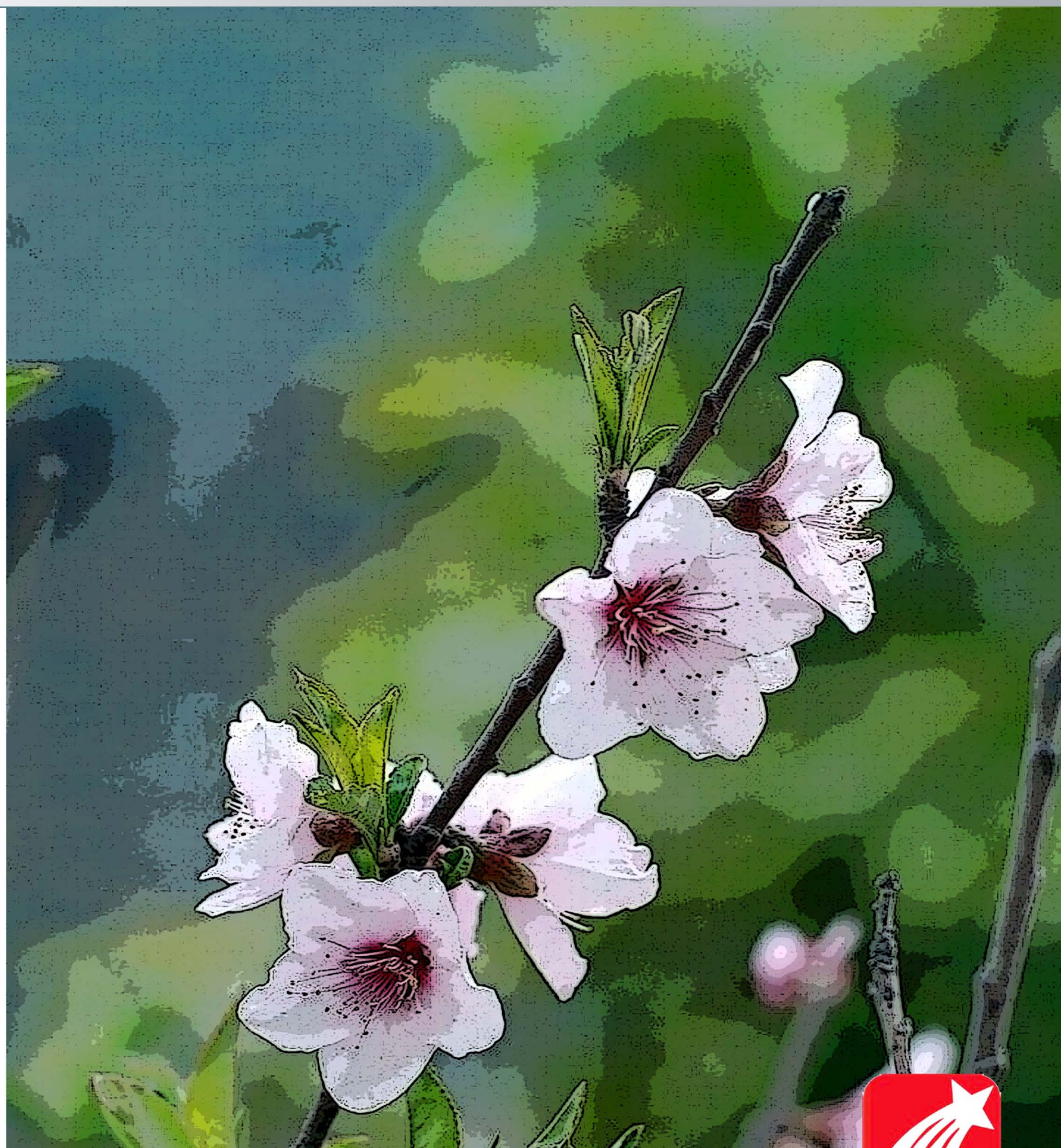


# 郑州大学学报(工学版)

2017年 第3期



## 目 次

### 化工与材料工程

rGO/ZnSn(OH) <sub>2</sub> 复合材料的合成及其光催化性能研究 .....	卢红霞, 李雪雪, 雷 君, 赵天歌, 邵 刚( 1 )
Zn 对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和常温力学性能的影响 .....	王杰芳, 张 铎, 郭巧能, 刘忠侠, 王明星( 6 )
内置扭带管内湍流流动与传热数值模拟 .....	吴金星, 王 超, 王明强, 刘艳会, 李亚飞( 10 )
增塑剂改性沥青路用性能试验研究 .....	傅 珍, 申万青, 孔志峰, 张 超( 15 )
微细粒褐煤中腐植酸的水溶特性及其影响研究 .....	邢龙杰, 黄艳芳, 王文娟, 韩桂洪, 刘炯天( 20 )
改性荷叶对 1,4-苯二酚吸附性能的研究 .....	韩秀丽, 宋阿娟, 白 净, 方书起( 25 )
Ta 掺杂对 BaCe <sub>0.8</sub> In <sub>0.1</sub> Y <sub>0.1</sub> O <sub>3-δ</sub> 电解质材料性能的影响 .....	苏金瑞, 南怡晨, 何 豪, 赵莹莹( 30 )
吸附剂浓度对 Cu( II ) / IIP-PAA/SiO <sub>2</sub> 吸附体系的影响 .....	范忠雷, 马翔宇, 李瑞瑞, 乔欢欢( 35 )

### 电气工程

解码动物转向行为的 ICA-小波特征提取方法 .....	董芳芳, 尚志刚, 刘新玉, 万 红( 39 )
输电固定成本分摊的 AR-DEA 合作博弈核仁解方法 .....	王金凤, 孟徐飞, 王 铮, 杨丽徙( 44 )
结合投影与近邻操作的支持向量快速筛选方法 .....	李蒙蒙, 尚志刚, 李志辉( 49 )
不同类型供电区域间典型供电模式过渡方案研究 .....	杨 卓, 王利利, 杨 博, 关朝杰, 程子霞( 54 )
真空开关低分散性永磁操动机构控制系统设计 .....	程 显, 陈占清, 何 周, 袁端磊, 钟建英( 58 )
一种基于聚类分析的自适应步态检测方法 .....	姜 鸣, 赵红宇, 刘学良( 63 )

### 机械工程

钻井力矩电机新型无位置传感器控制方法 .....	白国长, 张宇昕( 68 )
弹性底板上的液压支架整体尺寸参数优化 .....	王 志, 王朝雅, 杨 飞( 73 )
18CrNiMo7-6 高速磨削条件下表面质量的试验研究 .....	王 栋, 刘昱范, 陈 鑫( 78 )
基于滑移率的 CVT 夹紧力控制策略研究 .....	袁晓红, 陈 龙, 汪怡平( 82 )
基于位移响应最小化的约束阻尼结构优化设计 .....	侯俊剑, 房占鹏, 何文斌( 87 )

### 建筑工程

基于性能驱动的校园食堂建筑被动式节能设计 .....	张建涛, 周丽华( 92 )
----------------------------	----------------

**CONTENTS**

**【Chemical Engineering and Material Engineering】**

- The Synthesis and Photocatalytic Properties of rGO-ZnSn(OH)<sub>6</sub> Composite .....  
..... **LU Hongxia, LI Xuexue, LEI Jun, ZHAO Tiange, SHAO Gang** ( 1)
- Effect of Zn on the Microstructures and Mechanical Properties of an Al-Cu-Mg-Ag Alloy .....  
..... **WANG Jiefang, ZHANG Duo, GUO Qiaoneng, LIU Zhongxia, WANG Mingxing** ( 6)
- Numerical Simulation of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in a Circular Tube with Twisted Tape Inserts .....  
..... **WU Jinxing, WANG Chao, WANG Mingqiang, LIU Yanhui, LI Yafei** ( 10)
- Research on Pavement Performance of Asphalt Binder Modified with Plasticizer .....  
..... **FU Zhen, SHEN Wanqing, KONG Zhifeng, ZHANG Chao** ( 15)
- Water-Soluble Characteristics and the Effects of Humic Acids on Micron-Sized Lignite .....  
..... **XING Longjie, HUANG Yanfang, WANG Wenjuan, HAN Guihong, LIU Jiongtian** ( 20)
- Adsorption Characteristics of Hydroquinone on Modified Lotus Leaf .....  
..... **HAN Xiuli, SONG Ajuan, BAI Jing, FANG Shuqi** ( 25)
- The Influence of Doping Ta on the Properties of BaCe<sub>0.8</sub>In<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> Electrolyte .....  
..... **SU Jinrui, NAN Yichen, HE Hao, ZHAO Yingying** ( 30)
- Effect of Sorbent Concentration on Cu(II) Adsorption at Surface Ion-Imprinted Poly ( Allylamine) –Silica Material .....  
..... **FAN Zhonglei, MA Xiangyu, LI Ruirui, QIAO Huanhuan** ( 35)

**【Electrical Engineering】**

- ICA-wavelet Feature Extraction Method for Decoding of Animals Turning .....  
..... **DONG Fangfang, SHANG Zhigang, LIU Xinyu, WAN Hong** ( 39)
- AR-DEA and Cooperative Game Nucleolus Solutions for Transmission Fixed Cost Allocation .....  
..... **WANG Jinfeng, MENG Xufei, WANG Zheng, YANG Lixi** ( 44)
- Fast Method to Filter Support Vectors Combined with Operation of Projection and Nearest Neighbors' Selection .....  
..... **LI Mengmeng, SHANG Zhigang, LI Zhihui** ( 49)
- Research on Power Supply Scheme of the Typical Power Supply Mode in Different Types Power Supply Areas .....  
..... **YANG Zhuo, WANG Lili, YANG Bo, GUAN Chaojie, CHENG Zixia** ( 54)
- Design of the Low-dispersion Control System for the Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Switch .....  
..... **CHENG Xian, CHEN Zhanqing, HE Zhou, YUAN Duanlei, ZHONG Jianying** ( 58)
- An Adaptive Gait Detection Method Based on Clustering Analysis ..... **JIANG Ming, ZHAO Hongyu, Liu Xueliang** ( 63)

**【Mechanical Engineering】**

- New Sensorless Control Method Applied to Downhole Drilling Torque Motor ..... **BAI Guochang, ZHANG Yuxin** ( 68)
- Overall Parameter Optimization of the Hydraulic Support on the Elastic Foundation .....  
..... **WANG Zhi, WANG Chaoya, YANG Fei** ( 73)
- Experimental Study about Surface Quality in High-Speed Grinding Condition for 18CrNiMo7-6 .....  
..... **WANG Dong, LIU Yufan, CHEN Xin** ( 78)
- Research on Clamping Force Control Strategy in CVT Based on Slip Ratio .....  
..... **YUAN Xiaohong, CHEN Long, WANG Yiping** ( 82)
- Structure Optimization Design of Constrained Layer Damping Structures to Minimize Displacement Response as Optimization Goal .....  
..... **HOU Junjian, FANG Zhanpeng, HE Wenbin** ( 87)

**【Architectural Engineering】**

- Passive Energy-saving Design of Campus Canteen Based on Performance Driven ..... **ZHANG Jiantao, ZHOU Lihua** ( 92)

文章编号: 1671-6833(2017)03-0001-05

## rGO/ZnSn(OH)<sub>6</sub> 复合材料的合成及其光催化性能研究

卢红霞, 李雪雪, 雷 君, 赵天歌, 邵 刚

(郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 以  $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaOH}$  和  $\text{SnCl}_4$  为主要原料, 采用水热法合成粒径分布均匀、平均粒径为 100~200 nm、分散性良好的  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$  微纳米立方体, 并对羟基锡酸锌进行酸化处理; 同时, 通过改进的 Hummers 法制备氧化石墨烯(GO), 在低温条件下制备了  $\text{GO-ZnSn}(\text{OH})_6$  复合材料, 在紫外光照射条件下光致还原 GO 得到还原氧化石墨烯(rGO), 最终得到  $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$  复合材料. 利用 XRD、SEM、FT-IR、UV-Vis、PL 分析了材料的物相、微观结构以及光吸收性能, 并以亚甲基蓝为降解物质评价不同 GO 掺杂量对  $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$  复合材料光催化性能的影响. 结果表明, 当 GO 的质量分数为 2.0% 时,  $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$  复合材料的降解率达到最大值 93.2%, 降解速率常数  $k = 0.026 \text{ min}^{-1}$ , 分别是单一的  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$  的 2 倍和 4.3 倍.

**关键词:**  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ ; 低温溶液法;  $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$ ; 光催化性能

**中图分类号:** X 703.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.016

### 0 引言

近年来发展起来的以微纳米半导体金属氧化物为催化剂的光催化技术, 显示了广阔的应用前景. 常见的半导体金属氧化物光催化剂有  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SnO}_2$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{WO}_3$  和  $\text{CdS}$  等<sup>[1]</sup>, 然而羟基锡酸锌( $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ , 简称 ZHS) 作为一种新型的半导体光催化剂, 与氧化锌( $\text{ZnO}$ ) 纳米棒<sup>[2]</sup> 的光催化性能相比具有明显的优势. 并且, 羟基锡酸锌大的禁带宽度<sup>[3]</sup> 决定了羟基锡酸锌光催化效率低和应用范围窄. 目前很多研究者们致力于对羟基锡酸锌进行改性, 例如, 以葡萄糖为碳源水热合成  $\text{C-ZnSn}(\text{OH})_6$  纳米粉体<sup>[4]</sup>, 它具备相对较高的比表面积和结晶度, 且晶格间隙游离态碳元素的存在大大提高了光催化效率.

石墨烯是一种二维平面碳材料, 由于其高的比表面积、较高的电子迁移率、可变的表面官能团以及稳定的化学性能<sup>[5]</sup> 而备受研究者的关注. 氧化石墨烯表面有大量的官能团<sup>[5]</sup>, 使得它容易与有机物结合反应, 还原后变成石墨烯. 在制备石墨烯的研究中, 普遍采用氧化还原法还原氧化石墨烯得到还原氧化石墨烯(rGO), rGO 是一类石墨烯物质, 与石墨烯的特点基本一致.

Wang 等<sup>[6]</sup> 在水热条件下加入表面活性剂合成了石墨烯基二氧化钛复合材料; 而 Zhang 等<sup>[7]</sup> 在不加入表面活性剂的条件下利用水热法合成 P25/GR 复合材料; Reddy 等<sup>[8]</sup> 利用仿生方法将 rGO 嵌入在氧化锌纳米结构中, 有效提高了光催化效率. 然而, 探究一种更为简便、环保、高效的合成石墨烯基复合材料的方法是很有必要的.

笔者采用低温溶液法合成  $\text{rGO-ZHS}$  复合材料, 研究了工艺因素对物相、微观结构以及光吸收性能的影响, 并以亚甲基蓝为降解物质评价不同 GO 掺杂量对  $\text{rGO-ZHS}$  复合材料光催化性能的影响.

### 1 实验部分

#### 1.1 主要实验原料

乙酸锌( $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 氢氧化钠( $\text{NaOH}$ , 分析纯); 结晶四氯化锡( $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 分析纯); 高锰酸钾( $\text{KMnO}_4$ , 分析纯); 五氧化二磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ , 分析纯); 过硫酸钾( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ , 分析纯).

#### 1.2 实验过程

##### 1.2.1 ZHS 的制备

分别称取一定量的乙酸锌、氢氧化钠、结晶四氯化锡, 在搅拌下依次配制成均匀溶液 A、B、C 水

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51402264); 河南省科技厅基础研究项目(142300410099)

作者简介: 卢红霞(1969—), 女, 河南新乡人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事先进陶瓷材料研究, E-mail: luhx@zzu.edu.cn.



溶液,然后混合搅拌 30 min 后将反应液转移到聚四氟乙烯反应釜中,160 ℃ 条件下保温 16 h. 结束后洗涤沉淀,在真空干燥箱中 60 ℃ 下干燥 24 h.

### 1.2.2 利用改进的 Hummers 法制备 GO

(1) 鳞片石墨的预氧化. 量取 12 mL 浓硫酸加热到 90 ℃,在搅拌下依次加入定量的  $K_2S_2O_8$ 、 $P_2O_5$ ,称取 3.0 g 鳞片石墨加入到混合液中. 在 90 ℃ 条件下反应 6 h,冷却到室温后,用去离子水稀释,静置后,用聚碳酸酯膜真空抽滤并洗涤,把预氧化后的石墨在 50 ℃ 真空干燥 24 h.

(2) 石墨的第二步氧化. 首先是低温阶段,量取 92 mL 的浓硫酸置于 0 ℃ 的冰水浴中,搅拌条件下缓慢依次加入定量预氧化后的鳞片石墨、 $NaNO_3$ 、 $KMnO_4$ ,持续搅拌 2 h. 中温阶段,反应液在 35 ℃ 恒温水浴中搅拌 2 h,随后滴加 160 mL 去离子水,持续搅拌 30 min. 高温阶段,反应液在 95 ℃ 水浴锅中,搅拌条件下反应 30 min. 结束后,将反应液转为室温搅拌,加入 400 mL 去离子水稀释,并滴加 15 mL  $H_2O_2$ (质量分数 30%),持续搅拌 30 min,静置 24 h 后倒出上清液,用稀释的盐酸和去离子水洗涤至滤液的 pH 值接近 7,将所得产物冷冻干燥 24 h.

### 1.2.3 低温溶液法合成 rGO-ZHS 复合材料

称取 1.43 g 制备好的羟基锡酸锌微纳米粉体分散于盐酸溶液中(pH 值为 4). 将 GO 分散在水中配制成 1 mg/mL 悬浮液,并逐滴加入 ZHS 悬浮液,然后将所得悬浮液超声处理 30 min 后搅拌 4 h,然后静置 4 h,用去离子水过滤、洗涤、沉淀,冷冻干燥 12 h. 将得到的样品配制成乙醇悬浮液,在搅拌条件下利用紫外光照射光致还原 GO-ZHS,最终得到黑色粉末样品.

### 1.2.4 光催化性能测试

样品的光催化性能通过降解亚甲基蓝(MB)来表征,催化装置由紫外-可见光源(Abet Technologies Inc.,  $\sim 150 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )和紫外光滤波片组成( $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ ),将 10 mg 催化剂样品加入到 40 mL 的 MB 溶液(10 mg/L)中,在室温条件下将悬浮液避光搅拌 30 min 以达到光催化剂和染料的吸附-脱附平衡,并对达到平衡后溶液的吸光度进行测试. 光降解过程中,每间隔 20 min 取 5 mL 的 MB 溶液,在 8 000 r/min 下离心 5 min 后取上清液,利用紫外-可见分光光度计(UV-1800 PC)测定其吸光度,测试波长范围 300 ~ 800 nm. 催化剂对目标物质的降解率可以用来表示,如式(1)所示.

$$D = 1 - A/A_0, \quad (1)$$

式中:  $A$  为亚甲基蓝溶液在  $t$  时刻的吸光度;  $A_0$  为亚甲基蓝黑暗条件下吸附平衡后的吸光度.

### 1.3 表征方法

样品物相分析采用的是北京普析通用仪器有限公司的 XD-3 型 X 射线衍射仪,  $\text{CuK}\alpha$  为射线源( $\lambda = 1.5406 \text{ nm}$ , 36 kV, 20 mA),扫描速率为  $4^\circ/\text{min}$ ; 采用日本电子株式会社 JSM-T001F 扫描电子显微镜(FE-SEM, Nova 230, FEI Company)观察所得样品的微观形貌以及粒度分布; 紫外-可见漫反射吸收光谱采用紫外-可见-近红外分光光度计(UV-3600, Shimadzu)测量,附件为积分球探测器,以  $\text{BaSO}_4$  白板作为对样品,测量波长范围为 200 ~ 800 nm; 红外分析采用的是美国 Thermo Fisher Scientific 公司的傅里叶变换红外光谱分析仪(Nicolet iS10),测试范围为  $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ ; 荧光光谱分析采用天津港东科技有限公司生产的荧光分光光度计(F-280),采用氙灯作为光源.

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相及微观形貌分析

氧化石墨的红外光谱如图 1 所示,在  $3380 \text{ cm}^{-1}$  处的振动吸收峰对应于结合水 O—H 键的伸缩振动,在中频区  $1730 \text{ cm}^{-1}$  出现的峰是由羧基和羰基中共轭  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动引起的,  $1620 \text{ cm}^{-1}$  处是氧化石墨中未破坏的共轭  $\text{C}=\text{C}$  的伸缩振动峰,  $1400 \text{ cm}^{-1}$  处的振动峰是羧基上的 C—O 键伸缩振动,  $1220 \text{ cm}^{-1}$  处对应于环氧基上 C—O 键振动吸收,  $1056 \text{ cm}^{-1}$  处属于烷氧基上 C—O 键<sup>[9]</sup> 的吸收振动峰. 由此可见,通过改进的 Hummers 法制备 GO 可成功引入了羟基、羧基、环氧基等大量含氧活性基团,这些含氧基团的存在使氧化石墨具有很好的亲水性.

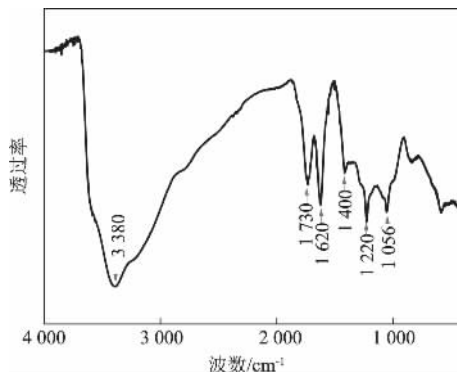


图1 氧化石墨 FT-IR 图谱

Fig. 1 The FT-IR pattern of GO

图2(a)显示了所有的衍射峰与ZHS的特征衍射峰(JCPDS No. 20-1455)一致,说明与rGO复合后ZHS的内部晶体结构没有改变,但没有检测到rGO的特征衍射峰,可能的原因如下:①产物中rGO的含量比较少;②ZHS纳米颗粒不规则地插入到rGO层间,导致rGO固有的层层堆垛结构被破坏<sup>[10]</sup>.

由图2(b)样品的FT-IR光谱可以看出,rGOZHS样品的FT-IR图谱中,在 $1\,176\text{ cm}^{-1}$ 和 $540\text{ cm}^{-1}$ 处出现了ZHS特征吸收峰,分别对应于Sn—OH的弯曲振动、Sn—O的伸缩振动,说明与rGO复合后的ZHS晶体结构并未发生改变.此外,rGO质量分数为2.0%的rGO-ZHS样品相比于ZHS在 $1\,637\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰强度增大,这可能是由于与rGO复合后,样品中共轭C=C的伸缩振动峰的存在.

图3(a)是未掺杂的ZHS微纳米粉体SEM图片,ZHS呈规则的立方体,颗粒尺寸100 nm左右,粒径分布均匀,分散性较好.图3(b)~3(f)为不同GO含量的rGO-ZHS样品SEM图,能明显观察到ZHS微纳米颗粒的形貌没有发生改变.从样品b和c中并未观察到明显的rGO纳米片层结构,这是由于GO掺杂量较少,rGO纳米片包裹在ZHS微纳米颗粒团聚体内部,SEM有限的分辨率难以直接观察到.然而当GO掺量增加到2.0%(如图3(d)),可观察到ZHS微纳米被负载到rGO纳米片层的边缘和平面.复合材料的多层结构是由一层一层堆积起来,这种结构以厚度在

1~10 nm的rGO纳米片作为模板,而ZHS微纳米颗粒分布在模板周围.

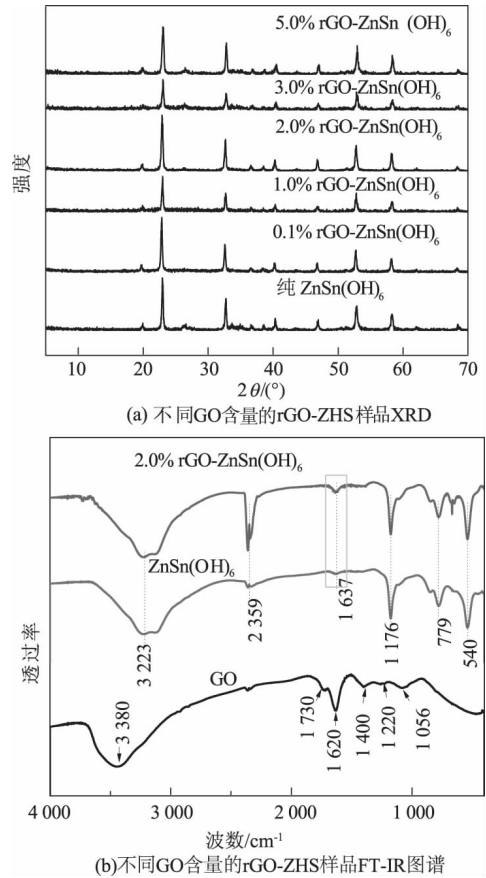


图2 不同GO含量的rGO-ZHS样品XRD图谱和FT-IR图谱

Fig. 2 XRD patterns and FT-IR patterns of rGO-ZHS samples with different amounts of GO

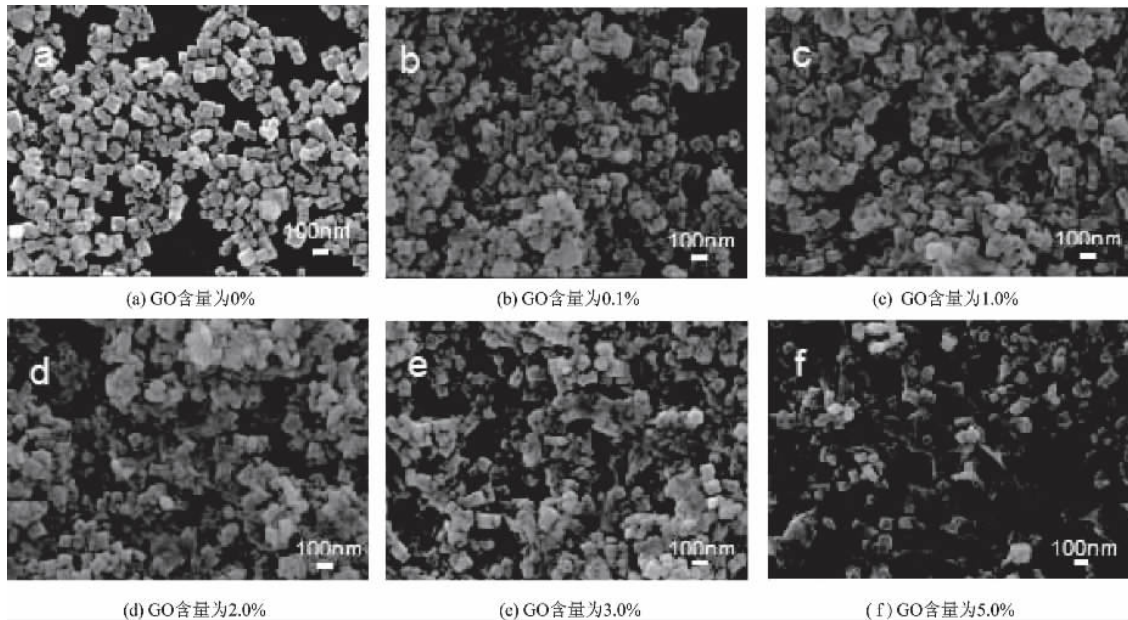


图3 不同GO含量的rGO-ZHS样品SEM图

Fig. 3 SEM images of rGO-ZHS with different amounts of GO

## 2.2 rGO-ZHS 样品紫外-可见漫反射吸收光谱分析

半导体光催化材料的光吸收能力和光吸收范围是影响光催化性能的重要因素. 如图4所示, 不同GO掺杂量的rGO-ZHS样品的光吸收能力有很大差异. 当rGO的质量分数从0.1%增大到5.0%时, rGO-ZHS样品也在320~800 nm内表现出更强的光吸收性能, 说明rGO有利于改善材料的光吸收能力, 提高光催化剂对太阳光的利用率.

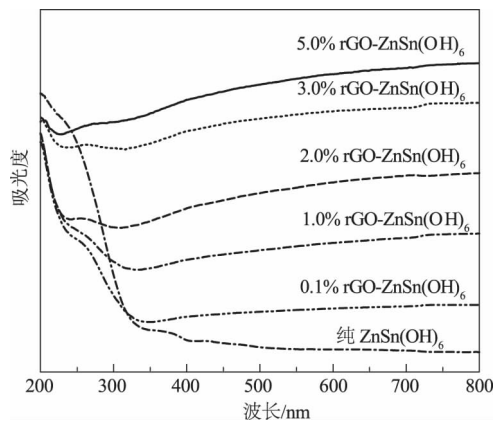


图4 不同GO含量的rGO-ZHS样品紫外-可见漫反射吸收光谱

Fig. 4 UV-Vis diffuse reflection spectrums of rGO-ZHS samples with different amounts of GO

PL光谱可有效表征半导体光催化剂光生载流子的复合效率. 从图5明显看出, 单一的ZHS微纳米光催化剂在570 nm附近出现较强的荧光发射峰, 而且随着GO掺杂含量的增加, rGO-ZHS样品荧光发射峰强度逐渐降低, 说明通过掺杂rGO, 有效抑制了羟基锡酸锌微纳米光催化剂光生电子-空穴对的复合, 这是由于rGO具有高的电子迁移率, 能在光催化反应过程中迅速转移光生电子, 进而延长光生载流子的寿命, 提高纳米羟基锡酸锌光催化剂量子效率.

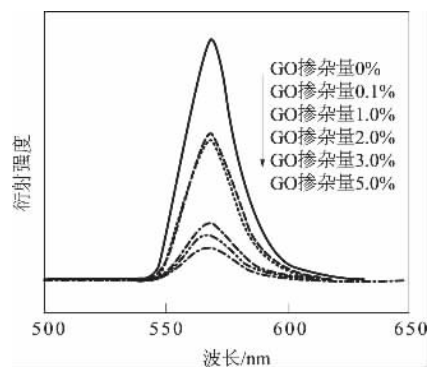


图5 不同GO含量的rGO-ZHS样品PL光谱

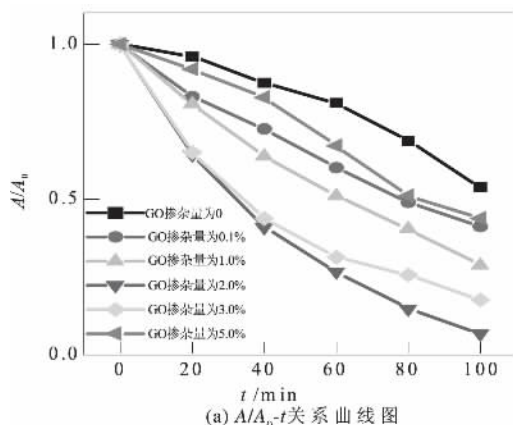
Fig. 5 PL spectrums of rGO-ZHS samples with different amounts of GO

## 2.3 GO含量对rGO-ZHS样品光催化性能的影响

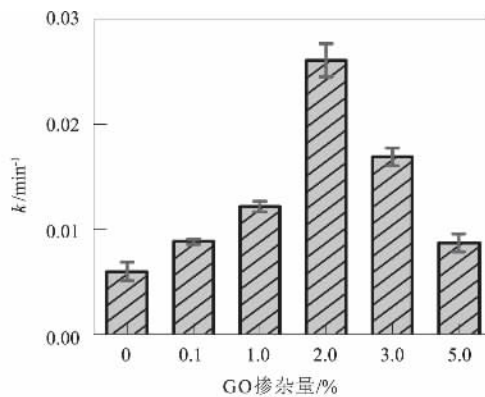
由图6(a)和6(b)可以看出, 在光照条件下, 掺杂石墨烯后的ZHS复合材料的光催化降解率高于单一ZHS催化剂. 当GO掺杂量低于2.0%时, rGO-ZHS对MB的降解率呈上升趋势, 2.0% rGO-ZHS样品在100 min内降解率达到93.2%, 相对于单一的ZHS降解率提高了一倍. 从图6(b)可以看出, 掺杂2.0%的rGO-ZHS样品光催化降解率最高, 降解速率 $k = 0.026 \text{ min}^{-1}$ , 是单一的ZHS光催化剂的4.3倍. 然而, 当GO掺杂量继续增加时, 该复合材料的催化活性开始降低, 相同催化反应条件下掺杂5.0%的rGO-ZHS降解率仅为56.2%, 降解速率 $k$ 下降至 $0.008 \text{ min}^{-1}$ , 这是由于过量的掺杂GO导致负载的ZHS相对稀疏, 有限的ZHS微纳米立方体颗粒减弱了催化剂对光的利用率.

## 2.4 rGO-ZHS光催化机理分析

图7为rGO-ZHS微纳米复合材料的光催化机理示意图. 在光照条件下, ZHS被激发<sup>[11]</sup>, 在导带上产生光生电子, 在价带上产生空穴, 受光激发



(a)  $A/A_0-t$ 关系曲线图



(b) 反应速率 $k$ 柱状图

图6 不同GO含量的rGO-ZHS催化剂 $A/A_0-t$ 关系曲线图和反应速率( $k$ )柱状图

Fig. 6 Photocatalytic activities and Column chart of the rate constants ( $k$ ) of rGO-ZHS photocatalysts with different amounts of GO

后的纳米光催化剂产生的电子通过导带向 rGO 表面转移, rGO 在光催化反应体系中及时接受和传输光生电子<sup>[12]</sup>, 使光生电子-空穴有效分离, 光生电子和空穴分别进一步反应生成各种活性基团, 并与吸附在 rGO-ZHS 复合催化剂表面的 MB 分子发生降解反应。

在光催化反应过程中<sup>[13]</sup>, rGO 作为电子接受体有效促进了光生电子-空穴对的分离, 被 rGO 捕获的光生电子与溶液中的 O<sub>2</sub> 反应生成超氧负离子, 进而生成具有强氧化性的氢氧自由基, 同时空穴与水分子结合生成 ·OH, 最终将溶液中的 MB 分子降解为 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 等分解产物。

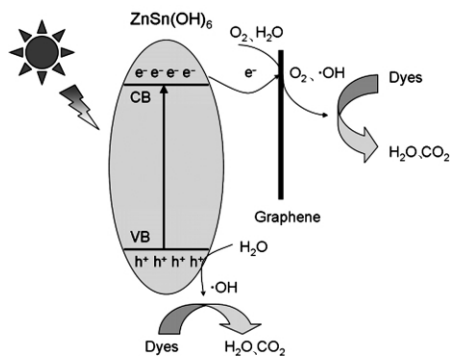


图7 rGO-ZHS 复合材料的光催化机理示意图

Fig. 7 The photocatalytic mechanism diagram of rGO-ZHS

### 3 结论

(1) 利用改进的 Hummers 法两步氧化制备了氧化程度较高的氧化石墨烯, 并对 ZHS 表面进行酸化处理, 并通过紫外光照射还原获得了 rGO-ZHS 复合材料。

(2) 在降解 MB 过程中, 当 GO 掺杂量为 2.0% (质量分数) 时, 降解率达到最大值 93.2%, 降解速率常数  $k = 0.026 \text{ min}^{-1}$ , 分别是单一 ZHS 的 2 倍和 4.3 倍。

(3) rGO-ZHS 复合光催化剂显著的光催化活性主要归因于 rGO 优异的电子传导率, 在光催化反应过程中 rGO 的共轭键能够有效分离光生电子-空穴对, 提高了光催化反应的量子速率。

### 参考文献:

[1] JENA H, KUTTY K V G, KUTTY T R N. Ionic transport and structural investigations on  $\text{MSn}(\text{OH})_6$  ( $\text{M} = \text{Ba}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Fe}, \text{Mn}$ ) hydroxide perovskites synthesized by wet sonochemical methods mater [J]. Chemistry physical, 2004, 88(1): 167-179.

[2] 卢红霞, 於秀君, 韩艳丽, 等. 水热法可控合成 ZnO 纳米棒及其光催化性能研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2011, 33(2): 55-58.

[3] CHEN Y B, LI D Z, HE M, et al. High photocatalytic performance of zinc hydroxystannate toward benzene and methyl orange [J]. Applied catalysis B: environmental, 2012, 113/114(1): 134-140.

[4] LU H X, LEI J, LI X X, et al. Synthesis and characterization of carbon-doped  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$  with enhanced photoactivity by hydrothermal method [J]. Crystal Research and technology, 2015, 51(1): 1-5.

[5] XIANG Q J, YU J G, JARONIEC M. Graphene-based semiconductor photocatalysts [J]. Chemical society reviews, 2012, 41(2): 782-796.

[6] WANG D H, CHOI D, LI J, et al. Self-assembled  $\text{TiO}_2$ -graphene hybrid nanostructures for enhanced Li-ion insertion [J]. Acs Nano, 2009, 3(4): 907-914.

[7] ZHANG H, LV X J, LI Y M, et al. P25-graphene composite as a high performance photocatalyst [J]. Acs Nano, 2010, 4(4): 380-386.

[8] REDDY T N, MANNA J, RANA R K. Polyamine-mediated interfacial assembly of rGO-ZnO nanostructures: A bioinspired approach and enhanced photocatalytic properties [J]. Acs Appl Mater Interfaces, 2015, 7(35): 19684-19690.

[9] DING Y H, ZHANG P, ZHUO Q, et al. A green approach to the synthesis of reduced graphene oxide nano sheets under UV irradiation [J]. Nanotechnology, 2011, 22(21): 215601-215605.

[10] SONG H J, ZHANG L C, HE C L, et al. Graphene sheets decorated with  $\text{SnO}_2$  nanoparticles: in situ synthesis and highly efficient materials for cataluminescence gas sensors [J]. Journal material chemistry, 2011, 21(6): 5972-5977.

[11] BAKER D R, KAMAT P V. Photosensitization of  $\text{TiO}_2$  nanostructures with CdS quantum dots: particulate versus tubular support architectures [J]. Advanced functional material, 2009, 19(5): 805-811.

[12] IWASE A, NG Y H, ISHIGURO Y, et al. Reduced graphene oxide as a solid-state electron mediator in Z-Scheme photocatalytic water splitting under visible light [J]. Journal of the american chemical society, 2011, 133(29): 11054-11057.

[13] KHOA N T, KIM S W, CHO S, et al. Fabrication of Au/graphene-wrapped ZnO-nanoparticle-assembled hollow spheres with effective photoinduced charge transfer for photocatalysis [J]. Acs Appl Mater Interfaces, 2015, 7(6): 3524-3531.

(下转第14页)



文章编号: 1671-6833(2017)03-0006-04

## Zn 对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和常温力学性能的影响

王杰芳, 张 铎, 郭巧能, 刘忠侠, 王明星

(郑州大学 材料物理教育部重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 借助光学显微镜、差示量热扫描仪、扫描电镜, 以及硬度、拉伸性能测试方法, 分析了 Zn 元素对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和常温力学性能的影响. 结果表明: Zn 的添加并未改变合金第二相的形态和成分, 合金适宜的均匀化制度为  $510\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ ; Zn 元素的添加加快了挤压态合金的初始时效反应速度, 使合金的峰时效硬度由 169 MHV 提高到 182 MHV, 合金的室温拉伸强度和屈服强度分别提高了 23 MPa 和 27 MPa, 并且合金的伸长率仍然保持在 14% 以上的较高水平, 其原因可能是 Zn 元素固溶于基体中, 增大了合金的晶格畸变, 致使合金硬度增加, 并提高了合金的室温力学性能.

**关键词:** Al-Cu-Mg-Ag 合金; Zn 元素; 均匀分布; 晶格畸变; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.020

### 0 引言

Al-Cu-Mg 系铝合金由于密度小, 比强度、比模量、断裂韧度和疲劳强度高, 以及良好的耐热性能而广泛地应用于航空航天领域, 但是随着航空航天技术的发展, 对铝合金材料综合性能的要求也越来越高. 而普通的 Al-Cu-Mg 系合金已不能满足现代化工业对合金性能的要求. Polmear 等发现在高的 Cu 与 Mg 质量比的 Al-Cu-Mg 合金中添加微量 Ag 元素可以改变合金的时效析出序列, 使合金在时效过程中析出一种细小弥散的强化相  $\Omega$  相, 不仅改善了合金室温和高温力学性能, 还提高了合金的高温抗蠕变性能<sup>[1-3]</sup>. 尽管 Al-Cu-Mg-Ag 合金展示了优于 Al-Cu-Mg 合金的室温与高温力学性能, 但其强度仍稍显不足, 当温度超过  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $\Omega$  相的粗化速率会急剧增大, 使得  $\Omega$  相发生共格失稳, 从而转变为平衡相  $\theta$  相, 致使合金的力学性能显著下降<sup>[4]</sup>. 大量的研究表明<sup>[5-10]</sup>: 通过添加微量的稀土元素能细化合金晶粒, 改善合金铸态组织, 提高合金的耐疲劳、耐腐蚀、室温和高温力学性能. 因此, 可以通过在 Al-Cu-Mg-Ag 合金中添加稀土元素使合金的综合性能得到提高. 但是近些年的研究都集中于稀土元素对铝合金的影响, 而忽略了对常规强化元素的研究. 查阅相关文

献[11-13]发现, Al-Zn-Mg-Cu 系合金与 Al-Cu-Mg 系合金相比, 多添加了 Zn 元素, 而强度却得到了很大的提升. Zn 在元素周期表中位于第 4 周期的第 IIB 族, 与 Sc、Ti、V 等处于同一周期, 在铝中的固溶度较高, 可能有与 Sc 等相类似的作用, 因此, 笔者尝试将 Zn 作为一种微合金化元素加入 Al-Cu-Mg-Ag 合金中, 研究其对 Al-Cu-Mg-Ag 合金的影响.

### 1 实验部分

#### 1.1 实验材料与方法

实验原料为工业纯铝、纯镁、纯锌、Al-Ag、Al-Cu、Al-Mn 和 Al-Ti 中间合金. 采用铸锭冶金方法制备了 Al-Cu-Mg-Ag-(Zn) 合金铸锭. 合金化学成分详见表 1. 铸锭经均匀化处理后, 挤压成棒材, 合金的淬火时效工艺采用  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  室温水淬,  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  时效. 拉伸测试在 MTS810 材料试验机上进行, 采用  $\phi 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  棒状试样, 拉伸速率为  $1\text{ mm/min}$ , 试样均为 3 根, 取平均值.

采用日本生产的 JEOL-JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 以及配套的 EDS 设备对合金进行能谱分析, 并用 OLYMPUSBX51 型光学金相显微镜进行微观组织观察. 差示扫描量热分析 (DSC) 在法国 Labsys 型高温扫描量热分析仪上

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11372283), 河南省高等学校重点科研项目 (17A430001; 13A140674)

作者简介: 王杰芳 (1968—), 女, 河南滑县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事轻金属材料与金属物理研究.

通信作者: 郭巧能 (1966—), 女, 河南沁阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事薄膜材料科学模拟研究, E-mail: gqiaoneng@126.com.

进行,升温速率为 10 ℃/min,扫描温度为 20 ~ 700 ℃. 用工业纯铝作为参比试样,采用 HXD-2000TMS/LCD 硬度仪检测合金硬度.

表 1 实验合金化学成分的质量分数  
Tab.1 Chemical composition of the experimental alloys

试样	Cu	Mg	Ag	Mn	Ti	Zn	Al
1#	5.0	0.4	0.4	0.3	0.12	0.0	Bal.
2#	5.0	0.4	0.4	0.3	0.12	0.6	Bal.

2 结果与分析

2.1 铸态合金显微组织

图 1 为两种合金的铸态微观组织. 由图 1 可以发现,这两种合金的铸态组织都呈典型的枝晶组织,晶粒形态呈花瓣状,在晶界处存在粗大的未溶第二相. 2#合金的铸态扫描组织如图 2,经 EDS 能谱分析可知,其成分都接近  $Al_2Cu$ . 能谱分析结果如表 2 所示.

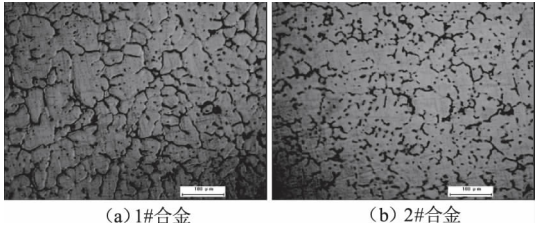


图 1 合金铸态金相组织  
Fig.1 Microstructures of the as-cast alloys

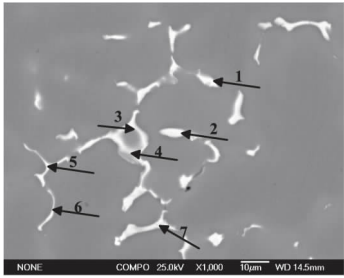


图 2 2#合金铸态 SEM 组织  
Fig.2 SEM image of the alloy 2#

2.2 合金均匀化制度

图 3 为两种合金的 DSC 曲线. 由图 3 可见,

两种合金都有两个吸热峰,且吸热峰的位置基本相同,所以可以在同一均匀化制度下均匀化,实验合金的主要合金化元素为 Cu、Mg、Ag 和 Zn. 在相同的温度条件下,Mg、Ag 和 Zn 的扩散速率要比 Cu 元素快<sup>[14]</sup>,因此在均匀化过程中主要考虑 Cu 元素. 经查阅文献,在 510 ℃ 条件下所求得的均匀化时间约为 20 h,为保证 Cu 元素扩散充分,所以设计均匀化时间为 24 h.

表 2 2#合金铸态组织能谱成分表  
Tab.2 EDS analysis results of the as-cast alloy 2#

晶界位置	Al	Cu	Mg	Mn	Fe
1	65.98	32.27	1.14	0.60	0.00
2	56.47	39.20	2.29	1.00	1.04
3	60.69	38.46	0.85	0.00	0.00
4	62.46	33.21	0.89	1.06	2.38
5	68.03	21.70	0.98	2.63	6.65
6	80.38	17.96	1.04	0.33	0.30
7	89.07	9.54	1.02	0.36	0.00

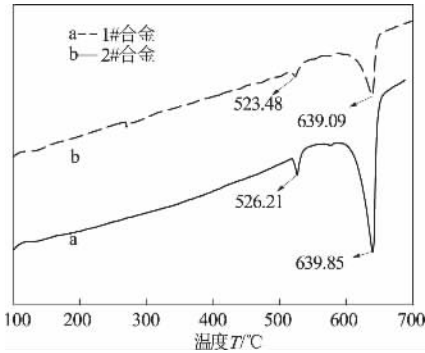
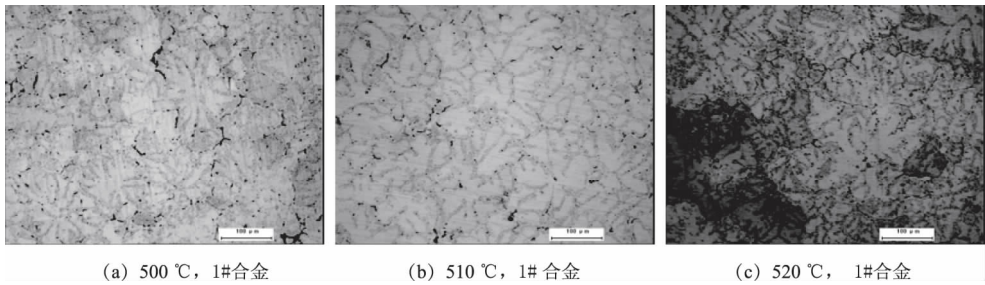


图 3 两种合金的 DSC 曲线  
Fig.3 DSC curves of the two as-cast alloys

图 4 给出了 1#、2#合金分别在 500、510、520 ℃ 下均匀化 24 h 的金相组织. 由图可见,经过均匀化处理,与铸态金相组织相比,晶界明显细化,晶界残余相大量减少. 对比 3 种均匀化制度: 500 ℃ 时合金晶界变细,残余相大量减少; 510 ℃ 时合金晶界变得更不明显,残余相更为减少; 520 ℃ 合金晶界与 510 ℃ 相比又变得明显,说明晶界开始扩展. 由以上分析可见,合金的最佳均匀化温度应为 510 ℃.



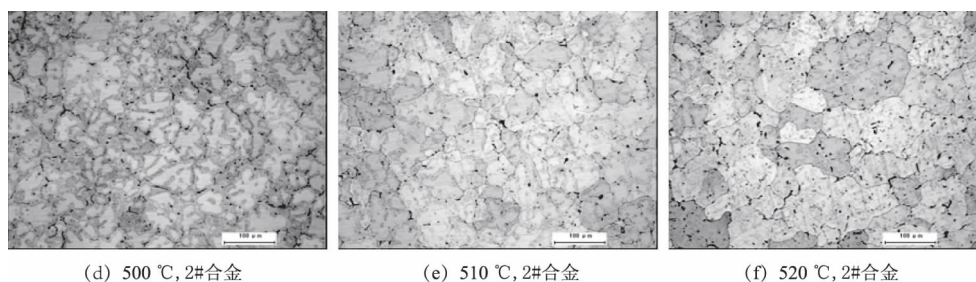


图4 1#、2#合金经不同均匀化处理的金相组织

Fig. 4 Microstructures of the alloy 1# &amp; 2# after different homogenization treatment

### 2.3 挤压态合金力学性能

图5为两种合金在520 °C固溶2 h后在180 °C时效过程下的时效硬化曲线. 合金的时效过程均呈典型的三阶段时效: 欠时效、峰时效和过时效. 1#合金在快速达到一定硬度后, 硬度值就开始缓慢增长, 直到12 h达到最高点169 MHV; 而添加Zn的2#合金, 初始硬化速率与1#合金相比有显著提高, 出现明显的峰值, 在8 h时达到182 MHV, 比1#合金提高了13 MHV. 对经过峰时效处理(T6态)的两种合金进行室温力学性能测试, 结果显示: 1#合金的抗拉强度为461 MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为437 MPa, 伸长率为14.48%; 2#合金的抗拉强度为484 MPa,  $\sigma_{0.2}$ 为464 MPa, 比1#合金的抗拉强度和屈服强度分别提高了23 MPa、27 MPa, 伸长率为14.4%, 与1#合金相当. 从图6也可以看出, 两种合金的断裂形式也基本相同.

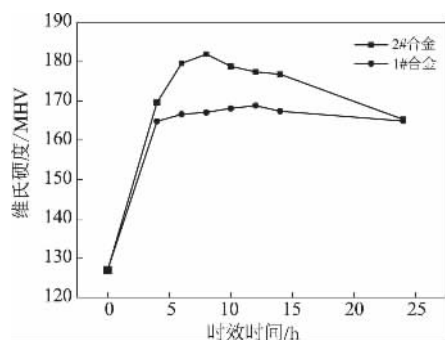
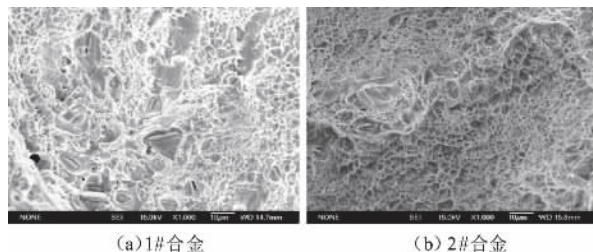


图5 两种合金在180 °C时的时效硬化曲线

Fig. 5 Age hardening curves of the two alloys at 180 °C



(a) 1#合金 (b) 2#合金

图6 2种合金室温拉伸断口形貌

Fig. 6 Fracture images of the two alloys

上述结果表明, 添加质量分数0.6% Zn元素

加快了挤压态合金的时效反应速率, 提高了硬化水平, 在保持合金拉伸延性的同时提高了合金的拉伸强度.

### 3 讨论

比较两种合金的拉伸性能可以发现, Zn的添加提高了合金的拉伸强度, 且几乎不影响合金的伸长率. Zn在铝合金中的固溶度很高, 室温20 °C下为2.0%, 在380 °C时可以达到32.8%. 而在本实验中, 2#合金中Zn的添加量为0.6%, 所以Zn很可能以固溶态的方式存在于合金中, 通过增大合金的晶格畸变程度来影响合金的组织与性能. 金属Al的层错能达 $0.20 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而在Al中加入溶质原子后其层错能会有所降低, 特别是固溶度大的溶质原子, 对层错能的影响更大, 而Zn、Mg和Ag等元素在Al中有较大的固溶度, 这些固溶原子聚集在密排 $\{111\}_\alpha$ 面上, 能显著降低Al合金的层错能, 有利于大量层错的形成, 为在 $\{111\}_\alpha$ 面上析出的密排六方相(如 $\Omega$ 相)提供优越的形核位置, 而析出相的大小、分布及密度对铝合金的性能影响很大.

### 4 结论

(1) Al-5.0Cu-0.4Mg-0.4Ag合金中添加0.6% Zn元素后, 在铸态合金中Zn基本呈均匀分布, 两种合金可在相同均匀化制度下进行均匀化处理.

(2) 添加0.6% Zn元素的合金时效初期反应速度明显加快, 且峰时效硬度高于不含Zn元素的Al-Cu-Mg-Ag合金, 并且使合金的拉伸强度得到提高, 而且合金仍能保持较高的伸长率. 这可能是Zn元素固溶于基体中, 增大了合金的晶格畸变, 降低了Al合金的层错能, 促进了强化相的析出, 致使合金的性能得到提高.

### 参考文献:

- [1] 宋旻, 肖代红, 贺跃辉, 等. 稀土元素对Al-Cu-Mg-Ag

- 合金显微组织与时效行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1356-1365.
- [2] SCULLY J R, LITTLE D A, CONNOLLY B J. An electrochemical framework to explain the intergranular stress corrosion behavior in two Al-Cu-Mg-Ag alloys as a function of aging [J]. Corrosion science, 2007, 49(2): 347-372.
- [3] CHANG C H, LEE S L, LIN J C, et al. Effect of Ag content and heat treatment on the stress corrosion cracking of Al-4.6Cu-0.3Mg alloy [J]. Materials chemistry and physics, 2005, 91(3): 454-462.
- [4] 刘晓艳, 潘清林, 陆智伦, 等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金高温蠕变行为[J]. 金属学报, 2011, 47(1): 53-60.
- [5] 赵启淞, 赵华荣, 王璐, 等. 钛加入量对铝铜镁稀土合金组织和拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2013, 37(12): 67-70.
- [6] 杨兵, 杨天云, 周鹏, 等. 不同 RE 含量对 Al-Cu-Mn 合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2012, 33(2): 171-173.
- [7] 周娴, 陈志国, 黄裕金, 等. 微量 Ge 对 Al-4.5Cu-4.0Mg 合金时效行为及微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1513-1520.
- [8] SHI Yaowu, YU Yang, LI Yaping, et al. Study on the microstructure and wettability of an Al-Cu-Si braze containing small amounts of rare earth erbium [J]. Journal of materials engineering and performance, 2009, 18(3): 278-281.
- [9] XIA Yumei, BAI Zhihao, QIU Feng, et al. Effects of multi-modification of rare earth  $\text{Pr}_x\text{O}_y$  and  $\text{La}_x\text{O}_y$  on microstructure and tensile properties of casting Al-Cu alloy [J]. Materials science & engineering A, 2012, 558(3): 602-606.
- [10] 向青春, 侯丽娜, 赵静, 等. Sc、Zr 微合金化对 Al-4Cu-1.5Mg 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 59(7): 611-645.
- [11] 王旭, 吴私, 刘运腾, 等. Al-Zn-Mg-Cu 系合金微合金化的研究进展[J]. 山东科学, 2014, 27(1): 56-62.
- [12] 李锡武, 熊柏青, 张永安, 等. 时效对新型 Al-Zn-Mg-Cu 合金力学及应力腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属, 2010, 34(4): 503-508.
- [13] 王正安, 汪明朴, 杨文超, 等. 1973 铝合金铸态组织及均匀化退火组织研究[J]. 材料工程, 2010, 43(5): 56-63.
- [14] 陈旭. Al-Zn-Mg-Cu 合金热处理工艺及组织性能研究[D]. 长沙: 中南大学材料科学与工程学院, 2012.

