释天地间的一切事物.方向以青、赤、白、黑、黄 5 种颜色表示,五色的色彩体系与图腾化神祇相合即青龙、白虎、朱雀、玄武、中央黄色,与人格化神祇相合即东方青帝、西方白帝、南方赤帝、北方玄帝、中央黄帝.

由此,色彩化生出五方正色,五方间色,有了高下等级的划分和特殊的象征意义,有的颜色还有严格的使用禁忌.传统色彩的使用不再是人的本性对颜色的快感诉求,而更多地蕴含着某些象征性的意味,如中国的京剧脸谱用色彩表示忠奸、善恶、美丑,显现出明确的概念化符号特点.红色表示赤胆忠心,白色表示奸诈小人,黑色表示刚直和勇敢,紫色表示智勇刚义,金银表示神仙鬼怪,黄色对武将表示骁勇善战、残暴,而对于文士则表示颇有阴谋,绿色表示狭义心肠、性格暴躁等等.

民间木版年画大多用 5 色套印,强烈的色彩并置效果响亮明确.图 1 为山东潍坊杨家埠的木板年画武财神而民间刺绣、泥塑(如图 2 中的泥老虎)中也多用 5 色,它体现了中国传统艺术用色的基本准则,积淀着深厚历史文化精髓的五行色彩的综合使用成为了华夏民族审美的最高标准.在中国水墨绘画中“墨分五彩”,在单一的颜色中建立起了丰富立体的多彩世界.全面系统地了解“五色观”及其色彩文化内涵,有助于中华民族在全球一体化的世界文化格局中保持鲜明的民族色彩个性.随着数字化时代的来临,传统的经典色彩已经面临数字色彩的挑战,人类的色彩活动必将进入一个崭新的时代,其中传统色彩将会随之愈发灿烂绚丽而不会失色.

### 2.2 传统色彩与包装设计

在中国传统的包装设计中,色彩的配色素材的来源非常广阔,可乞灵于古老的民族文化遗产,从一些原始、古典、传统、民间、少数民族的艺术中祈求灵感,如原始岩画中单纯、拙朴、强烈的色彩;工笔重彩中浓烈、华丽的色彩;宫廷及上层社会使用的器物中象征权力与富贵的富丽、浓艳的色彩;或者象征了中国文人出世、超脱的精神境界的含蓄、淡雅、清新的色彩等<sup>[4]</sup>.虽然色彩本身难以构成独立的形象,但它所营造的



图1 山东潍坊杨家埠的木板年画武财神



图2 民间的泥塑老虎

氛围却能给人留下深刻的印象,同时也使包装设计作品更富有表现力。

享誉中外的设计大师——陈幼坚先生也善于运用中国传统色彩,让东西文化在他的设计理念中合理地融合。他的作品既富有传统神韵又不失时尚品味的优雅。他的一幅茶叶罐的设计作品以“黑黄红”色调为主,在大面积的黑色中装点着雅致的红与黄,中国味浓重,堪称陈幼坚设计艺术的精髓,让人强烈感受到了闲人品茗的雅士风度。“酒鬼”酒的包装采用天然陶土色、润肤膏包装用贝壳磷光色,既直观又美观。这些成功案例给我们的启示就是在传统色彩的运用上,除了直接套用以外还可以根据商品色彩进行概括、提炼、大胆想象和创造,从而赋予商品包装特定的情感和内涵。

传统色彩的运用并不一定就是单纯地将色彩涂在包装纸面上,还可以将某一色彩图形因其色而用其形地用在包装设计中。比如,中国传统的书法、国画、剪纸、刺绣等工艺以及诸如戏剧、服饰、脸谱与道具、建筑、家具、生活用品、纺织印染等物品的装饰图案纹样等,只要与被包装的内容物有较密切的联系,且运用合理得当,都可用来作为体现传统色彩风格的手法,如图3稻香卤咸猪手的包装和图4土特产食品的包装设计既体现了包装的文化内涵与风俗意境,又达到了色彩与意境的统一。当然这也充分说明了传统文化的各种元素都是相互依存、相互影响的,我们在运用其某一个元素的同时也要充分考虑其他元素的应用。

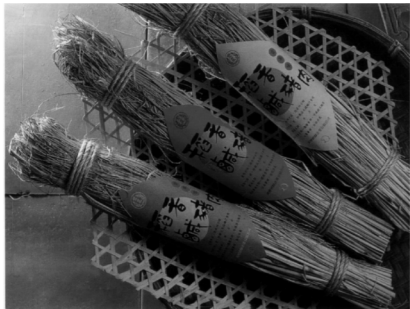


图3 稻香卤咸猪手包装



图4 土特产食品包装设计

### 2.3 传统色彩与标志设计

传统色彩最大的特点就是在刺激之中透着浑厚,浑厚之中又最贴切地展现着抽象的东西所带给人们的具象联想,所以说传统色彩用在现代设计中是非常醒目甚至是非常醒心的。

中国国旗和国徽两个标志设计在色彩上就用了中国传统的大红色和金黄色,并合理相间,相互辅托,成功地表现了国家的瑰丽色彩和中华民族文化艺术的特征,成为色彩设计的典范。“中国印—舞动的北京”,这个会徽将肖形印、中国字和五环徽有机地结合起来,充满了深沉的活力。寸幅之地,凝聚着东方气韵;笔画之间,升华着奥运会精神,这是历史与现实的交融,是奥运精神与中国文化的完美结合。这一切,既浓缩了我国古代印章由字而画的发展轨迹,也诠释了我国古代哲学力求中庸的主流观点。再加上象征中国的红色印泥和巨型方印,使得“中国印—舞动的北京”积聚了大量的历史信息和富足的文化精髓,并将传统精神与现代意识融为一体,是传统色彩与现代设计结合得很好的范例。

## 2.4 传统色彩与环境设计

一个城市的环境色彩与城市的历史一样悠久,生产的过程本身就积淀着城市的历史,同时也反映着这个城市的环境风格以及文化积淀.如果一座城市随意破坏其传统文化色调,则等于将历史割断,等于将一本绚烂多彩的历史画卷扔进了水中,捞起来就会色彩脱落,只剩下了单调的黑白.

