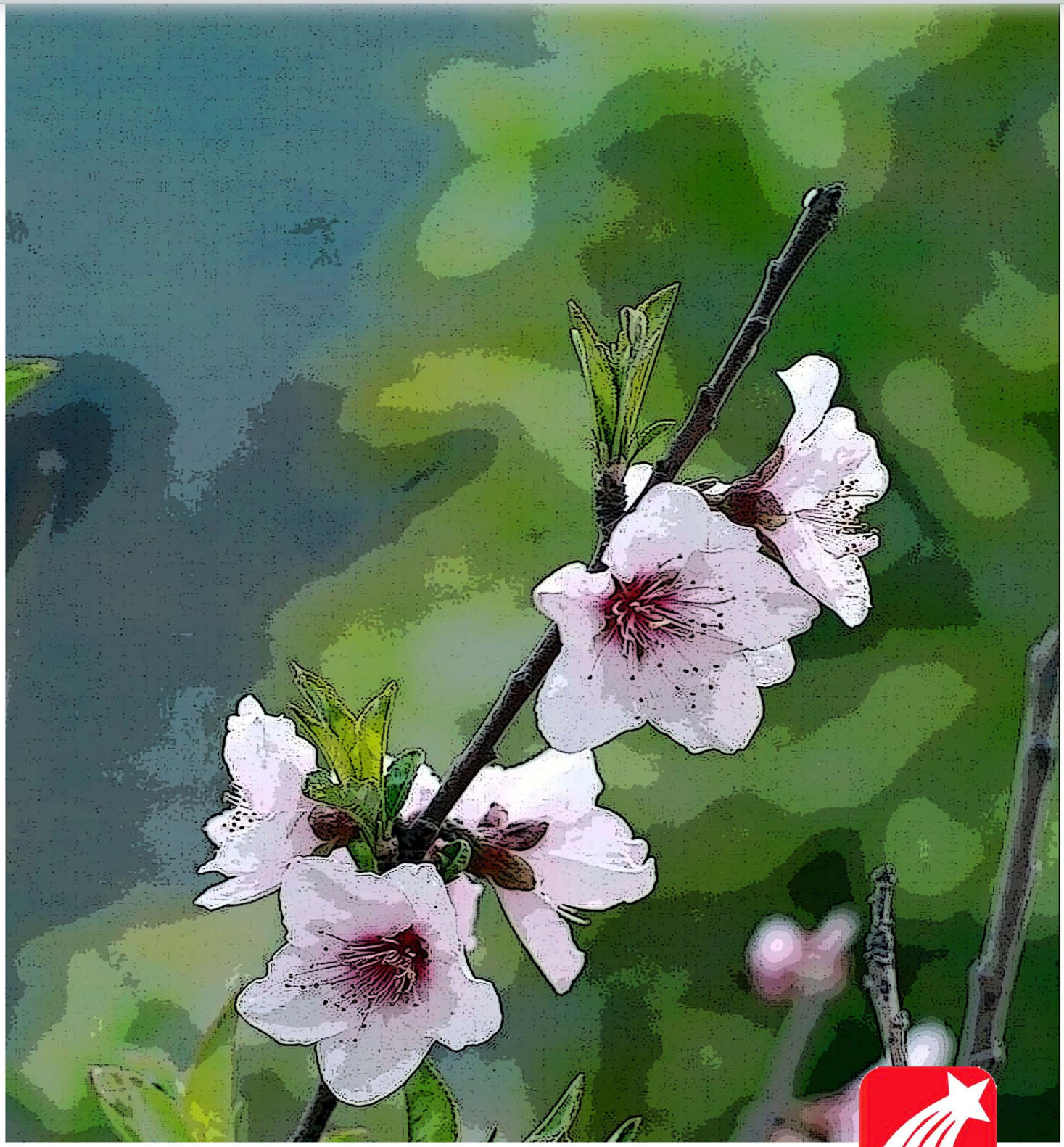
郑州大学学报

2015年第6期



郑州大学学报(工学版)

第36卷　第6期(卷终)　　2015年11月

目　　次

化工与材料工程

小压缩比秸秆螺旋挤压脱水机试验研究 …… 方书起，贺李萍，张龙龙，常　春，白　净，陈俊英(1)

有机酸对纤维素酶解和纤维乙醇发酵的影响…… 韩秀丽，赵浩浩，鲁　峰，常　春，何玉远(5)

TEMPO催化环己醇合成环己酮的研究 …… 章亚东，马金玲(10)

Al-3Ti-0.2C-5Sr铝合金细化剂制备工艺及凝固过程…… 赵红亮，赵开新，孙启宴(14)

二硫化钼基纳米复合材料的构筑与应用…… 陈德良，董会娜，张　锐(18)

表面铜离子印迹聚胺硅胶材料的吸附行为…… 范忠雷，李瑞瑞(30)

生物模板法合成铁钴纳米材料的研究…… 谢银德，侯保森，赵占中，张　冰，赵　霞(34)

信息与电气工程

基于分解的多目标进化算法在工程优化中的应用 … 张春江，TAN Kay Chen，高　亮，吴　擎(38)

基于烟花算法与差分进化算法的模糊分类系统设计…… 朱晓东，刘　冲，郭雅默(47)

可见光通信中LED阵列的优化配置算法研究 …… 叶会英，王　莉，刘津良(52)

基于自适应模糊C均值聚类算法的电力负荷特性分类 …… 赵国生，牛贞贞，刘永光，孙超亮(56)

质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展 …… CRISALLE Oscar Dardo，韩　闯，吴莉莉，支长义(61)

基于改进遗传算法的电力系统无功优化…… 杨胡萍，李威仁，左士伟，张　扬，蔡孝文(66)

古文献手写汉字切分方法研究…… 张忠林，吴相锦，周生龙(70)

机械工程

采用流固耦合方法的复合材料层合板鸟撞分析…… 李　成，郭文辉，铁　瑛(76)

驱动力矩对汽车操纵稳定性影响的仿真分析…… 夏长高，许颖聪(80)

激光焊接熔池特性的三维数值模拟…… 梅丽芳，陈由海，严东兵，葛晓宏，王俊琦(85)

基于Blob分析的玻璃纤维织物缺陷检测方法研究 …… 王庆海，赵凤霞，李纪峰，金少搏(90)

基于空间RCCR机构的轴向柱塞泵的性能参数分析 …… 冯志鹏，庄　森(94)

客车动力总成惯性参数的辨识…… 曾发林，葛平莹(99)

土木与交通工程

下穿立交储水管道模型建立及力学分析…… 张洪亮，孙　培，谢定文(104)

长大上坡沥青路面抗剪强度设计方法研究…… 吕彭民，桂发君，张　扬(109)

干湿循环下膨胀土边坡响应的模型试验…… 张雨灼，王柳江，刘斯宏，林亚伟(114)

水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷试验研究…… 李晶晶，张　擎(119)

钢管混凝土哑铃形截面标准拱面外稳定分析…… 陈礼榕，陈宝春(123)

期刊基本参数: CN 41－1339/T* 1980* b* A4* 128* zh* P* ￥10.00* 1600* 25* 2015－11

责任编辑: 向　飒

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
(ENGINEERING SCIENCE)
Vol. 36 No. 6 Nov. 2015

CONTENTS

【Chemical Engineering and Matertial Engineering】

Experimental Study on Low Compression Ratio Screw Extruder of Straw ····· **FANG Shuqi, HE Liping, ZHANG Longlong, CHANG Chun, BAI Jing, CHEN Junying** (1)

Effect of Organic Acid on Enzymatic Hydrolysis and Ethanol Fermentation of Cellulose ····· **HAN Xiuli, ZHAO Haohao, LU Feng, CHANG Chun, HE Yuyuan** (5)

Study on the Synthesis of Cyclohexanone from Cyclohexanol Catalyzed by TEMPO ····· **ZHANG Yadong, MA Jinling** (10)

Preparation and Solidification Process of Al-3Ti-0.2C-5Sr Grain Refiner ····· **ZHAO Hongliang, ZHAO Kaixin, SUN Qiyan** (14)

Advances in Synthesis and Applications of Molybdenum Disulfide Based Nanocomposites ····· **CHEN Deliang, DONG Huina, ZHANG Rui** (18)

Adsorption Behavior of Surface Ion-imprinted Poly(Allylamine) -Silica Material for Cu(II) from Aqueous Solution ····· **FAN Zhonglei, LI Ruirui** (30)

The Synthesis of Fe-Co Nano-materials Using Biological Templates ····· **XIE Yinde, HOU Baosen, ZHAO Zhanzhong, ZHANG Bing, ZHAO Xia** (34)

【Infomation Engineering and Electrical Engineering】

Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Engineering Optimization ····· **ZHANG Chunjiang, TAN Kay Chen, GAO Liang, WU qing** (38)

Design of Fuzzy Classification System Based on Fireworks Optimization and Differential Evolution Algorithm ····· **ZHU Xiaodong, LIU Chong, GUO Yamo** (47)

Study on Optimal Allocation Algorithm of the Visible Light Communication LED Array ····· **YE Huiying, WANG Li, LIU Jinliang** (52)

Power Load Characteristic Classification Technology Research Based on an Optimal Fuzzy C-means Clustering Algorithm ····· **ZHAO Guosheng, NIU Zhenzhen, LIU Yongguang, SUN Chaoliang** (56)

Review on Modeling and Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell ····· **CRISALLE Oscar Dardo, HAN Chuang, WU Lili, ZHI Changyi** (61)

Reactive Power Optimization by Improved Genetic Algorithm Method ····· **YANG Huping, LI Weiren, ZUO Shiwei, ZHANG Yang, CAI Xiaowen** (66)

Study on the Segmentation Method of Handwritten Characters From Historical Chinese Documents ····· **ZHANG Zhonglin, WU Xiangjin, ZHOU Shenglong** (70)

【Mechanical Engineering】

Analysis of Bird Impact on Composite Laminates by Fluid-Solid Coupling Method ····· **LI Cheng, GUO Wenhui, TIE Ying** (76)

Simulation Analysis for the Drive Torque Impact on Vehicle Handling Stability ····· **XIA Changgao, XU Yingcong** (80)

Three Dimensional Numerical Simulation of Characteristics of Laser Welding Pool ····· **MEI Lifang, CHEN Youhai, YAN Dongbing, GE Xiaohong, WANG Junqi** (85)

Research on Glass Fiber Fabric Defect Detection Method Based on Blob Analysis ····· **WANG Qinghai, ZHAO Fengxia, LI Jifeng, JIN Shaobo** (90)

Kinematics about the Performance Parameters of the Axial Piston Pump Based on the Spatial RCCR Mechanism ····· **FENG Zhipeng, ZHUANG Sen** (94)

The Identification of Inertial Parameters of the Bus Powertrain ····· **ZENG Falin, GE Pingying** (99)

【Civil Engineering and Construction Engineering】

Model Building and Mechanics Analysis on Storage Pipe of Underpass ····· **ZHANG Hongliang, SUN Pei, XIE Dingwen** (104)

Study of the Shear Strength Design Method for the Long-uphill Asphalt Pavement ····· **LYU Pengmin, GUI Fajun, ZHANG Yang** (109)

Model Test on the Performance of the Expansive Soil Slope During Wetting-drying Cycles ····· **ZHANG Yuzhuo, WANG Liujiang, LIU Sihong, LIN Yawei** (114)

Test Research on Load Transfer of Tie Bar of Concrete Pavement ····· **LI Jingjing, ZHANG Qing** (119)

Analysis of Out-of-plane Stability of Standard Concrete-filled Steel Tube Dumbbell-shaped Rib Arch ····· **CHEN Lirong, CHEN Baochun** (123)

英文责任编辑: 沈 杨

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0001 - 04

小压缩比秸秆螺旋挤压脱水机试验研究

方书起[1,2], 贺李萍[1], 张龙龙[1], 常　春[1,2], 白　净[1,2], 陈俊英[1,2]

(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: 采用小压缩比(压缩比为 2∶1)螺旋挤压脱水机对水洗后的秸秆进行了挤压脱水试验研究,考察了螺旋转速、物料初始含水量和料塞管长度等主要参数对设备除水率和处理量以及度电产量等的影响规律. 响应面分析结果表明:该螺旋挤压设备在物料初始含水量为 85%;螺旋转速为 50.8 r·min^{-1};料塞管长度为 26.91 mm 时,既保证了设备处理量和终了物料的性质,也使得设备能高效、平稳、连续运转.

关键词: 秸秆;压缩比;螺旋挤压脱水机;响应面

中图分类号: TQ022.4　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.001

0　引言

近年来,采用农作物秸秆制备燃料乙醇已成为国内外广泛研究的热点课题之一[1-3]. 为防止秸秆中混入的砂土、铁器等杂物对设备寿命及后续工艺的影响,通常采用干切、湿净化、预脱水等手段处理原料秸秆,以满足后续蒸汽爆破的要求[4-6].

当前,国内多借用造纸厂的螺旋挤压喂料器(又称潘多拉式喂料器)用于秸秆的预处理,该设备于上世纪末从国外引进并迅速国产化,压缩比多在 2.5∶1 ~ 4∶1,其最大缺点是功率消耗大;其次是喂料困难、喂料器堵塞、设备打滑磨损等[7-8]. 目前,对螺旋挤压脱水机的研究多源于生产经验的累积. 据报道,合适的料塞管长度、螺旋转速、螺旋螺距、秸秆粒度和含水率等均对设备正常进料、连续运转、设备处理量及耗电量有着显著的影响[9-11]. 但相关研究主要是针对大压缩比螺旋挤压脱水机,鲜见针对小压缩比螺旋挤压脱水机的研究报道.

为此,针对潘多拉喂料器的缺点和秸秆预脱水要求,笔者自行设计制造了压缩比为 2∶1 的螺旋挤压脱水机,在压缩段的螺旋叶片工作面上用不锈钢焊条间断堆焊高 1 ~ 2 mm 的不连续凸台防滑结构;同时,在料筒上设置一种免更换的新型螺钉防滑装置(实用新型专利号:201520038513.1),以增加物料与设备的摩擦力,保证挤压过程顺利进行. 试验证明,设备效率和操作性能大大提高.

1　试验原料及设备

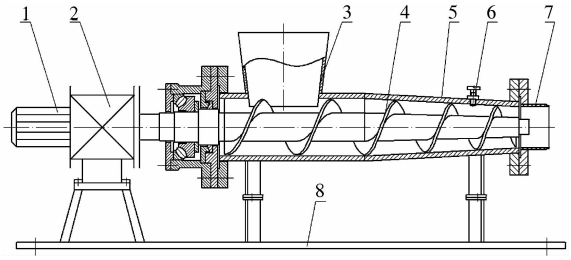
1.1　试验原料

试验采用的玉米秸秆均来自河南郑州地区,收集的秸秆经切碎处理,使其切碎后长度为 1 ~ 3 cm,并经风干晾晒处理,使其初始含水量为 15% ~ 25%,贮存使用.

试验过程需要对原料秸秆进行浸泡预处理,以除去收集过程中混入的铁屑、土块等,同时便于后续试验的进一步处理.

1.2　试验设备

本试验采用自行设计的螺旋挤压脱水机,压缩比为 2∶1,其结构如图 1 所示.



1—调速电机;2—减速器;3—进料仓;
4—螺旋主轴;5—料筒;6—防滑螺钉;7—料塞管;8—支架

图 1　螺旋挤压脱水机结构示意图

Fig. 1　The structure sketch of screw extruder

收稿日期: 2015 - 06 - 30;**修订日期:** 2015 - 09 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21176227)

作者简介: 方书起(1964—),男,山东冠县人,郑州大学教授,主要从事过程设备强化研究,E-mail: fangsq@zzu.edu.cn.

该螺旋挤压脱水机由进料段和压缩段两部分组成,其中进料段采用等径等距螺旋结构,压缩段采用变径变距的螺旋结构,料筒与螺旋主轴一起组成了挤压脱水系统,实现物料的输送和挤压.另外,在料筒进料段的底部和压缩段的全部壁面上按一定的布孔方式开设有锥形或阶梯孔,以利于挤压脱水过程中秸秆的排水,在料筒内壁面和螺旋叶片工作面均设有防滑结构.该设备配用 3 kW 电机,并通过变频器调节转速,使螺旋挤压脱水机在 20 ~ 60 r · min^{-1}范围内工作.试验条件如表 1 所示.

表 1 试验条件参数

Tab. 1 The test condition parameters

试验参数	调节范围
螺旋主轴转速/(r · min^{-1})	20,30,40,50,60
料塞管长度/mm	0,20,40,60
初始含水量(湿基)/%	70,75,80,85

1.3 评价参数

除水率: $$C = \frac{W_0 - W}{W_0}; \quad (1)$$

处理量: $$q_1 = \frac{(1 - W)}{(1 - W_1)} \cdot q; \quad (2)$$

度电产量: $$E_k = \frac{q_1}{P}. \quad (3)$$

式中: W_0 为进入挤压机前的物料含水量(简称初始含水量),%;W 为排出挤压机的物料含水量(简称终了含水量),%;W_1 为物料在风干状态下的含水量,本文试验条下取 $W_1 = 18.3\%$;q 为湿料处理量(一定时间内收集的湿物料质量除以时间),kg · h^{-1};P 为设备功率消耗,kW.

2 结果与讨论

2.1 螺旋转速和初始含水量对挤压的影响

图 2 为料塞管长度 $L = 40$ mm 时干料处理量随螺旋转速变化的曲线.从图 2 可以看出,螺旋转速在 20 ~ 50 r · min^{-1}时脱水机的干料处理量随转速的增大而增大,随初始含水量的增加而略有增加;当螺旋转速大于 50 r · min^{-1},设备处理量较低转速有下降趋势.这是因为,物料在螺旋推力作用下沿轴向运动,同时受到料筒的摩擦阻力.随着转速的提高,螺旋叶片推料量增多,料筒对物料的总阻力增加.当转速达到一个最大值时,叶片轴向推力克服不了料筒阻力,叶片和物料之间开始产生相对运动(即出现打滑现象),随着打滑的持续,叶片与物料的摩擦使物料温度升高,摩擦系数下降,造成螺旋推力减小,最终出现物料不能继续前行的现象.因此,需结合设备生产能力,确定合适的螺旋转速,以达到理想处理效果.

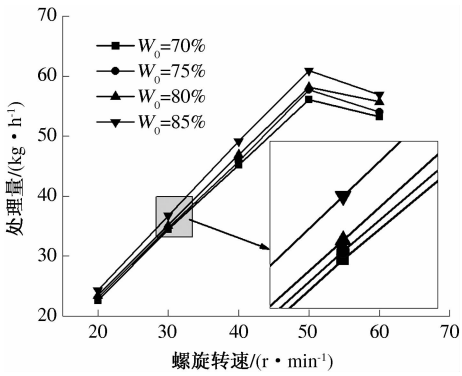


图 2 螺旋转速对处理量的影响($L = 40$ mm)

Fig. 2 Effect of screw speed on handling capacity ($L = 40$ mm)

图 3 为料塞管长度 $L = 40$ mm 时设备度电产量随螺旋转速变化的曲线.从图 3 中可以看出,在相同物料初始含水量下,螺旋转速在 20 ~ 50 r · min^{-1}时设备的度电产量随转速的增大而增大;当螺旋转速大于 50 r · min^{-1}时,设备的度电产量较低,转速有下降趋势.这是因为,在一定范围内提高螺旋转速使设备处理量显著提高,虽然设备功率消耗有所增加.但是,此时设备干料处理量与设备功率消耗的比值(即度电产量)随螺旋转速的增大而上升;而转速过高使得设备干料处理量随转速的增大而下降,这就使得设备度电产量亦出现一个同趋势的转折.另外,物料初始含水量增加,度电产量增大.

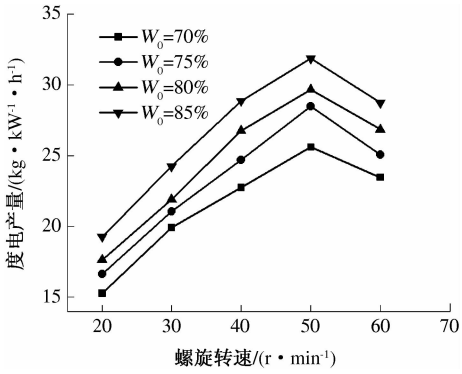


图 3 螺旋转速对度电产量的影响($L = 40$ mm)

Fig. 3 Effect of screw speed on output per kW · h ($L = 40$ mm)

2.2 料塞管长度和初始含水量对挤压的影响

图 4 为螺旋转速 $n = 50$ r · min^{-1}时设备的除水率随料塞管长度变化的曲线.从图 4 可以看出,设备的除水率随着料塞管长度的增加而增大.同时,初始含水量对除水率的影响也十分显著,初始

含水量越大,其除水效果越明显. 当料塞管长度为 60 mm,初始含水量为 85% 时,其除水率最大为 20.98%. 试验结果表明,料塞管长度从 20 mm 增至 40 mm 时,除水率增值最大,料塞管长度继续增大,除水率变化不大. 这是因为,物料在挤压末了经过料塞管处,料塞管对物料形成二次压缩,秸秆中仍有游离水被挤出,料塞管长度越长,料塞管处对物料的挤压效果越明显. 当料塞管增至一定长度时,由于料塞管上没有出水孔,挤出的水重新被形成的料塞带出,挤压效果不明显.

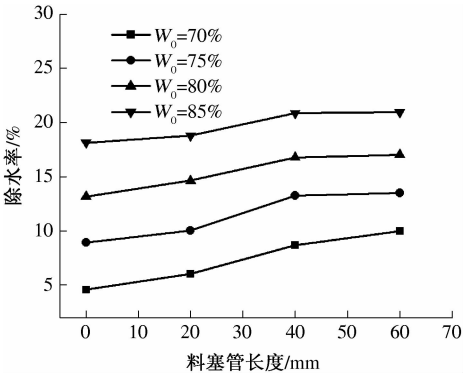


图 4　料塞管长度对除水率的影响(n = 50 r · min^{-1})

Fig. 4　Effect of the length of the straw plug pipe on dewatering rate(n = 50 r · min^{-1})

图 5 为螺旋转速 n = 50 r · min^{-1}时干料处理量随料塞管长度的变化曲线. 从图 5 可以看出,干料处理量随料塞管长度的增加而减小,同时随初始含水量的增大而增加. 这是因为,料塞管长度增加,料塞管对物料阻力增大,物料在螺旋叶片推力下得到更大的压缩,设备除水率增大,相同转速下处理量降低. 试验表明,设备不加料塞管且初始含水量为 85% 时,处理量最大,设备除水率较小;随着料塞管长度增加,除水率呈增大趋势. 因此,为达到一定的出口含水率,需增加料塞管的长度.

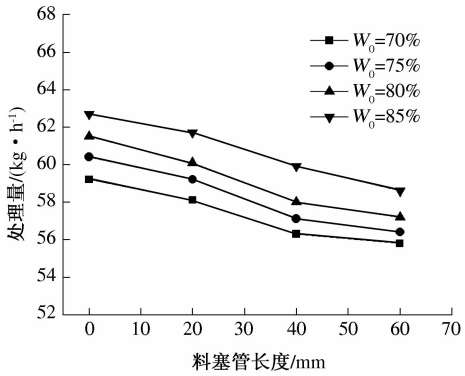


图 5　料塞管长度对处理量的影响(n = 50 r · min^{-1})

Fig. 5　Effect of the length of the straw plug pipe on handling capacity(n = 50 r · min^{-1})

图 6 为螺旋转速 n = 50 r · min^{-1}条件下度电产量随料塞管长度变化的曲线. 由图 6 可以看出,随着料塞管长度的增加,度电产量呈下降趋势. 这是因为,随着料塞管长度的增加,料塞管对物料阻力增大,设备的功率消耗增大,同时干料处理量减小,故设备度电产量降低.

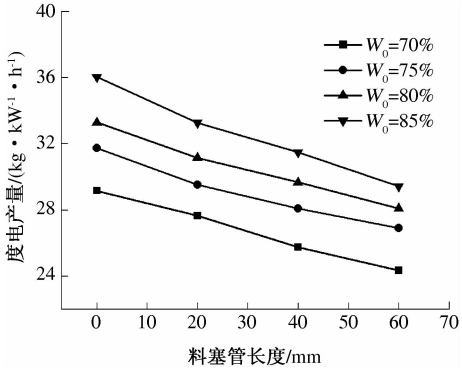


图 6　料塞管长度对度电产量的影响(n = 50 r · min^{-1})

Fig. 6　Effect of the length of the straw plug pipe on output per kW · h(n = 50 r · min^{-1})

2.3　试验结果分析

在前期试验基础上,采用响应面优化法设计了以螺旋转速(X_1)、物料初始含水量(X_2)、料塞管长度(X_3)为 3 因素的共 15 个试验组合,其中含有 12 个析因子和 3 个中心点,中心点用于估计误差,因素及水平设计如表 2 所示. 试验以除水率(Y_1)为主响应值,以处理量(Y_2)、度电产量(Y_3)为参考响应值,响应面试验矩阵及结果如表 3 所示.

表 2　响应面试验因素与水平

Tab. 2　Factors and the levels of experiments of response surface analysis

因素水平	试验因素		
	X_1/mm	X_2/%	X_3/(r · min^{-1})
-1	20	75	40
0	40	80	50
1	60	85	60

由响应面优化试验结果可知,螺旋挤压机用于秸秆脱水的最佳参数组合为:料塞管长度 L = 26.91 mm,物料初始含水量 W_0 = 85%,螺旋转速 n = 50.8 r · min^{-1},此时设备除水率为 19.68%,且设备具有满意的干料处理量和度电产量. 在该最佳参数组合下进行了 3 组平行试验,试验结果显示:设备除水率平均值为 17.92%,试验结果与预测结果之间的误差为 8.94%,表明该模型可以用于试验设计与预测.

表3 响应面分析方案及试验结果

Tab.3 Observed and estimated values for different levels of experimental design

序号	试验因素			Y_1/%	Y_2/(kg·h^{-1})	Y_3/(kg·kW^{-1}·h^{-1})
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	0	10.56	58.86	29.23
2	1	-1	0	13.22	56.41	26.89
3	-1	1	0	18.79	61.74	32.96
4	1	1	0	20.73	58.23	29.81
5	-1	0	-1	14.74	48.35	28.53
6	1	0	-1	16.78	45.28	23.78
7	-1	0	1	14.01	57.82	28.82
8	1	0	1	16.01	54.14	25.72
9	0	-1	-1	13.11	45.77	24.68
10	0	1	-1	20.87	49.14	28.86
11	0	-1	1	12.87	54.03	25.21
12	0	1	1	20.23	57.91	29.25
13	0	0	0	16.68	58.16	29.66
14	0	0	0	16.41	57.79	29.15
15	0	0	0	16.59	58.43	29.75

3 结论

采用螺旋挤压脱水机对原料秸秆进行脱水试验研究时发现,螺旋转速、物料初始含水量和料塞管长度是最重要的3个参数.通过分析其对设备除水率、处理量、度电产量等的影响可以看出:在一定范围内提高螺旋转速、增大物料初始含水量可提高设备处理量和度电产量;增大物料初始含水量、增大料塞管长度可增大设备除水率以及降低出口物料含水量.在实际生产中,为保证脱水过程的稳定高效,需采用合适的螺旋转速并配合合适的物料初始含水量以及料塞管长度.通过响应面优化研究可知,螺旋挤压脱水机处理预浸秸秆过程中,螺杆转速为50.8 r·min^{-1}、物料初始含水量为85%、料塞管长度为26.91 mm时,设备的综合效率最高.

参考文献:

[1] LIMYEM A, RICKE C S. Lignocelluosic biomass for bioethanol production: Cirrent perspectives, potential issues and future prospects[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(4): 449-467.

[2] 宋安东,任天宝,张百良.玉米秸秆生产燃料乙醇的经济性分析[J].农业工程学报,2010,26(6):283-286.

[3] BALAT M, BALAT H. Recent trends in global production and utilization of bioethanol fuel[J]. Applied Energy, 2009, 86: 2273-2282.

[4] 袁丽婷.玉米秸秆预处理技术研究进展[J].中国酿造,2008,27(20):1-7.

[5] 顾张丽.连续式中压蒸汽爆破预处理设备的研究[D].上海:华东理工大学机械与动力工程学院,2013.

[6] 陈克复,黄石茂.制浆造纸机械与设备:上册[M].北京:中国轻工业出版社,2003:299-334.

[7] 田雨德,陈柏林.对螺旋给料器的认识与实践[J].造纸技术通讯,1976(5):66-72.

[8] 刘靖.螺旋进料器的设计计算[J].纸和造纸,2009(4):53-54.

[9] 严红林.连续蒸煮螺旋喂料器的操作[J].纸和造纸,1996(2):34.

[10] 杨明艳.蒸汽连续喷爆设备加料器的研究[D].郑州:郑州大学化工与能源学院,2007.

[11] 白晓虎,李芳,张祖立,等.秸秆螺旋喂料装置工作性能的试验研究[J].农机化研究,2007,29(2):162-181.

Experimental Study on Low Compression Ratio Screw Extruder of Straw

FANG Shuqi[1,2], HE Liping[1], ZHANG Longlong[1], CHANG Chun[1,2], BAI Jing[1,2], CHEN Junying[1,2]

(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 effects of processing variables, such as screw speed, initial moisture content and the length of the straw plug pipe of extrusion process on the dewatering rate, handling capacity, output per kW·h etc. were experimentally studied using a low CR screw straw extruder. And the response surface optimization experimental results showed the extruder can run efficiently, stably and continuously with considerate dewatering rate, handling capacity and output per kW·h under the conditions that moisture content is 85%, screw speed 50.8 r/min, length of the straw plug pipe is 26.91 mm.

Key words: straw; compression ratio (CR); screw extruder; response surface

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0005 - 05

有机酸对纤维素酶解和纤维乙醇发酵的影响

韩秀丽[1], 赵浩浩[1], 鲁 峰[2], 常 春[1], 何玉远[1]

(1. 郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001;2. 河南省周口市环境监测站,河南 周口 466002)

摘 要: 纤维乙醇废水经过厌氧发酵生产沼气处理后,将其回用作为纤维乙醇发酵配料用水,从而实现纤维乙醇废水的回用. 沼液中含有的甲酸、乙酸和丙酸等小分子有机酸是抑制酵母发酵的主要物质,考察了这些有机酸对纤维素酶解和酵母发酵的影响. 研究表明:厌氧发酵废水中含有的甲酸、乙酸和丙酸对纤维素酶解具有影响,可通过调节酶解液的 pH 值而消除;甲酸、乙酸和丙酸对酵母发酵的抑制浓度分别为 1.6,3.0,3.0 g/L.

关键词: 纤维乙醇;酶解;发酵;甲酸;乙酸;丙酸

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.002

0 引言

随着各国对能源需求的增加,利用纤维原料生产纤维乙醇成为国内外学者的研究热点[1]. 目前,纤维乙醇项目存在的技术瓶颈主要有:废水处理问题;纤维原料的预处理能耗较大[2-3];秸秆运输储存困难;生产所需纤维素酶的成本高[4-5],这些因素导致纤维乙醇生产成本居高难下,每生产 1 t 纤维乙醇约产生 20 t 废水. 而随着纤维乙醇生产规模的扩大,需要处理的废水量巨大[6];同时,纤维乙醇废水污染负荷高、组分复杂,具有色度高和 COD(化学需氧量,Chemical Oxyen Demand)高的特点,是一种难处理的工业废水. 目前,蒸馏废液以采用"厌氧 - 好氧法"生物处理工艺为主,最终的废水(COD 约 300 ~ 400 mg/L)还需排放进入城市污水处理系统,加大了城市污水处理负荷. 废水好氧处理法投入大、难达标[7],好氧处理成本达 10 元/t,并且好氧污泥造成的污染隐患也依然存在. 因此,要发展纤维乙醇工业,必须解决其高浓度废水污染问题.

纤维乙醇废水首先经厌氧发酵生产沼气处理,然后将沼液作为工艺配料用水回用于纤维乙醇生产过程,这是解决纤维乙醇废水污染最有效的途径[8]. 废水的回用[9]不仅可以节约水资源,而且可减少废水排放对环境的污染[10],从而降低纤维乙醇生产成本.

厌氧发酵生产沼气过程主要包括 3 个阶段:①水解液化阶段,发酵性细菌所分泌的胞外酶将沼气原料中的非水溶性有机物转化为可溶性的有机酸和醇类等;②产酸阶段,主要是把第一阶段的产物丙酸、丁酸、乳酸和醇类等在产氢产乙酸菌的作用下转化为乙酸,同时产生 H_2 和 CO_2;③产甲烷阶段,是利用产甲烷菌将乙酸和 H_2、CO_2 等转化为沼气. 厌氧产沼气后的沼液中含有少量甲酸、乙酸和丙酸等小分子有机酸,这些物质累积到一定程度就会对酵母生长和乙醇发酵产生抑制. 笔者主要研究了甲酸、乙酸和丙酸等小分子有机酸对纤维素酶解和乙醇发酵的影响,旨在为纤维乙醇废水回用提供理论支撑.

1 实验部分

1.1 实验材料和仪器

材料:汽爆玉米秸秆,河南天冠企业集团有限公司;纤维素酶,诺维信(中国)生物技术有限公司,酶活为 1 381 U/mL(滤纸酶活法);安琪耐高温型酿酒高活性干酵母,湖北安琪酵母股份有限公司;所用试剂均为分析纯.

仪器:UV - 2102 PC 型紫外可见分光光度计,

收稿日期: 2015 - 05 - 27;**修订日期:** 2015 - 08 - 10

基金项目: 河南省教育厅科技攻关项目(12A530002);车用生物燃料技术国家重点实验室开放基金资助项目(2013007)

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方面研究,E-mail: xlhan@zzu.edu.cn.

尤尼柯上海仪器有限公司;FIWE3/6 纤维素测定仪,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;PHS-3S 型精密酸度计,上海大普仪器有限公司;HZ-9311K 恒温振荡器,太仓市科教器材厂;数显恒温水浴锅,郑州长城科工贸有限公司;电热手提压力蒸汽消毒器,上海医用核子仪器厂.

1.2 酵母的活化

用 5 mol/L 的 H_2SO_4 将 2% 葡萄糖水溶液的 pH 值调到 4.5~5.0,于 121 ℃的灭菌锅中灭菌 20 min,冷却至 40 ℃,向 50 mL 的上述灭菌后的葡萄糖水溶液中加入 3 g 干酵母,在 38 ℃的恒温水浴中保温 30 min,即可做酒母使用.

1.3 实验方法

酶解:按照底物浓度 15% 的比例,称取一定量的汽爆玉米秸秆置于三口烧瓶中,然后分别加入一定量 pH 4.8 的柠檬酸缓冲溶液、纤维素酶和聚乙二醇,摇匀,将三口烧瓶放入到 50 ℃恒温水浴,以 200 r/min 搅拌速度酶解 48 h,酶解液经离心机离心后,取上清液,适当稀释后测其还原糖浓度.

发酵:取 150 mL 酶解液,酵母接种量 1%(体积分数),摇匀后封口,放入 34 ℃恒温摇床中震荡,摇床转速为 160 r/min,发酵一定时间后,取样测定其乙醇含量和残余还原糖浓度.

1.4 分析方法

1.4.1 玉米秸秆成分分析

蒸汽爆破后的玉米秸秆成分采用纤维素测定仪测定. 其主要成分为:纤维素 31.68%;半纤维素 17.62%;木质素 22.11%;灰分 10.64%;其他 17.95%(均为质量分数).

1.4.2 还原糖浓度的测定

采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS 试剂)法测定[11]. 取 0.5 mL 稀释至一定倍数的酶解液于 25 mL 比色管中,加入 pH 4.8 的柠檬酸缓冲液 1.5 mL 和 DNS 3 mL,混匀,将比色管置于沸水浴中反应 10 min,取出迅速冷却至室温,用蒸馏水定容至 25 mL,混匀,用 1 cm 比色皿在波长 540 nm 处测量吸光度,用标准曲线法求出还原糖葡萄糖的含量.

1.4.3 乙醇含量(体积分数)的测定

取 100 mL 发酵液和等体积的蒸馏水于三口烧瓶中进行蒸馏,用容量瓶收集 100 mL 馏出液,然后用重铬酸钾比色法[11],在波长 610 nm 处测定吸光度,求出乙醇含量.

2 结果与讨论

2.1 甲酸、乙酸和丙酸对酶解的影响

纤维乙醇废水经厌氧发酵生产沼气处理后的沼液废水中含有甲酸、乙酸和丙酸等小分子有机酸,这些有机酸影响纤维素酶的糖化效率. 酶解试验的条件为:pH 4.8;底物浓度 15%(质量分数);聚乙二醇 0.15%(质量分数);纤维素酶用量 50 U/g(纤维素量);酶解时间 48 h. 为考察小分子有机酸对酶解的影响,向酶解液中加入不同浓度的甲酸、乙酸和丙酸,按照 1.3 中的实验方法进行酶解,酶解 48 h 后,测定酶解液的还原糖浓度和 pH 值,结果见图 1.

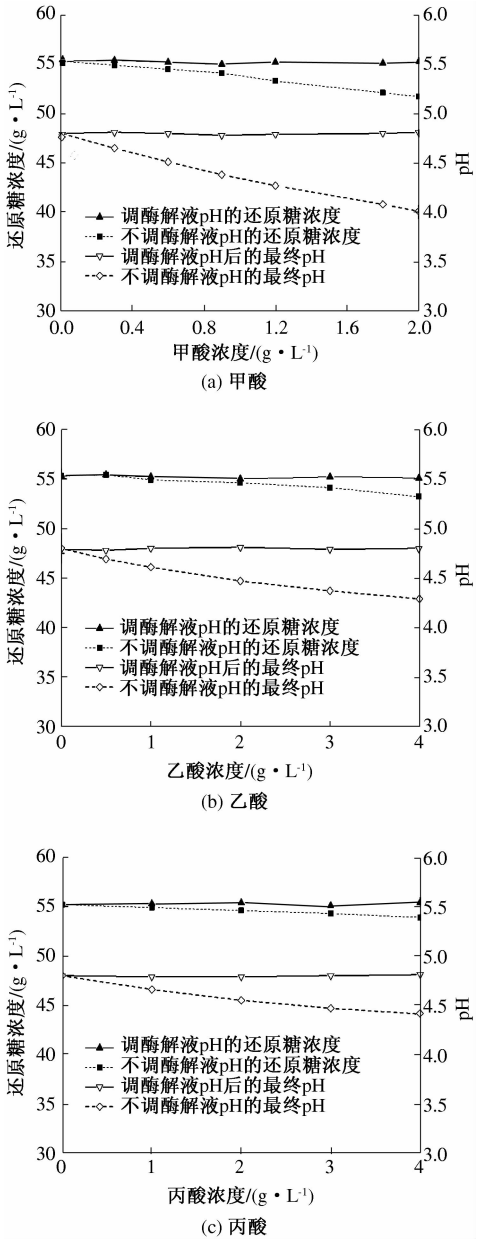


图 1 不同浓度的有机酸对还原糖浓度和酶解液最终 pH 的影响

Fig. 1 Effect of organic acid on reducing sugar concentrations and final pH values of enzymatic solution

按照上述方法加入有机酸后,再用 5 mol/L 氢氧化钠溶液分别调节酶解液的初始 pH 值为 4.8,

然后进行酶解 48 h,考察调节酶解液的 pH 值后 3 种酸对酶解糖化效率的影响,结果如图 1 所示.

由图 1 可以看出,甲酸、乙酸和丙酸对酶解的影响表现出相似的规律. 随着酸浓度的增加,酶解液的 pH 值逐渐降低,酶解 48 h 后所得的还原糖浓度也呈下降趋势. 当加入甲酸、乙酸,丙酸的浓度均为 2 g/L 时,酶解液的 pH 值分别为 4.01,4.47和4.55,所对应的还原糖浓度分别为 51.7,54.6,54.6 g/L. 可以看出,添加甲酸的酶解液 pH 值降低较明显,强于乙酸和丙酸,而且所对应的还原糖浓度降低也比较显著,这主要是由于甲酸的酸性强于乙酸和丙酸,pH 值的改变影响了纤维素酶的活性,降低了纤维素酶的反应速率,从而使最终的还原糖浓度降低.

从图 1 还可以看出,加不同量的有机酸,再将酶解液的 pH 值调节为 4.8 后进行酶解,得到的最终还原糖浓度与不加有机酸相比没有明显差别. 因此,一定浓度的甲酸、乙酸和丙酸对酶解的影响主要是由酸度引起的,可通过调节酶解液的 pH 值来消除小分子有机酸对酶解糖化效率的影响.

2.2　甲酸、乙酸和丙酸对乙醇发酵的影响

经厌氧沼气发酵可去除纤维乙醇废水中 80% 以上的 COD,但出水的 COD 仍然可达 3 000 mg/L 以上,其中含有未转化成沼气的甲酸、乙酸、丙酸等小分子有机酸. 废水回用过程中含有的这些有机酸会对乙醇发酵造成影响. 不同的有机酸对乙醇发酵和耗糖率的抑制作用差别很大,这是由于细胞膜具有选择性,对于不同的有机酸,其通透性是不同的. 不同的酸根离子在细胞内的存在形式也有差异,对细胞内外的浓度影响也不相同.

2.2.1　甲酸对乙醇发酵的影响

按照试验方法进行发酵,发酵前向醪液中添加不同量的甲酸,使浓度分别为 0,0.6,1.2,1.6,2.0,2.5,3.0 g/L,酵母接种量 1%(体积分数),发酵 12,24,36,48,60 h 后取样,分别测其乙醇含量和还原糖浓度,结果见图 2 和图 3.

甲酸是沼气发酵的一种前驱体物质,在厌氧过程中,甲酸可直接被甲烷菌利用转化成沼气. 当发酵醪液中的甲酸达到一定浓度时,会对乙醇发酵产生抑制作用. 从图 2 和图 3 可看出,随着甲酸浓度的增加,乙醇发酵受到抑制,酵母开始发酵的时间延长,与此同时耗糖速率也开始减慢. 当甲酸浓度较低时,甲酸并未对乙醇发酵产生明显影响. 当甲酸浓度达到 1.6 g/L 时,乙醇发酵开始表现出明显的抑制现象,最终发酵液中乙醇含量与对照组相比也明显减少,与之对应的残还原糖量也在增加. 当甲酸浓度达到 3 g/L 时,乙醇发酵几乎被完全抑制. 乙醇发酵的抑制作用主要表现在前期,酵母的数量增加慢,从而使乙醇含量低,耗糖速率慢. 由此可知,甲酸对乙醇发酵的抑制浓度为 1.6 g/L.

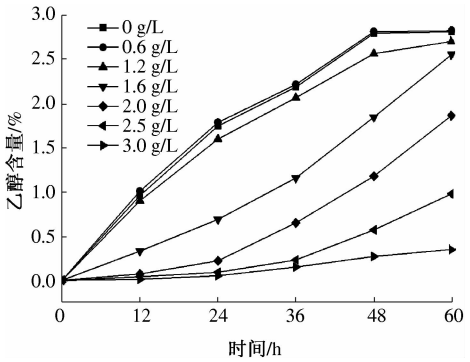


图 2　不同浓度的甲酸对发酵液乙醇含量的影响

Fig. 2　Effect of formic acid on ethanol production at different fermentation times

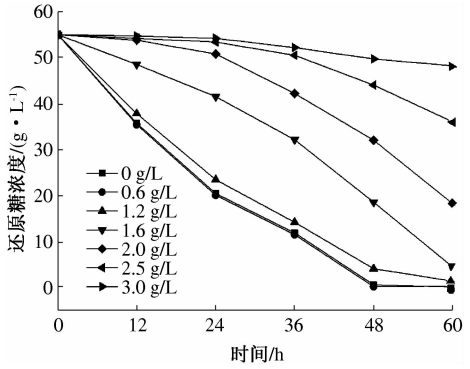


图 3　不同浓度的甲酸对耗糖速率的影响

Fig. 3　Effect of formic acid on reducing sugar consumption

2.2.2　乙酸对乙醇发酵的影响

在发酵液中加不同量的乙酸,使其浓度分别为 0,1,2,3,3.5,4,6 g/L,酵母接种量 1%(体积分数),按照试验方法进行发酵,发酵 12,24,36,48,60 h 后,分别测定发酵液中乙醇含量和还原糖浓度,结果见图 4 和图 5.

乙酸是沼气发酵中产生甲烷的主要前驱体物质,因此在厌氧发酵沼液中有少量存在. 若在发酵过程中污染了乙酸菌,也会产生乙酸. 从图 4 和图 5 可以看出,当乙酸浓度较低时,乙酸不仅不会对酵母发酵产生抑制作用,相反还会促进发酵. 在乙酸浓度为 1 g/L 时,发酵 60 h 后乙醇含量与对照组相比略有提高,这可能是由于乙酸浓度较低时,酵母可以利用低浓度的乙酸作为碳源进行发酵产

乙醇. 当乙酸达到 3 g/L 时,将会抑制酵母的生长,主要表现在发酵的前期,酵母的数量与对照组相比增加较慢,但酵母仍保持自身的活性,与此同时发酵液中的耗糖速率也较慢,发酵结束后,添加组与对照组相比乙醇含量略有降低. 随着乙酸浓度继续增加,当乙酸浓度达到 6 g/L 时,乙醇发酵几乎被完全抑制,糖几乎不被消耗. 由此可知,乙酸对乙醇发酵的抑制浓度为 3 g/L.

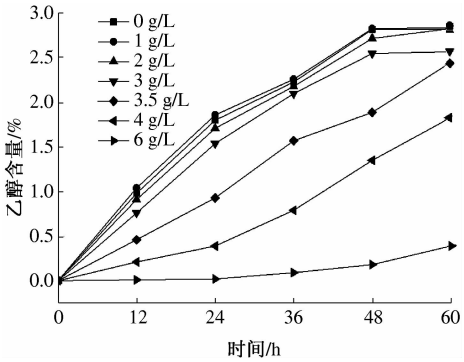


图 4 不同浓度的乙酸对发酵液乙醇含量的影响

Fig. 4 Effect of acetic acid on ethanol production at different fermentation time

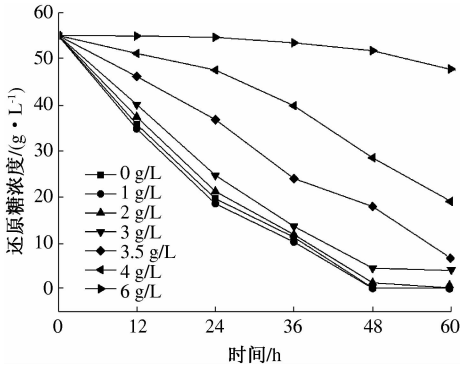


图 5 不同浓度的乙酸对耗糖速率的影响

Fig. 5 Effect of acetic acid on reducing sugar consumption

2.2.3 丙酸对乙醇发酵的影响

在发酵液中加入同量的丙酸,使其浓度分别为 0,1,2,3,3.5,4,5 g/L,酵母接种量 1%(体积分数),按照试验方法进行发酵,发酵 12,24,36,48,60 h 后取样,分别测定其乙醇含量和还原糖浓度,结果见图 6 和图 7.

丙酸是沼气发酵中一个重要的中间产物,与其他中间产物相比,丙酸转化甲烷的速率是最慢的,而且它也是沼气发酵的限制性物质,若发酵条件的控制不当,易造成丙酸型发酵. 从图 6 和图 7 可以看出,当丙酸浓度低于 2 g/L 时,与对照组相比,丙酸对乙醇发酵和耗糖速率没有明显的差别. 丙酸浓度高于 3 g/L 时,乙醇的发酵开始表现出明显的抑制现象,酵母的生长也受到了抑制,耗糖速率也开始减慢. 随着丙酸浓度的增加,丙酸对乙醇发酵的抑制作用越来越强烈,当丙酸浓度为 5 g/L 时,乙醇发酵抑制率可达 80%. 由此可知,丙酸对乙醇发酵和耗糖的抑制浓度为 3 g/L.

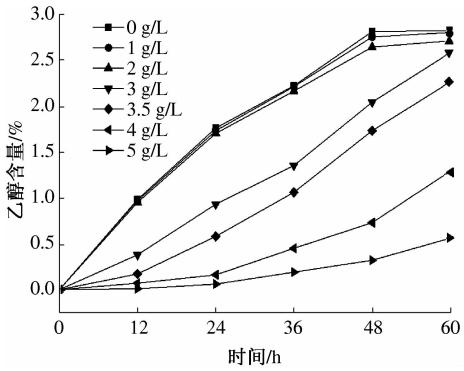


图 6 不同浓度的丙酸对乙醇含量的影响

Fig. 6 Effect of propanoic acid on ethanol production at different fermentation time

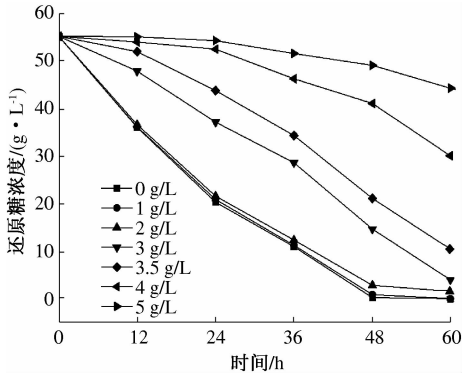


图 7 不同浓度的丙酸对耗糖速率的影响

Fig. 7 Effect of propanoic acid on reducing sugar consumption

2.2.4 有机酸对乙醇发酵的抑制机理[12]

由于酵母细胞内的 pH 值接近中性,未解离的有机弱酸通过扩散的方式穿过细胞膜进入细胞质内,在胞内不断地发生解离,造成了胞内质子浓度的不断增加,破坏了胞内质子梯度,使得膜电位降低. 为了维持胞内 pH 值在最佳的代谢范围,细胞必需依靠 ATP 产生能量将质子运出胞外以维持细胞内中性环境. 由于细胞内能量的大量消耗,又不能及时得到补充,使得必需的酶、辅酶和营养物质缺乏,就会对细胞代谢速率和原料利用速率产生抑制作用,从而影响了酵母发酵过程.

3 结论

构建纤维乙醇厌氧发酵 - 沼液资源化处理回

用耦联工艺系统为消除纤维乙醇废水污染隐患指明了方向.笔者对纤维乙醇废水回用中的关键问题进行了研究,主要考察了甲酸、乙酸和丙酸对纤维素酶解和乙醇发酵的影响规律.结果表明:甲酸、乙酸和丙酸对纤维素酶解反应的影响主要是酸度的影响,可以通过调节酶解液的初始 pH 值而消除.甲酸对乙醇发酵产生抑制的有效抑制浓度为 1.6 g/L,乙酸和丙酸对乙醇发酵产生抑制的有效抑制浓度均为 3 g/L.小分子有机酸是厌氧发酵生产沼气的重要底物,也是厌氧发酵的中间产物,因此,控制厌氧沼气发酵的稳定运行以及降低沼液中残留的甲酸、乙酸和丙酸的量,是实现纤维乙醇废水回用的重要前提.

参考文献:

[1] ZHANG Chengming, MAO Zhonggui. Effective ethanol production by reutilizing waste distillage anaerobic digestion effluent in an integrated fermentation process coupled with both ethanol and methane fermentations [J]. Bioprocess Biosystem Engineering, 2010, 33(9): 1067 – 1075.

[2] TAO L, ADEN A, ELANDER R T, et al. Process and technoeconomic analysis of leading pretreatment technologies for lignocellulosic ethanol production using switchgrass [J]. Bioresource Technology 2011, 102 (24): 11105 – 11114.

[3] YU Menghui, LI Jihong, LI Shizhong, et al. A cost-effective integrated process to convert solid-state fermented sweet sorghum bagasse into cellulosic ethanol [J]. Applied Energy, 2014, 115: 331 – 336.

[4] 方诩,秦玉琪,李雪芝,等.纤维素酶与木质纤维素生物降解转化的研究进展 [J].生物工程学报, 2010, 26(7): 864 – 869.

[5] ELLISTON A, COLLINS S R A, WILSON D R, et al. High concentrations of cellulosic ethanol achieved by fed batch semi simultaneous saccharification and fermentation of waste-paper [J]. Bioresource Technology, 2013, 134: 117 – 126.

[6] RAMCHANDRAN D, RAJAGOPALAN N, STRATHMANN T J, et al. Use of treated effluent water in ethanol production from cellulose [J]. Biomass And Bioenergy, 2013, 56: 22 – 28.

[7] ZHANG Chengming, DU Fengguang, WANG Xin, et al. Effect of propanoic acid on ethanol fermentation by saccharomyces cerevisiae in an ethanol-methane coupled fermentation process [J]. Biotechnology And Bioengineering, 2012, 20(5): 942 – 949.

[8] BIALAS W, SZYMANOWSKA D, GRAJEK W. Fuel ethanol production from granular corn starch using Saccharomyces cerevisiae in a long term repeated SSF process with full stillage recycling [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 3126 – 3131.

[9] 肖冬光,姚文娟,李于.酒精废液回用理论的探讨 [J].酿酒科技, 2001(6): 76 – 78

[10] 郑超,马晓建,郜晋楠.纤维乙醇废水处理研究进展 [J].湖北农业科学, 2013, 52(9): 1988 – 1991.

[11] 王福荣.酿酒分析与检测 [M].北京:化学工业出版社, 2005: 213 – 249.

[12] OLIVA J M, NERO M J, SAEZ F, et al. Effects of acetic acid, furfural and catechol combinations on ethanol fermentation of kluyv eromyces marxianus [J]. Process Biochemistry, 2006, 41: 1223 – 1228.

Effect of Organic Acid on Enzymatic Hydrolysis and Ethanol Fermentation of Cellulose

HAN Xiuli[1], ZHAO Haohao[1], LU Feng[2], CHANG Chun[1], HE Yuyuan[1]

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhoukou Environmental Monitoring Station, Zhoukou 466002, China)

Abstract: The cellulosic ethanol wastewater was first treated by anaerobic digestion (methane fermentation), and then the anaerobic digestion liquid was used as burden water on cellulosic ethanol fermentation, so that reuse of cellulosic ethanol wastewater could be realized. The small molecule organic acids in the anaerobic effluent, mainly formic acid, acetic acid and propanoic acid, were potential inhibitors of ethanol fermentation. The effects of organic acids on enzymatic hydrolysis and yeast fermentation of cellulose were studied. The results showed that the potential inhibitory effects of formic acid, acetic acid and propanoic acid on enzymatic hydrolysis could be avoided by controlling the medium pH. The inhibitory concentrations of formic acid, acetic acid and propanoic acid on yeast fermentation were 1.6, 3.0 and 3.0 g/L, respectively.

Key words: cellulosic ethanol; enzymatic hydrolysis; fermentation; formic acid; acetic acid; propanoic acid

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0010 - 04

TEMPO 催化环己醇合成环己酮的研究

章亚东, 马金玲

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

摘 要: 建立了由2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基(TEMPO)、NaClO 与 NaBr 所组成的无金属催化体系,催化氧化环己醇合成环己酮.探讨了反应时间、pH 值、催化剂用量以及溶剂用量等对反应的影响,得出了适宜的合成条件:环己醇用量为 0.3 g,TEMPO 用量为 0.005 g,NaBr 用量为 0.03 g,NaClO 用量为 0.45 g,CH_2Cl_2 用量为 7 mL,pH 值为 9.1,反应时间为 1 h.在该条件下进行3 次平行实验,测得环己醇平均转化率为 88.2%,环己酮平均收率可达 87.3 %.

关键词: 环己醇;环己酮;2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基

中图分类号: TQ234.21 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.003

0 引言

在有机合成反应中,环己醇氧化合成环己酮是用途非常广泛的官能团转换反应[1].在环己醇合成环己酮的反应中,传统上使用的氧化剂主要为铬酸盐[2]、氧化锰[3]和氧化钌[4]等,此类氧化剂不仅污染环境,而且也给操作过程带来潜在危险.后来,过氧化氢[5-6]作为一种绿色氧化剂,成为此领域研究的热点.由于过氧化氢单独使用时氧化能力较弱,需使用催化剂来提高其氧化能力.其中使用较多,效果显著的是杂多酸(盐)催化剂[7-9],然而杂多酸作为一种小分子催化剂,实验结束后溶于反应体系中,难以回收.因此,在大规模的工业生产中,不仅浪费了大量的催化剂,同时造成了严重的金属离子污染.

2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基(TEMPO)作为一种有机小分子催化剂,能将醇选择性地氧化为相应的羰基化合物,是一种环境友好的高选择性无金属催化剂[10].TEMPO 被真正应用于工业生产及醇类的催化氧化中并得到大家的重视来自于 Anelli 氧化体系的研究[11-12]. Anelli 等在 1987 年报道了 TEMPO/NaOCl 催化体系,在该体系中,伯醇可以很快地被定量氧化生成相对应的醛,仲醇则氧化成相对应的酮,且反应的选择性高,过度氧化量少.

笔者开展了 TEMPO/NaClO/NaBr 无金属催化氧化环己醇合成环己酮的研究,探讨了反应时间、pH 值、催化剂用量以及溶剂用量等对反应的影响,建立了适宜的合成反应条件.

1 实验部分

1.1 主要试剂及仪器

环己醇;环己酮;2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基(TEMPO);次氯酸钠;溴化钠;二氯甲烷;甲苯;碳酸氢钠;乙酸乙酯;无水硫酸镁等,均为分析纯试剂;GC-9800 气相色谱仪(上海科创公司产);SHZ-D(III)循环水式真空泵(巩义真空泵厂);DZF 真空干燥箱.

1.2 环己酮合成反应

称取一定量的环己醇、TEMPO 和 NaBr 置于 50 mL 三口烧瓶中,加入有机溶剂 CH_2Cl_2,并缓慢加入一定浓度的 NaClO 溶液,用 $NaHCO_3$ 调节体系的 pH,在 0 ~ 5℃下搅拌反应一段时间后,将混合液进行静置分层,用乙酸乙酯对下层水相进行萃取后合并有机相,经无水硫酸镁干燥后进气相色谱仪进行分析.

1.3 产品分析

采用 GC9800 气相色谱仪分析检测,检测器温度 250 ℃,进样口温度 250 ℃.采用程序升温,柱温 70 ℃,保温 5 min,以 5 ℃/min 升至 105 ℃,然后

收稿日期:2015 - 06 - 16;**修订日期:**2015 - 08 - 29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90610001;20871106)

作者简介:章亚东(1965—),男,河南正阳人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事药物制剂,精细有机化学品的绿色合成与工艺研究,E-mail:zzuzhangyadong@126.com.

保温3 min. 采用内标标准曲线法分析,内标物采用甲苯.

2　结果与讨论

2.1　反应时间对环己酮收率的影响

环己醇为 0.3 g,CH_2Cl_2 用量为 7 mL,TEMPO 用量为 0.005 g,将 0.45 g 的 NaClO 配制成 0.85 mol/L的溶液使用,NaBr 为 0.03 g,调节体系的 pH 值为 9.1,在 0 ~ 5 ℃下反应一定时间,考察反应时间对环己酮的收率的影响,结果如表 1 所示.

表 1　反应时间对环己酮收率的影响

Tab. 1　The effects of reaction time

反应时间/min	10	30	60	120	240
环己酮收率/%	43.1	72.5	87.1	87.1	87.1

由表 1 可知,随着反应时间延长,环己酮收率增加速度较快,在反应时间 60 min 时环己酮收率为 87.1%;60 min 以后环己酮收率基本保持不变,所以取合成环己酮的反应时间为 60 min.

2.2　TEMPO、NaBr 及 NaClO 用量对环己酮收率的影响

在其他条件不变的情况下,分别改变TEMPO、NaBr 及 NaClO 用量,考察其对环己酮的收率的影响,结果见表 2.

从表 2 可以看出,随着 TEMPO、NaBr 和 NaClO用量的增加,环己酮的收率先增加后又减少. 当 TEMPO 用量为 0.005 g 时,环己酮收率达到最大 86.8 %;NaBr 的用量为 0.03 g 时,环己酮收率达到最大 87.3 %;NaClO 用量为 0.45 g 时,环己酮收率最大为 87.0 %. 之后,分别继续增加 TEMPO、NaBr 和 NaClO 的量,环己酮收率下降. 所以,取合成环己酮的 TEMPO 用量为 0.005 g,NaBr 用量为 0.03 g,NaClO 用量为 0.45 g.

2.3　NaClO 浓度对环己酮收率的影响

虽然确定了实验中所需 NaClO 的合适量,但是,将 NaClO 加入反应体系中时需要提前对其进行稀释,所稀释的浓度不同,对实验的影响也会有所不同.

表 2　TEMPO、NaBr 和 NaClO 用量对环己酮收率的影响

Tab. 2　The effects of the amount of TEMPO, NaBr and NaClO

参数	TEMPO 用量/g				NaBr 用量/g				NaClO 用量/g			
	0.003	0.005	0.007	0.009	0.02	0.03	0.04	0.05	0.40	0.45	0.50	0.55
环己酮收率/%	74.6	86.8	80.3	69.9	85.5	87.3	86.9	86.0	80.7	87.0	83.5	76.8

环己醇为 0.3 g,CH_2Cl_2 用量为 7 mL,TEMPO 用量为 0.005 g,NaBr 用量为 0.03 g,NaClO 用量为 0.45 g,pH 值为 9.1,0 ~ 5 ℃下反应 1 h,改变 NaClO 加入时被稀释的浓度,考察 NaClO 加入后的浓度对环己酮收率的影响,如图 1 所示.

从图 1 可以看出,当配制的 NaClO 浓度小于 0.85 mol/L 时,环己酮收率随 NaClO 溶液浓度的增大而增大;在 NaClO 浓度为 0.85 mol/L 时,环己酮收率达到最大 87.0 %;之后继续增大NaClO 溶液的浓度,环己酮收率下降. 所以,取合成环己酮的 NaClO 溶液浓度为 0.85 mol/L.

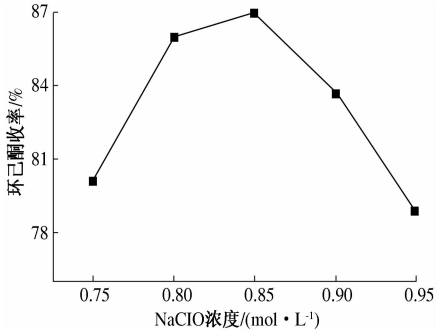


图 1　NaClO 浓度对环己酮收率的影响

Fig. 1　The effects of the concentration of NaClO

2.4　溶剂用量对环己酮收率的影响

环己醇用量为 0.3 g,TEMPO 用量为 0.005 g,NaClO 用量为 0.45 g,NaBr 用量为 0.03 g,pH 值为 9.1,改变加入溶剂的量,在 0 ~ 5 ℃下反应 1 h,考察溶剂用量对环己酮的收率的影响,如表 3 所示.

表 3　CH_2Cl_2 用量对环己酮收率的影响

Tab. 3　The effects of the amount of CH_2Cl_2

CH_2Cl_2/mL	3	5	7	10	13
环己酮收率/%	62.3	79.1	87.5	87.3	87.3

由表 3 可知,当溶剂用量小于 7 mL 时,环己酮收率随溶剂用量的增加而迅速增大;当溶剂用量大于 7 mL 以后,环己酮收率变化不大. 综合考虑溶剂的回收及经济性等因素,取溶剂用量为 7 mL.

2.5　pH 值对环己酮收率的影响

在其他条件不变的情况下,改变体系的 pH 值,考察 pH 值对环己酮的收率的影响,如图 2 所示.

由图 2 可以看出,在反应时间为 60 min 时,

环己酮收率随着 pH 值的增大先增加后减少. 在反应时间 60 min 以前,环己酮收率受 pH 值的影响较大,在 pH 值为 9.8 时,环己酮收率增长最快,pH 值为 9.1 时,环己酮收率较高;60 min 以后环己酮收率受 pH 值的影响较小,环己酮收率在 pH 值为 9.1 时达到最大 87.1%,故取反应中 pH 值为 9.1.

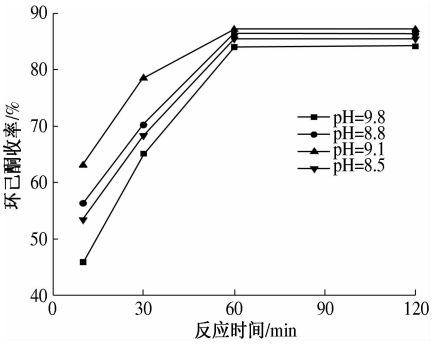


图 2 pH 值对环己酮收率的影响

Fig. 2 The effects of the pH on yield of cyclohexanone

3 产品的表征

为了进一步确定实验中所合成的物质是环己酮,采用红外光谱和核磁共振氢谱对产品进行表征分析.

3.1 红外光谱(FT-IR)测定

产品的 FT-IR 谱图(KBr 压片)如图 3 所示. 从图 3 可以看出,图谱中主要的吸收峰有:吸收峰 1 711 cm^{-1}为环己酮的羰基吸收峰,2 938 cm^{-1}、2 864 cm^{-1}为环己酮中 C—H 的两个吸收峰,环己酮中的 C—C 键在红外图谱中没有吸收峰.

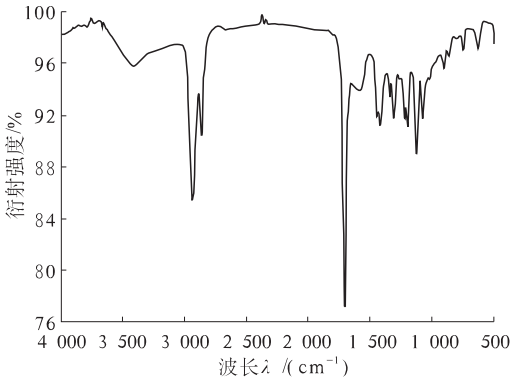


图 3 产品的 FT-IR 图谱

Fig. 3 FT-IR spectra of the product

3.2 ^{1}HNMR 的测定

产品的^{1}HNMR(溶剂采用 $CDCl_3$,400 MHz,TMS 内标)测定结果如图 4 所示. 由图 4 可知,核磁共振氢谱中产品的出峰情况与环己酮的标准图谱出峰的位置一致,所以可以确定所合成的物质是目标产物环己酮.

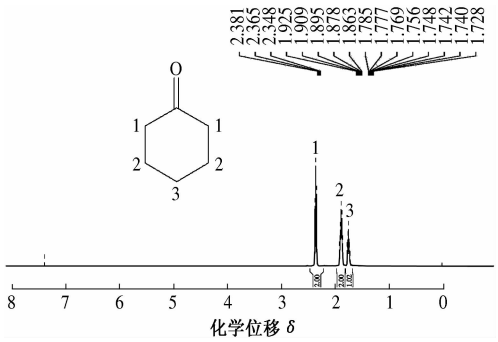


图 4 产品的^{1}HNMR 图谱

Fig. 4 ^{1}HNMR spectra of the product

4 适宜反应条件的确立

根据以上单因素实验确定出适宜的反应条件:环己醇用量为 0.3 g,溶剂 CH_2Cl_2 用量为 7 mL,TEMPO 用量为 0.005 g,NaClO 用量为 0.45 g,NaBr 用量为 0.03 g,pH 值为 9.1,在 0~5℃下反应 1 h. 在此条件下进行了 3 次平行实验,收率分别为 86.8%、87.3%、88.0%,平均收率为 87.3%. 3 次平行实验的结果很接近,可见本反应的重现性较好.

5 结论

(1)TEMPO 催化环己醇合成环己酮反应的最佳条件:环己醇为 0.3 g,CH_2Cl_2 为 7 mL,TEMPO 为 0.005 g,NaClO 为 0.45 g,NaBr 为 0.03 g,pH 值为 9.1,反应时间 1 h. 在该条件下进行了 3 次平行实验,测得环己酮平均收率达87.3%.

(2)该催化体系不含过渡金属及无机盐类,绿色清洁,且选择性高,既避免了工业生产中的电化学腐蚀和大量无机盐类的产生,也避免了醇类的过度氧化.

参考文献:

[1] ZHAN Bizeng, THOMPSON A. Recent developments in the aerobic oxidation of alcohols[J]. Tetrahedron, 2004, 60(13): 2917-2935.

[2] MUZART J. Chromium-catalyzed oxidations in organic synthesis[J]. Chem Rev, 1992, 92(3): 113-140.

[3] REGEN S L, KOTEEL C. Activation through-impregnation per-manganate coated solid supports[J]. Chem Soc, 1977, 99(5): 3837-3838.

[4] GRIFFITH W P. Ruthenium oxo complexes as organic oxidants[J]. Chem Soc Rev, 1993, 32(3): 268-271.

[5] 丁永杰,赵春香,胡龙淮,等. 相转移催化法合成环己酮的研究[J]. 周口师范学院学报,2008, 25(2): 74 - 76.

[6] SATO K, AOKI M, TAKAGI J, et al. A practical method for alcohol oxidation with aqueous hydrogen peroxide under organic solvent and halide-free conditions [J]. Bull Chem Soc Jpn, 1999, 72(10): 2287 - 2306.

[7] 徐文俊,景丽,张富民,等. 杂多酸有机盐相转移催化研究进展[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 80 - 87.

[8] 高玉环,吕振波,桂建舟,等. 十聚钨酸季铵盐催化环己醇合成环己酮[J]. 工业催化, 2011, 19(3): 66 - 70.

[9] 贾增敏,章亚东. 环己醇合成环己酮的工艺研究[J]. 河南化工, 2013(5): 33 - 35.

[10] ADAM W, SAHA-MOLLER C R, GANESHPURE P A. Synthetic applications of nonmetal catalysts for homogeneous oxidations [J]. Chem Rev, 2001, 101(11): 3499 - 3548.

[11] ANELLI P L, BIFFI C, MONTANARI F, et al. Fast and selective oxidation of Primary alcohols to aldehydes or to carboxylic acids and of secondary alcohols to ketones mediated by oxoammonium salts under two-phase conditions [J]. Org Chem, 1987, 52(12): 2559 - 2562.

[12] ZHENG Zhi, LUO Min, YU Jianer, et al. Novel process for 1,3-dihydroxyacetone production from glycerol. 1. technological feasibility study and process design[J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(9): 3715 - 3721.

Study on the Synthesis of Cyclohexanone from Cyclohexanol Catalyzed by TEMPO

ZHANG Yadong, MA Jinling

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

Abstract: This paper establishes a metal-free catalytic system comprising 2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl(TEMPO), NaClO and NaBr, catalytic oxidation of cyclohexanol to cyclohexanone. This paper studies the effects of reaction time, pH, the dosage of the catalysts and solvent and so on. The optimum reaction conditions are as follows: cyclohexanol 0.3 g, TEMPO 0.005 g, NaBr 0.03 g, NaClO 0.45 g, CH_2Cl_2 7 mL, pH 9.1 and the reaction time 1 h. Three parallel experiments were performed under this condition, the average conversition of cyclohexanol was 88.2%, and the average yield of cyclohexanone could reach 87.3%.

Key words: cyclohexanol; cyclohexanone; 2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0014 - 04

Al-3Ti-0.2C-5Sr 铝合金细化剂制备工艺及凝固过程

赵红亮[1], 赵开新[2], 孙启宴[1]

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院,河南 郑州 450001;2. 河南机电高等专科学校 汽车工程系,河南 新乡 453002)

摘 要: 研究了浇铸温度、冷却速度和保温时间对 Al-3Ti-0.2C-5Sr 铝合金细化剂显微组织的影响,并通过 DSC 分析及液淬实验研究了其凝固过程. 结果表明:Al-3Ti-0.2C-5Sr 铝合金细化剂主要由 $TiAl_3$ 相、Al-Ti-Sr 相、TiC 颗粒及少量 Al_4Sr 相组成;随着浇铸温度的降低,合金中 $TiAl_3$ 相由长条状逐渐转变为块状,Al-Ti-Sr 相由包覆状转变为包覆状和块状共同存在;随着冷却速度的降低,$TiAl_3$ 相尺寸减小,包覆状 Al-Ti-Sr 相增厚;随着保温时间的延长,$TiAl_3$ 相逐渐消失,包覆状 Al-Ti-Sr 相转变为大块状;Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化剂的液固区间为 800 ~ 640 ℃,各相析出顺序为:$TiAl_3$ 相、Al-Ti-Sr 相、Al_4Sr 相、α - Al 相.

关键词: 细化剂;制备;凝固相变;Al-Ti-Sr 相

中图分类号: TG292 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.004

0 引言

铝硅系合金以其优异的铸造性能被广泛应用于航空航天、汽车制造等领域[1-2],但未经细化和变质的铝硅合金组织中 α-Al 晶粒粗大,共晶硅呈针片状,对其性能影响严重[3-4]. 目前,提高铝硅合金性能最直接有效的方式是向熔体中添加晶粒细化剂和共晶硅变质剂[5]. 郑州大学自主开发的 Al-Ti-C-Sr 细化剂具有细化和变质双重效果,可有效提高铝硅合金的性能[6-8]. 高雅等[9]通过正交实验优化出了 Al-Ti-C-Sr 细化剂的最优成分为 Al-3Ti-0.2C-5Sr,但其制备出的细化剂中各相形貌不能有效控制.

笔者研究 Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化剂制备过程中浇铸温度、冷却速度和保温时间对显微组织的影响,并对其凝固过程进行分析,为有效控制细化剂中各相的形貌、尺寸提供理论依据.

1 实验材料与方法

制备 Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化剂的实验原料为:工业纯铝、工业氟钛酸钾、石墨粉、工业纯锶. 工业纯铝的各元素百分含量如表 1 所示(质量分数,下同),工业氟钛酸钾的纯度大于 99%,石墨粉的平均粒度约为 74 μm,工业纯锶的纯度大于 99.9%.

表 1 工业纯铝的化学成分的质量分数

Tab. 1 Composition of commercial - purity aluminum of mass fraction %

Al	Fe	Si	Fe + Si	Cu	其他
≥99.60	≤0.25	≤0.20	≤0.36	≤0.01	≤0.03

将工业纯铝放入坩埚电阻炉中,720 ℃保温至纯铝完全熔化,升温至 950 ℃,加入预热好的氟钛酸钾和石墨粉并保温 60 min,期间每隔 15 min 搅拌一次,降温到 850 ℃加入纯锶,保温一段时间后浇铸,浇铸温度分别为 850,800,750 ℃. 冷却方式分为 3 种:第 1 种将熔体液淬到冰盐水中,冷却速度约为 500 ℃/s;第 2 种将熔体浇铸到直径 8 mm 的铸铁模具中,冷却速度约为 100 ℃/s;第 3 种将熔体浇铸到直径 60 mm 的铸铁模具中,冷却速度约为 20 ℃/s. 以纯锶加入后为起始时间,分别保温 15,30,45 min,将制备出的 Al-3Ti-0.2C-5Sr 进行 DSC 分析及液淬实验. DSC 实验参数如下:温度为 950 ~ 600 ℃;降温速度为 20 ℃/min;液淬温度分别为 780,750,720 ℃. 试样经人工研磨、抛光后用 0.5% HF 腐蚀 10 s,在 OLYMPUS 金

收稿日期:2015 - 06 - 28;**修订日期:**2015 - 08 - 10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174177)

作者简介:赵红亮(1972—),男,河南项城人,郑州大学教授,博士,主要从事新型铝、镁合金的研究,E-mail:zhlwkr@zzu.edu.cn.

相显微镜上观察合金组织.

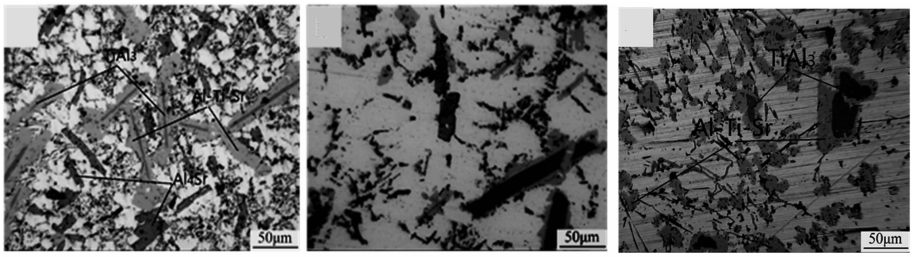
2　结果与讨论

2.1　制备工艺对 Al-3Ti-0.2C-5Sr 显微组织的影响

本课题组前期研究表明[9]：Al-3Ti-0.2C-5Sr 的显微组织中包含 $TiAl_3$ 相、Al-Ti-Sr 相、TiC 颗粒及少量 Al_4Sr 相，$TiAl_3$ 相全部被包覆在 Al-Ti-Sr 相内部，Al-Ti-Sr 相呈包覆状或块状. 图 1 为不同浇铸温度下 Al-3Ti-0.2C-5Sr 的显微组织. 由图 1 可知，当浇铸温度为 850 ℃时（图 1（a）所示），$TiAl_3$ 呈细的长条状，尺寸约为 20 μm × 100 μm，Al-Ti-Sr 相全部包覆在 $TiAl_3$ 相周围，无块状 Al-Ti-Sr 相；当浇铸温度为 800 ℃时（图 1（b）所示），$TiAl_3$ 相为较大的板条状，尺寸约为 30 μm × 70 μm，绝大多数 Al-Ti-Sr 相包覆在 $TiAl_3$ 相外围，存在少部分块状 Al-Ti-Sr 相；当浇铸温度降低到 750 ℃时（图 1（c）所示），$TiAl_3$ 相全部转变为大块状，尺寸约为 45 μm × 45 μm，Al-Ti-Sr 相以包覆状和块状共同存在，且块状 Al-Ti-Sr 相小于包覆状 Al-Ti-Sr 相. 由此可见，随浇铸温度降低，$TiAl_3$ 相先由大的长条状转变为较短的板条状，最后转变为块状，Al-Ti-Sr 相由全部为包覆状转变为包覆状和块状共同存在.