## Effect of Zn on the Microstructures and Mechanical Properties of an Al-Cu-Mg-Ag Alloy

WANG Jiefang, ZHANG Duo, GUO Qiaoneng, LIU Zhongxia, WANG Mingxing

(Key Laboratory of Materials Physics of Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The effect of zinc on the microstructures and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy was investigated using optical microscope, differential thermal scanners, scanning electron microscope, hardness and tensile property test. The results showed that the addition of Zn did not change the morphology and composition of the second phase, the best homogenization treatment of the alloy was  $500\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ . The peak aging hardness was increased from 169 MHV to 182 MHV, the tensile strength and yield strength at room temperature were increased by 23 MPa and 27 MPa, respectively. And the elongation of the alloy was still kept at a high level of 14%. The reason could be the solution of the zinc increase the crystal lattice distortion, and then lead to the improvement of the mechanical properties.

**Key words:** Al-Cu-Mg-Ag alloy; zinc; distribution; lattice distortion; mechanical properties



文章编号: 1671-6833(2017)03-0010-05

## 内置扭带管内湍流流动与传热数值模拟

吴金星, 王超, 王明强, 刘艳会, 李亚飞

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了提高内置扭带管的综合性能, 开发了一种三边扭带, 并对空管、普通扭带管、格栅扭带管及三边扭带管内流体流动与传热特性进行了数值模拟。以水为工质, 采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型, 扭带扭率  $\gamma=2.0$ , 取  $Re=5\,000\sim30\,000$ , 计算了扭带管内努赛尔数  $Nu$ 、阻力系数  $f$  和综合性能评价因子  $\eta$ , 与同工况下空管进行了对比。结果表明, 相比于空管、普通扭带管和格栅扭带管, 三边扭带管的综合性能较好, 其  $\eta$  值比空管高出 11.9%~33.2%。

**关键词:** 普通扭带; 格栅扭带; 三边扭带; 强化换热; 数值模拟

**中图分类号:** TK172 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.018

### 0 引言

采用强化换热技术提高换热器效率是当前换热器研究领域的一项重大课题。管内插入扭带是一种简单实用的强化传热技术。Manglik、Bergles<sup>[1-2]</sup> 以及 Samar 等<sup>[3]</sup> 较早地通过实验研究了螺旋扭带的强化传热特性, 并总结出内置扭带管强化传热的 3 种机理: ①当量直径的减少引起流体流速的增加; ②螺旋结构引起流体流程的增加; ③管内二次流引起管壁切应力的增大并增强了流体的掺混。朱登亮等<sup>[4]</sup> 模拟研究了扭带管内传热系数、压降与雷诺数及湍流动能的关系, 提出应使换热器的湍流动能限制在一定的范围内, 以获得较好的综合性能。张琳等<sup>[5-6]</sup> 模拟了自旋扭带管内流体流动及传热特性, 发现扭带管内流体近壁区域轴向、切向、径向速度和湍流强度的加大, 强

化了管内的对流传热。王特等<sup>[7]</sup> 模拟研究了多种内置交替轴扭带管内层流换热特性, 发现交替轴窄边中空扭带具有较好综合性能。

国内外学者研究表明<sup>[8-10]</sup>, 管内插入扭带在强化换热的同时, 流动阻力也迅速增大, 强化传热综合性能欠佳, 同时对于不同类型内置扭带管的性能对比研究较少。因此, 笔者开发了一种三边扭带, 并运用 CFD 软件模拟研究了普通扭带管、格栅扭带管及三边扭带管内的流体流动与传热特性, 并与空管进行了对比分析, 用流体流动和传热理论对内置扭带管的综合性能进行分析评价。

### 1 模型的建立与模拟方法

#### 1.1 几何模型

普通扭带、格栅扭带和三边扭带如图 1 所示。

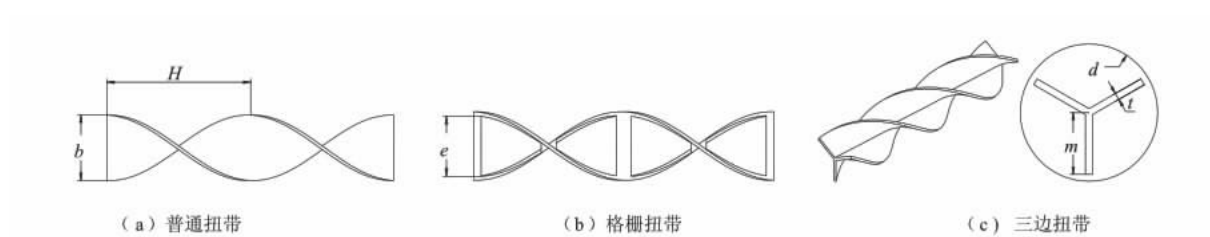


图 1 普通扭带、格栅扭带和三边扭带结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical twisted tape, grid spiral tape and 3-edge twisted tape

收稿日期: 2016-06-07; 修订日期: 2016-08-25

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目(132102210406); 郑州市科技攻关计划项目(141PPTGG410)

通信作者: 吴金星(1968—), 男, 河南通许人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事强化传热及节能技术研究, E-mail: wujx@zzu.edu.cn.

普通扭带的几何参数主要有: 扭带宽度  $b$ , 扭带半节距  $H$ , 即扭带扭转  $180^\circ$  对应的长度, 扭率  $\gamma = H/d$ . 在普通扭带上面间隔轧出一定尺寸的方孔就形成了格栅扭带, 方孔沿轴向均布; 三边扭带是将三片金属薄板焊接后扭曲而成, 邻边夹角为  $120^\circ$ .

内置扭带管的全流道模型主要参数有: 换热管内径  $d = 20.0 \text{ mm}$ , 全长  $L = 600 \text{ mm}$ , 进出口留有  $20 \text{ mm}$  空管段, 所有扭带厚度  $t = 1.0 \text{ mm}$ , 扭带半节距  $H = 40.0 \text{ mm}$ , 扭带宽度  $b = 18.0 \text{ mm}$ , 扭率  $\gamma = 2.0$ , 三边扭带边高  $m = 9.0 \text{ mm}$ , 格栅扭带开孔边长  $e = 16.0 \text{ mm}$ , 模拟的流体  $Re = 5\,000 \sim 30\,000$ , 对应的流体流速为  $0.25 \sim 1.5 \text{ m/s}$ .

## 1.2 模拟方法及模型验证

分别建立普通扭带管、格栅扭带管及三边扭带管及空管的几何模型, 划分六面体网格, 并对近壁面网格细化处理. 划分 5 套网格, 计算  $Re = 10\,000$  时的  $Nu$  和  $f$ . 当网格数量为  $72.84 \times 10^4$  时即可满足网格无关性要求. 为保证模拟精确, 选择网格数目为  $140.76 \times 10^4$ . 流道采用速度进口, 压力出口, 管壁面温度设为  $330 \text{ K}$ , 扭带表面设为绝热壁面.

模拟  $Re = 5\,000 \sim 25\,000$  时的  $Nu$  与  $f$  值, 并与 Manglik and Bergles 经验公式<sup>[2]</sup> 进行了对比, 结果如图 2 所示. 模拟得到的  $Nu$  值与实验值最大误差在  $10\%$  以内; 模拟得到的  $f$  值与实验值误差大部分都在  $15\%$  以内, 因此模拟结果满足准确性要求.

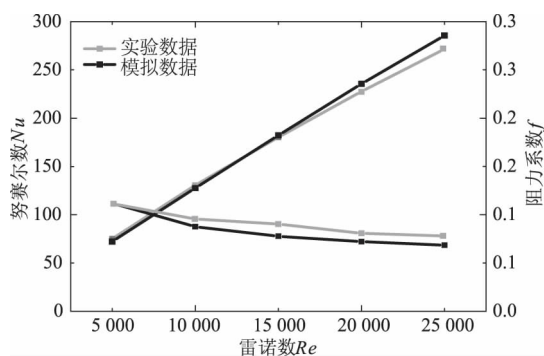


图 2 数值模拟结果与实验结果对比

Fig. 2 The comparison of simulation and experiment

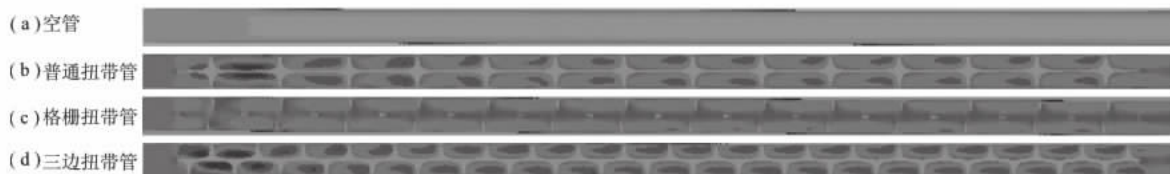


图 3 空管及内置扭带管轴向速度分布云图

Fig. 3 The contour plots of velocity on the axial plan of tubes

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 速度与温度分布特性

图 3 为内置扭带管轴向速度分布云图. 图 3 显示: 三边扭带管内两侧区域流体速度变化剧烈, 速度梯度较大, 普通扭带次之, 格栅扭带较小. 图 4 为内置扭带管中心横截面速度分布云图. 图 4 显示: 各种扭带管内流体的速度分布均呈漩涡状, 而三边扭带管内流体呈现 3 个螺旋流动. 可见三边扭带的旋流作用较强, 从而使流体产生径向及切向流动, 加强了壁面区流体与中心区流体的掺混, 管内速度梯度较大. 格栅扭带因中心开孔较大, 导致旋流作用较弱, 速度梯度较小.

图 5 为扭带管轴向温度分布云图. 图 5 显示: 三边扭带管内低温区长度较短, 格栅扭带管低温区长度较长. 图 6 为中心横截面的温度分布云图. 图 6 显示: 三边扭带低温区面积较小, 温度梯度较大, 热流密度较高; 格栅扭带的温度分布状况较差, 主要是因为中间开孔的阻隔减弱了流体的旋流, 从而减弱了壁面区流体与中心区流体的掺混, 造成温度梯度较小, 对流换热效率较低.

### 2.2 传热和阻力性能分析

3 种内置扭带管及空管的  $Nu$  随  $Re$  的变化规律如图 7 所示. 结果表明: 同等条件下, 三边扭带管的  $Nu$  较大, 比空管提高  $70\% \sim 116\%$ , 比普通扭带管提高  $8.34\% \sim 9.72\%$ , 普通扭带管和格栅扭带管的  $Nu$  相差不大.

3 种内置扭带管及空管的阻力系数  $f$  随  $Re$  的变化规律如图 8 所示. 由图 8 可以看出, 三边扭带管的  $f$  高于普通扭带管, 低于格栅扭带管. 格栅扭带呈现较大  $f$  值的原因在于: 流体流经开孔处时, 由于管中心低压区的存在, 使周围高压区的流体产生流经方孔的横向流动, 扭带区域内的流体速度分布混乱, 致使流动阻力增大, 同时因为中间肋的阻碍作用也使得流动阻力进一步增大.

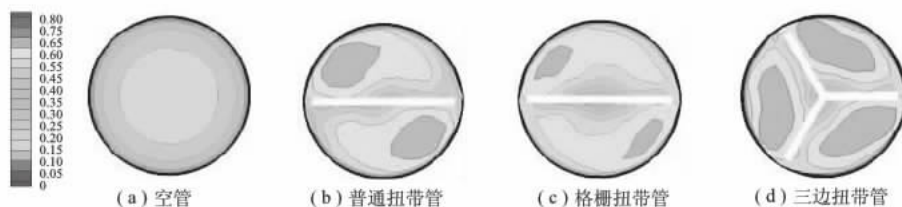


图4 空管及内置扭带管中心横截面速度分布云图

Fig.4 The contour maps of velocity on the middle cross-section plan of tubes

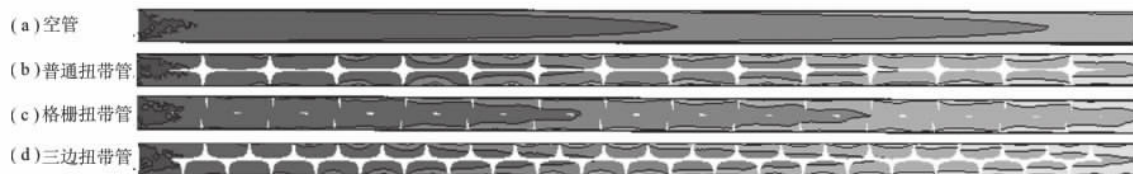


图5 空管及内置扭带管轴向温度分布云图

Fig.5 The contour maps of temperature on the axial plane of tubes

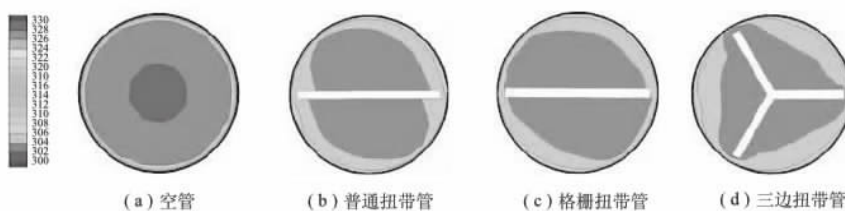
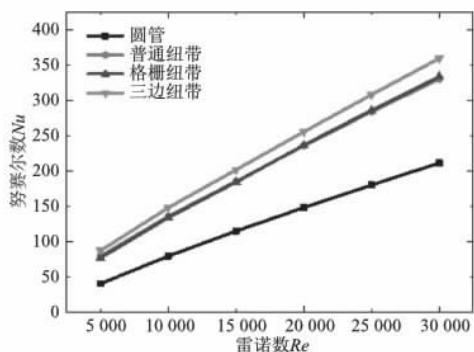
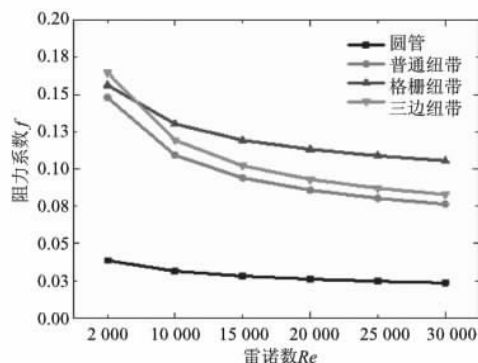


图6 空管及内置扭带管中心横截面温度分布云图

Fig.6 The contour maps of temperature on the middle cross-section plane of tubes

图7 内置扭带管  $Nu$  随  $Re$  的变化规律Fig.7 The variation of  $Nu$  of tubes with twisted tape inserts图8 内置扭带管  $f$  随  $Re$  的变化规律Fig.8 The variation of  $f$  of tubes with

twisted tape inserts

### 2.3 综合评价及场协同分析

基于等泵功评价指标,用综合性能评价因子  $\eta$  来评价不同内置扭带管的综合性能,  $\eta$  越大表明其综合性能越好,  $\eta$  的定义如下:

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{\frac{1}{3}}}$$

根据场协同原理<sup>[11-12]</sup>,提高速度矢量和温度梯度矢量的协同程度可强化传热,采用场协同数  $F_c$ <sup>[13]</sup> 来分析流场的协同程度,  $F_c$  越大,表明整个流场的协同性越好.  $F_c$  的定义如下:

$$F_c = \int \bar{U} \cdot \nabla T d\bar{y} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$$

不同扭带管的综合性能评价因子  $\eta$  随  $Re$  的变化规律如图9所示.可以看出,在模拟  $Re$  范围内,各内置扭带管的综合评价因子  $\eta$  随着  $Re$  增加而降低,这是由于随着雷诺数的增加,管内流体滞留层减薄到一定程度,通过破坏边界层的方式进行强化换热的能力逐渐弱化.  $Re = 5\,000 \sim 15\,000$  时,各扭带管的  $\eta$  值在  $1.0 \sim 1.33$ ,强化换热效果明显;  $Re > 15\,000$  时,只有普通扭带和三边扭带的  $\eta$  值在  $1.0$  以上,三边扭带管的  $\eta$  值较大,比空管

高出 11.9% ~ 33.2%.

不同扭带管的场协同数  $F_c$  随  $Re$  的变化规律如图 10 所示. 可以看出, 场协同数  $F_c$  随着  $Re$  的增大而减小, 说明流速越高, 场协同性能越差. 通过对比发现, 三边扭带管的场协同数较大, 流体的整场协同性较好; 普通扭带管和格栅扭带管的场协同数相差不大, 均小于三边扭带管.

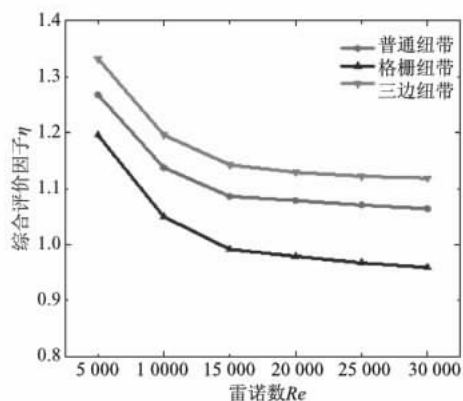


图9 各内置扭带管  $\eta$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 9 The variation of  $\eta$  of tubes with twisted tape inserts

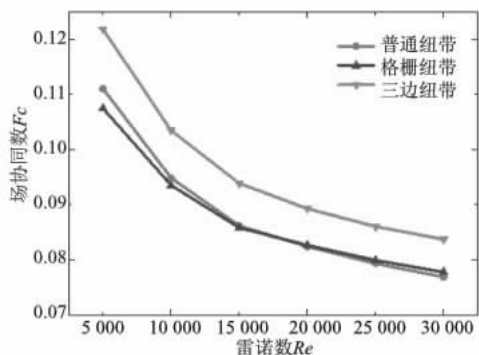


图10 各内置扭带管  $F_c$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 10 The variation of  $F_c$  of tubes with twisted tape inserts

### 3 结论

为了提高内置扭带管的综合性能  $\eta$  值, 开发了一种三边扭带, 同时模拟研究了空管、普通扭带管、格栅扭带管以及三边扭带管内的流体流动与传热特性, 得到的主要结论如下:

(1) 3 种内置扭带管的  $Nu$  均随着  $Re$  的增大而增大, 同等条件下三边扭带管的  $Nu$  较大, 比空管提高 70% ~ 116%, 比普通扭带管提高 8.34% ~ 9.72%, 普通扭带管和格栅扭带管的  $Nu$  相差不大.

(2) 3 种内置扭带管的  $f$  随着  $Re$  的增大而递

减, 同等条件下三边扭带管的阻力系数  $f$  高于普通扭带管, 低于格栅扭带管.

(3) 在模拟的雷诺数范围内, 三边扭带管的综合性能  $\eta$  较好, 比空管高出 11.9% ~ 33.2%; 格栅扭带的综合性能  $\eta$  较差,  $Re > 15\,000$  时, 格栅扭带的  $\eta$  值小于 1.0.

(4) 三边扭带管的场协同数较大, 流体的整场协同性较好; 普通扭带管和格栅扭带管的场协同数相差不大, 均小于三边扭带管.

### 参考文献:

- [1] MANGLIK R M, BERGLES A E, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes, part I: laminar flows [J]. Journal of heat transfer, 1993, 115(4): 881-889.
- [2] MANGLIK R M, BERGLES A E, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes, part II: transition and turbulent flows [J]. Journal of heat transfer, 1993, 115(4): 890-896.
- [3] SARMA P K, SUBRAMANYAM T, KISHORE P S, et al. Laminar convective heat transfer with twisted tape inserts in a tube [J]. International journal of thermal sciences, 2003, 42(9): 821-828.
- [4] 朱登亮, 吴金星, 张丽娜, 等. 圆形流道内置扭带强化传热机理分析 [J]. 节能技术, 2006, 24(5): 402-418.
- [5] 张琳, 钱红卫, 俞秀民, 等. 自转螺旋扭带管内湍流特性研究 [J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(1): 17-21.
- [6] 张琳, 钱红卫. 自转螺旋扭带管内三维流动与传热数值模拟 [J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1633-1638.
- [7] 王特, 王飞龙, 范爱武, 等. 内置交替轴扭带的管内层流换热特性 [J]. 化工学报, 2014, 65(S1): 316-322.
- [8] 马晓英. 扭带强化管内单相对流换热的研究进展 [J]. 能源研究与信息, 2011, 27(1): 50-54.
- [9] 向飒, 王定标, 梁珍祥. 规则间隙内置扭带管的强化传热特性研究 [J]. 热科学与技术, 2012, 11(4): 301-306.
- [10] KHWANCHIT W, SMITH E. Heat transfer enhancement by twisted tapes with alternate-axes and triangular, rectangular and trapezoidal wings [J]. Chemical engineering and processing: process intensification, 2011, 50(2): 211-219.
- [11] GUO Z Y, LI D Y, WANG B X. A novel concept for connective heat transfer enhancement [J]. International journal of heat transfer, 1998, 41(14): 2221-2225.
- [12] GUO Z Y, WANG S. Novel concept and approaches of heat transfer enhancement [C] // Process of Symposium on Energy and Engineering. New York: Hemisphere Public Corporation, 1995: 137-145.



- [13] 夏翔鸣,赵立伟,徐宏,等. 基于场协同理论的强化传热综合性能评价因子[J]. 热能动力工程,2011, 26(2): 197-202.

## Numerical Simulation of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in a Circular Tube with Twisted Tape Inserts

WU Jinxing, WANG Chao, WANG Mingqiang, LIU Yanhui, LI Yafei

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive performance of convection in tubes inserted with twisted tapes, in the developed 3-edge twisted tape, a simulation was carried out to examine the comprehensive characteristics of single phase convection in circular tubes inserted with twisted tapes, including typical twisted tape, grid spiral twisted tape and 3-edge twisted tape. With water as the working fluid, the behavior of fluid flow and heat transfer of these different types of twisted tapes with the same twist ratio  $\gamma = 2.0$  were studied. The RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model was chosen for the Reynolds number ranging from 5 000 to 30 000. The nusselt number( $Nu$ ), friction factor( $f$ ) and comprehensive performance evaluation factor( $\eta$ ) were calculated and compared with those of a plain tube in the same condition. The results showed that the comprehensive performance of 3-edge twisted tape was better than plain tube, the tubes with typical twisted tape and grid spiral twisted tapes insert.

**Key words:** typical twisted tape; grid spiral twisted tape; 3-edge twisted tape; enhanced heat transfer; numerical simulation

(上接第 5 页)

## The Synthesis and Photocatalytic Properties of rGO-ZnSn(OH)<sub>6</sub> Composite

LU Hongxia, LI Xuexue, LEI Jun, ZHAO Tiange, SHAO Gang

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** ZnSn(OH)<sub>6</sub> microl nanocubes with good dispersancy, uniform particle size distribution, and the average particle size for micro/nanoscale (100 ~ 200nm) were prepared by the hydrothermal method using (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn • 2H<sub>2</sub>O, NaOH and SnCl<sub>4</sub> as reactants, and the acidificate the Zinc hydroxysta treatment, graphene oxide(GO) was prepared by a modified Hummers method. GO-ZnSn(OH)<sub>6</sub> composite was prepared under the condition of low temperature, reduction graphene oxide(rGO) was obtained by photo induced reduction of GO under UV irradiation, and finally get rGO-ZnSn(OH)<sub>6</sub> composite. The samples were characterized by the XRD, SEM, FT-IR, UV-Vis and PL to analyze the phase, microstructure and optical absorption properties, and the effect of different amounts of GO dopant on the photocatalytic property of rGO-ZnSn(OH)<sub>6</sub> composite was also evaluated using methylene blue as the degradation of material. The results showed that the mass fraction of GO was 2.0 (massfraction, %), the maximum degradation rate of the rGO-ZnSn(OH)<sub>6</sub> composite was 93.2%, the degradation rate constant  $k = 0.026 \text{ min}^{-1}$ , which was 2 times and 4.3 times of the pure ZnSn(OH)<sub>6</sub>, respectively.

**Key words:** ZnSn(OH)<sub>6</sub>; low temperature solution method; rGO-ZnSn(OH)<sub>6</sub>; photocatalytic property

文章编号: 1671-6833(2017)03-0015-05

## 增塑剂改性沥青路用性能试验研究

傅 珍<sup>1</sup>, 申万青<sup>1</sup>, 孔志峰<sup>2</sup>, 张 超<sup>2</sup>

(1. 长安大学 材料学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 为了提高沥青结合料的柔韧性, 借鉴增塑剂在塑料制品的成功应用, 选用两种不同类型的增塑剂, 研究其对沥青的改性效果. 通过针入度、软化点、延度、黏度、测力延度和弹性恢复等试验对两种增塑剂改性沥青性能进行研究, 并从沥青的感温性、高低温性能、弹性恢复和老化特性等方面对路用性能改善效果做出评价. 试验结果表明, 两种增塑剂对沥青低温柔韧性改善效果显著, 同时对沥青结合料的感温性、弹性恢复和抗老化性也有一定的改善效果, 但不利于沥青的高温稳定性; 对比两种增塑剂改性沥青的路用性能, 马来酸二辛酯的改性效果优于邻苯二甲酸二辛酯, 且建议马来酸二辛酯最佳掺量值为3.0%.

**关键词:** 道路工程; 增塑剂改性沥青; 路用性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.03.001

### 0 引言

目前, 应用在沥青中的改性材料, 主要有3类: 高分子聚合物、矿物质填料和添加剂. 聚合物改性沥青可以分为3类: ①热塑性弹性体类, 代表为SBS; ②橡胶类, 如丁苯橡胶(SBR)、橡胶粉等; ③树脂类, 如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、EVA等. SBS改性沥青可以同时改善沥青的温度敏感性、高低温及抗疲劳等多方面性能<sup>[1]</sup>, 但有学者对其低温抗裂性能改善效果提出质疑<sup>[2]</sup>; 橡胶类改性沥青具有较好的低温抗裂性能和较好的粘结性能, 高温性能改善微弱<sup>[3]</sup>; 树脂类改性沥青具有良好的高温稳定性, 但对沥青路面的低温抗裂性能无明显改善<sup>[4]</sup>. 矿物质填料包括硅藻土、纳米材料、天然沥青等. 文献[5-6]研究发现, 硅藻土改性沥青具有良好的高温抗变形能力, 但低温性能降低. 文献[7]表明, 用纳米材料改性沥青可以改善结合料的路用性能, 但主要表现在高温性能上, 低温效果改善不明显. 天然沥青则主要体现在水稳定性能提高方面<sup>[8]</sup>.

沥青结合料作为沥青混合料的主要组成部分, 其低温拉伸变形性能决定了沥青路面的低温抗裂性能. 因此, 提高沥青结合料的低温性能, 可以有效地降低沥青路面的低温开裂. 增塑剂作为

一种高分子材料助剂, 可以显著改善塑料制品的柔韧性, 被大量应用于塑料工业中<sup>[9]</sup>. 杨希旺<sup>[10]</sup>和孔志峰<sup>[11]</sup>在论文中将增塑剂作为改性剂添加到沥青中并研究其改性效果, 结果表明, 增塑剂可以显著改善沥青胶结料的低温性能.

笔者借鉴增塑剂在塑料工业中可提高制品塑性这一特点, 选用邻苯二甲酸二辛酯(DOP)和马来酸二辛酯(DOM)两种增塑剂对沥青改性, 研究其对沥青路用性能的影响及规律, 为沥青改性材料的研究提供参考.

### 1 原材料及试验方案

#### 1.1 原材料

本研究选用中海90#沥青, 主要技术指标如表1所示, 增塑剂采用马来酸二辛酯(DOM)与邻苯二甲酸二辛酯(DOP), 其相关基本物理指标见表2. 对于改性沥青的制备, 首先, 取500g基质沥青, 置于140℃烘箱熔化至流动状态, 然后称取相应比例的增塑剂分别倒入基质沥青中, 再用强力电动搅拌机进行搅拌, 转速设定1000r/min, 时间10min. 搅拌过程中保持140℃加热温度不变.

表2中两种增塑剂属类似油状液体, 密度与沥青相近, 从搅拌结果目测观察来看, 相容效果良好.

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108038; 51108039)

作者简介: 傅珍(1976—), 女, 河南鹤壁人, 长安大学教授, 博士, 主要研究方向为道路结构与材料, E-mail: zhenfu@chd.edu.cn.

表 1 基质沥青主要技术指标

Tab.1 Main technical indexes of base asphalt

沥青型号	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	15℃延度/cm	软化点/℃	针入度指数	相对密度 (15℃)
中海 90#沥青	80.1	128.8	46.5	-0.94	0.99

表 2 增塑剂主要物理指标

Tab.2 Main physical indexes of plasticizers

增塑剂种类	外观	凝固点/℃	沸点/℃	相对密度(25℃)	黏度/(mPa·s)
DOM	无色透明液体	-50	195~207(0.67 kPa)	0.944	17.0
DOP	黄色透明液体	-55	386	0.981	81.4

## 1.2 试验方案

在基质沥青分别添加 1.5%、2.0%、2.5%、3.0% (质量分数) 掺量的两种增塑剂,对两种增塑剂改性沥青进行 3 大指标、测力延度、旋转黏度、弹性恢复和老化后的 3 大指标等试验,从感温性、高低温性能、弹性恢复和老化特性等方面对增塑剂改性沥青的改性效果进行分析。

由于增塑剂是一种油状液体,作为轻质组分——油分添加到沥青中,改变了沥青的四组分比例,因此笔者从短期老化的角度对老化后沥青性能变化进行研究。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 感温性能

通过针入度试验,测定 15℃、25℃和 30℃ 3 个温度下沥青针入度,得出针入度和针入度指数  $PI$  的试验结果如图 1 和图 2 所示。

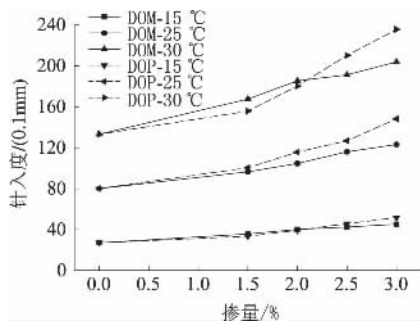


图 1 不同掺量增塑剂的沥青的针入度

Fig.1 Penetration of different dosage plasticizers

两种增塑剂都是类似油状液体,加入到沥青中,使沥青流变性发生变化,黏度降低,该结果由图 1 可以直观地反映出。相同温度下,随着增塑剂掺量的增加,两种增塑剂改性沥青的针入度持续增大,原因是增塑剂作为一种油分加入到沥青中,改变了沥青中四组分的比例,饱和分与芳香分的含量对针入度指标的影响较大,轻质组分比例的

增加会导致针入度数值的变大。

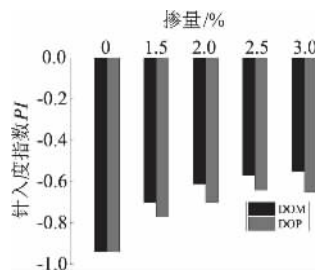


图 2 不同掺量增塑剂的沥青的针入度指数

Fig.2 Penetration index of different dosage plasticizer

在我国,针入度指数  $PI$  作为沥青感温性常用评价指标。如图 2 所示,掺入 1.5%、2.0%、2.5%、3.0% 的增塑剂后,两种沥青的  $PI$  值均比基质沥青有所提高,说明两种增塑剂均可以降低沥青结合料的温度敏感性,但不同的增塑剂对沥青感温性能改性效果不同。随着增塑剂掺量的不断增加,沥青  $PI$  值也在逐渐提高,但是提高幅度在逐渐减小。两种增塑剂对沥青感温性的改善效果作比较,DOM 优于 DOP。

### 2.2 高温性能

采用当量软化点  $T_{800}$  和 60℃ 黏度指标来评价沥青高温性能。试验结果见图 3 和图 4。

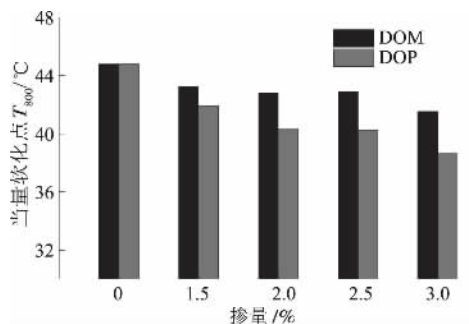


图 3 不同增塑剂掺量的沥青的当量软化点

Fig.3 Equivalent softening of different dosage plasticizer

由图 3 可以看出,增塑剂改性沥青的当量软

化点较基质沥青略有降低. 未掺增塑剂的沥青当量软化点为  $44.79^{\circ}\text{C}$ , 随增塑剂掺量的不断增加, 沥青的当量软化点也在不断降低. 沥青中胶质比例的变化对软化点影响最大, 增塑剂的添加可能改变了沥青中胶质比例, 同掺量增塑剂, DOP 改性沥青软化点降低幅度超过 DOM, DOM 增塑剂对原基质沥青的四组分比例影响相对较小.

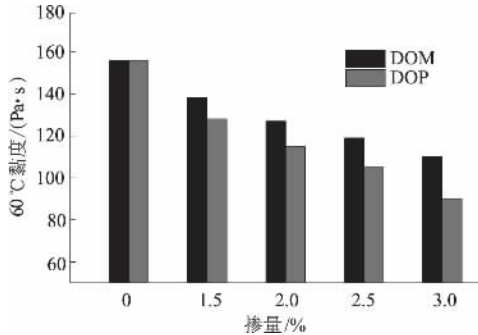


图4 不同掺量增塑剂的沥青的  $60^{\circ}\text{C}$  黏度  
Fig. 4  $60^{\circ}\text{C}$  viscosity of different dosage plasticizer

沥青  $60^{\circ}\text{C}$  黏度作为反映沥青在盛夏耐热性指标, 可真实地间接反映路面的实际使用状况. 由图4可知, 增塑剂改性沥青  $60^{\circ}\text{C}$  黏度均低于基质沥青, 且随增塑剂掺量的增加,  $60^{\circ}\text{C}$  黏度持续降低, 再一次验证了增塑剂的掺入会降低沥青高温稳定性. 两种增塑剂比较而言, DOM 对沥青高温稳定性的影响相对较小.

### 2.3 低温性能

测力延度作为一种简单、快捷判定沥青胶结料性能的方法, 可以更为有效地评价沥青的低温性能<sup>[12]</sup>. 对于沥青的低温性能评价, 笔者采用测力延度、 $5^{\circ}\text{C}$  低温延度及当量脆点  $T_{1.2}$  进行多指标评价. 试验结果见图5~7.

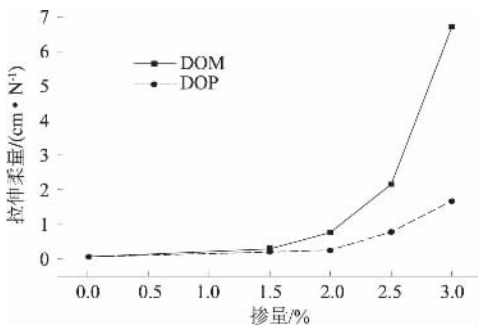


图5 不同掺量增塑剂的沥青的拉伸柔量  
Fig. 5  $5^{\circ}\text{C}$  measuring-stress ductility of different dosage plasticizer

由图5可知, 掺入增塑剂后, 改性沥青的拉伸柔量比基质沥青均有所增加. 随着增塑剂掺量的增加, 改性沥青的拉伸柔量值提高显著. 当掺量为  $3.0\%$

时, DOM 改性沥青拉伸柔量超过  $6.65\text{ cm} \cdot \text{N}^{-1}$ , 提高 100 多倍, 而 DOP 为  $1.68\text{ cm} \cdot \text{N}^{-1}$ , 提高近 30 倍.

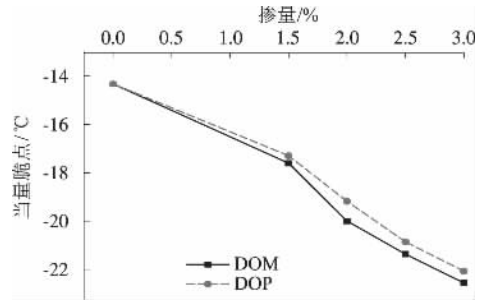


图6 不同掺量增塑剂沥青的当量脆点  
Fig. 6 Equivalent Fraass breaking point

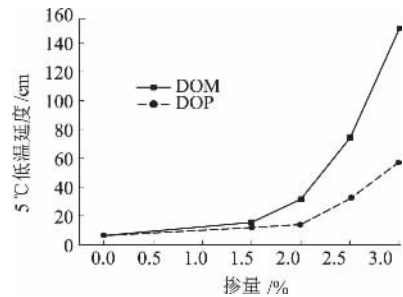


图7 不同掺量增塑剂沥青的  $5^{\circ}\text{C}$  延度  
Fig. 7  $5^{\circ}\text{C}$  ductility of different dosage plasticizer

由图6可以看出, 增塑剂的掺入可以降低沥青结合料当量脆点值  $T_{1.2}$ , 且随着掺量的不断增加, 当量脆点持续降低. 对于沥青结合料的  $5^{\circ}\text{C}$  低温延度, 增塑剂加入前后发生显著变化. 如图7所示, 未掺增塑剂的沥青结合料在  $5^{\circ}\text{C}$  的环境下近乎脆断, 随着增塑剂掺量的增加, 低温延度值也在逐渐增加, 当掺量达到  $3.0\%$  时, DOP 改性沥青的  $5^{\circ}\text{C}$  低温延度值达  $56.7\text{ cm}$ , 而 DOM 改性沥青  $5^{\circ}\text{C}$  低温延度值  $> 150\text{ cm}$ , 说明增塑剂改性沥青具有优良的低温拉伸性能.

由以上结果可以初步得出, 增塑剂可以显著改善沥青的低温柔性, 增强沥青的低温抗裂性. 对比研究中所用两种增塑剂改性效果, 由图5~7可知, DOM 对沥青低温性能改善效果更为显著.

### 2.4 弹性恢复

采用 ASTM D6084—97 及 D5876—96 规定的拉伸试验对增塑剂改性沥青的弹性恢复能力进行测试与评价, 试验温度为  $25^{\circ}\text{C}$ , 试验结果如图8所示.

由图8可见, 基质沥青经增塑剂改性后, 弹性恢复率大幅提高. 基质沥青的弹性恢复率仅为  $3\%$ , 掺入  $1.5\%$  增塑剂后, 弹性恢复率分别提高至  $9\%$  和  $6\%$ . 随着增塑剂掺量的增加, 弹性恢复



率呈现出一种线性提高,改善效果显著.对于两种增塑剂,掺量每提高 0.5%,弹性恢复率在前一个掺量的基础上提高 3%~4%.相同掺量下,DOM 的弹性恢复率均高于 DOP.增塑剂的掺入,使沥青在常温下具有较好的自愈能力,抗永久变形能力提高.

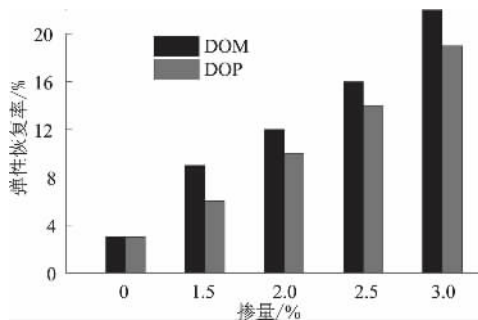


图 8 不同掺量增塑剂沥青的弹性恢复  
Fig. 8 Elasticity resuming rate of different dosage plasticizers

## 2.5 老化性能

采用薄膜烘箱试验(TFOT)模拟沥青的短期老化,并通过老化前后 3 大指标变化评价短期老化增塑剂改性沥青的性能.图 9 是 DOM 改性沥青和 DOP 改性沥青短期老化前后的试验结果.

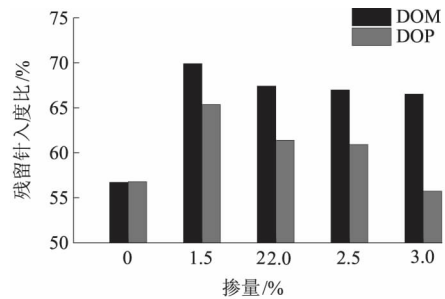
老化后残留针入度比越大,说明沥青的抗老化性能越好.由图 9(a)可知,在 4 种掺量中,除 3.0% 掺量 DOP 增塑剂改性沥青外,其他老化后所得残留针入度比均大于基质沥青. DOM 改性沥青的残留针入度比明显大于基质沥青,因为沥青四组分中,轻质组分对针入度指标影响较大.分析其原因,可能是添加增塑剂能有效降低老化对沥青组分变化的影响,但这种效应不随增塑剂掺量的提高而更加显著.随着增塑剂掺量的增加,改性沥青的残留针入度比逐渐减小,而 DOM 减小幅度比 DOP 慢,由此说明,当采用残留针入度比作为抗老化指标时,改性沥青的抗老化性能要优于基质沥青,其中,DOM 改性沥青要好于 DOP 改性沥青.

沥青老化后,软化点升高,软化点增值越小,沥青的抗老化性能越好.由图 9(b)可知,对于两种增塑剂改性沥青,随着增塑剂掺量的增加,老化后软化点增值逐渐增大,说明其抗老化能力随着掺量的增加逐渐减低,这与残留针入度比结果一致.

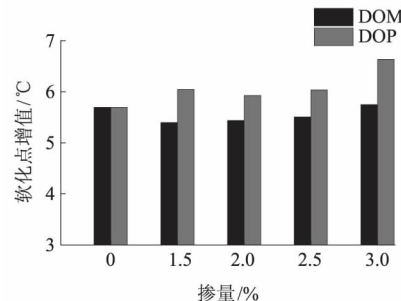
沥青老化后,延度值降低,延度残留比越大,沥青的抗老化能力越好.笔者所测延度试验温度均为 5℃,对比相关数据,老化后改性沥青的 5℃

延度依然远远高于基质沥青.图 9(c)显示,随着增塑剂掺量的增加,两种沥青的残留延度比逐渐减小,老化后 DOM 改性沥青延度值降低幅度较大.

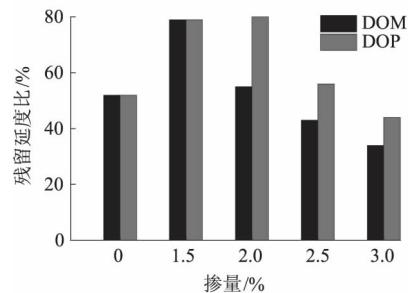
综合老化前后针入度、软化点和 5℃延度的变化情况可知,增塑剂改性沥青对沥青的抗老化能力有一定的增益作用;添加增塑剂能有效降低老化引起的沥青组分的变化,其中 DOM 的改性效果优于 DOP.



(a) 不同掺量残留针入度比



(b) 不同掺量软化点增值



(c) 不同掺量残留延度比

图 9 不同掺量的增塑剂改性沥青短期老化前后指标变化  
Fig. 9 Index change of modified asphalt with different dosage plasticizers

## 2.6 增塑剂掺量的选择

综合沥青感温性、高温稳定性、低温抗裂性能、弹性恢复及短期老化等各方面的性能可知,DOM 改性沥青优于 DOP 改性沥青.由前面分析可知,DOM 改性沥青的改性效果无法兼顾沥青结合料的各项性能:随着增塑剂掺量的增加,沥青感温性逐渐变好,低温抗裂能力和弹性恢复能力持续提高,高温稳定性和短期抗老化能力逐渐降低.

在所选4个掺量中,由于DOM对沥青的高温稳定性和抗老化方面的影响较小,建议DOM掺量为3.0%。

### 3 结论

选用两种增塑剂对基质沥青改性,分析了改性沥青的感温性、高低温性能、弹性恢复和老化等性能,推荐了较优的增塑剂,主要结论如下:

(1) 增塑剂对沥青路用性能的改性效果不同。同基质沥青对比,增塑剂改性沥青温度敏感性降低,低温柔韧性和弹性恢复能力显著提高,抗老化性能也有一定提升,但高温稳定性略微降低。

(2) 在所选掺量范围内,随增塑剂掺量的增加,沥青低温抗裂能力和弹性恢复能力持续提高,高温稳定性和短期抗老化性能力逐渐降低,而温度敏感性降低。

(3) 对比DOM和DOP两种增塑剂,综合沥青感温性、高低温性能、弹性恢复和老化等多方面性能比较,DOM对沥青的改性效果优于DOP,推荐DOM最佳掺量为3.0%。

### 参考文献:

- [1] 陈华鑫. SBS改性沥青路用性能与机理研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2006.
- [2] 张智强,周进川,饶泉宇. SBS对基质沥青低温性能改善效果研究[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(3): 89-92.
- [3] 崔亚楠,邢永明,王岚,等. 废胶粉改性沥青改性机理[J]. 建筑材料学报,2011,14(5): 634-638.
- [4] 张争奇,张登良. 聚乙烯改性沥青研究[J]. 中国公路学报,1996,9(3): 14-19.
- [5] CONG P L, CHEN S F, CHEN H X. Effects of diatomite on the properties of asphalt binder [J]. Construction and building materials,2012,30: 495-499.
- [6] 陈若祥. 硅藻土改性沥青结合料性能试验研究[J]. 公路工程,2013,38(5): 254-257.
- [7] YU J Y, ZENG X, WU S P, et al. Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts [J]. Materials science and engineering: A,2007, 447(2): 233-238.
- [8] 马峰,富志鹏,傅珍,等. 基于光电比色法的天然沥青改性沥青与集料黏附性研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(3): 77-81.
- [9] 陈立军,陈丽琼,张欣宇,等. 耐寒增塑剂的应用及发展[J]. 塑料科技,2007,35(4): 76-79.
- [10] 杨希旺. 增塑剂(ATBC)对基质沥青性能影响研究[D]. 西安:长安大学材料学院,2015.
- [11] 孔志峰. 增塑剂对路用沥青性能影响研究[D]. 西安:长安大学材料学院,2015.
- [12] 陈佩林,周进川,张肖宁,等. 沥青胶结料的测力延度试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(4): 38-42.

## Research on Pavement Performance of Asphalt Binder Modified with Plasticizer

FU Zhen<sup>1</sup>, SHEN Wanqing<sup>1</sup>, KONG Zhifeng<sup>2</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xian 710064, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xian 710064, China)

**Abstract:** With the fact that plasticizers were used successfully in plastic products to improve the low-temperature flexibility of asphalt binder, two kinds of plasticizer are selected in this paper to study the impact of two plasticizers on asphalt. In this paper, 4 different dosages of the two plasticizer totally 8 dosages were put into asphalt to study the performance of asphalt binders by several routine tests including the penetration, softening point, ductility, viscosity, measuring-stress ductility and elasticity resuming. And the modification effect was evaluated in the aspect of temperature sensitivity, high temperature and low temperature, elastic recovery and aging. The test results showed that the plasticizers did help significantly in the low-temperature performance of the modified asphalt binders, also in the facts of temperature sensitivity, anti-aging ability and elasticity resuming, but not in high-temperature performance. In general, the plasticizer DOM was better than DOP in improving the properties of asphalt binders.

**Key words:** road engineering; plasticizer modified asphalt binder; pavement performance

文章编号: 1671-6833(2017)03-0020-05

## 微细粒褐煤中腐植酸的水溶特性及其影响研究

邢龙杰, 黄艳芳, 王文娟, 韩桂洪, 刘炯天

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了充分利用褐煤, 采用光学显微镜、FTIR、接触角、Zeta 电位等分析技术, 重点研究褐煤腐植酸在水中随浸泡温度的溶解特性以及其溶解前后的褐煤总酸基含量、表面亲疏水性和表面荷电等变化规律。结果表明, 随着浸泡时间的延长, 浸泡温度的升高, 褐煤腐植酸的溶解量增大; 在浸泡温度 50 ℃, 浸泡时间 2 h 时, 腐植酸溶解量达 15.636 mg/L; 随着溶解温度的升高, 褐煤中含氧官能团减少, 其中总酸基由 2.768 mmol/g 降到 2.431 mmol/g, 接触角由 100.75° 升高到 105.33°, Zeta 电位由 -49.01 mV 升高到 -46.14 mV。

**关键词:** 褐煤; 腐植酸; 溶解; 含氧官能团; 接触角; zeta 电位

**中图分类号:** TQ028.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.004

### 0 引言

我国是一个以煤炭为主要一次能源的国家, 煤炭资源丰富, 其生产量和消耗量都居世界首位。我国褐煤资源总储量为 3 194.38 亿吨, 占我国煤炭资源总储量的 5.74%, 主要分布在内蒙古自治区东部和西南部的云南省境内。中国褐煤多属年老褐煤, 具有水分含量高、挥发分含量高、发热量低、灰熔点低、可磨指数低及利用能效低等特点, 这些特点使褐煤的开发和利用受到了限制。

与高阶煤相比, 褐煤碳含量低、氧含量高, 目前对于褐煤的研究主要集中在褐煤的提质。王冲等<sup>[1]</sup>提出了低温干燥与深度脱水的联合工艺, 研究了干燥时间、干燥温度和干燥粒度对褐煤深度脱水效果的影响; Zhang 等<sup>[2]</sup>研究了水热处理脱除褐煤中水分, 以及水热处理对褐煤物理化学性质和表面性质的影响; Racovalis 等<sup>[3]</sup>研究了水热

处理对废水中有机质含量的影响。褐煤中含氧官能团主要存在于干酪根、腐植酸和抽提物等 3 种有机质中, 其中绝大多数氧分布于腐植酸结构中<sup>[4]</sup>。当褐煤与水相互作用时, 腐植酸易发生溶解, 导致褐煤中含氧官能团发生变化, 进而引起褐煤表面性质发生改变。笔者从褐煤中的含氧官能团出发, 以腐植酸为载体, 重点研究了不同温度下褐煤腐植酸在水溶液中的溶解量、含氧官能团变化以及腐植酸溶解对褐煤表面性质的影响。

### 1 实验部分

#### 1.1 实验煤样与设备

实验所用的煤样来自中国云南省昭通煤矿。煤样经过干燥后, 先用颚式破碎机进行破碎, 再用行星磨磨机球磨 30 min。细磨处理后的褐煤物化性质分析如表 1 所示。由表 1 可以看出, 褐煤水分和灰分较高, 游离腐植酸含量高达 42.20%。

表 1 细磨处理后的褐煤样物化性质分析

Tab. 1 Physical and chemical properties of the milled lignite

工业分析含量 / %				元素含量 / %					腐植酸含量 / %	
M <sub>t</sub>	A <sub>d</sub>	V <sub>daf</sub>	FC <sub>daf</sub>	C	H	O	N	S	总腐植酸	游离腐植酸
61.60	19.91	58.75	41.25	67.12	3.54	26.00	1.56	1.78	45.79	42.20

收稿日期: 2016-06-01; 修订日期: 2016-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674225; 51404213)

通信作者: 韩桂洪(1981—), 男, 河北昌黎人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事矿物加工研究, E-mail: guihong-han@hotmail.com.

细磨处理后的煤样粒度采用显微镜法进行测定,其粒度累积分布曲线如图1所示.由图1可以看出,细磨煤样平均粒度  $D_{50}$  为  $1.821\ \mu\text{m}$ .采用红外光谱对褐煤进行了表面分析,结果如图2所示.红外光谱分析表明,褐煤中含氧官能团包括酚羟基、羧基等.

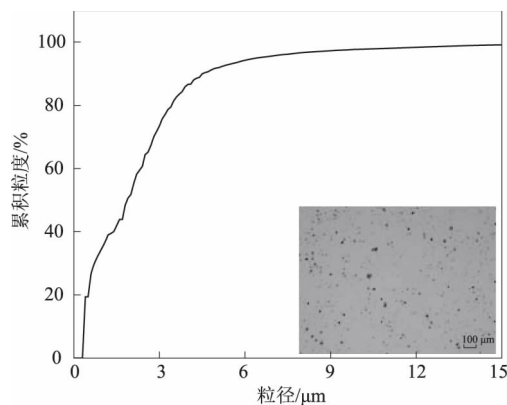


图1 细磨处理后的煤样粒度分布

Fig.1 Particle size distribution of the milled lignite

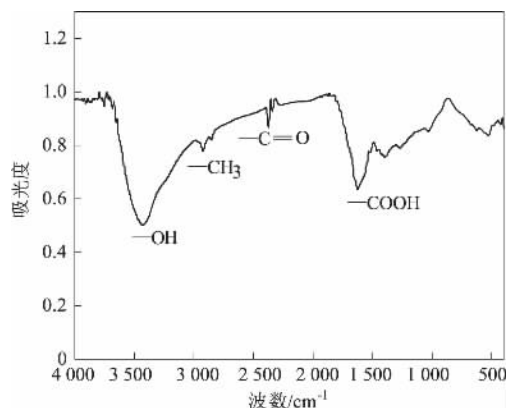


图2 细磨处理后的煤样红外光谱图

Fig.2 FTIR of the milled lignite

### 1.2 褐煤中腐植酸的溶解

褐煤中腐植酸溶解实验条件:水溶液 pH 值为 7,溶解温度为  $30\sim 50\ ^\circ\text{C}$ ,研究实验流程如图3所示.首先将 pH 值为 7 的水溶液加热到设定温度,再加入褐煤颗粒,煤浆浓度为  $3.33\ \text{g/L}$ ,分别在溶解 3、15、30、45、60、75、90、120 min 时,利用滤膜孔径为  $0.22\ \mu\text{m}$  的移液器抽取褐煤浆中的溶液,测定腐植酸含量、溶液 pH 值和颗粒的 Zeta 电位.将浸泡后的褐煤进行过滤,过滤后的煤样在真空干燥箱中  $30\ ^\circ\text{C}$  进行干燥.干燥完毕,装入试样袋,放入真空干燥器中.干燥后的煤样,进一步进行表面表征.

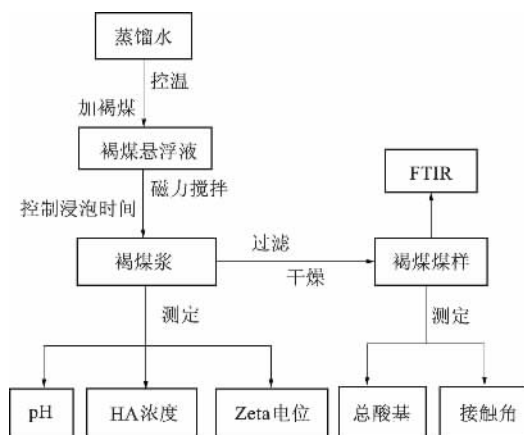


图3 实验流程图

Fig.3 The flow chart of experiment

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 溶解腐植酸的测定

采用紫外-可见分光光度法测定溶液中腐植酸的含量.配制标准溶液所用的腐植酸来源于昭通褐煤<sup>[5]</sup>,腐植酸的紫外可见光谱没有明显的特征峰. Novak 等<sup>[6]</sup>发现,从褐煤中提取的腐植酸在  $250\sim 280\ \text{nm}$  的吸光度较大,在  $280\ \text{nm}$  处发生了电子跃迁,存在一个肩峰.

笔者配制一系列浓度分别为 0、10、15、20、25、30、35  $\text{mg/L}$  的腐植酸溶液,以腐植酸浓度为横坐标,以  $280\ \text{nm}$  处的吸光度  $A$  为纵坐标绘制标准工作曲线如图4所示,所得标准工作曲线的相关系数  $R^2$  为 0.999 7.