中国古代的匠师在建筑装饰中最敢于使用色彩,也最善于使用色彩.五行学说中的五色、五志和紫禁城中的建筑色彩也有很大联系.在五行学说中赤色象征喜,所以紫禁城的宫墙、檐墙都用红色,宫殿的门、窗、柱、框也一律用红色,而且是银朱红色.坤宁宫的室内红色更为鲜明,朱红壁板上的[囍]字用沥粉贴金,可见紫禁城建筑色彩的运用受五行学说的影响之深.此外,在建筑上能够使用朱红颜色的就只有亲王府邸和寺庙了.而平民建筑的门柱多油黑色,只是在过年时贴红对联,结婚时用红喜字、红信箋、红服饰而已.北京社稷坛,体现五行中的五色最为明显,它不仅在基坛上放置表现方位的五色土,而且坛的四周矮墙也按五行中的颜色绘出各色的琉璃玻璃瓦顶,东方为青蓝颜色,南方为赤色,西方为白色,北方为黑色,中央为黄色,这样的布置体现了古代五行中方位和色彩的关系,也体现着色彩对环境设计的影响.

## 3 传统文化的继承与发展

传统文化的诸多元素对现代设计的影响并不是能用几句话、一篇论文所能阐述全面的.但是总而言之,现代设计无时无刻不在地受着传统文化的影响.在视觉传达设计方面,我们既要尊重民族艺术的独特性,体现中华民族的审美心理,又要反映现代人的内在精神追求.传统设计中的元素都对现代的设计有着很好的启示作用.

时至今日,我们所处的是一个高度现代化、信息化的社会,随之而来的新思想、新观念以及国外各种艺术思潮的涌入对中国的传统文化艺术带来了前所未有的冲击,在这种情况下,我们面临着一个如何认识传统文化与视觉传达设计的关系的问题,也就是在我们的视觉传达设计中传统文化艺术何去何从的问题.完全背离传统显然是不可取的,对西方现代艺术纯粹的模仿、简单的挪用将使我们的视觉设计丧失民族个性,因此对传统文化继承是必要的,也是必然的.中国的现代视觉传达设计要走出一条自己的路子,必然是建立在中国的传统文化基础之上的,香港一些著名设计师的成功之路就充分地说明了这一点.失去了传统就意味着失去了赖以生存的土壤.

## 4 结束语

当然,继承并不意味着拘泥.几千年的文明史固然给我们留下了一个多姿多彩的艺术宝库,但一味沉迷在传统的襁褓里,在我们的设计中单纯地奉行“拿来主义”,没有新鲜血液的注入,将会导致民族传统艺术发展的停滞,最终只能是我们将时代留下大批古董拷贝,而无设计可言.继承并发展一切优秀的文化传统是设计创新的前提.当然我们要对中国传统文化有足够的了解,寻找到我们民族传统文化中为其他民族所不及的思维优势和独特风采.只有这样,才能将中国传统文化这朵艺术奇葩、这块历史瑰宝展示给世人并永远传承下去,也只有这样,我国的现代视觉传达设计艺术在国际竞争中才能立于不败之地,现代视觉传达设计的个性特征才会以新的姿态、新的文化意义在国际设计舞台上展现中国的时代风采.传统文化对于视觉传达有着深刻的影响,两者之间是不可分离的.

## 参考文献

- [1] 耿昌军. 传统文化对现代设计的影响[J]. 装饰, 2001, (4): 56.
- [2] 李砚祖, 著. 视觉传达设计的历史与美学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001, 1.
- [3] 尚 华. 包装色彩创作的源泉与启示[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 150-151.



[4] 黄 静. 现代包装设计中的传统文化元素[J]. 包装工程, 2005, 26(1): 180, 181.

## RELATIONSHIP BETWEEN TRADITIONAL COLOR ELEMENTS AND VISUAL COMMUNICATION

LI Wen-feng, GONG Tai-sheng

(School of Design and Art, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Traditional culture contains many elements, this paper tries to analysis the use and impact of traditional cultural elements, such as color elements in modern visual communication design, and interpretate that how to reach perfect unity for modern elements and traditional cultural element in modern visual communication design, and ultimately achieve the aim of heritating and developing excerent traditional cultural in modern visual communication design.

**Key words:** traditional culture; traditional color elements; modern visual communication design

(上接第 148 页)

[29] Dugal HS, Swanson J W. Effect of polymer mannan content on the effectiveness of modified guar gum as a beater adhesive[J]. Tappi, 1972, 55(9): 1 362-1 367.

[30] Derek Abson, Brooks D F. Wet-end behavior of dry strength additives [J]. Tappi, 1985, 68(1): 76-78.

[31] 刘全校, 龙 柱, 杨淑蕙, 等. 木素在材料领域中的应用[J]. 天津造纸, 2003, (3): 26-29.

[32] 杜 煜, 文志军, 张安龙. 木素及其衍生物在造纸工业中的应用研究[J]. 纸和造纸, 2003, 5(3): 40-41.

[33] 石 岩, 鲁 杰, 谢来苏. 木质素在育果套外袋纸中的应用[J]. 造纸科学与技术, 2002, 21(1): 17-19.

[34] 徐 腾. 大豆蛋白质纤维试制特种纸[J]. 造纸信息, 2002, (6): 23.

[35] 袁 超, 杨 光, 杨 波, 等. 纸板用大豆蛋白胶粘剂的研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 723-726.

## RESEARCH PROCESS AND APPLICATION OF NATURAL POLYMERS IN PAPERMAKING INDUSTRY

LI Pei-yi, ZHANG Mei-yun, LIN Chun-tao, LI Li-ge

(1. School of Papermaking Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. China National Light Industry Paper Machinery Group Corporation, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** The paper introduced the natural polymers, including chitin/chitosan, amylose, and lignin, soybean protein fiber, and their research and application in papermaking industry.

**Key words:** nature polymers; chitin/chitosan; amylose; lignin; soybean protein fiber

# 白酒包装中符号价值与符号消费的关系

熊 静, 徐人平, 王坤茜

(昆明理工大学艺术与传媒学院, 云南 昆明 650093)

**摘 要:**目前人们的消费已不仅仅是一种物的消费,更多的是一种符号消费.从“物的消费”过渡到“符号消费”成为当今消费社会的突出特点.包装作为一种符号,体现了一个品牌的价格定位和品牌诉求,是同一个品牌定位的外化的符号.包装不仅向消费者传达了其产品本身的使用价值,也传递了该品牌产品的符号价值.作者从白酒包装的角度出发,阐述了白酒包装的符号价值和符号消费,由此得出了其符号价值和符号消费之间的关系.