2.1.1　冷却速度的影响

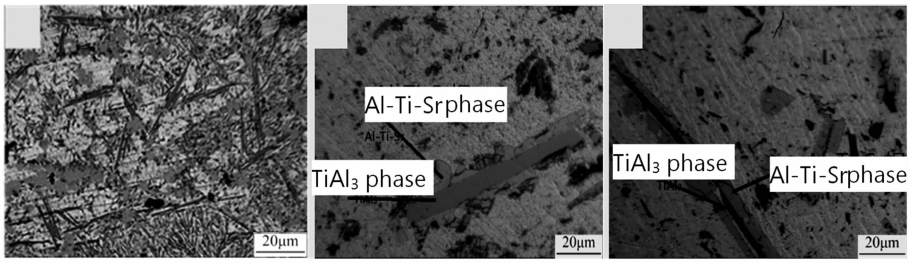
图 2 为不同冷却方式下的 Al-3Ti-0.2C-5Sr 显微组织形貌. 由图 2 可知，当冷却速度约为 500 ℃/s 时（图 2（a）所示），Al-3Ti-0.2C-5Sr 显微组织中中 $TiAl_3$ 相呈长条状或针片状，长度约为 50 μm，且 $TiAl_3$ 相周围基本没有包覆状 Al-Ti-Sr 相存在，仅存在少量块状 Al-Ti-Sr 相；当冷却速度降低到 100 ℃/s（图 2（b）所示），$TiAl_3$ 相呈板条状且周围出现少量包覆状 Al-Ti-Sr 相；当冷却速度进一步降低到 20 ℃/s 时（图 2（c）所示），包覆状 Al-Ti-Sr 相不断增厚. 可见，当冷却速度降低时，Al-Ti-Sr 相由块状转变为块状和包覆状共同存在，且包覆层不断增厚. 这是由于，冷却速度越大时，熔体的过冷度越大，Al-Ti-Sr 相直接从熔体中析出呈块状；冷却速度降低后，过冷度减小，块状 Al-Ti-Sr 相也随之减少，且 $TiAl_3$ 相有充分时间与熔体反应生成包覆状 Al-Ti-Sr 相，因此包覆状 Al-Ti-Sr 相不断增厚.



(a) 850 ℃　　(b) 800 ℃　　(c) 750 ℃

图 1　不同浇铸温度下 Al-3Ti-0.2C-5Sr 显微组织

Fig. 1　Microstructure of Al-3Ti-0.2C-5Sr refiner in different casting temperatures



(a) 液淬至冰盐水，冷速约500 ℃/s　(b) Φ8 mm 试样，冷速约100 ℃/s　(c) Φ60 mm 试样，冷速约20 ℃/s

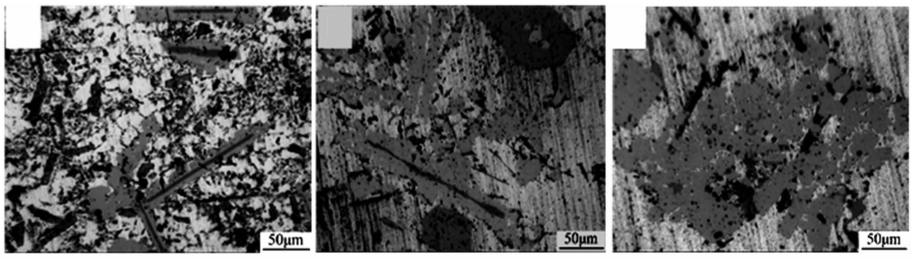
图 2　不同冷却方式下的 Al-3Ti-0.2C-5Sr 显微组织

Fig. 2　Microstructure of Al-3Ti-0.2C-5Sr refiner in different cooling rate

2.1.2　熔体保温时间的影响

图 3 为不同保温时间下 Al-3Ti-0.2C-5Sr 的显微组织. 由图 3 可知，当保温时间为 15 min 时（图 3（a）），Al-Ti-Sr 相绝大多数包覆在 $TiAl_3$ 相周围，尺寸约为 20 μm × 100 μm，块状 Al-Ti-Sr 相较少；当保温时间延长到 15 min 时（图 3（b）），包覆状 Al-Ti-Sr 相增厚，部分 $TiAl_3$ 相消失；当保温时间进一步增加到 45 min 后（图 3（c）），$TiAl_3$ 相

完全消失,Al-Ti-Sr 相均呈大的块状,尺寸约为 70 μm×70 μm,这是由于保温时间的延长增加了各相反应时间和长大时间.前期研究表明,包覆状 Al-Ti-Sr 相是由 $TiAl_3$ 相发生包晶反应形成的[9],因此,保温时间越长,包晶反应进行越完全,导致 $TiAl_3$ 相逐渐消失,小块状 Al-Ti-Sr 相长成大块状.



(a) 15 min (b) 30 min (c) 45 min

图 3 不同保温时间下的 Al-3Ti-0.2C-5Sr 的显微组织

Fig. 3 Microstructure of Al-3Ti-0.2C-5Sr under different holding time

2.2 Al-3Ti-0.2C-5Sr 的凝固过程

图 4 为铸态 Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化剂的差示扫描量热(DSC)分析曲线.图 5 为不同温度点的 Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化剂的液淬组织.由图 4 可知,在 900~600 ℃凝固范围内,Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化剂的 DSC 曲线出现 3 个明显的放热峰:A,B,C,而 A_1,B_1,C_1 分别对应着各相析出的开始温度,D 点为凝固结束温度.结合 Al-Ti、Al-Sr 二元相图及相关文献[10-12]分析可知,A 点对应着 $TiAl_3$ 相吸热峰,开始析出温度约为 800 ℃;B 点对应着 Al_4Sr 相吸热峰,开始析出温度约为 740 ℃;C 点对应着 α-Al 吸热峰;D 点为凝固结束温度,约为 640 ℃.

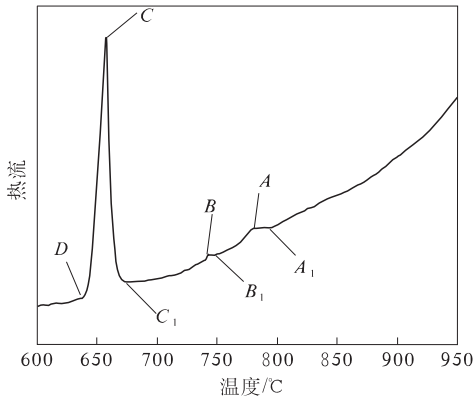
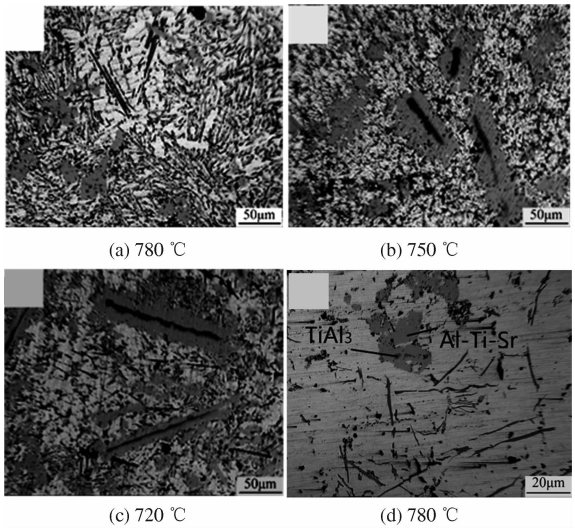


图 4 Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化变质剂的 DSC 凝固曲线

Fig. 4 DSC curve of the solidification for Al-3Ti-0.2C-5Sr

由图 5 可知,780 ℃下的液淬组织中存在细长条状 $TiAl_3$ 相和块状 Al-Ti-Sr 相,且部分块状 Al-Ti-Sr 相内部存在小部分 $TiAl_3$ 相(如图 5(d)),说明小块状 Al-Ti-Sr 相也是由 $TiAl_3$ 相与 Sr 元素发生包晶反应形成.750 ℃和 720 ℃的液淬组织均存在块状和包覆状 Al-Ti-Sr 相,且尺寸相差不大,在 720 ℃液淬组织中出现针状 Al_4Sr 相.因此,Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化变质剂的液固区间为 800~640 ℃,各相析出顺序为:$TiAl_3$ 相、Al-Ti-Sr 相、Al_4Sr 相、α-Al 相.



(a) 780 ℃ (b) 750 ℃

(c) 720 ℃ (d) 780 ℃

图 5 Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化变质剂的液淬组织

Fig. 5 Liquid quenching microstructure of Al-3Ti-0.2C-5Sr

分析 DSC 曲线及液淬组织可知,当熔体温度约为 800 ℃时,$TiAl_3$ 相直接从熔体中析出,$TiAl_3$ 相在析出过程中迅速与液相发生包晶反应,形成小块状 Al-Ti-Sr 相.但是,由于熔体中 Sr 元素分布不均匀,部分 $TiAl_3$ 相周围 Sr 元素浓度较低,包晶反应不能完全进行,形成包覆状 Al-Ti-Sr;并且,随着凝固过程的进行,原子不断扩散,使得包覆状 Al-Ti-Sr 相不断长大,随着液淬温度的进一步降低,熔体中开始析出 Al_4Sr 相.

3　结论

(1)随着浇铸温度的降低,Al-3Ti-0.2C-5Sr 合金中 $TiAl_3$ 相先由大的长条状转变为较短的板条状,最后转变为块状,Al-Ti-Sr 相由全部为包覆状转变为包覆状和块状共同存在.

(2)随着冷却速度的降低,$TiAl_3$ 相尺寸减小,包覆状 Al-Ti-Sr 相增厚.

(3)随着保温时间的延长,$TiAl_3$ 相逐渐消失,小块状和包覆状 Al-Ti-Sr 相转变为大块状 Al-Ti-Sr 相.

(4)Al-3Ti-0.2C-5Sr 细化变质剂的液固区间为 800 ~ 640 ℃,各相析出顺序为:$TiAl_3$ 相、Al-Ti-Sr 相、Al_4Sr 相和 α-Al 相. 块状 Al-Ti-Sr 相和包覆状 Al-Ti-Sr 相均由 $TiAl_3$ 相通过包晶反应形成.

参考文献:

[1] 王一诚,任树勇,高飞,等. 金属型真空重力精密铸造技术的研究及在铝硅系合金铸造上的应用[J]. 金属加工(热加工), 2008(17):63 – 64.

[2] EJIOFOR J U, REDDY R G. Development in the processing and proper-ties of particulate Al-Si composites [J]. JOM, 1997, 49(11): 31 – 37.

[3] 舒华记,司乃潮,孙少纯,等. $AlTi_5B_1$ 对亚共晶铝硅合金的组织和性能的影响[J]. 铸造, 2011, 60(11):1122 – 1125.

[4] WU Yaping, WANG Shujun, LI Hui. A new technique to modify hypereutectic Al ~ 24% Si alloys by a Si-P master alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 477(1): 139 – 144.

[5] WU Shusheng, TU Xiaolin, FUKUDA Y. Modification mechanism of hypereutectic Al-Si alloy with P-Na addition [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 6(13): 1285 – 1289.

[6] 白慧龙. Al-Ti-C-Sr 中间合金的制备及其细化性能研究[D]. 郑州:郑州大学材料科学与工程学院, 2008.

[7] 王军. Al-Ti-C-Sr 的合成机制及其细化行为研究[D]. 郑州:郑州大学材料科学与工程学院, 2009.

[8] 白慧龙,王军,赵红亮,等. Al-Ti-C-Sr 对 A356 合金的组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(3):15 – 17

[9] 赵红亮,高雅,孙启宴,等. Al-Ti-C-Sr 细化剂制备的正交优化及挤压研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(3):27 – 30.

[10] YAN Youwei, FU Zhengyi. Grain refining performance of SHS Al_5TiC master alloys for commercially pure aluminum [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 17(3): 5 – 8.

[11] 米国发,文涛,龚海军,等. Al-Si 合金 Sr 变质研究现状[J]. 航天制造技术, 2006(4):49 – 52

[12] KUMAR G S, MURTY B S, CHAKROABTRY M. Development of Al-Ti-C grain refiners and study of their grain refining efficiency on Al and Al-7Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 396(1/2): 143 – 150.

Preparation and Solidification Process of Al-3Ti-0.2C-5Sr Grain Refiner

ZHAO Hongliang[1], ZHAO Kaixin[2], SUN Qiyan[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Automotive Engineering & Technology, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China)

Abstract: The influence of casting temperature, holding time and cooling rate on Al-3Ti-0.2C-5Sr alloy microstructure, and the solidification processes were studied by DSC analysis and liquid quenching experiments. The results show that, Al-3Ti-0.2C-5Sr grain refiner is composed of $TiAl_3$ phase, Al-Ti-Sr phase, TiC phase and small amounts of Al_4Sr phase. With the increase of casting temperature, strip $TiAl_3$ phases in the alloy gradually transforms into massive, and the coated Al-Ti-Sr phases can change into block Al-Ti-Sr phases. With the decreasing cooling rate, size of $TiAl_3$ decreases the coated Al-Ti-Sr phases thickens. With the increase of the holding time, $TiAl_3$ phase gradually disappears, and the coated Al-Ti-Sr phases become big block phases. Liquid-solid temperature range of Al-3Ti-0.2C-5Sr grain refiner is 800 ~ 640 ℃, precipitation sequence of phases is $TiAl_3$ phases, Al-Ti-Sr phases, Al_4Sr phases and α-Al.

Key words: grain refiner; preparation; solidification process; Al-Ti-Sr phase

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0018 - 12

二硫化钼基纳米复合材料的构筑与应用

陈德良, 董会娜, 张　锐

(郑州大学 材料科学与工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 二硫化钼(MoS_2)具有典型的层状结构,易于形成寡层 MoS_2 纳米片,具有丰富的光、电、催化性能,在光电信息与能源转换等领域有广泛应用潜力. 采用含钼化工原料并通过湿化学、气相沉积等方法制备寡层 MoS_2 纳米片,继而构筑 MoS_2 纳米片基功能纳米复合材料,是目前国内外的研究热点;但是,以化工钼试剂为原料制备 MoS_2 纳米片的工艺路线长且不绿色. 而辉钼矿是以层状 MoS_2 为主要组分的矿物,在我国储量大,是制备寡层 MoS_2 纳米材料的良好原料,因此,以经提纯处理的层状结构辉钼矿为直接原料,采用插层 - 剥离技术制备寡层 MoS_2 纳米片是一种低碳经济途径.

关键词: 辉钼矿;二硫化钼;二维层状结构;插层与剥离;矿物材料;功能复合材料

中图分类号: TQ110,TD985　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.005

0　引言

辉钼矿在我国储量大,主要成分为层状结构二硫化钼(MoS_2),其物化性能丰富、应用前景广阔,研究基于辉钼矿"新材料"利用的基础科学问题,具有重要的理论意义与经济价值. 我国钼矿资源保有储量约 840 万 t,约占世界 25%,居世界首位,其中河南境内钼矿资源占全国近 30%,洛阳栾川有"中国钼都"之称. 作为最具工业价值的钼矿资源,辉钼矿的主要成分是二硫化钼,具有典型的层状结构和半导体特性,在高温高压固体润滑剂、整流和换能电子器件、复杂烃类的加氢脱硫催化剂、释氢催化剂、储能材料等领域具有广阔的应用前景. 辉钼矿属不可再生资源,探索其精深加工方法及高性能材料化应用,是钼矿产业可持续发展的必由之路,对促进矿业经济的低碳绿色转型发展具有现实意义.

二维层状纳米结构在光学、电子、催化等领域具有突出的优异特性与潜在应用[1],而剥离层状结构固体是制备高质量的近原子层厚度的二维纳米材料的有效途径[2]. 层状结构固体很多,包括石墨、六方 BN、MoS_2 等过渡金属硫簇化合物、$MoCl_2$ 等金属卤化物、MoO_3 等氧化物、层状磷酸盐、黏土、Ti_3C_2 等,具有丰富的电学、光学、力学、电化学与催化性能[3-4],它们层内是强的化学键结合,而层间靠较弱的范德华力维系三维结构. 氧化还原、热冲击、超声空化、离子交换、离子插层、机械剪切等作用可克服层间的范德华力而剥离成二维纳米片,而层内强的化学键保证了纳米片的稳定性(图 1(a))[4-5]. 层状结构剥离以后,可使大量层间界面变为外表面而增加比表面积,为催化、吸附、气敏等应用创造无限可能;此外,剥离所得的寡层二维纳米结构,由于电子结构的改变,可能出现前所未有的光、电性能[6-7]. 相对于化学合成,层状固体剥离法具有可预见性,易得大面积、单晶原子层厚的二维纳米片结构[8],是宏量制备二维纳米片晶材料的重要方法,也是目前材料研究的热点与前沿.

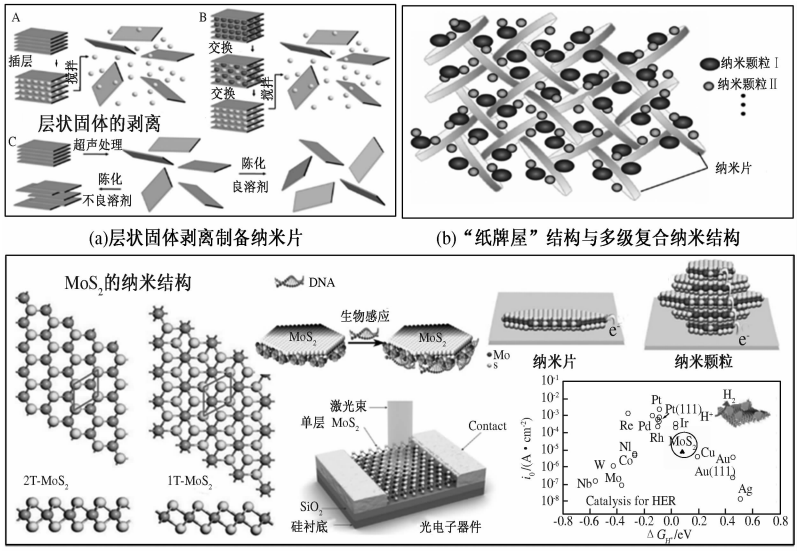
团聚(或堆叠)是单一低维纳米结构(尤其是超薄二维纳米片)在使用过程面临的难题. 克服团聚与功能化是二维纳米晶得以有效利用的基本前提,锚固功能第二相纳米晶、构筑多级复合纳米材料是克服团聚并实现功能化的有效途径[9]. 基于二维纳米片的杂化复合,锚固功能第二相纳米晶,构筑多维、多功能纳米复合材料具有诸多优势. 第二相纳米晶的锚固杂化,藉"纸牌屋"空间

收稿日期: 2015 - 07 - 20;**修订日期:** 2015 - 08 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574205,51172211);中国博士后科学基金资助项目(2013M531682,2014T70682);河南省高校创新人才资助项目(14HASTIT011);河南省杰出青年基金资助项目(154100510003)

作者简介: 陈德良(1975—),男,湖南祁阳人,郑州大学教授,博士,主要从事纳米陶瓷与功能复合材料研究,E-mail: dlchen@ zzu. edu. cn.

位阻效应从而克服纳米片的重新堆叠难题(图 1(b));同时,第二相纳米晶的锚固为功能导向设计复合材料提供了更多手段. 基于二维纳米片锚固杂化低维纳米晶,形成多级复合纳米结构,为气体与液体分子、离子的扩散提供快速通道;同时,第二功能相纳米晶与纳米片形成异质结而诱导协同效应,可大幅提高纳米复合材料的储能、催化、化学传感等应用性能.



(a)层状固体剥离制备纳米片　　(b)“纸牌屋”结构与多级复合纳米结构

(c) 寡层二硫化钼(MoS_2)的物相结构与应用[7]

图 1　层状固体剥离工艺与二维纳米结构材料

Fig. 1　Exfolidtion of layered solids and two-dimensional nano-materials

低维 MoS_2 纳米片及其复合材料具有丰富的物化特性,在催化、能源转换与储存、环境净化、润滑等领域得到广泛应用,可控宏量、廉价绿色地制备 MoS_2 基材料具有重要的理论意义与经济价值. 二维 MoS_2 纳米片拥有奇特的维度与尺寸相关的摩擦学、电学、光学、催化性能,在场效应晶体管、光电子元件、释氢与加氢脱硫催化剂、电化学储能、高压真空固体润滑剂等方面具有广阔应用前景[10-12]. 块体 MoS_2 为间接能隙半导体(E_g = 1.2 eV),而其单层结构则是能隙为 1.8 eV 的直接能隙半导体,具有荧光特性,可作生物标识剂,也是有效的太阳光吸收剂;尤其是 MoS_2 纳米晶具有优异的产氢催化性能,有望取代 Pt 等贵金属,大幅降低成本(图 1(c)),此外,MoS_2 基纳米复合材料可做锂(钠)离子电池的电极. 2H-MoS_2 纳米片具有半导体性质,而 1T-MoS_2 纳米片则具有金属特性(图 1(c)),并且这两种物相与片层结构调整对催化性能有重要影响. 2H-MoS_2 纳米片是继石墨烯之后最具应用潜力的半导体二维纳米材料之一[13]. 寡层 MoS_2 纳米片的可控宏量制备及其性能调控是目前国际研究的热点与前沿[14].

以我国储量丰富的层状辉钼矿为研究对象,经超细、分选与提纯制得的 MoS_2 微粉为起始物,以环境友好的醇/水、超临界 CO_2 等为剥离介质,藉“砂磨 - 超声”、“剪切 - 超声”等多力场耦合作用剥离辉钼矿,制备寡层 MoS_2 纳米片;并以所得寡层 MoS_2 纳米片为基体,藉功能导向锚固杂化功能第二相,构筑催化产氢、储能电极、化学传感的新材料,对深化理解层状固体矿物的插层剥离规律、促进矿物 - 材料学科交叉融合发展具有重要的科学价值,对促进矿业经济的低碳、精细化发展具有现实意义.

1　辉钼矿开发利用研究进展

1.1　辉钼矿的高效分离

辉钼矿与黄铜矿、石英等脉石矿物的物理分离,可制备辉钼矿粗精矿. 辉钼矿表面疏水,浮选分离辉钼矿与脉石获得辉钼矿精矿是目前的有效方法[15]. 郑州大学刘炯天等[16]将旋流 - 静态微泡浮选柱应用于辉钼矿的分选. 中南大学范子恒等[17]通过单矿物试验为辉钼矿与黄铜矿的分离找到了合适的药物制度. 中南大学陈立等[18]研究分析了辉钼矿浮选体系中的界面作用,明确了影响辉钼矿浮选指标的决定性因素是捕收剂在矿浆中的分散性. 武汉科技大学张兴旺等[19]研究了微细粒辉钼矿的浮选特性,发现粒度越细浮选效果越差. 日本 Hirajima 等[20]利用等离子体预处理矿

石,显著提高辉钼矿与黄铜矿浮选分离的选择性.目前已有的浮选技术能满足辉钼矿分选要求.

1.2 辉钼矿的提纯

去除辉钼矿粗精矿中少量杂质矿物、残留药剂等可制备高纯辉钼矿(优质精矿).物理提纯、强化浮选和化学浸出等是提纯普通钼精矿制备优质辉钼矿精矿的有效途径[21].物理提纯包括磨矿-筛分法和剪切絮凝法,后者可将钼精矿中的 MoS_2 含量提高到97.8%以上.制备优质辉钼矿精矿的强化浮选法是通过添加调整剂和多段再磨,对普通钼精矿进一步细磨或擦洗,脱去部分烃类油物质,打散聚团,使辉钼矿单体与夹杂的脉石颗粒解离分散并经多段浮选而精选出优质辉钼矿精矿[22].化学浸出法包括盐酸浸出、氯盐浸出、氰化浸出和氟化浸出等[23].盐酸浸出法利用 HCl 与方解石($CaCO_3$)和方铅矿(PbS)反应生成可溶性 $CaCl_2$ 与 $PbCl_2$(加热)而除去方解石和方铅矿杂质.氯盐浸出法利用 $FeCl_3$ 氧化黄铜矿和方铅矿生成 $CuCl_2$ 和 $PbCl_2$,进而加入氯盐(如 NaCl、$CaCl_2$),使 $CuCl_2$ 和 $PbCl_2$ 等难溶物络合成 $CuCl_3^-$ 和 $PbCl_3^-$ 等可溶性络离子而除去.氰化浸出法利用氰化钠与杂质矿物硫化铜表面的铜离子反应生成可溶性铜络离子,可去除大部分次生铜矿物.氟化浸出法利用氢氟酸在强酸性且80 ℃下与石英等硅类杂质矿物反应生成可溶性硅氟酸盐,从而除去硅类杂质矿物.普通钼精矿经过物理与化学提纯,可得到 MoS_2 含量达99%以上的辉钼矿精矿.

1.3 辉钼矿的高值利用

辉钼矿精矿经冶炼、加工,可制备金属钼粉、钼炉料、含钼化工试剂与功能材料.钼精矿通常经氧化焙烧和湿法浸出冶炼成金属钼粉、钼炉料或化工原料.氧化焙烧法将辉钼矿在氧化性条件下焙烧得到焙砂,然后用升华法或湿法制备三氧化钼,再经氢还原生产金属钼粉[24].近年来研究人员开发了包括添加碱性物质焙烧工艺(有利于钼铼分离)、部分还原焙烧工艺、直接热解工艺等新方法,具有节能、环保等优点[25].湿法浸出是在矿浆状态下强氧化反应将 MoS_2 氧化浸出,包括硝酸浸出法、氧压酸煮法、氧压碱煮法、次氯酸钠法、氯碱法、电氧化法等,最后产品多数是 H_2MoO_4 或 Na_2MoO_4[26].另一方面,优质辉钼矿精矿是制备高纯超细二硫化钼粉体的原料.高纯超细辉钼矿中 MoS_2 的含量可高达98%以上,其本身经短流程处理就是高档固体润滑剂、催化剂、光电功能材料.Simeonov 等[27]将球磨活化辉钼矿制备的 MoS_2 微粉用作 CO 加氢合成醇的催化剂,其成本比用钼酸铵制得的催化剂显著降低.英国曼彻斯特大学 Savjani 等[28]以辉钼矿为原料,在 NMP 溶液中超声剥离,得到边长200~600 nm、结晶好的寡层 MoS_2 纳米片.以天然辉钼矿为直接原料制备功能材料是辉钼矿绿色、低碳利用的新方向,但是,这方面的研究刚起步,基本理论与相关技术稀缺.

综上,辉钼矿的分选与提纯技术比较成熟,可获得 MoS_2 含量在99%以上的高纯辉钼矿.目前,辉钼矿精矿主要用作制备金属钼粉、钼炉料或钼酸盐等化学试剂的原料,而直接以天然辉钼矿为起始物,经活化、剥离等深加工直接开发高性能功能材料的研究很少,亟需深入研究.

2 “自下而上”途径制 MoS_2 纳米晶

2.1 溶剂热(水热)法制备 MoS_2 纳米晶

溶剂热(水热)法是在液相密闭介质中200~240 ℃下生长 MoS_2 纳米晶.天津大学 Zhuo[29]以L-巯基丙氨酸为S源、以混杂 MoO_3-EDA 纳米线为Mo源兼模板,200 ℃水热法制得了由 MoS_2 纳米片构成的纳米管,其可见光响应电流密度达0.67 mA/mg.香港科技大学 Zheng 等[30]以含肼、二甲基甲酰胺(DMF)的水溶液为介质,200 ℃处理已插层硫代钼酸铵的 GO,利用 GO 层间限域生长了 MoS_2 纳米片,所得 MoS_2/rGO 混杂结构呈现优异的释氢(HER)催化性能(起始电位 $U_{onset}=140$ mV、Tafel 斜率 $T_{fs}=41$ mV/dec).韩国成均馆大学 Zhang 等[31]240 ℃水热处理含有 $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$、硫脲、GO、冰醋酸的水溶液,制得了超薄 MoS_2 纳米片与 rGO 的复合物,以3%质量分数 MoS_2/rGO 为活性物质的锂离子电池负极具有突出的倍率性能与循环稳定性($709\ mA\cdot h\cdot g^{-1}\cdot ℃^{-1}$,50次循环后能量密度 $860\ mA\cdot h\cdot g^{-1}\cdot ℃^{-1}$).溶剂热法适于原位合成 MoS_2 纳米晶,但有压力、温度高、较危险,产物结构稳定差,宏量制备寡层 MoS_2 纳米片有困难.

2.2 单源前驱物热分解制备 MoS_2 薄膜

以 $(NH_4)_2MoS_4$ 等硫代钼酸盐为前驱物,热分解法制备 MoS_2 纳米薄膜.台湾科学院 Liu 等[32]以 $(NH_4)_2MoS_4$ 的 DMF 溶液为源,在蓝宝石或 SiO_2/Si 晶片上500 ℃ Ar-H_2 气氛下、1 000 ℃/Ar-S 气氛下两步热解制得了寡层 MoS_2 薄膜,所得3L-MoS_2 薄膜制作的场效应晶体管的开/关电流比达 10^5,电子迁移率达 $6\ cm^2/(V\cdot s)$.美国加

利福尼亚大学 George 等[33]将含$(NH_4)_2MoS_4$的 N-甲基吡咯烷酮(NMP)溶液旋涂到 SiO_2/Si 片,Ar/H_2 气氛 480 ℃分解,Ar 气氛 1 000 ℃结晶,制得高结晶 MoS_2 薄膜;以该膜为沟道制得的背栅场效应晶体管的电子迁移率约为 0.1 $cm^2/(V\cdot s)$. 单元前躯体热分解法可制备较大面积的 MoS_2 薄膜,但是此法在热分解过程中放出大量 H_2S、NH_3 等有害气体,并且所得 MoS_2 片尺寸较小,厚度均匀性难控制.

2.3　化学气相沉积法制备寡层 MoS_2 薄膜

以元素 S、金属 Mo 或 MoO_3 为起始物,采用化学气相沉积法(CVD)制备寡层 MoS_2 薄膜. 美国斯坦福大学 Kong 等[34]以预先生长在 Si 基板上的 Mo 纳米膜(厚约 50 nm)为 Mo 源,Ar 气氛 550 ℃下热蒸发 S 粉,制得原位气相生长垂直取向的 MoS_2 纳米片薄膜;该膜主要以"边"为暴露位点,具有显著提高的 HER 活性;Wang 等[35]继而利用电化学插 Li^+ 调控 MoS_2 薄膜的层间距,使其由 2H 半导体相变为 1T 金属相,从而使 HER 的 Tafel 斜率由 115 ~ 123 mV/dec 下降到 43 ~ 47 mV/dec. 美国莱斯大学 Zhan 等[36]采用类似 CVD 法,分别以 S 粉与预先涂覆于 SiO_2 衬底的 Mo 膜为 S 源和 Mo 源,在 N_2 气氛 500 ~ 750 ℃下制得沿 SiO_2 衬底平面生长的寡层 MoS_2 薄层(2 ~ 4 层),其电阻为 1.46×10^4 ~ 2.84×10^4 Ω. 北卡罗莱纳州立大学 Yu 等[37]以 $MoCl_5$ 与 S 粉为反应物,采用低压 CVD 法在蓝宝石上 Ar 气氛 800 ℃下制得了层数可控的 MoS_2 薄膜,它具有良好的光致发光与场效应特性. 清华大学 Wang 等[38]以 S、MoO_3 为源,650 ~ 950 ℃下 S 蒸气还原 MoO_3 蒸气,生成了棱形 MoS_2 纳米片(边长约10 μm),其场效应晶体管的开/关电流比约达10^6、场效迁移率约为 0.3 $cm^2/(V\cdot s)$. 北京大学 Zhang 等[39-40]采用低压 CVD 法蒸发 MoO_3 与 S 粉,在 $SrTiO_3$(100)基底上生长出枝化单层 MoS_2 片,它表现出良好的 HER 催化性能(T_{fs} = 73 mV/dec);采用该方法在金箔上则可生长出边长可调(200 nm ~ 50 μm)的单层 MoS_2,其电催化 HER 性能优异(T_{fs} = 61 mV/dec,氢交换电流密度 38.1 A/cm^2)[40]. 中国科学院物理所 Zhang 等[41]以高纯 S、MoO_3 粉末为原料,在 SiO_2/Si 基底上 CVD 法制备了大小可控 MoS_2 单层(边长 20 nm ~ 1 μm),其场效应管的开/关电流比为 10^6、电子迁移率为 7 $cm^2/(V\cdot s)$. 英国牛津大学 Wang 等[42]以 S 粉、MoO_3 粉为原料,在 SiO_2/Si 基底上 Ar 气氛 CVD 生长出了 MoS_2 纳米片. 采用 CVD 法可以制备高质量的寡层 MoS_2 薄膜,其层厚、面积大小等可以调控,并且具有良好的电催化、场效应、可见光响应特性,但是,CVD 法设备复杂且难以量产. 由此可见,大面积、连续、均匀寡层 MoS_2 薄膜的制备仍是一个难题;同时,CVD 法会产生大量有毒废气,且 S 与 Mo 蒸气的利用率低.

2.4　光热烧蚀法制备 MoS_2 纳米颗粒

光热烧蚀法是在含 S 气氛中烧蚀钼靶制备 MoS_2 纳米晶. 天津大学 Cui 等[43]采用毫秒激光在二甲基三硫(CH_3-S-S-S-CH_3)气氛中烧蚀 Mo 靶,制得了类富勒烯 MoS_2 纳米颗粒,在 400 ~ 500 K 具有超快的光响应性能. 以色列 Albu-yaron 等[44]研究了高辐照太阳炉烧蚀诱导 MoS_2 纳米颗粒的结构与物相变化(由八面体到近球壳的连续演变). 可见,激光烧蚀法是制备 MoS_2 纳米颗粒的好方法,但是激光源比较昂贵,产量小.

3　"自上而下"途径制 MoS_2 纳米晶

3.1　离子插层化学法

离子插层化学法是以有机锂、钠盐为插层剂,经氧化还原反应剥离 MoS_2 固体来制备 MoS_2 纳米片. 新加坡南洋理工大学 Ambrosi 等[45]先将不同有机锂(甲基锂、正丁基锂、叔丁基锂)与 MoS_2 微粉(粒径 2 μm)在 Ar 气氛有机介质中室温反应 72 h 形成 Li 插层物,然后与水反应剥离得寡层 MoS_2 纳米片;发现不同有机锂对 MoS_2 产物的电化学性能有显著影响,丁基锂剥离 MoS_2 纳米片在电催化释氢以及电容器储能方面最优. 美国威斯康星大学 Lukowski 等[46]将丁基锂化学插层改性气相法生长的 2H-MoS_2 得 1T-MoS_2 纳米片,大幅提高了释氢催化性能(电流密度(10 mA · cm^2)与过电势(−187 mV)的比值,T_{fs} = 43 mV/dec). 新加坡国立大学 Zheng 等[47]研究了萘基钠($Na^+C_{10}H_8$)插层经 N_2H_4 高温预膨胀的 MoS_2 微粉,然后在水中超声剥离成单层 MoS_2 纳米片,层厚为 1 ~ 3层,其边长达 5 ~ 10 μm,其 PL 谱在 668 nm 处(1.86 eV)有强峰. 印度圣约瑟夫大学 Jeffery 等[48]将有机 Li 插层的 Li_xMS_2(M = Mo、W)与新制备的饱和 NH_4Cl 水溶液低温(−5 ℃)反应,制得氨化 MoS_2 与 WS_2(即$(NH_3)_y(NH_4^+)_xMS_2$);氨化产物在水溶液中室温超声处理 2 h 剥离成宽 12 μm、厚约 2 nm 的 MoS_2 与 WS_2 纳米片,其 PL 谱显示单层发射峰,当蒸发溶剂后 MoS_2 与 WS_2 纳米片

可重新堆叠成 MoS_2/WS_2 混杂物.

3.2 液相超声剥离法

液相超声剥离法是在NMP、DMF等有机介质中超声空化剥离 MoS_2 固体,制备 MoS_2 纳米片.都柏林大学圣三一学院 Coleman 等[49-50]首先提出在NMP、异丙醇(IPA)等液相介质中超声剥离层状固体制备寡层 MoS_2、WS_2、BN 纳米片,并用做聚合物的增强剂.韩国 Bang 等[51]添加 NaOH,显著提高了 NMP 液相超声剥离 MoS_2 微粉的效率,所得寡层 MoS_2 及其 MoS_2-rGO 复合物可做 Na 离子电池的负极(比容量为 200~250 $mA \cdot h \cdot g^{-1}$).瑞士洛桑理工大学 Yu 等[52]在1,2-二氯代苯(DCB)溶液中超声剥离 MoS_2 微粉(粒径约 2 μm)6 h,并 5 500 $r \cdot min^{-1}$离心分级出沉淀物,制得寡层 2H-MoS_2 纳米片,并用烷基三氯硅烷改性稳定了 MoS_2 纳米片.复旦大学 Xu 等[53]以 NMP 或 DMF 为介质室温超声(250 W)剥离 MoS_2 微粉 3 h,然后取上 2/3 悬浮液,并在 140 ℃下剧烈搅拌 6 h,而后2 000 $r \cdot min^{-1}$离心 5 min 分离得单层 MoS_2 量子点(上层清液)与纳米片(沉淀物),所得单层 MoS_2 量子点可做生物成像探针与产氢电催化剂($U_{onset}=120$ mV,$T_{fs}=69$ mV/dec).韩国 KIST 的 Yun 等[54]以异丙醇 IPA/H_2O_2 为介质,超声剥离 MoS_2 微粉,制得了部分氧化的 MoO_3/MoS_2 纳米片,并用作有机太阳能电池的空穴抽取层(HEL),提高了电池稳定性.美国南伊利诺伊大学 Winchester 等[55]在十二烷基吡咯烷酮(N12P)介质中剥离 MoS_2(超声 1 h,浓度 10 mg/mL,1 500 $r \cdot min^{-1}$离心分级 45 min),剥离产物做 EDLC 电容器,其比电容达 2.25~2.4 mF/cm^2.美国加利福尼亚大学 Halim 等[56]在醇/水介质中通过理性设计溶剂组成、调整其表面张力,提高了液相超声剥离 MoS_2 的效率,并发现浓度为 10%~30% 的丁醇或异丙醇水溶液(表面张力在 25~35 mJ/m^2)可大幅提高剥离产率.

3.3 机械剥离法

机械剥离法是在机械剪切力作用下剥离 MoS_2 固体,制备 MoS_2 纳米片.新加坡南洋理工大学 Li 等[57]用透明强力胶带剥离 MoS_2 晶体制备了寡层 MoS_2 纳米片,所得 MoS_2 纳米片场效应管对低浓度 NO 气体响应灵敏.爱尔兰都柏林大学圣三一学院 Varrla 等[58]以胆酸钠($C_{24}H_{39}NaO_5$)为表面活性剂,利用厨房搅拌机的高速旋转产生的剪切力剥离 MoS_2(边长约 6 μm)、WS_2(边长约 2 μm)与 BN(边长约 1 μm),系统研究了起始浓度、表活性剂浓度、转速、容积等对剥离产物的大小(边长与层数)、产率、剥离速度等影响规律;在优化条件下,寡层 MoS_2 浓度达 0.5 mg/mL、产率 1%、剥离效率约 1 mg/min.

3.4 电化学剥离法

电化学剥离制备 MoS_2 纳米片:以电化学场促进离子插层、水分解产气剥离 MoS_2 固体,制备 MoS_2 纳米片.韩国高丽大学 Liu 等[59]分别以 MoS_2 单晶、Pt 丝为工作电极与对电极,以 0.5 mol/L Na_2SO_4 水溶液为电解质,加 +10 V 的正偏压电解 0.5~2 h,由于 MoS_2 层间水分解产生的 H_2、O_2 气泡促使其剥离,产率为 5%~9%;所得寡层 MoS_2 纳米片(边长约 50 μm)面积大、质量高,其背栅场效应管的开/关电流比在 10^6 以上、场效应迁移率 1.2 $cm^2/(V \cdot s)$.

3.5 超临界 CO_2 辅助超声剥离法

超临界 CO_2 辅助超声剥离层状固体:超声空化促进超临界 CO_2 分子插层,剥离 MoS_2 等固体,制备 MoS_2 纳米片.上海交通大学 Wang 等[60]利用超临界 CO_2 介质(45 ℃、10 MPa)与超声(12~60 W)的协同作用 40 min,成功剥离 MoS_2 等固体,所得 MoS_2 纳米片的平均厚度为 0.75~0.8 nm;介质的压力、温度、超声功率与作用时间等对层状固体的剥离有重要影响.最近,Gao 等[61]研究了超临界 CO_2 介质辅助超声剥离石墨制备寡层石墨烯,剥离产率能达 40%~50%.可见,超临界 CO_2 介质辅助超声剥离层状固体效果明显,超声可促使 CO_2 分子进入层间而克服层间范德华力而剥离.但是,目前剥离装置还不完善,剥离机制也不清楚,剥离参数需进一步研究优化,其效率可望进一步提高.

3.6 溶剂研磨辅助超声法

溶剂研磨辅助促进超声液相剥离 MoS_2 微粉,制备 MoS_2 纳米片.美国佐治亚理工大学 Yao 等[62]先将粒度小于 10 μm 的 MoS_2 微粉在 NMP(或 DMF、DMSO)溶液中研磨 0.5~3 h,所得凝胶状混合物干燥后再分散于体积分数为 45% 的乙醇/水介质中,并高能超声 120 min,6 000 $r \cdot min^{-1}$离心分离 30 min,得剥离 MoS_2 纳米片;研磨时间延长能显著提高剥离效率,所得 MoS_2 纳米片具有 NH_3 敏特性.最近,墨尔本皇家理工大学 Nguyen 等[63]先将 MoS_2 粉末(粒径约 6 μm)在不同有机溶剂(NMP、乙腈、丙酮等)中研磨后干燥,继而在乙醇介质中高能超声(120 W/20 kHz)90

min,发现有机介质中研磨对后续的超声剥离有重要影响,低表面张力、低沸点的溶剂易于去除,而高表面张力与高沸点 NMP 牢固吸附在 MoS_2 纳米片表面,影响其表面性能.

4　MoS_2 纳米晶基功能复合材料

4.1　金属纳米晶/MoS_2 复合功能材料

负载 Au、Ag、Pt 等金属纳米晶可提高 MoS_2 复合材料催化等性能. 堪萨斯州立大学 Sreeprasad 等[64]以 Au 修饰 MoS_2 纳米片,显著提高了 MoS_2 场效应性能与热导率. 北京大学 Yang 等[65]以水热合成的 Ag-MoS_2 混杂物作为 CdS 的助催化剂,显著提高了可见光催化释氢性能. 日本东北大学 Ge 等[66-68]在 3D 纳孔 Ag-Au 合金(NPG)中用湿化学法沉积无定形 MoS_x($MoS_{2.7}$/NPG),或气相法生长寡层 MoS_2 薄膜(MoS_2/NPG),所得产物呈现高效电催化产氢性能(T_{fs} = 41 ~ 46 mV/dec). 南京邮电大学 Yu 等[69]以化学 Li 插层剥离 MoS_2 纳米片为载体,微波辐照均匀锚固了几纳米大小的金属 Au、Pt、Pd 颗粒,所得 Pd-MoS_2 纳米复合晶提高了甲醇氧化催化活性. 南洋理工大学 Hong 等[70]以电化学剥离的 MoS_2 纳米片为载体,在苯乙醇水溶液中 140 ℃下制得了 Pt-MoS_2 与 PtAg-MoS_2 等复合纳米晶,可做闪存器件.

4.2　氧化物半导体/MoS_2 复合功能材料

复合 SnO_2、Fe_3O_4 等氧化物半导体纳米晶,可提高 MoS_2 复合材料的气敏、催化与电化学储能性能. 美国威斯康辛大学 Cui 等[71]以 $SnCl_4$ 水溶液与经有机锂剥离 MoS_2 纳米片为原料,制得了 p 型 SnO_2/MoS_2 混杂半导体,对 NO_2 气体有良好响应. 南洋理工大学 Che 等[72]以 Na_2MoO_4 与硫代乙酰胺 220 ℃水热制得的 MoS_2 纳米片为基底,合成了 Fe_3O_4/MoS_2 混杂材料,作为 LIB 负极具有高可逆容量与倍率性能. 俄罗斯科学院 Kabachii 等[73]将带负电 MoS_2 纳米片与带正电 Fe_3O_4 纳米晶混合,自组装成 Fe_3O_4/MoS_2 混杂物,可做 SO_4^{2-} 氧化催化剂,有磁性且易于回收再用. 苏州大学 Liu 等[74]将经聚乙烯醇稳定的 Fe_3O_4/MoS_2 混杂物用于多模成像制备的癌症光热诊疗,成效显著. 北京理工大学 Zhao 等[75]将水热 MoS_2 纳米片与 Cu_2O 复合制得质量分数 1% 的 MoS_2/Cu_2O 混杂物,显著提高了可见光催化产氢性能.

4.3　碳纳米结构/MoS_2 复合功能材料

将石墨烯、碳纳米管等碳纳米结构与 MoS_2 纳米晶复合,可大幅提高产氢催化、锂电储能等性能. 武汉工业大学 Xiang 等[76]研究了石墨负载 MoS_2 纳米簇的界面结合与形貌演变. 斯坦福大学 Li 等[77]将 GO 分散于含有 $(NH_4)_2MoS_4$、肼的 DMF 溶液,200 ℃溶剂热法制得 MoS_2/rGO 复合产氢催化剂(U_{onset} = 100 mV、T_{fs} = 41 mV/dec). 西弗吉尼亚大学 Meng 等人[78]以氮掺杂 rGO(n 型)为载体,生长出 p 型 MoS_2 纳米片,形成具有 p - n 结的 MoS_2/N-rGO 光催化产氢催化剂,太阳光下平均产氢速率达 160.6 μmol/(g·h^{-1}). 复旦大学 Liao 等[79]以介孔石墨烯泡沫(MGF)为载体,溶剂热原位生长 MoS_2 纳米晶,得 MoS_2/MGF 高活性释氢电催化剂(T_{fs} = 42 mV/dec). 韩国科学技术院 Li 等[80]以掺氮碳纳米管(NCNT)为基体,制得了 MoS_x/NCNT 混杂产氢催化剂(U_{onset} = 75 mV、T_{fs} = 40 mV/dec). 堪萨斯州立大学 David 等[81]通过真空过滤寡层 MoS_2 纳米片与 GO 纳米片混合悬浮液,制得了 MoS_2/GO 复合纸,用作钠离子电池负极,具有高循环稳定性与高充电容量(约 230 mA · h/g). 美国麻省理工学院 Yu 等[82]采用 CVD 法生长出石墨烯与 MoS_2 纳米层,以 MoS_2 为晶体管沟道,以石墨烯为电极与连接电路,制成了高性能、大面积电路器件. 康奈尔大学 Kwak 等[83]研究了多层"MoS_2/石墨烯"异质结场效应晶体管的电子学特性. 美国莱斯大学 Gong 等[84]制备了 MoS_2/rGO 网状结构,并用作 LIB 负极,在 0.5 ℃时具有 1 200 mA·h/g 容量,在 12 ℃时也在 600 mA·h/g 以上容量,且循环 3 000 次以上无衰减;他们[85]将剥离的 MoS_2 纳米片与 GO 混合液 180 ℃水热 12 h 还原,制得三维 MoS_2/rGO 结构并用做 LIB 负极,显著提高了可逆比容量(1 200 mA·h/g)与倍率性能. 南洋理工大学 Wang 等[86]采用 200 ℃水热法制备含石墨烯泡沫(GF)、P123、Na_2MoO_4、硫脲的水溶液,制得了蜂窝状 MoS_2/GF 纳米结构,显著提高了 LIB 储能性能. 此外,采用电纺丝[87]、硬模版法[88]制备负载 MoS_2 纳米片的碳纳米纤维也能显著提高 LIB 储能性能.

4.4　其他组元/MoS_2 复合功能材料

将 C_3N_4、吡咯、Si、PbS 量子点等纳米晶 MoS_2 复合,可提高复合材料的光催化、光学与电学性能. 香港中文大学 Li 等[89]将 MoS_2 与 C_3N_4 复合构成异质结构,显著提高了可见光催化降解有机染料的速度. 德国马普所 Gao 等[90]以 MoS_2 为仿

生氧活化剂制备了 MoS_2/Ta_3N_5 复合结构,可用做选择性有氧氧化反应催化剂. 北京大学 Wang 等[91]将 MoS_x 与吡咯(PPy)复合,采用电化学法制作 PPy/MoS_x 薄膜并用做释氢催化剂,Tafel 斜率低至 29 mV/dec. 南洋理工大学 Tan 等[92]将 MoS_2 等单层片与聚集诱导发射分子 DDTA 复合,其 PL 谱显著提高. 威斯康辛大学 Ding 等[93]将化学剥离的金属性 1T-MoS_2 纳米片与 p 型 Si 复合制成异质结构 PEC 产氢催化剂,标准太阳辐照,0 V下的光电流可达 17.6 mA/cm^2. 西班牙光学研究院 Kufer 等[94]将 PbS 量子点与寡层 MoS_2 纳米片复合用做光电晶体管的沟道层,其响应灵敏度高达 6×10^5. 佐治亚理工大学 Tarasov 等[95]研究了氧化还原分子控制掺杂 3L-MoS_2 纳米片,采用分子调控可使 3L-MoS_2 纳米片背栅场效应晶体管的载流子浓度高达 8×10^{12} cm^{-2},功函数变化可达 ±1 eV.

4.5 多组元/MoS_2 复合功能材料

将两种或以两种上功能相纳米晶与 MoS_2 复合,藉于多组元协同效应,提高了复合材料的性能. 武汉工业大学 Xiang 等[76]采用两步水热法合成了(MoS_2-rGO)/TiO_2 复合催化剂(95% TiO_2),其产氢速率达165.3 μmol/(g·h). Chang 等[96]将 rGO 水热原位生长 MoS_2 纳米晶的 MoS_2/G 与 CdS 复合,制备了 MoS_2/G-CdS 三元复合催化剂,其可见光产氢催化性能显著提高. 中国科学院化学所 Wan 等[97]将寡层 MoS_2 纳米片与聚酰亚酯、GO 溶液超声混匀,经真空过滤、干燥、还原处理,制得高韧性的人工贝壳,通过协同利用 rGO 高力学性能与 MoS_2 纳米片润滑性,增强了增韧聚合物.

5 国内外研究动态分析

(1)目前,辉钼矿主要用于制备金属钼粉、钼炉料与钼酸盐等化工试剂,以高纯辉钼矿为直接原料深加工制备高性能功能材料的研究较少,亟需发展.

一方面,我国以辉钼矿为主的钼矿资源储量世界第一,目前分离提纯的辉钼矿精矿(MoS_2 含量高)主要用于冶炼金属钼粉、钼炉料,以及生产 MoO_3、钼酸盐等化工试剂. 另一方面,目前国际上正掀起以金属钼或可溶性钼酸盐为前驱物经化学途径制备 MoS_2 微纳米晶的热潮. 可见,上述路线形成了一个高冗余、相矛盾的技术闭环,导致能耗高、污染重,偏离了绿色、低碳发展理念. 事实上,优质辉钼矿精矿可直接制备高纯超细二硫化钼粉体(MoS_2 含量 98% 以上),其本身就具有优异的机械、物理和化学性能,是高档固体润滑剂、催化剂、光电功能材料. 其研究开发直接基于天然辉钼矿的功能新材料,具有绿色、低碳、价廉的优势. 但是,目前以天然辉钼矿为直接原料,经非化学深加工技术获取高性能 MoS_2 基功能材料的研究甚少,亟需创新思路,开展研究.

(2)以含钼化工试剂为原料制备 MoS_2 基纳米材料是目前的研究热点,但以辉钼矿为直接原料经插层剥离制备 MoS_2 纳米材料,流程短,更加绿色、低碳,值得深入研究.

目前,制备 MoS_2 纳米晶的主要途径有:①以可溶性含钼化学试剂为原料,采用湿化学途径,通过精细控制晶体生长参数条件来制备 MoS_2 纳米晶;②以氧化钼、硫等易于热蒸发的化学试剂为原料,经化学气相沉积法(CVD)生长 MoS_2 纳米片或薄膜;③以高纯 MoS_2 化学试剂为原料,经有机锂插层、超声剥离等方法制备寡层 MoS_2 纳米片. 湿化学法具有适应性强等优点,但影响因素多,难控制,产品均一性差;化学气相法制备电子器件用的 MoS_2 薄层有优势,但是条件要求高、效率低、成本高;MoS_2 化学试剂剥离法可行,但成本高、剥离效率低. 以高纯含钼化学试剂为原料来制备 MoS_2 纳米片存在一定问题,因为在天然矿物中本来就大量存在的 MoS_2 材料,这样不但增加了成本,而且加重了环境、能源负担.

(3)剥离层状固体是宏量制备寡层 MoS_2 纳米片的可行方案,但是目前大量报道主要集中在单一力场、有机介质中的剥离,剥离效率低且不环保;在环境友好的绿色溶剂中,利用两种或两种以上力场的耦合作用剥离辉钼矿的研究鲜有报道,亟待研究.

目前,以化工试剂 MoS_2 为原料,采用有机锂插层或液相剥离法制备 MoS_2 纳米片已有研究,该法经离心分级可得层数可控的 MoS_2 纳米片悬浮液. 但是,有机锂插层剥离法耗时 48 h 以上,需要有机溶剂及非氧、非水环境,成本高、不环保. 液相剥离法则是在超声等单一力场作用下进行,剥离产率与速度低,寡层 MoS_2 产物少,边长与厚度不易控制,宏量制备难度大. 层状固体剥离需要克服其层间范德华力,多种力场的耦合作用有利于提高剥离效率. 此外,探寻环境友好的剥离介质替代有机溶剂也是亟需研究的课题.

(4)由于寡层 MoS_2 纳米片的宏量制备、绿色制备方法未能实现突破,基于寡层 MoS_2 纳米片

复合功能材料在催化产氢、电极材料、化学传感等领域的应用也难以取得进一步发展,质优价廉的寡层 MoS_2 纳米片基复合功能材料亟需研发.

目前,湿化学法、化学气相沉积法是制备寡层 MoS_2 纳米晶复合材料的主要途径,但由于影响因素多,所得材料的组成、微观结构等不稳定,重复性差,难以获得可靠的构效规律.因此,只有在发展宏量制备技术的基础上,理性设计并构筑功能复合材料,选择稳定性高、重现性好的模型体系,研究其相关共性规律,才能突破关键技术难题,为寡层 MoS_2 纳米片基功能复合材料的宏量制备、绿色制备及高附加值应用提供理论依据与技术支撑.

6　结论与展望

日益加剧的环境(如雾霾)与能源问题迫切要求发展低碳经济.矿业产业中通过短流程、低碳工艺将矿物资源转变为高性能的能源与环境材料是发展低碳经济的重要思路.矿物的常规利用路线首先是将矿物的目标元素经物理分选、化学冶炼提纯等火法与湿法过程,制得化学试剂;然后再以含目标元素的化学试剂为直接原料,经沉淀、氧化还原等化学过程制备所需的新材料.该路线具有过程冗余、污染物多、能耗高、效率低等弊端,亟需探索新思路以实现从“矿物”到“新材料”的短流程、低碳与多功能化转变(即矿物材料).而以绿色低碳、短流程、功能化为特征的矿物材料开发是矿物加工与材料科学的交叉领域,是目前资源加工的研究热点与前沿.

剥离辉钼矿制备寡层 MoS_2 纳米片以及构筑功能复合材料的研究,不仅有助于深化理解层状固体的剥离机制,充实二维层状材料,而且有望为辉钼矿等我国优势矿物资源的低碳高值应用提供技术支持.

参考文献:

[1] HAMM J M, HESS O. Two-dimensional materials are better than one [J]. Science, 2013, 340(6138): 1298 – 1299.

[2] RAO C N R, MATTE H S S R, MAITRA U. Graphene analogues of inorganic layered materials [J]. Angew Chem, 2013, 52(50): 13162 – 13185.

[3] NICOLOSI V, CHHOWALLA M, KANATZIDIS M G, et al, Liquid exfoliation of layered materials [J]. Science, 2013, 340 (6139): 1420.

[4] DAI S, FEI Z, MA Q, et al. Tunable phonon polaritons in atomically thin van der waals crystals of Boron Nitride [J]. Science, 2014, 343 (6175): 1125 – 1129.

[5] HERNANDEZ Y, NICOLOSI V, LOTYA M, et al. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite [J]. Nat Nanotechnol, 2008, 3 (9): 563 – 568.

[6] MAK K F, MCGILL K L, PARK J, et al. The valley Hall effect in MoS_2 transistors [J]. Science, 2014, 344(6191): 1489 – 1492.

[7] LOPEZ-SANCHEZ O, LEMBKE D, KAYCI M, et al. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS_2 [J]. Nat Nanotechnol, 2013, 8(7): 497 – 501.

[8] VAROON K, ZHANG Xueyi, ELYASSI B, et al. Dispersible exfoliated zeolite nanosheets and their application as a selective membrane [J]. Science, 2011, 334(6052):72 – 75.

[9] LI Dan, MULLER M B, GILJE S, et al. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets [J]. Nat Nanotechnol, 2008, 3(2): 101 – 105.

[10] LAURSEN A B, KEGNAES S, DAHL S, et al. Molybdenum sulfides-efficient and viable materials for electro-and photoelectrocatalytic hydrogen evolution [J]. Energ Environ Sci, 2012, 5(2): 5577 – 5591.

[11] YABUUCHI N, KUBOTA K, DAHBI M, et al. Research development on sodiunion batteries [J]. Chem Rev, 2014, 114(23): 11636 – 11682.

[12] YAN Ya, XIA Baoyu, XU Zhichuan, et al. Recent development of molybdenum sulfides as advanced electrocatalysts for hydrogen evolution reaction [J]. ACS Catal, 2014, 4(6): 1693 – 1705.

[13] SORKIN V, PAN H, SHI H, et al. Nanoscale transition metal dichalcogenides: structures, properties, and applications [J]. Crit Rev Solid State, 2014, 39(5): 319 – 367.

[14] SUN Yongfu, GAO Shan, LEI Fengcai, et al. Ultrathin two-dimensional inorganic materials: new opportunities for solid state nanochemistry [J]. Accounts Chem Res, 2015, 48(1): 3 – 12.

[15] KOR M, KORCZYK P M, ADDAI-MENSAH J, et al. Carboxymethylcellulose adsorption on Molybdenite: the effect of electrolyte composition on adsorption, bubble-surface collisions and flotation [J]. Langmuir, 2014, 30(40): 11975 – 11984.

[16] 刘炯天,李小兵,王永田,等.旋流 – 静态微泡浮选柱浮选某难选钼矿的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(2): 300 – 306.

[17] 范子恒.辉钼矿与黄铁矿浮选分离试验研究及机理分析[D].长沙:中南大学资源加工与生物工程学

院,2013.

[18] 陈立. 辉钼矿浮选体系中的界面相互作用研究[D].长沙:中南大学化学化工学院,2007.

[19] 张兴旺. 微细粒辉钼矿聚团浮选研究[D].武汉:武汉科技大学资源与环境工程学院,2010.

[20] HIRAJIMA T, MORI M, ICHIKAWA O, et al. Selective flotation of chalcopyrite and molybdenite with plasma pretreatment [J]. Miner Eng, 2014, 6668: 102 - 111.

[21] 杨久流. 制备优质辉钼矿精矿的提纯技术[J]. 国外金属矿选矿, 2000(8):22 - 24.

[22] BRAGAP F A, CHAVES A P, LUZ A B, et al. The use of dextrin in purification by flotation of molybdenite concentrates [J]. Int J Miner Process, 2014, 127, 23 - 27.

[23] LESSARD J D, SHEKHTER L N. Thermodynamic modeling of atmospheric hydrometallurgical removal of chalcopyrite from molybdenite concentrates [J]. Hydrometallurgy, 2014, 150:9 - 13.

[24] 张鸿彪, 牟文宁,宋佩,等. 钼矿冶炼新工艺发展概论[J].材料导报, 2013, 27(22): 87 - 90.

[25] 刘旭恒,陈星宇,赵中伟,等.辉钼矿的造锍熔炼与吹炼[J].中国有色金属学报,2014,24(6): 1616 - 1622.

[26] GOODARIZ M M, REZAI B, SEIFIKHANI A. Leaching and kinetic modelling of molybdenite concentrate using hydrogen peroxide insulfuric acid solution [J]. J Chem Chem Eng, 2014, 33(2): 73 - 85.

[27] SIMEONOV K, KIM J H, FERRARI D, et al. CoMoS/K catalysts for higher alcohol synthesis from syngas prepared by mechano-chemical activation of molybdenite [J]. Catal Sci Technol, 2014, 4(4): 922 - 924.

[28] SAVJANI N, LEWIS E A, PATTRCK R A D, et al. MoS_2 nanosheet production by the direct exfoliation of molybdenite minerals from several type-localities [J]. RSC Adv, 2014,67(4): 35609 - 35613.

[29] ZHUO Sifei, XU You, ZHAO Weiwei, et al. Hierarchical nanosheet-based MoS_2 nanotubes fabricated by an anion-exchange reaction of MoO_3-amine hybrid nanowires [J]. Angew Chem, 2013, 52(33): 8602 - 8606.

[30] ZHENG Xiaoli, XU Jianbao, YAN Keyou, et al. Space-confined growth of MoS_2 nanosheets within graphite: the layered hybrid of MoS_2 and graphene as an active catalyst for hydrogen evolution reaction [J]. Chem Mater, 2014, 26(7): 2344 - 2353.

[31] ZHANG Kan, KIM H J, SHI Xinjian, et al. Graphene/acid coassisted synthesis of ultrathin MoS_2 nanosheets with outstanding rate capability for a lithium battery anode [J]. Inorg Chem, 2013, 52(17): 9807 - 9812.

[32] LIU Kengku, ZHANG Wenjing, LEE Y H, et al. Growth of large-area and highly crystalline MoS_2 thin layers on insulating substrates [J]. Nano Lett, 2012, 12(3): 1538 - 1544.

[33] GEORQE A S, MUTLU Z, IONESCU R, et al. Wafer scale synthesis and high resolution structural characterization of atomically thin MoS_2 layers [J]. Adv Funct Mater, 2014, 24(47): 7461 - 7466.

[34] KONG Desheng, WANG Haotian, CHA Jingjing, et al. Synthesis of MoS_2 and $MoSe_2$ films with vertically aligned layers [J]. Nano Lett, 2013, 13(3): 1341 - 1347.

[35] WANG Haotian, LU Zhiyi, XU Shicheng, et al. Electrochemical tuning of vertically aligned MoS_2 nanofilms and its application in improving hydrogen evolution reaction [J]. PANS, 2013, 110(49): 19701 - 19706.

[36] ZHAN Yongjie, LIU Zheng, NAJMAEI S, et al. Large-area vapor-phase growth and characterization of MoS_2 atomic layers on a SiO_2 Substrate [J]. Small, 2012, 8(7): 966 - 971.

[37] YU Yifei, LI Chun, LIU Yi, et al. Controlled scalable synthesis of uniform, high-quality monolayer and few-layer MoS_2 Films [J]. Sci Rep, 2013, 3:1866.

[38] WANG Xinsheng, FENG Hongbin, WU Yongmin, et al. Controlled synthesis of highly crystalline MoS_2 flakes by chemical vapor deposition [J]. J Am Chem Soc, 2013, 135(14): 5304 - 5307.

[39] ZHANG Yu, JI Qingqing, HAN Gaofeng, et al. Dendritic, transferable, strictly monolayer MoS_2 flakes synthesized on $SrTiO_3$ single crystals for efficient electrocatalytic applications [J]. ACS Nano, 2014, 8(8): 8617 - 8624.

[40] SHI Jianping, MA Donglin, HAN Gaofeng, et al. Controllable growth and transfer of monolayer MoS_2 on Au foils and its potential application in hydrogen evolution reaction [J]. ACS Nano, 2014, 8(10): 10196 - 10204.

[41] ZHANG Jing, YU Hua, CHEN Wei, et al. Scalable growth of high-quality polycrystalline MoS_2-monolayers on SiO_2 with tunable grain sizes [J]. ACS Nano, 2014, 8(6): 6024 - 6030.

[42] WANG Shanshan, RONG Youmin, FAN Ye, et al. Shape evolution of monolayer MoS_2 crystals grown by chemical vapor deposition [J]. Chem Mater, 2014, 26(22): 6371 - 6379.

[43] SONG Shutao, CUI Lan, YANG Jing, et al. Millisecond laser ablation of molybdenum target in reactive gas toward MoS_2 fullerene-like nanoparticles with thermally stable photoresponse [J], ACS Appl Mater Interf, 2015,7(3): 1949 - 1954.

[44] ALBU-YARON A, LEVY M, TENNE R, et al. MoS_2 hybrid nanostructures: from octahedral to quasi-spherical shells within individual nanoparticles [J]. Angew Chem, 2011, 50(8): 1810 – 1814.

[45] AMBROSI A, SOFER Z, PUMERA M. Lithium intercalation compound dramatically influences the electrochemical properties of exfoliated MoS_2 [J]. Small, 2015, 11(5):605 – 612.

[46] LUKOWSKI M A, DANIEL A S, MENG F, et al. Enhanced hydrogen evolution catalysis from chemically exfoliated metallic MoS_2 Nanosheets [J]. J Am Chem Soc, 2013, 135(28): 10274 – 10277.

[47] ZHENG Jian, ZHANG Han, DONG Shaohua, et al. High yield exfoliation of two-dimensional chalcogenides using sodium naphthalenide [J]. Nat Commun, 2014, 5: 2995.

[48] JEFFERY A A, NETHRAVATHI C, RAJAMATHI M. Two-dimensional nanosheets and layered hybrids of MoS_2 and WS_2 through exfoliation of ammoniated MS_2 (M = Mo, W) [J]. J Phys Chem C, 2014, 118(2): 1386 – 1396.

[49] COLEMAN J N, LOTYA M, O'NEILL A, et al. Two-Dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials [J]. Science, 2011, 331 (6017): 568 – 571.

[50] ONEILL A, KHAN U, COLEMAN J N. Preparation of high concentration dispersions of exfoliated MoS_2 with increased flake size [J]. Chem Mater, 2012, 24 (12): 2414 – 2421.

[51] BANG G S, NAM K W, KIM J Y, et al. Effective liquid-phase exfoliation and sodium ion battery Application of MoS_2 nanosheets [J]. ACS Appl Mater Interf, 2014, 6(10): 7084 – 7089.

[52] YU Xiaoyun, PRéVOT M S, SIVULA K. Multflake thin film electronic devices of solution processed 2D MoS_2 enabled by sonopolymer assisted exfoliation and surface modification [J]. Chem Mater, 2014, 26 (20): 5892 – 5899.

[53] XU Shengjie, LI Dian, WU Peiyi. One-pot, facile, and versatile synthesis of monolayer MoS_2/WS_2 quantum dots as bioimaging probes and efficient electrocatalysts for hydrogen evolution reaction [J]. Adv Funct Mater, 2015, 25(7): 1127 – 1136.

[54] YUN J M, NOH Y J, LEE C H, et al. Exfoliated and partially oxidized MoS_2 nanosheets by one-pot reaction for efficient and stable organic solar cells [J]. Small, 2014, 10(12): 2319 – 2324.

[55] WINCHESTER A, GHOSH S, FENG S, et al. Electrochemical characterization of liquid phase exfoliated two-dimensional layers of molybdenum disulfide [J]. ACS Appl Mater Interf, 2014, 6(3): 2125 – 2130.

[56] HALIM U, ZHENG Churan, CHEN Yu, et al. A rational design of cosolvent exfoliation of layered materials by directly proboing liquid-solid interaction [J]. Nat Commun, 2013, 4: 2213.

[57] LI Hai, WU Jing, YIN Zongyou, et al. Preparation and applications of mechanically exfoliated single-layer and multilayer MoS_2 and WSe_2 nanosheets [J]. Accounts Chem Res, 2014, 47(4): 1067 – 1075.

[58] VARRLA E, BACKES C, PATON K R, et al. Large-scale production of size-controlled MoS_2 nanosheets by shear exfoliation [J]. Chem Mater, 2015, 27(3): 1129 – 1139.

[59] LIU Na, KIM P, KIM J H, et al. Large-area atomically thin MoS_2 nanosheets prepared using electrochemical exfoliation [J]. ACS Nano, 2014, 8(7): 6902 – 6910.

[60] WANG Yan, ZHOU Chenghong, WANG Wucong, et al. Preparation of two dimensional atomic crystals BN, WS_2, and MoS_2 by supercritical CO_2 assisted with ultrasound [J]. Ind Eng Chem Res, 2013, 52(11): 4379 – 4382.

[61] GAO Yahui, SHI Wen, WANG Wucong, et al. Ultrasonic-assisted production of graphene with high yield in supercritical CO_2 and its high electrical conductivity film [J]. Ind Eng Chem Res, 2014, 53(7): 2839 – 2845.

[62] YAO Yagang, TOLENTINO L, YANG Zhongzheng, et al. High-concentration aqueous dispersions of MoS_2 [J]. Adv Funct Mater, 2013, 23(28): 3577 – 3583.

[63] NGUYEN E P, CAREY B J, DAENEKE T, et al. Investigation of two-solvent grinding-assisted liquid phase exfoliation of layered MoS_2 [J]. Chem Mater, 2015, 23(1): 53 – 59.

[64] SREEPRASAD T S, NGUYEN P, KIM N, et al. Controlled, defect-guided, metal-nanoparticle incorporation onto MoS_2 via chemical and microwave routes: electrical, thermal, and structural properties [J]. Nano Lett, 2013, 13(9): 4434 – 4441.

[65] YANG Lei, ZHONG Ding, ZHANG Jingyu, et al. Optical properties of metal molybdenum disulfide hybrid nanosheets and their application for enhanced photocatalytic hydrogen evolution [J]. ACS Nano, 2014, 8(7): 6979 – 6985.

[66] GE Xingbo, CHEN Luyang, ZHANG Ling, et al. Nanoporous metal enhanced catalytic activities of amorphous molybdenum sulfide for high-efficient hydrogen production [J]. Adv Mater, 2014, 26(19): 3100

-3106.

[67] TAN Yongwen, LIU Pan, CHEN Luyang, et al. Monolayer MoS_2 films Supported by 3D nanoporous metals for high-efficiency electrocatalytic hydrogen production [J]. Adv Mater, 2014, 26(47): 8023-8028.

[68] PADILLA R, OPAZO C, RUIZ M C. Kinetics of copper removal from sulfidized molybdenite concentrates by pressure leaching [J]. Metall Mater Trans B, 2015, 46(1): 30-37.

[69] YU Wen, Lihui, XU Fei. General synthesis of noble metal (Au, Ag, Pd, Pt) nanocrystal modified MoS_2 nanosheets and the enhanced catalytic activity of Pd-MoS_2 for methanol oxidation [J]. Nanoscale, 2014, 6: 5762-5769.

[70] HONG Xun, LIU Juqing, ZHENG Bing, et al. A Universal method for preparation of noble metal nanoparticle-decorated transition metal dichalcogenide nanobelts [J]. Adv Mater, 2014, 26(36): 6250-6254.

[71] CUI Shumiao, WEN Zhenhai, HUANG Xingkai, et al. Stabilizing MoS_2 nanosheets through SnO_2 nanocrystal decoration for high-performance gas sensing in air [J]. Small, 2015, 11(19): 2305-2313.

[72] CHE Yu , SONG Bohang, TANG Xiaosheng, et al. Ultrasmall Fe_3O_4 nanoparticle /MoS_2 nanosheet composites with superior performances for lithium ion batteries [J]. Small, 2014, 10(8): 1536-1543.

[73] KABACHII Y A, GOLUB A S, KOCHEV S Y, et al. Multifunctional nanohybrids by self-assembly of monodisperse iron oxide nanoparticles and nanolamellar MoS_2 plates [J]. Chem Mater, 2013, 25(12): 2434-2440.

[74] LIU Teng, SHI Sixiang, LIANG Chao, et al. Iron oxide decorated MoS_2 nanosheets with double PEGylation for chelator-free radio labeling and multimodal imaging guided photothermal therapy [J]. ACS Nano, 2015, 9(1): 950-960.

[75] ZHAO Yufei, YANG Zhiyu, ZHANG Yuxia, et al. Cu_2O decorated with cocatalyst MoS_2 for solar hydrogen production with enhanced effciency under visible Light [J]. J Phys Chem C, 2014, 118(26): 14238-14245.

[76] XIANG Quanjun, YU jiaguo, JARONIEC M. Synergetic effect of MoS_2 and graphene as cocatalysts for enhanced photocatalytic H_2 production activity of TiO_2 Nanoparticles [J]. J Am Chem Soc, 2012, 134(15): 6575-6578.

[77] LI Yanguang, WANG Hailiang, XIE Liming, et al. MoS_2 nanoparticles grown on graphene: an advanced catalyst for the hydrogen evolution reaction [J]. J Am Chem Soc, 2011, 133(19): 7296-7299.

[78] MENG Fanke, LI Jiangtian, CUSHING S K, et al. Solar hydrogen generation by nanoscale p-n junction of p-type molybdenum disulfide/n-type nitrogen-doped reduced graphene oxide [J]. J Am Chem Soc, 2013, 135(28): 10286-10289.

[79] LIAO Lei, ZHU Jie, BIAN Xiaojun, et al. MoS_2 formed on mesoporous graphene as a highly active catalyst for hydrogen evolution [J]. Adv Funct Mater, 2013, 23(44): 5326-5333.

[80] LI Dongjun, MAITI U N, LIM J, et al. Molybdenum sulfide/N-doped CNT forest hybrid catalysts for high-performance hydrogen evolution reaction [J]. Nano Lett, 2014, 14(3): 1228-1233.

[81] DAVID L, BHANDAVAT R, SINGH G. MoS_2/graphene composite paper for sodium-ion battery electrodes [J]. ACS Nano 2014, 8(2): 1759-1770.

[82] YU Lili, LEE Y H, LING Xi, et al. Graphene/MoS_2 hybrid technology for large-scale two-dimensional electronics [J]. Nano Lett, 2014, 14(6): 3055-3063.

[83] KWAK J Y, HWANG J, CALDERON B, et al. Electrical characteristics of multilayer MoS_2 FET's with MoS_2/graphene heterojunction contacts [J]. Nano Lett, 2014, 14(8): 4511-4516.

[84] GONG Yongli, YANG Shubin, LIU Zheng, et al. Graphene-network-backoned architectures for high-performance lithium storage [J]. Adv Mater, 2013, 25(29): 3979-3984.

[85] GONG Yongli, YANG Shubin, ZHAN Liang, et al. A bottom-up approach to build 3D architectures from nanosheets for superior lithium storage [J]. Adv Funct Mater, 2014, 24(1): 125-130.

[86] WANG Jin, LIU Jilei, CHAO Dongliang, et al. Self-assembly of honeycomb-like MoS_2 nanoarchitectures anchored into graphene foam for enhanced lithium-ion storage [J]. Adv Mater, 2014, 26(42): 7162-7169.

[87] ZHU Changbao, MU Xiaoke, VAN AKEN P A, et al. Single-layered ultrasmall nanoplates of MoS_2 embedded in carbon nanofibers with excellent electrochemical performance for lithium and sodium storage [J]. Angew Chem, 2014, 53(8): 2152-2156.

[88] ZHOU Fei, XIN Sen, LIANG Haiwei, et al. Carbon nanofibers decorated with molybdenum disulfide nanosheets: synergistic lithium storage and enhanced electrochemical performance [J]. Angew Chem, 2014, 53(43): 11552-11556.

[89] LI Qian, ZHANG Ning, YANG Yong, et al. High efficiency photocatalysis for pollutant degradation with

MoS_2/C_3N_4 Heterostructures [J]. Langmuir, 2014, 30(29): 8965 – 8972.

[90] GAO Qingsheng, GIORDANO C, ANTONIET M. Biomimetic oxygen activation by MoS_2/Ta_3N_5 nanocomposites for selective aerobic oxidation [J]. Angew Chem, 2012, 51(47): 11740 – 11744.

[91] WANG Tanyuan, ZHUO Junqiao, DU Kuangzhou, et al. Electrochemically fabricated polypyrrole and MoS_x films as a highly active hydrogen evolution electrocatalyst [J]. Adv Mater, 2014, 26(22): 3761 – 3766.

[92] TAN Chaoliang, QI Xiaoying, HUANG Xiao, et al. Single-layer transition metal dichalcogenide nanosheet-assisted assembly of aggregation-induced emission molecules to form organic nanosheets with enhanced fluorescence [J]. Adv Mater, 2014, 26(11): 1735 – 1739.

[93] DING Qi, MENG Fei, ENGLISH C R, et al. Efficient photoelectrochemical hydrogen generation using heterostructures of Si and chemically exfoliated metallic MoS_2 [J]. J Am Chem Soc, 2014, 136 (24): 8504 – 8507.

[94] KUFER D, NIKITSKIY I, LASANTA L, et al. Hybrid 2D-0D MoS_2-PbS quantum dot photodetectors [J]. Adv Mater, 2015, 27(1): 176 – 180.

[95] TARASOV A, ZHANG Siyuan, TSAI M Y, et al. Controlled doping of large-area trilayer MoS_2 with molecular reductants and oxidants [J]. Adv Mater, 2015, 27(7): 1175 – 1181.

[96] CHANG Kun, MEI Zongwei, WANG Tao, et al. MoS_2/graphene cocatalyst for efficient photocatalytic H_2 evolution under visible light irradiation [J]. ACS Nano, 2014, 8(7): 7078 – 7087.

[97] WAN Sijie, LI Yuchen, PENG Jingsong, et al. Synergistic toughening of graphene oxide-molybdenum disulfide-thermoplastic polyurethane ternary artificial nacre [J]. ACS Nano, 2015, 9(1): 708 – 714.

