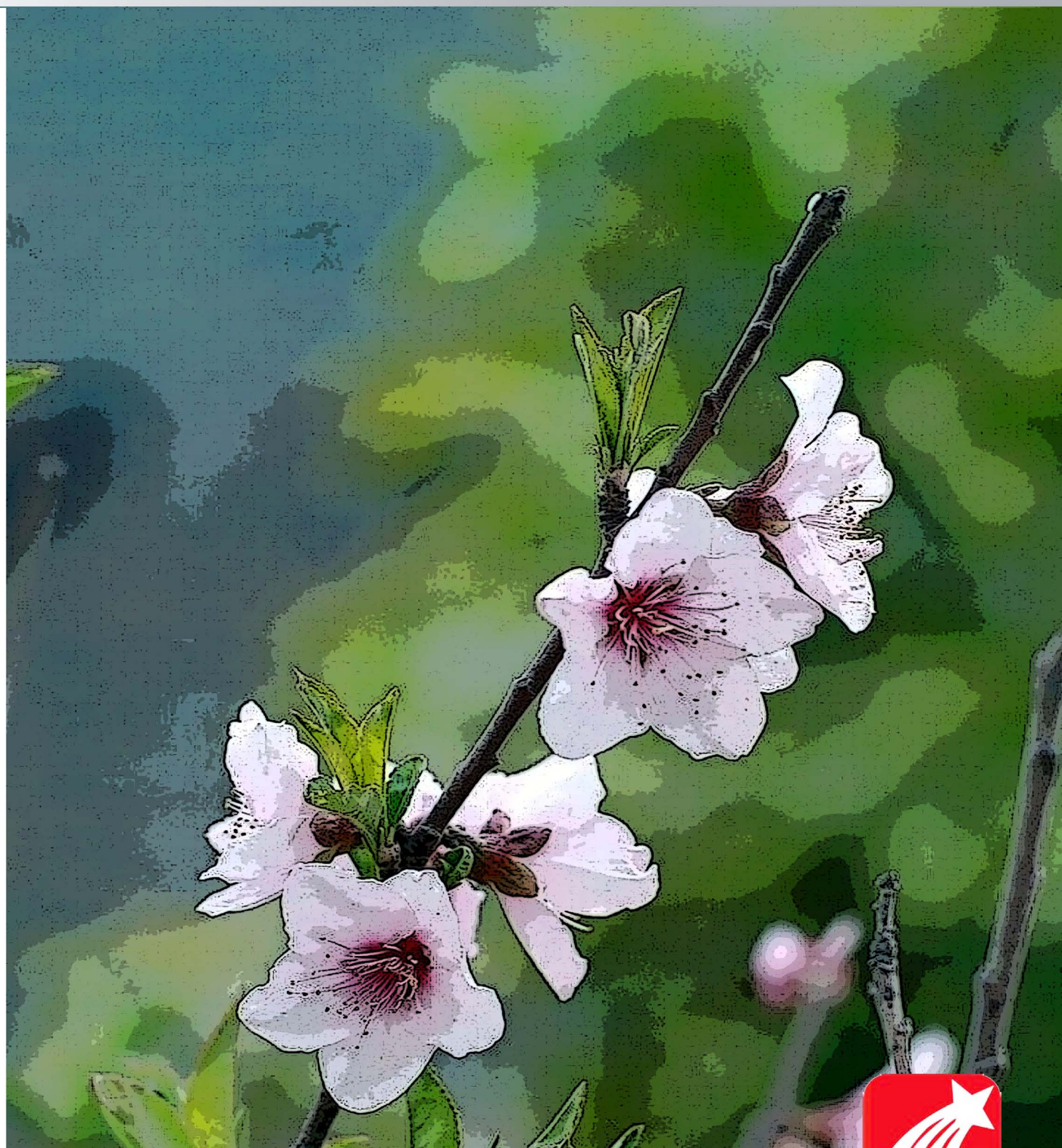


郑州大学学报

(工学版)

2015年第5期



目 次

材料与化学工程

- 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(1)
- 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(6)
- 锡元素对 Zn-40Al 钎料合金组织及性能的影响 李永刚, 范桂霞, 赵开新, 吴保鹏(11)
- 纳米 ZrO₂ 对 Al-Si 复合 Al₂O₃-C 材料性能、组成和结构的影响 刘志芳, 刘新红, 黄亚磊, 马 腾(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(20)
- NaAlCl₄/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(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(30)
- 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(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(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(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(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(53)

结构与路面工程

- 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(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(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(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(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(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(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(88)
- 高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪承载力公式浅析 金陵志, 张 猛, 李 丽(92)

计算机与机械工程

- 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(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(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(106)
- 利用噪声能量和卡方分布约束的虚假锋电位剔除方法 李志辉, 刘新玉, 尚志刚(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(116)
- 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(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(125)

CONTENTS

【Materials and Chemical Engineering】

- Adsorption of Cu(II) and Pb(II) in Solution of Aminated Hybrid Microspheres
..... **ZHANG Jie, SHANG Cheng-jiang, Chen Wei-hang, WANG Jing-tao** (1)
- Effect of the Tempering Process on the Property of DIN1.2316 Plastic Die Steel
..... **ZUO Xiu-rong, ZHANG Xin-li, GUO Hai-bin, LI Jin-ling, WANG Yi-peng** (6)
- Effect of Sn on Structure and Property of Zn-10Al Solder Alloy
..... **LI Yong-gang, FAN Gui-xia, ZHAO Kai-xin, WU Bao-peng** (11)
- Effects of Nano-ZrO₂ Powder Addition on Properties, Phase Composition and Microstructure of Al-Si Incorporated Al₂O₃-C Materials
..... **LIU Zhi-fang, LIU Xin-hong, HUANG Ya-lei, MA Teng** (15)
- Fabrication of PLA-PCL Composite Nanofiber with Core-shell Structure Through Electrospinning
..... **SI Jun-hui, CUI Zhi-xiang, LIU Qiong, WANG Qian-ting** (20)
- Study on the NaAlCl₄/ZSM-5 Catalysts by Redistributing Methyltrichlorosilane
..... **XU Wen-yuan, WANG Li-wei, WAN Huan-huan, FANG Zhi-li** (25)
- Characterization and Evaluation Applications of Special Gender Asphalt Emulsifier for SBS Modified Micro-surfacing
..... **GAO Li-ning, JIA Qin-long, YAN Yong, GUO Tao, XIA Hui-yun, CHEN Hua-xin** (30)
- Cellular Automata Simulation of Nanoscale Humic Acid Nitrogen Fertilizer Migration in Soil
..... **CHENG Liang, XU Li, HOU Cui-hong, LUO Ting-liang, ZHANG Bao-lin, LIU Guo-ji** (35)
- Numerical Study of Structure Optimization for Heat Exchanger with Variable Angle Helical Baffles
..... **LIU Min-shan, XU Wei-feng, WANG Yong-qing, WANG Dan, JIN Zun-long** (39)
- Study on the Performance of a Heat Pump System Using R744-based Natural Binary Mixture
..... **ZHANG Xian-ping, YANG Lei, WEI Xin-li, WANG Fang, CHEN Ai-dong** (44)
- Investigation on Solar Energy-Lithium Bromide Solution Desiccant-Regeneration System
..... **WANG Hai-feng, ZHANG Shou-bing, DONG Shan-shan, YUAN Hui-hui, LI Yu-duo** (49)
- Study on the Uniformity of Flow Distribution of the Parallel-flow Heat Exchanger
..... **WU Xue-hong, MENG Hao, DING Chang, GONG Yi, LU Yan-li** (53)

【Structure and Pavement Engineering】

- Study on Mechanical Performance of Outer-shell Connections for Concrete Filled Steel Tubular Column and Steel Beam
..... **LIU Jian, GAO Kui, ZHOU Guan-gen, CHEN Yuan** (58)
- Research on Hysteretic Behavior and Seismic Response Analysis of a New Composite Frame Structure
..... **ZHOU Kui, PAN Meng-yang, LIN Jie** (63)
- Research on Mode-based Displacement Expansion of Structural Component and Common Rules
..... **WU Ze-yu, WANG Dong-wei, WANG Zhi-hao** (68)
- Study on the Method and Results of Simply Supported Hollow Plate Girder Bridge Reinforcement Applied Transverse Prestressing
..... **LI Sha, RONG Xian, LI Peng-fei** (73)
- Probability Distribution and Reliability Design of Asphalt Pavement Interlayer Shear Stress
..... **LIU Xiao-yun, SHAO Yu-hong, JIN Xiao-juan** (78)
- Empirical Prediction Model of High-Temperature Field of Asphalt Pavement
..... **WANG Yan-hai, CAO Hai-li, JI Xiao-ping, GAN Xin-li** (84)
- Finite Element Analysis on Traffic Load Stress of Asphalt Pavement with Open-graded Large Stone Asphalt Mixes (OLSM-25) Anti-cracking Layer
..... **ZHAO Ya-lan, GUO Hong-bing, CHEN Shuan-fa** (88)
- Analysis of Shear Capacity Formula of Reactive Power Concrete Beams with High Strength Reinforcement
..... **JIN Ling-zhi, ZHANG Meng, LI Li** (92)

【Computer and Mechanical Engineering】

- Research of Prime Number Judgement Based on DNA Strand Displacement Reaction
..... **WANG Zi-cheng, DOU Gen-sheng, ZHOU Xiao-gang, YE Meng-meng** (96)
- Design and Implementation of PM2.5 Monitoring Application Based on Android and Remote Sensing Data
..... **SI Yi-dan, ZHANG Sheng-min, WANG Yu-jing, LU Yan-xin, ZHENG Feng-bin** (101)
- Research on Power Allocation and Relay Location for CR Network
..... **YANG Shou-yi, CHEN Feng-die, NING Bing, HAO Wan-ming** (106)
- A Method to Remove Fake Spikes by Means of Chi-Square Distribution Constraint of Noise Energy Sum
..... **LI Zhi-hui, LIU Xin-yu, SHANG Zhi-gang** (111)
- Study of Face Recognition Algorithm Based on Improved KPCA and LDA
..... **ZHANG Zhen, ZHANG Xue-zhong, LI Long** (116)
- Analysis of Structural Non-probabilistic Reliability Based on Response Surface Method
..... **CHEN Jiang-yi, WEN Wei-chao, WANG Ying-jia** (121)
- Analysis of the Assembling Deviations for Axial Permanent Magnet Eddy-Current Coupling
..... **LI Yan-min, LI Shen, HONG Zhen, SU Yu-feng** (125)

文章编号: 1671-6833(2015)05-0001-05

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

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 通过蒸馏共沉淀聚合反应和酰胺反应制备胺基功能化核-壳型有机/无机杂化二氧化硅微球 P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂, 该杂化微球无机内核直径约为 400 nm, 有机高分子外壳厚度约为 33 nm. 元素分析表明胺基化杂化微球上 N 元素的含量为 2.91%. 将所制备的胺基化杂化微球用于吸附污水中 Cu(II) 和 Pb(II). 结果表明: 胺基化杂化微球较甲基丙烯酸化杂化微球 P(MAA-co-EGDMA)/SiO₂ 和未改性 SiO₂ 微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 有更好的吸附性能; 吸附过程符合 Langmuir 等温吸附模型, 在 298 K 时对 Cu(II) 和 Pb(II) 的最大吸附容量分别为 45.50 mg/g 和 70.75 mg/g; 吸附动力学行为符合准二级动力学模型; 三次脱附再生实验后胺基化杂化微球仍具有良好的再生率.

关键词: 杂化微球; 重金属离子; 吸附; 再生

中图分类号: O647.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.001

0 引言

以无机微粒为核, 以功能高分子聚合物为壳的核-壳型有机/无机杂化材料集无机材料良好的稳定性与有机材料特殊的功能性于一身, 具有优异的综合性能. 这种新型材料在吸附分离、非均相催化、太阳能电池、生物医学等众多领域具有广泛的应用^[1-4].

水体中的重金属污染物毒性大, 难以降解, 一直严重威胁着人类的生存和生活环境, 开发具有优异性能的吸附剂具有重要的环保意义. 本研究以有机硅烷偶联剂 3-(异丁烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷(MPS)修饰的二氧化硅微球为种子, 以偶氮二异丁腈(AIBN)为引发剂, 以二甲基丙烯酸乙二醇酯(EGDMA)为交联剂, 以甲基丙烯酸(MAA)为高分子聚合单体, 通过蒸馏共沉淀法合成核-壳型有机/无机杂化二氧化硅微球 P(MAA-co-EGDMA)/SiO₂, 再以 N,N'-二环己基碳化二亚胺(DCC)为脱水剂, 以二乙烯三胺(DETA)为改性剂, 通过酰胺反应改性上述杂化微球制备表面富含胺基基团的胺基化杂化二氧化硅微球 P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂. 将所制备的胺基化杂化微球用于吸附溶液中 Cu(II) 和 Pb(II), 并对

其吸附机理和再生性能进行研究.

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

Nicolet IR200 傅立叶变换红外光谱仪(FT-IR, 美国热电公司); Vario EL III 元素分析仪(德国元素分析系统公司); Tecnai G2 F30 S-Twin 透射电子显微镜(美国 FEI 公司); TAS-986F 型原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器公司); SHY-2A 数显水浴恒温振荡器(常州普天仪器厂).

正硅酸乙酯(TEOS, 纯度 ≥ 98%, 阿拉丁试剂); 3-(异丁烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷(纯度 ≥ 97%, 阿拉丁试剂); 乙二醇二甲基丙烯酸酯(纯度 ≥ 98%, 阿拉丁试剂); 甲基丙烯酸(化学纯, 国药试剂); 二乙烯三胺(化学纯, 阿拉丁试剂); 偶氮二异丁腈(分析纯, 上海试四赫维化工有限公司); N,N'-二环己基碳化二亚胺(分析纯, 阿拉丁试剂).

1.2 SiO₂-MPS 微球的制备

将 11 mL 正硅酸乙酯(TEOS)、10 mL 氨水(25 wt. %)、10 mL 去离子水分散于 200 mL 无水乙醇中, 室温下搅拌 24 h 后向其中加入 1 mL MPS, 继续搅拌 24 h 后将产物经去离子水、无水

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21206151)

作者简介: 张婕(1970—), 女, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事化学分离工程研究, E-mail: zhanglianbi@zzu.edu.cn.

乙醇洗涤 3 次后于 30 ℃ 真空干燥箱中干燥 24 h, 即可获得 SiO₂-MPS 微球。

1.3 P(MAA-co-EGDMA)/SiO₂ 微球的制备

将 0.3 g 的 SiO₂-MPS 微球、0.02 g 的 AIBN、0.4 mL 的 EGDMA、0.6 mL 的 MAA 均匀分散到含有 80 mL 乙腈的 100 mL 单口烧瓶中, 加热使反应体系沸腾, 当体系蒸出 40 mL 乙腈时停止加热, 冷却后将产物经乙腈、无水乙醇洗涤 3 次后于 30 ℃ 真空干燥箱中干燥 24 h, 即可获得甲基丙烯酸化杂化微球 P(MAA-co-EGDMA)/SiO₂。

1.4 P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂ 微球的制备

将 1.0 g 的 P(MAA-co-EGDMA)/SiO₂ 微球置于盛有 30 mL DETA 的烧瓶中, 室温下超声 1 h 后加入 1.0 g DCC, 在 90 ℃ 油浴下回流 48 h, 产物经无水乙醇和蒸馏水反复冲洗数次后于 30 ℃ 真空干燥箱中干燥 24 h, 即可获得胺基化杂化微球 P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂。胺基化杂化微球合成路线如图 1 所示。

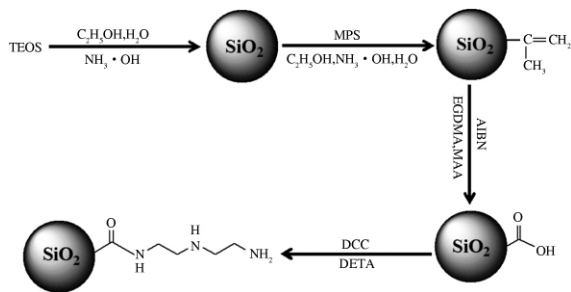


图 1 P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂ 合成路线

Fig. 1 Synthetic routes of P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂

1.5 吸附实验

胺基化杂化微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的单组分静态吸附实验在室温条件下进行, 吸附剂用量为 40 mg, 吸附后溶液中的重金属离子浓度通过原子吸收分光光度计测定。胺基化杂化微球的吸附容量与再生率可分别按下式进行计算。

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} V; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{q_i}{q_b} \times 100\%. \quad (2)$$

式中: q_e 为吸附剂单位吸附容量, mg/g; C_0 和 C_e 分别为 Cu(II) 和 Pb(II) 的初始浓度和吸附平衡时的浓度, mg/L; V 为溶液的体积, L; m 为吸附剂的用量, g; η 为吸附剂的再生率; q_i 、 q_b 分别为再生第 i 次和初次吸附剂在相同条件下的单位吸附容量, mg/g。对 pH 因素考察时, 取浓度均为 100

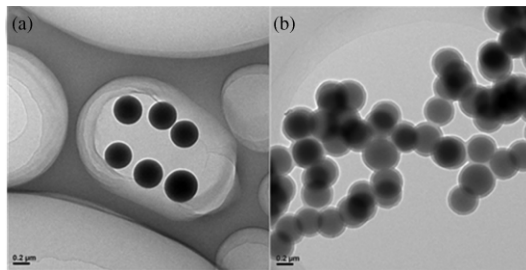
mg/L 的 Cu(II) 和 Pb(II) 溶液各 50 mL, 用盐酸将 pH 控制在 1.0 ~ 6.0, 在 298 K 下震荡 120 min 后测定溶液中 Cu(II) 和 Pb(II) 的浓度, 设定振荡速率为 130 r/min。对时间考察时, 分别取 50 mL 浓度均为 100 mg/L 的 Cu(II) 和 Pb(II) 溶液, 在 298 K 下震荡 0 ~ 180 min, 定时测定各自浓度。对初始浓度影响考察时, 控制初始浓度为 20 ~ 150 mg/L, 在 298 K 下震荡 120 min 后测定溶液中重金属离子的浓度。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

2.1.1 透射电镜分析

透射电镜下未改性 SiO₂ 微球和胺基化杂化 SiO₂ 微球的形貌特征如图 2 所示, 从图 2(a) 中可看到未改性 SiO₂ 微球粒度分布均匀, 表面光滑呈现规则的球形, 微球直径约为 400 nm, 从图 2(b) 中可看到接枝改性后的 SiO₂ 微球依然保持良好的单分散性和规则的球形, 且从图中能清晰地看到胺基化杂化微球的无机内核和有机高分子外壳, 从中可知有机高分子外壳的厚度约为 33 nm。



(a) SiO₂ (b) P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂

图 2 SiO₂ 和 P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂ 透射电镜图

Fig. 2 TEM of SiO₂ and P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂

2.1.2 红外光谱分析

未改性 SiO₂ 和胺基化杂化 SiO₂ 微球的红外光谱图如图 3 所示。在曲线 a 中, 476 cm⁻¹ 处为 SiO₂ 中 Si 的特征峰, 1 000 ~ 1 150 cm⁻¹ 处的宽峰对应的是 Si—O—Si 的横向和纵向对称收缩振动峰, 3 000 ~ 3 600 cm⁻¹ 处的宽峰对应的是硅羟基的振动峰^[5]; 曲线 b 中出现了三处明显的新吸收峰, 1 563 cm⁻¹ 处为 C—N 伸缩振动峰和 C—H 弯曲振动峰, 1 665 cm⁻¹ 处为酰胺中的 C=O 的伸缩振动峰^[6], 1 720 cm⁻¹ 处峰为交联剂 EGDMA 中的 C=O 振动峰^[7], 故可初步判定 DETA 成功接枝到 SiO₂ 微球表面。

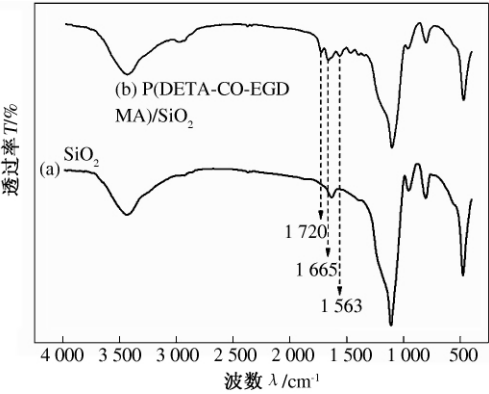


图 3 SiO₂ (a) 和 P(DETA-co-EGDMA) / SiO₂ (b) 红外光谱图
Fig.3 FT-IR of SiO₂(a) and P(DETA-co-EGDMA) /SiO₂(b)

2.1.3 元素分析

分别对不同类型的 SiO₂ 微球进行元素分析, 结果如表 1 所示.

表 1 不同类型 SiO₂微球元素分析结果
Tab.1 Elemental analysis of different types of SiO₂ microspheres

样品	质量分数 / %		
	C	H	N
SiO ₂	15.53	3.78	0
SiO ₂ -MPS	16.28	3.89	0
P(MAA-co-EGDMA) /SiO ₂	23.67	4.45	0
P(DETA-co-EGDMA) /SiO ₂	25.32	4.63	2.91

据表 1 数据可知, SiO₂、SiO₂-MPS、甲基丙烯酸杂化 SiO₂ 微球中 N 元素含量均为 0, 胺基功能化后的 SiO₂ 微球中 N 元素的含量为 2.91%, 故可进一步判定二乙烯三胺成功修饰到 SiO₂ 微球表面.

2.2 pH 的影响

溶液 pH 对胺基化杂化 SiO₂ 微球、甲基丙烯酸杂化 SiO₂ 微球和未改性 SiO₂ 微球吸附 Cu(II) 和 Pb(II) 的影响如图 4 所示. 由图可知, 胺基化杂化 SiO₂ 微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的吸附性能均明显优于甲基丙烯酸杂化 SiO₂ 微球和未改性 SiO₂ 微球. 在 pH 为 6 时, 胺基化杂化 SiO₂ 微球达到最大吸附容量, 对 Cu(II) 为 45.50 mg/g, 对 Pb(II) 为 70.75 mg/g, 换算为 mmol/g 单位计, 对 Cu(II) 为 0.72 mmol/g, 对 Pb(II) 为 0.34 mmol/g. 胺基化杂化微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的吸附容量各不相同, 造成这种差异的原因可能是不同重金属离子与胺基基团形成的配合物稳定性不同.

由图 4 还可发现, 随着溶液 pH 的减小, 胺基化杂化微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的吸附容量也逐渐减小, 这是由于溶液 pH 过低会引起胺基基团中的 N 原子发生质子化作用, 从而失去螯合能力导致胺基化杂化微球吸附容量降低.

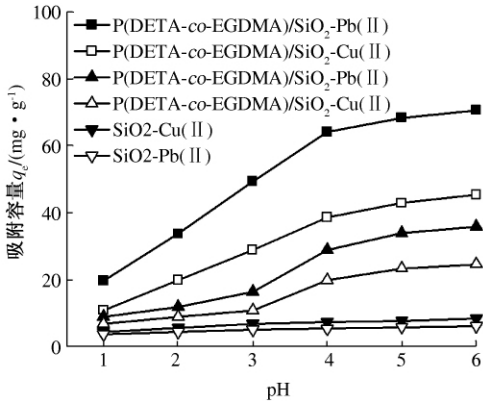


图 4 pH 对吸附的影响
Fig.4 Effect of pH on adsorption

2.3 溶液初始浓度的影响

溶液初始浓度对胺基化杂化微球吸附 Cu(II) 和 Pb(II) 的影响如图 5 所示, 从图中可看出, 胺基化杂化微球的吸附容量随着 Cu(II) 和 Pb(II) 初始浓度的增大而增大, 当溶液初始浓度增大到一定值后, 吸附容量不再增大, 这是因为随着重金属离子初始浓度的增大, 胺基化杂化微球与溶液中重金属离子发生碰撞相遇吸附的概率增加, 从而引起吸附容量增大, 但吸附剂用量一定, 当胺基化杂化微球被重金属离子完全覆盖时, 吸附过程达到饱和, 吸附容量不再增大.

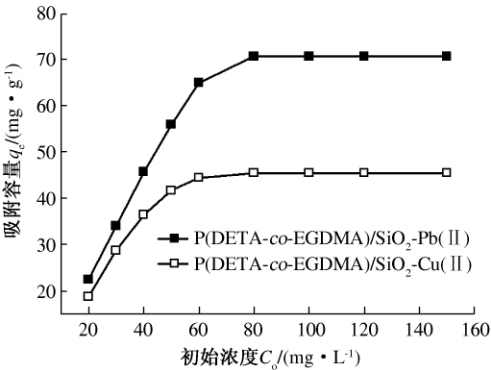


图 5 初始浓度对吸附的影响
Fig.5 Effect of initial concentration on adsorption

2.4 吸附时间的影响

吸附时间对胺基化杂化微球吸附 Cu(II) 和 Pb(II) 的影响如图 6 所示. 据图可知, 在吸附起始阶段, 吸附容量增幅均较大, 到 60 min 时吸附均达到平衡状态.

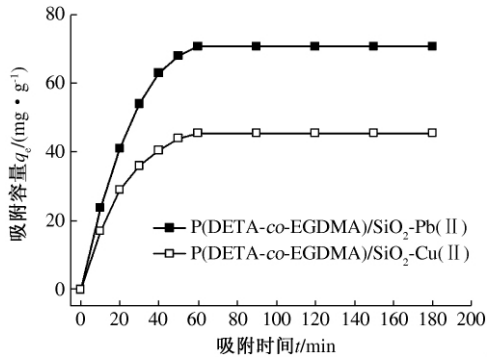


图6 吸附时间对吸附的影响

Fig. 6 Effect of adsorption time on adsorption

2.5 等温吸附模型

采用 Langmuir 和 Freundlich 方程对等温吸附模型进行分析, 方程线性表达式分别为

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m}; \quad (3)$$

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_e. \quad (4)$$

式中: q_e 和 q_m 分别为吸附平衡时和饱和时胺基化杂化微球的吸附容量, mg/g ; C_e 为吸附平衡时重金属离子的浓度, mg/L ; K_L 为 Langmuir 吸附平衡常数; K_F 为 Freundlich 吸附平衡常数; n 为 Freundlich 常数. 将实验数据依式 (3) 和 (4) 进行线性拟合, 所得等温吸附模型参数见表 2.

表2 298 K 下胺基化杂化微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的等温吸附模型参数

Tab. 2 Adsorption isotherm parameters of aminated hybrid microspheres on Cu(II) and Pb(II) at 298 K

等温模型	参数	Cu(II)	Pb(II)
Langmuir	$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	47.62	72.99
	K_L	0.27	0.46
	R^2	0.998	0.999
Freundlich	K_F	18.35	29.89
	$1/n$	0.22	0.23
	R^2	0.677	0.669

据表 2 可知, Langmuir 方程拟合所得的 R^2 值较大, 说明 Langmuir 等温吸附模型可较好地描述胺基化杂化微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的吸附行为. Freundlich 方程拟合所得的 $1/n$ 小于 1, 说明吸附过程容易进行^[8].

2.6 吸附动力学

采用准一级和准二级动力学方程对动力学进行分析, 方程式线性表达式分别为

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t; \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}. \quad (6)$$

式中: k_1 (min^{-1}) 为准一级动力学反应速率常数; k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 为准二级动力学反应速率常数; q_e 和 q_t 分别为吸附平衡时和时刻 t 时的吸附容量, mg/g . 将实验数据依式 (5) 和 (6) 进行线性拟合, 所得动力学参数见表 3.

表3 298 K 下胺基化杂化微球对 Cu(II) 和 Pb(II) 的吸附动力学参数

Tab. 3 Adsorption kinetics parameters of aminated hybrid microspheres on Cu(II) and Pb(II) at 298 K

动力学模型	参数	Cu(II)	Pb(II)
准一级	$q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	67.27	113.39
	k_1	0.071	0.070
	R^2	0.967	0.974
准二级	$q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	49.26	77.52
	k_2	1.89×10^{-3}	1.00×10^{-3}
	R^2	0.994	0.992

据表 3 可知, 准二级动力学方程拟合所得的 R^2 值较大, 且拟合所得的平衡吸附容量与实验值较为接近, 故准二级动力学模型可较好地描述胺基化杂化微球吸附 Cu(II) 和 Pb(II) 的行为, 说明该吸附过程为化学吸附, 这可能是溶液中的重金属离子与胺基化杂化微球外壳中 $-\text{NH}_2$ 上的 N 原子通过共用电子对形成了配位共价键.

2.7 离子强度的影响

取浓度均为 100 mg/L 的 Cu(II) 和 Pb(II) 溶液各 50 mL, 加入 40 mg 胺基化杂化微球, 用 NaCl 控制离子强度在 0 ~ 0.5 mol/L , 298 K 下震荡 120 min 后测定溶液中重金属离子的浓度, 然后计算胺基化杂化微球吸附容量, 结果如图 7 所示.

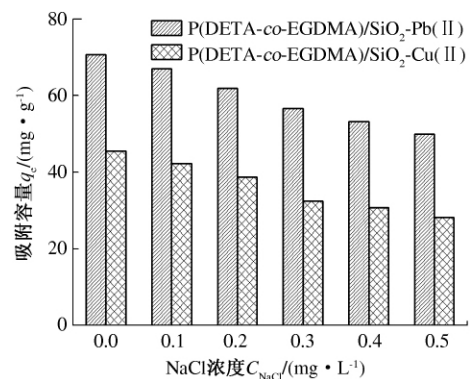


图7 离子强度对吸附的影响

Fig. 7 Effect of ionic strength on adsorption

从图 7 可看出, 随着离子强度的增大, 胺基化杂化微球的吸附容量逐渐减小, 可能是由于离子

强度的增大影响了重金属离子的活度系数,阻碍了它们扩散到吸附剂的表面^[9]。

2.8 脱附再生实验

以1.0 mol/L的盐酸溶液作为洗脱剂进行脱附再生实验,循环进行3次后吸附Cu(II)胺基化杂化微球的再生率为89.56%,吸附Pb(II)的再生率为85.87%,均能达到85%以上,由此表明胺基化杂化微球具有良好的再生能力,是一种具有良好发展前景的吸附材料。

3 结论

胺基化杂化微球对Cu(II)和Pb(II)的具有良好的吸附性能,吸附能力明显优于甲基丙烯酸杂化微球和未改性SiO₂微球,吸附过程符合Langmuir等温吸附模型和准二级动力学模型,以化学吸附作用为主。3次脱附再生实验后胺基化杂化微球的再生率仍能保持在85%以上,具有良好的再生性能。

参考文献:

- [1] REPO E, WARCHOL J K, BHATNAGAR A, et al. Heavy metals adsorption by novel EDTA-modified chitosan-silica hybrid materials [J]. J. Colloid Interface Sci., 2011, 358(1): 261–267.
- [2] RAJ G, SWALUS C, GUILLET A, et al. Supramolecular organization in organic-inorganic heterogeneous hybrid catalysts formed from polyoxometalate and poly(ampholyte) polymer [J]. Langmuir, 2013, 29(13): 4388–4395.
- [3] HE Ming, QIU Feng, LIN Zhi-qun. Toward high-performance organic-inorganic hybrid solar cells: bringing conjugated polymers and inorganic nanocrystals in close contact [J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4(11): 1788–1796.
- [4] KIM S S, AHN K M, PARK M S, et al. A poly(lactide-co-glycolide)/hydroxyapatite composite scaffold with enhanced osteoconductivity [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2007, 80A(1): 206–215.
- [5] 符远翔,孙艳辉,葛杏心. 单分散纳米二氧化硅的制备与表征[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(1): 154–159.
- [6] 李翠,徐昕,鲍长利,等. 二乙烯三胺改性多壁碳纳米管对溶液中Au(III)和Pd(II)的吸附[J]. 高等学校化学学报, 2012, 33(3): 586–590.
- [7] KARA A, UZUN L, BESIRLI N, et al. Poly(ethylene glycol dimethacrylate-*n*-vinyl imidazole) beads for heavy metal removal [J]. J. Hazard. Mater., 2004, 106(2): 93–99.
- [8] 邹卫华,周秀丽,刘静莹. 改性热解碳吸附水体中苯胺的热力学及动力学研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2014, 35(6): 27–30.
- [9] 吴志坚,刘海宁,张慧芳. 离子强度对吸附影响机理的研究进展[J]. 环境化学, 2010, 29(6): 997–1003.

Adsorption of Cu(II) and Pb(II) in Solution of Aminated Hybrid Microspheres

ZHANG Jie, SHANG Cheng-jiang, Chen Wei-hang, WANG Jing-tao

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

Abstract: The aminated core-shell organic-inorganic hybrid silica microspheres P(DETA-co-EGDMA)/SiO₂ were prepared by distillation precipitation polymerization and amide reaction. The diameter of hybrid microspheres inorganic core was ca. 400 nm and the thickness of organic polymer shell was ca. 33 nm. The aminated hybrid microspheres were characterized by elemental analysis and it was found that N element content of microspheres was 2.91%. The adsorption behaviors of aminated hybrid microspheres on heavy metal ions Cu(II) and Pb(II) were investigated, which showed that aminated hybrid microspheres exhibited larger adsorption capacities than methacrylic acid hybrid microspheres P(MAA-co-EGDMA)/SiO₂ and unmodified silica microspheres. The adsorption isotherm of aminated hybrid microspheres followed the Langmuir model and the maximum adsorption capacities of aminated hybrid microspheres was 45.50 mg/g for Cu(II) and 70.75 mg/g for Pb(II) at 298 K, respectively. The adsorption kinetics were consistent with pseudo-second order model. The aminated hybrid microspheres still maintained excellent regeneration ratios through thrice desorption and regeneration experiment.

Key words: hybrid microsphere; heavy metal ion; adsorption; regeneration

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

(郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用扫描电镜、金相显微镜、洛氏硬度计研究了 DIN1.2316 塑料模具钢经 1 050 ℃ 淬火、350 ~ 650 ℃ 保温 1 ~ 16 h 回火的微观组织及硬度变化规律。研究表明: 350 ~ 650 ℃ 回火, 随回火温度的升高钢的回火硬度呈现出下降的趋势。350 ~ 450 ℃ 回火硬度随保温时间变化不大, 500 ℃ 回火时, 保温 4 h 内硬度保持不变, 4 ~ 8 h 硬度从 53.9 HRC 下降到 47.4 HRC, 8 h 后硬度趋于稳定。550 ~ 650 ℃ 回火, 2 h 内硬度急剧下降, 2 h 之后硬度基本不再变化。回火工艺为 550 ℃ × 4 h ~ 16 h, 600 ℃ × 1 h ~ 4 h, 650 ℃ × 1 h, 回火参数在 11 300 ~ 13 500 硬度可以满足预硬化硬度要求。随回火温度升高、回火时间的延长, 碳化物析出量增多并逐渐球化、聚集长大, 使硬度下降。回火温度较回火时间对硬度的影响更显著。

关键词: DIN1.2316 塑料模具钢; 回火; 回火曲线; 硬度; 微观组织

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.002

0 引言

我国塑料行业发展迅速, 塑料机械行业发展前景广阔。当前塑料加工机械化程度不断提高, 所以对模具材料的需求越来越多, 要求也越来越高^[1]。但是我国的模具钢行业与工业发达国家相比仍存在较大差距, 模具寿命普遍较短。回火工艺对模具钢的性能有很大的影响, 合理的回火温度和保温时间可以使模具钢有良好的力学性能, 从而提高模具钢的寿命。热处理对 Cr13、Cr15、低合金铬钼钢和一些低碳低合金马氏体不锈钢组织和性能影响机制研究较多, 并对淬火回火等热处理制度进行了优化^[2-5]。

德国 DIN1.2316 塑料模具钢含有 17% 的铬元素, 耐腐蚀性和抛光性能都较好, 预硬化硬度在 34 ~ 40 HRC, 具有良好的力学性能^[6]。目前对于该模具钢的淬硬性^[7]和淬火回火工艺^[8]都有一些研究。笔者为了提高 DIN1.2316 模具钢的性能, 进一步研究了模具钢不同回火温度和保温时间的组织和力学性能, 作出了 DIN1.2316 模具钢回火参数曲线, 并通过正交分析确定了回火温度和回火时间对硬度影响的显著性水平, 确定满足要求的最佳回火参数。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验用 DIN1.2316 模具钢的化学成分见表 1。碳固溶在马氏体中, 晶格发生畸变, 从而提高马氏体基体的强度; 碳还可以与 Fe、Cr、Mo、V 等元素形成 Fe₃C、M₂₃C₆、M₆C、MC 等碳化物, 碳化物呈细小球状弥散分布在基体中, 可以提高基体的力学性能。Cr 对马氏体不锈钢的耐蚀性起着决定作用, 能有效降低钢对点蚀的敏感性。Mo 在钢中阻止了奥氏体化后冷却过程中合金碳化物的析出, 改善了钢的塑性和韧性。控制碳和其他合金元素的含量可以控制碳化物含量, 有利于改善不锈钢的韧性和耐蚀性^[8]。

表 1 DIN1.2316 模具钢的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of DIN1.2316 die steel

成分	C	Mn	V	Cr	Mo	Ni	P	S
质量分数	0.38	0.60	0.13	16.45	1.15	0.36	≤0.03	≤0.03

1.2 试验方法

退火处理的 DIN1.2316 模具钢加工成 8 mm × 8 mm × 11 mm 试样, 取 35 块分为 7 组。7 组样品经 1 050 ℃ 保温 30 min 淬火, 油冷后进行硬度

收稿日期: 2015-05-30; 修订日期: 2015-07-19

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2012CB025906)

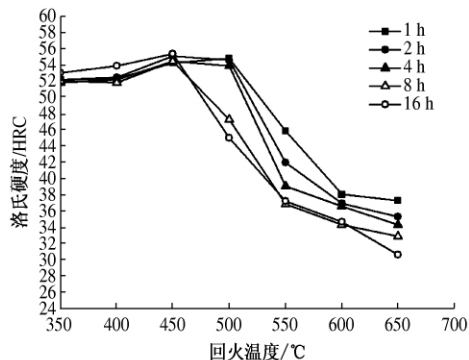
作者简介: 左秀荣(1967—), 女, 郑州大学教授, 主要从事钢铁材料研究, E-mail: zuoxiurong@126.com.

测定和微观组织观察. 7 组试样分别在 350、400、450、500、550、600 和 650 °C 保温 1、2、4、8、16 h 空冷. 测量每块样品的洛氏硬度并对微观组织进行观察分析. 加热炉选用 GWL-1400 型热处理炉, 采用 TH-300 洛氏硬度计测量洛氏硬度, 选用金刚石压头, 加载砝码 150 kg, 保持时间 2 s, 每个样品测量两点硬度, 取其平均值; 采用三氯化铁盐酸溶液腐蚀金相试样抛光面, 用 Olympus BX51 金相显微镜及 JSM-5610LV 电子显微镜观察微观组织.

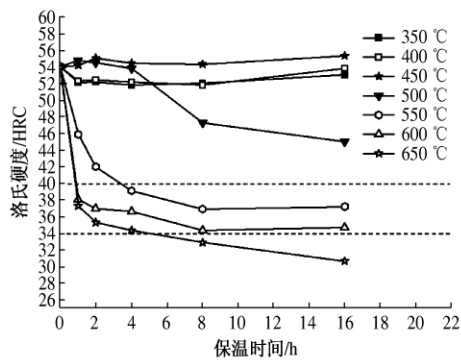
2 试验结果与分析

2.1 不同回火温度和保温时间对 1.2316 模具钢硬度的影响

图 1 为硬度与回火温度和保温时间关系曲线. 在 350 ~ 650 °C 回火, 随回火温度升高钢的回火硬度呈现出先升高后下降的趋势. 350 ~ 400 °C 回火后试样的硬度在 52 HRC 左右; 450 °C 回火产生二次硬化现象, 硬度达到 55.1 HRC; 回火温度高于 500 °C, 硬度迅速下降.



(a) 回火温度与试样硬度的关系曲线



(b) 保温时间与试样硬度的关系曲线

图 1 回火温度和保温时间与试样硬度的关系曲线

Fig. 1 Relation between the hardness of specimen and tempering temperature at different holding time

350 ~ 400 °C 回火保温 1 ~ 16 h, 硬度保持在 52 HRC 左右; 450 °C 回火保温 1 ~ 16 h, 硬度保持在 54 HRC 左右, 回火时间的影响不大. 回火温度

为 500 °C 时, 保温 4 h 内硬度保持不变, 4 ~ 8 h 硬度从 53.9 HRC 下降到 47.4 HRC, 8 h 以后硬度趋于稳定. 550 ~ 650 °C 回火, 2 h 内硬度急剧下降, 2 h 之后硬度基本不再变化.

DIN1.2316 模具钢预硬化硬度在 34 ~ 40 HRC, 从图 1 中可以看出满足预硬化硬度回火工艺有 550 °C × 4 ~ 16 h, 600 °C × 1 ~ 16 h, 650 °C × 1 ~ 4 h. 塑料模具钢回火后硬度越高, 回火组织越均匀、细小, 抛光性能越好. 但回火温度过高将会使组织变得粗大, 硬度下降. 因此优化的回火工艺为 550 °C × 4 ~ 16 h, 600 °C × 1 ~ 4 h, 650 °C × 1 h.

回火硬度 H 是回火温度 T 和回火时间 t 的函数, 即 $H = f(T, t)$, 即

$$H = f[T(C + \log t)], \quad (1)$$

式中: C 为常数, 与钢的含碳量有关, 对于中碳钢 DIN1.2316 塑料模具钢 C 取 20. 回火参数用 P 表示, $P = T(C + \log t)$, 将 P 代入公式 (1) 可以得出 H 与 P 的关系曲线, 称为回火曲线^[9-10]. 根据 DIN1.2316 模具钢的回火时间、回火温度和硬度可以做出回火曲线, 如图 2 所示. 回火参数小于 8 500 时, 试样的硬度值变化不大, 8 500 ~ 10 000 时, 硬度值略有升高, 产生二次硬化现象, 回火参数大于 10 000 时, 随着回火参数的增大硬度降低, 当回火参数在 11 300 ~ 13 500 范围硬度时, 试件可以满足预硬化的硬度要求.

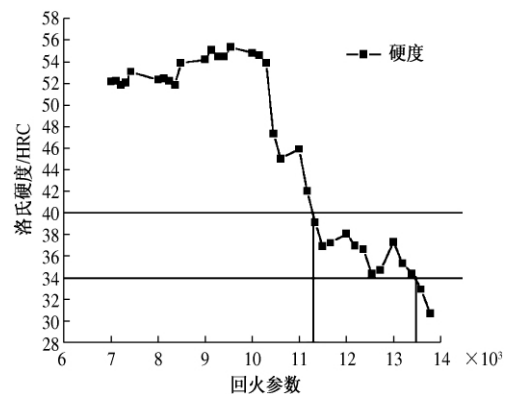


图 2 硬度与回火参数关系曲线

Fig. 2 Relation between hardness and tempering parameter

为了确定影响硬度变化的主要因素, 对试验结果进行方差分析. 该试验因素 1(回火温度) 7 个水平, 因素 2(保温时间) 5 个水平, 用硬度的变化来反映同一个因素的各个不同水平对试验结果影响的大小. 用正交试验显著性检验的 F 值来反映各因素的水平变动对试验结果影响^[11].

表 2 试验结果的方差分析

Tab. 2 Variance analysis regarding to the results of test

	平方和	自由度	均方和	F 值
回火温度	2 277.9	6	379.6	83.1
保温时间	71.19	4	17.8	3.9
误差	109.7	24	4.7	—
合计	2 458.6	34	—	—

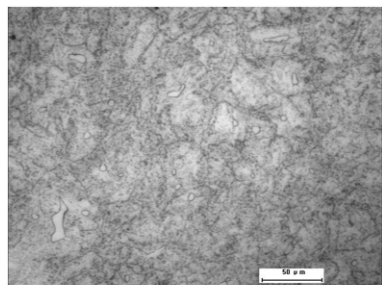
表 2 为试验结果的方差分析,经查表得:

$F_{0.05}(6,24) = 2.51 < 83.1$, $F_{0.05}(4,24) = 2.78 < 3.9$,所以当显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 时,回火温度和保温时间影响都是显著的,其中回火温度的影响更显著.所以可参照回火参数范围 11 300 ~ 13 500,优先确定回火温度,然后根据成本、生产效率、收益等方面的统筹选取回火时间.

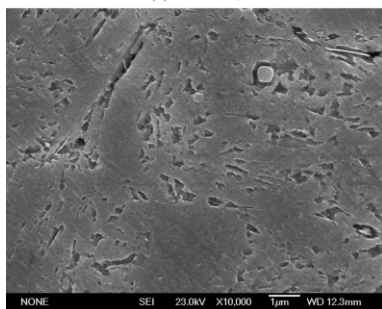
2.2 不同回火温度和保温时间对 DIN1.2316 模具钢微观组织的影响

2.2.1 不同回火温度对 DIN1.2316 模具钢微观组织的影响

图 3 为 DIN1.2316 塑料模具钢经 1 050 °C 淬



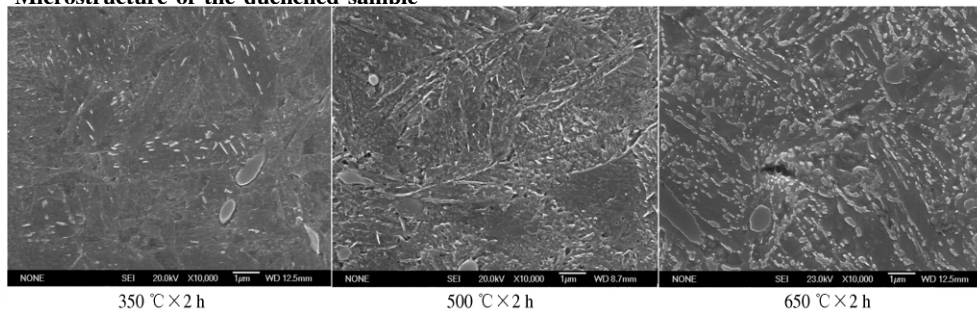
(a) 金相照片



(b) 扫描照片

图 3 1 050 °C 淬火态金相和扫描电镜照片

Fig. 3 Microstructure of the quenched sample



350 °C × 2 h

500 °C × 2 h

650 °C × 2 h

图 4 不同回火温度下的组织

Fig. 4 Microstructure of the samples at different tempering temperatures

火后的金相组织,可以看出有白色的铁素体和点状碳化物.该模具钢的合金元素含量较高,基体淬火马氏体呈隐晶状态,点状碳化物沿马氏体亚结构相界面析出^[12],在金相显微镜下不易观测到.通过扫描电镜观察可以看到,淬火组织较为细小,马氏体形态呈细小片状,还有少量碳化物.

DIN1.2316 塑料模具钢在 1 050 °C 淬火后硬度较高,主要是固溶强化引起的.在回火过程中一部分碳原子发生偏聚,马氏体基体中碳原子的含量下降,固溶强化作用降低,所以在回火过程中硬度降低.在此过程中有大量的碳化物析出,能够给基体带来一定的强化作用,但是它的作用比固溶强化弱,所以在 350 ~ 650 °C 回火温度区间,回火时间相同时,随着回火温度升高,硬度下降.随着碳化物析出,马氏体基体含碳量下降,回火温度继续升高,碳化物不断球化和长大,铁素体发生回复和再结晶,因此硬度进一步降低.

研究认为二次硬化现象是回火过程中共格析出的合金碳化物的弥散强化和残余奥氏体转变共同作用的结果^[13].由于未溶碳化物的干扰以及在硬度峰值状态时析出碳化物尺寸比较细小,对二次硬化机制还没有明确的结论.对于 Cr-Mo 系钢,随铬含量的增加二次硬化硬度峰值所对应的温度降低.2Cr-3Mo 和 5Cr-3Mo 钢的回火二次硬化峰值温度分别为 597 °C 和 567 °C^[14].本试验研究发现,DIN1.2316 模具钢二次硬化峰值温度在 450 °C.

图 4 为 DIN1.2316 模具钢不同回火温度保温 2 h 的微观组织,在 350 °C × 2 h 回火后,淬火马氏体转变为回火马氏体^[15],基体开始析出少量细小呈针状的碳化物.在此回火温度下,铬的碳化物析出较少,钢的硬度下降不明显.500 °C × 2 h 回火后,析出碳化物开始增多,由于回火时间较短,析出的碳化物仍然呈针状.这些碳化物呈弥散分布在板条基体内,对基体产生弥散强化作用,使钢的硬度略有升高.650 °C × 2 h 回火,碳化物大量析出,迅速聚集长大,并且开始球化,硬度明显降低.

2.2.2 不同回火保温时间对 DIN1. 2316 模具钢微观组织的影响

350 ~ 450 °C 回火时,随回火时间延长碳化物析出变化不大,对试样硬度的影响较小. 图 5 为 500 °C 和 650 °C 回火不同保温时间的试样扫描电镜照片,在 500 °C 回火保温 1 ~ 4 h 内,碳化物的析出不断增多,硬度保持在 54 HRC 左右,硬度下降幅度小于 1 HRC. 16 h 碳化物析出明显增加,组织变得更加均匀,硬度从 54.8 HRC 下降到 45.5

HRC,硬度下降幅度较大. 650 °C 回火保温时间在 1 h 内有大量碳化物析出,硬度从 54 HRC 下降到 37.4 HRC,满足预硬化硬度;4 h 后碳化物析出增加并明显球化,16 h 后碳化物球化长大,硬度降低到 30.7 HRC,低于预硬化硬度. 随着回火时间延长,碳化物的数量减少,尺寸增大. 这是由于随着回火时间的增长,小尺寸碳化物(小于临界半径尺寸的碳化物)溶解,依附于大于临界半径的碳化物上析出,使其逐渐长大^[16].