**关键词:**符号消费;符号价值;白酒包装;品牌

**中图分类号:**TB482

**文献标识码:**A

## 0 引言

消费是人类生存的必要条件,也是人类活动的目的和归宿,人们的消费状况反映了社会的发展状况和人们的生活状况.消费既是一种经济现象,也是一种社会现象.不同的消费方式往往反映了个人、群体的身份认同和社会地位,也可反映出一个社会宏观的社会结构、社会的平等和公正等问题.当今社会已经进入从“物的消费”过渡到“符号消费”的时代,符号消费的产生使得消费者愿意为这些符号价值去购买高价的产品,消费者通过消费这些符号获得了超出物品使用价值之外的符号价值.包装是品牌符号的基本表现,也是同一个品牌定位的外化的符号,并且是区别于同一品牌的其他产品特有的符号.消费社会中的消费既是对物质本身的消耗,又是对符号价值的占有,既有物质效用的一面,更有象征意义的一面.

## 1 符号价值与符号消费理论

符号是一个抽象的概念,它通过一定的媒介传达其形态所包含的内容,传递某些含义.“在交际的过程中,通过某种有意义的媒介物传达一种信息,这个‘有意义的媒介物’就是符号”<sup>[1]</sup>.瑞士语言学家费迪南·德·索绪尔(Ferdinand de Saussure)认为,符号是能指和所指的结合体,能指(听觉)和所指(概念)是构成符号的两个要素<sup>[2]</sup>.能指(signifier)是呈现符号形式的事物;所指(signified)是作为物而呈现的符号背后的意义,二者不能孤立存在,它们的有机结合构成了符号.

### 1.1 符号价值

消费社会中,消费是“一种操纵符号的系统性行为”<sup>[3]</sup>,消费的核心在于商品的符号价值.所谓符号价值是指把产品作为符号在消费时是按照其所代表的社会地位和权利以及其他要素来计价的,而不是根据物的成本和劳动价值来计价的.就像我们购买私家汽车,事实上,我国大多数人购买和使用汽车只是作为一种象征性符号,代表了其地位身份和财富,而从经济理性来考虑,人们会发现购买汽车是不划算的,使用私家汽车的费用远远高于使用公交车或出租车的费用.但人们为什么还乐此不疲地购买汽车呢?理由很简单,私家车属于自己,是一种符号,代表了身份地位和现代生活的时尚性标志.

\* 收稿日期:2009-09-20

作者简介:熊 静(1983—),女,四川省成都市人,在读硕士生,研究方向:产品开发与设计

## 1.2 符号消费

法国人让·波德里亚在《消费社会》一书中指出:只要把商品当作表达意义和信息的符号来操纵和使用,它就属于“符号消费”<sup>[4]</sup>。所谓符号消费是指消费者在选择商品的过程中所追求的并非商品的使用价值,而是商品所包含的附加性和消费者对声望、社会地位以及权利等的满足感,是具有一定象征性的概念和意义,即对这些符号所代表的“意义”或“内涵”的消费。符号消费的重点在于将消费品作为符号表达的内涵和意义本身作为消费的对象。

## 2 包装与品牌符号

### 2.1 品牌符号

随着新经济时代的来临,品牌(Brand)正充斥着整个世界,它不仅仅是一种标志和市场中的专用术语,也是我们这个社会的符号,品牌是一个重要的符号,很多消费的文化意义、象征意义都是以品牌为载体的<sup>[5]</sup>。一个品牌作为符号表达了商品的档次、信誉以及消费者的身份、荣耀、品味和心情。

从品牌思想发展的历史来看,品牌和符号学一直是紧密联系在一起的,品牌符号就是把品牌作为一种特殊的符号<sup>[6]</sup>。美国《商业周刊》和国际品牌咨询公司 Interbrand 联合发布的 2006 年度全球最具价值品牌 100 强中,全球十大最有价值的品牌美国占了 7 席,其强势的原因是美国品牌最能用有效的品牌符号与世界沟通。

### 2.2 包装与品牌符号

产品的包装成为商品与使用者之间沟通的媒介,传达商品内涵和设计思想,赋予商品新的生命。包装是一个品牌定位的外化的符号,把品牌定位有效地传递给目标市场,包装起了很大的作用。产品包装具有保护产品性能、传递品牌内涵和识别品牌等作用,不仅起着保护产品使用价值的作用,而且对建立强化品牌定位,即在你的客户心目中建立一个独特的、不同于竞争对手的产品差异点时起着非常重要的作用。从这个意义上讲,包装是一个品牌定位的外化,它用自身外在的因素阐释和支撑了定位的存在。

包装除了保护商品、方便运输外还有促销的作用,目的就是创造商品的附加价值,最终影响消费者的观念及行为,树立商品品牌,并取得营销战略的胜利<sup>[7]</sup>。包装是品牌符号的基本表现,是作为同一品牌外观上的示差符号,传达了产品本身的格调、档次和美感,已经成为消费的对象,成为消费过程中的一个组成部分。包装可以迅速而简明地告诉目标受众这类产品的消费对象是哪些,它传达了品牌与众不同的个性特征。许多优秀品牌极为重视包装对品牌的定位作用,并通过包装加强了品牌识别,促进了品牌内涵的传播和对目标受众的吸引力及识别记忆,而不是为包装而设计。

## 3 白酒包装的符号价值和符号消费

### 3.1 白酒包装的符号价值

白酒的包装也是一种符号,白酒包装的符号价值从传统意义上讲是为了方便消费者购买,也是给消费者区分同一品牌不同产品的符号,但是现在的产品包装比传统意义上的包装增加了许多附加值,白酒包装的符号价值在于由白酒的包装所塑造出来的价值,这些形成了品牌的意象,形成了附加值并成为消费者感性的选择对象,比如说包括它在品牌中的档次、知名度等等。它不仅具有方便消费者购买的功能,而且还具有信息传递的功能。比如说国窖 1573(见图 1)、贵州茅台(见图 2)、宜宾五粮液(见图 3)等高端白酒深受成功人士的喜爱,不仅仅是由于它的品质和口味,而在于大家通过这几款包装都知道这几款酒在人们心目中的符号价值,都知道这里包装的白酒是品牌酒中的高端酒,它能把产品的包装作为一种符号给消费者带来除了酒本身的使用价值外更多其他的附加值,这种附加值就是产品包装的“符号价值”。包装的符号价值也正存在于同一品牌商品之间的差异,这些差异不仅是商品本能上的,而且是符号上的,包括质量、档次等等,这种包装的差异构成了特定产品的独特性和差异性的符号。白酒包装的符号价值通过两方面表现出

来:第一是本身的独特性符号,即通过造型、色彩等设计来显示与其他商品的不同和独特性,第二是通过包装显示出该品牌的社会象征性.