Advances in Synthesis and Applications of Molybdenum Disulfide Based Nanocomposites

CHEN Deliang, DONG Huina, ZHANG Rui

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

Abstract: Molybdenum disulfide (MoS_2) with a typical layered structure easily forms few-layered MoS_2 nanosheets, and has a wealth of optical, electrical and catalytic performance with wide application potentials in areas such as photo-electrical and energy conversion. The preparation of few-layered MoS_2 nanocrystals and MoS_2-based nanocomposites using molybdenum-containing chemicals as starting materials by wet-chemical and vapor-deposition methods are the cutting-edge focuses of recent research. However, the synthesis of MoS_2 nanocrystals from chemical reagents with a long route is not low-carbon and environment friendly. Molybdenite is a typical layered mineral and composed of layered MoS_2 units. The amount of molybdenite in China is huge and it is a green and low-carbon way to prepare few-layered MoS_2 nanomaterials via the intercalation-exfoliation strategy using the purified molybdenite as the direct raw materials.

Key words: molybdenite; molybdenum disulfide; two-dimensional layered structure; intercalation and exfoliation; mineral material

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0030 - 04

表面铜离子印迹聚胺硅胶材料的吸附行为

范忠雷, 李瑞瑞

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘　要: 采用先物理负载后表面交联的方法合成铜离子印迹聚烯丙基胺硅胶材料(IIP-PAA/SiO_2),测定了 IIP-PAA/SiO_2 对 Cu(II)的吸附热力学、吸附动力学和选择性能. 结果表明:IIP-PAA/SiO_2 对铜离子的吸附量和选择性随温度升高而减小;测定的吸附平衡数据可用 Langmuir 方程拟合,计算得到过程的吸附焓变 ΔH^0 为 -12.29 kJ · moL^{-1},吉布斯自由能 ΔG^0 为 $-16.5 \sim -17.05$ kJ · moL^{-1},这也表明该吸附过程放热,因此,升高温度不利于吸附;吸附过程的吸附动力学可用拟二级动力学方程描述,拟合的吸附动力学常数和平衡吸附容量与溶液初始浓度有关.

关键词: 聚烯丙基胺;硅胶;表面印迹;Cu(II)

中图分类号: O647.3　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.006

0　引言

聚胺硅胶杂化材料是通过偶合接枝、物理负载和表面官能团改性等方法将聚胺分子负载到硅胶表面,使其对重金属离子的强螯合特性与硅胶的高比表面、优良的机械性能相结合而制备的一类新型吸附材料. 已报道的文献中,一般采用先硅胶硅烷化后偶合接枝的途径将聚胺分子接枝到硅胶表面,合成的聚胺硅胶杂化材料对 Cu(II)、Zn(II)、Ni(II)等重金属离子表现出优良的吸附性能[1-2],然后根据实际用途并针对不同的金属离子,通过表面官能团修饰[3-4]或表面印迹[5-7]提高材料对特定离子的选择性吸附. 但是,这种方法合成的聚胺硅胶杂化材料工艺路线长,聚胺分子在合成过程中受反应条件的影响易交联凝聚,原材料消耗大. 后来,笔者通过物理方法将聚烯丙基胺(PAA)负载到硅胶表面,并以 Cu(II)为模板离子、环氧氯丙烷(ECH)为交联剂,利用物理负载和表面印迹技术制备了表面印迹聚烯丙基胺硅胶材料(IIP-PAA/SiO_2)[8]. 在这个工作中,研究侧重于聚胺硅胶材料的合成方法、表面结构与吸附性能的关系、合成条件对材料吸附选择性影响等方面,没有涉及吸附过程和条件对材料吸附性能的影响. 因此,笔者在前期的基础上,拟通过静态吸附法研究 IIP-PAA/SiO_2 材料对铜离子的吸附条件、吸附热力学和吸附动力学,为新型吸附剂的应用提供依据.

1　实验部分

1.1　实验原料与仪器

层析硅胶(粒径 0.18 ~ 0.25 mm,表面积 431 $m^2 \cdot g^{-1}$),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;五水硫酸铜,分析纯,天津市科密欧试剂厂;其他试剂均为分析纯.

UV-2102PC 型紫外可见光分光光度计,上海尤尼柯仪器有限公司;PHS-3C 型酸度计,上海大中分析仪器厂.

1.2　表面印迹材料的制备

按照文献[8]的方法,采用物理负载方式制备聚烯丙基胺硅胶材料(PAA/SiO_2),然后将 10 g 螯合铜离子的 PAA/SiO_2 材料加入到 0.82 g ECH 与 100 mL 的甲醇溶液中,在 323 K 条件下搅拌反应 3 h,反应结束后用盐酸、氨水和蒸馏水依次洗涤,烘干后制得铜表面印迹聚烯丙基胺硅胶材料(IIP-PAA/SiO_2). 按照文献[7 - 8]的方法,测得 IIP-PAA/SiO_2 的胺基含量为 1.133 mmol · g^{-1}.

收稿日期: 2015 - 06 - 30;**修订日期:** 2015 - 08 - 26

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_2 的 FT-IR 红外谱图显示:1 066 cm^{-1} 和3 405 cm^{-1}处分别是 Si—O—Si 和—Si—OH 的红外吸收峰,2 962.5 cm^{-1}处出现了—CH_2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[2],IIP-PAA/SiO_2 的 FTIR 谱图在 698.2 cm^{-1}处没有出现—C—Cl 键的伸缩振动吸收峰,表明该材料表面印迹的 PAA 是以物理方式负载在硅胶表面.

1.3　静态吸附性能测定

按文献[2]的方法,称取待测材料 0.15 g,加入 25 mL pH =4 的待吸附铜离子溶液、锌离子溶液或其混合溶液,298 K 下静态吸附 24 h,测定溶液中 Cu(II)和 Zn(II)的平衡浓度 C_e,按照式(1)~(2)来计算材料的平衡吸附量 Q_e(mmol · g^{-1})和选择性系数 k:

$$Q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m}. \quad (1)$$

$$k = \frac{Q_{eCu(II)}}{C_{eCu(II)}} \cdot \left(\frac{Q_{eZn(II)}}{C_{eZn(II)}}\right)^{-1}. \quad (2)$$

式中:Q_e 为材料的铜或锌吸附量,mmol · g^{-1};C_0 和 C_e 分别是吸附前、吸附后溶液中铜离子或锌离子的浓度,mmol · L^{-1};V 为溶液体积,L;m 为吸附剂质量,g.

2　结果与讨论

2.1　pH 的影响

图 1 为溶液 pH 对 PAA/SiO_2 和 IIP-PAA/SiO_2 材料铜吸附量的影响. 从图 1 可以看出,PAA/SiO_2 和 IIP-PAA/SiO_2 吸附量随铜溶液 pH 的变化趋势相似. pH 值小于 2.0 时,材料表面氮原子在强酸性条件下易质子化,抑制了材料对 Cu(II)的吸附,吸附量很小;pH 值大于 2.0 时,材料表面的伯胺官能团对 Cu(II)的螯合作用逐渐起主导作用,吸附量开始迅速增加;当 4.0≤pH 值≤5.0 时,PAA/SiO_2 和 IIP-PAA/SiO_2 材料的吸附量基本恒定,分别为 0.599 mmol · g^{-1}和 0.625 mmol · g^{-1};溶液 pH 再升高,铜离子易沉淀而影响吸附操作. 因此,吸附操作控制铜溶液的 pH 值为 4.0.

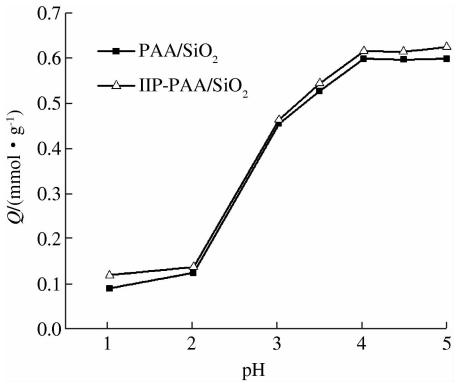


图 1　pH 对材料 Cu(II)吸附量的影响

Fig. 1　Effect of pH on the Cu(II) adsorption capacity of the materials

2.2　温度的影响

在溶液 pH =4、金属离子浓度为 5.0 mmol · L^{-1}、25 mL 条件下,温度对材料吸附量和选择性系数的影响见表 1. 由表 1 可知,PAA/SiO_2 和 IIP-PAA/SiO_2 吸附特性是不同的. 随着温度的升高,PAA/SiO_2 的平衡吸附量 $Q_{PAA/SiO_2\text{-}Cu}$逐渐增大,而 IIP-PAA/SiO_2 的平衡吸附量 $Q_{IIP\text{-}Cu}$随温度的升高而减小. 在铜锌离子竞争吸附过程中,PAA/SiO_2 的选择性系数 k_{PAA/SiO_2}基本维持不变,处于5.22~7.06,这表明,温度对该材料的铜锌离子选择性影响不大. 而 IIP-PAA/SiO_2 的选择性系数 $k_{IIP\text{-}PAA/SiO_2}$随温度的增大而显著减小,这表明,温度升高降低了印迹材料对铜离子的选择性. 两种材料吸附性能的差异可能原因是 IIP-PAA/SiO_2 制备过程中表面的 PAA 分子被交联固定在硅胶表面,高分子表面形态的改变造成两种材料吸附性能的变化.

2.3　吸附等温线

在 25 mL pH =4 硫酸铜溶液中,印迹材料浓度 6 g · L^{-1},吸附温度分别为 303,313,323,333,343 K 时的吸附等温线见图 2. 可以看出,相同温度下 IIP-PAA/SiO_2 的平衡吸附量在稀铜溶液中随平衡浓度的增加而增加,随后在较高铜浓度下逐渐趋于稳定值,而且吸附等温线具有 I 型等温线特征.

表 1　温度对材料吸附性能的影响

Tab. 1　Effect of temperature on the adsorption properties of the materials

材料	参数	303K	313K	323K	333K	343K
PAA/SiO_2	$Q_{PAA/SiO_2\text{-}Cu}$	0.596	0.605	0.615	0.632	0.656
	$Q_{PAA/SiO_2\text{-}Zn}$	0.107	0.140	0.146	0.140	0.138
	k_{PAA/SiO_2}	6.60	5.22	5.25	6.43	7.06
IIP-PAA/SiO_2	$Q_{IIP\text{-}Cu}$	0.638	0.601	0.581	0.551	0.533
	$Q_{IIP\text{-}Zn}$	0.011	0.013	0.016	0.017	0.021
	$k_{IIP\text{-}PAA/SiO_2}$	61.70	50.55	38.41	29.55	20.58

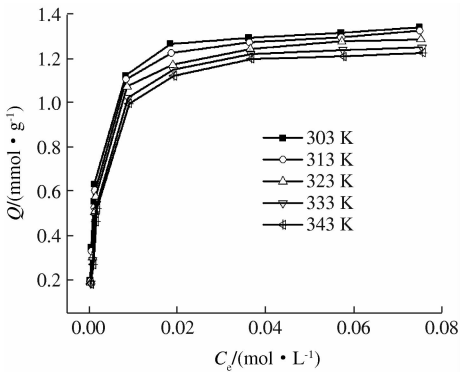


图 2 IIP-PAA/SiO_2 对 Cu(II)的吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherm of Cu(II) on IIP-PAA/SiO_2

Langmuir 吸附等温式[2]为

$$C_e = Q_m \frac{C_e}{Q_e} - \frac{1}{K_L}. \quad (3)$$

式中:Q_e 为平衡吸附量,mmol·g^{-1}; Q_m 为饱和吸附容量,mmol·g^{-1};C_e 为离子平衡浓度,mol·L^{-1};K_L 为 Langmuir 吸附系数,L·moL^{-1}. 用 Langmuir 吸附等温式对图 2 数据进行拟合,不同温度下的 C_e/Q_e 与 C_e 作图可得系列直线,根据拟合直线的斜率(Q_m)和截距($-1/K_L$)可求出不同温度下的饱和吸附容量和 Langmuir 吸附系数,拟合方程和参数计算值见表 2. 计算结果和图 2 显示:Cu(II)在 IIP-PAA/SiO_2 表面的吸附具有明显的温度效应. 随着温度的升高,IIP-PAA/SiO_2 的吸附等温线逐渐降低,拟合的饱和吸附量 Q_m 由 1.360 mmol·g^{-1}逐渐降低到 1.268 mmol·g^{-1},吸附系数 K_L 由 714.29 L·moL^{-1}依次降低到 400.00 L·moL^{-1},可见,升高温度不利于吸附.

表 2 IIP-PAA/SiO_2 吸附铜的 Langmuir 方程和热力学参数

Tab. 2 Langmuir equation and thermodynamic parameters of IIP-PAA/SiO_2 for Cu(II)

T/K	平衡方程	Q_m/(mmol·g^{-1})	K_L/(L·mol^{-1})	ΔH^0/(kJ·mol^{-1})	ΔS^0/(J·mol^{-1}·K^{-1})	ΔG^0/(kJ·mol^{-1})
303	$C_e = 1.359\,5C_e/Q_e - 0.001\,4$	1.360	714.29			-16.50
313	$C_e = 1.346\,6C_e/Q_e - 0.001\,7$	1.347	588.24			-16.63
323	$C_e = 1.321\,3C_e/Q_e - 0.002\,0$	1.321	500.00	-12.29	13.87	-16.77
333	$C_e = 1.289\,3C_e/Q_e - 0.002\,2$	1.289	454.55			-16.91
343	$C_e = 1.267\,7C_e/Q_e - 0.002\,5$	1.268	400.00			-17.05

Langmuir 吸附系数 K_L 随温度 T(K) 的变化可由 van't Hoff 等式[2]来表示:

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (6)$$

式中:ΔH^0(kJ·mol^{-1})和 ΔS^0(J·mol^{-1}·K^{-1})分别为吸附过程的焓变和熵变;T 为绝对温度;R 为理想气体常数. ln K_L随参数 $1/T$ 的变化具有较好的线性关系,见图 3. 其拟合方程为:ln K_L = 1 478.5/T + 1.669(R^2 = 0.990). 根据拟合方程的斜率和截距可获得吸附过程的焓变和熵变,由吉布斯自由能公式可得到吸附过程自由能 ΔG^0,计算结果列于表 2. 在实验温度下,ΔG^0为 -16.5 ~ -17.05 kJ·mol^{-1},是负值,这说明该吸附可自发进行;ΔH^0为 -12.29 kJ·mol^{-1},这表明该吸附过程放热,因此,升高温度不利吸附.

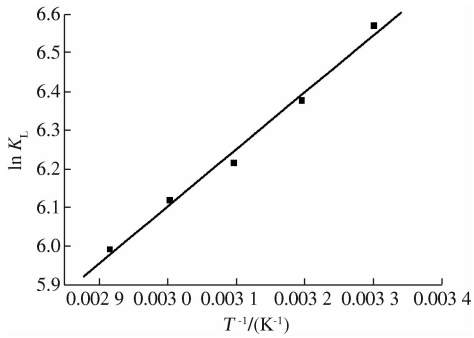


图 3 IIP-PAA/SiO_2 的 ln K_L 随 $1/T$ 的变化曲线

Fig. 3 Plot of lnK_L against $1/T$ of IIP-PAA/SiO_2

2.4 吸附动力学

溶液初始浓度分别为 4.93,11.0,22.0 mmol·L^{-1},其他吸附条件相同时的动力学曲线见图 4.

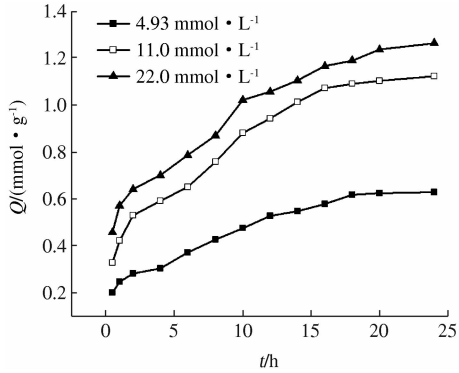


图 4 IIP-PAA/SiO_2 对不同浓度 Cu(II)的吸附动力学曲线

Fig. 4 Kinetic curve for Cu(II) adsorption on IIP-PAA/SiO_2 at different concentration

Ho 等[9]提出的拟二级动力学方程为

$$\frac{t}{Q_t}=\frac{1}{k_2Q_e^2}+\frac{1}{Q_e}t \tag{5}$$

式中:t 为吸附时间,h;Q_t 和 Q_e 为时间 t 时材料的吸附量和平衡吸附容量,mmol · g^{-1};k_2 为拟二级吸附速率常数,g · mmol^{-1} · h^{-1}. 用拟二级动力学方程拟合 IIP-PAA/SiO_2 对不同铜浓度的吸附动力学数据,可得到系列线性拟合方程,根据拟合直线的斜率和截距可求得拟二级吸附动力学参数,拟合方程和计算结果见表 3.

表 3　不同浓度下 IIP-PAA/SiO_2 吸附 Cu(II)的动力学参数

Tab. 3　Kinetic parameters for Cu(II) adsorption on IIP-PAA/SiO_2 at different concentration

C_0/(mmol · L^{-1})	Equation	R^2	Q_e/(mmol · g^{-1})	$Q_{e,exp}$/(mmol · g^{-1})	k_2/(g · mmoL^{-1} · h^{-1})
4.93	$t/Q_t=1.409\ 6t+5.109\ 0$	0.970	0.709	0.631	0.389
11.0	$t/Q_t=0.790\ 9t+2.744\ 3$	0.974	1.264	1.124	0.228
22.0	$t/Q_t=0.732\ 5t+2.071\ 7$	0.980	1.365	1.265	0.259

从表 3 可以看出,IIP-PAA/SiO_2 的实验数据可以用拟二级吸附动力学方程描述,拟合得到的平衡吸附容量 Q_e 与实验条件下的实验值 $Q_{e,exp}$ 相近;若提高溶液初始铜离子浓度,其拟合值 Q_e 与实验值 $Q_{e,exp}$ 都随之增加,变化情况类似. 吸附速率常数拟合值 k_2 与溶液的初始浓度有关,这表明 k_2 并不直接反映吸附速度的快慢,这与文献[7]的报道一致.

3　结论

采用先物理负载后表面交联的方法制得一种铜表面印迹聚烯丙基胺硅胶材料,并通过静态吸附法研究了印迹材料 IIP-PAA/SiO_2 对溶液中铜离子的吸附条件、吸附热力学和吸附动力学等问题. 结果表明,在实验范围内 IIP-PAA/SiO_2 吸附 Cu(II)的平衡数据可用 Langmuir 方程拟合;通过 Langmuir 吸附系数与温度的关系得到该吸附过程的吉布斯自由能 ΔG^0 为 −16.5 ~ −17.05 kJ · moL^{-1},焓变 ΔH^0 为 −12.29 kJ · moL^{-1},表明该吸附可自发进行,是一个放热过程,升高温度不利吸附进行. 另外,IIP-PAA/SiO_2 材料对 Cu(II)的吸附动力学数据可用拟二级动力学方程描述,得到的吸附动力学常数 k_2 与溶液初始浓度有关,拟合的平衡吸附容量 Q_e 与实验值 $Q_{e,exp}$ 相近,且都随溶液初始铜离子浓度增加而增加.

参考文献:

[1] BEATTY S T, FISCHER R J, ROSENBERG E, et al. Comparison of novel and patented silica − polyamine composite materials as aqueous heavy metal ion recovery materials[J]. Separation Science and Technology, 1999, 34(14): 2723 − 2739.

[2] 范忠雷,刘海龙,慎金鸽. PAA/SiO_2 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.

[3] 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.

[4] ALLEN J, BERLIN M, HUGHES M, et al. Structural design at the polymer surface interface in nanoporous silica polyamine composites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 126: 973 − 982.

[5] 朱琳琰,张荣华,朱志良. 金属离子印迹技术研究进展[J]. 化学通报, 2010, 73(4): 326 − 331.

[6] FAN Zhonglei, SHEN Jinge, LI Ruirui, et al. Synthesis and adsorption behavior of surface Cu(II) ionimprinted poly(allylamine)-silica gel material[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2012, 51(13): 1289 − 1295.

[7] FAN Zhonglei, LI Shuai, LI Ruirui, et al. Adsorption of Cu(II) on surface ionimprinted poly(allylamine)-silica material from aqueous solution[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014, 53(1): 30 − 37.

[8] 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.

[9] HO Y S, MCKAY G. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat[J]. Water Res, 2000, 34(3): 735 − 742.

(下转第 37 页)

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0034 - 04

生物模板法合成铁钴纳米材料的研究

谢银德[1], 侯保森[1], 赵占中[1], 张　冰[2], 赵　霞[1]

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院,郑州 450001; 2. 郑州大学 化工与能源学院,郑州 450001)

摘　要: 采用脱铁铁蛋白为生物模板,以硝酸钴和硫酸亚铁铵为原材料,利用硼氢化钠为还原剂合成了蛋白质包覆的铁钴纳米材料,并通过透射电子显微镜、EDS 能谱分析、电子衍射和紫外光谱分析对制得的样品进行了表征. 实验结果表明,采用脱铁铁蛋白生物模板制备的铁钴复合纳米颗粒为无定型的非晶体,具有高度的单分散性,其直径大约为 5 ~ 7 nm,粒径分布较为均匀,且研究结果进一步表明了脱铁铁蛋白是一种良好的制备纳米材料的模板.

关键词: 脱铁铁蛋白;生物模板;铁钴;纳米颗粒

中图分类号: TB331　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.007

0　引言

生物纳米材料的类天然性以及良好的生物相容性赋予了其更加优良的生物和物理化学方面的特性[1],研究和利用这些纳米生物材料,在生物医学领域、微电子技术和电子元器件等领域具有非常广阔的发展前景[2]. 近些年来,采用脱铁铁蛋白法合成了多种纳米材料,如 Douglas 等[3]以脱铁铁蛋白为生物模板,成功合成了 CO_3O_4 纳米颗粒;Kasivelu 等[4]以单细胞蛋白螺旋藻为生物模板合成了 Ag 和 Au 的纳米颗粒;Kenji 等[5]利用 Dps 笼状蛋白腔作为生物模板合成了半导体材料 CdS 纳米颗粒;黄保军等[6]利用生物模板法制备微纳米三氧化铁,用这种方法合成的纳米颗粒具有尺寸小、分布均匀等优点[7].

铁钴纳米材料具有良好的生物相容性,再加上钴元素具有较好的铁磁性,使铁钴合金在磁性性能上有更进一步的提高,并扩大了其应用范围[8]. 目前,铁钴材料主要通过液相合成法制成,颗粒直径较大,团聚较多并且尺寸不易控制[9].

笔者通过脱铁铁蛋白生物模板法合成铁钴纳米材料,成功解决了上述问题,并为二元金属纳米材料的合成提供了参考.

1　实验部分

1.1　主要原料

马脾脱铁铁蛋白(Apoferritin),Sigma 公司;硝酸钴($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$),天津市海晶精细化工厂;硼氢化钠($NaBH_4$),天津傲然精细化工研究所;三羟甲基氨基甲烷 Tris($(CH_2OH)_3CNH_2$),上海惠兴生化试剂有限公司;硫酸亚铁铵($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$),天津市北方化玻采购销售中心.

1.2　试样制备

硝酸钴和硫酸亚铁铵为主要材料. 首先,在水浴缸中注满水,在 60 ℃水浴加热和磁力搅拌的条件下,移取 2.0 mL 的 Tris 缓冲溶液于反应瓶的内层中,并通入氮气进行除氧[10]. 其次,将 20 μL 的脱铁铁蛋白溶液注入到反应瓶中,再分别吸取硝酸钴溶液、硫酸亚铁铵溶液和硼氢化钠溶液各 100 μL[11],以相同的速率加入到反应瓶中进行反应,并将反应液离心. 最后,取上清液进行分析表征.

1.3　样品表征

采用日本 JEM-100CX-型透射电子显微镜、E-VOLUTION600 紫外可见光分光光度计和能量色散 X 射线能谱仪(EDS)对样品进行表征.

2　结果与讨论

2.1　铁钴样品 TEM 分析

脱铁铁蛋白溶液用乙酸双氧铀染色后所拍摄

收稿日期: 2015 - 06 - 13;**修订日期:** 2015 - 07 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21271158);河南省教育厅科学技术研究重大项目(12B430023)

作者简介: 谢银德(1965—),男,河南焦作人,博士,主要从事仿生纳米材料和污染物降解等方面的研究,E-mail: ydxie@ zzu. edu. cn.

的 TEM 照片如图 1 所示. 从图 1 可以看到脱铁铁蛋白分子.

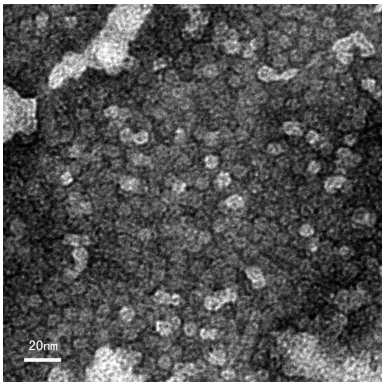


图 1　乙酸双氧铀染色后的纯脱铁铁蛋白的 TEM 照片

Fig. 1　Pure apoferritin TEM photographs uranyl acetate stained

图 2 为还原反应后的脱铁铁蛋白溶液在经过乙酸双氧铀染色后拍摄的 TEM 照片. 从图 2 可以看到蛋白质的空腔,这些空腔的直径大概为 8 nm,在这些白色斑点的中心都有一个直径约为 5 nm 的黑色颗粒. 图 3 是放大 10 万倍的样品的 TEM 图像.

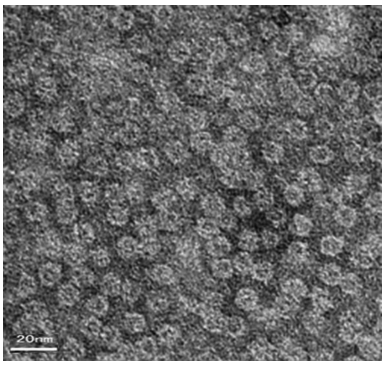


图 2　乙酸双氧铀染色后的铁钴样品 TEM 照片

Fig. 2　TEM photograph of iron cobalt samples stained with uranyl acetate

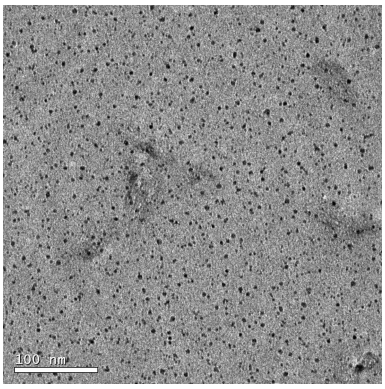


图 3　放大 10 万倍的铁钴样品 TEM 照片

Fig. 3　100 000 magnification TEM photograph of iron-cobalt samples

图 3 中的黑色斑点即纳米尺寸的颗粒体,颗粒分布均匀,具有高度的分散性,其粒径约为 5 ~ 7 nm,稍小于脱铁铁蛋白空腔的内径尺寸为 8 nm. 从选用的原材料来分析,这些黑色的颗粒可能是蛋白质包覆的、成分以 Fe-Co 为主的纳米粒子,再结合图 2 可断定样品颗粒被包裹在蛋白质内部中.

2.2　铁钴样品的 EDS 能谱分析

对铁钴样品进行 EDS 能谱分析,得到图 4 和表 1.

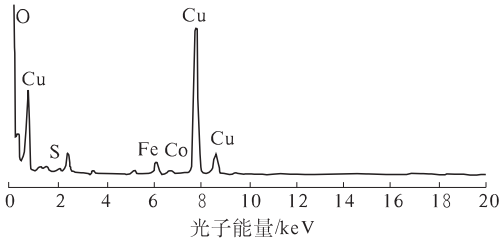


图 4　铁钴样品的 EDS 能谱

Fig. 4　EDS spectrum of Fe-Co samples

表 1　能谱中各元素质量百分比含量

Tab. 1　Energy spectrum percentage content of each element

元素	质量分数/%	原子数百分比/%
Cu	33.55	9.88
Fe	2.53	0.85
Co	0.90	0.29
C	58.50	84.03
S	0.61	0.36
O	3.91	4.59

图 4 所示是选区在微米级区域某个点的 EDS 能谱. 从图谱中可以观测到铁元素和钴元素的能谱峰,这说明看到的那些黑色纳米颗粒是金属铁或者钴,亦或者是两者的混合体. 并且图 4 中还有很强的铜元素峰,这是由于样品在做 TEM 表征时的衬物为铜网所致. 另外,还存在杂质碳元素的峰值,原因可能是溶液中脱铁铁蛋白含碳量过高所致;此外,还有杂质硫元素和氧元素的峰值,这可能是因为加入的原材料硫酸亚铁铵和脱铁铁蛋白中都含有一定量的硫元素和氧元素.

2.3　铁钴样品的选区电子衍射分析

采用透射电子显微镜观察样品的外观形貌,发现有许多粒径为 5 ~ 7 nm 的黑色纳米颗粒,选定其中一个具有代表性的、典型的黑色颗粒区域,进行选区电子衍射,其选区电子衍射结果如图 5 所示.

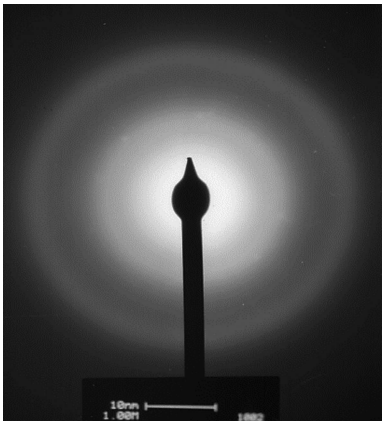


图 5 铁钴样品的电子衍射

Fig. 5 Electron diffraction of Fe-Co samples

从图 5 中未能发现明显的电子衍射斑点,推测这些包覆在蛋白质内部的纳米颗粒没有形成晶体,而是以无定形态存在. 在室温下,单质 Fe 的空间各质点呈体心立方的排列结构,属于立方晶系的布拉菲结构,其晶格常数是 $a = 0.286\ 3$ nm;单质 Co 的空间各质点呈密排六方结构,晶格常数是 $a = 0.250\ 7$ nm,$c = 0.407\ 0$ nm. 由于铁钴的晶格结构不同,晶格常数也有一定的差别,导致了其在蛋白腔内不能形成晶体结构,而是以无定形态存在.

2.4 铁钴样品的紫外可见光谱分析

对还原反应前后的脱铁铁蛋白纳米颗粒进行紫外可见光谱分析,紫外可见光吸收光谱图如图 6 所示.

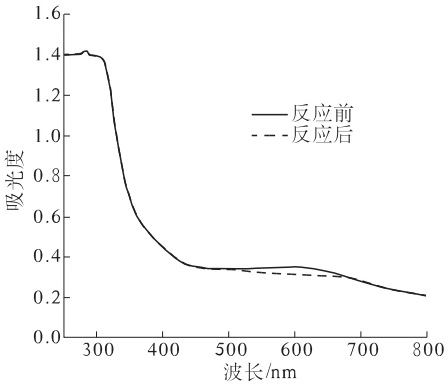


图 6 铁钴样品还原反应前后的 UV - vis 谱

Fig. 6 The UV - vis spectroscopy of Fe-Co sample before and after reduction reaction

图 6 中实线表示脱铁铁蛋白纳米颗粒在只加入 Fe^{2+}、Co^{2+} 溶液而不加入还原剂情况下的 UV - vis 谱线,虚线则表示同时加入 Fe^{2+}、Co^{2+} 溶液和还原剂情况下的 UV - vis 谱线. 从图 6 中峰位的变化来看,还原反应前的脱铁铁蛋白和 Fe^{2+}、Co^{2+} 的混合液在 610 nm 左右处出现了一个弱的吸收峰,这个位置是 Fe^{2+}、Co^{2+} 的典型特征吸收峰位;在同时加入 Fe^{2+}、Co^{2+} 溶液和还原剂 $NaBH_4$ 后,在此位置附近的吸收峰明显变弱,说明溶液中的 Fe^{2+}、Co^{2+} 被还原剂 $NaBH_4$ 还原成为 Fe、Co 金属原子;而在 280 nm 附近的脱铁铁蛋白的峰位则没有发生明显变化,说明还原反应前后脱铁铁蛋白的浓度没有发生变化,表明在整个反应过程中脱铁铁蛋白只是起到了一个载体模板的作用,对金属颗粒进行约束,并不参加反应.

通过紫外可见光谱分析进一步证实了组成黑色纳米颗粒的成分是金属铁和钴,这和透射电子显微观察分析的结果是一致的.

3 结论

以马脾脱铁铁蛋白(Apoferritin)为基体生物模板,以硝酸钴和硫酸亚铁铵为原材料,采用生物模板法合成 Fe-Co 纳米材料. 通过对样品的表征,说明制备的样品为铁钴纳米材料,颗粒直径在 5 ~ 7 nm 左右,非晶体结构分布均匀,具有高度的分散性,无明显团聚体;并且,脱铁铁蛋白在反应前后成分未发生变化,只是起到了一个约束颗粒成长的载体模板的作用.

参考文献:

[1] DIAS A M G C, HUSSAIN A, MARCOS A S, et al. A biotechnological perspective on the application of iron oxide magnetic colloids modified with polysaccharides [J]. Biotechnology Advances, 2011, 29 (1): 142 - 155.

[2] 张文毓. 新型仿生材料的研究进展[J]. 传感器世界:技术综述,2009,25(6):6 - 9.

[3] DOUGLAS T, STARK V T. Nanophase cobalt oxyhydroxide mineral synthesized within the protein cage of ferritin [J]. Inorganic Chemistry, 2000, 39 (8): 1828 - 1830.

[4] KASIVELU G, SABJAN K B. Silver gold and bimetallic nanoparticles production using single-cell protein geitler[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43 (15): 5115 - 5122.

[5] KENJI I, TAKAHIRO E, FURUSHO H, et al. Cadmium sulfide nanoparticle synthesis in dps protein from listeria innocua[J]. Chemistry of Materials, 2007, 19(13): 3105 - 3111.

[6] 黄保军,何琴,郭少凡,等. 生物模板法制备微纳米三氧化铁[J]. 化学世界,2012,76(3):133 - 135.

[7] CHIU C Y, LI Yujing, HUANG Yu. Size-controlled

synthesis of Pd nanocrystals using a specific multifunctional peptide[J]. The Royal Society of Chemistry, 2010,2(6):927 - 930.

[8] 邵东旭,郑冬梅,卓先勤,等. 铁钴纳米合金的制备及表征[J]. 甘肃冶金,2013,135(2):12 - 21.

[9] 王凤平,薛行华,马力胜,等. 铁钴纳米合金/天然橡胶复合材料的制备及性能研究[J]. 弹性体,2011,21(5):22 - 25.

[10] 朱志斌,王婧雯,廖明骏,等. PEG 模板控制水热法制备 BaTiO3 粉体[J]. 现代技术陶瓷,2013,112(4):3 - 7.

[11] WU Hao, XU Ming, WANG Yongchen, et al. Branched Co_3O_4/Fe_2O_3 nanowires as high capacity lithium - ion battery anodes[J]. Nano Research, 2013, 6(3): 167 - 173.

The Synthesis of Fe-Co Nano-materials Using Biological Templates

XIE Yinde[1], HOU Baosen[1], ZHAO Zhanzhong[1], ZHANG Bing[2], ZHAO Xia[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Fe-Co composited nanoparticles were synthesized by using apoferritin as a biological template, $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ and $NaBH_4$ as the reactants. The prepared nanoparticles were further characterized by TEM, EDS and UV-visble spectroscopy. Experimental results show that iron-cobalt composite nanoparticles that use apoferritin as a biological template for the preparation are amorphous non-crystalline and highly monodisperse. They are about 5 ~ 7 nm in diameter and the distribution of their particle size is relatively uniform. The result of the study is a further indication that the apoferritin is a good template for preparing nanomaterials.

Key words: apoferritin; biological template; Fe/Co; nano-particle

(上接第 33 页)

Adsorption Behavior of Surface Ion-imprinted Poly(Allylamine)-Silica Material for Cu(II) from Aqueous Solution

FAN Zhonglei, LI Ruirui

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

Abstract: Surface ion-imprinted poly(allylamine)-silica material (IIP-PAA/SiO_2) was synthesized by physical load and surface imprinting technique. The thermodynamics, kinetics and selectivity of Cu(II) adsorption on IIP-PAA/SiO_2 were studied by static methods. The results showed that the adsorption capacity and selectivity of IIP-PAA/SiO_2 decreased with the increase of the temperature. Its adsorption equilibrium data for Cu(II) could be fit well by the Langmuir model. The adsorption thermodynamic parameters calculated showed that its enthalpy change ΔH^0 was -12.29 kJ · moL^{-1} and ΔG^0 was among -16.5 kJ · moL^{-1} and -17.05 kJ · moL^{-1}, which indicated that the adsorption was exothermic spontaneous process and increasing temperature was not conducive to Cu(II) adsorption. Adsorption kinetics data of Cu(II) on IIP-PAA/SiO_2 could be described by pseudo-second-order kinetics equation, and the fitting adsorption rate constant and balanced copper adsorption capacity were related to initial solution concentration.

Key words: poly(allylamine); silica gel; surface imprinting; Cu(II)

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0038 - 09

基于分解的多目标进化算法在工程优化中的应用

张春江[1,2], TAN Kay Chen[2], 高 亮[1], 吴 擎[3]

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院,湖北 武汉 430074; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583; 3. 华中农业大学 工学院,湖北 武汉 430070)

摘 要: 将基于分解的多目标进化算法 (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, MOEA/D) 应用于工程优化问题时,由于各目标函数在数量级及量纲上的不同,需要对目标函数进行归一化处理. 首先,采用一种自适应 ε 约束差分进化算法(ε Constrained Differential Evolution, εDE)寻找各个目标在 Pareto 前沿上的最大值和最小值,利用这些值对各目标进行归一化处理;然后,用 MOEA/D 进行求解,并在算法中加入了自适应 ε 约束处理技术;最后,采用一个标准测试问题和一个焊接梁设计优化问题对该算法进行测试,并与其他两种归一化方法进行了比较. 根据提出的方法,MOEA/D 能对 Pareto 前沿的一端进行集中优化,因而能处理一些 Pareto 前沿两端难以优化的问题.

关键词: 多目标进化算法;MOEA/D;归一化;工程优化;差分进化;ε 约束处理

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.008

0 引言

多目标优化问题(Multi-Objective Optimization Problems, MOPs)普遍存在于工程应用与科学研究中,这些问题的各个目标往往相互冲突,在对其优化时,需要对各个目标进行折衷处理. MOPs 往往没有唯一的全局最优解,而有一个 Pareto 最优解集(Pareto Optimal Set, POS). 采用传统的数学规划方法求解 MOPs 时,如权重法、目标规划法等,一次运行只能求得一个解,而多目标进化算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm, MOEA)因其内在的并行性,能一次性求得一组 Pareto 最优解. 自从 Schatter 和 David[1] 在 1985 年首次提出用于多目标优化的向量评估遗传算法(Vector Evaluated Genetic Algorithm)以来,MOEA 得到了学者的广泛关注. 同时,许多学者提出了优秀的 MOEA 算法,如 Zitzler 等[2] 提出了 SAPE-II; Deb[3] 提出了 NSGA-II; Bader 和 Zitzler[4] 提出了基于评估指标的 HypE; 2007 年 Zhang 等[5] 提出了一种全新的基于分解的 MOEA 算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition, MOEA/D). 该算法结合传统的数学规划法,首先将多目标优化问题转发为众多单目标优化问题,然后采用进化算子同时优化这些单目标优化问题,最终获得一组 Pareto 最优解. 与大多数 MOEA 算法相比,MOEA/D 被证明有更快的求解速度,能获得分布性及收敛性更好的解集. 在 2009 年的 IEEE 进化计算大会中的多目标优化竞赛中,MOEA/D 荣获了第一名[6]. 近年来,许多学者对 MOEA/D 做出了很多改进,例如,Palmers 等[7] 让 MOEA/D 分解的每个子问题记录多个解; Qi 等[8] 为 MOEA/D 提出了一种自适应权重调整方法; Li 等[9] 为 MOEA/D 提出了一种自适应算子选择方法; 周爱民等[10] 提出了一种基于混合高斯模型的 MOEA/D. 目前,该算法也被成功应用于天线设计[11]、电力系统经济调配[12]、复杂网络聚类[13]、无线传感网络优化[14] 等应用领域.

多目标优化标准测试问题的 Pareto 最优前沿

收稿日期: 2015 - 07 - 28; **修订日期:** 2015 - 08 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51421062, 51435009); 湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB528); 国家留学基金管理委员会资助项目(201406160084).

作者简介: 张春江(1989—),男,湖南醴陵人,华中科技大学博士研究生,主要研究方向为进化计算及其在约束优化和多目标优化方面的应用.

通信作者: TAN Kay Chen(1971—),男,马来西亚人,新加坡国立大学副教授,IEEE 会士,主要研究智能计算及其在多目标优化、车间调度及数据挖掘等方面的应用,E-mail: eletankc@nus.edu.sg.

(Pareto Optimal Front, POF)的各目标值往往在[0,1]区间,MOEA/D 在这些问题上表现良好. 但现实中的工程优化问题各目标函数往往有不同的单位量度,并且其函数值常在不同的数量级上. 当直接应用 MOEA/D 求解时,会造成极差的解集分布性[12],因此,需对各目标函数进行归一化处理. Zhang 等[5]利用当前种群的信息来归一化,但该方法使得原目标函数动态变化,并在某些目标难以优化的情况下,该方法也会失效. Zhu 等[12]采用目标函数的最大和最小值来归一化,在某些情况下,该方法不适合 MOEA/D.

笔者旨在提供一种新的归一化方法,以便将 MOEA/D 应用于工程优化问题. 另外,笔者采用一种自适应 ε 约束处理方法来处理工程优化问题中的约束.

1　问题定义

不失一般性,工程优化中的多目标优化问题通常可以采用以下数学模型加以定义:

$$\begin{cases}\min \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}) = (f_1(\boldsymbol{X}), f_2(\boldsymbol{X}), \cdots, f_m(\boldsymbol{X})). \\ \text{s. t.} \begin{cases} g_i(\boldsymbol{X}) \leqslant 0 \ (i = 1, 2, \cdots, k); \\ h_i(\boldsymbol{X}) = 0 \ (i = 1, 2, \cdots, l). \end{cases}\end{cases} \tag{1}$$

该问题有 m 个优化目标,决策向量 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$,有 k 个不等式约束及 l 个等式约束,最大化问题可采用下式转化为最小化问题.

$$\max f_i(\boldsymbol{X}) = -\min(-f_i(\boldsymbol{X})). \tag{2}$$

1.1　Pareto 最优解

MOPs 中的最优解通常被称为 Pareto 最优解(Pareto Optimal Solution). 对于式(1)中的 MOP,其 Pareto 最优解 $\boldsymbol{X}^*$ 定义如下:对于 $\boldsymbol{X}^* \in \Omega$(表示满足(1)中所有约束的可行集),如果不存在其他任何 $\boldsymbol{X}' \in \Omega$ 使得 $f_j(\boldsymbol{X}^*) \geqslant f_j(\boldsymbol{X}')$ $(j = 1, 2, \cdots, m)$ 同时成立,且至少有一个严格不等式成立,则称 $\boldsymbol{X}^*$ 是 $\min \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X})$ 的 Pareto 最优解.

1.2　Pareto 最优解集

MOPs 的 Pareto 最优解往往不止一个,而存在一组相互制约的最优解集,被称为 Pareto 最优解集,其定义如下:

$$\boldsymbol{P}^* = \{\boldsymbol{X}^*\} = \{\boldsymbol{X} \in \Omega \mid \neg \ \exists \boldsymbol{X}' \in \Omega, f_j(\boldsymbol{X}') \leqslant f_j(\boldsymbol{X}), \boldsymbol{X}' ! = \boldsymbol{X}, j = 1, \cdots, m\}. \tag{3}$$

Pareto 最优解集是所有 Pareto 最优解的集合.

1.3　Pareto 最优前沿

Pareto 最优前沿是 Pareto 最优解集在目标函数空间的映射,定义如式(4)所示:

$$\boldsymbol{PF}^* = \{f(\boldsymbol{X})\} = \{f(\boldsymbol{X}) = (f_1(\boldsymbol{X}), f_2(\boldsymbol{X}), \cdots, f_m(\boldsymbol{X})) \mid \boldsymbol{X} \in \boldsymbol{P}^*)\}. \tag{4}$$

2　基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)

MOEA/D 是一种全新的多目标优化框架,在该框架中,多目标优化问题被转化为一系列单目标优化子问题,然后利用一定数量相邻问题的信息,采用进化算法对这些子问题同时进行优化,因为每一个单目标优化问题的最优解对应于 Pareto 最优前沿上的一个解,最终能求得一组 Pareto 最优解. 由于分解操作的存在,该方法在保持解的分散性方面有着很大优势,而通过分析相邻问题的信息来优化,能避免陷入局部最优. 与 NSGA-II 相比,MOEA/D 能在更快时间内获得分散性更好并更精确的 Pareto 近优解集[5].

较为常用的分解策略是切比雪夫(Tchebycheff)分解法. 该方法对 Pareto 最优前沿的形状不敏感. 笔者也采用该策略将 MOP 问题 $\min \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X})$ 转化为 $\min \boldsymbol{g}_j^{te}(\boldsymbol{X} \mid \boldsymbol{\lambda}^j, \boldsymbol{z}^*)$, $j = 1, 2, \cdots, N$,如下式所示:

$$\boldsymbol{g}_j^{te}(\boldsymbol{X} \mid \boldsymbol{\lambda}^j, \boldsymbol{z}^*) = \max_{1 \leqslant i \leqslant m} \{\lambda_i^j \mid f_i(\boldsymbol{X}) - z_i^* \mid\}. \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{\lambda}^j = (\lambda_1^j, \lambda_2^j, \cdots, \lambda_m^j)^{\mathrm{T}}$,为相应的权重向量,并满足条件,$0 \leqslant \lambda_i^j \leqslant 1$, $\sum \lambda_i^j = 1$,$\boldsymbol{\lambda}^j$ 的设定算法见文献[5];$\boldsymbol{z}^* = (z_1^*, z_2^*, \cdots, z_m^*)^{\mathrm{T}}$ 为参考点,$z_i^* = \min\{f_i(\boldsymbol{X})\}$. 可以证明,每一个子问题的最优解都是 MOP 的 Pareto 最优解,且 MOP 的每一个 Pareto 最优解都对应一个切比雪夫子问题.

MOEA/D 中,与子问题 $\min \boldsymbol{g}_j^{te}(\boldsymbol{X} \mid \boldsymbol{\lambda}^j, \boldsymbol{z}^*)$ 相似度最大的 k 个问题被定义为邻域子问题,采用权重向量之间的欧几里德距离来定义问题间的相似度,邻域子问题的个体被用来充当构建子代个体的父本. 个体进化时,常采用 SBX 算子或差分进化(DE)算子[15],笔者采用 DE 算子.

3　归一化方法

MOEA/D 适用于求解各目标函数的范围和量纲一致的问题. 将 MOEA/D 直接应用于各目标值量纲和数量级不同的工程优化问题时,目标函数会向着数值较大的目标进化,往往只能获得分散性较差的 Pareto 近优前沿,因而需要归一化处理. Zhu 等[12]在采用 MOEA/D 优化电力环境经济调度问题时,采用以下方法进行归一化.

$$f_i^{\text{trans}} = \frac{f_i - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \tag{6}$$

式中:f_i^{trans} 表示归一化后的第 i 个目标函数;f_i 表

示原始的第 i 个目标函数值;$f_i^{\min}$ 和 $f_i^{\max}$ 分别表示第 i 个目标函数的最小值和最大值. 有时某个 $f_i^{\max}$ 会非常大,甚至存在 $f_i^{\max}$ 并不存在的情况,这时候该归一化方法就会失效.

对于 MOEA/D,最理想的归一化方法如下所示:

$$f_i^{\text{trans}} = \frac{f_i - f_i^{\min}}{f_i^{\text{nad}} - f_i^{\min}}. \tag{7}$$

式中:f_i^{nad} 表示 Pareto 最优前沿上第 i 个目标函数的最大值. 这种方法可使每个目标函数在 Pareto 最优前沿上的值都在[0,1]区间. 采用式(6)进行归一化时,转化后的第 i 目标函数在 Pareto 最优前沿上的最大值 f_i^{Tnad} 如下所示:

$$f_i^{\text{Tnad}} = \frac{f_i^{\text{nad}} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}. \tag{8}$$

当 $f_i^{\max}$ 与 f_i^{nad} 相差很大时,f_i^{Tnad} 会远小于 1;并且由于每个目标函数的 f_i^{Tnad} 很可能各不相同,不能保证对各目标的均衡优化而得到分布性较差的 Pareto 近优前沿.

Zhang 等[5]认为很难求解 $f^{\min}$ 和 f^{nad},并提出了一种自适应归一化方法,如式(9)所示:

$$f_i^{\text{trans}} = \frac{f_i - z_i^*}{\bar{f}_i^{\text{nad}} - z_i^*}. \tag{9}$$

式中:$\bar{f}_i^{\text{nad}}$ 表示当前种群中第 i 个目标函数的最大值;z_i^* 的定义如上文所示. 一般情况下,$\bar{f}_i^{\text{nad}}$ 会逐渐逼近 f_i^{nad},z_i^* 也会逼近 $f_i^{\min}$,因而这种方法有效. 但这种方法有两个缺陷:其一,对于非常难的问题,$\bar{f}_i^{\text{nad}}$ 很难逼近 f_i^{nad},甚至存在 $\bar{f}_i^{\text{nad}}$ 不能得到改善的情况,z_i^* 也可能不会逼近 $f_i^{\min}$. 此时,会造成 f_i^{Tnad} 各不相同,从而对各目标的优化不均衡而得到分布性较差的解. 其二,当采用这种方法时,相当于子问题一直在变化,很显然,这种变化会对优化过程造成一定的困难,如收敛速度与解的精度都会受到影响.

笔者将采用式(7)的方法来进行归一化. 现在的问题便转化为了怎样求 $\boldsymbol{f}^{\min}$ 和 $\boldsymbol{f}^{\text{nad}}$. 对于 MOP 存在以下定理:在一般情况下,对于有 m 个目标的 MOP,它的 Pareto 最优解无论在解空间还是目标空间都是一个分段连续的 $m-1$ 维流形. 这说明,当 $m=2$(双目标优化问题)时,pareto 最优前沿是一个分段连续的一维流形,一般情形下是一条一维曲线,显然,$(f_1^{\min}, f_2^{\text{nad}})$ 和 $(f_1^{\text{nad}}, f_2^{\min})$ 恰好是曲线的两个端点.

对于双目标优化问题,采用以下方法来求解 $\boldsymbol{f}^{\min}$ 和 $\boldsymbol{f}^{\text{nad}}$. 首先,采用一种高效的约束优化算法,即自适应 εDE[16]分别优化 f_1 和 f_2 而求得 $f_1^{\min}$ 和 $f_2^{\min}$. 要求解 f_1^{nad} 和 f_2^{nad},只需采用自适应 εDE 求解式(10)和式(11),可证明这两式的最优值为 f_1^{nad} 和 f_2^{nad}. 式(11)最优解的示意图如图 1 所示. 约束条件 $f_1(\boldsymbol{X}) \leqslant f_1^{\min}$ 实际上只能取到 $f_1(\boldsymbol{X}) = f_1^{\min}$,如图中的虚线所示. 在这虚线上,$f_2$ 能取到的最小值只能是 f_2^{nad}. 当虚线与 Pareto 前沿相交时取到该最小值,此交点也是 Pareto 前沿的一个端点.

$$\begin{cases} \min f_1(\boldsymbol{X}), \\ \text{s.t.} \begin{cases} f_2(\boldsymbol{X}) \leqslant f_2^{\min}; \\ g_i(\boldsymbol{X}) \leqslant 0 \ (i=1,2,\cdots,k); \\ h_i(\boldsymbol{X}) = 0 \ (i=1,2,\cdots,l). \end{cases} \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} \min f_2(\boldsymbol{X}), \\ \text{s.t.} \begin{cases} f_1(\boldsymbol{X}) \leqslant f_1^{\min}; \\ g_i(\boldsymbol{X}) \leqslant 0 \ (i=1,2,\cdots,k); \\ h_i(\boldsymbol{X}) = 0 \ (i=1,2,\cdots,l). \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

与公式(9)相比,公式(6)和公式(7)的方法要先求解归一化所需的 $\boldsymbol{f}^{\min}$ 和 $\boldsymbol{f}^{\max}$ 或 $\boldsymbol{f}^{\text{nad}}$. 但因为单目标优化的计算复杂度要低于多目标优化,并且单目标优化所需的种群大小也一般小于多目标优化. 另外,当采用公式(6)和公式(9)进行归一化时,不需要更新 $\boldsymbol{z}^*$,可节约计算时间. 因而采用公式(6)和公式(9)的方法并不会增加额外的计算时间,甚至比公式(7)的方法所需时间更少.

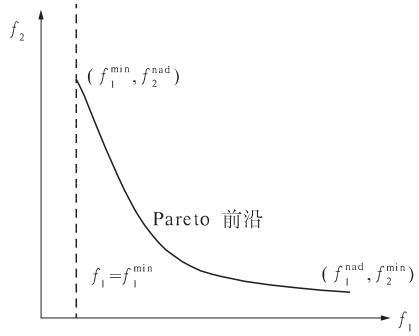


图 1 式(11)的最优解示意图

Fig. 1 Illustration of optimal solution for formula (11)

4 自适应 ε 约束处理及自适应 ε 差分进化算法

ε 约束处理方法最先由 Takahama 等[17]提出. 该方法用来比较两个候选解的优劣. 在该方法中,存在一个 ε 值,当两个解的约束违反量都小于 ε 时,则根据目标函数值的大小来比较,否则采用

违反约束的程度来比较. 数学表达式如下:

$$(f(\boldsymbol{X}_1),\varphi(\boldsymbol{X}_1)) \leqslant_{\varepsilon} (f(\boldsymbol{X}_2),\varphi(\boldsymbol{X}_2));$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} f(\boldsymbol{X}_1) \leqslant f(\boldsymbol{X}_2), \text{if } \varphi(\boldsymbol{X}_1),\varphi(\boldsymbol{X}_2) \leqslant \varepsilon; \\ f(\boldsymbol{X}_1) \leqslant f(\boldsymbol{X}_2), \text{if } \varphi(\boldsymbol{X}_1) = \varphi(\boldsymbol{X}_2); \\ \varphi(\boldsymbol{X}_1) \leqslant \varphi(\boldsymbol{X}_2), \text{otherwise}. \end{cases} \tag{12}$$

其中, φ 表示约束违反量,计算方式如下:

$$\varphi(\boldsymbol{X}) = \sum_{i=1}^{k} \max(0, g_i(\boldsymbol{X})) + \sum_{j=1}^{l} \max(|h_j(\boldsymbol{X})| - \delta, 0). \tag{13}$$

式中:δ 为等式约束的容许误差值.

Takahama 和 Sakai 将 ε 约束法与差分进化算法相结合,赢得了 2006 年与 2010 年 IEEE 计算智能大会上约束优化竞赛上的第一名[18-19]. 笔者采用 Zhang 等改进的自适应 ε 约束法. Zhang 等[16]利用当前种群中的信息而采用一种自适应方式来控制 ε 值. 具体控制方法如式(14)所示:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, \text{if } \varphi_{\max} > Th \text{ or } \varphi_0 > ap_1 \cdot N \text{ or } t > Tc; \\ ap_2 \cdot \varphi_{\max}, \text{ otherwise}; \end{cases} \tag{14}$$

式中:t 表示迭代次数;$\varphi_{\max}$ 表示种群中约束违反量的最大值;φ_0 表示种群中约束违反量为 0 的个体数;N 表示种群大小;Tc 表示迭代次数的阈值;Th 也是阈值;ap_1 和 ap_2 是介于 0 和 1 之间的系数. 上式表示,当种群中 $\varphi_{\max}$ 很大或者可行解很多时,直接让 ε 取 0;否则,让 ε 取值为 $\varphi_{\max}$ 的 ap_2 倍.

DE 算法由 Storn 和 Price[20]提出. Zhang 等人将自适应 ε 约束方法与最简单的一种 DE 算法(DE/rand/1/exp)结合. 数值试验证明,该方法具有求解速度快、精度高、鲁棒性强等优点. 用来求解 f^{nad} 的 εDE 算法的伪代码如图 2 所示.

```
ε DE/rand/1/exp
{
    for (i=1;i≤N;i=i+1) { //生成初始种群
        for (j=1;j≤n;j=j+1) {
            X^i_j = L_j+u(0,1)(U_j−L_j) //均匀分布初始化
        }
        计算f(X^i)和φ(X^i)
    }
    for(t=1;t≤T_max;t=t+1) {        //终止条件
      for(i=1;i≤N;i=i+1) {
        ε (t)={ 0,  if φ_max>Th or φ_0>ap_1*N or t>Tc
                ap_2*φ_max,otherwise
        随机从[1,N]中选择p_1,p_2,p_3
                s.t. p_1≠p_2≠p_3≠i;
        X^new=X^i;
        从[1,n]中随机选择j;
        k=1;
        do {        //交叉;
            X^new_j=X^p1_j+F(X^p2_j-X^p3_j)   //突变
            if(X^new_j<L_k||X^new_j>U_k)   //边界处理
                X^new_j=X^i_j
            j=(j+1)%n;
            k++;
        } while (k ≤n&&u(0,1)<CR);
        计算f(X^new)和φ(X^new)
        if((f(X^new),φ(X^new))< ε (f(X^i),φ(X^i))) // ε 比较
            {Z^i=X^new; f(Z^i)=f(X^new);φ(Z^i)=φ(X^new); }
        else
            {Z^i=X^i; f(Z^i)=f(X^i);φ(Z^i)=φ(X^i); }
      }
      for(i=1;i≤N;i=i+1) {     //更新种群
        X^i=Z^i; f(X^i)=f(Z^i);φ(X^i)=φ(Z^i);
      }
    }
    输出最优解
}
```

图 2　自适应 εDE 的伪代码

Fig. 2　Pseudo-code of adaptive εDE

5　算法步骤

将 MOEA/D 应用于工程优化问题的具体步骤如下:

(1)参数设置. 设置自适应 εDE 算法的参数以及 MOEA/D 的参数.

(2)采用自适应 εDE 算法求解 $f^{\min}$ 和 f^{nad}.

(3)初始化 MOEA/D. ①初始化权重向量 $\lambda^1,\cdots,\lambda^N$,具体方法见参考文献[5],计算这些权重向量之间的欧氏距离,为每个权重向量找出 T 个与其距离最近的向量,从而构成 $\boldsymbol{B}(i) = \{i_1,\cdots,i_T\}$;②采用均匀分布在定义域中生成种群大小为 N 的种群 X,并计算初始种群的目标函数与约束违反量;③迭代次数初始化:$Gen = 0$.

(4)算法迭代更新.

a) 根据式(14)定义 ε 值. 对每一个个体 i,进行如下操作.

b) 根据下式选择重组父本的范围:

$$\boldsymbol{P} = \begin{cases} \boldsymbol{B}(i), \text{ if rand} < \delta; \\ \{1,2,\cdots,N\}, \text{ otherwise}. \end{cases} \tag{15}$$

其中,rand 为服从均匀[0,1]分布的随机数.

c) 重组. 令 $r_1 = i$,从 $\boldsymbol{P}$ 中随机选择 r_2 和 r_3. 根据 DE 算子重组出新解 $\bar{\boldsymbol{Y}} = (\bar{Y}_1,\cdots,\bar{Y}_n)$. 每一维 $\bar{Y}_k$ 如下式所示:

$$\bar{Y}_k = \begin{cases} X_k^{r_1} + F(X_k^{r_2} - X_k^{r_3}), \text{ if rand} < CR; \\ X_k^{r_1}, \text{ otherwise}. \end{cases} \tag{16}$$

其中,F 和 CR 是两个参数. 再通过一个多项式突变算子得到解 $\boldsymbol{Y}$. 具体见文献[15].

d) 修复. 如果新解 $\boldsymbol{Y}$ 的某个元素值超出边界,则赋予该元素一个边界内随机值. 计算新解 $\boldsymbol{Y}$ 的函数值 $f(\boldsymbol{Y})$ 及约束违反量 $\varphi(\boldsymbol{Y})$.

e) 更新解. 随机从 $\boldsymbol{P}$ 中选择一个值 j,根据式(5)计算 $\boldsymbol{g}_j^{te}(\boldsymbol{X}^j \mid \boldsymbol{\lambda}^j, \boldsymbol{z}^*)$ 和 $\boldsymbol{g}_j^{te}(\boldsymbol{Y} \mid \boldsymbol{\lambda}^j, \boldsymbol{z}^*)$. 注意,此处需采用归一化方法,故式(5)需更改如下:

$g_j^{te}(\boldsymbol{X}\mid\boldsymbol{\lambda}^j)=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\{\lambda_i^j\mid f_i^{\text{trans}}(\boldsymbol{X})\mid\}=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\left\{\lambda_i^j\cdot\left|\dfrac{f_i-f_i^{\min}}{f_i^{\text{nad}}-f_i^{\min}}\right|\right\}$,然后根据 ε 约束法比较($g_i^{te}(\boldsymbol{X}^j\mid\boldsymbol{\lambda}^j)$,$\varphi(\boldsymbol{X}^j)$)和($g_i^{te}(\boldsymbol{Y}\mid\boldsymbol{\lambda}^j)$,$\varphi(\boldsymbol{Y})$). 如果后者优于前者,则用 $\boldsymbol{Y}$ 取代 $\boldsymbol{X}^j$.

(5)终止准则. 如果迭代次数 $gen=\text{Genmax}$,则停止迭代,输出结果;否则,$gen=gen+1$,并返回步骤(4).

6 数值实验

为了验证笔者提出归一化方法的有效性,选取了另两种方法来进行对比,这两种方法分别采取公式(6)和公式(9)来归一化. 首先选用 CEC2009 中多目标优化竞赛[21]中的一个问题 CF6 来比较 3 种归一化方法.

6.1 CF6 测试问题

对于 CF6,CEC2009 的标准测试问题的最大函数评估次数为 300 000,种群大小为 600,最大迭代次数为 500,其他参数的设置请参考文献[15]. 在求解 $\boldsymbol{f}^{\min}$、$\boldsymbol{f}^{\text{nad}}$ 和 $\boldsymbol{f}^{\max}$ 时,种群大小设置为 40,最大迭代次数设置为 2 000,其他参数设置请参考文献[16].

CF6 的两个目标函数范围都在[0,1],本不需要归一化,因此,将原目标函数 f_1 乘以 10,经改造的 CF6 如下所示:

$$\min\begin{cases}f_1=10(x_1+\sum\limits_{j\in J_1}y_j^2);\\ f_2=(1-x_1)^2+\sum\limits_{j\in J_2}y_j^2.\end{cases}\tag{17}$$

其中,$J_1=\{j\mid j$ 是奇数且 $2\leqslant j\leqslant n\}$,$J_2=\{j\mid j$ 是偶数且 $2\leqslant j\leqslant n\}$,且

$$y_j=\begin{cases}x_j-0.8x_1\cos(6\pi x_1+\dfrac{j\pi}{n})\ \text{if}\ j\in J_1;\\ x_j-0.8x_1\cos(6\pi x_1+\dfrac{j\pi}{n})\ \text{if}\ j\in J_2.\end{cases}\tag{18}$$

约束条件为

$$x_2-0.8x_1\sin\left(6\pi x_1+\frac{2\pi}{n}\right)-\text{sign}(0.5(1-x_1)-(1-x_1)2)\sqrt{|0.5(1-x_1)-(1-x_1)^2|}\geqslant 0.\tag{19}$$

$$x_4-0.8x_1\sin(6\pi x_1+\frac{4\pi}{n})-\text{sign}(0.25\sqrt{1-x_1}-0.5(1-x_1))\sqrt{|0.25\sqrt{1-x_1}-0.5(1-x_1)|}\geqslant 0.\tag{20}$$

决策空间为$[0,1]\times[-2,2]^{n-1}$.

采用公式(6)的归一化方法,需要先求 $\boldsymbol{f}^{\min}$ 和 $\boldsymbol{f}^{\max}$. 这里采用自适应 εDE 算法来求解,求得 $\boldsymbol{f}^{\min}=[0,0]$,$\boldsymbol{f}^{\max}=[270.9,30.9]$. 采用本文方法,也就是公式(7)的方法,需要求 $\boldsymbol{f}^{\text{nad}}$,求得 $\boldsymbol{f}^{\text{nad}}=[10,1]$. 对于公式(6)的方法,可以先根据式(8)计算 $\boldsymbol{f}^{\text{Tnad}}=\left[\dfrac{10}{270.9},\dfrac{1}{30.9}\right]$. 因为 f_1^{Tnad} 与 f_2^{Tnad} 相差不大,因此,可以推断公式(6)的方法与本文方法效果相当. 3 种方法均采用相同的算法参数,最终求得的解如图 3 所示.

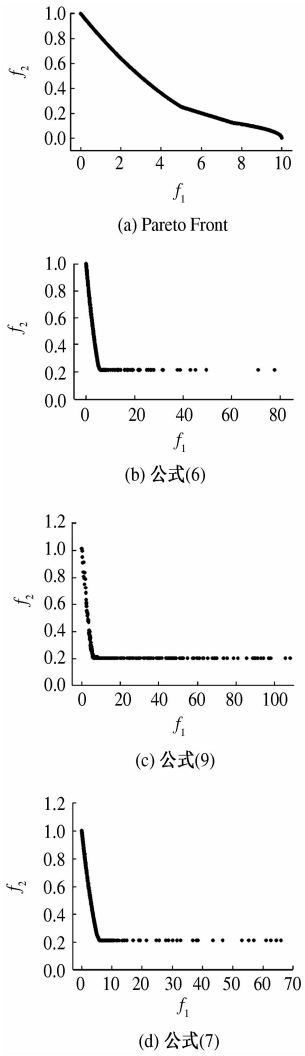


图 3 对 CF6 各方法 Pareto 前沿的比较

Fig. 3 Pareto fronts of different methods for CF6

图 3 中第一个子图为真实的 Pareto 前沿. 3 种方法都没有求得 f_2 的范围在[0,0.2]的 Pareto 最优前沿. 公式(6)的方法与本文方法相当,这是因为采用公式(6)时,该问题的 f_1^{Tnad} 与 f_2^{Tnad} 相差不大;公式(9)的方法结果较差,其一为分散性较

差,f_2的范围在[0.4,1]的 Pareto 前沿非常稀疏,原因在于此问题比较难于优化. 在优化后期该问题的 $\boldsymbol{z}^*$ 约为[0, 0.2], $\bar{\boldsymbol{f}}^{\mathrm{nad}}$(种群中的最大目标函数值 $\bar{f}^{\max}$)约为[110, 1]. 此时,计算 $\boldsymbol{f}^{\mathrm{Tnad}}$ 为 $\left[\frac{10-0}{110-0},\frac{1-0.2}{1-0.2}\right]=\left[\frac{1}{11},1\right]$,可见 f_2^{Tnad} 远大于 f_1^{Tnad},因此导致了较差的解集分布性. 公式(9)的结果较差还表现在精度不高. 从图 3(c)可见,公式(9)方法所获的前沿不光滑,有些解不是非支配解,这是因为采用公式(9)的方法使子问题变成了动态优化问题,收敛速度变慢了.

对于该问题,采用自适应 εDE 求解 $\boldsymbol{f}^{\min}$时,可获得 $\boldsymbol{f}^{\min}=[0, 0]$. 但采用 MOEA/D 进行求解时,却无法求得 f_2的范围在[0,0.2]的 Pareto 最优前沿. 在已知 $\boldsymbol{f}^{\min}=[0,0]$和 $\boldsymbol{f}^{\mathrm{nad}}=[10,1]$的情况下,可以结合归一化方法让更多的解集中在 f_2的范围为[0,0.2]的 Pareto 最优前沿处. 具体方法是在归一化时加大 f_1^{nad}. 比如,当分别采用 $\boldsymbol{f}^{\mathrm{nad}}=[20, 1]$和[100, 1]进行归一化时,可获得如图 4 所示的最优前沿. 很显然,当 f_1^{nad} 增加的越大时,对 Pareto 前沿的下端的优化就越集中,因而图 4 中右图 Pareto 前沿的下端要优于左图,而上端却较左图稀疏.

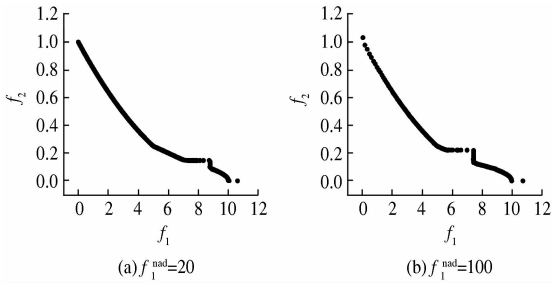


图 4　增加 f_1^{nad} 时所获得 Pareto 前沿

Fig. 4　Pareto fronts obtained by increasing f_1^{nad}

下面选取逆向世代距离(Inverted Generation Distance, IGD)进一步比较这几种方法. IGD 的定义如下式所示:

$$\begin{cases}\mathrm{IGD}(\boldsymbol{PF},\boldsymbol{PF}^*)=\dfrac{1}{|\boldsymbol{PF}|}\sum\limits_{X\in \boldsymbol{PF}} d(\boldsymbol{X},PF^*);\\ d(\boldsymbol{X},\boldsymbol{PF}^*)=\min\limits_{Y\in \boldsymbol{PF}^*}\|\boldsymbol{X}-\boldsymbol{Y}\|.\end{cases}\tag{21}$$

式中:$|\boldsymbol{PF}|$表示所获 Pareto 前沿的数目;$\boldsymbol{PF}^*$表示理想的 Pareto 最优前沿;$\|\boldsymbol{X}-\boldsymbol{Y}\|$表示欧几里德距离;IGD 可以同时度量 $\boldsymbol{PF}$ 的收敛性及分布性.

分别采用公式(6)、公式(9)、公式(7)以及采用公式(7)时将 f_1^{nad} 增大为 100 来归一化处理,将算法随机运行 30 遍. IGD 的平均值与标准差及每种方法所需的平均运行时间如表 1 所示. 每种方法获得 IGD 做出箱线图如图 5 所示.

由表 1 和图 5 可知,采用公式(9)的归一化方法所获的 IGD 最大,公式(6)和公式(7)的方法没有明显的差异,这与之前分析是一致的. 相对而言,公式(7)方法所获的解 IGD 更集中,而采用公式(7)方法时,将 f_1^{nad} 增大为 100 能明显提高算法的性能,不但能获得更小的 IGD 值,并且比其他方法更加集中. 这就是因为当 $f_1^{\mathrm{nad}}=100$ 时,会有大量的解集中到难以优化的 Pareto 前沿附近,因而能跳出该处的局部最优,获得更为完整 Pareto 最优前沿,结果如图 4 所示.

表 1　4 种方法对 CF6 运行 30 次求得的 IGD 平均值、标准差及所需平均时间

Tab. 1　IGD's average value, standard error and average time by the four methods running 30 times for CF6

方法	平均值	标准差	运行时间/s
公式(6)	4.22E-02	1.27E-02	154
公式(9)	6.68E-02	1.86E-02	167
公式(7)	4.31E-02	1.32E-02	155
$f_1^{\mathrm{nad}}=100$	2.81E-02	8.66E-03	153

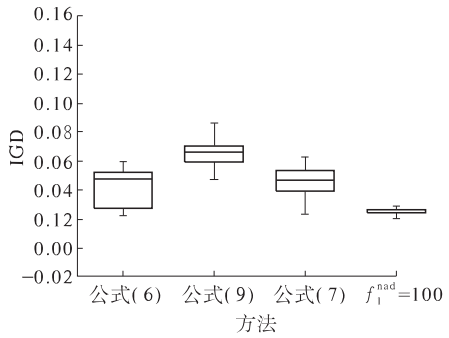


图 5　4 种方法对 CF6 运行 30 次的 IGD 的箱线图

Fig. 5　Boxplot of four methods for CF6

由表 1 可见,虽然需要先计算归一化所需的 $\boldsymbol{f}^{\min}$和 $\boldsymbol{f}^{\max}$或 $\boldsymbol{f}^{\mathrm{nad}}$,但公式(6)和公式(7)不需要更新 $\boldsymbol{z}^*$,所以这两种方法反而比公式(9)的方法的计算时间更少.

作出 IGD 为中位数时各方法的 IGD 收敛曲线如图 6 所示. 可见,公式(9)的方法最差,波动也较大,这正是 $\boldsymbol{f}^{\mathrm{nad}}$和 $\boldsymbol{z}^*$不断变化的结果. 采用公式(6)和公式(7)求得的 IGD 非常接近. 而采用公式(7)并将 f_1^{nad} 增大为 100 时,能收敛到更低的 IGD 值,这是因为有更多的解集中到 Pareto 前沿的下端,而能跳出局部最优.

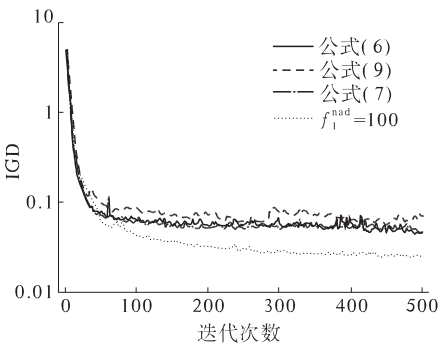


图 6 4 种方法求解 CF6 的 IGD 收敛图

Fig. 6 IGD's converge plots of four algorithms for CF6

6.2 焊接梁设计问题

笔者选用焊接梁设计问题[22]验证该算法的有效性,其目标是最小化制造成本和末端挠度,其约束为在一定的负载下剪切应力和弯曲应力均满足要求.

对于该问题,种群大小设置为 100,最大迭代次数为 100;自适应 εDE 的种群大小为 20,最大迭代次数为 500.

用自适应 εDE 算法求的 $\boldsymbol{f}^{min}$ = [1.861 6, 0.000 44], $\boldsymbol{f}^{max}$ = [1 220, 0.071 28],求得 $\boldsymbol{f}^{nad}$ = [35.23, 0.015 7]. 对于公式(6)的方法,计算其 $\boldsymbol{f}^{Tnad}$ = [0.027, 0.215],可见两个值相差较大. 采用 3 种方法所获得的 Pareto 前沿如图 7 所示.

从图 7 可见,对于公式(6)的方法,由于 f_2^{Tnad} 远大于 f_1^{Tnad},所获得 Pareto 前沿在上部的所获得解非常稀疏. 不过在 Pareto 前沿的下部所获得的解要优于公式(9)和公式(7)方法. 因为该问题易于求解,采用公式(9)的方法与公式(7)的方法,所获得 Pareto 前沿非常接近.

从图 7 可见,该问题的 Pareto 最优前沿有比较陡峭的尖端和很平缓的尾端. 当采用 MOEA/D 求解时,所获的解在尖端和尾端非常稀疏. 对于此问题,结合本文的归一化方法提供一种解决思路. 对于同一个问题采用两个种群分别求解,对一个种群归一化时增加 f_1^{nad},对另一个种群归一化时增加 f_2^{nad},最后所得解合二为一,就能得到在整个 Pareto 最优前沿上都分布较好的解. 这里每个种群采用 50 个粒子,分别将 f_1^{nad} 和 f_2^{nad} 扩大 10 倍,最终分别获得的 Pareto 前沿以及混合后的 Pareto 前沿如图 8 所示.

从图 8 可见,将 f_1^{nad} 和 f_2^{nad} 扩大 10 倍所求的解分别在 Pareto 前沿的一半分布性较好,两者混合后能获得整体上分布性较好的前沿. 与图 7 中公式(7)获得 Pareto 前沿相比,两者有着相同数量的解,但混合前沿的在尖端和尾端的分布性远远好于前者,可见该方法是有效的.

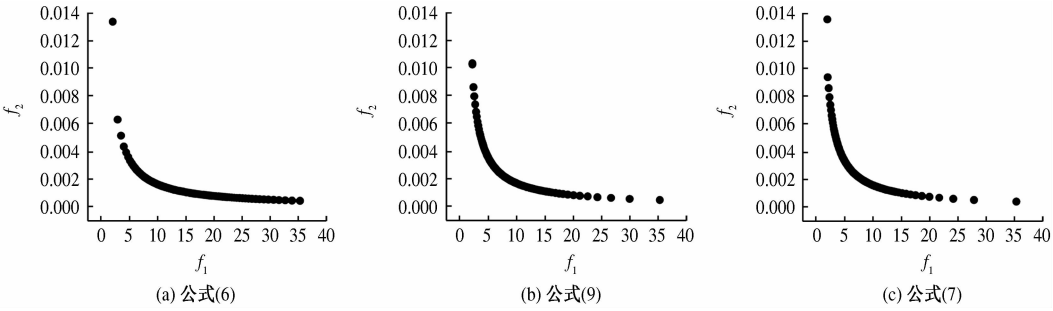


图 7 对焊接梁设计问题各方法 Pareto 前沿的比较

Fig. 7 Pareto Fronts obtained by three methods for weld bean design

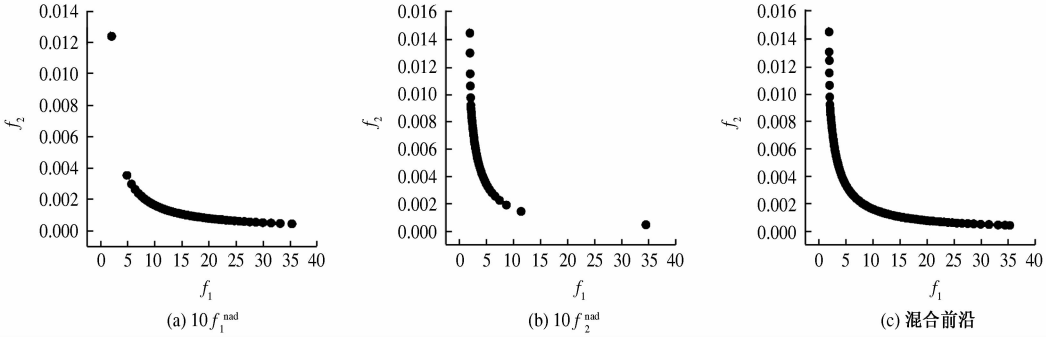


图 8 将 f_1^{nad} 和 f_2^{nad} 扩大 10 倍所得的 Pareto 前沿及混合前沿

Fig. 8 Pareto fronts obtained by enlarging f_1^{nad} and f_2^{nad} to 10 times and the mixed front

7　结束语

为了将 MOEA/D 算法更好地应用于各目标数量及量纲不同的多目标优化问题,笔者提出了一种新的归一化方法,并采用了一种自适应 ε 约束处理方法来处理约束. 归一化方法采用一种自适应 εDE 算法来求解归一化所需的 $f^{\min}$ 和 $f^{\max}$. 通过数值实例,证明了该方法能获得分布性较好的 Pareto 前沿,并且该方法能克服其他两种归一化方法的缺点. 另外,通过灵活运用该归一化方法,MOEA/D 能对 Pareto 前沿的一端集中优化,因而能处理一些 Pareto 前沿的两端比较难以优化的多目标优化问题.