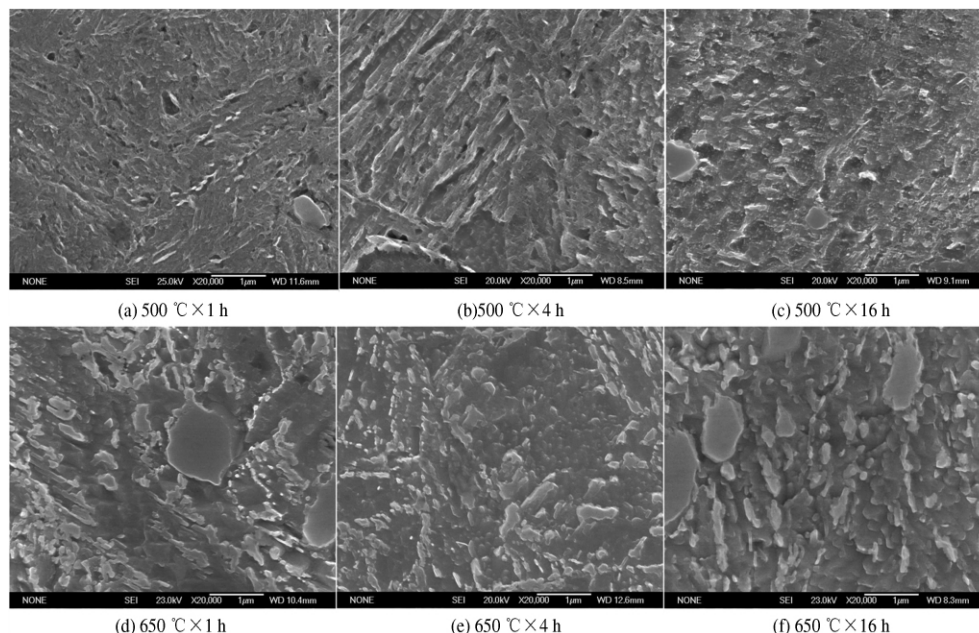


图 5 500 °C 和 650 °C 不同回火保温时间的组织变化

Fig. 5 Microstructure of the samples tempered at 500 °C and 650 °C in the different holding time

3 结论

(1) 350 ~ 650 °C 回火时,随回火温度升高,钢的回火硬度呈现出下降的趋势. 350 ~ 450 °C 回火时,硬度随保温时间变化不大,500 °C 回火时,保温 4 h 内硬度保持不变,4 ~ 8 h 硬度从 53.9 HRC 下降到 47.4 HRC,8 h 以后硬度趋于稳定. 550 ~ 650 °C 回火时,2 h 内硬度急剧下降,2 h 之后硬度基本不再变化.

(2) 回火工艺为 550 °C × 4 h ~ 16 h, 600 °C × 1 h ~ 4 h, 650 °C × 1 h, 回火参数在 11 300 ~ 13 500 范围硬度可以满足预硬化硬度要求.

(3) 碳化物随回火温度升高、回火时间延长析出增多并逐渐球化、聚集长大,使硬度下降. 回火温度对硬度的影响更显著.

参考文献:

[1] 张先鸣. 几种新型塑料模具钢性能及热处理工艺的

研究[J]. 模具制造, 2015, 15(5): 83 - 85.

[2] LIU Yu-rong, YE Dong, YONG Qi-long, et al. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 18(11): 60 - 66.

[3] JIANG Wen, ZHAO Kun-yu, YE Dong, et al. Effect of heat treatment on reversed austenite in Cr15 super martensitic stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 20(5): 61 - 65.

[4] BELLO K A, HASSAN S B, ABDULWAHAB M. Effects of tempering on the microstructure and mechanical properties of low carbon low alloy martensitic steel [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2007, 3(12): 1719 - 1723.

[5] GOJIC M, KOSEC L. The effect of tempering temperature on mechanical properties and micro-structure of low alloy Cr and Cr-Mo steel [J]. Journal of Materials Science, 1998, 5(33): 395 - 403.

[6] 许志刚, 叶林凤. 目前国内外主流塑料模具钢浅析[J]. 模具制造, 2010, 10(11): 85 - 88.

- [7] 陈志辉. 关于 DIN1. 2316A 钢淬硬性问题的探讨[J]. 模具制造, 2003, 4(21): 56-58.
- [8] 赵亮, 马党参, 刘建华, 等. 淬回火工艺对马氏体不锈钢 3Cr17Mo 组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(2): 58-60.
- [9] 孙利军. 关于 N80Q 钢回火方程的实验研究[D]. 西安: 西北大学物理学系, 2010.
- [10] VIRTANEN E, VAN T C J, LEVY B S, et al. The tempering parameter for evaluating softening of hot and warm forging die steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1364-1369.
- [11] 刘雷, 李培耀. 34CrNi3Mo 钢热处理工艺正交试验与优化[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(2): 164-166.
- [12] 张岩, 赵爱民, 何建国, 等. 回火温度对 Cr8Ni2MoNb 钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 114-116.
- [13] 迟宏宵, 马党参, 王昌, 等. Cr8Mo2SiV 钢二次硬化机理的研究[J]. 金属学报, 2010, 46(10): 1181-1185.
- [14] 王毛球, 董瀚, 王琪, 等. 3Cr-3Mo 二次硬化钢的回火组织和力学性能[J]. 钢铁, 2003, 38(3): 38-42.
- [15] 李雪峰, 王春芬, 王嘉敏. 回火马氏体与回火索氏体辨析[J]. 热处理, 2012, 27(4): 12-16.
- [16] 张忠侃. H13 钢碳化物球化过程及组织力学性能的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学材料工程与科学学院, 2010: 38-39.

Effect of the Tempering Process on the Property of DIN1. 2316 Plastic Die Steel

ZUO Xiu-rong, ZHANG Xin-li, GUO Hai-bin, LI Jin-ling, WANG Yi-peng

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

Abstract: The microstructure and mechanical properties of DIN1. 2316 plastic die steel quenching at 1 050 °C and tempering at 350 ~ 650 °C for 1 ~ 16 h were studied with scanning electron microscopy (SEM), metallurgical microscope and Rockwell hardness tester. It is found that the hardness of samples is showing a downward trend after rising at first when tempering at 350 ~ 650 °C in the same tempering holding time. Tempering at 350 ~ 450 °C, the hardness changes little with the tempering time. When tempering at 500 °C and holding time within 4h, the hardness remains the same but the hardness drops from 53.9 HRC to 47.4 HRC at 4 ~ 8 h and then remains steady after 8h. The hardness declines fast within 2h and basically keeps stable after 2 h at 550 ~ 650 °C. Tempering at 550 °C × 4 h ~ 16 h, 600 °C × 1 h ~ 4 h, 650 °C × 1 h and temper parameter at 11 300 ~ 13 500 can satisfy pre-hardening hardness requirement. Precipitated carbide gradually spheroidizes and the amount gradually increases with the extension of tempering temperature and the increasing of holding time, which makes the hardness decrease. The influence of tempering temperature on hardness is more important than holding time.

Key words: DIN1. 2316 plastic die steel; tempering; tempering curve; hardness; microstructure

文章编号: 1671-6833(2015)05-0011-04

锡元素对 Zn-10Al 钎料合金组织及性能的影响

李永刚¹, 范桂霞¹, 赵开新², 吴保鹏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 453003)

摘要: 利用 OM、XRD 衍射仪、SEM 及其自带的 EDS 能谱分析仪、万能试验机研究 Sn 元素添加量对 Zn-10Al 钎料合金显微组织、物理性能以及焊接性能的影响。结果表明: Sn 元素能够细化 Zn-Al 钎料共析组织, 降低钎料合金熔化温度, 提高钎料合金铺展性能以及焊接接头的抗剪强度。添加 Sn 元素质量分数为 12% 时, 钎料合金在铜板上铺展面积为 122 mm², 焊接接头的抗剪强度为 53 MPa。当 Sn 元素质量分数超过 12.0% 时, 铜界面处金属间化合物迅速生长, 铺展面积和剪切强度下降。

关键词: Zn-10Al 钎料; 显微组织; 熔化温度; 铺展面积; 抗剪强度

中图分类号: TG454

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.003

0 引言

铜及铝合金具有优良的导电、导热、耐腐蚀和加工成形性能, 广泛应用于电力、制冷及化工行业。但是我国铜资源稀缺, 铝资源相对丰富, 将铜、铝及其合金连接形成复合结构, 不但能减轻构件的重量、节省材料, 而且能发挥各自的性能优势^[1]。铜和铝之间存在较大的物理和化学性能差异, 实现铜铝可靠焊接并形成合格的焊接接头存在较大困难^[2]。由于钎焊对母材的各种性能影响较小, 所以铜、铝的连接多采用钎焊的焊接方法。锌铝合金不仅是优良的耐磨材料, 还可以作为钎料广泛应用于钎焊中^[3]。中南大学的刘正林^[4]等人研究发现 Zn-10Al 钎料钎焊铜铝接头的强度最高。河南科技大学的赵快乐^[5]等人研究了 Sn 元素对 Zn-4Al-3Cu 钎料合金组织和性能的影响, 结果表明: 当 Sn 元素添加量为 10.0 wt.% 时, 钎料合金铺展性和抗拉强度最好。但是钎焊普遍存在的问题(尤其对于 Zn-Al 钎料)是接头的抗剪强度不高。作者通过在 Zn-Al 钎料合金中加入 Sn 元素, 研究 Sn 元素对 Zn-10Al 钎料合金组织及性能的影响。

1 试验方法

试验钎料配置选用 0# 锌锭(纯度 >

99.99%)、工业纯铝(纯度 > 99.7%)、工业纯锡(纯度 > 99.99%), 在 Zn-10Al 钎料合金中加入质量分数为 0%、4%、8%、12%、16% 的 Sn 元素。钎剂采用 KAlF₄-CsAlF₄ 无腐蚀性钎剂。钎焊试验母材选用 3 mm 的 1060 铝板和 2 mm 的 T2 紫铜板, 试验前去除母材表面油污和氧化物。测定钎料的熔化温度在 Mettler-Toledo TGA/DSC 同步分析仪上进行, 升温速度 10 °C/min。钎料的铺展试验在 (480 ± 5) °C 的恒温电阻炉中保温 4 min。钎焊接头力学性能试验参照国家标准 GB/T11363-2008 《钎焊接头强度试验方法》。采用 Olympus H2-UMA 型光学显微镜和 JSM-6490LV 型扫描电镜及其自带的 EDS 能谱仪对钎料和焊缝组织进行观察和分析。在 Philips PW1700 型 X 射线衍射仪上进行钎料合金的相组成分析。焊接接头的抗剪强度在 Sun10 型万能试验机上进行, 拉伸速率为 1 mm/min。

2 试验结果与讨论

2.1 Sn 元素对 Zn-10Al 钎料合金组织的影响

Zn-10Al-xSn 钎料合金的金相组织如图 1 所示。钎料合金室温下存在 3 种组织形态: 灰色基体、树枝晶、白色块状组织。对图 1 中 A、B、C 三点进行 EDS 能谱分析。结果如表 1 所示。钎料合金中的 XRD 衍射分析结果如图 2 所示, 结合钎料合

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-06-23

作者简介: 李永刚(1967—), 男, 河南漯河人, 郑州大学副教授, 硕士, 主要从事锌铝合金耐磨性以及锌铝钎料焊接方面的研究, E-mail: Lyg@zzu.edu.cn.

金显微组织和 EDS 分析结果,可以判定 A 为 η (Zn) 相,树枝晶 B 为 Zn-Al 共析组织,白色块状 C 为 β (Sn) 相. Zn-10Al 钎料合金的树枝晶存在两种组织形态:层片状、层片状周围的蜂窝状. 由 Zn-Al 二元合金相图可知,Zn-10Al 属于亚共晶成分,研究表明,层片状为先共晶 β (Zn) 发生共析反应

生成的 α (Al) + η (Zn) 共析组织,蜂窝状为共晶组织^[6]. 随着 Sn 元素的加入,钎料合金树枝晶细化, β (Sn) 相呈均匀分布. 树枝晶细化,有利于降低成分偏析,减少缩松等缺陷^[7]. 当 Sn 元素质量分数超过 12.0% 时,弥散分布的 β (Sn) 相变得粗大,将直接影响钎料合金的性能.

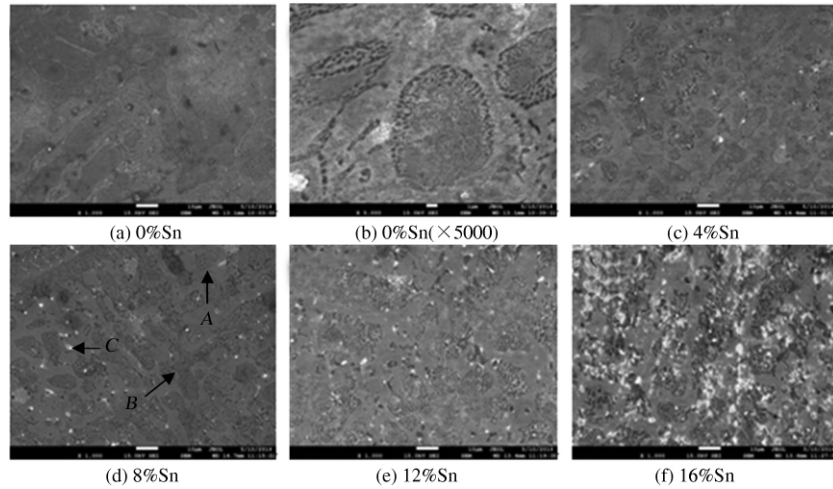


图 1 Zn-10Al-xSn (wt. %) 钎料合金相组织 $\times 1000$

Fig. 1 Microstructure of solder alloys

表 1 图 1 所示区域 EDS 分析结果

Tab. 1 EDS analysis of points marked on Fig. 1 %

元素质量分数	A	B	C
Zn	98.73	73.62	44.84
Al	1.27	23.26	3.45
Sn	-	3.12	51.72

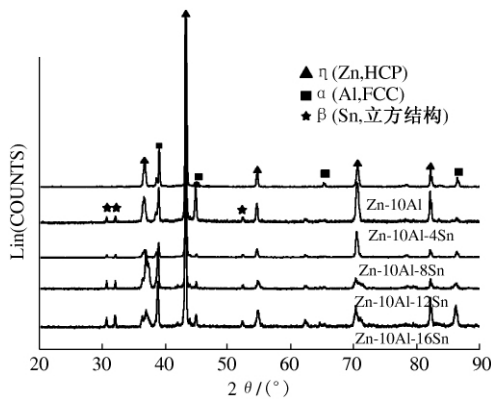


图 2 钎料合金的 XRD 分析结果

Fig. 2 X-ray diffraction patterns analysis results of solder alloys

2.2 Sn 元素对 Zn-10Al 钎料熔化温度的影响

Zn-10Al-xSn 钎料合金的 DSC 曲线如图 3 所示. 随着 Sn 元素添加量增加,DSC 曲线向左偏移,各吸热峰的峰值逐渐减小,吸热峰逐渐变宽. 表明 Sn 元素的加入能够降低钎料合金的熔化温度,使

钎料合金的固液相温度区间变宽. 这是因为金属 Sn 的熔点为 232 °C,随着 Sn 元素添加量增加,钎料合金中低熔点 β (Sn) 相增多,高熔点 η (Zn) 相减少,所以能够降低钎料合金的熔化温度.

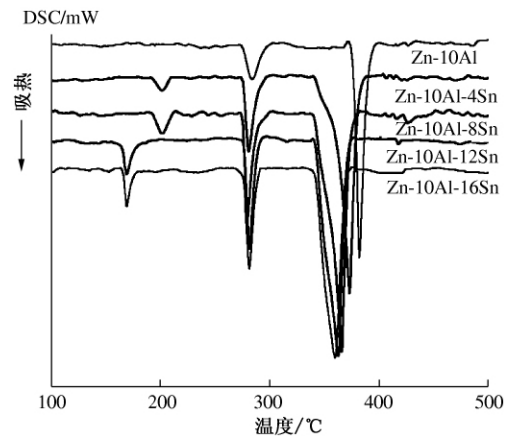


图 3 Zn-10Al-xSn (wt. %) 钎料合金 DSC 曲线图

Fig. 3 The DSC curves of Zn-10Al-xSn solder alloys

2.3 Sn 元素对 Zn-10Al 钎料铺展性影响

钎料在铜板和铝板上铺展性试验测试结果如图 4 所示. 随着 Sn 元素添加量增加,钎料合金在铝板上铺展面积呈上升趋势,在铜板上铺展面积先增加后减小. Sn 元素质量分数为 12.0% 时,在铜板上铺展面积最大. Sn 元素的加入降低了钎料合金的熔化温度,在同一温度下,低熔点合金相对过热度高,分子运动剧烈,黏度小,流动性好,铺展

面积大^[8]. 影响润湿性能的另一个因素是液态钎料表面张力的大小^[6], Sn 元素为表面活性元素, 其表面张力为 0.55 N/m, 小于 Zn 元素的 0.81 N/m, 表面张力越小, 铺展面积越大. 界面处生成的大量金属间化合物会阻碍钎料的流动^[9]. 因此, Zn-10Al-12Sn 钎料合金在铜板上的铺展面积最大.

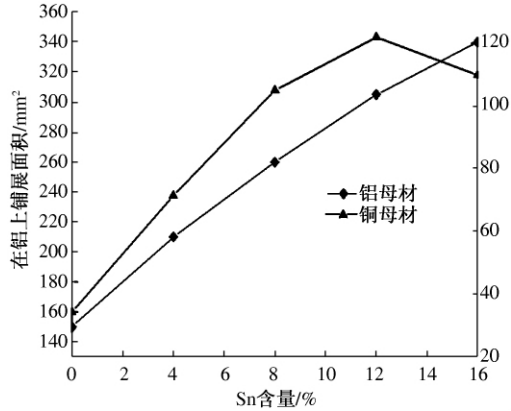


图 4 钎料在铜板和铝板上的铺展面积

Fig. 4 The spreading area of solders on copper plate and aluminum plate

2.4 焊缝与铜侧界面组织分析

焊缝与铜母材界面显微组织如图 5 所示, 钎料与铜侧界面有金属间化合物生成, 从铜基体延伸至焊缝内部. 研究表明, Zn-Al 钎料与铜界面产生 CuAl_2 和 CuZn_3 金属间化合物^[10]. 由表 2 界面

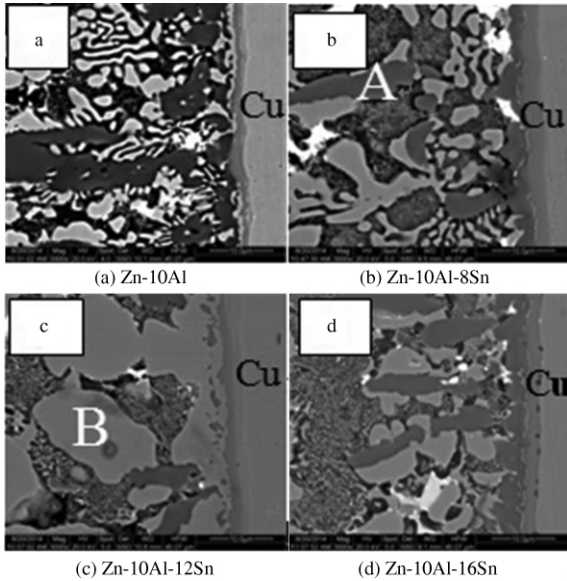


图 5 Zn-10Al-xSn 钎料钎焊缝与铜界面组织

Fig. 5 Microstructures of interface layer on copper side

处组织 EDS 能谱分析结果可知, A 为 CuAl_2 相, B 为 CuZn_3 相. 在钎焊过程中, Cu 原子从铜母材向焊缝区域扩散, 与钎料中 Zn 和 Al 元素结合形成

化合物. 在焊缝冷却过程中, 高熔点的 CuZn_3 相先结晶析出, 并沿界面向内生长成树枝晶, 低熔点的 CuAl_2 相依附在 CuZn_3 相周围生成, 剩余液体被排挤到枝晶间形成 Zn-Al 共析组织.

表 2 图 5 所示区域 EDS 分析结果

Tab. 2 EDS analysis of points marked on Fig. 5 %

元素质量分数	A	B
Zn	2.69	73.31
Al	65.90	4.60
Cu	31.41	22.09

2.5 Sn 元素对 Zn-10Al 钎料剪切强度的影响

钎料合金焊接接头剪切强度如图 6 所示. 当 Sn 元素质量分数为 12.0% 时, 抗剪切强度为 53 MPa, 较没添加 Sn 时提高了 35.9%. 在剪切力作用下, 焊缝与铜母材界面处金属间化合物因应力集中导致裂纹萌生并扩展^[11], 因此断裂发生在焊缝与铜母材界面处. Zn-10Al 和 Zn-10Al-8Sn 钎料焊缝与铜界面处密集分布着两种硬脆的金属间化合物, 在剪切力的作用下不能协调变形; Zn-10Al-16Sn 钎料合金熔点较低, 在相同的焊接温度下, 钎料合金与铜母材反应剧烈, 界面处金属间化合物层较厚, $\beta(\text{Sn})$ 相分布不均匀, 加剧了组织不均匀性, 协调变形能力差, 不利于焊接接头剪切强度的提高. Zn-10Al-12Sn 钎料合金中 CuZn_3 相开始与界面分离, 更多塑韧性好的 Zn-Al 共析组织与界面接触, 并且界面层弥散分布着大量的 CuAl_2 相, 起到弥散强化的作用, 有利于焊接接头剪切强度的提高.

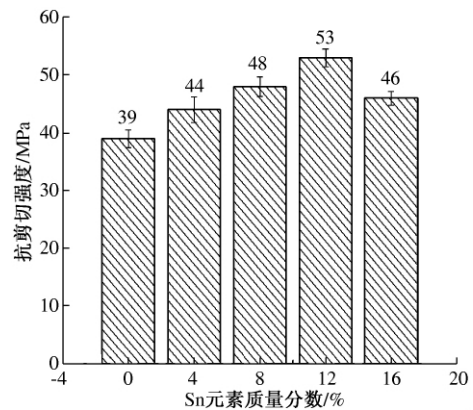


图 6 铜/铝钎焊接头剪切强度

Fig. 6 Shear strengths of Cu/Al brazing joints

3 结论

(1) 在 Zn-10Al 钎料合金中加入 Sn 元素, 钎

料合金共析组织得到细化,白色块状的 β (Sn) 相分布均匀,当 Sn 元素质量分数超过 12.0% 时, β (Sn) 相变得粗大,组织不均匀性增加。

(2) Sn 元素的加入能使 Zn-10Al 钎料合金的熔化温度降低,改善钎料合金与铝板和铜板的润湿性。当 Sn 元素质量分数为 12.0% 时,在铜板上铺展面积最大。

(3) Zn-10Al-xSn 钎料合金焊接接头剪切强度随着 Sn 元素质量分数的增加,先增加后减小。质量分数为 12.0% 时,剪切强度为 53 MPa。

参考文献:

- [1] 夏春智,李亚江,王娟. Cu/Al 异种金属连接的研究现状[J]. 焊接, 2008(1): 17-20.
- [2] 张满,薛松柏,戴玮,等. Al 元素含量对 Zn-Al 钎料性能影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 93-96.
- [3] 李永刚,赵向南,范桂霞,等. 硅元素对 Zn-75Al 合金组织及性能的影响[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(2): 100-103.
- [4] 刘正林,杨凯珍,尹登峰. 铝铜钎焊用 Zn-Al 钎料的研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(11): 123-125.
- [5] 赵快乐. Zn 基新型高温无铅软钎料研究[D]. 洛阳: 河南科技大学材料科学与工程学院, 2012.
- [6] KIM S J, KIM K S, KIM S S, et al. Characteristics of Zn-Al-Cu alloys for high temperature solder application[J]. Materials transactions, 2008, 49(7): 1531-1536.
- [7] 方洪渊,冯吉才. 材料连接过程中的界面行为[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [8] 安阁英. 铸件形成理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [9] 刘凤美,杨凯珍,刘师田,等. Cu 元素对铝/铜钎焊用 Zn-Al 钎料性能的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(21): 32-35.
- [10] JI Feng, XUE Song-bai, LOU Ji-yuan, et al. Micro-structure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn-Al filler metals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 281-287.
- [11] 张满,王鹏飞,张临财,等. Zn-Al-Ag 钎料铜-铝钎焊接头显微组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 55-58.

Effect of Sn on Structure and Property of Zn-10Al Solder Alloy

LI Yong-gang¹, FAN Gui-xia¹, ZHAO Kai-xin², WU Bao-peng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Automotive Engineering, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453003, China)

Abstract: This paper deals with the effect of Sn on the microstructure, physical properties, and welding performance of Zn-10Al-xSn Alloys by using OM, XRD diffraction, SEM and its EDS spectrum analyzer and Sun10 universal testing machine. The results show that Sn can refine eutectoid structure and reduce the melting temperature of Zn-Al alloys. Spreading performance and the shear strength of welded joints are improved with the adding of Sn element. The spreading area on copper plate is 122 mm² and the shear strength of welded joints is 53 MPa when the Sn element is added up to 12 wt. %. Increasing the adding amount of Sn element, the spreading area and shear strength decrease. This is because intermetallic compound on interfacial grows rapidly.

Key words: Zn-10Al solder; microstructure; melting temperature; spreading area; shear strength

文章编号: 1671-6833(2015)05-0015-05

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

(郑州大学 河南省高温功能材料重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘 要: 以板状刚玉骨料和细粉、Al 粉、Si 粉、石墨和纳米 ZrO_2 粉为原料, 以酚醛树脂为结合剂, 研究了纳米 ZrO_2 粉对 Al-Si 复合 Al_2O_3 -C 材料性能、组成和结构的影响. 结果表明: 引入纳米 ZrO_2 粉对试样的常温和高温强度影响不大, 但有利于提高试样的成型致密度和抗氧化性, 可明显提高试样的抗热震性. 试样致密度提高的原因在于纳米氧化锆具有良好的填充作用和助烧结作用. 纳米 ZrO_2 可促进 Al、Si 反应生成更多非氧化物晶须, 并在试样中形成交叉连锁的网络结构, 以及纳米粉的增韧和 ZrO_2 的相变增韧均有利于提高试样的抗热震性.

关键词: Al-Si 复合 Al_2O_3 -C 材料; 纳米 ZrO_2 粉; 高温机械性能; 物相组成; 显微结构

中图分类号: TQ175.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.004

0 引言

滑板是炼钢连铸用关键性功能元件, 具有调节钢水流量的功能, 其使用时受到强烈的热冲击、高温钢水的冲刷磨损以及环境介质的侵蚀, 因此, 滑板应具有优良的抗热震性和抗侵蚀性等^[1-2]. 目前国内外滑板材料以高温烧成的铝碳和铝锆碳质为主, 采用高温埋碳烧成, 制备成本高、能耗大、污染严重. 近几年新开发的节能型低碳金属 Al-Si 复合 Al_2O_3 -C 滑板^[3-4], 采用低温烧成或不烧工艺, 节能减排效果显著, 且较低的碳含量有利于洁净钢冶炼. 滑板中的 Al、Si 在加热或高温使用过程中与基体中的 C 以及气氛中的 CO 和 N_2 反应原位生成纤维状或针状碳化物、氮化物增强增韧相, 从而显著提高材料高温使用性能^[5]. 此新型滑板已在生产实际中得以应用, 并取得了较好的使用效果.

然而, 随着洁净钢冶炼比例的增加, 对滑板的抗热震性和抗侵蚀性提出更高要求. 纳米粉具有较好的填充作用, 易使材料结构致密化、气孔微细化, 可提高抗侵蚀性; 在材料中易形成以纳米颗粒为核的类似于“晶内型”的复合结构, 可提高材料

的抗热震性^[6-7]. 此外, 纳米粉还具有降低烧结温度、提高反应活性和增强结合的作用等. 在氧化铝耐火材料中引入纳米 SiO_2 、 ZrO_2 和 TiO_2 均可提高材料的抗热震性^[8]. 将纳米氧化铝引入到不烧铝碳滑板中, 可明显提高滑板的性能和使用效果^[9]. 将纳米 SiO_2 引入到金属 Al-Si 复合低碳铝碳不烧滑板中, 可提高滑板的抗热震性和抗氧化性^[10]. 将纳米 ZrO_2 粉引入到铝碳或铝锆碳耐火材料中, 可提高材料的抗热震性和抗侵蚀性^[11-12], 不仅因为纳米 ZrO_2 粉具有良好的增韧作用, 还具有相变增韧以及良好的抗渣侵蚀性能.

可见, 纳米粉引入到滑板中, 可提高滑板的抗热震性和抗侵蚀性等. 因此, 本工作在 Al-Si 复合低碳铝碳不烧滑板材料中引入纳米 ZrO_2 , 研究其对材料组成、结构和性能的影响, 期望提高此类滑板的抗侵蚀性和抗热震性, 进而为滑板的实际应用提供技术数据.

1 实验

1.1 实验原料

实验主要原料为: 板状刚玉颗粒和细粉、 α -

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-07-17

基金项目: 河南省重点科技攻关资助项目(14A430030); 郑州市科技局攻关资助项目(131PPTGG409-3)

通讯作者: 刘新红(1973—), 女, 河南沈丘人, 郑州大学副教授, 博士, 无机非金属材料专业, 主要从事耐火材料研究,

E-mail: liuxinhong@zzu.edu.cn.

Al_2O_3 微粉、铝粉、Si 粉、石墨和纳米 ZrO_2 。原料的纯度和粒度如表 1 所示。

颗粒与细粉的比例为 65/35, 其中 1~3 mm 占 35 wt.%, 1~0 mm 占 30 wt.%. 试样分为两组: AS 为只添加 Al、Si 的试样(Al 为 5 wt.%, Si 为 3 wt.%), ASZ 是在 AS 的基础上添加了 1 wt.% 纳米 ZrO_2 粉。

表 1 原料的纯度和粒度

Tab. 1 Purity and particle sizes of raw materials

原料种类	质量分数/%	粒度
板状刚玉颗粒	Al_2O_3 : 99.28	0~3 mm
板状刚玉细粉	Al_2O_3 : 99.28	0.044 mm
α - Al_2O_3 微粉	Al_2O_3 : 99.21	$D_{50} = 3.31 \mu\text{m}$
铝粉	Al: 99.00	0.074 mm
Si 粉	Si: 99.00	0.074 mm
石墨	C: 97.00	0.088 mm

1.2 实验过程

首先将纳米 ZrO_2 粉加入到无水乙醇中, 以聚乙二醇型缩聚物粉末(FS-10)为分散剂, 采用超声分散的方法将纳米 ZrO_2 粉体均匀分散在无水乙醇中来制备分散液, 分散后纳米粉的显微结构如图 1 所示, 由图可知 ZrO_2 粉体分散均匀, 其颗粒尺寸在 20~50 nm。

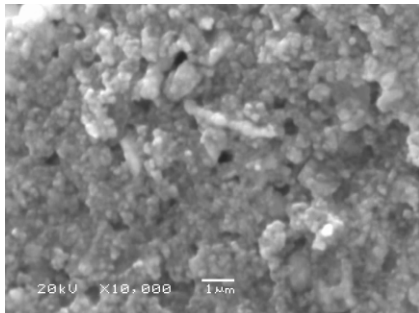


图 1 分散后纳米 ZrO_2 粉体的显微结构

Fig. 1 Microstructure of the dispersed nano- ZrO_2

将分散液加入到酚醛树脂中, 在高速搅拌机以上以 5 000 r/min 转速将分散液与酚醛树脂混合均匀。按实验配比称取各种原料, 以含纳米 ZrO_2 的酚醛树脂为结合剂, 将各种原料在搅拌机中混练均匀。以 150 MPa 的压力压制成 25 mm × 25 mm × 150 mm 的条形试样和 $\phi 36$ mm × 36 mm 的圆柱形试样。然后将试样放入烘箱中在 60 °C 下烘烤 6 h, 120 °C 下烘烤 6 h, 在 180 °C 下烘烤 12 h。自然冷却后, 测量试样的显气孔率(AP)、体积密

度(BD)、常温抗折强度(MOR)和耐压强度(CCS)以及 1 400 °C 下的高温抗折强度(埋碳, 保温 30 min)和 $\Delta T = 1\ 100$ °C 的抗热震性。抗热震性的实验方法为: 测量试样热震前后的残余抗折强度 σ_f 和 σ_r , 以残余抗折强度保持率(热震后的抗折强度/热震前抗折强度即 σ_r/σ_f)来表征试样的抗热震性。试样分为两组, 一组在 1 100 °C 下埋碳加热后在炉中自然冷却, 试样的强度为热震前强度。另一组在 1 100 °C 下埋碳加热 30 min, 然后在空气中急冷处理, 反复 3 次, 这组试样的强度为热震后的强度。抗氧化性的实验方法为: 将烘烤后试样置于氧化炉中分别于 1 000 °C 和 1 500 °C 下保温 3 h 研究其抗氧化性, 测定不同位置横截面的氧化层深度来评估氧化程度。用 XRD 分析试样的物相组成, 用 SEM 观察试样的显微结构, 并对试样进行 EDS 微区分析。

2 实验结果和讨论

2.1 引入纳米 ZrO_2 对试样性能的影响

试样的常温物理性能包括显气孔率(AP)、体积密度(BD)、常温抗折强度(MOR)和常温耐压强度(CCS), 高温机械性能包括高温抗折强度(HMOR)和抗热震性(TSR)。试样的常温物理性能和高温机械性能见表 2。

表 2 试样的常温物理性能和高温机械性能

Tab. 2 Physical and thermo-mechanical properties of specimens

试样	AP /%	BD/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	MOR/ MPa	CCS/ MPa	HMOR/ MPa	TSR	
						σ_r / MPa	$(\sigma_r / \sigma_f) / \%$
AS	11.6	2.94	42.9	107.5	32.5	25.1	58.4
ASZ	11.1	3.00	42.2	106.5	32.8	28.2	66.9

从表 2 可以看出: 与 AS 试样相比, 添加纳米 ZrO_2 粉的 ASZ 试样的致密度有所提高, 这是由于纳米粉具有良好的填充作用, 有助于材料致密度的提高, 但添加纳米 ZrO_2 粉对试样的常温强度和高温强度影响不大。添加纳米 ZrO_2 粉后试样的残余强度和残余强度保持率明显提高, 残余强度保持率从 58.4% 提高到 66.9%, 提高了 8.5%, 可见, 引入纳米 ZrO_2 可明显提高材料的抗热震性。这可能因为: ①纳米粉体粒度极小, 可以起到塑性颗粒增强体的作用, 它作为塑性弥散相与耐火骨料及基质复合, 在骨料与基质的交界处起到了吸引裂纹应力的作用, 当裂纹尖端抵达塑性相时, 其

应力被吸收,阻止裂纹继续发展或偏转,从而增强了材料的断裂能和抵抗热应力的能力^[6-7];②纳米氧化锆加热过程中会发生 $m\text{-ZrO}_2 \rightarrow t\text{-ZrO}_2$ 相变,产生 3% ~ 5% 的体积变化,从而引起微裂纹,产生增韧作用,从而提高试样的抗热震性^[11].

180 °C 烘烤后试样在 1 000 °C 和 1 500 °C 下氧化 3 h 后的剖面照片示于图 2,在 1 000 °C 下氧化后的试样的未氧化层呈黑色,氧化层呈深灰色,这是由于材料部分氧化导致;而在 1 500 °C 下氧化后的氧化层呈灰白色,表明氧化层被完全氧化,且温度越高氧化越剧烈. 测量氧化层厚度(图中颜色较浅部位为氧化层),用以评价试样的抗氧化性,结果示于表 3.

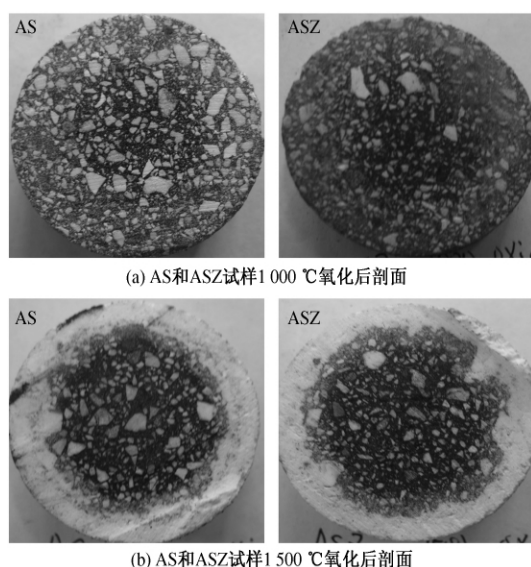


图 2 试样氧化后剖面

Fig. 2 Cross-section of specimens after oxidized

表 3 试样的 1 000 °C 和 1 500 °C 氧化层厚度

Tab. 3 Thickness of specimens after oxidized

试样	at 1 000 °C and 1 500 °C		mm
	1 000 °C	1 500 °C	
AS	9.53	4.98	
ASZ	6.72	4.03	

由表 3 可知,在 1 000 °C 和 1 500 °C 下氧化后 AS 和 ASZ 的氧化层厚度分别为 9.53 mm, 4.98 mm 和 6.72 mm, 4.03 mm. 可见, ASZ 试样的抗氧化性优于 AS 试样. 这是因为: ①引入纳米 ZrO_2 后材料结构更致密, 氧气进入试样内部的通道减少; ②Al、Si 以及 AlN、SiC 等氧化产物为 Al_2O_3 和 SiO_2 , Al_2O_3 和 SiO_2 进一步反应形成莫来石致密层, 阻碍氧气进入试样内部, 形成保护性氧化. 对于 ASZ 试样, 原位生成的 AlN、SiC 晶须直径更

细, 活性更高, 更易反应形成莫来石致密保护层^[13].

2.2 引入纳米 ZrO_2 对试样物相组成的影响

图 3 为高温抗折测试后试样 AS 和 ASZ 的 XRD 图谱. 高温抗折测试是在 1 400 °C 埋碳条件下进行的, 过多的 C 和氧反应形成 $\text{CO}(\text{g})$, 同时空气中存在大量的 N_2 , 因此, 该体系中的气氛主要为 CO 和 N_2 , CO 和 N_2 通过试样中的孔隙进入试样内部与 Al 和 Si 发生反应.

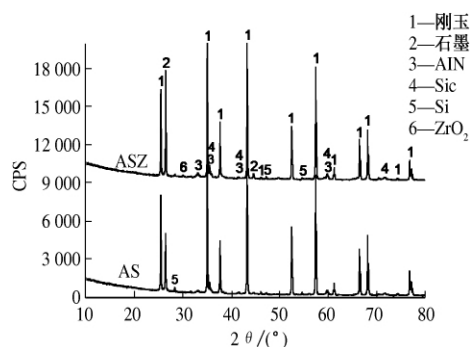


图 3 高温抗折测试后试样的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of specimens after HMOR testing

从图 3 可以看出: 在 1 400 °C 埋碳条件下加热处理 30 min, 两试样中均未发现金属 Al 的峰, 说明金属 Al 完全发生了反应. 与试样 AS 相比, ASZ 中 Si 峰的强度较低, 说明 ASZ 中硅的含量较少, 同时发现试样 ASZ 中 AlN 或 SiC 峰的强度稍高于 AS, 这表明纳米 ZrO_2 的加入有助于促进 Al、Si 粉反应生成较多非氧化物. 在 ASZ 中检测到 ZrO_2 的峰, 其以四方相存在.

2.3 引入纳米 ZrO_2 对试样显微结构的影响

图 4(a) ~ (d) 为高温抗折测试后试样 AS 和 ASZ 的显微结构. 表 4 为图 4(c) 中各点的能谱分析.

图 4(a) 为试样 AS 在 500 倍下的断口形貌, 可以看出在试样的孔隙中有原位生成的非氧化物晶须, 在试样中成簇状分布. 图 4(b) 为试样 ASZ 在 500 倍下的断口形貌, 由图可以看出, 原位生成的非氧化物晶须在试样中分布更广泛, 数量更多. 图 4(c) 和 3(d) 表明非氧化物晶须呈交叉连锁的网络结构, 有利于提高试样的抗热震性; 且 ASZ 试样中形成连续的网络结构, 非氧化物晶须直径更细, 其增韧效果更明显, 因此, ASZ 试样比 AS 具有更优良的抗热震性. 图 4(c) 结合表 4 的能谱分析可知, 晶须状物质为非氧化物 AlN 和 SiC.

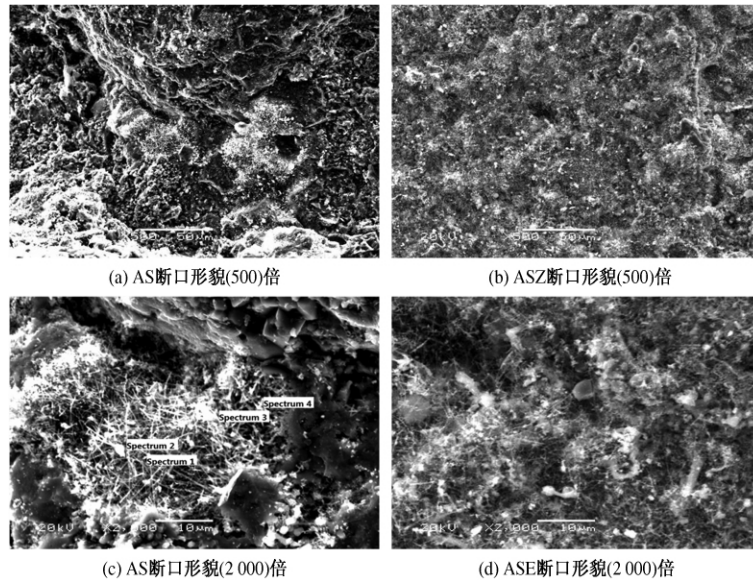


图4 试样经高温抗折测试后断口的 SEM 照片

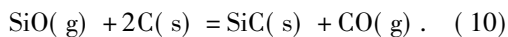
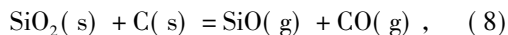
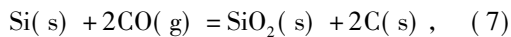
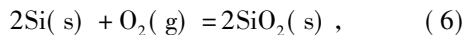
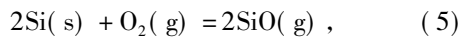
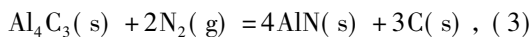
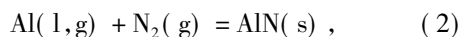
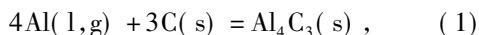
Fig.4 SEM photographs of specimens after HMOR testing

表4 图4(c)中各点的能谱分析

Tab.4 EDS results of the points in figure 3(c) %

Spectrum	C	N	O	Al	Si
Spectrum 1	23.50	29.61	0.00	44.43	2.45
Spectrum 2	0.00	0.00	0.00	87.61	12.39
Spectrum 3	45.01	0.00	0.00	49.43	5.56
Spectrum 4	42.51	0.00	14.94	39.63	2.91

在 1 400 ℃埋碳条件下,Al、Si 与 C 以及气氛中的 CO、N₂ 和少量 O₂ 反应生成 AlN 和 SiC 晶须可能通过以下途径实现



当纳米 ZrO₂ 接触到 Al、Si 时,由于纳米 ZrO₂ 具有较大的比表面积和较高的活性,可与 Al、Si 反应,在相对较低的温度下可能形成中间产物 Al₂O(g)、AlO(g) 以及 SiO(g) 等,这些气相中间产物传质速度较快、更易在试样中扩散,并可与 C、CO 和 N₂ 反应生成 AlN 和 SiC 晶须,因此,引入纳米 ZrO₂ 可促进 Al、Si 反应,且非氧化物晶须在试样中分布更广、数量更多。

综上可知:①在 Al-Si 复合低碳 Al₂O₃-C 材料中引入纳米 ZrO₂,由于纳米粉具有良好的填充作用,可提高试样的致密度;②纳米 ZrO₂ 促进 Al、Si 反应生成非氧化物晶须,晶须交叉连锁形成连续的网络结构,具有较好的增强增韧作用,有利于提高试样的抗热震性;纳米 ZrO₂ 本身具有较好的增韧作用,同时存在 m-ZrO₂→t-ZrO₂ 相变,相变产生微裂纹,具有良好的增韧作用,因此,引入纳米 ZrO₂ 可明显提高试样的抗热震性。

3 结论

(1) 引入纳米 ZrO₂ 粉有利于提高试样的成型致密度,但对材料的常温和高温强度影响不大。

(2) 引入纳米 ZrO₂ 粉可明显提高试样的抗热震性,原因在于纳米 ZrO₂ 具有增韧及相变增韧作用,以及其促进 Al、Si 反应生成更多非氧化物晶须,晶须交叉连锁形成连续的网络结构,增韧效果显著。

(3) 引入纳米 ZrO₂ 粉可提高试样的抗氧化性,原因在于纳米 ZrO₂ 的填充作用以及助烧结作用,使材料结构更致密,以及较细的非氧化物晶须更易氧化形成莫来石致密保护层。

参考文献:

- [1] 李影,赵海燕,张山林,等. 滑板用耐火材料的研究与发展[J]. 价值工程, 2011(35): 73-74.
- [2] YOHTARO M, MINORU O, KOUICHI Y. Statistical analysis of thermal spalling of refractories for continu-

- ous casting [C]. Proc of UNITECR'03: Osaka, Japan, 2003: 260 – 263.
- [3] 石凯. Al/Si 复合 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 材料的高温性能、显微结构及研制 [D]. 郑州: 郑州大学材料科学与工程学院, 2007.
- [4] 刘新红, 钟香崇. 加入不同量 Al 粉和 Si 粉的低碳 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 滑板的高温力学性能 [J]. 耐火材料, 2013, 47(1): 6 – 9.
- [5] 石凯, 钟香崇. 金属 Al-Si 结合 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 滑板的性能和使用 [J]. 耐火材料, 2007, 41(3): 205 – 207, 219.
- [6] 汪厚植, 赵惠忠, 顾华志, 等. 纳米技术在耐火材料中的应用研究 [J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2005, 28(2): 130 – 133.
- [7] 刘新红, 朱晓燕, 马腾, 等. 纳米技术在耐火材料中应用的新进展 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 2514 – 2526.
- [8] DUDCZIG S, VERES D, ANEZIRIS C G, et al. Nano and micro metre additions of SiO_2 , ZrO_2 and TiO_2 in fine grained alumina refractory ceramics for improved thermal shock performance [J]. Ceramics International, 2012, 38(3): 2011 – 2019.
- [9] 罗焰, 石凯, 吕培中. 一种含纳米氧化铝不烧铝碳滑板砖的生产工艺: 中国: 200710189730. 0. [P]. 2008.
- [10] LIU Xin-hong, JIANG Wei-fen, JIA Quan-li, et al. Evolution of properties and microstructure of Al and Si incorporated $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ material with nano- SiO_2 powder addition [J]. Int. J. Nano manufacturing, 2014, 10(1/2): 83 – 93.
- [11] 于之东. 铝碳系滑板材料性能研究 [D]. 石家庄: 河北理工大学材料科学与工程学院, 2005.
- [12] SEN A, PRASAD B, SAHU J K, et al. Effect of nano-oxides and anti-oxidants on corrosion and erosion behavior of submerged nozzle for longer sequence casting of steel [C]. Proc. of UNITECR 2009, Salvador, Brazil.
- [13] 刘新红, 叶方保, 钟香崇. Si 粉和 Si-Al 粉加入量对原位合成刚玉- SiC/SiAlON 复合材料抗氧化性研究 [J]. 耐火材料, 2008, 42(2): 97 – 100.

Effects of Nano- ZrO_2 Powder Addition on Properties, Phase Composition and Microstructure of Al-Si Incorporated $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ Materials

LIU Zhi-fang, LIU Xin-hong, HUANG Ya-lei, MA Teng

(Henan Key Laboratory of High Temperature Functional Ceramics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The effects of nano- ZrO_2 powder addition on properties, phase composition and microstructure of Al-Si incorporated $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ materials have been investigated using tabular alumina aggregates and fines, Al powder, Si powder, graphite and nano- ZrO_2 powder as starting materials, resin as binder. The results show: there is almost no effect of nano- ZrO_2 powder addition on strength properties both at room temperature and high temperature; nano- ZrO_2 powder addition contributes to increase in density and oxidation resistance as well as noticeably increase in thermal shock resistance. The increase of density may be due to good filling effect and promoting sintering of nano- ZrO_2 powder. The noticeably increased thermal shock resistance may be attributed to the following reasons: Nano- ZrO_2 powder addition promotes Al, Si reacting with C, CO and N_2 in-situ formation of AlN and SiC whiskers, and the whiskers constitute network structure creating toughening effects. Besides, the nano powder possesses toughening effect and nano- ZrO_2 phase transformation creates toughening effect.