图 1 国窖 1573



图 2 贵州茅台



图 3 宜宾五粮液

### 3.2 白酒包装的符号消费

在这个以符号为主要特征的消费社会里,品牌白酒的消费中符号消费显得尤为明显.在重要的社交中,消费者消费高端白酒的主要目的不是为了消费白酒本身,而是为了通过包装的符号价值来彰显自己的经济地位、政治地位、文化地位等阶级或阶层差别,以使地位、品位、身份等象征意义得到满足.因而作为消费符号,白酒的包装成为企业与消费者之间交流和交换的对象,包装则是交流的媒介.白酒的包装符号是对消费者进行的关于产品的诠释,包装的作用就是作为一种符号来引导消费者消费.白酒的包装成为区分同一品牌商品之间差异的手段,让消费者通过认知该产品的包装而决定购买.

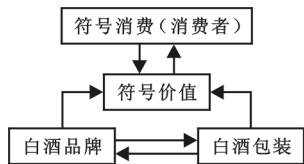


图 4 白酒包装的符号价值与符号消费关系图

### 3.3 白酒包装的符号价值与符号消费的关系(见图 4)

(1)白酒包装中包裹着品牌的符号价值.包装体现了一个品牌的价格定位和品牌诉求,品牌要通过包装来区分自己的产品结构,通过包装你就可以迅速而简明地告诉你的目标受众,你的产品是卖给谁的,它传达了品牌与众不同的个性特征.就像茅台、国窖、五粮液一直就是采用原样的包装,它所传递的信息与内在的产品魅力一样具有穿透力,这几款的包装强化了品牌的高品质形象定位.

在现代消费社会中,包装的价值已经从一个单纯保护商品的功能上升到提升和凸现品牌定位的更高层上来了.产品包装具有保护产品性能、传递品牌内涵和识别品牌等作用.产品包装不仅起着保护产品使用价值的作用,而且可强化品牌定位.包装是一个品牌定位的外化,它用自身外在的视觉因素阐释和支撑了品牌定位的存在,通过包装可以促进与强化一个品牌定位在客户心目中的塑造.产品包装往往以其独特的形状把自己的产品定位与竞争对手区别开来,而且很多产品从一开始就用包装特有的符号作为建立自己品牌形象的有效手段.

(2)白酒包装的符号价值引导符号消费.包装成为促进与强化一个品牌定位在客户心目中塑造的重要营销手段.符号价值的出现给消费者了一种新的消费观,为什么在一些重要的场合人们都喜欢选择像五粮液、国窖 1573、茅台等高端白酒呢?如果说用传统的物品价值观念来看,这类包装的酒在酒质上比其他白酒也好不了多少,但是为什么在一些交际、应酬场合人们喜欢选择这些高价的白酒呢?用“符号价值”来分析,就会全然明白这几款白酒的目标消费群定位是品味极高的成功人士,是针对这些人士对生活追求尊贵品质、身份化的特点,特别推向市场的高端白酒品牌.它不仅仅局限于“物品价值”的消费,而更重要的是因为它的符号价值能够给消费者带来更多的附加值,能够彰显消费者的社会地位、身份和品位以及其他心理体验,品牌与产品的包装往往支配着消费者的购买决定.

(3)符号消费更加强化了白酒包装的符号价值.包装的符号价值能够引导消费者进行符号消费,反之,符号消费更能强化消费者对包装的符号价值,两者是互相促进的关系.白酒的包装赋予了白酒本身的符号

价值,消费者根据其符号价值进行消费.一方面消费者以消费高端白酒作为一种彰显自己身份、地位的符号,另一方面更显示出消费者对该包装的品牌的信任,从而消费者在消费中更加强化了白酒包装的符号价值.符号消费的产生,也使产品包装的符号价值得到了自然而然的提升.

#### 4 结束语

从包装的符号价值与符号消费的关系中可以看出,两者是相互影响、相互作用的,包装能够作为品牌的符号向消费者传递其符号价值,引导消费者而消费.我们正处于从“物的消费”过渡到“符号消费”的社会中,符号消费已经成了当今消费社会的突出特点,符号消费的实质在于社会身份的建构.人们消费这类产品,不仅仅是为了消费产品本身,更重要的是通过消费产品的符号价值彰显自身的符号.一方面它是一种在人的社会活动中反映个体在社会关系中地位的重要方式以及社会成员表现其自身身份的重要手段,另一方面符号消费也带来了一些负面的影响.随着社会经济的发展,越来越多的人有能力进行符号消费,虽然这能促进消费,给企业带来更大的经济效益,但是如果过度的崇拜将容易形成拜物之风,导致大量社会资源的浪费,最后造成社会风气的浮华,形成非符号不消费的误区.

#### 参考文献

[1] 俞建章,叶舒宪.符号:语言与艺术[M].上海:上海人民出版社,1988.  
[2] (瑞士)费迪南·德·索绪尔(著),屠友祥(译).第三次普通语言学教程[M].上海:上海人民出版社,2002.  
[3] 茹春亚,黄爱华.社会转型期符号消费的伦理学分析[J].理论与改革,2003,(6):113-116.  
[4] 波德里亚.消费社会[M].南京:南京大学出版社,2001.  
[5] 过山.品牌塑造与包装设计[J].包装工程,2002,(3):101-102.  
[6] 张锐,张 巍.品牌学-理论经常与学科发展[M].北京:中国经济出版社,2007.  
[7] 胡绍中,冯 彬.中国白酒与包装设计[J].包装工程,2005,(2):175-176.

## RELATIONSHIP BETWEEN SYMBOL VALUE AND SYMBOL CONSUMPTION OF PACKAGING OF LIQUOR

XIONG Jing, XU Ren-ping, WANG Kun-qian

(College of Art and Media,Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Nowadays, the world has developed into a world of symbol consumption. Consumption is not only a kind of material consumption, but also a kind of symbol consumption. Transition from “material consumption” to “symbol consumption” is an outstanding characteristic of nowadays' consumption. As a symbol, packaging embodies a brand's price orientation and brand's implications. It's an external symbol for a specific brand. Packaging delivers not only the value of the product itself, also the symbol value of the brand. This paper expatiate on symbol value and symbol consumption of liquor packaging, and further analyzes the relationship between symbol value and symbol consumption.