参考文献:

[1] SCHAFFER, DAVID J. Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms [D]. Nashville, TN (USA):Vanderbilt Univ, 1985.

[2] ZITZLER E, LAUMANNS M, THIELE L. SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization [R]. Zurich: Computer Engineering and Networks Laboratory(TIK),Swiss Federal Institute of Technology(ETH), 2001: 19 – 21.

[3] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA – II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 – 197.

[4] BADER J, ZITZLER E. HypE: An algorithm for fast hypervolume-based many – objective optimization [J]. Evolutionary Computation, 2011, 19(1):45 – 76.

[5] ZHANG Qingfu, LI Hui. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712 – 731.

[6] ZHANG Qingfu, LIU Wudong, LI Hui. The performance of a new version of MOEA/D on CEC09 unconstrained MOP test instances [C]//In IEEE Congress on Evolutionary Computation. Trondheim: IEEE Press 2009:203 – 208.

[7] PALMERS P, MCCONAGHY T, STEYAERT M, et al. Massively multitopology sizing of analog integrated circuits [C]//Conference on Design, Automation and Test in Europe, DATE 2009. Nice:IEEE Press,2009: 706 – 711.

[8] QI Yutao, MA Xiaoliang, LIU Fang, et al. MOEA/D with adaptive weight adjustment [J]. Evolutionary computation, 2014, 22(2), 231 – 264.

[9] LI Ke, FIALHO A, KWONG S,et al. Adaptive operator selection with bandits for a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18 (1): 114 – 130.

[10] 周爱民,张青富,张桂戌. 一种基于混合高斯模型的多目标进化算法[J]. 软件学报,2014, 25 (5): 913 – 928.

[11] CARVALHO R D. A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for optimal design of Yagi – Uda antennas [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012, 48(2): 803 – 806.

[12] ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang. Multi-objective economic emission dispatch considering wind power using evolutionary algorithm based on decomposition [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014,63: 434 – 445.

[13] GONG Maoguo, CAI Qing, CHEN Xiaowei, et al. Complex network clustering by multiobjective discrete particle swarm optimization based on decomposition [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(1): 82 – 97.

[14] KONSTANTINIDIS A, YANG K. Multi-objective energy-efficient dense deployment in wireless sensor networks using a hybrid problem-specific MOEA/D [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(6): 4117 – 4134.

[15] LI Hui, ZHANG Qingfu. Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 284 – 302.

[16] ZHANG Chunjiang, LIN Qun, GAO Liang. A novel adaptive ε-constrained method for constrained problem [C]//In Proceedings of the 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems. Singapore:Springer,2015: 573 – 586.

[17] TAKAHAMA T, SAKAI S, IWANE N. Constrained optimization by the epsilon constrained hybrid algorithm of particle swarm optimization and genetic algorithm [C]//Ai 2005: Advances in Artificial Intelligence. Sydney,Australia:Springer,2005:389 – 400.

[18] TAKAHAMA T, SAKAI S. Constrained optimization by the epsilon constrained differential evolution with gradient-based mutation and feasible elites [C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation. Ancouver,BC:IEEE Press,2006:1 – 8.

[19] TAKAHAMA T, SAKAI S. Constrained optimization by the ε constrained differential evolution with an Archive and gradient-based mutation [C]//2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Barce: IEEE Press,2010:25 – 32.

[20] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997,11(4):341 -359.

[21] ZHANG Qingfu, ZHOU Aimin, ZHAO Shizheng, et al. Multiobjective optimization test instances for the CEC 2009 special session and competition[R]. University of Essex, Colchester, UK and Nanyang Technological University, Singapore, 2008: 1 -30.

[22] RAY T, TAI K. An evolutionary algorithm with a multilevel pairing strategy for single and multiobjective optimization [J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 2001, 26(1): 75 -98.

Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Engineering Optimization

ZHANG Chunjiang[1,2], TAN Kay Chen[2], GAO Liang[1], WU qing[3]

(1. School of Mechanical Scinece & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583; 3. School of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order for effective application of Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition (MOEA/D) in engineering optimization, normalization of the range of objective values is needed. A self-adaptive ε constrained Differential Evolution (εDE) algorithm is proposed to obtain the minimum and maximum values of each objective on the Pareto Front (PF). After normalization, MOEA/D can then be effectively applied. In addition, the self-adaptive ε constraint method is combined with MOEA/D for constraint handling. A benchmark problem and a weld bean design problem are used to evaluate the performance of the algorithm against two other normalization methods. One main advantage of the proposed method is the selective concentrated optimization on some regions on the Pareto front which allows handling of problems where regions of Pareto front are difficult to be optimized.

Key words: multi-objective evolutionary algorithm; MOEA/D; normalization; engineering optimization; differential evolution; ε-constraint handling

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0047 - 05

基于烟花算法与差分进化算法的模糊分类系统设计

朱晓东, 刘　冲, 郭雅默

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 针对模糊分类问题,提出了一种基于烟花算法和差分进化算法的模糊系统建模方法,这是首次将烟花算法应用到模糊建模领域,目的是建立精确度高而且解释性好的模糊分类器. 烟花算法是通过模拟烟花爆炸现象而提出的一种新的粒子智能算法,首先采用此方法对模型的结构和参数进行学习,结果表明该方法具有较好的收敛速度和搜索性能;其次,为了扩大搜索范围,避免过早地陷入局部最优,在每一次迭代中采用差分算法进一步优化模型;最后,对 Iris 数据样本进行仿真实验,在保证较高分类精度的前提下,构建了一个解释性良好的模糊分类系统.

关键词: 差分进化;烟花算法;模糊系统;解释性;系统辨识

中图分类号: TP273　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.009

0　引言

模糊分类系统能够融合专家经验,通过易于理解的模糊规则来阐述实际问题的内部机理,因而在模式识别、数据挖掘等领域得到了广泛的应用. 为了提高模糊系统的性能,学者们做了大量的研究:利用聚类算法建立模糊模型[1],采用遗传算法[2-3]或神经网络[4-5]学习模糊规则及隶属函数的特征参数等 . 然而,这些算法在追求模型高精确度的同时,采用了较多的模糊规则和模糊集合,使得模型结构复杂、难以理解. 为了建立结构简单易懂、精确度高的模糊模型,文献[6]采用分层模糊的概念来构造模糊系统,降低了系统维度,简化了系统的结构. 文献[7]采用基于类空间模糊度的计算几何分类器权重分配方法来构建分类器,这种方法使得模型的精确性和解释性都得到了进一步的提高.

烟花算法[8]是受烟花在夜空中的爆炸现象启发而提出的一种新的群智能算法,和粒子群算法等其他方法相比具有较好的搜索性能. 在烟花算法中,性能较好的烟花在较小的搜索范围内产生数量较多的子代火花,进而加快了收敛速度;而性能较差的烟花则在较大的搜索范围内产生数量较少的子代火花,因而扩大了搜索范围,提高了种群的多样性. 但是,烟花算法忽略了不同烟花个体之间的相互联系和学习,这样容易使算法过早成熟. 为了解决这个问题,将差分算法与烟花算法相结合,进一步增加种群的多样性,扩大搜索区域,增强个体间的相互联系,防止算法过早陷入局部最优[9]. 笔者将烟花算法和差分进化算法用于模糊模型优化,能够使种群以较快的收敛速度、较好的搜索性能寻找全局最优个体,建立结构简单、精确度高的模糊模型.

1　预备知识

1.1　模糊分类系统

对于 n 维 m 类的分类问题,其中 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为输入变量,$\{g_1, g_2, \cdots, g_n\}$ 为输出类的标值号,则经典的模糊分类系统的规则可表示为[10]

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } \mu_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } \mu_{i2} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } \mu_{in}, \text{ then the pattern } (x_1, \cdots, x_n) \text{ belongs to } g_i. \quad (1)$$

其中,$\mu_{i1}, \cdots, \mu_{in}$ 为模糊集合. 其高斯型隶属函数为

$$\mu_{ij}(x_j) = \exp\left(-\frac{(x_j - v_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right). \quad (2)$$

式中:ν_{ij}, σ_{ij} 分别表示函数的中心和方差. 对于样本 x_k,模糊系统所对应的输出类别为激励强度最大的规则的后件类别号.

收稿日期: 2015 - 07 - 10;**修订日期:** 2015 - 08 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473266)

作者简介: 朱晓东(1970—),男,河南安阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事智能控制、信息处理、数据挖掘、模式识别等方面的研究,E-mail: zhu_xd@zzu.edu.cn.

1.2 烟花算法

烟花算法是 Tan 通过模拟烟花的爆炸过程而提出的一种群体智能算法[8]. 该算法在每一代都选择出性能较好的烟花作为父代,来产生子代火花用以搜索最优解. 对于烟花 x_i,产生子代火花的数量 s_i 以及爆炸的范围 A_i 分别定义如下:

$$s_i = m \cdot \frac{f_{\max} - f(x_i) + \varepsilon}{\sum_{j=1}^{L} (f_{\max} - f(x_j)) + \varepsilon}; \tag{3}$$

$$A_i = \hat{A} \cdot \frac{f(x_i) - f_{\min} + \varepsilon}{\sum_{j=1}^{L} (f(x_j) - f_{\min}) + \varepsilon}. \tag{4}$$

式中:s_i 和 $\hat{A}$ 是控制参数;L 为种群大小;$f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 分别表示目标函数的最大值和最小值;ε 是一个极小的常量以避免除数为零.

为了避免性能优秀的烟花对子代的影响过大,以至于丧失种群多样性,需对 s_i 的大小范围进行限制:

$$s_i = \begin{cases} s_{\min}, \text{ if } s_i < s_{\min}; \\ s_{\max}, \text{ if } s_i > s_{\max}; \\ s_i, \text{ otherwise.} \end{cases} \tag{5}$$

对于一个 D 维的问题,随机选择烟花 x_i 的 $z(z < D)$ 个位置,对每一个位置 x_i^k 加上一个位移构成 $x_j^k(1 \leqslant j \leqslant s_i, 1 \leqslant k \leqslant z)$. 生成火花 x_j^k 的方法有两种. 大部分火花是通过对 x_i^k 加上一个位移 $h_k = A_i \cdot \text{rand}(-1,1)$ 而得到的,即

$$x_j^k = x_i^k + A_i \cdot \text{rand}(-1,1). \tag{6}$$

对于少数的烟花,将一个高斯位移加到 x_i^k,这样可以提高种群的多样性,即

$$x_j^k = x_i^k + A_i \cdot \text{Gaussian}(1,1). \tag{7}$$

对于上述两种方法,如果产生的新的位置超出了搜索区间,需要将其映射到搜索区间内,方法如下:

$$x_j^k = x_{\min}^k + |x_j^k| \text{mod}(x_{\max}^k - x_{\min}^k). \tag{8}$$

在每一次迭代中,所有的个体(包括烟花和火花)中的最优个体,总是被选为烟花进入下一代,并根据距离概率[9]选择其他 $L-1$ 个个体作为下一代的父体烟花.

1.3 差分进化算法

仅仅采用烟花算法对初始模糊模型进行优化,容易过早成熟收敛,陷入局部最优解[9]. 为了提高种群的多样性,扩大搜索范围,在每一次迭代过程中,采用烟花算法产生新的子代火花,并选择出较好的个体作为下一代烟花,然后执行差分算法对被选择出的烟花进一步优化. 差分算法的步骤为:

(1) 变异操作. 对于个体 x_i,在种群中随机选择 3 个个体 x_{r_1}, x_{r_2} 和 x_{r_3},其中的一个个体加上另外两个个体的差值与权值系数的乘积,生成变异个体 v_i,即

$$v_i = x_{r_1} + \gamma(x_{r_2} - x_{r_3}). \tag{9}$$

式中:$r_1, r_2, r_3 \in [1, L]$;γ 是变异尺度因子,用来控制摄动幅度.

(2) 交叉操作. 在原始个体和变异个体之间进行比较,挑选出试验个体 u_i^j. 采用二项式交叉,即

$$u_i^j = \begin{cases} v_i^j, \text{ if rand}(0,1) < c_r \text{ or } j = r(i); \\ x_i^j, \text{ otherwise.} \end{cases} \tag{10}$$

式中:c_r 是交叉概率;$r(i)$ 是$(0, 2 \times c \times n]$之间的随机数.

(3) 选择操作. 将原始个体和试验个体进行比较,比较优秀者被选择进入下一代种群. 这个操作过程表示为

$$x_i = \begin{cases} u_i, \text{ if } f(u_i) \leqslant f(x_i); \\ x_i, \text{ otherwise.} \end{cases} \tag{11}$$

2 利用烟花算法和差分算法建立模糊分类系统

采用模糊 C - 均值(FCM) 聚类算法构造初始模糊系统,但初始模糊模型在分类精度以及可解释性方面的效果都比较差. 采用烟花算法和差分进化算法对模型的结构和参数进行学习和优化,并在进化算法中采用相似相融原理[10]对模型进行约简[11],在保证系统精确度的前提下,简化系统结构,使得系统更好理解、透明性更高.

2.1 模糊分类系统的初始化

为了避免“维数灾”问题,首先进行特征变量的选择[11],以降低系统的维度. 并采用模糊 C - 均值(FCM) 聚类算法辨识初始模糊模型[12],其中初始聚类数为 c,即初始的模糊模型规则数,取 $c = 3N_c$(N_c 为实际分类数).

规则 R_i 的后件所对应的类标号值[11] 为

$$i^* = \arg(\max(M_{ij})), \ j = 1, 2, \cdots, N_c. \tag{12}$$

$$M_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N} u_{ik} f_j(x_k)}{\sum_{k=1}^{N} f_j(x_k)}. \tag{13}$$

其中,u_{ik} 是数据 x_k 对 i^{th} 聚类中心的隶属度,且满足:

$$u_{ik} \in [0,1]. \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1,\ 0 < \sum_{k=1}^{N} u_{ik} < N. \tag{15}$$

$$f_j(x_k) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } x_k \text{ 属于类 } j; \\ 0, & \text{如果 } x_k \text{ 不属于类 } j. \end{cases} \tag{16}$$

2.2　染色体编码

设定种群的个体数为 L,染色体表示为 H_p, $p = 1,2,\cdots,L$,第一条染色体根据初始模型的参数来构造,其中隶属函数的中心 v_{ij} 和方差 σ_{ij} 为编码参数,则第一条染色体的编码为

$$H_1 = (v_{11},\cdots,v_{cn},\sigma_{11},\cdots,\sigma_{cn}). \tag{17}$$

搜索区域为$[H^{\min},H^{\max}]$:

$$H^{\min} = (v_{11}^{\min},\cdots,v_{cp}^{\min},\sigma_{11}^{\min},\cdots,\sigma_{cp}^{\min}); \tag{18}$$

$$H^{\max} = (v_{11}^{\max},\cdots,v_{cp}^{\max},\sigma_{11}^{\max},\cdots,\sigma_{cp}^{\max}). \tag{19}$$

式中:$v_{ij}^{\max}$,$v_{ij}^{\min}$,$\sigma_{ij}^{\max}$,$\sigma_{ij}^{\min}$ 分别为对应隶属函数的中心和方差的最大最小极限. 其余的初始染色体在染色体 H_1 附近、搜索区间之内随机生成. 由于初始种群相对应的模糊模型的分类性能差、结构复杂,需要采用烟花算法和差分进化算法对种群个体进行迭代和优化,以提高模型的性能.

2.3　适应度函数

建立模型的主要目的是能够准确地模拟实际问题,为此,精确性是模糊分类系统的一个重要性能指标,可用分类误差来衡量模糊分类系统的精确性:

$$J_{\mathrm{ERR}} = \sum_{k=1}^{N} e_k. \tag{20}$$

其中,

$$e_k = \begin{cases} 0, & \text{如果 } x_k \text{ 被正确分类}; \\ 1, & \text{如果 } x_k \text{ 被错误分类}. \end{cases} \tag{21}$$

系统的解释性是指,人们容易通过该系统理解并学习实际问题的内部机理. 一般情况下,模型的结构越复杂,所包含的模糊规则和模糊集合数量越多,人们学习该模型就越困难,模型的解释性就越差[11,13]. 若要使模型易于理解,应在满足精确性的前提下,采用尽可能少的规则和集合;而且,模糊规则必须满足一致性和完备性,输入变量的两个相邻的模糊集合应满足可区分性,并在恰当的隶属函数值处交叉.

精确性和解释性是模糊系统的两个重要指标,利用加权求和法的思想,将这两个指标综合,构成为如下适应度函数:

$$F = \omega_1 J_{\mathrm{ERR}} + \omega_2 N_{\mathrm{R}} + \omega_3 N_{\mathrm{S}}. \tag{22}$$

式中:J_{ERR} 为衡量模型精确性的指标,为类别被划分错误的样本数目;N_{R},N_{S} 分别为模糊规则和模糊集合的数目,用来度量模型的解释性;ω_1,ω_2 和 ω_3 为预先设置的权值参数,其值的大小一般是根据具体问题需要和经验进行选取.

2.4　模糊分类器的设计步骤

基于烟花算法和差分进化算法的模糊分类器设计的详细步骤如下.

步骤 1:初始化. 首先,对系统的特征变量进行选择,降低模糊系统的维度;其次,利用 FCM 聚类算法构建初始模糊模型,并对初始种群 P 进行染色体编码.

步骤 2:计算模糊规则和模糊集合之间的相似度,并约简模糊模型结构.

步骤 3:根据公式(3)、(5)计算每一个烟花所产生子代火花的数量,由公式(4)得出子代火花范围.

步骤 4:根据公式(6)、(8)产生普通子代,根据公式(7)、(8)得到少量由高斯位移产生的子代.

步骤 5:根据适应度函数值,选择最优个体,并在适应度排在前 $2L$ 的个体中随机选择 $L-1$ 个个体组成种群 P'. 选择概率为$\dfrac{f(x_i)}{\sum_{j\in P} f(x_j)}$.

步骤 6:对由烟花算法得到的种群 P',采用差分算法,经过变异、交叉、选择操作得到种群 P.

步骤 7:判断是否满足步长终止条件,如果满足,返回步骤 2;否则,算法执行结束.

2.5　算法流程图

模糊分类器设计步骤的算法流程如图 1 所示.

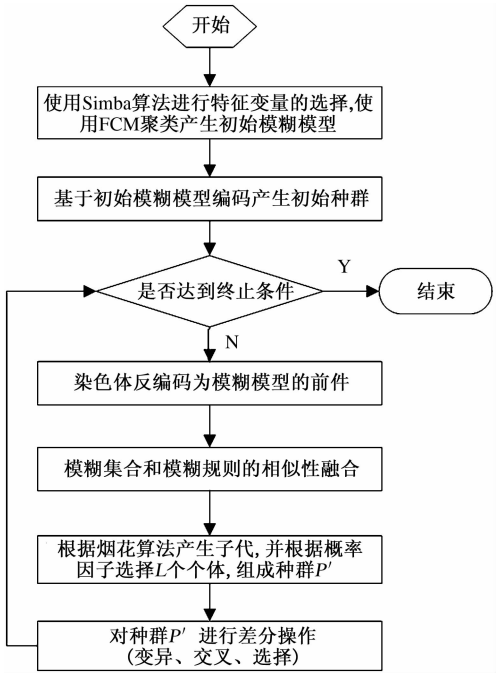


图 1　模糊分类器设计算法流程图

Fig. 1　Flowchart of the fuzzy classifier generation

3 试验与分析

采用 Iris 数据样本作为实验数据. Iris 数据是由 4 维数据[x_1:Sepal length;x_2:Sepal width;x_3:Petal length;x_4:Petal width]的 150 个样本组成. 对实验数据的特征进行筛选,选择 x_3 和 x_4 为输入变量[3];采用 FCM 聚类对数据进行预处理,构建一个由 9 个模糊规则和 18 个模糊集合所组成的初始模型. 该模型的结构复杂,且错误分类样本数目为 10,分类精确度为 93.3%,分类效果差.

采用烟花算法和差分进化算法对模型的结构和参数进行优化,并利用相似度原理对规则和集合进行约简. 关于实验中一些常量参数的设定,笔者是在参考相关文献资料的基础上经过反复试验而获取的. 选取不同的常量参数所得到的模糊模型,其性能有一定的差别. 经过多次实验和分析后,最终设定种群的大小 $L=40$,进化代数为 100,模糊集合和规则的相似性融合的阈值分别为 0.4 和 0.9,适应度函数参数 $\omega_1=1$,$\omega_2=0.5$,$\omega_3=0.2$.

经过优化后的模型精确性提高了很多,错误划分样本数目降为 4,精确性度高达 97.3%,模糊集合数减少到 5,其隶属函数如图 2 所示,模糊规则数降为 3,模型的结构简单了许多,解释性得到了提高.

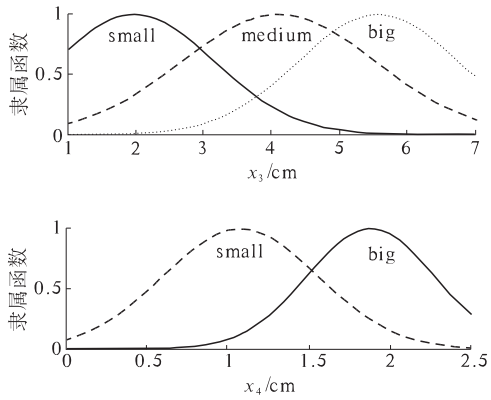


图 2 优化后模糊模型的隶属函数图

Fig. 2 Membership function of the optimized fuzzy model

表 1 列举了本文方法与其他文献方法的对比结果. 可以看出,基于烟花算法和差分进化算法所建立的模糊分类系统分类精度高、结构简单、易于理解. 文献[14-15]中的分类系统的分类效果虽然比本文方法的精确度稍好一些,但系统所包含的模糊集合数目较多、结构复杂、解释性差. 文献[16]中的分类系统与本文所建立的系统相比,结构更为简单,解释性稍好,但其分类准确度较差. 总体来说,笔者所建立的模糊分类系统在精确性与解释性这两个相互矛盾的方面获得了较好的折衷,模型更为合理.

表 1 Iris 分类问题不同建模方法的性能比较

Tab. 1 Comparison of different modeling methods on the Iris classification problem

文献方法	模糊规则数	模糊集合总数	分类正确率/%
文献[14]	5	7	98.00
文献[16]	3	4	96.67
文献[15]	3	11	97.50
本文方法	3	5	97.30

4 结论

为了建立能够准确模拟实际问题并且易于被人们所理解的模糊模型,采用烟花算法和差分进化算法来建立模糊模型是一种很好的选择. 这是首次将烟花算法应用到模糊建模领域,利用烟花算法和差分算法对模型结构和参数进行优化. 在烟花算法中,性能较好的烟花在较小的范围内产生较多的子代个体,加快了收敛速度;另一方面,性能较差的个体在较大的范围内产生较少的子代个体,从而增大了搜索范围. 而采用差分算法对子代火花进一步优化,能够提高种群的多样性,很好地解决了烟花算法容易过早地陷入局部最优的问题,并最终以较少的模糊规则和模糊集合数取得了精确性良好的模糊分类系统.

笔者采用的是加权求和法的方法构建适应度函数,将多目标转化为一个目标函数. 但是,目前还没有确定某种算法能较好地确定权值大小,在这里仅是根据经验来设定权值大小,可见,这种方法具有一定的局限性. 下一步,笔者将尝试并研究采用 Pareto 最优解的理论来处理多个目标的问题.

参考文献:

[1] 生龙, 张洪斌. 二型模糊系统在音频信号分类中的应用[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(3): 436-441.

[2] 郭亦文, 李军, 耿林霄. 基于遗传算法获取模糊规则[J]. 计算机应用, 2014, 34(10): 2899-2903.

[3] 张永, 吴晓蓓, 向峥嵘, 等. 基于决策树和遗传算法的模糊分类系统设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006,36(1): 23-36.

[4] 冯冬青, 张希平. 基于神经网络的自学习模糊控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(4): 6

-10.

[5] 张景元. 基于神经网络的自适应模糊控制系统[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3613-3616.

[6] 王杰, 周贺松. 增一型分层模糊系统结构的 PCA 优化方法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2013, 45(2):59-63.

[7] 张涛, 洪文学. 基于模糊度的计算几何分类器权重分配[J]. 控制与决策, 2013,28(4): 569-573.

[8] ZHENG Shaoqiu, JANECEK A,TAN Ying. Enhanced fireworks algorithm[C]//2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun, México: IEEE Press, 2013: 2069-2077.

[9] ZHENG Yujun, XU Xinli, LING Haifeng, et al. A hybrid fireworks optimization method with differential evolution operators[J]. Neurocomputing, 2012, 148: 75-82.

[10] SETNES M, BABUSKA R, KAYMAK U, et al. Similarity measures in fuzzy rule base simplification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1998, 28(3): 376-386.

[11] 张永, 吴晓蓓, 向峥嵘, 等. 基于多目标进化算法的高维模糊分类系统的设计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 210-215.

[12] 文传军, 汪庆淼, 詹永照. 均衡模糊 C 均值聚类算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 250-253.

[13] WANG Hanli, KWONG S, JIN Yaochu, et al. Multi-objective hierarchical genetic algorithm for interpretable fuzzy rule-based knowledge extraction[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 149(1): 149-186.

[14] ISHIBUCHI H, NAKASHIMA T, MURATA T. Three-objective genetics-based machine learning for linguistic rule extraction[J]. Information Sciences, 2001, 136(1): 109-133.

[15] WANG J S, LEE C S G. Self adaptive neuro-fuzzy inference systems for classification applications[J]. IEEE Transactions on Fuzzy System, 2002, 10(6): 790-802.

[16] ZHANG Yong, WU Xiaobei, XING Zongyi, et al. On generating interpretable and precise fuzzy systems based on Pareto multi-objective cooperative coevolutionary algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1): 1284-1294.

Design of Fuzzy Classification System Based on Fireworks Optimization and Differential Evolution Algorithm

ZHU Xiaodong, LIU Chong, GUO Yamo

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

Abstract: A novel approach to construct accurate and interpretable fuzzy classification system based on fireworks optimization algorithm (FOA) combined with differential evolution operators is proposed. It is the first time to apply FOA in fuzzy modeling. The fireworks optimization algorithm is a novel swarm intelligent algorithm based on simulating the explosion process of fireworks, which can optimize the construction and parameters of fuzzy system with good convergence speed and optimization accuracy. To improve the diversity of the swarm and avoid being trapped in local optima too early, the differential evolution is performed to further optimize the model at each iteration. The proposed approach is applied to the Iris benchmark classification problem, and the results prove its validity.

Key words: differential evolution; fireworks algorithm; fuzzy system; interpretability; system identification

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0052 - 04

可见光通信中 LED 阵列的优化配置算法研究

叶会英, 王　莉, 刘津良

(郑州大学 信息工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 针对可见光通信中光源优化布局的局限性,提出了一种具有普适性的光源布局优化配置算法. 仿真结果表明:利用该算法求解出的光源布局,不仅可以使得房间内的平均面积谱效率达到最大,光照度水平在 400 lx ~ 1 500 lx,而且光分布均匀,可以满足人们对照明的需求,因此,该算法可以作为一种普适的求解光源布局的优化算法.

关键词: 可见光通信;LED 阵列布局;优化算法; 普适性

中图分类号: TN929.1　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.010

0　引言

在固态照明技术的推动下,可见光通信(Variable Light Communication, VLC)正在发展成为一种新型无线通信技术. 自 VLC 系统提出后,各国科研工作者进行了大量研究,研究重点主要集中在如何提高通信速率;如何实现双工通信、调制解调技术、通信信道的研究等方面. 但是,作为整个 VLC 系统通信信号发射端的 LED 阵列布局是否合理也极为重要.

此前,关于光源布局的研究也有一些,例如,文献[1 - 2]提出了求偏导数来求解 LED 阵列的坐标的算法;文献[3]分析了相邻 LED 之间的距离与光照度分布之间的关系;文献[4]分析了多阵元发射天线的阵元分布、阵元光轴极角、阵元层间距、阵元数目等参数对室内光功率分布的影响. 但上述文献中提出的最优布局均是对于特定的房间模型而言,故而有很大的局限性,由此会大大限制 VLC 系统的应用推广. 因此,笔者提出了一种具有普适性的优化算法,该算法以 ASE(Area Spectral Efficiency,简称 ASE)最大作为优化准则. 在文献[5 - 6]中,ASE[7] 被推广为一种衡量绿色无线通信的标准;而且,ASE 在无线通信的设计和最优化等方面也提供了一个新的视角,ASE 优化准则还充分考虑了室内用户位置的不确定性,由此使得提出的优化算法更具有普适性.

1　光源布局优化方案

该优化问题是当房间中多个 LED 阵列共存时,求解 LED 阵列的最优位置.

LED 阵列布局参数如下:(x_c, y_c) 表示 LED 阵列左上角 LED 灯的坐标;d 表示 LED 阵列中相邻两个 LED 之间的距离;N_{led} 表示 LED 阵列中 LED 的个数;L 为在房间中的光照单元的个数;A_e 为 ASE 的期望值;$E[\cdot]$ 为期望算子.

该优化方案的优化变量:$x_{c1}, y_{c1}, x_{c2}, y_{c2}, \cdots, x_{cL}, y_{cL}$,优化准则:$\max E[A_e]$,约束条件:房间长度为 L,房间宽度为 W, $-L/2 < x_{c1}, x_{c2}, \cdots, x_{cL} < L/2$; $-W/2 < y_{c1}, y_{c2}, \cdots, y_{cL} < W/2$;$0 < d < \min(W, L)/N_{\mathrm{led}}$.

定义　一个矩阵 $\boldsymbol{H}$ 包含任意用户 k 和任意光照单元 l 之间的直射链路增益(Los)$g_{\mathrm{Los}}(l, k)$ 为

$$\boldsymbol{H}(l,k) = \begin{pmatrix} g_{\mathrm{Los}}(s_1, u_1) & \cdots & g_{\mathrm{Los}}(s_1, u_{K\mathrm{u}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{\mathrm{Los}}(s_L, u_1) & \cdots & g_{\mathrm{Los}}(s_L, u_{K\mathrm{u}}) \end{pmatrix}.$$

式中:$l = 1, \cdots, L$;$k = 1, \cdots, K_{\mathrm{u}}$,且 K_{u} 表示在房间里的用户数.

假设用户在房间中的位置是随机的,$X = (x, y)$,为了简单起见,在 $g_{\mathrm{Los}}(l, k)$ 和矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的表达中省略(x, y) 以及由其衍生的变量.

收稿日期:2015 - 06 - 30;**修订日期:**2015 - 08 - 22

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(15A510013)

作者简介:叶会英(1966—), 女,河南开封人,郑州大学教授,博士,主要从事光电测试技术及信号处理方面的研究, E-mail:iehyye@ zzu. edu. com.

$\gamma(u_k,l)$ 是用户 k 在光照单元 l 服务下信号和噪声干扰的比,即 SINR,其计算公式如下:

$$\gamma(u_k,l) = \frac{(SP_{\text{led}}\boldsymbol{H}(l,k))^2}{P_{\text{noise}} + (SP_{\text{led}}\sum_{l_1\neq l}^{L}\boldsymbol{H}(l_1,k))^2}. \quad (1)$$

式中:P_{led} 是单个 LED 的平均光功率;S 是硅光电二极管在蓝色区域的响应率;P_{noise} 是散弹噪声和白噪声的功率.

由光照单元 l 服务的用户 u_k 与光照单元 l 之间的信道容量为

$$C(u_k,l) = W_k\log_2(1+\gamma(u_k,l)). \quad (2)$$

式中:W_k 是光照单元 l 分配给用户 u_k 的带宽,其大小由光照单元 l 服务的总的用户个数决定.

$$l_k = \arg\max_{1\leqslant l\leqslant L}\boldsymbol{H}(l,k). \quad (3)$$

因此,由光照单元 l 服务的用户 u_k 的带宽 W_k 是由调制带宽除以由光照单元 l 服务的用户的个数,具体计算公式如(4)式:

$$W_k = \frac{W}{\sum_{k_1=1}^{K_u}[l_{k1} = l_k]}. \quad (4)$$

式中:W 是光照单元 l 的调制带宽;l_k、l_{k1} 由式(3)获得,其中方括号的定义如下[8]:

$$[P] = \begin{cases}1, \text{ if } P \text{ is true};\\ 0, \text{ otherwise}.\end{cases} \quad (5)$$

ASE 计算公式如下:

$$A_e = \frac{\sum_{k=1}^{K_u}W_k\log_2(1+\gamma(u_k))}{WA_\tau}. \quad (6)$$

式中:A_r 是房间的面积.

综上所述,可以得到该优化问题的目标函数如(7)式所示:

$$\begin{cases} f = \max\left(E_{Xn}\left[\frac{1}{WA_T}\sum_{k=1}^{K_u}W_k\cdot u\right]\right);\\ u = \log_2\left(1+\frac{(SP_{\text{led}}\max\boldsymbol{H}(l,k))^2}{P_{\text{noise}}+(SP_{\text{led}}\sum_{l_1\neq\arg\max_{1\leqslant l\leqslant L}H(l,k)}^{L}\boldsymbol{H}(l,k))^2}\right).\end{cases} \quad (7)$$

2　系统模型

笔者所构建的仿真实验系统参数如表 1 所示,在长 × 宽 × 高为 3 m × 6 m × 3 m 和 8 m × 8 m × 3 m 的典型空旷房间内,分别以 2 个和 4 个白光 LED 阵列作为照明与通信光源,研究了该典型房间内的 LED 阵列分布. 房间中的照明系统是采用 OSRAM Golden DRAGON 白光二极管设计. LED 阵列位于天花板下 0.5 m 处,每个 LED 阵列由 7 × 7 共计 49 只白光 LED 组成. 假设在接收端 FOV 为 45°,接收端设备置于高为 0.85 m 的实验台上,根据第 1 节所介绍的 LED 阵列优化配置算法,可以计算出 LED 的位置.

表 1　可见光通信系统参数

Tab. 1　visible light communication system parameters

LED 半功率角 $\phi_{1/2}$/(°)	平均发射光功率 P_{led}/mW	调制带宽 W/MHz	硅光电二极管响应率, S/(A · W^{-1})
60	189	20	0.28
噪声功率密度 N_0/(A · W^{-1})	接收角 β/(°)	探测器的物理积 A_d/cm^2	LED 最大光照度 I_0/cd
10^{-21}	45	1	28

假设 LED 阵列被放置在同一平面且服从朗伯辐射模型,根据欧洲照明标准阅读所需的最低光照度为 400 lx,这可以通过使用多个高发光强度(28cd)OSRAM 白光 LED 达到. 每个 LED 在数据表中推荐的偏置点(即 350 mA)处偏置且有 189 mW 的光输出功率. 当白光 LED 以照明为目的时,照度是其最重要的参数特征. 假设其服从朗伯辐射模式,那么其水平光照度可以按下式计算[9]:

$$E_h = I_0(\cos\varphi)^n\cos\theta/R^2. \quad (8)$$

式中:φ 是辐射角;θ 是入射角;R 是 LED 到照明表面的距离;I_0 是最大发光强度.

第 i 个 LED 与用户之间信道的直流增益为[10]

$$g_{\text{Los},i} \approx \frac{(n+1)A_d}{2\pi R_i^2}(\cos\varphi_i)^n\cos\theta_i\,\text{rect}(\theta_i/\beta). \quad (9)$$

式中:A_d 是探测器的物理面积;β 是接收角;朗伯系数 n 取决于 LED 的半功率角 $\phi_{1/2}$,$n = -1/\log_2(\cos\phi_{1/2})$,且

$$\text{rect}(x) = \begin{cases}1, \text{if } |x|\leqslant 1;\\ 0, \text{if } |x| > 1.\end{cases} \quad (10)$$

如果考虑在同一个房间内多个 VLC 的接入点,那么在接收机的 SINR 可以表示为

$$\gamma_{\text{VLC}} = \frac{(P_R S)^2}{(P_{\text{Int}}S)^2 + N_0 W}. \quad (11)$$

式中:P_R 为用户在接收端接收到的光功率. 对于一个平坦信道,用户接收到的光信号功率为服务用户的光照单元中所有 LED 对用户的输出功率总和.

$$P_R = \sum_i P_{\text{led}}g_{\text{Los},i} = P_{\text{led}}\sum_i g_{\text{Los},i}. \quad (12)$$

式中:$g_{\text{Los},i}$ 是第 i 个发射信号的 LED 和用户之间

的路径增益. 在用户处的光学干扰功率 P_{Int},是除了服务该用户的其他光照单元中所有 LED 对该用户的输出功率总和:

$$P_{Int} = \sum_{j} P_{led} g_{Los,j}. \tag{13}$$

3 算法验证

笔者提出的 LED 阵列优化配置问题是以房间内的平均面积谱效率最大为优化准则来求 LED 阵列左上角坐标以及 LED 阵列中相邻两个 LED 之间距离的最优值. 以长×宽×高为 3 m×6 m×3 m 和 8 m×8 m×3 m两个房间模型为例来验证该算法的可行性和普适性. 在 3 m×6 m×3 m 房间中,假设有两个 LED 阵列共存,那么,该优化问题有 5 个变量. 而在 8 m×8 m×3 m 房间中,假设有 4 个 LED 阵列共存,那么,该优化问题有 9 个变量. 由于目标函数是非凸函数,该优化问题可以通过计算机模拟,利用 MATLAB 优化工具箱来求解. 一般来说,利用最优化工具箱求解得到的解可能是局部最优,也可能是全局最优,但是无法保证求出的解是全局最优解. 所以,笔者先采用遗传算法工具箱求解出一个可能的全局最优解,再以得到的解为初始值,利用模式搜索在该解的附近继续搜索,看是否存在既满足约束条件又比解更优的解,通过遗传算法和模式搜索相结合来保证得到的解是全局最优解,在求解过程中采用以下两点来对得到解进行评估:①该算法求解的结果要符合不同的用户位置对于求解结果的初始估计;②在求解得到的结果附近继续搜索看是否存在满足目标函数和约束条件的且比得到结果更优的解.

利用遗传算法工具箱求解. ①编写该优化问题的目标函数;②启动遗传算法工具箱并在遗传算法工具箱中选择 ga 作为优化函数;③填写适应度函数、该优化问题的约束条件以及适应度函数的变量个数;④设定遗传算法运行所用的参数,本文中实验的参数设置如下,迭代次数:100,种群大小:20,适应度测量:排序尺度变换,选择函数:随机均匀分布函数,交叉函数:多点交叉函数,其他参数使用遗传算法工具箱内的默认值;⑤运行遗传算法工具箱. 笔者采用的遗传算法工具箱是英国谢菲尔大学开发的 GATBX 以及 GADS(Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox).

表 2 列出了由该优化算法求解出的 LED 阵列的坐标以及阵列中相邻 LED 之间的距离. 根据该结果得出的 3 m×6 m×3 m 房间 LED 阵列的示意图如图 1 所示.

表 2 3 m×6 m×3 m 房间遗传算法求解结果

Tab. 2 3 m×6 m×3 m room genetic algorithm results m

x_{c1}	y_{c1}	x_{c2}	y_{c2}	d
-0.942	1.091	-0.922	-0.893	0.004

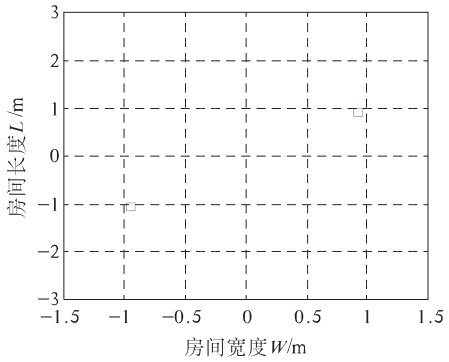


图 1 3 m×6 m×3 m 房间内 LED 阵列示意图

Fig. 1 3 m×6 m×3 m room LED array diagram

图 2 为图 1 LED 布局下的 3 m×6 m×3 m 房间内的光照度图. 从图 2 可以看出,在该布局下的光照度最高可以达到 450 lx,可以满足人们对于光照的要求,而且光照度分布较均匀.

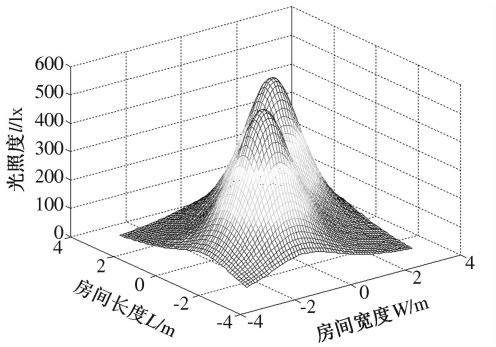


图 2 3 m×6 m×3 m 房间光照度图

Fig. 2 3 m×6 m×3 m room light illumination map

表 3 列出了由该优化算法求解出的 LED 阵列的坐标以及阵列中相邻 LED 之间的距离. 根据该结果得出的 8 m×8 m×3 m 房间 LED 阵列的示意图如图 3 所示.

图 4 为图 3 LED 布局下的 8 m×8 m×3 m 房间内的光照度图. 从图 4 可以看出,在该布局下的光照度最低可以达到 450 lx,最高可以达到 1 500 lx,可以满足人们对于光照的要求,而且在该布局下的光照度分较均匀,与之前研究中提出的优化原则相符.

表 3　8 m×8 m×3 m 房间遗传算法求解结果

Tab. 3　8 m×8 m×3 m room genetic algorithm results　　m

x_{c1}	y_{c1}	x_{c2}	y_{c2}	x_{c3}
-2.110	1.932	1.889	1.987	-2.330
y_{c3}	x_{c4}	y_{c4}	d	
-2.000	1.887	-1.990	0.003	

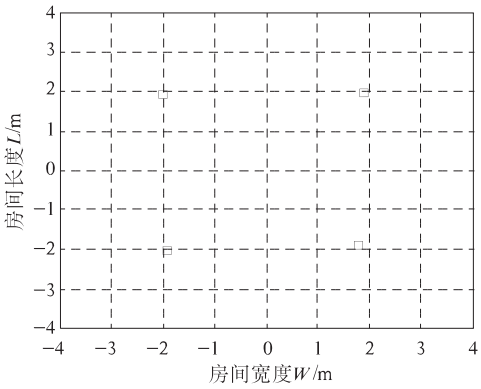


图 3　8 m×8 m×3 m 房间内 LED 阵列示意图

Fig. 3　8 m×8 m×3 m room LED array diagram map

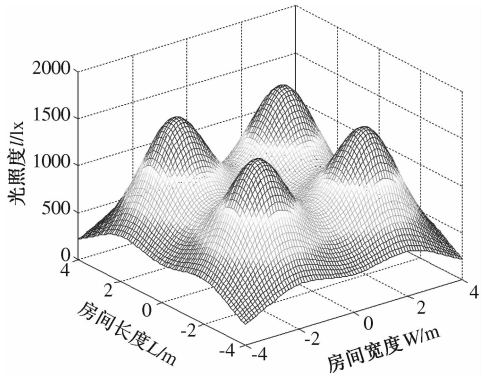


图 4　8 m×8 m×3 m 房间光照度图

Fig. 4　8 m×8 m×3 m room light illumination map

4　结束语

LED 阵列的布局是影响通信系统性能的一个重要因素,合理的 LED 阵列布局可以在无需透镜的情况下控制室内光功率的分布,改善光强度的起伏. 笔者提出了一种求解 LED 阵列布局的普适优化算法,运用该算法可以较精确地求出 LED 阵列的具体位置,得出的解不仅可以使得房间内的平均面积谱效率达到最大,而且得到的光照度分布均匀,这与之前研究中的布局优化原则相符. 并且,笔者提出的优化算法相比之前研究中提出的优化算法更具有普适性. 笔者通过对 3 m×6 m×3 m 和 8 m×8 m×3 m 2 个房间模型的仿真验证了该算法的可行性和普适性. 从单个仿真图可以看出,得到的布局不仅可以满足光照度要求,而且得到的光照度分布也较均匀,与之前研究中的优化原则相符,由此可证该算法的可行性. 从两个仿真图可以看出,对于不同维度的房间都适用,由此可证该算法的普适性.

参考文献:

[1] 丁德强,柯熙政,李建勋. VLC 系统的光源布局设计与仿真研究[J]. 光电工程,2007,34(1): 131-134.

[2] 杨森,于庆龙. 可见光通信中白光 LED 阵列光源的光功率分布研究[J]. 科技促进发展,2012,24(9): 115-120.

[3] 闫伟才. 基于室内 LED 光源的无线通信技术研究[D]. 太原:太原理工大学信息工程学院,2011.

[4] 丁德强,柯熙政,李建勋. 室内可见光通信多阵元发射天线优化设计[J]. 应用科学学报,2011,29(3): 238-242.

[5] STEFAN I, BURCHARDT H, HAAS H. Area spectral efficiency performance comparison between VLC and RF femtocell networks[C]//2013 IEEE International Conference on Communications(ICC). Budapest, Hungary: IEEE Press, 2013: 3825-3829.

[6] ZHANG Lei, YANG Hongchuan, MAZEN O H. Generalized area spectral efficiency: an effective performance metric for green wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 747-757.

[7] ALOUINI M S, GOLDSMITH A J. Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(4): 1047-1066.

[8] GRAHAM R L. Concrete mathematics: a foundation for computer science; dedicated to leonhard euler[M]. Noida: Pearson Education India, 1994: 1707-1783.

[9] GRUBOR J, RANDEL S, LANGER K D, et al. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting[J]. Journal of Lightwave technology, 2008, 26(24): 3883-3892.

[10] BARRY J, KAHN J, KRAUSE W, et al. Messerschmitt simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1993, 11(3): 367-379.

(下转第 60 页)

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0056 - 05

基于自适应模糊 C 均值聚类算法的电力负荷特性分类

赵国生[1], 牛贞贞[1], 刘永光[2], 孙超亮[2]

(1. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001; 2. 河南许继仪表有限公司,河南 许昌 461000)

摘　要: 针对传统模糊 C 均值聚类算法(FCM)存在的缺点,提出了一种自适应 FCM 算法,该算法以类内距离 MIA 和类间距离 MDC 两个聚类结果评价指标为基础,把 MDC 和 MIA 的比值 I 作为自适应函数来确定 FCM 算法的聚类数目 c;同时,根据模糊决策的方法,利用 FCM 算法的目标函数和划分熵来共同确定最优的模糊加权指数 m 的取值. 结果表明:该算法不仅能够克服 FCM 算法无法自动确定聚类数目和模糊加权指数需要凭经验给出的缺点,而且得到的聚类结果是最优的,通过算例分析也证明了该算法的正确性和有效性.

关键词: 负荷聚类;C 均值聚类算法;负荷特性;日负荷曲线

中图分类号: TP18　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.011

0　引言

基于电力用户的实际负荷曲线分类对电力需求侧管理[1]有着重要意义. 合理的电力负荷分类有助于供电部门有效地掌握用户的负荷特性并制定合理的电价政策[2];有助于通过削峰填谷手段实现负荷曲线的整形[3];有助于激励用户积极参与到需求侧管理项目中去. 同时,精细化的负荷分类对指导电网滚动规划、实时调度及运行规划的可靠性评估等方面也具有重要意义. 根据用电行业、电力负荷用电可靠性等级以及电价等进行分类的传统负荷分类方法已不能满足需求侧管理的需要,基于电力用户的实际负荷曲线分类的电力负荷特性分类方法受到越来越多的关注,成为当前负荷分类的主要方法.

目前,基于实际负荷曲线对负荷进行分类的方法有很多,常用的有 K-means 算法[4]、层次聚类算法[5]、模糊 C 均值聚类算法(FCM)[6]、高斯混合模型(GMM)算法[7]、自组织特征映射神经网络(SOM)算法[8]、支持向量机(SVM)算法[9]和极限学习机(ELM)算法[10]等. 这些方法中,FCM 算法在运行时间、准确度、稳定性及聚类效果等方面均表现较好,是目前应用最广泛的电力负荷特性分类算法之一. 但是,FCM 算法也存在着需要人为确定聚类数目 c 以及模糊加权指数 m 取值需要凭经验给定等问题. 针对 FCM 算法存在的缺点,笔者以聚类有效性判别指标[11] MIA 和 MDC 为基础来自动确定 FCM 算法的聚类数目,并通过模糊决策的方法来确定最优的 m 取值,以达到最优的聚类结果.

1　传统 FCM 聚类算法

1.1　传统 FCM 聚类算法

FCM 算法是一种以隶属度来确定每个数据点属于某个聚类程度的算法,该算法是传统硬聚类(HCM)算法的一种改进. FCM 把数据集 $\boldsymbol{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]$ 分为 c 个模糊组,并求每组的聚类中心,它的模糊划分可用矩阵 $\boldsymbol{U} = [u_{ij}]$ 表示,其中矩阵 $\boldsymbol{U}$ 的元素 u_{ij} 表示第 $j(j = 1,2,\cdots,n)$ 个数据点属于第 $i(i = 1,2,\cdots,c)$ 类的隶属度. u_{ij} 满足以下条件:

$$\begin{cases} \forall j,\ \sum_{i=1}^{c} u_{ij} = 1; \\ \forall i, j,\ u_{ij} \in [0,1]; \\ \forall i,\ \sum_{j=1}^{n} u_{ij} > 0. \end{cases} \tag{1}$$

FCM 的目标函数是各点的隶属度和该点与聚类中心的欧氏距离的乘积之和,FCM 算法就是

收稿日期: 2015 - 06 - 10;**修订日期:** 2015 - 07 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307152)

作者简介: 赵国生(1965—),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事电能质量方面的研究,E-mail:zgs410@zzu.edu.cn.

求使聚类目标函数最小化的划分矩阵 $\boldsymbol{U}$ 和聚类中心矩阵 $\boldsymbol{C}$. 即

$$\min \boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C}) = \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ij}^m d_{ij}^2(x_j,c_i). \quad (2)$$

$$d_{ij}(x_j,c_i) = \|x_j - c_i\|. \quad (3)$$

式中:n 是样本数据集的个数;c 是聚类中心数;m 为模糊加权指数;d_{ij} 表示样本点和聚类中心之间的欧氏距离.

使得公式(2) 达到最小值的两个必要条件为

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m}. \quad (4)$$

$$u_{ij} = \left\{\sum_{k=1}^{c}\left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}}\right)^{2/(m-1)}\right\}^{-1}. \quad (5)$$

1.2　FCM 聚类算法的实现

FCM 算法就是反复更新聚类中心矩阵 $\boldsymbol{C}$ 和隶属矩阵 $\boldsymbol{U}$ 进行迭代的过程,具体步骤如下.

step1:给定聚类数目 c、模糊加权指数 m 和迭代停止阈值 ε 的值,令 $k = 0$,初始化隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}^{(0)}$ 和聚类中心矩阵 $\boldsymbol{C}^{(0)}$.

step2:根据公式(6) 计算更新 $\boldsymbol{U}^{(k)}$.

$\forall i,j$,若 $d_{ij}^{(k)} > 0$,则

$$u_{ij}^{(k)} = \left\{\sum_{r=1}^{c}\left(\frac{d_{ij}^{(k)}}{d_{rj}^{(k)}}\right)^{2/(m-1)}\right\}^{-1}. \quad (6)$$

若 $d_{ij}^{(k)} = 0$,则 $u_{ij}^{(k)} = 1$ 且 $j \neq k$,$u_{ij}^{(k)} = 0$.

step3:根据公式(7) 计算更新 $\boldsymbol{C}^{(k+1)}$.

$$c_i^{(k+1)} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (u_{ij}^{(k)})^m x_j}{\sum_{j=1}^{n} (u_{ij}^{(k)})^m}. \quad (7)$$

step4:根据公式(2) 计算目标函数,如果 $\|\boldsymbol{C}^{(k)} - \boldsymbol{C}^{(k+1)}\| < \varepsilon$,则停止迭代,输出聚类结果;否则,$k = k + 1$,返回 step2.

1.3　FCM 聚类算法存在的问题

①FCM 算法不能自动确定聚类数目 c,需要人工输入一个聚类数目初始值;②FCM 算法的模糊加权指数 m 的取值需要人为给出,不同的参数 m 代表不同的模糊度划分,m 取值的大小直接影响着 FCM 算法中目标函数的收敛性.

2　自适应 FCM 聚类算法

2.1　聚类数目 c 的确定方法

FCM 聚类算法的聚类数目不能自动确定,需要人为输入. 为了克服这一缺点,笔者以类内距离 MIA 和类间距离 MDC 两个聚类效果评价指标为基础,引入聚类数目 c 的自适应函数 $I(c)$ 来确定 FCM 算法的聚类数目. 理想的负荷分类结果应该是同类负荷曲线间距离最小,不同类负荷曲线间距离最大. 类内距离 MIA 和类间距离 MDC 的定义如下:

假设聚类结果得到 c 个负荷分类,C_k 表示第 k 类负荷曲线中所包含的负荷曲线集合;nt_k 表示该集合中的所有负荷曲线;n_k 表示第 k 类负荷曲线中包含的单位数目;CT_k 表示第 k 类负荷曲线的聚类中心,其中 $k = 1,2,\cdots,c$.

类内距离 MIA 表示各聚类中心和其对应聚类中所有负荷曲线数据的距离平均值,定义如下:

$$\mathrm{MIA}(c) = \sqrt{\frac{1}{c}\sum_{k=1}^{c} d^2(CT_k,C_k)}. \quad (8)$$

其中,

$$d(CT_k,C_k) = \sqrt{\frac{1}{n_k}\sum_{n=1}^{n_k} d^2(CT_k,nt_k^n)}. \quad (9)$$

类间距离 MDC 表示不同类的聚类中心负荷曲线间距离的平均值,定义如下:

$$\mathrm{MDC}(c) = \mathrm{mean}(d(CT_k,CT_k)). \quad (10)$$

式中:mean 为求平均值的函数.

定义类间距离 MDC 与类间距离 MIA 的比值 I 为

$$I(c) = \mathrm{MDC}(c)/\mathrm{MIA}(c). \quad (11)$$

由于 MIA(c) 表示类内距离;MDC(c) 表示类间距离;类间距离与类内距离的比值 $I(c)$ 越大表明聚类效果越好,即 $I(c)$ 取得最大值时对应的 c 为最佳聚类数目.

2.2　模糊加权指数 m 的确定

FCM 聚类算法与传统的硬聚类算法的区别就在于引入了模糊加权指数 m,而参数 m 取值的大小是根据经验确定的. 不同的 m 值对 FCM 算法的分类结果有着很大的影响. m 的值越大,聚类结果越模糊,所得到的 FCM 分类结果中每类之间的区别越不明显. 也就是说,m 的取值影响着 FCM 算法的聚类效果. m 的取值区间为[1, + ∞],在不做特殊要求的时候,m 的值取 2. Pal 等人从聚类有效性方面入手,通过实验得出 m 的最优选择区间为[1.5,2.5].

选取 m 的最优取值是为了 FCM 聚类算法能够得出合理有效的聚类结果,所以,笔者以 FCM 算法的目标函数为基础,引入 m 的自适应函数. 根

据文献[12]中的划分熵 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 和 FCM 算法的目标函数 $\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 共同约束来求得最优的 m. 其中 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 定义如下:

$$\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C}) = -\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ij}\cdot \ln u_{ij}. \quad (12)$$

其中,当 $u_{ij}=0$ 时,$u_{ij}\cdot\ln u_{ij}=0$;$\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 越大,聚类越模糊. 模糊加权指数 m 的最佳值为 m^*,表示如下:

$$m^* = \arg_{\forall m}\begin{cases}\min(\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*));\\ \text{s.t. } \boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*)\to\min.\end{cases} \quad (13)$$

将 m^* 确定转化为一个带约束的非线性规划问题,用模糊决策的方法来确定 m^* 的值,则 $\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 和 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 分别定义成如下形式:

$$\mu_G(m) = \exp\left(-\alpha\cdot\frac{\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*)}{\max\limits_{\forall m}(\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*))}\right). \quad (14)$$

$$\mu_C(m) = \frac{1}{1+\beta\left(\dfrac{\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*)}{\max\limits_{\forall m}(\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*))}\right)}. \quad (15)$$

其中:参数 $\alpha>1$,一般 $\alpha=1.5$;β 为较大的正常数,一般 $\beta=10$. 根据式(14)、(15),利用模糊决策的方法可以得到 m^*.

$$m^* = \arg_{\forall m}(\max(\min(\mu_G(m),\mu_C(m)))). \quad (16)$$

即以较大的隶属度来通过同时极小化 $\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{C})$ 和 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U},C)$,由此得到的聚类结果不但分类清晰,而且类内的元素相似性也比较大.

2.3 自适应 FCM 聚类算法的实现

笔者所提出的自适应 FCM 算法是通过模糊决策的方法自动确定模糊加权指数 m 的值,并通过类间距离与类内距离的比值形成的自适应函数 $I(c)$ 来自动确定聚类数目. 自适应 FCM 算法流程图如图 1 所示. 自适应 FCM 聚类算法的具体实现步骤如下.

step1:输入初始聚类数目 $c=2$,$I(0)=0$.

step2:给定 $m=1.1$.

step3:由 1.2 中的 FCM(m,c) 进行聚类,求出目标函数 $\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*)$ 和划分熵 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U}^*,\boldsymbol{C}^*)$.

step4:判断模糊加权指数 m 的大小,如果 $m<2.5$,则 $m=m+0.1$ 返回 step3.

step5:根据公式(12),利用模糊决策的方法得到最优的模糊加权指数的 m_c^*.

step6:由 1.2 中的 FCM(m_c^*,c) 进行聚类,求出 $I(c)$.

step7:当 $2<c<n$ 时,如果 $I(c-1)>I(c-2)$ 且 $I(c-1)>I(c)$,则聚类过程结束;否则 $c=c+1$,返回 step2.

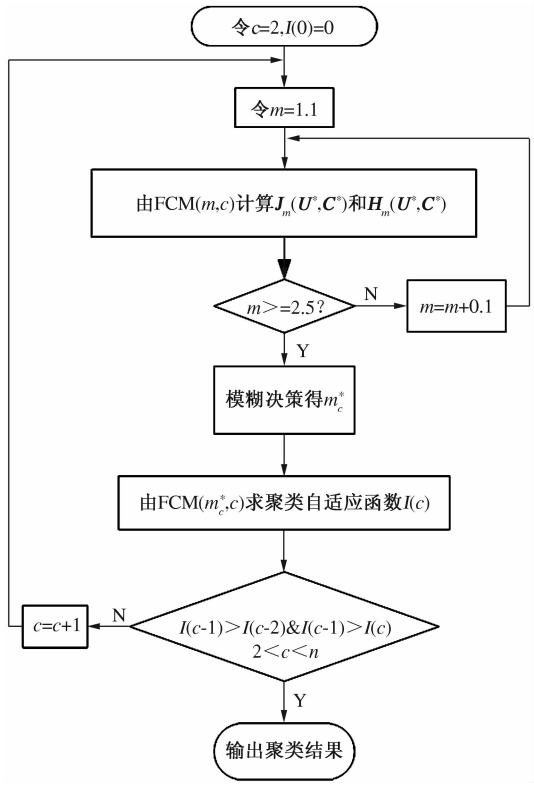


图 1 自适应 FCM 算法流程图

Fig. 1 The flow chart of adaptive FCM algorithm

3 算例分析

3.1 日负荷曲线数据的选取和预处理

算例所采用的数据为北方某省电力公司的用电信息采集系统所采集到的包括商业楼宇、公共机构、高耗电行业等不同行业的 98 个电力用户的 96 点典型日负荷曲线. 为了降低其他因素的影响,笔者采用连续多个工作日的 96 点日负荷曲线数据取平均值的方法来获取典型的日负荷曲线数据.

现取连续一个月的 96 点日负荷曲线数据来获取该类负荷的典型日负荷曲线,则该负荷的典型日负荷曲线为一个月日负荷曲线数据的平均值. 第 i 条负荷曲线的典型负荷曲线表示为 $x_i=[x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{i96}]$,由于不同类型的负荷数据变化很大,不便于进行数据比较,为去除负荷数量级对聚类分析的影响,在进行聚类分析之前已经对电力用户的典型日负荷曲线数据进行归一化处理,这里采用极值序列归一化,即

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max[x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{i96}]}. \quad (16)$$

归一化之后所有的数值都在[0,1],式中

$\max[x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{i96}]$ 为第 i 条典型日负荷曲线数据 x_i 中数据点的最大值.

3.2　自适应 FCM 聚类算法分类结果

根据算例所使用的典型日负荷曲线数据,对其进行极值序列归一化处理后,得到归一化的 98 条典型日负荷曲线数据. 按照第 2 节中的自适应 FCM 聚类算法对 98 条负荷曲线进行分类. 当聚类数目 $c=8$ 且最优模糊加权指数 $m_c^*=1.9$ 时算法停止,最终的聚类结果如图 2 所示.

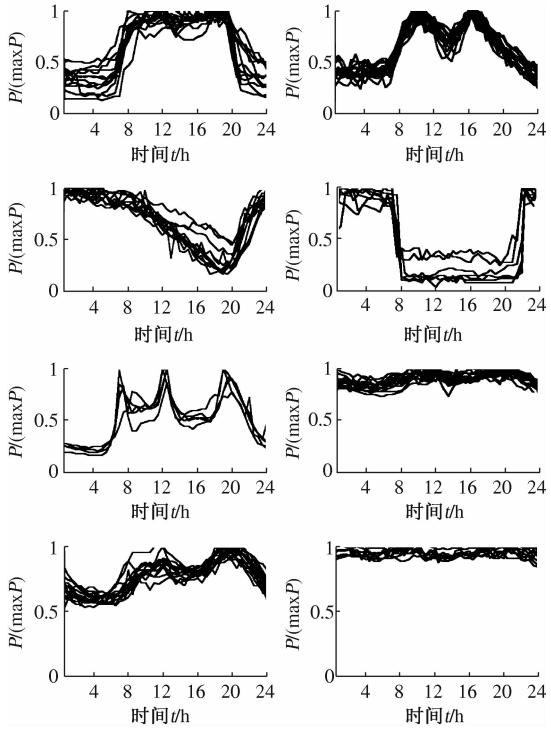


图 2　自适应 FCM 算法分类结果

Fig. 2　The classification result of adaptive FCM algorithm

由图 2 的最终分类结果可以看出,该分类结果中每个分类能明显地代表一类典型负荷的负荷特征,分类结果比较理想. 与传统的 FCM 算法相比,笔者所用自适应 FCM 算法的聚类数目 c 的确定,是根据聚类有效性指标的类间距离与类内聚类的比值来确定的;而模糊加权指数 m 值是以 FCM 算法的目标函数为基础,利用模糊决策的方法确定的. 该算法克服了传统 FCM 算法的不足,并且优于那些单纯确定聚类数目 c 的自适应 FCM 算法.

文献[8]是将 SOM 算法与 FCM 算法相结合,利用 SOM 算法得到聚类数目和初始聚类中心,并作为 FCM 算法的初始输入,以克服 FCM 算法存在的缺点,即相当于进行了两次聚类,实现起来比较复杂,且聚类结果的优劣仍需要进行衡量. 与文献[8]相比,笔者所采用的自适应 FCM 算法,是基于聚类结果的评价指标确定自适应函数以确定聚类数目 c,且以 FCM 算法的目标函数为基础来确定模糊加权指数 m,均是以聚类结果最优为基础对 FCM 算法本身进行的改进,此方法不仅克服了 FCM 算法存在的缺点,且得到的聚类结果是最优的,实现起来也比较简单.

4　结论

针对 FCM 聚类算法存在需要人为确定聚类数目的缺点,笔者通过计算聚类算法中的有效性判别指标 MDC(c)和 MIA(c)的比值 $I(c)$,选取 $I(c)$ 取得最大值时所对应的聚类数目 c 为最优的聚类数目,并且通过模糊决策的方法来优选模糊加权指数 m,以 FCM 算法的目标函数 $\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U}^*, \boldsymbol{C}^*)$ 为模糊决策方法的目标函数和划分熵 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U}^*, \boldsymbol{C}^*)$ 为模糊决策方法的约束条件,以较大的隶属度来通过同时极小化 $\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{U}, \boldsymbol{C})$ 和 $\boldsymbol{H}_m(\boldsymbol{U}, \boldsymbol{C})$ 以求得最优的 m. 通过算例分析可知,该算法不仅克服了 FCM 算法存在的缺点,而且所得到的聚类结果能够分别代表一类典型负荷的负荷特性.

参考文献:

[1]　王冬利. 电力需求侧管理实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2005:7 - 14.

[2]　黄永皓,康重庆,夏清,等. 用户分类电价决策方法的研究[J]. 中国电力,2004,37(1):24 - 28.

[3]　徐明. 基于负荷特性分析的错峰方案研究[D]. 广州:华南理工大学电力学院,2012:17 - 19.

[4]　楼佳,王小华. 一种分列式的 k - means 聚类算法[J]. 杭州电子科技大学学报,2009,29(4):54 - 57.

[5]　郭晓娟,刘晓霞,李晓玲. 层次聚类算法的改进及分析[J]. 计算机应用与软件,2008,25(6):243 - 246.

[6]　周开乐,杨善林. 基于改进模糊 C 均值算法的电力负荷特性分类[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(22):58 - 62.

[7]　岳佳,王士同. 高斯混合模型聚类中 EM 算法及初始化的研究[J]. 微计算机信息,2006,11(22):244 - 247.

[8]　王文生,王进,王科文. SOM 神经网络和 C - 均值法在负荷分类中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(4):36 - 39.

[9]　冯晓蒲. 基于实际负荷曲线的电力用户分类技术研究[D]. 保定:华北电力大学电气与电子工程学院,2011:22 - 27.

[10]　NAGI J, YAP K S, TIONG S K, et al. Nontechnical loss

detection for metered customers in power utility using support vector machines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1162 – 1171.

[11] CHICCO G, NAPOLI R, PETAL P. Customer characterization options for improving the tariff offer [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 381 – 387.

[12] BEZDEK J C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms [M]. NewYork: Plenum Press, 1981: 100 – 136.

Power Load Characteristic Classification Technology Research Based on an Optimal Fuzzy C-means Clustering Algorithm

ZHAO Guosheng[1], NIU Zhenzhen[1], LIU Yongguang[2], SUN Chaoliang[2]

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Xu Ji Instrument Co. Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: In view of the disadvantages of the traditional Fuzzy C-means clustering algorithm, the author proposes an adaptive FCM algorithm. This algorithm is based on two clustering results evaluation index of within the class distance MIA and between the class distance MDC. The ratio of MDC and MIA, defined as I, is an adaptive function to determine the clustering number c of FCM algorithm. At the same time, according to the fuzzy decision method, we use the objective function and partition entropy of FCM algorithm together to determine the value of optimal fuzzy weighted m. This algorithm not only overcomes the FCM algorithm disadvantage of not being able to determine the clustering number automatically and fuzzy weighted index needs to be given by experience, but also the clustering result is optimal. Finally, the correctness and effectiveness of the algorithm were proved through example analysis.

Key words: load clustering; FCM; load characteristic; daily load curve

(上接第 55 页)

Study on Optimal Allocation Algorithm of the Visible Light Communication LED Array

YE Huiying, WANG Li, LIU Jinliang

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

Abstract: In view of the limitation of the visible light communication light source layout optimization, this paper presents a universal optimization layout of light source. The simulation results show that, using the light source layout of the algorithm, not only can make the average area of the room reaches the maximum spectral efficiency, and uniform distribution of illumination. Illuminance level is between 400 lx and 1500 lx which can meet the demand for lighting. Therefore, this algorithm can be used as an optimization algorithm for the layout of the universal light source.

Key words: visible light communication; LED array layout; optimization algorithm; universal

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0061 - 05

质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展

CRISALLE Oscar Dardo, 韩　闯, 吴莉莉, 支长义

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 针对质子交换膜燃料电池的建模与控制问题,概述了基于极化曲线和参数维度的经验模型和机理模型,分析了基于电化学反应、温度、压力等因素的电化学稳态模型和动态模型,介绍了基于神经网络辨识、群集智能算法和支持向量机等的智能方法模型,对质子交换膜燃料电池的现有智能控制策略进行了总结,最后指出:利用群集智能算法同时优化质子交换膜燃料电池的模型参数和环境参数将是建模的一个发展方向,预测广义 Hamilton 理论等也可被尝试用于质子交换膜燃料电池建模的研究中,同时融合新算法的智能控制策略将成为质子交换膜燃料电池控制的研究趋势.

关键词: 质子交换膜燃料电池;建模;智能控制

中图分类号: TP29; TM911.4　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.012

0　引言

近年来,新的清洁能源逐渐引起人们的重视. 质子交换膜燃料电池因工作温度低、启动快、结构简单、无污染等优点,被尝试应用于混合动力汽车、可移动动力设备、混合能源系统和分布式发电系统中,应用前景广阔,研究意义重大[1]. 笔者主要探究质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)在建模和控制方面的研究进展,介绍了 PEMFC 的基本原理、组成结构和相关特性;综述了 PEMFC 建模和控制策略,包含经验模型、机理模型、稳态模型、动态模型和智能方法模型以及智能控制和组合控制策略;分析了各种思路、方法和技术的特点,展望了 PEMFC 建模与控制的研究趋势和发展方向.

1　PEMFC 简介

PEMFC 由质子交换膜、电极、电催化剂、双极板、流场通道等构件组成. PEMFC 具有阴极和阳极两个电极,分别为氧化剂和燃料的临时寄存场所,氢气由燃料电池的阳极流道进入,在催化剂作用下发生反应,生成氢离子和电子,氢离子经由质子交换膜到达阴极,电子经过外电路流向阴极,然后和阴极的氧气和氢离子发生反应生成水. 电极反应方程式如下[2]:

阳极　$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$.　(1)

阴极　$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$.　(2)

总反应　$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ + 电能 + 热量.　(3)

温度和反应气体的压力是影响 PEMFC 性能的最主要因素. 正是由于温度和压力对电池性能影响较大,PEMFC 的建模方法才扩展至考虑温度影响的热模型和考虑阴极阳极压力的动态模型;同时,反应气体的湿度、燃料利用率、电流密度等对 PEMFC 的性能也有一定影响.

2　PEMFC 模型

2.1　经验模型

对于 PEMFC 的建模,最早是从基于电池电压和电流密度极化曲线的 PEMFC 经验模型研究开始的. 刘鹤[2]在前人关于中小电流密度和大电流密度极化曲线的基础上对 PEMFC 的经验模型做了改进,并用 SIMULINK 仿真验证了改进的经验模型能够较好地反应 PEMFC 电流密度和电压的关系. 而经验模型是基于电池电压和电流密度极化曲线建立的,未对燃料电池内部的具体参数进行分析,所以经验模型不适合具体分析燃料电

收稿日期: 2015 - 05 - 30;**修订日期:** 2015 - 08 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473266)

作者简介: CRISALLE Oscar Dardo(1958—),男,美国盖恩斯维尔人,郑州大学特聘教授,博士,博士生导师,主要从事燃料电池的设计与优化运行等研究.

通信作者: 韩闯(1991—),男,河南驻马店人,郑州大学硕士研究生,E-mail:zdhhan@126.com.

池的模型.

2.2 机理模型

为了反映PEMFC的内部特性、传递现象,研究者提出基于空间维数变量划分的一维、二维、三维分布参数机理模型.

一维数学模型结构简单、建模方便,但由于维数限制只能模拟简单的电池结构,因此,不能揭示PEMFC内部结构本质.其中,Kulikovsky[3]考虑水热和蒸汽传输等物理化学过程建立了一维稳态模型.二维模型则在一维模型的基础上考虑电池内部的水热管理问题.基于此模型考虑不同的条件对电池性能的影响,Lei等[4]和Chaudhary等[5]建立了PEMFC的二维模型,探究基于此模型膜的含水量和温度对电池性能的影响.之后,随着大规模燃料电池的逐渐使用,研究者开始关注以气体流道和流体分布为基础的PEMFC三维模型.郭玉宝等[6]提出了PEMFC的三维稳态数值模型,主要是基于其物理模型和控制方程来探究不同的扩散层孔隙率对其出口处含水量、电流密度、气体浓度等的影响.

2.3 电化学稳态模型

电化学稳态模型是PEMFC建模中最常见的模型,常用于探究电流密度、阴极阳极压力、温度、膜的含水量等对输出电压稳态性能的影响.模型是基于电化学理论计算出总电压和每部分的过电压建立的,公式为[7-8]

$$V_{\mathrm{cell}} = E_{\mathrm{nernst}} - \eta_{\mathrm{act}} - \eta_{\mathrm{ohm}} - \eta_{\mathrm{con}}. \tag{4}$$

式中:E_{nernst}为能斯特电动势;η_{act}是活化过电压;η_{ohm}是欧姆过电压;η_{con}是浓差过电压.

Bizon等[7]、Zhan等[8]都建立了含PEMFC的混合能源系统模型,其中PEMFC的稳态模型是基于公式(4)建立,并对系统的能量管理进行了控制,燃料电池因自身特性常被应用于混合能源发电或分布式能源发电.电化学稳态模型是PEMFC最常用的建模方法之一,其建模方法简单且易于对燃料电池进行性能分析.但在实际的反应过程中,燃料电池内部的环境温度、阴极阳极气体流量和负载等都是动态变化的,所以有必要进一步探究其动态模型.

2.4 动态模型

根据PEMFC的性能影响因素可知,温度和反应气体压力的变化对于PEMFC的性能有较大的影响;所以,建立基于阳极、阴极气体流道压力和基于温度的热模型对研究PEMFC的动态性能具有重要的意义.

2.4.1 电化学动态模型

上述研究中电化学稳态模型并未考虑燃料电池状态变化的过程性,而实际反应过程中外电路负载或系统输入发生变化时,PEMFC的两极分别聚集通过薄膜流入的氢离子和未通过薄膜暂时不能通过外电路的电子,就形成了双层电荷效应,这种特性和电容十分类似.基于这个过程建立电化学动态模型的特性方程为[9]

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{act}}}{\mathrm{d}t} = \frac{i}{c} - \frac{V_{\mathrm{act}}}{R_{\mathrm{act}}C}. \tag{5}$$

式中:R_{act}为活化电阻.

贺建军等[9]分析了PEMFC中电化学反应中的活化极化过电压、欧姆极化过电压、浓度极化过电压和双层电荷作用,建立了输入为阴极阳极的流量和温度、输出为电压的动态模型,用仿真结果和实际结果进行对比.结果表明:该模型更好地描述了电池内部的反应过程,建模效果更好,具有较好的使用价值,为进一步研究PEMFC控制器设计、分布式发电、混合能源等问题奠定了基础.

2.4.2 阳极、阴极气体流道模型

根据理想气体状态方程和质量守恒定律,对PEMFC的阳极气体氢气和阴极气体氧气列出对应方程分别为[10]

$$\frac{V_{\mathrm{H_2}}}{RT} \cdot \frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{H_2}}}{\mathrm{d}t} = q_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{in}} - q_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{out}} - q_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{r}}. \tag{6}$$

$$\frac{V_{\mathrm{O_2}}}{RT} \cdot \frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{O_2}}}{\mathrm{d}t} = q_{\mathrm{O_2}}^{\mathrm{in}} - q_{\mathrm{O_2}}^{\mathrm{out}} - q_{\mathrm{O_2}}^{\mathrm{r}}. \tag{7}$$

式中:$P_{\mathrm{H_2}}$和$P_{\mathrm{O_2}}$分别代表氢气和氧气的压力;$q_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{in}}$和$q_{\mathrm{O_2}}^{\mathrm{in}}$分别代表氢气和氧气的输入流量;$q_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{out}}$和$q_{\mathrm{O_2}}^{\mathrm{out}}$分别代表氢气和氧气的输出流量;$q_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{r}}$和$q_{\mathrm{O_2}}^{\mathrm{r}}$分别代表氢气和氧气反应消耗的气体流量.

在PEMFC反应内部,阳极和阴极的气体流量与压力总是动态变化的,通过建立气体流道模型可以更好地反应PEMFC内部气体的流动行为.Yang等[10]详细分析了PEMFC的动态模型,分别计算了阴极阳极的输入输出以及反应消耗的流量,并用MATLAB进行了仿真,最后探究了含PEMFC并网系统的低电压和故障穿越问题.

2.4.3 热模型

温度是影响PEMFC性能的重要参数,过高的温度可能熔化或者烧坏质子交换膜;同样,温度过低化学反应速度变慢,催化剂效率变低,扩散层效率降低.所以,基于温度建立热模型对于保持PEMFC工作在最优状态十分重要.根据能量守恒定律可得[11]

$$W_{tot} = W_{elec} - W_{stack} - W_{loss} - W_{cool} . \quad (8)$$

式中:W_{tot}是 PEMFC 释放的总能量;W_{elec}是输出的电能;W_{stack}是存储在电池内部的能量;W_{loss}是散失在空气中的能量;W_{cool}是冷却系统吸收的能量.

基于温度的角度建立 PEMFC 的热模型在整个 PEMFC 的建模中较为常见,建模的依据是能量守恒定律,实时动态更新系统的温度传递给相关的其他 PEMFC 系统子模型,实现在线实时动态调整,提高了系统建模的可靠性. 郭爱等[11]用 PEMFC 为机车提供动力源,建立了燃料电池机车温度系统的动态模型,考虑了散热器风量和管路压力,利用热力学第一定律,建立了温度系统状态方程.