Key words: Al-Si incorporated $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ composite; nano- ZrO_2 powder; thermo-mechanical property; phase composition; microstructure

文章编号: 1671-6833(2015)05-0020-05

静电纺丝制备 PLA-PCL 核-壳结构复合纤维

司军辉^{1,2}, 崔志香², 刘 琼², 王乾廷²

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘 要: 采用同轴静电纺丝技术制备聚乳酸(PLA)-聚己内酯(PCL)核-壳结构复合纤维. 利用扫描电子显微镜(SEM)观察纺丝电压、收集距离和核层-壳层溶液推进速度对 PLA-PCL 核-壳结构复合纤维形貌的影响. 通过透射扫描电子显微镜(TEM)分析核层-壳层溶液推进速度对 PLA-PCL 核-壳结构形成的影响. 研究结果表明: 当核-壳溶液推进速度为 0.1-0.2 和 0.1-0.3 mL/h 时形成了清晰的核-壳结构; 随着壳层溶液推进速度加快, PLA-PCL 复合纤维核层含量降低, 增加纺丝电压能够有效地降低复合纤维平均直径, 而增大收集距离使复合纤维平均直径先降低后增加.

关键词: 同轴静电纺丝; 核-壳结构; 聚乳酸(PLA); 聚己内酯(PCL); 复合纤维

中图分类号: TQ342

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.005

0 引言

近年来, 由于静电纺丝技术制备的纳米纤维具有比表面积大、孔隙率高、内部连通性好等优异性能^[1], 所以在生物医学材料、复合改性材料、过滤和防护材料、传感器等领域得到广泛应用^[2]. 使用同轴静电纺丝技术制备具有核-壳结构复合纳米材料更是成为复合材料、纳米材料等领域研究的热点之一^[3]. 与其它制备复合纤维方法相比, 同轴静电纺丝技术制备的复合纤维具有更好的均匀性与连续性, 且加工过程操作较为简单, 具有一步成型的特点. 另外, 核-壳复合纤维可将核层材料和壳层材料各自优良的性能互相结合, 比如, 可以赋予核-壳结构复合纤维的核层优良的机械性能, 而壳层则赋予良好的感光性或生物相容性等^[4]. 亦可在核层载入一些活性物质, 使核-壳复合纤维具有催化、药物控制释放等功能^[5-6]. 因此, 目前在组织工程、药物控释等方面, 核-壳结构纤维的应用非常广泛^[7-9].

聚乳酸(PLA)和聚己内酯(PCL)是 FDA 认可的生物材料, 具有良好的生物相容性和降解性,

在体内可逐渐降解为对人体无毒, 无积累的二氧化碳和水^[10]. PLA 具有高强度的同时其柔韧性较差, 限制了其在强度和柔韧性要求较高领域的应用^[11]. 而 PCL 具有良好的伸展性, 因此采用同轴静电纺丝技术制备 PLA-PCL 核-壳复合纤维, 使其具有优良的综合性能. 通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)探讨核层-壳层溶液推进速度, 纺丝电压和收集距离对 PLA-PCL 核-壳结构复合纤维形貌结构的影响.

1 实验

1.1 材料与仪器

聚乳酸(PLA, 2002D, 美国 NatureWorks 公司); 聚己内酯(PCL, Capa 6500, Mn=50000, 粒料, Perstorp UK Limited); 三氯甲烷(分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司); N, N-二甲基甲酰胺(DMF, 分析纯, 广东光华科技股份有限公司); 静电纺丝设备(深圳市通力微纳科技有限公司); 包括双组分同轴喷丝头, 高压电源和两个微量注射泵(SN-50)等; 扫描电子显微镜(SEM, S-3400N); 透射电子显微镜(TEM, JEOL-

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51303027); 中国博士后科学基金 56 批面上一等资助项目(2014M560525); 福建省高校科研专项资助项目(JK2014030)

作者简介: 司军辉(1982—), 男, 河南项城人, 郑州大学博士生, 福建工程学院讲师, 主要从事高分子材料加工, E-mail: sijunhui2004@126.com.

通讯作者: 崔志香(1981—), 女, 河南项城人, 福建工程学院副教授, 博士, 主要从事高分子材料加工, E-mail: cuizhixiang2006@126.com.

2100)。

1.2 PLA-PCL 核-壳结构复合纤维制备

称取 1 g PLA, 2.2 g PCL 分别溶于 10 mL 三氯甲烷: DMF (9: 1, w/v) 混合溶剂中, 采用振荡器振荡 3 h, 得到浓度分别为 10%、22% (w/v) 的 PLA 和 PCL 核层、壳层均匀纺丝液备用。所制备 10% PLA 和 22% PCL 均匀溶液的黏度值采用 NDJ 数显黏度计(上海方瑞仪器有限公司)进行测量, 分别为 198 和 291 mPa · s。取一定量 PLA、PCL 纺丝液分别装于 10 mL 的注射器内, 将注射器分别安装于两个 SN-50 微量注射泵, 再用聚四氟乙烯软管(内径为 1.19 mm) 将 PLA 溶液连于内层针管(直径为 0.50 mm), PCL 溶液连于外层嵌套装置(直径为 1.10 mm), 如图 1 所示。实验过程中对同轴装置施加相同高压, 使 PLA 核层液流与 PCL 壳层液体在喷口处汇合而成同心分层流。由于核壳溶液皆不易扩散, 两者在喷口处汇合时间较短, 故不会导致核壳溶液混合, 在高压静电场的静电力牵引下, 复合液滴形成稳定的泰勒锥 (Taylor Cone), 进而受到拉伸和分裂使射流变得极细, 待溶剂挥发后凝固, 得到同轴复合纤维, 本实验以接地的铝箔纸为接收装置。为了研究电压、收集距离和核层-壳层溶液推进速度对复合纤维形态的影响, 电压分别取 15、20 和 25 kV, 收集距离分别取 15、20 和 25 cm, 核层-壳层溶液推进速度分别为 0.1-0.1、0.1-0.2、0.1-0.3 mL/h。纺丝温度控制在 25 °C。同轴静电纺丝工艺参数设计如表 1 所示。

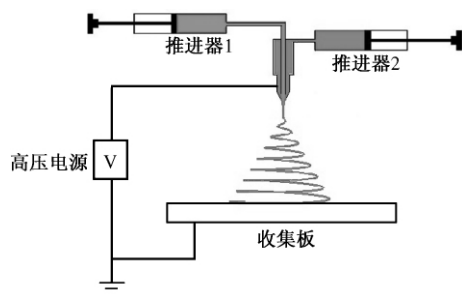


图 1 同轴静电纺丝装置图

Fig.1 Schematic of co-axial electrospinning setup

1.3 复合纤维形态表征

采用扫描电子显微镜 (SEM) 在 15 kV 电压下观察同轴复合纤维表面形态, 观察前将样品进行喷金处理 20 s。并采用 image-pro plus 软件对 SEM 照片进行处理, 测算出复合纤维直径, 根据所得数据计算其直径分布和平均直径。在纺丝过程中将少量的复合纤维直接喷射在铜网样板上,

采用透射电子显微镜 (TEM) 在 80 kV 电压下观察复合纤维的内部形态, 同时用 image-pro plus 分别测量核层、壳层直径。

表 1 同轴静电纺丝过程工艺参数

Tab.1 Processing parameters during co-axial electrospinning process

样品名称	纺丝电压 /kV	收集距离 /cm	核-壳推进速度 /(mL · h ⁻¹)
1	20	20	0.1-0.1
2	20	20	0.1-0.2
3	20	20	0.1-0.3
4	15	20	0.1-0.2
5	25	20	0.1-0.2
6	20	15	0.1-0.2
7	20	25	0.1-0.2

2 结果与分析

2.1 核层-壳层溶液推进速度对同轴静电纺 PLA-PCL 复合纤维形态影响

图 2 为不同核-壳溶液推进速度下 PLA-PCL 复合纤维 SEM 图和直径分布图。从 SEM 图中可以看出, 固定核层推进速度, 改变壳层推进速度进行同轴静电纺丝能够得到形貌均匀良好的复合纤维。从直径分布图可以看出, 随着壳层推进速度的增加, PLA-PCL 核-壳复合纤维的平均直径逐渐增加。壳层推进速度从 0.1 mL/h 增加到 0.2 mL/h 时, 复合纤维直径分布和平均直径变化不大, 这与增加溶液推进速度纤维直径将增加的理论并不相符。这是由于此时增加推进速度主要使同轴喷射流泰勒锥增大, 喷射流直线运动部分(稳定纺丝)变短, 而鞭动过程(非稳定纺丝)更为显著, 使纤维分化能力增加。而壳层推进速度从 0.2 mL/h 增加到 0.3 mL/h 时, 复合纤维平均直径显著增大。这是因为随着进一步增加推进速度, 单位时间内电场需要牵伸的溶液量明显增加, 单位体积上溶液射流受到的牵伸力减小, 纤维分化能力降低, 进而导致纤维直径增加。图 3 的 TEM 图反映了不同核-壳溶液推进速度对 PLA-PCL 复合纤维核-壳结构的影响。从图 3(a) 中可以看出当核-壳溶液推进速度为 0.1-0.1 mL/h 时没有形成均匀良好的核-壳结构, 这说明本研究中当核-壳溶液推进速度比为 1:1 时, 核层纺丝液流速较快, 从而突破壳层纺丝液的包覆, 出现表面粗糙, 直径不均匀的非核-壳纤维形态。当核-壳溶液推进速度为 0.1-0.2 和 0.1-0.3 mL/h 时, 从图 3(b)、

(c) 中可以看出复合纤维核-壳结构形成,且核层与壳层之间界限明显.说明在同轴静电纺丝过程中,核壳两层间并未发生混合,完整地保持了内部材料的表面形态.另外,由复合纤维内径与外径的比值,可以看出随着壳层溶液推进速度增加,核层含量降低.因此,内-外层纺丝溶液的推进速度(流速)对核-壳结构的形成及其组分含量都具有较大影响.

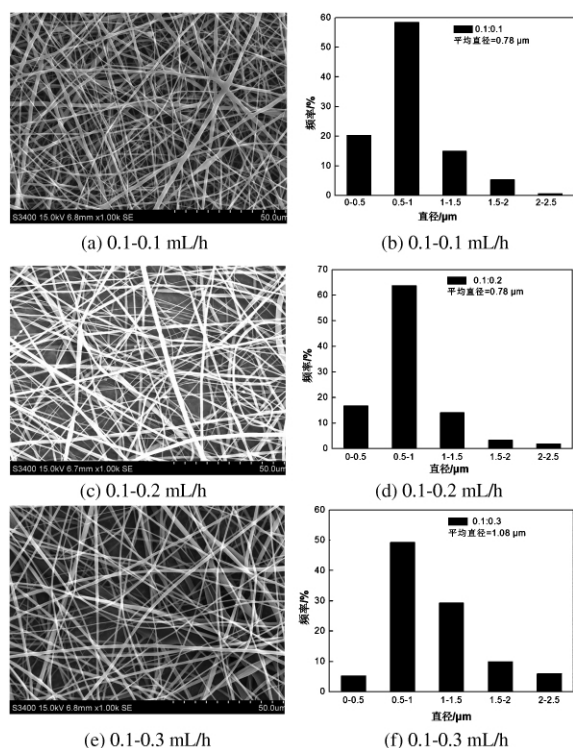


图2 不同核-壳溶液推进速度下
PLA-PCL 复合纤维 SEM

Fig. 2 SEM images and diameter distribution of
PLA-PCL composite fiber under different
core-shell solution infusion speeds.

2.2 电压对 PLA-PCL 复合纤维形态影响

电压作为静电纺丝过程的驱动力,在纺丝过程中起着重要作用.图4是核层-壳层推进速度为0.1-0.2 mL/h,收集距离为20 cm,纺丝电压

分别为15、20、25 kV下复合纤维SEM图和直径分布图.从图4中可以看出,在三种纺丝电压下都得到了表面形态良好的复合纳米纤维,但随着电压的增加,复合纳米纤维平均直径减小.这主要是因为随着纺丝电压的升高,电场强度增强,使得溶液射流的电荷密度变大,液体中电荷之间的相互排斥作用增强,纤维的分化能力提高,从而导致纤维直径减小.从图4中可以看出,随着电压逐渐升高,纤维平均直径变小的速率降低.当电压从15 kV升高至20 kV时,纤维平均直径从1.09 μm减小至0.78 μm;而当电压从20 kV升高至25 kV时,纤维平均直径从0.78 μm仅减小为0.75 μm.这主要是由于电压的增大有利于增强纤维的分化能力,使纤维直径降低,但当电压增大到一定程度后,其对纤维分化能力的影响降低,此时材料本身的结构性能和化学性能将对纤维直径大小起主导作用.因此电压在一定范围内增加,纤维平均直径迅速降低,之后电压继续增加,纤维直径减小较少.

2.3 收集距离对 PLA-PCL 复合纤维形态影响

图5是核层-壳层推进速度为0.1-0.2 mL/h,纺丝电压为20 kV,收集距离分别为15、20、25 cm下复合纤维SEM图和直径分布图.从图5可以看出,当收集距离为15 cm时,纤维表面出现部分黏结现象,而随着收集距离的增大,黏结现象逐渐消失.这主要是由于当收集距离较小的情况下,溶剂挥发时间较短,挥发不完全,收集得到的纳米纤维含有较高比例的未挥发溶剂,从而导致纤维之间的黏合现象.当收集距离从15 cm增大到20 cm时,纤维平均直径从0.8 μm降低至0.78 μm,而由电场强度公式(电场强度=电压/距离)可得,额定电压下,收集距离的增加等价于电场强度的减小,根据上述电压对纤维分化能力影响的分析可知,纤维直径应随着收集距离的增加(即电场强度的降低)而增大,但实验结果与此

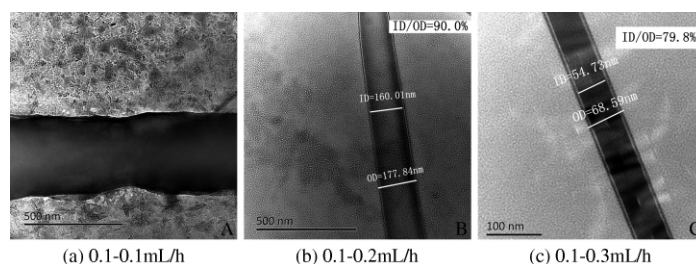


图3 不同核-壳溶液推进速度 PLA-PCL 复合纤维 TEM 图(纺丝电压为20 kV,
收集距离为20 cm, OD 为外径, ID 为内径)

Fig. 3 TEM images of PLA-PCL composite fiber (voltage 20 kV, collected distance 20 cm,
OD outer diameter, ID inner diameter)

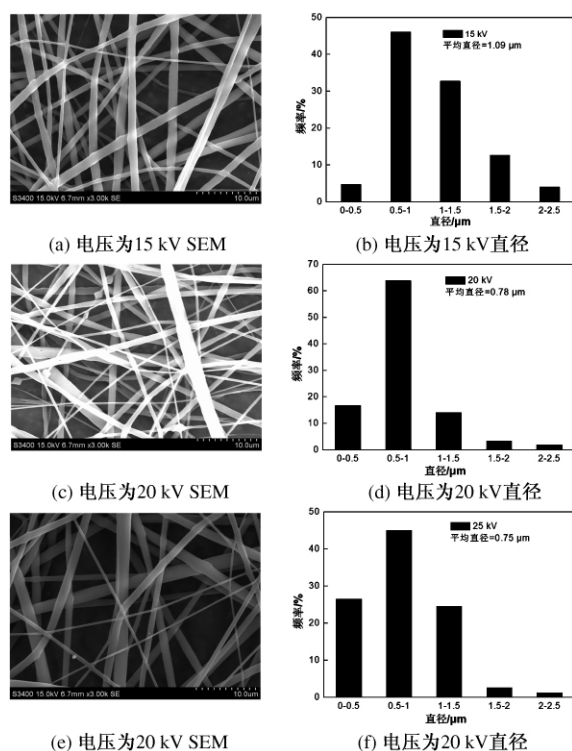


图4 不同纺丝电压 PLA-PCL 核-壳复合纤维 SEM 图和直径分布图

Fig. 4 SEM images and diameter distribution of PLA-PCL composite fiber under different electrospinning voltages

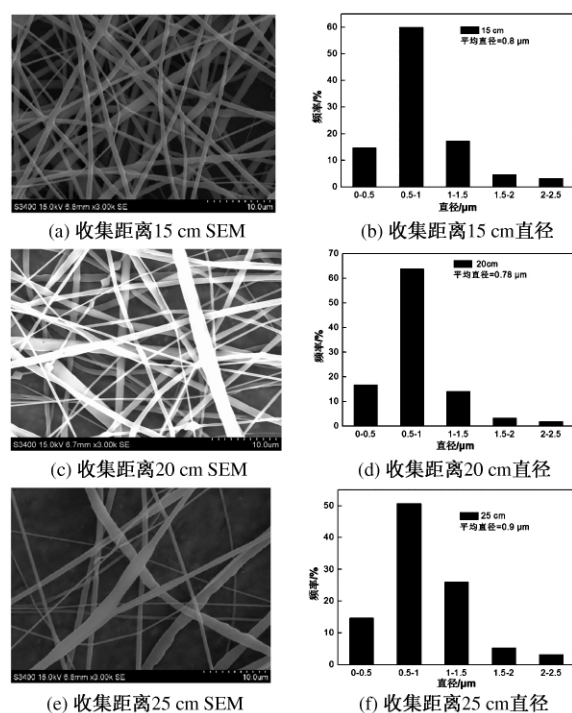


图5 不同收集距离 PLA-PCL 核-壳复合纤维 SEM 图和直径分布图

Fig. 5 SEM images and diameter distribution of PLA-PCL composite fiber under different collected distances

结论相反,这是因为收集距离增加,虽然导致电场强度降低,但溶剂在空气中的挥发路程变长,挥发时间更加充足,使纤维分化环境变优,分化时间增加,导致纤维直径减小,这时收集距离对纤维直径的影响起主导作用。随着收集距离逐渐升高纤维平均直径出现增大的趋势,这主要是因为当收集距离增大到一定程度后,溶剂完全挥发,纤维凝固定型,再增加分化时间(收集距离)对纤维直径影响降低,而此时收集距离的增加,导致电场强度降低,纤维分化能力降低,从而导致纤维平均直径增加,此时电场强度对纤维直径的影响起主导作用。因此,收集距离和纺丝电压对纤维形态的影响需要从影响纤维分化时间和分化能力的两因素综合考虑。

3 结论

通过同轴静电纺丝技术制备 PLA-PCL 核-壳复合纤维。研究核-壳溶液推进速度比、纺丝电压和收集距离对复合纤维表面形态和直径分布的影响。实验结果表明:核-壳溶液推进速度为 0.1-0.1 mL/h 时无核壳结构形成,为 0.1-0.2 和 0.1-0.3 mL/h 时形成了均匀良好的核-壳复合纤维。纺丝电压的增加能够有效的降低复合纤维平均直径。收集距离在一定程度内增加,会降低复合纤维平均直径,继续增加将会增加复合纤维平均直径。

参考文献:

- [1] WANG Xian-feng, DING Bin, LI Bing-yun. Biomimetic electrospun nanofibrous structures for tissue engineering [J]. Materials Today, 2013, 16(6): 229-241.
- [2] KO Y G, CHOI U S. Diverse applications of fibers surface-functionalized with nano- and microparticles [J]. Composites Science and Technology, 2013, (79): 77-86.
- [3] KAMATA K, LU Yu, XIA You-nan. Synthesis and characterization of monodispersed core-shell spherical colloids with movable cores [J]. Journal of the American Chemical Society, 2003, 125(9): 2384-2385.
- [4] CAO Hou-bao, DU Ping-fan, SONG Li-xin, et al. Co-electrospinning fabrication and photocatalytic performance of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ core/sheath nanofibers with tunable sheath thickness [J]. Materials Research Bulletin, 2013, 48(11): 4673-4678.
- [5] YU Deng-guang, CHIAN Wei, WANG Xia, et al.

- Linear drug release membrane prepared by a modified coaxial electrospinning process [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 428: 150 – 156.
- [6] QIAN Wei, YU Deng-guang, LI Ying, et al. Dual drug release electrospun core-shell nanofibers with tunable dose in the second phase [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2014, 15(1) : 774 – 786.
- [7] PANT H R, RISAL P, PARK C H, et al. Core-shell structured electrospun biomimetic composite nanofibers of calcium lactate/nylon – 6 for tissue engineering [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, (221) : 90 – 98.
- [8] MERKLE V, ZENG L K, TENG Wei-bing, et al. Gelatin shells strengthen polyvinyl alcohol core-shell nanofibers [J]. *Polymer*, 2013, 54 (21) : 6003 – 6007.
- [9] SOHRABI A, SHAIBANI P M, ETAYASH H, et al. Sustained drug release and antibacterial activity of ampicillin incorporated poly(methyl methacrylate)-nylon6 core/shell nanofibers [J]. *Polymer*, 2013, 54(11) : 2699 – 2705.
- [10] GUNATILLAKE P A, ADHIKARI R. Biodegradable synthetic polymers for tissue engineering [J]. *European Cells and Materials*, 2003, 5(1) : 1 – 16.
- [11] LJUNGBERG N, WESSLEN B. Tributyl citrate oligomers as plasticizers for poly(lactic acid) : Thermo – mechanical film properties and aging [J]. *Polymer*, 2003, 44(25) : 7679 – 7688.

Fabrication of PLA-PCL Composite Nanofiber with Core-shell Structure Through Electrospinning

SI Jun-hui^{1,2}, CUI Zhi-xiang², LIU Qiong², WANG Qian-ting²

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In this study, polylactic acid (PLA) – polycaprolactone (PCL) composite fiber with core-shell structure was fabricated by means of co-axial electrospinning. SEM was employed to study the impacts of electrospinning voltage, collected distance and ratio of core-shell solution injection speed on morphology of PLA-PCL composite fiber with core-shell structure. The influences on the formation of the core-shell structure under different ratio of core-shell solution injection speed were observed with TEM. The results showed that the obvious core-shell structure was fabricated when core-shell solution injection speed was 0.1-0.2 and 0.1-0.3 mL/h. The core component in PLA-PCL composite fiber decreases with the increase of shell solution injection speed. The increasing of electrospinning voltage could efficiently reduce the average diameter of composite fiber. The average diameter of composite nanofiber decreases and then increases with the increase of collection distance.

Key words: co-axial electrospinning; core-shell structure; polylactic acid (PLA) ; polycaprolactone (PCL) ; composite fiber

文章编号: 1671-6833(2015)05-0025-05

NaAlCl₄/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

(华东交通大学 理学院, 江西 南昌 330013)

摘 要: 使用浸渍法将复盐 NaAlCl₄ 负载在 ZSM-5 表面, 对比使用不同硅铝比的 ZSM-5 分子筛作为载体, 同时变化温度, 综合研究不同催化剂对歧化生成二甲基二氯硅烷的影响. 通过 X 射线衍射仪 (XRD)、气相色谱仪 (GC)、电子扫描电镜 (SEM)、比表面测试 (BET)、NH₃ 吸附-脱附 (NH₃-TPD) 等对其进行表征. 结果表明: 低温时反应为表面控制, 高温时为活化控制. 当温度为 373 K, 负载比例为 4%, 硅铝比为 38 时, 催化剂活性达到最佳, 产率为 57.9%.

关键词: ZSM-5 分子筛; 二甲基二氯硅烷; 歧化催化

中图分类号: TQ032.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.006

0 引言

有机硅作为一种新型高科技材料, 被广泛应用于电子、电器、航空、航天、建筑、纺织、医药、等领域, 成为国民经济发展和人民生活水平提高不可或缺的新材料. 有机氯硅烷单体是整个有机硅化学的支柱, 其中绝大多数材料都含有由二甲基二氯硅烷所制得的聚硅氧烷, 如果引入其他基团、如苯基、乙烯基、氯苯基以及氟烷基等, 可衍生出一系列性能各异的有机硅聚合物^[1].

有机硅行业自上世纪八十年代起至今一直快速发展, 有机硅高聚物产品种类繁多, 但是其合成使用单体中最重要的是二甲基二氯硅烷, 简称二甲. 二甲是有机硅工业的基础和支柱^[2-4], 主要合成方法有: 直接合成法^[5]、缩合法、格氏试剂法和歧化法^[6]. 而工业上生产制备二甲基二氯硅烷时, 分离困难^[7], 伴随着大量副产物如有机硅高沸物以及低沸物. 由于国内技术水平较低且产品市场局限性, 因此市场需求量不能消耗每年过量的一甲^[8]. 前期研究表明: NaAlCl₄/ZSM-5 分子筛有较好的催化活性^[9], 进行了掺杂稀土元素的实验, 但并未对该复盐的制备和不同硅铝比的载体进行探索. 另外, 固体催化剂具有环境友好、反应条件温和、选择性高等特点而备受关注^[10]. 笔者

尝试使用歧化催化一甲生成经济价值较高的二甲, 不但解决了环境问题, 同时增加了经济效益. 为了找到效果更好的催化剂, 笔者将此二者组合, 分别考察了 NaAlCl₄/ZSM-5 复盐催化剂在不同 Si/Al 比、不同 NaCl 负载量及在不同温度下的催化活性.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

DHG202-00 型电热鼓风恒温干燥箱 (上海光地仪器设备有限公司)、D8ADVANCE 型 (XRD) (德国 Bruker 公司)、GC2000 型气相色谱仪 (山东滕海)、N2000 型色谱信号处理器 (浙江大学)、FUR-1100-W 型不锈钢单段式高温炉 (浙江泛泰)、SV-A-40A 型箱式电阻炉 (上海雷韵试验仪器制造有限公司)、FEI Quanta 200 型电子扫描电镜 (SEM) (荷兰 FEI 公司)、吸附分析仪 (BET) (贝士德仪器科技有限公司 3H-2000PS2)、Finesorb3010 型化学吸附仪 (浙江泛泰仪器公司).

无水 AlCl₃、NaCl、CeCl₃·7H₂O、LaCl₃·7H₂O、二甲苯均为分析纯; ZSM-5 购于南开大学催化剂厂; 一甲和三甲购于江西星火化工厂.

收稿日期: 2015-05-17; 修订日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21163005); 江西省自然科学基金资助项目 (20132BAB203013)

作者简介: 徐文媛 (1970—), 女, 江西南昌人, 华东交通大学教授, 博士, 主要从事工业催化, 量子化学研究, E-mail: xwyktz@163.com.

1.2 催化剂制备

不同负载比例 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂制备: 选用 Si/Al 为 38 的 ZSM-5 分子筛作为载体, 制备催化剂. 取一定量的 ZSM-5 分子筛, 浸渍在 NaCl 溶液中, 之后 150 °C 将其烘干, 所负载 NaCl 的质量分数分别为 1%, 2%, 4%, 5%. 按 Na/Al 质量比为 1:2 的标准, 取无水氯化铝与负载后的 ZSM-5 混合, 装入自制聚四氟乙烯棒中密封. 在 220 °C 条件下, 放入马弗炉煅烧 16 h 后, 冷却得到不同负载比例的催化剂分别记为 Cat-1%、Cat-2%、Cat-4%、Cat-5%.

不同 Si/Al 的 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂制备: 按照载体质量分数 4% 的负载比例, 配置 NaCl 溶液, 取 Si/Al = 38、50、80 的 ZSM-5 分子筛浸渍在其中, 在 150 °C 烘干后与无水 AlCl_3 混合, 放入自制的聚四氟乙烯棒中. 并置于马弗炉中升温至 220 °C, 使载体在 AlCl_3 蒸汽下负载 16 h, 冷却后即得到催化剂. 其中 $m(\text{ZSM-5}) : m(\text{NaCl}) = 25 : 1$, $n(\text{NaCl}) : n(\text{AlCl}_3) = 1 : 2$. 样品分别标记为 Cat-38、Cat-50、Cat-80. 图 1 为催化剂的制备流程示意图.



图 1 催化剂制备流程

Fig. 1 The preparation routes of catalysts

1.3 歧化反应过程

歧化法又称再分配法, 是指将不同的硅烷放入一定的催化剂条件下取代基进行再分配, 生成新的有机卤硅烷的方法. 歧化法又可分为低压歧化法(反应压力小于 3 MPa) 和高压歧化法(反应压力一般在 3 ~ 10 MPa 之间). 相关反应方程式如下所示:



笔者采用 Si/Al = 38 的 ZSM-5 分子筛作为载体, 负载 4% 的 NaCl, 制成 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 复盐催化剂, 取 0.7 g, 加入歧化制备二甲的反应装置中, 进行反应. 使用脉冲进样, 反应样品为一甲和三甲混合物(物质的量比例为 1:1), 反应物在汽化室汽化后, 在载气 H_2 的带动下, 进入催化剂所在的反应釜中, 控制反应釜的温度为 375 K, 催化歧化反应后的产物随着载气通过 OV-210 柱子分离, 并使用检测器检测其催化活性, 对负载比例不同的催化剂的催化活性分别进行考察. 生成目标产

物二甲, 产率为 57.9%.

1.4 歧化产物的检测

歧化产物检测: 将反应仪器与气相色谱连接起来, 利用气相色谱的进样室汽化反应物后进入反应釜中, 反应后的产物随着载体的带动进入色谱进行检测分析, 对气相色谱的参数设置如下: 不锈钢管色谱柱, 长 3 m, 外径 4 mm, 内径 3 mm; 固定液 OV-210; 担体 chromosorb P-AW; TCD 检测器, 柱温: 60 °C, 进样器温: 100 °C, 检测器温度: 120 °C, 载气: H_2 , 载气流速: 40 mL/min, 桥电流: 120 mA, 进样量为 3 ~ 5 μL .

1.5 催化剂的表征

通过采用荷兰 FEI 公司的 FEI Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM) 对样品的晶体结构和组成成分进行表征.

采用贝士德仪器科技(北京) 有限公司的 3H-2000PS2 型吸附分析仪对样品孔结构进行测定. 实验操作条件: 样品于 250 °C 真空脱气处理 5 h, 以高纯 N_2 做吸附质, 在 77 K 温度下进行吸附, 样品孔径分布由 BJH 法和 T-Plot 法对脱附等温曲线处理计算所得, 使用 BET 法计算可以得到比表面积.

采用浙江泛泰仪器公司 Finesorb3010 化学吸附仪对样品酸性进行定量的测定. 实验操作条件: TCD 检测器, 检测器温 60 °C, 桥电流 80 mA, 催化剂在 450 °C 下流速为 20 mL/min $\text{C}_2\text{-He}$ 气吹扫预处理 185 min 后换 NH_3 吸附 30 min, 吸附饱和后 $\text{C}_2\text{-He}$ 吹扫 30 min 吹走表面残留 NH_3 , 以 10 °C/min 的升温速率进行程序升温至 600 °C 脱附 88 min.

2 分析与讨论

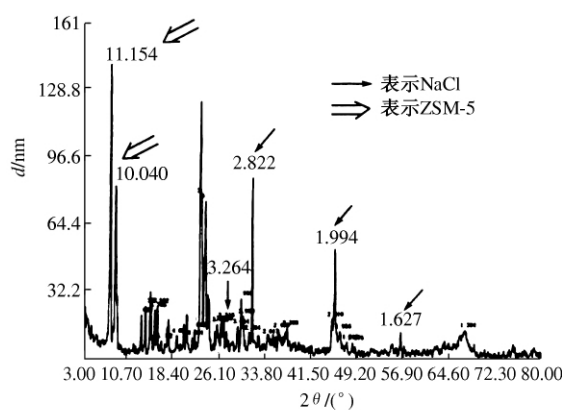
2.1 X 射线衍射仪(XRD)

图 2 为分子筛的 XRD 谱图. 比较图中的(a) 和(b), 发现 NaCl 的衍射峰的积分强度均有所下降, 并产生了新峰, 说明 NaCl 与 AlCl_3 作用, 致使 NaCl 被消耗, 并生成了复盐 NaAlCl_4 [10].

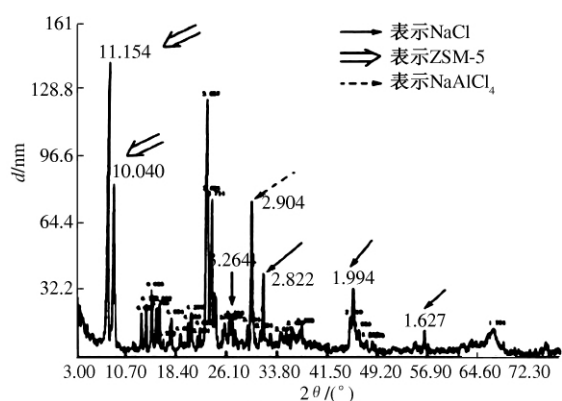
2.2 电子扫描电镜(SEM)

图 3 为扫描电镜图. 图中(b) 是以(a) 作为载体所进行的负载. 可以看出表面有一些成微小并且凸起的、分散较好的、成小粒状的块状物质, 呈均匀紧密排列状, 即为 NaCl. (c) 是以(b) 作为载体所进行的 AlCl_3 负载. 看出其表面有成块状的固体凸出, 这是因为形成了复盐 NaAlCl_4 . 不仅增加了催化剂的有效比表面积, 也释放出更多的活

性位点,进而增加了催化剂的效率.



(a) $\text{NaCl}/\text{ZSM-5}$



(a) $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$

图 2 $\text{NaCl}/\text{ZSM-5}$ 分子筛和 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 分子筛的 XRD 谱图^[11]

Fig. 2 XRD patterns of $\text{NaCl}/\text{ZSM-5}$ zeolite and $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ zeolite^[11]

2.3 NaAlCl_4 负载量的影响

据表 1 可知,负载不同比例的 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM}$

催化性能. 纵观所有温度范围, $\text{Cat-4\%} > \text{Cat-2\%} > \text{Cat-1\%}$ (Cat-5\%). 这是因为活性组分越多发生歧化反应位点越多,从而活性增大. 而 Cat-5\% 的活性不佳,可能是因为活性组分太多堵塞了孔道,反而导致反应活性面下降所致. 其中, Cat-4\% 、 Cat-2\% 、 Cat-1\% 的变化趋势类同,随温度升高先下降后上升;而 Cat-5\% 随温度的升高,二甲含量先上升后下降,从酸量和活性双重角度考虑,选择最佳温度为 373 K. 在 373 K 时,催化活性顺序为 $\text{Cat-4\%} > \text{Cat-2\%} > \text{Cat-1\%} > \text{Cat-5\%}$. 其中,负载比例为 4% 时,二甲产率最好,达到 57.9%. 目标产物产率与反应物转化率也是成正比的,符合实验结果.

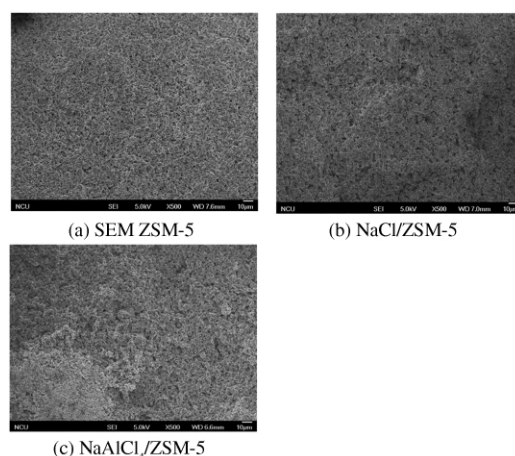


图 3 ZSM-5 、 $\text{NaCl}/\text{ZSM-5}$ 和 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 的扫描电镜图

Fig. 3 SEM figures of ZSM-5 、 $\text{NaCl}/\text{ZSM-5}$ and $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$

表 1 不同 NaAlCl_4 负载量在不同温度下二甲产率和反应物转化率

Tab. 1 The yields of of catalysts with different NaAlCl_4 at different temperatures

%

实验组	373 K			423 K			473 K		
	二甲	一甲	三甲	二甲	一甲	三甲	二甲	一甲	三甲
Cat-1%	45.20	47.71	48.34	37.29	39.53	41.21	36.53	38.73	40.43
Cat-2%	53.76	54.21	57.91	45.12	48.80	48.12	43.38	45.19	48.32
Cat-4%	57.90	59.79	61.02	56.21	58.37	60.31	52.16	55.08	54.94
Cat-5%	31.28	34.68	35.57	29.89	31.38	33.63	42.98	44.97	46.15

注: 该节反应其它条件 $\text{Si}/\text{Al} = 38$; $n(\text{一甲}) : n(\text{三甲}) = 1 : 1$.

2.4 Si/Al 比的影响

在载气带动下反应物(每次进样 3~5 μL)通过脉冲进样在汽化室汽化后,进入反应釜中在特定温度下进行催化歧化反应,最终产物经过色谱柱分析,再通过 TCD 检测器,测得产物及其相应含量. 制备了硅铝比分别为 38, 50 和 80 的样品,各样品在不同温度的活性如表 2 所示.

在温度为 373 K 时, Cat-38 活性最佳, Cat-50 次之. 而 Cat-80 在 473 K 时效果最好,其随温度变化活性变化不大,与 373 K 二甲产率的差距小于 3%. 在低温时,催化剂的活性大小为 $\text{Cat-38} > \text{Cat-50} > \text{Cat-80}$,在高温时催化剂的活性大小为 $\text{Cat-38} > \text{Cat-80} > \text{Cat-50}$. 从节能和活性双重角度考虑,效果最好的 Si/Al 为 38,反应温度为 373 K.

表 2 不同硅铝比催化剂在不同温度下二甲产率和反应物转化率

Tab. 2 The yields of catalysts with different Si/Al at different temperature

%

实验组	373 K			423 K			473 K		
	二甲	一甲	三甲	二甲	一甲	三甲	二甲	一甲	三甲
Cat-38	57.90	59.28	61.45	56.73	59.63	59.96	50.09	56.93	59.16
Cat-50	51.26	54.08	56.03	48.21	51.88	52.36	37.24	39.77	39.73
Cat-80	42.32	44.60	45.88	44.76	48.96	50.91	45.09	47.14	49.04

注: 该节反应其它条件 NaCl 负载量为 4%; $n(\text{一甲}):n(\text{三甲}) = 1:1$.

表 2 中看出目标产物的收率与起始反应物转化率是成正比的, 也进一步证实实验结果的可靠性.

2.5 BET 测试结果

由表 3 可知, 不同硅铝比的 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂的比表面大小为: $\text{Cat-38} > \text{Cat-50} > \text{Cat-80}$, 较大的比表面积可以增加反应物与催化剂的接触面积, 这与三者在低温时的二甲产率, 也就是催化活性呈正相关. 这很可能是在低温时属于表面控制, 因此比表面越大活性越好. 而在高温时, Cat-80 活性高于 Cat-50 , 可能是酸性位起到主要控制作用. 于是下文做了 $\text{NH}_3\text{-TPD}$, 以进一步探明影响因素. 表中, 还可看出 Cat-80 的平均孔体积远远大于其它两组, 较大的孔体积更有利于在高温时为反应提供足够的空间, 这也是影响活性的因素之一.

表 3 不同硅铝比的 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂的

表面结构性质 BET 和孔径大小的数据分布

Tab. 3 Surface area and pore distributions of Catalyst $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ with different Si/Al

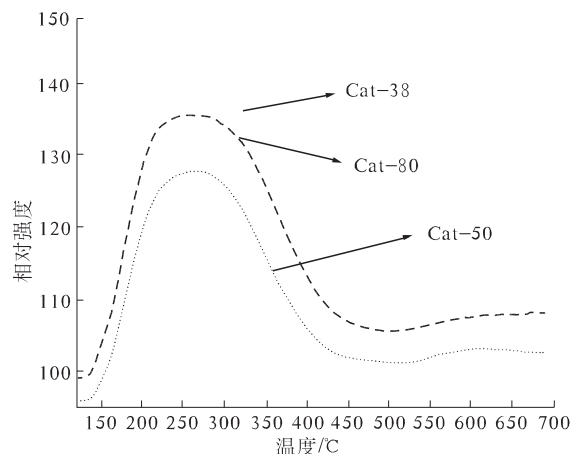
实验组	比表面测试	孔径测试	
	表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm
Cat-38	277.146 3	0.115 85	0.52
Cat-50	262.407 6	0.100 02	0.51
Cat-80	179.490 3	0.651 10	0.52

2.6 $\text{NH}_3\text{-TPD}$ 测试结果

不同硅铝比 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂的 $\text{NH}_3\text{-TPD}$ 如图 4, 载体的总酸量影响催化剂的活性, 较高的总酸量使催化剂具有较高的活性^[12].

对 Cat-38 、 Cat-80 和 Cat-50 脱附曲线进行积分所得面积分别为 69 768. 295, 64 118. 35, 61 008. 66. 在氨气程序升温脱附过程中, 脱附面积越大表示其酸性越大, 因此可知, 不同硅铝比催化剂的酸性排列顺序为: $\text{Cat-38} > \text{Cat-50} > \text{Cat-80}$. 根据 BET 和 $\text{NH}_3\text{-TPD}$ 的结果, 便可解释表 2 的数据. 在低温时属于表面控制, 因此比表面越大活性越好; 而在高温阶段, 反应变为活性控

制, 酸性越强, 活性越高.

图 4 不同硅铝比 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂的 $\text{NH}_3\text{-TPD}$ Fig. 4 The $\text{NH}_3\text{-TPD}$ of $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ catalysts with different Si/Al ratios

3 结论

(1) 用浸渍法将复盐 NaAlCl_4 负载在 ZSM-5 表面, 改变其负载比, 硅铝比制成一系列 $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 催化剂, 对其表征并进行活性分析. 随着负载比例的改变, 结果表明活性顺序为 $\text{Cat-4\%} > \text{Cat-2\%} > \text{Cat-1\%}$ (Cat-5\%). 其中, Cat-4\% 在 373 K 时, 二甲产率最大, 可以达到 57.9%.

(2) 将制备好的催化剂用于歧化反应, 结果表明在低温时属于表面控制, 而在高温时为活化控制. 低温时催化剂活性顺序为 $\text{Cat-38} > \text{Cat-50} > \text{Cat-80}$, 高温时催化活性顺序为 $\text{Cat-38} > \text{Cat-80} > \text{Cat-50}$.

综合来看, 当温度为 373 K, 负载比例为 4%, 硅铝比为 38 时, 二甲产率最好, 达到 57.9%.

参考文献:

- [1] 杨雄发, 伍川, 董红, 等. LED 封装用有机硅材料的研究进展 [J]. 有机硅材料, 2009, 23(1): 47-50.
- [2] WANG Chao, LIU Tong, HUANG Yun-long, et al. Promoter effects of Zn and Sn in the direct synthesis of methylchlorosilanes [J]. Industrial & Engineering

- Chemistry Research, 2013, 52(15): 5282 – 5286.
- [3] TIAN Lu-lu, WANG Jia-jun, GU Xue-ping, et al. Advances in synthetic technology of organosilicon monomer [J]. Modern Chemical Industry, 2004, 24(12): 23 – 26.
- [4] GOERL U D, HUNSCHE A, MUELLER A, et al. Investigations into the silane reaction system [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1997, 70(4): 608 – 623.
- [5] 刘奇英, 苗刚, 黄颜峰. 浅谈甲基氯硅烷生产中的节能措施 [J]. 有机硅材料, 2015, 29(1): 52 – 56.
- [6] FLEDNER K, GRAPE W. Process for the preparation of dimethyldichlorosilane [P]. US: 4552973, 1985.
- [7] 孙建阳, 孔令启, 张传国. 国内甲基氯硅烷分离技术现状及改进方法 [J]. 有机硅材料, 2015, 29(1): 47 – 51.
- [8] 付琼. 改性 MCM-41 催化剂甲基三氯硅烷制备二甲基二氯硅烷的研究 [D]. 南昌: 南昌大学化学学院, 2012.
- [9] 徐文媛, 郝伟, 钟昀, 等. $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ 分子筛催化剂的改性研究——对有机硅单体一甲和三甲歧化反应的影响 [J]. 浙江大学学报: 理学版, 2010, 37(1): 72 – 75.
- [10] 孙培勤, 赵世强, 常春, 等. 固体酸 USY 催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的实验研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(3): 21 – 26.
- [11] 徐文媛, 刘显亮, 陈丽萍, 等. M1 和 M3 的歧化反应—ZSM-5 系列催化剂效果对比及其理论解释 [J]. 浙江大学学报: 理学版, 2009, 36(1): 74 – 79.
- [12] 陈宜俊, 朱阳阳, 徐军, 等. 分子筛的酸性对正十二烷烃临氢异构化的影响 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(5): 121 – 124.

Study on the $\text{NaAlCl}_4/\text{ZSM-5}$ Catalysts by Redistributing Methyltrichlorosilane

XU Wen-yuan, WANG Li-wei, WAN Huan-huan, FANG Zhi-li

(College of Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: ZSM-5 zeolite with different Si/Al ratios was selected as catalyst carrier and the salt of the NaAlCl_4 as the surface load. The catalytic performance with different Si/Al ratios at different temperatures was compared to investigate the effects of Si/Al ratio. Commonly used, the catalysts were characterized by X-ray diffraction (XRD), GC, scanning electron microscope (SEM), BET and NH_3 -TPD and so on. The catalyst which Si/Al ratio was 38 had the greatest acidity and was the most active one. The results showed that the catalytic activity depended on the surface area at low temperature, while at high temperature depended on the activation sites. When Si/Al ratio was 38, at 373 K, Cat-4% showed the best catalytic effect, of which yield of dichlorodimethylsilane was 57.9%.

Key words: ZSM-5 zeolite; dichlorodimethylsilane; catalytic redistribution

文章编号: 1671-6833(2015)05-0030-05

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

(长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

摘 要: 微表处中沥青乳化剂的相关性能对改性乳化沥青及稀浆混合料性能至关重要. 笔者利用油酸、多胺、有机氯酸以及氯醇等为原料合成了两性沥青乳化剂, 分析了乳化剂的红外光谱、表面张力、亲水亲油平衡值(HLB 值); 测试了 5% SBS 掺量改性乳化沥青的性质和稀浆混合料的技术指标. 结果显示: 乳化剂的临界胶束浓度为 2.63×10^{-5} mol/L, 此时表面张力 46.11 mN/m; 乳化剂 HLB 值为 12.7; 当乳化剂用量为 1.5% 时, 改性乳化沥青蒸发残留物的 25 °C 针入度为 6.2 mm, 软化点为 78.5 °C, 5 °C 延度为 35 cm; 微表处混合料 60 min 凝聚力值达到 $2.4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 为中度成型, 浸水 1 h 和浸水 6 h 湿轮磨耗值均满足规范要求.

关键词: 沥青乳化剂; 微表处; 改性乳化沥青; 油酸

中图分类号: U418.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.007

0 引言

微表处是采用专用机械设备将聚合物改性乳化沥青、粗细集料、填料、水和添加剂等按照设计配比拌和成稀浆混合料摊铺在原路面上, 并且很快开放交通的具有高抗滑和耐久性能的薄层罩面^[1]. 微表处要求的改性乳化沥青中使用的沥青乳化剂对微表处的性能影响至关重要. 微表处专用沥青乳化剂主要有烷基多胺类, 其乳化性能良好且对集料的黏附性好. 该类型乳化剂在国外应用相当广泛, 如美国 Westvaco 公司生产的 MQK 乳化剂^[2] 以及瑞典 AKZO-NOBEL 公司生产的微表处专用乳化剂^[3]. 张倩等^[4] 合成了聚氧乙烯型慢裂快凝型阳离子沥青乳化剂, 但并未针对微表处要求的改性乳化沥青进行研究. 现在国内微表处大多采用 SBR 胶乳改性, 而 SBS 改性乳化沥青应用尚不成熟, SBS 改性沥青的乳化效果亦不甚理想, 乳化条件苛刻. 针对这一问题 SBS 改性微表处专用沥青乳化剂的研制就显得尤为重要.

两性表面活性剂同时具有阳离子基团和阴离子基团, 性能温和且易于降解. 作为沥青乳化剂使用时, 乳化性能优良, 且阴离子亲水基的引入使乳

化剂在较宽范围和较大离子强度时能保持乳液的稳定性^[5], 更适合拌合型乳化沥青的制备.

笔者以油酸、多胺、有机氯酸以及氯醇等为原料合成了微表处专用沥青乳化剂, 经红外光谱、表面张力以及亲水亲油平衡值测试, 表明乳化剂自身性能优异. SBS 改性乳化沥青各项性能指标以及微表处混合料试验数据均满足微表处规范要求.

1 试验部分

1.1 原材料和仪器

试剂: 油酸(工业品); 多胺、有机氯酸、氯醇等均为分析纯; SK90#沥青(指标参见表 1).

仪器: 红外光谱测定使用德国 Bruker 公司 Tensor27 型红外光谱仪, KBr 压片法; 表面张力测定使用德国 Dataphysics 公司 DCAT21 型表面张力仪, 吊环法; 改性乳化沥青制备使用布鲁克 FA25 高剪切分散乳化机; 混合料黏聚力使用黏聚力试验仪测定.

1.2 合成方法

在装有恒温磁力搅拌器、冷凝循环水的 250 mL 三口烧瓶中加入多胺化合物适量, 保持温

收稿日期: 2015-05-01; 修订日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51202016); 国家留学基金资助项目(201206565034); 陕西省博士后项目; 长安大学大学生创新创业训练计划项目(201310710151); 中央高校基本科研业务费专项资金(0009-2014G1311086、CHD2013G3312019); 长安大学科技创新重点项目资助

作者简介: 高莉宁(1978—), 女, 陕西铜川人, 长安大学教授, 硕导, 主要从事材料化学研究, E-mail: lngao@chd.edu.cn.

度 80 ℃,搅拌并缓慢滴加油酸,滴加完毕后,通入氮气作为保护气体,将反应物升温至 160 ℃ 并使其反应一定时间.待反应完成后降温至 60 ℃,加入乙醇 15 g 以及 50% 的有机氯酸水溶液,保温使其反应 90 min,再滴加适量氯醇反应 1 h. 所得乳化剂待用.