**Key words:** symbol consumption; symbol value; packaging of liquor; brand

# 我国篮球后备人才培养模式的探析

唐开荣<sup>1</sup>, 赵学峰<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学体育部, 陕西 西安 710021; 2. 张掖医学高等专科学校体育部, 甘肃 张掖 734000)

**摘要:**对“大超”(大学生篮球超级联赛)培养模式与现行的篮球人才培养模式进行了分析,指出了我国在篮球后备人才培养中存在的问题,而“体教合一”的培养模式能够很好地解决运动训练与文化学习之间的矛盾;随着当代竞技体育的发展,运动训练日趋科学化,大学生在体能与智能上有着较大的适应性和优势,完全有条件、有可能成为我国竞技体育发展的中坚力量,通过提高运动员的文化素质来加速提高其运动技术水平必将成为我国竞技体育发展的一个方向。

**关键词:**篮球; 后备人才; 培养模式

**中图法分类号:**G841

**文献标识码:**A

## 0 引言

近些年来,我国篮球运动得到了蓬勃发展,建立了多支优秀的运动队伍,培养了一批批优秀的运动员和教练员,同时建立和完善了全国竞赛制度及长期的训练制度,但在国际篮球比赛中却一直没有更大的突破,为什么会出现这样的情况?从篮球运动发达国家美国来看,NBA 现役球员有 486 人,优秀球员储备 18 000 多人,参加基础训练的青少年达 37 万人;CBA 现役球员 280 人,优秀球员储备 900 余人,优秀球员未来储备 6 000 多人。种种迹象表明,我国传统的篮球人才训练渠道正在日益萎缩,而高校的巨大能量还没有得到充分的开发。NBA 之所以如此繁荣,很大程度上取决于其良好的后备人才体系,即小学、中学、大学、NBA 这一完整的学历教育和运动训练相结合的培养体系,我们称之为“体教合一”。建立和创新这一模式势必会在未来的发展过程中为中国篮球造就一大批高校篮球新星,也必将成为中国篮坛的又一亮点<sup>[1-3]</sup>。

## 1 现行篮球后备人才培养模式分析

### 1.1 先成名后上学的篮球人才培养模式

目前国内有部分高校为了在较短时间内出运动成绩而采取了急功近利的办法,即将一些已成名的运动员招入高校,代表学校在国内参加不同的比赛,以示“教体合一”,这些人名义上是大学生,但实际上很少在大学正式接受教育,其真正的目的是以运动员的竞技能力和水平换取文凭。这种模式对运动员人才培养机制造成了混乱,对各类赛事的公平、公正性带来了极大的冲击,对体育后备人才培养也是一种浪费资源的无效投资,非常不利于篮球后备人才事业的可持续发展。

### 1.2 “大超”培养模式

“大超”(大学生篮球超级联赛)培养模式是将优秀的体育后备人才与高校教育相结合的一种培养模

\* 收稿日期:2009-07-31

作者简介:唐开荣(1974—),男,甘肃省张掖市人,讲师,研究方向:体育教学与训练

式.在已往的培养体制中,退役球员以及淘汰球员的转型就业问题是一个难以解决的突出问题.这些球员由于一直在运动队中训练,没有正规文化课教育背景,所以退役后在知识经济发展的今天很难在竞争激烈的社会中立足.由于篮球人才选拔的淘汰率过高以及旧体制下大型企事业单位“养”球队的光景不在,导致更多的家长不再情愿让孩子去从事这个“风险”较高的行业.而“大超”则提供了一个新的模式,可以更好地解决这两者之间的矛盾问题,并且高校的校园氛围可以熏陶这些优秀篮球运动员的场外气质,还可以通过高水平课堂的教学使这些运动员学到先进的科学文化知识.由于大体协、国家篮协的大力支持推广以及各知名高校的加入,迅速提升了大超联赛的知名度和影响力,也吸引了众多国内外知名企业的赞助,为联赛注入了可观的资金并提供了比赛装备,在一定程度上促进了联赛质量的提高,同时加入大超的各个名校都有自己独特的校园文化和底蕴,也使得球员通过校园的熏陶为自己汲取到了更充足的养分.如今的大超联赛,以前面所述的种种优势吸引着八方的眼球,各校出于对比赛成绩的竞争以及对优秀教练的需要展开了对专业队教练,甚至国家级教练的激烈追逐,目前大超联赛中有专业队执教背景的教练已占半数左右,其中不乏国字号的教练.高水平教练以及高水平队员的引入势必有助于联赛实现其培养优秀篮球人才的目的<sup>[4,5]</sup>.

## 2 新体制下篮球运动后备人才的最佳培养模式——“体教合一”

### 2.1 新时期的篮球人才培养模式——“体教合一”

传统的篮球人才培养模式由于存在成才率低、人才浪费严重、转型不利而使球员难以在社会立足、生存等问题,因此家长们更愿意把孩子送往学校学习文化知识而不是送入体校接受专业训练.为了解决这一矛盾,在我国教育事业日趋发展的大背景下,建立小学(小学体育俱乐部、少儿体育俱乐部、普通业余体校)——中学(中学体育俱乐部、青少年体育俱乐部、重点业余体校)——大学(专业体校、社会体育俱乐部、大学体育俱乐部)——俱乐部——国家队”的新的培养模式势在必行.

### 2.2 后备人才的培养应循序渐进,逐步建立“体教合一”的教育体制

培养体育后备人才,不能采取行政命令的方式,而要根据各个学校的具体情况,通过政策倾斜与制度安排的调整,吸引大中小学的学生主动参与到后备人才培养中来.如果培养体育人才对这些单位没有任何利益,即使行政手段介入也不会有比较理想的效果.从国外教育系统开展课余训练的实践来看,学校之所以愿意培养体育人才,原因在于这样做有利于学校的发展:一方面可以提高学校的知名度,另一方面可以谋取经济效益与社会效益.从我国的现实情况来看,学校承办业余训练还不太可能在经济效益上有所体现,只有通过政府的财政拨款和政策适当的调整来调动学校承办运动队的积极性.

### 2.3 实施“体教合一”工程,加强篮球后备人才的培养

高校是块最具活力和创新能力的沃土,从“CUBA”到“大超”联赛的赛事是我国在篮球后备人材培养体制上的一次重要革新,其直接的目标是为中国篮球源源不断地输送高素质的篮球人材.体育回归教育,对促进大学生综合素质的提高将发挥巨大的作用.随着我国教育的不断推进,作为培养篮球高素质人才的高校,在素质教育观和现代教学思想的指导下,针对传统的纯技术教学观和纯体育教学观所存在的不足,从教学观念的转变、课程结构的优化与教学内容的调整等方面着手进行改革创新,已经取得了较显著的效果.校园篮球文化一定要突出教育特色和以人为本,与2008年的“人文奥运”相结合,体现“更高、更快、更强”的奥林匹克精神,并在更深层次展现“我的篮球,人文篮球,绿色篮球”的理念,同时加大体教结合力度,更好地解决运动学校的出路和生存问题,改变原有的办学模式,逐步压缩中等专业体校,有条件的升格为大专或本科,没有条件的则合并或体校或予以停办.此外应加强省优秀运动队的体教结合,改革目前体育行政部门独家办体校的体制,逐步把业余体校列入九年义务教育的序列,对列入教育系统的学校逐步实现两家联合办体校的体制,从而解决“学训矛盾”和体校生源经费不足的问题.体育部门和教育部门要联合对业余体校进行评估检查,合格的挂牌,不合格的摘牌.设立后备人才奖励基金,对实行“体教合一”、培养优秀后备人才做出突出贡献的体育、教育部门和单位给予奖励.与教育部门积极协商,制定和完善体校