2.5　智能方法模型

随着智能控制理论的发展,智能方法逐渐被应用到 PEMFC 的建模中. 基于神经网络、智能优化算法、支持向量机等策略的 PEMFC 模型较好地描述了 PEMFC 各变量之间的关系,且模型中的未知参数易于辨识.

神经网络模型被称为黑箱模型,将其应用于燃料电池的建模中能够精确描述 PEMFC 各变量之间的复杂关系,易于实施控制算法. Puranik 等[12]建立了基于二层递归神经网络的 PEMFC 模型,其中输入为温度、电流、阴极阳极压力,输出为电压,并进一步研究了这种模型下燃料电池的稳态性能、暂态性能和基于噪声的鲁棒性. 李大字等[13]提出了一种新的引导型粒子群算法,并将其应用到 PEMFC 的建模中,比较了混合神经网络算法、级联相关神经网络算法、级联相关 - 引导型粒子群算法的预测误差和相对误差,发现混合神经网络误差最小,对 PEMFC 输出电压的预测最精确.

智能优化算法的应用越来越广泛,使用智能优化算法可以优化 PEMFC 中的模型参数和环境参数等,基于此可以建立更加精准的 PEMFC 模型. Cheng 等[14]、Zhang 等[15]分别使用自适应差分进化算法和 RNA 遗传算法对 PEMFC 模型中的模型参数进行了优化,结果表明两种算法均提高了 PEMFC 建模的准确性.

基于统计学习理论的支持向量机方法具有训练时间短、全局优化性能好、适应性强等优点,也被广泛应用于 PEMFC 的建模中. Li 等[16]利用改进的粒子群算法优化支持向量机模型,结果表明:优化后的 PEMFC 模型表现出更好的动态性能.

3　PEMFC 控制策略

PEMFC 的控制策略包含传统控制、智能控制、组合控制等,被控变量包含气体流量、压力、温度、输出电压、输出功率、效率等. 由于 PEMFC 是非线性、时变、多输入多输出的复杂控制对象,传统 PID 控制不能很好地解决复杂控制对象的控制问题,所以智能控制策略被逐渐广泛应用.

3.1　PEMFC 的预测控制

PEMFC 预测控制是根据电池模型的历史信息和未来输入来预测未来输出,通过反馈校正调整预测模型和控制器的参数达到提高系统稳态性能和动态性能的控制目标,预测控制的实时跟踪保证了其控制的精准性. 于亚笛等[17]将广义预测控制(GPC)应用于基于模糊神经网络辨识的 PEMFC 模型中,并与其他控制策略比较. 结果表明:预测控制在跟踪负荷上优于其他控制器,但预测控制的快速性和鲁棒性相对较差.

3.2　PEMFC 的模糊控制

PEMFC 模糊控制是在燃料电池模糊模型的基础上,通过建立模糊规则库并设计模糊控制器实现模糊推理来完成的,模糊控制整体表现出较好的控制效果,但模糊化主要靠经验获得具有不确定性,且稳态精度不高. Fan 等[18]将自适应模糊控制器应用于 PEMFC 的动态模型中,利用双模糊控制器来稳定负载变化,自适应模糊控制器反应迅速,表现出较强的鲁棒性.

3.3　PEMFC 的神经网络控制

PEMFC 神经网络控制通过选择合适的结构和算法,经过训练和学习使被控系统达到所要求的稳态和动态性能,且有较强的自学习能力. 鉴于 PEMFC 模型的非线性和不确定性,越来越多的学者利用神经网络控制燃料电池. 杨忠君等[19]研究了基于 PEMFC 数学模型的神经网络控制器设计问题,通过调节输入气体的流量控制 PEMFC 输出功率的稳定. 仿真结果表明:对于负载的突变,神经网络控制器能够平滑过渡到恒定功率,表现出较强的学习能力和鲁棒性.

3.4　PEMFC 的组合控制

组合控制是指将传统控制和智能控制中的模糊控制、神经网络控制等相互结合形成的具有更强控制功能的新策略,也可以是智能控制方法之间的结合.

3.4.1　PEMFC 的模糊 PID 控制

PEMFC 的模糊 PID 控制是利用模糊控制策

略整定燃料电池 PID 控制器的比例系数、积分时间常数和微分时间常数,来获得最佳的 PID 控制效果,这种控制策略在提高系统的实时性、稳态性能等方面优于传统 PID 控制,适用于 PEMFC 这种复杂非线性系统的控制. Marzooghi 等[20]设计了含有功率转换装置的 PEMFC 模糊 PI 控制系统和固体氧化物燃料电池的模糊 PI 控制系统来减弱输出功率的波动,并与传统 PI 控制器进行对比,结果表明:模糊 PI 控制器表现出更好的动态性能.

3.4.2 PEMFC 的神经网络 PID 控制

PEMFC 的神经网络 PID 控制是利用神经网络的学习方法自动在线调节电池的 PID 控制器参数,相比传统的 PID 控制,大大提高了系统的可靠性. 卫国爱等[21]使用 RBF 神经网络来整定 PID 控制器参数,同时对 PEMFC 的压力进行控制. 结果表明:基于 RBF 神经网络的 PID 控制器响应时间快,具有更好的动态性能.

3.4.3 PEMFC 的模糊神经网络控制

PEMFC 的模糊神经网络控制采用神经网络对模糊规则和隶属度函数进行调整,通过反复调整达到更优的控制目标. 模糊神经网络同时兼有神经网络和模糊控制逻辑的优点,特别适用于 PEMFC 这种时变性、大滞后、不确定的对象. 吴昆[22]利用模糊神经网络控制系统实现对 PEMFC 温度的控制,结果表明:该控制系统具有良好的鲁棒性、动态特性和抗干扰能力.

4 总结与展望

PEMFC 的建模从最初的基于经验模型逐渐发展为基于参数维度的一维、二维、三维模型;而后,又从电化学反应的角度建立了稳态模型和基于温度压力的动态模型;最后,随着智能算法的普遍应用,基于智能方法的模型被广泛应用于燃料电池的研究中. 从发展趋势的角度看,由于 PEMFC 模型的温度、压力等内部因素的实时变化,动态模型更能反映其内部特点. 在对模型内部不确定参数进行辨识时,群集智能优化算法具有显著的效果,如采用群集智能算法优化 PEMFC 相关的模型参数和环境参数,建立更加精确的模型. 考虑到 PEMFC 电化学过程的复杂性,基于黑箱的神经网络模型将是 PEMFC 建模的另一发展趋势. 再者,随着预测理论的逐渐应用,可考虑利用经验模态分解、回声状态网络等方法建立 PEMFC 的预测模型,实时预测燃料电池的输出信息. 除此之外,一些新的控制理论和优化方法也可以应用到 PEMFC 的建模中,如考虑到 PEMFC 是能量耗散型对象,可建立基于广义 Hamilton 理论的 PEMFC 模型,这些也将是笔者后期的研究方向.

PEMEC 模型本身的不确定性、环境参数的复杂性使 PEMFC 系统的数学模型不够完善,因此,基于精确模型的传统控制策略不能实现对 PEMFC 的有效控制. 基于智能控制策略的强学习能力和强鲁棒性特点,智能控制策略能实现对 PEMFC 系统负载和外部参数变化的跟踪控制;同时,融合了智能控制和传统控制的组合控制将成为 PEMFC 控制的另一研究方向. 最后,笔者认为,从 PEMFC 输入和输出需求之间的矛盾来研究其多目标控制问题,应用智能控制策略和智能算法实现 PEMFC 燃料消耗最少能量利用率最高,也将成为 PEMFC 控制新的研究趋势.

参考文献:

[1] 刘春娜. 燃料电池技术最新进展[J]. 电源技术,2015,39(3):445-446.

[2] 刘鹤. 质子交换膜燃料电池的建模与仿真[D]. 北京:华北电力大学控制与计算机工程学院,2012.

[3] KULIKOVSKY A A. One-dimensional impedance of the cathode side of a pem fuel cell:exact analytical solution[J]. Journal of the Electrochemical Society,2015,126(3):217-222.

[4] LEI Xing,MAMLOUK M,SCOTT K. A two dimensional agglomerate model for a proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy,2013,61:196-210.

[5] CHAUDHARY S,SACHAN V K,BHATTACHARYA P K. Two dimensional modeling of water uptake in proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(31):17802-17818.

[6] 郭玉宝,朱红,魏永生,等. 质子交换膜燃料电池三维稳态数值模拟[J]. 计算机与应用化学,2014,31(2):135-139.

[7] BIZON N,OPROESCU M H,RACEANU M. Efficient energy control strategies for a standalone renewable/fuel cell hybrid power source[J]. Energy Conversion and Management,2015,90:93-110.

[8] ZHAN Yuedong,GUO Youguang,ZHU Jianguo,et al. Power and energy management of grid/PEMFC/battery/supercapacitor hybrid power sources for UPS applications[J]. Electrical Power and Energy Systems,2015,67:598-612.

[9] 贺建军,孙超. 质子交换膜燃料电池的建模与仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41

(2):566 – 571.

[10] YANG Yanxia, LUO Xu, DAI Chahua, et al. Dynamic modeling and dynamic responses of grid-connected fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(26): 14296 – 14305.

[11] 郭爱,陈维荣,李奇,等. 燃料电池机车温度系统建模和控制[J]. 系统仿真学报,2015,27(1):133 – 141.

[12] PURANIK S V, KEYHANI A, KHORRAMI F. Neural network modeling of proton exchange membrane fuel cell[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 474 – 483.

[13] 李大字,刘方,勒其兵. 自增长混合神经网络及其在燃料电池建模中的应用[J]. 化工学报,2015,66(1):333 – 337.

[14] CHENG Jixiang, ZHANG Gexiang. Parameter fitting of PEMFC models based on adaptive differential evolution [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 62: 189 – 198.

[15] ZHANG Li, WANG Ning. An adaptive RNA genetic algorithm for modeling of proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38: 219 – 228.

[16] LI Qi, CHEN Weirong, LIU Zhixiang, et al. Nonlinear multivariable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13777 – 13786.

[17] 于亚笛,李大字,勒其兵. 基于 Takagi – Sugeno 模型的质子交换膜燃料电池广义预测控制[J]. 北京化工大学学报,2013,40(3):104 – 108.

[18] FAN Liping, LI Chong, SHI Xiaolin. Adaptive fuzzy control of a proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2013, 7(1): 41 – 49.

[19] 杨忠君,樊立萍,宗学军,等. 质子交换膜燃料电池神经网络控制研究[J]. 自动化仪表,2014,35(5):63 – 68.

[20] MARZOOGHI H, RAOOFAT M. Improving the performance of proton exchange membrane and solid oxide fuel cells under voltage flicker using Fuzz-PI controller [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(9): 7796 – 7806.

[21] 卫国爱,全书海,李发均,等. 基于 RBF-PID 的燃料电池空气压力控制[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2014,36(5):618 – 621.

[22] 吴昆. 质子交换膜燃料电池动态建模与控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学自动化学院,2011.

Review on Modeling and Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

CRISALLE Oscar Dardo, HAN Chuang, WU Lili, ZHI Changyi

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

Abstract: This paper focuses on the modeling and control of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC). Empirical and mechanistic models based on polarization curves and parameter dimension are reviewed. Steady state and dynamic models, based on electrochemical reaction, temperature and pressure, among other variables, are analyzed. Intelligent models, which are based on neural-network identification, swarm-intelligence algorithm and support vector machine are introduced. The intelligent control strategies for PEMFC control are summarized. Finally, the swarm intelligence algorithm optimizing environment and model parameters of PEMFC will be a research direction, and the new theory including prediction and Hamilton can be applied for modeling of PEMFC, meanwhile the intelligent control strategies for PEMFC based on the state-of-the-art algorithm will become a development trend.

Key words: PEMFC; modeling; intelligent control

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0066 - 04

基于改进遗传算法的电力系统无功优化

杨胡萍[1], 李威仁[1], 左士伟[2], 张　扬[3], 蔡孝文[4]

(1. 南昌大学 信息工程学院,江西 南昌 330031;2. 国网浙江省电力公司 金华供电公司,浙江 金华 321017;3. 国网江西省电力公司 信息通信分公司,江西 南昌 330096;4. 国网江西省电力公司 检修分公司,江西 南昌 330096)

摘　要: 应用遗传算法求解电力系统无功优化问题,建立以无功补偿设备的投入容量、发电机端电压、可调变压器变比为控制变量,以综合效益最大为目标函数的电力系统无功优化数学模型. 所建模型中,控制中心取离散值的变量,采用十进制整数编码提高了计算效率,应用混合选择算子和自适应调整交叉/变异率改善了收敛性能. 在 IEEE 14 节点系统上进行 500 次的无功优化,验证了方法的正确性和有效性.

关键词: 电力系统;无功优化;遗传算法

中图分类号: TM731　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.013

0　引言

法国工程师 Carpentier 于 1960 年初最早提出最优潮流数学模型[1],最优潮流问题可被分解为无功优化问题和有功优化问题两个子问题,可以单独求解,作为最优潮流的重要分支,电力系统的无功优化问题正式得到广泛研究.

电力系统无功优化可以降低网络损耗,且已成为减小供电成本、增加供电量、提高经济效益的突破口. 文献[2]全面地分析了国内外学术界对无功优化调度问题的研究现状,归纳了无功优化调度领域的五个关键问题,总结出智能算法和内点算法在无功优化计算方面的独特优势;文献[3 - 5]研究了包含分布式电源的配电网无功优化,分别从不同的角度提出了实用的解决策略;文献[6 - 7]阐述了配电网无功优化中含风力发电机组的问题,提出了新的解决模型;文献[8 - 11]分别使用了多种不同的优化算法解决电力系统无功优化问题;文献[12]选取典型的多目标进化算法,从整体角度对它们在无功优化问题中的应用展开比较研究.

笔者基于前人研究,对传统遗传算法做适当改进,使之更适用于电力系统无功优化求解,并通过对 IEEE14 节点系统进行无功优化. 分析结果表明,所提模型的有效性和可行性得到了很好的验证.

1　无功优化数学模型

1.1　约束条件

模型以潮流方程、电力电量平衡、发电机端电压、无功补偿容量、可调变压器分接头档位、发电机无功出力、负荷节点电压和其他安全运行条件为约束,约束条件如下:

$$P_{Gi} = P_{Li} + U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}). \quad (1)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Ri} = Q_{Li} + U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}). \quad (2)$$

$$U_{Gi,\min} \leqslant U_{Gi} \leqslant U_{Gi,\max}, i = 1,2,\cdots,N_G; \quad (3)$$

$$Q_{Ri,\min} \leqslant Q_{Ri} \leqslant Q_{Ri,\max}, i = 1,2,\cdots,N_R; \quad (4)$$

$$Q_{Ci,\min} \leqslant Q_{Ci} \leqslant Q_{Ci,\max}, i = 1,2,\cdots,N_C; \quad (5)$$

$$T_{Ki,\min} \leqslant T_{Ki} \leqslant T_{Ki,\max}, i = 1,2,\cdots,N_K; \quad (6)$$

$$Q_{Gi,\min} \leqslant Q_{Gi} \leqslant Q_{Gi,\max}, i = 1,2,\cdots,N_G; \quad (7)$$

$$U_{Li,\min} \leqslant U_{Li} \leqslant U_{Li,\max}, i = 1,2,\cdots,N_L. \quad (8)$$

式中:下标 G,L,R,C 和 K 分别代表发电机、负荷、感性无功、容性无功和变压器分接头;N_G,N_L,N_R,N_C和 N_K分别代表发电机节点、负荷节点、感

收稿日期:2015 - 06 - 01;**修订日期:**2015 - 08 - 21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51367014)

作者简介:杨胡萍(1964—),女,江西南昌人,南昌大学教授,主要从事电力系统分析及经济运行方面的研究,E-mail:yhp123@163.com.

性无功补偿设备、容性无功补偿设备和可调变压器分接头的个数;P_G和Q_G为发电机有功和无功出力;P_L和Q_L为负荷有功和无功;U_G和U_L为发电机和负荷节点电压幅值;Q_R和Q_C为感性和容性无功补偿设备的容量;T_K为可调变压器分接头档位的位置.

式(1)和式(2)为潮流平衡方程;式(3)和式(8)为发电机和负荷节点电压约束;式(4)和式(5)为感性和容性无功补偿设备的容量约束;式(6)为可调变压器分接头档位的位置约束;式(7)为发电机无功出力约束.

1.2　目标函数

考虑到发电机无功出力越限值最小、发电机有功出力最小、节点电压偏差最小、无功补偿设备容量和投资最小,可构造综合效益最优的目标函数如下:

$$\max \quad F = F_{\text{econ}} - F_{\text{over}}. \tag{9}$$

$$F_{\text{econ}} = \frac{Y\tau_{\max} C_1 (P_{\text{ori}} - P_{\text{opt}}) - C_2 Q_R - C_3 Q_C}{Y\tau_{\max} C_1 P_{\text{ori}}}. \tag{10}$$

$$F_{\text{over}} = \lambda_1 \sum_{j \in N_L} \left(\frac{\Delta U_{Lj}}{U_{Lj,\max} - U_{Lj,\min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum_{k \in N_G} \left(\frac{\Delta Q_{Gk}}{Q_{Gk,\max} - Q_{Gk,\min}} \right)^2. \tag{11}$$

$$\Delta U_{Lj} = \begin{cases} U_{Lj} - U_{Lj,\max}, U_{Lj} > U_{Lj,\max}; \\ 0, U_{Lj,\min} < U_{Lj} < U_{Lj,\max}; \\ U_{Lj,\min} - U_{Lj}, U_{Lj} < U_{Lj,\min}. \end{cases} \tag{12}$$

式中:F_{econ}和F_{over}分别代表控制变量越限的罚函数和经济收益抵偿函数;λ_1和λ_2分别代表负荷节点电压越限罚因子和发电机节点无功出力越限罚因子;Y代表最大投资回收年限;$\tau_{\max}$代表年最大负荷利用小时数;C_1,C_2和C_3分别代表电价、单位电抗器价格和单位电容器价格;Q_R和Q_C分别代表感性和容性无功补偿设备的总容量.

2　遗传算法的改进

针对某一具体问题的某项目标,采用适应度函数作为评价依据,从初始种群开始,通过随机选择、交叉和变异等遗传操作,将优化趋势逐代持续,直至搜索到全局最优解.

2.1　十进制整数编码

现有遗传算法普遍采用二进制编码,遗传操作直观,与无功优化问题控制变量的离散性相适应.但是,二进制编码占用内存空间大,计算速度慢,编码和解码时间长,还会产生无效解.二进制编码的变异是简单的取反操作,但经常因为海明悬崖的问题使控制变量突变太大而影响了算法的局部搜索能力和收敛稳定性.

采用十进制整数编码,将不同类型的控制变量进行相对独立的编码,从而使遗传算法的任何一个解都由包含信息不同的若干条子染色体来构成.这种策略对于控制变量多而且类型复杂、取值范围差别大的无功优化问题非常适合,所有的遗传操作均在对应的子染色体上进行,避免解的不可行问题.

整数编码是指将原问题的解空间映射到十进制整数串空间上,然后在整数串空间上进行交叉和变异,最后再通过解码过程还原成其表现型以进行适应度评估.整数编码完全适用于控制变量的离散性问题,每个控制变量只需 1 位整数基因来表达,码串长度大大减小,所占内存空间少,进行遗传操作效率提高 4 倍左右,解码也比二进制编码简单.

由于发电机端电压在控制中心取离散值,所以无功补偿设备投入组数、变压器分接头档位和发电机端电压都统一使用十进制整数编码,即

$$\boldsymbol{X} = [N_R \quad N_C \quad N_K \quad N_G]. \tag{13}$$

不难推出对应的解码,即

$$\delta = N_{\text{now}} (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / N + \delta_{\min}. \tag{14}$$

式中:δ,$\delta_{\max}$和$\delta_{\min}$分别代表变量实际值、上限值和下限值;N_{now}和N分别代表变量当前状态值和总状态数.

2.2　选择算子及适应度函数设计

不同的选择方法对遗传算法的收敛有一定影响,收敛代数与选择强度成反比,较高选择强度虽然能明显提高适应度,加速收敛,但太高会导致收敛太快,解的质量差.

在遗传算法前期采用轮盘赌法,既保留了轮盘赌法以较大概率选择高适应度个体的优点,保证了种群在算法前期不断进化,又利用了其有一定随机性的特点,防止了优秀个体在种群中的迅速扩散,也避免了算法结果的严重震荡,有利于全局搜索.后期种群趋于收敛,适应度相差不大,依据适应度来分配的轮盘赌法已变为盲目搜索,因此采用锦标赛法.整个算法过程中,都采用精英保留策略,这在算法前期能在理论上保证全局收敛.

前期采用轮盘赌法时,适应度函数采用线性变换,即

$$f' = \alpha f + \beta. \tag{15}$$

其中，
$$\alpha=\frac{f_{avg}}{f_{avg}-f_{min}},\beta=\frac{-f_{min}f_{avg}}{f_{avg}-f_{min}}. \tag{16}$$

式中：f_{avg}，f_{max}和f_{min}分别代表种群的平均适应度、最大适应度和最小适应度；f和f'分别代表个体原始适应度和变换适应度.

后期采用锦标赛法时，适应度函数即目标函数.

2.3 自适应调整交叉/变异率

采用基于 Sigmoid 函数的自适应调整交叉/变异率调节方法，即

$$p_c=\begin{cases}p_{cmin}+\dfrac{p_{cmax}-p_{cmin}}{1+\exp\left(20\times\dfrac{f'-(f_{avg}+f_{max})/2}{f_{max}-f_{avg}}\right)}, & f'\geqslant f_{avg};\\ p_{cmax}, & f'<f_{avg}.\end{cases} \tag{17}$$

式中：p_{cmin}和p_{cmax}分别代表交叉/变异率取值的下限值和上限值.

3 算例分析

3.1 收敛性统计分析

在 IEEE 14 节点系统上进行 500 次的无功优化计算，验证所提模型的有效性. 参数设置如下：最大世代数 100，精英遗传最大代数 10；交叉率 0.9，变异率 0.05，最小交叉率 0.5，最大交叉率 0.9，最小变异率 0.01，最大变异率 0.09；最大投资回收年限 10 年，电价 0.044 万元/(MW·h)，最大负荷利用小时数 3 200 h，单位电容/电抗价格 5 万元/MVar；电压越限罚因子 0.2，无功越限罚因子 0.1；发电机端电压上下限及档位 1.1/0.9/21，无功补偿设备上下限及档位 0.5/-0.1/21，变压器变比上下限及档位 1.1/0.9/9，电压质量上下限 1.05/0.95. 统计分析的网损下降率直方图如图 1 所示，收敛代数直方图如图 2 所示.

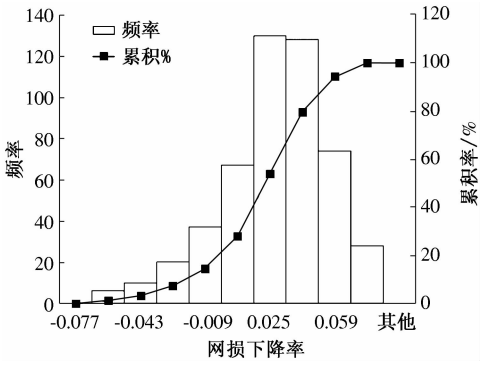


图 1 网损下降率直方图

Fig. 1 The histogram of the drop of active power loss

由于统计的样本足够多，可近似将直方图中的频率视为概率. 根据图 1 和图 2 可知，算法收敛于 70 代以前的概率为 70% ~80%，优化后的网损较初始的网损小的概率超过 80%，即算法能以超过 80% 的概率改善系统的网损率；平均网损下降率为 2%，最大网损下降率为 7.53%，电压越限和无功越限都较少. 优化结果统计见表 1 所示.

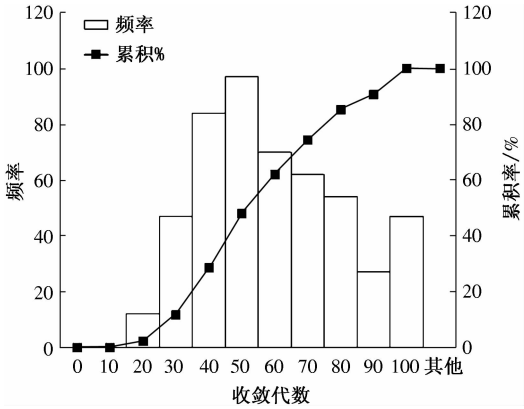


图 2 收敛代数直方图

Fig. 2 The histogram of the convergence generation

表 1 优化结果统计

Tab. 1 The Statistical optimization results

项目	平均值	最大值	最小值
最优适应度	1.000	1.021	0.921
最优网损/MW	13.114	14.423	12.384
网损下降率/%	2.09	7.53	-7.69
电压越限母线数/条	1.9	6.0	0.0
电压越限总量/MVar	0.035	0.121	0.000
无功越限母线数/条	1.1	3.0	0.0
无功越限总量	15.225	51.475	0.000
收敛代数	55.4	100.0	14.0
最优个体出现代数	45.716	100	4
耗时/s	3.392	6.407	0.879

3.2 最佳优化结果分析

500 次的无功优化试验的最佳优化结果如表 2 所示. 从表 2 可以看出，优化潮流较初始潮流的有功网损有显著下降，电压越限母线数减少了 5 条，电压越限量也有所下降，年支出下降 100 多万元，经济效益可观. 遗传算法世代图如图 3 所示.

从图 3 可以看出，平均适应度在不断改善，种群不断进化，这说明算法一直在朝着更优解的方向搜索. 表 2 给出的优化结果就是全局最优解.

表 2　优化前后重要数据比较

Tab. 2　Important data before and after optimization

潮流	网损/MW	电压越限母线数/条	电压越限量/p. u.	无功越限母线数/条	无功越限量/MVar	补偿容量/MVar	支出/(万元·年$^{-1}$)
初始潮流	13.39	9	0.100 9	0	0	0	1881
优化潮流	12.38	4	0.094 2	0	0	0.95	1744

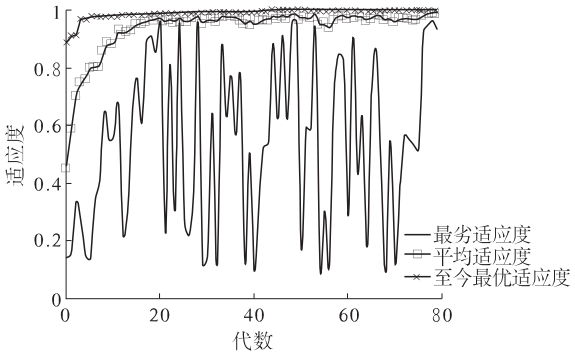


图 3　遗传算法收敛图

Fig. 3　The convergence graph of Genetic Algorithm

4　结论

提出了以综合效益最大为目标的无功优化数学模型,采用改进的遗传算法进行求解并收到了良好的效果,将所提模型应用到 IEEE14 节点系统上进行 500 次的无功优化,结果表明:

(1)把电力系统中所有控制变量视为离散量可以减小编程难度,简化了编解码过程;

(2)目标函数既满足了经济效益又满足了技术指标,在应用上有一定合理性;

(3)遗传算法在实际应用中很难寻到全局最优解,只能得到一个较优解,有时甚至得到较初始网损率还要差的解,该算法的稳定性有待于进一步提高.

遗传算法自身的理论复杂性使得人们有必要通过各种其他算法与改进方案来完善它,可以考虑以下改进方向:

(1)结合其他局部优化算法,如:线性规划法、内点法等,改善种群质量;

(2)采用灾变算子,传统遗传算法局限于"好生好,坏生坏"的思想,优选策略更是抑制了劣质个体的进化潜力,有必要采用更丰富算子,比如使用灾变算子杀死一些个体,给劣质个体增加进化的空间;

(3)本文所有无功补偿设备容量相同,但在实际系统中,各母线上并联的无功补偿设备的容量往往是不同的,这需要对每个节点进行单独设置;

(4)增加专家知识对遗传算法寻优进行指导,例如,对低电压节点优先投入电容器进行补偿.此外,更为重要的是,由于笔者只讨论了 14 节点的小系统,当节点增多时,量变将产生质变,遗传算法可能产生大量不可行初始解,此时需要对大系统进行区域划分.

参考文献:

[1] CARPENTIER J. Optimal power flows[J]. Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1979, 1(1): 3-15.

[2] 张勇军,任震,李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术,2005,29(2):50-56.

[3] 张丽,徐玉琴,王增平,等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报,2011,26(3):168-174.

[4] 程杉,陈民铀,黄薏宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(10):45-50.

[5] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.

[6] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J],中国电机工程学报,2008,28(7):40-45.

[7] 赵晶晶,符杨,李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2011,35(11):33-38.

[8] 张庭场,耿光飞. 基于改进粒子群算法的中压配电网无功优化[J]. 电网技术,2012,36(2):158-162.

[9] 崔挺,孙元章,徐箭,等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19):43-50.

[10] 刘科研,盛万兴,李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. 电网技术,2007,31(3):13-18.

[11] 熊虎岗,程浩忠,李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):102-108.

[12] 李鸿鑫,李银红,李智欢. 多目标进化算法求解无功优化问题的比较与评估[J]. 电网技术,2013,37(6):1652-1658.

(下转第 75 页)

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0070 - 06

古文献手写汉字切分方法研究

张忠林[1], 吴相锦[1], 周生龙[2]

(1. 兰州交通大学 电子与信息工程学院,甘肃 兰州 730070;2. 甘肃省图书馆,甘肃 兰州 730000)

摘　要: 根据古文献和古汉字的多重叠、多粘连等特点,提出了适合古文献的列切分和字切分方法. 列切分采用统计投影循环过滤方法,首先对古文献进行纵向上的统计投影,然后采用循环过滤的方法对统计结果进行处理直到分离出比较均匀的列. 该算法在噪点较多、有一定倾斜、列高度不均匀等多种复杂情况下,取得了很好的效果. 字切分采用投影、分段投影和顶底部笔画特征相结合的多步切分方法,并在此基础上采用上下文相结合的方法进行切分检验,对不正确的切分进行调整. 分段投影采用二分的思想把存在粘连、重叠的字段分为左右两部分,分别进行投影,并分析投影数组获取字段的切分路径;顶底部笔画特征切分法是根据汉字顶底部笔画的特点找到过度切分和不足切分,依次对切分进行调整. 实验结果表明,提出的方法能较好地用于手写古文献的切分.

关键词: 古文献;手写汉字;汉字切分;分割算法

中图分类号: TP391　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.014

0　引言

近年来,随着古文献研究的不断盛行和深入及计算机技术的不断发展,利用计算机技术解决古文研究中的一些问题成为研究的热点之一,其中古汉字的切分和识别是这项研究的基础. 然而,由于古文献大多是手写,随意性较大,字体多变,字之间存在重叠、粘连等情况,使得古汉字切分成为研究的难点. 手写古汉字的正确切分是提高古文字识别率的关键,也是对古文献做信息处理的重要前提和保障. 因此,提高古汉字的切分准确率和效率具有非常重要的研究意义.

目前,对汉字的切分方法主要有基于汉字笔画结构切分方法、基于整体认识的切分方法、基于识别的切分方法、像素跟踪法[1]. 基于汉字笔画结构切分方法一般采用笔画连接盒的动态算法[2]和黑游程跟踪提取笔划算法[3],该类方法对笔画提取有较高的要求;基于汉字整体认识的切分方法一般采用投影法[4]和连通域分析法[5],但对汉字间有粘连或重叠的情况,该方法效果较差;基于识别的切分方法通过识别的结果来判断最终的切分点[6],该方法与后期的识别密切相关,受到识别率的限制;像素跟踪法通过跟踪黑色像素得到汉字笔画[7],对无粘连字符的分割取得了很好的效果,但对粘连字符分割的效果非常有限.

除了上述方法外,多种方法相融合的多步切分方法也是一种解决问题的有效途径. 文献[8]中介绍了一种多步分割方法. 首先,利用隐马尔可夫模型(HMM)中的 Viterbi 算法将相离字符和重叠字符分割开;然后,对于粘连字符,通过寻找候选分割点,使用最短路径法做进一步非线性切分;最后,应用 A * 算法找到全局最佳分割路径. 这种方法能够对重叠字符和较少笔画粘连的字符有较好的切分效果,但对较多笔画粘连的字符的效果不太理想. 文献[9]中介绍了一种最小加权分割路径的方法,该方法是在投影切分的基础上,把粘连字符串的中线作为初始分割路径,然后求出最小权值,再依据最小权值找到最佳分割路径. 这种方法对字高度差别不大的两字粘连有很好的切分准确率,但对两个字高度差别较大和多个字粘连的情况切分效果有限. 文献[10]介绍了一种粗切分与细切分相结合的切分方法,粗切分是用投影

收稿日期: 2015 - 06 - 27;**修订日期:** 2015 - 11 - 10

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(14YJA870014).

作者简介: 张忠林(1965—),男,河北衡水人,兰州交通大学教授,博士,主要研究方向为智能信息处理、软件工程,E-mail: zhangzl@mail.lzjtu.cn.

法将相离的字符切分出来,细切分是在背景细化的基础上根据连通域和切分字段交叠的情况进行非相离字的切分. 笔者在前人研究的基础上提出了列切分的投影循环过滤方法,字切分的投影、分段投影和顶底部笔画特征相结合的多步切分方法,并在此基础上进行切分检验.

1　列切分

古文献有如下特点:毛笔书写,笔画较粗,间隙较小,相邻字之间存在较多的粘连,图像质量较差,多数文档中有不完整的格线. 针对古文献的这些特点,笔者采用基于统计的投影循环过滤方法进行列切分.

1.1　基于统计的投影循环过滤方法

令 I 表示原图像,$I(x,y)$ 为 (x,y) 点的像素值,I_p 表示经灰度化、二值化、去格线、去边界线处理后的二值图像,$I_p(x,y)$ 为处理后的二值图像在 (x,y) 点的像素值,D_X 表示 I_p 在 X 轴方向投影得到的投影图像,$D_X(x,y)$ 为投影图像在 (x,y) 点的像素值. 在整个过程中涉及到的其他参数定义如下.

(1)最大过滤值 $P_{\max}$:

$$P_{\max} = \max \sum_{y=0}^{H} D_X(x,y). \tag{1}$$

式中:H 为图像的高度.

(2)投影过滤公式定义如下:

$$SUM_X(x) = \begin{cases} 0, & SUM_X < P_i; \\ SUM_X, & SUM_X \geqslant P_i. \end{cases} \tag{2}$$

式中:$SUM_X(x) = \sum_{x=0}^{W} \sum_{y=0}^{H} D_X(x,y)$;$W$ 为图像的宽度;H 为图像的高度.

首先,对 I_p 图像进行 X 轴方向上的统计投影,得到 $D_X(x,y)$ 和 SUM_X,然后计算出最大过滤值 $P_{\max}$,接着开始 $0 \leqslant P_i \leqslant P_{\max}$ 的循环,P_i 为过滤值,在每一次循环结束时都要计算出该过滤值下所有列宽度的方差,待整个循环结束,计算得到每一种切分方案的所有列宽度的方差,方差最小且过滤值 P_i 最小时,被选定为最优切分方案. 基于统计的投影循环过滤方法的具体步骤如下.

Step 1:对 I_p 图像进行 X 轴方向上的统计投影,得到 $D_X(x,y)$ 的 SUM_X 和 $P_{\max}$.

Step 2:从 P_i 等于 0 开始循环过滤 SUM_X,直到 P_i 等于 $P_{\max}$,并计算过滤值下列宽度的方差,存入 S 数组中,S 数组的长度为 $P_{\max}+1$.

Step 3:查找 S 数组中最小的值,如果存在最小值有多个,选取 S 数组下标最小的值作为最优切分过滤值.

Step 4:利用 Step3 中得到的最优过滤值,过滤 SUM_X,得到每一列的开始坐标和结束坐标.

Step 5:结束.

2　字切分

字切分包括相离字切分和非相离字切分. 首先,采用投影切分的方法将相离字切分出来并标记. 然后,对未被切分出来的非相离字段,采用分段投影切分法和顶底部笔画特征切分法相结合的方法进行切分,并在切分完成后采用上下文检验的方法进行切分检验.

2.1　投影切分

首先,对每一列进行 Y 轴方向上的投影,把白色像素点的位置作为切分点. 两个切分点之间如果没有黑色像素点,那么这两个切分点之间的部分称为间隔,否则称为字段,同时记录上下字段间隔和字段高度. 其次,统计字高度. 由于汉字是方块字,一般情况下汉字的宽度和高度相差不大,根据汉字的这一特点,只统计字段高度在列宽度左右一定范围内的字段,经实验得出这个范围一般在 $R_i \pm R_i \times 0.15$ 内,R_i 表示第 i 列宽度. 最后,根据统计得到的平均字段高度、字段间隔、字段高度,对较小的字段进行合并. 合并遵循以下原则:(1)最近原则;(2)合并后的字高度较小原则. 至此,相离的字能够正确分离出来.

2.2　分段投影切分

在分段投影开始之前,要重新统计字平均高度 $\bar{h}$,统计方法和投影切分中的统计方法相同,因为此时相离字已经切分出来,统计出的平均字段高度会更准确.

对于高度小于 $\bar{h}+\lambda \times \bar{h}$ 的字段,认为是单个汉字不再进行其他处理;而对于高度大于 $\bar{h}+\lambda \times \bar{h}$ 的字段,认为是由多个汉字组成的,存在重叠或粘连情况的字段即非相离字段,其中 λ 为平均高度偏移量,是通过测试大量古文献图像获取的值,本文取值为 0.2. 对于这样的字段采用分段投影的切分方法进行字段切分.

分段投影是对字段的前 $W_i/2$ 和后 $W_i/2$ 分别做 Y 轴方向上的投影,其中 W_i 为字段宽度,i 是字段序号. 然后,在每一个投影数组中对于每两个字找到一个分割点或分割范围,例如,对于一个由

两个字组成的字段,在前 $W_i/2$ 的投影数组中找到的分割范围是 $[Y_{i1}, Y_{i2}]$,其中,Y_{i1},Y_{i2} 表示 Y 轴上的相对纵坐标,且 $P+\bar{h}-(\lambda\times\bar{h})\leqslant Y_{i1}\leqslant Y_{i2}\leqslant P+\bar{h}+(\lambda\times\bar{h})$,$P$ 表示在此字段中,要分割的两个字中第一个字与它之前字的分割点的相对纵坐标.

最后,根据找出的两组分割范围分析出分割点. 由于,从上向下分析非相离字重叠、粘连部分的像素,在重叠、粘连部分的一定范围内,统计每一行的黑色像素个数并找到黑色像素个数走势的转折点. 根据此转折点即可在两组分割范围内找到一个切分点,从而对重叠、粘连字进行切分. 如果只能找到前 $W_i/2$ 对映的分割范围,就在这一组坐标范围内去找后 $W_i/2$ 中黑色像素走势的转折点,并把此转折点作为切分点;如果在前后数组中都能找出分割范围,这两组分割范围肯定没有交叉,就在两组分割范围中间的部分,找出转折点并把它作为切分点;如果前后数组中都没能找出分割范围,就在整个字段的投影中,在要分割的字的偏移量范围内找出转折点并把它作为切分点. 具体示例如图 1 所示.

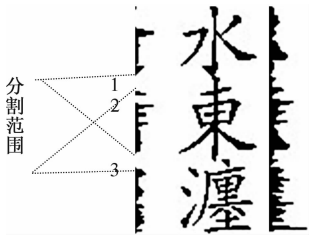


图 1 分段投影

Fig. 1 Piecewise projection

在 $P_j+\bar{h}-(\lambda\times\bar{h})\leqslant Y_i\leqslant P_j+\bar{h}+(\lambda\times\bar{h})$ 范围内对前后 $W_i/2$ 的投影进行分析,可发现在前 $W_i/2$ 投影中有三段白色像素范围,这里称之为候选分割范围,如图 1 中数字所示,后 $W_i/2$ 投影中没有候选分割范围. 然而,如果在第二个候选分割范围内找分割点,就使的第一个字的高度太大而第二个的高度太小,且都与 $\bar{h}$ 有很大的偏差,不符合汉字高度的一般规律;如果在第一个候选分割范围内找分割点就使得两个字的高度与平均高度相当,故选择第一个候选分割范围作为前两个字的分割范围. 第二个字与第三个字之间只有一个候选分割范围,且在此候选分割范围内的分割点不会使两个字的高度相对于平均高度有太大偏差,所以选择第三个候选分割范围作为第二个与第三字的分割范围. 最后,在分割范围内找出黑色像素个数走势的转折点从而得到分割点并对字段进行切分. 分段投影切分具体步骤如下.

Step 1:统计字平均高度 $\bar{h}$.

Step 2:如果 $h_i\leqslant\bar{h}+\lambda\times\bar{h}$ 认为是单字,h_i 表示字段的高度,添加到单字向量中,结束.

Step 3:如果 $h_i>\bar{h}+\lambda\times\bar{h}$,认为字段中包括 m 个单字,其中,

$$m=\begin{cases}1.5, \mathrm{Round}(h_i/\bar{h})=1;\\ \mathrm{Round}(h_i/\bar{h})-0.5, \mathrm{Round}(h_i/\bar{h})>h_i/\bar{h};\\ \mathrm{Round}(h_i/\bar{h}), \mathrm{Round}(h_i/\bar{h})\leqslant h_i/\bar{h}.\end{cases}\quad(3)$$

式中:Round( )是四舍五入函数,$m=1.5, 2, 2.5, \cdots$.

Step 4:对字段进行前 $W_i/2$ 和后 $W_i/2$ 投影,并获得投影数组 *F_Array*、*B_Array*.

Step 5:如果 $m=\mathrm{Round}(m)$,在 $[P_j+\bar{h}-(\lambda\times\bar{h}), P_j+\bar{h}+(\lambda\times\bar{h})]$ $(j\leqslant m-2)$ 范围内利用 F_Array、B_Array 数组找到分割范围,获取每两个字的切分点.

Step 6:如果 $m<\mathrm{Round}(m)$,在 $[P_j+\bar{h}/2-(\lambda\times\bar{h}), P_j+\bar{h}/2+(\lambda\times\bar{h})]$,$j\leqslant m-2$ 的范围内,利用 *F_Array*、*B_Array* 数组找到分割范围,获取前半个字与一个单字的切分点.

Step 7:根据 m 是否为整数进行上下文合并.

Step 8:循环步骤 2 ~ 8 到所有字段均被处理.

2.3 顶底部笔画特征切分

因分段投影中采用直线切分,会使有些笔画的一部分被分割到与它相邻的字的像素数组中,顶底部笔画特征切分就是把错误分割的部分挖取出来并把它放在应该放的位置上.

首先,对采用分段投影切分出来的单字,读取顶部第一行和底部第一行即最后一行的像素并记录黑色像素的位置;然后,对相连的黑色像素进行合并,并记录合并后的黑色像素点集的起始位置、结束位置;第三,采用像素跟踪法跟踪每一个黑色像素点集,得到它对映的笔画并判断出笔画的类型(横、竖、撇、捺、点);最后,根据汉字顶部笔画和底部笔画的类型及对应关系,判断是过度切分还是切分不足. 顶部笔画特征切分的判断依据是通过分析大量分段投影切分后出现的错误切分结果得到的,具体如下:

(1)如果是"点",判断它的下面是否有"横"或类似"横"的部首,如,"宝"字的点下面被认为

是有横的.

(2)如果只有一个“撇”,判断在它的中间位置是否有与之相连的“横”或“竖”以及在它的结束位置是否有与之相连的“竖”,例如:“有”,“作”等.

(3)如果有“撇”和“捺”,在字的上部一般是先“捺”后“撇”的顺序,如:“尊”.

(4)如果只有“捺”,判断与之相交的笔画是否有“横”,例如:“戈”,“成”等.

(5)如果是“竖”,则在 $\alpha \times h_i$ 范围内判断其连通性,α 表示“竖”的连通性参数,可根据测试实验数据得出,本文取 0.3.

(6)如果是“横”,则在 $\beta \times h_i$ 范围内判断其连通性,β 表示“横”的连通性参数,可根据测试实验数据得出,本文取 0.2,如果不连通,判断在它的下面是否还有“横”,例如:“三”.

下部分笔画的判断与上述六条规则相似,不同在于当同时有“撇”“捺”时一般“撇”在前“捺”在后.

判断出某一笔画属于哪个字后,挖取、合并即可,切分效果如图 2 所示.

图 2　顶底部笔画特征切分

Fig. 2　Segmentation method of strokes features at top and bottom

2.4　上下文检验

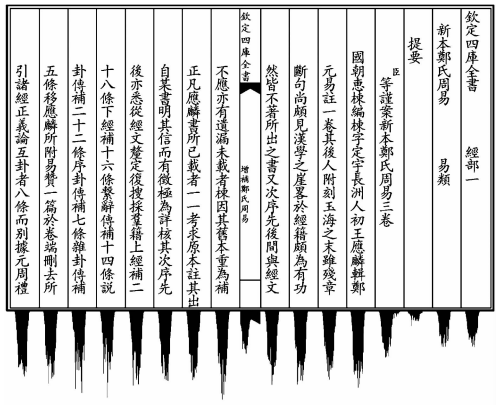
汉字是方块字,字的高度和宽度基本相同是汉字的一大特性.根据汉字的这一特性,笔者提出了上下文相结合的切分检验方法.首先,计算第 K,$K+1$ 个字的高宽比 Sc_k、Sc_{k+1},并排除是特殊字的情况,如“一”.然后,判断 Sc_k 是否满足 $(1-\zeta) \leqslant Sc_k \leqslant (1+\sigma)$;$\zeta$,$\sigma$ 是高宽比的偏移因子,通过大量测试得到,如果这两个字都不满足上述条件,且一个字的 Sc_k 比 $1-\zeta$ 小,而另外一个字的 Sc_k 比 $1+\sigma$ 大,则继续检验第 $K+2$,$K+3$,…,$K+n$ 个字,直到第 $K+n$ 个字满足 Sc_k 的范围要求.第三,把从第 K 到第 $K+n-1$ 的字进行合并,并调整分段投影中 λ 的值使得

$$\lambda = \frac{\max\{nw, h\}}{\min\{nw, h\}} - 1. \tag{4}$$

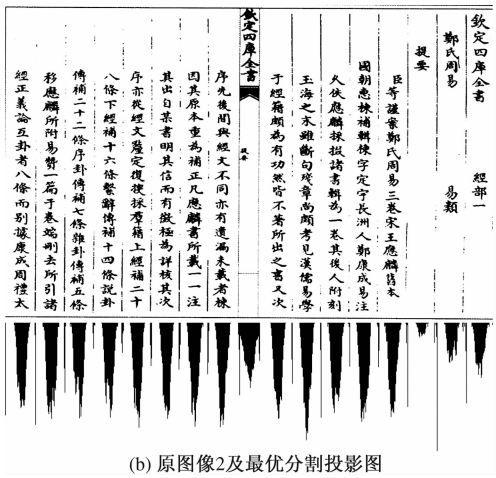
式中:w,h 分别为合并后的字符段的宽度和高度.最后,用新的高度偏移量 λ 再次进行分段投影和顶底部笔画特征切分.

3　实验结果分析

实验的运行环境如下:①硬件环境,Intel(R) Corei5/2.5GHZ/RAM4GB;②软件开发环境,java 编程语言.实验数据主要来自《四库全书》提要部分的 10 张扫描图像,因四库全书分为不同的阁,阁与阁之间相同内容部分的书写通常是不同的人完成,这些数据作为实验数据也能充分说明不同风格的书写方式对实验的成功率具有一定的影响.下面以文津阁和文渊阁的图像为例说明实验的结果,切分效果如图 3 所示.



(a) 原图像1及最优分割投影图



(b) 原图像2及最优分割投影图

图 3　列切分

Fig. 3　Text line segmentation

列切分的准确率主要受不完整的格线、图像的倾斜等因素影响.列切分的准确率定义如下:

$$\text{列切分准确率} = \frac{\text{准确切分的列数}}{\text{实际列数}}. \tag{5}$$

在对文津阁和文渊阁的图像做列切分时,所有的列都能被正确切分出来,切分效果令人惊喜.单纯的投影方法对倾斜的图像或有短列的情况下进行列切分的效果不是很好,而采用本文算法能

够适当的增加字体黑色像素的比例,减小其它因素的影响,实现列的正确切分.

古汉字切分结果的优劣不能单从正确率来判断,对于一些字,虽然字的个别笔画的小部分被错误分割,但对它后期的识别以及其它的处理影响不是太大,例如,“中”,有些人会把竖写的很长,在切分时,竖的小部分可能被错误分割到它的相邻字A上,此时,如果对A造成的影响大,把A划分到错误切分范围内,把“中”划分到微错切分准确范围内,对于正确切分率和微错切分准确率的定义如下:

$$\text{切分准确率} = \frac{\text{正确切分的汉字个数}}{\text{总汉字个数}}. \quad (6)$$

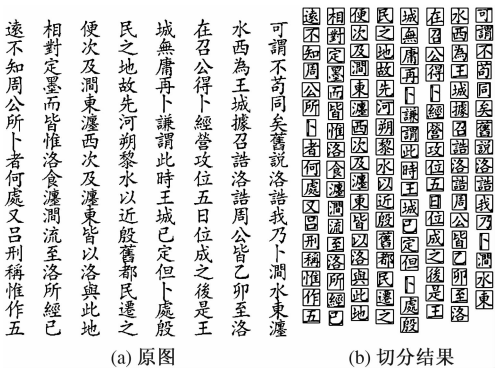
$$\text{微错切分准确率} = \frac{\text{正确切分汉字个数} + \text{微错汉字个数}}{\text{总汉字个数}}. \quad (7)$$

在实验中,选择文献[10]中的算法作为比较算法.并对四库全书文津阁和文渊阁的10张图像(共143列,2 315个汉字)做统计,共计用时16.53 s.字切分结果如表1所示.从表1可以看出,本文算法在切分准确率和微错误切分准确率都提高了将近5个百分点.从图4可以看出,一些存在重叠、粘连的汉字也能被正确切分出来.实验结果表明,本文算法对古代手写汉字的切分有比较好的效果.

表1 字切分结果

Tab.1 The results of Chinese character segmentation

算法	实际字数	切分准确字数	微错切分准确字数	切分准确率/%	微错切分准确率/%
文献[10]算法	2 315	2 092	20	90.37	91.23
本文算法	2 315	2 201	16	95.06	95.77



(a) 原图 (b) 切分结果

图4 切分效果

Fig.4 Segmentation effect

4 结论

古汉字切分是古文献电子化及研究的关键技术之一,且对手写古汉字的正确高效切分显得尤为重要.笔者采用多种方法相结合的多步切分方法,取得了良好的切分效果.但是,也存在着一些问题,例如,当两个字的粘连笔画长度非常大时只能正确切分出一个字或一个微错字,这时就显得效率不高;当一列文字中夹杂这一些小字时,切分检验部分会把这个小字认为是一个错误合并的字段,从而把这个小字切分并用上下字合并,进而造成上下字的错误,检查出这个字本身是小字还是错误合并的字是解决这个问题的关键.

参考文献:

[1] 高彦宇,杨扬.无约束手写体汉字切分方法综述[J].计算机工程,2004,30(5):144-146.

[2] 王宏志,姜昱明.基于笔划包围盒的脱机手写体汉字分割算法[J].计算机工程与设计,2005,26(3):803-806.

[3] 王嵘,丁晓青,刘长松.基于笔划合并的手写体信函地址汉字切分识别[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(4):498-502.

[4] LU Yi. Machine printed character segmentation-An overview[J]. Pattern Recognition,1995, 28(1):67-80.

[5] LU Yi, SHRIDHAR M. Character segmentation in handwritten words-An overview[J]. Pattern Recognition. 1996, 29(1):77-96.

[6] LIU Chenglin, KOGA M, FUJISAWA H. Lexicon-driven segmentation and recognition of handwritten character strings for japanese address reading[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell,2002,24(11):1425-1437.

[7] 邵洁,成瑜.关于手写汉字切分方法的思考[J].计算机技术与发展,2006,16(6):184-186, 190.

[8] 马瑞,杨静宇.一种有效的手写汉字多步分割方法[J].中国图象图形学报,2007,12(11):2062-2067.

[9] 周双飞,刘纯平,柳恭,等.最小加权分割路径的古籍手写汉字多步切分方法[J].小型微型计算机系统,2012,33(3):614-620.

[10] 倪恩志,蒋旻隽,周昌乐.古代汉字文献切分研究[J].计算机工程与应用,2013,49(2):29-33,38.

Study on the Segmentation Method of Handwritten Characters From Historical Chinese Documents

ZHANG Zhonglin[1], WU Xiangjin[1], ZHOU Shenglong[2]

(1. College of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Library, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, we propose methods of text line and character segmentation, which suit the characteristics of ancient documents and handwritten characters of China, such as longitudinal writing, overlapping, conglutination and so on. For line segmentation, a method called statistical projection filtering is proposed. Firstly, we count up the vertical projection of ancient documents, then adopt the method of loop filter to deal with statistical results until much uniform columns are isolated. Even in some complex cases, like much noise, certain inclined and column height is not uniform, our algorithm still has good performance. The methods of projection, piecewise projection and segmentation of strokes features at top and bottom are applied to character segmentation. Finally, the context combined method are adopted to test the segmentation, then, the mistaken segmentation is adjusted. Using the idea of dichotomy, piecewise projection divide characters, where exist overlap and adhesion exist, into two parts, then projected respectively. After that, analyzing projection arrays, we get segmentation path. After finding the over – segmentation and under – segmentation by SM – SFTB (the segmentation method of strokes features at top and bottom) using the characteristics of Chinese character strokes, the adjustment for segmentation is possible. The experimental results show that the proposed methods have good performance for historical Chinese documents.

Key words: historical chinese documents; handwritten chinese characters; chinese character segmentation; segmentation algorithm

(上接第 69 页)

Reactive Power Optimization by Improved Genetic Algorithm Method

YANG Huping[1], LI Weiren[1], ZUO Shiwei[2], ZHANG Yang[3], CAI Xiaowen[4]

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Jinhua Power Supply Company, Jinhua 321017, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Company Information and Communications Branch, Nanchang 330096, China; 4. State Grid Jiangxi Electric Power Company Maintenance Branch, Nanchang 330096, China)

Abstract: Reactive power optimization using improved genetic algorithm is studied in this paper. A mathematical model of reactive power optimization for power system is established, which treats the voltage of the generator, capacity of reactive power compensation equipment, ratio of adjustable transformers as control variables, aiming at maximizing the comprehensive benefits which takes the economics and power system performance into account. The proposed model takes decimal integer encoding strategy to improve the computational efficiency for the discrete variables in control center, applies comprehensive selection operator and adaptive crossover mutation rate to improve the convergence performance. The correctness and effectiveness of the proposed method are validated by simulation results of IEEE 14-bus system for 500 times.

Key words: power system; reactive power optimization; genetic algorithm

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0076 - 04

采用流固耦合方法的复合材料层合板鸟撞分析

李　成, 郭文辉, 铁　瑛

(郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 基于流固耦合的方法,利用 ANSYS/LS - DYNA 软件构建了复合材料层合板鸟撞损伤模型,通过分析层合板鸟撞后的动响应验证了鸟撞过程的 4 个阶段,探讨了鸟撞过程中冲击波在层合板中的传递情况;分析了层合板在鸟撞时先后出现的基体压缩、基体开裂以及纤维断裂这一损伤过程;研究了铺层方式对鸟撞后鸟体的剩余能的影响. 结果表明:合理的设计铺层方式可以有效提升层合板抗撞能力.

关键词: 流固耦合;复合材料;鸟撞;动响应;损伤分析

中图分类号: V215　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.015

0　引言

航空航天由于追求卓越性能的特点,率先成为了复合材料技术实验和技术转化的战场,然而飞机等飞行器在起飞和着陆以及在低空、高速飞行过程中,经常发生和飞鸟、碎石等碰撞的情况,从而导致复合材料的损伤和破坏[1]. 由于复合材料层合板的各向异性以及铺层特点,全部通过试验的方法来研究这些问题耗时耗力,效果也不佳[2],但通过数值模拟方法对复合材料的高速冲击损伤进行研究,对于飞行器的抗撞设计及复合材料再利用有重要的应用价值[3]. 万小朋等[4]利用 LS - DYNA 软件对飞机的机翼前缘进行了抗鸟撞的数值分析. 结果表明:LS - DYNA 在模拟高速撞击时有较高的准确度;杜龙[5]利用 ABAQUS 采用 CEL(耦合欧拉 - 拉格朗日)方法研究了某型无人机复合材料机翼前缘的鸟撞问题,分析了鸟体速度、密度等对于鸟撞动响应的影响;潘雄等[6]采用 SPH 方法针对纤维金属层板进行了鸟撞的动响应分析,探讨了层合板的参数对于鸟撞的影响.

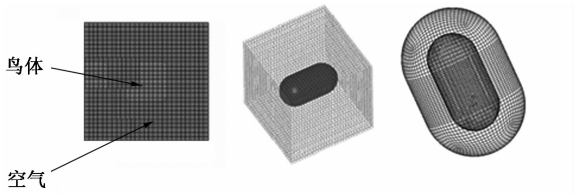
笔者针对高速冲击下的软体冲击即鸟撞问题,基于有限元软件 ANSYS/LS - DYNA,采用流固耦合方法,结合 ALE(任意拉格朗日 - 欧拉)算法,建立复合材料层板冲击损伤模型并对其进行分析,探讨其冲击动响应及损伤情况.

1　损伤分析模型及边界条件

1.1　鸟撞层合板几何及有限元模型

采用 LS - DYNA 进行流固耦合分析时通过 * constrained_lagrange_in_solid 关键字,将流体和固体单元耦合在一起,这需要同时提供鸟体材料扩散流变的空气域.

在以往的文献中,鸟体几何模型及空气域主要有如图 1(a)、(b)所示两种情况[7],即正方体形的鸟体造型和中间圆柱两端球形的造型,而空气域均为立方体造型. 现通过查阅大量资料并通过实际模拟对比优化,鸟体几何外形采用中间圆柱两端球形的造型,质量采用国际通用的 1.8 kg,空气域则设计为与鸟体相仿的中空造型,二者均采用 solid164 单元构建,如图 1(c)所示.



(a) 正方形鸟体　(b) 立方体空气域　(c) 与鸟体相仿空气域

图 1　鸟体有限元模型

Fig. 1　Finite element model of the bird

鸟体几何外形如图 2(a)所示,单位为 cm. 对

收稿日期:2015 - 06 - 20;**修订日期:**2015 - 08 - 10

基金项目:国家自然科学基金民航联合研究重点支持项目(U1333201);国家自然科学基金资助项目(51205370)

作者简介:李成(1962—),男,新疆乌鲁木齐人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事复合材料强度研究,E-mail:chegnli@ zzu. edu. cn.

于层合板,考虑到高速冲击下,层合板的破坏形式主要为板内损伤,故层合板采用 shell163 单元构建,并且不再设置层间单元,其尺寸为长宽均为 500 mm 的正方形板,鸟体采用垂直撞击方式,最终的鸟撞层合板有限元模型如图 2(b)所示.

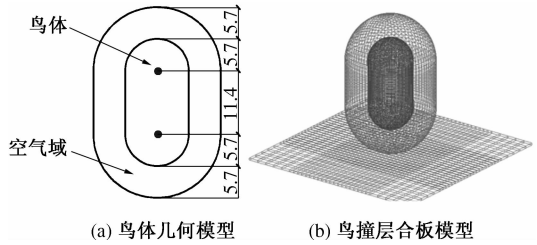


图 2　鸟体几何模型及鸟撞层合板模型

Fig. 2　Geometry model of bird and the bird impact laminates model

1.2　鸟体及层合板材料模型和参数的选取

1.2.1　鸟体材料模型及参数

考虑到鸟撞层合板是一个瞬时的高度非线性碰撞,其冲击过程中鸟体会呈现出流体的性质,会产生流变和大变形,甚至破碎. 而在流体处理的过程中,需要同时使用两种方式来描述材料,即用本构模型来描述应力和应变,用状态方程来描述体积变形和压力,因此,鸟体的材料模型采用 LS-DYNA 本身提供的空材料模型 * mat_null 来表示其本构,而采用状态方程 EOS 来表示其压力行为应力组件,这样一起为材料提供应力张量.

鸟体和空气域部分参数列于表 1[8]. 表中,C 为压力截断值;S_1、S_2 为 $v_s - v_p$ 曲线的斜率.

表 1　鸟体及空气参数[8]

Tab. 1　the parameters of the bird and air

项目	密度/(g · cm^{-3})	C	S_1	S_2
鸟体	0.998 00	1.647	1.921	-0.096
空气	0.001 25	0.343	0	0

1.2.2　层合板材料模型及参数

层合板考虑到其单元属性及可能发生的破坏形式,采用 LS-DYNA 提供的 22 号材料模型 * mat_composite_damage 来模拟,该模型为 Chang-Chang Composite Failure Model, 主要包含 3 个失效准则.

(1)基体开裂失效:

$$F_{\text{matrix}} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + \bar{\tau}. \tag{3}$$

当 $F_{\text{matrix}} > 1$ 时,基体开裂失效.

(2)压缩失效:

$$F_{\text{comp}} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{C_2}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_2}{C_2} + \bar{\tau}. \tag{4}$$

当 $F_{\text{comp}} > 1$ 时,材料压缩失效.

(3)纤维断裂失效:

$$F_{\text{fiber}} = \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + \bar{\tau}. \tag{5}$$

当 $F_{\text{fiber}} > 1$ 时,材料最终失效,之后材料参数均被重置为 0.

上述 3 个失效准则公式中,S_1 为纵向拉伸强度;S_2 为横向拉伸强度;S_{12} 为剪切强度,C_2 为横向压缩强度;σ_1、σ_2 为材料两个方向的主应力,$\bar{\tau}$ 为剪切应力与剪切强度的比值;F_{matrix}、F_{comp}、F_{fiber} 分别为基体开裂、基体压缩、纤维断裂判断系数.

层合板单层板参数列于表 2. 表中,ρ 为密度;E_{11},E_{22},E_{33} 为 3 个方向的弹性模量;PR_{12},PR_{23},PR_{31} 为 3 个方向泊松比;G_{12},G_{23},G_{31} 为 3 个方向的剪切模量;X_T,Y_T 分别为纵向和横向拉伸强度;Y_C 为横向压缩强度;E 为体积模量;γ 为剪切强度.

表 2　层合板单层材料参数

Tab. 2　the material parameters of single layer

参数	数值	参数	数值
ρ/(g · cm^{-3})	1.78	G_{12}/GPa	4.17
$E_{11} = E_{22}$/GPa	23.5	G_{23}/GPa	1.8
E_{33}/GPa	8.1	G_{31}/GPa	1.8
PR_{12}	0.13	Y_T/GPa	0.4
PR_{23}	0.13	X_T/GPa	0.004 6
PR_{31}	0.13	Y_C/GPa	0.4
E/GPa	10.6	γ/GPa	0.116

1.3　初始及边界条件

考虑到鸟撞一般发生在飞机起飞和降落等场合,其冲击速度一般设置在 75 ~ 150 m/s;对复合材料层合板,采用四边固支的方式,以模拟鸟撞时较真实的情况.

2　结果及分析

2.1　鸟撞层合板动响应分析

给鸟体赋予 120 m/s 的相对速度,使其正面撞击四边固支的复合材料层合板,图 3 给出了层合板撞击中心点的接触压力随时间的变化曲线. 从图 3 可以看出,大约 0.52 ms 时撞击开始,此时压力迅速增大,达到最大 65 MPa 后开始减小,随后压力值不断振荡,不过振幅不断减小,最终会因为该单元的彻底失效而使压力值为 0,此处由于计算时间的终止,故而最终未能显示到该单元失

效时的状态.根据文献[9],理想鸟体与层合板相撞时,其接触压力变化会分为4个阶段,分别是初始冲击、压力衰减、压力稳定及压力终止.本文的模拟结果与该过程基本吻合,这一方面验证了所建模型的正确性;同时也进一步描述了鸟体在高速冲击下的流变过程.

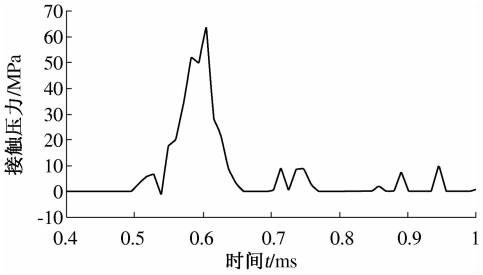


图3 鸟撞中心点接触压力变化曲线

Fig. 3 Contact pressure curves of the center point of bird impact

为了进一步研究鸟撞的动响应过程,选取层合板上从中心到边缘同一直线上的5个单元,如图4所示,提取其接触压力,并绘制时间历程曲线如图5所示.从图5可以看出,单元A由于处于层合板中心,首先遭受冲击,于是其应力值首先达到最大,之后迅速衰减,而单元B、C、D、E的压力变化趋势则与A相仿,这是由于鸟刚撞上时,速度急剧减小,压力急速增大造成,但由于鸟体流变,所以压力又迅速衰减;当时间达到0.8 ms时,单元C衰减后的应力重新开始增大,当达到一定数值后开始第二次衰减,而单元B在0.9 ms时则有相同的趋势,这是由于冲击波回弹造成了应力的二次增大,D、E由于计算时间终止的关系而没有出现类似现象.这说明,层合板遭受鸟撞之后,一方面其应力会迅速增大,并向周围扩散,另一方面应力波还会在板中来回的振荡传递,从而对板不断的相互作用,直至最终衰减为0.

2.2 层合板损伤分析

图6给出了鸟撞层合板不同时刻的应力云图.从图6可以看出,当 $t=0.524$ ms时,鸟体开始与层合板撞击,此时层合板的应力开始出现;当

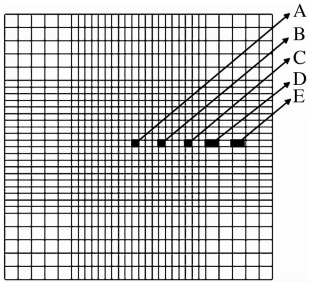


图4 距离中心不等处的单元

Fig. 4 The elements of different distance to the center

$t=0.715$ ms时,鸟体出现部分流变,并向周围扩散,最大应力达到379.7 MPa,鸟体开始对层合板进行贯穿,此时层合板中心处部分单元由于基体压缩等因素而出现不可见失效;当 $t=0.834$ ms时,鸟体流变比较明显,由于鸟体的流变,层合板最大应力值基本稳定在379 MPa左右,但由于位移的不断增大,层合板部分单元出现了纤维断裂,从而最终失效,其失效单元被删除,在图中可以看到失效单元所在的位置;当 $t=1.0$ ms时,计算终止,此时,层合板已被深度贯穿,鸟体也发生大范围的扩散,层合板中心处大部分单元由于过大的拉伸位移,而造成纤维断裂等最终失效.

2.3 不同铺层方式下鸟体剩余能分析

鸟体在撞击层合板后,其剩余能量的多少,可以作为层合板抗撞能力的一个指标,在此,设置不同铺层方式的层合板,使其承受正面的鸟体冲击,之后根据鸟体的剩余能,可以判断铺层方式对于层合板抗鸟撞的影响.图7绘出了[0/45/90/45/0],

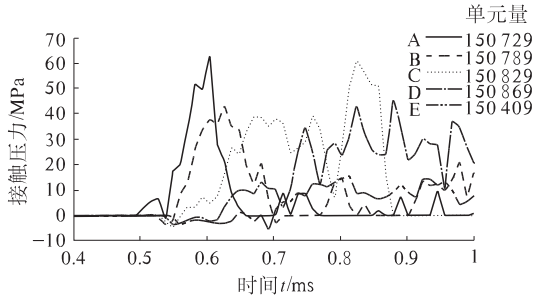


图5 所选单元接触压力变化

Fig. 5 Contact pressure of the slected elements

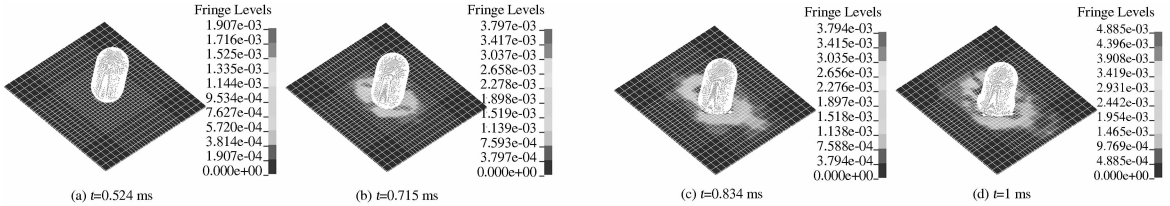


图6 不同时刻鸟撞层合板应力云图

Fig. 6 Vonmise of bird impact in different time

[0/90/0/90/0],[45/-45/45/-45/45]3 种铺层下的鸟体动能时间历程曲线.通过比较,采用后两种铺层方式下的鸟体能量损失分别比第一种多 7.7% 和 6.84%,即层合板在后两种铺层下所吸收的能量均多于第一种铺层的情况.可见在不改变层合板质量的情况下,通过改变铺层方式是可以有效提升层合板的吸能情况,从而提高其抗撞击能力.

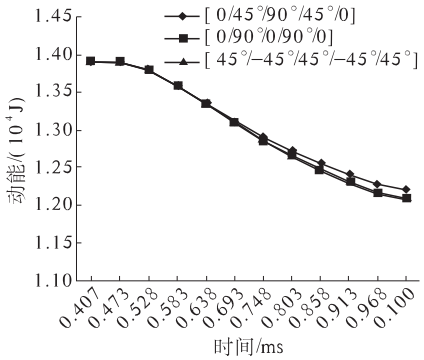


图 7　不同铺层方式下鸟体动能时间历程曲线

Fig. 7　The time-history curve of the bird kinetic energy of different layer styles

3　结论

通过流固耦合方法,对鸟撞层合板进行分析,主要得出以下结论:

(1)层合板在遭受鸟撞的情况下,其中心处压力会经历迅速增大,衰减,振荡,最终减小为零这样一个过程,在该过程中,冲击波从中心向周围传递,同时冲击过程中会出现波的来回振荡.

(2)在鸟撞过程中,鸟体会出现较大流变,而层合板则由于鸟体的正面冲击,先后出现基体压缩,基体破裂,纤维断裂,以致最终失效这一过程.

(3)在不改变层合板质量的情况下,合理的铺设层合板铺角可以有效的提升其抗撞击能力.

参考文献:

[1] 贾建东,李志强,杨建林,等. 用 SPH 和有限元方法研究鸟撞飞机风挡问题[J]. 航空学报,2010,31(1):136-142.

[2] LAVOIE M A, GAKWAYA A, NEJAD ENSAN M, et al. Bird's substitute tests results and evaluation of available numerical methods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(10):1276-1287.

[3] HANSSEN A G, GIRARD Y, OLOVSSON L, et al. A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(7):1127-1144.

[4] 万小朋,龚伦. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的飞机机翼前缘抗鸟撞分析[J]. 西北工业大学学报,2007,25(2):285-288.

[5] 杜龙. 基于欧拉-拉格朗日方法的复合材料机翼前缘鸟撞模拟[J]. 振动与冲击,2012,31(7):137-141.

[6] 潘雄. 纤维金属层板鸟撞动响应分析及应用研究[D]. 南京:南京航天航空大学航空宇航学院,2011.

[7] 郑涵天,王富生,岳珠峰. 复合材料雷达罩鸟撞破坏流固耦合动响应分析[J]. 振动与冲击,2012,31(8):170-175.

[8] 叶党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:201-202.

[9] 林长亮,王浩文. 采用流固耦合方法的直升机桨叶鸟撞数值模拟[J]. 科学技术与工程,2012,12(1):1-6.

Analysis of Bird Impact on Composite Laminates by Fluid-Solid Coupling Method

LI Cheng, GUO Wenhui, TIE Ying

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

Abstract: With the fluid-solid coupling method, damage model of the composite laminates under bird impact is built by using the software LS-DYNA; through analyzing the dynamic response of the laminates, four stages of the bird impact process are verified, and spreading of the impact wave in the laminates is discussed. The progressive damage process of matrix compression, matrix cracking, and fiber fracture during the bird impact is analyzed. The effect of different layer styles on residual energy of the bird after impact is studied, and the result proves that properly designed layer style can improve the anti-impact capacity of the laminates effectively.

Key words: fluid-solid coupling; composite; bird impact; dynamic response; damage analysis

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0080 - 05

驱动力矩对汽车操纵稳定性影响的仿真分析

夏长高, 许颖聪

(江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212000)

摘　要: 为了研究驱动力矩在驱动/转向工况下对汽车操纵稳定性的影响,建立了包含纵向运动、侧向运动、横摆运动以及前、后车轮转动在内的非线性 5 自由度整车模型. 通过理论推导和建模仿真,得出驱动力矩对汽车操纵稳定性的影响来自 3 个方面:轮胎纵向力在侧向的分量、轮胎纵向力对侧偏力的影响和纵向车速的变化. 通过对前轮驱动车型进行仿真,结果表明,驱动力矩的增大会使整车转向性能减弱,驱动轮打滑时,汽车失去转向能力.

关键词: 车辆;操纵稳定性;驱动力矩;驱动/转向;仿真

中图分类号: U461.6　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.016

0　引言

汽车的操纵稳定性对汽车安全行驶的影响非常重要. 在前人所做的汽车操纵稳定性分析中,以假设纵向车速不变的线性 2 自由度模型[1]为基础建立整车模型,研究汽车转向特性. 如 Zheng[1] 和 Lenart[2] 使用线性 2 自由度模型来研究针对前轮的主动转向,以达到改善操纵稳定性的目的. 吉林大学的刘宝会[3]也用线性 2 自由度模型来研究汽车转向特性,并设计了一种通过转向轮到方向盘之间的变传动比机构,使汽车获得良好的操纵稳定性. 然而在实际转向过程中,驱动力矩的变化会引起滑移率的变化,导致驱动轮的纵向力和侧偏力发生变化,从而纵向车速也随之发生改变. 由于线性 2 自由度模型认为纵向车速不变,轮胎纵向力在侧向的分量、轮胎纵向力对侧偏力的影响和纵向车速的变化这 3 个因素会导致线性 2 自由度模型的仿真结果与实际结果产生很大误差,并且这类模型无法在驱动/转向工况下进行操纵稳定性的研究. 南京林业大学的 Wang 等[4]在对后轮转向系统的研究中将 2 自由度模型扩展到 4 轮转向模型,但是并没有将轮胎纵向力考虑在内,只是单纯地认为轮胎侧偏力仅随着侧偏角的变化而变化. 清华大学的 Dai 等[5]考虑了整车的纵向和侧向联合运动控制,改善汽车的操纵稳定性,但是并没有关于汽车本身驱动力矩对操纵稳定性的影响研究. 江苏大学的王继磊[6]重新建立了 8 自由度(包括车身侧向、纵向、横摆、侧倾和 4 个车轮的转动)整车模型,将汽车纵向运动纳入模型进行仿真,并通过附加横摆力矩获得较好的操纵稳定性,但是他并没有进行驱动/转向工况下的稳定性研究. Setiawan 等[7]建立了 14 个自由度的整车模型,其中包含车身的纵向、横向、垂直、横摆、俯仰和侧倾 6 个自由度,以及 4 个车轮的转动和振动,但是也没有给出纵向运动对汽车操纵稳定性的影响,只是在纵向车速为定值的情况下,对汽车转向特性进行了仿真分析.

为了研究在驱动/转向工况下汽车的转向特性,获得驱动力矩对汽车操纵稳定性的影响结果,笔者通过 MATLAB/SIMULINK 软件,建立了 5 自由度(包括车身的纵向、侧向和横摆以及前、后车轮的转动)整车模型,并对驱动/转向工况下的汽车转向进行了仿真分析.

1　整车模型的建立

笔者所建前轮驱动转向模型主要包括:3 自由度车身模型、魔术轮胎模型、滑移率模型、垂直载荷模型和侧偏角模型,共 5 大模块. 由于本模型包含纵向运动受力方程,将道路阻力系数、空气阻力系数和加速阻力考虑进来,仿真结果与文献

收稿日期: 2015 - 06 - 07;**修订日期:** 2015 - 08 - 19

基金项目: 江苏省科技计划资助项目(BY2013065;BE2013447)

作者简介: 夏长高(1965—),江苏兴化人,江苏大学教授,博士,主要从事汽车零部件 CAD/CAE 集成与应用、汽车系统动力学与控制研究,E-mail:771652018@qq.com.

[1-7]所建模型相比更符合实际,并且可以实现在驱动/转向工况下的仿真研究.

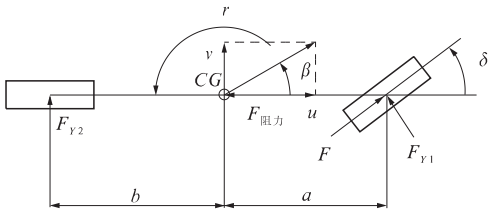


图 1　5 自由度汽车模型

Fig. 1　5DOF Vehicle model

1.1　3 自由度车身模型

车身运动方程[8]:

$$m(\dot{u}-vr)=F\cos\delta-F_{Y1}\sin\delta-\frac{C_DA}{21.15}u^2-G\psi;\tag{1}$$

$$m(\dot{v}+ur)=F_{Y1}\cos\delta+F_{Y2}+F\sin\delta;\tag{2}$$

$$J\dot{r}=aF_{Y1}\cos\delta-bF_{Y2}+aF\sin\delta.\tag{3}$$

由式(1)、式(2)和式(3),可得

$$\begin{cases}\dot{u}=\dfrac{1}{m}(F\cos\delta-F_{Y1}\sin\delta-\dfrac{C_DA}{21.15}u^2-G\psi+mvr);\\ \dot{v}=\dfrac{1}{m}(F_{Y1}\cos\delta+F_{Y2}+F\sin\delta-mur);\\ \dot{r}=\dfrac{1}{J}(aF_{Y1}\cos\delta-bF_{Y2}+aF\sin\delta).\end{cases}\tag{4}$$

式中:m 为整车质量;a、b 分别为质心到前、后轴的水平距离;J 为整车绕质心的转动惯量;F 为前轮纵向力;F_{Y1}、F_{Y2}分别为前、后轮侧偏力;δ 为前轮转角;u 为纵向车速;v 为侧向车速;r 为横摆角速度;C_D 为风阻系数;A 为汽车迎风面积;ψ 为道路阻力系数.