表 1 90#基质沥青基本指标
Tab.1 90#asphalt basic indicators

项目	试验方法	1-4 区指标要求	试验结果
软化点/℃	T 0606	≥45	46.7
针入度/ 10 ⁻¹ mm	T 0604	80 ~ 100	82.1
延度 (15℃)/cm	T 0605	≥100	> 100
密度/ (g·cm ⁻³)	T 0603	实测	1.036
溶解度/%	T 0607	≥99.5	99.7
项目	旋转薄膜烘箱后残留物		
质量损失/%	T 0610	≤ ±0.8	0.036
针入度比/%	T 0604	≥57	57.79
延度(10℃)/cm	T 0605	≥8	9.43

1.3 乳化剂表面活性的测定

乳化剂的纯化:合成的产物用无水乙醇进行重结晶 3 次、干燥后得到纯品,测定 25 ℃ 下不同浓度乳化剂水溶液的表面张力 σ ,作图求得临界胶束浓度,以及溶液在临界胶束浓度下的表面张力 σ_c .

1.4 乳化沥青的制备及性能测试

1.4.1 SBS 乳化改性沥青的制备

称取乳化剂和适量稳定剂,加入 200 g 水中,加热至 65 ℃.取 SBS 含量为 5% 的改性沥青 300 g 加热到 165 ℃^[6].开启乳化剪切机,剪切皂液均匀后,缓慢加入改性沥青,乳化 5 ~ 10 min,将乳化好的乳化沥青装到烧杯中备用.其中,乳化剂分别取 1.2%、1.5% 和 1.8% 进行 3 组试验.

1.4.2 改性乳化沥青以及其蒸发残留物性质测试

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规范(JTJ052—2000)》^[7]分别测试了乳化沥青筛上剩余量(1.18 mm 筛)、标准黏度、蒸发残留物含量、贮存稳定性,以及蒸发残留物的 25 ℃ 针入度、软化点和 5 ℃ 延度.

1.4.3 微表处混合料拌和及破乳时间试验

微表处的矿料级配采用《微表处和稀浆封层技术指南》^[8]中的 MS-2 级配类型,油石比(沥青

占矿料的质量百分比)为 6.5% ~ 9%.称取 100 g MS-2 型级配的矿料倒入拌合杯中,加入适量固化添加剂、水拌匀,然后倒入 15 g 改性乳化沥青,搅拌并开始计时,记录可拌合时间.

同样采用上述混合料,拌合均匀,时间不超过 30 s,取出稀浆混合料立即倒入 10 mm 厚的油毛毡试模上,保持合适的环境温度,每隔 5 min 用白纸巾轻轻按压混合料表面,至无褐色斑点出现,即可认为乳化沥青已经破乳.

1.4.4 微表处混合料黏聚力试验

取 300 g 级配矿料,制备微表处混合料试件.试件在温度 25 ℃ 的环境中成型 30 min,放置到黏聚力试验仪的测试台上.分别测试 30、45、60、75 和 90 min 的黏聚力值,观察试样测试后的破坏状态.

1.4.5 微表处混合料湿轮磨耗试验

取 800 g 级配矿料,制备微表处混合料试件.将试件放入 60 ℃ 烘箱中烘 16 h 取出,称取其总质量 m_a .分别测定油石比为 7%、7.5%、8%、8.5% 时浸水 1 h 和浸水 6 h 湿轮磨耗试验后烘至衡重的总质量 m_b ,计算磨耗值.

2 结果与分析

2.1 乳化剂结构分析

图 1 为合成乳化剂的红外光谱图.可以看出,3 423 cm⁻¹为羟基的 O—H 伸缩振动,2 923 cm⁻¹为亚甲基的非对称伸缩振动峰,2 854 cm⁻¹为亚甲基的对称伸缩振动峰,1 647 cm⁻¹为酰胺基 CO—NH 的伸缩振动峰,1 612 cm⁻¹为羧酸盐中羰基 C=O 的伸缩振动峰,1 461 cm⁻¹为甲基和亚甲基的弯曲振动峰,1 394 cm⁻¹为羧酸盐 COO⁻的不对称伸缩振动峰,1 132 cm⁻¹为 C—N 键的伸缩振动峰,1 080 cm⁻¹为 C—OH 的伸缩振

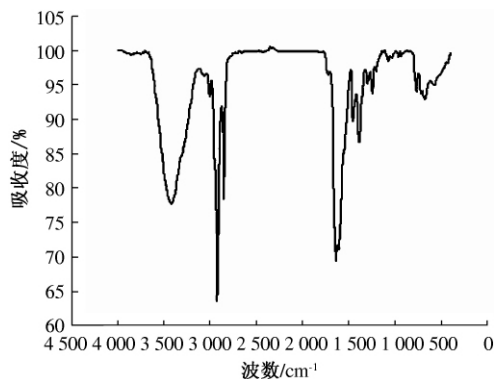


图 1 合成乳化剂的红外光谱图

Fig.1 IR spectra of emulsifier

动峰, 722 cm^{-1} 为亚甲基的面内摇摆振动峰. 因此, 在该乳化剂中除了长碳链之外, 还含有酰胺基和羧基, 为典型的两性表面活性剂.

2.2 乳化剂的表面活性

通过测定乳化剂在不同浓度水溶液中的表面张力 σ , 作出浓度对数值与表面张力的变化关系图(图2). 由图可知, 随着乳化剂浓度的增加, 两相界面吸附增大, 表面张力逐渐降低, 到达临界胶束浓度时, 界面吸附达到饱和, 此后表面张力基本不发生变化^[9], 乳化剂的 CMC 为 $2.63 \times 10^{-5}\text{ mol/L}$, 溶液在 CMC 下的表面张力 σ_c 为 46.11 mN/m .

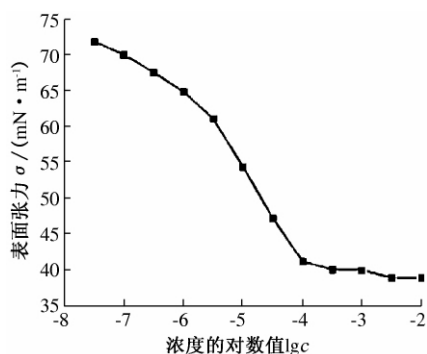


图2 乳化剂的表面张力 σ 与浓度 c 对数值关系曲线

Fig.2 Surface tension and concentration curve emulsifier

2.3 乳化剂亲水亲油平衡值 HLB 的计算

HLB 值可以用来判断乳化剂亲水亲油性大小. HLB 值越小, 在水中的溶解性越差, 说明乳化剂的亲水性越差, 亲油性越强. 沥青乳化剂的 HLB 值一般在 $8 \sim 18$ 之间^[10].

利用小田法可计算乳化剂 HLB 值的大小^[10]: 一个甲基 ($-\text{CH}_3$) 或亚甲基 ($-\text{CH}_2-$) 的有机性值为 20. 酰胺基 ($-\text{CONH}-$) 无机性值 200, 胺基 ($-\text{NR}_2$)、($-\text{NHR}$) 无机性值 70, ($-\text{COOH}$) 无机性值 150, ($-\text{OH}$) 无机性值 100, 双键无机性值 2. 因此计算得, Σ 有机性基的值 = 520; Σ 无机性基的值 = 662.

$$\text{HLB 值} = \frac{\Sigma \text{无机性基的值}}{\Sigma \text{有机性基的值}} \times K = \frac{662}{520} \times 10 = 12.7.$$

该乳化剂的 HLB 值为 12.7, 其水溶液为淡黄色透明液体, 水溶性好, 满足沥青乳化剂的要求.

2.4 SBS 改性乳化沥青性能评价

当乳化剂加入量为 1.5% 时试验数据最为理想. 根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测试乳化沥青及蒸发残留物部分性能指标, 如表 2 所示. 可以看出, 改性乳化沥青的各项指标均满

足微表处 BCR 型乳化沥青的技术指标要求, 且达到较好水平.

表2 改性乳化沥青性能指标

Tab.2 Modified asphalt emulsion performance

乳化改性 沥青	技术 要求	检测 结果	试验 方法
标准黏度 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	12 ~ 60	49	T0621
筛上剩余量 (1.18 mm) /%	≤ 0.1	0.05	T0652
蒸发残留物 含量 /%	≥ 60	60.17	T0651
存储稳定性 (1 d) /%	≤ 1.00	0.05	T0655
蒸发残留物性能试验			
溶解度(三氯 乙烯) /%	97.5	98.6	T0607
$25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 针入度 / 10^{-1} mm	60 ~ 150	62	T0604
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	53	78.5	T0606
$5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 延度/cm	20	35	T0605

2.5 微表处混合料性能评价

2.5.1 拌和性能评价

微表处混合料分别采用 3%、4%、5%、6%、7% 和 8% 的加水量, 部分稀浆混合料拌合情况如图 3 所示; 当稀浆混合料加水 6% 时拌合时间为 127 s, 大于 120 s, 满足微表处混合料拌合时间技术要求, 因为施工中可能存在误差, 取稀浆混合料加水量为 7%. 加水 7% 时, 拌和的混合料平铺在毛毡试模上 15 min 后, 用纸巾轻轻按压混合料表面, 纸巾上无褐色斑点出现, 判断破乳时间约为 15 min.

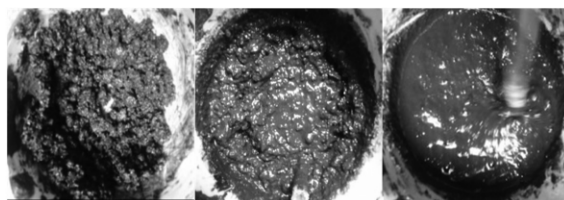


图3 稀浆混合料拌合情况(从左到右加水量依次为 3%、5% 和 7%)

Fig.3 Slurry mixture mixing conditions (from left to right amount of water were 3%, 5% and 7%)

2.5.2 黏聚力性能评价

黏聚力值大于 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 时为混合料的初凝时间. 黏聚力(C) 随时间的变化曲线如图 4 所示;

试验数据显示混合料 30 min 的黏聚力值为 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 试件表面出现一条细小裂缝, 为初级成型. 60 min 黏聚力值约为 $2.4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 试件表面没有裂缝出现, 压头下的部分集料被碾落, 判断为中度成型. 当混合料成型时间大于 75 min 后, 黏聚力达到 $2.8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 试样表面未见任何损坏, 压头在其表面打滑, 表面沥青膜留下圆形痕迹, 试件完全成型. 混合料的黏聚力试验数据满足规范要求.

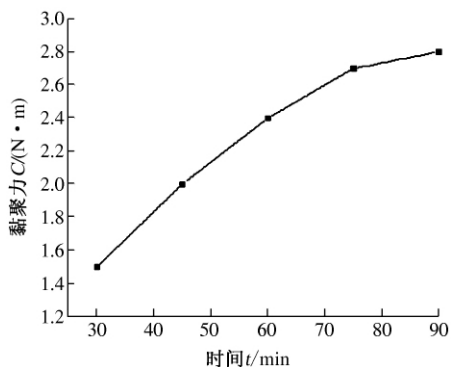


图4 黏聚力随时间的变化曲线

Fig. 4 Curve of cohesion with time

2.5.3 湿轮磨耗试验评价

试件在不同油石比、不同浸水时间试验中磨耗前后的质量 m_a 和 m_b , 通过湿轮磨耗值计算公式:

$$\text{WTAT} = \frac{m_a - m_b}{A} \quad (1)$$

式中: $A = 0.034 \text{ m}^2$. 根据式 (1) 计算磨耗值, 试验数据见表 3. 不同油石比下浸水 1 h 湿轮磨耗值和浸水 6 h 湿轮磨耗值的关系曲线图如图 5 所示; 由表 3 及图 5 分析知, 浸水 1 h 和浸水 6 h 湿轮磨耗值均满足规范要求. 随油石比变化, 当油石比为 8.0% 时, 浸水 1 h 磨耗值与浸水 6 h 磨耗值曲线变缓, 综合成本分析, 确定油石比为 8.0%.

表3 湿轮磨耗试验中试件前后质量

Tab. 3 The quality of specimens before and after the wet track abrasion test

		油石比/%			
		7	7.5	8	8.5
浸水 1 h	m_{a1} / g	913.5	906.4	918.5	924.8
	m_{b1} / g	898.7	893.0	905.8	912.3
	WTAT/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	435.3	394.1	373.5	367.6
浸水 6 h	m_{a2} / g	907.8	910.4	921.4	918.5
	m_{b2} / g	884.6	888.2	902.3	900.1
	WTAT/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	682.3	652.9	561.7	541.2

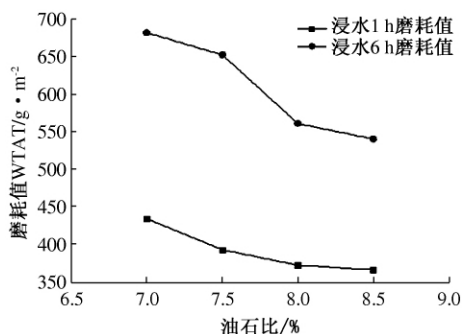


图5 湿轮磨耗值随油石比的变化曲线

Fig. 5 WTAT value curve with the asphalt aggregate ratio

3 结论

(1) 油酸、多胺、有机氯酸、氯醇反应生成沥青乳化剂. 通过红外光谱分析, 知乳化剂具有酰胺基和羧基, 为两性沥青乳化剂, 其表面张力 σ_c 为 46.11 mN/m , HLB 值为 12.7.

(2) 当乳化剂用量为 1.5% 时, 乳化 5% SBS 含量的改性沥青, 所得改性乳化沥青蒸发残留物的 25°C 针入度为 6.2 mm , 软化点为 78.5°C , 5°C 延度为 35 cm , 及其他指标均满足微表处 BCR 型乳化沥青技术要求.

(3) 稀浆混合料拌和试验证明该乳化剂为慢裂快凝型, 且混合料初凝时间为 30 min 左右, 60 min 黏聚力值达到 $2.4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 为中度成型, 可满足微表处快速开放交通的要求; 浸水 1 h 和浸水 6 h 湿轮磨耗值也均满足规范要求, 且达到较好水平.

参考文献:

- [1] 交通部公路科学研究院. 微表处和稀浆封层技术指南 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] PETER S. Cationic slurry seal emulsifiers [P]. U. S. Patent: US5019168, 1991-02-05.
- [3] 肖晶晶. 微表处改性乳化沥青及混合料性能研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2007.
- [4] 张倩. 慢裂快凝型阳离子沥青乳化剂的合成及性能研究 [J]. 日用化学工业, 2012, 42(6): 432-435.
- [5] 王军. 功能性表面活性剂制备与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [6] 温立影. 超薄磨耗层高性能改性乳化沥青粘层材料开发研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2011.
- [7] 交通运输部公路科学研究院. JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

- [8] 施来顺. 新型甜菜碱型沥青乳化剂的合成与性能测试[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(4): 112-115.
- [9] 刘尚乐. 乳化沥青及其在道路、建筑工程上的应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.

Characterization and Evaluation Applications of Special Gender Asphalt Emulsifier for SBS Modified Micro-surfacing

GAO Li-ning, JIA Qin-long, YAN Yong, GUO Tao, XIA Hui-yun, CHEN Hua-xin

(Engineering Research Center of Ministry of Education for Transportation Materials, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The properties of asphalt emulsifier in micro-surfacing are an issue of great importance for modified emulsified asphalt and mixture performance. In this paper, a kind of zwitterionic surfactant which can be used for asphalt emulsifier was synthesized by using oleic acid, polyamine, acid and alcohol containing chloride as starting materials. The synthesized asphalt emulsifier was characterized by means of FT-IR, surface tension and the calculated hydrophilic-lipophilic balance (HLB) value. The properties of 5% SBS modified emulsion asphalt and the technical parameters of slurry mixtures were also tested. The results showed that the critical micelle concentration (CMC) of emulsifier was 2.63×10^{-5} mol/L, the surface tension at CMC was 46.11 mN/m, and the calculated HLB value was 12.7. Furthermore, the modified emulsion asphalt showed the best performance when the concentration of emulsifier was 1.5%, and the modified asphalt emulsion evaporation residue 25 °C penetration was 6.2 mm, softening point was 78.5 °C, 5 °C ductility was 35 cm; micro-surfacing mixture 60 min cohesion value reached 2.4 N · m, moderate molding, 1 h and 6 h soaking wet wheel abrasion values were to meet regulatory requirements.

Key words: asphalt emulsifier; micro-surfacing; modified emulsified asphalt; oleic acid

文章编号: 1671-6833(2015)05-0035-04

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

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为研究纳米腐植酸类肥氮素释放特性, 以元胞自动机为模拟工具, 肥料养分扩散的离散性为理论基础, 系统进行了纳米腐植酸缓释肥中氮素在土壤中运移的动态可视化模拟. 研究表明: 元胞自动机模拟的纳米腐植酸肥中氮素释放规律与所选取的两种包膜肥料于 25 ℃ 下氮素释放特性基本一致, 为肥料中氮素释放特性研究提供了有效模拟手段.

关键词: 纳米腐植酸缓释肥; 元胞自动机; 动态可视化模拟; 氮素释放特性

中图分类号: TQ021.4, TP11 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.008

0 引言

纳米腐植酸是随着纳米材料技术的发展而诞生的一种新型精细有机材料, 其粒径介于 1~100 nm, 鉴于其纳米效应(表面效应、量子尺寸效应及体积效应), 具有抑制尿酶活性, 提高肥料利用率和减少对环境的污染等功能^[1]. 纳米腐植酸缓释肥作为肥料行业的新兴产业被广泛研究和关注. 目前, 多数研究均集中在包膜类缓、控释肥料养分释放特性、研究进展和肥效等方面^[2], 对纳米腐植酸缓控释肥中氮素在土壤中运移鲜见报道. 元胞元胞机(Cellular Automato, CA) 作为一个时间、空间都离散的动力学系统, 其广泛应用于复杂系统的动态可视化模拟研究^[3]. 文献[4]开展了关于元胞自动机在扩散系统及缓控释制剂中功能物质的释放过程模拟研究, 为利用元胞自动机进行肥料养分释放过程的模拟研究提供了理论依据. 笔者以元胞自动机为模拟工具, 肥料养分扩散的离散性为理论基础, 系统进行了纳米腐植酸缓释肥氮素在土壤中运移研究, 实现腐植酸类肥中氮素释放过程动态可视化模拟, 为提高纳米腐植酸缓释肥中氮素的利用率提供参考.

1 缓控释肥氮素在土壤运移模型

氮素在土壤中的存在形态很多, 且转化较为复杂. 土壤中氮素存在形式主要有其在土壤转化、

运移及植物根系吸收. 土壤氮素运移指土壤无机态氮的运移, 描述对象一般是 NH_4^+ 和 NO_3^- . 无机态氮素溶于土壤后可作为土壤溶质的一部分, 故土壤中氮素运移机理与溶质运移原理基本一致, 溶质运移方程同样适用于土壤氮素运移过程^[5].

从物理、化学方面利用数学模型可定量预测溶质在土壤中的运移行为. 溶质运移包括 3 个物理过程, 即对流、分子扩散和机械弥散. 目前, 研究土壤中溶质迁移模型主要有: 确定性模型、动水-不动水体模型及随机模型^[6].

1.1 随机模型

随机模型由 Jury^[7] 推算而来. 模型指出孔隙在土壤中是复杂的, 溶质在土壤中运移具体细节犹如“黑箱”, 不能准确描述, 溶质在不同层深的迁移通量, 可采用已知浓度的累计渗入通量进行估计; 在氮素运移的大田试验观测资料有限的背景下, 该模型为当今模拟大田氮素运移规律最有效的方程模型, 其方程如式(1)、(2),

$$C(l, t) = \int_0^t C_{in}(t-t') f_1(t') dt'; \quad (1)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma}\right], \quad (2)$$

式中: $f_1(t)$ 为传输函数; $C_{in}(t-t')$ 为已知浓度的人渗通量.

1.2 确定性模型

确定性模型(CDE) 是指以对流-弥散方程

收稿日期: 2015-04-21; 修订日期: 2015-07-11

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿项目(2011A530008); 郑州大学优秀博士学位论文培育基金(20131131)

作者简介: 程亮(1986—), 男, 郑州大学博士生, 主要从事纳米粉体复合材料的制备及应用研究.

通讯作者: 刘国际(1964—), 男, 郑州大学教授, 博士生导师, E-mail: guojiliu@zzu.edu.cn.

为主,主要考虑土壤盐溶液中不同成分间的化学作用,土壤中原有物质对溶液离子的吸附、解吸等作用.在此模型基础上,Nielson 等^[8]首次系统进行了 CDE 方程科学性及其合理性的研究,

一维条件下,土壤中氮素运移、热及水的模型方程分别如式(3)、(4)、(5)、(6)^[8],

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + U; \quad (3)$$

$$\frac{\partial (C_v \cdot T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\theta \cdot C_1)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{sh}(\theta, v) \cdot \frac{\partial C_1}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC_1)}{\partial z} + S_1; \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\theta \cdot C_2)}{\partial t} + \rho R \frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{sh}(\theta, v) \cdot \frac{\partial C_2}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qC_2)}{\partial z} + S_2, \quad (6)$$

式中: R 为 NH_4^+ 在液相和固相中的分配系数, cm^3/g ; C_v 为土壤比热容, $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$; C 为土壤比水容量, cm^{-1} ; ρ 为土壤容重, g/cm^3 ; θ 为土壤体积含水量; S_1 为 NO_3^- 运移方程中的源汇项; S_2 为 NH_4^+ 运移方程中的源汇项; $D_{sh}(\theta, v)$ 为一般条件下溶质的扩散-弥散系数, cm^2/d ; H 为土壤总水头, cm ; h 为土壤负压水头, cm ; K 为土壤导水率, cm/d ; t 为时间坐标; T 为土壤平均温度, $^\circ\text{C}$; q 为土壤水分通量, cm/d .

1.3 动水-不动水体模型

Van. Genuchten 等在对流-弥散方程模型基础上提出土壤动水-不动水体模型方程^[9]

$$\frac{\partial (\theta_m C_m + \theta_{im} C_{im})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[D_{sh}(V_m, \theta_m) \frac{\partial C_m}{\partial Z} \right]; \quad (7)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}), \quad (8)$$

式中: α 为两区间质量交换系数, h^{-1} ; θ_m 、 θ_{im} 分别为土壤水分流动区、非流动区的含水率, %; Z 为空间坐标, cm ; C_m 、 C_{im} 分别为相应区域溶质浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$; D_{sh} 为弥散系数, cm^2/h ; t 为时间, h ; V_m 为流动区平均孔隙水流速度, cm/h .

确定性方程模型前提假设为“均匀介质”,其应用需有边界和初始条件,随机(传输函数)方程模型虽可在溶质运移的不稳定条件下应用,但因其不完善需深入探讨.鉴于此种情况,缓控释肥料氮素在土壤中运移的元胞自动机模拟尤为重要.

2 纳米腐植酸肥中氮素在土壤中运移的元胞自动机模拟

2.1 模型的结构设计与参数设置^[10-11]

土壤属于结构复杂、类型繁多的多孔介质材料,且生物、物理、化学过程同时进行.为使模拟过程简化,实验假设将土壤溶液分为可动区域和不可动区域.实验只考虑可动区溶液,将不可动区域土壤溶液与土壤固相结合研究.

稳态条件下动水-不动水体方程模型如式(7)、(8)所示,其初始及边界条件为^[12]

$$C_i = 0 \quad 0 < x < l, t = 0, \quad (9)$$

$$V_i C_0 = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + V_i C_i \quad x = 0, t > 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = 0 \quad x = l, t > 0, \quad (11)$$

式中: D_i 为可动区弥散系数; V_i 为流速, m/s ; C_i 为浓度, mol/L ; l 为土壤深度, cm .

纳米腐植酸缓控释肥养分释放模拟元胞自动机结构设计如图1所示.

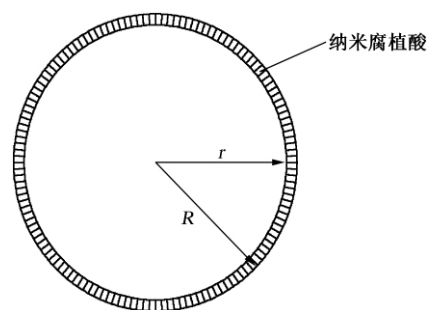


图1 肥料颗粒的物理模型

Fig.1 The physical model of fertilizer granules

肥料养分释放的元胞自动机是在肥料颗粒横截面上假设离散域呈圆形,建立由极坐标表示圆域面- $\rho(\theta)$ 的二维元胞空间,元胞由均匀分布在圆域内的一系列圆点表示,如图2所示.在模拟肥料颗粒养分释放过程中,元胞在不同状态值间的转换过程即反映肥料氮素释放过程^[12].

将代表元胞自动机的圆形域进行离散化处理:以极坐标的形式表示,设该圆域为 $\rho(\theta) = R$, 则 $0 \leq \rho \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi$. 将该圆形离散为许多点,且 $\rho = n\Delta r, \theta = m\Delta\varphi, \Delta r$ 是离散域内规整排列的两层圆点之间距离, $\Delta\varphi$ 是圆域内旋转角度的梯度.每个元胞定义为 $C_{i,j}, \{C_{i,j} | 0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m\}$ 以间隔 Δt 对时间进行离散化,使得任一时刻 $t = k\Delta t = t_k, k$ 为演化次数.

令 $S_{i,j}$ 为元胞的状态变量,表示元胞的类别,

每个中心元胞在 $t = t_{k+1}$ 时的状态 S^{k+1} 仅取决于 $t = k$ 时其自身和上、下、左、右 4 个位于其紧邻的邻居元胞的状态,即

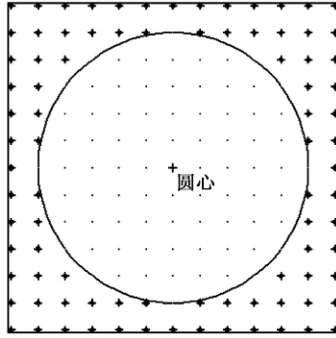


图2 肥料元胞自动机示意图

Fig.2 The cellular automation schematic of fertilizers

$$S_{i,j}^{k+1} = f(S_{i-1,j}^k, S_{i+1,j}^k, S_{i,j-1}^k, S_{i,j+1}^k, S_{i,j}^k), \quad (13)$$

式中: S 为元胞的状态,上标代表时间,下标代表坐标位置; f 为演化规则^[4,12]

假设元胞因子 $C_{i,j}$ 在任一时刻 t 状态为 $S_{i,j}(t)$, 其状态值有 3 个: 0、1、2. 为简捷可直接以状态值代替元胞,即元胞 0、元胞 1 和元胞 2. 元胞 0 表示溶剂(主要指土壤溶液),元胞 1 表示固体氮素颗粒,元胞 2 表示氮素颗粒在土壤溶液中的状态. 通过二次项分布定理来描述 CA 的演化概率,其演化原理可概述为在离散域范围内所包含的任一元胞 1,当其 4 个相邻域中没有出现元胞 0,表示元胞不演化;当其四个相邻域中状态值为 0,元胞数量分别为 1、2、3、4 情况下,状态值演化为 2,其演化过程中状态值概率可分别表示为 p 、 $2p(1-p)$ 、 $3p(1-p)^2$ 、 $4p(1-p)^3$. 假设演化过程的边界条件为固定边界,自始至终都为 0 状态,虚拟的格位可表示为元胞自动机不发生演化.

2.2 元胞自动机模拟结果及数据分析

假设在累计演化元胞数达到 80% 时,纳米腐植酸缓释肥中氮素运移过程完成,元胞自动机演化过程如图 3 所示. 此模型能清晰呈现氮素颗粒在土壤里的迁移轨迹. 纳米腐植酸缓释肥氮素迁移的初始阶段($t = 0$ s),元胞只出现了 0 及 1 两种状态值,且元胞 1 状态值尚未进入演化过程,这表明固体氮素颗粒还未发生迁移; $t = 20$ s 时(图 3b),圆形域内有部分元胞 0 存在,元胞 1 状态值开始发生演化变成元胞 2 状态值; $t = 50$ s 时(图 3c),元胞 0 状态值和元胞 1 状态值的数量相对于 $t = 20$ s 时进一步减少,元胞 2 状态值数量逐渐增多; $t = 80$ s 时(图 3d),元胞 2 状态值占据了大部分圆形域空间,因缓释肥料中氮素颗粒扩

散的推动力通常为两者的浓度差,累计百分数与演化时间 t 的关系如图 4 所示.

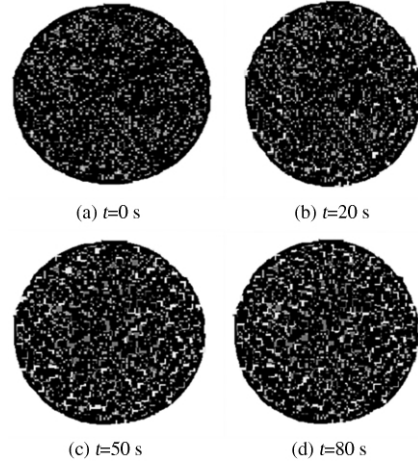


图3 氮素在土壤中运移的元胞自动机演化过程

Fig.3 The cellular automation evolution of nitrogen release in soil

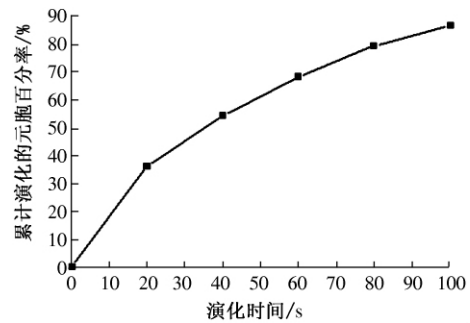


图4 氮素在土壤中运移的元胞分数与时间关系

Fig.4 The relationship between time and cumulate percentage of cellular of nitrogen in soil

由图 4 可知,模拟系统的元胞自动机氮素演化过程与纳米腐植酸肥中氮素在土壤中的迁移过程互相对应,整个氮素演化过程简捷且清晰;图 3 和图 4 呈现了纳米腐植酸缓释肥中氮素的运移过程,土壤中氮素运移过程的动态可视化模拟过程得以实现.

2.3 包膜型肥料的实例分析

包膜型肥的氮素释放特性由于不同包膜材料和包膜工艺造成包膜层结构多样,使得包膜肥养分释放机理不同. 实验以两种包膜控释尿素为研究对象^[12],其物化性状如表 1 所示.

以上述两种包膜缓释控释肥为研究目标,系统探讨了在不同温度下,土壤中两种包膜缓释控释肥中氮素累计释放速率与时间的关系,结果如图 5 所示.

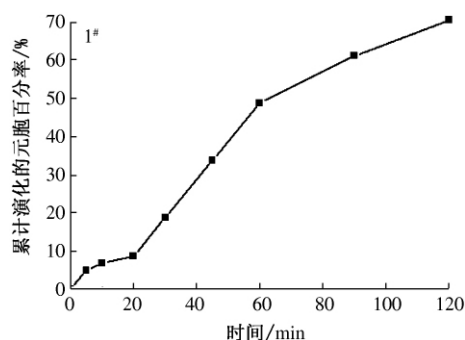
通过方程拟合以及利用文献[13]所提离散值估算法,计算出元胞自动机理论参数分别为:

表 1 供试包膜控释肥料的物化性质

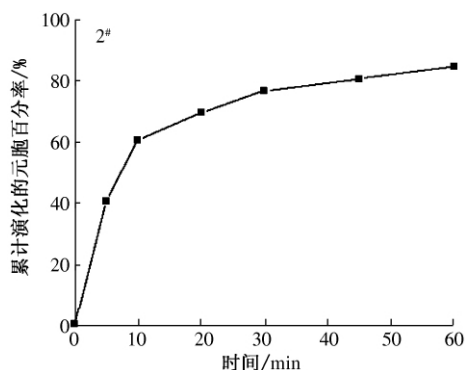
Tab. 1 Physical and chemistry properties of tested coated fertilizers

型号	含氮量 /%	包裹膜材料的种类和含量	氮素释放期 /d	生产厂家
1 [#]	42	聚烯烃, 9%	50	奥佳肥业
2 [#]	42	聚烯烃 + 小分子有机物, 9%	90	奥佳肥业

$r = 56$, 元胞总数量为 3 136, $w_1 = 45$ 、 $w_2 = 45$ 、 $w_3 = 10$, 本实验所用演化概率为 $p = 0.10$, 25 °C 时纳米腐植酸缓控释肥中氮素累计元胞百分率 - 时间关系, 如图 5 所示, 图 5 中 25 °C 时两种包膜缓释肥中氮素累计释放率 - 时间关系进行对比, 其氮素释放特性基本一致, 表明元胞自动机能反映纳米腐植酸肥中氮素释放特性。



(a) 聚烯烃包膜缓释肥



(b) 聚烯烃与小分子有机物包膜缓释肥

图 5 CA 预测缓释肥中氮素累计释放曲线

Fig. 5 The cumulate release curve predicted by cellular automation

3 结论

以土壤中溶质运移理论为前提, 将纳米腐植酸缓释肥中氮素在土壤溶液中运移过程转化为溶质(氮素颗粒)在多孔介质材料中的扩散。通过 CA 对运移轨迹进行了系统的模拟。结果表明, 通过不同温度下肥料中氮素累计释放率 - 时间关系对比, 25 °C 时肥料中氮素元胞自动机能很好地模拟纳米腐植酸缓释肥中氮素在土壤中的运移过程, 且元胞自动机参数为: $r = 56$, 元胞数为 3 136,

$w_1 = 45$ 、 $w_2 = 45$ 、 $w_3 = 10$, (演化概率 $p = 0.10$)。

参考文献:

- [1] 程亮, 张保林, 侯翠红, 等. 高剪切条件下纳米腐植酸的制备与表征 [J]. 化工学报, 2012, 63 (8): 2648 - 2654.
- [2] SPITTLE. A, BROWN. R. Acellular-automata model of steady-state columnar-dendritic growth in binary alloys [J]. Journal of Material Science, 1995, 30 (16): 3989 - 3994.
- [3] BROWN R, BRUCE B. Three-dimensional cellular automaton models of micro-structural evolution during solidification [J]. Journal of Material Science, 1995, 30(1 - 5): 1144 - 1150.
- [4] NICOLAS B, GREGOIRE L, Patrice Hildgen. Modeling drug release from bioerodible microspheres using cellular automation [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2007, 343(43): 196 - 207.
- [5] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 302 - 309.
- [6] 张伟, 邓英尔. 溶质迁移研究进展 [J]. 广东微量元素科学, 2009, 16(12): 1 - 7.
- [7] JURY W. A, GARRISON S. A transfer function model of solute transport through soil I fundamental concept [J]. Water Resources Research, 1986, 22 (2): 243 - 247.
- [8] 黄元仿, 李韵珠, 陆锦文. 田间条件下土壤氮素运移的模拟模型 I [J]. 水利学报, 1996, 27 (6): 9 - 14.
- [9] NIELSEN D. R, VAN G M, BIGGAR J. W. Flow and solute transport processes in the unsaturated zone [J]. Water Resources Research. 1986, 22 (9): 895 - 905.
- [10] 赵霞则. 典型溶质在土壤中运移规律的实验研究及数值模拟 [D]. 南京: 河海大学水电学院, 2005.
- [11] LI Gong-sheng, YAO De, WANG Yong-zai, et al. A non-linear solute transport model and data reconstruction with parameter determination in an undisturbed soil-column experiment [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2011, 12 (6): 368 - 379.
- [12] 陈可可. 缓控释肥料氮素转运特性及模拟研究 [D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2012.
- [13] 李延升. 缓控释制品中功能物质传递过程研究 [D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2009.

(下转第 43 页)

文章编号: 1671-6833(2015)05-0039-05

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

(郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对螺旋折流板换热器壳程进口螺旋流动未充分发展区域分布特点, 提出了一种变角度螺旋折流板换热器模型, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型方程对两种折流板形式的换热器流动和传热特性进行了数值研究, 并对换热器传热强化机理进行了分析. 结果表明: 变角度螺旋折流板换热器能够减小壳程进口螺旋流动未充分发展段长度, 增加壳程整体螺旋流动强度和流体流动传热速度场与温度场的协同性, 强化换热器传热. 螺旋角为 $10^\circ + 20^\circ$ 和 $15^\circ + 25^\circ$ 的变角度螺旋折流板换热器较常规螺旋折流板换热器综合性能分别提高 7.10% ~ 7.54% 和 2.88% ~ 4.05%.

关键词: 换热器; 变角度; 螺旋折流板; 结构优化; 数值模拟

中图分类号: TK124

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.009

0 引言

作为诸多工业生产过程中的通用设备, 管壳式换热器强化传热性能的研究对促进能源、资源利用最大化, 进而达到节能减排目的具有重要意义^[1-3]. 螺旋折流板换热器的提出有效地解决了传统弓形折流板换热器存在的流阻大、传热系数偏低、易结垢和产生诱导振动等缺点, 得到了广泛的重视^[4-5]. 现有的研究工作已经比较系统地分析了螺旋折流板换热器的流动和传热性能, 但主要集中在螺旋角及搭接折流板间的连接方式方面^[6-7].

张剑飞等^[8]采用周期性模型对换热器整场的协同角及局部换热特性进行了研究, 结果表明螺旋折流板换热器内部场协同性分布比较均匀, 可以充分利用所有的换热面积, 但未考虑壳程流动未充分发展区的影响. 李大为等^[9]通过改进螺旋折流板换热器壳程入口结构, 结果表明倾斜入口能够有效降低换热器整体压降, 提高换热器性能. 曹兴等^[10]通过对连续性螺旋折流板换热器整体流动和传热性能的分析得出, 换热器壳程进口

未充分发展段长度约为相应折流板螺旋角下一个螺旋周期的长度. 笔者通过对螺旋折流板换热器强化传热特性机理进行分析, 并充分考虑折流板结构特点, 提出一种变角度的连续螺旋折流板模型; 其通过减小螺旋折流板第一个螺旋周期的长度, 优化壳程进口螺旋流动未充分发展区域长度. 采用 CFD 分析软件 FLUENT 对新型折流板换热器进行数值分析研究, 为换热器强化传热性能的研究提供参考.

1 几何模型

常规的螺旋折流板换热器折流板螺旋角为一固定角度, 变角度螺旋折流板为通过改变折流板第一个螺旋周期的螺旋角, 如图 1 所示. 笔者将变角度螺旋折流板第一个螺旋周期的螺旋角记为 α , 其余周期的螺旋角记为 θ , 变角度螺旋折流板表示为 $\alpha + \theta$. 分别建立螺旋角 θ 为 20° 、 25° 的常规螺旋折流板换热器模型和对应 α 角为 10° 、 15° 的变角度螺旋折流板换热器模型, 记为 $10^\circ + 20^\circ$ 、 $15^\circ + 25^\circ$. 螺旋折流板换热器结构参数和计算区域模型分别见表 1 和图 2.

收稿日期: 2015-04-11; **修订日期:** 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476147); 郑州大学自主创新项目(14LF00628)

作者简介: 刘敏珊(1943—), 女, 河南商丘人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事过程装备传热与节能技术方面的研究工作.

通讯作者: 靳遵龙(1973—), 男, 河南淮阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事过程设备流体流动与强化传热方面的研究工作, E-mail: zljn@zzu.edu.cn.

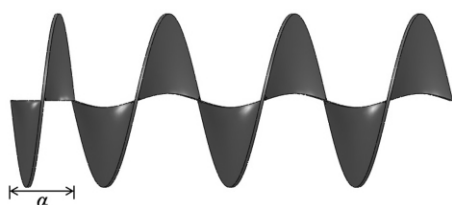


图1 变角度连续螺旋折流板结构示意图

Fig. 1 Helical baffles with variable angles

表1 换热器主要结构尺寸

Tab. 1 Main structural parameters of heat exchanger

筒体内径/ mm	换热器长度/ mm	换热管直径/ mm	管孔距离/ mm	折流板厚度/ mm	布管方式
235	870	25	32	4	正三角形

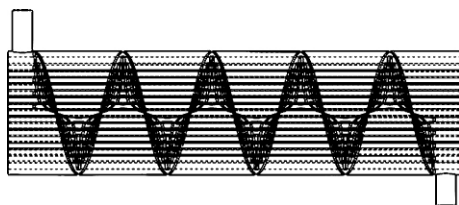


图2 换热器计算区域模型

Fig. 2 Schematic diagram of calculation

2 边界条件及求解设置

壳程介质为液态水,常物性;计算中忽略重力及换热器壳体壁面对外散热。壳程进口采用速度进口,出口采用压力出口;流体入口温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,管壁温度为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒壁温。湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型方程,增强壁面函数法^[11];压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法;动量、能量、湍动能和湍流耗散率离散采用二阶迎风格式。

3 网格划分及实验验证

螺旋折流板换热器壳程内部结构复杂,无法生成结构化网格,文中网格划分采用正四面体与金字塔形的非结构化网格。考虑到换热管壁面温度梯度较大及边界层效应,对管束壁面设置边界层。综合考虑计算精度和计算机计算能力,最终确定螺旋角为 20° 、 $10^{\circ} + 20^{\circ}$ 、 25° 、 $10^{\circ} + 25^{\circ}$ 的换热器模型网格数量分别为 8.98×10^6 、 8.73×10^6 、 9.02×10^6 和 9.00×10^6 ,此时通过网格无关性分析,换热器壳程换热系数和压降偏差均小于 1.5% 。取壳程流速为 4.5 kg/s 时,网格无关性分析结果见表 2。

为验证数值计算结果的可靠性,采用笔者方

法对文献[12]中的连续螺旋折流板换热器进行数值计算,数值计算结果同文献中实验值对比见图 3。同实验值相比,数值计算结果最大偏差为 16.12% ,从而证明了数值计算结果的可靠性。

表2 网格无关性验证

Tab. 2 Validation of grid-independent

模型	网格数/ $\times 10^6$	换热系数 $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	压降/kPa
20°	8.25	4 526.21	31.75
	8.98	4 775.31	32.49
	9.80	4 805.21	32.21
	10.76	4 818.71	31.95
$10^{\circ} + 20^{\circ}$	7.55	5 367.87	35.13
	8.73	5 211.17	34.37
	9.08	5 202.75	34.38
	9.65	5 257.41	34.52
25°	8.06	4 148.30	29.80
	9.02	4 255.80	29.87
	9.86	4 201.97	30.10
	10.80	4 244.67	29.91
$15^{\circ} + 25^{\circ}$	8.49	4 451.16	31.02
	9.00	4 485.09	31.22
	10.33	4 527.10	31.61
	10.97	4 508.98	31.54

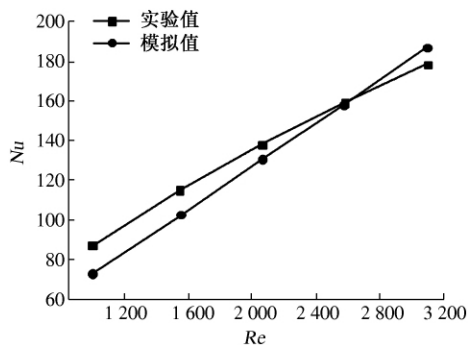


图3 数值计算值与实验值对比

Fig. 3 Comparison between simulation and experiment

4 计算结果分析

4.1 壳程传热系数分析

图 4 为不同折流板结构下换热器壳程传热系数随流量的变化曲线。从图 4 可以看出,换热器壳程传热系数随流速的增大而增加,随折流板螺旋角的增加而减小;变角度连续折流板换热器能够明显提高换热器的传热系数,改善换热器的传热性能。壳程流量在 $1.5 \sim 7.5\text{ kg/s}$ 范围内,螺旋角为 $10^{\circ} + 20^{\circ}$ 的变角度螺旋折流板换热器较螺旋角为 20° 的常规螺旋折流板换热器传热系数增加 $8.94\% \sim 9.86\%$;螺旋角为 $15^{\circ} + 25^{\circ}$ 的变角度螺旋折流板换热器较螺旋角为 25° 的常规螺旋折流

板换热器传热系数增加 4.75% ~ 5.51%.

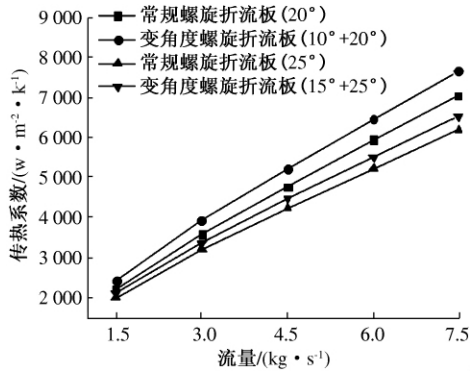


图4 壳程传热系数随流量的变化

Fig. 4 Shell side heat transfer coefficient versus flux

4.2 壳程压降分析

图5为不同折流板结构下换热器壳程压降随流量的变化曲线.从图5可以看出,换热器壳程压降随流速的增大而增加,随折流板螺旋角的增加而减小;变角度连续折流板换热器较常规螺旋折流板换热器压降有所升高.壳程流量在 1.5 ~ 7.5 kg/s 范围内,螺旋角为 10° + 20° 的变角度螺旋折流板换热器较螺旋角为 20° 的常规螺旋折流板换热器壳程压降增加 4.90% ~ 6.61%;螺旋角为 15° + 25° 的变角度螺旋折流板换热器较螺旋角为 25° 的常规螺旋折流板换热器壳程压降增加 4.28% ~ 6.23%.

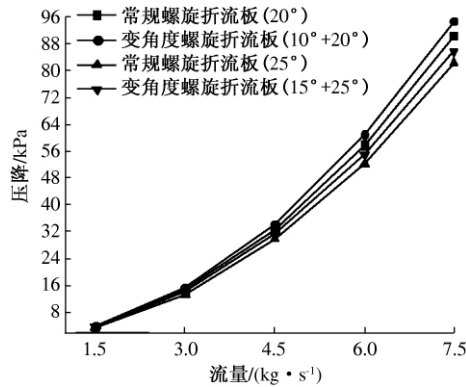


图5 壳程压降随螺旋角 α 的变化

Fig. 5 Shell side pressure drop versus flux

4.3 换热器综合性能分析

采用等泵工下的综合性能评价指标 $Nu/(f)^{1/3}$ 对不同螺旋折流板结构的换热器进行分析^[13-14], Nu 和 f 为换热器壳程努赛尔数与阻力系数.

$$Nu = \frac{hd_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$f = \frac{D_i}{L} \frac{2\Delta P}{\rho u^2}, \quad (2)$$

式中: h 为壳程换热系数; d_0 为换热管直径; λ 为导热系数; D_i 为壳体内径; L 为壳体长度; ΔP 为壳程压降; ρ 为壳程流体密度; u 为壳程流体速度.

图6为换热器综合性能随流量的变化曲线.从图6可以看出,换热器综合性能随流速的增大而增加,变角度连续折流板换热器较常规螺旋折流板换热器综合性能升高.壳程流量在 1.5 ~ 7.5 kg/s 范围内,螺旋角为 10° + 20° 的变角度螺旋折流板换热器较螺旋角为 20° 的常规螺旋折流板换热器综合性能增加 7.10% ~ 7.54%;螺旋角为 15° + 25° 的变角度螺旋折流板换热器较螺旋角为 25° 的常规螺旋折流板换热器壳程压降增加 2.88% ~ 4.05%.

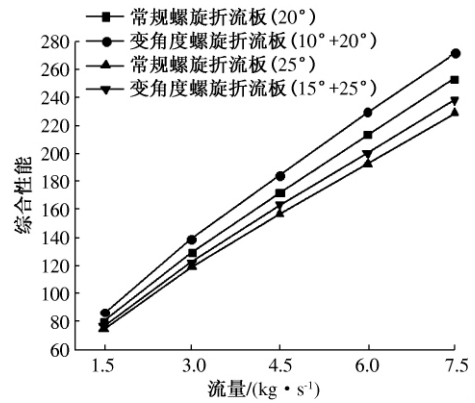


图6 换热器综合性能随螺旋角 α 的变化

Fig. 6 Comprehensive performance versus α

4.4 传热强化机理分析

通过 4.1 ~ 4.3 的分析可知,变角度螺旋折流板能够有效提高换热器的性能,强化换热器传热.图7为螺旋角为 25°,壳程流量为 4.5 kg/s 时常规螺旋折流板和变角度螺旋折流板换热器壳程流线分布图;图8和图9分别为螺旋角为 25° 时两种折流板类型下壳程流动未充分发展区和流动充分发展区的截面协同角分布图.

通过图7(a)和图7(b)对比分析可得出,变角度螺旋折流板换热器能够有效减小换热器进口螺旋流动未充分发展区的长度,增加换热器壳程整体螺旋流动程度,流体对换热管束的斜向冲刷程度增强,管壳程之间的传热热阻减小,壳程传热系数增加.常规螺旋折流板和变角度螺旋折流板换热器壳程螺旋流动未充分发展区截面协同角分别为 81.77° 和 81.31°,充分发展区截面螺旋角分别为 83.17° 和 82.88°,从场协同原理^[14]可得出:采用变角度螺旋折流板不仅改善了壳程流动未充分发展区的温度场同速度场协同性,同时也改善

了流动充分发展区温度场同速度场协同性; 换热器传热系数增加.