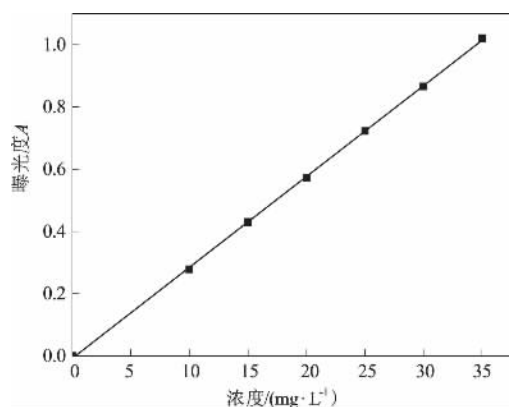


图4 腐植酸的紫外可见标准工作曲线

Fig.4 The UV-visible standard curve of HA solution

#### 1.3.2 FT-IR 测定

红外光谱分析采用北京瑞利分析仪器公司生产的 WQF-510 型傅里叶变换红外光谱仪.取  $1\ \text{mg}$  的干燥煤样与  $100\ \text{mg}$  KBr 混合压制成薄片,再将薄片放入红外光谱仪进行测试.测试波数范围:  $4000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$ ,扫描速率:  $0.55\ \text{cm/s}$ .



### 1.3.3 总酸基的测定

称取约 50 mg 样品于锥形瓶中,加入 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液 10 mL,随后加入 0.05 mol/L 的氯化钡溶液 25 mL,塞上橡皮塞,摇振 10 min,过滤,取滤液 25 mL 于 50 mL 的烧杯中,用 0.1 mol/L 的 HCl 电位滴定,终点为 pH 值为 8.4. 进行两个平行试验,同时做一个空白测定. 测定结果采用如下公式:

$$n_T = \frac{(V_2 - V_1) \cdot C_{HCl}}{m} \cdot \frac{35}{25},$$

式中:  $n_T$  为总酸性基含量, mmol/g;  $V_2$  为空白滴定时用酸体积, mL;  $V_1$  为样品滴定时用酸体积, mL;  $C_{HCl}$  为盐酸溶液的浓度, mol/L;  $m$  为样品质量, g.

### 1.3.4 接触角测定

采用上海中晨数字技术设备有限公司生产的 JC2000D 接触角测定仪测定样品的接触角. 煤样经加压成型模具压制成直径为 10 mm、厚度约 3 mm 的具有压光平面的圆柱体试片. 每个样品测定 5 次,取平均值.

### 1.3.5 Zeta 电位的测定

取不同温度下溶解 30 min 的煤泥澄清液,加入电泳池中,采用电泳仪 (JS94H<sub>2</sub> 型微电泳仪,上海中晨数字技术设备有限公司) 进行测定,每个样品分别测定 5 次,取平均值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 褐煤中腐植酸的溶解

褐煤中含有大量的腐植酸,实验中控制溶液 pH 值为 7,温度分别为 30、35、40、45、50 °C,测定了不同温度条件下腐植酸含量随浸泡时间的变化规律,实验结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出,随着浸泡时间的延长,褐煤中腐植酸溶解量逐渐提高;随着温度的升高,腐植酸的溶出量也相应升高;当浸泡温度为 50 °C,浸泡时间为 120 min 时,溶液中的腐植酸含量达到 15.636 mg/L. 上述结果表明,当温度升高或溶解时间延长,可以显著增加褐煤中腐植酸的溶解程度. 上述结果与现有研究中褐煤溶解规律一致<sup>[7]</sup>.

### 2.2 褐煤中含氧官能团的变化

分别采用红外光谱和化学滴定法对原煤和经过不同条件处理后的褐煤中含氧官能团进行测定,结果分别如图 6 和图 7 所示.

从图 6 可以看出,原煤与经过不同温度溶解后褐煤的红外光谱之间存在着明显的差异. 根

据褐煤的化学基团在特定波数处的吸收谱带<sup>[8]</sup>,褐煤红外光谱各个峰的归属分别为: 3 400 cm<sup>-1</sup> 处为羟基的—OH 的伸缩振动峰; 2 922 cm<sup>-1</sup> 处为脂肪碳基团; 1 760 ~ 1 680 cm<sup>-1</sup> 处为羧基的伸缩振动峰.

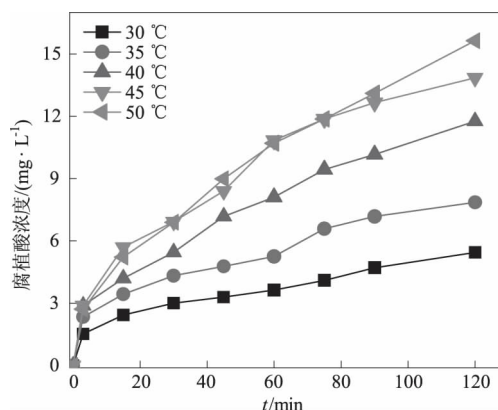


图 5 不同浸泡温度下褐煤中腐植酸的溶解

Fig. 5 Dissolution of HA in lignite under different soaking temperature

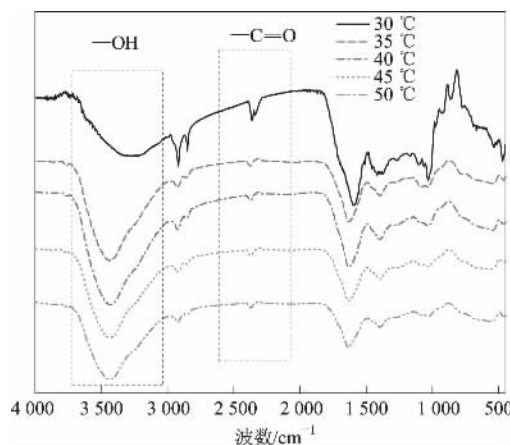


图 6 不同温度条件下褐煤的 FT-IR 图

Fig. 6 FT-IR of lignite under different soaking temperatures

图 7 为采用化学滴定法测定的浸泡后褐煤总酸基的变化. 由图 7 可以看出,随着温度的升高,总酸基(酚羟基与羧基)逐渐减少,总酸基含量由 2.768 mmol/g 降到 2.431 mmol/g. 褐煤中含氧官能团的变化与不同温度下褐煤腐植酸的溶解情况紧密相关. 张营等研究表明<sup>[9]</sup>,褐煤、腐植酸和提取腐植酸后褐煤的含氧官能团存在较大的差异,含氧官能团含量大小依次为: 腐植酸、褐煤、提取腐植酸后褐煤的含氧官能团. 褐煤含氧官能团发生变化对褐煤的表面性质存在着很大影响<sup>[10]</sup>.

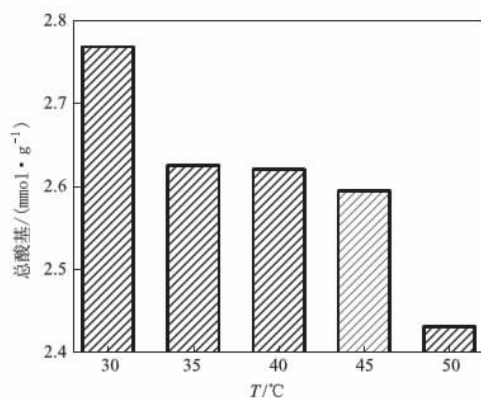


图7 不同温度条件下褐煤中总酸基的变化

Fig.7 Total acid groups of lignite under different soaking temperatures

### 2.3 褐煤表面性质的变化

接触角和 Zeta 电位是表征褐煤表面性质的重要指标. 接触角是表征褐煤的亲疏水性的重要参数, 接触角越小褐煤越亲水, 越大则越疏水<sup>[11]</sup>.

不同溶解温度条件下褐煤的接触角变化如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 褐煤的接触角随着浸泡温度的升高而不断增加, 从 100.75° 升高到 105.33°, 而原褐煤的接触角只有 99.20°. 结果表明, 褐煤的亲水性随着温度的升高而逐渐降低. Zhang 等<sup>[2]</sup>的研究也发现类似结果, 即随着溶解温度的升高, 褐煤的接触角增大. Wang 等<sup>[12]</sup>、刘文涛等<sup>[13]</sup>研究表明, 接触角与含氧官能团含量之间是线性相关的.

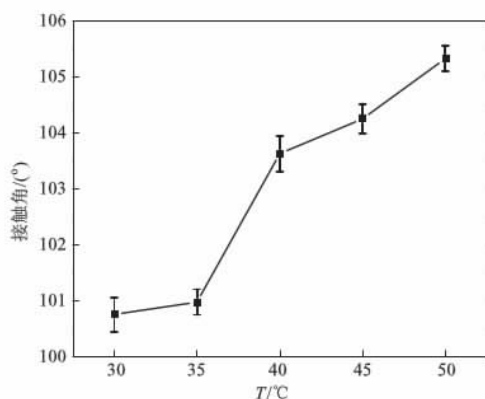


图8 不同温度浸泡褐煤样的接触角变化

Fig.8 Contact angle of lignite under different soaking temperatures

Zeta 电位是表征胶体颗粒表面电性的重要手段, 也是判断颗粒分散性的重要参数<sup>[14]</sup>. 不同温度溶解条件下, 褐煤表面的 Zeta 电位变化如图 9 所示.

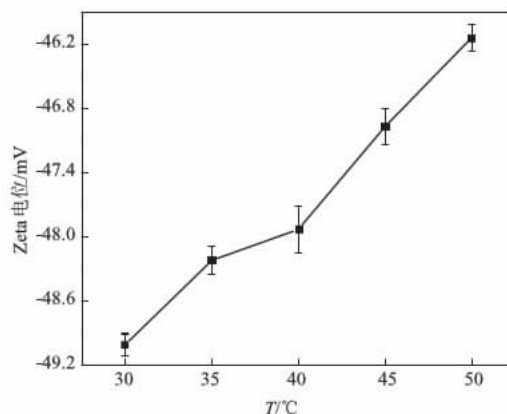


图9 不同温度条件下褐煤的 Zeta 电位变化

Fig.9 Zeta-potential of lignite under different soaking temperatures

图 9 表明, 随着温度的升高, 褐煤的 Zeta 电位由 -49.01 mV 到 -46.14 mV, 绝对值不断减小, 结果表明了褐煤表面电性减小, 分散性降低. 李敏的研究表明<sup>[15]</sup>, 褐煤被氧化后, 其 Zeta 绝对值增加, 这与本文的结论相一致.

从表面性质的变化可以得出, 随着温度升高, 腐植酸的溶解加剧, 褐煤的含氧官能团减少, 褐煤疏水性增大, 颗粒间静电力减小.

### 3 结论

(1) 褐煤颗粒所处溶液化学环境不同, 腐植酸溶解程度也随之发生改变. 随着溶液温度升高或浸泡时间延长, 褐煤中腐植酸溶解量逐渐提高. 在溶液温度 50 °C, 浸泡时间 2 h 时, 腐植酸溶解量达 15.636 mg/L.

(2) FT-IR 和化学分析结果表明: 随着溶液温度的提高, 褐煤中含氧官能团, 特别是总酸基的含量不断降低.

(3) 褐煤表面性质研究表明: 溶解温度升高, 褐煤含氧官能团减少, 最终导致褐煤的表面性质发生变化, 褐煤的接触角不断增大, Zeta 电位逐渐升高. 腐植酸溶解对褐煤所处溶液化学环境以及颗粒自身分散稳定性产生了影响, 将进一步影响褐煤后续加工利用过程.

### 参考文献:

- [1] 王冲, 董建勋, 白向飞, 等. 褐煤深度脱水的实验研究 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18(1): 49-52.
- [2] ZHANG Y X, WU J J, WANG Y, et al. Effect of hydrothermal dewatering on the physico-chemical structure and surface properties of shengli lignite [J]. Fu-

- el, 2016, 164: 128 – 133.
- [3] RACOVALLIS L, HOBDAI M D, HODGES S. Effect of processing conditions on organics in wastewater from hydrothermal dewatering of low-rank coal [J]. *Fuel*, 2002, 81( 10): 1369 – 1378.
- [4] 韩峰, 张衍国, 蒙爱红, 等. 云南褐煤结构的 FTIR 分析 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39( 11): 2293 – 2299.
- [5] 韩桂洪. 腐植酸基铁矿球团粘结剂的构效关系研究 [D]. 长沙: 中南大学资源加工与生物工程学院, 2013: 15 – 18.
- [6] NOVAK F, ŠESTAUBEROVA M, HRABAL R. Structural features of lignohumic acids [J]. *Journal of molecular structure*, 2015, 1093: 179 – 185.
- [7] HUANG Y F, WANG W J, XING L J, et al. Exploring on aqueous chemistry of micron-sized lignite particles in lignite-water slurry: Effects of pH on humics dissolution [J]. *Fuel*, 2016, 181: 94 – 101.
- [8] OREM W H, NEUZIL S G, LERCH H E, et al. Experimental early-stage coalification of a peat sample and a peatified wood sample from Indonesia [J]. *Org Geochem*, 1996, 24( 2): 111 – 125.
- [9] 张营, 冯莉, 宋玲玲, 等. 褐煤中腐植酸的提取及其含氧官能团的分析 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40( 24): 12146 – 12147.
- [10] 王永刚, 周剑林, 林雄超. 低阶煤含氧官能团赋存状态及其对表面性质的影响 [J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41( 9): 182 – 187.
- [11] CHOUNG J, XU Z, SZYMANSKI J. An integrated approach for coal tailings management [J]. *Can J Chem Eng*, 2000, 78( 4): 780 – 784.
- [12] WANG Y, ZHOU J, BAI L, et al. Impacts of inherent O-containing functional groups on the surface properties of Shengli lignite [J]. *Energ Fuel*, 2014, 28( 2): 862 – 867.
- [13] 刘文涛, 唐新颖, 梁雯娜, 等. 聚乳酸的 ATRP 引发剂的合成与表征 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35( 3): 31 – 34.
- [14] HUNTER R J. Zeta potential in colloid science: principles and applications [M]. New York: Academic Press, 1981: 198 – 276.
- [15] 李敏. 煤表面含氧官能团的研究 [D]. 太原: 太原理工大学化学化工学院, 2004: 25 – 35.

## Water-Soluble Characteristics and the Effects of Humic Acids on Micron-Sized Lignite

XING Longjie, HUANG Yanfang, WANG Wenjuan, HAN Guihong, LIU Jiongtian

( School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to make use of lignite, the dissolution of HA in lignite with the change of soaking temperature, and the content of total acid group, hydrophilicity and charge of lignite surface after dissolution was investigated. The result showed that the capacity of dissolution of HA in lignite increased with the increase of soaking time and temperature. When soaking temperature was 50 °C, soaking time 2 h, the capacity of HA was 15.636 mg/L. The analysis of FTIR was used. And the lignite after dissolution was characterized. The total acid groups, contact angle and zeta-potential of lignite after dissolution were determined. This research showed that the oxygen-containing functional groups of lignite after dissolution decreased from 2.768 mmol/g to 2.431 mmol/g, the contact angle increased from 100.75° to 105.33°; and the Zeta-potential increased from -49.01 mV to -46.14 mV with the increase of temperature.

**Key words:** lignite; humic acids; dissolution; oxygen-containing functional groups; contact angle; Zeta-potential

文章编号: 1671-6833(2017)03-0025-05

## 改性荷叶对1,4-苯二酚吸附性能的研究

韩秀丽<sup>1,2</sup>, 宋阿娟<sup>1</sup>, 白净<sup>1,2</sup>, 方书起<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 生物质炼制技术与装备河南省工程实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 以天然荷叶为原料、三乙烯四胺为改性剂, 对荷叶进行改性处理, 并用吸附法处理1,4-苯二酚废水。采用响应面分析方法对荷叶改性工艺进行优化, 得到最佳工艺条件为: 反应温度81.8℃, 反应时间3.8 h, 液料比为3 mL·g<sup>-1</sup>。考察吸附时间、吸附剂用量及pH等因素对吸附过程的影响, 并从热力学方面探讨了其吸附机理。结果表明: 吸附过程符合Langmuir和Temkin等温吸附模型, 313 K时改性荷叶对1,4-苯二酚的最大吸附量为1.384 mmol·g<sup>-1</sup>, 且吸附过程是自发的吸热过程。

**关键词:** 荷叶; 三乙烯四胺; 响应面分析; 1,4-苯二酚; 热力学

**中图分类号:** X703.1

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.009

### 0 引言

1,4-苯二酚又称氢醌, 是一类常见的酚类污染物, 因可生化性差、毒性大且难降解等特点, 急需寻求一种原料来源广泛、高效和廉价的方法处理酚类废水。目前, 处理工艺主要有催化氧化膜反应法<sup>[1]</sup>、电化学技术、酶降解法<sup>[2]</sup>和萃取法等。这些方法在应用时受到了很大程度的限制, 如催化氧化法需要研发高效催化剂和面临催化剂回收的问题; 萃取法中的萃取剂很容易在废水中残留, 且能耗高, 增加了处理过程的费用; 酶降解法很难处理高浓度的废水, 且对废水有一定的选择性。而吸附法是一种操作简单、适用于处理各种废水的方法, 因而被广泛应用。目前, 处理1,4-苯二酚废水的吸附材料主要有活性炭<sup>[3]</sup>、环糊精-壳聚糖改性氧化石墨烯<sup>[4]</sup>以及Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>改性沸石<sup>[5]</sup>等, 但其成本较高, 并且制备过程复杂, 在很大程度上阻碍其广泛应用, 所以, 寻求一种原料廉价且制备方法简单的吸附剂更有意义。荷叶作为一种农业废弃物来源广泛且价格低廉, 但原材料对1,4-苯二酚的吸附量较小, 因此对其改性制备成一种高效的吸附剂, 用于处理1,4-苯二酚废水。笔者采用响应面分析方法<sup>[6-8]</sup>优化改性荷叶的工艺, 用于处理难降解的1,4-苯二酚废水。改性荷叶不仅使农业

废弃物得到了充分的利用, 也为处理酚类废水提供了一种新方法, 同时也为其他农业废弃物的合理利用开辟了新路径, 并对减少环境污染具有重大意义。

### 1 实验部分

#### 1.1 材料与试剂

荷叶产自河南郑州; 1,4-苯二酚储备液10.0 mmol·L<sup>-1</sup>, 由分析纯1,4-苯二酚配制而成, 使用时稀释成相应的浓度。

#### 1.2 改性荷叶的制备方法

收集的荷叶用蒸馏水清洗, 在60℃的恒温干燥箱中烘5 h, 然后用小型粉碎机将烘干的荷叶进行粉碎, 过筛, 取粒度0.42~0.84 mm的荷叶储存备用。

称取一定量的荷叶放入烧瓶中, 将荷叶、水和三乙烯四胺按照一定的比例混合, 利用恒温水浴锅加热并持续搅拌反应一定时间, 过滤, 然后用蒸馏水反复冲洗荷叶至中性, 最后置于温度为60℃的恒温干燥箱中进行烘干, 得到三乙烯四胺改性的荷叶。

#### 1.3 吸附实验方法

向50 mL锥形瓶中加入10 mL一定浓度的1,4-苯二酚溶液, 再加入一定质量的改性荷叶, 置

收稿日期: 2016-06-30; 修订日期: 2016-08-08

基金项目: 车用生物燃料技术国家重点实验室开放基金资助项目(2013007); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A530005)

作者简介: 韩秀丽(1966—), 女, 河南内黄人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事可再生能源和环境污染治理研究, E-mail: xlhan@zzu.edu.cn.



于恒温水浴振荡箱中至吸附平衡,溶液离心后,用紫外分光光度计在最大吸收波长 289 nm 下测上清液的吸光度,根据标准曲线求出平衡时溶液中的 1,4-苯二酚浓度,计算其吸附量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 改性荷叶工艺参数的优化

#### 2.1.1 响应面模型的建立

根据响应面实验设计,制定了三因素三水平的 15 个实验组合:反应温度  $X_1$ , °C; 反应时间  $X_2$ , h; 液料比  $X_3$  代表的是三乙烯四胺的体积和荷叶质量的比值, mL · g<sup>-1</sup>。以 1,4-苯二酚的吸附量  $q_e$  为响应值,吸附量单位为 mmol · g<sup>-1</sup>,其试验结果见表 1。

表 1 响应面实验设计和结果

Tab. 1 Experiment design matrix and results for preparation of modified lotus leaf

编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$q_e$
1	-1(75)	-1(3)	0(3)	0.635
2	1(95)	-1(3)	0(3)	0.382
3	-1(75)	1(5)	0(3)	0.466
4	1(95)	1(5)	0(3)	0.553
5	-1(75)	0(4)	-1(2)	0.469
6	1(95)	0(4)	-1(2)	0.371
7	-1(75)	0(4)	1(4)	0.481
8	1(95)	0(4)	1(4)	0.432
9	0(85)	-1(3)	-1(2)	0.479
10	0(85)	1(5)	-1(2)	0.444
11	0(85)	-1(3)	1(4)	0.411
12	0(85)	1(5)	1(4)	0.496
13	0(85)	0(4)	0(3)	0.647
14	0(85)	0(4)	0(3)	0.645
15	0(85)	0(4)	0(3)	0.637

#### 2.1.2 模型理论分析

利用 Design Expert 8.0 软件进行回归拟合,可得到各影响因素与 1,4-苯二酚吸附量之间的关系回归方程如式(1)所示:

$$q_e = 0.64 - 0.039X_1 + 0.0065X_2 + 0.00712X_3 + 0.0085X_1X_2 + 0.012X_1X_3 + 0.03X_2X_3 - 0.077X_1^2 - 0.057X_2^2 - 0.13X_3^2. \quad (1)$$

对方程(1)求偏导,用内插法计算出最优的改性工艺条件为:反应温度为 81.8 °C,反应时间为 3.8 h,液料比为 3 mL · g<sup>-1</sup>。在优化出的最佳条件下制备改性荷叶,其对 1,4-苯二酚的平均吸附量为 0.649 mmol · g<sup>-1</sup>,因此,该模型具有较强的可靠性。

模型的方差分析如表 2 所示。其中, $F$  值是方差分析中的一个指标,用来判断各变量的显著性; $P$  值是拒绝零假设的概率水平。当  $P < 0.05$ ,有差异; $P < 0.01$ ,差异显著; $P < 0.001$ ,差异极显著。

该模型  $P$  为 0.000 2,方程模型拟合效果显著;失拟项  $P$  为 0.060 2,失拟项不显著。从显著性上分析所考察因素对吸附量的影响可知,影响吸附量的因素大小次序为:  $X_1 > X_3 > X_2$ 。交互项中,  $X_1X_2$  的交互作用对改性荷叶吸附性能的影响最为明显。

回归模型的可信度也可用多重相关系数  $R^2$  检验拟合程度。模型的相关系数  $R^2$  为 0.989 5,这表明模型与试验结果具有较好的相关性;变异系数为 3.30,表明实验操作具有较高的可靠性;用于预测实验结果的信噪比为 19.514,表明该模型可靠。

表 2 回归模型的方差分析

Tab. 2 Analysis of variance for selected factorial model for adsorption capacity

方差来源	平方和	自由度	均方值	$F$ 值	$P$ 值	状态
模型	0.130 0	9	0.014 0	52.40	0.000 2	显著
$X_1$	0.012 0	1	0.012 0	44.39	0.001 1	
$X_2$	0.003 8	1	0.003 8	1.23	0.318 7	
$X_3$	0.000 4	1	0.000 4	1.47	0.279 2	
$X_1X_2$	0.029 0	1	0.029 0	104.77	0.000 2	
$X_1X_3$	0.000 6	1	0.000 6	2.18	0.209 2	
$X_2X_3$	0.003 6	1	0.003 6	13.05	0.015 3	
失拟项	0.001 4	3	0.000 3	15.75	0.060 2	不显著
残差	0.001 3	5	0.000 4	—	—	
总离差	0.130 0	14	—	—	—	

### 2.1.3 响应面曲线图分析

各因素之间交互影响的立体图和等高图如图 1~3 所示. 从图中可以看出, 反应温度和反应时间对荷叶改性工艺有交互影响且极为显著, 反应时间和液料比有交互作用且显著. 过高的反应温度不利于三乙烯四胺上的氨基和荷叶上的羧基反应, 导致吸附活性位点减少, 吸附量降低. 同时, 随着液料比的增大, 吸附量先增大后减小, 主要是因为荷叶表面是一种多孔呈蜂窝状的结构, 三乙烯四胺具有强碱性, 过多的三乙烯四胺将会破坏这些孔结构, 造成吸附量的降低.

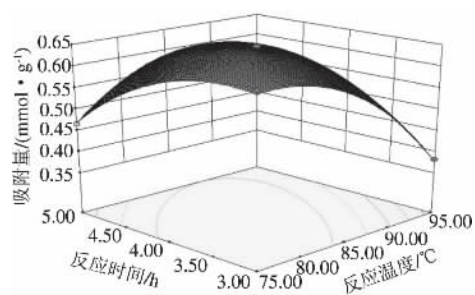


图1 反应温度与反应时间的交互影响立体图

Fig.1 Interactive influence diagram of temperature and time

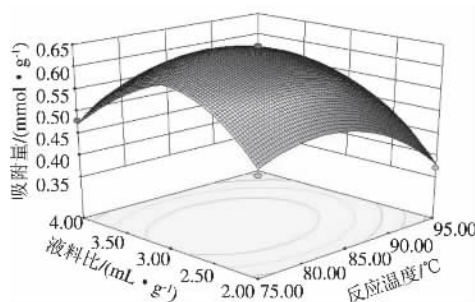


图2 反应温度和液料比的交互影响立体图

Fig.2 Interactive influence diagram of temperature and ratio of material

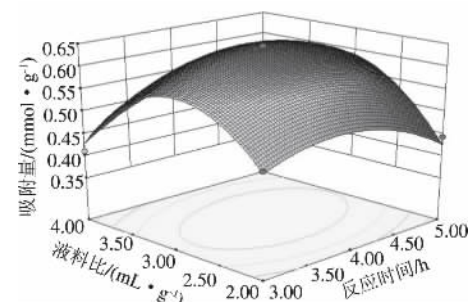


图3 反应时间和液料比的交互影响立体图

Fig.3 Interactive influence diagram of time and ratio of material

## 2.2 静态吸附试验的结果与分析

### 2.2.1 吸附时间对吸附的影响

吸附时间对吸附的影响结果如图 4 所示. 可以看出, 反应前 120 min 内为快速吸附阶段, 改性荷叶表面大量的活性位点与 1,4-苯二酚有效接触, 吸附速率加快; 120~300 min 为慢速吸附, 随着大量的活性位点被占据和溶液中 1,4-苯二酚浓度的降低, 吸附速率逐渐降低; 360 min 以后基本达到吸附平衡过程, 因此, 吸附平衡时间为 360 min.

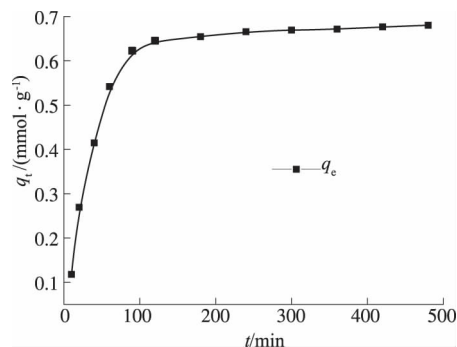


图4 吸附时间对吸附的影响

Fig.4 The effect of contact time on adsorption

### 2.2.2 吸附剂用量对吸附的影响

取 10 mL  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 1,4-苯二酚溶液置于一系列 50 mL 锥形瓶中, 加入一定量的改性荷叶, 置于 298 K 恒温振荡器中振荡至吸附平衡,  $P$  为去除率, 结果见图 5. 可以看出, 当吸附剂质量浓度从  $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 1,4-苯二酚的去除率从 18.68% 上升至 71.12%, 而吸附量却从  $0.748 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$  下降至  $0.024 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ . 去除率的提升是因为改性荷叶质量浓度的增大, 为吸附过程提供了更多的活性位点; 而吸附剂用量的增大, 导致吸附剂之间的竞争增强, 从而导致单位质量吸附剂的吸附量减小. 综合考虑去除率和吸附量, 吸附剂用量定为  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ .

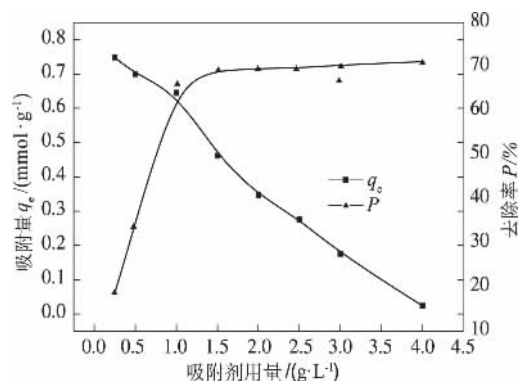


图5 吸附剂用量对吸附的影响

Fig.5 The effect of adsorbent dosages on adsorption

### 2.2.3 pH 值对吸附的影响

1,4-苯二酚初始浓度为  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 吸附剂用量为  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 调节溶液的 pH 值在 1.83 ~ 10.05, 考察 pH 值对吸附的影响, 结果见图 6. 在酸性溶液里吸附量较大, 主要是因为当溶液的 pH 值  $< 6$  时, 改性荷叶表面  $-\text{NH}_2$  与溶液中  $\text{H}^+$  结合, 形成了带正电荷的基团, 与 1,4-苯二酚之间形成很强的静电引力作用; 当 pH 值  $> 7$  时, 溶液中含有大量的  $\text{OH}^-$ , 与 1,4-苯二酚产生竞争作用, 吸附量显著下降. 1,4-苯二酚溶液的初始 pH 值为 5.52, 因此试验过程中不再调节溶液的 pH 值.

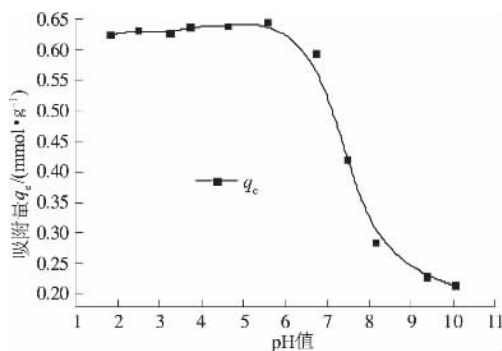


图 6 溶液 pH 值对吸附的影响

Fig. 6 The effect of pH on adsorption

### 2.2.4 吸附等温线模型

在初始浓度为  $0.4 \sim 1.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 1,4-苯二酚溶液中, 加入吸附剂用量为  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的改性荷叶, 振荡至吸附平衡, 考察温度和浓度对吸附的影响. 选用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温线模型来描述改性荷叶对 1,4-苯二酚的吸附行为<sup>[9]</sup>.

Langmuir 模型方程表达式:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}, \quad (2)$$

式中:  $q_e$  为理论平衡吸附量;  $q_m$  为单位吸附剂单分子层的饱和吸附量,  $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $K_L$  为模型吸附常数,  $\text{L} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ;  $C_e$  是吸附质的平衡浓度,  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Freundlich 模型方程表达式:

$$q_e = K_F C_e^{1/n}, \quad (3)$$

式中:  $K_F$  和  $n$  为模型常数,  $K_F$  的单位为  $(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})^{1/n}$ .

Temkin 模型方程表达式:

$$q_e = A_T + B_T \ln C_e, \quad (4)$$

式中:  $A_T$  和  $B_T$  均为模型常数.

按照公式 (2)、(3) 和 (4) 对实验数据进行非线性拟合, 分析结果如表 3 和图 7 所示. 从非线性

拟合回归的相关系数和模型参数分析可知: Langmuir 模型拟合得出的  $R^2$  均大于 0.98, 且  $q_m$  和  $K_L$  随着温度升高而增大, 因此 Langmuir 可以较好地描述其吸附过程. 而 Freundlich 模型拟合的相关系数  $R^2$  均为 0.93, 不能很好地表达其吸附行为. Temkin 模型的拟合参数  $A_T$  和  $B_T$  随着温度的升高逐渐增大, 且  $R^2$  均大于 0.98, 说明 Temkin 模型也可以很好地描述此吸附过程.

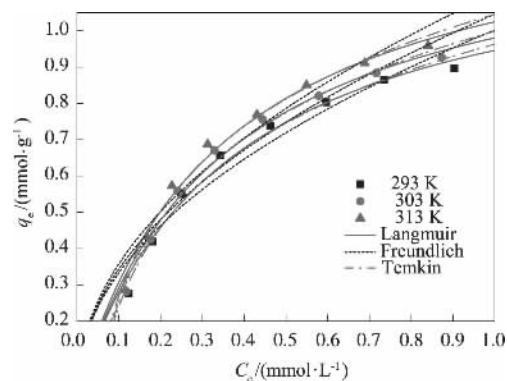


图 7 等温方程的非线性拟合曲线

Fig. 7 Non-linear fitted curve with Isotherm model

表 3 改性荷叶对 1,4-苯二酚吸附等温线参数

Tab. 3 Isotherm parameters for the adsorption of hydroquinone onto modified lotus leaf

模型	参数	293 K	303 K	313 K
Langmuir	$q_m$	1.288	1.330	1.384
	$K_L$	2.771	2.806	2.855
	$R^2$	0.983	0.985	0.983
Frundlich	$K_F$	1.002	1.046	1.103
	$1/n$	0.479	0.484	0.490
	$R^2$	0.934	0.939	0.939
Temkin	$A_T$	0.963	0.999	1.045
	$B_T$	0.314	0.324	0.337
	$R^2$	0.987	0.989	0.989

热力学参数主要包括 Gibbs 自由能  $\Delta G$ 、熵变  $\Delta S$  和焓变  $\Delta H$ , 其单位分别是  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $\text{kJ} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$  和  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . 各参数用下列公式计算:

$$\Delta G = -RT \ln K_L; \quad (5)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S, \quad (6)$$

式中:  $R$  为气体常数,  $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$  为温度, K;  $K_L$  为 Langmuir 常数,  $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

$\Delta G$  与温度  $T$  呈直线关系, 由直线的斜率和截距可得到熵变值和焓变值. 在实验温度范围内  $\Delta G$  均为负值, 熵变值 (0.012) 和焓变值 (1.184) 为正值, 说明改性荷叶对 1,4-苯二酚的吸附能够自发进行, 且吸附过程为吸热的熵增过程.

### 3 结论

利用响应面分析方法优化了三乙烯四胺改性荷叶的工艺,得到最佳工艺条件: 反应温度 81.8 °C,反应时间 3.8 h,液料比为 3 mL · g<sup>-1</sup>. 改性荷叶吸附 1,4-苯二酚的热力学数据表明: Langmuir 和 Temkin 吸附模型能够很好地描述改性荷叶对 1,4-苯二酚的吸附过程,313 K 下改性荷叶对 1,4-苯二酚的最大吸附量为 1.384 mmol · g<sup>-1</sup>,温度的升高有利于改性荷叶对 1,4-苯二酚的吸附,吸附过程属于以化学吸附为主的自发吸热过程.

### 参考文献:

- [1] WANG H, GUAN Q Q, LI J X, et al. Phenolic wastewater treatment by an electrocatalytic membrane reactor [J]. *Catalysis today*, 2014, 236(18): 121–126.
- [2] CHAGAS P M, TORRES J A, SILVA M C, et al. Immobilized soybean hull peroxidase for the oxidation of phenolic compounds in coffee processing waste water [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2015, 81: 568–575.
- [3] 崔节虎, 杜秀红, 郑宾国, 等. 粉末活性炭对模拟对苯二酚废水吸附研究 [J]. *光谱实验室*, 2009 (4): 1023–1026.
- [4] LI L L, FAN L L, SUN M, et al. Adsorbent for hydroquinone removal based on grapheme oxide functionalized with magnetic cyclodextrin–chitosan [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2013, 58: 169–175.
- [5] JIANG X, CHEN H Y, LIU L L, et al. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> embedded ZIF-8 nanocrystals with ultra-high adsorption capacity towards hydroquinone [J]. *Journal of alloys and compounds*, 2015, 646: 1075–1082.
- [6] DANISH M, HASHIM R, IBRAHIM M N M, et al. Response surface methodology approach for methyl orange dye removal using optimized Acacia mangium wood activated carbon [J]. *Wood science and technology*, 2014, 48(5): 1085–1105.
- [7] HASHEMIKIA S, HEMMATINEJAD N, AHMADI E, et al. Optimization of tetracycline hydrochloride adsorption on amino modified SBA-15 using response surface methodology [J]. *Journal of colloid and interface science*, 2015, 443: 105–114.
- [8] YANG Q, ZHONG Y, ZHONG H, et al. A novel pretreatment process of mature landfill leachate with ultrasonic activated persulfate: Optimization using integrated Taguchi method and response surface methodology [J]. *Process safety and environmental protection*, 2015, 98: 268–275.
- [9] 韩秀丽, 何玉远, 郭晓峰, 等. 脱硅稻壳基活性炭对靛蓝吸附性能的研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(3): 1–5.

## Adsorption Characteristics of Hydroquinone on Modified Lotus Leaf

HAN Xiuli<sup>1,2</sup>, SONG Ajuan<sup>1</sup>, BAI Jing<sup>1,2</sup>, FANG Shuqi<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 China; 2. Engineering Laboratory of Henan Province for Biorefinery Technology and Equipment, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The lotus leaf chemically modified by triethylenetetramine was prepared as adsorbent to remove hydroquinone from aqueous solution. Response surface methodology was applied to optimize the experimental conditions. The optimal conditions were reaction temperature of 81.8 °C, reaction time of 3.8 h and ratio of triethylenetetramine and material of 3 mL · g<sup>-1</sup>. A series of factors affecting the adsorption process such as the contact time, adsorbent dosage and pH were investigated. The isothermal process of hydroquinone was described very well by the Langmuir and Temkin models, the maximum adsorption capacity onto modified lotus leaf was 1.384 mmol · g<sup>-1</sup> at the temperature of 313 K. Thermodynamic parameters indicated that the adsorption process conformed to spontaneous and endothermic process.

**Key words:** lotus leaf; triethylenetetramine; response surface analysis; hydroquinone; thermodynamics



文章编号: 1671-6833(2017)03-0030-05

## Ta 掺杂对 $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ 电解质材料性能的影响

苏金瑞, 南怡晨, 何 豪, 赵莹莹

(郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 采用柠檬酸盐燃烧法和固相反应相结合的方法制备  $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCIY) 和掺杂 Ta 的  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCTIY) 电解质粉体, 在 200 MPa 压力下干压成型后在不同温度下烧结成电解质片, 并使用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 和电化学工作站分别对样品的物相、微观结构和电导率进行了表征。XRD 结果显示, 1 000 °C 煅烧 5 h 的 BCIY 和 BCTIY 均表现出单一的钙钛矿相。收缩率和 SEM 结果显示, BCIY 在 1 250 °C 下就可以烧结致密, 掺杂 Ta 的 BCTIY 在 1 350 °C 下也可以烧结致密。在空气和湿润的  $\text{H}_2$  气氛下 BCTIY 的电导率比 BCIY 的略有降低。在  $\text{CO}_2$  和沸水环境下, BCTIY 比 BCIY 明显表现出较好的化学稳定性。研究结果表明: BCTIY 有望成为中低温固体氧化物燃料电池稳定的电解质材料。

**关键词:** 质子导体; 固体氧化物燃料电池;  $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ ;  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ ; 烧结活性; 化学稳定性; 电导率

中图分类号: TM911

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.007

## 0 引言

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 因能量转化效率高、低污染、可循环使用等优点引起了国内外的关注<sup>[1]</sup>。与氧离子导体相比, 质子导体具有更低的活化能, 这使得质子导体固体氧化物燃料电池在中低温环境下具有较高质子传导性<sup>[2-3]</sup>。掺杂  $\text{BaCeO}_3$  和掺杂  $\text{BaZrO}_3$  是目前研究较多的质子导体, 掺杂  $\text{BaCeO}_3$  具有高的质子电导率, 但在  $\text{CO}_2$  和沸水环境中稳定性差; 掺杂  $\text{BaZrO}_3$  具有较好的化学稳定性, 但  $\text{BaZrO}_3$  的烧结活性很差, 一般需要较高的烧结温度才能使样品烧结致密<sup>[4-7]</sup>。而高温很容易导致 Ba 的挥发引起样品组分的变化, 使样品的电导率降低, 同时烧结后的  $\text{BaZrO}_3$  的晶粒较小, 晶界电阻较大, 晶界密度非常高, 也会使样品的烧结活性和离子电导率降低<sup>[2,4]</sup>。Bi 等<sup>[4,8]</sup> 和 Zhao 等<sup>[6,9]</sup> 发现用 In 掺杂  $\text{BaCeO}_3$  材料可以有效地提高  $\text{BaCeO}_3$  的烧结活性, 且不会过多地降低材料的电导率。Bi 等<sup>[4,7,10]</sup> 和 Radojkovic 等<sup>[11]</sup> 将 Ta 引入到 Y 掺杂的  $\text{BaCeO}_3$  中, 发现 Ta 的掺杂很大地提高了  $\text{BaCeO}_3$  基材料化学稳定性,

但 Ta 的掺杂却需要较高的温度才能烧结致密。笔者采用柠檬酸盐燃烧法和固相反应相结合的方法合成  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCTIY) 和  $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCIY), 研究 Ta 掺杂对 BCIY 物相、烧结活性、化学稳定性及电导率的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验药品

$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ;  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ; 柠檬酸 ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ );  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (均为天津科密欧化学试剂有限公司), 氨水 ( $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), 无水乙醇 (天津风船化学试剂科技有限公司), 浓硝酸 (洛阳市化学试剂厂)。

### 1.2 电解质制备

用柠檬酸盐燃烧法和固相反应相结合的方法合成  $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCIY) 和  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCTIY)。按化学计量比称取  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  溶于适量的去离子水中, 混合搅拌 30 min 后加入金属离子摩尔量 1.5 倍的柠檬酸, 用氨水调节 PH 值增至 7, 形成黄色溶液 (合成 BCTIY 时在形成的黄色溶液中加入不溶于水和酸

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51371160; 11104253)

作者简介: 苏金瑞 (1974—), 女, 河南洛阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事氧化物陶瓷功能材料研究, E-mail: jrsu@zzu.edu.cn.

的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , 得到含有不溶性  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  的黄色溶液)。然后加热搅拌, 使其充分络合并除去多余的水分, 等到溶液变得较少时移至蒸发皿中, 并将蒸发皿置于电炉上加热, 溶液逐渐变成胶状而后迅速燃烧, 燃烧完全后得到灰白色粉体。而后  $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$  煅烧  $5\text{ h}$ , 得到白色粉体。用  $200\text{ MPa}$  压力干压成直径约为  $10\text{ mm}$ 、厚度约为  $1\text{ mm}$  的圆形坯体, 分别在  $1\,250$ 、 $1\,350$ 、 $1\,450$ 、 $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$  下烧结成电解质片。

### 1.3 表征和电导率测量

物相采用 Philips X 型 XRD 进行表征; 用螺旋测微器测得样品烧结前后的径向变化来计算收缩率; 用 JSM-6700F 型 SEM 观察样品断面的微观形貌。采用上海辰华 CHI-604E 型电化学工作站, 用银丝做集电网将其用导电银胶固定到涂有银浆的电解质片上, 分别在空气和湿润  $\text{H}_2$  气氛下 ( $\text{H}_2\text{O}$  质量分数约  $3\%$ ) 测量电导率。阻抗的频率设为  $0.1\sim 100\text{ kHz}$ , 测试温度在  $500\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$  之间, 每隔  $50\text{ }^\circ\text{C}$  测试一次。

## 2 结果与分析

### 2.1 物相

图 1 为经  $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$  煅烧  $5\text{ h}$  后 BCIY 和 BCTIY 粉体的 XRD。由图 1 知, BCIY 和 BCTIY 均呈现单一的钙钛矿相。

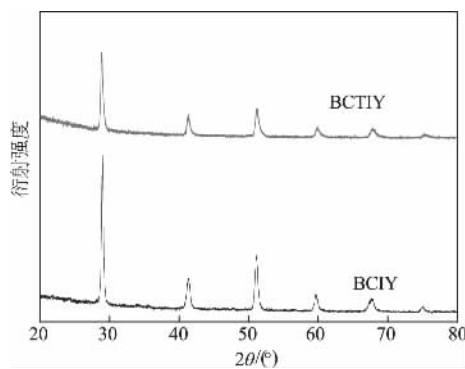


图 1 BCIY 和 BCTIY 粉体的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of BCIY and BCTIY powder

### 2.2 收缩率

收缩率可以反映样品的烧结活性。表 1 为两种样品在不同温度下煅烧  $5\text{ h}$  后的平均收缩率。从表 1 可以看出, 收缩率随温度的升高而增大, BCIY 在  $1\,250\text{ }^\circ\text{C}$  已基本烧结致密, BCTIY 在  $1\,350\text{ }^\circ\text{C}$  也可烧结致密。这与 Bi 等<sup>[4,8]</sup> 和 Zhao 等<sup>[6,9]</sup> 研究的 In 的掺杂对烧结活性有很大的提高, 与 Bi 等<sup>[4,7,10]</sup> 和 Radojkovic 等<sup>[11]</sup> 研究的 Ta 的掺杂反而会使样品比较难烧结的性能相一致。

表 1 不同温度烧结  $5\text{ h}$  后的 BCIY 和 BCTIY 样品的收缩率

Tab. 1 Shrinkage of samples BCIY and BCTIY sintered at different temperatures for  $5\text{ h}$

温度/ $^\circ\text{C}$	BCIY 收 缩率/%	BCTIY 收 缩率/%
1 250	16.82	8.58
1 350	18.94	16.18
1 450	19.26	16.91
1 500	19.46	17.27

### 2.3 SEM

图 2 和图 3 为 BCIY 和 BCTIY 断面 SEM 照片。由图 2 可知, BCIY 在  $1\,250\text{ }^\circ\text{C}$  时已基本烧结致密, 只有较少的孔隙存在。图 3 中, 掺杂 Ta 的 BCTIY 在  $1\,250\text{ }^\circ\text{C}$  时晶粒之间没有紧密的连接在一起, 存在较多的孔隙,  $1\,350\text{ }^\circ\text{C}$  时晶粒紧密相连, 无孔隙存在, 烧结致密。由 SEM 分析可知, 晶粒随着温度的升高而逐渐增大, 晶粒之间紧密地连接在一起, 在相同温度下, BCIY 的晶粒尺寸均比 BCTIY 的晶粒尺寸大, 这也与表 1 收缩率的测量一致。

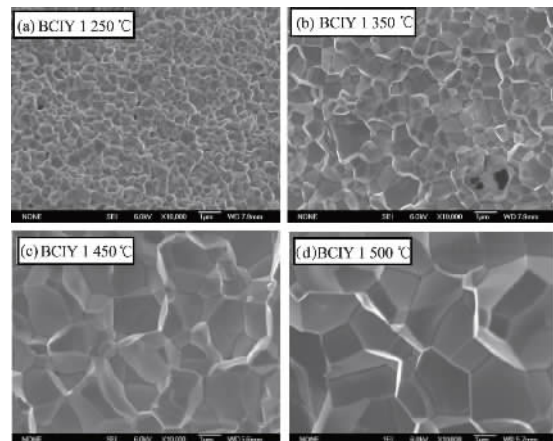


图 2 不同温度烧结  $5\text{ h}$  的 BCIY 断面 SEM 照片

Fig. 2 SEM micrographs of fractured surface of BCIY sintered at different temperatures for  $5\text{ h}$

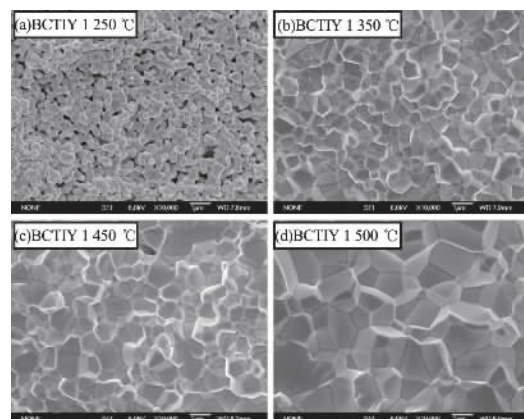


图 3 不同温度烧结  $5\text{ h}$  的 BCTIY 断面 SEM 照片

Fig. 3 SEM micrographs of fractured surface of BCTIY sintered at different temperatures for  $5\text{ h}$

## 2.4 化学稳定性

为了检测 BCIY 和 BCTIY 在  $\text{CO}_2$  和沸水环境中的化学稳定性,将两样品分别置于 100%  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2$  的流速设为 20 mL/min) 环境中在 700 °C 和沸水中分别处理 3 h、6 h、12 h. 将所有处理过的电解质片研磨后,用 XRD 对物相进行分析,观察相结构的变化. 图 4 和图 5 分别为 BCTIY 和 BCIY 电解质经沸水与 100%  $\text{CO}_2$  处理后的 XRD 图谱.

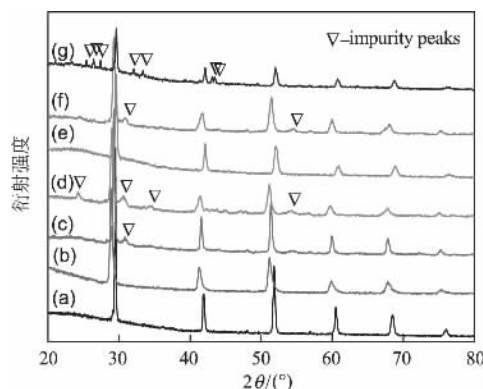


图 4 烧结后的 (a) BCTIY 电解质; (b)、(c)、(d) BCTIY 电解质经过 100%  $\text{CO}_2$  在 700 °C 处理 3 h、6 h、12 h 后; (e)、(f)、(g) BCTIY 电解质经沸水处理 3 h、6 h、12 h 后的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns for the sintering of (a) BCTIY electrolyte; (b), (c), (d) BCTIY electrolyte after exposure to 100%  $\text{CO}_2$  at 700 °C for 3 h, 6 h, 12 h; (e), (f), (g) BCTIY electrolyte after being boiled in water for 3 h, 6 h, 12 h

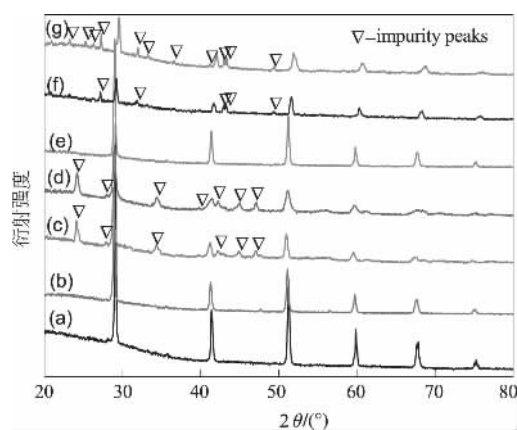


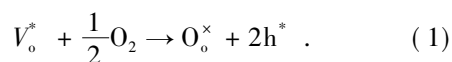
图 5 烧结后的 (a) BCIY 电解质; (b)、(c)、(d) BCIY 电解质经过 100%  $\text{CO}_2$  在 700 °C 处理 3 h、6 h、12 h 后; (e)、(f)、(g) BCIY 电解质经沸水处理 3 h、6 h、12 h 后的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns for the sintering of (a) BCIY electrolyte; (b), (c), (d) BCIY electrolyte after exposure to 100%  $\text{CO}_2$  at 700 °C for 3 h, 6 h, 12 h; (e), (f), (g) BCIY electrolyte after being boiled in water for 3 h, 6 h, 12 h

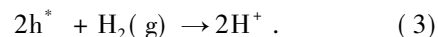
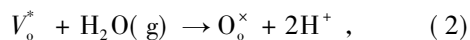
由图谱 4~5 可以看出,3 h 时两者的物相基本没有发生变化,还保持原来固有的钙钛矿相,没有杂相峰出现. 6 h 后 BCTIY 仍保持较好的主相,有一个杂相峰出现,BCIY 经沸水与 100%  $\text{CO}_2$  处理后虽保持主相但有较多的杂相峰出现. 12 h 后 BCTIY 的主相仍然存在,但在沸水中产生了相对较多的杂相峰; BCIY 主相也存在,但相比 BCTIY 的主相相对较弱,而且在  $\text{CO}_2$  和沸水中有较多的杂相峰出现. 因 Ta 具有较高的电负性,减小了化合物的碱性,从而增强了 BCTIY 的化学稳定性<sup>[4,7,10]</sup>.

## 2.5 电导率

图 6 和图 7 分别为 BCIY 和 BCTIY 样品在不同环境下的电导率  $\alpha$  及其 Arrhenius 曲线. 由图 6(a) 和图 7(a) 可见,BCIY 和 BCTIY 在两种气氛下的电导率随温度的升高而增大,且 BCIY 的电导率略大于 BCTIY 的电导率,这与 Zhao 等<sup>[6]</sup> 和 Dang 等<sup>[5]</sup> 报道的电导率相当,且 BCTIY 的电导率高于 Dang 等<sup>[5]</sup> 报道的  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  的电导率. 由图 6(b) 和图 7(b) 可知,在 500~800 °C 时 BCIY 和 BCTIY 样品的  $\ln(\alpha T)$  与  $1000/T$  呈线性关系,表明电导率随温度的变化符合小极化子导电机理<sup>[12]</sup>. BCIY 在空气和湿润的  $\text{H}_2$  下的活化能分别为 0.54 eV 和 0.41 eV; BCTIY 在空气和湿润的  $\text{H}_2$  下的活化能分别为 0.55 eV 和 0.42 eV. 在湿润的  $\text{H}_2$  气氛下的活化能低于空气中的活化能,这是因为  $\text{BaCeO}_3$  掺杂后出现了氧空位和电子空穴,如下式所示:



而当电解质样品处于湿润的  $\text{H}_2$  气氛下时,由电子空穴所引起的电子电导会受到抑制,而质子传导得以促进<sup>[13]</sup>,具体反应式如下所示:



由上式可知,在空气气氛下样品主要表现为电子空穴和氧离子混合导体,而在湿润的  $\text{H}_2$  气氛下则表现为质子导体<sup>[12]</sup>. 较低的活化能同时也说明了质子导体更适合在中低温环境下使用.

## 3 结论

采用柠檬酸盐燃烧法和固相反应相结合的方法制备 BCIY 和 BCTIY 粉体,在 1 000 °C 煅烧 5 h 后均呈单一的钙钛矿相. BCIY 和 BCTIY 分别在 1 250 °C 和 1 350 °C 下均可烧结致密,在 1 350 °C 下都已完全致密,无孔隙存在,且晶粒尺寸随温度升高而增大. 在空气和湿润的  $\text{H}_2$  气氛下,BCIY

比 BCTIY 的电导率略高,但相差不大.但在化学稳定性测试中,BCTIY 对  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的耐受力明显比 BCIY 好,这表明,BCTIY 更能满足电池的实

际应用的要求,可以作为中低温稳定的质子导体电解质材料.