由公式(4)可以看出,轮胎纵向力在侧向上的分量会使得侧向加速度和横摆角速度变大.

1.2　驱动与转弯联合工况下的魔术轮胎模型

使用魔术轮胎公式并计入附着系数 μ 的影响[9]. 纯侧偏工况下轮胎侧向力:

$$Fy_0=\mu D\sin((5/4-\mu/4)C\cdot\arctan((2-\mu)B(1-E)x+E\arctan((2-\mu)Bx)))+S_v;\tag{5}$$

其中,　$x=\partial+S_h$.

纯侧偏工况下轮胎纵向力:

$$Fx_0=\mu D\sin((5/4-\mu/4)C\times\arctan((2-\mu)B(1-E)s+E\arctan((2-\mu)Bs))).\tag{6}$$

式中:∂为轮胎侧偏角;s 为轮胎滑移率;D 为峰值因子;B 为刚度因子;E 为曲线曲率因子;C 为曲线形状因子;S_h 为曲线的水平方向漂移;S_v 为曲线的垂直方向漂移,具体取值请参考文献[10].

假设轮胎各向同性,从"魔术公式"轮胎模型得到的侧向力和纵向力,在制动/驱动和转向联合工况下需要通过滑移率和侧偏角修正[10]:

$$\begin{cases}F_x=-\dfrac{\sigma_x}{\sigma}Fx_0,F_y=-\dfrac{\sigma_y}{\sigma}Fy_0,\\ \sigma=\sqrt{\sigma_x{}^2+\sigma_y{}^2},\\ \sigma_x=-\dfrac{s}{1+s},\sigma_y=-\dfrac{\tan\partial}{1+s}.\end{cases}\tag{7}$$

式中:F_x 和 F_y 分别为轮胎纵向力和侧向力;σ 为规格化的滑动率;σ_x 和 σ_y 为 σ 在纵向和侧向上的分量.

轮胎纵向力与侧向力的关系如图 2 所示. 从图 2 可以看出,轮胎纵向力的增大会使得轮胎侧向力大幅减小,这是驱动力矩对汽车操纵稳定性影响的一个重要因素.

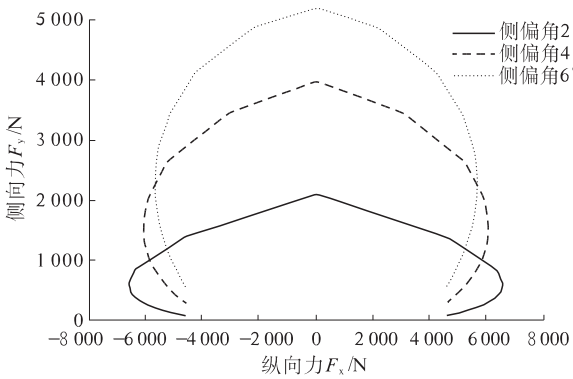


图 2　轮胎侧向力与纵向力的关系

Fig. 2　Relationship between the longitudinal and lateral tireforce

1.3　滑移率模型

滑移率模型中包含车轮滚动模型.

车轮动力学方程:

$$I\dot{w}=T_d-FR-T_b;\tag{8}$$

由上式得:

$$w=\int\frac{T_d-FR-T_b}{I}dt+w_0;\tag{9}$$

滑移率方程:

$$s=\left|1-\frac{Rw}{u}\right|.\tag{10}$$

式中:w 为车轮转速;w_0 为初始车轮转速;T_d 为作用在车轮的驱动力矩;F 为轮胎纵向力;T_b 为车轮滚动阻力矩;s 为滑移率;R 为车轮半径;I 为车轮转动惯量.

1.4 垂直载荷模块

忽略由侧倾和俯仰运动所引起的前、后车轮的载荷转移,所以前、后车轮的垂直载荷可表示为

$$F_{z1}=\frac{mgb}{L}. \tag{11}$$

$$F_{z2}=\frac{mga}{L}. \tag{12}$$

式中:轴距 $L=a+b$.

1.5 侧偏角模块

汽车前、后轮侧偏角与运动参数有关. 汽车前、后轴中点的速度为 u_1、u_2,侧偏角为 α_1、α_2,质心的侧偏角为 $\beta=\frac{v}{u}$. ξ 是 u_1 与 x 轴的夹角,其值为[1]

$$\xi=\frac{v+ar}{u}=\beta+\frac{ar}{u}. \tag{13}$$

根据汽车坐标系的规定,前、后轮侧偏角可表示为

$$\alpha_1=\beta+\frac{ar}{u}-\delta; \tag{14}$$

$$\alpha_2=\beta-\frac{br}{u}. \tag{15}$$

综合上述 5 大模块在 MATLAB/SIMULINK 中实现图形建模如图 3 所示. 汽车模型参数如表 3 所示.

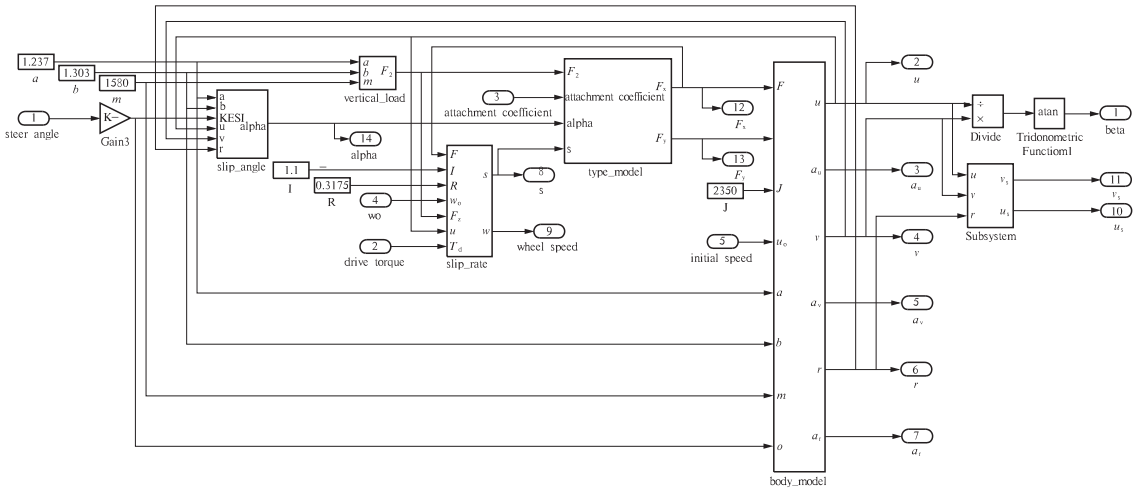


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

表 1 汽车模型参数

Tab. 1 The parameters of vehicle model

整车质量 m/kg	质心到前轴距离 a/m	质心到后轴距离 b/m	轮胎半径 R/m	车轮转动惯量 I/(kg·m^2)	绕质心转动惯量 J/(kg·m^2)	风阻系数 C_D/m^2	迎风面积 A/m^2	道路阻力系数 ψ/m^2
1 580	1.237	1.303	0.3175	1.1	2 350	0.36	1.8	0.01

2 仿真与结果

仿真工况:前轮角阶跃输入 0.04 rad,作用在驱动轴上的驱动力矩分别为 257,600,830 N·m,路面附着系数 $\mu=0.4$,初始车速为 25 m/s.

驱动力矩和轮胎纵向力的关系如图 4 所示. 由图 4 可以看出,驱动力矩的增大使得轮胎纵向力增大. 当驱动力矩达到 830 N·m 时,由于驱动轮发生打滑,所以纵向力急剧降低. 由于驱动轮是前轮,后轮纵向力很小且为负值.

驱动力矩和轮胎侧偏力的关系如图 5 所示. 由图 5 可以看出,驱动力矩的增大使得轮胎侧偏力变小. 当驱动力矩不变时,由于驱动轮上的滑

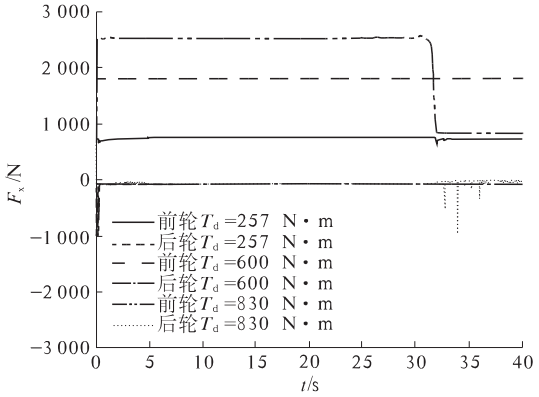


图 4 轮胎纵向力

Fig. 4 Longitudinal tire force

移率会随着加速度的减小而减小,从而导致驱动力矩在 600 N·m 时的前后轮的侧偏力会随着时间而变大;驱动力矩为 600 N·m 时前后轮的侧偏角差值较 257 N·m 时更小,横摆角速度也减小. 当驱动力矩在 830 N·m 时,由于驱动轮打滑,前轮侧偏力急剧降低,后轮侧偏力随之降低且产生较大波动.

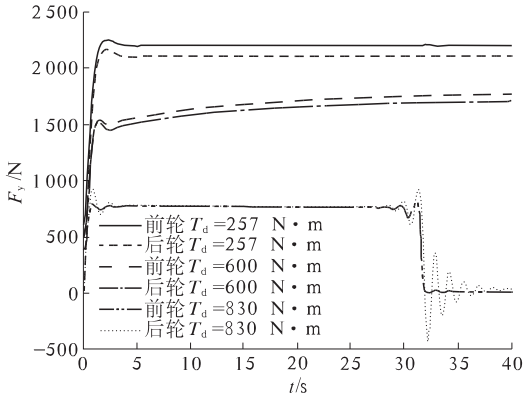


图 5　前、后车轮的轮胎侧偏力

Fig. 5　Longitudinal force of front and rear tires

驱动力矩和质心侧偏角的关系如图 6 所示. 由图 6 可以看出,驱动力矩的增大导致前轮角阶跃输入下的质心侧偏角瞬态响应值降低,增加了不足转向性能. 驱动力矩在 600 N·m 时,滑移率随着时间增加而逐渐降低,驱动轮上的侧偏力变大,整车的转向性能有所提高,质心侧偏角负向增大. 当驱动力矩增大到 830 N·m 时,车轮打滑,质心侧偏角急剧增大到 0,且出现较大波动.

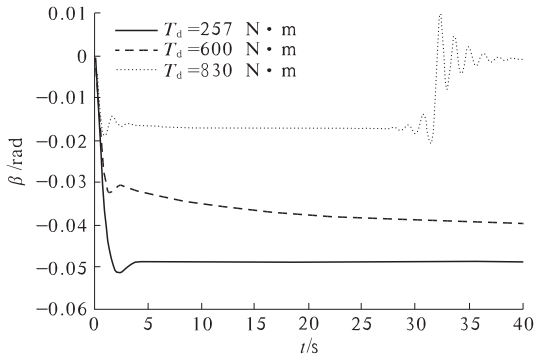


图 6　质心侧偏角

Fig. 6　Vehicle sideslip angle

驱动力矩和横摆角速度的关系如图 7 所示. 由图 7 可以看出,驱动力矩的增大导致前轮角阶跃输入下的横摆角速度瞬态响应值降低,减弱了汽车的转向能力. 驱动力矩在 600 N·m 时横摆角速度随着时间的增加而持续降低;驱动力矩增大到 830 N·m 时,车轮打滑,横摆角速度从整体趋势上缓慢降到 0,且出现较大波动.

驱动力矩和侧向加速度的关系如图 8 所示. 由图 8 可知,驱动力矩的增大导致前轮角阶跃输入下的侧向加速度瞬态响应值降低,减弱了汽车的转向能力. 驱动力矩在 600 N·m 时,侧向加速度随着时间的增加而增大;当驱动力矩增大到 830 N·m 时,车轮出现打滑,侧向加速度急剧降到 0,且出现较大波动.

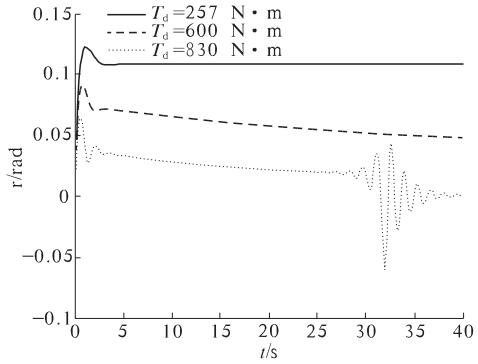


图 7　横摆角速度

Fig. 7　Yaw velocity

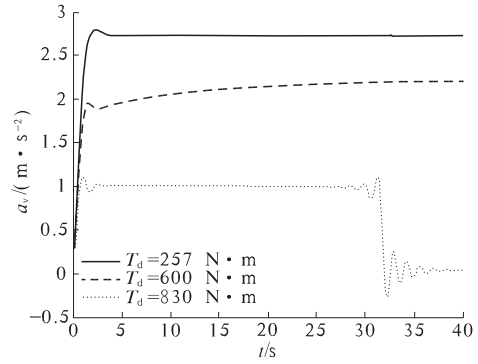


图 8　侧向加速度

Fig. 8　Lateral acceleration

汽车的侧向位移与纵向位移的关系如图 9 所示. 由图 9 可以直观地看出,由于驱动力矩的增大,使得汽车的转向半径增大;当驱动力矩达到 830 N·m 时,前轮打滑,汽车失去转向能力.

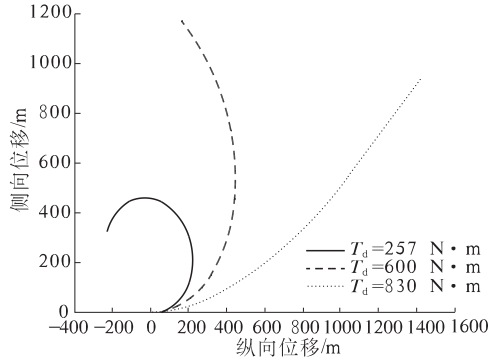


图 9　汽车行驶轨迹图

Fig. 9　Movement track of vehicle

不同驱动力矩下的轮胎滑移率随时间的变化关系如图 10 所示. 由图 10 可以看出,驱动力矩的增大使得滑移率增大,驱动力矩在 830 N·m 时,滑移率 s 达到了 1,驱动轮打滑.

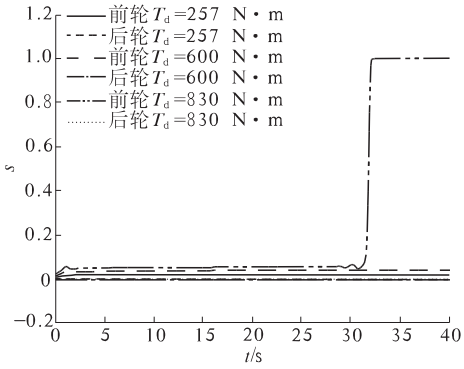


图 10 前、后轮胎的滑移率

Fig. 10 Slip rate of front and rear tire

3 结论

通过仿真分析研究了驱动力矩在驱动/转向工况下对汽车操纵稳定性的影响. 这种影响主要来自于 3 个部分:第一部分是前轮的轮胎纵向力在侧向的分量的影响,这一部分会增大汽车的转向性能;第二部分是轮胎纵向力对侧偏力的影响,这一部分会降低汽车的转向性能;第三部分是纵向车速变化的影响.

在综合以上 3 种因素的情况下通过 MATLAB/SIMULINK 仿真得出以下结论:前轮驱动汽车在驱动/转向工况下,驱动力矩的增大,会使得汽车整体转向性能不足,转向半径变大,质心侧偏角、横摆角速度和侧向加速度更趋向于 0;驱动力矩增大到一定程度时,驱动轮会打滑,汽车失去转向能力.

参考文献:

[1] 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] ZHENG B, OH P, LENART B. Active steering control with front wheel steering[C]//American Control Conference (ACC104). Boston, Mass, USA: IEEE Press, 2004: 1475 – 1480.

[3] 刘宝会. 轿车主动转向系统研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2011.

[4] WANG Yu, TIAN Jie, CHEN Ning, et al. Handling performances of vehicle with a fractional compliant rear-wheel steering system[R]. ICFDA, 2014: 1 – 6.

[5] DAI Yifan, LUO Yugong, LI Keqiang. Longitudinal andlateral coordinated motion control of four-wheel-independent drive electric vehicles[C]//Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). IEEE Press, 2013: 1 – 9.

[6] 王继磊. 车辆操纵稳定性控制研究[D]. 镇江:江苏大学汽车与交通工程学院,2012.

[7] SETIAWAN J D, SAFARUDIN M, SINGH A. Modeling, simulation and validation of 14 DOF full vehicle model[C]//ICICI-BME, IEEE Press, 2009: 1 – 6.

[8] THOMAS D J. Fundamentals of vehicle dynamics[M]. NewYork, America: Society of Automotive Engineers, 2000.

[9] BAKKER E, NYBORG L, PAEEJKA H B. Tyre modelling for use in vechicle dynamices study[R]. SAE Paper No. 870421, 1987.

[10] 张长冲. ESP-汽车电子稳定系统仿真研究[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2007.

Simulation Analysis for the Drive Torque Impact on Vehicle Handling Stability

XIA Changgao, XU Yingcong

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: To analyze the influence of the drive torque on vehicle handling stability in the situation of driving and steering, a non-liner 5 degree of freedom full vehicle model is established, including the longitudinal motion, the lateral motion, the yaw motion and the rotations of the front and rear wheels. The weight of the tire longitudinal force in the lateral, the influence of the longitudinal tire force on the corning stiffness and the variable longitudinal speeds are the three aspects impact vehicle handling stability by theoretical derivation and simulation. By simulating the front drive vehicle, the result shows that, the steering performance is getting worse with the drive torque increasing; even worse, the steering ability will be lost when the drive wheels are shipped.

Key words: vehicle; handling stability; drive torque; driving and steering; simulation.

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0085 - 05

激光焊接熔池特性的三维数值模拟

梅丽芳，陈由海，严东兵，葛晓宏，王俊琦

(厦门理工学院 机械与汽车工程学院,福建 厦门 361024)

摘　要: 为了对激光深熔焊接熔池特性进行三维解析模拟,基于一定的基本假设条件将焊接过程视为准稳态过程,应用激光焊接低碳钢熔池形状和温度分布的三维控制数学模型,以求解相态转变界面为基础,将对激光深熔焊接熔池特性的模拟简化为对气 - 液相界面和固 - 液相界面位置和温度分布的积分方程的求解,得出了焊接试样上的熔池几何形状和温度分布情况. 结果表明:熔池形状相对光轴中心向后偏移,且熔池前沿壁陡峭,后沿壁过渡平滑;熔池深度和宽度随着激光功率的增大同步增大,随焊接速度的增加同步减小,随光斑尺寸增大熔宽增大而熔深减小;熔池各层面上的最高温度点均偏后于光束中心,等温线分布密集表明激光焊接热影响区窄.

关键词: 激光技术;焊接;熔池形状;温度;数值模拟

中图分类号: TG456.7　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.017

0　引言

激光焊接作为现代制造业不可或缺的工艺,在车身材料加工领域一直发挥着重要作用,其焊接产品质量备受关注. 由于激光焊接时,工件表面发生强烈的熔化与汽化蒸发,需严格控制焊接热量输入,以防止变形、气孔、飞溅、烧损等缺陷产生,因而优化工艺参数、控制激光焊接熔池形态成为保证焊接质量的关键技术[1]. 因此,同步模拟固相、液相、气相状态下焊接接头各相区的清晰界面,准确获得焊接小孔、熔池几何形状及温度场分布与激光焊接工艺参数之间的关系显得尤为重要. 目前,数值模拟方法在激光焊接领域中的应用主要集中在焊接熔池温度场和应力场的计算分析[2-3],而有关应用数值模拟的方法研究焊接工艺参数对小孔与熔池几何形状影响的报道较少,尤其是对其进行三维的解析模拟甚少. 因此,笔者通过对激光焊接低碳钢小孔与熔池形状及温度分布的数学控制模型进行计算后,拟得出基于焊接实际过程的小孔和熔池的三维形状与温度场;研究不同工艺参数下的熔池几何形状,以期获取焊接熔池宽度和深度与工艺参数之间的相互关系,研究结果可为激光焊接工艺试验提供理论参考与指导.

1　熔池特性的数学模型

笔者采用准稳态方法,将动态熔化过程视为不同位置的静态固 - 液相界面组成;将动态小孔视为不同位置的静态气 - 液相界面组成.

1.1　数学模型的基本假设

为建立准稳态下激光深熔焊接的小孔与熔池形状和温度分布的数学模型,特作以下假设:① 试样材料各向同性,且材料的热物理性能参数不随温度变化;② 不考虑熔池深度方向的热传导及对流;③ 忽略试样表面的对流影响;④ 试样的初始温度与室温相同. 设近似高斯分布的激光光束沿 z 轴方向垂直入射至试样表面,并以恒定的速度 v 沿 x 轴正向移动,移动坐标系(x, y, z)的原点为激光光束的中心点,如图 1 所示.

1.2　熔池形状的控制方程

基于上述假设,对于激光深熔焊接的气-液与固-液相界面的准稳态能量平衡方程分别为[4]

$$q_{\text{laser}} + k_{\text{l}}\left[1+\left(\frac{\partial s_{\text{l}}}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial s_{\text{l}}}{\partial y}\right)^2\right]\left(\frac{\partial T_{\text{l}}}{\partial z}\right) = -\rho L_{\text{b}} v\frac{\partial s_{\text{l}}}{\partial x}. \quad (1)$$

$$\left(k_{\text{s}}\frac{\partial T_{\text{s}}}{\partial z}-k_{\text{l}}\frac{\partial T_{\text{l}}}{\partial z}\right)\left[1+\left(\frac{\partial s_{\text{s}}}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial s_{\text{s}}}{\partial y}\right)^2\right] = -\rho L_{\text{m}} v\frac{\partial s_{\text{s}}}{\partial x}. \quad (2)$$

收稿日期: 2015 - 06 - 30;**修订日期:** 2015 - 08 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405411);福建省自然科学基金资助项目(2013J05085)

作者简介: 梅丽芳(1982—),女,湖南永州人,厦门理工学院副教授,博士,主要从事激光加工研究,E-mail:meilifang0804@163.com.

式中:q_{laser}为入射激光热流密度;k_l,k_s 分别为材料液相区和固相区的热传导系数;L_b,L_m 分别为材料的汽化潜热和熔化潜热;s_l,s_s 分别表示材料的气-液相界面和固-液相界面;T_s,T_l 分别为材料固相区和液相区的温度;ρ 为材料密度.

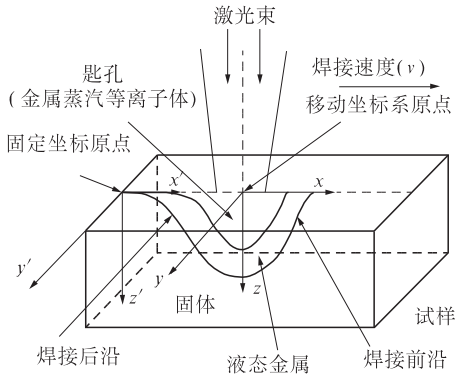


图 1 激光深熔焊接熔池几何形状示意图

Fig. 1 Sketches of laser welding pool shape

经一系列数学理论推导,得到气-液相和固-液相相界面的数学表达式为

$$s_l(x,y)=\begin{cases}\dfrac{K_l}{2L_b}\left(\dfrac{AP}{\pi\rho v}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\dfrac{L_b+L_m+C_p(T_b-T_0)}{3R}\right)^{\frac{1}{3}}\cdot\\ \exp\left(-\dfrac{2(x+x_{ml})^2}{L_{fl}^2}\right)\exp\left(-\dfrac{2y^2}{L_l^2}\right),x\geqslant -x_{ml};\\ \dfrac{K_l}{2L_b}\left(\dfrac{AP}{\pi\rho v}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\dfrac{L_b+L_m+C_p(T_b-T_0)}{3R}\right)^{\frac{1}{3}}\cdot\\ \exp\left(-\dfrac{2(x+x_{ml})^2}{L_{rl}^2}\right)\exp\left(-\dfrac{2y^2}{L_l^2}\right),x<-x_{ml}.\end{cases}\tag{3}$$

$$s_s(x,y)=\begin{cases}\dfrac{K_s}{2L_m}\left(\dfrac{AP}{\pi\rho v}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\dfrac{L_m+C_p(T_m-T_0)}{3R}\right)^{\frac{1}{3}}\cdot\\ \exp\left(-\dfrac{2(x+x_{ms})^2}{L_{fs}^2}\right)\exp\left(-\dfrac{2y^2}{L_s^2}\right),x\geqslant -x_{ms};\\ \dfrac{K_s}{2L_m}\left(\dfrac{AP}{\pi\rho v}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\dfrac{L_m+C_p(T_m-T_0)}{3R}\right)^{\frac{1}{3}}\cdot\\ \exp\left(-\dfrac{2(x+x_{ms})^2}{L_{rs}^2}\right)\exp\left(-\dfrac{2y^2}{L_s^2}\right),x<-x_{ms}.\end{cases}\tag{4}$$

式中:A 为材料对激光能量的吸收系数;P 为激光功率;R 为激光光斑半径;T_b 为汽化温度;T_m 为熔化温度;T_0 为初始温度;C_p 为定压比热容;x_{ml}和 x_{ms}分别为气-液和固-液相界面的底部在 x 方向上的位移量,$x_{ml}=vR^2/\alpha_l$,$x_{ms}=vR^2/\alpha_s$,其中,α_l 和 α_s 分别为试件在液相和固相时的热扩散率;K_l,K_s 分别为气-液和固-液相界面曲率影响因子的修正系数;L_l,L_s 分别为气-液和固-液相界面的初始宽度标量;L_{fl}和 L_{fs}分别表示激光光轴中心到熔池前沿的气-液和固-液相界面之间的距离,$L_{fl}=L_l-2R_0$,$L_{fs}=L_s-2R_0$;同理,L_{rl}和 L_{rs}分别为激光光轴中心到熔池后沿的气-液相界面和固-液相界面之间的距离,$L_{rl}=L_l+2R_0$,$L_{rs}=L_s+2R_0$;一般认为熔池的宽度(W)就是固-液相界面轮廓在工件表面的宽度,熔宽可表示为 $W=2L_s$.

1.3 熔池温度分布的控制方程

通过定义边界条件可得出液相区和固相区的温度分布表达式:

$$T_l(x,y,z)=T_b-\frac{T_b-T_m}{s_s(x,y)-s_l(x,y)}[z-s_l(x,y)];\tag{5}$$

$$T_s(x,y,z)=T_0+(T_m-T_0)\exp\left(1-\frac{z}{s_s(x,y)}\right).\tag{6}$$

2 计算结果与分析

基于以上准稳态下的熔池形状和温度分布的数学模型,采用 MATLAB 软件对不同工艺参数下的焊接区域的几何形状和温度场进行了计算,数值分析了激光焊接过程中激光功率、焊接速度和光斑大小对熔池的固-液分界面气-液分界面形状、熔宽及熔深的影响. 材料的主要热物理性能参数如表 1 所示. 计算所用的工艺参数为:激光功率 $P=1\ 700$ W,焊接速度 $v=20$ mm/s,聚焦光斑半径 $R=0.2$ mm. 试样材料对激光的吸收系数为0.65[5].

2.1 熔池的形状

基于给定参数,通过分别对式(3)和式(4)进行计算,得到了熔池的形状. 图 2 所示为熔池的固-液界面分别在 $x-z$ 平面与 $y-z$ 平面上投影的轮廓形状. 在垂直于激光光束前进方向的 $y-z$ 平面上,熔池相界面形状关于激光光轴呈对称分布,见图 2(a),这主要是因为在 y 方向的激光光束能量分布是近似对称的. 而由图 2(b)可以看出,在平行于激光前进方向的 $x-z$ 平面上,熔池相界面

表 1 低碳钢的热物理性能参数值[5]

Tab. 1 Thermophysical properties parameters of steel

材料	密度 ρ/($kg\cdot m^{-3}$)	熔化温度 T_m/K	汽化温度 T_b/K	比热容 C_p/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	熔化潜热 L_m/($J\cdot kg^{-1}$)	沸腾潜热 L_b/($J\cdot kg^{-1}$)	液态扩散率 α_l/($m^2\cdot s^{-1}$)	固态扩散率 α_s/($m^2\cdot s^{-1}$)
低碳钢	7 800	1 803	3 000	620	2.72×10^5	6.3×10^6	4.9×10^{-6}	4.0×10^{-6}

呈不对称分布. 基于上述工艺参数,在 x 方向上,固 - 液分界面的最低点位置处于激光光轴中心后方约 0.2 mm 处.

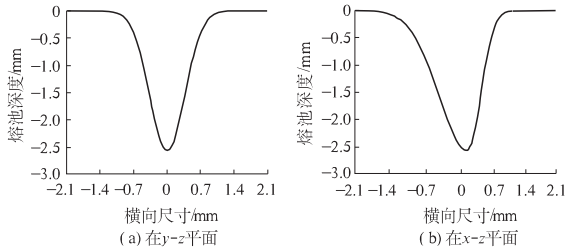


图 2　熔池固 - 液相界面形状

Fig. 2　Solid-liquid interface of laser weld pool shape

图 3 为固 - 液与气 - 液相界面形状的三维视图. 在激光焊接过程中,固 - 液相界面上方的小孔是因部分材料受热蒸发而形成的,小孔与液态金属之间的界面就是气 - 液相界面,而气 - 液相界面与固 - 液相界面之间的区域就是焊接熔池. 由于焊接速度的存在,熔池在焊接速度的反方向上产生拉长. 图中气 - 液相相界面形状便是激光深熔焊中形成的小孔形状,这与文献[6]中通过试验或数值计算所得到的小孔形状相近.

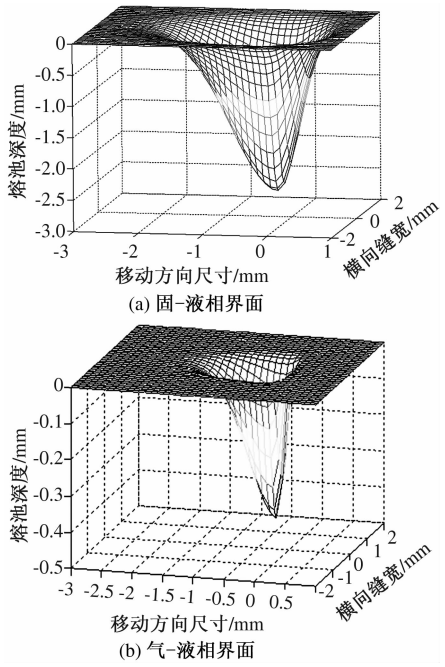


图 3　熔池相界面形状的三维图

Fig. 3　3D diagram of weld pool phase interface shape

2.2　激光焊接工艺参数对熔池形状的影响

笔者研究利用两相界面的数学模型计算激光功率、焊接速度及光斑半径大小等不同工艺参数下的熔池形状,并分析这些工艺参数对熔池宽度和深度的影响.

2.2.1　激光功率的影响

保持 v,R 不变,选取不同的激光功率 P 进行计算. 由图 4 可知,在激光深熔焊接中,随着 P 的增大,焊接试样上固 - 液相界面不断增大,即熔池的深度和宽度均同步增大,这与文献[7]中通过试验所得变化规律一致. 导致这种现象产生的主要原因是增大激光功率增加了作用于焊接试样上的激光能量,试样上熔化区温度升高致使相界面扩大,进而使得熔深和熔宽增大.

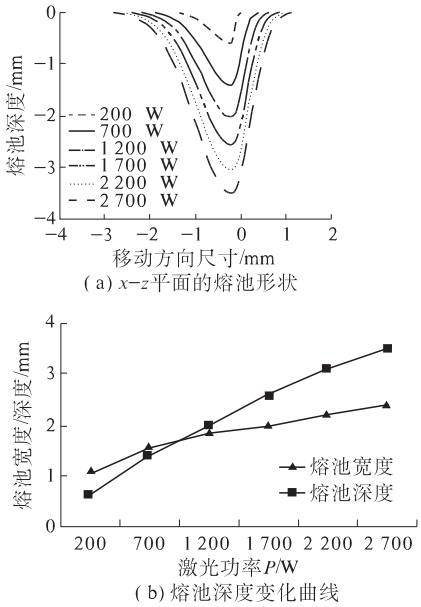


图 4　熔池形状随激光功率变化

Fig. 4　Relationship between weld pool and laser power

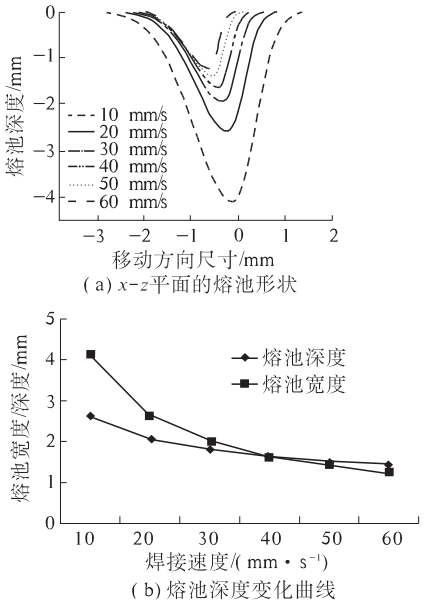
2.2.2　焊接速度的影响

为了研究焊接速度对熔池几何形状的影响,保持 P,R 不变,选取不同的 v 代入模型计算,结果如图 5 所示. 由图 5 可见,在激光焊接过程中,试样上固 - 液相界面随着 v 的增大而不断缩小,即熔池深度和宽度同步减小,这与文献[8]中通过试验所得结果一致. 导致这种现象产生的主要原因是,随着 v 的增大,激光束在试样上的辐照时间变短,试样单位面积上吸收的总热量变小,因此,熔宽和熔深变小. 此外还可发现,低速下的熔池深而宽,高速下的熔池浅而窄.

2.2.3　激光光斑尺寸的影响

工程实际中,激光光斑尺寸也是影响焊接质量的主要因素之一. 保持 P,v 不变,分别选取不同的 R 代入模型计算,结果如图 6 所示. 随着激光光斑尺寸的改变,试样相界面在深度方向上不断减小,在宽度方向上不断增大. 产生这种现象的主要原因是光斑尺寸增大,但总的激光能量不变,试

样单位面积上获得的激光能量下降,进而使得入射至材料表面的激光功率密度降低,相界面在深度方向向上移动,因此,熔池深度变浅.而光斑增大同时导致激光光束照射面积增大,试样上获得激光能量作用的区域更大,相界面在宽度方向上增大,进而使得焊接熔宽增大.

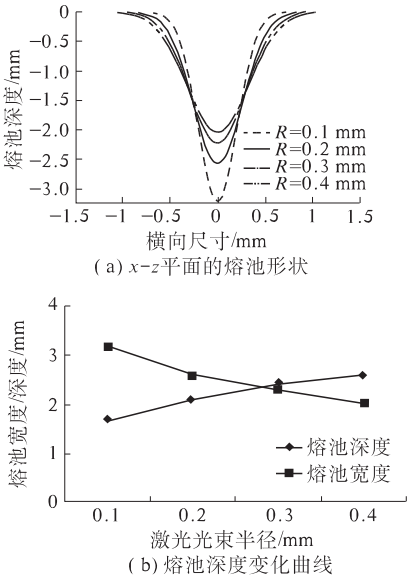


(a) $x-z$平面的熔池形状

(b) 熔池深度变化曲线

图 5 熔池形状随焊接速度的变化

Fig. 5 Relationship between weld pool and weld speed



(a) $x-z$平面的熔池形状

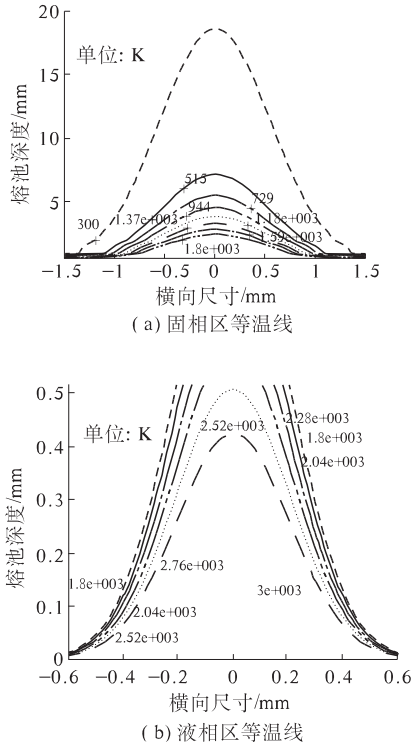
(b) 熔池深度变化曲线

图 6 熔池形状随光斑尺寸的变化

Fig. 6 Relationship between weld pool and laser spot size

2.3 焊缝的温度分布

在给定的工艺参数下,通过对试样固、液相区温度分布数学模型的计算,得出了试样上两相区的温度值大小和分布情况,在 $y-z$ 平面上分布如图 7 所示.由图 7 可见,等温线分布密集,表明热影响区狭窄,这是激光深熔焊接的优点之一.



(a) 固相区等温线

(b) 液相区等温线

图 7 在 $y-z$ 平面上的固相区与液相区等温线

Fig. 7 The isotherm of solid and liquid phase in *Y-Z* plane

图 8 为距熔池表面的深度(z)分别为 0.4,1.0,2.0 和 3.0 mm 的平面上的温度值与分布情况.当熔深 $z=0.4$ mm 时,试样 $x-y$ 平面上的最高温度约为 3 500 K,略大于试样材料的汽化温度,为焊接试样上气相区内的温度,即可视为焊接小孔内的温度,因此,该平面上高于汽化温度的点均处于焊接小孔内.当熔深 $z=1.0$,2.0 mm 时,试样该两熔深处的 $x-y$ 平面上的最高温度分别分别为 2 800,2 000 K,均低于试样材料的汽化温度而高于试样材料的熔化温度,为试样上液相区内的温度,因此,这两处平面上置于熔化温度和汽化温度之间的点均处于焊接熔池内;而当熔深 $z=3.0$ mm 时,试样该熔深处的 $x-y$ 平面上的最高温度为 1 200 K,低于试样材料的熔化温度,为试样上固相区内的温度.

3 结论

(1)通过对激光焊接熔池的气-液和固-液相界面控制模型的数值计算,得出了焊接试样的气-液和固-液相界面的三维几何轮廓形状.

(2)用相界面轮廓形状表征了焊接熔池形状,发现在垂直于前进方向上,熔池形状呈对称性;在平行于前进方向上,熔池最深处相对光轴中

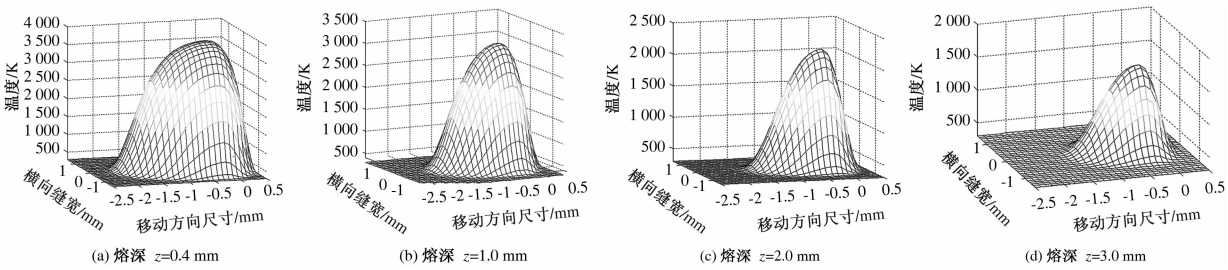


图 8　不同熔深处的温度分布情况

Fig. 8　Temperature distribution at different location

心向后偏移.

(3)熔池几何形状与工艺参数间存在密切的关系:熔深和熔宽随激光功率的增大而增大,随焊接速度的增加而减小;光斑尺寸增大熔深减小而熔宽增大.

(4)试样上液相区和固相区的等温线分布密集,不同熔深处的最高温度点均偏后于光轴中心.

参考文献:

[1] 陈根余,吴克如,廖生慧,等. V 型坡口对钢/铝激光对接熔钎焊性能的影响[J]. 激光技术,2014, 38(1): 11 – 16.

[2] 汪任凭,雷永平,史耀武. 基于光束跟踪的热源模型在激光焊接中的应用[J]. 激光技术,2011, 35(1): 31 – 35.

[3] 刘西霞,黄锐,姚刚,等. 钛合金薄板激光对接焊温度场的数值模拟中的应用[J]. 激光技术,2013, 37(5): 700 – 704.

[4] 熊建钢. 深熔激光焊接小孔和熔池形状数学模型及工艺参数 ANN 优化设计[D]. 武汉:华中科技大学材料工程学院,2001: 34 – 36.

[5] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 192 – 193.

[6] 周惦武,吴平,彭利,等. 镀 Zn 钢 – 6016 铝合金异种金属的激光熔钎焊及数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1738 – 1745.

[7] 董其峰,鄢锉,廖先宇. 激光焊接镀锌钢/冷轧钢异种板材工艺试验研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 665 – 669.

[8] 崔丽,张彦超,贺定勇,等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154 – 159.

Three Dimensional Numerical Simulation of Characteristics of Laser Welding Pool

MEI Lifang, CHEN Youhai, YAN Dongbing, GE Xiaohong, WANG Junqi

(Department of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: For simulating the characteristics of laser deep penetration welding pool in three-dimensional, the welding process was regarded as quasi-steady-state under a certain assumptions, and the mathematical models of pool shape and temperature distribution for laser welding low carbon were applied to solve the phase transformation interface. The mathematical simulations of laser welding pool shape and temperature filed were simplified to solve the integral equation of gas / liquid interface and solid / liquid interface. Then, the characteristics of weld pool shape were obtained. The results show that, for laser weld pool, the lowest point lagged behind the optical axis center, the front wall gradient was steep, and the wear wall gradient was smooth. The weld pool depth and width both increased with the increase of laser power, and decreased with the increase of welding speed. As laser spot radius increases, the weld pool depth increases, and the weld pool width decreases. The highest temperature on the surface of weld pool also lagged behind the optical axis center, and the isothermals distributed dense which would indicate a narrow heat-affected zone.

Key words: laser technology; welding; weld pool shape; temperature; numerical simulation

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0090 - 04

基于 Blob 分析的玻璃纤维织物缺陷检测方法研究

王庆海[1], 赵凤霞[2], 李纪峰[2], 金少搏[2]

(1. 河南机电职业学院 机械工程系,河南 郑州 451191; 2. 郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 为了解决玻璃纤维织物在线检测效率低、实时性差等问题,提出了一种基于 Blob 分析的织物缺陷检测方法. 首先对织物图像采用均值滤波器进行平滑处理,以削弱噪声和织物纹理的干扰,然后采用 Otsu 算法寻找最佳阈值将图像分割为 Blob 和背景的像素集合,采用形态学处理调整分割后的 Blob 形状,最后对图像进行连通性分析和特征提取,通过对 Blob 区域进行最小外接矩形拟合得到缺陷特征的个数和尺寸等信息. 实验结果表明:该方法计算简单、检测结果稳健可靠、实时性好.

关键词: 玻璃纤维织物;在线检测;缝隙缺陷;机器视觉;Blob 分析;Otsu 算法

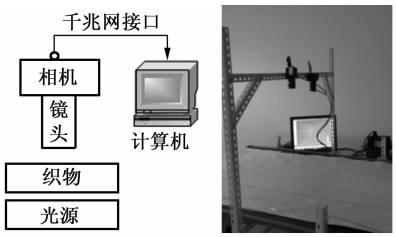
中图分类号: TN911.73　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.018

0　引言

在玻璃纤维织物的生产过程中,织物的缝隙缺陷是影响产品质量的重要因素,也是产品质量控制的主要验收项目之一. 目前,利用机器视觉技术进行织物的质量检测,已经成为国内外研究的热点,且已产生了许多的检测算法,如采用 Gabor 滤波技术的布匹瑕疵检测方法[1];采用 AR 模型的谱估计方法[2];基于纹理模型的疵点检测方法[3];基于小波分析的织物缺陷检测方法[4];采用非下采样 Contourlet 域高斯混合模型的布匹瑕疵识别算法[5];采用图像纹理频谱能量分布的布匹瑕疵检测方法[6];应用纹理增强分水岭的织物瑕疵检测方法[7]等等. 这些方法从不同的侧面可以实现织物的缺陷检测,但是计算复杂度高,实时性不好. 笔者提出采用 Blob 分析方法对织物缺陷进行检测,在检测过程中不需要对缺陷进行边缘提取操作,也不需要进行模板匹配或样本训练,而是对图像中具有相同灰度的连通域进行分析,该方法计算简单,易于实现,且检测结果准确可靠,实时性好,能满足织物缺陷的在线检测需求.

1　图像获取

玻璃纤维织物为缝编织物,是由一层或一层以上的无捻粗纱平行无皱褶排列,各层纱线以相同或不同的方向层叠,再用有机纤维线缝编而成的制品. 织物颜色一般为白色的,在加工过程中织物的质量缺陷主要是断经或间隙造成的缝隙缺陷,要求检测的最小缝隙宽度为 1 mm,长度为 150 mm. 织物的在线生产速度一般为 2 m/min 左右,织物的幅宽范围一般为 200 ~ 2 500 mm. 根据生产实际状况,笔者设计的玻璃纤维织物机器视觉系统如图 1 所示.



(a) 结构布局图　　(b) 实验平台照片

图 1　玻璃纤维织物机器视觉系统

Fig. 1　Glass fiber fabric machine vision system

由图 1 可以看出,相机、镜头和光源组成了机器视觉系统的图像采集模块. 其中,相机采用的是两个全局曝光的 MV - GE130GM 型黑白工业相机(深圳迈德威视公司生产)同步工作,分辨率为 1 280 pixel × 960 pixel,帧率为 60 FPS(大于织物的运动速度),因此,可以获得无拖影的视频图像. 镜头选用日本 Computar 公司的 M0814 - MP2 机器视觉镜头,规格为 2/3″,与所选用的相机相

收稿日期: 2015 - 07 - 11;**修订日期:** 2015 - 08 - 24

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010B460020)

通信作者: 赵凤霞(1971—),女,河南扶沟县人,郑州大学教授,博士,研究方向为精密测量技术,E-mail:zfxmail@163.com.

配,焦距为 8 mm. 相机与计算机之间的接口采用千兆网 GigE 接口,GigE 接口是工业应用所新开发的一种图像接口技术,以 Gigabit Ethernet 协议为标准,可以实现高速的、远距离的图像传输,满足了在线检测的实时性要求. 光源设置在织物下方,采用背光照明方式,这种光源配置方式可以获得高对比度的图像;当织物中有缝隙缺陷时,则缺陷处将有亮光透过;如织物中无缝隙缺陷,则图像中无较大灰度差的特征出现.

图 2 为机器视觉系统获得的图像. 从图 2 可以看出,缝隙缺陷与背景具有较大的灰度差,形成了有利于后续图像处理的成像效果.

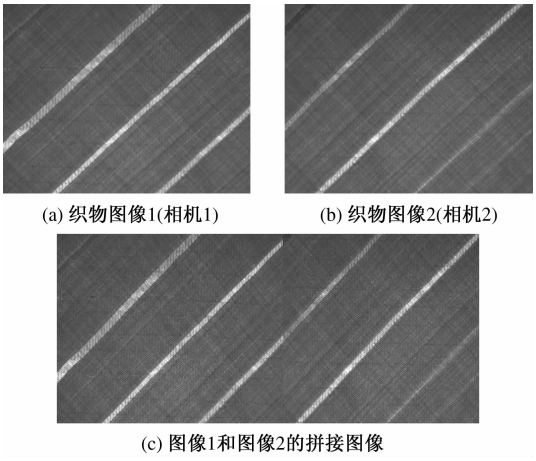

(a) 织物图像1(相机1)　(b) 织物图像2(相机2)
(c) 图像1和图像2的拼接图像

图 2　玻璃纤维织物图像

Fig. 2　Glass fiber fabric image

2　织物缺陷检测的 Blob 分析算法

采用 Blob 分析法对织物缺陷进行检测时,需要把具有相同灰度值的像素构成的连通域分割出来,检测流程如图 3 所示.

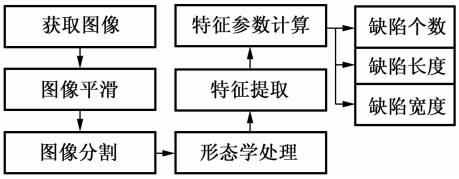


图 3　织物缺陷的 Blob 分析流程

Fig. 3　Blob analysis process for fabric defect

2.1　图像平滑

由于在图像获取过程中受照明光线的方向、亮度、稳定性、柔性织物表面张紧程度不一致、以及图像拼接接缝等的影响,使所获取的图像中含有噪声;同时,织物具有纹理结构特征,这些纹理结构也会影响织物缺陷的检出率和准确性. 因此,需要对图像进行平滑处理以模糊织物纹理和减小噪声干扰. 常用的滤波器有高斯滤波器、中值滤波器、均值滤波器等等. 其中,均值滤波是典型的线性滤波算法,能够有效滤波图像中的加性噪声,达到模糊织物纹理结构和减小噪声干扰的目的. 因此选择均值滤波器.

2.2　图像分割

在进行 Blob 分析时,必须把图像分割为构成斑点(Blob)和局部背景的像素集合. 最简单的分割算法是阈值分割法,它适用于目标和背景占据不同灰度级范围的图像. 分析图 2 可知,织物图像中的缺陷目标与背景具有完全不同的灰度,比较适合采用阈值分割方法. 阈值分割法的定义为

$$S = \{(r,c) \in R \mid g_{\min} \leqslant f_{r,c} \leqslant g_{\max}\}. \qquad (1)$$

由式(1)可知,阈值分割就是将图像 $f(r,c)$ 中灰度值处于阈值 $g_{\max}$ 和 $g_{\min}$ 范围内的全部点选到输出区域 S 中. 由此可见,阈值分割的关键是确定合适的阈值以准确地将图像分割为目标像素和背景像素.

常用的阈值确定方法有直方图双峰法、P 参数法、基于最大类间方差原理的 Otsu 算法、基于信息熵原理的一维最大熵法、迭代法等等. 其中,双峰法比较适合直方图存在双峰的情况. 图 4 所示是图 2 的灰度直方图,直方图呈单峰状态,因此双峰法不适合于织物缺陷的检测. P 参数法用于在固定分辨率下,目标所占整个图像的比例已知的情况;Otsu 算法适用于目标与背景灰度差比较明显的情况;最大熵法和迭代法对于具有非理想双峰直方图的图像可以得到较好的分割,但是运算速度较慢,不适合在线的实时处理. 本文需要在线检测玻璃纤维织物的缺陷,对实时性要求较高,对比这些阈值确定的方法可知,Otsu 算法是一种比较适合本文的方法.

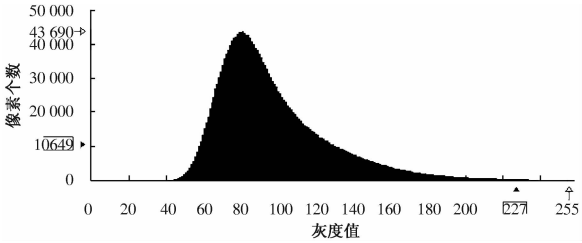


图 4　图 2 所示图像的灰度直方图

Fig. 4　Histogram of the image in Figure 2

采用 Otsu 算法进行图像分割的过程如下:①计算图像的直方图,寻找直方图的最大峰值;②以最大峰值为初始阈值 Th 对图像进行分割,将图像分割为 A,B 两类;③分别计算 A,B 两类像素集合的均值 μ_A,μ_B,计算公式分别见式(2)和式(3);④计算 A,B 两类像素的类间方差 σ,公式见

式(4);⑤将 Th 在最大峰值 ±25 范围内循环,分别计算 A、B 的类间方差,当类间方差最大时,对应的 Th 即为所求的最佳阈值;⑥采用全局阈值法把灰度值在 Th 至 255 之间的像素分割出来.

图 5 所示是对图 2 进行阈值分割的结果.

$$\mu_A = \frac{1}{N_A}\sum_{(i,j)\in A} f(i,j). \tag{2}$$

$$\mu_B = \frac{1}{N_B}\sum_{(i,j)\in B} f(i,j). \tag{3}$$

式中:N_A,N_B 分别表示集合 A,B 中的像素个数.

$$\sigma(Th) = N_A(Th)\cdot N_B(Th)\cdot [\mu_A(Th)-\mu_B(Th)]^2. \tag{4}$$

图 5 图 2(c)阈值分割的结果

Fig. 5 Thresholding result of the image in Figure 2

2.3 形态学处理

由于分割区域中会有一些杂点或小的突出物,需要对分割的图像进行形态学处理,去除这些不必要的干扰.采用的形态学处理算法为:首先采用半径为 5 的圆结构元素对分割的图像进行一次开操作,以去除与缺陷目标像素相连的干扰部分,并抑制分割区域中的一些小分支;然后采用半径为 5 的圆结构元素再进行一次闭操作,用来填补缺陷目标区域中断开的缝隙.经过开、闭操作后减少了图像中不必要的区域干扰,同时将缺陷目标断开的缝隙进行了闭合,调整了分割后的 Blob 区域形状.

2.4 特征提取

形态学处理删除了一些不必要的区域干扰,但是结果中仍会存在着一些不是目标像素的区域,必须对图像进行连通性分析和特征提取.笔者按照 8 连通域标记方法把图像中具有相同像素值且位置相邻的所有前景像素点进行合并,形成 Blob 连通区域,但是这些区域有些不是缺陷特征区域,需要对连通区域进行进一步的特征提取操作.

玻璃纤维织物为多轴向织物,纹理方向一般呈现为 0°,90°或 ±45°.在织物图像中,缺陷目标也具有明显的方向特征,如图 2 所示缺陷目标的纹理方向特征为 +45°,同时,缺陷目标的区域面积要比干扰的区域面积大.因此,按照方向特征和区域的面积特征实现缺陷特征的提取.

2.5 特征参数计算

由于提取出的缺陷特征是不规则的图形,无法直接进行缺陷特征参数的计算,需要首先将不规则图形进行凸包问题求解,然后用凸包作为多边形区域,在矩形倾斜方向和面积最小的约束下对多边形拟合,构造出其最小外接矩形.如图 6 所示为由最小外接矩形中心(r,c)的坐标值、矩形的倾斜角度 θ、矩形的半高度 l_1 和矩形半宽度 l_2 等参数得到缺陷特征的尺寸和位置等信息.图 7 所示是对提取出的 Blob 区域构造了最小外接矩形,并计算出了缺陷的特征参数.

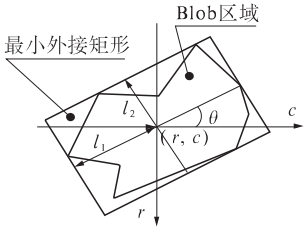


图 6 Blob 区域的最小外接矩形参数示意图

Fig. 6 The Schematic diagram of the parameter of minimum external rectangle of Blob regions

图 7 图 2(c)的 Blob 分析结果

Fig. 7 The Blob analysis results of the image in Figure 2

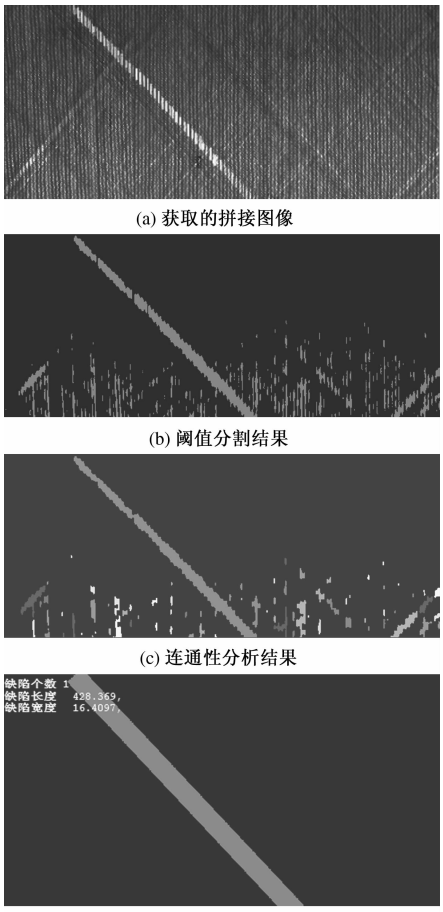
3 实验验证

基于建立的织物机器视觉缺陷检测系统,从现场选取了多种织物样品进行了实验.计算机配置为 Intel Core™ i5 - 2410M CPU,2G 内存;处理软件为机器视觉软件 Halcon11.0.在缺陷检测前,对相机进行了标定.

图 8 所示是一种缺陷纹理方向为 -45°的织物样品及其 Blob 分析结果.图 8(a)所示是采用图 1 所示的机器视觉系统获得的拼接图像;图 8(b)所示是采用 Otsu 算法自动寻找最佳分割阈值对图像进行阈值分割的结果;图 8(c)是对阈值分割后的图像进行形态学处理和连通性分析的结果;图 8(d)所示是在特征提取的基础上,对提取出的 Blob 区域构造了最小外接矩形,计算出了缺陷的特征参数(单位为 mm).

经过多次实验结果表明,采用 Blob 分析法可以较准确地从织物图像中提取出缝隙缺陷特征,测量结果稳健可靠.另外,从相机拍照到图像拼接、缺陷参数计算等的计算机处理时间为 800 ms 左右,方便快速,满足了玻璃纤维织物在线检测的

实时性要求.



(a) 获取的拼接图像

(b) 阈值分割结果

(c) 连通性分析结果

(d) Bolg分析结果

图 8　织物样品缺陷检测实例

Fig. 8　Example of fabric defect detection

4　结论

根据玻璃纤维织物的实际生产状况,设计了基于机器视觉的玻璃纤维织物缺陷检测系统,该系统采用 Blob 算法能成功标记出织物中的缝隙缺陷,并得到缺陷的个数、缺陷的长度和宽度等信息. 经过实验研究,所设计的缺陷检测系统和算法可以快速、准确地从织物图像中提取出缺陷特征,且测量结果稳健可靠,满足了玻璃纤维织物在线检测的实时性要求.

参考文献:

[1]　ARIVAZHAGAN S, GANESAN L, BAMA S. Fault segmentation in fabric images using Gabor wavelet transform [J]. Machine Vision and Applications, 2006, 16(6):356 – 363.

[2]　朱俊岭,汪军,张孝南,等. 基于 AR 模型的机织物线状疵点研究[J]. 纺织学报, 2012,33(8):50 – 54.

[3]　祝双武, 郝重阳. 基于纹理周期性分析的织物疵点检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2012,48(21):163 – 166.

[4]　殷国亮,张瑞,郑欣,等. 基于边缘检测和小波分析的布匹瑕疵检测方法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2011,10(6):637 – 641.

[5]　崔玲玲,卢朝阳,李静,等. 基于非下采样 Contourlet 域高斯混合模型的布匹瑕疵识别算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013,43(3):734 – 739.

[6]　李鑫,许增朴,于德敏,等. 基于图像能量的布匹瑕疵检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9):1243 – 1245

[7]　沈晶,况晓静,张量. 基于纹理增强分水岭的织物瑕疵检测新算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014,37(7):812 – 817.

Research on Glass Fiber Fabric Defect Detection Method Based on Blob Analysis

WANG Qinghai[1], ZHAO Fengxia[2], LI Jifeng[2], JIN Shaobo[2]

(1. Department of Mechanical Engineering, Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the problems, such as low efficiency, poor real-time performance and so on, in on – line detection of glass fiber fabric, a new method of fabric defect detection based on Blob analysis is proposed. Firstly, the image is smoothed by using mean filter, and the noises and the fabric textures are weakened. Then, the Otsu algorithm is used to find the best threshold to segment the image into Blob and background pixels. The shape of the Blob region is adjusted by using morphological processing. Finally, the connectivity analysis and feature extraction of the image are carried out. The number and size of the defects are obtained by using the least square fitting of the Blob region. Experimental results show that the method is simple, reliable and robust.

Key words: glass giber fabric; on-line detection; gap defect; machine vision; Blob analysis; Otsu algorithm

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0094 - 05

基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的性能参数分析

冯志鹏, 庄　森

(郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要: 以空间 RCCR 机构的原理及运动规律为基础,对基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵进行了性能参数的计算,得出该泵的排量公式及流量脉动系数,并对柱塞数与流量脉动系数关系进行分析,证明了该泵符合一般斜轴泵的规律;此外,还将其与现有斜轴泵进行比较. 结果表明:基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵传力杆铰接处运动轨迹为一椭圆,且该泵柱塞的运动规律清晰,为一平滑的正弦曲线;该泵在斜轴泵工况下传力杆的 Z 向约束力受力状态良好,接近于余弦曲线.

关键词: RCCR 轴向柱塞泵; 排量; 柱塞数; 流量脉动系数

中图分类号: TU312^{+}.1　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.019

0　引言

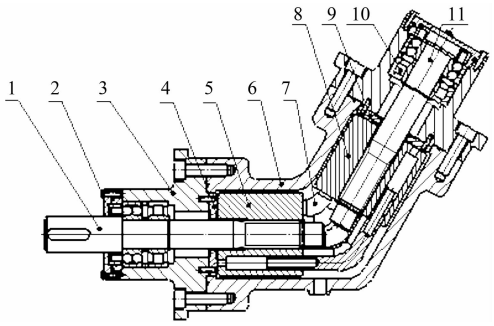
斜轴泵因其启动性能好和容积效率高的特点,具有很好的应用前景,然因其受连杆强度和泵体摆角等方面的限制,约束了斜轴泵的应用[1]. 国内外研究者采用简化 RSSCR 面杆法或者折杆法来尝试给出斜轴泵柱塞运动规律的理论公式[2-4],但均未将该规律清晰表达. 解决这类问题最好可以避开这种结构的斜轴泵,采用一种新型的柱塞连接方式. 近年来,庄森等人对空间 RCCR 机构进行了运动和力的分析[5-6],依据空间 RCCR 机构的运动学原理,设想了一种斜轴泵,如图 1 所示[7]. 然而,这种基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的结构、运动规律、性能参数等方面,与其他现有斜轴泵相比具有哪些优点仍不清晰.

因此,笔者针对基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的结构和运动特性,对该泵的排量以及流量脉动等性能参数进行计算,得出排量及流量脉动公式,并与现有斜轴泵进行比较,阐述该泵在结构、运动规律等方面的优点.

1　基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的简单介绍

1.1　结构介绍

如图 1 所示,基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵具有两个缸体——第一缸体和第二缸体,两个缸体的中心轴线呈一定的夹角. 配流盘上有过渡区隔开并对称分布的高低压月牙形沟槽,为排油窗和吸油窗,分别与柱塞泵的出油口和进油口相通.



1. 主动泵体轴;2. 骨架油封;3. 主动外泵体;4. 主动配流盘;5. 第一缸体;6. 泵体;7. 柱塞杆;8. 第二缸体;9. 从动配流盘;10. 轴承组;11. 从动泵体轴;12. 从动外泵体;13. 柱塞杆 1;14. 柱塞杆 2

图 1　基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵结构图

Fig. 1　Axial piston pump structure of the Axial Piston Pump based on the Spatial RCCR Mechanism

此外,对于第一泵体,转动轴的轴线与柱塞的轴线平行,主动轴带动第一缸体,再由第一缸体带动柱塞转动,具有斜轴泵的特点;对于第二泵体,柱塞带动第二缸体转动,再由第二缸体带动转轴转动,仍具有斜轴泵的特点.

收稿日期: 2015 - 06 - 17;**修订日期:** 2015 - 08 - 03

基金项目: 郑州市科技攻关计划项目(131PPTGG409)

通信作者: 庄森(1961—),男,河南南阳人,郑州大学教授,博士,研究方向为现代制造装备,E-mail:zhuangsen680@aliyun.com.

1.2　工作原理介绍

基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵在工作过程中,传动轴每转动一周,每对柱塞均相对于各自与之对应的缸体同时进行一次往复运动,对应泵的一个吸入行程和一个排出行程. 吸入行程:外部低压流体在大气压的作用下,经配流盘吸油窗进入柱塞腔内;排出行程:柱塞回缩,高压流体经配流盘压油窗排入系统. 柱塞的往复运动,保证了向液压系统供油液,完成了轴向柱塞泵的基本要求.

1.3　运动规律介绍

空间 RCCR 机构可以视为基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的简化模型. 图 2 为空间 RCCR 机构的单对杆的机构运动简图. 传力杆 1、2 的位移以及速度分别为[8]:

$$\begin{cases} S_1 = L_1 + \dfrac{\sin\alpha - 1}{\cos\alpha} h\cos(\omega t); \\ S_2 = L_2 + \dfrac{\sin\alpha - 1}{\cos\alpha} h\cos(\omega t). \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} v_1 = -\dfrac{\sin\alpha - 1}{\cos\alpha} h\omega\sin(\omega t); \\ v_2 = -\dfrac{\sin\alpha - 1}{\cos\alpha} h\omega\sin(\omega t). \end{cases} \tag{2}$$

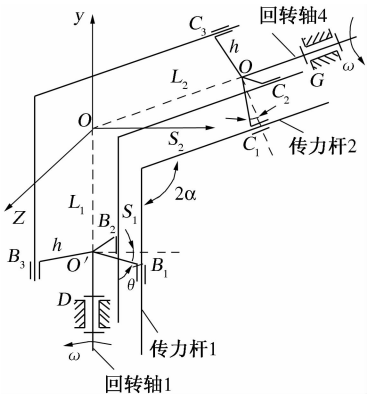


图 2　空间 RCCR 机构的单对杆的机构运动简图

Fig. 2　Kinematic schematic of RCCR space agency single rod

2　主要性能参数计算

2.1　排量

在第一泵体中,柱塞直径为 d_1,柱塞数 Z,并定义如图 2 中的结构参数 L_1,α,h,运动参数 ω,柱塞行程 l_1 为[9]

$$l_1 = 2h\frac{1-\sin\alpha}{\cos\alpha}. \tag{3}$$

则泵的排量 V_1 为

$$V_1 = \frac{\pi {d_1}^2}{4}\cdot 2Z\cdot l_1 = \frac{\pi d_1^2 hZ(1-\sin\alpha)}{\cos\alpha}. \tag{4}$$

在第二泵体中,柱塞直径为 d_2,柱塞行程 l_2,柱塞数 Z,并定义如图 2 中的结构参数 L_2,α,h,运动参数 ω,则泵的排量 V_2 为

$$V_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}\cdot 2Z\cdot l_2 = \frac{\pi d_2^2 hZ(1-\sin\alpha)}{\cos\alpha}. \tag{5}$$

假如两个泵体均向同一系统中供油,则基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的理论排量 V 为

$$V = V_1 + V_2 = \frac{\pi d_1^2}{4}\cdot 2Z\cdot l_1 + \frac{\pi {d_2}^2}{4}\cdot 2Z\cdot l_2 = \frac{\pi d_1^2 hZ(1-\sin\alpha)}{\cos\alpha} + \frac{\pi d_2^2 hZ(1-\sin\alpha)}{\cos\alpha}. \tag{6}$$

2.2　流量脉动

每个柱塞的瞬态排液量 Q_i 为[10]

$$Q_i = A_i v_i. \tag{7}$$

式中: A_i 为柱塞截面积;v_i 为柱塞瞬时相对速度.

则第一泵体中柱塞的瞬态排液量 Q_1 为

$$Q_1 = A_1 v_1 = \frac{A_1(1-\sin\alpha)}{\cos\alpha} h\omega\sin(\omega t). \tag{8}$$

根据上式可知,第一泵体中每一个柱塞的瞬态排液量 Q_1 随时间遵循正弦函数变化,令 $\theta = \omega t$,$K = \dfrac{A_1(1-\sin\alpha)}{\cos\alpha}h$,则上式可以转化为

$$Q_1 = A_1 v_1 = K\sin\theta. \tag{9}$$

由于计算处在排油区的柱塞的流量脉动,则 $0 \leqslant \theta \leqslant \pi$. 而在第一泵体中,每两个相邻柱塞间的夹角 $\varphi = \dfrac{2\pi}{Z}$,则第一泵体中总的瞬态排液量 Q_{t1} 为

$$Q_{t1} = \sum_1^m Q_1 = \sum_{n=1}^m K\sin[\theta + (n-1)]. \tag{10}$$

式中: m 为位于排油区的柱塞数目;n 表示第 n 个柱塞.

当柱塞数 Z 为奇数时:$m = \dfrac{Z\pm 1}{2}$,当柱塞数为偶数时:$m = \dfrac{Z}{2}$. 故根据上式可以求得排油区柱塞的瞬态排量的最大值 $Q_{\max}$ 和最小值 $Q_{\max}$,可以求得流量脉动系数 δ_Q[11]:

$$\delta_Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max}} = \begin{cases} 2\sin^2\left(\dfrac{\varphi}{4}\right), Z\text{ 为偶数}; \\ 2\sin^2\left(\dfrac{\varphi}{8}\right), Z\text{ 为奇数}. \end{cases} \tag{11}$$

表 1 不同柱塞数下的流量系数

Tab. 1 The flow coefficient of different plunger

Z	偶数柱塞						奇数柱塞					
	2	4	6	8	10	12	3	5	7	9	11	3
$\delta_Q \times 100$	157	32.5	14.0	7.8	4.9	3.4	14.2	4.9	2.5	1.5	1.0	14.2

3 与现有斜轴泵的比较分析

3.1 结构比较

从图 1 可以看出,基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵具有两个泵体,每一个泵体均相当于一个无铰式斜轴泵. 从结构上看,基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵相当于两个无铰式斜轴泵的叠加. 根据上述求得的基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵排量公式,可以发现:基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞具有排量大的特点,因此,可以从结构上解决斜轴泵排量小的缺陷.

无铰式斜轴泵的主动轴与柱塞杆的运动轨迹均为圆形轨迹,而二者的连接点则要求椭圆运动轨迹. 因此,此类泵需要一连杆作为中间件来满足传动. 而经过研究,空间 RCCR 机构在每对传力杆铰接处的运动副的运动轨迹如下式[5]:

$$\begin{cases} x = h\cos\theta; \\ y = \dfrac{\sin\alpha - 1}{\cos\alpha} h\cos\theta; \\ z = h\sin\theta. \end{cases} \tag{12}$$

上式表明,该处运动轨迹为一椭圆,满足斜轴泵的运动要求,因此,基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵不需要连杆作为中间件进行传动.

3.2 运动规律比较

由于无铰式斜轴泵传动轴与缸体之间的传动需要依靠连杆,其运动规律复杂,经过理论计算得到的运动方程的影响参数很多. 因此,能否根据理论计算公式得到泵的运动规律示意图仍不确定[11]. 参考无铰式斜轴泵的 motion 仿真,得到无铰式斜轴泵每个柱塞的运动规律示意图,如图 3 所示[12].

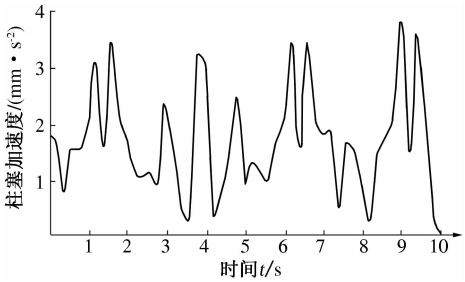


图 3 无铰式斜轴泵柱塞运动规律示意图

Fig. 3 No knuckle oblique pump plunger motion diagram

而对比基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的运动方程,发现基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵运动规律简单,影响参数较少. 根据基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的运动方程,可以得到基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵每个柱塞的运动规律示意图,如图 4 所示.

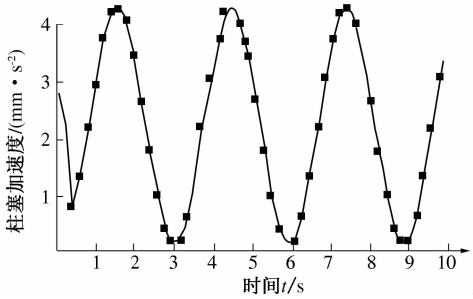


图 4 基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵柱塞运动规律示意图

Fig. 4 The plunger schematic of the Axial Piston Pump based on the Spatial RCCR Mechanism

从图 3、图 4 可以看出,基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵柱塞的加速度曲线是一平滑的正弦曲线;无铰型斜轴泵柱塞速度曲线为一周期性的非平滑曲线,而正弦曲线具有容易求解及反求的优点. 因此,基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的运动规律优于无铰型斜轴泵.

3.3 受力状态分析

对比 A2F12 型斜轴泵的工况,假定泵工况下受到的端面力如下,

$$F_m = \frac{F}{2}\left\{\mathrm{sign}\left\{\sin\left[\theta + (m-1)\frac{2}{7}\pi\right]\right\} + 1\right\}. \tag{14}$$

式中:m 代表各传力杆 1 ~ 7.

给定泵的工况为 $P = 30$ MPa, $n = 1\ 500$ r/min. 根据基于空间 RCCR 机构轴向柱塞泵的结构,建立如图 5 所示的空间 RCCR 机构模型. 其中,两泵体夹角 $2\alpha = 120°$,偏距 $h = 12$ mm.

对左边泵体进行受力分析,得到图 6 所示的受力分析图. 由文献[12]可知,传力杆在示力副处所受到的 6 个约束分量,其中 3 个矩分量均为零. 因此,每个传力杆的示力副处仅受到 3 个力分量,分别为为 F_{mx}, F_{my}, F_{mz}.

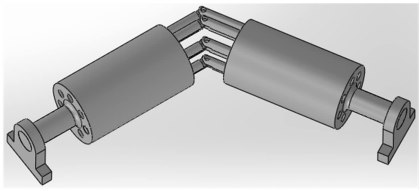


图 5　空间 RCCR 机构模型

Fig. 5　The model of SpaceRCCRagency

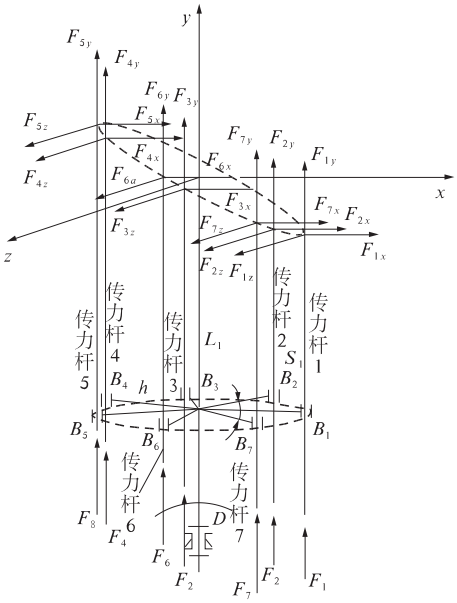


图 6　机构拆分示意图

Fig. 6　Schematic diagram of the agency

根据给定压力 P 与传力杆端面面积 A 可得到:

$$F_m = \frac{PA}{2}\{\mathrm{sign}\{\sin[\theta + (m-1)\frac{2}{7}\pi]\} + 1\}. \quad (15)$$

根据能量守恒方程及上述变形协调方程[12]可知,此时输入力矩 T_1 为

$$T_1 = \frac{9.55}{n}\sum_{m=1}^{7} F_m \frac{\sin(2\alpha - \frac{\pi}{2}) - 1}{\cos(2\alpha - \frac{\pi}{2})} \cdot h\omega \sin[\theta + (m-1)\frac{2\pi}{7}]. \quad (16)$$

示力副 $A_1 \sim A_7$ 处的 z 方向的力为

$$F_{mz} = \frac{2\cos[\theta + (m-1)\frac{2\pi}{7}]}{7h}\sum_{m=1}^{7}\{F_m \cdot \frac{\sin(2\alpha - \frac{\pi}{2}) - 1}{\cos(2\alpha - \frac{\pi}{2})} h\omega + \frac{F_m \sin(2\alpha - \frac{\pi}{2})}{\cos(2\alpha - \frac{\pi}{2})} h]\sin[\theta + (m-1)\frac{2}{7}\pi]\}. \quad (17)$$

根据上述预设条件及式(17)可以得到传力杆 1 示力副处的 Z 向约束力,如图 7 所示.

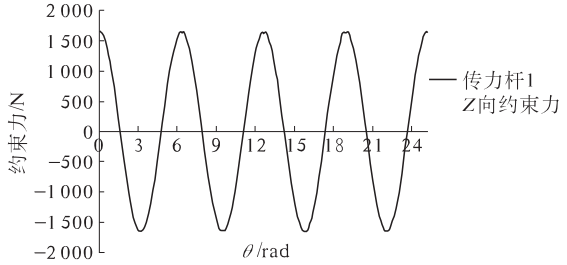


图 7　Z 向约束力理论曲线

Fig. 7　Binding theory curve of the Z axe

由于空间 RCCR 机构传力杆的受力状态相当于基于空间 RCCR 机构轴向柱塞泵柱塞的受力状态.从图 7 可以看出,该泵在现有斜轴泵工况下柱塞连接处的受力状态良好,随余弦规律变化.

3.4　流量脉动比较

图 8 为基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的柱塞数与流量脉动的关系图.从图 8 可以看出:①基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵脉动程度随着柱塞数的增加而下降;②奇数柱塞泵的脉动程度远小于偶数柱塞泵的脉动程度,故该泵符合一般斜轴泵的流量脉动规律.