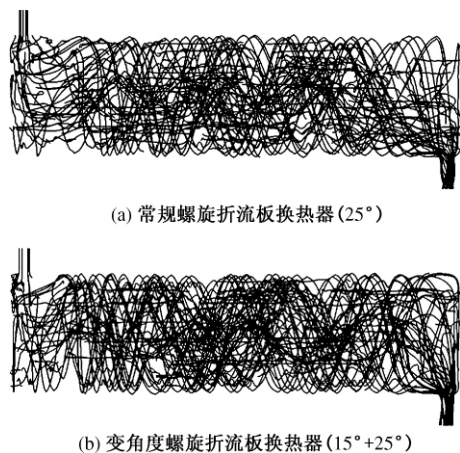


图 7 不同螺旋角螺旋折流板换热器壳程流线图

Fig. 7 Streamlines distribution of shell-sided under different helical angles

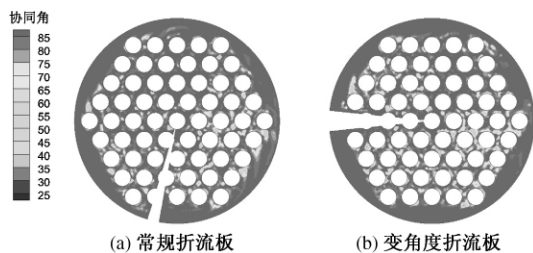


图 8 流动未充分发展区截面协同角分布

Fig. 8 Synergy angle of non-fully developed section

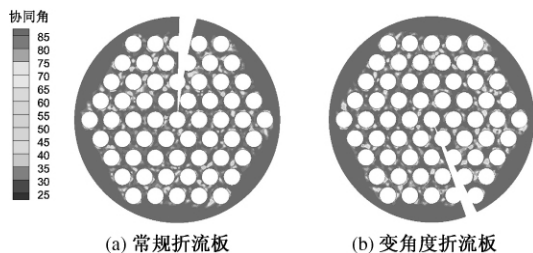


图 9 流动充分发展区截面协同角分布

Fig. 9 Synergy angle of fully developed section

由 4.2 分析可知, 壳程压降随折流板螺旋角的增加而减小, 采用变角度螺旋折流板相当于减小了换热器壳程的局部螺旋角, 壳程压降上升; 同时由壳程整体流线分布可得出, 变角度螺旋折流板换热器增加了壳程整体的螺旋流动程度, 壳程流体扰动程度增强, 压力损失增加.

综上所述, 变角度螺旋折流板换热器增强了壳程流体流动的扰动程度, 提高换热器壳程流体流动速度场与温度场的协同性, 换热器壳程传热系数增大, 同时壳程的压力损失增大; 但壳程压降的增大幅度较传热系数的增大幅度小, 换热器综

合性能升高.

5 结论

(1) 变角度连续折流板换热器能够明显提高换热器的传热系数, 同时换热器壳程压力损失也上升; 螺旋角为 $10^\circ + 20^\circ$ 时的变角度螺旋折流板较常规折流板换热器传热系数和压力损失分别提高 8.94% ~ 9.86% 和 4.90% ~ 6.61%; 螺旋角为 $15^\circ + 25^\circ$ 时传热系数和压力损失分别提高 4.75% ~ 5.51% 和 4.28% ~ 6.23%.

(2) 变角度螺旋折流板换热器能够提高换热器的综合性能, 螺旋角为 $10^\circ + 20^\circ$ 、 $15^\circ + 25^\circ$ 时的变角度螺旋折流板较常规折流板换热器综合性能分别提高 7.10% ~ 7.54% 和 2.88% ~ 4.05%.

(3) 变角度螺旋折流板换热器能够改善壳程进口螺旋流动未充分发展区长度, 优化未充分发展区作用, 强化换热器传热.

(4) 变角度螺旋折流板换热器能够增强壳程整体螺旋流动, 提高壳程整体流体流动传热速度场与温度场的协同性.

参考文献:

- [1] 董其伍, 刘敏珊. 纵流壳程换热器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 1-5.
- [2] 古新, 刘冰, 董其伍, 等. 三角形布管方式下两种换热器传热与流阻性能研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2012, 33(3): 76-79.
- [3] 王永庆, 靳遵龙, 郭小迪, 等. 一种带状支撑的纵流壳程换热器热力特性分析 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(4): 77-80.
- [4] 宋素芳. 套管双壳程连续螺旋折流板换热器性能数值模拟研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(14): 82-87.
- [5] 刘敏珊, 许伟峰, 靳遵龙, 等. 三角区漏流对螺旋折流板换热器综合性能的影响 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(6): 1-4.
- [6] 董聪, 陈亚平. 阻流板对轴向搭接螺旋折流板换热器流动和传热性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 135-140.
- [7] WANG Si-min, WEN Jian, YANG Hui-zhu, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement of a heat exchanger with helical baffles through blockage of triangle leakage zones [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1/2): 122-130.
- [8] 张剑飞, 陶文铨, 何雅玲. 螺旋折流板换热器的协同角分布特性及局部换热特征 [J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2769-2773.

- [9] 李大为,沈人杰,高晓东,等. 螺旋折流板换热器数值模拟及入口结构改进研究[J]. 高校化学工程学报,2005,19(5):699-702.
- [10] 曹兴,杜文静,程林. 连续螺旋折流板换热器流动与传热性能及熵产分析[J]. 化工学报,2012,63(8):2375-2382.
- [11] 董其伍,谢建,刘敏珊,等. 管壳式换热器模拟中壁面函数选择分析[J]. 石油机械,2009,37(2):41-44.
- [12] 曾敏,彭波涛,喻澄清,等. 连续螺旋折流板换热器传热与阻力性能实验研究[J]. 核动力工程,2006,27(1):102-106.
- [13] 王定标,董永申,向飒,等. 基于螺旋片强化的套管换热器性能[J]. 化工学报,2014,65(4):1208-1214.
- [14] GUO Zeng-yuan, LI De-yu, WANG Bu-xuan. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(14):2221-2225.

Numerical Study of Structure Optimization for Heat Exchanger with Variable Angle Helical Baffles

LIU Min-shan, XU Wei-feng, WANG Yong-qing, WANG Dan, JIN Zun-long

(Key Laboratory of Process Heat Transfer Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Variable angle helical baffle heat exchanger is proposed to optimize the non-fully developed section in shell inlet. The flow and heat transfer performance of heat exchangers with different forms of helical baffles were studied, and the mechanisms of heat transfer enhancement for heat exchangers were analyzed. The results show: the length of non-fully developed section could be reduced by using variable angle helical baffle, the intensity of overall helical flow and the coordination of temperature field with velocity field increase too, and then the heat transfer performance is strengthened. Compared with general helical baffle heat exchanger, the comprehensive performance of variable angle helical baffle heat exchanger with angle of $10^\circ + 20^\circ$ and $15^\circ + 25^\circ$ could increase 7.10% ~ 7.54% and 2.88 ~ 4.05%, respectively.

Key words: heat exchanger; variable angles; helical baffles; structural optimization; numerical simulation

(上接第38页)

Cellular Automata Simulation of Nanoscale Humic Acid Nitrogen Fertilizer Migration in Soil

CHENG Liang, XU Li, HOU Cui-hong, LUO Ting-liang, ZHANG Bao-lin, LIU Guo-ji

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

Abstract: In order to investigate nitrogen release characteristics of the nanoscale humic acid fertilizers, cellular automata and the spread of fertilizer nutrients discreteness were used as simulation tools and theoretical basis, respectively. Nitrogen dynamic visual simulation was systematically studied by nitrogen migration of nanoscale humic acid fertilizer. The research results showed that the nitrogen release characteristics of cellular automata simulation was consistent between nanoscale humic acid fertilizer and the selection of two kinds of coated fertilizer under 25°C . This model provides an effective simulation tool for studying the features in fertilizer nitrogen released characteristics.

Key words: nanoscale humic acid coated-fertilizer; cellular automata; dynamic visual simulation; nitrogen release characteristics

文章编号: 1671-6833(2015)05-0044-05

R744 混合自然工质热泵系统特性研究

张仙平^{1,2}, 杨磊³, 魏新利², 王方³, 陈爱东¹

(1. 河南工程学院 土木工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001;
3. 中原工学院 环境与能源学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 采用 EES(Engineering Equation Solver) 软件建立了跨临界循环混合工质热力学模型, 以中原地区典型城市—郑州的气象和水文条件模拟 R744/R290 自然混合工质热泵系统的性能, 基于计算数据, 对总当量变暖影响 (TEWI) 进行了估算. 结果表明: 在设计工况下, 不带回热器跨临界 R744/R290 热泵热水装置的最优制热 COP 可达 4.104. 经计算, 用于郑州地区的年平均制热 COP 为 4.202. 与其他常规能源热水器相比, R744/R290 热泵热水装置 CO₂ 排放量平均可减少 36.39%. 论文还计算并探讨了回热器和压缩机等熵效率对热泵系统性能的影响. 综合分析, R744/R290 热泵热水装置具有能效高且环保的优点.

关键词: R744; 混合自然工质; 热泵; TEWI; 雾霾

中图分类号: TB61⁺5; TU833⁺.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.010

0 引言

近几年, 华北华中地区冬季雾霾日趋严重, 直接影响人民的生活质量甚至健康^[1]. 形成雾霾的因素多种多样, 其中工业、生活供热及采暖燃用化石燃料排出的污染物是主要原因之一^[2]. 若用 R744/R290 热泵热水器代替传统热水器, 对减缓雾霾污染, 改善空气质量将大有裨益.

热泵作为一种高效节能设备在暖通空调制冷领域的应用越来越广泛. 然而, 中国现役热泵系统使用的工质主要是氟利昂类工质 HCFC22, 还有部分过渡氟利昂类 HFC 工质如 HFC134a、R410A 和 R407C 等. 这些工质的温室效应指数 GWP 仍较高, 终将被替代. 从可持续发展角度考虑, 自然工质将是最佳选择^[3]. 自然工质中的 R744 具有环保(臭氧消耗潜能指数 ODP=0, 100 年 GWP=1), 不可燃无毒无嗅, 物化稳定性好, 易获取, 价格低廉, 无需回收, 流动传热特性优良等诸多优点, 但跨临界循环 R744 系统放热侧压力较高, 约是氟利昂类工质的 3~6 倍. 高压带来设备需重新

设计, 运行需考虑安全性等问题^[4]. 理论和实验研究均证明, 采用合适的第二组分工质与 R744 混合可达到降低压力的目的^[5-6]. 韩国学者 Kim 等人实验研究了跨临界循环 R744/R290(质量配比, 85/15, 75/25, 60/40) 制冷用空调系统性能, 表明系统压力下降, 效率提高, 制冷量下降^[7]. 该课题组还实验研究了 R744/R290 流经光管和微肋铜管时的沸腾换热和压降特性^[8-9]. 意大利学者 Grauso 等人对 R744/R290(质量配比, 83.2/16.8, 70.0/30.0) 流经内径为 6.0 mm 水平光管的流动沸腾换热特性进行了实验研究^[10]. 总结已有研究成果, 在 R744 中加入 R290 后, 沸腾传热系数总体呈下降趋势. 韩国学者 Kim 课题组还对 R744/R290(质量配比, 75/25, 60/40) 亚临界循环空调系统进行了实验研究^[11]. 笔者课题组前期研究表明, 在给定条件下, R744/R290(质量配比, 95/5) 将是最佳选择^[12]. 自然工质丙烷 R290 具有环保 (ODP=0, 100 年 GWP≈20), 充灌量少, 效率高等优点, 但最大缺点是易燃易爆. R290 与 R744 混合后恰好能抑制其可燃可爆性, 且当 R744 质量

收稿日期: 2015-03-15; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176207); 河南省高等学校青年骨干教师资助项目(2012GGJS-185)

作者简介: 张仙平(1973—), 女, 河南陕县人, 河南工程学院副教授, 博士, 主要从事环保工质热泵技术的研究, E-mail: zh2000ao@sohu.com.

通讯作者: 魏新利(1953—), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博导, 主要从事高效热泵技术、多能源建筑空调系统等研究与开发工作, E-mail: xlwei@zzu.edu.cn.

配比大于 89% 时, R744/R290 混合物不可燃, 安全等级为 A1 级. 从环保和可持续发展角度考虑, R744/R290 混合自然工质对环境非常友善, 这也是笔者选择其作为热泵用工质的根本出发点.

根据文献调研, R744/R290 热泵系统用于中原地区的性能分析尚无公开报道. 笔者以中原地区典型城市—郑州为对象, 通过所建混合工质跨临界循环热力学模型, 模拟计算 R744/R290 热泵系统性能, 得到制热性能系数 COP, 最优放热侧压力等主要技术参数的运行规律; 基于计算数据, 估算 R744/R290 热泵热水装置的总当量变暖影响 TEWIs(Total Equivalent Warming Impact), 并与 HCFC22 热泵热水装置、电热水器、燃气热水器进行对比^[13-15].

1 热力学模型

1.1 模型构建

R744/R290 混合工质热泵由压缩机、气冷器、回热器、一级节流阀、储液器、二级节流阀和蒸发器组成, 如图 1 所示. 利用回热器的进出口阀门, 回热器设计为可选运行模式, 如图中虚线框所示.

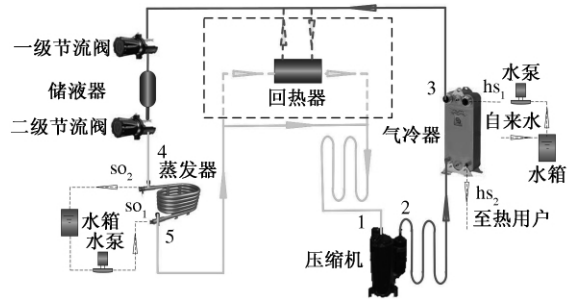


图 1 R744/R290 混合工质热泵系统
Fig.1 Schematic diagram of R744/R290 heat pump system

图 2 为温-熵图, 可以看出, 热泵循环由 1—2 压缩过程、2—3 等压冷凝过程、3—4 等熵节流过程、4—5—1 等压蒸发过程组成, 6 为蒸发压力下的泡点, 蒸发过程 4—5—1 和冷凝过程 2—3 均为变温过程, 虚线 si_1-si_2 和 so_1-so_2 分别为热汇水和热源水变化线.

为简化热力计算, 作出以下主要假设: 压缩过程绝热但不等熵, 考虑到热力计算中作出了若干假设, 是具有一定理想化程度的计算, 计算结果往往比试验值大, 等熵效率取 0.70; 忽略系统和周围环境间的散热损失; 各组分工质为纯工质, 忽略润滑油对工质或混合工质热物性的影响; 忽略制

冷工质在各换热设备、连接管路中的压降; 考虑到实际循环中由于部件匹配问题可能导致换热器传热效果变差, 蒸发器和冷凝器中的最小传热温差取 7 ℃; 压缩机吸气过热度取 10 ℃, 以免产生液击.

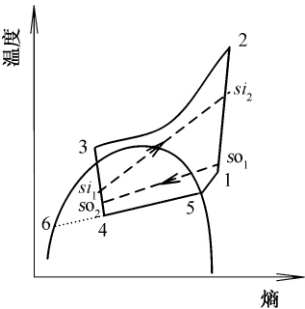


图 2 温-熵($T-s$)图
Fig.2 Temperature-entropy diagram

所建预测 R744/R290 混合工质热泵系统性能的模型已经得到实验验证, 实验研究及跨临界循环算法流程框图参见本课题组前期研究文献[10].

1.2 参数设定

根据相关国家标准^[16], 设计工况下热汇水进、出口温度分别取 17 和 65 ℃, 热源进出口温度分别取 20 和 15 ℃.

选取郑州为代表, 分别在不同季节条件下研究热泵系统的性能, 温、湿度如表 1 所示. 郑州地区饮用水源主要有两种, 地表水和深井水, 地表水取自南水北调丹江水库水或黄河水, 其使用区域更广, 因此选地表水作为第二换热流体, 水温随着室外空气温度的变化而变化, 自来水的压力大约为 0.30 MPa. 根据我国相关国家标准及热用户对用水温度的需求特点, 设定热汇水出水温度分别为 55, 65, 75 和 85 ℃. 气象参数取自文献[13].

表 1 郑州地区不同季节第二换热流体的温度、湿度
Tab.1 Temperature and humidity of second heat transfer fluids at different seasons in Zhengzhou

季节	代号	干球温度/ ℃	相对湿度/ %	供水温度/ ℃
冬季	W	1	54	5
过渡季	T	15	64	15
夏季	S	26	73	22

2 结果与讨论

2.1 设计工况系统特性

图 3 表示了回热器对系统制热性能系数 COP

的影响. 两种循环的制热 COP 均随着放热侧压力的升高而先增加后降低, 存在最优值, 对应的压力为最优放热侧压力. 设置回热器可使系统最优性能系数由 4.104 升高为 4.245, 提高了 3.4%. 最优放热侧压力由 9.6 MPa 降为 9.1 MPa, 利于安全运行. 当高压压力比最优压力高 0.5 MPa, 不带回热器系统的 COP 比最优 COP 降低 3.75%, 带回热器的 COP 降低 4.50%; 高压压力比最优压力低 0.5 MPa 时, 两个循环的 COP 均有约 7% 的降低量.

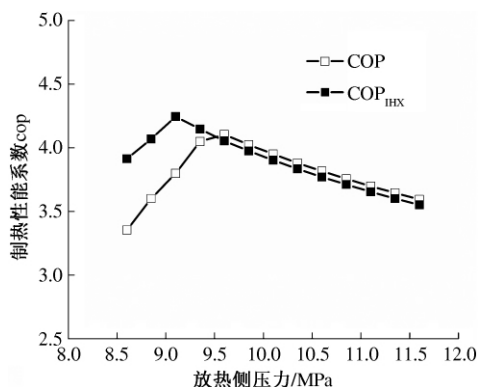


图3 回热器对系统性能的影响

Fig. 3 The effect of internal heat exchanger on the system performance

图4为3种不同压缩机等熵效率对应的系统性能. 可以看出, 等熵效率对制热 COP 影响较大, 对最优压力影响较小. 等熵效率为 0.70 时, COP 为 4.104, 最优压力为 9.60 MPa. 以等熵效率 0.70 作为比较基准, 等熵效率为 0.80 时, COP 提高了 10.79%, 最优压力基本维持不变; 等熵效率为 0.60 时, COP 降低了 9.02%, 最优压力降低了 2.63%. 等熵效率与压缩机类型有关, 因此, 开发高效压缩机对提高系统性能十分重要.

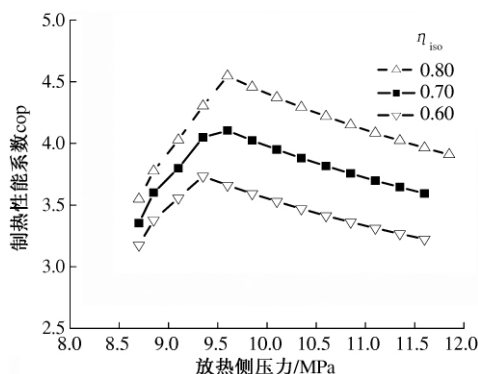


图4 压缩机等熵效率对系统性能的影响

Fig. 4 The effect of compressor isentropic efficiency on the system performance

2.2 变工况系统特性

图5为热汇水出水温度改变时系统性能的变化曲线. 3种工况下, 最优制热 COP 均随着热汇水出水温度的增加而降低, 最优压力随着出水温度的增加而增加. 过渡季节 T 和夏季 S 的最优 COP 比冬季大, 但 T 和 S 的最优压力也较高. 从图中还可看出, 该热泵装置可生产出 85℃ 的热水, 即使在冬季, 制热 COP 也可达到 3.084.

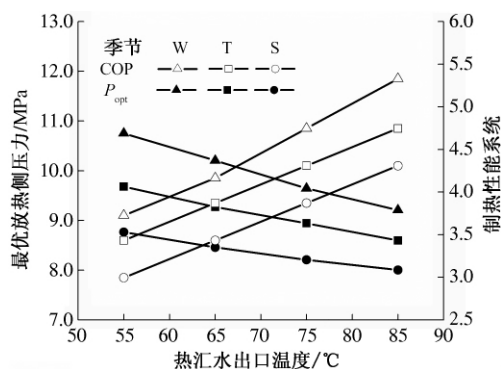


图5 改变出水温度时制热 COP, P_{opt} 的变化

Fig. 5 Variation of heating COP, P_{opt} and heat sink outlet temperature

笔者取蒸发压力下泡点温度和露点温度的算术平均值作为蒸发温度. 图6为3种工况下, 最优 COP 及最优放热侧压力和蒸发温度的关系. 在其他条件不变的情况下, 最优 COP 与蒸发温度成正比, 冬季 W 工况最优制热 COP 最低, 夏季 S 工况 COP 最高. 从图中可以看出, 在其他条件不变的情况下, 最优压力随着热汇出水温度增加而增加, 特别在夏季, 出水温度为 85℃ 时最优放热侧压力较高, 达到 11.85 MPa.

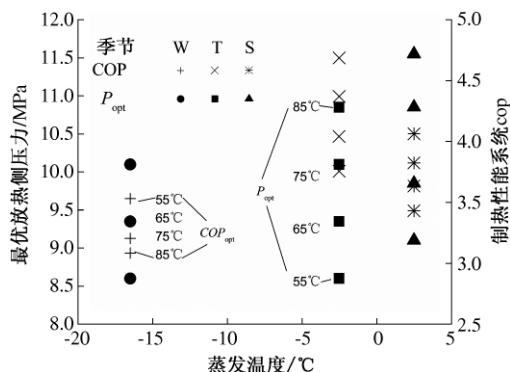


图6 改变蒸发温度时制热 COP, P_{opt} 的变化

Fig. 6 Variation of heating COP, P_{opt} and evaporation temperature

2.3 应用于郑州地区的 TEWIs 评价

根据气象资料, 可得到郑州市典型年室外空气干球温度的频率. 蒸发温度取决于空气的干球温度, 一般比空气干球温度低 10℃ 左右. 根据室外空气干球温度频率, 拟合出不同出水温度下制

热 COP 和蒸发温度的关联式,再根据室外空气干球温度频率估算全年不同蒸发温度出现的频率,得到 R744/R290 热泵系统应用于郑州地区不同热汇出水温度下的全年平均制热性能系数 COP. 计算结果如图 7 所示,可以看出,随着热汇水出水温度的增加,系统 COP 呈下降趋势,全年平均制热性能系数 COP 为 4.202.

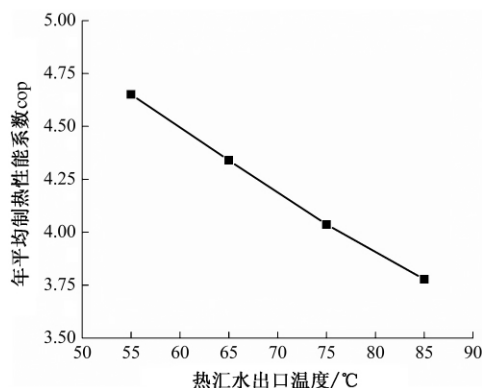


图 7 应用于郑州地区的年平均制热 COP
Fig. 7 Annual heating COP in Zhengzhou

假设 R744/R290 混合工质热泵热水器安装在郑州市的三口之家,制热负荷为 3.0 kW,初始制冷剂充注量为 0.90 kg,每年运行小时数为 3 000 h,使用寿命为 10 a,制冷剂的年泄漏量约为充灌量的 2%. 天然气和燃煤发电的 CO_2 排放量分别为 0.051 36 kg/MJ 和 0.264 2 kg/MJ,燃煤发电仍然是中国目前获取电力的主要方式,因此燃煤每产 1 kW/h 电能的 CO_2 排放量为 0.95 kg^[17]. 天然气折算成标准煤,确定其碳排放系数,再计算出每立方米天然气排放的 CO_2 量. 电热水器的效率取 0.90. 天然气的电能消耗忽略不计,假设燃烧效率为 0.95. 当前国内空气源热泵系统常用制冷工质是 HCFC22,因此 HCFC22 也被选择以计算比较 TEWI,其初始制冷剂充注量为 1.07 kg.

计算结果如图 8 所示,可以看出,煤电的 TEWI 最大, R744/R290 的 TEWI 最小;与 HCFC22 相比, R744/R290 减少了 18.76% 的 CO_2 排放量. 平均可减少 36.39% 的 CO_2 排放量. 计算结果还表明,在总 TEWI 中,直接温室效应所占的比例相当小,可以忽略不计.

3 结论

利用 EES 软件建立了 R744/R290 混合工质热泵系统分布参数模型,研究家用热泵热水器的系统性能,分别计算并讨论了设计工况下及应用

于中国中原地区典型城市—郑州市的系统综合性能变化规律. 基于模拟数据,估算了 TEWI 值. 结果表明,在设计工况下,最优制热 COP 为 4.104,最优放热侧压力为 9.70 MPa;由于最优压力高,对部件及连接管件的安全性要求较高. 基于郑州典型年的气象参数和当地用水条件,年平均制热 COP 为 4.202. 分析 TEWI 可以看出,与其他常用能源相比, R744/R290 热泵装置 CO_2 排放量平均减少 36.39%. 家用热泵热水器采用 R744/R290 作为替代工质可以达到高效环保的目的.

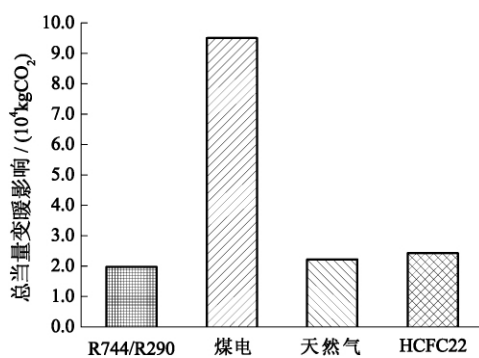


图 8 不同能源或工质的总 TEWI 比较

Fig. 8 Comparison of TEWIs for different energy

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部数据中心. 全国城市空气质量日报. [DB/OL]. [2015-03-01]. <http://datacenter.mep.gov.cn/>.
- [2] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [3] LORENTZEN G. The use of natural refrigerants: a complete solution to the CFC/HCFC predicament [J]. Int J Refrig, 1995, 18(3): 190-197.
- [4] KIM M H, PETERSEN J, BULLARD C W. Fundamental process and system design issues in CO_2 vapor compression systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 119-174.
- [5] SARKAR J, BHATTACHARYYA S. Assessment of blends of CO_2 with butane and isobutane as working fluids for heat pump applications [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(7): 1460-1465.
- [6] KOYAMA S, JIN Dong-xu, XUE Jun, et al. Experimental study on the performance of a CO_2 /DME system [C]//Proceedings of the 22nd International Congress of Refrigeration, E2. Beijing, China, 2007: 986.
- [7] KIM J H, CHO J M, KIM M S. Cooling performance

- of several CO₂/propane mixtures and glide matching with secondary heat transfer fluid [J]. *Int J Refrig*, 2008, 31 (5): 800–806.
- [8] CHO J M, KIM Y J, KIM M S. Experimental studies on the characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of CO₂/propane mixtures in horizontal and vertical smooth and micro-fin tubes [J]. *Int J Refrig*, 2010, 33 (1): 170–179.
- [9] CHO J M, KIM Y J, KIM M S. Experimental studies on the evaporative heat transfer and pressure drop of CO₂ and CO₂/propane mixtures flowing upward in smooth and micro-fin tubes with outer diameter of 5mm for an inclination angle of 45° [J]. *Int J Refrig*, 2010, 33 (5): 922–931.
- [10] KIM J H, CHO J M, LEE I H, et al. Circulation concentration of CO₂/propane mixtures and the effect of their charge on the cooling performance in an air-conditioning system [J]. *Int J Refrig*, 2007, 30 (1): 43–49.
- [11] GRAUSO S, MASTRULLO R, MAURO A W, et al. CO₂ and propane blends: Experiments and assessment of predictive methods for flow boiling in horizontal tubes [J]. *Int J Refrig*, 2011, 34 (4): 1028–1039.
- [12] 张仙平. 热泵系统用 R744 混合工质特性的研究 [D]. 上海: 东华大学环境科学与工程学院, 2011.
- [13] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] KLEIN S A. Engineering Equation Solver [CP]. Academic Commercial Ver 9.699, #2313, 2015.
- [15] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP) [DB]. NIST Standard Reference Database 23, Version 9.0, 2013.
- [16] 中国家用电器研究院, 美的集团有限公司, 等. GB/T23137—2008 家用和类似用途热泵热水器标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] 李方运. 天然气燃烧及应用技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.

Study on the Performance of a Heat Pump System Using R744-based Natural Binary Mixture

ZHANG Xian-ping^{1,2}, YANG Lei³, WEI Xin-li², WANG Fang³, CHEN Ai-dong¹

(1. Department of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The thermal model using EES (Engineering Equation Solver) is developed, and then the system performance of transcritical R744/R290 heat pump water heater is simulated with the meteorological and hydrological conditions in Zhengzhou, the typical city in central China. The total Equivalent Warming Impacts (TEWIs) are calculated with the simulation datum. The results show that the maximum heating system COP is 4.104 under the design condition without consideration of internal heat exchanger. When R744/R290 heat pump water heater is on operation in central China, the mean annual heating COP of 4.202 can be achieved. Compared with the hot water heater using other energy, the R744/R290 heat pump water heater is averagely decreased by 36.39% in the CO₂ emissions. It is also calculated and discussed how the internal heat exchanger and compressor isentropic efficiency influence the system performances respectively. Therefore, the R744/R290 based heat pump water heater is characterized by a higher energy efficiency and a very effective way for remarkably reducing CO₂ emissions.

Key words: R744; mixture natural refrigerant; heat pump; TEWI; smog

文章编号: 1671-6833(2015)05-0049-04

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

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 建立一种新型的太阳能-溴化锂溶液除湿-再生试验系统, 并用正交试验法对影响除湿效果的入口溶液质量分数、入口溶液温度、入口液气比、入口空气相对湿度、入口空气温度、溶液再生温度等诸多因素进行了实验分析. 结果表明: 对单位除湿量的影响程度由大到小排序为: 入口空气相对湿度、入口液气比、入口溶液温度、入口溶液质量分数、入口空气温度. 当系统入口液气比为 3.5 时, 系统的除湿效果较好. 同时, 利用闪蒸原理使系统溶液的再生温度控制在 60~70 °C 之间, 为太阳能-溴化锂溶液除湿器的设计、使用提供了依据.

关键词: 太阳能; 溶液除湿; 溴化锂; 正交试验法

中图分类号: TU831.7

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.011

0 引言

除湿是生产和生活中经常遇到的问题^[1]. 溶液除湿方法是采用吸湿性能强的盐溶液作为除湿剂, 如溴化锂溶液、氯化锂溶液、氯化钙溶液等, 盐溶液与被处理空气直接接触, 由于盐溶液表面的水蒸气分压力与被处理空气的水蒸气分压力间存在压差, 驱动水分在空气和吸湿溶液间传递, 从而实现空气湿度的改变^[2-3].

国内外众多学者对溶液除湿系统进行了研究. Florida Solar Energy Center 的 Swami^[4] 在 1998 年提出利用屋顶作为太阳能吸收表面对溶液进行再生的系统. Nelson 等^[5] 实验研究了 LiCl 溶液为除湿剂的除湿性能. Kabeel^[6] 搭建了一套由太阳能驱动的方案除湿蒸发冷却机组, 并进行了实验分析. 张小松等^[7] 建立了蓄能型液体除湿蒸发冷却系统, 并对除湿与再生性能进行了实验分析. 沈钰龙^[8] 实验测试了液体除湿空调中 LiCl 溶液为除湿剂的除湿与再生性能. 邹同华等^[9] 实验分析了 LiCl 溶液除湿系统的除湿性能, 但并没有研究溶液的再生温度. 杨金伟等^[10] 专门对 LiBr 的再生性能进行了研究. 国内外学者对 LiBr 的除湿性能研究较少, 由于在 PH 相同和浓度等效相等的情况下, 溴化锂的表面蒸气压、比热容、腐蚀性等理化性质优于氯化锂、氯化钙等除湿剂^[11], 鉴于

此, 笔者实验研究了以太阳能-溴化锂溶液为基础的除湿-再生系统及其影响除湿效果的因素, 并对溴化锂溶液的再生温度进行了分析, 为工程设计与应用奠定了基础.

1 溶液除湿-再生系统的建立

太阳能-溶液除湿-再生系统的原理如图 1 所示(图中箭头表示溶液流向). 主要由六部分组成: 1. 除湿器; 2. 太阳能加热器; 3. 溶液再生器; 4. 回热器; 5. 风冷器; 6. 溶液泵. 还有风机、喷头、填料、流量计、调压器等辅助设备. 其中除湿溶液为溴化锂溶液. T 为温度测点, Q 为流量测点, RH 为相对湿度测点.

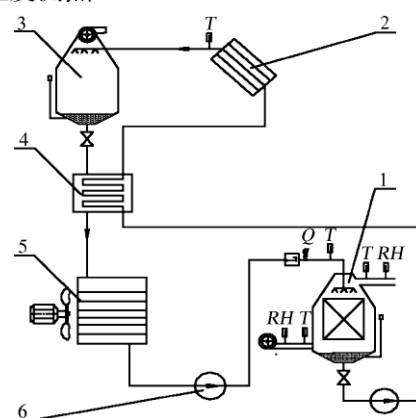


图 1 系统原理图

Fig. 1 The principle diagram of the system

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176174); 郑州大学大学生创新创业训练计划项目(1210459076)

作者简介: 王海峰(1957—), 男, 河南西华人, 郑州大学高级工程师, 硕士, 主要从事制冷、热泵、节能技术的研究,

E-mail: wanghaifeng@zzu.edu.cn.

2 正交试验方案的建立

本实验用正交试验方法来完成实验方案的设计,并找到影响除湿性能的主要因素.影响太阳能-溶液除湿系统性能的因素有进入除湿器的空气流量、入口空气温度、入口空气相对湿度、入口溶液质量分数、入口溶液温度、溶液流量、溶液再生温度等.

由于空气流量和溶液流量相互影响,本实验稳定溶液流量,通过调节入口空气流量,测得空气和溶液的相关参数,最终以液气比作为一个入口影响

因素.液气比定义为除湿器入口溶液与气体的质量流量之比.取入口液气比(A)、入口溶液质量分数(B)、入口溶液温度(C)、入口空气相对湿度(D)、入口空气温度(E)等5个因素,根据正交试验表选取 $L_{18}(3^7)$ 正交表^[12],正交设计见表1.最后研究了不同工况下溶液再生温度的变化情况.

3 实验结果与分析

实验中,当系统运行相对稳定时,开始记录数据,每组实验记录10组数据,每3 min记录一组数据,查询湿空气焓湿图并整理得表1.

表1 正交试验设计表及结果分析

Tab.1 Orthogonal experiment design and results analysis

实验	因素					出口空气含湿量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 干空气	出口空气 温度/ $^{\circ}\text{C}$	除湿量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 干空气	溶液再生 温度/ $^{\circ}\text{C}$
	A	B	C	D	E				
1	1.5	36%	27	65%	23	10.19	24	1.23	63
2	1.5	39%	30	72%	26	13.70	27	1.53	66
3	1.5	42%	33	80%	29	18.35	30	1.97	69
4	2.5	36%	27	72%	26	13.66	27	1.57	63
5	2.5	39%	30	80%	29	18.43	29	1.89	66
6	2.5	42%	33	65%	23	10.00	24	1.42	69
7	3.5	36%	30	65%	29	14.82	29	1.59	65
8	3.5	39%	33	72%	23	10.80	24	1.87	68
9	3.5	42%	27	80%	26	14.26	26	2.70	70
10	1.5	36%	33	80%	26	15.48	28	1.48	60
11	1.5	39%	27	65%	29	15.07	29	1.34	62
12	1.5	42%	30	72%	23	11.21	25	1.46	65
13	2.5	36%	27	80%	23	11.31	23	2.80	66
14	2.5	39%	33	65%	26	12.19	28	1.52	69
15	2.5	42%	30	72%	29	16.19	29	2.04	70
16	3.5	36%	33	72%	29	16.59	29	1.64	60
17	3.5	39%	27	80%	23	11.80	25	2.31	62
18	3.5	42%	30	65%	26	11.70	27	2.01	65
K_1	9.01	10.31	11.95	9.11	11.09				
K_2	11.24	10.46	10.52	10.11	10.81				
K_3	12.12	11.6	9.90	13.15	10.47				
\bar{K}_1	1.50	1.72	1.99	1.52	1.85				
\bar{K}_2	1.87	1.74	1.75	1.69	1.81				
\bar{K}_3	2.02	1.93	1.65	2.19	1.75				
R	0.52	0.21	0.34	0.67	0.10				

3.1 极差法分析

把每个因素的各个水平分组相加,则相当于把每个因素的实验结果分成了3组,分别用 K_1 , K_2 , K_3 表示,并求各自的算术平均值,最后计算各因素的极差.通过比较各因素极差的大小,可得影响因素的主次顺序为 $D > A > C > B > E$.造成这种顺序的原因与溶液、湿空气自身的物性、溶液与湿

空气的传热传质以及外界环境有关.入口空气相对湿度和入口液气比是影响除湿量的主要因素.因为入口空气相对湿度以及液气比直接影响气液两相的传质和传热过程,实际运行过程中,入口空气相对湿度由外界环境决定的,无法控制,而液气比是可以调节的,设计除湿系统时应重点考虑;其次是入口溶液温度和入口溶液质量分数,因为溶

液温度对表面水蒸气分压力的作用大于溶液质量分数的作用,故对除湿效果的影响更大;由于入口空气温度和出口空气温度的温差变化并不是很大,因而对除湿剂溶液除湿效果的影响也较小.由表1实验结果可知,最优组合^[12]为A3,B3,C1,D3,E1,即:液气比3.5,入口溶液质量分数42%,入口溶液温度27℃,入口空气相对湿度为80%,入口空气温度23℃.

3.2 分析结果

各个因素对除湿效果的影响如图2所示.由图2(a)可知,随着液气比的增加,除湿量也逐渐增加,但当液气比为3.5时,除湿量增加幅度明显放缓,且在实验中发现,液气比增加到一定程度,除湿量基本不发生变化.因为液气比很小时,待除湿空气是过量的,湿空气与溶液接触时间短,除湿量较小;随着液气比的增加,溶液与空气接触时间增加,除湿量有所增加;但液气比太大时,由空气带入的水蒸气量减少,除湿量增加缓慢.故在除湿过程中可以通过调节入口空气流量与溶液流量来改变系统除湿量,而且要想系统达到最佳除湿效果,必须要选择合适的液气比.

由图2(b)可知,随着入口溶液温度增加,除湿量减小.由于溶液温升,溶液表面水蒸气分压力升高,导致湿空气与溶液的水蒸气分压力差减少,除湿量减少,溶液温度过高时,除湿量会减少到零甚至为负值.故在系统中增加了回热器和风冷器,一方面可回收利用能量,另一方面对溶液充分冷却使溶液达到较低温度.

由图2(c)可知,随着入口溶液质量分数增加,除湿量增加.因为溶液质量分数增加时,浓度增加,溶液表面的水蒸气分压力减少,与空气中水蒸气分压力的压差增大,除湿量的增长越快.但溶液质量分数不能太大,否则溴化锂就会结晶析出,影响整个系统正常运行^[13].

由图2(d)可知,随着入口空气相对湿度增加,除湿量逐渐增加,几乎成正比关系.入口空气相对湿度大时,其水蒸气分压力大,湿空气与溶液表面的水蒸气分压力差增加,除湿量增加,故对空气含湿量大的地方除湿效果较好.

由图2(e)可知,入口空气温度变化(最大为6℃)时,除湿量变化较小(最大为0.1 g/kg干空气),说明入口空气温度对除湿效果影响较小.但出口空气温度会受入口空气温度以及入口溶液温度的影响,出口空气温度太高,说明除湿系统的整体性能不理想,会加重室内空调负荷.

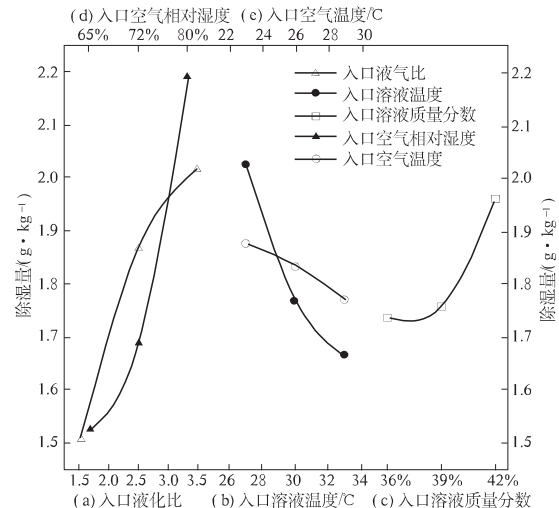


图2 除湿量随各个因素的变化

Fig. 2 Dehumidification capacity varies with each factor

3.3 溶液再生温度的分析

根据文献[14]可知,闪蒸初始压力不同时,即使相同溶液在闪蒸的除湿阶段,压力较低溶液的蒸发速度明显快于压力较高者.因此蒸发压力是决定蒸发速度的核心因素,压力越低蒸发速度越快,但压力也不能过低以防溶液结晶使得闪蒸过程终止.此外为了保证闪蒸过程能够持续不间断进行,必须将闪蒸过程中产生的水蒸气及时除去,从而在再生器中维持一个较低的水蒸气分压力.

实验过程中溶液的再生采用太阳能加热器,把溶液加热到适当温度后进入再生器,并通过离心风机的抽吸作用,使再生器内的压力较低,让溶液中的水蒸气发生闪蒸,在较低温度下就能获得较高的再生效率,这样可以减轻风冷器的负荷.

由表1可知,不同入口溶液质量分数所需要的再生温度不同,且溶液质量分数较大时所需的再生温度较高.故提高再生温度有利于溶液的再生.表中显示再生温度在60~70℃,实验过程中定时测量溶液的浓度,每个再生温度下都能保持稳定,说明此除湿系统能够在较低温度下实现溶液的再生.

4 结论

(1) 建立了太阳能-溴化锂溶液除湿-再生试验系统,通过实验得到了各入口参数对单位除湿量的影响程度,由大到小为:入口空气相对湿度>入口液气比>入口溶液温度>入口溶液质量分数>入口空气温度.

(2) 系统运行过程中,通过调整入口空气流量与溶液流量可改变系统的除湿量,当入口液气

比为 3.5 时,系统的除湿效果较好。

(3) 利用闪蒸原理,降低再生器的内部压力,再生温度为 60 ~ 70 °C 可以满足系统运行需求。

参考文献:

- [1] 张立志. 除湿技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 20 - 22.
- [2] 薛殿华. 空气调节 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 101 - 105.
- [3] 刘晓华, 江亿. 建筑节能技术与实践丛书 - 温湿度独立控制空调系统 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 42 - 46.
- [4] SWAMI Z. Theoretical and computational investigation of algorithms for simultaneous heat and moisture transport in buildings: task 2 final report [J]. Solar Energy, 1998, 89(B): 12 - 13.
- [5] NELSON F, GOSWAMI D Y. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration [J]. Solar Energy, 2002, 72(4): 351 - 361.
- [6] KABEEL A E. Augmentation of the performance of solar regenerator of open absorption cooling system [J]. Renewable Energy, 2005, 30(3): 327 - 338.
- [7] 张小松, 殷勇高, 曹毅然. 蓄能型液体除湿蒸发冷却系统中除湿性能的实验研究 [J]. 热科学与技术, 2004, 3(1): 60 - 64.
- [8] 沈钰龙, 柳建华. 液体除湿空调再生性能分析 [J]. 制冷, 2008, 27(1): 1 - 5.
- [9] 邹同华, 张涛, 马淑媛, 等. 溶液除湿系统除湿性能实验研究 [J]. 暖通空调, 2013, 43(1): 76 - 79.
- [10] 杨金伟, 裴刚, 林媛, 等. 溴化锂溶液除湿系统再生性能的研究 [J]. 热科学与技术, 2011, 10(4): 345 - 350.
- [11] 易晓勤. 常用溶液除湿剂的性质研究 [D]. 北京: 清华大学建筑学院, 2009: 57 - 73.
- [12] 夏伯忠. 正交实验法 [M]. 吉林: 吉林人民出版社, 1985: 1 - 22.
- [13] PATEK J, KLOMFAR J. Solid-liquid phase equilibrium in the systems of LiBr - H₂O and LiCl - H₂O [J]. Fluid Phase Equilibria, 2006, 250(1): 138 - 149.
- [14] 高文忠, 时亚茹. 混合除湿盐溶液液滴闪蒸机理 [J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3453 - 3459.

Investigation on Solar Energy-Lithium Bromide Solution Desiccant-Regeneration System

WANG Hai-feng, ZHANG Shou-bing, DONG Shan-shan, YUAN Hui-hui, LI Yu-duo

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

Abstract: Based on the solar energy-lithium bromide solution desiccant-regeneration test system, the influence of a range of factors at an inlet, such as solution mass fraction, solution temperature, liquid-gas ratio, relative humidity ratio of air and temperature, on export air moisture content were analyzed with the orthogonal experiment method in the experiment. The results show that the influence degree of them on the capacity of dehumidification from large to small is: relative moisture content air, liquid-gas ratio, liquid solution temperature, solution mass fraction, and the inlet air temperature. When liquid-gas ratio of the inlet was 3.5, the system had a better dehumidification effect. Meanwhile, based on the flash principle, the regeneration temperature of the solution system could be controlled within the range of 60 °C and 70 °C. The results provide the basis for the engineering design and application of the solar energy-lithium bromide solution dehumidifier.

Key words: solar energy; liquid dehumidification; lithium bromide; orthogonal experiment method

文章编号: 1671-6833(2015)05-0053-05

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

(郑州轻工业学院 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 单相流体的流动分配均匀性是影响平行流换热器性能的重要因素,也是两相流换热器研究的基础。提出一种16孔分流板结构,以水为工质,研究该分流板对流量分配均匀性的影响,并与无分流板换热器和12孔分流板换热器进行性能对比分析。结果表明:16孔分流板换热器的总流量分配不均匀度最小,流动分配均匀性达到最佳。16孔分流板换热器的总流量分配不均匀度分别比无分流板换热器和12孔分流板换热器减小76%~87.8%和10%~60%。当制冷剂流量为45~220 kg/h时,12孔分流板换热器的进出口压降比无分流板换热器增加8.3%~34.2%;而16孔分流板换热器的压降则只增加2.8%~12.4%。因此,16孔分流板的综合性能更好。

关键词: 平行流换热器;分流板;流量分配;单相

中图分类号: TB657 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.012

0 引言

换热器作为通用设备,广泛应用于制冷空调、能源动力等众多行业。其中,平行流换热器由于结构紧凑、重量轻、体积小和单位体积内换热面积大等优点而备受关注。研究发现,平行流换热器的制冷剂流量分配不均会导致换热器性能下降20%^[1]。在两相流状态下,扁管各通道中制冷剂的流量分配不均匀性更差,时常出现“干蒸”和“供液过多”问题,严重影响了换热性能。制冷剂流量分配不均匀已经成为降低平行流换热器实际性能和制约其发展的一个重要因素^[2]。国内外众多学者对此展开了大量的实验和模拟研究。

Shi等^[3]提出在封头中安装分流板,对制冷剂流量进行二次分配,以提高平行流换热器内流量分配的均匀性,并以R134A为工质,对两流程24排扁管的平行流换热器进行实验研究。结果表明,合理布置分流板结构能有效提高蒸发器流体分配均匀性,从而提高制冷量。刘巍和朱春玲^[4-5]在平行流蒸发器进口集流管中安装分流板,并对分流板上的开孔数量、位置及开孔面积进行研究。研究结果表明:分流板上的开孔数量和位置对蒸发器的流动与换热性能影响很大,且分流板的开

孔孔径存在一个最佳值,使蒸发器阻力损失和制冷剂流量分配均匀性的匹配性最好。Kim等^[6-7]以R134A为制冷剂,实验研究了3种不同的流动入口结构对平行流换热器中流动分布均匀性的影响。研究表明:垂直式和竖直式入口结构生成的流动分布比较相似,平行式入口的流体流动分布均匀性最差。Bowers等^[8]以R134A为制冷剂实验研究了扁管插入集流管高度和入口长度的影响。陆平等^[9]采用计算流体力学(CFD)方法对微通道平行流气冷器内流量分配性能进行计算研究,分析进出口集流管与扁管间多种不同组合尺寸、扁管长度等参数对流量分配、压降特性的影响。张丽娜等^[10]对微通道平行流气冷器中扁管与集流管的组合结构进行了一系列优化设计,对产品的工程应用具有一定的指导意义。

目前,国内外学者对平行流换热器流动分配均匀性的研究多集中在集流管尺寸、集流管入口位置、扁管插入集流管高度、流体流动方向等方面,而对分流板的研究相对较少。因此,笔者以汽车空调系统中常见的24通道两流程结构形式的平行流换热器为例,提出一种16孔新型分流板结构,并对平行流换热器流体分配特性进行数值模拟,从而提高换热器的流量分配均匀性。平行流冷

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476148); 河南省杰出青年基金项目; 郑州领军人才资助项目(131PLJRC640)

作者简介: 吴学红(1979—),男,河南固始人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要从事制冷与低温设备节能技术和能源利用与环境控制方面的研究, E-mail: wuxh1212@163.com.

凝器中,压缩机排出的高温高压制冷剂以过热蒸汽状态流经进口集流管进入换热器各扁管中. 分配过程中,由于入口管中流体的射流及重力等的影响,存在单相流体分配不均匀的现象,导致换热器整体性能下降. 笔者针对平行流换热器中单相流体的流动分配问题进行研究,以水作为模拟工质,廉价易得,亦方便与后续以水为工质的流量分配实验研究进行对比.

1 研究对象

笔者主要研究无分流板换热器、12 孔分流板换热器和 16 孔分流板换热器的流动特性.