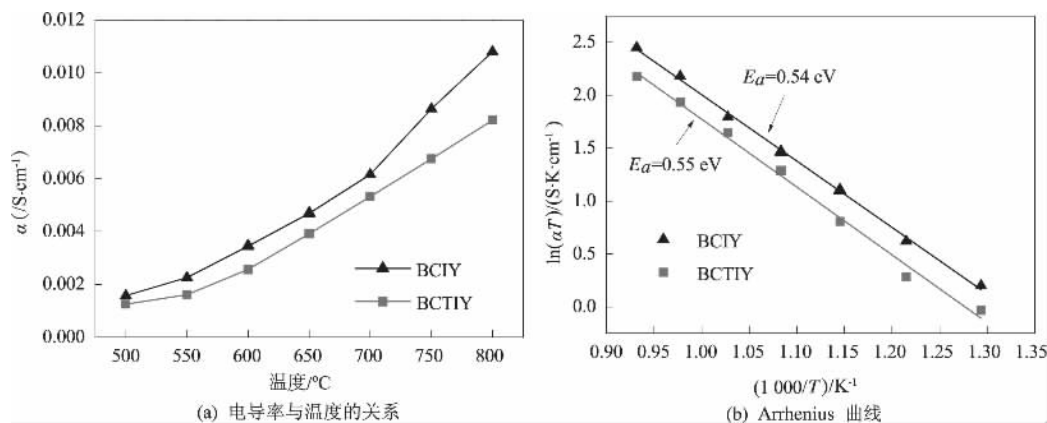


图6 样品 BCIY 及 BCTIY 在空气气氛下电导率与温度的关系 (a) 及其 Arrhenius 曲线 (b)  
Fig. 6 The relationship between conductivity and temperature (a) and Arrhenius curves (b) in air atmosphere of BCIY and BCTIY

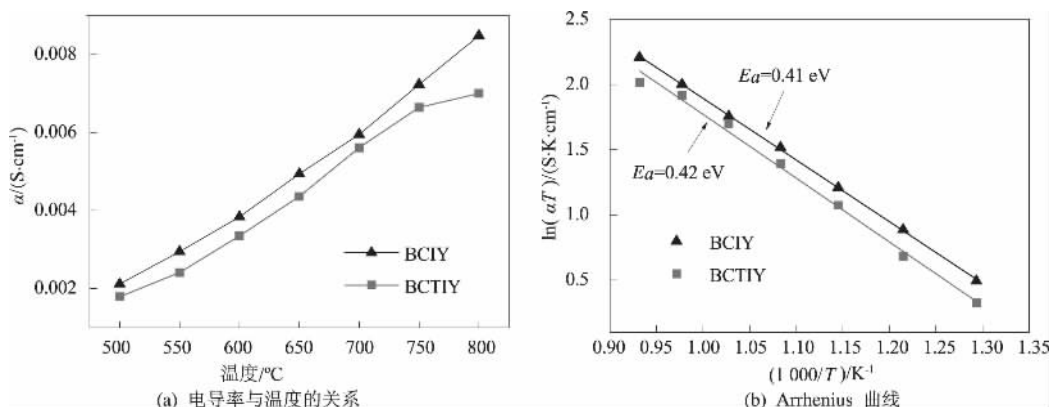


图7 样品 BCIY 及 BCTIY 在湿润的  $\text{H}_2$  气氛下电导率与温度的关系 (a) 及其 Arrhenius 曲线 (b)  
Fig. 7 The relationship between conductivity and temperature (a) and Arrhenius curves (b) in wet  $\text{H}_2$  atmosphere of BCIY and BCTIY

## 参考文献:

- [1] HOU Jie, ZHU Zhiwen, QIAN Jing, et al. A new cobalt-free proton-blocking composite cathode  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ - $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$  for  $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ce}_{0.7}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ -based solid oxide fuel cells [J]. Journal of power sources, 2014, 264: 67-75.
- [2] 孙文平. 中低温固体氧化物燃料电池新材料与结构设计及电化学性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学材料科学与工程系, 2013.
- [3] HOU Jie, QIAN Jing, BI Lei, et al. The effect of oxygen transfer mechanism on the cathode performance based on proton-conducting solid oxide fuel cells [J]. Journal of materials chemistry A, 2015(3): 2207-2215.
- [4] 毕磊. 质子导体固体氧化物燃料电池的制备及其电化学研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学材料科学与工程系, 2009.
- [5] DANG Junjie, ZHU Zhiwen, QIAN Jing, et al. A stable  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte membrane for proton-conducting solid oxide fuel cells [J]. Ceramics international, 2013, 39(4): 4287-4292.
- [6] ZHAO Fei, LIU Qiang, WANG Siwei, et al. Synthesis and characterization of  $\text{BaIn}_{0.3-x}\text{Y}_x\text{Ce}_{0.7}\text{O}_{3-\delta}$  ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3$ ) proton conductors [J]. International journal of hydrogen energy, 2010, 35(9): 258-4263.
- [7] BI Lei, FANG Shumin, TAO Zetian, et al. Influence of anode pore forming additives on the densification of supported  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte membranes based on a solid state reaction [J]. Journal of the european ceramic society, 2009, 29(12): 2567-2573.
- [8] BI Lei, TAO Zetian, LIU Cong, et al. Fabrication and characterization of easily sintered and stable anode-

- supported proton-conducting membranes [J]. Journal of membrane science, 2009, 336(1/2): 1–6.
- [9] ZHAO Fei, CHEN Fanglin. Performance of solid oxide fuel cells based on proton-conducting  $\text{BaCe}_{0.7}\text{In}_{0.3-x}\text{Y}_x\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte [J]. International journal of hydrogen energy, 2010, 35(20): 11194–11199.
- [10] BI Lei, ZHANG Shangquan, FANG Shumin, et al. A novel anode supported  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte membrane for proton-conducting solid oxide fuel cell [J]. Electrochemistry communications, 2008, 10(10): 1598–1601.
- [11] RADOJKOVIĆ A, ZUNIĆ M, SAVIĆ S M, et al. Enhanced stability in  $\text{CO}_2$  of Ta doped  $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte for intermediate temperature SOFCs [J]. Ceramics international, 2013, 39(3): 2631–2637.
- [12] 顾庆文, 王小连, 丁岩芝, 等. 用于固体氧化物燃料电池的 Zn 掺杂  $\text{BaZr}_{0.7}\text{Pr}_{0.1}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  质子导体电解质的制备与性能 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(12): 1828–1834.
- [13] 谷肄静. 钙钛矿型  $\text{BaMO}_3$  及其复合电解质的掺杂改性与其电学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2009.

## The Influence of Doping Ta on the Properties of $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ Electrolyte

SU Jinrui, NAN Yichen, HE Hao, ZHAO Yingying

(School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The  $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCIY) and Ta doped  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$  (BCTIY) electrolyte powders were successfully synthesized by citrate combustion and solid phase reaction method in this paper. Under the 200 MPa pressure dry-pressing molding, the electrolyte flakes were obtained by sintered at different temperatures. The phase of samples was analysed by the x-ray diffraction (XRD); the microstructure was obtained by scanning electron microscope (SEM). The electrochemical performance was measured by the electrochemical workstation. The characterization of XRD, SEM and electrochemical workstation demonstrated BCIY and BCTIY both with a single perovskite structure after 5 h at 1 000°C calcination. Moreover, BCIY and BCTIY Could be dense sintered under 1 250°C and 1 350°C, respectively. In addition, the conductivity of BCTIY is a little smaller than that of BCIY in the air and humid  $\text{H}_2$ . Meanwhile, the chemical stability of BCTIY is superior to that of BCIY in  $\text{CO}_2$  and boiling water environment. These results indicated that BCTIY could be stable electrolyte materials applied in intermediate temperature solid oxide fuel cells.

**Key words:** proton-conducting; solid oxide fuel cells;  $\text{BaCe}_{0.8}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ ;  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Ta}_{0.1}\text{In}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ ; sinterability; chemical stability; conductivity



## 吸附剂浓度对 Cu(II) /IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 吸附体系的影响

范忠雷, 马翔宇, 李瑞瑞, 乔欢欢

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用表面印迹技术合成了铜离子印迹聚烯丙基胺硅胶材料(IIP-PAA/SiO<sub>2</sub>), 通过静态实验研究了吸附剂浓度  $W_0$  对 Cu(II) 离子在 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料上吸附的影响. 结果表明, 随着  $W_0$  增加, Cu(II) / IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 体系的吸附等温线下降, 吸附体系具有明显的吸附剂浓度效应. 实验数据显示吸附剂的平衡吸附量  $Q_e$  与液相平衡浓度  $C_e$  和吸附剂浓度  $W_0$  之间具有相关性, 通过  $C_e/W_0$  (液相平衡离子浓度与吸附剂浓度的比值) 因子来修正经典 Langmuir 模型参数, 所得的修正 Langmuir 等温式能描述和预测不同吸附剂浓度  $W_0$  水平下的平衡吸附量  $Q_e$ , 表明该修正模型具有合理性.

**关键词:** 聚烯丙基胺; 硅胶; 浓度效应; Cu(II); 吸附

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.03.003

### 0 引言

经典吸附模型常被用于描述液/固离子吸附系统的吸附特性, 具体方法是在给定吸附温度和吸附剂浓度条件下, 通过改变溶液金属离子浓度, 从而得到平衡吸附量  $Q_e$  与溶液平衡浓度  $C_e$  之间的吸附等温曲线, 然后对实测数据进行拟合, 根据拟合曲线相关系数值的大小来确定该吸附过程是否能用经典方程来描述<sup>[1]</sup>. 近年来, 不少实验发现  $Q_e-C_e$  曲线随吸附剂浓度的增大而降低, 依据经典吸附方程得到的模型参数与吸附剂浓度  $W_0$  有关, 有文献将这种现象称为“吸附剂浓度效应”或“粒子浓度效应”<sup>[2-5]</sup>, 并且提出了多种吸附模型, 如粒子间相互作用模型<sup>[2]</sup>、亚稳平衡态吸附理论<sup>[3]</sup>、四组分吸附模型<sup>[4]</sup>和表面组分活度模型<sup>[5]</sup>等, 来解释这种吸附剂浓度效应现象及本质.

近年来, 常有报道通过偶合接枝<sup>[6-8]</sup>和物理沉积<sup>[9]</sup>等方法将聚胺高分子负载到多孔介质硅胶表面, 然后根据实际用途进行表面官能团修饰<sup>[10]</sup>或表面印迹<sup>[1,9]</sup>, 以提高材料对特定离子的选择性吸附. 在这些工作中, 研究侧重于材料的合成方法、表面结构与吸附性能的关系、宏观吸附动力学和热力学以及吸附选择性等方面<sup>[1,9-11]</sup>, 对吸附过程中发生在固液界面的吸附现象及吸附剂浓度效应, 即吸附等温

线或吸附平衡常数随固体浓度升高而降低的现象, 则少有涉及. 因此, 笔者在合成表面印迹聚烯丙基胺硅胶材料(IIP-PAA/SiO<sub>2</sub>)<sup>[9]</sup>的基础上, 拟通过静态吸附法研究 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料对铜离子吸附的固体浓度效应, 通过修正的 Langmuir 等温式对不同吸附剂浓度水平下的吸附数据进行描述, 为新型吸附剂的应用提供依据.

### 1 实验部分

#### 1.1 实验原料

层析硅胶(0.178~0.250 mm), 工业级, 青岛美晶化工有限公司; 聚烯丙基胺溶液(PAA, 质量分数 15%), 工业级, 日本日东纺织公司; 环氧氯丙烷(ECH), 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 分析纯, 天津市科密欧试剂厂; 其他试剂均为分析纯.

#### 1.2 表面印迹聚烯丙基胺硅胶材料的制备

按照文献[9], 采用物理负载的方法制得聚烯丙基胺负载硅胶(PAA/SiO<sub>2</sub>). 测得 PAA/SiO<sub>2</sub> 材料的胺基含量为 1.468 mmol·g<sup>-1</sup>. 然后将 10 g 螯合铜离子的 PAA/SiO<sub>2</sub> 材料加入到 0.82 g ECH 与 100 mL 甲醇的溶液中, 在 323 K、搅拌条件下反应 3 h, 反应结束后用盐酸、氨水和蒸馏水依次洗涤, 烘干后制得铜印迹聚烯丙基胺硅胶材料

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目(152102310063)

作者简介: 范忠雷(1972—), 男, 河南沁阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事功能材料研究, E-mail: zhlfan@zzu.edu.cn.

(IIP-PAA/SiO<sub>2</sub>)。IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 的红外谱图显示 1 066 cm<sup>-1</sup> 和 3 405 cm<sup>-1</sup> 处分别是 Si—O—Si 和 —Si—OH 的红外吸收峰, 2 962.5 cm<sup>-1</sup> 处出现了一 CH<sub>2</sub> 键的伸缩振动吸收峰。相比采用先硅烷偶联后接枝方法合成聚烯丙基胺硅胶材料<sup>[1,8]</sup>, IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 的 FT-IR 谱图在 698.2 cm<sup>-1</sup> 处没有出现 —C—Cl 键的伸缩振动吸收峰, 表明该材料表面的 PAA 是以物理方式负载在硅胶表面。

### 1.3 吸附实验

用 CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O 配置不同初始离子浓度的溶液。依次加入准确称取的 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料和 25 mL pH 值为 4 的铜溶液于密闭吸附瓶中, 在恒温水浴(303 K) 中震荡 24 h, 吸附结束后过滤, 用 UV-2102PC 型紫外可见分光光度计测定滤液中铜离子浓度, 按式(1) 计算材料的铜吸附量<sup>[8-9]</sup>。

$$Q = \frac{V(C_0 - C_e)}{m}, \quad (1)$$

式中:  $Q$  为吸附剂平衡吸附量, mmol · g<sup>-1</sup>;  $V$  为铜溶液体积, L;  $C_0$  为铜溶液初始浓度, mmol · L<sup>-1</sup>;  $C_e$  为吸附液中铜离子浓度, mmol · L<sup>-1</sup>;  $m$  为 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料质量, g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附等温线

图 1 是吸附温度 303 K 时不同吸附剂浓度 ( $W_0 = 3.0, 6.0, 12.0, 18.0$  g · L<sup>-1</sup>) 下 Cu(II) 在 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料上的吸附等温线。可以看出, 当给定吸附温度和吸附剂浓度  $W_0$  时, 随着 Cu(II) 浓度的增大, IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料的吸附量逐渐增大,  $Q_e$  是  $C_e$  的单一变量函数, 且吸附曲线形状符

合 Langmuir 曲线。Langmuir 吸附方程为<sup>[1]</sup>:

$$C_e = Q_m \frac{C_e}{Q_e} - \frac{1}{K_L}, \quad (2)$$

式中:  $Q_e$  为平衡吸附量, mmol · g<sup>-1</sup>;  $C_e$  为离子平衡浓度, mol · L<sup>-1</sup>;  $Q_m$  为饱和吸附容量, mmol · g<sup>-1</sup>;  $K_L$  为 Langmuir 吸附系数, L · mol<sup>-1</sup>。对不同吸附剂浓度  $W_0$  下的  $C_e$  与  $C_e/Q_e$  作图, 用等温式(2) 进行拟合, 根据拟合方程的斜率( $Q_m$ ) 和截距( $1/K_L$ ) 计算出不同  $W_0$  下的 Langmuir 模型参数, 结果见表 1。结果表明, 在给定  $W_0$  水平下, Cu(II) 的吸附符合 Langmuir 模型, 拟合方程具有线性相关性, 相关系数  $R^2$  均大于 0.99。同时, 表 1 数据也显示 Langmuir 模型参数( $Q_m$  和  $K_L$ ) 随吸附剂浓度  $W_0$  变化而变化, 随  $W_0$  增大, 饱和吸附容量  $Q_m$  降低, 说明传统 Langmuir 方程不能用于描述不同吸附剂浓度水平上的实际离子吸附过程<sup>[4-5]</sup>。

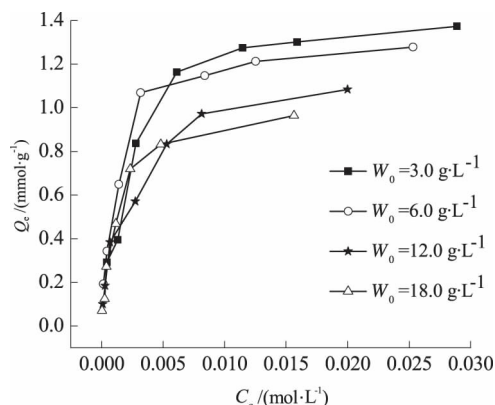


图 1 不同吸附剂浓度下 Cu(II) 的吸附等温线  
Fig.1 Adsorption isotherm of Cu(II) at different  $W_0$  level

表 1 不同  $W_0$  水平上的 Langmuir 模型参数

Tab.1 Model parameters of Langmuir isotherm at different  $W_0$  level

$W_0 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	Langmuir Equation	$Q_m / (\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mol}^{-1})$	$R^2$
3.0	$C_e = 1.486 C_e / Q_e - 0.0022$	1.486	454.6	0.996
6.0	$C_e = 1.360 C_e / Q_e - 0.0014$	1.360	714.3	0.999
12.0	$C_e = 1.158 C_e / Q_e - 0.0017$	1.158	588.2	0.993
18.0	$C_e = 1.029 C_e / Q_e - 0.0011$	1.029	909.1	0.994
综合数据	$C_e = 1.302 C_e / Q_e - 0.0017$	1.302	588.2	0.971

注: 综合数据是 4 个  $W_0$  水平数据的线性分析结果。

### 2.2 吸附剂浓度效应

对于 Cu(II) /IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 吸附体系, 图 1 显示不同吸附剂浓度  $W_0$  水平下, 吸附等温线随着吸附剂固体浓度的升高而明显下移, 即在给定的平衡离子浓度  $C_e$  点有多个对应的平衡吸附量  $Q_e$  点, 而  $Q_e$  只在给定的  $W_0$  水平上才与  $C_e$  具有唯一对应

的值, 可见  $Q_e$  是与  $C_e$  和  $W_0$  有关的函数, 这一现象被称为吸附剂浓度效应, 该效应与文献 [12-13] 报道的规律具有相似性。

传统 Langmuir 等温式的  $Q_m$  代表吸附剂的饱和吸附容量, 其大小只与吸附剂的性质有关, 与吸附剂浓度无关; 吸附系数  $K_L$  只与吸附温度有关,

也与吸附剂浓度无关. 而表 1 的  $Q_m$  和  $K_L$  值随吸附剂浓度变化而变化, 说明传统方式得到的 Langmuir 方程不能用于描述不同吸附剂浓度水平上的离子吸附规律. 为了去除 Cu( II) / IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 吸附体系中的吸附剂浓度效应, 使用相同数据, 绘制体系平衡吸附量  $Q_e$  与溶液离子浓度与吸附剂浓度的比值 ( $C_e/W_0$ )<sup>[4]</sup> 曲线, 见图 2. 对比图 1 和图 2 发现, 当用  $C_e/W_0$  比值代替  $C_e$  时, 图 1 中原本分离的 4 条曲线在图 2 中基本重叠在一起, 表明  $Q_e$  与  $C_e/W_0$  具有相关性,  $Q_e$  不是  $C_e$  而是  $C_e/W_0$  的单变量函数.

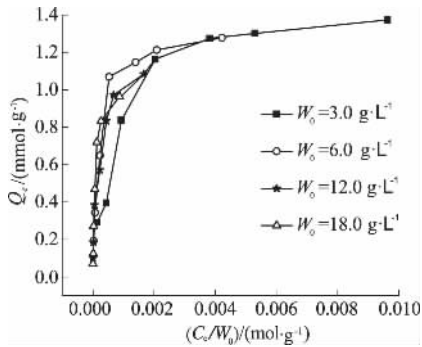


图 2  $Q_e$  与  $C_e/W_0$  的关系

Fig. 2 Relationship between  $Q_e$  and the ratio of  $C_e/W_0$

结合 Langmuir 等温式, 综合上述 4 个  $W_0$  水平的吸附数据, 可得到综合数据  $C_e$  随  $C_e/Q_e$  的变化关系见图 3.  $C_e$  与  $C_e/Q_e$  有较好的线性关系, 其线性拟合方程为:  $C_e = 1.302 \times C_e/Q_e - 0.0017$  ( $R^2 = 0.971$ ), 由方程的斜率和截距得到不同吸附剂浓度下的综合吸附数据: 铜离子的  $Q_m = 1.302 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $K_L = 588.24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 结果见表 1. 由此综合吸附数据可以建立 Cu( II) 与 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 吸附体系修正的 Langmuir 等温吸附模型. 根据修正 Langmuir 模型可以验证和预测该吸附体系的吸附过程, 相关计算结果见表 2.

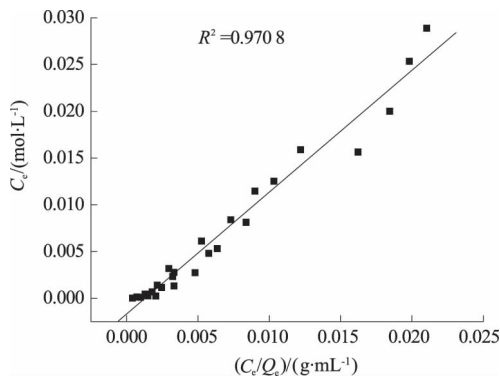


图 3  $C_e/Q_e$ - $C_e$  的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between  $C_e/Q_e$  and  $C_e$

表 2 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 吸附铜的 Langmuir 模拟结果

Tab. 2 Langmuir simulation results of IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> on Cu( II) adsorption

$W_0 /$ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$C_0 /$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$C_e /$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$Q_{e, \text{exp}} /$ ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$Q_e /$ ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$RD$
3.0	1.3	0.425	0.291	0.260	-0.107
	5.3	2.783	0.837	0.808	-0.034
	9.6	6.115	1.163	1.019	-0.124
	15.3	11.466	1.275	1.134	-0.110
	19.8	15.896	1.301	1.176	-0.096
	33.0	28.890	1.374	1.230	-0.105
6.0	2.5	0.444	0.343	0.270	-0.213
	5.3	1.398	0.649	0.587	-0.095
	9.6	3.175	1.069	0.848	-0.207
	15.3	8.389	1.147	1.083	-0.056
	19.8	12.524	1.213	1.146	-0.055
	33.0	25.323	1.278	1.220	-0.045
12.0	1.3	0.098 6	0.100	0.071	-0.287
	2.5	0.276 0	0.185	0.182	-0.017
	5.3	0.689 0	0.384	0.375	-0.024
	15.3	5.292 0	0.833	0.985	0.183
	19.8	8.134	0.972	1.077	0.108
	33.0	19.992	1.084	1.200	0.107
18.0	2.5	0.254	0.145	0.169	0.142
	5.3	0.392	0.272	0.244	-0.104
	9.6	1.156	0.469	0.527	0.124
	15.3	2.332	0.719	0.753	0.047
	19.8	4.802	0.832	0.962	0.155
	33.0	15.641	0.964	1.174	0.218

注:  $RD = (Q_e - Q_{e, \text{exp}}) / Q_{e, \text{exp}}$ ,  $RD$  为相对误差,  $Q_e$  为 Langmuir 模拟值,  $Q_{e, \text{exp}}$  为实测值.

表 2 数据显示: 通过上述方法得到的综合数据  $Q_m$  和  $K_L$  值可以用来修正 Langmuir 等温式, 所得修正模型可以描述和预测不同吸附剂浓度  $W_0$  水平下的等温平衡吸附量  $Q_e$ . 除个别数据外, 由综合参数得到的模拟数据都在实验数据所允许的误差范围之内, 这在一定程度上证明通过离子浓度与吸附剂浓度的比值 ( $C_e/W_0$ ) 来修正 Langmuir 模型的  $Q_m$  和  $K_L$  参数、扩大吸附等温方程使用范围是可行的.

### 3 结论

在实验范围 ( $W_0 = 3.0 \sim 18.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 内, 铜离子在 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料上的吸附呈现显著的吸附剂浓度效应, 即吸附等温线随着吸附剂浓度  $W_0$  的升高而降低. 在给定的  $W_0$  下, Cu( II) 的吸附等温线能用 Langmuir 等温式进行描述, 但该模型

不能用来描述不同吸附剂浓度下的吸附行为. 吸附数据显示 IIP-PAA/SiO<sub>2</sub> 材料的平衡吸附量  $Q_e$  由液相平衡浓度  $C_e$  和吸附剂浓度  $W_0$  所决定, 通过离子浓度与吸附剂浓度比值 ( $C_e/W_0$ ) 的方法来修正 Langmuir 模型参数, 所得的修正吸附等温式能描述和预测不同吸附剂浓度  $W_0$  水平下的平衡吸附量  $Q_e$ , 表明该 Langmuir 修正模型是合理的.

### 参考文献:

- [1] FAN Z L, LI S, LI R R, SHEN J G. Adsorption of Cu (II) on surface ion-imprinted poly(allylamine) - silica material from aqueous solution [J]. Polym Plast Technol Eng, 2014, 53(1): 30 - 37.
- [2] DITORO D M, MAHONY J D, KIRCHGRABER P R, et al. Effects of nonreversibility, particle concentration, and ionic-strength on heavy-metal sorption [J]. Environmental science and technology, 1986, 20(1): 55 - 61.
- [3] PAN G, LISS P S. Metastable equilibrium adsorption theory I Theoretical [J]. Journal of colloid and interface science, 1998, 201(1): 71 - 76.
- [4] WU X F, HU Y L, ZHAO F, et al. Ion adsorption components in liquid/solid systems [J]. Journal of environmental sciences, 2006, 18(6): 1167 - 1175.
- [5] 赵凌曦, 宋淑娥, 杜娜, 等. 一个与吸附剂浓度有关的 Langmuir 等温式 [J]. 物理化学学报, 2012, 28(12), 2905 - 2910.
- [6] EL-NAHHAL I M, EL-ASHGAR N M. A review on polysiloxane-immobilized ligand systems: synthesis, characterization and applications [J]. J Organomet Chem, 2007, 692(14): 2861 - 2886.
- [7] HUGHES M A, NIELSEN D, ROSENBERG E, et al. Structural investigations of silica polyamine composites: surface coverage, metal Ion coordination, and ligand modification [J]. Ind Eng Chem Res, 2006, 45(19): 6538 - 6547.
- [8] 范忠雷, 刘海龙, 慎金鸽. PAA/SiO<sub>2</sub> 材料对含铜废水吸附性能研究 [J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(4): 679 - 684.
- [9] 范忠雷, 李瑞瑞, 王亚辉, 等. 表面印迹聚烯丙基胺硅胶材料的制备研究 [J]. 化工新型材料, 2012, 40(8): 20 - 22.
- [10] HUGHES M A, ROSENBERG E. Characterization and applications of poly-acetate modified silica polyamine composites [J]. Separation science and technology, 2007, 42: 261 - 283.
- [11] 范忠雷, 王玲慧, 慎金鸽. 乙二胺硅胶复合材料对 Zn<sup>2+</sup> 的吸附特性 [J]. 应用化学, 2010, 27(11): 1260 - 1263.
- [12] 徐丛, 李薇, 潘纲. Zn(II) /a-FeOOH 吸附体系的固体浓度效应 [J]. 物理化学学报, 2009, 25(9): 1737 - 1742.
- [13] FEHSE K U, BORG H, SORKAU E, et al. Correcting the effect of the sorbent to solution ratio on sorption isotherms from batch tests with soils and sediments [J]. Water air soil pollut, 2010, 210(1): 211 - 220.

## Effect of Sorbent Concentration on Cu(II) Adsorption at Surface Ion-Imprinted Poly (Allylamine) -Silica Material

FAN Zhonglei, MA Xiangyu, LI Ruirui, QIAO Huanhuan

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Surface ion-imprinted poly(allylamine) -silica material (IIP-PAA/SiO<sub>2</sub>) was synthesized by surface imprinting technique. The effect of sorbent concentration ( $W_0$ ) on Cu(II) adsorption was studied using batch experiments. The results showed that the adsorption system exhibited a significant sorbent concentration effect, and adsorption isotherms declined as  $W_0$  increased. Results obtained from the tests also indicated that the equilibrium adsorption capacity  $Q_e$  was not a single function of the equilibrium ion concentration  $C_e$  but a function of both  $C_e$  and  $W_0$ . A revised Langmuir model was obtained according to the factor of  $C_e/W_0$ . Its applicability was examined, and the result showed that the equilibrium capacities under various particle concentrations could be described well by the revised Langmuir model.

**Key words:** poly(allylamine); silica gel; concentration effect; Cu(II); sorbent

# 解码动物转向行为的 ICA-小波特征提取方法

董芳芳, 尚志刚, 刘新玉, 万红

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对提取局部场电位(LFP)用于运动意图解码的特征时, 存在 LFP 信噪比低、编码时间窗难以确定等问题, 提出了一种结合独立成分分析(ICA)与小波分解的特征提取方法, 用于动物转向行为的神经信息解码。首先结合动物运动行为视频与 LFP 信号时频分析方法, 确定编码时间窗的范围; 然后用 ICA 对时间窗内的 LFP 进行去噪处理, 提高 LFP 信噪比; 接着利用小波分解进一步确定 LFP 编码频带, 并通过滑窗方法计算频带内的时序能量, 构建编码特征; 最后采用  $k$  近邻方法对编码特征进行分类, 验证其解码性能。实验结果表明, 利用提出的特征提取方法, 经过 1 000 次交叉互验证, 分类正确率达到  $(92.35 \pm 5.87)\%$ , 能够准确稳定地解码动物的转向行为。

**关键词:** 局部场电位; 独立成分分析; 小波分解; 时频分析

**中图分类号:** R318.04 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.006

## 0 引言

局部场电位(Local Field Potential, LFP)是由大量神经元突触活动引起的, 反映了大脑局部区域神经元集群的综合电活动, 具有较好的长期解码稳定性, 而将其应用于运动解码的研究具有很大的应用潜力, 正逐渐成为神经科学研究新的热点。Arjun 等<sup>[1]</sup>用在猴子初级运动皮层和腹侧前运动皮层采集到的低频局部场电位信号, 解码出了猴子抓握运动轨迹。Tomislav 等<sup>[2]</sup>对猴子抓握运动参数进行解码研究发现, 在运动计划和执行阶段 LFP 多个频带共同编码了运动信息。然而, LFP 十分微弱, 而且具有较强的非平稳特性, 难以提取出有效的解码特征, 因此确定出编码时间窗和编码频带, 进而提取出可靠的编码特征是准确解码的关键。

在对 LFP 进行特征提取时, 常用 50 Hz 陷波器陷波处理的方法对工频干扰进行去除, 之后用经典滤波器滤波得到特定频带的信号, 再提取能量特征, 然而处理效果并不理想。龙飞等<sup>[3]</sup>将独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)方法应用到脑电中眼电伪迹的去除, 消噪的同时能对有用信号的细节成分做到很好的保留,

使目标信息的特征更为明显, 可以进一步对相关信息进行准确提取。钟伯成等<sup>[4]</sup>利用小波变换对脑电信号中的瞬态弱电信号进行了有效提取。Camara 等<sup>[5]</sup>利用小波变换对从帕金森病人身上采集到的 LFP 进行特征提取, 实现了对不同类型病例的准确分类。LFP 与皮层脑电信号较为相似, 同为频率较低的非平稳信号, ICA 与小波方法对 LFP 的特征提取具有很大的应用潜力。

笔者以鸽子为实验对象, 采集了其转向运动时与运动决策相关的 NCL(Nidopallium Caudolaterale)区<sup>[6]</sup> LFP 信号。结合 ICA 和小波变换方法对特征进行提取, 进而用  $k$  近邻<sup>[7]</sup>( $k$ -Nearest Neighbor,  $k$ NN)方法进行分类, 并与常用的 LFP 特征提取方法进行了对比。

## 1 原理与方法

### 1.1 独立成分分析

ICA<sup>[8]</sup>是一种盲源分离算法, 是指在不知道源信号和传输通道参数的情况下根据输入源信号的统计特性, 仅由观测信号恢复出源信号各个独立成分的过程。ICA 方法的处理流程如图 1 所示。

观测信号  $\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S}$ , 在混合矩阵  $\mathbf{A}$  和原始信号未知的情况下, 只根据观测数据向量  $\mathbf{X}$  确定分离

收稿日期: 2016-07-01; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1304602); 河南省科技攻关计划项目(122102210102)

通信作者: 万红(1964—), 女, 辽宁沈阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事神经信号处理, E-mail: wanhong@zzu.edu.cn.



矩阵  $W$ , 使得变换后的输出  $Y = WX$ .



图1 ICA 处理流程

Fig. 1 Process of ICA method

## 1.2 小波分解

小波分解对信号具有很好的时域和频域分辨率, 常用于非平稳信号的时频特性分析. 用 Mallat 算法<sup>[9]</sup>对信号  $f(t)$  进行离散小波分解, 可表示为:

$$f(t) = f_L^1(n) + \sum_{j=1}^L f_j^D(n) = A_L + \sum_{j=1}^L D_j. \quad (1)$$

式中:  $L$  为分解层数;  $D_j$  为不同尺度下的细节分量;  $A_L$  为近似分量. 如果信号采样率为  $f_s$ , 则  $A_L, D_L, D_{L-1}, \dots, D_1$  分量对应的子频段为  $[0, f_s/2^{L+1}]$ ,  $[f_s/2^{L+1}, f_s/2^L]$ ,  $[f_s/2^L, f_s/2^{L-1}]$ ,  $\dots$ ,  $[f_s/2^2, f_s/2]$ .

## 1.3 ICA-小波特征提取

为了有效提取用于解码鸽子转向行为的 LFP 特征, 提出一种结合 ICA 与小波的特征提取方法. 从神经信息处理的角度出发, 采用基于负熵最大的 FastICA 算法<sup>[10]</sup>. 它以负熵最大作为一个搜寻方向, 实现顺序地提取独立源, 该算法采用了定点迭代的优化算法, 使得收敛更加快速、稳健.

FastICA 算法的基本步骤如下:

(1) 对数据进行去均值、白化处理, 将观测数据  $X$  变为  $Z$ .

(2) 确定要分离的独立分量个数, 一般与观测数据的数目相同, 随机选取初始矢量  $W_p$ .

(3) 由负熵最大的原则推出  $W_p$  的迭代公式

$$\begin{cases} W_p = E\{Zg(W_p^T Z)\} - E\{g'(W_p^T Z)\} W_p; \\ W_p^* = W_p - \sum_{j=1}^{p-1} (W_p^T W_j) W_j; \\ W_p = W_p^* / \|W_p^*\|. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $W_p$  为第  $p$  个要估计的分离矩阵的矢量;  $W_p^*$  是  $W_p$  的新值;  $Z$  为白化后的数据;  $g$  为选取的非线性函数, 笔者选取为正切函数.

(4) 估算出分离矩阵, FastICA 算法结束.

根据局部场电位信号的特征, 选取与局部场电位较为相似的 Daubechies 小波<sup>[11]</sup>. ICA-小波特征提取的流程如图 2 所示, 其具体步骤如下:

(1) 用 ICA 方法分解原始信号, 对分解出的独立分量进行分析, 作出分解出的各分量信号的功率谱, 将明显的干扰信号分量置零, 逆变换得到去除噪声的信号.

(2) 根据 LFP 信号的常用采样频率的范围 (1 000 ~ 2 000 Hz) 及可能包含编码信息频带的范围 (1 ~ 100 Hz), 确定出小波分解的层次; 对 ICA 去噪后的信号用小波方法进行多层小波分解, 分解出多个小波子带, 对各层的细节系数进行单支重构. 由时频分析作出不同方向的时频图, 确定特征提取的小波频带.

(3) 对选取的  $m$  个通道信号小波子带信号, 在其转向发生时刻  $t$  秒内, 滑动时间窗求取该时间窗内的能量值, 并对其进行归一化处理, 每个通道提取  $n$  个特征, 以  $m \times n$  维特征作为解码特征, 之后进行分类.

(4) 利用  $kNN$  方法对编码特征进行分类.  $kNN$  方法不需要估计样本的概率密度函数, 找到被分类对象在测试样本中  $k$  个最近的样本, 然后根据样本分类属性进行投票, 将预测值的分类属性赋于被分类对象, 解码出鸽子运动方向.

## 2 鸽子神经信号采集

为了获得鸽子转向运动行为的神经信号, 笔者采用十字迷宫对动物进行转向训练并同步进行神经信号检测. 鸽子转向训练范式如图 3 所示. 图中有标号为 1, 2, 3, 4 的 4 对红外装置, 用于对同步记录到的神经信号数据的对应时间进行标记.

在电极植入前, 首先对鸽子进行训练, 训练过程如下: 实验开始前将鸽子放入等待区, 当实验开始提示音响起后, 自动门打开, 同时左转、直行、右转三个方向的食槽随机打开一个, 鸽子到达十字路口通过观察食槽位置朝相应方向前进, 得到食物奖励后返回到起始点, 等待下次实验.

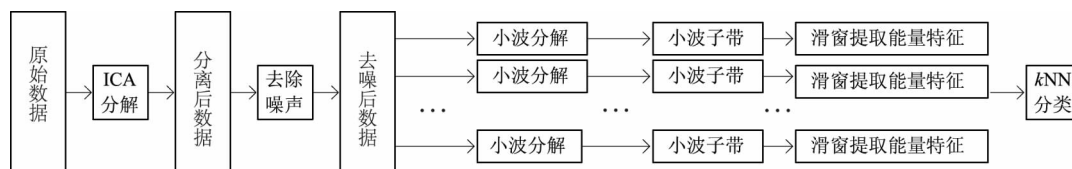


图2 ICA-小波编码特征提取及解码流程

Fig. 2 Process of feature extracting by ICA-wavelet and decoding

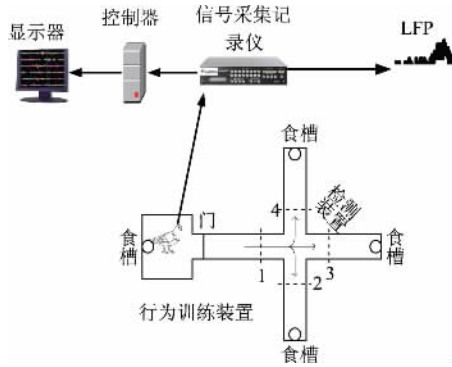


图3 鸽子训练范式及神经信号示意图

Fig.3 Training mode and neural signals

当鸽子转向正确率达到90%以上时,将 $2 \times 8$ 通道的Microprobe微电极阵列植入到鸽子的NCL脑区,术后7 d左右利用Cerebus™的128通道数据采集系统进行信号采集.采集到的神经信号幅值较小,一般是 $\mu\text{V}$ 级别的需要经过放大装置进行放大;数据传输采用光纤通信,采样率为2 kHz,16位模数转换精度;采用通带为0~250 Hz的二阶Butterworth滤波器对采集到的信号进行滤波得到LFP,之后降采样至1 kHz,实验全程通过视频监控,以便对鸽子运动状态进行分析.对采集到的信号用去均值的方法去除基线漂移,之后用于特征提取与解码.

### 3 编码特征提取与解码

为对鸽子转向的LFP进行整体认知,首先结合鸽子运动行为视频与LFP时频分析,确定编码时间窗.观察到信号时频变化如图4的原始信号所示,信号在40~60 Hz的频带内1 s的时间内能量有变化,但是工频干扰比较明显,导致信号特征不是很明显,影响解码效果,需要对信号进一步处理.用50 Hz陷波方法对原始信号进行处理,去除工频干扰的同时,将50 Hz可能包含的信号也去除了.用ICA进行处理,去除噪声的同时且不损害有用信号,使特征更为明显.对3个方向的原始信号用不同方法进行去噪后的时频图如图4所示.

由于信号的能量发生变化,对处理后的信号,提取其能量特征.用经典的Chebyshev滤波器方法提取7个通道1 s内40~60 Hz的信号,每200 ms为一个时间窗,计算该段时间内的能量值,共得到35个能量值,将其归一化(均值为0,方差为1)后作为分类的特征向量.小波方法具有很好的局部特征提取作用,对ICA处理后的数据用db7小波进行7层小波分解,提取第4层信号(频带范围为31.25~62.5 Hz),同样的处理方法得到

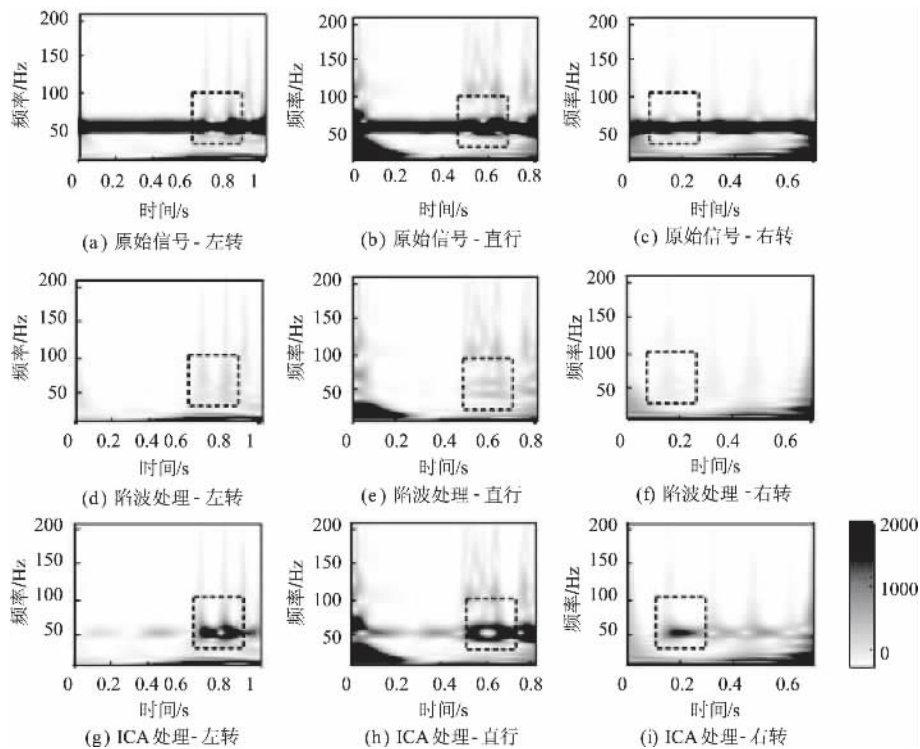


图4 ICA和陷波器去噪效果对比时频图

Fig.4 Comparison of de-noising effect time-frequency diagram by ICA and notch filter method

分类的特征向量,各方向各通道变化如图 5 所示.可以看出左转,直行,右转信号的能量有所差异,小波方法提取的特征可分性更强.取左转 15 组,直行 15 组,右转 15 组信号,对其进行 ICA-小波特征提取,左转、直行、右转各方向的信号能量变化又具有一致性,如图 6 所示.

为了评估所提出算法的解码效果,笔者比较了 Chebyshev 滤波器特征提取算法(原始信号陷波滤波器去除工频干扰后用 Chebyshev 滤波器滤波得到 40 ~ 60 Hz 频带),小波滤波特征提取,

ICA-Chebyshev 滤波特征提取,和 ICA-小波滤波特征提取四种特征提取算法的解码效果.采用  $k$ NN 方法对信号特征进行分类.对 4 只鸽子采集的数据,用 2/3 的数据用作训练,1/3 的数据用于测试分类,进行 1 000 次测试,其分类结果如表 1 所示.

从表 1 可以看出,笔者提出的方法对运动转向的分类效果最好.而经过 ICA 方法处理,使得原本混合在同一通道的相互独立的信号源分离开,不同通道采集到的同一信号源发出的信号加

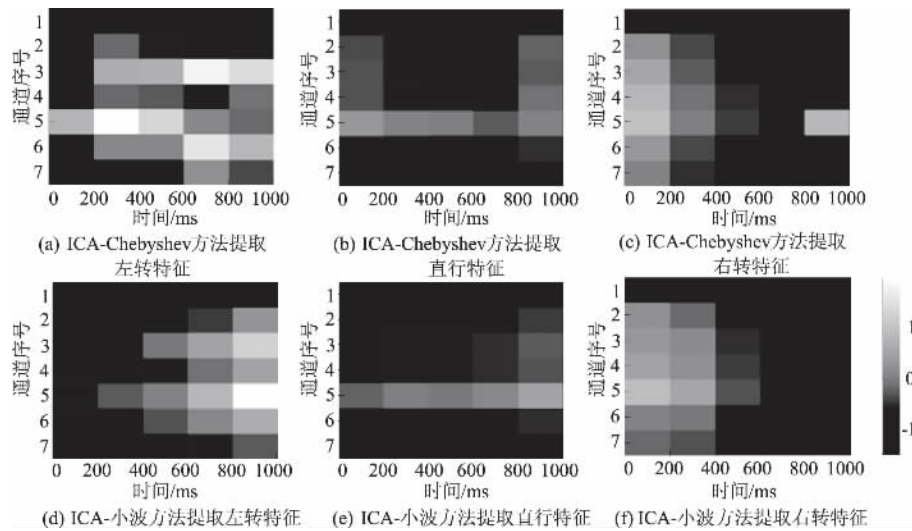


图 5 Chebyshev 与小波方法提取的能量特征对比

Fig. 5 Comparison of energy features extracted by Chebyshev and wavelet method

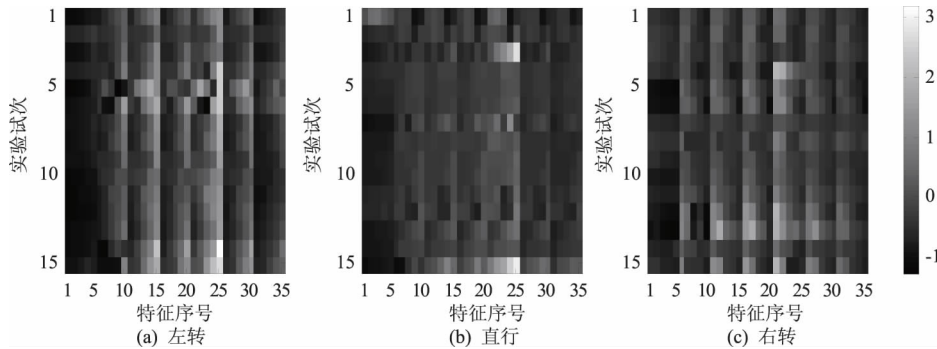


图 6 不同转向多个试次的特征一致性分析

Fig. 6 Consistency analysis of the features in different direction

表 1 ICA-小波与其它方法提取特征解码正确率

Tab. 1 Decoding accuracy of extracted features by ICA-wavelet and other methods

%

鸽子 编号	Chebyshev 方法		小波方法		ICA-Chebyshev 方法		ICA-小波方法	
	解码正确 率均值	解码正确 率标准差	解码正确 率均值	解码正确 率标准差	解码正确 率均值	解码正确 率标准差	解码正确 率均值	解码正确 率标准差
P600	83.47	8.44	86.46	7.26	88.28	6.92	92.35	5.87
P609	72.07	14.53	73.38	14.17	76.32	13.58	82.62	11.60
P619	65.73	6.38	66.83	6.26	70.07	8.66	74.01	8.33
P603	66.75	10.14	68.70	9.06	77.64	7.35	80.55	5.12

强,将明显的干扰信号去除,使解码时的左转、直行和右转的可分性更强.小波分析方法具有良好的时频特性,使得我们在时频域获得更多的信息,对于非平稳信号的特征提取具有很好的适用性.而Chebyshev等数字滤波器,容易造成频谱泄露,而且过渡带较宽,时频分辨率较差.经过小波函数提取的特征能明显反应不同转向时的特征变化,达到了很好的解码效果.

#### 4 结论

笔者采集到动物转向时的信号,对其进行视频分析、去噪、时频分析、提取特征,并进行分类解码.结果表明,鸽子进行运动转向时,其LFP发生了变化,说明LFP与运动决策相关,可以用于对运动方向的解码.利用ICA方法去除信号的噪声,提高了信号的信噪比,通过对数据进行时频分析,得到时频域的变化信息;并将不同实验场景发生改变的信号准确定位,确定出特征提取的时间窗与编码频带,进而结合小波分析的方法对特征进行提取.经过ICA方法处理后再用小波方法进行提取的特征,能解码鸽子运动转向行为,解码正确率较其他方法有较大提高,而且分类方差较小,证明了该方法的有效性.

#### 参考文献:

- [1] ARJUN K, CARLOS E, WILSON T. Relationships among low-frequency local field potentials, spiking activity, and three-dimensional reach and grasp kinematics in primary motor and ventral premotor cortices [J]. *Journal of neurophysiology*, 2011, 105 (4): 1603 – 1619.
- [2] TOMISLAV M, WILSON T, SONJA G. Local field potentials in primate motor cortex encode grasp kinetic parameters [J]. *NeuroImage*, 2015, 114(1): 338 – 355.
- [3] 龙飞,吴小培,范聆.基于独立分量分析的脑电噪声消除[J].*生物医学工程学杂志*, 2003, 20(3): 479 – 483.
- [4] 钟伯成,吴小培.基于小波变换的脑电信号瞬态特征提取[J].*模式识别与人工智能*, 2000, 13(2): 218 – 221.
- [5] CAMARA C, LSASI P, WARWICK K, et al. Resting tremor classification and detection in Parkinson's disease patients [J]. *Biomedical signal processing and control*, 2015, 16: 88 – 97.
- [6] DANIEL L, ROLAND P, ONUR G. Neurons in the pigeon nidopallium caudolaterale signal the selection and execution of perceptual decisions [J]. *European journal of neuroscience*, 2014, 40(9): 3316 – 3327.
- [7] 刘新玉,尚志刚,万红.神经元锋电位检测中大幅值干扰的去除[J].*中国科技论文*, 2013, 8(1): 46 – 50.
- [8] COMON P. Independent component analysis, a new concept [J]. *Signal processing*, 1994, 36(3): 287 – 314.
- [9] SHENSA M. The discrete wavelet transform: wedding the a trous and mallat algorithms [J]. *IEEE transactions on signal processing*, 1992, 40(10): 2464 – 2482.
- [10] HYYARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. *IEEE Transactions on neural networks*, 1999, 10(3): 626 – 634.
- [11] 尚志刚,冯平艳,刘新玉,等.局部场电位 $\gamma$ 频带能量对朝向调谐特性研究[J].*郑州大学学报(工学版)*, 2012, 33(6): 5 – 9.

### ICA-wavelet Feature Extraction Method for Decoding of Animals Turning

DONG Fangfang, SHANG Zhigang, LIU Xinyu, WAN Hong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to overcome the problems as low signal-to-noise ratio (SNR) of LFP and difficulty in identifying encoding time window when extract the features of motion intention, a method that combines independent component analysis (ICA) with Wavelet was presented to extract the features of turning. Firstly, the motion videos of animals were analyzed and the time-frequency diagrams of LFP were plotted to determine the time window of signal which encoded the motion information. Then, ICA was used to increase the SNR of LFP. Thirdly, the encode bands of LFP were extracted by wavelet method as well as the encode features were extracted by sliding time window method. Lastly, k-nearest neighbor method was used to classify the encode features. And via 1 000 times cross validation the precision was  $(92.35 \pm 5.87) \%$ , the results showed that it could decode reliably the motion intention of animals.

**Key words:** local field potentials; independent component analysis; wavelet decomposition; time-frequency analysis

# 输电固定成本分摊的 AR-DEA 合作博弈核仁解方法

王金凤<sup>1</sup>, 孟徐飞<sup>1</sup>, 王 铮<sup>2</sup>, 杨丽徙<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司信息通讯公司, 河南 郑州 450000)

**摘 要:** 针对现有输电固定成本分摊方法不能保证完全回收成本和提供经济信号的问题, 提出基于 AR-DEA 与合作博弈核仁解的输电固定成本分摊方法. 首先考虑用电量、分时电价和电能质量等因素, 构建成本分摊指标体系; 然后在数据包络分析基础上建立合作博弈模型, 并引入保证区域的限制来对权重进行约束, 得到考虑多指标权重约束的输电固定成本分摊模型; 最后通过算例验证了方法的可行性.

**关键词:** 数据包络分析; 合作博弈; 核仁解; 输电固定费用成本分摊

**中图分类号:** TM73; F123 .9 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.011

## 0 引言

目前, 输电固定成本的合理计算与分摊不仅成为电力市场良好发展的关键, 也成为电力市场必须解决的核心问题<sup>[1-2]</sup>. 国内外关于输电固定成本分摊方法的主要有三类: 综合成本法<sup>[3]</sup> (包括邮票法、MW-km 法、合同路径法和边界潮流法等)、边际成本法<sup>[4]</sup> (包括长期边际成本法和短期边际成本法) 和基于合作博弈的方法<sup>[5]</sup>. 然而, 单纯的利用合作博弈的方法, 不管是基于夏普利值, 或者基于核仁解<sup>[6]</sup> 来解决成本分摊问题, 都只考虑用电量或输送功率单个指标, 忽略电能质量、分时电价等指标的影响, 使得分摊结果并不合理, 不能满足电力市场的发展需求.

数据包络分析方法 (Data Envelopment Analysis, DEA) 是由 Charnes 等人在 1978 年提出<sup>[7]</sup>, 主要是通过比较决策单元偏离 DEA 前沿面的程度来评价它们的相对有效性. 在 1999 年, Cook 等<sup>[8]</sup> 首次将 DEA 方法应用于固定成本分摊问题, 他们首先将固定成本作为决策单元的一种新投入要素, 然后根据固定成本分摊前后所有决策单元效率不变性和帕雷托最小性给出了问题的解决思路. 但是, 目前利用 DEA 理论解决固定成本分摊问题的研究均没有考虑到决策单元之间存在既竞争又合作的博弈关系.

笔者将博弈论引入 DEA 模型, 使用 DEA 合作博弈核仁解的方法来解决输电固定成本分摊问题,

考虑用电量、分时电价和电能质量等多个因素, 建立固定成本分摊指标体系, 然后基于 DEA 合作博弈核仁解模型确定各用户的分摊比例. 通过引入保证区域 (Assurance Region, AR) 的限制和权重约束的概念, 通过对比分摊指标有无权重约束来判断分摊结果的合理性.

## 1 用户输电费用固定成本分摊指标

采用文献 [9] 的方法, 将用电量、分时电价和电能质量作为指标, 建立成本分摊指标体系.

(1) 用电量指标: 即用户的年用电量.

(2) 各用户的分时电价指标:

$$D_i = \sum_{j=1}^m T_j (\alpha_j t_{ij,f} + t_{ij,p} + \beta_j t_{ij,g}), i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

式中:  $D_i$  为用户  $i$  的分时电价指标;  $n$  为用户数量;  $m$  为划分的典型日数;  $T_j$  为典型日  $j$  对应的天数;  $\alpha_j$ 、 $\beta_j$  分别为典型日  $j$  的峰、谷电价比;  $t_{ij,f}$ 、 $t_{ij,p}$ 、 $t_{ij,g}$  分别为用户  $i$  在典型日  $j$  的峰、平、谷利用的小时数.

(3) 电能质量指标: 利用电能质量综合指标  $S_{PQI}$  对电能质量国家标准涉及的 5 个指标进行综合评估, 包括供电电压允许偏差、公用电网谐波、电压允许波动和闪变、三相电压允许不平衡度和电力系统频率允许偏差. 电能质量评定等级分为 1~5 等.

收稿日期: 2016-06-25; 修订日期: 2016-09-18

基金项目: 郑州大学青年骨干教师资助项目

通信作者: 王金凤 (1977—), 女, 河南宁陵人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力网络规划、电力经济等相关研究, E-mail: wangjinfeng@zzu.edu.cn.



(4) 评价指标的归一化处理: 根据综合评价要求, 为计算方便对各指标进行归一化处理。

## 2 DEA 合作博弈方法

### 2.1 DEA 决策矩阵及局中人收益

假设有  $n$  个局中人和  $m$  个决策标准, 构造一个决策矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1i} & \cdots & x_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对该决策矩阵的每行进行求和归一化处理, 即

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1.$$

假设某个决策属性对局中人越有利, 局中人就越倾向于按照这个决策属性执行, 那么这个决策属性的权重值就越大. 对于每个局中人  $k$ , 其选择的执行的权重为:

$$\omega^k = (\omega_1^k, \omega_2^k, \cdots, \omega_m^k). \quad (3)$$

则每个局中人收益为:

$$c(S) = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^k x_{ik}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^k (\sum_{j=1}^n x_{ij})}. \quad (4)$$

### 2.2 局中人分摊值最小化的 DEA

根据每个局中人收益, 可知局中人分摊最小化的模型为:

$$\min \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^k x_{ik}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^k (\sum_{j=1}^n x_{ij})}; \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \omega_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

经过 Charnes-Cooper 变换<sup>[10]</sup>, 将其转化为线性规划:

$$c(k) = \min \sum_{i=1}^m \omega_i^k x_{ik}; \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^m \omega_i^k = 1, \omega_i^k \geq 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

经过以上转化, 问题就变为求上式的目标函数. 为了求解上面的问题, 引入 DEA 合作博弈.