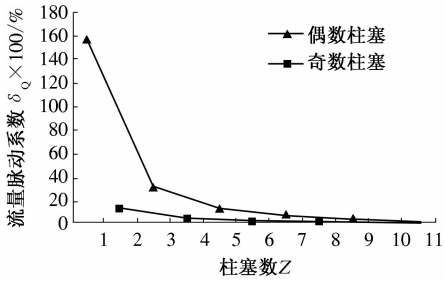


图 8　基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的流量脉动系数

Fig. 8　The flow pulsation coefficient of the Axial Piston Pump based on the Spatial RCCR Mechanism

4　结论

根据上述对基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的原理及运动规律的分析,对排量、流量脉动等性能参数的计算,以及与现有无铰式斜轴泵的比较,可以得到如下结论:

(1)基于空间 RCCR 机构轴向柱塞泵的排量为两个泵体的排量和;

(2)基于空间 RCCR 机构轴向柱塞泵柱塞的运动规律清晰,与现有斜轴泵相比,该泵的运动规律示意图为一平滑正弦曲线;

(3)基于空间 RCCR 机构轴向柱塞泵柱塞连

接处的受力状态良好,接近于余弦曲线;

(4)基于空间 RCCR 机构轴向柱塞泵流量脉动系数符合一般轴向柱塞泵的脉动系数的特点,间接证明了该泵应用的可能性.

参考文献:

[1] 许贤良.关于斜柱塞泵的问题[J].煤矿机械,2003(9):40-42.

[2] BIANCHI A, BRESCIA I T. Bent axis pump: US 7739945B2[P]. 2010-08-22.

[3] 王奕豫,李庆.无铰式斜轴泵新结构及初步分析[J].煤炭科学与技术,1980(1):40-46.

[4] 宋琦,李鉴清.无铰型斜轴式轴向柱塞泵运动学的研究及其结构参数的选择[J].机械设计与研究,1984(4):54-69.

[5] 庄森,赵伟星,蒋晶.空间相交轴 RCCR 机构的位移特性[J].机械传动,2007,31(5):59-61.

[6] 庄森,张开飞,马世榜.等偏距同转向空间 RCCR 机构的位移特性[J].机械传动,2010,34(2):20-22.

[7] 庄森,庄晨,禹茜.双杠柱塞泵:CN201110116837.9[P].2011-08-24.

[8] 庄森,程果.双缸体轴向柱塞泵工况下的单对传力杆空间 RCCR 机构受力分析[J].机械传动,2012,12(3):104-106.

[9] 严金坤.液压元件[M].上海:上海交通大学出版社,1989:69-71.

[10] 贾跃虎,王荣哲,安高成.新型径向柱塞泵[M].北京:国防工业出版社,2012:17-22.

[11] 许贤良,赵连春,王传金.轴向柱塞泵的流量脉动[J].中国矿业大学学报,1992,12(4):72-81.

[12] 邓海顺,张贤坤.基于 cosmos motion 的轴向柱塞泵运动仿真[J].煤矿机械,2007,28(9):60-62.

Kinematics about the Performance Parameters of the Axial Piston Pump Based on the Spatial RCCR Mechanism

FENG Zhipeng, ZHUANG Sen

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

Abstract: Based on the principle and the motion law of the spatial RCCR mechanism, the performance parameters of the axial piston pump based on the Spatial RCCR Mechanism are calculated, and the displacement formula and the flow pulsation coefficient of this pump are obtained. Then, the relationship between the number of pistons and the flow pulsation coefficient is analyzed, and it proved that this pump accords with the law of general slanting axial pumps. Compared with the existing slanting axial pump, the movement orbits of the dowel bar articulation joint point for the new type of axial piston pump is an ellipse, and the motion law of the piston is clear, which is a smooth sine curve. And the force of z-atis is in good conditions of this oump at the oblique pump strucfure condition, which is close to consine curve.

Key words: RCCR axial piston; pump displacement; number of pistons; flow pulsation coefficient

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0099 - 05

客车动力总成惯性参数的辨识

曾发林[1],葛平莹[2]

(1. 江苏大学 汽车工程研究院,江苏 镇江 212013;2. 江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘　要: 以结构、材料等更为复杂的某公司大型客车动车总成系统为研究对象,首先介绍了基于模态试验分析技术的惯性参数识别法(质量线法),该方法是通过激励和响应点坐标、相关运动和动力学方程及激励求取质心坐标、相关惯量参数;然后利用已知的发动机、变速箱以及缓速器各自的惯性参数和组合方式,通过计算整合得到动力总成系统的惯性参数;并与试验获得的结果进行对比分析. 结果表明:通过质量线法来求取复杂刚体惯性参数的方法是可靠的.

关键词: 动力总成;模态试验;惯性参数;质量线法;计算整合

中图分类号: U271.91　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.020

0　引言

随着汽车工业的发展与技术的不断提高,在国内的汽车行业中 NVH 特性研究已经受到了足够的重视,作为汽车主要的振源之一的动力总成的振动,其性能的优劣直接影响着整车的 NVH 水平[1]. 同时,其惯性参数是实现悬置系统设计与优化、动态仿真模拟及有限元分析计算等必不可少的参数,也是评价和确定产品结构性能的必要参数[2].

目前,国内在汽车行业中采用质量线法来获取动力总成惯性参数[3]的研究尽管越来越多,然而大部分研究仅是针对一些小型汽车,其结构简单、材料性能要求低、质量较轻. 而针对大型客车或者货车动力总成的研究相对较少,它们的结构复杂性、材料的性能要求及其本身重量远远超出小型汽车,这种方法是否仍然适用需要进一步的研究. 因此,本文的研究对象是某客车六点悬置动力总成系统,在结构上不仅包含了传统意思上的发动机和变速箱,而且还增加了客车动力总成专用的缓速器及附件,其重量也远远超出小型汽车,并且悬吊装置采用的是柔软的弹性绳,使试验结果更加准确. 因此,笔者旨在验证对于更加复杂的刚体,基于模态试验法来获取其惯性参数的可靠性.

首先,给出了基于模态试验方法获取刚体惯性参数的原理;其次,将该方法运用于该客车动力总成惯性参数的获取;最后,在已知各组成部分惯性参数的基础上,通过计算整合得到动力总成的惯性参数,并将计算结果与试验结果进行对比分析,验证了该方法对获取复杂刚体惯性参数的准确性和快捷性.

1　基于模态试验法测量惯性参数的原理

1.1　试验理论依据

因为刚体特性参数与基于模态试验的频响函数(FRF)中的质量线之间存在着一定内在关系,从而使用一系列的运动和动态方程组表示这些质量线,确定刚体的惯性属性(质心、转动惯量和惯性积等). 由于被测物体一般不是纯刚体,会出现弹性模态,因此实际的振动加速度频率响应函数曲线如图 1 所示.

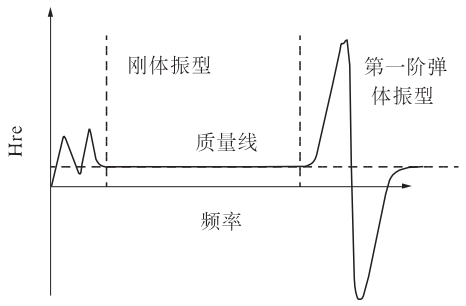


图 1　刚体与弹性系统频率响应函数

Fig. 1　The frequency response functions of rigid body

收稿日期: 2015 - 06 - 02;**修订日期:** 2015 - 08 - 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575238)

作者简介: 曾发林(1963—),男,江苏镇江人,江苏大学副教授,研究方向为汽车 NVH 特性研究,E-mail:519491781@qq.com.

图中FRF曲线分为三部分:低频段曲线显示结构在悬吊支撑约束条件下发生一定变形时的柔性模态;中间近似平直线的频段就是质量线,该频段内FRF值只与质量矩阵[M]中各惯性参数有关,而其是结构的固有属性,不会发生变化;高频段曲线反映的是因被测物体发生弹性变形而引起的弹性体模态[4].

1.2 计算参考加速度矩阵和力矩阵

对选定频带内所有谱线,对所有响应测量点$P,Q,\cdots$,对所有被考虑的输入1,2,…,有如下的加速度矩阵形式的运动学关系:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_{1P_x} & \ddot{X}_{2P_x} & \cdots \\ \ddot{X}_{1P_y} & \ddot{X}_{2P_y} & \cdots \\ \ddot{X}_{1P_z} & \ddot{X}_{2P_z} & \cdots \\ \ddot{X}_{1Q_x} & \ddot{X}_{2Q_x} & \cdots \\ \ddot{X}_{1Q_y} & \ddot{X}_{2Q_y} & \cdots \\ \ddot{X}_{1Q_z} & \ddot{X}_{2Q_z} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & Z_P & -Y_P \\ 0 & 1 & 0 & -Z_P & 0 & X_P \\ 0 & 0 & 1 & Y_P & -X_P & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & Z_Q & -Y_Q \\ 0 & 1 & 0 & -Z_Q & O & Y_Q \\ 0 & 0 & 1 & Y_Q & -X_Q & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{X}_{1gx} & \ddot{X}_{2gx} & \cdots \\ \ddot{X}_{1gy} & \ddot{X}_{2gy} & \cdots \\ \ddot{X}_{1gz} & \ddot{X}_{2gz} & \cdots \\ \ddot{a}_{1gx} & \ddot{a}_{2gx} & \cdots \\ \ddot{a}_{1gy} & \ddot{a}_{2gy} & \cdots \\ \ddot{a}_{1gz} & \ddot{a}_{2gz} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}. \tag{1}$$

式中:X_P,Y_P,Z_P为测点P在总坐标系中的坐标(或对于给定的参考坐标).

对应于每一谱线建立的超定方程组(输入自由度数大于或等于6)以最小二乘法求解.

对于所有的输入1,2,…,可得到力矩阵形式的运动学关系:

$$\begin{Bmatrix} F_{1gx} \\ F_{1gy} \\ F_{1gz} \\ M_{1gx} \\ M_{1gy} \\ M_{1gz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -Z_1 & Y_1 \\ Z_1 & 0 & -X_1 \\ -Y_1 & X_1 & 0 \end{bmatrix} \{F_1\}. \tag{2}$$

式中:$\{F_1\}$为输入1的作用力,N;X_1,Y_1,Z_1为输入1作用点的总坐标分量.

1.3 计算质心坐标,转动惯量及惯性积

对于每一输入每一谱线、每一输入全体被考虑的频带可列出方程组:

$$\begin{Bmatrix} F_{gx}-ma_{gx} \\ F_{gy}-ma_{gy} \\ F_{gz}-ma_{gz} \\ M_{gx} \\ M_{gy} \\ M_{gz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -ma_z & ma_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ ma_z & 0 & -ma_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -ma_y & ma_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{gz} & -F_{gy} & a_x & 0 & 0 & -a_y & 0 & -a_z \\ -F_{gz} & 0 & F_{gx} & 0 & a_y & 0 & -a_x & -a_z & 0 \\ F_{gy} & F_{gx} & 0 & 0 & 0 & a_z & 0 & -a_y & -a_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{\mathrm{cog}} \\ Y_{\mathrm{cog}} \\ Z_{\mathrm{cog}} \\ I_{xx} \\ I_{yy} \\ I_{zz} \\ I_{xy} \\ I_{yz} \\ I_{xz} \end{Bmatrix}. \tag{3}$$

式中:$X_{\mathrm{cog}},Y_{\mathrm{cog}},Z_{\mathrm{cog}}$为质心在总坐标上的坐标分量;$I_{xx},I_{yy},I_{zz}$为刚体对总坐标各坐标轴的轴转动惯量;$I_{xy},I_{yz},I_{xz}$为刚体在总坐标系中的惯性积.

对应每一谱线这些超定方程组(输入数多于或等于2)可采用最小二乘法求解.

2 客车动力总成模态试验

2.1 试验测试系统

本次试验所用仪器如表1所示.试验所用仪器均是满足国际标准的测试仪器,且全部经过标定,测量范围和精度完全满足试验模态的要求.采

用锤击法进行试验[5].

表 1　试验仪器列表

Tab. 1　Test equipment list

编号	仪器名称	数量	仪器型号
1	加速度传感器	5	美国 PCB 的 ICP 加速度传感器
2	力锤	1	美国 PCB 公司模态力锤
3	数据采集系统	1	LMS SCADASⅢ
4	数据分析处理软件	1	LMS Test. lab 11A

2.2　模态试验方法

由于锤击法是一种宽频带激励，需要的设备简单、灵活性大、适合现场操作，所以，本次试验选用锤击法[6]. 实验对象为某公司大型客车动力总成，总重量为 1 261 kg.

使用柔软的悬挂装置悬吊动力总成，使被测对象处于自由悬挂状态，避免柔性吊绳对动力总成造成约束，允许动力总成在所有的方向运动（平动和转动），使试验结果更加准确. 悬挂装置一共四个悬吊点，其中两个悬吊点在缓速器两侧，另两个悬吊点在发动机支撑架的两侧，如图 2 所示. 其中动力总成左侧部分为发动机，中间部分为变速箱，右侧部分为客车动力总成专用的缓速器.

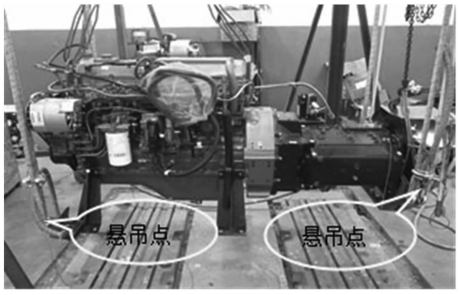


图 2　悬吊点位置

Fig. 2　Suspension points arrangement

建立动力总成的坐标系，以发动机后端面左下方为原点，$+x$ 方向指向汽车正前方，$+z$ 方向垂直向上，根据右手定则确定 $+y$ 方向.

2.3　试验设置

为取得较好的数据计算结果，一般要保证所选质量线频段内的频率谱线数大于 5 条. 但若在较大的频率范围内，结构本身的质量线数据可以保持相对的恒定值，那么可将采样频率分辨率设置较低，以提高运算速度、加快试验进程. 因此本实验设置参数见表 2 所示.

表 2　激励参数的设置

Tab. 2　Excitation parameter settings

激励源	激振频率带宽/Hz	分辨率/Hz	谱线数	采样时间/s	敲击次数/次
力锤	512	0.25	2 048	4	5

力锤激励信号是一个脉冲信号，持续时间短，衰减较快，且在实验过程中可实时查看激励力信号的状况，所以激励信号加力窗函数. 而响应信号是结构在冲击后获得一定加速度的自由振动，开始信号阶跃然后逐渐衰减，所以该试验对响应信号加指数窗进行衰减处理[7].

2.4　模态试验要注意的问题

由于试验结果对加速度与激励力很敏感，所以在实验前应对所有加速度传感器进行标定，以保证数据的准确性并提前排除有故障的传感器和数据传输线. 用质量线法计算惯性参数时，参与计算的数据是低频范围内的 FRF 值，所以应选用较软的锤头，本实验选用塑料锤头的力锤进行激励脉冲输入.

激励点和响应点的选择遵循的原则[8]：激励点和响应点都应在局部刚度较大的位置选取，以防止局部弹性变形影响测试结果；应尽量多地选取激励点和响应点，本次试验选取 25 个激励点，共 52 个单向响应点；激振点位置的选择应避开支撑点和结构模态振型节点，响应点的选择主要考虑其能反映结构的主要轮廓；激励点和响应点不应布置在同一平面内，更不宜分布在同一条直线上[9]. 本实验针对动力总成实际结构，选择了相应的激励点和响应点，部分如图 3 所示.

图 3　部分响应点和激励点位置

Fig. 3　Partial response and excitation point

2.5　数据处理及计算结果

在 LMS 的 modal data selection 中选取合理的频率响应函数（FRF）曲线，采用刚体特性计算模块（Modal Rigid Body），在 Mass 栏输入动力总成质量 m = 1 261 kg，在 Node name 栏中输入质心名

称进行计算. 在保证 LMS 软件允许计算的情况下,注意以下几点:保留尽量多的激励点和响应点;选取关心频率带内较为平滑的 FRF 曲线数据;选取尽可能宽的 FRF 频带,如图 4 所示.

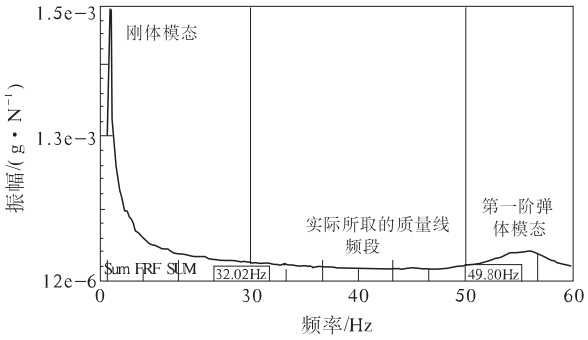


图 4 动力总成的频响函数

Fig. 4 The FRF curve of the powertrain

动力总成惯性参数试验计算结果如下:

质心坐标 $x = 0.874\ 7$ m, $y = -0.060\ 6$ m, $z = 0.241\ 2$ m. 转动惯量 $I_{xx} = 51.399$ kg·m^2, $I_{yy} = 411.426$ kg·m^2, $I_{zz} = 373.822$ kg·m^2. 惯性积 $I_{xy} = -6.235$ kg·m^2, $I_{xz} = -2.918$ kg·m^2, $I_{yz} = -20.051$ kg·m^2.

3 动力总成惯性参数的计算整合

首先,通过企业所给数据知道了发动机、变速器和缓速器的各自质量以及在各自坐标系下质心位置,其中发动机质量为 840 kg,变速箱质量为 335 kg,缓速器质量为 85 kg. 笔者在发动机上建立的参考坐标系与动力总成的参考坐标系重合,所以要把变速器和缓速器的质心坐标转换到发动机或者动力总成参考坐标系中,再由物体质心坐标一般公式求得动力总成系统的质心位置,已知数据和计算结果如表 3 所示[10].

表 3 在动力总成参考坐标系下的质心坐标

Tab. 3 The centroid coordinate in the powertrain coordinates

名称	x/m	y/m	z/m
发动机	0.502	-0.073	0.306
变速箱	1.374	-0.056	0.217
缓速器	1.726	-0.055	0.221
动力总成系统	0.817	-0.067	0.277

其次,在已知各部分绕各自质心位置的转动惯量和惯性积后,如表 4 所示,再由转动惯量和惯性积的平行轴方程式,得到各部分绕动力总成系统质心位置的转动惯量和惯性积,进而通过叠加可以得到动力总成绕质心位置的转动惯量和惯性积,并与模态试验法所得结果进行了对比,计算结果如表 5 所示.

转动惯量和惯性积的平行轴方程式如下所示:

$$I_{xx} = (I_{x'x'})_G + \Sigma m(y_G^2 + z_G^2);$$
$$I_{yy} = (I_{y'y'})_G + \Sigma m(x_G^2 + z_G^2);$$
$$I_{zz} = (I_{z'z'})_G + \Sigma m(x_G^2 + y_G^2);$$
$$I_{xy} = (I_{x'y'})_G + \Sigma m(x_G y_G);$$
$$I_{xz} = (I_{x'z'})_G + \Sigma m(x_G z_G);$$
$$I_{yz} = (I_{y'z'})_G + \Sigma m(z_G y_G).$$

式中:$(I_{x'x'})_G$, $(I_{y'y'})_G$, $(I_{z'z'})_G$ 分别表示动力总成各个部分绕 x, y, z 轴转动惯量的和;$(I_{x'y'})_G$, $(I_{x'z'})_G$, $(I_{y'z'})_G$ 表示动力总成各个部分惯性积的和;x_G, y_G, z_G 表示动力总成质心坐标与总成某一部分质心坐标的距离.

表 4 动力总成各部分的转动惯量和惯性积

Tab. 4 Moment of inertia and product of inertia of each part in power assembly kg·m^2

部位	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{xz}	I_{yz}
发动机	34.765	91.821	69.672	-7.64	13.76	-13.11
变速箱	13.536	35.714	23.665	-2.703	6.301	-4.705
缓冲装置	6.050	3.503	3.344	0.056	0.062	0.003

表 5 动力总成的转动惯量和惯性积

Tab. 5 Moment of inertia and product of inertia kg·m^2

方法	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{xz}	I_{yz}
质量线法	51.399	411.426	373.822	-6.235	-2.918	-20.051
计算整合法	56.605	391.562	355.098	-5.708	-3.123	-18.237

对比两种方法可知,计算结果具有较好的一致性,在 3 个方向上的惯性参数的误差值均在 10% 以内,符合工程上的要求,显示了通过质量线法获取结构更加复杂的客车动力总成惯性参数的测试精度比较高[11].

产生误差的原因可能是:当动力总成进行模态试验时,其响应信号中不可避免地会混入一些干扰噪声,从而使真实值与测量值之间产生一定的误差;由于动力总成材料、结构复杂,在悬吊过程中平衡点比较难找,有时会卸下一些质量很轻的铁片,这也会对试验差生较小的误差.

4 结论

介绍并应用了一种获取复杂刚体惯性参数的有效方法,即基于模态试验的刚体惯性参数识别法(质量线法). 文中首先给出了质量线法的理论

依据,采用基于模态试验的方法获取了客车动力总成的惯性参数,同时将试验结果与计算整合得到的结果进行对比分析,对比结果显示了该方法对获取复杂刚体的惯性参数具有较高的测试精度. 由于该方法操作方便,需要的设备简单,总体可操作性强,加之其精确的测试结果,以后在复杂刚体惯性参数的测试中必然会有更广泛的应用. 除此之外,文中最后也对引起试验误差的可能性进行了分析.

参考文献:

[1] 赵夕长,时培成. 动力总成悬置系统振动分析与解耦优化[J]. 农业装备与车辆工程,2010(5):7 - 10 .

[2] 龙岩. 动力总成惯性参数识别的试验研究[J]. 噪声与振动控制,2009,22(1):73 - 76 .

[3] 俞斌,庄德军,明新国. 汽车动力总成惯性参数的辨识[J]. 传动技术,2008,22(1):38 - 45.

[4] 何岩松,荣申强,徐中明,等. 基于频响函数的结构惯性参数识别与应用[J]. 世界科技研究与展,2010(4),488 - 490.

[5] 王佳,潘宏侠,杨晓波. 基于 PolyMAX 法的齿轮箱试验模态分析[J]. 机械传动,2013,37(2):66 - 75 .

[6] 刘军,高建立,穆桂脂等. 改进锤击法试验模态分析技术的研究[J]. 振动与冲击,2009(3):174 - 177.

[7] 张力. 模态分析与实验[M]. 北京:清华大学出版社,2011.

[8] 任永连,周竑,束元. 基于质量线法的汽车动力总成惯性参数的研究与辨识[J]. 汽车技术,2013(7):25 - 30.

[9] LEE H,LEE Y B,PARK Y S. Response and excitation points selection for accurate rigid-body inertia properties identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2004,13(4):571 - 592.

[10] 岳光杰. 车辆动力总成悬置系统振动分析及优化设计[D]. 重庆:重庆交通大学机电与汽车工程学院,2013.

[11] 陈海朝,周文超. 基于模态试验法测量整备驾驶室质心和转动惯量[R]. 上海:第一汽车股份有限公司,2012.

The Identification of Inertial Parameters of the Bus Powertrain

ZENG Falin[1],GE Pingying[2]

(1. Automotive Engineering Research Institute,Jiangsu University,Zhenjiang 212013,China;2. School of Automotive and Traffic Engineering,Jiangsu University,Zhenjiang 212013,China)

Abstract: In this paper,a bus powertrain of which the structure and material are more complex is applied as an example. First, it introduces the inertial parameter identification technique based on experimental modal analysis. The method obtains the center-of-mass coordinate and the inertial parameters of the powertrain through the excitation and the coordinate of response points,relative motions and dynamics equations. Then,the paper produces how to obtain the inertial parameters of the powertrain on the basis of knowing the data of each part, it validates the accuracy of obtaining the complex inertial parameters of the rigid body through the contrast and analysis with the result of experimental modal.

Key words: powertrain;experimental modal;inertial parameter;method of mass line;calculation of integration

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0104 - 05

下穿立交储水管道模型建立及力学分析

张洪亮[1], 孙　培[1], 谢定文[2]

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;2. 四川省蓝地设计规划设计研究院有限公司,四川 成都 610041)

摘　要: 为改善我国下穿立交积水现状,提出在排水系统中增加储水管道的设计方案. 基于交通荷载作用下的管 - 土力学模型,建立储水管道仿真模型,并采用有限元方法分析该仿真模型,对储水管道进行配筋验算,同时分析储水管道各参数对其力学特性的影响. 研究结果表明:该仿真模型是可行的;储水管道埋土深度、土基模量、管壁厚度、管道直径等管道参数对其力学特性影响显著. 结合研究结果,推荐储水管道埋土深度 1.5 m,底部土基模量 40 MPa,管壁厚度 10 cm,管道直径 1 200 mm.

关键词: 道路工程;下穿立交;排水系统;储水管道;力学特性

中图分类号: TU992.24　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.021

0　引言

近几年,国内下穿立交积水已然成为引发城市内涝的主要原因. 国内外下穿立交多采用暗式泵站进行抽升排水[1]. 国外下穿立交排水系统的主要组成部分有雨水存储系统、雨水收集系统和排水泵站[2-4],其中,利用雨水存储系统来控制雨水径流的方法被广泛采用. Peter[5]通过研究泵站的存储系统,推导出存储管道和集水池的合适尺寸及位置. Gentry 等[6]提出了一种估算小型集水区存储系统蓄水容积的简化方法. 另外《AASHTO 排水设计指南》中也详细介绍了雨水存储系统[7]. 高雪香等[8]提出在引道以外的路面设置反向坡,通过自流排水排除此区域内的雨水. 冯启军[9]提出在下穿立交的最低点处设置不同数量的进水口. 范君等[10]提议将多篦集水井设置在立交最低处,就近流入泵站集水池.

国内下穿立交未设置专门的储水管道,这是导致国内下穿立交积水的主要原因之一. 一旦管道在荷载作用下的变形超过容许变形值,管道易产生裂缝、渗漏等病害. 笔者借鉴国外的立交排水系统,对下穿立交储水管道进行力学分析与设计.

1　交通荷载作用下储水管道模型

1.1　交通荷载作用下管 - 土力学模型

1.1.1　交通荷载模型

进行仿真模拟时,由于均布荷载建模简单[11],所以很多学者将交通荷载等效简化为均布荷载. 但是这种简单化难以准确模拟实际的使用情况,会影响模拟结果的精确性.

车辆在储水管道上方行驶,实际上是以一定的间距和速度通过的. 为了准确地模拟实际情况,拟定公路 - Ⅰ级和公路 - Ⅱ级作为新的车辆荷载标准,以代替原来的汽车 - 超 20 级和汽车 - 20 级标准车辆荷载,如表 1 所示.

1.1.2　土基模型

对土基模型进行模拟时,一般需从塑性和弹性两个方面来考虑. 线弹性模型的计算相对简单,只需要材料的泊松比和弹性模量两个参数;而弹塑性模型则相对复杂些,但是更符合土基的实际情况[12]. 由于研究的是在交通荷载作用下土基中储水管道的力学特性,重点在于模拟车辆荷载及分析土基中储水管道的力学特性,故可将土基简化为线弹性模型.

1.1.3　管 - 土相互作用模型

储水管道与地基土体间的相互作用十分复

收稿日期: 2015 - 06 - 20;**修订日期:** 2015 - 09 - 10

基金项目: 陕西省交通科技项目(13 - 01K)

作者简介: 张洪亮(1974—),男,山东山亭人,长安大学教授,博士,主要从事道路工程研究,E-mail: 631808674 @qq.com.

杂,可将二者视为一个耦合系统.通过简化储水管道和地基土体相互间的作用,将管土接触面之间的相互作用分解为法向和切向,同时对法向和切向上管土间的接触性状进行了定义[13]:①法向考虑储水管道和地基土体的竖向变形可能不一致,定义管土节点间接触后允许互相分离;②切向考虑土体和储水管道间的摩擦力,定义管土节点间接触后不会发生滑移.

表 1　各级公路的汽车荷载等级

Tab.1　Rates of vehicle load on all levels of road

公路等级	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
汽车荷载等级	公路 - Ⅰ级 汽车 - 超 20 级	公路 - Ⅰ级 汽车 - 超 20 级	公路 - Ⅱ级 汽车 - 20 级	公路 - Ⅱ级 汽车 - 20 级	公路 - Ⅱ级 汽车 - 20 级

1.2　储水管道仿真模型

1.2.1　基本假设

(1)切向上假定管土节点接触后不发生滑移,发生接触的管土节点容许相互分离.

(2)采用汽车车队荷载,同时不考虑湿度、温度和地下水等对储水管道的影响.

(3)假定钢筋规则地成环状排列,并且与混凝土完全粘结;混凝土各向同性;路面各结构层为各向同性、均匀的连续弹性体.

(4)面层、基层和土基间充分接触,并且相互之间不存在摩擦力.

(5)考虑路面结构自重以及储水管道自重.

1.2.2　仿真模型基本参数

(1)模型尺寸.考虑到地基土体为无限空间体,建模时可以依据实际尺寸进行建模.选取地基三维固体有限元计算模型参数如下:长 140 m,宽 6 m,高度最高处 11.5 m,最低处 8 m,路面纵坡取 2.5%.采用三维固体模型模拟管道,各项参数如下:长 140 m,壁厚 100 mm,直径 1 200 mm,埋土深度 1.5m.我国《室外排水设计规范》规定雨水管道最小设计坡度为:塑料管道 0.2%,其他管道 0.3%,故本文储水管道设计坡度取 0.3%.管道基础长 140 m,宽 2.3 m,厚 0.1 m.

(2)边界条件.定义自由边为离路肩边缘较近的侧面,地基底部、两端面以及管道两端为固支,并且将其视为储水管道的固支边界条件.

(3)荷载条件.采用 1.1.1 节中选定的汽车车队荷载,根据规范中的标准选用相应大小的荷载以及正方形轮印,每个轮胎的尺寸近似为 19 cm × 19 cm,轮胎间距为 34 cm,每辆车的轮距均为 180 cm.

(4)网格划分.采用 Abaqus 软件进行分析,选用 Abaqus/Standard 模块.对道路结构和地基进行网格划分时,均采取八节点线性减缩积分三维应力单元,管道的单元尺寸为 0.12 m,地基和路面结构单元尺寸为 1 m.

1.2.3　模型计算结果分析

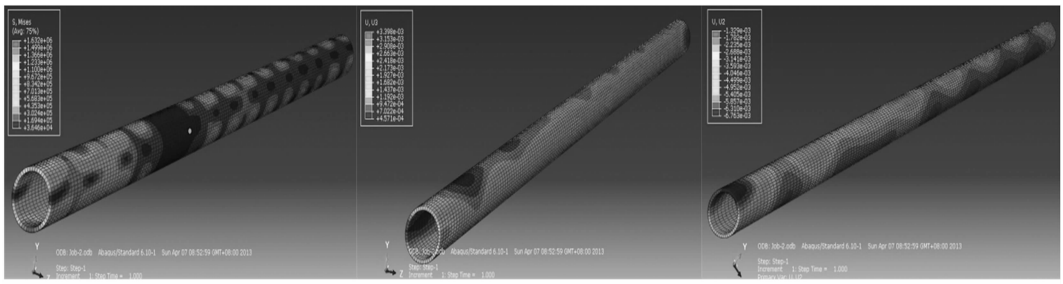
基本参数如下:①选用混凝土储水管道,弹性模量 $E_1 = 3.0 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\lambda_1 = 0.15$,热膨胀系数 $= 1 \times 10^{-5}$/℃,密度 $\rho_1 = 2\ 400$ kg/m^3;②沥青混凝土面层厚度 18 cm,弹性模量 $E_2 = 1.5 \times 10^3$ MPa,泊松比 $\lambda_2 = 0.25$,密度 $\rho_2 = 2\ 000$ kg/m^3;③水泥稳定碎石基层厚度 40 cm,收缩开裂后弹性模量 $E_3 = 800$ MPa,泊松比 $\lambda_3 = 0.3$,密度 $\rho_3 = 2\ 100$ kg/m^3;④底基层厚度 20 cm,弹性模量 $E_4 = 200$ MPa,泊松比 $\lambda_4 = 0.3$,密度 $\rho_4 = 1\ 900$ kg/m^3;⑤地基土的变形模量 $E_5 = 40$ MPa,泊松比 $\lambda_5 = 0.4$,密度 $\rho_5 = 1\ 800$ kg/m^3;⑥管道基础为 C8 混凝土,变形模量 $E_6 = 12\ 000$ MPa,泊松比 $\lambda_6 = 0.2$,密度 $\rho_6 = 2\ 100$ kg/m^3.在车队荷载作用下管道应力、横向位移和竖向位移计算结果分别如图 1 所示.

1.2.4　储水管道配筋计算

(1)计算参数.储水管道内径 $d = 1\ 200$ mm,外径 $D = 1\ 400$ mm;储水管道壁厚 $t = 100$ mm;埋土深度 $H = 1\ 500$ mm;填土容重 $\gamma_1 = 18.00$ kN/m^3;混凝土强度为 C25;管节长度 $L = 1\ 000$ mm;钢筋强度等级为 R235;钢筋保护层厚度为 25 mm;现拟在该储水管道中布设 ϕ10@100 mm 受力钢筋.

(2)荷载计算.基于钢筋等效原则,建立钢筋混凝土储水管道模型.对仿真模型计算结果进行分析,得知正常使用极限状态组合下管顶处的最大应力为 0.080 7 MPa,最大弯矩值 M_k 为 4.77 kN · m;承载能力极限状态组合下管顶处最大应力为 0.144 6 MPa,最大弯矩 M_{ud} 为 8.54 kN · m.

(3)强度验算.由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)查得 R235 钢筋的弹性模量 $E_s = 2.1 \times 105$ MPa,R235 钢筋的抗拉强度设计值 $f_{sd} = 195$ MPa,C25 混凝土的轴心抗压强度设计值 $f_{cd} = 11.5$ MPa,构件的正截面相对界限受压区高度 $\xi_b = 0.62$.



(a) 应力位移分布 (b) 横向位移分布 (c) 竖向位移分布

图 1 管道应力、横向位移和竖向位移分布

Fig. 1 Stress distribution, lateral displacement distribution and vertical displacement distribution of storage pipe

由于在管节处要预留 10 mm 的接缝宽度,所以实际管节长度为 1 000 - 10 = 990(mm). 其截面强度应满足公式(1)~(3)的要求.

$$f_{cd}bx = f_{sd}A_s. \tag{1}$$

$$x \leqslant \xi_b h_0. \tag{2}$$

$$\gamma_0 M_{ud} \leqslant M_u = f_{sd}A_s\left(h_0 - \frac{x}{2}\right). \tag{3}$$

式中:γ_0 为结构的重要性系数;M_u 为计算截面的抗弯承载力,kN·m;A_s 为受拉钢筋的截面面积,mm^2;x 为按等效矩形应力图计算受压区高度,mm;b 为截面的宽度,mm;h_0 为截面的有效高度,mm.

由公式(1)~(3)计算可得:$x = \frac{f_{sd}A_s}{f_{cd}b} = 195 \times 11 \times 78.5 \div (11.5 \times 990) = 14.8$(mm),$\xi_b h_0 = 0.62 \times 75 = 46.5$(mm) $> x = 14.8$(mm),所有受压区高度满足验算要求. 又 $h_0 = 75$ mm,$f_{cd}A_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) = 11.5 \times 990 \times 24.7 \times (75 - 14.8/2) = 19.01$(kN·m) $> \gamma_0 M_{ud} = 0.9 \times 8.54 = 7.686$(kN·m),故截面强度满足验算要求.

(4)裂缝宽度验算公式如下:

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87 h_0 A_s}. \tag{4}$$

$$\omega_{max} = \alpha_{cr}\varphi \frac{\sigma_{sk}}{E_s}\left(1.9c + 0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}}\right). \tag{5}$$

式中:ω_{max} 为按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度,mm;α_{cr} 为混凝土构件受力特征系数;φ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数,当 $\varphi < 0.2$ 时,取 $\varphi = 0.2$,当 $\varphi > 1$ 时,取 $\varphi = 1$;σ_{sk} 为按荷载效应的标准组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力或预应力混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力,N/mm^2;c 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离,mm,当 $c < 20$ 时,取 $c = 20$, 当 $c > 65$ 时,取 $c = 65$;ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率,在最大裂缝宽度计算中,当 $\rho_{te} < 0.01$ 时,取 $\rho_{te} = 0.01$;d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径,mm.

由《给排水工程管道结构设计规范》(G50332—2002)查得:对于采用钢筋混凝土结构构件的刚性管道而言,在组合作用下,当计算截面处于受弯、大偏心受压或受拉状态时,截面容许的最大裂缝宽度不能超过 0.2 mm.

根据荷载效应的标准组合计算公式,得到弯矩值 M_k 为 4.77 kN·m,根据公式(4)算出 σ_{sk} 为 84.6 N/mm^2,将带入公式(5)即可算出 ω_{max} 为 0.043 mm < 0.2 mm,故裂缝宽度满足验算要求.

综上可知,未配钢筋时储水管道上的最大拉应力超过规范要求. 通过对配筋后的储水管道进行分析,发现其各项力学指标均满足规范要求.

2 储水管道参数力学分析

2.1 储水管道埋土深度的影响

《室外排水设计规范》(GB50014—2006)中规定布设在行车道下的管道,其管道最小埋土深度一般不宜小于 0.7 m. 通过查阅资料发现 0.7 m 的埋土深度偏小,从而导致很多埋地管道出现破坏. 取 0.9,1.2,1.5,1.8,2.1,2.4 m 的埋土深度,分析埋土深度变化对储水管道应力和位移的影响,结果见表 2.

由表 2 可知,储水管道上最大应力、横向位移和竖向位移随着埋土深度的增加而逐渐减小. 当埋土深度从 0.9 m 增加到 2.4 m 时,最大应力、横向位移和竖向位移分别降低了 37.6%、40.3%、47.4%,但当埋土深度达到 1.5 m 时应力和位移值的变化趋于平缓,故埋土深度建议采用 1.5 m.

2.2 土基模量的影响

当埋土深度为 1.5 m 时,取土基模量为 20,

40,60,80 MPa,分析土基模量变化对储水管道应力和位移的影响,结果见表 3.

表 2　埋土深度对应力和位移的影响

Tab. 2　Influence of covering earth thickness on stress and displacement

埋土深度 H/m	最大应力/MPa	横向位移/mm	竖向位移/mm
0.9	0.172 2	1.104	2.274
1.2	0.132 1	0.907	1.642
1.5	0.129 7	0.734	1.332
1.8	0.119 7	0.693	1.257
2.1	0.111 7	0.672	1.220
2.4	0.107 5	0.659	1.196

表 3　土基模量对应力和位移的影响

Tab. 3　Influence of modulus of soil base on stress and displacement

土基模量 E/MPa	最大应力/MPa	横向位移/mm	竖向位移/mm
20	0.141 2	0.895	1.613
40	0.129 7	0.734	1.332
60	0.117 7	0.682	1.236
80	0.110 9	0.642	1.165

由表 3 可知,储水管道上最大应力、横向位移和竖向位移随着土基模量的增加而逐渐减小. 当土基模量由 20 MPa 变为 80 MPa 时,最大应力、横向位移和竖向位移分别降低了 21.5%、28.3%、27.8%. 在土基模量由 20 MPa 变到 40 MPa 时,应力和位移变化较快;而土基模量大于 40 MPa 后,变化则较平缓,故土基模量建议采用 40 Mpa.

2.3　储水管道管壁厚度的影响

对管壁厚度为 8,9,10,11,12 cm 的储水管道进行研究,分析储水管道管壁厚度对储水管道应力和位移的影响,结果见表 4.

表 4　管壁厚度对应力和位移的影响

Tab. 4　Influence of wall thickness of storage pipe on stress and displacement

管壁厚度 t/cm	最大应力/MPa	横向位移/mm	竖向位移/mm
8	0.147 0	0.837	1.579
9	0.141 7	0.801	1.451
10	0.129 7	0.734	1.332
11	0.124 6	0.713	1.293
12	0.110 9	0.681	1.235

由表 4 可知,储水管道上最大应力、横向位移和竖向位移随着管壁厚度的增加而逐渐减小. 可以看出,当储水管道管壁厚度从 8 cm 变为 12 cm 时,应力和位移都逐渐减小,最大应力、横向位移和竖向位移分别降低了45.1%、8.5%、6.7%. 而当管壁厚度≥10 cm 时,应力和位移变化均很小,故管壁厚度建议采用 10 cm.

2.4　管道直径的影响

当储水管道的直径取 1 000,1 200,1 400,1 600 mm 时,分析储水管道直径变化对储水管道应力和位移的影响,计算结果见表 5.

表 5　管道直径对应力和位移的影响

Tab. 5　Influence of diameter of storage pipe on stress and displacement

管道直径 d/mm	最大应力/MPa	横向位移/mm	竖向位移/mm
1 000	0.172 3	1.199	2.052
1 200	0.129 7	0.734	1.332
1 400	0.117 1	0.627	1.047
1 600	0.146 4	0.725	1.143

由表 5 可知,随着管径的增大,应力和位移先减小后增大. 当管径为 1 400 mm 时,最大应力和位移取到最小值;而当管径为1 200 mm 时,储水管道的应力和位移与管径为1 400 mm 时相差不大. 考虑到储水管道的单位重量、施工费用、运输费用和管材价格等因素的影响,建议选用管径为 1 200 mm 的储水管道.

2.5　储水管道长度设计

借鉴国内外经验,推荐出图 2 所示的下穿立交排水系统. 它由雨水收集系统、雨水存储系统、排水泵站等组成. 储水管道和集水池共同构成雨水存储系统,主要作用是削弱洪峰流量.

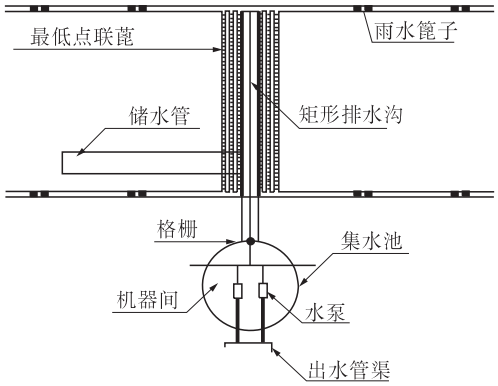


图 2　下穿立交排水泵站系统示意图

Fig. 2　The schematic diagram of drainage pump station systems in the underpass interchange

为了保证所需的存储容积不超过总的存储容积,有必要确定管道的长度. 目前,国外的存储管道主要为直径 1 200 ~ 1 400 mm. 存储的有效库容是存储管道、集水池最高水位以及水泵抽水最低

水位之间所有存储空间的总和,可按式(6)计算储水管道的长度:

$$L = \frac{V_{req} - V_{cs} - V_w}{A_s}. \quad (6)$$

式中:L 为所需存储单元的总长度,m;V_{req} 为所需最小存储体积,m^3;V_{cs} 为收集系统低于允许高水位的容积,m^3;V_w 为湿井低于允许高水位的容积,m^3;A_s 为储水管道横截面面积,m^2.

通过对以上各参数的分析,推荐的储水管道各参数如下:埋土深度 1.5 m,土基模量 40 MPa,储水管道管壁厚度 10 cm,管道直径 1 200 mm.

3 结论

(1)基于管-土力学模型建立了储水管道仿真模型,通过对其进行分析,计算出在车队荷载作用下储水管道的应力、横向位移和竖向位移.

(2)对储水管道进行配筋验算,其结果表明:未配钢筋时,储水管道上的最大拉应力超过了极限拉应力,配筋后则能满足规范要求.

(3)埋土深度、底部土基模量、管壁厚度、管道直径等管道参数与储水管道力学特性具有良好的对数相关性,本文推荐储水管道参数为埋土深度 1.5 m,底部土基模量 40 MPa,管壁厚度 10 cm,管道直径 1 200 mm.

参考文献:

[1] 王锋,万芸,陈金锥. 城市道路下穿立交排水优化设计[J]. 交通科技,2009(4):78-80.

[2] CONG Xiangyu, NI Guangheng, HUI Shibo, et al. Simulation of storm waterlogging value of urban interchange bridges [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2006 (2):13-17.

[3] 谢定文. 下穿立交排水泵站系统设计[D]. 西安:长安大学公路学院,2013.

[4] PETER N. Highway storm water pump station design [J]. Hydraulic Engineering Circular, 2001:(24)1-7.

[5] 徐飞. 下穿立交排水泵站系统优化设计研究[J]. 道路工程, 2014(2):154-156.

[6] 厉晶晶. 雨水收集利用系统关键技术及工程示范研究[D]. 镇江:江苏大学环境学院, 2010.

[7] AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures[R]. Washington D C:AASHTO, 2002.

[8] 高雪香,赵铁立,杨其新. 下穿式立交雨水排水系统改进[J]. 四川建筑,2006,26(3):99-100.

[9] 冯启军. 立交桥下穿引道排水系统研究[D]. 济南:山东大学土建与水利学院,2009.

[10] 范君,崔红梅. 城市下立交雨水排水系统设计[J]. 中国新技术新产品,2009(12):88-89.

[11] 吴小刚. 交通荷载作用下软土地基中管道的受力分析模型研究[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院,2004.

[12] 张土乔,吴小刚. 垂直荷载作用下的管道纵向受力分析模式初探[J]. 中国市政工程,2001(4):41-45.

[13] 张崇文,陈荣,张社荣. 沟埋式大型钢筋混凝土管与土相互作用动力性能的研究[J]. 岩土工程学报,1991,13(4):24-32.

Model Building and Mechanics Analysis on Storage Pipe of Underpass

ZHANG Hongliang[1], SUN Pei[1], XIE Dingwen[2]

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Sichuan Blue Planning and Design Institute Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the present waterlogging condition of underpass, a scheme of adding a storage pipe in underpass is given. Based on the tube-soil mechanics model, a simulation mechanical model of storage pipe is built, which is analyzed by finite element method. The reinforcement of the storage pipe is calculated, while the influence of parameters on the mechanical property of storage pipe is studied. The test results show that: the covering earth thickness, the soil base modulus, the wall thickness and the diameter have significant influence on mechanical property of storage pipe. According to the research results, a new storage pipe is recommended as follows: covering earth thickness of 1.5 m, soil base modulus of 40 MPa, wall thickness of 10 cm and diameter of 1200 mm.

Key words: road engineering; underpass; drainage system; storage pipe; mechanical property

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0109 - 05

长大上坡沥青路面抗剪强度设计方法研究

吕彭民[1], 桂发君[1], 张　扬[2]

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064;2. 西安陕鼓动力股份有限公司,陕西 西安 710075)

摘　要: 为了研究多种因素与长大上坡沥青路面面层内部剪应力的关系,以我国高速公路最常见的二轴车和四轴车为例,通过分析沥青路面剪切流动变形及影响因素,建立了一种移动荷载下长大上坡沥青路面的动力学响应模型. 基于正交试验方法对多变量进行了交叉组合计算,通过对计算结果的分析,建立了包括载重、速度、坡度和温度等主要影响因素的长大上坡沥青路面最大横向剪应力综合计算模型. 根据长大上坡路段的受力特点,建议在长大上坡沥青路面的设计和施工中增加面内最大剪应力和路面材料抗剪强度控制指标,并给出了多因素综合影响下的长大上坡沥青路面车辙预测模型.

关键词: 道路工程;长大上坡;沥青路面;剪应力;控制指标

中图分类号: U416.217　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.022

0　引言

研究表明,车辙是最常见的沥青路面病害形式之一[1]. 长大上坡路面在低速、重载等条件下,车辙病害更加严重,特别是温度较高的夏季,车辙形成速度快,严重影响行车安全[2]. 目前,国内外学者均没有将长大上坡路面的受力特点作为路面结构设计的参考因素,使得现有的长大上坡沥青路面过早的出现了车辙病害. 我国沥青路面的车辙大部分是流动型车辙,这是因为抗剪能力不足,沥青混合料在剪切力的作用下产生流动变形而形成的[3]. 研究发现,在实际交通荷载下,沥青路面因受到纵向剪应力(或剪应变)而产生的变形能够得到一定程度的强制恢复,而受到横向剪应力(或剪应变)产生的变形由于累积效应,路面破坏严重且不能恢复[4];同时,通过计算分析发现,长大上坡沥青路面面层内部的横向剪应变明显大于纵向剪应变. 为此,笔者针对移动荷载作用下的长大上坡路面动力学模型进行研究.

1　剪切流动变形及影响因素的分析

长大上坡沥青路面受力存在如下特点:①在相同荷载条件下,路面受到的剪应力与坡度大小正相关;②沥青混合料模量、抗剪强度等与温度负相关,且温度较高时会显著下降,使得路面易产生流动变形;③重载车辆上坡时,通常降档减速,相当于延长了荷载作用时间,根据时温等效原理[5],等同于提高了路面温度,加剧了长大上坡路面的剪切流动. 根据上述分析可以看出,载重、速度、坡度和温度是长大上坡沥青路面产生流动变形的最关键因素.

2　剪切应力模型的建立

2.1　有限元模型的建立

2.1.1　移动荷载的实现

笔者选择项目中某高速公路半刚性基层沥青路面结构进行研究,采用 Abaqus 软件,利用 Fortran 语言编写了 Dload 及 Utracload 的子程序,用来分别模拟长大上坡路面实际交通荷载下的车辆各轮对路面的垂直和水平移动荷载的作用,根据车辆的行驶距离和预先设定的载荷步时间来确定垂直和水平移动荷载作用的速度.

根据本项目组对现有几条高速公路车辆组成的调查发现[5]:目前国内高速公路上的载重车主要是二轴车,尤其是 1 + 2 型二轴车,其次为三轴车和四轴车中的 1 + 5 型、1 + 1 + 5 型及 1 + 2 + 5

收稿日期: 2015 - 07 - 10;**修订日期:** 2015 - 08 - 10

基金项目: 陕西省交通厅科技项目(08 - 12K)

作者简介: 吕彭民(1957—),男,陕西渭南人,长安大学教授,博士,博士生导师,主要从事工程机械和大型结构优化设计等方面的研究,E-mail:lpmin@chd.edu.cn.

型车辆居多,这里选择具有代表性的1+2型二轴车和1+1+5型四轴车进行研究.

考虑到实际路面情况,由于沿行车方向路面结构、移动荷载均对称分布,因此,只需研究车辆轮载作用区域的一半,即取整体路面宽度的一半(即单侧1/2)进行建模,1+2型二轴车作用下单侧各轮对沥青路面的移动荷载的模拟图见图1.笔者选取矩形均布压力模式来模拟各轮的作用力,同时认为轮胎的接地压力与标准胎压(取0.7 MPa)相等.此外,上坡路段行驶车辆各轮施加给路面的水平力由本项目组根据现场试验结果建立的水平力计算模型算得[5].

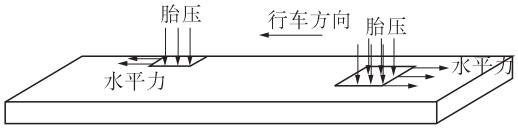


图1 1+2型二轴车荷载作用下移动荷载的模拟(单侧1/2)

Fig.1 Simulation of moving load by the 1+2 two-axis vehicle (one side 1/2)

2.1.2 边界条件及网格划分

根据圣维南原理和参考文献[6],路面结构模型的几何尺寸取为:10 m(沿行车方向,即纵向)×4 m(路面厚度,即垂向)×3 m(路面宽度,即横向).边界条件为:模型的底部($y=-4$ m处),U2=UR1=UR3=0;模型的前后($z=\pm5$ m处),U3=UR1=UR2=0;模型右边界($x=3$ m处),U1=UR2=UR3=0;模型的左边界($x=0$ m处),设成沿x方向的对称边界约束条件.采用三维实体单元C3D8R建立路面模型,划分网格情况见图2.1+1+5型四轴车的建模方法之与相同.

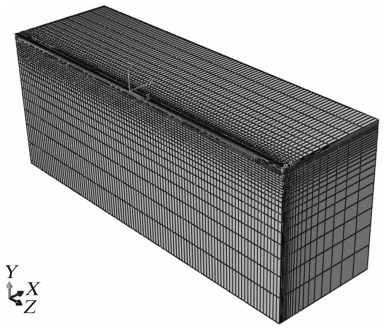


图2 沥青路面有限元模型及网格划分(1/2)

Fig.2 Finite element model for asphalt pavement and meshing(1/2)

2.1.3 沥青路面结构动力学有限元方程

当沥青路面所受荷载时间很短或受到动态荷载时,需要采用动态分析方法进行动力学研究,从而获得沥青路面的动态响应[7].

根据Hamilton变分原理及相关力学知识,建立了如下系统动力学有限元方程:

$$[M]\{\ddot{\delta}\}+[C]\{\dot{\delta}\}+[K]\{\delta\}=\{F(t)\}. \quad (1)$$

式中:$[M]$为系统的总质量矩阵;$\{\delta\}$、$\{\dot{\delta}\}$、$\{\ddot{\delta}\}$为系统中离散点的位移、速度和加速度的向量表达形式;$[K]$为系统的总刚度矩阵;$[C]$为系统的总阻尼矩阵;$\{F(t)\}$为路面动力系统的荷载矩阵.

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K]. \quad (2)$$

式中:α,β为比例常数,与沥青路面结构的固有频率和阻尼比有关.

这里采用Abaqus软件中的动力学分析模块对方程(1)进行求解,从而获得沥青路面在各种参数下的动力学响应.

2.1.4 路面结构及材料参数

试验路段沥青路面的结构形式和材料参数见表1.由于半刚性沥青路面的基层和底基层选用水泥稳定材料,温度对其性能影响较小[8],所以不考虑温度对基层和底基层的影响.

根据BELLS修正模型[9]能算出不同温度下的沥青层模量,见公式(3).根据《公路沥青路面设计规范》选取20 ℃时的各沥青层模量值.

$$E_T=E_{20}\times10^{0.018(20-T)}. \quad (3)$$

式中:E_{20}为沥青混合料在20 ℃时的模量,MPa;T为沥青混合料温度,℃;E_T为沥青混合料在T下的模量,MPa.

表1 路面结构及材料参数

Tab.1 Pavement structure and material parameters

路面各结构层	厚度/mm	模量/MPa	泊松比v	密度/(kg·m^{-3})	阻尼 α	阻尼 β
上面层	40	E	0.35	2 400	0.4	0.005
中面层	60	E	0.35	2 400	0.4	0.005
下面层	120	E	0.35	2 400	0.4	0.005
水泥稳定碎石	180	1 500	0.2	2 340	0.4	0.005
水泥稳定碎石	180	1 300	0.2	2 340	0.4	0.005
土基	\	45	0.4	1 730	0.4	0.005

注:表格中,"E"表示该参数与温度有关;"\"则表示该参数与结构模型的尺寸有关.

2.2 计算工况设计

为了研究长大上坡路段载重、速度、坡度和温度等因素与面层内部最大横向剪应变之间的关系,参照正交试验方法,在标准胎压(取0.7 MPa)及标准荷载下,对坡顶位置(最易形成车辙的位

置)进行各变量的交叉组合计算,正交计算工况如表 2 所示.

表 2　正交计算工况

Tab. 2　Orthogonal calculation case

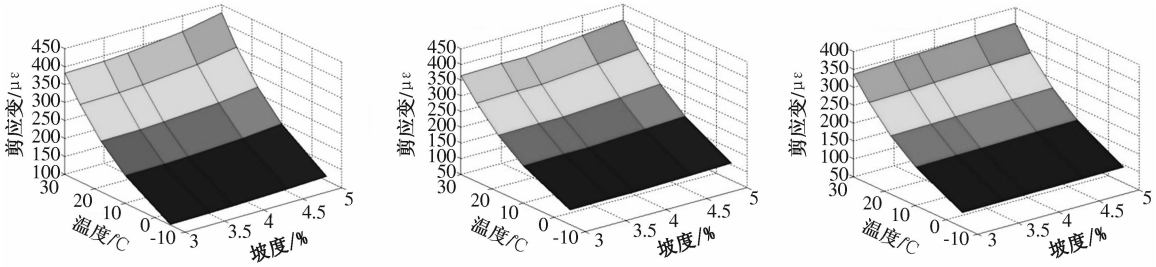
变量	变量值				
入坡速度 v_0/(km·h^{-1})	40	60	80	—	—
坡度 α/%	3	3.5	3.8	4.5	5
温度 T/℃	-5	10	18	25	30

由于计算量大,笔者只对标准载荷情况下各交叉组合工况进行有限元计算. 首先,建立表 2 中各变量与面内横向剪应变的关系式;然后,考虑到载重的影响,建立包括载重和表 2 中各变量在内的面内最大横向剪应变模型.

2.3　计算结果

选取 1+2 型二轴车,在标准荷载情况下进行试验,得到不同入坡速度、坡度和温度时各组合工况下的面内最大横向剪应变的有限元计算结果分布见图 3. 1+1+5 型四轴车类似.

由图 3 可知:面层内部最大横向剪应变随着入坡速度 v_0 的减小、坡度 α 的增加和温度 T 的升高而增大;其中温度的影响最为显著.



(a) v_0=40 km·h^{-1}　　(b) v_0=60 km·h^{-1}　　(c) v_0=80 km·h^{-1}

图 3　1+2 型二轴车标准荷载下不同入坡速度时面层内部最大横向剪应变分布图

Fig. 3　Distribution of maximum transverse shear strain in the surface layer of 1+2 two-axis vehicle with standard load by different speed into the slope

2.4　剪切应力模型的建立

2.4.1　拟合函数形式的选择

为确定面内最大横向剪应变 ε_0 与速度 v、坡度 α 和温度 T 等变量之间的函数关系,笔者分别选取线性函数、对数函数、多项式函数、幂函数、指数函数等 5 种函数形式进行拟合,通过相关性对比分析发现,相关性最高的函数形式为指数函数,故取面内最大横向剪应变与各变量之间的拟合函数表达式为

$$\varepsilon_0 = a_0 e^{(a_1 v + a_2 \alpha + a_3 T)}. \tag{4}$$

式中:ε_0 为面内最大横向剪切应变,με;v 为坡顶速度,km/h;α 为坡度,%;T 为温度,℃;a_0,a_1,a_2,a_3 为待定的回归系数.

2.4.2　函数拟合

采用 SPSS 统计软件,按照公式(4)的函数形式将图 3 中的数据结果进行多元非线性回归,即可确定 1+2 型二轴车和 1+1+5 型四轴车标准荷载下,面内最大横向剪应变与速度、坡度及温度的拟合函数表达式:

1+2 型车辆作用下:

$$\varepsilon_0 = 148.171 e^{(-0.004\,4v + 0.002\,9\alpha + 0.038T)}, R^2 = 0.990. \tag{5}$$

1+1+5 型车辆作用下:

$$\varepsilon_0 = 154.238 e^{(-0.003\,6v + 0.000\,1\alpha + 0.038\,2T)}, R^2 = 0.990. \tag{6}$$

以上函数表达式均是在标准载荷情况下分析得到的,并没有考虑到载荷变化的影响. 图 4 给出了二轴车和四轴车分别在入坡速度为 60 km/h、坡度为 3.8%、温度为 30 ℃时,不同荷载情况下的面内最大横向剪应变的分布关系. 由图 4 可知,面内最大横向剪应变与车辆荷载质量线性相关,拟合表达式如下.

1+2 型二轴车作用下:

$$\varepsilon_W = 0.018\,8W + 286.21, R^2 = 0.937. \tag{7}$$

1+1+5 型四轴车作用下:

$$\varepsilon_W = 0.003\,9W + 370.26, R^2 = 0.923. \tag{8}$$

式中:W 为车辆的实际荷载质量,kg.

由式(7)和式(8)的线性关系,可得图 5 所示任意载荷与面层内部最大横向剪应变的曲线(其中,W_0 为标准载荷时的荷载质量,ε_0 为标准载荷作用下的最大横向剪应变).

由图 5 可知,利用曲线斜率 k 和任意一点的坐标,就能表达出任意载荷下的面层内部最大横向剪应变的大小,见式(9):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon = \varepsilon_0 + k(W - W_0). \tag{9}$$

将式(4)代入式(9):

$$\varepsilon = a_0 e^{(a_1 v + a_2 \alpha + a_3 T)} + k(W - W_0). \tag{10}$$

式中:ε 为各因素影响下的面内最大横向剪应变,$\mu\varepsilon$;k 为曲线斜率.

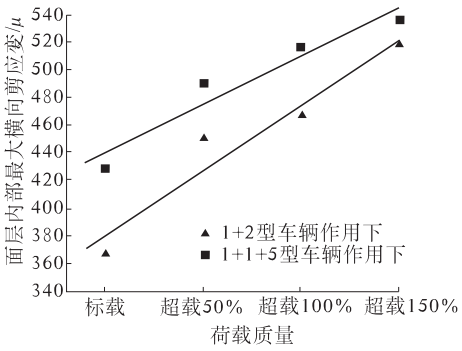


图4 不同荷载质量对面内最大横向剪应变大小的影响

Fig. 4 Influence of different qualities and the maximum transverse shear strain in the surface layer

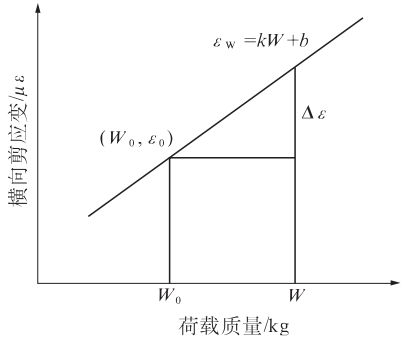


图5 面内最大横向剪应变与荷载质量关系曲线图

Fig. 5 Graph of the maximum transverse shear strain in the surface layer and quality

由虎克定律可知,面内最大横向剪应力 τ 的函数关系式为

$$\tau = G \cdot \varepsilon \cdot 10^{-6}. \tag{11}$$

式中:G 为剪切模量,MPa.

因此,式(10)也可转变为剪应力模型:

$$\tau = G \cdot (a_0 e^{a_1 v + a_2 \alpha + a_3 T}) + k(W - W_0)) \cdot 10^{-6}. \tag{12}$$

结合式(5)~(8)及式(12)即可得到1+2型二轴车和1+1+5型四轴车载荷作用下,包括载重 W、速度 v、坡度 α 和温度 T 等变量在内的面层内部最大横向剪应力 τ 的拟合函数形式,见式(13)和式(14):

1+2型车辆荷载作用下:

$$\tau = G \cdot (0.018\,8(W - 500\,0) + 148.171 \cdot e^{-0.004\,4v + 0.002\,9\alpha + 0.038T}) \cdot 10^{-6}. \tag{13}$$

1+1+5型车辆荷载作用下:

$$\tau = G \cdot (0.003\,9(W - 178\,00) + 154.238 \cdot e^{(-0.003\,6v + 0.000\,1\alpha + 0.038\,2T)}) \cdot 10^{-6}. \tag{14}$$

公式(12)即为包括载重、速度、坡度和温度等变量在内的长大上坡沥青路面面层内部最大横向剪应力模型.该模型可为多因素作用下长大上坡沥青路面面层内部最大横向剪应力的分布、车辙产生原因及长大上坡沥青路面的结构设计等研究提供理论支撑.

3 长大上坡沥青路面控制指标研究

综合以上分析,我国半刚性基层沥青路面容易产生流动型车辙变形的关键力学原因是:面层内部受到的横向剪应力(或剪应变)超过了允许范围,然而现有的沥青路面在结构设计和实际施工中均未考虑剪应力(或剪应变)的影响,而且目前在长大上坡沥青路面的设计和实际施工中,还没有提出可供参考的相关控制指标的执行标准及设计方法.针对以上问题,建议在路面结构设计中,增加考虑面层内部抗剪性能的控制指标,即面内最大横向剪应力 τ.同时,在沥青路面的实际施工中,增加抗剪强度 τ_0 作为控制指标.

(1)根据面内剪应力的大小进行控制:

$$\tau \leqslant [\tau] = \tau_0 / n. \tag{15}$$

式中:τ 为面内最大横向剪切应力,MPa;$[\tau]$ 为设计时面内允许最大横向剪切应力,MPa;n 为安全系数;τ_0 为面层材料的抗剪强度,MPa.

此方法要求在路面结构设计中,必须控制面内最大横向剪应力 τ,使其小于或等于允许的最大横向剪应力 $[\tau]$.

(2)根据沥青混合料的抗剪强度和路面施工质量控制,式(15)可变为

$$\tau_0 \geqslant n\tau. \tag{16}$$

此方法要求在控制混合料级配或检验路面施工质量时,务必控制面层混合材料的抗剪强度 τ_0,使其大于或等于设计时的最大横向剪应力 τ 与安全系数 n 的乘积.因此,分别将 τ 作为沥青路面结构设计时的控制指标,τ_0 作为检测施工质量的控制指标,两者统一且相互制约,可弥补现有规范的不足.

4 长大上坡沥青路面综合车辙预测模型

文献[3]给出了沥青层厚度、沥青路面的温度、轮载作用次数、路面最大剪应力和混合料的抗剪强度等变量在内的车辙深度的关系式:

$$R_D = 0.388\,3 T^{0.748\,2} \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^{1.402\,7} N^{0.370\,4} h^{0.482\,5}. \tag{17}$$

式中:R_D 为沥青路面车辙深度,mm;T 为沥青路面温度,℃;τ 为在车辆荷载作用下的沥青路面最大剪应力,MPa;τ_0 为路面材料的抗剪强度,MPa;N 为轮载作用次数;h 为沥青路面沥青层厚度,cm.

将式(12)代入式(17),可得

$$\begin{cases} R_D = 0.388\,3T^{0.748\,2}\left(\dfrac{\tau}{\tau_0}\right)^{1.402\,7} N^{0.370\,4} h^{0.482\,5}; \\ \tau = G\cdot(a_0 e^{(a_0 V + a_2 a + a_3 T)}) + k(W - W_0))\cdot 10^{-6}. \end{cases} \tag{18}$$

对于 1 + 2 型二轴车和 1 + 1 + 5 型四轴车车辆荷载作用下,τ 的大小根据式(13)和式(14)算得. 公式(18)即为包括载重、速度、坡度和温度等影响因素在内的坡道沥青路面车辙综合预估模型,该预估模型为长大上坡沥青路面的车辙预测提供了一种计算方法.

5　结论

(1)由长大上坡沥青路面的受力特点可知:载重、速度、坡度和温度是长大上坡沥青路面产生流动型车辙变形的最关键因素;

(2)建立了包括载重、速度、坡度和温度等影响因素在内的长大上坡沥青路面面层内部最大横向剪应力计算模型,以及沥青路面车辙综合预估模型;

(3)建议将面层内部最大横向剪应力 τ 增加为长大上坡沥青路面结构设计的控制指标,将面层材料的抗剪强度 τ_0 增加为路面实际施工质量的控制指标.

参考文献:

[1] 崔文博,郝培文. 基于 Ham - burg 车辙试验的沥青路面车辙损坏分析[J]. 中外公路,2014 ,34(1):95 - 98.

[2] 吴浩,裴建中,张久鹏. 长大纵坡路段沥青路面车辙规律及影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版),2009,29(6):28 - 31.

[3] 鲁正兰,孙立军. 沥青路面车辙预估方法的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1476 - 1480.

[4] 闫卫红,孟枫林,董忠红. 移动荷载下半刚性基层沥青路面剪应变研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(2):47 - 51.

[5] 许丽明. 长大上坡路段车辆对路面动作用力的研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2012.

[6] LU Pengmin, TIAN Runli, LIU Xiaoyun. Dynamic response solution in transient state of viscoelastic road under moving load and its application[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010,136(2):168 - 173.

[7] PEI Jianzhong, WU Hao, CHEN Yong, et al. Dynamic response characteristics of asphalt pavement under multi-axle moving load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5):26 - 31.

[8] 武建民,马君毅,戴经梁. 温度对水泥稳定旧沥青路面材料强度的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2009,33(17):54 - 56.

[9] 谈至明,吁新华. 沥青面层的截面弯曲刚度当量模量计算[J]. 中国公路学报,2012,25(6):37 - 42.

Study of the Shear Strength Design Method for the Long-uphill Asphalt Pavement

LYU Pengmin[1], GUI Fajun[1], ZHANG Yang[2]

(1. Key Laboratory of Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Shaangu Power Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to study the relationship between the shear stress in the surface layer of long-uphill asphalt pavement and multiple factors, by analyzing the shear flow deformation with the affecting factors of asphalt pavement, a dynamic response model of the long-uphill asphalt pavement under moving load was established which took the most common two-axis vehicle and four-axis vehicle on highway in China as examples in this paper. The multivariate cross combinations calculation was conducted with reference to the orthogonal test method. By the analysis of the calculated results, a maximum transverse shear stress comprehensive calculation model of the long-uphill asphalt pavement was proposed which included main affecting factors such as axle load, speed, slope and temperature. According to the mechanical characteristics of the long-uphill pavement, it is suggested that the maximum shear stress in the surface layer and the shear strength of the pavement material should be added as control indexs in the pavement design and construction. A comprehensive rutting prediction model under the influence of many factors was proposed.

Key words: road engineering; long-uphill; asphalt pavement; shear stress; control index

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0114 - 05

干湿循环下膨胀土边坡响应的模型试验

张雨灼,王柳江,刘斯宏,林亚伟

(河海大学 水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘 要: 为了解干湿循环作用下膨胀土边坡的吸力、孔隙水压力、胀缩变形的变化,开展了室内膨胀土边坡模型试验,测定了干湿循环条件下膨胀土边坡表层土体的吸力、孔隙水压力、胀缩变形的变化情况,绘制了相应的时程曲线及表面轮廓线.试验结果表明:随着干湿循环次数的增加,裂缝逐渐变宽变深,吸力和孔隙水压力在降雨工况下的变化幅度增大;水平顺坡向位移在干湿循环过程中表现为递增趋势,竖向位移在干湿循环中表现出明显的胀缩性;膨胀土边坡的隆起变形在每次干湿循环后均有所增加,且坡脚和坡底处的隆起变形量较其余部位更为明显.

关键词: 干湿循环;膨胀土;边坡;吸力;孔隙水压力;位移;模型试验

中图分类号: TB61^{+}5;TU833^{+}.1 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.023

0 引言

膨胀土是一种典型的非饱和土体,其破坏性极强且分布十分广泛,主要由黏土矿物蒙脱石与伊利石等亲水性黏粒成分组成,具有吸水膨胀、失水收缩、易风化与崩解、多裂隙、超固结和强度衰减等特性,对工程建筑物破坏性强,并具有多次反复和长期潜在的特点[1].因此,膨胀土问题是岩土工程领域中的技术难题之一,而膨胀土边坡的稳定问题,更是有“逢堑必崩,无堤不塌”之说.早期的研究调查表明,降雨和水位变动是导致膨胀土边坡失稳的主要外因,而很少考虑长期干湿循环作用的影响.但是,目前则普遍认为干湿循环是引起膨胀土边坡失稳的主要原因,循环降雨和蒸发易引起浅层膨胀土胀缩开裂,裂隙加速水分入渗,破坏土体结构,从而导致土体强度降低,使得膨胀土边坡失稳具有浅层性、逐级牵引性和缓坡滑动等特征.

单元试验是目前研究膨胀土干湿循环效应最常用的方法之一.杨和平等[2]对宁明原状膨胀土进行了有荷载条件模拟干湿循环过程的试验研究,得到其胀缩变形和强度的变化规律.刘华强等[3]采用室内直剪仪,研究了不同干湿循环次数下膨胀土的饱和抗剪强度规律,指出干湿循环是导致膨胀土饱和抗剪强度迅速衰减的主要原因.吕海波等[4]通过对南宁地区原状膨胀土经历干湿循环后的强度试验,探讨了膨胀土抗剪强度与含水率、循环次数、循环幅度等循环控制参数的关系.徐彬等[5]通过室内干湿循环试验获得了含裂隙的膨胀土试样,首次利用三轴仪研究了含裂隙土体强度的影响因素和变化规律.刘松玉等[6]研究了干湿循环对击实膨胀土胀缩特性的影响.唐朝生等[7]则开展了吸力控制及常规条件下的原状和重塑膨胀土干湿循环试验,进一步研究了干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征,并探讨了不同干湿循环路径对膨胀土胀缩性的影响.上述研究结果表明,膨胀土抗剪强度和胀缩变形性能均随着干湿循环次数的增加而衰减,但强度衰减幅度却并不足以导致膨胀土边坡失稳,这主要是由于室内直剪或三轴试验不能模拟干湿循环作用下膨胀土边坡裂缝的产生和发展过程以及水的入渗对其强度和变形特性的影响,其得出的强度和变形指标无法很好地反映实际情况.

近年来,一些研究者开始对干湿循环作用下的膨胀土边坡开展模型试验研究.其中,王国利、陈生水等[8-9]人通过离心模型试验,研究了干湿

收稿日期: 2015 - 06 - 02;**修订日期:** 2015 - 09 - 03

基金项目: 中国博士后科学基金(2014M561566);江苏省博士后科研资助计划(1301015A);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金(YK913007)

通信作者: 王柳江(1985—),男,浙江武义人,河海大学博士后,主要从事非饱和土力学特性及数值模拟,E-mail:15850514642@163.com.

循环下膨胀土边坡的变形和稳定性. 周健等[10]通过膨胀土边坡干湿循环模型试验,直接在坡面切取各次干湿循环后的边坡土样进行直剪试验,得到抗剪强度随边坡干湿循环的变化规律. 石北啸等[11]开展了膨胀土边坡基质吸力随深度和时间变化规律的室内试验,对模型破坏过程进行了分析. 上述试验成果均表明了干湿循环作用下膨胀土边坡的失稳破坏是一种浅表层的牵引式渐进性破坏. 但鉴于膨胀土本身性质的复杂性及边坡地质条件的多样性,对于干湿循环下膨胀土边坡破坏的牵引性、渐进性、浅层性、长期性等特点及作用机理仍需深入研究.

笔者以南京汤山地区膨胀土为试验材料,开展膨胀土模型边坡干湿循环试验,研究干湿循环作用下对膨胀土边坡内部吸力、孔隙水压力以及变形的变化规律,以期揭示干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响的内在机理.

1　边坡模型试验方案

试验用膨胀土取自南京汤山的灰白色膨胀土,试验前对所采用的膨胀土的物理性质进行了测定,见表 1. 按自由膨胀率和塑性图联合判别法判定,该土属强膨胀土.

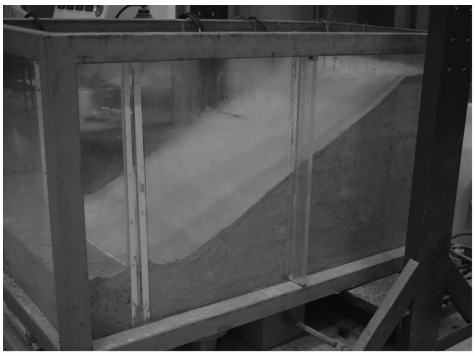
模型边坡制作时,首先将含水率为 10% 的风干膨胀土均匀加水调配成含水率为 28% 的土样,然后采用分层击实法在模型箱内形成 80 cm 厚的平整土层(击实时共分 16 层,每层厚 5 cm),填筑过程中控制干密度 1.3 g/cm^3,压实度达到 95.6%,之后进行开挖削坡形成图 1 所示边坡,按南水北调南阳段施工边坡缩放 10 倍得到模型边坡尺寸,为 160 cm × 80 cm × 80 cm,坡顶宽 20 cm,坡比为 1∶2. 为监测干湿循环作用过程中膨胀土边坡的表现特性(吸力、孔隙水压力及变形),在模型边坡内部埋设了张力计和孔隙水压力计,并在边坡表面布置了位移测点,各探头及测点位置如图 1(b)所示. 其中,吸力观测采用常规张力计,量程为 0 ~ 90 kPa,在坡顶、坡中及坡脚各布置了一个,陶土头的插入深度为 10 cm. 孔隙水压力监测采用振弦式孔压计,量程为 200 kPa,共埋设了 6 个,其中在坡面以下 15 cm 和 30 cm 处分别布置了 3 个,孔压计埋设之前先浸水饱和 24 h,然后在模型边坡填筑过程中将其埋入预定位置. 表面位移通过标记点进行测定,自坡顶到坡脚共布置了 7 排,其中每排 3 个点,结果分析时采用均值.

模型边坡制成后先静置 24 h,然后开始干湿循环试验. 整个试验共进行 6 次干湿循环,湿润过程采用喷壶对边坡均匀降雨,降雨过程持续 2 h,降雨强度为 6 mm/h,以模拟自然状况下的中等强度降雨,当坡面裂隙闭合时,大部分水已经沿坡面顺坡滑到坡脚位置,只有少量入渗到边坡内部,并且坡脚已经有大量积水,湿化过程结束;干燥过程采用浴霸模拟日照,持续约 60 h 后,孔隙水压力计和张力计的读数变化不大,胀缩变形也不明显,认为干缩过程结束,该过程即为一次干湿循环. 试验过程中对吸力、孔隙水压力及位移变化进行全程监测,并观察表层裂隙的开展情况.