1.1 实物模型

笔者所研究的平行流换热器由扁管、百叶窗翅片、集流管及分流板构成,如图 1. 换热器分两流程,每个流程有 24 排扁管. 流程图如图 2. 从图 2 可以看出,分流板安装在平行流换热器第 1 流程的进口集流管中. 分流板的安插方向与扁管的安插方向垂直,且平行于流体沿集流管的入流方向. 平行流换热器结构尺寸及零部件参数如表 1 所示. 图 3 为扁管与集流管的截面示意图.

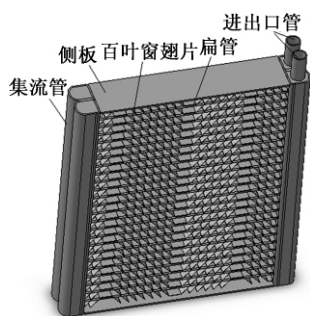


图 1 平行流换热器结构图

Fig. 1 Schematic of parallel-flow heat exchanger

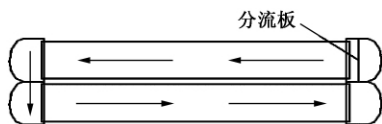


图 2 工作流程图

Fig. 2 Work flow chart

表 1 平行流换热器参数

Tab. 1 Parameters of parallel-flow heat exchanger

参数	数值
芯体尺寸/mm	215.5 × 240.0 × 40.0
扁管尺寸/mm	200 × 16 × 2
扁管数量	24 × 2
扁管间距/mm	9.4
分流板尺寸/mm	240 × 18

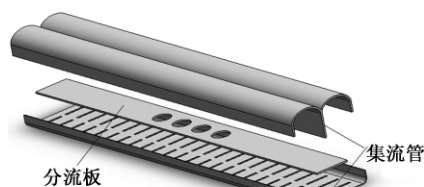


图 3 集流管结构图

Fig. 3 Schematic of manifold

1.2 计算模型

1.2.1 分流板结构

分流板是调节平行流换热器中制冷剂流量分配的关键部件. 分流板上的开孔相当于流体流量的二次分配入口,通过改变开孔的尺寸、数量和位置,可以直接影响制冷剂流量分配的均匀性. 图 4 所示为前人提出的 12 孔分流板. 图 5 为笔者提出的 16 孔分流板. 16 孔分流板是根据无分流板换热器与 12 孔分流板换热器中制冷剂流动分布情况以及集流管中的压力分布优化提出的.

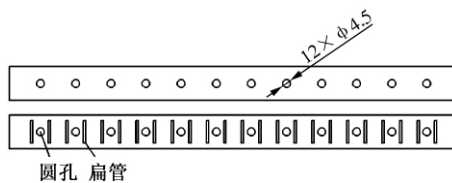


图 4 12 孔分流板结构图

Fig. 4 Schematic of 12-hole deflector

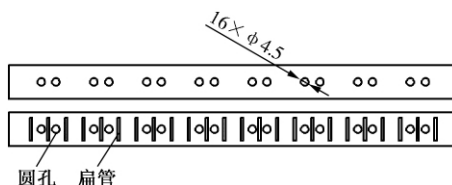


图 5 16 孔分流板结构图

Fig. 5 Schematic of 16-hole deflector

1.2.2 计算区域

将进口集流管、分流板及扁管作为计算区域,如图 6. 集流管长度为 240 mm,直径 20 mm. 扁管间距 9.4 mm. 扁管插入集流管的深度为 4.5 mm,扁管入口端面距离分流板 1 mm. 将多孔扁管简化为具有一个通道且流通面积相同的矩形扁管,流体流动通道的形状、大小及总流通面积不变,对流动分布特性没有影响.

1.2.3 边界条件及计算方法

由于笔者只考虑换热器内流体流动分配性能,因此,并未考虑温度边界条件. 计算区域入口为速度入口边界条件;出口为压力出口边界条件,共 24 个出口. 采用双精度计算,并根据流速选择

层流模型和湍流模型.采用稳态计算求解,近壁处节点采用标准壁面函数法处理,湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,动量方程的离散采用二阶迎风格式,其余物理量采用一阶迎风格式^[11].迭代运算过程中,计算收敛判断依据为各项残差下降到 10^{-5} 以下.

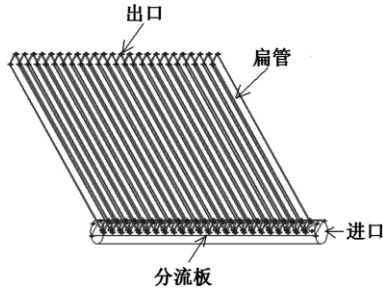


图6 计算区域

Fig. 6 Computational domain

用 Gambit 软件对模型进行网格划分.扁管采用结构化网格划分,入口集流管采用非结构化网格划分.以 16 孔分流板换热器为例,网格独立性验证如表 2 所示.本次计算采用的网格数为 35.2 万.

表2 网格独立性验证表

Tab.2 Table of the grid independence test

网格数	S 变化百分比
29.5 万	1.1%
35.2 万	1.4%
55.5 万	

2 计算结果与分析

在 0 ~ 220 kg/h 范围内从小到大依次选取 45、90、110、130、170 和 220 kg/h 这 6 个不同的流量值,对比不同入口流量条件下 3 个计算模型中流体分配均匀性.

为评估计算区域中 24 根扁管内的流量分配特性,沿集流管中流体的入口流向,从上至下对扁管依次编号,并定义扁管流量分配不平衡度 E_i 和总流量分配不均匀度 S ^[12] 两个参数.这两个参数的定义式为

$$E_i = \frac{m_i - m_a}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{m_a} - 1 \right)^2}. \quad (2)$$

式中: m_i 为第 i 根扁管内流体流量, kg/s; m_a 为平

均单根扁管内流体流量, kg/s; n 为扁管总数.

图 7 所示为不同 Re 数下无分流板换热器各扁管中流量分布情况.该现象与文献[10]中所列情况相一致,由此证明模拟的正确性.从中可以看出,无分流板换热器的流量分配不均现象比较严重,流量分配均匀性随 Re 数的变化而变化,稳定性较差.因此,换热器的理论设计与实际性能偏差较大.其中,1 号扁管中流体流量最小.这是由于 1 号扁管与进口集流管连接处的流通面积减小,该处流速大大提高,动压变大,静压减小,从而 1 号扁管的流体流量始终比其它扁管的流量小.

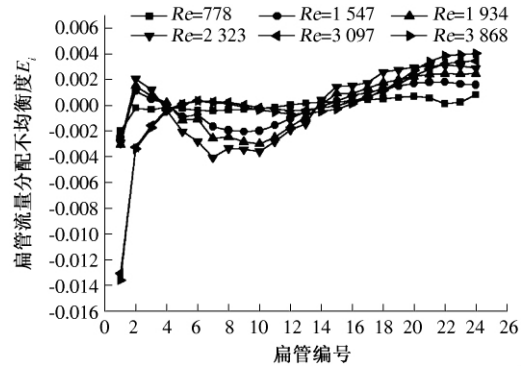
图7 无分流板换热器各扁管的 E_i 值Fig. 7 Flow maldistribution of flat tubes E_i in heat exchanger of no deflector

图 8 为 12 孔分流板换热器在不同 Re 数下各扁管的流量分布规律.对比图 7 和图 8 可以看出,与无分流板换热器相比,12 孔分流板换热器各扁管中流量分配不平衡度 E_i 有所改善,流体分配均匀性增加.其 E_i 值缩小到 ± 0.002 之间.但当 Re 数大于 3 320 时,各扁管中流量分配不均现象开始明显增加,此时曲线震荡较为严重.

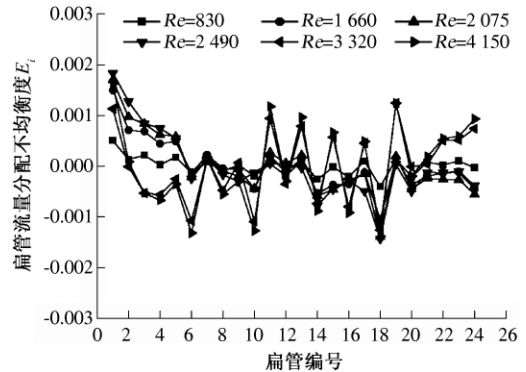
图8 12孔分流板换热器各扁管的 E_i 值Fig. 8 Flow maldistribution of flat tubes E_i in heat exchanger of 12-hole deflector

图 9 为笔者提出的 16 孔分流板换热器中扁管流量分配不平衡度 E_i 图.对比图 7 和图 9 可以明显看出,16 孔分流板换热器的流体流量分配均

匀性比无分流板换热器好. 其 E_i 值范围与 12 孔分流板换热器的基本相同, 均在 ± 0.002 之间. 当 Re 数小于 3 320 时, 各扁管的 E_i 曲线更加收敛, 接近于 0. 与 12 孔分流板换热器相比, 当 Re 数大于 3 320 时, 16 孔分流板换热器明显改善了 3 号、6 号、23 号扁管之外的其它各扁管中流量分配均匀性.

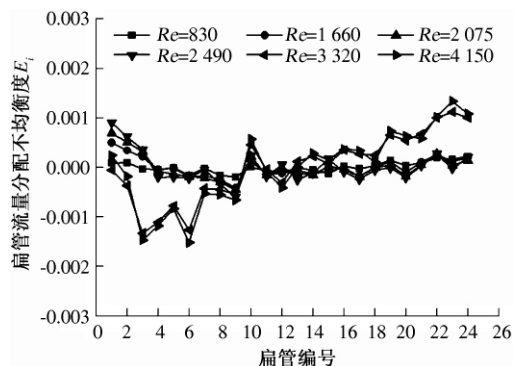


图 9 16 孔分流板换热器各扁管的 E_i 值

Fig. 9 Flow maldistribution of flat tubes E_i in heat exchanger of 16-hole deflector

3 个计算模型的总流量分配不均匀度 S 如图 10. 总流量分配不均匀度的物理意义为各扁管中流体流量与换热器平均流量的离散程度. S 值越小, 表明流量分配越均匀. 从图 10 可以看出, 不同流量下 16 孔分流板换热器的 S 值均最小. 随着入口流量的增加, 3 个计算模型中总流量分配不均匀度 S 变大. 其中, 12 孔和 16 孔分流板换热器的 S 值变化较小; 无分流板换热器的 S 值变化较大, 稳定性较差. 16 孔分流板换热器的 S 值比无分流板换热器和 12 孔分流板换热器分别减小 76% ~ 87.8% 和 10% ~ 60%. 流量为 45 ~ 170 kg/h 时, 16 孔分流板换热器的流动分配更加均匀; 当流量大于 170 kg/h 时, 16 孔分流板与 12 孔分流板的性能相差较小, 为 10%. 因此, 不同流量下, 16 孔分流板换热器的流体流动分配均匀性最好.

表 3 所示为不同入口流量下, 3 种计算模型的流体进出口压降. 从中可以看出, 无分流板换热器的流体进出口压降最小. 12 孔分流板换热器和 16 孔分流板换热器的进出口压降分别比无分流板换热器增加 8.3% ~ 34.2% 和 2.8% ~ 12.4%. 通常情况下, 微通道蒸发器内制冷剂的质量流量约为 120 kg/h, 此时, 12 孔分流板换热器和 16 孔分流板换热器的压降分别比无分流板换热器增加 18.3% 和 4.5%. 可以看出, 与 12 孔分流板换热器相比, 16 孔分流板换热器的压降增加幅度

更小.

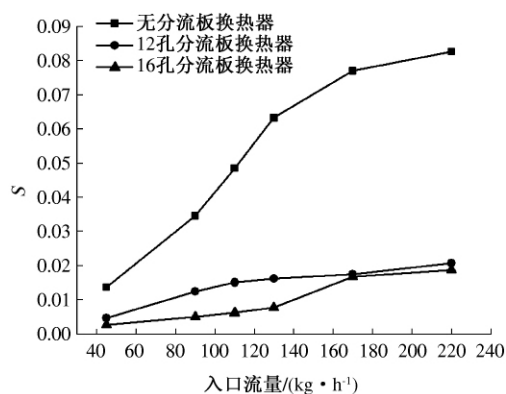


图 10 不同流量下 3 种模型的 S 值

Fig. 10 Total flow maldistribution S of the three models under different flow rates

表 3 3 种计算模型中流体进出口压降

Tab. 3 Pressure drops in the three computational models

流量 $/(kg \cdot h^{-1})$	进出口压降 $\Delta P/Pa$		
	无分流板 换热器	12 孔分流 板换热器	16 孔分流 板换热器
45	54.5	59.0	56.0
90	118.3	135.3	122.6
110	153.5	179.7	160.0
130	191.0	228.3	200.0
170	295.2	378.2	324.2
220	386.3	518.3	434.2

3 结论

以水为工质, 针对平行流换热器提出 16 孔分流板结构, 并与无分流板换热器和 12 孔分流板换热器对比, 进行流量分配特性的数值研究.

(1) 无分流板时, 平行流换热器中流体流量分配均匀性较差, 1 号扁管中流量最小.

(2) 12 孔分流板平行流换热器的流量分配均匀性较无分流板换热器有很大提高, 其总流量分配不均匀度 S 比无分流板换热器降低了 64.2% ~ 77.4%. 当制冷剂流量在 45 ~ 220 kg/h 之间时, 12 孔分流板换热器的进出口压降比无分流板换热器增加 8.3% ~ 34.2%.

(3) 16 孔分流板换热器的总流量分配不均匀度 S 最小, 流量分配均匀性达到最佳. 16 孔分流板换热器的 S 值分别比无分流板换热器和 12 孔分流板换热器减小 76% ~ 87.8% 和 10% ~ 60%. 当制冷剂流量在 45 ~ 220 kg/h 之间时, 16 孔分流板换热器的进出口压降仅比无分流板换热器增加

2.8% ~ 12.4%.

因此,本次研究的16孔分流板在总流量分配不均衡度和流体进出口压降上均能达到较好的效果. 而它在改善换热器内流体分配均匀性的同时,对提高传热性能所带来的具体影响,仍需在后续工作中进一步研究.

参考文献:

- [1] KULKARNI T, BULLARD C W, CHO K. Header design tradeoffs in microchannel evaporators [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24 (5/6): 759 – 776.
- [2] 鲁红亮,陶红歌,胡云鹏,等. 平行流换热器中热流体分布均匀性的研究进展 [J]. *制冷学报*, 2010, 31 (6): 39 – 45.
- [3] SHI Jun-ye, QU Xiao-hua, QI Zhao-gang, et al. Investigating performance of microchannel evaporators with different manifold structures [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(1): 292 – 302.
- [4] 刘巍,朱春玲. 分流板开口面积对微通道平行流蒸发器性能的影响 [J]. *制冷学报*, 2014, 35(3): 58 – 64.
- [5] 刘巍,朱春玲. 分流板结构对微通道平行流蒸发器性能的影响 [J]. *化工学报*, 2012, 63 (3): 761 – 766.
- [6] KIM N H, KIM D Y, BYUN H W. Effect of inlet configuration on the refrigerant distribution in a parallel flow minichannel heat exchanger [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(5): 1209 – 1221.
- [7] KIM N H, LEE E J, BYUN H W. Two-phase refrigerant distribution in a parallel flow minichannel heat exchanger having horizontal headers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55 (25/26): 7747 – 7759.
- [8] BOWERS C D, HRNJAK P S, NEWELL T A. Two-phase refrigerant distribution in a micro-channel manifold [J]. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue 11th*, 2006.
- [9] 陆平,陈江平,陈芝久. 微通道平行流气冷器流量分配的数值模拟 [J]. *应用科学学报*, 2007, 25 (3): 317 – 322.
- [10] 张丽娜,刘敏珊,董其伍. 超临界 CO₂ 汽车空调气冷器分配性能研究 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2011, 32(3): 23 – 27.
- [11] 吴金星,李俊超,潘彦凯,等. U型地埋管换热器的传热性能数值模拟 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2013, 34(6): 108 – 111.
- [12] HABIB M A, BENMANSOUR R, SAID S A M, et al. Evaluation of flow maldistribution in air-cooled heat exchangers [J]. *Computers and Fluids*, 2009, 38 (3): 677 – 690.

Study on the Uniformity of Flow Distribution of the Parallel-flow Heat Exchanger

WU Xue-hong, MENG Hao, DING Chang, GONG Yi, LU Yan-li

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The distribution uniformity of single-phase fluid is an important factor that affects the performance of parallel-flow heat exchanger, which is also the basis of investigating two-phase flow heat exchanger. A 16-hole deflector is proposed in this paper to study the influence of the 16-hole deflector on the distribution uniformity with the cryogen of water. The performance of heat exchanger of the 16-hole deflector is compared with that of no deflector and the 12-hole deflector. The results show that the total flow maldistribution S of parallel-flow heat exchanger of the 16-hole deflector is the minimum, and the distribution uniformity is the best. S of parallel-flow heat exchanger with the 16-hole deflector decreases 76%–87.8% and 10%–60% compared with that of no deflector and 12-hole deflector, respectively. When the flow rates are between 45 kg/h and 220 kg/h, the pressure drop of heat exchanger of 12-hole deflector increases 8.3%–34.2% than that of no deflector, however, the pressure drop of heat exchanger of 16-hole deflector increases only 2.8%–12.4%. In conclusion, the comprehensive performance of the heat exchanger of 16-hole deflector in the three models is better.

Key words: parallel-flow heat exchanger; deflector; flow distribution; single-phase

文章编号: 1671-6833(2015)05-0058-05

带外套管钢管混凝土柱与钢梁节点力学性能研究

刘 坚¹, 高 奎¹, 周观根², 陈 原¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 浙江东南网架股份有限公司, 浙江 杭州 311209)

摘 要: 在总结以往钢管混凝土柱与钢梁连接节点不足的基础上, 提出了新型带外套管式钢管混凝土柱与钢梁单边螺栓连接节点, 通过已有的试验研究和理论分析, 考虑构件的初始几何缺陷和混凝土的塑性损伤本构, 在与试验对比后, 分别建立了带和不带外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的有限元模型. 通过对模型进行单调加载, 分析节点的破坏和工作机理; 然后对节点进行参数分析, 总结出影响节点初始刚度和承载力的主要因素; 提出外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的 $M-\theta_r$ 实用模型. 结果表明: 带外套管式钢管混凝土-钢梁端板连接节点具有更大的初始刚度、承载力, 提出节点的 $M-\theta_r$ 曲线实用计算方法与有限元计算出的 $M-\theta_r$ 曲线吻合较好, 研究将为外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点在实际工程中的应用提供参考.

关键词: 外套管; 钢管混凝土柱-钢梁连接节点; $M-\theta_r$ 实用模型; 力学性能

中图分类号: TH133.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.013

0 引言

钢管混凝土以其优越的性能广泛应用于工程实际中^[1]. 近年对钢管混凝土柱-钢梁半刚性连接研究比较多的是穿芯螺栓端板式连接, 试验和理论分析表明这种连接方式具有良好的抗震性能^[2-4], 不足是这种节点构造比较复杂, 节点在实际应用过程中不仅受截面形式的影响, 而且要在钢管混凝土柱各个方向同时连接钢梁, 施工比较困难. 单边螺栓的出现较好地解决了这一问题, 众多试验表明: 单边螺栓钢管混凝土柱节点, 具有较好的承载能力和抗震性能^[5-6]. 然而内置在钢管内的螺栓缺少与混凝土的锚固, 节点域内的钢管柱壁由于受到螺栓的拉力作用会发生明显的外凸变形^[3], 这不仅降低了节点的承载能力, 而且钢管柱壁的破坏将加速整体结构破坏, 阻碍了单边螺栓连接的钢管混凝土柱-钢梁连接节点进入工程实践. 一些学者提出了如多样式模型、B3 样条模型等半刚性节点的 $M-\theta_r$ 曲线计算模型^[7], 这些模型都是针对型钢柱与钢梁半刚性连接节点的, 对钢管混凝土柱钢梁半刚性节点 $M-\theta_r$ 计算

模型研究较少.

为解决上述问题, 从加强节点域钢管柱壁的角度出发, 提出了新型外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点, 与以往的单边螺栓钢管混凝土柱-钢梁连接节点不同的是在节点域的钢管柱壁外套一个加强管, 其目的是保护节点域钢管柱壁, 防止其在受力的情况下外凸变形. 通过对提出的新型外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点建立有限元模型, 进行单调加载, 与不加外套管的钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点进行对比, 分析外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点的破坏和损伤机理, 并针对此连接方式提出实用的 $M-\theta_r$ 模型, 为此类新型节点在实际工程应用提供参考.

1 新型节点的设计、建模与验证

1.1 节点试件设计

为更深入地分析带外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的静力性能, 分别建立带外套管式和不带外套管式圆钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点的分析模型, 编号为 ECD1、

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 住宅和城乡建设部科技计划项目(2012-K2-8); 广东省教育厅科技创新项目(2012-KJCX-0084); 浙江东南网架股份有限公司横向项目(SM-0716-01)

作者简介: 刘坚(1964—), 男, 广州大学教授, 博士, 主要从事钢结构、钢与砼混(组)合结构研究, E-mail: 787196372@qq.com.

ECD2. 钢管混凝土柱截面为圆形截面, 直径为 200 mm, 厚度为 8 mm, 柱高 1 600 mm; 钢梁截 H300 mm × 150 mm × 6 mm × 10 mm, 梁长为 1 600 mm; 试件端板厚度均为 18 mm; 每个节点的连接处均设置 4 排 2 列; ECD1 节点试件外套管厚度为 18 mm; 螺栓节点连接螺栓采用 M24 高强螺栓; 钢管混凝土柱轴压比取 0.2.

1.2 有限元建模

有限元模型中钢材和螺栓的本构关系均采用双线性随动强化准则, 强化阶段弹性模量设为 0.01E; 混凝土本构采用文献 [8] 提出的等效应力-应变关系模型; 所有组件均采用八节点一阶线性减缩积分格式的三维实体单元 (C3D8R); 各构

件之间均采用 Coulomb 摩擦模型, 并考虑界面粘结的影响. 柱翼缘与端板、螺栓、螺栓与端板之间的摩擦系数均取 0.45.

1.3 试验验证

为验证材料模型、界面接触及单元类型对分析钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点的适用性, 对文献 [9-10] 中不带外套管单边螺栓节点试件 CJM1、MES1 进行有限元模拟, 计算结果与试验结果对比见图 1. 从图 1 中可以看出有限元模拟结果值比试验值稍大, 误差范围在 3% 以内, 在允许范围内. 证明有限元建模方法可靠合理.

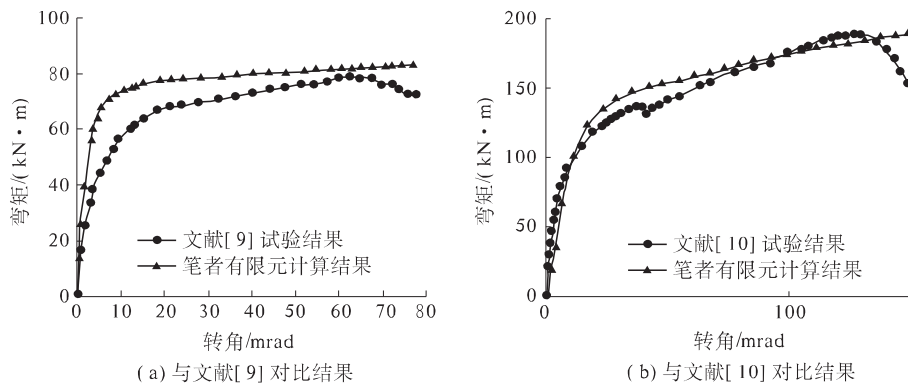


图 1 $M-\theta_r$ 曲线的非线性有限元分析结果和试验结果进行对比

Fig. 1 Comparison between moment versus rotation curves predicted by FEM and tests

2 单调荷载下新型节点的破坏和工作机理研究

对 2 个有限元分析模型梁进行梁端单调加载, 加载位移为 120 mm, 详细研究了节点荷载-位移变形的全过程. 带外套管式和不带外套管式钢管混凝土柱钢梁连接节点试件的应力云图和钢管的应力云见图 2. 从图 2 中可以看出试件 ECD1 端板基本没有变形, 节点域钢管柱壁没有发生平面外变形, 钢梁下翼缘鼓曲明显; 试件 ECD2 端板脱离柱壁, 节点域钢管柱壁发生轻微的平面外变形, 钢梁下翼缘鼓曲明显; 计算得出试件 ECD1 节点初始刚度和极限承载力为 58 kN · mm/mrad、500 kN · mm, 试件 ECD2 节点初始刚度和极限承载力为 53.2 kN · mm/mrad、450 kN · mm.

通过对 2 个节点试件的变形状况分析, 可以得到外套管在单边螺栓钢管混凝土柱-钢梁连接节点中所起的主要作用有: ①保护节点域钢管柱壁, 防止其发生平面外变形, 降低节点的承载能力; ②减小端板变形, 保证节点域不发生较大的剪

切变形; ③保证节点破坏发生在梁端, 使其达到“强连接, 弱构件”的要求; ④提高连接节点的初始刚度和承载力.

3 外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点参数化研究

对新型节点进行参数分析, 分析参数包括端板厚度 (t_{ep})、钢材屈服强度 (f_y)、截面含钢率 (σ)、外套管厚度 (t_c). 图 3 为不同参数下节点的 $M-\theta_r$ 曲线. 从图 3(c) 可以得到截面含钢率对新型节点初始刚度和极限承载力影响不大; 从 (a)、(d) 可以看出随着端板和外套管厚度增加, 节点的初始刚度和极限承载力也有一定的提高, 当端板厚度和外套管厚度达到一定程度时, 再加大端板和外套管的厚度, 该节点的初始刚度和承载力不再增加; 从图 3(b) 可以得到, 钢材的屈服强度是影响该节点承载力的最重要因素, 随着钢材屈服强度增加, 该节点的承载力增加比较明显.

由于外套管对新型节点域钢管柱壁的约束作用, 且柱的线刚度远大于梁, 加载位置又设置在梁

端,所以柱截面含钢率对节点的初始刚度和承载力影响不明显;端板厚度较薄时,对梁端进行加载,端板首先屈服,增加端板厚度,新型节点的初始刚度和承载力都提高,端板厚度达到一定程度时,节点屈服首先发生在梁端,再增加端板的厚度,对节点初始刚度和承载力的影响并不明显;外套管在节点域起着环向约束作用,笔者选取的钢

管柱壁较厚,所以增加外套管的厚度,节点的承载力和初始刚度变化不大.由新型节点的破坏模式可知,对于钢管柱壁较薄的节点,增加外套管厚度,必然能提高节点的承载力和初始刚度.在工程实践中应从钢材的屈服强度、端板厚度和外套管的厚度,改善外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的初始刚度和承载力.

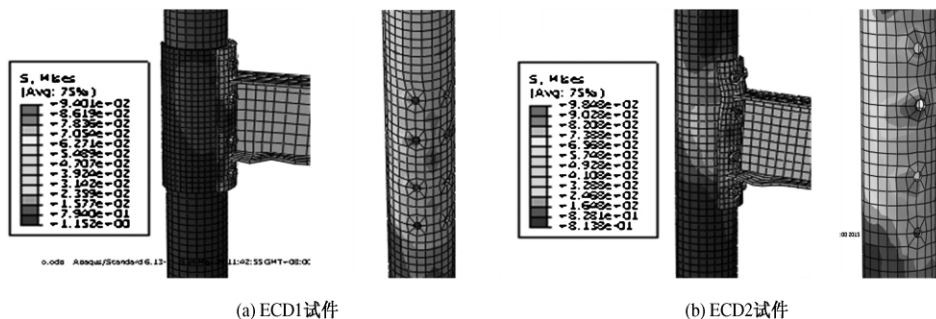


图 2 2 个试件应力云图对比
Fig. 2 Stress nephograms comparison of specimen

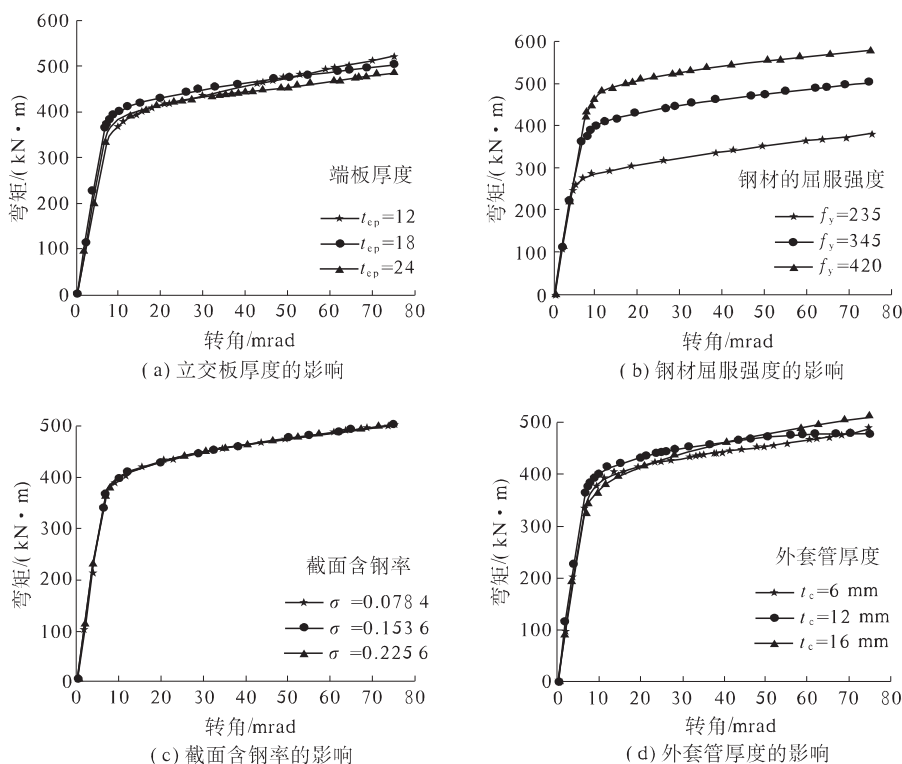


图 3 不同参数下节点 $M-\theta_r$ 曲线的对比
Fig. 3 Comparison of moment versus rotation curves under different parameters

4 $M-\theta_r$ 实用模型

虽然有限元分析能够较准确地计算连接弯矩-转角关系曲线,但设计耗时较多,另一方面试验研究又不具有通用性,不便于日常设计应用.描述节点连接弯矩-转角关系常用的方法是通过大

量试验数据或有限元分析结果进行拟合而提出连接的 $M-\theta_r$ 关系模型.

为简化计算过程,笔者选用文献[11]提出的半刚性端板连接节点的 $M-\theta_r$ 模型拟合带外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的 $M-\theta_r$ 曲线,其表达形式为

$$M = \begin{cases} k_{in}\theta_r & \theta_r < \theta_p \\ M_{pc} + k_{st}(\theta_r - \theta_p) & \theta_r \geq \theta_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 、 M_{pc} 分别为节点承受的弯矩和节点塑性弯矩; θ_r 为节点相对转角; k_{in} 、 k_{st} 分别为节点初始刚度和强化阶段转动刚度; θ_p 为塑性弯矩对应的节点转角。

(1) 新型节点的初始刚度. 节点变形与端板变形、柱翼缘变形、螺栓伸长变形都有关系^[11], 由于笔者提出的新型节点在节点域有外套管的作用, 导致钢管混凝土柱翼缘基本不参与节点变形, 所以在外套管厚度确定的情况下计算初始转角时, 只考虑端板变形和螺栓伸长变形。

将端板连接简化成 T 型件分析可得到 k_{in} 与 θ_r 的关系式^[11]。

$$k_{in} = Fh_1/\theta_r \quad (2)$$

式中: F 为梁翼缘等效轴力。

对于端板引起的转角, 在初始阶段, 忽略端板外伸处的撬力作用, 并认为端板与柱翼缘同步转动, 同时将螺栓处端板简化为铰接, 梁翼缘作为定向支座, 即可求出端板在水平方向的位移, 进一步求出端板变形引起的转角为

$$\theta_{ep} = Fe_f^3/(6EI_{ep}h_1) \quad (3)$$

式中: EI_{ep} 为端板的抗弯刚度; h_1 为梁高; e_f 为第一排螺栓孔中心至梁翼缘顶端的间距。

在初始状态下螺栓预拉力未被克服, 伸长变形非常小; 因钢管混凝土柱的线刚度非常大, 变形

也很小. 利用已经分析的结果, 进行回归计算, 得到节点总转角为

$$\theta_r = 1.1\theta_{ep} \quad (4)$$

将式(3)、(4)、(5)带入式(2), 得到带套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的初始刚度为:

$$k_{in} = h_1^2/(1.1(e_f^3/(6EI_{ep}))) \quad (5)$$

(2) 新型节点塑性弯矩. 钢管混凝土柱框架结构连接节点的抗震设计准则是强节点弱构件, 因此, 对于合理的节点设计, 节点塑性弯矩不会小于梁截面塑性弯矩, 所以为方便起见, 可近似取

$$M_{pc} = M_{pb} \quad (6)$$

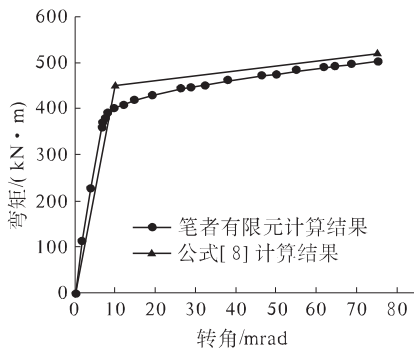
(3) 新型节点强化阶段转动刚度. 强化阶段转动刚度, 根据本文第3节, 节点试件参数分析统计可得

$$k_{st} = 0.01k_{in} \quad (7)$$

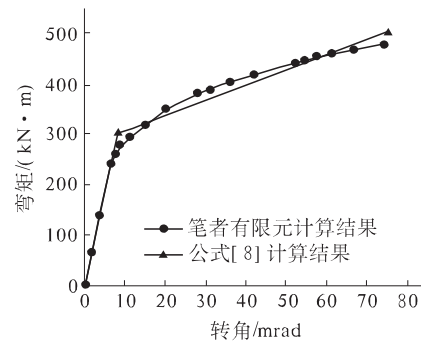
综上可得外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的 $M-\theta_r$ 曲线公式为

$$M = \begin{cases} k_{in}\theta_r & , (\theta_r \leq \theta_p) \\ M_{pb} + 0.01k_{in}(\theta_r - \theta_p) & , (\theta_r > \theta_p) \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8)分别对比了单调加载下外套管厚度为18 mm和12 mm的节点模型的 $M-\theta_r$ 曲线, 对比结果如图4. 从图4可以得到有限元计算结果和公式计算结果的对比如除强化段承载力和刚度有少许出入外, 两者计算结果基本吻合, 拟合的 $M-\theta_r$ 曲线满足要求。



(a) 外套管厚度为18mm的节点模型



(b) 外套管厚度为12mm的节点模型

图4 $M-\theta_r$ 公式计算曲线和非线性有限元计算曲线的比较

Fig. 4 Comparison between moment versus rotation curves predicted by formula and finite element

5 结论

(1) 外套管式钢管混凝土柱与钢梁单边螺栓端板连接新型节点由于外套管的存在, 很好地保护了节点域钢管柱壁, 使带套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点在受力过程中, 节

点域钢管柱壁不会发生较大的外凸变形, 避免导致整个节点连接处损坏。

(2) 与不带套管单边螺栓端板连接节点对比, 带套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点具有更高的初始刚度和抗弯承载能力。

(3) 端板厚度、钢材屈服强度、外套管厚度是

影响新型节点初始刚度和承载力最重要的因素,所以改善节点的初始刚度和承载力应从这三方面入手.

(4) 根据大量的参数分析,提出新型节点的 $M-\theta_r$ 实用模型,实用模型计算结果与有限元分析结果吻合较好,可以为这种新型节点形式的工程实际提供参考.

参考文献:

- [1] 刘坚. 钢与混凝土组合结构设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构试验理论和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 王先铁, 郝际平. 方钢管混凝土穿芯高强螺栓-端板节点滞回性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(1): 33-37.
- [4] 马尤苏夫, 王先铁. 穿芯高强螺栓-端板节点方钢管混凝土框架抗震性能数值分析 [J]. 工程力学, 2015, 32(2): 154-162.
- [5] LOH H Y, UY B, BRADFORD M A. The effects of partial shear connection in composite flush end plate joints: Part I-experimental study [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(4): 378-390.
- [6] 王静峰, 张琳. 半刚性钢管混凝土框架梁柱端板连接抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 14-21.
- [7] 刘坚 著. 钢结构高等分析的三阶非线性理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [8] 刘威. 圆钢管混凝土柱-钢梁外环板式框架节点抗震性能研究 [D]. 北京: 清华大学土木工程学院, 2011.
- [9] WANG Jing-feng, HAN Lin-hai, UY B. Hysteretic behavior of flush end Plate joints to concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8/9): 1644-1663.
- [10] 陈莉萍. 半刚性钢管混凝土框架端板连接节点静力试验和理论研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学土木工程学院, 2010.
- [11] 顾强. 钢结构滞回性能及抗震设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

Study on Mechanical Performance of Outer-shell Connections for Concrete Filled Steel Tubular Column and Steel Beam

LIU Jian¹, GAO Kui¹, ZHOU Guan-gen², CHEN Yuan¹

(1. Department of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Zhejiang Southeast Space Frame Co., Ltd., Hangzhou 311209, China)

Abstract: The unilateral bolt connection nodes of new type concrete filled steel tubular columns with outer shell and steel beam was put forward by summing up the previous deficiency of connection nodes. Based on the experimental and theoretical analysis, in consideration of the initial geometric imperfections of steels and concrete damaged plasticity model, end-plate connections for concrete filled steel tubular columns and steel beam with outer-shell and without outer shell finite element models were established respectively. Under monotonic loading in finite element model, analysis the damage and working mechanism; according to parametric study analysis the main factors of initial stiffness and bearing capacity for joints and establish $M-\theta_r$ practical model for new type joints. The results show that the joints with outer-shell have greater initial stiffness and bearing capacity and better seismic performance. The $M-\theta_r$ models which was presented in this paper are reasonable and reliable. It can provide a reference for theory design and real engineering application.

Key words: outer-shell; connections of concrete filled steel tubular columns to steel beam; practical moment versus rotation model; mechanical performance

文章编号: 1671-6833(2015)05-0063-05

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

(上海理工大学 环境与建筑工程学院, 上海 200093)

摘要: 在已有试验研究的基础上, 采用平面非线性软件 IDARC 2D 建立数值模型, 对一榀配置核心钢管的混凝土柱和钢筋混凝土梁新型组合框架进行滞回分析, 并与试验结果对比. 同时, 对此框架的套建增层改造实例进行地震反应时程分析. 研究表明: IDARC 2D 能较好地模拟组合框架在低周往复荷载作用下的受力过程, 为此类框架滞回性能的模拟提供了合适的方法; 此新型框架具有梁铰耗能, 延缓柱底出铰的特点, 抗倒塌能力较强.

关键词: 组合框架; 钢筋混凝土梁; 内置核心钢管混凝土柱; 滞回性能; 时程分析

中图分类号: TU398+.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.014

0 引言

套建增层技术较传统增层技术而言, 既能在原有房屋的基础上实现增层, 又避免将施工阶段的荷载传至原有房屋结构和基础, 具有显著的优势. 目前, 国内普遍采用型钢-混凝土组合框架来实现大跨度、高承载力要求的外套建框架. 近些年, 针对此类结构已有许多试验成果: 钟新谷等^[1]和胡吉等^[2]分别对钢箱和外包钢混凝土梁进行了弯曲性能试验; 温庆杰等^[3]和黄琼等^[4]对钢-混结构的收缩徐变效应进行了分析; 王琨、袁沈峰等^[5-6]提出了两种新型组合框架并进行了低周往复荷载作用下的结构试验. 虽已有诸多成果, 但对此类问题的仿真模拟及滞回性能分析却较少. 笔者全程模拟了王琨、袁沈峰等人提出的一种以配置核心钢管的钢筋混凝土柱作为框架柱、以 H 型钢钢筋混凝土作为框架梁的新型套建增层框架结构, 并将其应用于实际工程, 同时进行了地震反应分析.

1 试验概况

1.1 配筋构造和材料性能

试验共设计制作了 2 榀单层单跨新型组合框架试件 SRCF 和 PSRCF, 其中试件 PSRCF 的钢筋混凝土梁上施加预应力. 两榀框架模型试件的框架梁均内置焊接 H 型钢, 框架柱内均置无缝圆钢管, 框架内部钢筋节点连接是参考相关规程, 在

外加强环板式节点基础上设计制作而成, 其他配筋构造以及实测材料性能详见文献[6].

1.2 试验简图和加载制度

SRCF 一榀框架和 PSRCF 一榀框架试件加载简图见图 1. 图 2 为试验加载制度, 其中水平加载采用荷载-位移混合控制的加载方法. 规定以向右加载为正向, 向左为负向. 以试验中荷载-位移曲线上出现明显拐点作为构件屈服点.

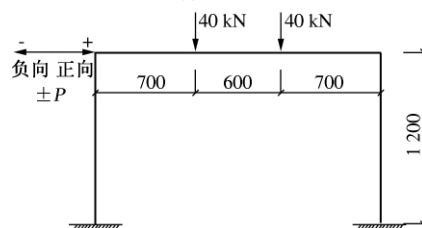


图 1 试件加载示意图

Fig. 1 Specimen loading diagram

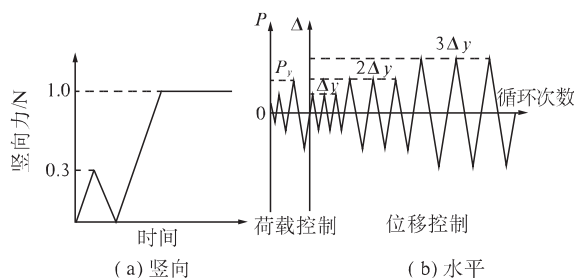


图 2 加载制度

Fig. 2 The loading system

2 滞回性能理论分析

假定框架梁、柱在受力过程中符合平截面假

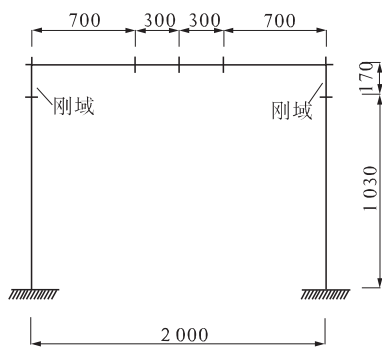
收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-07-10

作者简介: 周奎(1970—), 男, 安徽铜陵人, 上海理工大学副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、结构健康监测与损伤识别研究, E-mail: zhoukui_sh@163.com.

定;节点不发生破坏;构件受弯破坏先于受剪破坏;不考虑混凝土收缩、徐变影响;钢筋、型钢与混凝土之间粘结可靠.笔者采用平面非线性程序 IDARC 2D,对此新型钢骨混凝土组合框架试验进行低周反复荷载的全过程模拟.

2.1 计算模型的建立

采用杆系模型作为结构整体分析的力学模型.由于框架试件受力明确,塑性铰分布可准确预估,因此采用集中塑性铰单分量模型作为单元模型,在可能出现塑性铰的位置设置单元节点.型钢锚脚设置在距离柱顶部 170 mm 处,此范围内截面刚度较大,可以将其简化为刚域.框架的分析简化模型如图 3 所示.



注: + 表示单元节点

图 3 框架的分析模型

Fig. 3 Analysis model of framework

2.2 材料的本构关系

钢筋及型钢的本构关系采用理想弹塑性模型.混凝土以及预应力钢筋本构关系采用我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010).其中,预应力钢筋本构关系表达式见式(1).

$$\sigma_p = \begin{cases} E_{py} \varepsilon_p, & E_{py} = f_{py} / \varepsilon_{py} \quad (0 < \varepsilon_p \leq \varepsilon_{py}) \\ f_{py} + (f_{pu} - f_{py}) / (\varepsilon_{pu} - \varepsilon_{py}) (\varepsilon_p - \varepsilon_{py}), & (\varepsilon_{py} < \varepsilon_p \leq \varepsilon_{pu}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:钢筋的屈服强度表示为 f_{py} ,对于无明显屈服点的钢筋,建议取 $f_{py} = 0.85f_{pu}$, f_{py} 对应的应变为 ε_{py} ;钢筋的极限强度 ε_s ,极限应变 ε_{pu} .

2.3 梁柱恢复力模型

2.3.1 模型的选取

采用 Park 恢复力模型^[7],如图 4 所示. Park 恢复力模型提供了一种顶点导向模式,根据钢材每次循环顶点的指向都与上次循环顶点的指向相同的规律,该模式假定每次循环的峰值与上次循环的峰值相同.该模型须确定如下参数:初始刚度 (EI)、开裂弯矩 (PCP)、屈服弯矩 (PYP)、屈服曲率 (UYP) 和极限曲率 (UUP),刚度退化参数 (α)、强度退化参数 (β_1, β_2) 以及滑移退化参数 (γ).在模拟过程中,笔者采用顶点导向模式的 Park 恢复

力模型.

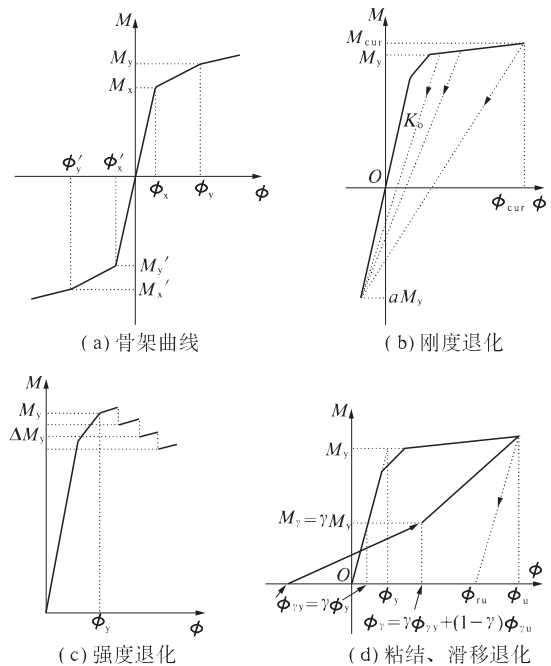


图 4 Park 顶点导向模型

Fig. 4 Park vertex oriented model

2.3.2 构件参数的确定

规定 H 型钢受拉翼缘屈服则钢骨混凝土梁截面屈服,受拉钢管边缘屈服则钢管混凝土柱截面屈服.笔者运用 Matlab 软件根据非线性有限元分析法,编制了梁柱截面的弯矩曲率计算程序,分别模拟了 H 型钢钢骨混凝土梁截面、预应力 H 型钢钢骨混凝土梁截面以及配置钢管核心钢筋混凝土柱截面的弯矩曲率图,如图 5 所示.从中可获得截面的开裂弯矩 (PCP)、屈服弯矩 (PYP)、屈服曲率 (UYP) 以及极限曲率 (UUP) 参数,如表 1 所示.

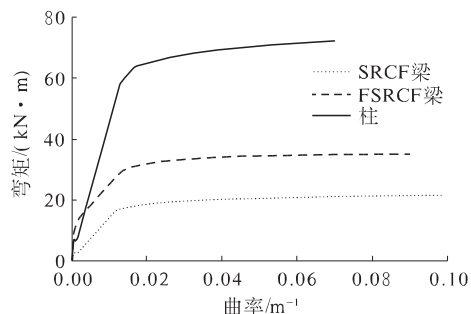


图 5 组合框架各截面弯矩曲率关系图

Fig. 5 The sectional moment curvature diagram of the composite frame

对于滞回模型参数,目前还没有通用的方法.笔者根据试验模拟经验以及构件滞回特点,综合考虑如下三点来确定滞回模型参数:①考虑不同参数滞回模型顶点与构件截面弯矩曲率骨架曲线

吻合程度;②考虑 IDARC Manual^[8] 中构件退化程度的推荐参数;③考虑相关文献 [9 - 10] 对于此类组合构件的建议参数. 经过分析及反复修正,确定构件屈服后刚度退化参数(α)、强度退化参数($\beta_1\beta_2$) 以及滑移退化参数(γ),如表 2 所示.

表 1 组合框架各截面弯矩曲率参数表
Tab.1 The sectional moment curvature parameters of the composite frame

试件类型	开裂弯矩/ (kN·m)	屈服弯矩/ (kN·m)	屈服曲率/ (1·m ⁻¹)	极限曲率/ (1·m ⁻¹)
SRCF 梁	3.23	17.70	0.015	0.099
PSRCF 梁	13.55	30.20	0.014	0.090
钢管砼柱	7.42	61.10	0.015	0.070

表 2 构件截面的退化参数表
Tab.2 The degradation parameters of components section

退化参数	钢骨混凝土梁	预应力钢骨混凝土梁	钢管混凝土柱
α	4	3	6
β_1	0.01	0.30	0.30
β_2	0.01	0.35	0.15
γ	1.0	1.0	0.25

表 3 两种框架试验与模拟关键值对比表
Tab.3 The comparison of key values from test and simulation of two frames

		梁开裂 荷载/kN	柱开裂 荷载/kN	屈服点 荷载/kN	屈服点荷载 对应的位移 Δ_y /mm	破坏时的 最大位移/mm
SRCF	实验值	50.00	100.00	180.00	8.00	$7\Delta_y = 56.00$
	模拟值	39.48	75.39	161.70	6.55	$66.78 \approx 10.2\Delta_y$
PSRCF	实验值	100.00	100.00	160.00	7.00	$7\Delta_y = 49.00$
	模拟值	64.80	74.80	150.00	5.75	$39.57 \approx 6.9\Delta_y$

3 实例分析

新型套建框架存在头重脚轻、刚度沿房屋高度分布不均匀的现象,如何确保其“小震不坏,中

2.4 加载制度的修正

在模拟中,试件 SRCF 水平向右加载时,①当荷载达到 + 39.48 kN 时,梁端首先开裂;②当荷载达到 + 75.39 kN 时,左柱和右柱同时出现裂缝;③当荷载达到 + 161.7 kN 时,荷载 - 位移曲线出现明显拐点,此时水平位移约为 6.55 mm(即 $\Delta_y = 6.55$ mm),此后加载改用位移控制;④当水平位移为 66.78 mm(即 $10.2\Delta_y$) 时,混凝土破坏严重,程序停止. 此时,试验破坏时的最大位移为 $7\Delta_y = 56.00$ mm,具体表现为梁端部混凝土压碎,出现贯穿梁界面的斜裂缝,两柱端根部塑性铰区混凝土破坏严重. 可见上述模拟关键值和与之对应的试验值存在差异. 框架试验与模拟关键值对比见表 3. 模拟中,以模拟关键值调整加载准则.