学生升学优惠政策以及加强体校运动员文化学习的有关政策,加强教练员岗位培训,提高教练员素质.建立以省专业队教练和业余体校教练组成的项目教研联组,每年定期进行体育专项技术讲座和竞赛规则信息咨询,并对全国青少年选材制订标准,鼓励各高校引进高职称、高学历、高水平的教练员.

### 3 结束语

“体教合一”的篮球人才培养模式目前尚处于尝试和探索阶段.高校为篮球运动员的发展提供了优越的训练条件和良好的学习氛围,从长远来看,这种人才培养模式一定会成为中国篮球后备人才培养的主要渠道之一,一定会为中国的篮球运动培养出更多高素质、高水平的现代化职业球员.高校要理顺科学管理、科学训练、科学教育的关系,加强教育和体育两个系统教练员的培训与提高,提升育人的综合素质与能力,提倡科学育人与科学训练,尽快建成“体教合一”的优秀运动员后备人才教育培养机制,完善制度,以“中国特色”求发展.

“体教合一”很好地解决了运动员运动训练与文化学习之间的矛盾.随着当代竞技体育的发展,运动训练的日趋科学化,运动员的运动寿命也在不断延长,而大学生在体能与智能上有着较大的适应性和优势,完全有条件、有可能成为我国竞技体育发展的中坚力量,通过提高运动员的文化素质来加速提高运动技术水平必将成为我国竞技体育发展的一个方向.

### 参考文献

- [1] 曲宗湖,扬文轩.域外体育传真[M].北京:人民教育出版社,1999:171-203.
- [2] 杨铁黎,陈 钧.学校课余训练改革新视野[M].北京:北体大出版社,2003:79-99.
- [3] 熊斗寅.比较体育[M].北京:人民体育出版社,1989:32-50.
- [4] 刘 波,于 华.论“体教结合”背景下的高校竞技体育人才培养[J].体育科技文献通报,2007,15(3):14-15,32.
- [5] 潘 前.中美体育后备人才培养体制初探[J].西安体育学院学报,2003,20(3):23-25.

## AN EXPLORATION OF BASKETBALL RESERVE FOSTERING MODES

TANG Kai-rong<sup>1</sup>, ZHAO Xue-feng<sup>2</sup>

(1. P. E. Department, Shaanxi University of Science & Technology, Xi 'an 710021, China; 2. P. E. Department, Zhangye Medical College, Zhangye 734000, China)

**Abstract:** The thesis points out some problems in fostering basketball reserves through the analysis of the current developing modes as well as those of University Basketball Premier League. The approach of “integrating athletics with literacy” was put forward by the author to resolve the contradictions between athletic exercises and literacy acquisition. With the development of contemporary athletics, sports exercises get increasingly scientific. College students are more likely to become the backbone with their great adaptation and advantages in physical stamina and intellect. Thus improving literacy quality and sports skills will surely become one trend in the development of athletic sports in China.

**Key words:** basketball; reserves; fostering modes

\* 文章编号:1000-5811(2009)06-0175-04

# 文科院校本科生毕业实习工作对策研究

李仲秋<sup>1</sup>, 庞 闻<sup>2</sup>

(1. 西安外国语大学西方语言文化学院, 陕西 西安 710128; 2. 西安外国语大学教务处, 陕西 西安 710128)

**摘 要:**对文科院校本科生毕业实习的相关问题进行了研究,采取调查问卷和访谈的方法对文科院校本科生毕业实习的态度、模式、时空特征、影响因子等进行了定量与定性分析,得出了提高文科院校大学生毕业实习质量的若干对策,以期为文科院校的毕业实习工作提供有益的借鉴与参考.

**关键词:**文科院校; 本科学生; 毕业实习

**中图法分类号:**G642.44

**文献标识码:**A

## 0 引言

高等院校的本科生毕业实习是人才培养的重要一环,是检验人才培养目标正确与否以及人才培养质量高低的重要的尺度.作为提高教学质量的重要一环,教育部在《开展高等学校本科教学质量工程与教学改革工程的意见》和《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》等多份文件中明确指出要大力加强实验、实习、实践和毕业设计(论文)等实践教学环节,特别要加强专业实习与毕业实习等重要环节;要确保学生专业实习与毕业实习的时间和质量,推进教育教学与生产劳动和社会实践的紧密结合,并对高等学校的本科毕业实习工作提出了更高的要求.同时,日益凸显的大学生就业问题也促使学校必须加强毕业实习工作,使学生在毕业实习中充分运用所学的专业理论知识和技术,培养其独立解决问题的能力、实际工作能力、协调能力和创新能力,提升在就业竞争中的优势.由此可见,毕业实习在本科教学中的地位十分重要.

长期以来,高等院校毕业实习工作的重点主要集中于工科、师范、医学、农学等专业<sup>[1-4]</sup>,针对性的研究也主要集中于这些专业,而文科专业如何开展毕业实习的探索鲜有见闻.为此,作者针对西安外国语大学2005级毕业生的毕业实习进行了调查研究,以期为文科院校的毕业实习工作提供参考性意见.

## 1 调查和分析方法

### 1.1 调查方法

采用填写问卷和座谈的方式对西安外国语大学英语教育学院、东方语言文化学院、西方语言文化学院、中国语言与文化学院、商学院5个院系的2005级的160名本科生进行了座谈和问卷调查,共回收有效问卷154份,有效率为96.25%,数据样本基本上满足了分析的需要.采用现场走访和电话调查的方法对13所实习单位进行了回访,以了解实习单位对学生专业实习的意见.

### 1.2 统计和分析方法

采用EXCEL统计软件对有效的调查数据进行分析,以得出真实、客观、可信的结果,并采用定性和定量相结合的方法将不同专业的大学生实习数据进行对比分析,得出了相关结论.