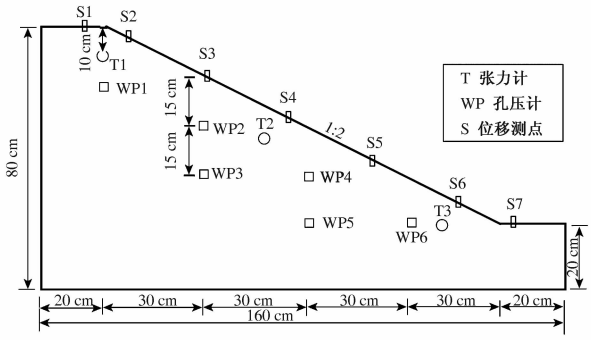
表 1　膨胀土基本物理性质

Tab. 1　The basic physical properties of expansive soil

土样	最大干密度/(g · cm^{-3})	天然含水率/%	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
膨胀土	1.36	11.8	31	78.1	31.7	46.4	100



(a) 照片



(b) 监测仪器

图 1　模型边坡及测点布置图

Fig. 1　Model slope and measuring point layout

2 试验结果分析

2.1 吸力

图2为张力计(T1~T3)所测得的吸力随干湿循环过程的变化曲线,图中实线表示干湿循环过程.从图2可以看到,所测得的吸力在3个位置中的变化规律基本一致,且吸力大小在坡顶位置处最大,坡中次之,坡底最小,这与文献[12]中的实测结果一致,但受限于本次试验边坡模型尺寸,三者之间的差值并不明显.第一次干湿循环时,由于张力计读数尚未稳定,加之膨胀土渗透系数十分小且边坡表面裂缝尚未形成,雨水难以入渗,吸力在此期间一直呈上升趋势.而在之后的每次干湿循环中,吸力均呈现先减小,后增大的趋势,且吸力减小基本发生在降雨与降雨后的2~5 h内,说明膨胀土边坡表层土体吸力受降雨影响十分明显.根据非饱和土强度理论,土体强度与吸力呈密切的正相关关系,由此表明膨胀土边坡浅层土体强度在降雨开始至降雨后的短期内会下降,从而容易导致边坡在此期间发生浅层滑动.

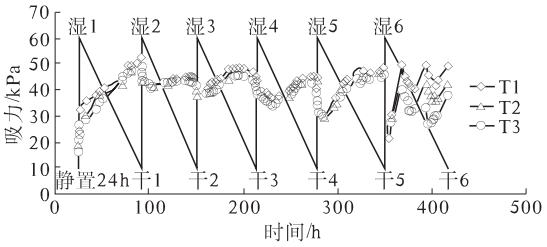
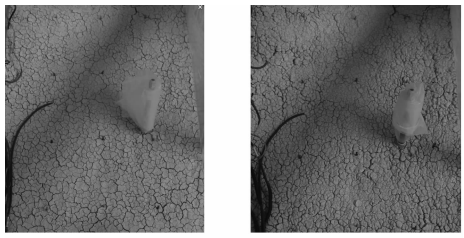


图2 干湿循环过程中吸力变化曲线

Fig. 2 Suction curve during wetting-drying cycles

随着干湿循环次数的增加,吸力随降雨和蒸发的变化幅度越来越大,这与边坡表层裂隙随干湿循环次数的开展程度有关.图3为第1次和第6次干湿循环后的边坡表层裂隙开展情况.从图3可以看到,经历6次干湿循环后的边坡表面裂缝在数量和深度上较第一次干湿循环后的显著.该现象表明,膨胀土边坡浅层土体中的裂隙在多次干湿循环后相互贯通,使得坡表水分在湿润过程中更容易渗入边坡内部,而边坡内部土体水分在干燥过程中也更容易通过裂隙蒸发,从而导致膨胀土边坡浅层土体中的吸力变化幅度增大.由此可见,在相同的干湿循环幅度下,降雨引起的吸力减小幅度随干湿循环次数而增大,并使土体强度的降低幅度也随之增大,最终引发膨胀土边坡滑动破坏,从而表明裂隙的产生和发展不仅削弱了膨胀土土体的结构,而且为水分的入渗提供了通道,进一步增加土体强度降低幅度.



(a) 1次干湿循环后 (b) 6次干湿循环后

图3 裂隙开展分布照片

Fig. 3 The crack distribution photo

2.2 孔隙水压力

干湿循环试验过程中测定的孔隙水压力变化主要由边坡填筑结束后的超静孔隙水压力消散以及外界水分的入渗和蒸发引起.为对比研究不同部位的孔隙水压力在试验过程中的变化规律,笔者采用了相对初始状态的孔隙水压力(即各测点试验过程中测得的孔隙水压力减去边坡填筑完成时的孔隙水压力)进行对比分析.图4为孔隙水压力增量在干湿循环过程中的变化曲线,其变化规律与吸力具有一定相似性.

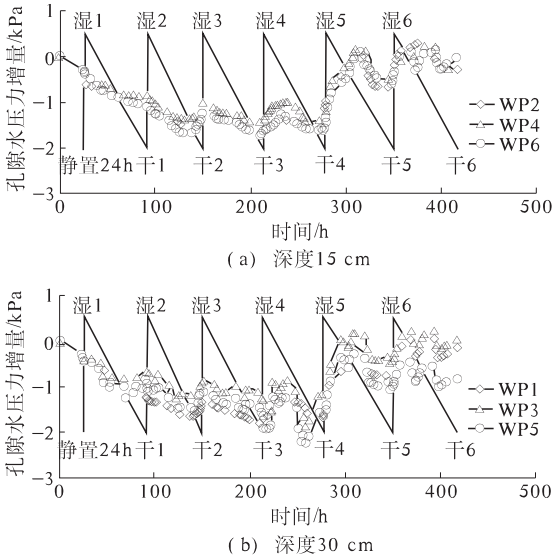


图4 干湿循环过程中孔隙水压力变化曲线

Fig. 4 Pore water pressure curve during wetting-drying cycles

在第二次干湿循环结束之前,降雨引起的孔隙水压力变化具有明显的滞后性,不同部位的孔隙水压力在此阶段基本呈递减趋势,这是由于膨胀土的弱渗透性使得前两次降雨入渗对孔压计埋设位置处的孔隙水压力影响不明显,此时孔隙水压力的变化主要表现为超静孔隙水压力的消散.在此之后,孔隙水压力在每次干湿循环中先增大后减小,且经历4次干湿循环后,由第5次降雨引

起的孔隙水压力增量急剧增大,说明此时边坡表面裂缝已开展至一定深度,在降雨条件下成为了对边坡稳定不利的渗水通道. 关于坡面以下 15 cm 和 30 cm 深度的孔隙水压力,除深度 30 cm 处的孔隙水压力波动性较 15 cm 处强之外,两者的总体变化规律基本一致,这说明干湿循环对模型边坡的影响深度已达到 30 cm.

2.3　坡面位移

图 5 为干湿循环过程中模型边坡表面的位移变化曲线,图中 S1 和 S7 位于坡顶和坡底水平部位,S2 ~ S6 分布于斜坡表面. 试验结果表明,干湿循环使得膨胀土边坡产生明显的变形. 水平向位移主要由雨水入渗引起,受蒸发作用的影响较小,可见在整个干湿循环过程中基本呈递增趋势,在前三次干湿循环中增长速度较快,坡顶及坡表上部的水平向位移小于坡底及坡表下部,最大水平向位移发生在坡表下部,该部位与文献[13]中膨胀土模型边坡在降雨条件下产生滑坡的位置相对应.

竖向位移明显小于水平向位移,受降雨入渗和水分蒸发的循环作用,其主要表现为膨胀和收缩变形,反映了膨胀土边坡表面在干湿循环过程中显著的胀缩性,这将促进土体结构的破坏以及裂缝的开展. 由于膨胀土在干湿循环中的膨胀和收缩变形具有不可逆性,坡顶和坡底的累积竖向位移主要表现为膨胀,其余部位则表现为沉降. 其中,最大累积膨胀变形发生在坡底部位,而最大累积沉降变形发生在坡底以上 1/3 坡高处.

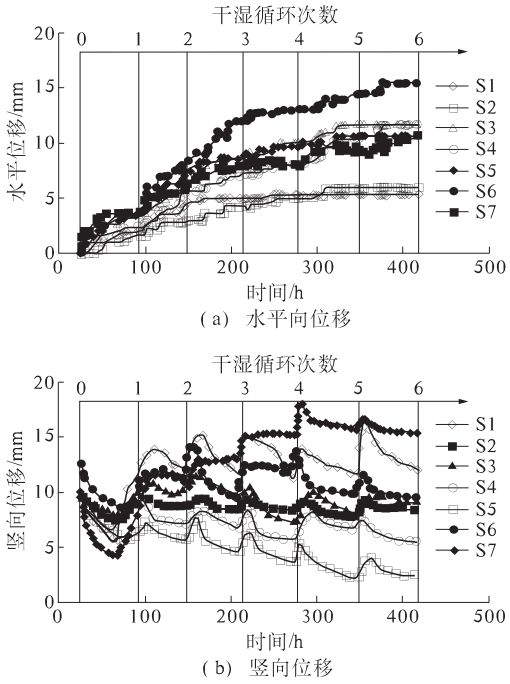


图 5　干湿循环过程中坡面位移变化曲线

Fig. 5　Slope displacement curve during wetting-drying cycles

图 6 为不同干湿循环次数后位移放大 10 倍的坡面轮廓线示意图. 由图 6 可见,膨胀土边坡在水平向和竖向位移的共同作用下,在第一次干湿循环后,边坡表面的隆起变形量较小,且在坡底位置还表现为收缩变形;第三次和第六次干湿循环后,边坡整体表现为隆起变形,且由于降雨径流沿坡面往坡底汇集,坡脚和坡底处的变形量较其余部位更大,这是膨胀土边坡发生渐进性破坏的一个重要特点.

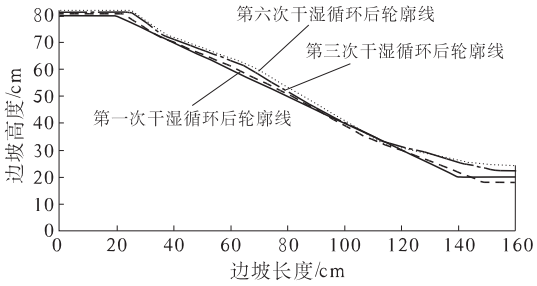


图 6　干湿循环后坡面轮廓线示意图(放大 10 倍)

Fig. 6　Sketch map of slope contour after wetting-drying cycles (magnification factor = 10)

3　结论

(1)干湿循环对膨胀土边坡浅层土体吸力和孔隙水压力的影响主要表现为膨胀土边坡裂缝的产生. 随着干湿循环次数的增加,裂缝逐渐变宽变深,为水分的入渗和蒸发提供了通道,使得降雨入渗条件下的吸力和孔隙水压力变化幅度随干湿循环次数增加而增大.

(2)水平顺坡向位移在干湿循环过程中表现为递增趋势. 随着干湿循环次数的增加,干湿循环对膨胀土边坡水平顺坡向位移的影响减弱. 竖向位移在干湿循环中表现出明显的胀缩性,这将促进膨胀土边坡浅层土体的结构破坏以及裂缝开展.

(3)膨胀土边坡的隆起变形在每次干湿循环后均有所增加,且坡脚和坡底处的隆起变形量较其余部位更为明显,具有发生渐进性破坏趋势.

参考文献:

[1]　廖世文. 膨胀土与铁道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.

[2]　杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报,2006, 28(11):1936 - 1941.

[3]　刘华强,殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学,2010, 31(3):727 - 731.

[4] 吕海波,曾召田,赵艳林等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学,2009, 30(12):3797-3802.
[5] 徐彬,殷宗泽,刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学,2011, 32(1):44-50.
[6] 刘松玉,季鹏,方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报,1999, 21(1):12-16.
[7] 唐朝生,施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报,2011, 33(9):1376-1384.
[8] 王国利,陈生水,徐光明. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. 水利水运工程学报,2005(4):6-10.
[9] 陈生水,郑澄锋,王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2007, 29(6):795-799.
[10] 周健,徐洪钟,胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报,2013, 35(S2):152-156.
[11] 石北啸,陈生水,韩华强等. 考虑吸力变化的膨胀土边坡破坏规律分析[J]. 水利学报,2014, 45(12):1499-1506.
[12] Zhan Liangtong, NG C W W, FREDLUND D G. Instrumentation of an unsaturated expansive soil slope [J]. ASTM, Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(2), 113-123.
[13] 程永辉,程展林,张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2011, 33(S1):416-421.

Model Test on the Performance of the Expansive Soil Slope During Wetting-drying Cycles

ZHANG Yuzhuo, WANG Liujiang, LIU Sihong, LIN Yawei

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the responses of the suction, pore water pressure and swelling-shrinking deformation of the expansive soil slope during wetting-drying cycles, a laboratory model test on the expansive soil slope was conducted. During the wetting-drying cycles we measured the changes of suction, pore water pressure and swelling-shrinking deformation of the expansive soil slope surface, drew the corresponding time curve and surface contours. The experimental result showed that variations of the suction and pore water pressure caused by rainfall increase with the increase of the times of the wetting-drying cycle for the width and the depth of the crack got larger and deeper; the horizontal displacement increases during wetting-drying cycles, while there is remarkable swelling-shrinking deformation observed for the vertical displacement; the heave deformation of the expansive soil slope increases after each wetting-drying cycle, especially at the foot and base of slope.

Key words: expansive soil; slope; wetting-drying cycle; suction; pore water pressure; displacement; model test

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0119 - 04

水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷试验研究

李晶晶[1,2], 张　擎[2]

(1. 陕西交通职业技术学院 公路工程系,陕西 西安 710018;2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘　要: 在分析重复荷载作用下接缝工作机理的基础上,通过弯曲疲劳试验,研究不同板厚、拉杆长度和拉杆直径等条件下水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷能力. 结果表明:纵缝传荷系数的变化在荷载作用 50 万次前后大致分为快速下降阶段和保持阶段;纵缝传荷系数随着拉杆直径和拉杆长度的增加而增大,但增幅不足 9%;纵缝传荷系数随着板厚的增加而降低,幅度约为 8%;结合现行规范对于旧水泥混凝土路面接缝传荷能力等级的评定,表明在试验模拟的工况下,荷载作用 50 万次后纵缝传荷系数保持值均在 80% 以上,具有优良的传荷能力.

关键词: 道路工程;水泥混凝土路面;接缝传荷系数;弯曲疲劳;拉杆

中图分类号: U416.222　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.024

0　引言

为了减小温度或湿度变化在水泥混凝土路面结构内引起的收缩或翘曲应力问题以及便于铺筑施工,人们通常采用纵向和横向的各种接缝形式将路面分割为规则形状的混凝土板,但接缝也是最容易出现病害的部位,是整个路面结构的最薄弱环节[1-3]. 国内外许多道路工作者对于接缝传荷能力和传力杆接缝运行特性进行了大量的研究工作[2-8],但基本上只测横向接缝传荷系数,往往忽略了纵缝传荷性能. 我国现行的水泥混凝土路面设计规范针对纵缝拉杆的设计主要考虑在温度收缩作用下拉杆本身的抗拉强度及拉杆与水泥混凝土之间的粘结力是否超过容许拉应力[1],也没有考虑拉杆的实际受荷特性及其传荷性能,而在实际路面的受力中纵缝拉杆的传荷性能不能忽视,因此,有必要对水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷性能进行研究.

1　重复荷载作用下接缝工作性能

1.1　接缝传荷能力评定

接缝的传荷能力是指水泥混凝土路面板的接缝具有将车轮荷载由一侧直接承受荷载的板块向接缝另一侧非直接承受荷载的板块进行传递的能力[2,4],通常可用接缝两侧板边的荷载和弯沉来计算.

1.1.1　荷载法

表征接缝传荷能力的直接指标是接缝两侧所承受荷载的比值,其计算方法虽然与传荷能力的定义完全一致,但对于荷载分配的实际状况却难以测量.

$$k_j = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%. \tag{1}$$

式中:k_j 为接缝传荷系数;P_2 为未受荷板接缝边缘处所承受的荷载,kN;P_1 为受荷板接缝边缘所承受的荷载,kN.

1.1.2　弯沉法

现行的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)采用受荷板一侧接缝边缘处的弯沉与未受荷板接缝边缘处弯沉之比来评定接缝传荷能力[1],根据接缝传荷系数大小将接缝传荷能力分为优良、中、次、差 4 个等级. 该方法目前广泛用于评定接缝传荷能力.

$$k_j = \frac{w_u}{w_i} \times 100\%. \tag{2}$$

式中:k_j 为接缝传荷系数;w_u 为未受荷板接缝边缘处的弯沉值,0.01 mm;w_i 为受荷板接缝边缘处的弯沉值,0.01 mm.

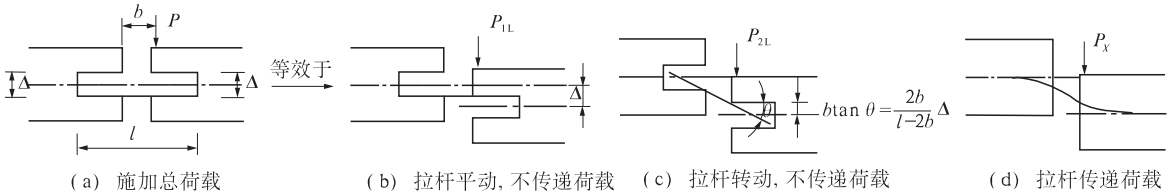
收稿日期: 2015 - 06 - 02;**修订日期:** 2015 - 08 - 03

基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目(2014H38);陕西省教育科学"十二五"规划项目(SGH14093)

作者简介: 李晶晶(1985—),女,湖北随州人,陕西交通职业技术学院讲师,长安大学博士研究生,研究方向为路面材料与结构,E-mail:lijingjingqi@163.com.

1.2 重复荷载作用下接缝工作机理

在重复荷载作用下,拉杆与混凝土相互作用致使与拉杆接触的混凝土界面出现一定的缝隙,即累计损伤,用松动量来表示[4]. 发生松动现象的单杆传荷系统,假定传荷系统始终处于线弹性工作范围,总荷载为 P,拉杆长为 l,松动量为 Δ,缝宽为 b,单根拉杆工作过程可分解为图 1 所示的模型.



(a) 施加总荷载 (b) 拉杆平动,不传递荷载 (c) 拉杆转动,不传递荷载 (d) 拉杆传递荷载

图 1 重复荷载下单根拉杆工作过程

Fig. 1 The work process of single tie bar under repetitive loads

由图 1 可以看出,荷载作用在水泥混凝土路面板时,拉杆并没有立即开始传荷,作用在受荷板的荷载由 $P = P_{1L} + P_{2L} + P_X$ 三部分组成,其中,P_{1L}和 P_{2L}用来克服接缝松动,P_X 是按照没有产生松动的正常情况传递. 这个工作过程仅对单根拉杆而言的,在实际传荷系统中,往往有多达十几根的拉杆,并不是每根拉杆同时按图 1 所示受力工作,它是一个逐渐变化的过程.

2 纵缝拉杆传荷疲劳试验与分析

2.1 重复荷载试验方法

为了得出拉杆对纵缝工作性能的影响,通过弯曲疲劳试验来分析纵缝拉杆传荷能力的变化,其试验装置类似于水泥混凝土抗弯拉试验,不同的是该装置的支座为两个距离 450 mm 的固定支座,用落锤式弯沉仪测得其反应模量为 45 MN/m^3;为真实模拟行车荷载通过接缝时其两侧受力不均匀以及荷载传递情况,试验中上压头采用偏心设置的单压头,试验中压头所接触的试块一端为受荷端,未接触的一端为非受荷端,在非受荷端一侧搭接一刚性平台布置位移传感器用以记录非受荷端在荷载作用过程中位移的变化情况,该刚性平台到接缝的距离与压头距接缝的距离相等. 试块的固定示意图如图 2 所示. 接缝传荷系数用弯沉法来进行表征.

试验中针对不同板厚的拉杆进行尺寸选择:试件尺寸($X \times Y \times Z$)为 90 cm × 15 cm × 24 cm 和 100 cm × 15 cm × 28 cm 两种规格. 拉杆材质选用 HRB355 螺纹钢,拉杆位于试件中央,直径选用 12,14,16,18 mm 4 种,长度选用 600,700,800,900 mm 4 种情况.

试验开始前,将 MTS 材料试验机的下作动头向上移动至重复弯曲试验装置的压头与试块紧密接触,施加一个小于 1 kN 的初始压力,且每次试验时控制初始压力相等;根据现场调查拉杆的受力情况以及试验室内传力杆的疲劳模拟经验[3,7,8],试验时以 0.05 kN/s 的速度加载到 5 kN,然后,控制 MTS 材料试验机以 5 Hz 的频率完成 5 ~ 20 kN 的一个加载周期,重复加载,记录试验数据的变化过程.

2.2 疲劳作用下纵缝拉杆传荷能力衰变规律

通过对拉杆的传荷疲劳试验进行分析,发现在荷载循环作用过程中,接缝传荷系数的变化规律类似,在此仅列出板厚为 24 cm,拉杆长度为 600 mm

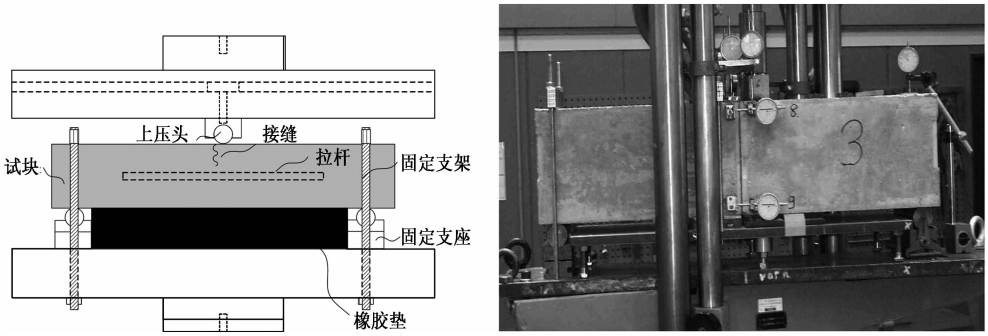


图 2 重复弯曲试验试块固定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fixing in repeated flexural test

的不同直径拉杆试验结果,见图 3. 分析可知:当拉杆直径为 12,14,16,18 mm 时,接缝传荷能力的初始值分别为 89%、91%、92% 和 93%. 由此可见,随着拉杆直径的增大,纵缝传荷能力的初始值逐渐增大. 进一步分析可知,在荷载循环作用过程中,接缝传荷系数的变化在荷载作用 50 万次前后可以大致分为两个阶段:快速下降阶段和保持阶段. 在接缝传荷系数的保持阶段,随着荷载循环作用的继续,接缝传荷系数保持不变. 当拉杆直径为 12,14,16,18 mm 时,接缝传荷系数分别保持在 86%、87%、91% 和 92%. 在工程中,更关心的是初始阶段和保持阶段的纵缝受力情况,因此,不同板厚、拉杆直径和拉杆长度的疲劳试验结果仅分析初始阶段和保持阶段的传荷系数.

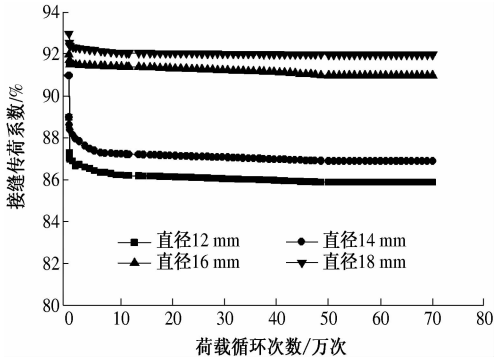


图 3　板厚 24 cm,拉杆长度 600 mm 时不同直径拉杆的纵缝传荷能力

Fig. 3　The transfer coefficient of longitudinal joint (the slab thickness is 24 cm, the length of tie bar is 600 mm)

2.2.1　拉杆直径和长度

对水泥混凝土路面板厚为 24 cm 的纵缝拉杆进行疲劳试验,结果见图 4(a). 分析可知:当拉杆长度为 600 mm,拉杆直径为 12,14,16,18 mm 时,纵缝传荷系数的初始值分别为 89%、91%、92% 和 93%,保持值分别为 86%、87%、91% 和 92%;当拉杆长度为 700 mm,拉杆直径为 12,14,16,18 mm 时,纵缝传荷系数的初始值分别为 89%、92%、92% 和 92%,保持值分别为 87%、89%、90% 和 91%;当拉杆长度为 800 mm,拉杆直径为 12,14,16,18 mm 时,纵缝传荷系数的初始值分别为 90%、93%、93% 和 93%,保持值分别为 87%、90%、92% 和 92%. 结果表明,当板厚和拉杆长度一定时,随着拉杆直径的增大,纵缝拉杆传荷系数的初始值和保持值均逐渐增大,但增幅不大;对于相同直径的拉杆而言,纵缝拉杆传荷系数随着拉杆长度的增大也在逐渐增加,同样整体增幅不太明显,且拉杆直径和长度达到一定程度时,拉杆在保持阶段的纵缝传荷水平相当. 因此,在实际工程中选用拉杆直径和长度时,应综合考虑接缝传荷能力和经济性,不能盲目追求高直径和高长度的拉杆.

对板厚 28 cm 的纵缝拉杆传荷能力进行疲劳试验,结果见图 4(b). 分析可知:当拉杆长度为 700 mm,拉杆直径为 12 ~ 18 mm 时,纵缝传荷系数的初始值为 84% ~ 90%,在快速下降阶段,纵缝传荷系数衰减了 4% ~ 7%;当拉杆长度为 900 mm,拉杆直径为 12 ~ 18 mm 时,纵缝传荷系数的初始值为 86% ~ 95%,在快速下降阶段,纵缝传荷系数衰减了 5% ~ 11%. 结果表明,当板厚和拉杆长度一定时,纵缝拉杆传荷系数随着拉杆直径的增大而增大,增幅为 6% ~ 9%;在接缝传荷能力快速下降阶段,其衰减值也是随着拉杆直径的增大而增大,致使在保持阶段接缝传荷系数变化幅度不大于 3%.

2.2.2　板厚

对不同板厚进行纵缝拉杆传荷疲劳试验,结果见图 5. 当拉杆长度为 700 mm 时,板厚 24 cm 的纵缝传荷系数初始值为 89% ~ 92%,保持值为 87% ~ 91%,板厚 28 cm 的纵缝传荷系数初始值为 84% ~ 90%,保持值为 80% ~ 83%;当拉杆长度为 800 mm 时,板厚 24 cm 的纵缝传荷系数初始值为 90% ~ 93%,保持值为 87% ~ 92%,板厚 28 cm 的纵缝传荷系数初始值为 85% ~ 93%,保持值为 80% ~ 83%. 这表明当拉杆长度一定时,纵缝拉杆传荷系数无论是初始值还是保持值均随着板厚的增加而降低,幅度约为 8%,当板厚一定时,随着拉杆长度和直径的增加而增大. 因此,在工程应用中,当交通量增加需增加板厚时,应适当加大拉杆直径和增大拉杆长度来提高纵缝的传荷能力.

根据《公路水泥混凝土路面设计规范(JTGD40—2011)中关于旧水泥混凝土路面接缝传荷能力等级划分的相关规定:当接缝传荷系数大于等于 80% 时,接缝传荷能力评定为优良. 通过以上分析可知,当板厚为 24 cm 和 28 cm,拉杆长度为 600 ~ 900 mm,拉杆直径为 12 ~ 18 mm 时,荷载作用 50 万次后纵缝传荷系数保持值均在 80% 以上,这表明纵缝拉杆承受荷载 50 万次循环后仍具有良好的传荷能力.

3　结论

(1)通过弯曲疲劳试验进行拉杆传荷能力分

析,发现在荷载循环作用下,纵缝传荷系数在荷载作用50万次前后大致分为快速下降阶段和保持阶段,与传力杆受力情况相似.

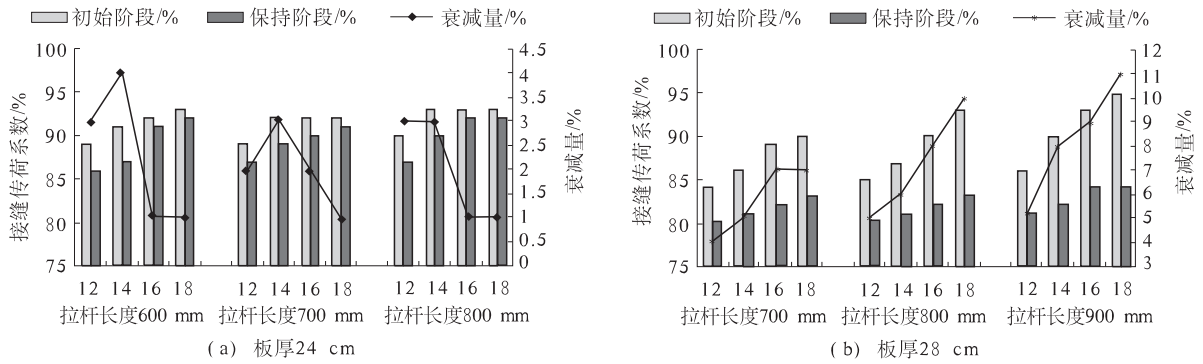


图4 不同拉杆直径和长度的纵缝传荷能力

Fig. 4 The transfer coefficient of longitudinal joint when the length and diameter of tie bar is different

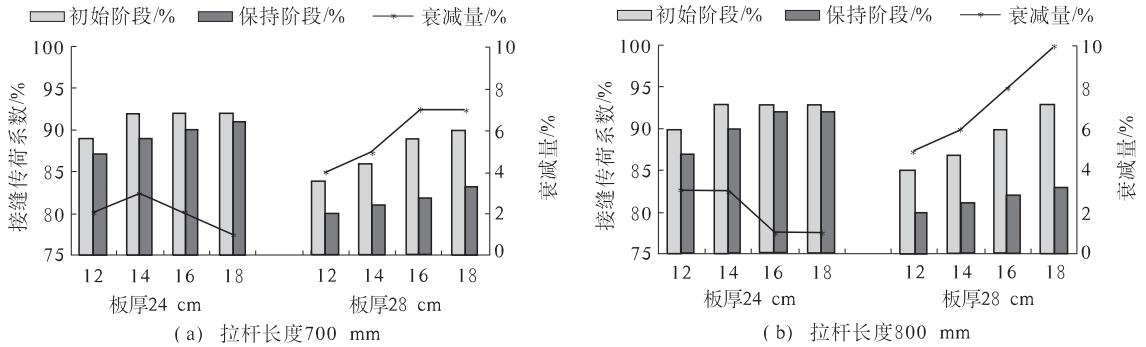


图5 板厚对纵缝拉杆传荷能力的影响

Fig. 5 The transfer coefficient of longitudinal joint of different slab thichness

(2)纵缝传荷系数随着拉杆直径的增加而增大,初始阶段的增幅为3% ~9%,保持阶段的增幅为3% ~6%;随着拉杆长度的增加而增大,初始阶段和保持阶段的增幅均不大于3%;随着板厚的增加而降低,幅度约为8%.结合现行规范对于旧水泥混凝土路面接缝传荷能力等级的评定,结果表明,在试验模拟的工况下,荷载作用50万次后纵缝传荷系数保持值均在80%以上,具有优良的传荷能力.因此,在实际工程中针对不同板厚的路面结构选用拉杆直径和长度时,应综合考虑接缝传荷能力和经济性.

参考文献:

[1] 国家建设部. JTG D40—2011公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[2] 周德云,姚祖康. 水泥混凝土路面接缝传荷能力的分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,1993,21(3):57-65.

[3] 彭鹏,田波,牛开民. 水平安装误差时传力杆工作性能研究[J]. 公路交通科技,2011,28(6):62-67.

[4] 张宁,黄晓明. 重复荷载下传力杆接缝运行特性[J]. 东南大学学报(自然科学版),1998,28(2):89-95.

[5] TAYABJI S D. Optimized performance at concrete pavement joints[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 1985:595-608.

[6] 冯升. 水泥混凝土路面纵缝传荷性能测试方法[J]. 中外公路,2009,29(1):90-92.

[7] 刘旭峰. 水泥混凝土路面接缝传荷衰变试验研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2012.

[8] 徐真真,曹高尚,王杰. 基于灰色理论的水泥路面拉杆传荷能力有限元分析[J]. 城市道桥与防洪,2013(1):133-136.

(下转第128页)

文章编号:1671 - 6833(2015)06 - 0123 - 06

钢管混凝土哑铃形截面标准拱面外稳定分析

陈礼榕[1,2], 陈宝春[1]

(1. 福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108;2. 福建省交通规划设计院,福建 福州 350008)

摘　要: 收集大量钢管混凝土哑铃形截面拱桥资料,对影响该类拱桥面外稳定的主要参素进行统计分析,参考实际桥例,构建既符合工程实际、又有代表性的哑铃形截面标准拱,并以标准拱为对象,进行面外弹性稳定的参数分析. 结果表明:哑铃形拱的弹性稳定系数随着矢跨比增大而先增大后减小,在矢跨比为 0.22 ~ 0.25 时达到峰值;与钢管混凝土单圆管拱相似,哑铃形拱的面外稳定性随着宽跨比增大而先增大后减小;横撑布设形式不仅影响哑铃形拱弹性稳定系数,还会影响面外失稳模态;拱顶横撑对面外稳定性影响较小、边横撑影响较大;适当增大拱肋钢管直径,可有效提高哑铃形拱面外稳定性,增加截面高度对其面外稳定性的提高幅度很小;拱弹性稳定系数随着桥面刚度增大而增大,但桥面刚度超过一定值后,哑铃形拱的面外稳定性增速变缓.

关键词: 钢管混凝土;哑铃形;标准拱;面外稳定;参数分析

中图分类号: U448.22;TU318　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.2015.06.025

0　引言

哑铃形截面拱肋是钢管混凝土拱桥中的最常见拱肋形式. 针对钢管混凝土哑铃形拱的稳定问题,学者通过试验研究和计算分析,提出了哑铃形拱面内稳定极限承载力的实用算法[1-2];而针对其面外稳定极限承载力的理论和试验研究很少,仅见文献[3]在空间受力试验基础上,进行单肋拱面外极限承载力研究,但该研究没有考虑横撑和桥面系的影响,与实际桥梁相差较大.

考虑哑铃形拱面外稳定极限承载力的研究还不够深入与成熟,且其面外失稳时一类失稳的特征较明显[4],工程实践与研究中,多以一类弹性稳定来控制哑铃形拱的面外稳定. 虽然弹性稳定求解的是拱失稳临界荷载上限,但其在理论上便于求解,并可揭示拱最容易发生的失稳模态特征. 本文的研究也采用这种稳定分析方法.

从分析对象角度看,现阶段哑铃形拱桥面外稳定问题研究常常限于某具体工程实例[5-7],缺乏系统性和代表性. 为使研究成果具有普适性,笔者选择哑铃形拱桥中最常用的下承式拱梁组合桥,统计分析已建桥例,构建了既符合工程实际、又具有代表性的哑铃形标准拱,并对其进行面外稳定参数分析,作为对目前研究不足的补充,从而为此类桥梁的应用与研究提供参考.

1　桥例统计分析

由拱结构稳定理论和已有哑铃形拱桥面外稳定的研究成果可知,影响钢管混凝土哑铃形拱梁组合桥面外稳定的主要参数有:矢跨比、宽跨比、拱轴线形、拱肋截面特性、横撑布置、桥面刚度等. 对上述参数进行分析,确定参数分布规律.

1.1　桥跨形式与结构主要参数

截止至 2014 年 12 月,共收集到 160 座钢管混凝土哑铃形截面拱桥. 参考文献[8]的分类方法,对收集到的哑铃形拱桥进行分类统计:下承式拱梁组合桥所占比例最大,占总数的 41.9%;其次为中承式,占总数 23.1%,下承式刚架系杆拱占 21.9%,其余结构形式所占比例均较小. 以下结构参数分析时,均以已知参数的 67 座下承式拱梁组合桥为分析对象.

从图 1 可以看出,哑铃形拱梁组合桥在跨径 70 ~ 130 m 范围内应用较多. 大多数哑铃形拱梁组合桥的矢跨比集中在 0.2 ~ 0.25,其中以 0.2

收稿日期: 2015 - 07 - 08;**修订日期:** 2015 - 08 - 18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178119);住房与城乡建设部《工程建设标准制订、修订计划》(2011 - 1 - 59)

作者简介: 陈礼榕(1981—),男,福建福州人,福建省交通规划设计院高级工程师,福州大学博士生,主要从事组合桥梁结构研究,E-mail:robby3368@163.com.

最多,占桥例总数的49.0%.

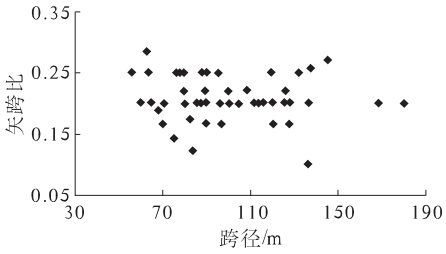


图1 拱肋矢跨比与跨径关系

Fig.1 Relationship between rise-span ratio and arch span

绝大多数哑铃形拱梁组合桥的拱轴线形为二次抛物线和悬链线,其中以二次抛物线最多,占桥例总数的75.0%,悬链线占总数的22.2%.

哑铃形拱梁组合桥的宽跨比覆盖范围较大,介于1/15.1~1/1.9,其中宽跨比在1/8~1/3的桥梁占总数的75.0%.

表1为钢管混凝土哑铃形拱桥的桥跨结构主要参数统计分析结果.

表1 桥跨结构主要参数统计

Tab.1 Main parameters statistics of arch structure

参数	哑铃形拱梁组合桥		所有类型哑铃形拱	
	平均值	标准差	平均值	标准差
跨径/m	97.4	25.7	101.9	27.6
矢跨比(f/L)	0.21	0.033	0.22	0.040
宽跨比(B/L)	0.23	0.112	0.21	0.103

1.2 拱肋构造主要参数

在构建哑铃形标准拱时,通过拱肋截面的跨高比和高宽比确定拱肋的截面形状,拱肋截面主要参数统计见表2.

表2 拱肋截面主要参数统计

Tab.2 Main parameters statistics of arch rib

参数	哑铃形拱梁组合桥		所有类型哑铃形拱	
	平均值	标准差	平均值	标准差
跨高比(L/h)	40.7	9.44	43.8	9.80
高宽比(h/d)	2.54	0.32	2.50	0.37

从表1和表2可以看出,哑铃形拱梁组合桥的桥跨结构和拱肋截面主要参数的统计分析基本能反映出钢管混凝土哑铃形拱桥的整体趋势.

根据收集的资料,哑铃形拱梁组合桥的拱肋截面高度h为2~3 m的占66.0%,拱肋钢管直径d(截面宽度)为0.8~1.2 m的占84.1%;拱肋截面高宽比的主要区间为2.3~2.7,拱肋跨高比L/h的主要区间为30~50.高宽比和跨高比均与跨径关系不大.

根据统计数据,超过86%的哑铃形拱肋采用Q345钢;拱肋核心混凝土以C50和C40混凝土为主,两者合计占81.1%;拱肋截面含钢率在5%~7%较多.拱肋截面含钢率与跨径几乎不相关.

1.3 横撑布设

哑铃形拱桥横撑主要形式有全桥一字式、一字式与K式组合、全桥K式、K式与X式组合等.对于哑铃形拱梁组合桥,一字式与K式横撑组合的应用率最高,占统计样本数的40.9%.

1.4 系梁构造

拱桥中拱梁组合体系按照拱肋刚度和系梁刚度之比可以分为刚性系杆刚性拱、刚性系杆柔性拱、柔性系杆刚性拱3种[9].工程实践中,刚性系杆刚性拱应用较多.根据统计数据,系梁截面高度与跨径之比介于1/60~1/30.

2 哑铃形截面标准拱的构建

2.1 构建方法[10]

根据面外稳定影响参数的统计分析结果,取统计平均值构建虚拟拱,并参考与其跨径相近的实际桥例,构建钢管混凝土哑铃形截面标准拱.

2.2 标准拱

参考实际桥例:郑州黄河公路二桥主桥[11]和石家庄石环公路龙泉大桥[12],对虚拟拱进行修正而得标准拱,标准拱主要结构参数见表3.

表3 拱结构主要参数

Tab.3 Main parameters of arch

参数名称	虚拟拱	桥例1	桥例2	标准拱
跨径/m	97.4	100	100	100
拱轴线形	75%为二次抛物线	悬链线	二次抛物线	二次抛物线
矢跨比	0.21	0.222	0.2	0.2
宽跨比	0.23	0.224	0.195	0.21
拱肋高/m	2.39	2.4	3	2.5
截面跨高比	40.7	41.7	33.3	40
截面高宽比	2.54	2.4	2.5	2.5
横撑形式		K撑与一字撑结合	一字撑	K撑与一字撑组合

标准拱跨径为100 m,矢跨比为0.2,拱轴线形为二次抛物线.拱肋截面高2.5 m,钢管规格为ϕ1 000 mm×16 mm.钢管采用Q345钢,管内灌注C50混凝土.两拱肋中心距21 m,拱顶设一字撑和两侧各一道K撑,横撑钢管直径为1 500 mm.系梁采用PC箱梁,梁宽2.0 m,梁高2.75 m.吊杆间距7.0 m.标准拱总体布置见图2.

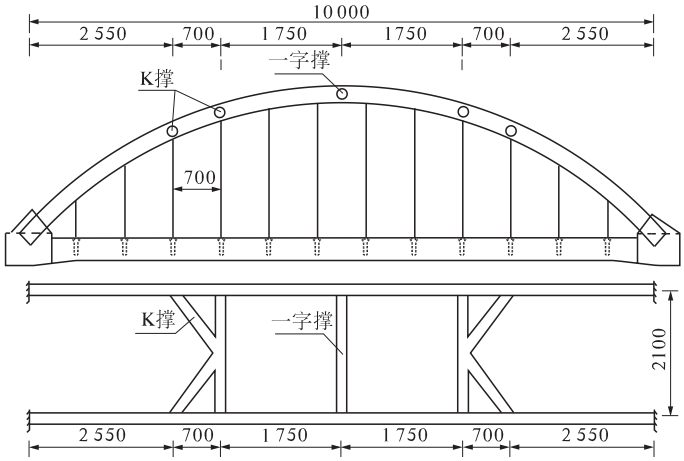


图 2　标准拱总体布置图(单位:cm)

Fig. 2　Layout of general plan of standard arch

3　标准拱弹性稳定计算

3.1　有限元模型

采用 ANSYS 软件建立有限元模型,拱肋钢管、混凝土、横撑及纵横梁采用梁单元 Beam188,吊杆采用空间杆单元 Link10. 钢管混凝土材料采用双单元法建立模型,即采用梁单元分别模拟钢管和混凝土,并假定二者完全粘结,无相对滑移. 车辆荷载采用最不利的布置方式:全桥满布车辆荷载.

3.2　计算结果

建立哑铃形标准拱的有限元模型,进行弹性稳定分析. 标准拱的一阶失稳形式为面外失稳,失稳模态为面外反对称全波失稳,如图 3 所示.

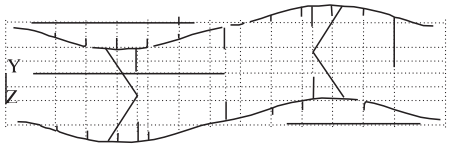


图 3　哑铃形标准拱一阶失稳模态

Fig. 3　First order instability mode of standard arch

与文献[10]的钢管混凝土标准桁拱相比,虽然两类拱桥的失稳形式均为面外失稳,但由于拱肋构造和横撑布置差别较大,失稳模态有所差别. 桁拱的宽跨比较小,其通常在 1/3 跨到 2/3 跨范围密集布置横撑,其面外失稳模态一般为面外对称半波失稳;而哑铃形拱跨径相对较小,横撑布置较稀疏,其面外失稳模态多为面外反对称全波失稳.

4　弹性稳定参数分析

为了解各面外稳定参数的影响,在标准拱模型的基础上,通过参数变化,进行弹性稳定分析.

4.1　矢跨比

计算分析时,保持拱肋截面、宽跨比、横撑布设形式等参数不变,仅改变矢跨比,其矢跨比 f/L 分别为 0.17,0.2,0.22,0.25,0.3 和 0.35,得到矢跨比和弹性稳定系数的关系如图 4 所示.

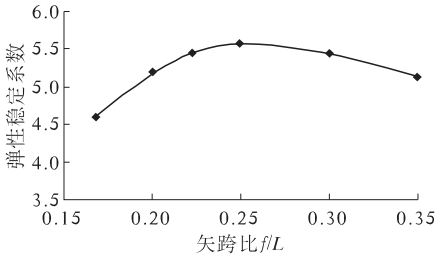


图 4　矢跨比与弹性稳定系数关系

Fig. 4　Relationship between rise-span ratio and elastic stability coefficient

从图 4 可以看出,哑铃形拱弹性稳定系数随着矢跨比增大而先增大后减小. 矢跨比在 0.22 ~ 0.25,弹性稳定系数到达了最大值. 当 f/L 较小时,拱肋弧长虽短,但拱肋由荷载产生的轴力大;而当 f/L 较大时,拱肋轴力虽小,但拱弧较长,拱肋面外长细比较大,故两种情况都易失稳.

4.2　宽跨比

计算分析时,保持拱肋截面、矢跨比、横撑布设等其他参数均不变,仅改变两拱肋的间距,建立车道数为 1 车道、2 车道、3 车道、4 车道、5 车道和 6 车道的模型拱,其宽跨比分别为 1/12.5,1/9.5,1/7.1,1/5.7,1/4.8 和 1/4.1,得到宽跨比和弹性稳定系数的关系如图 5 所示.

从图 5 可以看出,当宽跨比较小时,哑铃形拱的面外弹性稳定性随宽跨比增大而增大;当宽跨

比超过一定值后,哑铃形拱的面外弹性稳定性随宽跨比增大而减小.这与文献[13]的钢管混凝土单圆管拱桥的变化趋势相似,而与钢管混凝土标准桁拱[10]的变化趋势不同.

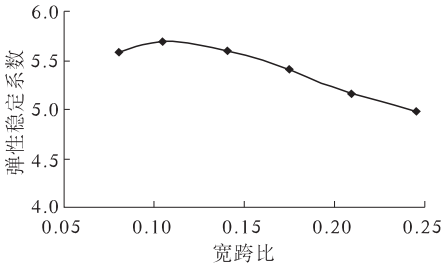


图5 宽跨比与弹性稳定系数关系

Fig.5 Relationship between width-span ratio and elastic stability coefficient

4.3 拱肋截面形状

分别以哑铃形截面高度和钢管直径为参数,在哑铃形标准拱的基础上进行弹性稳定分析,结果如表4和表5所示.从表4和表5可以看出,当桥跨结构、哑铃形截面宽度和钢管直径不变,仅增大截面高度,拱肋面外长细比不减反增,弹性稳定系数仅小幅增大.如果仅增大钢管直径,拱肋面外长细比明显减小,弹性稳定系数也会相应大增.

表4 不同拱肋截面高度的稳定计算结果

Tab.4 Stability results of variation of arch section height

截面高/m	面外长细比	稳定系数	失稳模态
2.25	453.5	5.11	面外反对称全波失稳
2.50	463.1	5.17	面外反对称全波失稳
2.75	472.8	5.22	面外反对称全波失稳
3.00	484.5	5.28	面外反对称全波失稳

表5 不同拱肋钢管直径的稳定计算结果

Tab.5 Stability results of variation of steel pipe diameter

钢管直径/m	面外长细比	稳定系数	失稳模态
0.9	525.5	4.23	面外对称半波失稳
1.0	463.1	5.17	面外反对称全波失稳
1.1	413.1	6.33	面外反对称全波失稳
1.2	371.2	7.39	面外反对称全波失稳

在桥跨结构不变时,拱肋截面形状直接决定拱肋面外抗弯刚度和面外长细比.合理地设计哑铃形截面,尽量减小拱肋面外长细比,对提高哑铃形拱面外稳定性至关重要.

4.4 横撑布设

与其他肋拱桥类似,横撑布设对哑铃形拱桥的面外稳定性影响很大.以标准拱为例,横撑布设形式确定后,拱顶一字撑不变,两个K撑位置对一阶弹性稳定系数的影响,如表6所示.从表6可以看出,对于拱顶一字撑和两侧K撑的横撑组合,在1/3跨和2/3跨附近布置K式横撑,面外稳定性最好.在横撑根数和形式相同情况下,合理的横撑间距可有效提高哑铃形拱的面外稳定性.

表6 不同K式横撑位置的稳定计算结果

Tab.6 Stability results of variation of K type brace position

K撑间距/m	稳定系数	失稳模态
30	4.93	面外对称半波失稳
35	5.17	面外反对称全波失稳
40	4.67	面外反对称全波失稳
45	4.59	面外反对称全波失稳

根据本文1.3小节对哑铃形拱桥横撑布设形式的分析,分别计算不同横撑形式的弹性稳定系数,结果如表7所示.

表7 不同横撑形式的稳定计算结果

Tab.7 Stability results of variation of brace form

横撑布设		稳定系数	失稳模态
拱顶	其他位置		
一字撑	K撑(2根)	5.17	面外反对称失稳
X式撑	K撑(2根)	5.47	面外对称失稳
米式撑	K撑(2根)	5.48	面外对称失稳
X式撑	一字撑(2根)	3.94	面外对称失稳
一字撑	一字撑(2根)	3.86	面外对称失稳
一字撑	一字撑(4根)	4.41	面外对称失稳
一字撑	一字撑(6根)	5.99	面外反对称失稳

由表7可知,横撑布设形式不仅会影响哑铃形拱桥弹性稳定系数,还会影响面外失稳模态.拱肋各位置横撑均为一字撑时,弹性稳定系数随着横撑数量增加而增大,失稳模态也由面外对称失稳转为面外反对称失稳.各位置横撑对哑铃形拱面外稳定性影响程度不同:边横撑不变,仅拱顶横撑从一字撑变为刚度较大的米式撑,稳定系数仅提高6%;而拱顶横撑不变,边撑由K式撑变为一字撑,稳定系数下降了25%,失稳模态也发生变化.

4.5 桥面系梁刚度

在桥跨结构和拱肋截面特性等参数不变的前提下,以桥面系梁横向刚度与拱肋面外抗弯刚度之比($EI_{系梁}/EI_{拱肋}$)为参数,考虑$EI_{拱肋}$不变、$EI_{系梁}$变化情况,分析系梁刚度变化对哑铃形拱梁组合桥面外稳定的影响,结果如图6所示.

从图6可看出,桥面系梁刚度对拱梁组合桥的面外稳定有一定影响,其弹性稳定系数随着桥

面刚度增大而增大. 当 $EI_{系梁}/EI_{拱肋}$ 在 0 ~ 2,弹性稳定系数随 $EI_{系梁}/EI_{拱肋}$ 比值增大而明显增大,当 $EI_{系梁}/EI_{拱肋} \geqslant 2$ 之后,弹性稳定系数增速减缓.

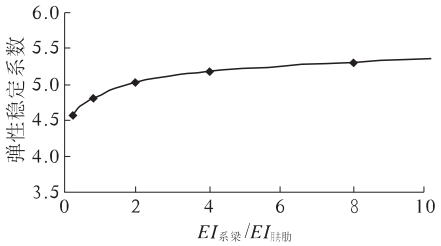


图 6　桥面系梁刚度与弹性稳定系数关系

Fig. 6　Relationship between deck beam stiffness and elastic stability coefficient

哑铃形拱桥的一阶失稳形式以拱肋面外变形为主,桥面系基本不动. 桥面刚度变化之所以会影响面外稳定性,主要由于哑铃形拱梁组合桥存在吊杆非保向力效应[14-15],非保向力效应可显著提高拱的面外稳定性[16-18],其随桥面刚度增大而增大. 因此,在工程实践中,合理设计桥面系,除了要考虑桥面系作为拱桥承载结构外,还应考虑桥面系对拱结构面外稳定的影响.

5　结论

(1)哑铃形拱的弹性稳定系数随着矢跨比 f/L 的增大而先增大后减小,在 f/L 为 0.22 ~ 0.25 时达到峰值.

(2)当宽跨比较小时,哑铃形拱的面外稳定性随着宽跨比增大而增大;当宽跨比超过一定值(0.11 左右)后,其面外稳定性随着宽跨比的增大而减小. 这与钢管混凝土单圆管拱的变化趋势相似,而与钢管混凝土桁拱的变化趋势不同.

(3)横撑布设形式不仅影响哑铃形拱的弹性稳定系数,还会影响面外失稳模态;拱顶横撑形式对面外稳定性影响较小、边横撑影响较大. 对于拱顶一字撑和两侧 K 式撑的横撑组合形式,在 1/3 跨和 2/3 跨附近布置 K 式撑,拱的面外稳定性最好.

(4)哑铃形截面设计时,增大钢管直径会明显减小拱肋面外长细比,有效提高拱的面外稳定性;而在常用取值范围内,增加截面高度对哑铃形拱弹性稳定系数的提高幅度不超过 5%.

(5)哑铃形拱桥的弹性稳定系数随着桥面系梁横向刚度增大而增大. 桥面系梁横向刚度与拱肋面外抗弯刚度的比值在 0 ~ 2 区间,弹性稳定系数随 $EI_{系梁}/EI_{拱肋}$ 的值增大而明显增大,当 $EI_{系梁}/EI_{拱肋} \geqslant 2$ 之后,弹性稳定系数增速变缓.

参考文献:

[1] 赵均海,李艳,梁文彪,等. 考虑初应力的哑铃型钢管混凝土拱肋极限承载力统一解[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 90 - 96.

[2] 陈宝春,盛叶. 钢管混凝土哑铃型拱面内极限承载力研究[J]. 工程力学, 2009,26(9): 94 - 104.

[3] 李晓辉. 钢管混凝土实肋拱面外稳定性研究[D]. 福州:福州大学土木工程学院, 2011.

[4] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2007.

[5] 皇甫娟. 下承式钢管混凝土拱梁组合结构设计与计算分析[J]. 交通科技, 2015(3):57 - 60

[6] 邢帆,祝兵,王学勇. 下承式钢管混凝土拱桥稳定性研究[J]. 桥梁建设, 2009(1):25 - 28.

[7] 栾娟. 钢管混凝土拱桥的稳定性分析[D]. 西安:长安大学公路学院, 2009.

[8] 陈宝春,刘福忠,韦建刚. 327 座钢管混凝土拱桥的统计分析[J]. 中外公路,2011, 31(3):96 - 103.

[9] 顾安邦. 桥梁工程[M]. 下册. 北京:人民交通出版社,2000.

[10] 宋福春,陈宝春. 钢管混凝土标准桁肋拱面外弹性稳定分析[J]. 工程力学,2012, 29(9): 125 - 132.

[11] 陈淮,葛素娟. 吊杆破断对郑州黄河二桥主桥静力性能的影响[J]. 中外公路, 2008(4):153 - 155.

[12] 洪小刚. 大跨度钢管混凝土拱桥顶推施工技术研究[J]. 山西建筑,2010,36(26):285 - 287.

[13] 叶智威. 钢管混凝土单圆管标准拱桥面外稳定性研究[D]. 福州:福州大学土木工程学院, 2012.

[14] GODDEN W G, THOMPSON J G. An experimental study of a model tied-arch bridge[J]. ICE Proceedings: Engineering Divisons, 1959, 14 (4): 383 - 394.

[15] TOKARZ F J. Experimental study of lateral buckling of arches [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(2): 545 - 559.

[16] GODDEN W G. The lateral buckling of tied arches [J]. ICE Proceedings: Engineering Divisions, 1954, 3(4): 496 - 514.

[17] 杨永清,蒲黔辉. 抛物线双肋拱在非保向力作用下的横向稳定性[J]. 西南交通大学学报,2003, 38(3): 309 - 313.

[18] 刘爱荣,申富林,张俊平,等. 斜靠式拱桥侧倾失稳临界荷载解析解[J]. 土木工程学报 2012, 45(4): 107 - 115.

Analysis of Out-of-plane Stability of Standard Concrete-filled Steel Tube Dumbbell-shaped Rib Arch

CHEN Lirong[1,2], CHEN Baochun[1]

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Communications Planning and Design Institute, Fuzhou 350008, China)

Abstract: Information of concrete-filled steel tube (CFST) dumbbell-shaped rib arch bridge was investigated. Main influencing factors of out-of-plane stability of this kind of arch bridge were statistically analyzed. A standard dumbbell-shaped rib arch which could be representatively in accordance with engineering practice was built by referring to real bridges. The parameter analysis was conducted on this standard arch. The results show that coefficient of elastic stability increases firstly and then decreases while the rise-span ratio increases. When the rise-span ratio is in the range from 0.22 to 0.25, the coefficient of elastic stability of dumbbell-shaped arch bridge reaches the peak. The influence of the width-span ratio of arch is similar to the rise-span ratio. Brace form not only affects the stability coefficient of arch, but also affects the out-of-plane instability mode. The top brace has greater effect on elastic stability than side braces. Enlarging the diameter of steel pipe can effectively improve the out-of-plane stability of dumbbell-shaped arch, but enlarging the section height of arch rib could only slightly improve the out-of-plane stability. Then coefficient of elastic stability of arch will enlarge with the increase of deck stiffness, but there is a reasonable value interval of deck stiffness. While exceeding this interval, the coefficient increases slowly.

Key words: concrete-filled steel tubular (CFST); dumbbell-shaped; standard arch; out-of-plane stability; parameter analysis

---

(上接第 122 页)

Test Research on Load Transfer of Tie Bar of Concrete Pavement

LI Jingjing[1,2], ZHANG Qing[2]

(1. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: After the working mechanism of joint under repetitive loads was analyzed, the bending fatigue test was made, and then the load transfer ability of tie bar under different thickness, the length and diameter of tie bar were studied. The results show that the load transfer coefficient of longitudinal joint is roughly divided into the fast decline and maintaining phase, before and after the load is 50 million times; the transfer coefficient of longitudinal joint is enlarged by the increase of the length and diameter of tie bar, but the growth is less than 9%; the transfer coefficient of longitudinal joint is decreased with the increasing of the slab thickness, about 8%; combined with the current specification for the level evaluation of load transfer capability of the old cement concrete pavement, after the load is applied 50 million times under the experiment conditions, the transfer coefficient is above 80%, it has excellent load transfer capacity.

Key words: road engineering; cement concrete pavement; load transfer coefficient; bending fatigue; tie bar

郑州大学学报(工学版)

第 36 卷　　2015 年 11 月

二〇一五年总目次

电气工程

基于状态空间模型的神经元动态相关性研究…… 师　黎，许昆峰，牛晓可(1－1)
基于遗传算法的背靠背换流站控制系统参数优化…… 蒋建东，王　忆，张灵娟，赵育辉(1－6)
杂草算法在城市交通用户平衡问题中的应用…… 曾庆山，刘　巍(1－10)
蛇型 DGS 微带滤波器的设计 …… 王　克，陈小强(1－15)
一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法…… 焦留成，邵创创，程志平(1－20)
双三相永磁同步电动机一相绕组短路故障性能分析 …… 齐　歌，白左霞，刘宪林，师　黎(1－24)
线性判别分析特征提取稀疏表示人脸识别方法…… 张　勇，党兰学(2－94)
基于嵌入式 Linux 的液压静力压桩机吊装过载安全监控 ……
…… 廖　平，余卫星，刘纯亮，李　玉，郑友娟(2－99)
一种改进的群搜索优化算法…… 安晓伟，苏宏升(2－105)
大失准角传递对准杆臂效应影响研究…… 丁国强，马军霞，熊　明，乔相伟(2－110)
基于频率自适应滤波器的单相锁相环…… 陈红兵，闵晶妍(2－115)
基于能量成型的永磁同步直线电机控制研究…… 焦留成，姚　涛(3－1)
基于能量平衡的无线传感器网络分布式成簇机制…… 冯冬青，邢凯丽(3－6)
单相 500 kV GIS 电子式组合互感器发热有限元分析 … 许　珉，岐召阳，刘　玮，武　杰(3－11)
基于逆系统方法的永磁同步风力发电系统随机最优控制…… 刘艳红，齐书康(3－16)
基于角点动能的视频群体异常行为检测…… 逯　鹏，梁　玉，陈树伟(3－20)
基于支持向量机与 Hamming 距离的虹膜识别方法 …… 张　震，张英杰(3－25)
基于 HKG-07A 红外脉搏传感器的智能睡眠唤醒仪 ……
…… 李晓媛，孟昕元，苏　星，魏健平，陈雪美，牛云玲(3－30)
基于 HHT 的电力负荷组合预测模型研究与应用 …… 蒋建东，张豪杰，王　静(4－1)
基于模型参考自适应的网络控制系统随机时延补偿…… 李健勇，赵　峰，丁青青(4－6)
基于混合优化算法的模糊系统辨识…… 朱晓东，刘　丹，李　广(4－10)
骨髓细胞图像的小波变换与 K-means 聚类分割算法…… 苏士美，吕雪扬(4－15)
静止同步补偿器新型双闭环控制策略研究…… 曹　原，尉乔南(4－19)
基于逆系统方法的强制循环蒸发器非线性控制 …… 刘爱玲，马　欢，齐书康(4－24)
基于自适应模糊 C 均值聚类算法的电力负荷特性分类 ……
…… 赵国生，牛贞贞，刘永光，孙超亮(6－56)

质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展 …… CRISALLE Oscar Dardo，韩　闯，吴莉莉，支长义（6－61）
基于改进遗传算法的电力系统无功优化…… 杨胡萍，李威仁，左士伟，张　扬，蔡孝文（6－66）

化工与能源

基于 Aspen Plus 的煤气化副产物粗酚的分离精制 …… 李惠萍，李焕新，李雪平，张　丹，梁淑琴，梁学博（1－28）
由化纤厂废碱液制备羧甲基纤维素…… 周彩荣，徐敏强，王晓松，王海峰（1－33）
高效液相色谱法同时测定反应液中的苯并噻唑和 2-巯基苯并噻唑 …… 赵建宏，张梅梅，程相林，王建设，王留成，宋成盈，张家丽（1－37）
煤炭自燃阻化剂的试验研究…… 王要令，池吉安，陈　铎（1－41）
900 MW 压水堆稳态热工水力特性数值研究 …… 王为术，郭会军，梁诚胜，徐维晖（1－45）
汽轮机叶型的三维数值模拟及优化…… 周俊杰，王梅玲，郭朋飞，王定标（1－49）
引流介质充填强化旋流－静态浮选过程的研究…… 张　敏，沈家华，刘东云（1－54）
响应面法优化混合活化剂制备脱硅稻壳基活性炭 …… 陈俊英，冯向应，史召霞，方书起，韩秀丽，王　铎（2－120）
压缩制冷系统节流损失及应对方案研究…… 魏新利，王中华，耿利红，孟祥睿（3－68）
染料脱盐纳滤膜分离性能表征…… 张浩勤，秦国胜，张秋楠，穆文瑞，武文佳，陈　普（3－73）
基于回归的深冷空分增压膨胀机组运行参量软测量建模
…… 刘超锋，赵　伟，尹永怀，靳佳霖，吴学红，刘亚莉，龚　毅（3－92）
增韧耐温改性环氧树脂的制备及其表征 …… 王红凯，李　华，李明雪，郭青青，李　静，廖钟玲，苏　媛（4－28）
普瑞巴林化学拆分过程研究…… 李　雯，刘春霞，于玉振，张　华，陈水库，张方杰（4－33）
600 MW 燃煤锅炉 SCR 系统烟道导流板设计 …… 王为术，上官闪闪，路　统，杨智峰，郑春雄，陈　刚（4－37）
改性氯球及制备三聚氯氰功能化树脂…… 章亚东，贾金锋（4－41）
有机朗肯循环系统蒸发器的性能研究…… 魏新利，闫艳伟，马新灵，孟祥睿，李明辉（4－45）
负载磷钨酸催化剂的制备及在 BEA 合成中的应用 …… 万亚珍，刘亚楠，陈　迪（4－49）
胺基化杂化微球对溶液中 Cu(II)和 Pb(II)的吸附 …… 张　婕，尚成江，陈卫航，王景涛（5－1）
纳米腐植酸缓释肥氮素运移的元胞机模拟 …… 程　亮，徐　丽，侯翠红，雒廷亮，张保林，刘国际（5－35）
变角度连续螺旋折流板换热器优化结构的数值研究 …… 刘敏珊，许伟峰，王永庆，王　丹，靳遵龙（5－39）
R744 混合自然工质热泵系统特性研究 …… 张仙平，杨　磊，魏新利，王　方，陈爱东（5－44）
太阳能－溴化锂溶液除湿－再生系统的实验研究 …… 王海峰，张守兵，董闪闪，原惠惠，李玉夺（5－49）
平行流换热器流量分配均匀性研究…… 吴学红，孟　浩，丁　昌，龚　毅，吕彦力（5－53）

小压缩比秸秆螺旋挤压脱水机试验研究 …… 方书起，贺李萍，张龙龙，常　春，白　净，陈俊英（6－1）
有机酸对纤维素酶解和纤维乙醇发酵的影响 …… 韩秀丽，赵浩浩，鲁　峰，常　春，何玉远（6－5）
TEMPO 催化环己醇合成环己酮的研究 …… 章亚东，马金玲（6－10）
表面铜离子印迹聚胺硅胶材料的吸附行为…… 范忠雷，李瑞瑞（6－30）

信息工程

基于离散电视频带的频谱接入策略研究…… 陆彦辉，张　帅，穆晓敏，杨守义（1－92）
基于改进的小波核主元分析故障检测…… 张端金，汪爱娟（1－97）
对流层波导中电波传播的抛物方程法及误差分析…… 杨明珊，邱志勇，杜晓燕（1－101）
电力电缆循环加热试验中热力学工态研究 …… 王光斌，杨海马，杨　晖，陆　崚，金智勇，马　生，黄影平（1－105）
拟周期激励下非线性半车模型的混沌振动研究…… 杨智勇，梁　山，周　桐（1－110）
一种改进的机载双基雷达多普勒频移算法…… 赵　军，沈明威，朱岱寅，赵建洋（2－75）
基于形态学特征的颗粒图像分割和计数…… 王忠勇，贾　萌，侯中新，陈在旭（2－80）
基于 Q 学习的无线传感网分簇拓扑控制算法 …… 阎新芳，王晓晓，冯　岩，严晶晶（2－85）
影响特高压直流输电线路表面电场的因素及分析…… 马　力，王珍雪，叶会英，朱君瑶（2－89）
基于 SSC-SC 方案的移动无线传感器网络系统的性能分析 …… 徐凌伟，张　浩，吕婷婷，施　威，GULLIVER T A（3－96）
基于机器视觉的机械式表盘自动读表技术的实现…… 陈继华，李　勇，田增国，李　磊（3－101）
一种基于多种类型匹配器的本体映射方法…… 张凌宇，马志晟，陈淑鑫（3－106）
AP 聚类算法求解植入（l, d）模体识别问题 …… 陈　昆，张小骏（3－110）
基于改进 SVM 的煤矿水灾害救援组织系统可靠性预测 …… 张炎亮，刘　阳，王金凤（3－115）
求解 VRPSDP 的变邻域混合遗传算法…… 马　欢，张建伟，赵进超，陈　明（3－120）
一种优化分层式移动 IPv6 路由算法研究 …… 马　芳，吉　星（3－125）
基于 Hadoop 的图像纹理特征提取 …… 赵进超，朱颢东，申　圳，李红婵（4－109）
考虑车辆机械惯性的跟驰模型及其数值模拟分析…… 周　桐，李雨宣，杨智勇，孙棣华（4－114）
基于 PDM 的高频感应加热电源的设计与实现 …… 臧甲杰，刘　平，徐　瀚，陈睿科（4－119）
基于动态信任的最优云服务选择算法…… 王宗江，杨淑慧（4－124）
基于 DNA 链置换反应的自然数素性判定问题研究 …… 王子成，豆根生，周小刚，叶盟盟（5－96）
基于 Android 与遥感数据的 PM2.5 监测系统设计与实现 …… 司一丹，张胜敏，王玉璟，卢延新，郑逢斌（5－101）
认知网络中继位置和功率分配的研究…… 杨守义，陈凤蝶，宁　冰，郝万明（5－106）
利用噪声能量和卡方分布约束的虚假锋电位筛除方法…… 李志辉，刘新玉，尚志刚（5－111）
基于 KPCA 和 LDA 融合改进的人脸识别算法研究 …… 张　震，张学忠，李　龙（5－116）

基于分解的多目标进化算法在工程优化中的应用 …… 张春江，TAN Kay Chen，高　亮，吴　擎（6－38）
基于烟花算法与差分进化算法的模糊分类系统设计…… 朱晓东，刘　冲，郭雅默（6－47）
可见光通信中 LED 阵列的优化配置算法研究 …… 叶会英，王　莉，刘津良（6－52）
古文献手写汉字切分方法研究…… 张忠林，吴相锦，周生龙（6－70）

土木与交通工程

张弦梁结构张拉力确定方法研究…… 李静斌，洪彩玲，张　哲，李素洁（1－61）
混凝土开裂部位氯离子渗透试验研究…… 唐先习，尹月酉，国　伟（1－66）
大跨连续梁桥桩基础的减隔震分析…… 郭红梅，周　燕，张　凯，李　宇（1－70）
CEEMD-FFT 在滚动轴承故障诊断中的应用 …… 陆森林，王　龙（1－75）
基于第二主应力的沥青混合料强度试验研究…… 锁利军，王秉纲，郑传超（1－79）
测试条件对 SBS 改性沥青表观黏度影响研究 …… 徐鸥明，韩　森，牛冬瑜，刘亚敏（1－83）
工程翻新轮胎多元复合层型及力学模型的构建…… 王　强，齐英杰（1－87）
钢桥面板 U 肋与顶板焊根疲劳寿命预测方法对比分析 …… 杨沐野，吉伯海，傅中秋，徐汉江（2－22）
旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标研究…… 袁玉卿，刘凤利，王选仓（2－28）
曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥改造方案分析…… 李　杰，陈　淮，王　艳，陈代海（2－33）
岩溶隧道衬砌水压力分布统计分析及模糊评价…… 王一鸣，阳军生，罗禄森，林　辉（2－38）
变幅宽移动模架结构的有限元分析与试验研究…… 吕彭民，杨龙飞，王斌华（2－43）
折线先张法预应力混凝土梁长期挠度实用计算公式…… 王　俊，孔亚美，刘立新（2－47）
温度作用下岩石热弹塑性模型及其数值模拟 …… 贾善坡，林建品，刘团辉，崔丽华，汤小琪，蒋素萍（2－52）
考虑损伤程度的 CFRP 加固 RC 框架 Pushover 分析 …… 孙莉萍，王新玲，邹旭岩，钱　辉（2－57）
正交异性桥面板横隔板圆弧过渡处剪切疲劳强度实验研究…… 吕彭民，宋年波，李大涛（2－62）
某高速铁路车站路基沉降处治…… 陈远洪（2－67）
大跨径悬索桥施工猫道气动力系数数值分析…… 李胜利，胡亚楠，杜道倾，王东炜（4－57）
废旧轮胎颗粒－砂混合物的水平循环剪切特性试验研究 …… 徐小东，鲁　洋，毛航宇，刘　锦，杨　齐（4－62）
竖向荷载下群桩受力特性研究…… 杜思义，石　磊（4－67）
交通荷载下斜坡加筋路堤动力特性研究…… 罗烈日，郑俊杰（4－72）
基于壁面压力分布的消声器性能优化研究…… 王　磊，马　建，杨志刚，张文博，刘永博（4－77）
基于增程式电动商用车的增程器匹配和能耗分析…… 解少博，刘玺斌，李司光，王　佳（4－82）
路面结构中探地雷达传播精确高效数值模型…… 方宏远，李　健，钟燕辉，王复明（4－87）
超宽“321”型装配式公路钢桥的第二类稳定性研究 …… 李斐然（4－92）
基于模糊聚类的西安市区轿车行驶工况构建…… 蔺宏良，余　强（4－96）
带外套管钢管混凝土柱与钢梁节点力学性能研究…… 刘　坚，高　奎，周观根，陈　原（5－58）

一种新型组合框架滞回性能及地震反应分析…… 周　奎，潘梦阳，林　杰(5－63)
基于振型的构件位移分解及规律研究…… 吴泽玉，王东炜，汪志昊(5－68)
简支空心板梁桥横向预应力加固方法及效果研究…… 李　莎，戎　贤，李鹏飞(5－73)
沥青路面层间剪切强度的概率分布及可靠性设计…… 刘小云，邵雨虹，靳晓娟(5－78)
沥青路面高温温度场的经验预估模型…… 王延海，曹海利，纪小平，甘新立(5－84)
设置 OLSM－25 防裂层的沥青路面车辆荷载应力有限元分析…… 赵亚兰，郭红兵，陈拴发(5－88)
高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪承载力公式浅析…… 金凌志，张　猛，李　丽(5－92)
长大上坡沥青路面抗剪强度设计方法研究…… 吕彭民，桂发君，张　扬(6－109)
干湿循环下膨胀土边坡响应的模型试验…… 张雨灼，王柳江，刘斯宏，林亚伟(6－114)
水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷试验研究…… 李晶晶，张　擎(6－119)
钢管混凝土哑铃形截面标准拱面外稳定分析…… 陈礼榕，陈宝春(6－123)

机械工程

立式磨粉机粉磨粉煤灰工艺及设备…… 马胜钢，何宗海，刘晓瑞，董攀辉(1－119)
书籍自动翻页扫描装置的设计与应用…… 裴东杰，秦营周，张　峥(1－122)
单层球形网壳结构的分析及实验研究…… 马泳涛，陈天跃，李　伟，袁　涛(1－125)
混联混合动力客车动力系统建模与转矩分配控制策略研究 ……
…… 秦东晨，潘守辰，徐一村，王迎佳(2－1)
基于 ANSYS 的斜齿轮副接触分析与可靠性分析 …… 刘竹丽，赵敏敏，马朋朋，秦东晨(2－6)
载重汽车曲线行驶智能循迹控制仿真研究…… 赵　伟，王宁宁，段燕燕，张明柱(2－10)
MSC. Patran二次开发在预拉伸消减淬火残余应力中的应用…… 湛利华，陈　真(2－14)
Q345B 厚板 T 型头 CO_2 气体保护焊温度场的数值模拟与分析 ……
…… 王　栋，肖　波，宋志东，何宗海(2－18)
六环冗余轴向磁力轴承的热性能研究…… 王晓光，谢　钧，张　晓，刘　倩，付　靖(3－34)
两挡纯电动汽车动力传动系统参数设计与仿真…… 龚贤武，唐自强，吴德军，马　建(3－39)
基于 LMD 和样本熵的齿轮故障特征提取方法研究……
…… 王洪明，郝旺身，韩　捷，董辛旻，郝　伟，欧阳贺龙(3－44)
履带车辆转向工况综合传动系统换段品质试验…… 曹付义，郭广林，周志立，张明柱(3－49)
基于 PolyMAX 的汽车驾驶室系统试验模态分析 …… 曾发林，阮　洋，李建康(3－54)
基于 ZOA 方法的犁体曲面铣削稳定性预测模型 ……
…… 张开飞，靳　刚，何玉静，史景钊，余泳昌(3－59)
基于模糊决策的大型客车电动助力转向系统研究 ……
…… 曹艳玲，梁法明，刘孟楠，徐立友，阎祥海(3－64)
RV 针摆传动齿面接触强度非线性分析 …… 吴素珍，何卫东(4－100)
单层球形网壳梁膜结构设计及力学试验研究…… 李大磊，代朝磊，李　峰(4－105)
基于响应面方法的结构非概率可靠性分析…… 陈江义，文尉超，王迎佳(5－121)

轴向永磁涡流联轴器的安装误差分析…… 李延民，李　申，洪　祯，苏宇锋（5－125）
采用流固耦合方法的复合材料层合板鸟撞分析…… 李　成，郭文辉，铁　瑛（6－76）
驱动力矩对汽车操纵稳定性影响的仿真分析…… 夏长高，许颖聪（6－80）
激光焊接熔池特性的三维数值模拟…… 梅丽芳，陈由海，严东兵，葛晓宏，王俊琦（6－85）
基于 Blob 分析的玻璃纤维织物缺陷检测方法研究 …… 王庆海，赵凤霞，李纪峰，金少搏（6－90）
基于空间 RCCR 机构的轴向柱塞泵的性能参数分析 …… 冯志鹏，庄　森（6－94）
客车动力总成惯性参数的辨识…… 曾发林，葛平莹（6－99）

材料工程

FeSiCP 系软磁非晶合金的研究 …… 李福山，李杏瑞，李育洛，菅成志（1－57）
基于光电比色法的天然沥青改性沥青与集料黏附性研究 ……
…… 马　峰，富志鹏，傅　珍，陈斌华（3－77）
$Nd_{8.5}Fe_{84}Nb_{0.5}Zr_{0.5}B_6Cu_{0.5}$稀土永磁合金磁性能的研究 ……
…… 李福山，王金磊，董晓源，李育洛，黎文强（3－82）
RE 和 Ti 对 Al-Mg-Si 导体材料组织和性能的影响…… 赵红亮，孔亚萍，刘志鹏（4－54）
回火工艺对DIN1.2316塑料模具钢性能的影响 ……
…… 左秀荣，张新理，郭海滨，李金玲，王翼鹏（5－6）
锡元素对 Zn-10Al 钎料合金组织及性能的影响 …… 李永刚，范桂霞，赵开新，吴保鹏（5－11）
纳米 ZrO_2 对 Al-Si 复合 Al_2O_3-C 材料性能、组成和结构的影响 ……
…… 刘志芳，刘新红，黄亚磊，马　腾（5－15）
静电纺丝制备 PLA-PCL 核－壳结构复合纤维 …… 司军辉，崔志香，刘　琼，王乾廷（5－20）
$NaAlCl_4$/ZSM-5 催化甲基三氯硅烷歧化反应性能 …… 徐文媛，王利伟，万欢欢，方智利（5－25）
微表处专用两性沥青乳化剂表征及应用效果评价 ……
…… 高莉宁，贾秦龙，晏　永，郭　涛，夏慧芸，陈华鑫（5－30）
Al-3Ti-0.2C-5Sr 铝合金细化剂制备工艺及凝固过程…… 赵红亮，赵开新，孙启宴（6－14）
二硫化钼基纳米复合材料的构筑与应用…… 陈德良，董会娜，张　锐（6－18）
生物模板法合成铁钴纳米材料的研究…… 谢银德，侯保森，赵占中，张　冰，赵　霞（6－34）

水利与环境工程及其他

基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统研究…… 李小根，王安明（1－114）
郑州大学嵩阳书院总体规划设计分析…… 李蔚英（2－71）
考虑运输的退化工件在线排序问题研究…… 刘其佳，张利齐，冯　琪（2－125）
覆盖层上高面板堆石坝地震反应特性研究 ……
…… 岑威钧，袁丽娜，张自齐，周　涛，杨宏昆，卢培灿（3－87）