### 2.3 DEA 合作博弈假设

(1) 在输电固定成本分摊过程中, 各个用户间可相互结盟且结盟后各成员是团体理性的, 都同意不打破此博弈, 以获得最大利益.

(2) 在分析中不考虑输电系统的可靠性以及其他电力市场的不确定因素.

假设有  $n$  个局中人构成联盟整体  $N$ , 它们之间任意组合, 包含空联盟在内可形成的联盟个数为  $2^n$ .  $N$  的任一子集  $S$  构成一个联盟, 以便获得最小的联盟成本  $c(S)$ . 其中:

$$c(S) = \min \sum_{i=1}^m \omega_i x_i(S), \quad (7)$$

$$\text{s. t. } x_i(S) = \sum_{j \in S} x_{ij};$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m).$$

显然,  $c(N) = 1, c(\Phi) = 0$ . 文献 [11] 证明  $c(S)$  具有次可加性, 即

$$c(S \cup T) \leq c(S) + c(T).$$

联盟  $S$  和联盟  $T$  形成大联盟时分配总额小于或等于两者不联盟所分配的固定成本总额, 因此, 可以将  $c(S)$  作为联盟  $S$  的特征函数.

### 2.4 合作博弈的核仁解

在研究多人合作博弈时, 如果任一局中人在对其最不利的分配方案中仍获得了成本最小或利益最大的结果, 那么这个分配方案就是核仁. 核仁解的输电固定费用分配的数学模型可描述成下述线性规划问题:

$$\min \varepsilon. \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^N y_j + \varepsilon \geq z(S), N = \{1, 2, \cdots, 2^n\};$$

$$z(S) = \sum_{j \in S} c(j) - c(S);$$

$$\sum_{j \in N} y_j = z(N);$$

$$c'_j = c(j) - y_j,$$

式中:  $c(j)$  是电网中仅存在用户  $j$  时的输电成本特征函数值;  $c(S)$  是多用户形成联盟  $S$  共同使用输电网时, 不论联盟外部用户使用什么策略, 联盟  $S$  内用户所共同承担的固定成本;  $y_j$  是局中人  $j$  在输电成本分配函数中的成本超出矢量;  $z(S)$  是联盟  $S$  中用户通过结成联盟比每个人单独使用电网时所减少的固定费用;  $z(N)$  是形成大联盟时固定费用减少的总额;  $c'_j$  是用户最终应承担的固定成本, 是由每个用户使用电网时的固定成本减去相应的成本超出矢量求得.

### 2.5 AR-DEA 合作博弈

AR (assurance region) 即保证区域, 因为 DEA 计算得到的权重值变化较大, 在结合 AR 后将得到的权重值限制在一定范围内变化, 使

得到的权重分配更加合理. 假定用电量所占的权重较大, 定义限定条件为:

$$L_i \leq \frac{\omega_i}{\omega_1} \leq U_i. \quad (9)$$

将限定条件引入到联盟  $S$  的特征函数中, 得到 AR-DEA 合作博弈的模型:

$$c(S) = \min \sum_{i=1}^m \omega_i x_i(S). \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^m \omega_i^k = 1, \omega_i^k \geq 0;$$

$$L_i \leq \frac{\omega_i}{\omega_1} \leq U_i, \quad (i=1, 2, \dots, m).$$

为方便, 使用如下方法求解联盟特征函数:

表 1 各用户基本情况

Tab. 1 Basic information of the major users

用户	负荷季节	工作制度	电能质量等级	用电量 / (亿 kW · h)	峰谷电价时段划分	峰、平、谷电价比
A	全年	24 小时制	4	43.8	峰时: 10:00—12:30	
B	夏季	24 小时制	5	42.67	18:00—22:00	夏季:
					平时: 0:00—10:00	2:1:0.5
C	全年	8:00—12:00 2:30—6:30	3	8.76	12:00—18:00	冬季:
					22:00—24:00	1.5:1:0.5
D	全年	0:00—8:00	1	8.49	谷时: 0:00—8:00	

表 2 无 AR 约束下各联盟特征函数

Tab. 2 The characteristic function of the union under the non AR constraint

用户联盟	用电量指标	电能质量指标	分时电价指标	特征函数	用户联盟	用电量指标	电能质量指标	分时电价指标	特征函数
{A}	0.422 3	0.181 8	0.519 2	0.181 8	{B, D}	0.493 3	0.545 4	0.336 8	0.336 8
{B}	0.411 4	0.090 9	0.276 2	0.090 9	{C, D}	0.166 4	0.727 2	0.204 6	0.166 4
{C}	0.084 5	0.272 7	0.144 0	0.084 5	{A, B, C}	0.918 2	0.545 4	0.939 4	0.545 4
{D}	0.081 9	0.454 5	0.060 6	0.060 6	{A, B, D}	0.915 6	0.727 2	0.856 0	0.727 2
{A, B}	0.833 7	0.272 7	0.795 4	0.272 7	{A, C, D}	0.588 7	0.909 0	0.723 8	0.588 7
{A, C}	0.506 8	0.454 5	0.663 2	0.454 5	{B, C, D}	0.577 8	0.818 1	0.480 8	0.480 8
{A, D}	0.504 2	0.636 3	0.579 8	0.504 2	{A, B, C, D}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
{B, C}	0.495 9	0.363 6	0.420 2	0.363 6					

### 3.2 AR 约束下合作博弈核仁解

在以上计算中, 若将限定条件改为  $\omega_1 \geq \omega_2$ ,  $\omega_1 \geq \omega_3$ , 则用电量指标相比其他两个指标所占权重更大. 在 AR 约束下的合作博弈特征函数如表 3 所示.

在 AR 约束下的 DEA 合作博弈由式 (8) 求出各用户的核仁解. 无权重约束及 AR 约束下计算结果见表 4.

### 3.3 计算结果对比

将邮票法、不考虑权重约束的合作博弈核仁

$$c(S) = \min \left\{ x_1(S), \frac{x_1(S) + x_2(S)}{2}, \frac{x_1(S) + x_3(S)}{2}, \frac{x_1(S) + x_2(S) + x_3(S)}{3} \right\}. \quad (11)$$

## 3 算例分析

算例数据取自参考文献 [9]. 假设各用户用电情况如表 1. 将表 1 的数据进行归一化处理.

### 3.1 无 AR 约束下合作博弈核仁解

根据归一化处理数据分别求出在不同联盟状态下的特征函数, 如表 2 所示. 利用核仁解的数学模型式 (8) 求出最后的各用户的核仁解.

法、AR 约束下的合作博弈核仁法的计算结果对比如图 1 所示. 由图 1 可以看出, 用户 A 和 B 虽然用电量大, 但是其对电能质量要求较小, 在同时考虑分时电价情况下, 利用 DEA 合作博弈核仁解的方法分摊的比例与采用邮票法相比有所下降; 而用户 C 和 D 虽然用电量较小, 但对电能质量要求高, 所以其分摊的成本与邮票法相比有所上升. 可知采用多属性综合评价方法的 DEA 合作博弈核仁法使得分摊的结果更加公平合理.

表 3 AR 约束下各联盟特征函数

Tab.3 The characteristic function of the union under the AR constraint

用户联盟	$x_1(S)$	$[x_1(S) + x_2(S)]/2$	$[x_1(S) + x_3(S)]/2$	$[x_1(S) + x_2(S) + x_3(S)]/3$	特征函数
{ A }	0.422 3	0.302 1	0.470 8	0.374 4	0.302 1
{ B }	0.411 4	0.251 2	0.343 8	0.259 5	0.251 2
{ C }	0.084 5	0.178 6	0.114 2	0.167 1	0.084 5
{ D }	0.081 9	0.268 2	0.071 2	0.199 0	0.071 2
{ A,B }	0.833 7	0.533 2	0.814 6	0.633 9	0.553 2
{ A,C }	0.506 8	0.480 6	0.585 0	0.541 5	0.480 6
{ A,D }	0.504 1	0.570 3	0.542 0	0.573 4	0.504 1
{ B,C }	0.495 9	0.429 7	0.458 0	0.426 6	0.426 6
{ B,D }	0.493 3	0.519 4	0.415 0	0.458 5	0.415 0
{ C,D }	0.166 3	0.446 8	0.185 4	0.366 1	0.166 3
{ A,B,C }	0.918 2	0.731 8	0.928 8	0.801 0	0.731 8
{ A,B,D }	0.915 6	0.821 4	0.885 8	0.832 9	0.821 4
{ A,C,D }	0.588 6	0.748 8	0.656 2	0.740 5	0.588 6
{ B,C,D }	0.577 8	0.697 6	0.529 2	0.625 6	0.529 2
{ A,B,C,D }	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

表 4 联盟博弈的核仁解

Tab.4 Nucleous solution of the cooperative game

项目	用户A	用户B	用户C	用户D
不考虑权重约束	0.364 0	0.250 8	0.178 9	0.206 3
约束用电量权重	0.394 2	0.329 5	0.131 8	0.144 5

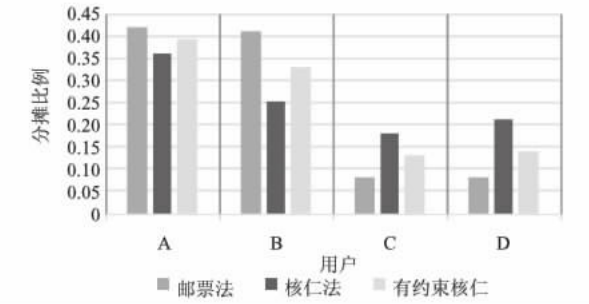


图 1 3 种方法下各用户分摊比例对比

Fig.1 Comparison of three different methods of user allocation

在采用了 AR 约束后,因为设定的用电量所占的权重较大,从图中可看出,由于用户 A 和 B 用电量大,其分摊比例比采用无约束 DEA 合作博弈核仁解的计算结果有所上升;而用户 C 和 D 因为用电量较小,所以其比例稍微下降.

以上计算仅考虑用电量所占比重较大,若分别设定电能质量与分时电价权重较大时,将分别约束用电量、电能质量、分时电价权重后的分摊结果相对比如图 2 所示.

由图 2 可知,分别对用电量、电能质量和分时电价的权重进行约束,各用户分摊的结果相差较大.令电能质量权重较大时,用户 A 和 B 的分摊

比例下降明显,用户 C 和 D 分摊比例显著提高,这是因为虽然用户 A 和 B 的用电量高,但是用户 C 和 D 对电能质量要求很高,所以在电能质量权重较大后,其分摊比例得到了明显的提高.特别是用户 D,其用电量相对 A 来讲很小,但是对电能质量的要求比 A 高的多,用户 D 最后的分摊比例甚至超过了 A.

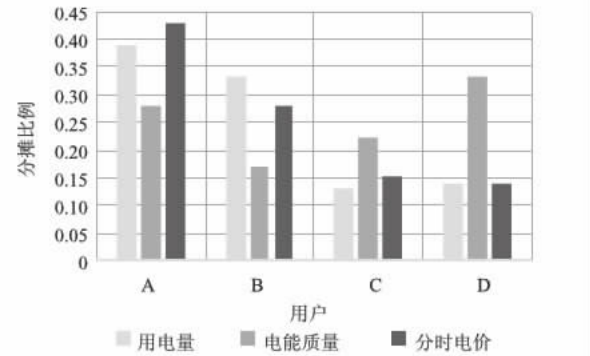


图 2 3 种约束下各用户分摊比例对比

Fig.2 Comparison of the proportion of each user's contribution under the three constraints

在令分时电价权重较大后,从图 2 中可看出,跟用电量权重较大时的分摊结果相似.但是两个结果相比之下,用户 A 的分摊比例有所上升,这是因为其分时电价指标相对非常高,而且其用电量也很大.用户 B 的分摊比例有所下降,这是由于用户 B 的分时电价不高所致.用户 C 和 D 分摊结果变化不大,这是由于两者用电量相近,虽然用户 C 的分时电价指标较高,但是用户 C 对电能质

量要求相对低,所以两者分摊结果接近.

从对比结果可以看出,在引入多指标来进行固定成本分摊后,分摊结果更加公平合理.而在加入权重约束后会使分摊结果产生很大变化,权重约束合理才能使分摊结果合理.采用权重约束,不但更符合各方利益,促进电网更好的回收成本,提高用户的用电效率,而且能给电力市场参与者提供良好的经济信号,促进电力市场更好的发展.

#### 4 结论

笔者使用基于 AR-DEA 合作博弈的方法,解决输电成本分摊问题,通过合作博弈核仁解来获得各用户分摊比例.考虑了用电量、分时电价和电能质量等多因素的影响,考虑因素相对全面,使分摊结果更加合理.引入保证区域限制,对不同指标权重进行约束,说明指标权重对分摊结果的重要影响,使得分摊结果更加透明,为电力市场各方参与者提供一定经济信号.但是,这里只考虑了用电量、电能质量和分时电价 3 个指标,如何考虑更多因素的影响,建立一个更全面更完善的指标体系,有待进一步的研究.

#### 参考文献:

- [1] 荆朝霞,廖名洋,聂更生,等. 输电固定成本分摊中最大化综合效益的源流分析方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(23): 71-77.
- [2] ROUSTAEI M, SHEIKH-EL-ESLAMI M K, SEIFI H. Transmission cost allocation based on the users' benefits[J]. Electrical power and energy systems, 2014 (61): 547-552.
- [3] KRISTIANSEN T. Comparison of transmission pricing models [J]. International journal of electrical power&energy systems, 2011, 33(4): 947-953.
- [4] LIMA J W M, DE OLIVERIRA E J. The long-term impact of transmission pricing [J]. IEEE transactions on power systems, 1998, 13(4): 1514-1520.
- [5] 童强,高效. 输电固定成本分配的合作博弈[J]. 电力系统保护与控制,2008(13): 48-51.
- [6] 高效,彭建春,罗安. 多种交易模式下核仁解分摊电网固定成本[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10): 120-124.
- [7] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring efficiency of decision making units [J]. European journal of operational research, 1978(2): 429-444.
- [8] COOK W D, KRESS M. Characterizing an equitable allocation of shared costs: A DEA approach [J]. European journal of operational research, 1999(119): 652-661.
- [9] 周明,郑雅楠,李庚银,等. 考虑分时电价和电能质量的大用户转运费用固定成本的综合分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(19): 125-130.
- [10] 魏权龄,岳明. DEA 概论与 C<sup>2</sup>R 模型——数据包络分析(一) [J]. 系统工程理论与实践,1989,9(1): 58-69.
- [11] KEN N. Egoist's dilemma: a DEA game [J]. Omega, 2006, 34(2): 135-148.

### AR-DEA and Cooperative Game Nucleolus Solutions for Transmission Fixed Cost Allocation

WANG Jinfeng<sup>1</sup>, MENG Xufei<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>2</sup>, YANG Lixi<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Information and Communication Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The current transmission fixed cost allocation method could not ensure the complete recovery of the cost and provide economic signals, a transmission fixed cost allocation method based on AR-DEA and cooperative game was proposed. Firstly, the index system of cost allocation was constructed in consideration of power consumption, TOU power price, power quality and other factors. Then based on the data envelopment analysis, a cooperative game model was established; and the assurance region was introduced to the weight constraint; so a transmission fixed cost allocation model considering multi index weight constraints was obtained. Finally, A numerical example was used to illustrate the feasibility of this method.

**Key words:** DEA; cooperative game; nucleolus solutions; transmission cost allocation on a fixed route

## 结合投影与近邻操作的支持向量快速筛选方法

李蒙蒙, 尚志刚, 李志辉

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为减少支持向量机(SVM)的计算负担, 提高运算效率, 并保证分类精度, 提出一种结合投影与近邻操作的支持向量快速筛选方法. 该方法利用 Fisher 投影轴的全局特性将其作为 SVM 最优分类面的近似法方向, 在该方向快速筛除大量非支持向量, 将分类边界附近的样本集作为备选支持向量集, 同时为解决投影操作未考虑样本局部结构信息造成的误删支持向量的问题, 结合近邻操作回选样本空间中备选支持向量的近邻样本更新扩充备选支持向量集, 以该子集中的样本作为 SVM 的输入. 在多个 UCI 标准数据集上的实验结果表明, 该方法在充分保证分类精度的前提下有效降低了 SVM 的计算负担, 具有较好的推广性.

**关键词:** 支持向量机; 支持向量; Fisher 投影;  $k$ -近邻; 快速筛选

**中图分类号:** TP391.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.003

### 0 引言

支持向量机(support vector machine, SVM)是建立在统计学习 VC 维理论和结构风险最小化基础上的机器学习方法, 其学习过程实际是求解一个二次规划问题, 需用到所有训练样本的 Hessian 矩阵, 故遇到样本集较大的学习问题时, 传统方法内存消耗过大且学习速度缓慢, 从而影响了它的实用价值和推广. 针对这一问题, 近年出现了许多改进算法提高 SVM 对大样本集的学习速度. 一种思路是改进优化方法, 以 Keerthi 等提出的循环最近点算法<sup>[1]</sup>、Platt 提出的序贯最小优化算法最具代表性. 另一种思路是通过某种处理缩减样本集得到规模较小的替代集而又不影响分类精度, 如文献[2-3]提出的局部支持向量机算法, 利用 K 均值聚类生成的样本中心点集作为替代; 文献[4]提出基于距离排序的快速支持向量机分类算法; 文献[5]提出基于  $k$ -近邻法的快速训练算法; 文献[6]提出了基于 Fisher 鉴别分析的训练样本缩减策略. 上述算法筛除了冗余样本, 减少了无谓运算, 提高了运算速度. 但由于数据压缩往往会误删一部分支持向量, 破坏原分类边界, 造成一定程度的精度下降. 考虑到 SVM 确定的支持向量均靠

近分类边界并最终决定最优分类面, 而其他大量非支持向量则属于冗余样本, 故如何在保持原样本集分类边界较完整的条件下, 快速筛除与分类无关的非支持向量具有重要的研究价值.

为快速准确地筛除大量非支持向量, 提高 SVM 确定支持向量的计算效率, 笔者提出一种结合投影与近邻操作的方法, 利用 Fisher 投影的全局特性, 快速粗略地筛除大量远离分类边界的冗余样本以减少计算量, 结合邻域选择可以保留数据局部结构信息的优势, 进行样本回选以避免对支持向量的误删, 保证分类边界信息的完整性.

### 1 支持向量机的原理与问题

SVM 基于结构风险最小化理论在样本空间中构造最优超平面. 对线性可分样本集, 必然存在最优超平面保证在分类间隔最大的条件下正确划分所有训练样本, 这同时保证了经验风险最小和结构风险最小, 从而达到期望风险最小化<sup>[7-9]</sup>.

设数据集上的两类样本分别可标记为  $\{\mathbf{x}_i, y_i\}$ ,  $i=1, \dots, l$ , 其中,  $l$  为样本的总数,  $y_i$  为类别标签且  $y_i \in \{-1, 1\}$ . SVM 的求解问题是一个对于不等式约束的条件极值问题, 引入非负的拉格朗日系数  $\alpha_i$ , 可表述为如下的拉格朗日方程:

收稿日期: 2016-06-08; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1304602; 61473266), 河南省高等学校重点科研资助项目(15A120016)

通信作者: 尚志刚(1975—), 男, 甘肃兰州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事生物医学信息与模式识别研究, E-mail: zhigang\_shang@zzu.edu.cn.



$$L(\mathbf{w}, b, \alpha_i) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i (y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1). \quad (1)$$

将上式转化为较简单的“对偶”形式为:

$$W(\alpha_i) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j). \quad (2)$$

求解使  $W$  取最大值的  $\alpha$ , 若  $\alpha^*$  为最优解, 则最优分类面的法向量可表示为  $\mathbf{w}^* = \sum_{i=1}^l \alpha_i^* y_i \mathbf{x}_i$  [10-11].

上述计算需要用到所有训练样本的 Hessian 阵, 而实际上非支持向量对应的  $\alpha^*$  均为 0, 对于最优分类面的确定没有贡献, 因此如何快速可靠地筛除非支持向量就成为提高 SVM 计算速度的关键.

## 2 结合 Fisher 投影与近邻法的支持向量快速筛选方法

SVM 中靠近分类边界的支持向量对确定最优分类面较重要, 而远离边界的样本可视作冗余样本进行筛除. Fisher 最佳投影轴可近似视为 SVM 分类面的法方向, 故可将其引入 SVM 中快速筛除冗余样本以缩减样本集, 从而更快筛选出支持向量. 但由于 Fisher 投影侧重样本集的全局结构信息, 而未考虑局部结构信息可能误删支持向量, 故笔者拟采用结合投影和近邻操作的方法解决这一问题, 以快速准确筛选出潜在支持向量.

### 2.1 Fisher 投影筛除非支持向量

Fisher 投影基于 Fisher 准则 [12] 寻求最佳方向, 使所有特征点在该方向得到最好的分类. 以二分类为例, 类均值向量为  $\mathbf{m}_1$  和  $\mathbf{m}_2$ , 原空间类内散度矩阵为  $\mathbf{S}_w$ , 类间散度矩阵为  $\mathbf{S}_b$ , 所有样本投影到一维空间后类内散度和类间散度变为具体值, 以  $\tilde{S}_w$  和  $\tilde{S}_b$  表示, 此时 Fisher 准则函数为:

$$\max J(\mathbf{w}) = \frac{\tilde{S}_b}{\tilde{S}_w} = \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{S}_b \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \mathbf{S}_w \mathbf{w}}. \quad (3)$$

为求满足上式的投影方向  $\mathbf{w}$ , 引入拉格朗日乘子求解无约束极值问题, 得到最佳投影方向:

$$\mathbf{w} = \mathbf{S}_w^{-1} (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2). \quad (4)$$

所有样本向  $\mathbf{w}$  投影得对应投影值, 但这种向一维空间的特征压缩不像 SVM 考虑了分类面附近的局部结构信息, 故推理知在此基础上筛除冗余样本会不可避免地误删一部分潜在支持向量.

笔者采用数值实验验证上述推理, Fisher 投影筛除方法如下: 对  $\mathbf{X}$  中任一样本  $\mathbf{x}$ , 其投影表示

为  $z = \mathbf{w}^T \mathbf{x}$ . 选取两类样本最靠近边界者的均值为基准点, 记作  $z_0$ , 逻辑推理知远离  $z_0$  的是非支持向量冗余样本, 反之则更有可能是 SVM 确定的支持向量. 记  $z_0$  两侧投影点对应的原始样本集为  $\mathbf{X}^+$  和  $\mathbf{X}^-$ , 分别计算它们与  $z_0$  的距离, 记:

$$\mathbf{D}^+ = \{ |\mathbf{w}^T \mathbf{x} - z_0| \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X}^+ \} = \{ D_1^+, D_2^+, \dots, D_{n_1}^+ \}. \quad (5)$$

$$\mathbf{D}^- = \{ |\mathbf{w}^T \mathbf{x} - z_0| \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X}^- \} = \{ D_1^-, D_2^-, \dots, D_{n_2}^- \}. \quad (6)$$

其中,  $1, 2, \dots, n_1; 1, 2, \dots, n_2$  是排序前的序号.

对  $\mathbf{D}^+$  和  $\mathbf{D}^-$  排序, 以  $(1), (2), \dots, (k_1), \dots, (n_1); (1), (2), \dots, (k_2), \dots, (n_2)$  作为排序后的新序号, 记:

$$D_{(1)}^+ \leq D_{(2)}^+ \leq \dots \leq D_{(k_1)}^+ \leq \dots \leq D_{(n_1)}^+. \quad (7)$$

$$D_{(1)}^- \leq D_{(2)}^- \leq \dots \leq D_{(k_2)}^- \leq \dots \leq D_{(n_2)}^-. \quad (8)$$

则潜在支持向量与  $D_{(1)}^+$  和  $D_{(1)}^-$  对应的样本相邻较近, 故可设定一定的样本筛除参数  $r$  ( $0 < r < 1$ ) 筛除非支持向量, 即满足以下条件的点对应的样本, 其集合记为  $\mathbf{F}$ :

$$\begin{cases} P\{D_{(k_1+1)}^+, D_{(k_1+1)}^+, \dots, D_{(n_1)}^+\} = r; \\ P\{D_{(k_2+1)}^-, D_{(k_2+1)}^-, \dots, D_{(n_2)}^-\} = r. \end{cases} \quad (9)$$

剩余的点组成的并集可表示为  $\mathbf{D} = \{D_{(1)}^+, D_{(2)}^+, \dots, D_{(k_1)}^+\} \cup \{D_{(1)}^-, D_{(2)}^-, \dots, D_{(k_2)}^-\}$ , 它们对应的样本构成备选支持向量集  $\mathbf{G}$ .

以 Iris 数据集为例做上述处理, 结果见图 1. 其中  $l_1$  为样本集  $\mathbf{X}$  在 Fisher 最佳投影轴上的分布,  $l_2$  为 SVM 确定的支持向量集  $\mathbf{S}$  的分布,  $l_3$  为用上述方法处理得到的备选支持向量集  $\mathbf{G}$  的分布.



图1 仅采用 Fisher 投影筛除非支持向量的效果

Fig. 1 The effect of filtering out non-support-vector using Fisher projection only

从图 1 可看出, 仅采用 Fisher 投影筛除冗余样本会误删部分支持向量, 故需考虑  $\mathbf{G}$  的扩充更新, 为此引入  $k$ -近邻法从样本空间回选备选支持向量的近邻补充合并为新的备选支持向量集.

### 2.2 $k$ -近邻法回选扩充备选支持向量集

$k$ -近邻法是基于距离的度量方法 [13]. 采用欧

氏距离作为确定近邻的测度,在原始样本空间中回选  $k$  个与备选支持向量距离最近的样本更新扩充备选集. 遍历备选支持向量集  $G$ , 对其中任一元素  $g$ , 计算其与  $F$  中样本之间的距离, 记:

$$d_j = \text{norm}(g - F_j) = \{d_1, d_2, \dots, d_j\}. \quad (10)$$

对  $d_j$  排序, 记:  $d_{(1)} \leq d_{(2)} \leq \dots \leq d_{(j)}$ , 设定近邻样本回选参数  $k$  ( $1 \leq k$ ), 从中选取前  $k$  个较小值对应的样本, 即距离  $g$  最近的  $k$  个样本组成回选更新集  $g^*$ , 合并所有备选支持向量的更新集作唯一化处理剔除重复样本, 得到的合集记为  $G^*$ , 则  $G \cup G^*$  即为补偿更新后的备选支持向量集.

结合近邻操作回选更新备选支持向量集后的非支持向量筛选效果如图 2 所示,  $l_4$  为采用上述方法更新备选支持向量集后的投影分布.

对比图 1 与图 2 表明对  $G$  进行上述回选更新后可更准确地提取潜在支持向量, 进而更好地保留数据集的边界信息, 为确定最优分类面提供可靠支持. 笔者将这种结合 Fisher 投影和  $k$ -近邻法快速筛选支持向量的方法称为 Fisher Projection- $k$  Nearest Neighbor\_Support Vector Filter, 记作 FP- $k$ NN\_SVF.



图 2 结合近邻操作回选更新后的非支持向量筛选效果

Fig. 2 The effect of filtering out non-support-vector combining nearest neighbor selection with Fisher projection

### 2.3 FP- $k$ NN\_SVF 方法的步骤

笔者提出的 FP- $k$ NN\_SVF 方法流程见图 3. 具体步骤表述如下:

- (1) 输入数据集, 设定筛选率  $r$  和近邻参数  $k$ ;
- (2) Fisher 投影得到投影值并计算基准点;
- (3) 计算各投影值与基准点的距离并排序, 按  $r$  由式 (9) 筛除非支持向量得到备选支持向量集;
- (4) 计算每个备选支持向量与筛除样本间的距离并排序, 按  $k$  回选备选支持向量的近邻更新备选支持向量集, 得到新的备选支持向量集.

## 3 数值实验与结果分析

为考察 FP- $k$ NN\_SVF 方法在不同数据集上的

应用性能, 包括其计算速度、分类精度与鲁棒性, 以及参数  $r$  和  $k$  对实验结果的影响, 笔者开展了相关数值实验. 文中所有计算均采用 MATLAB 软件编程实现, 实验条件为 Intel(R) Pentium(R) D CPU 3.20 GHz/4.00 GB/ Windows XP/MATLAB 8.0.

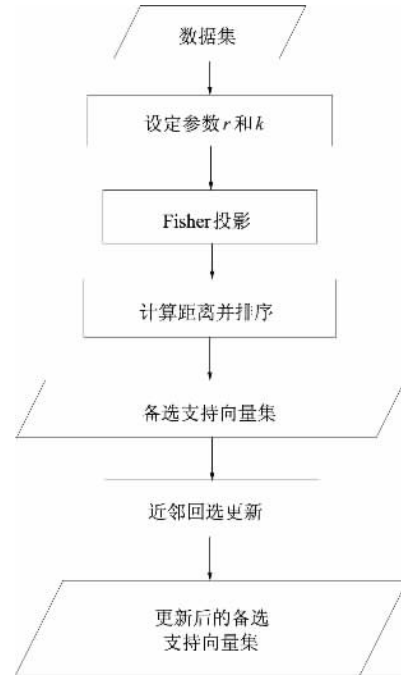


图 3 FP- $k$ NN\_SVF 方法流程图

Fig. 3 The flow chart of the FP- $k$ NN\_SVF method

### 3.1 FP- $k$ NN\_SVF 方法的有效性评估

考虑在样本数量和特征数量上多样化的条件下对比结果差异, 选取 UCI 数据库中 6 个数据集进行实验. 采用交叉互验证, 随机选取每个数据集 70% 的样本作训练集, 30% 作测试集, 随机抽样 10 次分别实验, 以 10 次的平均结果作为 3 种方法的最终结果加以比较, 分类效果如表 1 所示. (其中 Iris 和 Wine 数据集均原有 3 类, 分别将两者的第一类作为正类, 其余两类合并作为负类.)

实验结果表明: ① F\_SVM 和笔者提出的 F- $k$ \_SVM 都可以快速筛除样本, 并较大幅度降低运行时间, F\_SVM 运行时间只占 SVM 的 28% 以下, F- $k$ \_SVM 的运行时间也都只占 SVM 的 64% 以下, F\_SVM 在的表现更突出; ② 3 种方法中, F\_SVM 的分类精度最低, 而 F- $k$ \_SVM 的分类精度高于 F\_SVM, 与原始 SVM 相当甚至高出 SVM, 且其鲁棒性也高于其他两种方法.

综合以上两点说明: F- $k$ \_SVM 在不同数据集上均有良好的表现, 能够充分保证分类的准确性和鲁棒性, 并提高计算效率.

表1 SVM、F\_SVM 和 F-k\_SVM 在 6 种数据集上的分类效果比较

Tab.1 Comparison of classification effect of SVM, F\_SVM and F-k\_SVM on 6 data sets

数据集	样本数量	特征维数	筛除率 $r/\%$	运行时间/s			分类精度/%		
				SVM	F_SVM	F-k_SVM	SVM	F_SVM	F-k_SVM
Iris	150	4	70	0.38	0.01	0.08	$98.89 \pm 1.15$	$96.00 \pm 3.70$	$99.33 \pm 1.07$
Wine	178	13	70	0.24	0.02	0.08	$92.07 \pm 3.69$	$73.77 \pm 4.38$	$92.26 \pm 3.56$
Heart	270	13	30	0.34	0.05	0.16	$70.00 \pm 5.63$	$62.47 \pm 6.92$	$71.23 \pm 4.90$
Breast	683	10	25	27.62	7.70	13.31	$96.00 \pm 1.33$	$95.46 \pm 1.26$	$96.15 \pm 1.20$
Australian	690	14	25	17.73	3.44	4.60	$79.61 \pm 3.23$	$75.80 \pm 3.00$	$80.05 \pm 1.43$
Pima	768	8	25	35.54	8.04	15.91	$68.57 \pm 2.40$	$66.96 \pm 3.49$	$68.91 \pm 2.16$

注: 不筛除样本的方法记作 SVM, 文献 [8] 中仅采用 Fisher 投影筛除样本后结合 SVM 的方法记作 F\_SVM, 笔者提出的 FP-kNN\_SVF 方法结合 SVM 记作 F-k\_SVM.

### 3.2 筛除率 $r$ 对结果的影响

对于样本筛除率  $r$  的选择, 笔者以 Australian 数据集为例, 分别令  $r = 10, 30, 50, 70, 90$ , 各进行 10 次重复随机抽样实验, 记录 10 次的平均运行时间与分类精度, 取  $k = 5$ , 结果如图 4 所示.

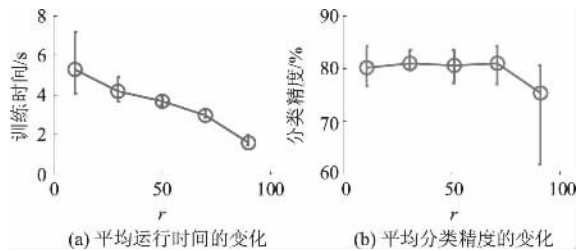
图4 不同  $r$  值下的实验结果( $k = 5$ )Fig.4 The test results with different  $r$  ( $k = 5$ )

图 4 表明, 平均运行时间随  $r$  的增大而降低, 这是由于  $r$  越大, 保留的需处理样本越少, 运算时间也对应降低;  $r$  为 10 ~ 70 时平均分类精度变化不大, 而  $r$  为 90 时精度明显下降, 这是由于筛除了过量样本造成支持向量损失严重引起的. 故针对不同数据集, 应根据其实际的数据结构设置不同的  $r$  以获得时间与精度之间最好的折衷.

### 3.3 参数 $k$ 对结果的影响

对近邻参数  $k$  的选择, 笔者仍以 Australian 数据集为例, 分别令  $k = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$ , 各进行 10 次随机抽样实验, 记录平均运行时间与分类精度,  $r$  为 25 和 90 时的结果如图 5、图 6 所示.

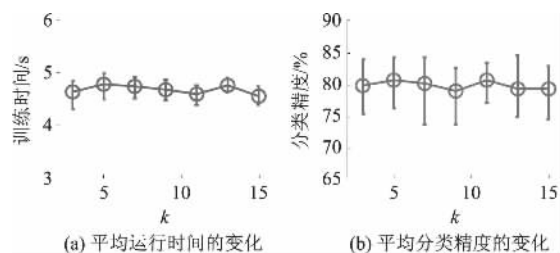
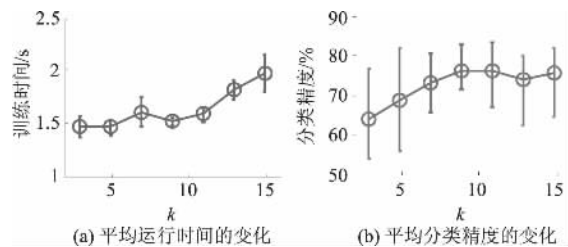
图5 不同  $k$  值下的实验结果( $r = 25$ )Fig.5 The test results with different  $k$  ( $r = 25$ )图6 不同  $k$  值下的实验结果( $r = 90$ )Fig.6 The test results with different  $k$  ( $r = 90$ )

图 5、图 6 的结果表明:  $r$  取 25 时, 平均运行时间和分类精度随  $k$  的变化仅发生较小波动, 即  $k$  对结果无较大影响;  $r$  取 90 时, 平均运行时间和分类精度随  $k$  的变化均呈上升趋势, 即此时  $k$  对结果产生了一定的影响. 这是因为,  $r$  取 25 时样本筛除结果相对安全, 较多支持向量被保留, 而近邻回选得到的多数结果相互重合, 造成不同  $k$  值下更新后的备选支持向量集相差不大, 故实验结果波动不大; 而  $r$  取 90 时由于筛除过程过于贪婪, 误删了一部分支持向量造成分类精度的下降, 而通过逐渐增大  $k$ , 可以扩充备选支持向量集恢复已被破坏的数据结构, 这一方面增加了分类的准确性, 但也因运算量的增加造成运行时间的上升. 故实际操作中应根据不同的  $r$  下的结果确定  $k$  的取值以改善算法性能, 即  $r$  取值合适时应尽量选取较小的  $k$  减少运算;  $r$  取值过大时应尽量选取较大的  $k$  以保证精度.

## 4 结论

笔者利用 Fisher 投影的全局性质与  $k$ -近邻法保留局部结构信息的作用, 提出了一种结合投影与近邻操作的支持向量快速筛选新方法, 通过在实际数据集上的应用得到如下结论:

(1) 笔者提出的 F-k\_SVM 可以快速准确筛选支持向量以提高运行速度, 并能获得更高的分类

精度和鲁棒性,有效解决了 F\_SVM 精度下降的问题,具有较好的推广性.

(2) 对不同数据集设置合适的筛除率  $r$  可同时保证较少的运行时间与较高的分类精度.

(3) 设定不同的筛除率时,应根据实际情况进行参数  $k$  的选择以获得较好的实验效果.

笔者提出的 F- $k$ \_SVM 基于线性层面解决大样本集问题,扩展到核空间可能会更好解决复杂非线性问题;另外,文中筛除率  $r$  是事先设定的,如何根据数据集的结构自适应地确定  $r$  也很有意义,故上述两点将成为笔者下阶段的主攻方向.

### 参考文献:

- [1] KEERTHI S S, SHEVADE S K, BHATTACHARYYA C, et al. A fast iterative nearest point algorithm for support vector machine classifier design [J]. IEEE transactions on neural networks, 2000, 11(1): 124 - 136.
- [2] 田新梅,吴秀清,刘莉. 大样本情况下的一种新的 SVM 迭代算法 [J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 205 - 207.
- [3] 浩庆波,牟少敏,尹传环,等. 一种基于聚类的快速局部支持向量机算法 [J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(1): 13 - 18.
- [4] 胡志军,王鸿斌,张惠斌. 基于距离排序的快速支持向量机分类算法 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(4): 85 - 87.
- [5] 孙发圣,肖怀铁. 基于 K 最近邻的支持向量机快速训练算法 [J]. 电光与控制, 2008, 15(6): 44 - 47.
- [6] 饶刚,刘琼荪. 基于 Fisher 鉴别分析的支持向量机训练样本缩减策略 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3): 156 - 157.
- [7] 顾亚祥,丁世飞. 支持向量机研究进展 [J]. 计算机科学, 2011, 38(2): 14 - 17.
- [8] NANDHINI K, SANTHI B. Retrospection of SVM classifier [J]. Journal of theoretical and applied information technology, 2012, 38(1): 83 - 88.
- [9] 张震,张英杰. 基于支持向量机与 Hamming 距离的虹膜识别方法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 25 - 29.
- [10] VAIDYA J, YU H, JIANG X. Privacy-preserving SVM classification [J]. Knowledge & information systems, 2008, 14(2): 161 - 178.
- [11] 张炎亮,刘阳,王金凤. 基于改进 SVM 的煤矿水灾害救援组织系统可靠性预测 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 115 - 119.
- [12] 陈立江,毛峡,ISHIZUKA M. 基于 Fisher 准则与 SVM 的分层语音情感识别 [J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25(4): 604 - 609.
- [13] 曹根,葛孝堃,杨丽琴. 基于 K-近邻法的局部加权朴素贝叶斯分类算法 [J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(9): 267 - 268.

## Fast Method to Filter Support Vectors Combined with Operation of Projection and Nearest Neighbors' Selection

LI Mengmeng, SHANG Zhigang, LI Zhihui

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** To reduce computational burden and improve operation efficiency of support vector machine (SVM) while ensuring classification accuracy, a fast method to filter support vectors combined with operation of projection and nearest neighbors' selection was proposed. Considering the global characteristics of Fisher projection, it could be viewed as the approximate normal directions of SVM optimal hyperplane and filtered out a large number of non-support-vectors in this direction. The samples near the classification obtained boundary were regarded as alternative support vectors set. Neighborhood operation was combined to solve the problem that some support vectors might be filtered out mistakenly regardless of the local structure information. A number of nearest neighbors of the alternative support vectors were selected backward from the samples space to update and expand the alternative support vectors set. The sets was treated as the SVM input. The experimental results on several UCI standard data sets showed that the fast method had good generalization performance and reduced the computational burden effectively under the premise of fully guaranteed classification accuracy.

**Key words:** SVM; support vector; fisher projection;  $k$ -nearest neighbor; rapid filter

## 不同类型供电区域间典型供电模式过渡方案研究

杨卓<sup>1</sup>, 王利利<sup>1</sup>, 杨博<sup>2</sup>, 关朝杰<sup>1</sup>, 程子霞<sup>3</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 三门峡电力设计有限责任公司 河南 三门峡 472000; 3. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 结合不同类型供电区域(A+、A、B、C、D、E)典型供电模式的组成特点, 根据供电区域未来的发展定位, 研究配电网供电模式的建设改造问题. 首先提出改进的“最小单位负荷年费用法”——规划年最小费用法, 制定不同类型供电区域间典型供电模式升级的过渡方案; 然后利用改进的计算方法对过渡方案进行经济性比较, 并综合分析各种方案; 最后计算得到最佳过渡路径.

**关键词:** 典型供电模式; 供电区域; 过渡路径; 经济性

**中图分类号:** TM 726 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.008

### 0 引言

配电网是电网的重要组成部分, 长期以来国内对配电网的研究和实践主要集中在接线模式方面. 文献[1-5]对几种常见的接线模式进行可靠性、供电能力的比较, 探讨配电网接线模式的安全性、可靠性、经济性等因素, 对不同接线模式进行评估. 这些研究为配电网的优化、经济运行及规划提供了有益的参考. 但接线模式仅体现了本级线路间的联络关系, 无法体现电网在不同区域和不同负荷密度<sup>[6-7]</sup>条件下配电网的供电结构. 目前, 随着负荷密度的增加及便于智能化管理的需要, 采用标准化的供电模式来构筑高水平的配电网<sup>[8-9]</sup>. 构建适合我国特点的标准化供电模式以指导配电网的规划和改造, 具有重要的现实意义.

目前已有大量研究供电模式的文章, 文献[10-11]用“最小单位负荷费用法”对各种供电模式进行经济性比较, 介绍中压配电网供电模式过渡的基本思路 and 原则. 文献[12]提出根据变电站的新增站点扩展不同网架结构的方法, 给出供电模式的扩展方式. 上述文献对供电模式的优劣性进行经济性比较, 也考虑供电模式的过渡问题, 但未对过渡问题深入分析和讨论.

笔者根据供电区域未来的发展定位, 考虑配电网向高可靠性和高设备利用率升级过渡的特

点, 研究供电模式最佳过渡方案. 以我国某地区配电网为例, 利用改进的“最小单位负荷年费用法”——规划年最小费用法进行过渡方案经济性比较, 综合分析各种方案, 从中选出最佳过渡路线. 以此指导配网规划, 减少电力建设投资浪费.

### 1 过渡方案研究

#### 1.1 供电模式电网结构发展方向

电网建设一般可分为初期、过渡期和完善期三个阶段, 不同阶段划分的主要依据是地区负荷密度、负荷增长速度、以及网架情况. 图1、2为110~35 kV、10 kV电网结构过渡示意图. 在电网建设的过程中, 可依据图1、图2在规划中设计好的电

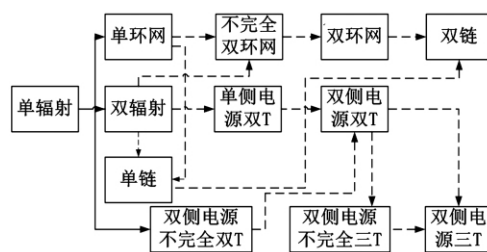


图1 110~35 kV 电网结构过渡

Fig. 1 110~35 kV power grid structure transition

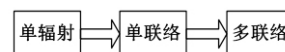


图2 10 kV 电网结构过渡

Fig. 2 10 kV power grid structure transition

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407163)

通信作者: 程子霞(1974—), 女, 河南焦作人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事高电压绝缘方面的研究和教学工作,  
E-mail: chzx@zzu.edu.cn.



网结构发展方向,研究供电模式过渡方案。

### 1.2 典型供电模式的过渡

随着供电区域内用户对供电可靠性要求的提高和负荷增长,当该供电区域内的供电模式不适应用户需求时,需要对供电模式进行升级改造,通过不断升级改造使其达到该地区的目标供电模式。

供电模式升级的方向是,较低级供电区域的配电网供电模式经过负荷的不断发展过渡到更高级的供电区域典型供电模式,如图3所示。

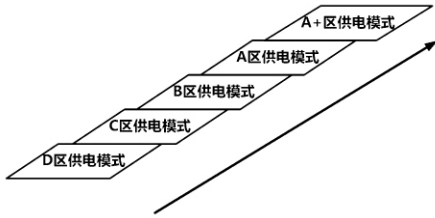


图3 供电模式低级向高级升级示意图

Fig.3 Power supply mode upgrade schematic

不同类型供电区域间供电模式的过渡有: 相邻级别的过渡、跨级别的过渡。在实际配电网建设时,考虑到变电站土建、线路走廊等一次性建成的条件限制,跨两级及以上级别的过渡方案理论上是不可能出现的。相邻级别的过渡只需各电压等级的网架结构符合过渡方向即可直接过渡,不存在需要比较过渡方案来寻找最佳过渡路径的问题,所以跨一个级别的最佳过渡方案研究最具有实际意义。

## 2 供电模式经济性分析

### 2.1 计算方法

供电方案经济性计算的基本方法是对供电模式的各种过渡方案利用“最小单位负荷年费用法”判定其经济性好坏<sup>[2-3]</sup>。

通过对某供电区域多种过渡方案的比较,研究其由现状模式发展到目标供电模式的最佳过渡方案。由于针对的是同一地区,所以比较时不需要考虑负荷密度的问题;且在配电网规划建设时,现状模式发展到目标供电模式是随着负荷需求的增长而过渡的,是一个过程。因此,提出采用改进的“最小单位负荷年费用法”——规划年最小费用法,对过渡方案进行经济性计算。此方法利用不同过渡方案都是针对同一供电区域发展的这一特点,避免了供电模式发展中负荷密度不断变化这一复杂问题的计算,使计算思路更清晰明确。

计算时首先需要对确定的供电区域计算出高

压变电站、高压线路和中压线路的投资费用,同时考虑线路损耗和变压器损耗等运行费用,然后按“现值转年值”法,转化为高压变电站年费用值、高压线路和中压线路年费用值,三者相加乘以规划年就可以得到配电网规划年的总费用值,如图4所示。

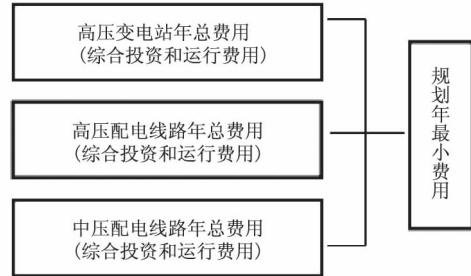


图4 供电方案经济性计算方法

Fig.4 Power supply mode economy method

### 2.2 计算公式

计算中引用的主要计算模型如下:

$$C = (SZU + LHZU + LZU) \cdot N. \quad (1)$$

式中:  $C$  为规划年最小年费用;  $N$  为规划年;  $SZU$  为高压变电站年总费用,且有

$$SZU = SZ \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} + SU; \quad (2)$$

$LHZU$  为高压线路年总费用,且有

$$LHZU = LHZ \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} + LHU; \quad (3)$$

$LZU$  为中压线路年总费用,且有

$$LZU = LZ \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} + LU. \quad (4)$$

式中:  $SZ$ 、 $LHZ$ 、 $LZ$  分别为高压变电站、高压线路、中压线路综合投资费用;  $SU$ 、 $LHU$ 、 $LU$  分别为高压变电站、高压线路、中压线路运行费用。

注意: 当各项费用值不是十分明确时,年运行费用可按综合投资的百分率进行计算:

$$SU = \beta \cdot SZ \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1}. \quad (5)$$

$$LHU = \beta \cdot LHZ \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1}. \quad (6)$$

$$LU = \beta \cdot LZ \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1}. \quad (7)$$

式中:  $\beta$  为年运行费用占综合投资的百分率, %。

## 3 案例分析

### 3.1 不同类型供电区域间的最佳过渡路径

本案例给出适合我国某地区发展的3种类型

供电区域的典型供电模式 B-3、A-3 和 A+ -4, 假设 B-3 是该地区的现状典型供电模式, A+ -4 是该地区的目标典型供电模式. 每种典型供电模式的基础数据在国网发展策划部编制的《配电网典型供电模式》报告中均可找到.

比较 3 种典型供电模式, 高压 110 kV 的网架都为单链结构, 符合 110 ~ 35 kV 电网结构过渡; 中压网架也同样符合网架过渡方向. 案例又为跨级过渡, 这种情况下的过渡可分为直接过渡和逐步过渡两种方案如表 1 所示.

表 1 过渡方案  
Tab. 1 Transition scheme

方案号	过渡路径	
1	直接过渡	B-3→A+ -4
2	逐步过渡	B-3→A-3→A+ -4

采用规划年最小费用法对过渡方案进行经济性计算时, 所需设备造价和技术参数, 以及计算公式中的基础数据, 如表 2 所示.

表 2 线路综合投资造价  
Tab. 2 Lines cost

线路	线型/mm <sup>2</sup>	综合投资/(万元·公里 <sup>-1</sup> )
110 kV	电缆 630 mm <sup>2</sup>	190
	LGJ-240	70
	YJV22-8.7/15 3* 400	105
10 kV	YJV22-8.7/15 3* 300	95
	JKLYJ-240	42

3.2 经济性比较结果与分析

通过比较供电模式的数据参数, 可知高压变电站和高压配电网设备参数都相同, 在过渡方案经济性计算时只需考虑中压配电网即可. 对于确定的供电区域, 利用规划年最小费用法计算线路单位长度综合投资费用. 计算每种供电模式中压配电网单位综合造价结果, 如表 3 所示.

考虑到不同供电设施的经济使用年限不同, 采用“等年值法”, 将费用现值折算为使用年限内的年费用.

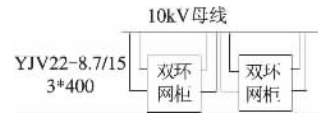

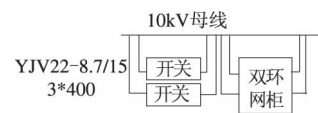
表 4 过渡方案经济性比较结果

Tab. 4 Transition economy comparison results

过渡方式		过渡单位综合投资/万元	现值折算综合单位造价/万元	单位年运行费用/万元	最小年费用/万元	到规划年最小费用/万元
直接过渡	B-3→A+ -4	840	85.898	8.590	94.488	3 779.520
间接过渡	B-3→A-3	630	64.449	6.445	70.894	$x$ 年
	A-3→A+ -4	210	21.483	2.148	23.631	$(N-x)$ 年

表 3 供电模式中压配电网单位综合造价

Tab. 3 Power supply mode of medium voltage distribution network unit costs

供电模式	中压配电网接线示意图	单位综合造价/(万元·km <sup>-1</sup> )
A+ -4		840
A-3		630
B-3		548

$$C_t = Z \cdot \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \quad (8)$$

式中:  $C_t$  为平均分布在  $n$  年内的年费用;  $Z$  为投资费用;  $n$  为设备的经济使用年限;  $r_0$  为折现率, 现阶段取 0.1;  $\beta$  取 10%.

查表可知电缆线路经济使用年限 40 a、架空线路 30 a, 由此计算各自的折算率  $\eta$ .

$$\eta = \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \quad (9)$$

当  $n = 40, \eta = 0.1023$ ;  $n = 30, \eta = 0.1061$ .

根据折算率, 利用现值折算公式即可计算现值折算综合单位造价, 如表 4 所示.

再采用规划年最小费用法计算各过渡方案的规划年最小费用. 假设规划年  $N = 40$  a,  $x$  表示 B-3 升级到 A-3 后运行  $x$  年后, 再升级到 A+ -4 运行  $N - x$  年, 该地区的负荷密度与升级后的典型供电模式相匹配. 按照 2.2 中的计算公式, 结果如图 5 所示.

由图 5 可知, B-3 升级到 A-3 后运行  $x$  年中的  $x$  取不同的值, 在规划年内所需的最小费用也不同. 只有当  $x = 0$  时, 这时方案 2 与方案 1 相同, 方案 2 所需的最小费用最大. 对于方案 2 来

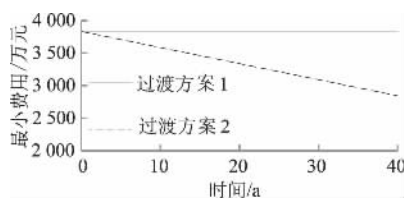


图5  $N=40$  a,  $x$  取不同值时两种方案的最小费用

Fig.5  $N=40$  a, minimum cost of different schemes according to  $x$

说,  $x$  必须大于 0, 且随着  $x$  的增大过渡方案 2 的费用不断减小. 据此可推测, 对于其他地区的典型供电模式过渡, 当需计算变压器和高压线路的费用时, 也遵循随着  $x$  的增大而所需最小费用不断减小的规律. 所以可以得出, 对于跨一个级别的过渡研究来说, 最佳的过渡路线是逐步过渡.

#### 4 结论

笔者研究的跨级过渡只针对跨一个级别的过渡方案. 通过案例分析可知, 最佳的过渡路线是逐步过渡; 规划年最小费用法避开了负荷密度不断变化这一复杂问题的计算, 使计算思路更清晰明确. 此研究不仅是指导我国配电网建设改造工程的重要依据, 还是减少电力建设投资造成巨大浪费的重要前提.

#### 参考文献:

- [1] 程一鸣, 赵志辉, 王天华. 城市 110kV 高压配电网接线方式研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 113-115.
- [2] 葛少云, 郭明星, 王成山, 等. 城市高压配电网接线

- 模式比较研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 33-37.
- [3] 潘锋, 周敏, 汪利华. 城市高、中压配电网接线模式的综合评价方法[J]. 华东电力, 2009, 37(1): 129-131.
- [4] 姚莉娜, 张军利, 刘华, 等. 城市中压配电网典型接线方式分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 26-29.
- [5] 王巍. 城市配电网接线模式的技术经济分析研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2008.
- [6] 蒋建东, 张豪杰, 王静. 基于 HHT 的电力负荷组合预测模型研究与应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 1-5.
- [7] 赵国生, 牛贞贞, 刘永光, 等. 基于自适应模糊 C 均值聚类算法的电力负荷特性分类[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 56-60.
- [8] KHATOR S K, LEUNG L C. Power distribution planning: A review of models and issues [J]. IEEE trans on power systems, 1997, 12(3): 1151-1159.
- [9] LIN W M, YANG C D, TSAY M T. Distribution system planning with evolutionary programming and a reliability cost model[J]. IEEE proceedings online, 2000(7): 336-341.
- [10] 傅颖. 基于接线模式的高中压配电网供电模式的研究[D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2009.
- [11] 熊振东, 程鹏. 中压配电网供电方案经济性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 150-155.
- [12] 林韩, 陈彬, 吴涵, 等. 面向远景目标网架的中压配电网供电模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 116-120.

### Research on Power Supply Scheme of the Typical Power Supply Mode in Different Types Power Supply Areas

YANG Zhuo<sup>1</sup>, WANG Lili<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>, GUAN Chaojie<sup>1</sup>, CHENG Zixia<sup>3</sup>

(1. Electric Power Economic Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. Sanmenxia Electric Power Design Co., Ltd., Sanmenxia 472000, China; 3 School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The construction and transformation of power supply modes were explored researched according to the composition of the typical power supply mode in different power supply areas(A + , A, B, C, D, E) as well as future development orientation. The “smallest unit of planning year” adapted from “smallest unit of load method”, was proposed at first, to make the transition program for the updating of typical power supply mode in different power supply area. Then transition schemes were economically compared and comprehensive analyzed using modified method of calculation. At last, the optimal transition path was selected to determine its development course of power supply mode by calculating.