2.5 滞回曲线对比

采用 IDARC 2D 程序模拟得到了组合框架滞回曲线与试验结果对比如图 6、7 所示. 分析可得:①模拟结果的初始刚度、加载刚度、卸载刚度以及屈服点与试验结果较为一致;②滞回曲线的峰值相差较小,其中模拟 PSRCF 的骨架曲线下降更为迅速,而 SRCF 则比试验平缓;③模拟构件与试验滞回环饱满,都具有较好的耗能能力;在加载初期,模拟结果耗能能力稍强,后期则与试验结果接近;这是由于初期残余变形模拟偏小造成的.

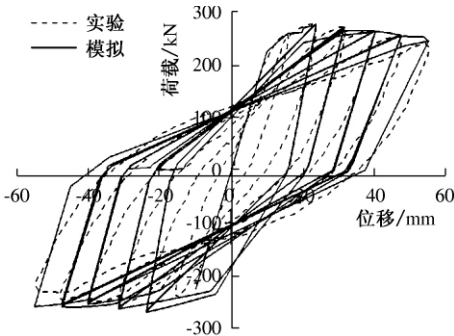


图 6 SRCF 框架试验与模拟滞回曲线对比图
Fig.6 The comparison of the test and simulation in the hysteretic curve of SRCF

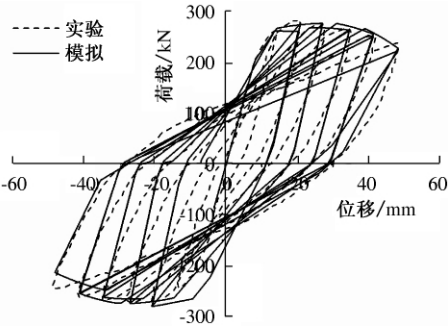


图 7 PSRCF 框架试验与模拟滞回曲线对比图
Fig.7 The comparison of the test and simulation in the hysteretic curve of PSRCF

3.1 实例介绍以及建立模型

根据文献[11]的改造要求,采用笔者所提的新型钢筋混凝土组合框架进行套建增层改造设计。

哈尔滨南岗会堂于 2004 年扩建了 2 层砌体结构房屋,层高为 7.8 m。现需将房屋由 2 层增至 5 层,并确保原建筑在施工过程中正常使用。套建主框架采用配置核心钢管的混凝土柱和钢筋混凝土梁新型组合框架,次框架选用型钢混凝土梁和型钢混凝土吊柱,考虑预应力对梁徐变的影响,应对主框架梁施加预应力^[12]。套建设计框架基本参数具体见图 8。套建框架各构件材料参数指标,如表 4 所示。

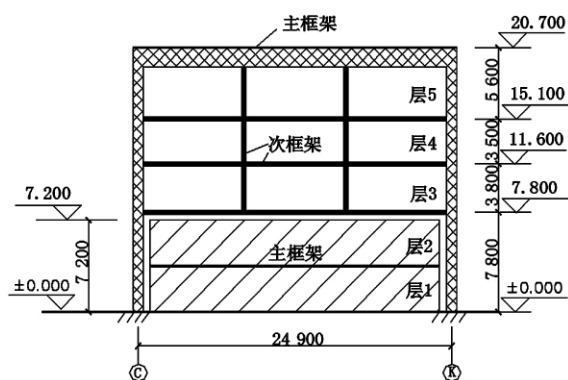


图 8 套建设计框架侧立面图

Fig. 8 The frame side elevation of jacking design

表 4 套建框架各构件参数

Tab. 4 Component parameters of the jacking frame

		柱	梁
主框架	尺寸	1 100 × 1 100	600 × 2 600
	纵筋	2 × 8φ25	2 × 8φ25
	型钢	钢管 φ351 × 8	H2400 × 400 × 30 × 30
次框架	尺寸	600 × 600	500 × 500
	纵筋	2 × 2φ25	2 × 2φ25
	型钢	H400 × 400 × 13 × 21	H300 × 300 × 10 × 15

根据以上构件参数,运用 Matlab 编程进行非线性有限元分析,得出截面的弯矩曲率关系。再根据弯矩曲率参数运用二维平面框架分析软件 IDARC 2D 将这些特殊构件进行组合。其中,模拟过程及参数选择参照本文第 2 节,不再赘述。依据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》相关规定,黑龙江哈尔滨地区设防烈度为 6 度,抗震等级为四级。

3.2 倒塌机制判断准则

对于 H 型钢预应力混凝土组合框架梁,以 H 型钢受拉翼缘屈服作为梁铰出现的标志。同时,配置核心钢管混凝土框架柱以受拉区钢管边缘屈服作为柱铰出现的标志。当结构框架水平侧移(位

移角)超过抗震要求的弹塑性限值时,框架结构如出现沿水平方向的可变机构(塑性铰),则认为结构进入倒塌临界状态^[13-14]。

3.3 弹塑性地震反应分析

笔者选取了 Taft 波和 El Centro 波,人工波根据哈尔滨当地地震基本信息拟合而成。通过 IDARC 2D 计算得出,在 Taft 波、El Centro 波以及人工波作用下的层间位移角如图 9 所示。在 3 种地震波作用下损伤情况近似,如图 10 所示。

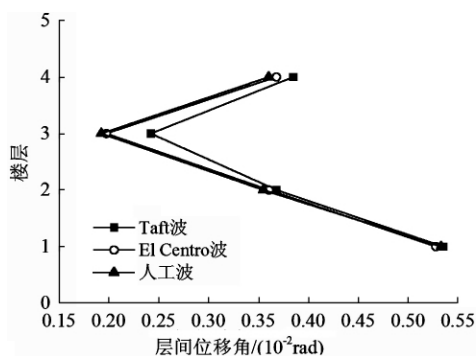
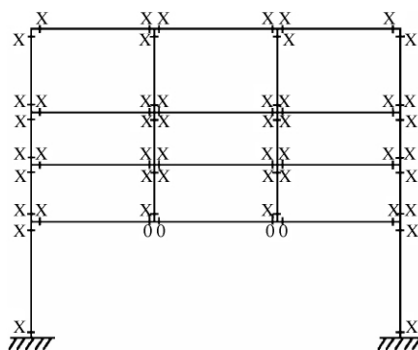


图 9 3 种地震波作用下框架的层间位移角

Fig. 9 The inter-story displacement angle of frame in three earthquake



注:0 表示塑性铰;X 表示开裂。

图 10 框架损伤情况示意图

Fig. 10 Schematic diagram of frame damage

经计算,3 种地震波得到的侧移(层间位移角)比较接近。我国抗震规范并未规定此类钢混框架结构的层间位移角限制,但在《建筑抗震设计规范》中有弹塑性层间位移角最小值为 1/120。由图 9 可知满足国家抗震规范构造要求。由图 10 可知只有一层梁端出现了塑性铰,而柱未出铰。这与文献[6]试验得出此框架能够实现梁铰耗能机制,可延缓柱底出铰的结论一致。因此,新型组合框架结构能很好的避免倒塌机制。

4 结论

(1) 新型组合框架的滞回模拟与试验结果吻合较好,所采用的 IDARC 2D 程序能够很好地模拟此类自定义截面构件组合框架的滞回性能,程

序中所运用模型及参数设定较为合理。

(2) 模拟与试验滞回曲线都呈饱满的梭形,具有较好的抗震性能。在加载初期,模拟残余变形偏小,导致模拟曲线耗能能力稍强,后期则与试验结果接近。

(3) 在多遇地震作用下,新型组合框架结构并未出现水平方向可变机制。说明新型组合框架具有梁铰耗能,延缓柱底出铰的特点。因此,能使结构避免倒塌机制的出现。

参考文献:

- [1] 钟新谷,舒小娟. 钢箱-混凝土组合梁弯曲性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(1):71-76.
- [2] 胡吉,石启印. 外包钢-混凝土组合梁正截面受弯承载力试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,26(9):457-460.
- [3] 温庆杰,叶见曙. 钢-混凝土组合梁的收缩徐变效应分析[J]. 工业建筑,2006,36(21):492-495.
- [4] 黄琼,叶梅新. 钢-混凝土叠合板组合桥面的徐变和应力重分布研究[J]. 铁道科学与工程学报,2006(3):15-20.
- [5] 王琨. 套建增层预应力钢骨混凝土框架抗震性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院,2010.
- [6] 王琨,袁沈峰,曹大富,等. 配置核心钢管的钢筋混凝土柱-钢骨混凝土梁组合框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(6):103-112.
- [7] PARK Y J, REINHORN A M, KUNNATH S K. IDARC: Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures [R]. Technical Report NCEER - 87 - 0008. State University of New York at Buffalo. 1987.
- [8] VALLES R E, REINHORN A M, KUNNATH S K, et al. IDARC 2D Version 6.0: A program for the inelastic damage analysis of building [R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research. State University of New York. 1996.
- [9] 王琨,郑文忠. 套建增层预应力钢骨混凝土框架弹塑性地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(4):94-105.
- [10] 葛建国,王琨. 基于IDARC的型钢混凝土组合框架滞回性能理论分析[J]. 建筑科学,2012,28(1):5-8.
- [11] 郑文忠,王英,刘思嘉. 哈尔滨南岗会堂增层改造设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(6):45-50.
- [12] 王俊,赵静超,刘立新. 预应力度对梁徐变系数与徐变挠度系数数值关系的影响[J]. 郑州大学学报:工学版,2013,34(5):26-30.
- [13] 魏琰,王迪民,韦承基,等. 钢筋混凝土框架结构地震破坏机理探讨[J]. 工程抗震,1998(1):3-5.
- [14] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1999.

Research on Hysteretic Behavior and Seismic Response Analysis of a New Composite Frame Structure

ZHOU Kui, PAN Meng-yang, LIN Jie

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this study, a theoretical research on hysteretic behavior of a new composite frame composed of RC column encased steel-tube and steel reinforced concrete beam was proposed by using the plane nonlinear software-IDARC2D. The theoretical analysis results were compared with experiments. In addition, seismic response regarding to an outer-jacketing reconstruction example of composite frame was analyzed by means of time-history analysis. The research results showed that IDARC 2D could preferably simulate the entire loading process on the composite frame, and provide a suitable analytical method for hysteretic behavior. The emergence sequence of plastic hinges on this frame is 'beam ends before and column bottoms after', so that the anti-collapse ability of the structure was largely enhanced.

Key words: composite frame; steel reinforced concrete beam; RC column encased steel-tube; hysteretic behavior; time-history analysis

文章编号: 1671-6833(2015)05-0068-05

基于振型的构件位移分解及规律研究

吴泽玉¹, 王东炜², 汪志昊³

(1. 北京工业大学 建工学院, 北京 100124; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了清楚分析结构的荷载效应, 可将位移向振型方向投影, 计算位移在各个振型中所占比重. 增加对结构变形有利振型位移所占比例, 降低对结构变形不利振型位移所占比例. 提出位移展开所需振型量确定方法和位移和应变、应力及内力用振型展开的相关表达式. 通过对普通梁、适中柱及深受弯构件和短柱位移展开, 得到梁柱荷载效应的一般规律.

关键词: 振型; 位移; 振型方向系数; 构件; 概念设计

中图分类号: TU311.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.015

0 引言

振型通常用来研究结构损伤检测和动力性能^[1-5], 鲜有用来指导结构概念设计和构造设计. 王东炜等人率先提出利用振型研究结构整体力学性能, 取得了很好的工程应用经验^[6-7]. 为了清楚了解构件在外界荷载作用下的效应机理, 更好地指导结构设计, 可将位移向振型方向投影. 增加对结构变形有利的振型位移值, 减少对结构变形不利的振型位移值. 在结构概念设计阶段, 对结构整体受力性能进行宏观控制, 使对结构概念设计有了量化措施. 振型描述了刚度和质量在整个结构体上的分布, 表征二者的相对比值关系, 为二者的相对比值关系在空间位置上的分布情况. 同时, 振型也反映了结构在外界荷载作用下最易发生变形的先后顺序. 外力作用对结构都会产生效应, 通常以位移的形式表现出来. 结构振型是位移的广义完备正交基, 通过位移在振型坐标基上的展开, 可清楚了解外力的作用效应以及这种效应在各振型中所占的比例, 特别是容易引起结构脆性破坏的剪切效应和扭转效应. 故在结构设计时, 提高对结构变形有利的振型所占的比重, 减少对结构变形不利的振型所占的比重, 用来指导结构概念设计和构造设计.

1 位移、应变和应力振型展开

振型是结构位移的完备正交基, 任何位移都能以振型为坐标基展开, 表示为振型和振型幅值乘积的形式, 如式(1)所示^[8]

$$\mathbf{D} = a_1\phi_1 + a_2\phi_2 + \cdots + a_n\phi_n, \quad (1)$$

式中: \mathbf{D} 表示位移向量; ϕ_n 表示结构的振型; a_n 表示位移展开在各振型中的振幅. 利用振型的正交性, 式(1)中各振型幅值系数

$$a_n = \phi_n^T \mathbf{M} \mathbf{D} / (\phi_n^T \mathbf{M} \phi_n), \quad (2)$$

式中: $\phi_n^T \mathbf{M} / (\phi_n^T \mathbf{M} \phi_n)$ 完全由结构质量和刚度空间分布决定. 当 a_n 已知时, 任意位移可在振型上展开. 又知应变与位移之间的微分方程为^[9]

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{L}]\{\mathbf{D}\}, \quad (3)$$

式中: $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ 为应变矩阵; $[\mathbf{L}]$ 为微分算子矩阵. 应力与应变的关系式为

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = [\mathbf{K}]\{\boldsymbol{\varepsilon}\}, \quad (4)$$

式中: $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ 为应力矩阵; $[\mathbf{K}]$ 为刚度矩阵.

通过位移矩阵, 应变矩阵和应力矩阵都可以依振型矩阵展开. 振型上应变和应力的展开为

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}_n\} = a_n \phi_n [\mathbf{L}]\{\mathbf{D}\}, \quad (5)$$

$$\{\boldsymbol{\sigma}_n\} = [\mathbf{K}]\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = a_n \phi_n [\mathbf{K}][\mathbf{L}]\{\mathbf{D}\}. \quad (6)$$

从式(2)~(6)可以看出, 只要构件位移已知, 就可以求出相应的应变和应力在振型上的投

收稿日期: 2015-03-30; 修订日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目资助项目(50978232); 河南教育厅项目资助(14B560029)

作者简介: 吴泽玉(1976—), 男, 河南固始人, 北京工业大学讲师, 博士, 主要从事复杂结构体系选型与振动控制研究, E-mail: 13598437507@163.com.

影值,对应力在面内或体积内积分,可求出相应的内力值.位移在振型上投影的幅度值 a_n 反映了外界荷载对各振型的作用效应,因此对 a_n 分析就能显示荷载效应在振型分配大小.

2 满足精度要求的振型数量

计算位移展开所需振型数可由范数确定^[10-12].设需展开的位移向量为 $\{D\}$,假定前 M 阶振型展开的位移量为 $\{D_s\}$,展开位移与实际位移之间的误差为

$$\{E\} = \{D\} - \{D_s\}, \quad (7)$$

对式(7)的差值位移向量,可由3种方法确定所需振型数量.

(1) 均方法

$$\|E\|_2 = \left\{ \sum_{i=1}^M (D_i - D_{si})^2 \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

式中: D_i 为位移向量 $\{D\}$ 中的分量; D_{si} 为位移向量 $\{D_s\}$ 中的分量.当 $\|E\|_2$ 值满足计算精度时,所取的振型阶数 M 即为所需振型量.

(2) 最大位移法

$$\|E\|_\infty = \max \left\{ \sum_{i=1}^M (D_i - D_{si}) \right\}, \quad (9)$$

由公式可知,展开振型阶次越高,任意自由度位移误差逐渐收敛展开位移量.

(3) 百分比法

$$P = \frac{\|D - D_s\|_2}{\|D\|_2} = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^M (D_i - D_{si})^2 \right\}^{1/2}}{\left\{ \sum_{i=1}^M (D_i)^2 \right\}^{1/2}}. \quad (10)$$

3 适中柱和普通梁位移量在振型坐标基上的投影

3.1 适中柱位移在振型上的投影分析

某柱横截面为 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 高为 6 m ,横截面方向为 x 和 y 坐标,柱高为 z 向.假定反弯点在柱中点,取一半柱高分析,约束形式为上端自由下端固定.柱的剪跨比为: $\lambda = 3.75 > 2$,为适中柱^[13].结构自由端结点图如图1所示.水平和竖向力均为 1000 kN ,分析位移在振型上的投影规律.水平力分别作用于结点 309、373、372 和结点 25 时,位移在前 10 阶振型上的位移投影系数.水平力位移展开系数和双向偏心受压和单向偏心受压位移展开系数如表1和表2所示.

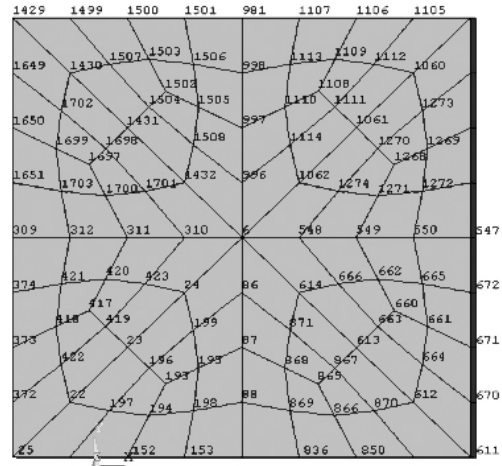


图1 适中柱自由端结点图

Fig.1 Free end node of moderate column

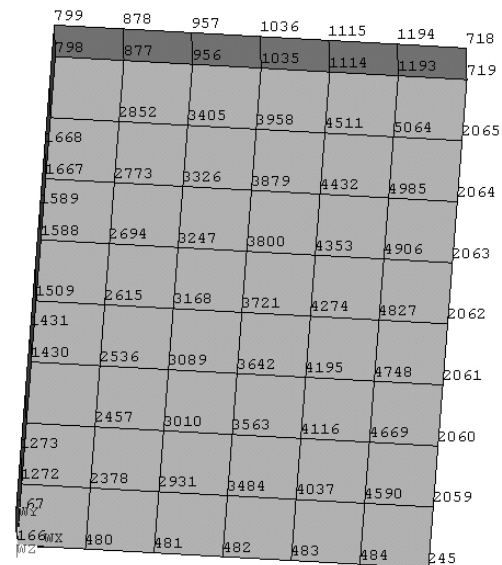


图2 普通梁跨中结点图

Fig.2 Middle span node of moderate beam

3.2 普通梁位移在振型上的投影分析

某梁横截面为 $0.6 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,跨度为 8 m ,假定梁两端固定.梁的跨高比为: $l_0/h = 10 > 5$,为普通梁.构件的跨中结点图如图2所示.梁跨中受竖向力为集中力 1000 kN ,作用于梁的跨中.分析荷载在梁横截面上移动时,位移在振型上的投影规律.普通梁在横向荷载作用下位移在各振型上展开比例如表2所示.

4 短柱和深梁在振型坐标基上的投影

4.1 短柱位移在振型上的投影分析

某柱横截面为 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,高为 2.4 m ,假定反弯点在柱高中点,约束形式为上端自由下端

表 1 水平荷载作用下和双向偏心竖向荷载作用下结点位移在振型上展开比例

Tab. 1 Mode proportion of displacement under longitudinal force and mode proportion of displacement under two-directional eccentric vertical force

振型 阶次	振动 形态	水平荷载作用下结点位移比例/%				双向偏心竖向荷载作用下结点位移比例/%			
		309	373	372	25	6	23	22	25
1	一阶 x 向侧弯	85.4	82.7	24.5	27.3	0.0	34.6	35.8	36.4
2	一阶 y 向侧弯	10.5	10.2	11.8	14.7	0.0	44.3	45.9	46.6
3	一阶扭转	0.0	2.8	2.9	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	二阶 x 向侧弯	0.6	0.6	7.2	6.9	0.0	3.5	3.5	3.7
5	二阶 y 向侧弯	2.9	2.8	24.3	20.6	0.0	5.4	5.6	5.7
6	竖向伸缩	0.0	0.0	2.5	2.5	89.4	9.0	6.1	4.7
7	二阶扭转	0.0	0.3	2.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
8	三阶 x 向侧弯	0.0	0.0	1.4	1.2	0.0	1.3	1.3	1.4
9	三阶 y 向侧弯	0.5	0.5	10.6	8.7	0.0	1.0	1.1	1.1
10	二阶竖向伸缩	0.0	0.0	12.8	12.5	10.6	1.0	0.7	0.5
合计		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 2 柱单向偏心竖向荷载作用下和梁竖向力作用下结点位移在振型上展开比例

Tab. 2 Column mode proportion of displacement under eccentric vertical force and beam mode proportion of displacement under vertical force

振型 阶次	振动 形态	单向偏心竖向荷载作用下位移比例/%				梁竖向力作用下结点位移比例/%			
		6	87	88	85	1035	956	877	798
1	x 向弯曲	0.0	7.9	8.4	8.7	0	0.3	0.6	0.9
2	y 向弯曲	0.0	64.5	68.5	70.3	96.4	92.7	89.5	86.4
3	二阶 x 向弯曲	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	二阶 y 向弯曲	0.0	7.3	7.7	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	一阶扭转	0.0	1.6	1.7	1.8	0.0	3.3	6.3	9.2
6	三阶 x 向弯曲	89.4	14.7	10.4	7.9	0.0	0.1	0.1	0.2
7	三阶 y 向弯曲	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	3.5	3.4	3.3
8	一阶轴向振动	0.0	1.9	2.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
9	二阶扭转	0.0	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
10	四阶 x 向弯曲	10.6	1.7	1.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
合计		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

固定. 柱的剪跨比为: $\lambda = 1.5 < 2$, 为短柱. 结构的自由端结点图如图 3 所示. 水平和竖向力均为 1 000 kN, 分析位移在振型上的投影规律. 水平力位移展开系数和双向偏压展开系数如表 3 所示. 单向偏压位移展开系数如表 4 所示.

4.2 深受弯构件位移在振型上的投影分析

某梁横截面为 0.6 m \times 0.8 m, 跨度为 3.2 m, 假定梁两端固定. 梁的跨高比为: $l_0/h = 4 < 5$, 为深受弯构件. 构件的结点图如图 4 所示. 梁跨中受竖向力为集中力, 大小等于 1 000 kN, 作用于梁的

跨中, 分析荷载在梁横截面上移动时, 位移在振型上的投影规律. 深梁在横向荷载作用下位移在各振型上展开比例如表 4 所示.

5 结论

对由梁柱组成的结构体系来说, 基于振型的位移展开可清楚了解构件的变形形态, 尽可能避免短柱和深受弯构件的出现, 实在无法避免时, 要提高构件的抗剪和抗扭能力. 通过位移在振型上的展开可以指导结构概念设计和构造设计.

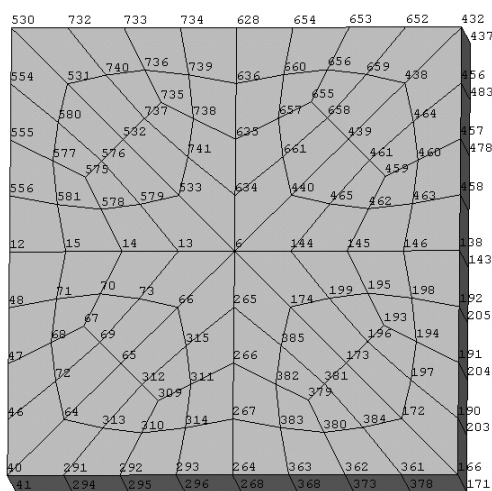


图3 短柱自由端结点图

Fig. 3 Free end node of short column

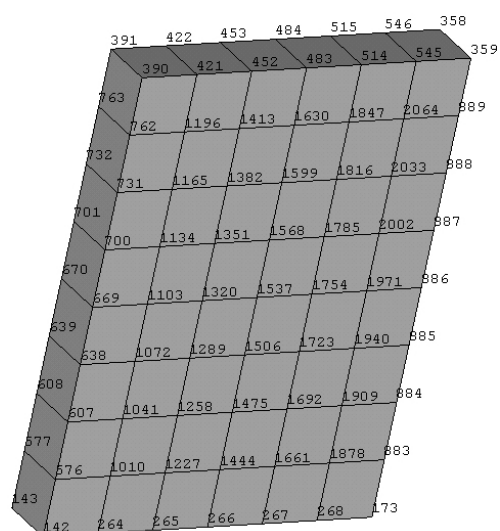


图4 深受弯梁跨中结点图

Fig.4 Middle span node of short beam

表3 水平荷载作用下结点位移在振型上展开比例

Tab.3 Mode proportion of displacement under longitudinal force and mode proportion of displacement under two-directional eccentric vertical force

[illegible]

表4 单向偏心竖向荷载作用下和深梁在横向荷载作用下结点位移在振型上展开比例

Tab.4 Mode proportion of displacement under eccentric vertical force and mode proportion of deep beam displacement under longitudinal force

[illegible]

参考文献:

- [1] WANG Xi-ping, JAMES P W, ROBERT J R, et al. Nondestructive assessment of timber bridges using a vibration-based method [C]. Structure2005, 2005: 1 ~ 12.
- [2] HWANG Jin-hung, WU Chia-pin, CHOU Jui-te. Motion characteristics of compacted earth dams under small earthquake excitation in Taiwan [J]. Geotechnical Earthquake and Engineering and Soil Dynamics, 2008, 5(2): 1 ~ 12.
- [3] TRAVIS T, MARVIN W H, PAUL J B. Structural health monitoring of the Cherry Hill bridge [C]. Structure2006, 2006: 1 ~ 8.
- [4] MICHELE D, ANTONINO M. Reconstruction method for damage detection in beams based on natural frequency and antiresonant frequency measurements [J]. Engineering Mechanics, 2010, 136(3): 329 ~ 344.
- [5] ROBERT B, CHARLES S, SOOYONG P, et al. Modal property changes of a seismically damaged concrete bridge [J]. Bridge Engineering, 2010, 10(4): 415 ~ 428.
- [6] 季三荣,王东炜,赵骞. 基于模态分析的钢管脚手架平面支撑刚度研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010,31(4): 31 ~ 35.
- [7] 王东炜,张奇伟,王用中. 基于模态分析的鄆城黄河公路大桥优化设计 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010,31(6): 1 ~ 5.
- [8] RAY C, JOSEPH P. Dynamics of structures [M]. Berkeley, California, USA, Computers and Structures, Inc, 1995: 101 ~ 105.
- [9] Elsevier(Singapore) Pte Ltd. Finite element method [M]. 2008: 120 ~ 125.
- [10] 庄茁. 连续体和结构的非线性有限元 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] 史荣昌,魏丰. 矩阵分析 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [12] 李清扬,王能超,易大义. 数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Research on Mode-based Displacement Expansion of Structural Component and Common Rules

WU Ze-yu¹, WANG Dong-wei², WANG Zhi-hao³

(1. College of Architecture of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to clarify the external load effect on structure, the displacement can be decomposed on the mode and calculated the proportion of the each mode. The advantage mode displacement can be increased and disadvantage mode displacement can be decreased. To meet the engineering safety requirements, the mode number of displacement expansion is determined and stress equation, strain equation and relevant internal force equation can be derived on mode coordinate system. Through the load effect of beam and column, some valuable laws were obtained.

Key words: mode; displacement; mode directional coefficient; structural member; concept design

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

(河北工业大学 土木工程学院 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘 要: 为解决空心板梁桥单板受力问题, 基于邢汾高速某简支空心板梁桥设计相似有机玻璃试验模型, 分析了预应力筋的布置以及荷载的施加等几个因素对横向预应力筋加固简支空心板梁桥效果的影响, 从图形和量化计算两个方面, 直观地给出了模型的加固方案对比. 试验结果表明: 施加横向预应力筋加固效果明显, 在梁底跨中部位施加预应力加固效果最好; 张拉预应力大小并非越大越好, 应与施加荷载大小相适应, 才能达到最佳加固效果.

关键词: 简支空心板桥; 单板受力; 横向预应力; 横向分布系数; 有限元法

中图分类号: U448.21⁺7

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.016

0 引言

单板受力现象是装配式简支空心板梁桥的普遍病害之一, 是由于横向连接强度降低, 导致车辆通过时, 所受荷载只能由单个梁板承受而形成的一种桥梁病害^[1]. 在中国, 随着超载加重, 多数简支空心板梁桥出现不同程度的“单板受力”破坏^[2], 形成纵向不均匀的裂缝, 且大部分集中在道路行车道轮迹线上^[3], 亟待加固. 施加横向预应力是现今桥梁加固中新兴起的一种加固方法, 梁富全, 李友好等通过理论试验分析证明, 施加横向预应力可以通过提高桥梁的整体刚度, 起到增强空心梁板结构间横向联系的作用^[2]. 但施加预应力后空心板梁桥的传力形式会发生什么变化, 怎样施加预应力, 才能达到既经济又显著的加固效果, 还有待深入研究. 笔者借助一个简单的试验模型, 对比研究预应力施加位置以及预应力张拉大小对空心板梁桥加固效果的影响, 并借助加固效果指标, 量化分析荷载施加情况对选择预应力加固方案的重要性.

1 试验设计

有机玻璃作为一种理想的模型材料, 有较高

的弹性极限, 在弹性受力范围内应力应变呈现良好的线弹性关系, 具有自重轻, 各向同性, 易于机械加工等优点. 弹性模量约为混凝土的 1/10, 在较小的荷载下即可呈现试验精度的变形; 在水泥混凝土路面模型试验中取得了较理想的效果^[4].

基于以上研究成果, 本试验选用有机玻璃模型代替混凝土模型, 根据其相似变化规律实现判别施加横向预应力设计方案优劣的目的, 从而更好地控制各影响因素. 为避免温度对有机玻璃模型影响, 试验选在一天中温度最高的时段(10 点~14 点)进行.

根据应力分析模型相似理论, 试验模型以邢汾高速某一跨简支空心板梁桥为原型, 并按截面尺寸的 1/4 进行缩尺. 原桥净跨 12.6 m, 由 9 块 1 m 宽的预制空心板拼接而成, 板高 0.6 m. 缩尺之后的模型尺寸及加载点布置如图 1 所示.

纵桥向对称预留 5 个孔道; 竖向, 可以在孔道底部, 中部和顶部 3 个位置贯穿张拉水平预应力筋. 预应力筋选用 $\phi 12$ 的钢筋, 按直线布置(即张拉端、固定端、中间支点在一条直线上), 张拉大小通过锚索测力计控制; 在如图 1 所示 5 个测点下方布置位移计, 依次在 3 个加载点施加静力荷载, 实时监控各测点的竖向变形.

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-07-28

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(12JCYBJC1410); 河北省交通运输厅科技计划资助项目(Y-2012041)

作者简介: 李莎(1989—), 女, 河北石家庄人, 河北工业大学博士生, 主要从事结构抗震、加固研究, E-mail: 1048448152@qq.com.

通讯作者: 戎贤(1965—), 男, 河北定州人, 河北工业大学教授, 博士, 主要从事结构抗震、加固研究, E-mail: xrong@hebut.edu.cn.

为研究预应力布置以及预应力张拉大小对加固效果的影响,设计 12 个工况进行对比分析.

工况: 预应力竖向位置(顶,中,底) + 桥跨方向位置(5 个孔道) + 预应力筋大小(kN) + 加载点位置(梁号).

工况 1: 0+0+0+1/3/5 (无预应力)

工况 2: 234+3+1/3/5

工况 3: 234+5+1/3/5

工况 4: 234+7+1/3/5

工况 5: 135+3+1/3/5

工况 6: 135+5+1/3/5

工况 7: 135+7+1/3/5

工况 8: 全+3+1/3/5

工况 9: 全+5+1/3/5

工况 10: 全+7+1/3/5

工况 11: 中+全+5+1/3/5

工况 12: 顶+全+5+1/3/5

其中,竖向位置未说明代表在梁底布置. 如工况 3 代表: 在梁底 2、3、4 预应力孔道位置(如图 1)对称张拉 5 kN 的预应力,当荷载分别作用在第 1 块、第 3 块、第 5 块板上时的情况.

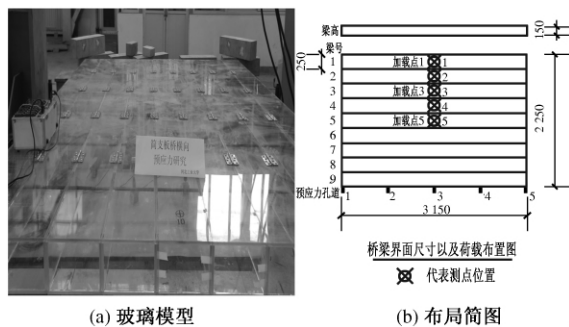


图 1 试验模型

Fig. 1 Test models

空心板间横向联系作用的强弱常用各梁板的挠度值以及横向分布影响线来反映. 挠度值根据试验数据直接换算得到,横向分布影响线的坐标值按各板跨中挠度的比例来计算,即 $\eta_i = w_i/W$; 其中: η_i 为集中荷载作用在 j 板时,对 i 板产生的荷载影响系数; w_i 为当集中荷载作用在 j 板时,对 i 板跨中产生的竖向位移; W 为各板中点的挠度之和^[5-6].

2 施加横向预应力后试验现象分析

由图 2 挠度曲线可以看出: 施加横向预应力筋后,梁板的最大挠度值明显减小,各梁板的挠度变化曲线趋于平缓,可见,施加横向预应力确实可

以起到增强横向联系的作用^[6]; 同时注意到,预应力施加方法不同,梁板竖向变形以及横向联系作用也高低不同. 所以,如何施加预应力以更好地提高空心板桥承载能力有待进一步研究.

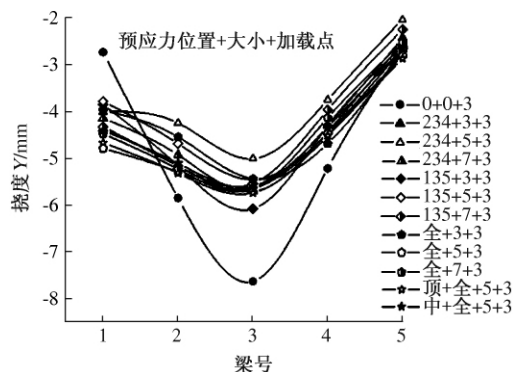


图 2 施加横向预应力前后挠度曲线

Fig. 2 The deflection curve before and after the transverse prestress being applied

3 桥跨方向布置方案研究

选用 2-5-8, 3-6-9, 4-7-10 这 9 个工况分 3 组试验进行对比,研究改变桥跨方向预应力筋的布置对横向预应力筋加固效果的影响,结果如图 3 所示.

从图 3 可见,在跨中和 1/4 跨对称布置 3 根预应力筋和沿全跨布置 5 根预应力筋的加固效果明显好于仅在边跨和跨中施加预应力的情况,且全跨布置相比在跨中对称布置 3 根预应力筋的情况并没多大改善,当荷载作用在中间梁板时,全跨布置反而不占优势. 跨中部位为简支梁桥结构的受力薄弱区,预应力筋并不是布置越多越好,张拉预应力施工难度大,成本高,选择最合适的位置和根数才能达到最经济实用的效果.

4 张拉预应力大小设计研究

选用工况 2-3-4, 5-6-7 以及 8-9-10 进行对比,分析张拉预应力大小不同对简支空心板梁桥加固效果的影响,结果如图 4 所示.

由图 4 可知,在预应力张拉过程中,边板挠度普遍比无预应力时略有增加,出现不同程度的反拱现象. 但是各板横向分布影响线变得平缓,横向联系作用增强; 随着预应力不断张拉,反拱并不是一直增大,而是出现先减小后又增大的趋势. 从图 4 挠度图可以明显地看出,一号边板挠度在预应力由 3 kN 增加到 5 kN 的时候逐渐减小,继续张拉,

到 7 kN 时挠度反而又增大,甚至大于张拉 5 kN 时的情况;横向分布影响线也不是张拉越大越平缓,对预应力筋张拉 5 kN 时的效果就要好于张拉 7 kN 时的。可见,张拉预应力并非越大越好,相反,预应力越大,可能会造成边板反拱过大。预应力的的大小,往往要跟荷载的大小相适应,这点,在下文将会作进一步分析。

5 沿桥竖向布置方案研究

对比试验工况 9-11-12,研究预应力筋沿桥竖向布置位置的改变对简支空心板梁桥加固效果的影响,结果如图 5 所示。

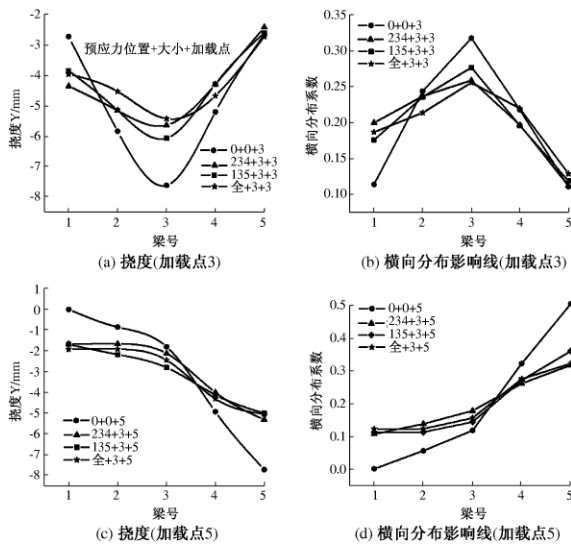


图 3 不同桥跨方向布置对应加固效果曲线

Fig. 3 Reinforcement effect curves of different layout in the bridge span direction

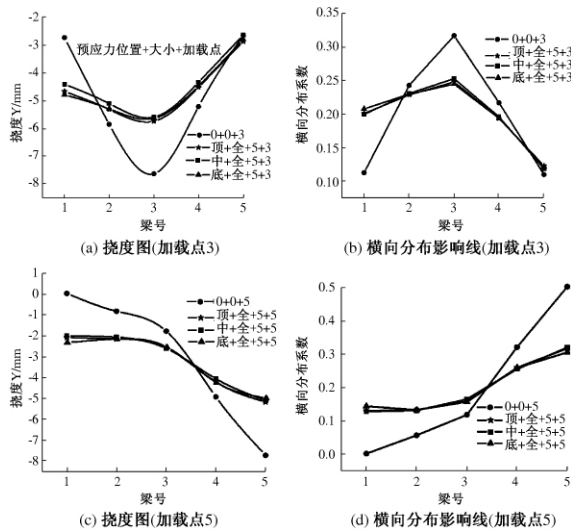


图 4 预应力张拉大小不同对应加固效果曲线

Fig. 4 Reinforcement effect curves of different prestressed tension size

由图 5 可见,预应力筋竖向布置位置的改变对空心板梁桥加固效果的影响不是很大,相对而言在板底位置布置时,曲线较平滑,各空心板间的传力效果最好。在梁底加固,亦符合梁板的受力机理,且施工方便。但是,考虑到钢筋的锈蚀问题,建议根据实际情况在梁底进行加固时预留一定的混凝土保护层厚度,保护层厚度按照规范施工,一般要求不小于 50 mm。

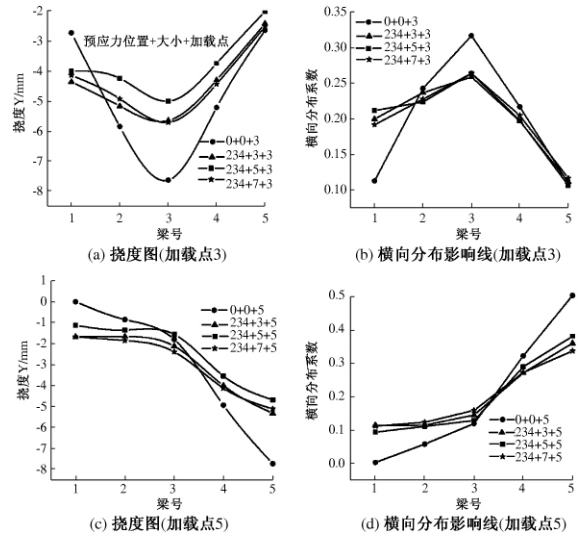


图 5 沿桥竖向布置不同对应加固效果曲线

Fig. 5 Reinforcement effect curves of different layout in the bridge vertical direction

6 荷载大小影响研究

为检验有机玻璃模型的正确性,进一步研究施加荷载大小对施加预应力大小的影响,建立实桥有限元模型,并引入 N 作为一个加固效果评价指标,进行量化评估^[6]。

$$N = \frac{\Delta y_{\text{后}} - \Delta y_{\text{前}}}{\Delta y_{\text{前}}} \quad (1)$$

式中: Δy 代表最大挠度值与最小挠度值之差。求得 N 为负,证明加固有效果;所得 N 的绝对值越大,证明加固效果越好。

ANSYS 建立原桥模型如图 6 所示。混凝土体单元采用 solid65 作为模型单元,预应力钢筋用 link8 杆单元,杆单元与实体单元通过同一位置节点的自由度耦合实现。全桥简支,共形成 50 592 个体单元,3 个线单元和 69 747 个节点,预加力施加采用降温法^[10-11]。

对比相似有机玻璃试验模型和混凝土有限元模型施加横向预应力后空心板梁桥的横向分布系数变化情况,如图 7 所示。可以看出,混凝土有限

元模型的横向分布较有机玻璃平缓,但二者相差不大,且都呈现向加载点逐渐增大的趋势.因此,可以说,用有机玻璃模型模拟混凝土空心板梁桥进行横向联系研究是可行的.

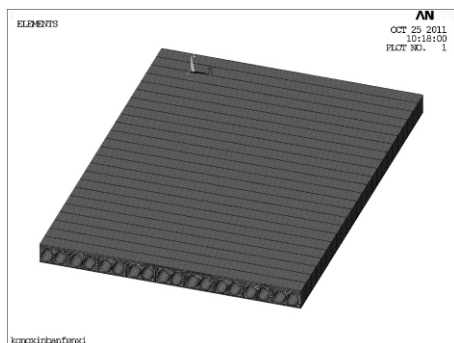


图6 全桥模型

Fig. 6 Finite element model of the bridge

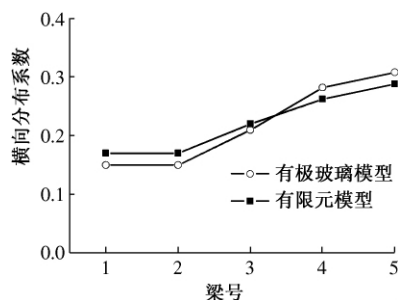


图7 模型对比

Fig. 7 Comparative model diagram

分别改变张拉预应力的大小以及施加荷载的大小,记录每种情况下的挠度值,并利用式(1),得到表1所示加固效果评价指标.

表1 加固效果评价指标 N

Tab. 1 Evaluation indexes 1 of reinforcement effect

预应力/kN	荷载/kN	指标 N
50	100	0.441 8
	200	0.313 1
	300	0.316 1
100	100	0.164 8
	200	0.443 9
	300	0.424 7

由表1可见,100 kN 荷载对应 50 kN 预应力,200 kN 荷载对应 100 kN 预应力时的加固效果是最好的.如此也印证了上面的结论,预应力大小并非越大越好,与荷载大小相适应时,才能发挥出最大的效果.

7 结论

(1) 可以用有机玻璃模型来模拟实际混凝土空心板桥梁的横向受力规律.施加横向预应力加固简支空心板梁桥不仅可以减小最大挠度值,而且可以显著增强加固后各梁板间的横向联系作用.

(2) 预应力布置在梁板受力最薄弱部位周围时,可以发挥最佳的加固效果.对于空心板梁桥,在梁底跨中部位对称布置效果最明显.

(3) 预应力张拉大小与板的挠度值以及横向分布系数变化,呈现一种先减小又增大的抛物线趋势.张拉大小与施加荷载大小相适应,找到最合适的张拉值,才能达到最佳加固效果.可以用理论分析和有限元分析相结合的方法,确定最佳张拉值.

参考文献:

- [1] 梁全富,邵景干. 横向预应力加固简支空心板梁桥技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 李友好,赵豫生. 某病害桥横向预应力加固实践 [J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(7): 19-21.
- [3] 李娟燕,李娟玲,江祥林. 横向体外预应力在空心板桥加固中的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2011(5): 11-14.
- [4] 郭黎明. 有机玻璃在水泥混凝土路面模型试验中的应用 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 1993, 13(1): 38-44.
- [5] 李国豪,石洞. 公路桥梁荷载横向分布系数计算 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [6] 陈淮,张云娜. 施加横向预应力加固装配式空心板桥研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(10): 58-62.
- [7] 翟凤柱,马飞. 浅谈预应力混凝土板梁反拱问题 [J]. 辽宁交通科技, 2002, 25(6): 15-16.
- [8] 潘钻峰, Fu C C, 吕志涛. 装配式板桥的横向预应力设计 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(6): 1265-1270.
- [9] 康省桢,王复明,蔡迎春,等. 简支空心板桥横向预应力加固试验研究 [J]. 中外公路, 2011, 31(5): 95-98.
- [10] 刘平,李鹏飞,李莎. 空心板桥横向预应力加固分析 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(4): 24-28.
- [11] 金花,孙立功. 横向预应力加固板梁桥的有限元分析 [J]. 石家庄铁道学院学报: 自然科学版, 2010, 23(1): 70-73.

Study on the Method and Results of Simply Supported Hollow Plate Girder Bridge Reinforcement Applied Transverse Prestressing

LI Sha, RONG Xian, LI Peng-fei

(School of Civil Engineering, Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to solve the problem of single plunk strength, the similarly experimental model in organic glass based on a simply supported slab bridge of Xing Fen motorway is designed. The effect of the prestressing tendon layout and the applied load on transverse prestressed reinforcement of simply supported slab bridge is analyzed. The comparison of reinforcement program is given with the graphs and theoretical calculations. At the same time, the experimental results show that the reinforcement effect of transverse prestressing tendon is obvious. It is best when the transverse prestressing tendon is rationally used across the bottom of the beam; on the other side, the load position also impacts on the reinforcement effect to some extent. It is incorrect to think that the bigger prestressed size, the better reinforcement effect. It should be in line with the applied load so that the best effect of reinforcement can be achieved.

Key words: hollow plate bridge; single plunk strength; transverse pre-stressing; transverse distribution coefficient; the finite-element method

文章编号: 1671-6833(2015)05-0078-06

沥青路面层间剪切强度的概率分布及可靠性设计

刘小云¹, 邵雨虹², 靳晓娟¹

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 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)

摘 要: 为了对沥青路面层间抗剪能力进行可靠性设计, 以现场实测的沥青路面层间剪切强度数据为样本, 求出了沥青路面面层与基层、面层与面层间剪切强度的经验密度函数和分布函数, 依据分布拟合, 对沥青路面面层与基层、面层与面层间剪切强度的概率分布做出了假设, 采用科尔莫哥洛夫检验方法, 对假设进行了检验. 结果表明: 沥青路面面层与基层间的剪切强度服从参数为 $\mu_{x_1} = -1.514\ 6, \sigma_{x_1}^2 = 0.578\ 3^2$ 的对数正态分布, 而沥青路面面层与面层的剪切强度则服从参数为 $\alpha_{x_2} = 0.959\ 7, \lambda_{x_2} = 3.801\ 2$ 的威布尔分布. 根据它们所服从的概率分布, 对沥青路面层间抗剪能力进行了可靠性设计, 给出了不同可靠度下沥青路面层间剪切应力允许设计值.