## 2 结果分析

\* 收稿日期:2009-08-18

作者简介:李仲秋(1983—),女,陕西省西安市人,助教,研究方向:高校教学管理

## 2.1 学生对毕业实习态度的分析

我校大学生对毕业实习整体上表现出非常积极的态度,但不同类型的学生群体对实习态度的差异性显著. 调查结果显示,共有 148 人(占调查总数 94.87%的毕业生)参加了各种形式的实习,6 人(占调查总数 5.13%的毕业生)因为出国学习或身体等原因未能参加实习,以其他形式学分代替. 在参加实习的学生中,52.03%的学生认为毕业实习对提升专业技能作用非常显著,只有 8.1%的学生认为毕业实习对提升专业技能没有作用.

表 1 毕业实习对学生专业技能提升效果调查统计结果

	效果			
	非常显著	显著	一般	不明显
调查人数	77	30	29	12
各种结果百分比	52.03%	20.27%	19.59%	8.1%

通过与部分学生的座谈发现,来自城市的学生和经常参加学生生活的学生大都认为毕业实习对专业技能的提升有效果,而来自农村或者平时很少参加学生生活的学生则认为毕业实习对专业技能提升作用不大. 此外,学生在校学习成绩的高低不影响此项调查的结果.

## 2.2 实习模式分析

调查显示,学校统一组织仍是实习的主要模式,超过 52%的学生能够在校内、外实习基地进行实习. 毕业实习与就业联系越来越紧密,有 21%的学生在签约单位实习,另有 27%的学生自己联系实习单位(如图 1 所示).

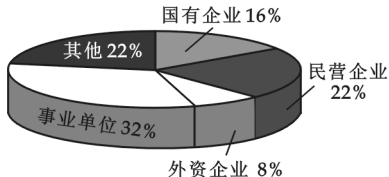


图 1 实习单位类型统计

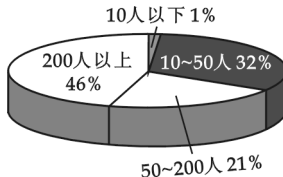


图 2 实习单位规模统计

统计显示,事业单位是学生最主要的实习场所,教师职业也成为学生最为主要的实习类型. 在各类企业的实习中,学生主要从事翻译、贸易、文秘、导游等工作. 实习单位主要以大中型企事业单位为主,一方面是由于学校的实习基地一般选择大中型企事业单位,以便可以开展规模较大的实习活动;另一方面,学生在自主联系实习单位的过程中,也从未来就业、人身安全的角度出发,选择规模较大的单位(如图 2 所示). 在实习单位的类型统计中,外资企业接收学生实习的规模最小,分析原因可能是西安地区外资企业数量不多并且外资企业普遍注重效率,不愿花费多余精力从事与生产无关的活动.

## 2.3 毕业实习的时空特征分析

(1)时间特征分析. 毕业实习的时间主要集中于第七学期后的寒假和第八学期的第一个月,这与学校的安排一致. 部分院系把毕业实习的时间提前到第六学期后的暑假,以避免毕业实习时间与找工作、考研时间的冲突,此外暑假时间较长,能够进行较长时间的实习,实习效果比较理想,学生也比较认可这一时间段的实习安排.

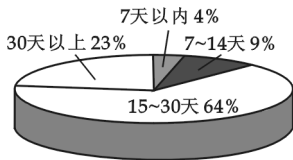


图 3 毕业实习时间统计

毕业实习的时间一般为 2~4 周,占到总体样本比例的 64%,而时间为 2 周以内的实习占总体样本的比例不到 14%. 通过座谈发现,学生普遍反映随着实习时间的增加,实习的收获越来越多,前两周主要为适应阶段,逐渐实现学生角色到工作角色的转换,实习 2 周后方能融入到工作角色中,初步运用所学专业知识、专业技能完成工作任务,4 周后能够独立完成一般性的工作任务. 但由于时间、费用等诸多因素的影响,4 周以上的实习占总

数比例不超过四分之一(如图 3 所示).

(2)空间特征分析. 在对毕业实习地点的空间选择上,学生主要集中于西安(学校所在城市)以及生源地,两者比例基本相当,合计达到总数的 85%以上. 另有不到 15%的学生在西安临近地区,主要是学校校外实习基地所在地以及签约单位所在地实习.

## 2.4 实习内容与专业相关程度分析

调查发现,实习内容与专业相关程度最高的为教育学专业. 由于国家对教育学专业的相关要求,我校英语教育学院集体组织学生在省内各实习基地进行统一的教育实习,实习内容与专业一致的比例达到了 100%. 语言学专业由于其自身专业及用人单位的特点,不便于由院系组织大规模的集体实习,而主要由学生自行联系实习单位,调查结果显示其实习内容与专业相关程度之高出乎意料,证明学生自行

联系实习单位时往往能够利用各种社会关系寻找到符合专业要求和自身特点的实习单位,值得推广.非语言类专业学生毕业实习内容同专业相关程度最低,主要原因是这些专业通常是热门专业,从事此专业学习的学生人数多,实习单位接纳人数有限,导致部分学生不能从事与专业相关的实习,这也从一个侧面反映了这类专业就业的困难程度(如图 4 所示).

2.5 影响学生毕业实习的主要因素

影响学生毕业实习效果的因素主要由外部因素和内部因素两部分组成,其中外部因素主要包括学校组织、培训、学校老师指导、实习单位老师指导;内部因素主要有经济、时间、知识结构、专业知识以及自身实践能力等.调查显示,外部因素对实习效果影响较大,尤其是学校的组织工作、培训和实习单位老师指导,分别占到 21%、15%和 27%.内部因素中自身实践能力对实习效果的影响最大,占到 19%.

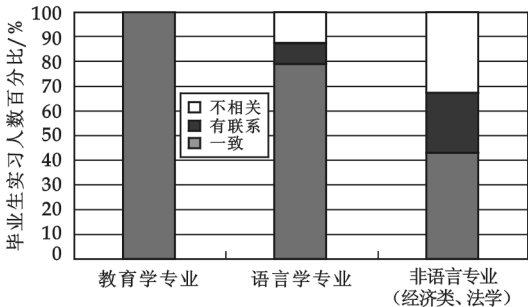


图 4 学生毕业实习与专业相关度分析

2.6 学生自身体会

调查显示,学生普遍反映通过毕业实习自身各方面能力均得到了不同程度的提高,依次为人际交往能力、专业知识的运用能力和社会适应能力.绝大多数学生认识到自身在专业知识掌握、知识结构、实践能力方面的不足,并认为通过毕业实习能够更好的了解自我、完善自我,最终找到适合自身特点的工作.