**Key words:** the typical power supply mode; power supply area; the optimal transition path; economy

文章编号: 1671-6833(2017)03-0058-05

# 真空开关低分散性永磁操动机构控制系统设计

程 显<sup>1,2</sup>, 陈占清<sup>1</sup>, 何 周<sup>2</sup>, 袁端磊<sup>2</sup>, 钟建英<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000)

**摘 要:** 为抑制真空开关分闸、合闸操作引起的暂态影响, 分析了真空开关分闸、合闸时的受力情况及其操动精度的影响因素, 仿真计算了永磁机构的动态特性; 设计了一个自适应操动机构控制系统对真空开关操动机构的励磁电流、机构行程实时监测, 通过驱动 IGBT 有序控制操动机构电容放电, 有效修正其动作分散性; 增加系统电压、电流相位检测单元后可实现设定相位准确动作。测试结果证明, 控制系统可以明显降低真空开关操动机构的动作分散性, 且操动机构分闸、合闸动作分散性控制在  $\pm 500 \mu\text{s}$  以内。

**关键词:** 真空开关; 自适应控制; 永磁机构; 机构行程; 励磁电流; 动作分散性

**中图分类号:** TM501; TM561 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.033

## 0 引言

真空开关分闸、合闸瞬间系统电压和电流相位通常是随机的, 当其分合并联电容器组、电抗器、空载变压器以及空载线路时常会产生幅值、频率很高的涌流和过电压<sup>[1-2]</sup>。这些过电压波形给开关和其他一次设备的绝缘寿命带来不良影响, 也影响电能质量和系统可靠性<sup>[3-5]</sup>。若真空开关在有利的系统电压或电流相位动作, 则操作对系统及其他一次设备的影响将降到最低, 同时也可提高真空开关在复杂条件下开断短路电流的能力, 而能否在有利相位完成分闸、合闸动作, 主要由真空开关操动机构的动作分散性决定<sup>[6-9]</sup>。

低分散性断路器技术在国外已有三十多年的研究历史, 目前已大量应用于并联电容器组、空载变压器和电抗器等负荷的正常投切, 然而国内该技术的控制实现方案、控制策略等开展相关研究, 以期开发出可进行工程推广的实用技术产品<sup>[10-12]</sup>。

笔者在归纳影响真空开关分闸、合闸精度因素的基础上分析永磁机构的动态特性; 采用高速采样技术、PWM 驱动技术和自适应控制技术, 设

计一种可实现操动机构低分散性的永磁操动机构控制系统, 其可应用于 10 kV、35 kV 电压等级的真空开关。

## 1 操动机构选型与动态特性分析

在合适的系统电压或电流相位进行分闸、合闸操作可在一定程度上提高真空开关的动作成功率, 这对真空开关机械特性提出较高需求; 三相独立动作还对操动机构体积提出了小型化要求; 真空断口承受电压与真空间隙长度成正比, 若操动速度低, 真空间隙将发生重击穿, 这要求操动机构的动作速度较高; 同时考虑到便于控制方案实施, 还对其受外界因素影响的参量多少进行了限制。

综合各种因素, 最终选取单线圈永磁机构为操动机构。永磁机构通过励磁线圈驱动, 励磁线圈的电压、电流值仅需通过控制电解电容器容量、充电电压和精确放电调节。温度变化对操动机构性能影响、真空开关触头弹跳及触头的磨损老化也都是设计低分散性操动机构时需重点考虑的问题。设计中永磁机构与真空开关相连实现开断, 要求合闸速度为 0.7 m/s, 分闸速度为 1.7 m/s。

### 1.1 永磁机构动态特性数学模型

电容对永磁机构线圈放电励磁的过程是一动

收稿日期: 2016-06-22; 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407163; 51477024), 中国博士后科学基金资助项目(2014M552012; 2015T80778)

作者简介: 程显(1982—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事高压智能电器和高电压新技术研究, E-mail: chengxian@zzu.edu.cn.

态能量转换过程,该过程数学模型可构建如下:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \zeta \frac{F(t) - F_f(t)}{m}; \quad (1)$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = U_c(t) - Ri(t); \quad (2)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \zeta v(t); \quad (3)$$

$$\frac{dU_c(t)}{dt} = -\frac{i(t)}{C}; \quad (4)$$

$$\psi(t_0) = \psi(t_0), v(t_0) = 0, x(t_0) = 0, U_c(0) = U. \quad (5)$$

式中,  $v(t)$  为动铁芯运动速度;  $x(t)$  为动铁芯位移;  $F(t)$ 、 $F_f(t)$  为动铁芯所受电磁吸力和系统反力;  $m$  为归算到动铁芯的质量;  $\psi$  为线圈耦合磁链. 其中,  $\zeta = 0$  时为机构触动过程,  $\zeta = 1$  时为机构运动过程.

## 1.2 合闸过程动态特性

基于上述模型运用 matlab 及相关软件对永磁操动机构运动过程的受力、合闸速度、位移及电源电压、励磁电流进行仿真计算,如图 1 所示. 图 1(a) 为合闸受力曲线,其中真空泡反力包括分闸

簧、触头压力簧压力及断路器自闭力,电磁吸力大于真空泡反力时触头开始合闸动作. 随着合力的变化,动铁芯在合闸初期迅速加速,即将到达合闸位置时急剧减速,避免触头弹跳. 图 1(b) 为合闸速度和位移曲线,合闸速度约为 2 m/s,高于要求合闸速度 0.7 m/s(刚合点前 6 mm 内平均速度),提供了合闸调速区间. 由图 1(c) 中电容电压变化曲线可知,单次合闸操作电容电压下降约 30 V,能量消耗较小,可进行多次操作.

## 1.3 分闸过程动态特性

永磁机构分闸过程的动态特性如图 2 所示. 图 2(a) 的分闸受力曲线中,真空泡反力包括触头弹簧压力和自闭力. 由图 2(b) 可计算出分闸速度约为 2.6 m/s,大于要求分闸速度 1.7 m/s,有分闸调速空间. 单次分闸操作电容电压最大下降 25 V,电容剩余能量可完成下次合闸操作.

经以上仿真分析可知,永磁操动机构动态分闸过程中的机械特性、电气特性满足低分散性真空开关的实际设计要求.

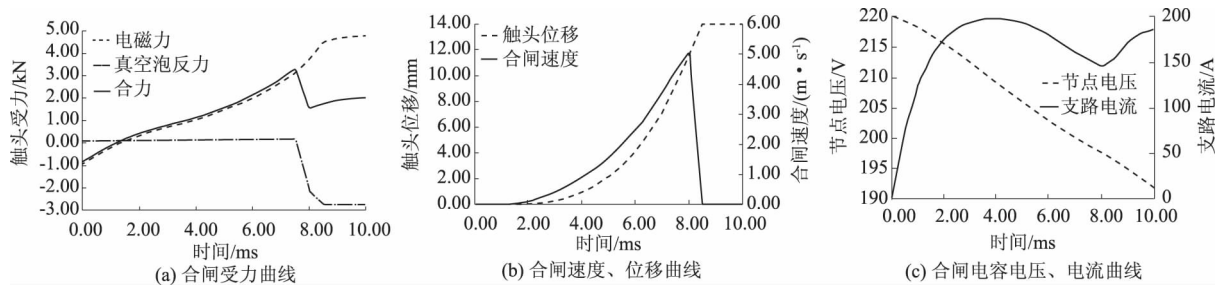


图 1 永磁机构合闸运动特性

Fig. 1 Motion characteristics of permanent magnetic actuator's closing

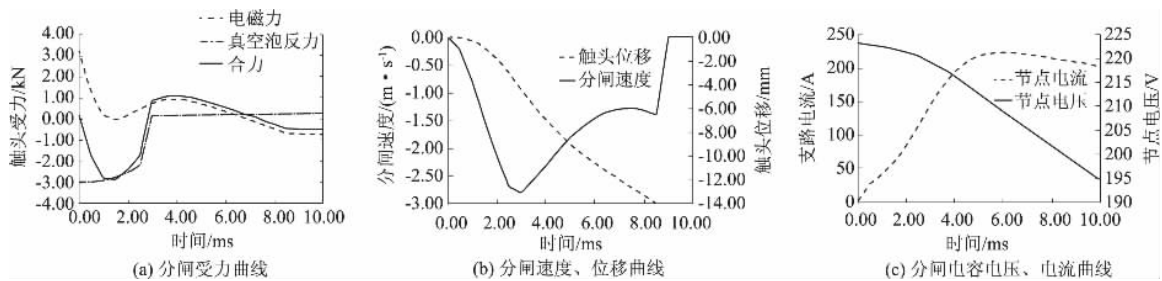


图 2 永磁机构分闸运动特性

Fig. 2 Motion characteristics of permanent magnetic actuator's opening

## 2 操动机构控制系统设计

### 2.1 控制系统整体方案

期望在理想相位进行准确操动,需要解决两个问题:一是系统的电压、电流波形相位的准确判断,这可以通过采样、滤波、信号调理电路和过零点检测算法并结合操动机构行程总时间实现;二

是确保操动机构动作的低分散性. 操动机构动作精度受环境温度、机构磨损程度、线圈阻值和机构偏心度等因素影响,这一过程计算繁琐且无法准确计算,但其造成的影响必然在机构行程和励磁电流参数上反映出来,因此系统设计中不直接考虑上述复杂的物理模型和补偿算法,而是通过大量实验得出多种复杂环境下操动机构行程的典型



理想曲线(包括励磁电流曲线和行程曲线),将实际操动过程中机构行程和励磁电流参数分别与内置控制系统的理想曲线实时比对,并通过计算及比例调用对励磁线圈电压、电流进行实时调节,精确控制机构行程,实现行程调节降低操动机构动作分散性的功能。通过高速采样技术、并行处理技术、高速计算技术和脉冲驱动技术可解决上述两点问题。依据以上控制原理分析,设计的真空开关操动机构控制系统的整体原理图如图3所示,其主要包括系统电压、电流波形的信号采集单元;进行低分散性控制的驱动与调速单元;对上述两部分信号并行采样和高速计算的数据处理单元。下面将对驱动与调速单元进行说明。

## 2.2 操动机构驱动与调速单元设计

操动机构驱动与调速单元主要由信号采集部分、逻辑控制部分、励磁电流驱动部分及操动电源部分构成。信号采集部分负责实时采集操动机构励磁电流和触头位置信息;逻辑控制部分基于

PWM技术建立闭环控制,通过对比操动机构实际状态量和操动机构理想位移曲线及理想励磁电流曲线,同步调整相应的控制信号;励磁电流驱动部分负责完成永磁机构的励磁电流控制,如图4所示。上述操动所需电源由电解电容提供。

接收到分、合闸操作指令时,主控芯片发出控制信号并通过光耦驱动芯片 HCPL-316J 对 4 个 IGBT 置相应逻辑电平控制 IGBT 的导通和关断,控制电容器对励磁线圈放电的时间、次序,实现准确控制励磁线圈电流大小补偿操动机构位移偏差,修正各种环境因素变化引起的操动机构动作时间分散问题,确保永磁机构基本按照理想行程曲线运动。IGBT Q1、Q4 导通, Q2、Q3 关断时,真空开关进行合闸操作;控制 Q2、Q3 导通, Q1、Q4 关断时,真空开关分闸。需要注意的是不能使同一桥臂中上下两个 IGBT 同时导通,以免造成电解电容短路。图5为 IGBT 模块控制电路图。

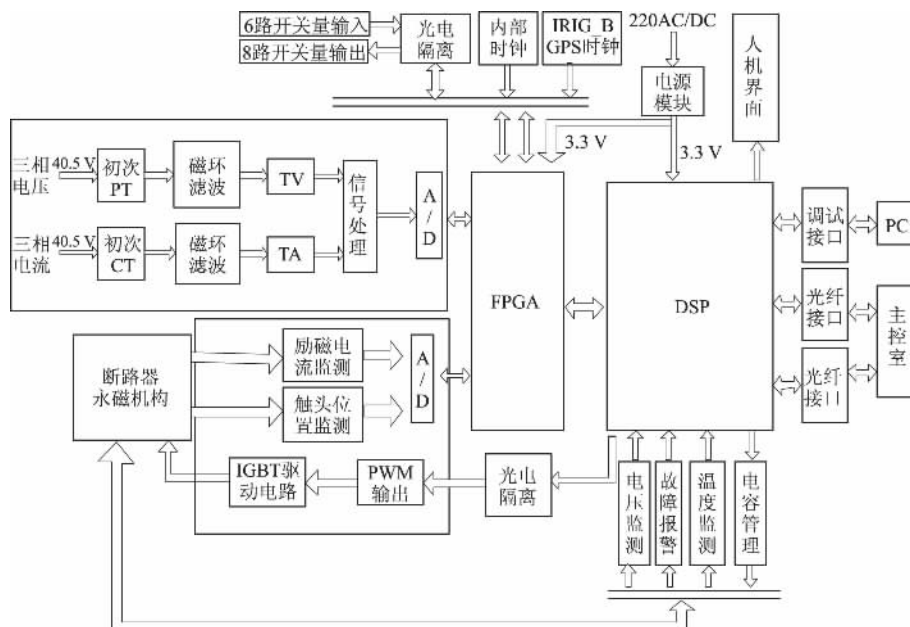


图3 操动机构控制系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of control system of actuator

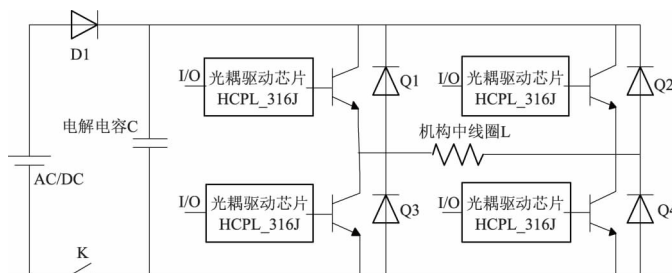


图4 IGBT驱动电路图

Fig.4 IGBT driving circuit diagram



压、电流相位检测单元后可实现选相控制。

(2) 测试试验证明, 储能电容范围 200 ~ 240 V 时操动机构合闸弹跳时间  $< 0.5$  ms; 操动机构闲置 168 h 时合闸时间标准差  $< 0.1$  ms; 温度在零下 10 ~ 55 °C 变化时开关动作受温度影响变化  $< 0.1$  ms。控制系统抗电磁干扰能力强, EMC 实验均符合 a 类标准; 分闸、合闸速度分别为  $(1.7 \pm 0.2)$  m/s、 $(0.7 \pm 0.2)$  m/s, 操动机构的分合闸精度在  $\pm 500$   $\mu$ s。

### 参考文献:

- [1] 陈明帆, 段雄英, 黄智慧, 等. 真空开关动作时间的自适应控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (35): 22 - 26.
- [2] DELFINO B, FOMARI F, GEMME C. Power quality improvement in transmission and distribution networks via synchronous switching [C]//Proceeding of the IEEE Power and Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Atlanta, GA: IEEE Press, 2001: 367 - 372.
- [3] 林莘, 曹辰, 李斌, 等. 永磁机构真空断路器的动态特性仿真及分闸弹跳分析 [J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1772 - 1777.
- [4] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 相控真空断路器的最佳燃弧区间研究 [J]. 高压电器, 2012, 48(8): 1 - 6.
- [5] 程显, 廖敏夫, 段雄英, 等. 双断口真空开关瞬态恢复电压分布特性的仿真与实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 171 - 178.
- [6] 朱晓东, 刘冲, 郭雅默. 基于烟花算法与差分算法的模糊分类系统设计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 47 - 51.
- [7] 吕锦柏, 王毅, 常广, 等. 优化的真空断路器合闸控制方法 [J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2836 - 2844.
- [8] 汤庚, 徐建源, 林莘, 等. 基于双信号检测及跟踪的真空断路器永磁机构控制方法研究 [J]. 高压电器, 2013, 49(12): 1 - 6.
- [9] 焦留成, 姚涛. 基于能量成型的永磁同步直线电机控制研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 1 - 5.
- [10] 苏宗海, 韩爱芝, 武建文, 等. 同步真空断路器投切电容器组装置的精度研究 [J]. 高压电器, 2014, 50(7): 31 - 37.
- [11] RIOUAL M, DIGARD H, MARTIN C, et al. Field application of a synchronous controller based on measurement of residual fluxes for the energization of a set-up transformer [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE Press, 2011: 1 - 8.
- [12] 赵艺杰, 负保记, 郑飞, 等. 基于最小二乘法的永磁断路器同步关合控制的研究 [J]. 高压电器, 2014, 50(6): 61 - 64.

## Design of the Low-dispersion Control System for the Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Switch

CHENG Xian<sup>1,2</sup>, CHEN Zhanqing<sup>1</sup>, HE Zhou<sup>2</sup>, YUAN Duanlei<sup>2</sup>, ZHONG Jianying<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Ping Gao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** To decrease the transient influence caused by the switching operation of vacuum switches, the resultant force on vacuum switch in the operating period and the influence factors on operating accuracy were analyzed in this paper. Dynamic characteristics of permanent magnetic actuator in the operating processes were calculated. A self-adaptive control system for actuator, which could real-time control the excitation current and travel agency of actuator, was designed. The control system could modify action dispersion of the actuator effectively by driving IGBT to control the discharging orders of capacitors. It could also realize accurate operating at setting voltage and current phases by adding phase detection unit. Test results of the control system showed that the control system could reduce the action dispersion of vacuum switch actuator significantly, and the action dispersion was controlled within  $\pm 500$   $\mu$ s.

**Key words:** vacuum switch; self-adaptive control; permanent magnetic actuator; mechanism travel; excitation current; action dispersion

# 一种基于聚类分析的自适应步态检测方法

姜 鸣<sup>1</sup>, 赵红宇<sup>2</sup>, 刘学良<sup>1</sup>

(1. 东莞理工学院 电子工程和智能化学院, 广东 东莞 523808; 2. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 提出一种基于K-中心点聚类算法的自适应步态检测方法, 检测不同步态参数及其耦合关系. 所提方法在现有检测方法的基础上增加了步态精细划分环节, 提高步态检测结果的正确性和有效性. 实验结果显示, 在较大步态参数空间内, 采用所提检测方法可将步数估计的精度从现有方法的 46.16% ~ 53.22% 提高到 76.13%.

**关键词:** 步态检测; 聚类分析; 步行周期划分; 自适应参数; 惯性测量

**中图分类号:** TP 29

**文献标志码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2017.03.005

## 0 引言

在医疗康复等领域中, 步长、步宽、步高、步频、步速、足偏角、趾屈角、背屈角, 以及各步态时相的时长、比例等均是重要的步态参数. 步态检测的基本功能是检测步态周期中的支撑相, 即脚底与地面接触的静止时间段. 支撑相检测是步态分析的基础和前提, 在支撑相内, 脚底对地面的绝对速度为零, 这一信息可以被零速修正(Zero Velocity Updates, 简称 ZUPT) 方法加以利用, 为步态分析提供更加精确的量化指标.

近年来, 随着 MEMS 传感器的体积不断减小、成本不断降低, 涌现出了许多基于 MEMS 惯性传感器的步态分析方法<sup>[1]</sup>. 现有的基于惯性技术的步态检测方法<sup>[2-5]</sup>, 没有充分合理地考虑测量值波动对步态检测的影响, 检测结果易受测量值波动和检测参数设置的影响, 不足以准确无误地检测出每个步态周期中的支撑相, 且检测参数手动修改、单独调节, 主观性较强, 灵活性较差. 在实际使用中, 往往会由于方法设计不合理或参数设置不合适, 造成支撑相的误检测, 引入不同程度的估计误差, 降低步态分析系统的精度.

笔者基于无线传感器网络平台<sup>[6]</sup>, 研究了将 MEMS 惯性传感器安装于脚部的步态检测技术. 安装于脚部的惯性传感器可以感知脚部与地面的

每次触碰和随后的支撑相, 其测得的加速度和角速度数据的周期特性与脚部运动完全同步. 为提高步态检测结果的正确性和有效性, 笔者提出了一种基于聚类分析的自适应步态检测方法, 在现有检测方法的基础上增加了步态精细划分环节, 能够提高步态检测结果对用户、环境、步速和步态变化的适应能力.

## 1 步态周期划分

步态周期划分方法如图 1 所示. 在图 1 中, 一个完整的单足步态周期被划分为支撑相和摆动相, 支撑相约占整个步态周期 60%<sup>[7]</sup>. 本文检测方法主要检测单腿支撑时间, 为利用支撑相内步速为零的信息, 认为支撑相占步态周期 30% 的时间<sup>[8]</sup>. 只要脚的任意部分尚未接触地面或者已经离开地面, 便认为当前时刻步态处于摆动相.

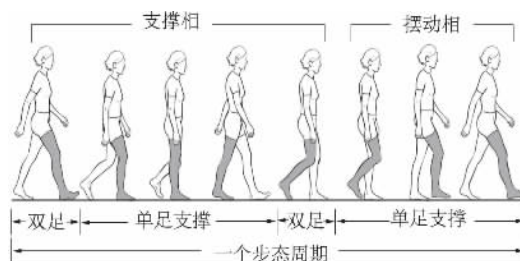


图 1 本文步态周期划分方式

Fig. 1 Common way of dividing a gait cycle

收稿日期: 2016-10-20; 修订日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407031); 广东省自然科学基金(2016A030313134); 广东省高等学校“创新强校工程”创新项目(2014KQNCX221); 东莞市社会科学基金项目(2013108101007)

作者简介: 姜鸣(1982—), 男, 辽宁沈阳人, 东莞理工学院讲师, 博士, 主要从事模式识别和智能系统研究. E-mail: jiangm@dgut.edu.cn.

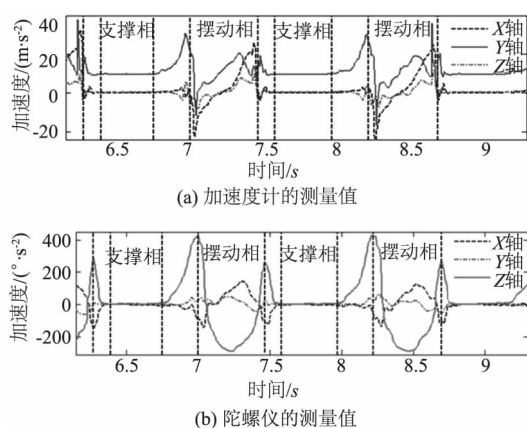


图2 惯性数据及相应的步态事件和步态时相

Fig. 2 Inertial measurements with corresponding gait events and gait phases

理论上支撑相内角速度和线速度均为零,但实际上由于传感器的测量误差,使得实际测量值在各期望值附近波动,如图2所示.惯性传感器测得的加速度和角速度数据表现出与脚部运动同步的周期特性,每个人都有自己独特的步态特征<sup>[5,9]</sup>,如图2中所示步频约100步/min,支撑相时长约0.37s,占整个步态周期的比例约31%.

## 2 基于惯性技术的步态检测

### 2.1 检测统计量计算

现有的基于惯性技术的步态检测方法主要利用惯性传感器的测量值检测步态周期中的支撑相.支撑相检测可以视为一个模式识别的过程,待识别的模式满足如下两个条件:

(1) 加速度条件:  $\| \mathbf{a}_k^b \| = g$ ;

(2) 角速度条件:  $\| \boldsymbol{\omega}_k^b \| = 0$ ,

式中, $b$ 表示载体坐标系; $k$ 表示采样时间; $\mathbf{a}^b$ 表示加速度计的测量值; $\boldsymbol{\omega}^b$ 表示陀螺仪的测量值; $g$ 表示重力加速度大小; $\| \cdot \|$ 表示向量的二范数.

根据步态事件的检测原理,可以将步态检测方法划分为三类:峰值检测<sup>[10]</sup>、过零检测<sup>[11]</sup>和平区检测<sup>[7]</sup>.采用平区检测方法来进行步态检测.根据数据来源不同,同时考虑到环境的复杂性和步态的多样性,笔者采用基于加速度和角速度数据的步态检测方法.令向量 $\mathbf{z}_k$ 表示惯性传感器的测量值,如公式(1)所示:

$$\mathbf{z}_k = [(\mathbf{a}_k^b)^T (\boldsymbol{\omega}_k^b)^T]^T, \quad (1)$$

式中, $(\cdot)^T$ 和 $[\cdot]^T$ 表示向量的转置.令 $S_k$ 表示 $k$ 时刻用于进行步态检测的统计量,由公式(2)计算获得

$$S_k = S(\{z_i\}_{i=k-w}^{k+w-1} = k) =$$

$$\frac{1}{W} \sum_{i=k}^{k+w-1} \left( \frac{1}{\|\sigma_f^b\|^2} \left\| \mathbf{a}_i^b - g \frac{\bar{\mathbf{a}}_k^b}{\|\bar{\mathbf{a}}_k^b\|} \right\|^2 + \frac{1}{\|\sigma_\omega^b\|^2} \|\boldsymbol{\omega}_i^b\|^2 \right), \quad (2)$$

式中: $W$ 为数据窗口大小; $\sigma_\omega^b$ 为陀螺仪的测量噪声; $\sigma_f^b$ 为加速度计的测量噪声; $\bar{\mathbf{a}}_k^b$ 为窗口内加速度的均值.本文检测统计量由加速度的等效移动方差值和角速度的移动均方值组成,二者通过加权求和的方式进行数据融合,权重大小由测量噪声 $\sigma_f^b$ 和 $\sigma_\omega^b$ 进行调节.

### 2.2 测量值波动分析

现有步态检测方法通常只采用一个检测阈值 $T_b$ ,检测过程为标准两步法<sup>[2-3]</sup>.该方法由于没有考虑测量值波动对检测结果的影响,容易造成支撑相的误检测.以一次直线行走实验为例,采用单一检测阈值进行步态检测,检测结果如图3所示.

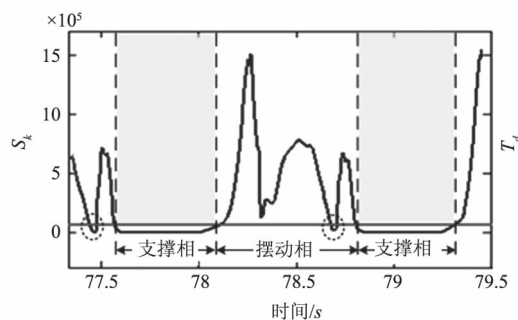


图3 支撑相的误检测

Fig. 3 False detection of the stance phases

由于测量值局部下行波动而诱发的伪支撑相往往持续时间较短,现有研究通常在单一检测阈值的基础上增加了一个预设时间阈值 $T_l$ ,对单一检测阈值的检测结果进行验证<sup>[4-5]</sup>,所有持续时间小于 $T_l$ 的支撑相均视为伪支撑相.但是该方法容易将所有的短支撑相删除,使得检测结果易受测量值波动和检测参数选取的影响,造成检测结果的不准确.

## 3 基于聚类分析的步态检测

### 3.1 自适应检测过程

步态检测有3个检测参数需要调节:窗口大小 $W$ 、检测阈值 $T_d$ 、时间阈值 $T_l$ .现有步态检测方法中,阈值参数均需要手动调节,容易造成检测误差.笔者提出了一种基于聚类分析的自适应步态检测方法,能够对测量值波动和对检测参数的变化适应性调整.本文检测方法分为粗略划分阶段和精细划分阶段,选用对孤立点不敏感的 $K$ -中心点聚类算法区分步态分割结果的真伪,本文方法的结构如图4所示.



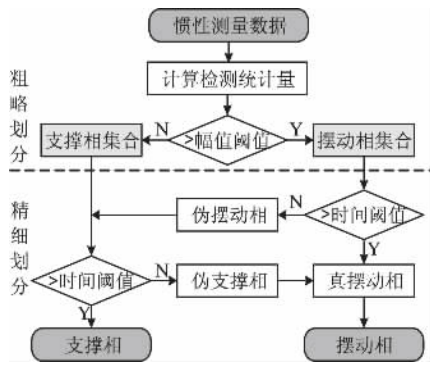


图4 自适应步态检测方法的流程图

Fig.4 Block diagram of the adaptive gait detection method

笔者方法在粗略划分的基础上增加了精细划分的过程,在对支撑相进行划分之前增加了对摆动相精细划分的环节.在精细划分阶段,通过采用K-中心点聚类,将粗略划分结果自动划分为真伪两类,自动获取阈值参数.

### 3.2 自适应参数选取

以直线行走实验为例,支撑相精细划分结果如图5所示.图5中给出了真支撑相的最小时长和伪支撑相的最大时长,时间阈值  $T_l$  可以设置为这两个极值之间的值.

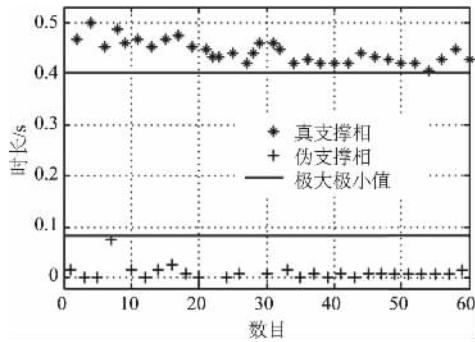


图5 支撑相的精细划分

Fig.5 Classification of the raw stance phases

基于聚类算法的支撑相划分方法是局部搜索算法,所产生的修正阈值是局部动态阈值  $T_l$ ,对步态变化有很强的鲁棒性.聚类算法可在没有任何先验知识下通过数据自身特点,自动地将数据划分到不同的类别中,因此检测方法具有较高鲁棒性.

## 4 实验过程和实验结果

### 4.1 实验数据采集

笔者使用惯性测量单元采集步行时的惯性信号,CPU时钟频率为1 MHz,使用无线射频芯片CC2420将采集到的数据通过2.4 GHz无线信道

传回PC端.惯性测量单元包括3轴加速度计(LIS344ALH)和3个单轴陀螺仪(LY530AL).实验采集6名志愿者(3男3女)的步态数据.图6所示为某志愿者正常行走时的X轴加速度、Y轴加速度,以及Z轴角速度的信号曲线.

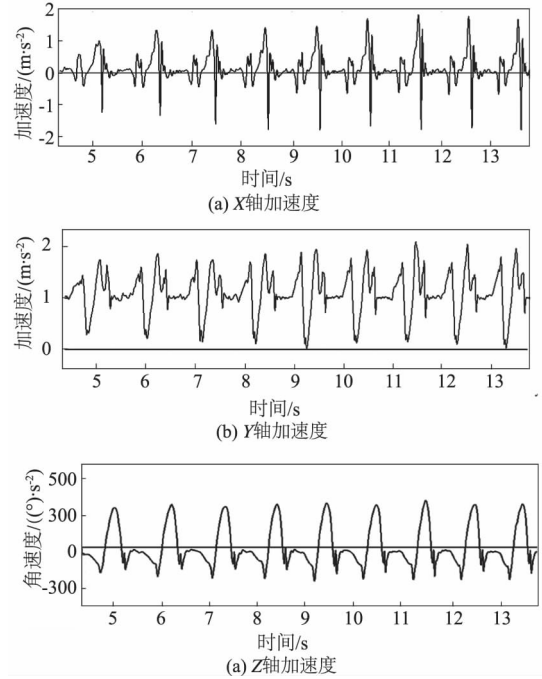


图6 某志愿者的步态信号

Fig.6 Gait signal from a volunteer

### 4.2 实验数据分析

以一次75步的水平行走实验为例对本文提及的3种步态检测方法进行了对比,  $N_a$  和  $N_d$  分别为实际行走步数和检测到的行走步数,实验结果如图7、图8和图9所示.

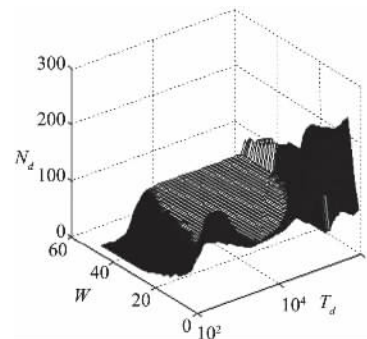


图7 单一检测阈值法的步数估计

Fig.7 Stride estimates of single detection threshold method

由图7可见,当采用单一检测阈值  $T_d$  时,步态时相的误检测较严重,导致检测到的行走步数多于实际行走步数,即  $N_d > N_a$ . 由图8可见,当增加固定时间阈值  $T_l$  时,  $T_l$  的取值不同,所获得的

检测结果也会不同. 本实验中选取了 3 个依次递增的  $T_l$ , 由图 7 可见, 较小的  $T_l$  不能删除一些时间较长的伪支撑相, 而较大的  $T_l$  又删除了很多短

支撑相. 因此, 该方法不能根据  $W$  和  $T_d$  的取值变化自适应地调节  $T_l$ , 无法正确地消除所有的伪支撑相.

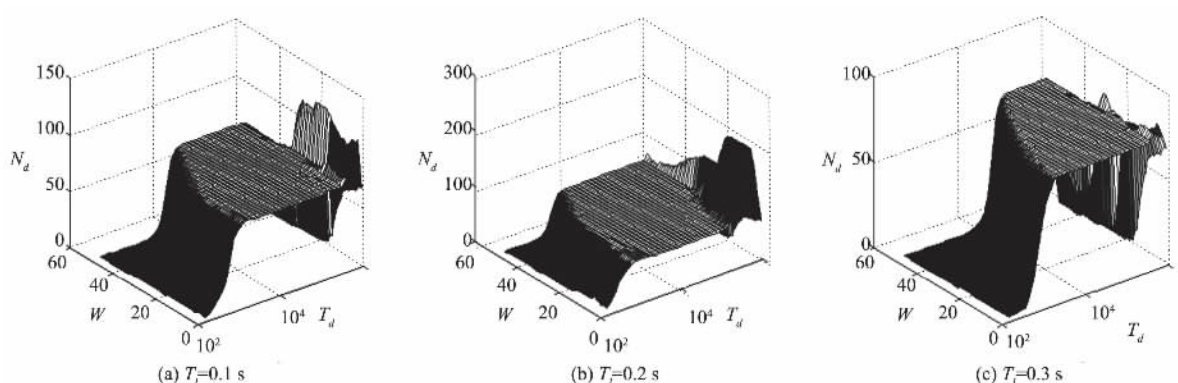


图 8 固定时间阈值法的步数估计

Fig. 8 Stride estimates of the fixed time threshold method

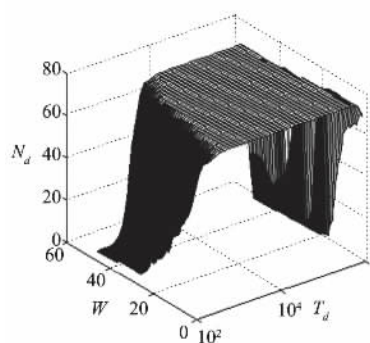


图 9 本文所提自适应检测方法的步数估计

Fig. 9 Stride estimates of the adaptive detection method

由图 9 可见, 由于提供了一个自适应的时间阈值  $T_l$ , 本文方法可以根据参数空间内每一对  $W$  和  $T_d$  的取值, 自适应地调节参数  $T_l$ .

笔者在一个较大检测参数空间内从步数估计的角度对实验结果进行了统计, 如表 1 所示. 评价指标为使得  $N_d = N_a$  的参数组合占有所有参数组合的百分比, 称为步数估计的精确度.

表 1 参数空间内步数估计的精确度

Tab. 1 Gait detection accuracy over large parameter space

实验者	步数估计精确度 /%		
	单一检测阈值法 <sup>[2-3]</sup>	固定时间阈值法 <sup>[4-5]</sup>	本文方法
#1	47.64	47.29	77.54
#2	15.62	33.82	60.45
#3	27.40	30.97	54.62
#4	31.76	42.40	69.35
#5	40.76	49.07	80.97
#6	46.16	53.22	76.13

需要注意的是, 如果参数空间选取不同, 上表

中的数值会相应变化, 但依然可表明本文步态检测方法的总体性能最优, 能够在更大的参数空间内估计出较准确的步态参数. 以上实验结果和相关讨论表明, 本文的自适应步态检测方法在存在测量值波动的情况下, 估计结果优于现有的采用单一检测阈值法和增加固定时间阈值的步态检测方法. 该方法参数选择简单、方便、灵活且鲁棒性强, 提高了现有步态检测方法的精度性、可靠性和鲁棒性.

## 5 结论

提出了一种基于聚类分析的自适应步态检测方法, 其检测结果对测量值的波动和检测参数的选取有很强的鲁棒性, 从而扩大了系统可行的参数空间, 提高了步态检测的精确性和可靠性. 本文所提的自适应步态检测方法在康复医学、身份识别、跌倒检测、虚拟现实、行人导航以及双足机器人姿态控制等领域有着广泛的应用前景, 具有很强的工程应用价值.

## 参考文献:

- [1] HENCHOZ Y, SOLDINI N, PEYROT N, et al. Energetics and mechanics of walking in patients with chronic low back pain and healthy matched controls [J]. European journal of applied physiology, 2015, 115 (11): 2433–2443.
- [2] FISCHER C, SUKUMAR P T, HAZAS M. Tutorial: Implementing a pedestrian tracker using inertial sensors [J]. IEEE pervasive computing, 2013, 12(2): 17–27.
- [3] MENG X L, ZHANG Z Q, WU J K, et al. Self-con-

- tained pedestrian tracking during normal walking using an inertial/magnetic sensor module [J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2014, 63 ( 3 ) : 892 – 899.
- [4] YUN X P, CALUSDIAN J, BACHMANN E R, et al. Estimation of human foot motion during normal walking using inertial and magnetic sensor measurements [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2012, 61( 7 ) : 2059 – 2072.
- [5] GODHA S, LACHAPELLE G. Foot mounted inertial system for pedestrian navigation [J]. Measurement science & technology, 2008, 19( 7 ) : 1 – 9.
- [6] 冯冬青, 邢凯丽. 基于能量平衡的无线传感器网络分布式成簇机制 [J]. 郑州大学学报 ( 工学版 ), 2015, 36( 3 ) : 6 – 10.
- [7] BEBOK Özkan, SUSTER M A, RAJGOPAL S, et al. Personal navigation via high-resolution gait-corrected inertial measurement units [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2010, 59 ( 11 ) : 3018–3027.
- [8] WANG J S, LIN C W, YANG Y, et al. Walking pattern classification and walking distance estimation algorithms using gait phase information [J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2012, 59 ( 10 ) : 2884 – 2892.
- [9] FOXLIN E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors [J]. IEEE computer graphics and applications, 2005, 25( 6 ) : 38 – 46.
- [10] PRATAMA A R, HIDAYAT R. Smartphone-based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system [C] // Proceedings of the International Conference on System Engineering and Technology. Bandung, Indonesia: IEEE Press, 2012: 1 – 6.
- [11] YUN X P, BACHMANN E R, MOORE H, et al. Self-contained position tracking of human movement using small inertial/magnetic sensor modules [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy: IEEE Press, 2007: 2526 – 2533.

## An Adaptive Gait Detection Method Based on Clustering Analysis

JIANG Ming<sup>1</sup>, ZHAO Hongyu<sup>2</sup>, Liu Xueliang<sup>1</sup>

( 1. School of Electronical Engineering & Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;

2. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Gait analysis was one of the most focusd research fields in recent several years, and the gait parameters attracted increasing interest in clinical medicine, pedestrian navigation and so on. However, the existing gait detection methods had some shortcomings that prevented their successful use to many practical applications, the detection results of which were very sensitive to measurement fluctuations and detection parameters, and thereby characterized by poor robustness. In this paper, the mutual coupling relationship between different parameters was tested, and an adaptive gait detection method based on clustering analysis was proposed, so as to automatically yield the time heuristic threshold. The experimental results demonstrated the correctness and effectiveness of the method, and the gait detection accuracy over a large parameter space could be improved from 46.16% and 53.22% respectively to 76.13%.

**Key words:** gait detection; clustering analysis; gait phase division; adaptive parameters; inertial measurement

# 钻井力矩电机新型无位置传感器控制方法

白国长, 张宇昕

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对目前无位置传感器控制方法受限于电机在零速和低速时反电动势不存在、非常微弱、或是实施困难等特点, 基于传统磁链函数法基本原理, 屏蔽计算误差和噪声的函数项, 得出了简化的磁链函数法。通过软件建模仿真, 并搭建基于 TMS320F28335 控制芯片的硬件实验平台进行实验验证。结果表明, 简化的磁链函数法相比传统磁链函数法只使用电机运行时导通相线电压计算换相时刻, 减少了计算量、降低了对参数的依赖性, 钻井力矩电机在低转速 (60 r/min) 下使用简化的磁链函数法可准确计算换相时刻, 实现电机平稳运行。

**关键词:** 无位置传感器; 转速无关; 钻井力矩电机; 低转速; 磁链函数

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.010

## 0 引言

当前安装转子位置传感器的钻井力矩电机 (后称钻井电机) 使得电机的体积和成本增加, 可靠性降低, 无法在恶劣的井下环境工作, 采用无位置传感器控制方法 (后称无位置控制法) 是钻井电机的发展方向。无位置控制法发展至今, 反电动势法是目前运用最多, 技术最成熟的一种方法, 国内外专家学者对其研究较多<sup>[1-2]</sup>, 但由于滤波电路的引入导致高速时相应滞后, 实时补偿难以实现等问题。文献 [3] 通过分析电子导通相微分方程, 提出一种与转速无关的磁链函数法, 该方法应用于电机低速阶段, 但是计算量大, 依赖性高。文献 [4] 将滑动滤波器应用在传统磁链函数法上, 拓宽了低速检测范围, 降低了测量噪声, 但是仍需获取电压电流等物理量。

笔者针对传统磁链函数法对电机固有参数依赖性高、计算量大的问题, 对其进行简化。简化的磁链函数法只使用电机运行时的线电压获取换相点, 降低了传统磁链函数对于电机固有参数的依赖性及计算量, 无需附加硬件电路。最后通过仿真及实验验证了电机在低转速下使用简化磁链函数法的有效性。

## 1 磁链函数法基本原理

### 1.1 系统数学模型

首先建立 PMBLDCM 数学模型及基本假设: 电机定子绕组连接方式为星形连接; 电机定子三相完全对称, 各相绕组  $R$ 、 $L$  参数完全相同; 忽略定子绕组电枢反应的影响; 电机气隙磁导均匀, 磁钢性能一致, 忽略磁路饱和, 涡流损耗、铁耗、漏感及电流饱和效应。得到电机数学模型如下<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $V_x$  为三相绕组电压, V;  $i_x$  为三相绕组电流, A;  $R$  为每相绕组相电阻,  $\Omega$ ;  $e_x$  为三相绕组反电动势, V,  $x = a, b, c$ ;  $L$  为简化后电机相电感, 其中  $L = L_s - L_m$ ;  $L_s$  和  $L_m$  为每相绕组的自感与互感, H。式 (1) 对应的等效电路如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

### 1.2 磁链函数法推导

电机在运行时的导通相都可以由一阶微分方程 (2) 来描述:

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金联合资助项目 (U13040120)

作者简介: 白国长 (1968—), 男, 河南襄城人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机电一体化、变频调速及控制、液压伺服系统控制的研究, E-mail: bai\_guochang@126.com.

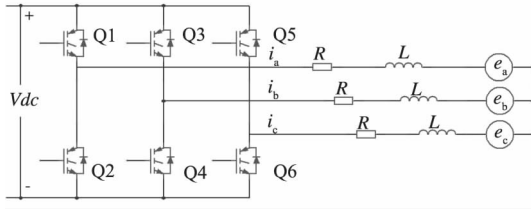


图1 永磁无刷直流电机等效电路

Fig.1 PMBLDCM equivalent circuit

$$V_x = Ri_x + \sum_{k=1}^n \frac{d\psi_{kx}(\theta, i_x)}{dt} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为电机转子位置;  $\psi_{kx}(\theta, i_x)$  为电机三相各导通相磁链函数, 其中包含了自感磁链和互感磁链, 根据假设, 则能得到 a 相磁链表达式:

$$\psi_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + \lambda_{ar}(\theta) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得

$$\begin{aligned} V_a &= Ri_a + \frac{d}{dt}(L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c) + \frac{d\lambda_{ar}(\theta)}{dt} = \\ &= Ri_a + \frac{d}{dt}(L_s i_a + L_m i_b + L_m i_c) + \frac{d\lambda_{ar}(\theta)}{dt} = \\ &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{d\lambda_{ar}(\theta)}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)即为 a 相相电压表达式. 式中等号右边第三项为反电动势函数微分项, 该函数值与转子位置相关. 其中  $\lambda_{ar}(\theta) = k_e f_{ar}(\theta)$ ,  $k_e$  为反电动势系数,  $f_{ar}(\theta)$  为反映转子位置的磁链形式函数<sup>[7]</sup>, 从而式(4)最终可化为

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + k_e \omega \frac{d(f_{ar}(\theta))}{dt} \quad (5)$$

式中:  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  代表转速. 由于现在电机制造厂商很少提供中线, 为便于计算, 需要获取线电压. 通过类比式(5), 将相电压表达式相减可得 a、b 相间线电压方程式:

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + k_e \omega \frac{d(f_{abr}(\theta))}{dt} \quad (6)$$

再将磁链形式函数微分项提取出来, 移项后可得

$$\frac{d(f_{abr}(\theta))}{dt} = \frac{V_{ab} - R(i_a - i_b) - L \frac{d(i_a - i_b)}{dt}}{k_e \omega} \quad (7)$$

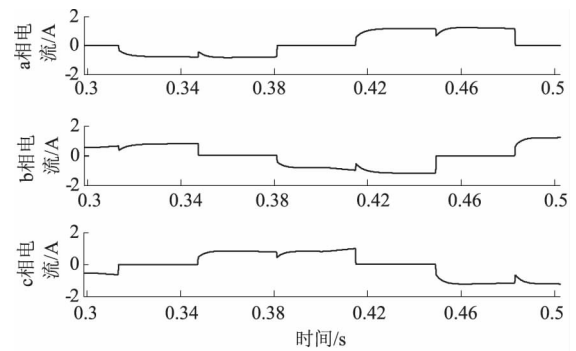
此时将相邻磁链形式函数微分项相除消去转速得

$$\begin{aligned} \frac{d(f_{abr}(\theta))}{dt} &= \frac{\left[ (V_a - V_b) - R(i_a - i_b) - L \left( \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \right]}{\left[ (V_c - V_a) - R(i_c - i_a) - L \left( \frac{di_c}{dt} - \frac{di_a}{dt} \right) \right]} \cdot \\ &\quad \frac{d(f_{car}(\theta))}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

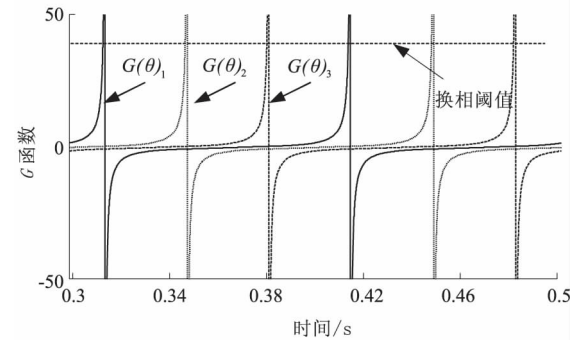
$$\text{令 } \frac{d(f_{abr}(\theta))}{dt} / \frac{d(f_{car}(\theta))}{dt} = G_{ab/ca}(\theta) = G(\theta)_1 \quad (9)$$

于是就得到了一个与转速无关的函数, 称为  $G$  函数<sup>[7]</sup>. 通过类似的方法可以得到另外两个  $G$  函数:  $G_{ca/bc}(\theta) = G(\theta)_2$  和  $G_{bc/ab}(\theta) = G(\theta)_3$ .

图2表达了  $G$  函数的工作过程, 假设现在电机运行到 0.3 s, 当前导通的开关管为 Q3 和 Q6 (后称 b + c -), 电机即将换相, 换相时使用  $G(\theta)_1$ , 换相后导通相变为 b + a -, 随后在 0.34 s 过后再次换相, 换相时使用  $G(\theta)_2$ , 换相后导通相变为 c + a -. 之后在 0.38 s 附近进行换相, 换相时使用  $G(\theta)_3$ , 换相后导通相变为 c + b -. 随着转子不断转动  $G$  函数也在不断被顺次重复使用, 从而可以得出在电机 b、c 相导通时使用  $G(\theta)_1$ ; a、b 相导通时使用  $G(\theta)_2$ ; a、c 相导通时使用  $G(\theta)_3$ . 同时通过观察得出电机换相时刻发生在  $G$  函数波形从无穷大处瞬变至无穷小处, 即函数与  $x$  轴的下降过零交点. 其他两个  $G$  函数波形和  $G(\theta)_1$  的波形一样, 只是在相位上相差了  $60^\circ$  电角度. 所以, 在电机运行时, 只要依次地使用 3 个  $G$  函数, 在  $G$  函数从无穷大处瞬变至无穷小处或到达设定的换相阈值时触发对应的换相信号便可以完成电机的持续换相.



(a) 电机三相电流

(b)  $G$  函数波形图2 三相电流波形与  $G$  函数波形Fig.2 3-phase current and  $G$  function waveform

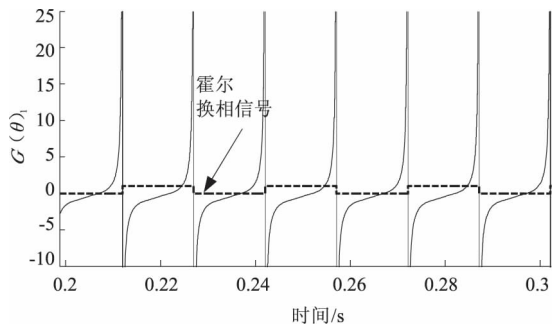


### 1.3 简化的磁链函数法

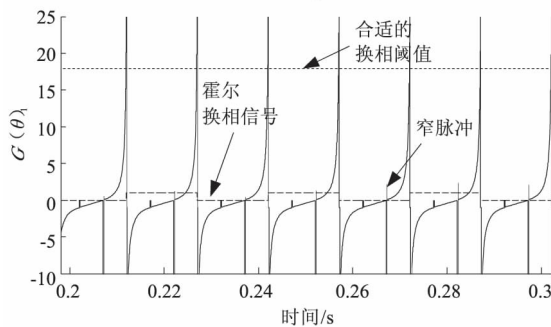
从式(8)可知,计算  $G$  函数需要获取电机线电压、线电流及固有参数  $R/L$ ,但是钻井电机工作环境恶劣多变,电机固有参数  $R/L$  随时都在变,并且对于电感电流的测量误差和计算累积误差使得  $G$  函数的可靠性降低,且计算量大.为降低  $G$  函数对电机固有参数的依赖性,减少计算量,对其进行简化.通过分析图2和式(8)可知, $G$  函数的关键在于准确计算出电机运行时的换相时刻(换相点),同时式(8)中线电压项在电机工作时变化最小,现将式(8)中电阻和电感项消去,只留下线电压项计算,得到简化的  $G$  函数:

$$\frac{d(f_{abr}(\theta))}{dt} = \frac{V_{ab}}{V_{ca}} = G(\theta)_1. \quad (9)$$

简化的  $G$  函数换相策略,换相时刻与使用均与传统  $G$  函数一致.相比传统  $G$  函数,简化的  $G$  函数在整体波形上略有变化,不过变化不大,不影响钻井电机的运行.从图3可知,简化的  $G$  函数与传统  $G$  函数同样能准确计算出电机换相时刻,不同的是在计算简化的  $G$  函数时由于电机非导通相二极管续流导致  $G$  函数出现了窄脉冲.当窄脉冲数值过大并且换相阈值选取不当时,电机将会触发误换相信号,严重时会导致电机无法运行.表1为简化的  $G$  函数电机换相表及对应导通相.



(a) 传统  $G(\theta)_1$  函数波形



(b) 简化的  $G(\theta)_1$  函数波形

图3 传统  $G$  函数与简化的  $G$  函数波形对比

Fig.3 Comparison between traditional  $G$  function and simplified  $G$  function

表1 不同状态下简化的  $G$  函数

Tab.1 Simplified  $G$  function in different status

简化的 $G$ 函数	导通相
$G(\theta)_1 = \frac{V_{ab}}{V_{ca}}$	b相、c相
$G(\theta)_2 = \frac{V_{ca}}{V_{bc}}$	a相、b相
$G(\theta)_3 = \frac{V_{bc}}{V_{ab}}$	c相、a相

### 1.4 电机起动方法选择

简化的  $G$  函数法在实际运用中存在随机噪声,需要无位置起动.预定位起动法<sup>[8]</sup>、升频升压等起动法<sup>[9]</sup>都无法很好地工作于带负载起动的情况.基于本电机所受负载情况复杂,使用转子脉冲注入检测法进行起动<sup>[10]</sup>(脉冲注入法).该方法基于定子铁芯电感饱和性质,通过在很短的时间内向不同绕组注入电压(母线电压),即短时间导通电机相应相.由于永磁体转子对定子铁芯有增去磁作用,定子绕组电流在电压注入期间的变化率及峰值不同,通过获取注入电压相的电流,再对比不同相电流的大小即可确定转子的位置,之后再根据所确定的转子位置对应导通下一相进行加速.随着不断重复“检测位置-导通相应相-检测位置”的过程,电机转速将逐渐提升.

## 2 钻井电机仿真分析

基于 Matlab/simulink 搭建电机控制系统仿真模型,仿真整体模型如图6所示.仿真时长为1s,阻尼系数为  $0.68 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ,极对数为5,相电阻为  $2.85 \Omega$ ,仿真给定转速为  $60 \text{ r/min}$ ,simulink 中电机类型设为无刷直流电机.

图4为电机在  $60 \text{ r/min}$  下空载线电压、相电流波形.图中相电流波形近似方波,由于转矩脉动及齿槽效应的存在,导致波峰平顶处出现下凹.受

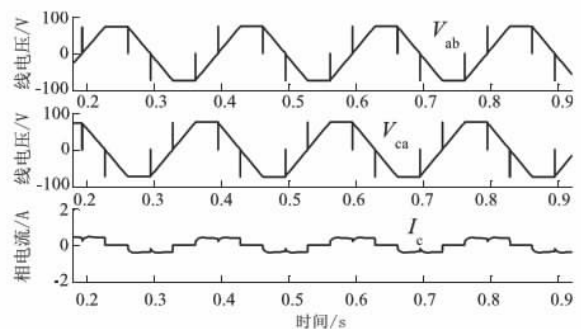


图4 线电压及相电流仿真波形

Fig.4 Line voltage and phase current simulation waveforms



无刷直流电机反电动势波形及开关管在换相时刻导通的影响,线电压波形呈矩形状并在换相时刻出现窄脉冲。从图中可以看出线电压及相电流波形整体平稳,无幅值突变,表明电机运行平稳。

图5为图4中线电压相除所得简化的 $G$ 函数波形。对比图3(a)可以看出,简化的 $G$ 函数波形与传统 $G$ 函数基本一致,换相时刻发生在函数数值从正无穷瞬变至负无穷处,为便于观察,简化的 $G$ 函数数值截取至40,简化的 $G$ 函数在使用时必须设定合适的换相阈值,不然函数波形上出现的

窄脉冲会触发误换相信号.

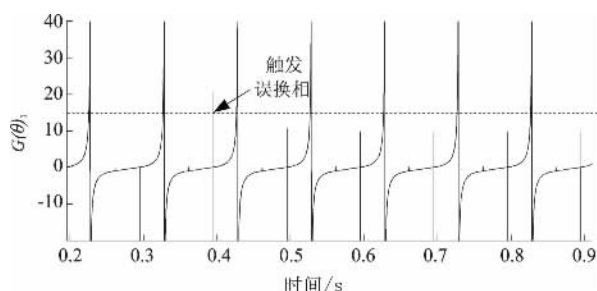


图5 对应简化的  $G$  函数波形

**Fig.5** Correspondingsimplified  $G$  function wave form

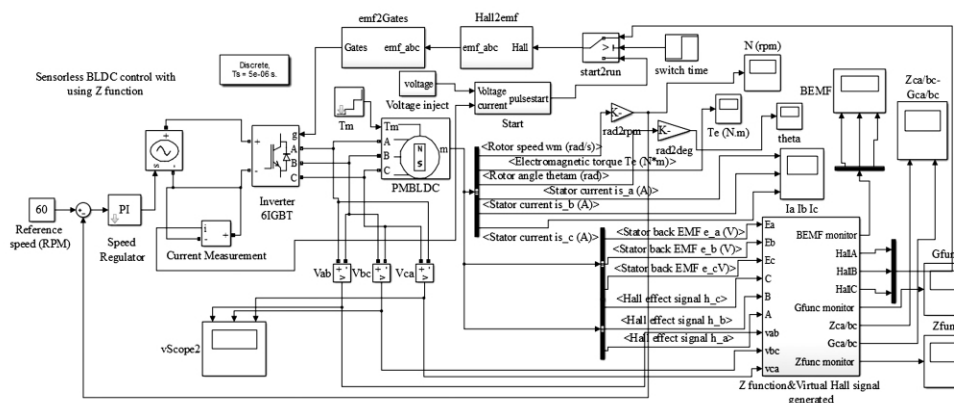


图 6 钻井电机 simulink 仿真模型

**Fig. 6 The simulink model of DDTM**

### 3 钻井电机实验验证

现以钻井电机为研究对象进行实验验证。电机控制芯片采用 TI 公司的 TMS320F28335。电机开关管采用英飞凌 IGBT 驱动管(FF150R17KE4),控制方式采用三相六状态控制法。以钻井电机仿真简化的  $G$  函数波形作参考,换相國值选取 25。

图 7 (a) 中实验相电流波形受电机电磁设计、运行于空载等因素, 整体显得比较杂乱, 当线反电动势瞬间大于相电压时, 相电流出现负值, 呈现出严重下凹。与仿真类似, 线电压波形偏向梯形波, 也存在窄脉冲, 窄脉冲形状受电磁时间常数和电机运行状态影响。从图 7 (b) 可以看出, 简化的  $G$  函数的换相阈值取值非常重要, 为便于观察, 简化的  $G$  函数数值截取至 40, 过大或过小的换相阈值会导致换相时刻的遗漏或误导通, 使得电机难以正常运行, 进而影响效率, 为保证换相信号的准确生成, 需选取合适的换相阈值。对比图 5 和图 7 可以看出, 仿真与实验下的波形基本一致, 使用简化的  $G$  函数的电机空载运行良好, 换相点计算准确, 电流及电压幅值无突变, 相位无明显滞后或超前。

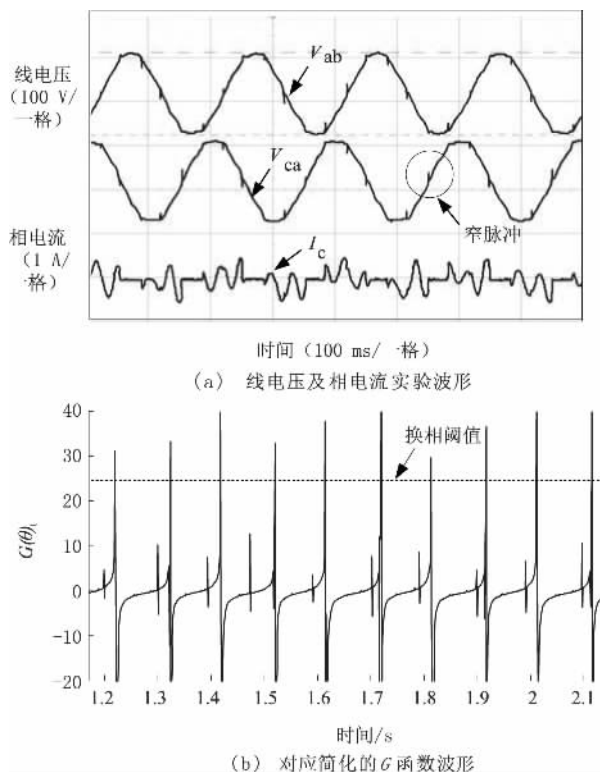


图 7 电机在 60 r/min 实验波形(使用简化的  $G$  函数)

**Fig. 7 Experiment waveforms at 60r/min**  
( usingsimplified  $G$  function)

实验平台由钻井电机本体、直流电压源、DC-DC 电源、主控电路等组成,其中直流电压源为电机提供直流电,DC-DC 电源为硬件电路等供电,主控电路通过处理采集到的物理量生成换相信号,随后传输至 IGBT 驱动来控制电机运行,逆变部分为 6 个 IGBT 组成的三相全桥电路。实验平台中各部分连接关系如图 8 所示。

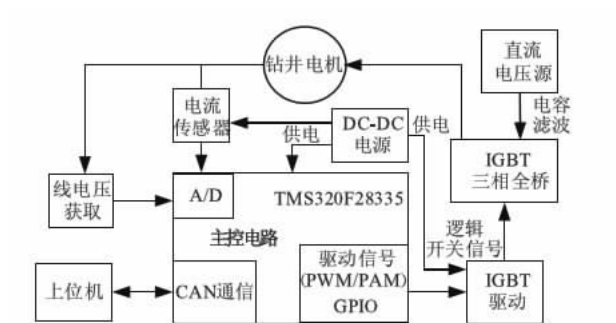


图 8 钻井电机实验平台框图

Fig. 8 Experimental platform frame of DDTM

#### 4 结论

针对钻井电机低速时转子位置信息难以检测及传统  $G$  函数法的缺点,在  $G$  函数法运行原理基础上对其进行简化,简化后的  $G$  函数法只需采集线电压计算换相时刻,计算量更小,对电机参数依赖性更低。仿真和实验结果表明,通过设定好合适的换相阈值,钻井电机在使用简化的  $G$  函数法运行于低转速 (60 r/min) 下能准确获取换相时刻,电机相电流及线电压幅值无突变,相位无明显滞后或超前,电机运行平稳,简化的  $G$  函数法在低

速阶段的有效性与其可行性得到了验证。

#### 参考文献:

- [1] IIZUKA K, UZUHASHI H, KANO M, et al. Micro-computer control for sensorless brushless motor [J]. IEEE transactions on industry applications, 1985, 21(3): 595-601.
- [2] 李志强, 夏长亮, 陈炜. 基于线反电动势的无刷直流电机无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 38-44.
- [3] KIM T, EHSANI M. Sensorless control of the bldc motor from near zero to high speed [J]. IEEE Transactions on power electronics, 2004, 19(6): 1635-1645.
- [4] 杨影, 陈鑫. 滑动平均滤波在磁链函数转子位置检测法中的应用与设计 [J]. 中国科技论文, 2013, 8(8): 829-832.
- [5] 张承宁, 张复琳, 王志福. 无刷直流电动机无位置传感器控制技术综述 [J]. 微特电机, 2014, 42(2): 70-74.
- [6] 李自成, 程善美, 蔡凯. 基于线间反电动势的无刷直流电机转子位置估算 [J]. 电气传动, 2008, 38(11): 17-20.
- [7] 陈华锋, 宋辉, 王占强. 一种改进的无刷直流电机控制方法 [J]. 电机与控制应用, 2015, 42(1): 28-35.
- [8] 孟光伟, 李槐树, 熊浩. 基于 SVPWM 和电流调节控制的无位置传感器 BLDCM 的起动控制 [J]. 微电机, 2010, 43(4): 45-48.
- [9] 许鹏, 曹建波, 曹秉刚. 无位置传感器直流无刷电机软件起动 [J]. 电机控制学报, 2009, 13(5): 734-738.
- [10] 林明耀, 刘文勇, 周谷庆. 无位置传感器无刷直流电机短时脉冲定位加速方法 [J]. 电机控制学报, 2011, 26(9): 80-86.

### New Sensorless Control Method Applied to Downhole Drilling Torque Motor

BAI Guochang, ZHANG Yuxin

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper focused on the sensorless start-up strategy of a torque motor, especially, when a motor was at standstill or very low speed. It was well known that the signal was too small or contains too many noise signals to estimate a precise rotor position. By eliminating the function of error and noise, the simplified flux linkage function method could be obtained based on the traditional winding flux linkage function method principle. The simulation model and the experimental platform based on TMS320F28335 showed that the calculation amount was decreased and the dependence on the parameter was reduced compared with the traditional method. At low speed (60 r/min), the simplified flux function method could be used to ensure the motor running smoothly by calculating the phase change.

**Key words:** sensorless; speed-independent; downhole drilling torque motor; low speed; winding flux linkage function

## 弹性底板上的液压支架整体尺寸参数优化

王志, 王朝雅, 杨飞

(郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 基于弹性地基梁理论, 建立了弹性底板上的液压支架底座受力分析模型, 以前后连杆力最小、结构尺寸最小、掩护梁弯矩最小、支护效率最高、弹性底板比压最小为5个优化目标函数, 通过序列二次规划法对液压支架的整体尺寸设计参数进行优化, 实现了不同底板状况下的整体尺寸参数优化, 基于MATLAB/GUI可视化编程, 实现了程序的可视化。算例分析表明, 将底板比压作为优化目标函数对液压支架整体进行优化, 在结构尺寸变化不大的前提下, 优化结果不仅能满足设计要求, 而且力学特性有较大的改善, 前后连杆轴力、底板比压、掩护梁弯矩4个参数较优化前平均减少了31.95%。

**关键词:** 弹性底板; 底板比压; 多目标优化; 整体尺寸参数; 液压支架

**中图分类号:** TD355 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.002

### 0 引言

关于液压支架整体参数优化, 国内的许多学者对此进行了大量的研究, 如王国法等<sup>[1-2]</sup>提出了一种液压支架总体参数优化设计的数学模型及用修正解析法确定支架四连杆机构初始参数的有效方法, 设计了优化设计实用软件并进行了实例验证。杜小勇<sup>[3]</sup>利用Pro/Toolkit底层函数接口实现了三维软件Pro/E和程序开发软件Visual C++ 2005的连接, 设计开发了“二柱掩护式液压支架参数化设计系统”。李庆国<sup>[4]</sup>结合多学科设计优化的理论与方法, 基于优化软件ISIGHT, 建立了动力学模型、静力学模型及液压支架设计优化的目标函数、设计参数和约束条件, 对支架进行了优化设计。白秀琴等<sup>[5]</sup>选取影响液压支架性能的12个参数, 确定了4个目标函数, 对掩护式液压支架进行了总体优化, 但该文主要考虑的是底板为塑性底板, 没有考虑弹性底板影响的多目标问题的优化。另外, 许多国内外学者采用层次分析法、遗传算法等方法对各种机械结构进行了研究, 得到了较好的优化结果。

液压支架支撑于煤层上, 煤岩性质差异很大, 将底板假设为塑性底板在有些情况下不能真实反

映底座与底板的接触情况, 对于液压支架的精细化设计产生不利的影响, 再加上作业工况的不确定性, 使得支架底座与底板的接触力学特性呈现较为复杂的随机性。笔者在王国法<sup>[1]</sup>、白秀琴<sup>[5]</sup>等模型的基础上, 假设底板为弹性, 将底板比压作为第5个目标进行优化设计, 以达到精细化设计的目的。

### 1 弹性底板上的底座受力模型

假设液压支架底板为弹性体, 底板与底座相互作用的关键点是在接触面上满足变形和位移协调。将底板视作梁, 可采用弹性地基梁的解法。Winkler模型<sup>[6-8]</sup>和双参数模型<sup>[9-12]</sup>是最常见的弹性地基梁模型。假设梁表面任一点的压力 $p$ 与该点的位移 $w$ 成正比:

$$p(x, y) = kw(x, y). \quad (1)$$

弹性地基梁模型如图1所示, 在梁 $OB$ 上作用一组外荷载, 假设坐标原点 $O$ 与梁的一端重合, 在这种情况下, 梁的基本方程可以写为:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kwb = qb, \quad (2)$$

式中:  $k$ 称为地基基床系数;  $q$ 和 $p$ 分别为梁所受的分布荷载及地基反力;  $b$ 为梁的宽度。

收稿日期: 2016-06-04; 修订日期: 2016-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404212); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目

通信作者: 王志(1981—), 男, 内蒙包头人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事工程力学研究, E-mail: wangzhi@zzu.edu.cn.

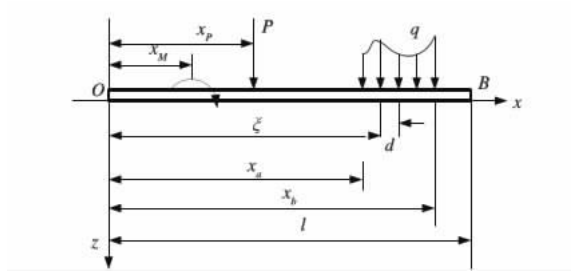


图1 弹性地基梁模型受力示意图

Fig. 1 The stress diagram

式(2)是 Winkler 弹性地基梁的控制方程,该方程只考虑了一个参数即基床系数  $k$ 。Winkler 把地基看成是由独立且互不影响的弹簧组成的,不能考虑土体抗剪切能力。于是考虑土体剪切能力的参数  $G_p$  被引入到 Winkler 模型中,形成了双参数模型,其控制方程为<sup>[13]</sup>:

$$Elw^{(4)} - G_p b^* w'' + kb^* w = bq(x). \quad (3)$$

该方程的齐次解可以写为:

$$w(x) = c_1 F_1(x) + c_2 F_2(x) + c_3 F_3(x) + c_4 F_4(x).$$

其中:  $b^* = b [1 + (G_p/k)^{1/2}/b]$ ;  $F_1(x) = \cos(\alpha_1 \lambda x) \operatorname{sh}(\alpha_2 \lambda x)$ ,  $F_2(x) = \cos(\alpha_1 \lambda x) \cdot \operatorname{ch}(\alpha_2 \lambda x)$ ,  $F_3(x) = \sin(\alpha_1 \lambda x) \operatorname{ch}(\alpha_2 \lambda x)$ ,  $F_4(x) = \sin(\alpha_1 \lambda x) \operatorname{sh}(\alpha_2 \lambda x)$ ,  $\lambda = [kb^*/(4EI)]^{1/4}$ .

而  $\alpha_1 = [1 - G_p \lambda^2/k]^{1/2}$ ,  $\alpha_2 = [1 + G_p \lambda^2/k]^{1/2}$ ,  $\theta$  为截面转角,  $M$  为弯矩,  $V$  为广义剪力,  $w$  为挠度,且满足关系:  $\theta = w'$ ,  $M = -Elw''$ ,  $V = -Elw''' + G_p b^* w'$ .

方程可通过初参数求解,初参数解可写为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} \theta(x) = & w_0 \lambda \left( \frac{F_1}{\alpha_2} - \frac{F_3}{\alpha_1} \right) + \theta_0 \left[ F_2 + \left( \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) F_4 \right] - \\ & \frac{M_0}{2\lambda EI} \left( \frac{F_1}{\alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1} \right) - \frac{V_0}{\lambda^2 EI} \left( \frac{F_4}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) - \frac{M}{2\lambda EI} \cdot \\ & \left[ \frac{F_1(x - x_M)}{\alpha_2} + \frac{F_3(x - x_M)}{\alpha_1} \right] + \frac{P}{\lambda^2 EI} \cdot \\ & \left( \frac{F_4(x - x_p)}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) + \frac{b}{\lambda^2 EI} \int_{x_a}^x q \left( \frac{F_4(x - \xi)}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) d\xi; \quad (4) \\ w(x) = & w_0 \left[ F_2 - \left( \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) F_4 \right] + \frac{\theta_0}{2\lambda} \left( \frac{F_1}{\alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1} \right) - \\ & \frac{M_0}{\lambda^2 EI} \left( \frac{F_4}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) + \frac{V_0}{4\lambda^3 EI} \left( \frac{F_1}{\alpha_2} - \frac{F_3}{\alpha_1} \right) - \\ & \frac{M}{\lambda^2 EI} \left( \frac{F_4(x - x_M)}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) - \frac{b}{4\lambda^3 EI} \cdot \\ & \int_{x_a}^x q \left( \frac{F_1(x - \xi)}{\alpha_2} - \frac{F_3(x - \xi)}{\alpha_1} \right) d\xi - \\ & \frac{P}{4\lambda^3 EI} \left( \frac{F_1(x - x_p)}{\alpha_2} - \frac{F_3(x - x_p)}{\alpha_1} \right); \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M(x) = & 4w_0 EI \lambda^2 \left( \frac{F_4}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) - \frac{\theta_0 EI \lambda}{2} \cdot \\ & \left[ \left( \frac{3\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{\alpha_2} \right) F_1 + \left( \frac{2\alpha_2^2 - 3\alpha_1^2}{\alpha_1} \right) F_3 \right] + M_0 \cdot \\ & \left[ F_2 + \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} F_4 \right] + \frac{V_0}{2\lambda} \left( \frac{F_1}{\alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1} \right) + \\ & M \left[ F_2(x - x_M) + \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} F_4(x - x_M) \right] - \\ & \frac{P}{2\lambda} \left( \frac{F_1(x - x_p)}{\alpha_2} + \frac{F_3(x - x_p)}{\alpha_1} \right) - \\ & \frac{b}{2\lambda} \int_{x_a}^x q \left( \frac{F_1(x - \xi)}{\alpha_2} + \frac{F_3(x - \xi)}{\alpha_1} \right) d\xi. \quad (6) \end{aligned}$$

其中:  $r = 2G_p l^2/k$ ,  $w_0, \theta_0, M_0, V_0$  可根据两端的初始支承条件确定,如两端为自由端,则可由  $M_0 = M_l = 0$ ,  $V_0 = G_p b^* \alpha w_0$ ,  $V_l = -G_p b^* \alpha w_l$ ,  $\alpha^2 = k/G_p$  来确定。

以上就是双参数弹性地基梁的基本方程,当剪切模量  $G_p$  为 0 时,双参数模型退化为 Winkler 模型。

底板上的底座受力示意图如图 2 所示,取液压支架底座为单独受力体,将其放置于双参数弹性底板上,通过液压支架平面受力分析程序<sup>[14]</sup>,可以得到立柱作用力  $P$ 、前后连杆作用力  $F_K$  和  $F_R$ 。根据式(4)可解得位移  $w$ 、比压  $p$  以及弯矩  $M$  和剪力  $V$ 。

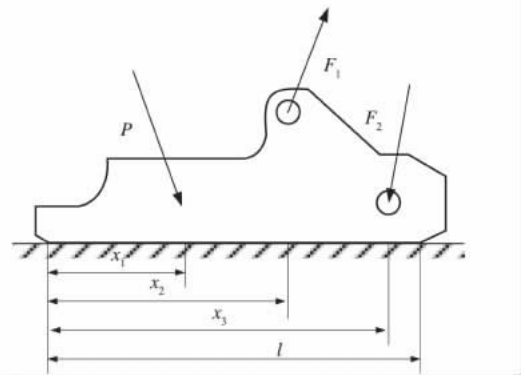


图2 底板上的底座受力示意图

Fig. 2 The stress diagram of the base on the floor

## 2 液压支架整体尺寸参数优化模型

梁柱掩护式液压支架整体外观尺寸如图 3 所示。影响液压支架性能的主要参数共有 12 个:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}]^T = [L_1, L_2, L_3, L_4, L_{15}, L_{18}, H_0, x_K, y_K, y_R, L_5, x_D]^T.$$



$$g_{14}(\mathbf{X}) = [y_{R\min}] - y_R \leq 0.$$

(10) 限制连杆上铰点位于掩护梁中心线以下,即

$$g_{17}(\mathbf{X}) = -L_{18} \leq 0.$$

(11) O 点与前连杆间水平距离约束,即

$$g_{18}(\mathbf{X}) = [\Delta x_{\min}] - (x_o - x_K) \leq 0,$$

$$g_{19}(\mathbf{X}) = (x_o - x_K) - [\Delta x_{\max}] \leq 0.$$

(12) 底座长度及柱窝位置约束,即

$$g_{20}(\mathbf{X}) = 2/3 [(H - 2y_D) \sin \beta + x_D] - L_{15} \leq 0,$$

$$g_{21}(\mathbf{X}) = (D_L + S_p) - (x_D - x_K) \leq 0.$$

(13) 顶梁长度及柱窝前后配比应满足:

$$g_{22}(\mathbf{X}) = L_5 / (L_{13} + L_0) - R_{l\max} \leq 0,$$

其中:  $D_L$  为立柱外径;  $S_p$  人行道宽度;  $R_{l\max}$  为允许  $L_5 / (L_{13} + L_0)$  的最大值.

综上,两柱掩护式液压支架总体参数优化数学模型是一个具有 12 个设计变量、5 个优化子目标函数和 22 个约束条件的优化问题,可表达为:

$$\min f(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^5 \frac{f_j(\mathbf{X})}{f_0},$$

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{12}]^T;$$

$$\text{s. t. } g_u(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, 22).$$

### 3 基于 MATLAB/GUI 可视化编程

采用 MATLAB/GUI 编写液压支架整体参数优化设计程序. 用户直接面对窗口, 具有良好的人机交互功能, 可以实现参数优化和优化结果动态显示合二为一. 本程序设计共编写了 1 个主程序,

6 个子程序, 包括目标函数、运动学、连杆受力、底板比压、约束条件、优化模型, 每个子程序下面又将设置一些输入输出子程序可供相互调用, 使大量的功能在子程序中实现, 最大程度实现主程序的简洁, 同时利用了 MATLAB 优化工具箱中关于 SQP 算法的程序语句. 程序设计流程如图 4 所示.

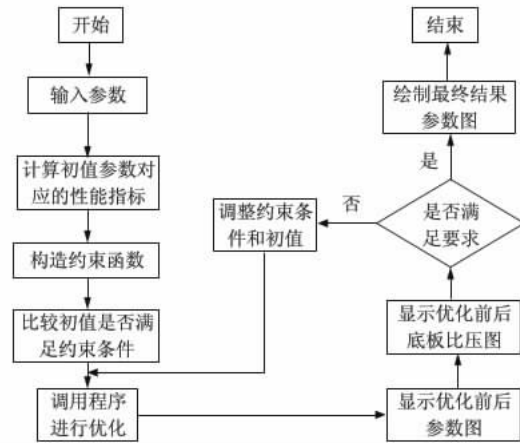


图 4 优化程序设计流程

Fig. 4 The design process of the optimizer

### 4 算例分析

对 ZY18000/32/70D 型两柱掩护式支架进行总体参数优化设计. 该支架的设计要求为: 最大高度  $H_{\max} = 7\,000\text{ mm}$ , 最小高度为  $H_{\min} = 3\,200\text{ mm}$ , 每柱工作阻力  $9\,000\text{ kN}$ . 优化前后的尺寸及性能对比见表 1 和表 2.

表 1 优化前后尺寸参数对比

Tab. 1 Size parameters before and after optimization

项目	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_{15}$	$L_{18}$	$H_0$	$x_K$	$y_K$	$y_R$	$L_5$	$x_D$
优化前	3 100	2 900	750	3 100	3 700	0	240	1 100	1 200	480	1 500	2 100
优化后	3 111	2 964	720	3 142	4 297	49	302	1 135	1 244	498	1 728	2 100
变化量/%	0.35	2.22	-3.98	1.35	16.13	100	25.92	3.21	3.67	3.78	15.18	0

表 2 优化前后性能参数对比

Tab. 2 The performance parameters before and after optimization

项目	双纽线摆幅/mm	前连杆力/kN	后连杆力/kN	比压/MPa	掩护梁弯矩/(kN·m)
优化前	210.71	-4 840.70	4 986.36	1.91	-2 965.02
优化后	60.00	-3 074.30	2 990.24	1.62	-1 885.14
变化量/%	-71.52	-36.49	-40.03	-14.88	-36.42

由优化结果可知, 该优化不仅能满足设计要求, 而且力学特性有较大的改善, 可以保证液压支架的整体性能最优. 同时, 根据优化结果, 底板比压在优化后有所减少, 分布规律与优化前一致, 优化过程中可随时根据优化对比结果以及底板比压

分布状况调整参数重新进行优化, 直到达到满意的优化结果.

### 5 结论

基于弹性底板假设, 选取底板比压等 5 个目



标函数,通过 SQP 算法对液压支架的整体尺寸设计参数进行了优化,编制了基于 MATLAB/GUI 的可视化程序界面,实现了不同底板状况的整体尺寸优化,得到如下主要结论:

(1) 通过液压支架整体尺寸参数的优化,不仅能满足设计要求,而且力学特性有较大的改善,可以保证液压支架的整体性能最优,底板比压分布更为均匀。

(2) 将底板比压作为优化目标函数,参与整体尺寸的优化,在结构尺寸变化不大的前提下,前后连杆轴力、底板比压、掩护梁弯矩 4 个主要力学特性参数较优化前平均减少了 31.95%,使得液压支架整体性能考量更加完整与具体,液压支架的整体力学性能更佳。

### 参考文献:

- [1] 王国法. 掩护式液压支架参数优化设计方法的研究[J]. 煤炭学报,1995,20(S1): 27-32.
- [2] 王国法,马胜存. 液压支架总体结构参数的模糊聚类分析和模糊优化[J]. 煤炭学报,1999,24(6): 628-633.
- [3] 杜小勇. 二柱掩护式液压支架参数化设计系统的构建[D]. 石家庄: 河北工程大学机电工程学院,2013.
- [4] 李庆国. 液压支架多学科设计优化平台研究与实现[D]. 济南: 山东科技大学机械电子工程学院,2007.
- [5] 白秀琴,李清. 掩护式液压支架总体参数优化的数学模型[J]. 煤矿机械,2009,30(5): 34-36.
- [6] 赵宝生,王敏中,于新. Winkler 弹性地基上梁的精细化理论[J]. 应用力学学报,2005,22(4): 602-605.
- [7] MOHANTY S C, DASH R R, ROUT T. Parametric instability of a functionally graded Timoshenko beam on Winkler's elastic foundation[J]. Nuclear engineering and design, 2011, 241(8): 2698-2715.
- [8] WANG J L, ZHANG C. Three-parameter, elastic foundation model for analysis of adhesively bonded joints[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2009, 29(5): 495-502.
- [9] 卢正,姚海林,罗海宁,等. 双参数黏弹性地基上连续配筋混凝土路面振动参数分析[J]. 岩土力学, 2008,29(8): 2177-2182.
- [10] 何芳社,钟光珞. 双参数弹性地基上变截面梁的弯曲[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005,37(2): 251-254.
- [11] WU J X, LI X F, TANG G J. Bending wave propagation of carbon nanotubes in a bi-parameter elastic matrix[J]. Physica B: condensed matter, 2012, 407(4): 684-688.
- [12] WANG J L, C ZHANG. A three-parameter elastic foundation model for interface stresses in curved beams externally strengthened by a thin FRP plate[J]. International journal of solids and structures, 2010, 47(7/8): 998-1006.
- [13] 黄义. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京: 科学出版社,2005: 3-40.
- [14] 王志,倪和平,赵明皞. 弹性底板上的液压支架底座力学性能分析[J]. 科学技术与工程,2014,14(7): 94-98.

## Overall Parameter Optimization of the Hydraulic Support on the Elastic Foundation

WANG Zhi, WANG Chaoya, YANG Fei

(School of Mechanics & Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A stress analysis model of hydraulic support base on elastic floor was established based on the theory of beam on elastic foundation. The optimal variables including connecting rod force, structure size, bending moment of the cover beam, floor pressure and support efficiency were taken as five optimization objectives. Hydraulic support overall size of the design parameters were optimized under different floor conditions through the sequence quadratic planning method. The application of visualization was realized based on MATLAB/GUI visual programming. The example analysis showed that the optimization results not only could meet the design requirements but also could improve the mechanical properties. The four main mechanical parameters include the axial force of the connecting rod, the pressure of the floor and the bending moment of the cover beam decreased by 31.95% on average.

**Key words:** elastic foundation; pressure of base plate; multi-objective optimization; overall size parameters; hydraulic support.

# 18CrNiMo7-6 高速磨削条件下表面质量的试验研究

王 栋, 刘昱范, 陈 鑫

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 在高速磨削条件下, 以砂轮线速度、磨削深度以及工作台速度为变量, 对齿轮常用材料 18CrNiMo7-6 进行了单因素高速磨削工艺试验, 从表面粗糙度和表面硬度两方面研究了高速磨削对试验材料表面质量的影响, 分析了磨削参数对表面粗糙度以及表面硬度的影响规律, 揭示了试验材料在高速磨削加工中表面粗糙度和表面硬度的变化规律. 试验结果表明: 表面粗糙度随着砂轮线速度的增大而减小, 随着磨削深度和工作台速度的增大而增大; 表面硬度随着磨削深度的增大而减小, 随着工作台速度的增大而增大, 但是随着砂轮线速度的增大, 表面硬度先减小再增大最后趋于稳定.

**关键词:** 高速磨削; 表面粗糙度; 表面硬度; 砂轮线速度; 磨削深度; 工作台速度

**中图分类号:** TH161

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.019

## 0 引言

齿轮是传动系统中的关键部件, 其失效形式有齿根弯曲疲劳、齿面接触疲劳等, 这些失效通常源自于齿轮齿面或齿根的表面. 因此, 齿轮材料的表面质量显得十分重要, 而表面粗糙度和表面硬度是衡量工件表面质量的重要指标<sup>[1-2]</sup>.

高速磨削是指通过提高砂轮线速度来提高磨削去除率与磨削质量的工艺. 人们通常把砂轮线速度为 45~150 m/s 的磨削工艺称为高速磨削. 高速磨削可以显著提高磨削效率与磨削质量, 同时又能延长砂轮寿命, 是磨削工艺的革命性跃变<sup>[3-7]</sup>. 由于齿轮齿面加工的终加工工艺通常为磨削, 且实际生产中的磨削速度尚未达到高速磨削, 粗劣的磨削条件会降低齿轮的表面质量与疲劳强度, 影响齿轮的使用性能. 因此, 笔者针对齿轮常用材料 18CrNiMo7-6, 在高速磨削的条件下设计了单因素磨削试验方案, 从表面粗糙度和表面硬度两方面研究了高速磨削对试验材料表面质量的影响, 并对不同磨削参数下的表面粗糙度与表面硬度进行测量, 详细分析了砂轮线速度、工作台速度以及磨削深度对表面粗糙度和表面硬度的影响, 揭示了试验材料在高速磨削加工中表面粗糙

度和表面硬度的变化规律. 从而为 18CrNiMo7-6 在高速磨削条件下磨削参数的选择提供了依据<sup>[8-10]</sup>.

## 1 试验装置

### 1.1 高速磨削试验平台

由于目前尚未有齿轮高速成型磨床, 因此用高速平面磨床来模拟高速磨削齿轮过程. 试验在杭州机床厂生产的 MKL7132X8/17 型超高速平面磨床上进行, 如图 1 所示. 该磨床应用计算机数控系统和缓进深切成形磨削工艺, 能对机床的三个直线轴和磨头主轴进行单独控制或联动. 主轴最高转速达 10 000 r/min, 砂轮电动机功率为 50 kW.

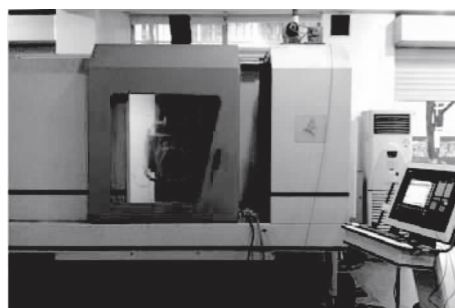


图 1 超高速平面磨床

Fig. 1 Super-high surface grinder

收稿日期: 2016-07-04; 修订日期: 2016-10-09

基金项目: 2014 年国家工业和信息化部工业转型升级强基工程

作者简介: 王栋(1970—), 男, 河南沁阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事抗疲劳制造技术研究, E-mail: wangdong@zzu.edu.com.

### 1.2 表面粗糙度测量仪

试验采用 2206B 型表面轮廓-粗糙度测量仪,在垂直于磨削方向上测量试样表面粗糙度  $Ra$ ,针对每一试样测量 5 次并求其平均值。

### 1.3 洛氏硬度计

由于齿轮材料要求表面硬度高,因此,试验利用 HR-450A 型手动洛氏硬度计测量试件表面硬度。磨削后沿磨削方向上测量 5 个点的表面硬度,并求其平均值。

## 2 磨削工艺条件

### 2.1 试验材料

试样选用齿轮常用材料 18CrNiMo7-6,其热

处理工艺同齿轮实际热处理工艺相同。使用拉伸试验机对此齿轮材料进行拉伸试验,测得其性能如表 1 所示。

### 2.2 磨削方式的选择

根据砂轮线速度方向与工作台速度方向的异同,将平面磨削分为顺磨与逆磨。由于在相同的磨削条件下,顺磨比逆磨的磨削力大,磨削温度高,因此试验采用平面逆磨的磨削方式<sup>[11]</sup>。

### 2.3 砂轮的选择

CBN(立方氮化硼)砂轮和金刚石砂轮是高速磨削工艺中常用的砂轮。它们各有各的特点<sup>[12]</sup>。结合试验条件,选用陶瓷 CBN 砂轮。砂轮参数如表 2 所示。

表 1 试验材料及性能

Tab.1 Experimental materials and performance

材料	热处理方法	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	硬度 HRC	延伸率/%	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	试样尺寸/mm
18CrNiMo7-6	渗碳淬火	1 220	1 016	58.4	16	0.742	35 × 25 × 40

表 2 砂轮参数

Tab.2 Parameters of grinding wheel

磨料	粒度	磨料层厚度/mm	结合剂类型	砂轮直径/mm	磨削宽度/mm	最高线速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	修整方式
CBN	120/140	5	陶瓷	400	15	200	金刚石滚轮修整

### 2.4 磨削液的选择

高速磨削时砂轮磨粒与工件之间发生高速的摩擦与切削,会在磨削区产生高温,造成工件表面烧伤,降低加工精度与表面粗糙度,加剧砂轮的磨损。为了避免这一现象,在高速磨削加工时应合理使用磨削液。本次试验选用 GYSyn 256C 磨削液。磨削试验条件如表 3 所示。

表 3 磨削试验条件

Tab.3 Grinding condition of grinding

磨削方式	平面逆磨
砂轮	陶瓷 CBN 砂轮
磨削液	GYSyn 256C
砂轮线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	60, 80, 100, 120, 140, 160
工作台速度 $v_w / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	2, 4, 6
磨削深度 $a_p / \mu\text{m}$	10, 20, 30, 40, 50

## 3 试验结果和分析

### 3.1 磨削要素对表面粗糙度的影响

#### 3.1.1 砂轮线速度对表面粗糙度的影响

图 2 反映了当工作台速度为 4 m/min,砂轮

磨削深度为 20  $\mu\text{m}$  时,砂轮线速度与表面粗糙度之间的关系。从图 2 可以看出,试样表面粗糙度随着砂轮线速度的增大而减小。这是因为砂轮线速度的提高会使最大未变形切削厚度  $h_{\text{max}}$  降低,导致单颗磨粒的切深减小,磨屑变薄,因此磨粒在工件表面的切痕深度变小。同时,工件材料来不及变形,表层金属的塑性变形减小,磨削表面的粗糙度将减小。

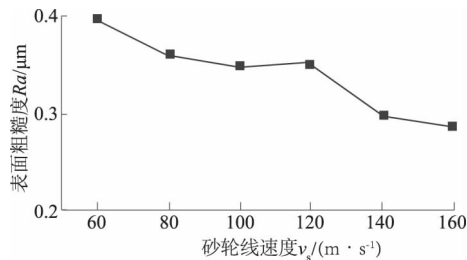


图 2 表面粗糙度与砂轮线速度的关系

Fig.2 The relationship between surface roughness and wheel speed

#### 3.1.2 磨削深度对表面粗糙度的影响

图 3 反映了当砂轮线速度为 120 m/s,工作

台速度为 4 m/min 时,砂轮磨削深度与表面粗糙度之间的关系.从图 3 可以看出,试样表面粗糙度随着磨削深度的增大而增大.这是由于增大磨削深度,最大未变形切削厚度增大,单颗磨粒切削厚度也增大,这会导致磨粒在工件表面的切痕变深.同时,塑性变形也会随之增大,被磨表面的粗糙度数值将会增大.但是,当磨削深度为 10 ~ 20  $\mu\text{m}$  时,表面粗糙度随着磨削深度的增大而减小.这是由于在磨削平面时,当工件表面  $Ra$  为 1.5 ~ 15 时,工件表面存在缺陷层,且缺陷层深度为 20 ~ 30  $\mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>.由于试样表面  $Ra$  的实测值为 3.467,介于 1.5 ~ 15,所以当磨削深度小于 20  $\mu\text{m}$  时,试样表面缺陷层并未被完全磨除,导致  $Ra$  其较大.

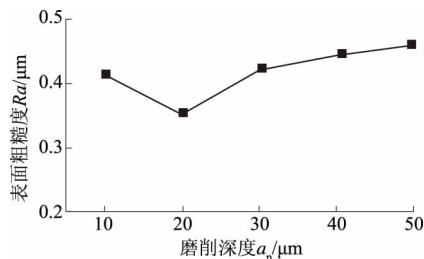


图 3 表面粗糙度与磨削深度的关系

Fig. 3 The relationship between surface roughness and wheel depth of cut

### 3.1.3 工作台速度对表面粗糙度的影响

图 4 反映了当砂轮线速度为 120 m/s,磨削深度为 20  $\mu\text{m}$  时,工作台速度与表面粗糙度之间的关系.从图 4 可以看出,随着工作台速度的增大,

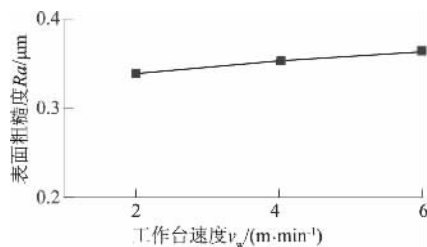


图 4 表面粗糙度与工作台速度的关系

Fig. 4 The relationship between surface roughness and workpiece velocity

试样表面粗糙度略有增大.究其原因:工作台速度增大时,单位时间内磨除的材料增加,单颗磨粒的未变形切削厚度增大,导致磨粒在工件表面留下的刻痕深度也有所增加,表面粗糙度值也增大.但由于实际磨床工作台速度有所限制,因此,工作台速度对表面粗糙度的影响不明显.

## 3.2 磨削要素对表面硬度的影响

### 3.2.1 砂轮线速度对表面硬度的影响

图 5 反映了工作台速度为 4 m/min,磨削深度为 20  $\mu\text{m}$  时,砂轮线速度与表面硬度间的关系.从图 5 可以看出,随着砂轮线速度的增大,试样表面硬度先减小再增大,最后趋于稳定.这是由于当砂轮线速度为 60 ~ 80 m/s 时,随着砂轮线速度的提高,最大未变形切削厚度  $h_{\text{max}}$  降低,这意味着单位时间内参与切削的磨粒数增加,切削变形能增大;同时,磨削温度升高,这会使试样表面产生回火软化现象,且温度越高,回火软化现象越严重,因此表面硬度值有所下降.但是,当砂轮线速度达到 80 m/s 左右时,砂轮与试样接触层的温度达到最高点,越过这个点后,砂轮线速度持续提高,接触层高温磨屑的形成加快,接触层厚度变小,导致接触层下边一层的温度在增大之前,接触层即被切除,磨削温度降低,这种现象符合萨洛蒙曲线.因此,试样表面回火软化程度下降,硬度有所上升,最终趋于稳定.

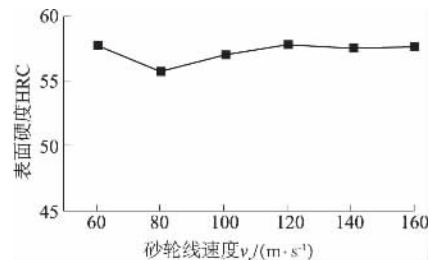


图 5 砂轮线速度对表面硬度的影响

Fig. 5 The relationship between surface hardness and wheel speed

### 3.2.2 磨削深度对表面硬度的影响

图 6 反映了砂轮线速度为 120 m/s,工作台速度为 4 m/min 时,砂轮磨削深度与表面硬度之间的关系.从图 6 可以看出,随着砂轮磨削深度的

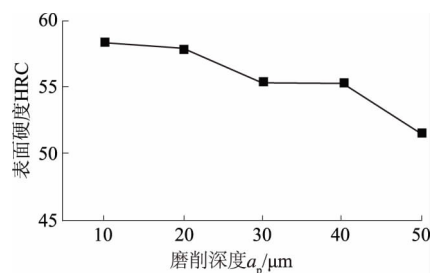


图 6 磨削深度对表面硬度的影响

Fig. 6 The relationship between surface hardness and wheel depth of cut

增大,试样表面硬度值减小.这是由于随着砂轮磨削深度的增大,磨削区范围增大,参与切削的磨粒数增加,单颗磨粒切削厚度增大,因此磨削区的总热流强度增大,导致工件表面温度升高,产生回火软化现象.并且随着磨削深度的增加,试件表面回火软化程度增大,因此表面硬度降低.

### 3.2.3 工作台速度对表面硬度的影响

图7反映了砂轮线速度为 120 m/s,磨削深度为 20  $\mu\text{m}$  时,工作台速度与表面硬度间的关系.从图7可以看出,试样表面硬度随着工作台速度的增大而增大.这是由于随着工作台速度的增大,虽然最大未变形切削厚度  $h_{\max}$  变大,单颗磨粒切厚变大,热源强度增大,但是热源在工件表面上移动的速度加快,作用时间减少,回火软化现象不显著,表面硬度变化趋于稳定.

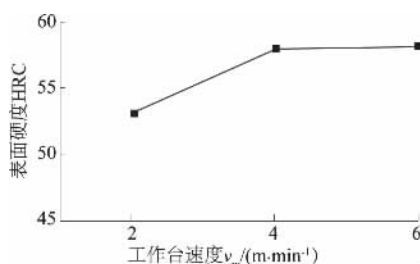


图7 工作台速度对表面硬度的影响

Fig.7 The relationship between surface hardness and workpiece velocity

## 4 结论

针对齿轮常用材料 18CrNiMo7-6,笔者在高速磨削的条件下设计了单因素磨削试验方案,并对不同磨削参数下工件的表面粗糙度与表面硬度进行测量,最终得到了砂轮线速度、磨削深度以及工作台速度对表面粗糙度以及表面硬度的影响规律.

(1) 表面粗糙度随着砂轮线速度的增大而减小,随着磨削深度与工作台速度的增大而增大.但是当磨削深度为 10 ~ 20  $\mu\text{m}$  时,表面粗糙度随着磨削深度的增大而减小,这是由于平磨试样时,试样表面  $R_a$  的实测值为 3.467,介于 1.5 ~ 15,试样表面缺陷层深度  $H_a$  为 20 ~ 30  $\mu\text{m}$ .所以当磨削深度小于 20  $\mu\text{m}$  时,试样表面缺陷层并未被完全磨除,导致其  $R_a$  较大.因此,在高速磨削条件下,可适当增加磨削深度,这样既能保证工件表面质量,

又可以提高磨削效率;

(2) 表面硬度随着磨削深度的增大而减小,随着工作台速度的增大而增大.但是随着砂轮线速度的增大,表面硬度先减小再增大最后趋于稳定.这是由于磨削温度随着砂轮线速度的提高先升高再降低最后趋于稳定,因此导致不同砂轮线速度下,试样表面回火软化程度不同,硬度值也就有所不同.

## 参考文献:

- [1] 陈勇. 汽车轴类零件高效磨削实验研究与工艺优化 [D]. 上海: 东华大学机械工程学院, 2014.
- [2] NI Jiaming, LI Beizhi, PANG Jingzhu. High-speed cylindrical grinding of SiC: The process characteristics and surface integrity [J]. Journal of ceramic processing research, 2013, 14(1): 70 - 76.
- [3] 任敬心. 磨削原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] 李蓓智. 高速高质量磨削理论、工艺、装备与应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [5] 李伯民. 现代磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] BATAKO A D, ROWE W B, MORGAN M, N. Temperature measurement in high efficiency deep grinding [J]. International journal of machine tools & manufacture. 2005, 45: 1131 - 1245.
- [7] 郭宗福. 9SiCr 超高速磨削试验研究与磨削温度仿真 [D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2012.
- [8] 郭克希, 谭佩莲, 唐进元. 基于人工神经网络的螺旋锥齿轮磨削加工表面粗糙度预测 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(3): 65 - 67 + 74.
- [9] 陈涛, 盛晓敏, 宓海青. 40Cr 超高速磨削工艺试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2007, 34(10): 39 - 43.
- [10] 陈涛, 盛晓敏, 黄红武. CBN 砂轮超高速磨削条件下加工表面粗糙度的试验研究 [J]. 制造技术与机床, 2007(5): 60 - 63.
- [11] 林正白, 徐昌齐, 陈迅. 关于平面磨削中顺、逆磨特性的研究 [J]. 磨料磨具与磨削, 1983(4): 12 - 17.
- [12] 陈涛. CBN 砂轮 210m/s 超高速磨削工艺试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2006.
- [13] 王先逵. 机械制造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

(下转第 86 页)

## 基于滑移率的 CVT 夹紧力控制策略研究

袁晓红, 陈 龙, 汪怡平

(武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 为了研究金属带式无级变速器的夹紧力控制问题, 对传统的夹紧力控制策略进行改进. 通过分析金属带与带轮的滑移机理, 对滑移现象进行描述; 研究滑移率对带轮传动的影响, 并利用试验数据建立数学模型. 利用 AMESim 和 Simulink 建立联合仿真模型, 结合仿真结果对比新的控制策略与传统的控制策略. 仿真结果表明: 采用新的控制策略后, 夹紧力降至原有的 85% ~ 90%; 节气门开度从 10% 增加至 50% 的过程中, 采用滑移控制的 CVT 的传动效率维持在 80% ~ 85%; 在极限工况下, 滑移率控制会产生一定程度的滑移率波动, 需要进一步改善.

**关键词:** 金属带式无级变速器; 滑移率; 夹紧力; 传动效率; PID

**中图分类号:** U463.212

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.013

### 0 引言

金属带式无级变速器 (V-belt continuously variable transmission, CVT) 可以在较宽的范围内实现无级变速, 获得传动系与发动机工况的最佳匹配, 提高整车的燃油经济性<sup>[1]</sup>, 从而有效降低燃油消耗和排放, 且驾驶舒适性好, 因而在整车上的应用越来越广泛. 然而 CVT 相对于机械变速器传动效率偏低<sup>[2]</sup>, 所以提高 CVT 传动效率成为推广 CVT 的关键. 有研究表明, CVT 在一定滑移率范围内, 传动效率随着滑移率的增大而提高; 超过一定滑移率后, 传动效率会快速下降<sup>[3]</sup>. 如果能将滑移率控制在合理范围内, 就可以在避免钢带过度磨损的情况下, 提升传动效率. 因此, 笔者提出基于滑移率的夹紧力控制策略, 并以传统控制策略为比较对象, 进行多方面对比.

### 1 传统夹紧力控制理论及方法

CVT 夹紧力控制是通过从动缸压力的控制来实现的. 由油门开度和行驶模式可以确定发动机输出转矩  $T_e$  和目标速比  $i$ , 则在发动机输出  $T_e$  时, 变速机构应能传递的最小转矩  $T_j$  为<sup>[4]</sup>

$$T_j = T_f + T_e, \quad (1)$$

式中:  $T_j$  为安全转矩,  $N \cdot m$ ;  $T_f$  为转矩余量,  $N \cdot m$ ;  $T_e$  为发动机输出转矩,  $N \cdot m$ . 引入转矩相对安全系数  $S_f$ , 则此时变速机构应能传递的最小转矩  $T_j$  为

$$T_j = S_f T_e. \quad (2)$$

式中:  $S_f$  为安全系数, 一般取 1.3 ~ 2<sup>[5]</sup>. 由此可得从动带轮的夹紧力为<sup>[6]</sup>

$$F_s = \frac{T_j \cos \alpha}{2\mu_{bp} R_p}. \quad (3)$$

式中:  $F_s$  为从动带轮的夹紧力,  $N$ ;  $\alpha$  为带轮锥角,  $\text{rad}$ ;  $\mu_{bp}$  为金属片与带轮间的摩擦系数;  $R_p$  为主动轮工作半径,  $m$ .

实时控制时, 依据速比  $i$  和发动机转矩  $T_e$  可以确定从动轮的夹紧力  $F_s$ , 则从动缸压力为

$$p_s = \frac{F_s}{A_s}. \quad (4)$$

式中:  $p_s$  为从动缸压力,  $\text{Pa}$ ;  $A_s$  为从动缸面积,  $\text{m}^2$ .

夹紧力控制策略如图 1 所示<sup>[7]</sup>.

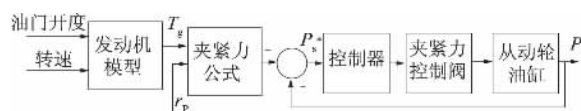


图1 传统夹紧力控制策略

Fig. 1 Traditional clamping force control strategy

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305312)

作者简介: 袁晓红(1972—), 女, 湖南汉寿人, 武汉理工大学副教授, 博士, 主要从事汽车动力学研究, E-mail: yxh-hying@163.com.



## 2 金属带与带轮滑移机理

滑移是变速器在传递转矩的过程中无法避免的一个现象,它主要由金属带和带轮之间的摩擦特性决定.相关研究表明,在几何速比、从动轮夹紧力、主动带轮工作半径、主动轮的转速一定的情况下,主动轮和从动轮与金属带之间的滑移随着变速器输入转矩的增加而增加.通常用滑移率  $S$  来描述打滑滑移的大小<sup>[8]</sup>

$$S = 1 - \frac{v}{\omega R}, \quad (5)$$

式中:  $S$  为滑移率;  $v$  为金属带的线速度, m/s;  $\omega$  为带轮转速, rad/s;  $R$  为带轮工作半径, m.

CVT 传递效率描述了金属带夹紧力与传递转矩之间的关系,其定义为<sup>[9]</sup>

$$\eta_t = \eta_\omega \eta_T, \quad (6)$$

式中:  $\eta_t$  为总传递效率;  $\eta_\omega$  为转速传递效率;  $\eta_T$  为转矩传递效率.对传递效率进一步的分析可知, CVT 的传递效率由从动缸压力决定.当从动缸压力过大时,则液压系统压力较大,导致较大的金属带转矩损失;当从动缸压力过小时,夹紧力不足导致金属带和带轮之间的速度损失较大.因此,合理控制金属带与带轮的滑移率及从动缸压力,可以提高变速器的传递效率.

## 3 最优滑移率控制策略

速比和滑移率是影响带轮与金属带之间摩擦系数的两个最重要的因素.滑移率与摩擦系数之间的关系,可以用以下的数学模型描述<sup>[10]</sup>:

$$\bar{\mu} = \mu_{\max} (1 - e^{\beta S}), \quad (7)$$

式中:  $\bar{\mu}$  为金属带与带轮的摩擦系数;  $\mu_{\max}$  为最大摩擦系数;  $\beta$  为摩擦系数变化率;  $e$  取 2.718.

图 2 所示为传动效率测试数据.由此可知,每个速比下都存在一个传动效率最高点,这个点所对应的滑移率就是该速比下的最优滑移率.由此建立最优滑移率与速比之间的关系,如图 3 所示.

滑移率控制系统根据速比  $i$  确定金属带与带轮的目标滑移率  $S_{\text{obj}}$ ,与当前实际的滑移率  $S_{\text{real}}$  进行比较,通过 PID 控制器得出当前所需要的夹紧力,进而将变速器的滑移率控制在最佳滑移率附近<sup>[11]</sup>,滑移率控制策略如图 4 所示<sup>[12]</sup>.

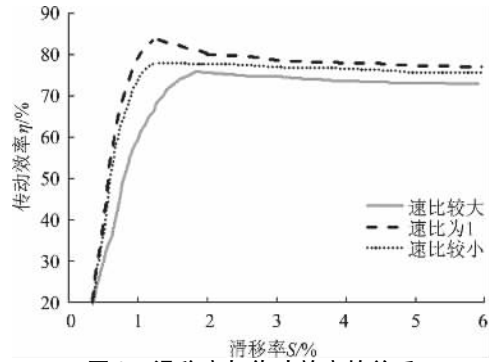


图 2 滑移率与传动效率的关系

Fig. 2 Relationship between slip ratio and transmission efficiency

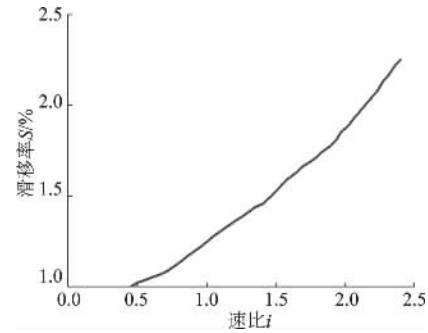


图 3 最优滑移率

Fig. 3 Optimal slip ratio

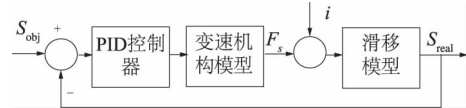


图 4 滑移率控制策略

Fig. 4 Slip ratio control strategy

在该控制策略下,当实际滑移率大于目标滑移率时,则适当加大从动轮夹紧力,使金属带与带轮间的滑移率减小;当实际滑移率小于目标滑移率时,则减小从动轮夹紧力,使滑移率增加,增加摩擦系数.

## 4 建模与仿真

利用 AMESim 和 Simulink 建立联合仿真模型.其中,在 AMESim 中建立变速机构模块、系统液压模块和整车模块,在 Simulink 中建立发动机模块、驾驶员输入模块和 CVT 控制模块<sup>[13]</sup>,所建的模型如图 5 和图 6 所示.

在此模型中,驾驶员输入模块可以模拟多种简单工况,夹紧力和速比控制模块可以调整控制策略,以对比各个控制策略的优劣,方便了后续的研究.