2.7 实习单位评价

回访的 13 家实习单位普遍表示,学生的基础知识掌握情况较好,但实际动手能力较弱,随着实习时间的增加,其动手能力有显著提升.国有企、事业单位对学生实习满意度较高,而外资企业对学生实习满意度较低,显示出外企对实习学生的要求标准较国内企业为高.调查还显示,性格外向、动手能力强的学生更容易受到实习单位的欢迎,获得评价也较高.

3 提高文科院校大学生毕业实习质量的对策

培养符合社会需要的高素质人才是大学教育的出发点和最终目标,通过对西安外国语大学 2005 级本科学生毕业实习的分析,本文期望最终为文科院校更好地开展毕业实习提供制度建设、质量监控体系、组织方式等多方面的建议,以培养出符合社会发展需要、能够充分发挥自身优势、学有所用的高素质复合型人才,具体的对策有以下几项.

3.1 建立科学完整的组织体系

文科院校的毕业实习工作与工科院校的差距首先体现在组织体系的建设上.工科院校由于长时间实践教学工作的积累,拥有比较完整的实习工作组织体系,大多形成了以教务处或实践教学中心为领导,各院系实习工作领导小组为基础的两级实习工作组织体系.教务处或实践教学中心负责拟定毕业实习的总体规划、实施细则及其他相关要求,负责各院系实习计划的审定、实习资金的统一调配以及实习工作的检查、评估、总结和交流,各院系负责毕业实习的具体组织和管理,根据各专业的具体要求组织制定实习大纲、实习计划等,负责实习基地的规划、建设并组织选题、选派指导教师,同时及时发现和解决在具体实施过程中出现的问题,在结束时对实习进行总结、组织答辩<sup>[5]</sup>.文科院校在毕业实习组织体系的建设上可以完全参考工科院校的成熟经验,建立各司其职、分工明确的两级实习管理体系.

3.2 针对文科专业特点,创新实习模式

伴随着我国高等教育的快速发展,实习模式、实习方法也在不断的改革创新.目前较为常见的实习模式有 4 种:校内科研实习、校外实习基地实习、学生自主实习以及模拟实习,其中校内科研实习和校外实习基地实习是传统的实习模式,是工科、医学等专业常采取的实习模式,也是文科院校开始实习工作时首先选择的实习模式,但实际上文科院校科研项目经费有限,难以提供很多的校内科研实习岗位.文科专业工作小而散的特点决定了其很难建设大量且专业对口的校外实习基地,因此这两种实习模式很难在专业对口的基础上实现所有学生的毕业实习.自主联系实习可以充分利用学生庞大的社会关系网,根据各个学生的自身特点找到专业对口且符合其兴趣要求的实习岗位,并在自主联系的过程中增强学生的人际交往能力,

丰富学生本人的人生经历.西安外国语大学的实践表明,在语言类专业采取学生自主联系的实习模式取得了非常理想的效果,学生实习工作与所学专业一致率达到了 100%,学生对实习效果的满意率达到 90%以上.

模拟实习是一种新兴的毕业实习模式,其通过搭建虚拟环境和业务让学生切实体验真实的工作氛围,熟悉业务流程,并通过专人辅导解决学生在角色转换、专业知识应用等方面遇到的问题,此种实习模式适用于经济、管理、法学、文秘等专业的学生.由于部分企业特别是外企出于工作效率、商业安全等因素的考虑,很少招收相关专业的实习学生,导致在调查中此类专业学生毕业实习内容与所学专业相关程度最低,而模拟实习能够为这些专业的学生提供接近真实的工作环境,这在国内外已有很多成功的案例,例如德国 F+U 培训集团提供的职业技能培训<sup>[6]</sup>和湖北工业学院管理系在国际经济与贸易专业开展的模拟实践教学<sup>[7]</sup>.

### 3.3 根据实际情况,合理、灵活地安排实习时间

基于本科毕业前所学专业内容的专业实践的功能设计,本科毕业实习一般都安排在第八学期进行.这一阶段学生已完成了所有专业课程的学习,最后一学期通过毕业实习、毕业论文和毕业答辩完成专业技能、动手能力、分析能力的考核,实现从学生到社会所需合格人才的转换.作为计划经济体系下工科人才的培养模式,这种时间安排取得了非常良好的效果,但随着社会经济的快速发展,就业模式从国家分配变为双向选择,大学本科生毕业人数逐年增多,就业、考研压力使得这种毕业实习时间安排不是非常合理.根据文科专业软科学的特点,课程之间的相互联系不是非常紧密,完全可以将毕业实习时间提前到大三暑假,并实现弹性时间安排,各院系根据专业特点在大三暑假到第八学期头一个月安排多个时段进行毕业实习,一方面可以缓解毕业实习与就业、考研的时间冲突,另一方面可以利用各类实习基地提供不间断、多批次的实习,扩大统一实习的规模.

### 参考文献

- [1] 白丽平,刘建强,伍乃骐,等.大学工科专业生产实习方式的探索和思考[J].广东工业大学学报(社会科学版),2003,3: 44-46.
- [2] 周有斌.加强实习基地建设 提高师范生的从教能力[J].中国高教研究,2005,11:89-90.
- [3] 张波,府伟灵.医学检验专业实习教学实施素质教育初探[J].医学教育,2002,3:32-33.
- [4] 刘章勇,秦亚平,李定国,等.农学专业全程体验型实习模式的实践与思考[J].黑龙江教育(高教研究与评估),2007,11:61-62.
- [5] 崔晓秋,刘云刚,尹洪霞.关于大学生毕业实习的探讨[J].高等教育与学术研究,2008,2: 48-50.
- [6] 王红,马天芳.德国 F+U 模拟实习随想[J].教书育人,2007,(1): 111-112.
- [7] 廖良美,李燕,刘应元,等.模拟实习:理论与实践的桥梁[J].高等工程教育研究,2003,1: 83-84.

## GRADUATE INTERNSHIPS UNDERGRADUATE LIBERAL ARTS COLLEGES COUNTERMEASURES

LI Zhong-qiu<sup>1</sup>, PANG Wen<sup>2</sup>

(1. School of Occidental Studies, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China; 2. Administration Office, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China)

**Abstract:** The internship of undergraduates is essential to cultivate talents for colleges and universities. Compared with engineering-agriculture-medicine-colleges, colleges and universities of arts implement internship for undergraduates late and have less theoretical and practical researches. The research focuses on the pertinent problems on internship with the methods of questionnaire and interview for both qualitative and quantitative study. Some strategies are elicited from the research to improve their internship which might offer some instructive suggestions for colleges and universities of arts.

**Key words:** colleges and universities of arts; B. A.; internship