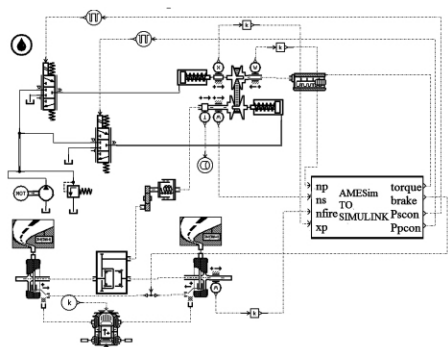


图5 基于滑移率在AMESim中建立的仿真模型

Fig. 5 Simulation model built in AMESim based on

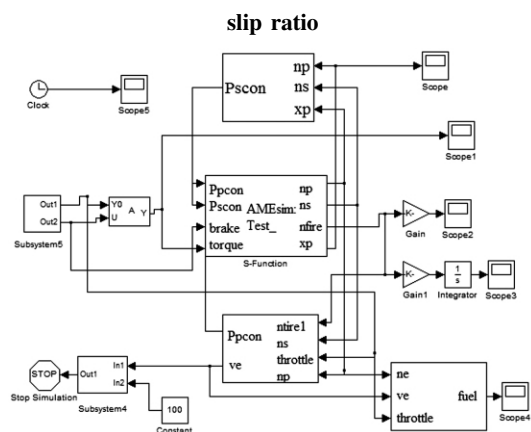


图6 基于滑移率控制在Simulink中建立的仿真模型

Fig. 6 Simulation model built in Simulink  
based on slip ratio

## 5 滑移率控制策略与传统控制策略的比较

### 5.1 夹紧力

选取水平道路起步和紧急制动两种工况进行仿真,对滑移率控制策略和传统控制策略进行比较分析,结果如图7和图8所示。由仿真结果可知,滑移控制可以明显降低从动缸压力,减小夹紧力。同时应当注意,在紧急制动中,由于载荷迅速增加,想要避免出现过大的滑移,需要从动缸压力的迅速增加。

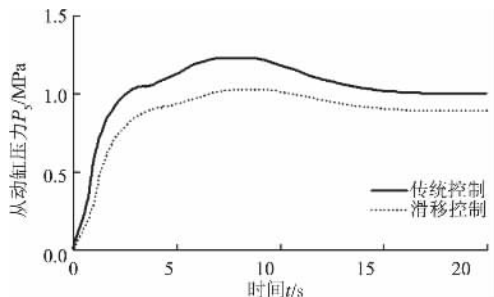


图7 起步工况下从动缸压力变化

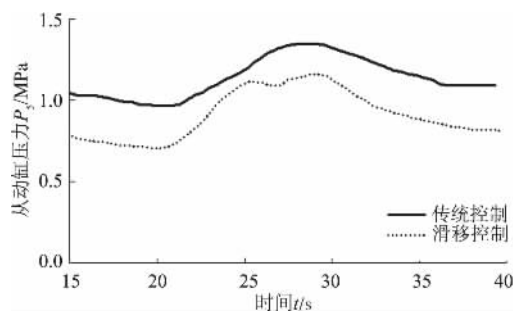
Fig. 7 The pressure change of the driven cylinder  
under the starting condition

图8 紧急制动工况下从动缸压力变化

Fig. 8 The pressure change of the driven cylinder  
under the emergency braking condition

图9所示为紧急制动时的滑移率变化。可以看出,在紧急制动时出现了一个较大的滑移,滑移率峰值达到15%,在5s内,滑移率迅速减小。这表明,在降低夹紧力后,CVT的抗扰动能力下降,在出现极限工况时,金属带和带轮会在短时间内出现一定磨损。因此,下一步应该调整控制策略,减小极限工况下的峰值滑移率,并使滑移率能在更短的时间内迅速下降,以提高控制系统的载荷适应能力。

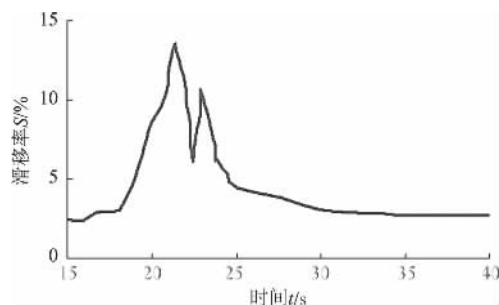


图9 紧急制动工况下滑移率变化

Fig. 9 The slip rate change under emergency  
braking condition

### 5.2 传动效率

对比不同节气门开度的工况下的传动效率,对比结果如图10所示。

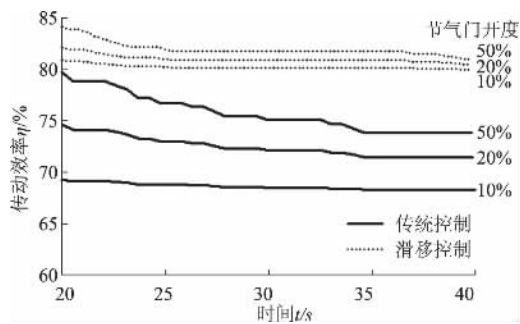


图10 各节气门开度下传动效率变化

Fig. 10 The change of drive efficiency under various  
sections of valve opening

如图 10 所示,在不同节气门开度下,采用滑移控制策略的传动效率较传统控制策略都有所提高.同时注意到,在节气门开度逐渐增大的过程中,采用滑移率控制策略的传动效率一直维持在 80% 至 85% 之间,较为稳定.而采用传动控制策略的传动效率则从 65% 至 80% 随节气门开度而逐渐提高.

## 6 硬件在环仿真试验

### 6.1 硬件在环仿真平台的搭建

笔者搭建的 CVT 硬件在环仿真平台如图 11 所示.其主要包括两部分:一是基于 CVT 台架试验的 Simulink 仿真模型;另一个是基于单片机设计的 CVT 控制器.



图 11 硬件在环仿真平台

Fig. 11 Hardware in loop simulation platform

### 6.2 试验结果

分别测量不同车速下的百公里油耗,结果如图 12 所示.可以看出,基于滑移率的夹紧力控制能提升燃油经济性

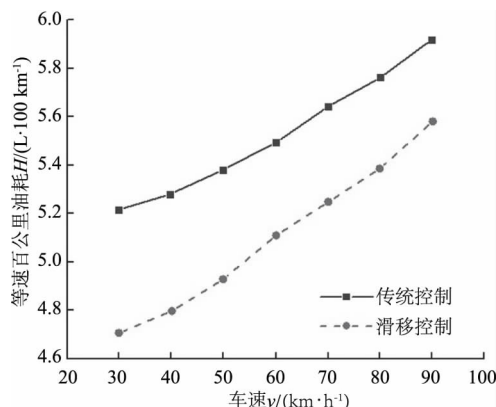


图 12 等速百公里油耗

Fig. 12 Constant speed fuel consumption per hundred kilometers

## 7 结论

基于夹紧力控制策略,通过 AMESim 和 MATLAB/Simulink 的联合仿真对比传统夹紧力控制

策略和滑移率控制策略的优劣.仿真结果表明,基于滑移率的夹紧力控制策略能通过减小夹紧力来提升 CVT 的传动效率.硬件在环仿真试验表明,基于滑移率的夹紧力控制策略能有效地提升整车燃油经济性.同时,由降低夹紧力导致的 CVT 抗扰动能力的下降不容忽视.因此,基于滑移的夹紧力控制策略在现阶段也有其局限性,应该加强控制方法的载荷适应能力和工况适应能力.

## 参考文献:

- [1] 程乃士. 汽车金属带式无级变速器—CVT 原理和设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 刘开昌, 吴云杰. 封闭式锥盘无级变速器无循环功率条件及应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(6): 84–87.
- [3] 蔡源春. 金属带式无级变速器燃油经济性及其系统可靠性关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2011: 76–77.
- [4] 程乃士, 张德臻, 刘温. 金属带式车用无级变速器 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(12): 1421–1423.
- [5] 龚贤武, 吴德军, 高闯, 等. 混联型混合动力汽车建模及控制策略研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 73–77.
- [6] 杨凯. 金属带式 CVT 夹紧力控制及液压控制系统的仿真分析 [D]. 长沙: 湖南大学机械工程学院, 2012: 12–15.
- [7] AKEHURST S, VAUGHAN N D, PARKER D A. Modeling of Loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission-part2: torque losses due to band friction [J]. Automobile engineering, 2004, 218: 1283–1293.
- [8] BONSEN B. Performance optimization of the push-belt CVT by variator slip control [J]. Int J of Vehicle Design, 2005, 39(3): 17–26.
- [9] NILABH S, IMTIAZ H. Transient dynamics of the metal V-belt CVT: effects of pulley flexibility and friction characteristic [J]. Journal of computational and nonlinear dynamics, 2007, 2(1): 1317–1326.
- [10] AKEHURST S, VAUGHAN N D, PARKER D A. Modeling of loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission-part1: torque losses due to band friction [J]. Automobile engineering, 2004, 218: 1269–1281.
- [11] CARBONE G, MANGIALARDI L, MANTRIOTA G. Theoretical model of metal V-belt drives during ratio changing speed [J]. ASME journal of mechanical design, 2000, 123(1): 111–117.
- [12] 罗勇, 孙冬野, 秦大同, 等. 考虑 CVT 效率的无级变

速车辆最佳经济性控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 80-86.

[13] 史天亮. 基于 AMESim 捣固车作业走行系统仿真及改进[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(5): 89-92.

## Research on Clamping Force Control Strategy in CVT Based on Slip Ratio

YUAN Xiaohong, CHEN Long, WANG Yiping

(Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The clamping force control of continuously variable transmission was studied, and the traditional force control strategy was improved. The slip mechanism of metal belt and pulley was analyzed, with the description of the slip phenomenon. The influence of slip ratio on the belt wheel drive was studied, and the mathematical model was established by the test data. The combined simulation model based on AMESim and Simulink was established. Combined with simulation results, the new control strategy and the traditional control strategy are compared. The simulation results showed that the clamping force was reduced to the original 85% - 90% with the new control strategy. The new control strategy made transmission efficiency maintained between 80% to 85%, with throttle opening increased from 10% to 50%. In extreme conditions, the slip rate control would produce a certain degree of slip rate fluctuations, which might need further improvement.

**Key words:** CVT; slip ratio; clamping force; transfer efficiency; PID

(上接第 81 页)

## Experimental Study about Surface Quality in High-Speed Grinding Condition for 18CrNiMo7-6

WANG Dong, LIU Yufan, CHEN Xin

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In the condition of high-speed grinding, a single factor process experiment was carried out for 18CrNiMo7-6, which usually used in gear material, making grinding parameters such as wheel velocity, grinding depth and workpiece velocity variables. This study aimed to explore the effects of high-speed grinding on surface quality of experimental material from surface roughness and surface hardness, to analyze the effects of grinding parameters on surface roughness and surface hardness, and to explain the varying pattern of surface roughness and surface hardness of experimental material in high-speed grinding. The results showed that surface roughness decreased with the increase of wheel velocity and increased with the increase of grinding depth and workpiece velocity; surface hardness decreased with the increase of grinding depth, and increased with the increase of workpiece velocity, but surface hardness decreased firstly and then decreased and tended to be stable finally with the increase of wheel velocity.

**Key words:** high-speed grinding; surface roughness; surface hardness; specific grinding energy; wheel velocity; Grinding depth; workpiece velocity

# 基于位移响应最小化的约束阻尼结构优化设计

侯俊剑, 房占鹏, 何文斌

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对约束阻尼结构的动力学拓扑优化问题, 基于实体各向同性材料惩罚模型(SIMP 插值模型), 以约束阻尼结构位移响应最小化为优化目标, 约束阻尼材料使用量为约束条件, 建立了约束阻尼结构位移响应拓扑优化模型. 在位移响应的灵敏度分析时, 将模态阻尼比的灵敏度引入到优化目标的灵敏度分析中, 使优化目标的灵敏度计算更加准确合理. 采用移动渐近线法(MMA)对拓扑优化模型进行求解. 通过算例分析, 验证了提出的约束阻尼结构的动力学优化算法的正确性和有效性.

**关键词:** 约束阻尼; 拓扑优化; 灵敏度; 位移响应

**中图分类号:** TB53

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.012

## 0 引言

约束阻尼处理技术对原结构改变少, 易于实施, 能有效地抑制结构宽频振动噪声, 在航空航天、汽车和舰船等行业的减振降噪方面获得广泛应用<sup>[1-2]</sup>. 为了降低成本及提高阻尼材料的利用效率, 需对约束阻尼材料的布置位置进行优化. 目前, 约束阻尼结构的拓扑优化大多以模态阻尼比(模态损耗因子)为优化目标, 旨在通过提高约束阻尼结构的模态阻尼比(模态损耗因子)来抑制结构的振动和噪声辐射<sup>[3-6]</sup>. 在此研究中, 仅考虑了结构模态阻尼比(模态损耗因子), 未考虑振型和固有频率的变化对结构振动响应影响.

以结构动响应为优化目标的动力学拓扑优化具有良好的工程实用性和设计针对性, 通过对结构的拓扑优化来抑制结构的振动响应<sup>[7-9]</sup>, 成为结构拓扑优化的研究热点. 在此研究中, 结构为无阻尼结构或者优化过程中结构阻尼变化不大, 可将结构阻尼视为定值, 仅考虑了振型和固有频率的变化对结构动响应的影响. 对于约束阻尼结构而言, 将结构阻尼视为定值则会带来很大误差, 在灵敏度分析时, 需要综合考虑模态阻尼比、固有频率和振型对位移响应的影响.

笔者基于实体各向同性材料惩罚模型(SIMP

插值模型), 以位移响应为优化目标, 建立了约束阻尼结构的拓扑优化模型. 考虑到约束阻尼结构的模态阻尼比在优化迭代过程中的变化, 将模态阻尼比的灵敏度引入到优化目标的灵敏度计算中, 提高灵敏度计算精度. 采用 MMA 算法, 编制了约束阻尼结构的优化流程, 提出了约束阻尼结构以位移响应最小化为目标的优化方法.

## 1 拓扑优化模型

在实际工程应用中, 结构的某些部分的振动响应需要加以控制, 因而, 以约束阻尼结构某些部位的位移响应为优化目标, 通过优化使其位移响应达到最小化. 为了严格控制结构的整体重量, 以约束阻尼材料使用体积为约束条件, 约束阻尼材料单元为设计变量建立拓扑优化模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } \rho_e, e = 1, 2, \dots, n; \\ \min s = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b X_j(\omega_i); \\ \text{s. t. } \frac{\sum_{e=1}^n \rho_e V_e}{\sum_{e=1}^n V_e} \leq V_f; \\ (K - \omega_r^2 M) \varphi_r = 0; \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1, e = 1, 2, \dots, n. \end{array} \right. \quad (1)$$

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505433); 河南省高等学校重点科研项目(16A460028)

作者简介: 侯俊剑(1982—), 男, 河南郑州人, 郑州轻工业学院讲师, 博士, 主要从事振动与噪声控制研究, E-mail: houjian220@163.com.



式中:  $\rho_e$  为设计变量;  $\rho_{\min}$  为设计变量的下界, 本文取值为 0.000 1;  $a$  为激励频率数;  $b$  为优化目标点数;  $V_e$  为每个约束阻尼单元的体积;  $V_f$  为体积分数.

## 2 灵敏度分析

简谐激励下, 结构的振动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{f}(t), \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别为质量、阻尼和刚度矩阵, 均为  $N \times N$  阶对称矩阵,  $N$  表示结构自由度数;  $\mathbf{f}(t) = \mathbf{F}e^{i\omega_f t}$  为激励力矢量, 其中,  $\mathbf{F}$  为激励力的幅值矢量,  $\omega_f$  为激励频率;  $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$  和  $\ddot{\mathbf{X}}$  分别为结构的位移、速度和加速度矢量.

对于约束阻尼结构, 质量矩阵  $\mathbf{M}$  和刚度矩阵  $\mathbf{K}$  分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{M}_b + \mathbf{M}_v + \mathbf{M}_c; \\ \mathbf{K} = \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_v + \mathbf{K}_c. \end{cases} \quad (3)$$

式中: 下标 b、v 和 c 分别表示基本层、黏弹性阻尼层和约束层.

根据模态应变能法<sup>[10]</sup>, 约束阻尼结构的第  $r$  阶的模态损耗因子为:

$$\eta_r = \frac{\eta_v \boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{K}_v \boldsymbol{\varphi}_r}{\boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_r}, \quad (4)$$

式中:  $\eta_r$  为约束阻尼材料的损耗因子;  $\boldsymbol{\varphi}_r$  为约束阻尼结构的第  $r$  阶模态振型.

模态阻尼比和模态损耗因子的关系为<sup>[11]</sup>

$$\eta = 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (5)$$

如图 1 所示, 当  $0 \leq \eta \leq 0.3$  时, 模态损耗因子和模态阻尼比的关系可近似为:

$$\eta = 2\zeta. \quad (6)$$

通过以上分析, 式(2)可转换为:

$$\ddot{\mathbf{y}}_i + 2\omega_i \zeta_i \dot{\mathbf{y}}_i + \omega_i^2 \mathbf{y}_i = \mathbf{q}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

式中:  $\omega_i$  和  $\zeta_i$  分别为第  $i$  阶圆频率和模态阻尼比;  $\mathbf{y}_i$  和  $\mathbf{q}_i$  分别为模态坐标下的结构位移和激励力.

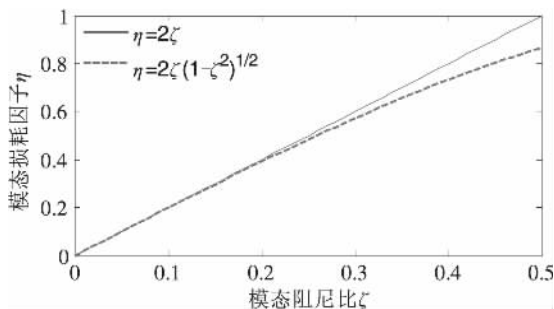


图 1 模态损耗因子  $\eta$  与模态阻尼比  $\zeta$  关系

Fig. 1 Relationship between loss factor  $\eta$  and damping ratio  $\zeta$

根据频率响应法, 在外部激励  $\mathbf{f}(t)$  在约束阻尼结构的第  $d$  自由度作用下, 约束阻尼结构的第  $j$  自由度的稳态位移响应的幅值  $X_j$  可表示为:

$$X_j(\omega_f) = \sum_{r=1}^N \boldsymbol{\varphi}_{j,r} \| (\omega_r^2 - \omega_f^2 + i2\zeta_r \omega_r \omega_f)^{-1} \| \cdot \boldsymbol{\varphi}_{d,r} F_d, \quad (8)$$

式中:  $N$  为模态叠加法所取阶数;  $\boldsymbol{\varphi}_{j,r}$ 、 $\boldsymbol{\varphi}_{d,r}$  为第  $r$  阶模态中第  $j$  和  $d$  自由度的振型值;  $F_d$  表示施加在  $d$  自由度上简谐力激励的幅值.

设  $D_r = (\omega_r^2 - \omega_f^2 + i2\zeta_r \omega_r \omega_f)^{-1}$ , 稳态响应幅值关于设计变量的  $\rho_e$  灵敏度可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial s}{\partial \rho_e} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{\partial X_j(\omega_i)}{\partial \rho_e}; \\ \frac{\partial X_j(\omega_i)}{\partial \rho_e} = \sum_{r=1}^N \left( \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_{j,r}}{\partial \rho_e} \| D_r \| \boldsymbol{\varphi}_{d,r} + \boldsymbol{\varphi}_{j,r} \frac{\partial \| D_r \|}{\partial \rho_e} \boldsymbol{\varphi}_{d,r} + \boldsymbol{\varphi}_{j,r} \| D_r \| \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_{d,r}}{\partial \rho_e} F_d \right). \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \| D_r \|}{\partial \rho_e} &= ((\text{RE}(D_r))^2 + (\text{IM}(D_r))^2)^{-0.5} \cdot \\ &(\text{RE}(D_r) \frac{\partial (\text{RE}(D_r))}{\partial \rho_e} + \text{IM}(D_r) \frac{\partial (\text{IM}(D_r))}{\partial \rho_e}), \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\text{RE}(D_r)$  和  $\text{IM}(D_r)$  分别为  $D_r$  的实部和虚部.

在以往动力学拓扑优化的研究中, 对  $\frac{\partial \| D_r \|}{\partial \rho_e}$  的求解, 常将模态阻尼比看为常量. 笔者考虑到约束阻尼结构在优化过程中, 模态阻尼比有较大的变化<sup>[6]</sup>, 将模态阻尼比视为定值, 会导致灵敏度分析有较大的误差, 或会出现错误的优化结果, 因而, 将模态阻尼比的灵敏度  $\frac{\partial \zeta_r}{\partial \rho_e}$  引入到式(10)的求解中, 提高灵敏度的计算精度. 因而, 式(9)求解的关键在于计算  $\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_r}{\partial \rho_e}$ 、 $\frac{\partial \omega_r^2}{\partial \rho_e}$  和  $\frac{\partial \zeta_r}{\partial \rho_e}$ . 振型灵敏度  $\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_r}{\partial \rho_e}$  的求解可采用不完备振型叠加法<sup>[12]</sup>, 即

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_r}{\partial \rho_e} = \sum_{k=1}^N \alpha_{r,k} \boldsymbol{\varphi}_k. \quad (11)$$

$$\alpha_{r,k} = \begin{cases} -\frac{1}{2} \boldsymbol{\varphi}_k^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} \boldsymbol{\varphi}_r, & r = k; \\ \frac{\boldsymbol{\varphi}_k^T (\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} - \omega_r^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e}) \boldsymbol{\varphi}_r}{\omega_r^2 - \omega_k^2}, & r \neq k. \end{cases} \quad (12)$$

$\frac{\partial \omega_r^2}{\partial \rho_e}$  的求解如下式:

$$\frac{\partial \omega_r^2}{\partial \rho_e} = \boldsymbol{\varphi}_r^T \left( \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} - \omega_r^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} \right) \boldsymbol{\varphi}_r. \quad (13)$$

$\frac{\partial \zeta_r}{\partial \rho_e}$  的求解公式如下:

$$\frac{\partial \zeta_r}{\partial \rho_e} = \frac{\eta_r}{2} \frac{\boldsymbol{\varphi}_r^T \frac{\partial \mathbf{K}_v}{\partial \rho_e} \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_r - \boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{K}_v \boldsymbol{\varphi}_r \boldsymbol{\varphi}_r^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} \boldsymbol{\varphi}_r}{(\boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_r)^2}. \quad (14)$$

笔者以约束阻尼结构的约束阻尼材料单元为设计变量,因而,根据 SIMP 插值模型对约束阻尼材料进行插值:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_v^e = \rho_e^p \mathbf{M}_{v0}^e; \\ \mathbf{K}_v^e = \rho_e^q \mathbf{K}_{v0}^e; \\ \mathbf{M}_c^e = \rho_e^p \mathbf{M}_{c0}^e; \\ \mathbf{K}_c^e = \rho_e^q \mathbf{K}_{c0}^e. \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $p$  和  $q$  为惩罚因子,本文取值分别为 1 和 3;  $\mathbf{M}_{v0}^e$ 、 $\mathbf{M}_{c0}^e$ 、 $\mathbf{K}_{v0}^e$  和  $\mathbf{K}_{c0}^e$  分别为单元  $e$  的密度值  $\rho_e = 1$  时的刚度矩阵和质量矩阵;  $\mathbf{K}_v^e$  和  $\mathbf{K}_c^e$  分别为单元  $e$  的黏弹性阻尼层的刚度矩阵和约束层的质量矩阵.  $\mathbf{M}_v^e$  和  $\mathbf{M}_c^e$  分别为单元  $e$  的黏弹性阻尼层的质量矩阵和约束层的质量矩阵.

约束阻尼结构总的质量矩阵和刚度矩阵可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \sum_{e=1}^n (\mathbf{M}_b^e + \rho_e^p (\mathbf{M}_{v0}^e + \mathbf{M}_{c0}^e)); \\ \mathbf{K} = \sum_{e=1}^n (\mathbf{K}_b^e + \rho_e^q (\mathbf{K}_{v0}^e + \mathbf{K}_{c0}^e)). \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{则} \quad \begin{cases} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} = \mathbf{M}_{v0}^e + \mathbf{M}_{c0}^e; \\ \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} = q \rho_e^{q-1} (\mathbf{K}_{v0}^e + \mathbf{K}_{c0}^e); \\ \frac{\partial \mathbf{K}_v}{\partial \rho_e} = q \rho_e^{q-1} \mathbf{K}_{v0}^e. \end{cases} \quad (17)$$

将式(10)~(14)和式(17)代入式(9)可得考虑模态阻尼比灵敏度的目标函数灵敏度.为抑制拓扑优化过程中出现棋盘格现象,采用网格独立滤波技术<sup>[13]</sup>对目标函数的灵敏度滤波,即对目标函数灵敏度进行再分配,使单元灵敏度等于以单元形心为中心的指定半径区域内的所有单元灵敏度的线性加权.

### 3 拓扑优化的实现流程

MMA 方法是一种高效的适合于求解具有复杂目标函数和多约束条件的优化求解器.笔者采

用 MMA 方法对建立的拓扑优化模型进行求解,拓扑优化流程如图 2 所示.



图 2 拓扑优化流程图

Fig. 2 Diagram for the topology optimization procedures

## 4 算例分析

### 4.1 两端固支的约束阻尼板拓扑优化

约束阻尼矩形板的长和宽分别为 0.4 m 和 0.2 m,短边的两端固定.基板为铝板,厚度为 0.003 m,密度为 2 800 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.3.阻尼层厚度为 0.000 5 m,密度为 1 200 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 12 MPa,泊松比为 0.495,阻尼材料的损耗因子为 0.5,约束层厚度为 0.001 m,密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.3.

简谐载荷作用于约束阻尼矩形板中心位置,幅值为 100 N,分别以第一阶和第三阶共振频率处的垂向共振位移最小化为优化目标,体积分数为 0.5.优化的拓扑构型分别为图 3 和图 4,图中黑色为粘贴约束阻尼材料位置.



图 3 拓扑构型(一阶)

Fig. 3 Optimal distribution of damping material (the first modal)



图4 拓扑构型(三阶)

Fig. 4 Optimal distribution of damping material (The third modal)

图5为一阶共振位移最小化为优化目标的体积分数和优化目标值的迭代历程.从图5可以看出,体积分数在14次迭代后保持固定值0.5;经过120次迭代,优化目标值由初始结构的0.027 m减小为0.008 1 m.图6为三阶共振位移最小化为优化目标的体积分数和优化目标值的迭代历程,从图中可以看出,体积分数在7次迭代后保持固定值0.5;经过120次迭代,优化目标值由初始结构的 $1.99 \times 10^{-4}$  m减小为 $1.47 \times 10^{-4}$  m.从图5和图6可以看出,以一阶和三阶共振位移最小化为优化目标,优化的约束阻尼结构比初始约束阻尼结构在优化目标点处的共振位移响应分别减小了70%和26%,说明提出的约束阻尼结构优化算法的正确性和有效性.

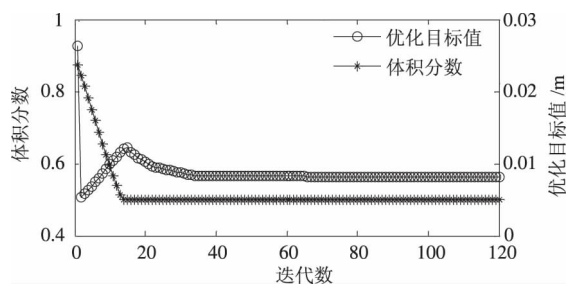


图5 体积分数和优化目标值的迭代历程(一阶)

Fig. 5 Iteration history of optimization objective and volume fraction (the first modal)

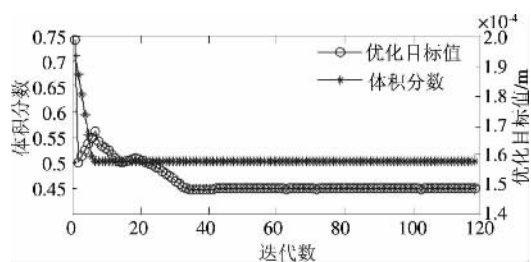


图6 体积分数和优化目标值的迭代历程(三阶)

Fig. 6 Iteration history of optimization objective and volume fraction (the third modal)

#### 4.2 约束阻尼悬臂板的拓扑优化

图7所示的悬臂约束阻尼板结构,基板为铝板,其上覆盖约束阻尼材料.基板长为0.2 m,宽

为0.1 m,厚度为0.001 5 m,密度为 $2\,800\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.3.约束阻尼材料为SOUNDCOAT公司的SOUNDFOIL TYPE D,阻尼层为黏弹性高分子聚合物,约束层为铝箔,阻尼层厚度为0.000 05 m,密度为 $1\,200\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为12 MPa,泊松比为0.495,阻尼材料的损耗因子为0.5.约束层厚度为0.000 13 m,密度为 $2\,700\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.3.左端固定,右端自由.

简谐载荷作用于右边界中心位置,幅值为1 N,激励频带分别为:1~180 Hz和181~300 Hz,频率间隔为0.6 Hz,以频带内激励点处垂向位移响应的和最小化为优化目标,体积分数为0.5.图8为1~180 Hz激励频带下的拓扑构型,图中黑色为粘贴约束阻尼材料位置.



图7 悬臂约束阻尼板

Fig. 7 The cantilever constrained layer damping plate

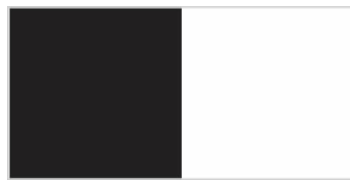


图8 拓扑构型(激励频带[1~180]Hz)

Fig. 8 Optimal distribution of damping material (excitation frequency band [1~180] Hz)

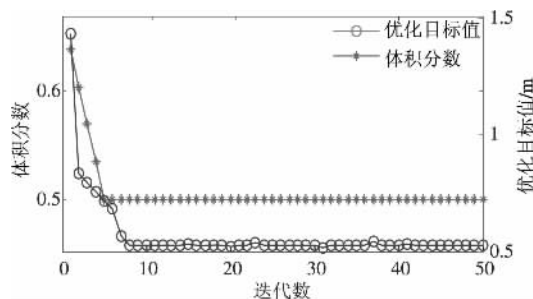


图9 体积分数和优化目标值的迭代历程(激励频带[1~180]Hz)

Fig. 9 Iteration history of optimization objective and volume fraction (excitation frequency band [1~180] Hz)

图9为激励频带1~180 Hz时,体积分数和优化目标值的迭代历程,体积分数在5次迭代后保持固定值0.5;经过50次迭代,优化目标值由初始结构的1.41 m减小为0.54 m.图10为180~300 Hz激励频带下的拓扑构型.图11为激励频

带 181 ~ 300 Hz 时,体积分数和优化目标值的迭代历程,体积分数在 8 次迭代后保持固定值 0.5; 经过 50 次迭代,优化目标值由初始结构的 0.058 m 减小为 0.042 m. 在 1 ~ 180 Hz 和 181 ~ 300 Hz 两个频带的激励下,优化的约束阻尼结构比初始约束阻尼结构都在优化目标点处的位移响应的和分别减小了 61.7% 和 27.6%.



图 10 拓扑构型(激励频带 181 ~ 300 Hz)

Fig. 10 Optimal distribution of damping material (excitation frequency band 181 ~ 300 Hz)

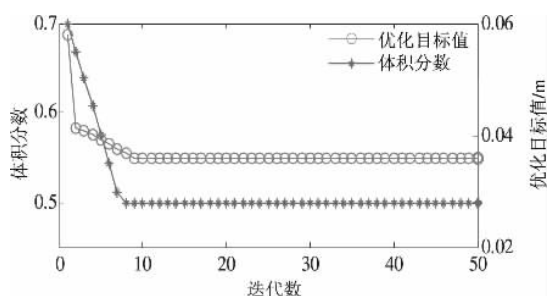


图 11 体积分数和优化目标值的迭代历程 (激励频带 181 ~ 300 Hz)

Fig. 11 Iteration history of optimization objective and volume fraction (excitation frequency band 181 ~ 300 Hz)

图 12 为没有阻尼材料只有基板和约束层结构与两个频段优化结构的频率响应曲线对比. 从图 12 可以看出,在优化的频段内优化结构比没有阻尼材料结构的振动响应有明显的降低,具有很好的减振效果,表明笔者提出的约束阻尼结构的优化算法对频带激励下约束阻尼结构的优化也是有效的.

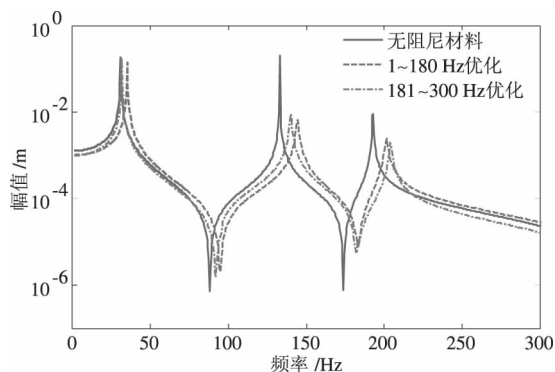


图 12 频率响应曲线对比

Fig. 12 The comparison of FRF

## 5 结论

(1) 基于实体各向同性材料惩罚模型 (SIMP 插值模型), 以约束阻尼结构位移响应为优化目标, 约束阻尼材料使用量为约束条件, 约束阻尼单元为设计变量, 建立了约束阻尼结构位移响应拓扑优化模型.

(2) 考虑到在优化过程中, 约束阻尼结构的模态阻尼比有较大的变化, 将模态阻尼比灵敏度引入到目标函数的灵敏度分析中, 并采用模态应变能法分析约束阻尼结构的模态阻尼比灵敏度.

(3) 采用 MMA 算法对建立的优化模型进行求解, 编制了其优化流程, 并对共振位移响应和频带激励下的位移响应和最小化为优化目标的约束阻尼结构进行优化, 得到的优化构型的位移响应比初始结构都有较大幅度的减小, 验证了笔者提出的优化算法的正确性和有效性.

## 参考文献:

- [1] 杜华军, 于百胜, 郑钢铁, 等. 蜂窝锥壳卫星适配器约束阻尼层振动抑制分析 [J]. 应用力学学报, 2003, 20 (3): 5 - 10.
- [2] RAO M D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial air - planes [J]. Journal of sound and vibration, 2003, 262 (3): 457 - 474.
- [3] ANSARI M, KHAJEPOUR A, ESMAILZADEH E. Application of level set method to optimal vibration control of plate structures [J]. Journal of sound and vibration, 2013, 332: 687 - 700.
- [4] ZHENG H, CAI C, PAU G S H, et al. Minimizing vibration response of cylindrical shells through layout optimization of passive constrained layer damping treatments [J]. Journal of sound and vibration, 2005, 279 (3): 739 - 756.
- [5] KIM S Y, MECHEFSKE C K, KIM I Y. Optimal damping layout in a shell structure using topology optimization [J]. Journal of sound and vibration, 2013, 332: 2873 - 2883.
- [6] 房占鹏, 郑玲. 约束阻尼结构的双向渐进拓扑优化 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (8): 165 - 170.
- [7] 彭细荣, 隋允康. 强迫谐振动下连续体结构拓扑优化 [J]. 固体力学学报, 2008, 29 (2): 157 - 162.
- [8] SHU L, WANG M Y, FANG Z, et al. Level set based structural topology optimization for minimizing frequency response [J]. Journal of sound and vibration, 2011, 330 (24): 5820 - 5834.

(下转第 96 页)

# 基于性能驱动的校园食堂建筑被动式节能设计

张建涛, 周丽华

(郑州大学 建筑学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 以校园食堂建筑为研究对象, 从建筑环境性能驱动设计角度, 结合地区气候条件对校园食堂建筑的被动式节能设计进行分析研究. 在建筑设计阶段, 从环境整合、空间组织、界面设计、模拟优化四个层面, 构建校园食堂建筑被动式节能设计原则和方法. 结合案例归纳出郑州地区被动式节能设计原则和校园食堂建筑被动式节能设计策略.

**关键词:** 校园食堂建筑; 被动式节能设计; 性能驱动

**中图分类号:** TU201

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201703.002

## 0 引言

建筑低能耗涉及建筑的规划、设计、建造、使用、拆除、再利用等各个环节. 国内外现有可持续建筑评价体系中, 建筑能耗的分数权重多为建筑设备系统性能<sup>[1]</sup>. 由于这样的评价体系, 使得在建筑的规划和设计阶段, 建筑被动式节能设计的要求容易被忽视. 如果在设计阶段强调被动式节能的技术应用, 则更能发挥建筑设备系统的效能. 国内外有关建筑被动式节能设计研究可归纳为: 一是侧重于气候分析及策略的环境整合理论; 二是侧重于从建筑外部和内部空间要素变化, 以形体构成手法、空间的组合方式、空间界面调节等, 提出建筑生态化设计策略的空间调节理论<sup>[2]</sup>. 这些理论研究逐步从定性分析到定量模拟, 并应用到设计实践. 基于性能驱动理论对校园食堂建筑被动式节能设计研究, 即以就餐人员对功能空间的建筑物理环境要求为依据, 在设计阶段, 从环境整合和空间调节两方面入手, 强调被动式节能技术应用, 并精确定量模拟建成后使用效果.

## 1 校园食堂建筑

食堂建筑属于建造数量大、建造经费条件一般的公共建筑. 食堂建筑按其功能属性可分为办公食堂、校园食堂、医院食堂等. 校园食堂建筑与其它类型的食堂不同. 在建筑空间形态方面, 绝大

多数校园食堂建筑属于多层大空间建筑, 其空间完整、空间体积大、使用区域比例小、外壁比例大. 这些空间特征使得室内通风换气次数少、建筑内冷热湿负荷特性特殊. 在使用功能方面, 校园食堂建筑具有很强的分段性、季节性. 早中晚就餐时间段内使用, 其余时间较少使用, 且会出现大量阵发性人流. 寒暑假期间基本不使用. 校园食堂建筑属于非盈利性或微盈利性的校园公共进餐场所, 其就餐者主要为本校师生, 且就餐时间内人员密集.

## 2 被动式节能及其影响因素

### 2.1 被动式节能

被动式节能主要是针对于主动式节能而言的, 在建筑规划与设计阶段, 侧重于通过建筑自身的规划布局、空间组织、环境配置等方式来应对室外气候的变化, 并非以机械设备进行环境调节, 使室内空间环境更接近使用者的舒适范围, 从而降低建筑对资源能源的消耗和环境的负荷.

### 2.2 地区气候条件

气候条件是被动式节能设计的主要影响因素. 气候影响因素主要包括温度、湿度见表1<sup>[3]</sup>, 以及主导风等. 风速的人体舒适范围, 室外为3~5.7 m/s, 室内为0.25~1 m/s. 郑州地区夏季炎热较湿润, 冬季寒冷干燥, 夏季以东南向风为主、冬季多东北、西北向风, 要达到室内空间环境接近使用者的舒适范围, 建筑节能设计需要兼顾过渡季

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2016-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508516)

作者简介: 张建涛(1965—)男, 河北保定人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事建筑设计及其理论研究, E-mail: jiantao@zzu.edu.cn.

节的通风、夏季引导东南和西南风通风、冬季阻挡东北风和西北风,并做好建筑夏季散热、隔热,冬季保温、集热。

表1 气候影响因素

Tab.1 Climatic factors in Zhengzhou

气候影响要素	温度/℃		湿度%	
	夏	冬	夏	冬
人体舒适范围	24~26	16~18	40~60	40~60
郑州地区气候数据最大值	27~32	7~12	85~95	29~39

注:表中温度指干球温度,湿度指相对湿度

### 3 性能驱动设计

#### 3.1 性能驱动设计

性能驱动设计是以人对建筑物理环境需求为依据,结合地区气候条件,在建筑设计过程中利用影响建筑环境性能的气候因素,对建筑的外部环境、空间形态、界面形态等进行系统地整合设计,以获得建筑室内环境舒适性,并减少资源能源消耗的被动式建筑节能策略。性能驱动设计在综合满足各项性能要求的前提下,在多样的空间形态和功能解决方案中,选择出最佳方案,实现对多个目标问题的优化求解。它是一种探索建筑空间生成与环境能耗数值模拟交互驱动的设计方法<sup>[4][5]</sup>。

#### 3.2 性能驱动设计技术路径

以性能驱动的建筑空间形态整合的技术路径见图1。

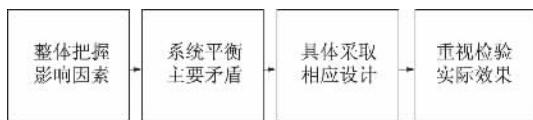


图1 被动式节能设计技术路径示意图

Fig.1 Technical path of passive energy-saving design

(1) 整体把握影响因素。针对地区自然气候条件、御寒防暑方式、实际建造技术等因素,分析被动式建筑节能设计的可行性。

(2) 系统平衡主要矛盾。从调节建筑空间形态的过程中,对空间的基本要素和构成方式及界面的设计的各个设计因素进行解析,平衡出设计的主导因素。

(3) 具体采取相应设计。针对平衡出的设计主导因素,从对风的引导与阻隔、光的反射与遮挡,冬季保温集热与夏季散热隔热等具体技术手段着手,使建筑室内空间环境达到舒适度的要求。

(4) 重视检验实际效果。利用计算机对建筑方案的空间内的气流场、温度场进行模拟分析,结合设计的预期值,整合优化被动式节能相关设计措施,以完善设计成果。

### 4 郑州大学南校区学苑食堂设计

项目位于郑州大学南校区。基地西侧、北侧为机关单位居民楼,东侧校园景观绿地,东北、东南方向为学校教学楼及宿舍楼见图2。拟定食堂容纳5000人就餐,建筑面积8000m<sup>2</sup>。项目设计结合具体条件,从建筑环境整合、形态构成、界面设计、模拟优化四个层面对项目被动式节能设计进行分析和研究。

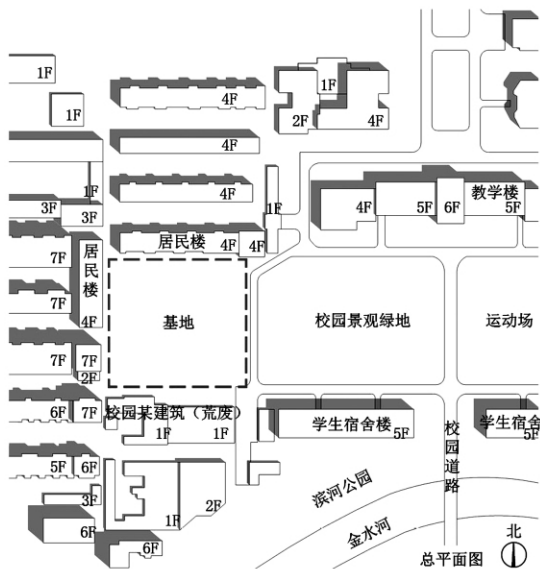


图2 基地环境

Fig.2 The site

#### 4.1 环境整合

结合郑州气候条件及基地环境特点,建筑空间形态西北相对封闭,减少冬季由内向外的热损失;食堂餐厅多层空间南北通透,促进夏季通风散热。基地东侧面向校园景观绿地,东南、东北主要人流方向,食堂餐厅设在东部,与就餐人流和校园绿地相联系。将厨房靠西布置,减少餐厨及人流的噪音对北侧、西侧居民楼的影响,同时就餐流线 with 厨房工作人员流线分离,各自流线便捷通畅见图3。

#### 4.2 空间构成

结合食堂的功能需求,从空间的基本要素和构成方式两方面对建筑进行空间形态组织。空间基本要素主要指建筑本体的方位、朝向、体量、形状、色彩等;空间构成方式主要以退台、内凹、中庭等方式侧重减法。见图4空间形态组织。



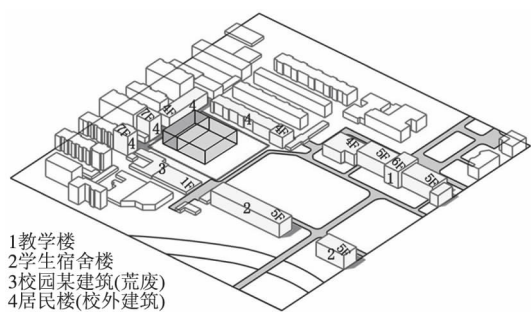


图3 新建食堂与周边建筑环境整合

Fig. 3 Relation between new building and built environment on the site

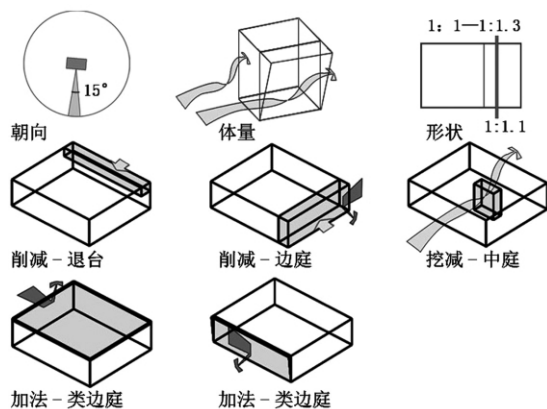


图4 空间形态组织

Fig. 4 Spatial form organization

#### 4.2.1 空间基本要素

(1) 方位. 结合前期分析,餐厅部分设在基地东部,厨房部分设在西部。

(2) 朝向. 平衡建筑各方向太阳辐射、自然通风、基地形状,以及周边建筑等因素,建筑东西向布置,使餐厅获得好的朝向<sup>[6]</sup>。

(3) 体量. 建筑空间体积、层高一定时,长方体的建筑面积大、表面积小、体形系数小、能耗低,更宜满足校园食堂建筑大量就餐人员需求。

(4) 形状. 建筑长宽比 1:1.4:1.3,接近寒冷地区理想长宽比 1:1.1。

(5) 颜色. 考虑老校区建筑风格,选用砖红色面砖。

#### 4.2.2 空间构成方式

(1) 北向退台. 满足北侧 4 层居民楼采光需求,减缓大体量新建筑对周边老建筑在视觉上的压力。

(2) 东向、南向内凹. 结合室外主导风向及室内温度场,餐厅部分东面一层中间凹入,布置主要出入口<sup>[7]</sup>;南面布置餐厅次出入口和食堂员工出入口,以有利于餐厅的通风。在功能上,缓解阵发性人流压力,避免就餐和辅助人员流线交叉。

(3) 挖减中庭. 食堂进深远大于对流通风有效进深,无中庭时室内各层 1.5 m 截面处风速均小于 0.25 m/s,人体不易察觉风速太小。挖减中庭上下连通多层大空间,增强夏季热压通风效果。

#### 4.3 界面设计

建筑东向一层入口柱廊,二三层东向立面处理成旋转 30°的垂直导风板,以通风防风。建筑南向利用夏季主导风,设置垂直导风板引导表面气流,并利用场地南侧和东侧植物降低风温。建筑南立面出挑遮阳,室内外水平界面为浅色反光板,以改善大空间光均匀度。建筑屋顶设绿化和 35°倾角太阳能光电板隔热,见图 5。

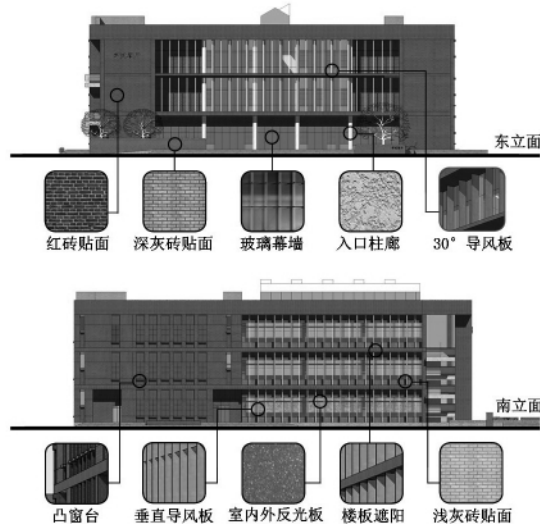


图5 界面设计

Fig. 5 Interface design

#### 4.4 模拟优化

简化食堂模型,利用 Airpak 模拟室内风环境,建立模拟分析区域长宽高 180 m、120 m、60 m 均大于 3 倍餐厅大空间,分析网格门窗处局部加密。其中,食堂轴线尺寸东西长 7.2 m × 8 = 57.6 m,南北长 7.2 m × 6 + 6.0 m = 49.2 m,高 5.4 m × 3 = 16.2 m,长宽比 1:1.17;餐厅区域轴线总体积为 7 651 m<sup>3</sup>,面积为 1 417 m<sup>2</sup>,长宽高分别为 49.2 m、28.8 m、16.2 m。

图 6 为建筑未优化调整时不良空气流动状况。可以看出,未采取措施时,室内一层北部易出现回流;三层南部中和面高度低于窗洞高度,易出现回灌等不良空气状况,使空气质量变差<sup>[8]</sup>。

建筑界面采取被动式节能措施调整之后,如图 7~8 所示。除一层东北角小区域,餐厅大部分区域可达到室内舒适风速。中庭采用文丘里渐缩断面、顶部排风窗单独点状加高并增大排进风窗面积比,削弱涡流和回灌;各层开窗南低北高,削弱回流。

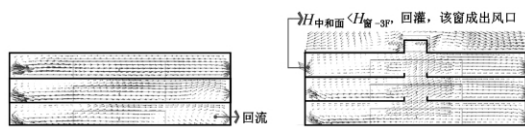


图6 措施采取不当时不良空气流动状况

Fig. 6 Bad air flow conditions of improper measures

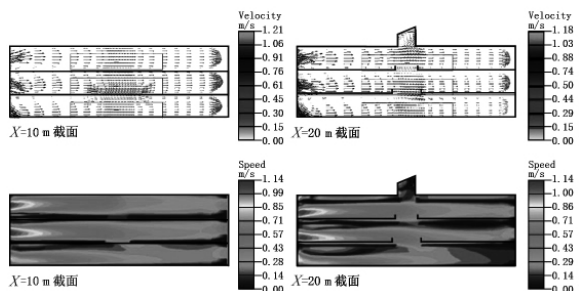


图7 餐厅纵截面速度矢量示意图及速度

Fig. 7 Velocity and speed of dining hall longitudinal section

综合上述分析,结合项目设计,郑州地区基于性能驱动的被动式节能设计原则归纳为:

- (1) 场地南侧、东南侧布置植物降温通风、东北侧植物防风;
- (2) 建筑南向开敞、西北向相对封闭,不同朝

向注意采用不同开窗比.

- (3) 夏季建筑散热、屋顶隔热、东西向防晒;
- (4) 冬季建筑南侧保温、集热,利用太阳能;
- (5) 夏季建筑南侧利用东南、西南向风,降温通风,并夜间自然通风;
- (6) 冬季建筑东侧、北侧防东北、西北向风.

基于上述原则,通过模拟优化得到最终校园食堂建筑被动式节能设计策略手段,图9所示.

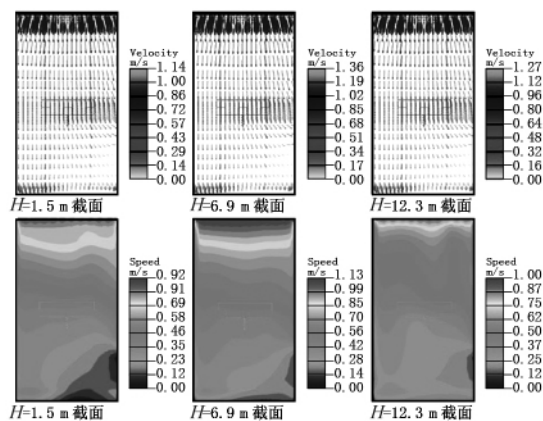


图8 餐厅横截面速度矢量示意图及速度

Fig. 8 Velocity and speed at different heights plane of dining hall

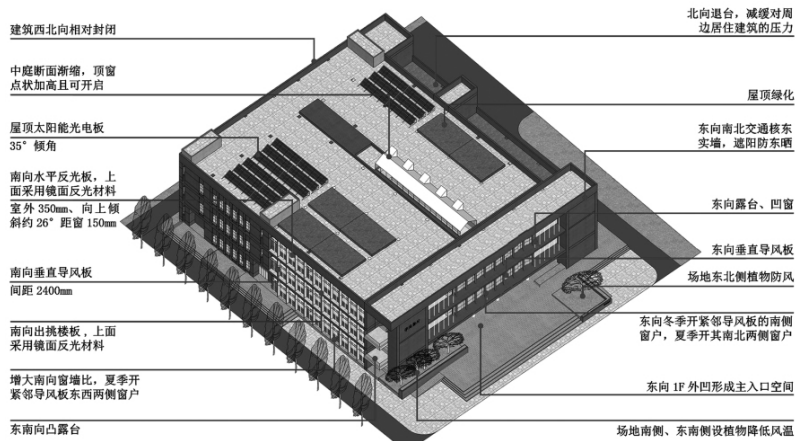


图9 校园食堂建筑被动式节能设计策略

Fig. 9 Passive energy-saving design strategy of campus canteen

## 5 结束语

建筑的被动式节能设计,需从现实条件出发,在适用性、经济性、节能性方面分析研究资源优化配置,平衡建造和使用阶段的运营成本. 在环境整合、空间调节、性能驱动等方面,综合调整建造和使用时的各个影响因素,提高建筑在整体环境、使用功能等方面的品质. 在建筑设计阶段,从梳理地区气候条件、建筑环境性能和人体舒适体验等因素入手,在环境整合、空间构成、界面设计、模拟优化四个层面,基于性能驱动对校园食堂建筑被动

式节能设计进行分析研究,提出校园食堂建筑被动式节能设计原则和策略手段. 这一设计方法的讨论侧重于在设计阶段,从地区气候环境和建筑空间两方面的设计条件进行整合. 而对于建筑围护结构性能、建筑材料性能等因素对建筑节能的影响,本文不做进一步讨论.

(方案设计: 张建涛、周丽华、曹森)

## 参考文献:

- [1] 万丽, 吴恩融. 可持续建筑评估体系中的被动式低能耗建筑设计评估 [J]. 建筑学报, 2012 (10):

- 13-16.
- [2] 张彤. 中国普天信息产业上海工业园智能生态科研楼[J]. 世界建筑, 2015(5): 130-131.
- [3] 王丽. 建筑气候设计的程序化实现[D]. 西安: 西安建筑科技大学建筑学院, 2009.
- [4] 孙澄, 韩昀松. 寒冷气候区低能耗公共建筑空间性能驱动设计体系建构[J]. 南方建筑, 2013(3): 8-13.
- [5] 张彤. 空间调节+性能驱动——东南大学本科四年级绿色公共建筑设计专题教案研析[J]. 城市建筑, 2015(11): 25-31.
- [6] 贺栋. 郑州地区教学建筑绿色节能设计研究[D]. 郑州: 郑州大学建筑学院, 2012: 12-14.
- [7] 赵丽华. 严寒地区建筑入口空间热环境研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学建筑学院, 2013: 42-63.
- [8] 雷涛, 袁镔. 生态建筑中的中庭空间设计探讨[J]. 建筑学报, 2004(8): 68-69.

## Passive Energy-saving Design of Campus Canteen Based on Performance Driven

ZHANG Jiantao, ZHOU Lihua

(School of Architecture, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Taking the campus canteen as the research object, the passive energy-saving design of campus canteen was analyzed and studied in the view of environmental performance-driven building design, and regional climatic conditions. In the architectural design phase, the principles and methods of environmental integration, spatial organization, interface design, simulation and optimization four aspects were considered. Based on this case, the passive energy-saving design principles and strategies of campus canteen in Zhengzhou were generalized.

**Key words:** campus canteen; passive energy-saving design; performance driven

(上接第 91 页)

- [9] YANG X, LI Y. Structural topology optimization on dynamic compliance at resonance frequency in thermal environments[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2014, 49(1): 81-91.
- [10] ZHENG L, XIE R L, WANG Y, et al. Topology optimization of constrained layer damping on plates using method of moving asymptote (MMA) approach[J]. Shock and vibration, 2011, 18: 221-44.
- [11] YOON G H. Structural topology optimization for frequency response problem using model reduction schemes[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2010, 199(25): 1744-1763.
- [12] 刘虎, 张卫红, 朱继宏. 简谐力激励下结构拓扑优化与频率影响分析[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 588-597.
- [13] SIGMUND O, PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima[J]. Structural optimization, 1998, 16(1): 68-75.

## Structure Optimization Design of Constrained Layer Damping Structures to Minimize Displacement Response as Optimization Goal

HOU Junjian, FANG Zhanpeng, HE Wenbin

(Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) was applied to establish the topology optimization model of constrained layer damping (CLD) structure. The minimum of displacement response was considered as the objective function and the volume fraction of constrained layer damping material as constrained conditions. The sensitivity of modal damping ratio was introduced in the sensitivity analysis of the objective function, making the sensitivity more accurate and sensible. The topology optimization model was solved by Method of Moving Asymptotes (MMA). The numerical examples demonstrated that the proposed dynamics optimization of CLD structure was of validity and effectiveness.

**Key words:** constrained layer damping; topology optimization; sensitivity; displacement response