关键词: 沥青路面; 层间剪切强度; 假设检验; 概率分布; 可靠性设计

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.017

0 引言

在公路设施建设中, 道路可靠性是至关重要的, 它直接影响着交通的质量和安全性. 我国现有道路中, 沥青路面占主要比例, 人们在不断完善沥青路面设计与计算方法. 国内外专家学者在剪应力分析与可靠性设计方面进行了大量的理论研究和试验研究, 美国沥青学会和荷兰壳牌公司分别开发了求解沥青路面层状体系力学参数的软件, 可用来计算层间剪切应力; Romanoschi^[1] 则建立了一个层间接触的新模型, 用来研究不同层间接触情况和水平轮载对柔性路面寿命的影响. Willis and Timm^[2] 认为层间粘结强度的损伤会导致沥青面层早期疲劳开裂, 并在 NCAT 试验路上作了试验验证. F. Canestrari 等人^[3] 研究了温度对层间粘结性能的影响. M. diakhate^[4] 等人则研究了沥青路面层间剪切疲劳强度. 在国内, 林巧飞^[5] 等人通过对沥青路面结构可靠性验证方法的探讨、分析, 提出了实际可靠度计算公式及相应的验证方案, 并利用实际调查数据建立理论可靠度修正式. 吴美发^[6]、苏凯^[7]、赵桂娟^[8]、马培建^[9] 等人分别对路面层间剪切性能、剪切强度进行了理论研究和试验研究. 郭永雄则对沥青路面结构可靠

度计算时所选计算指标的计算公式及概率分布类型进行了探讨, 并通过建立数学模型阐述了具体的计算方法^[10]. 尽管国内外对沥青路面的研究很多, 但对沥青路面层间剪切强度的分布及按可靠性对沥青路面层间剪切强度的研究却很少. 对于我国广泛使用的半刚性基层沥青路面, 沥青路面破坏的主要形式之一是层间在剪切应力作用下的破坏. 目前在路面设计中, 对面层与基层、面层与面层之间的剪切强度的要求还没有制定统一的设计规范, 使得路面设计在这方面出现了盲区.

为了设计路面时能考虑沥青路面面层与基层、面层与面层之间的剪切强度, 提高所设计路面的耐久性, 笔者以新修和大修的几条道路的面层与基层、面层与面层之间剪切强度现场测试结果作为样本, 求出沥青路面面层与基层、面层与面层间剪切强度的经验密度函数和分布函数, 对沥青路面面层与基层、面层与面层间剪切强度的概率分布做出了多种假设, 采用科尔莫哥洛夫 (Kolmogorov) 检验方法, 对假设进行检验. 根据它们所服从的分布, 对沥青路面层间抗剪能力进行了可靠性设计, 给出了不同可靠度下沥青路面层间剪切应力设计允许值.

收稿日期: 2015-04-11; 修订日期: 2015-06-28

基金项目: 交通运输部应用基础研究资助项目(2013319812160)

作者简介: 刘小云(1958—), 女, 长安大学教授, 主要从事随机理论的研究及应用, E-mail: lxyunl@126.com.

1 沥青路面层间剪切强度的概率分布

1.1 检验方法的选择

对于单总体分布的假设检验,常用的有皮尔逊的 χ^2 拟合优度检验法及柯尔莫哥洛夫的 K 检验法. 皮尔逊的 χ^2 拟合优度检验法适合于任何类型的分布,但检验结果受划分区间的影响. 柯尔莫哥洛夫的 K 检验法适合于总体的分布函数是连续函数的情形,它考虑了样本经验分布函数和总体的分布函数,检验结果不受划分区域的影响,比皮尔逊的 χ^2 检验法灵敏准确^[11]. 这里将沥青路面面层与基层之间、面层与面层之间的剪切强度简称为沥青路面层间的剪切强度,因沥青路面层间的剪切强度是连续型随机变量,所以总体的分布函数是连续的,于是在这里选用柯尔莫哥洛夫的 K 检验法更好.

1.2 柯尔莫哥洛夫 K 检验法介绍

柯尔莫哥洛夫定理^[12-13]: 若随机变数 X 的分布函数 $F(x)$ 是 x 的连续函数, $F_n(x)$ 是由 X 的样本生成的经验分布函数,则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \sqrt{n} \sup_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F(x)| < y \right\} = K(y) \\ = \begin{cases} 0, & y \leq 0 \\ \sum_{l=-\infty}^{\infty} (-1)^l e^{-2l^2 y^2}, & y > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K(y)$ 所表示的分布为 K 分布; n 为样本容量.

柯尔莫哥洛夫的 K 检验法: 柯尔莫哥洛夫定理表明,若记 $D_n = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F(x)|$,当 $n \rightarrow \infty$ 时, K 分布为 $\sqrt{n}D_n$ 的极限分布,故当 n 充分大时, $\sqrt{n}D_n$ 近似服从 K 分布. 若给出假设 H_0 : K 的分布函数是 $F(x)$. 在显著水平 α (一般 ≤ 0.5)下,运用从总体抽取的样本计算出统计量 D_n 的值,并查出 K 分布的 α 上侧分位数 K_α ,若 $\sqrt{n}D_n > K_\alpha$,则拒绝假设 H_0 ,否则接受假设 H_0 . 在实际应用中,上述判断条件也被叙述为^[11]: 当 $D_n \geq \frac{K_\alpha}{\sqrt{n}} =$

$D_{n,\alpha}$ 时,拒绝假设 H_0 ; 当 $D_n < \frac{K_\alpha}{\sqrt{n}} = D_{n,\alpha}$ 时,接受假设 H_0 . 而当 $n \leq 50$ 时, $D_{n,\alpha}$ 可直接查表求得; 当 $n > 50$ 时,由 $p\left\{D_n > \frac{y}{\sqrt{n}}\right\} = \alpha$,得 $p\left\{D_n \leq \frac{y_{1-\alpha}}{\sqrt{n}}\right\} = 1 - \alpha = K(y_{1-\alpha})$,反查柯尔莫哥洛夫统计量 D_n 的极限分布函数 $K(y) = \lim_{n \rightarrow \infty} p\left\{D_n \leq \frac{y}{\sqrt{n}}\right\}$ 得 $y_{1-\alpha}$,于

是柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{n,\alpha} = \frac{y_{1-\alpha}}{\sqrt{n}}$.

下面根据假设检验方法推断沥青路面层间剪切强度所服从的分布. 采用从甘肃—康临高速公路现场剪切试验、河北—唐山迁曹大修路现场剪切试验、贵阳—贵清高速现场剪切试验及青兰高速陕西境内路段现场剪切试验实测而来的沥青路面层间的剪切强度的数据^[14],其中面层与基层之间采用改性沥青作为透层油.

1.3 沥青路面面层与基层之间剪切强度概率分布的假设检验

1.3.1 沥青路面面层与基层剪切强度的经验分布及拟合

设 X_1 表示沥青路面面层与基层之间的剪切强度,则 X_1 为总体. 对 X_1 所采集的样本进行统计,样本所在区间为 $[0.000, 0.800]$,样本容量 $n_1 = 86$,在求出 X_1 的样本经验密度函数时,直方图的分组区间间距取 $\delta = 0.1$,设 m_i 表示 X_1 的样本 $(x_1, x_2, \dots, x_{86})$ 在第 i ($i = 1, 2, \dots, 8$)个区间的频数, $f_{n_1}(x)$ 表示样本经验密度函数,则第 i 个分组区间的频率: $\mu_i = \frac{m_i}{n_1}, i = 1, 2, \dots, 8$,第 i 个区间经验密度函数值为

$$f_{n_1}(x) = \frac{\mu_i}{\delta}, i = 1, 2, \dots, 8. \quad (2)$$

样本经验分布函数为

$$F_{n_1}(x) = \frac{\text{样本}(x_1, x_2, \dots, x_{86}) \text{中满足 } x_i \leq x \text{ 的 } x_i \text{ 个数}}{86}, \\ x \in (-\infty, +\infty). \quad (3)$$

经统计计算, X_1 的样本容量、各分组区间的频数、频率及样本经验密度函数值见表1.

为了研究沥青路面面层与基层之间剪切强度 X_1 的概率分布,笔者采用正态分布、对数正态分布、威布尔分布、伽马分布、极值I型分布5种概率密度函数及分布函数分别对 X_1 的经验密度函数 $f_{n_1}(x)$ 及经验分布函数 $F_{n_1}(x)$ 进行拟合,拟合结果分别如图1、图2所示.

在用各分布对 X_1 的经验密度函数 $f_{n_1}(x)$ 、经验分布函数 $F_{n_1}(x)$ 的拟合数据中,统计量 $D_{n_1} = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_{n_1}(x) - F_1(x)|$ 表示了拟合分布与经验分布的偏差,它还是 K 检验统计量,也称 K 检验值. 它的大小可用来评定拟合的效果, D_{n_1} 越小,拟合程度就越好,其中 $F_1(x)$ 为拟合分布的分布函数. 经计算,各拟合分布参数的估计值、 K 检验值 D_{n_1} 见表2. 由表2知,对数正态分布的 D_{n_1} 值最小,

为 0.052 7, 故对数正态分布拟合的贴程度最高, 所以从拟合情况推断: 沥青路面面层与基层剪切强度 X_1 应服从对数正态分布。

表 1 X_1 的样本频数、频率及经验密度函数值

Tab.1 Sample frequency and empirical density function of X_1

分组区间	频数 m_i	频率 μ_i	经验密度函数值 $f_{n_1}(x)$
(0.000, 0.100]	9	0.104 7	1.046 5
(0.100, 0.200]	29	0.337 2	3.372 1
(0.200, 0.300]	23	0.267 4	2.674 4
(0.300, 0.400]	8	0.093 0	0.930 2
(0.400, 0.500]	8	0.093 0	0.930 2
(0.500, 0.600]	6	0.069 8	0.697 7
(0.600, 0.700]	2	0.023 3	0.232 6
(0.700, 0.800]	1	0.011 6	0.116 3
合计	86	1.000 0	10.000 0

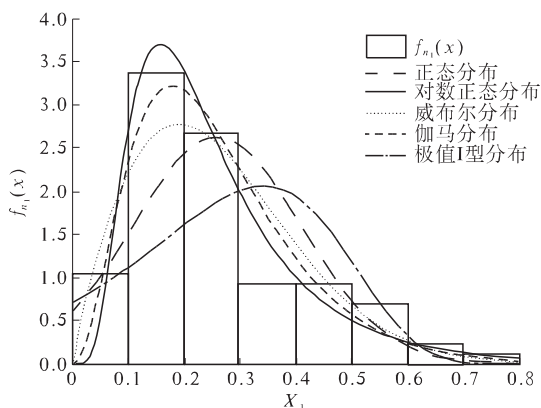


图 1 面层与基层间剪切强度经验密度直方图及拟合
Fig.1 Empirical density histogram and fitting curve of the shear strength between surface layer and base layer

1.3.2 沥青路面面层与基层剪切强度 X_1 分布的假设检验

这里采用柯尔莫哥洛夫的 K 检验法。

假设 H_0 : X_1 所服从分布的分布函数为 $F_1(x)$, 这里 $F_1(x)$ 取拟合时所用的 5 种分布(见表 2) 的分布函数。

下面对此假设进行检验. 根据样本数据, 经计

算得各假设分布的 K 检验统计量 $D_{n_1} = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_{n_1}(x) - F_1(x)|$ 的值, 见表 2。

因样本容量 $n_1 = 86$, 取 $\alpha = 0.05$, 则 $1 - \alpha = 0.95$, 由 $p\left\{D_{n_1} \leq \frac{y_{0.95}}{\sqrt{n_1}}\right\} = 0.95 = K(y_{0.95})$, 反查柯尔莫哥洛夫统计量 D_{n_1} 的极限分布函数值表得: $y_{0.95} = 1.358$, 于是得柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{n_1, \alpha} = \frac{y_{0.95}}{\sqrt{n_1}} = \frac{1.358}{\sqrt{86}} = 0.146 4$ 。

由表 2 可知: 在满足 $D_{n_1} < D_{n_1, \alpha} = 0.146 4$ 的 D_{n_1} 中, 有对数正态分布、威布尔分布和伽马分布, 而对数正态分布对应的 $D_{n_1} = 0.052 7$ 最小, 这说明, 沥青路面面层与基层间的剪切强度 X_1 服从均值 $\mu_{X_1} = -1.514 6$ 、方差 $\sigma_{X_1}^2 = 0.578 3^2$ 的对数正态分布 $LN(-1.514 6, 0.578 3^2)$ 。这与拟合后的推断是一致的。

1.4 沥青路面面层与面层之间剪切强度概率分布的假设检验

1.4.1 沥青路面面层与面层剪切强度的经验分布及拟合

与上述研究方法相同, 设 X_2 表示沥青路面面层与面层之间的剪切强度, 则 X_2 为总体. 先求出 X_2 的样本经验密度函数、样本经验分布函数并进行拟合。

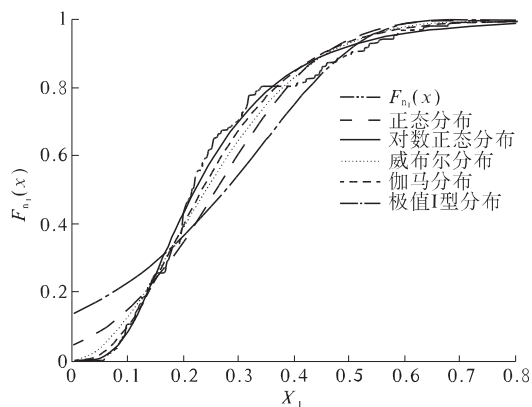


图 2 面层与基层间剪切强度经验分布函数及拟合
Fig.2 Empirical distribution function and fitting curve of the shear strength between surface layer and base layer

表 2 X_1 各假设分布的参数值和 K 检验值

Tab.2 Parameter values and testing values of the various distribution hypotheses of X_1

参数	分布类型				
	正态分布	对数正态分布	威布尔分布	伽马分布	极值 I 型分布
分布参数一	0.258 5	-1.514 6	0.292 8	3.251 8	0.340 9
分布参数二	0.151 6	0.578 3	1.843 0	0.079 5	0.178 0
D_{n_1}	0.162 9	0.052 7	0.114 4	0.089 6	0.196 2

经对 X_2 所采集的样本进行统计, 样本所在区间为 $[0.05, 1.35]$, 样本容量 $n_2 = 168$, 在求出 X_2 的样本经验密度函数时, 直方图的分组区间间距取 $\delta = 0.1$, 设 m_i 表示 X_2 的样本 $(x_1, x_2, \dots, x_{168})$ 在第 i ($i = 1, 2, \dots, 13$) 个区间的频数, $f_{n_2}(x)$ 表示样本经验密度函数, 则第 i 个分组区间的频率: $\mu_i = \frac{m_i}{n_2}, i = 1, 2, \dots, 13$, 第 i 个区间经验密度函数值为

$$f_{n_2}(x) = \frac{\mu_i}{\delta}, \quad i = 1, 2, \dots, 13. \quad (4)$$

样本经验分布函数为

$$F_{n_2}(x) = \frac{\text{样本}(x_1, x_2, \dots, x_{168}) \text{ 中满足 } x_i \leq x \text{ 的 } x_i \text{ 的个数}}{168}, x \in (-\infty, +\infty). \quad (5)$$

经统计计算, X_2 的样本容量、各分组区间的频数、频率及样本经验密度函数值见表 3.

同样用正态分布、对数正态分布、威布尔分布、伽马分布、极值 I 型分布 5 种概率密度函数及分布函数分别对 X_2 的经验密度函数 $f_{n_2}(x)$ 及经验分布函数 $F_{n_2}(x)$ 进行拟合, 拟合结果分别见图 3、图 4.

表 3 X_2 的样本频数、频率及经验密度函数值

Tab.3 Sample frequency and empirical density function of X_2

分组区间	频数 m_i	频率 μ_i	经验密度函数 值 $f_{n_2}(x)$
(0.050, 0.150]	2	0.011 9	0.119 0
(0.150, 0.250]	2	0.011 9	0.119 0
(0.250, 0.350]	4	0.023 8	0.238 1
(0.350, 0.450]	4	0.023 8	0.238 1
(0.450, 0.550]	9	0.053 6	0.535 7
(0.550, 0.650]	17	0.101 2	1.011 9
(0.650, 0.750]	16	0.095 2	0.952 4
(0.750, 0.850]	18	0.107 1	1.071 4
(0.850, 0.950]	24	0.142 9	1.428 6
(0.950, 1.050]	24	0.142 9	1.428 6
(1.050, 1.150]	18	0.107 1	1.071 4
(1.150, 1.250]	19	0.113 1	1.131 0
(1.250, 1.350]	11	0.065 5	0.654 8
合计	168	1.000 0	10.000 0

在用各分布对 X_2 的经验密度函数 $f_{n_2}(x)$ 、经验分布函数 $F_{n_2}(x)$ 的拟合数据中, 由 1.3.1 节知, 统计量 $D_{n_2} = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_{n_2}(x) - F_2(x)|$ 越小, 拟合程度就越好, 其中 $F_{n_2}(x)$ 为拟合分布的分布

函数. 经计算, 各拟合分布参数的估计值、 K 检验值 D_{n_2} 见表 4. 由表 4 知, 威布尔分布的 K 检验值 D_{n_2} 最小, 为 0.053 1, 故威布尔分布拟合的贴近期最高, 由此推断: 沥青路面面层与面层间剪切强度 X_2 可服从参数为 $\alpha_{X_2} = 0.959 7, \lambda_{X_2} = 3.801 2$ 的威布尔分布.

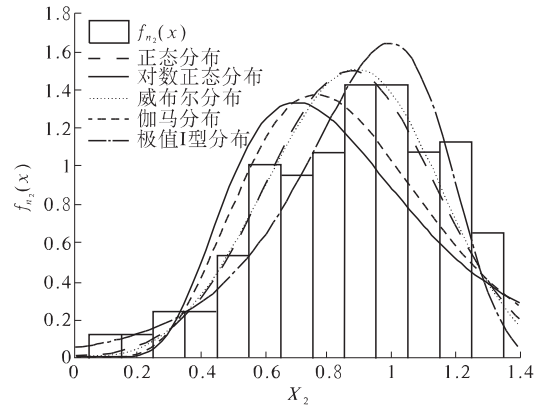


图 3 面层与面层间剪切强度经验密度直方图及拟合
Fig.3 Empirical density histogram and fitting curve of the shear strength between surface layers

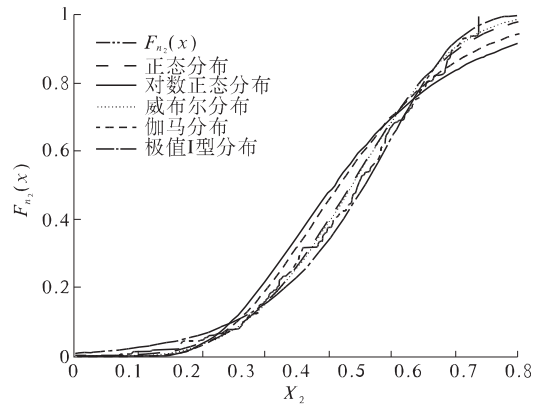


图 4 面层与面层间剪切强度经验分布函数及拟合
Fig.4 Empirical distribution function and fitting curve of the shear strength between surface layers

1.4.2 沥青路面面层与面层剪切强度 X_2 的分布的假设检验

这里仍采用柯尔莫哥洛夫的 K 检验法.

假设 H_0 : X_2 所服从分布的分布函数为 $F_2(x)$, 这里 $F_2(x)$ 取拟合时所用的 5 种分布(见表 4)的分布函数.

下面对此假设进行检验. 根据样本数据, 经计算得各假设分布的 K 检验统计量 $D_{n_2} = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_{n_2}(x) - F_2(x)|$ 的值(见表 4).

因样本容量 $n_2 = 168$, 故 $D_{n_2, \alpha}$ 不能直接查表求值. 取 $\alpha = 0.05$, 由 $p\left\{D_{n_2} > \frac{x}{\sqrt{n_2}}\right\} = 0.05$,

得 $p\left\{D_{n_2} \leq \frac{x_{0.95}}{\sqrt{n_2}}\right\} = 0.95 = K(x_{0.95})$, 反查柯尔莫哥洛夫统计量 D_{n_2} 的极限分布函数 $K(y) = \lim_{n_2 \rightarrow \infty} p$

$\left\{D_{n_2} \leq \frac{y}{\sqrt{n_2}}\right\}$ 表得 $y_{0.95} = 1.358$, 于是得柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{n_2, \alpha} = \frac{y_{0.95}}{\sqrt{168}} = \frac{1.358}{\sqrt{168}} = 0.1048$.

由表 4 可知: 在满足 $D_{n_2} < D_{n_2, \alpha} = 0.1048$ 的 D_{n_2} 中, 正态分布、威布尔分布、伽马分布和极值 I

型分布均能满足条件, 而威布尔分布和正态分布更为合适, 根据假设检验的原理知, 沥青路面面层与面层的剪切强度 X_2 服从参数 $\alpha_{X_2} = 0.9597$, $\lambda_{X_2} = 3.8012$ 的威布尔分布.

由以上分析可知, 由于沥青路面各层材料性质的不同, 从而导致层间剪切强度的差异及概率分布函数的差异. 因此, 在进行路面可靠性设计时, 基层与面层、面层与面层之间的剪切强度应采用不同的分布函数进行计算.

表 4 X_2 各假设分布的参数值和 K 检验值

Tab. 4 Parameter values and testing values of the various distribution hypotheses of X_2

参数	分布类型				
	正态分布	对数正态分布	威布尔分布	伽马分布	极值 I 型分布
分布参数一	0.867 3	-0.205 8	0.959 7	8.046 5	0.993 6
分布参数二	0.265 6	0.396 3	3.801 2	0.107 8	0.223 2
D_{n_2}	0.062 8	0.129 1	0.053 1	0.100 4	0.068 0

2 沥青路面层间抗剪能力的可靠性设计

对于随机性问题的处理, 通常是以可靠度做尺度, 为工程实践提供指导的. 下面对沥青路面层间剪切强度的可靠性设计进行分析和计算.

2.1 沥青路面面层与基层间剪切强度的可靠性设计

经拟合和假设检验知, 沥青路面面层与基层剪切强度 $X_1 \sim LN(-1.5146, 0.5783^2)$, 即 $\ln X_1 \sim N(-1.5146, 0.5783^2)$, 取可靠度为 R , 设在可靠度为 R 时基面层间剪切强度允许设计值为 X_{1R} , 则存活概率

$$P\{X_{1R} < X_1\} = P\{\ln X_{1R} < \ln X_1\} = 1 - P\left\{\frac{\ln X_1 + 1.5146}{0.5783} \leq \frac{\ln X_{1R} + 1.5146}{0.5783}\right\} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln X_{1R} + 1.5146}{0.5783}\right) = R. \quad (6)$$

$$\ln X_{1R} = 0.5783\Phi^{-1}(1-R) - 1.5146.$$

解得可靠度 R 下基面层间剪切强度设计值

$$X_{1R} = \exp[0.5783\Phi^{-1}(1-R) - 1.5146]. \quad (7)$$

由此计算可得不同可靠度下的沥青路面面层与基层间剪切强度设计值 X_{1R} , 见表 5.

计算结果表明: 要求的可靠度越高, 沥青路面面层与基层间剪切强度允许设计值就越小, 即路面的安全余度就越大.

2.2 沥青路面面层与面层间剪切强度的可靠性设计

由表 4 知: 在满足 $D_{n_2} < D_{n_2, \alpha} = 0.1048$ 的 D_{n_2}

中, 正态分布、威布尔分布、伽马分布和极值 I 型分布均能满足, 而威布尔分布和正态分布更为合适, 由图 3、图 4 及 D_{n_2} 的值可以看出两者差异很小, 拟合曲线几乎重合, 但正态分布较威布尔分布更容易进行可靠性计算, 故这里取沥青路面面层与面层间剪切强度 X_2 服从参数 $\mu_{X_2} = 0.8673$, $\sigma_{X_2}^2 = 0.2656^2$ 的正态分布对沥青路面面层与面层间的剪切强度进行可靠性计算.

因沥青路面面层与面层剪切强度 $X_2 \sim N(0.8673, 0.2656^2)$, 设在可靠度为 R 时面层与面层间剪切强度的允许设计值为 X_{2R} , 则存活概率

$$P\{X_{2R} < X_2\} = 1 - P\left\{\frac{X_2 - 0.8673}{0.2656} \leq \frac{X_{2R} - 0.8673}{0.2656}\right\} = 1 - \Phi\left(\frac{X_{2R} - 0.8673}{0.2656}\right) = R. \quad (8)$$

解得可靠度 R 下面层与面层间剪切强度允许设计值

$$X_{2R} = 0.2656\Phi^{-1}(1-R) + 0.8673. \quad (9)$$

由此计算可得不同可靠度 R 下的沥青路面面层与面层间剪切强度允许设计值 X_{2R} , 见表 5.

同样, 要求的可靠度越大, 沥青路面面层与面层剪切强度允许设计值就要越小. 即路面的安全余度就越大.

3 结论

(1) 沥青路面层间剪切强度分布规律是不相同的. 面层与基层之间的剪切强度服从对数正态分布, 而面层与面层之间则服从威布尔分布.

表5 不同可靠度下沥青路面层间剪切强度允许设计值

Tab.5 Allowable design values of the shear strength between layers of the asphalt pavement under the different reliability values

可靠度 R	99%	95%	90%	80%	70%	60%	50%
X_{1R}	0.057 3	0.084 9	0.104 8	0.135 2	0.162 4	0.189 9	0.219 9
X_{2R}	0.249 4	0.430 4	0.526 9	0.643 8	0.728 0	0.800 0	0.867 3

(2) 文中得到的沥青路面面层与基层、面层与面层之间剪切强度允许设计值可作为沥青路面可靠性设计参考。由于可靠度越高,剪切强度设计允许值就越小,其成本就越高。因此,应根据道路的设计寿命和造价选择合理的可靠度设计指标。

参考文献:

- [1] BROWN S F, BRUNTON J M. The influence of bonding between bituminous layers [J]. Highways and transportation, 1984, 31(5): 16-17.
- [2] WILLIS J R, TIMM D H. Forensic investigation of a rich-bottom pavement [R]. US: The transportation research board, 2006.
- [3] CANESTRARI F, SANTAGATA E. Temperature effects on the shear behavior of tack coat emulsions used in flexible pavements [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(1): 39-46.
- [4] DIAKHATE M, PHELIPOT A, MILLIEN A, et al. Shear fatigue behavior of tack coats in pavements [J]. Road Materials and Pavement Design, 2006, 7(2): 201-222.
- [5] 林巧飞,王选仓,王秉纲. 沥青路面可靠性验证方法的探讨[J]. 西安公路交通大学学报, 1996, 16(3): 1-3.
- [6] 吴美发,周翔,许志鸿. 超载作用下沥青路面剪应力有限元分析[C]//浙江省公路学会 2005 年论文集. 北京: 人民交通出版社, 2006: 82-87.
- [7] 苏凯,武建民,姚红云. 沥青路面层间滑移破坏分析[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(3): 35-38.
- [8] 赵桂娟. 半刚性基层沥青路面粘结材料抗剪性能分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 90-94.
- [9] 马培建,王佳蓉,王选仓. 基于摩尔-库伦理论的沥青路面层间抗剪强度[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 34-38.
- [10] 郭永雄. 沥青路面结构的可靠度分析[J]. 山西建筑, 2008, 34(31): 273-274.
- [11] 吴喜之,王兆军. 非参数统计方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [12] 王梓坤. 率论基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [13] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992.
- [14] 郑仲浪. 重载车辆作用下沥青路面层间力学行为研究[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2010.

Probability Distribution and Reliability Design of Asphalt Pavement Interlayer Shear Stress

LIU Xiao-yun¹, SHAO Yu-hong², JIN Xiao-juan¹

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Education Ministry, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to make the reliability design for the interlayer shear stress of asphalt pavement, by using the interlayer shear strength sample data of asphalt pavement, which is measured on site, the empirical density function and its distribution function are obtained. Through distribution fitting, the probabilistic distributions of the shear strength on the interlayers are supposed. According to Kolmogorov test methods, the hypothesis testing of them is done. The results show that the shear strength between the asphalt road surface layer and the base layer obeys the lognormal distribution ($\mu_{x_1} = -1.5146, \sigma_{x_1}^2 = 0.5783^2$) and the shear strength between the surface layer and surface layer obeys Weibull distribution ($\alpha_{x_2} = 0.9597, \lambda_{x_2} = 3.8012$). Based on these distributions, the reliability designs for interlayer shear stress of asphalt pavement are done. The allowed design value of the interlayer shear stress for the asphalt pavement is suggested under the different reliability.

Key words: asphalt pavement; interlayer shear strength; hypothesis testing; probability distribution; reliability design

文章编号: 1671-6833(2015)05-0084-04

沥青路面高温温度场的经验预估模型

王延海¹, 曹海利¹, 纪小平², 甘新立²

(1. 徐州市交通规划设计研究院, 江苏 徐州 221002; 2. 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)

摘 要: 通过长期测试 3 种典型沥青路面结构的温度数据, 引入气温、太阳辐射、风速及湿度参数, 建立了夏季高温期沥青路面日最高温度与日平均温度的经验预估模型, 并与 SHRP、LTPP 模型对比验证所建模型的适用性。结果表明: 所建立的沥青路面高温温度场预估模型具有较好的预估效果, 且与 SHRP、LTPP 模型相比, 本模型在预估当地沥青路面日最高温度时具有更好的精度。

关键词: 沥青路面; 温度场; 预估模型; 预估精度

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.018

0 引言

由于沥青路面在不同温度下表现出不同的黏弹塑性, 准确预测沥青路面的高温温度场是对沥青路面进行合理设计的基础^[1-2]。国内外学者先后提出了一系列沥青路面温度场预估模型, 主要包括理论分析模型和统计分析模型^[3-5]。统计分析模型(又称为经验模型)因形式和求解简单、输入参数少、易于获取的特点被广泛应用。目前常用的经验预估模型主要包括 SHRP 高温和低温模型^[6]、LTPP 高温和低温模型^[7]等, 能够在一定程度上对沥青路面的温度进行预测, 但也存在一些不足之处。一方面, 现有模型往往仅引入大气温度和纬度参数, 而路面与大气处于热交换状态, 大气的温度和湿度都将对热交换产生重要影响; 另一方面, 现有模型也缺乏对路面平均温度进行有效

预估的方法。

笔者通过在淮海经济区 3 种典型沥青路面结构中埋设温度传感器, 测试夏季高温期的路面温度场; 引入大气温度、太阳辐射、风速及湿度, 建立夏季高温期沥青路面日最高温度与日平均温度的经验预估模型, 并与 SHRP、LTPP 模型对比以验证本模型的适用性。

1 温度场测试

选取 3 种典型沥青路面结构, 具体路面结构与材料见表 1, 在路面中钻取芯样, 并在芯样中放置温度传感器后回填, 用温度采集仪对路面温度数据进行长期采集。温度传感器埋设于路表、以及各结构层层底, 每种结构埋设 2 处。温度采集频率为 30 min, 精度为 0.1 °C。

表 1 测温路面结构与材料

Tab. 1 Structure and material of pavements for measuring temperature

道路编号	上面层		中面层		下面层	
	材料	厚度/cm	材料	厚度/cm	材料	厚度/cm
1	AC-13C	4	—	—	AC-25F	8
2	SMA-13	4	AC-16C	6	AC-25F	7
3	AC-16C	5	—	—	AC-25C	7

收稿日期: 2015-04-08; 修订日期: 2015-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408044); 中国博士后科学基金项目(2013M532004)

作者简介: 王延海(1967—), 男, 江苏徐州人, 研究员高级工程师, 研究方向为道路工程, E-mail: wang_yh67@163.com.

2 沥青路面经验预估模型的参数

影响路面温度场变化的环境因素主要为气温、太阳辐射、风速、湿度等,各因素作用图示如图1.

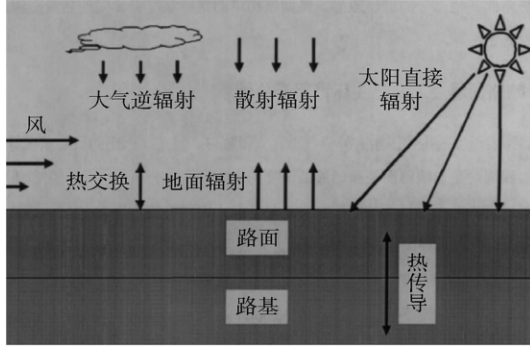


图1 环境对路面温度的影响

Fig. 1 Impacts of enviromental factors on pavement temperature

(1) 气温. 由于路面结构与大气直接接触,大气与路面结构之间形成对流换热系统,路面温度随气温呈周期性变化,两者规律相似,但峰值较气温滞后.

(2) 太阳辐射. 基于统计分析法建立的沥青路面温度场预估模型往往存在地区差异,使其只能用于当地路面温度场的预测. 产生地区差异的主要原因是不同地区的太阳辐射不一致,特别是随着纬度和海拔变化时. 笔者引入太阳辐射因子用以消除地区差异性. 参考文献[8-9],确定太阳辐射的计算方法如下.

Step1: 计算日辐射角度 Γ .

$$\Gamma = \frac{2\pi(S_n - 1)}{365}, \quad (1)$$

式中: S_n 为一年中的日期数,范围为1到365. 如1月1日, $S_n = 1$; 5月14日, $S_n = 134$.

Step2: 计算偏心系数 E_0 .

$$E_0 = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma. \quad (2)$$

Step3: 计算太阳赤纬 δ .

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \times \left(\frac{180}{\pi}\right). \quad (3)$$

Step4: 计算日升时角. 时角为某地区每天太阳最高点与太阳日升或日落时之间的角度. 当日升时,时角为负值;日落时,时角为正值. 当地时间正午12时,时角为 0° ,前后每隔一个小时,增加 15° . 日升时角

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \quad (4)$$

式中: φ 为纬度.

Step5: 计算日太阳辐射量.

$$R_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \sin \varphi \sin \delta \left(\frac{\pi \omega}{180} - \tan \omega \right), \quad (5)$$

式中: R_0 为日太阳辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; I_{sc} 为日辐射常数,为 $4.871 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Step6: 计算地平面上某一地点一天中某一时段(时角 ω_1 到 ω_2) 的太阳辐射时总量.

$$I_h = \frac{12 \times 3600}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360d_n}{365} \right) \cdot \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right]. \quad (6)$$

(3) 湿度和风速

大气湿度影响地面有效辐射,进而影响路面温度场. 风速是影响大气与路面结构间对流热交换的重要因素,风速增大加剧对流热交换. 笔者在预估模型中引入风速和湿度因子,以提高温度场的预测精度.

3 沥青路面高温温度场经验预估模型的建立

3.1 日最高温度预估模型

(1) 路表日最高温度预估模型. 采用日最高气温 T_{amax} 代表气温 T_a 、日出至14时太阳辐射量 R_{14} 表征太阳辐射,同时考虑日平均相对湿度 H_{ave} 和风速 W_{ave} 的影响,路表日最高温度 T_{smax} 的预估模型形式如式(7)所示:

$$T_{smax} = a_1 + a_2 T_{amax} + a_3 R_{14} + a_4 H_{ave} + a_5 W_{ave}, \quad (7)$$

式中: T_{smax} 为路表日最高温度, $^\circ\text{C}$; T_{amax} 为日最高气温, $^\circ\text{C}$; R_{14} 为日出至14时太阳辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; H_{ave} 为日平均相对湿度, %; W_{ave} 为日平均风速, m/s ; $a_1 \sim a_5$ 为回归系数.

模型参数中,气温、湿度和风速参数可以通过查询中国气象科学数据共享服务网(<http://www.cma.gov.cn>) 获取,太阳辐射量无法直接查取,故采用式(5)和式(6)计算得到. 通过回归分析可得到路表日最高温度预估模型,如式(8). 预估值与实测值的相关性系数 $R^2 = 0.759$. 系数 a_2 与 a_3 为

正值,说明路表温度与气温、太阳辐射正相关;系数 a_4 与 a_5 为负值,说明路表与风速、湿度负相关,符合实际情况.

$$T_{smax} = 21.929 + 1.523T_{amax} + 0.184R_{14} - 0.381H_{ave} - 0.170W_{ave}. \quad (8)$$

(2) 路面内部与路表日最高温度的关系模型. 采用幂函数形式建立路面内部日最高温度 T_{pmax} 与路表日最高温度的关系,如式(9). 通过回归分析确定关系模型,如式(10). 预估值与实测值的相关性系数 $R^2 = 0.921$.

$$T_{pmax} = A(D^d) + T_{smax}, \quad (9)$$

式中: T_{pmax} 为路面内部的日最高温度, $^{\circ}\text{C}$; D 为距路表深度, cm ; A, d 为回归系数.

$$T_{pmax} = -3.822(D^{0.379}) + T_{smax}. \quad (10)$$

(3) 日最高温度预估模型. 将式(10)代入式(8),得到路面日最高温度场预估模型,如式(11). 由该模型可以计算路面某一深度处的日最高温度.

$$T_{pmax} = -3.822(D^{0.379}) + 21.929 + 1.523T_{amax} + 0.184R_{14} - 0.381H_{ave} - 0.170W_{ave}. \quad (11)$$

3.2 日平均温度预估模型

(1) 路表日平均温度预估模型. 采用日平均气温 T_{aave} 代表气温 T_a 、日太阳辐射量 R_0 表征太阳辐射,同时考虑日平均相对湿度 H_{ave} 和风速 W_{ave} 的影响,按相同步骤得到路表日平均温度 T_{save} 的预估模型,如式(12). 预估值与实测值的相关性系数 $R^2 = 0.885$.

$$T_{save} = 16.470 + 1.114T_{aave} + 0.0164R_0 - 0.188H_{ave} - 0.107W_{ave}. \quad (12)$$

(2) 路面内部日平均温度与路表日平均温度的关系模型. 按上述步骤建立路面日平均温度 T_{pave} 与路表日平均温度的关系模型,如式(13). 预估值与实测值的相关性系数 $R^2 = 0.978$.

$$T_{pave} = -0.410(D^{0.0947}) + T_{save}. \quad (13)$$

(3) 日平均温度预估模型. 将式(13)代入式(12),得到路面日平均温度场预估模型,如式(14). 由该模型可以计算路面某一深度处的日平均温度.

$$T_{pave} = -0.410(D^{0.0947}) + 16.470 + 1.114T_{aave} + 0.0164R_0 - 0.188H_{ave} - 0.107W_{ave}. \quad (14)$$

4 温度场预估模型的验证

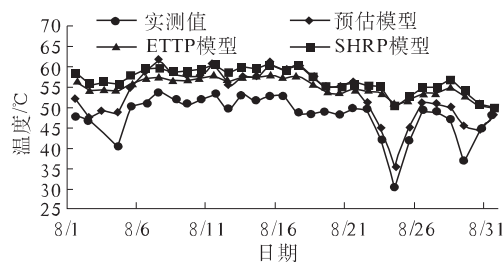
目前,国际上对路面高温温度场进行预估的经典模型为 SHRP 模型和 LTPP 模型,笔者将建立的高温模型预估结果与这两种经典模型的预估结果

进行对比,以验证所建模型的预估效果. SHRP 计算模型如式(15)所示, LTPP 模型如式(16)所示.

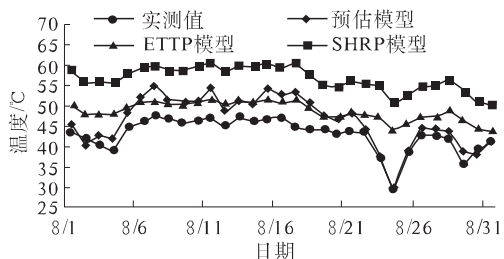
$$T_{pmax} = (T_{amax} + 0.00618\varphi^2 + 0.2289\varphi + 42.18) \times (1 - 2.48 \times 10^{-3}D + 1.085 \times 10^{-5}D^2 - 2.441 \times 10^{-8}D^3) - 17.78, \quad (15)$$

$$T_{pmax} = 54.32 + 0.78T_{amax} - 0.0025\varphi + 15.14\lg(D + 25). \quad (16)$$

采用不同的预估模型计算路表和距路表 4 cm 处的路面夏季日最高温度,结果如图 2 所示. 由结果可知, SHRP 公式计算值最高, LTPP 公式计算值次之,且两者均高于实测值. 笔者预估模型预估值与实测值最为接近,即笔者所建模型具有更高的预估精度.



(a) 路表最高温度



(b) 路表以下 4 cm 处最高温度

图 2 夏季日最高温度对比

Fig. 2 Comparison of daily highest temperature in Summer

由于 SHRP 和 LTPP 模型均为极限温度预估模型,而尚无针对路面平均温度进行有效预估的温度场模型,因此笔者所建立的日平均温度预估模型的预估精度还有待于进一步验证.

5 结论

沥青路面的高温温度场可通过引入气温、太阳辐射量、风速和湿度参数进行有效预估. 与 SHRP、LTPP 模型相比,本模型在预估当地沥青路面日最高温度时具有更好的精度. 需要通过更广泛的温度测试验证日平均温度预估模型的适用性.

参考文献:

- [1] 周岚,倪富健,赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路

- 面车辙发展的影响性分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3): 42-47, 54.
- [2] 汤文, 孙立军. 不同温度下沥青混合料的抗剪性能及其评价指标[J]. 公路, 2012(3): 191-195.
- [3] 孙强, 李进, 胡腾飞, 等. 实测沥青路面温度场分布规律研究[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 32-36.
- [4] 左兴, 蒋永祥. 基于弹性层状体系的沥青混凝土路面温度场模型分析[J]. 公路, 2013(6): 31-35.
- [5] 陈嘉祺, 罗苏平, 李亮, 等. 沥青路面温度场分布规律与理论经验预估模型[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(4): 1647-1656.
- [6] HUBER G A. Weather database for the superpave mix design system [R]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [7] MOHSENI A, M SYMONS. Improved AC pavement temperature models from LTPP seasonal data [C]//TRB. Proceedings of the 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC: TRB, 1998: 1-10.
- [8] YANG, K, KOIKE T, YE B. Improving estimation of hourly daily and monthly solar radiation by importing global data sets [J]. Agric. Forest Meteorol, 2006, 137(1): 43-55.
- [9] RAUL V, MIHAI M, TIMOTHY R C, et al. improve model to predict flexible pavement temperature profile [C]//Third International Conference on Accelerated Pavement Testing, Madrid: CEDEX, 2008: 14-26.

Empirical Prediction Model of High-Temperature Field of Asphalt Pavement

WANG Yan-hai¹, CAO Hai-li¹, JI Xiao-ping², GAN Xin-li²

(1. Traffic Planning, Design and Research Institute of Xuzhou, Xuzhou 221002, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The temperature data of three kinds of typical asphalt pavement structure was carried out by long-term tests, and the high precision experience forecast models of high temperature field of asphalt pavement were established by introducing the air temperature, solar radiation, wind speed and humidity parameters, and through compared with SHRP, LTPP models, the applicability was validated. The results show that, the high precision experience forecast models of high temperature field of asphalt pavement has a good forecast effect, and compared with the SHRP and LTPP models, the model in the paper has better precision in forecasting the highest temperature of the asphalt.

Key words: asphalt pavement; temperature field; prediction model; precision of prediction

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¹, 郭红兵¹, 陈拴发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 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对刚性基层沥青路面的反射裂缝问题, 提出采用 OLSM-25 (Open-graded Large Stone Asphalt Mixes, OLSM) 作为防裂层的方法, 以国内外 OLSM 参考级配为基础, 结合试验段修筑情况, 采用三维有限元方法, 建立设置 OLSM-25 防裂层的沥青路面有限元模型, 对其车辆荷载应力进行有限元数值分析, 提出 OLSM-25 防裂层荷载应力的实用计算公式, 为设置 OLSM-25 防裂层的沥青路面结构设计提供理论依据。结果表明: 在车辆荷载偏载作用下, 轴载、贫混凝土基层厚度、沥青面层厚度、OLSM-25 防裂层模量及厚度对 OLSM-25 防裂层的荷载应力具有显著影响。

关键词: 道路工程; 开级配大粒径沥青碎石; 三维有限元; 车辆荷载应力; 数值分析; 防裂层

中图分类号: U416.224 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.019

0 引言

沥青路面结构在交通荷载和环境因素作用下会产生荷载应力、温度应力及耦合应力。对于 OLSM 防裂层而言, 当基层存在裂缝且三者应力超过 OLSM 防裂层容许抗拉强度时, OLSM 防裂层将产生裂缝, 在三者应力反复作用下裂缝自下而上将逐渐扩展至沥青面层路表, 最终导致整个沥青路面结构破坏^[1]。笔者采用三维有限元法, 结合试验路建立设置 OLSM-25 防裂层的沥青路面结构计算模型与参数, 分析轴载以及各结构层的厚度和模量等 8 个设计参数对 OLSM-25 防裂层荷载应力的影响规律, 提出 OLSM-25 防裂层的荷载应力计算公式, 为设置 OLSM-25 防裂层的沥青路面结构设计提供理论基础和计算依据。

1 有限元计算模型与参数

1.1 有限元计算模型

图 1 为试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面计算模型, 其中基础指由路基、底基层等组成的路面综合支承体系。针对该弹性层状体系结构, 在符合

沥青路面基本假定基础之上, 还需做以下几点假定^[2-3]: ①应力分析时不考虑路面结构重力场; ②贫混凝土基层中部 1 cm 宽度的原始裂缝处无竖向荷载传递能力。基于已有研究对沥青路面结构计算模型的收敛性分析结论, 基础扩大尺寸拟定为 10.50 m × 9.00 m × 16.00 m。

在分析交通荷载作用下荷载应力时, 采用标准轴载 BZZ-100。根据已有研究对中荷载和偏荷载两种荷载作用位置对比分析结论^[4-6], 偏荷载作用为最不利荷载位置。试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面结构的计算模型^[4]见图 1。

1.2 计算参数

根据国内外相关研究成果^[7-9], OLSM-25 级配组成见表 1, 表 1 为 OLSM-25 的推荐级配范围。在试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面结构中, 采用推荐级配的上限作为防裂层级配。

分析沥青路面结构中 OLSM-25 防裂层荷载应力时, 所采用的计算参数见表 2, 以试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面结构作为计算基本结构, 逐一变化轴载、基础模量、贫混凝土基层模量及厚度、防裂层模量及厚度、沥青面层模量及厚度 8 个

收稿日期: 2015-06-18; 修订日期: 2015-07-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD 2010JC011); 陕西省教育厅专项科研计划项目(14JK1067)

作者简介: 赵亚兰(1979—), 女, 陕西眉县人, 陕西交通职业技术学院副教授, 硕士, 主要从事公路路面结构与材料研究, E-mail: 1204457943@qq.com.

主要参数,8 个参数的变化范围见表 3,分析 8 个参数对 OLSM-25 防裂层底部最大主应力 σ_1 的影响规律,比较 8 个参数对 OLSM-25 防裂层荷载应力指标的影响程度,从而确定出 8 个参数中对 OLSM-25 防裂层荷载应力影响显著的参数,在此基础上提出 OLSM-25 防裂层荷载应力计算公式。

在 BZZ-100 偏载作用下,OLSM-25 防裂层底部的最大主应力出现在基层裂缝顶端 A 点位置^[4, 10-11],图 2 为 OLSM-25 防裂层底部的最大主应力点位置。根据材料强度的最大拉应力理论^[12-13],在以下的荷载应力分析中,主要考察 OLSM-25 防裂层底部 A 点的主应力 σ_1 。

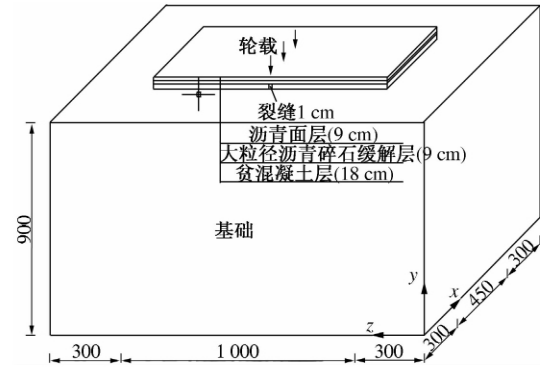


图 1 试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面计算模型 (单位/cm)

Fig. 1 Calculation model of asphalt pavement structure with OLSM-25 anti-cracking layer in the test roads

表 1 OLSM-25 推荐级配范围
Tab. 1 Recommended gradation range of OLSM-25

筛孔尺寸/ mm	通过各筛孔的质量百分率/%						
31.5	26.5	19	16	13.2	9.5		
级配范围	100	95-75	71-52	61-43	52-35	39-25	
筛孔尺寸/ mm	通过各筛孔的质量百分率/%						
4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配范围	22-12	17-8	10-4	6-2	4-1	2-1	1-0

表 2 计算参数
Tab. 2 Main calculation parameters

路面结构层	几何尺寸 $x \times y \times z/\text{m}$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
沥青面层	$4.50 \times 0.09 \times 10.00$	1 200	0.25
OLSM-25 防裂层	$4.50 \times 0.09 \times 10.00$	600	0.25
贫混凝土基层	$4.50 \times 0.18 \times (4.995 + 4.995)$	20 000	0.15
基础	$10.50 \times 9.00 \times 16.00$	100	0.35

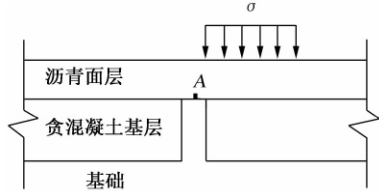


图 2 OLSM-25 防裂层底部的最大主应力点位置

Fig. 2 Point position of the maximum principal stress at the bottom of OLSM-25 anti-cracking layer

表 3 主要参数变化范围

Tab. 3 Variation range of main calculation parameters

轴载 P/kN	基础模量 E_0/MPa	贫混凝土基层		OLSM-25 防裂层		沥青面层	
		模量 E_1/MPa	厚度 h_1/cm	模量 E_2/MPa	厚度 h_2/cm	模量 E_3/MPa	厚度 h_3/cm
80~200	25~800	10 000~30 000	16~28	400~800	8~14	600~2200	9~14

2 OLSM-25 防裂层荷载应力分析

2.1 荷载应力参数影响规律分析

经过有限元计算,OLSM-25 防裂层荷载应力在轴载 P 等 8 个参数逐一变化时的计算结果见图 3. 由图 3 分析可知 OLSM-25 防裂层荷载应力受轴载 P 等 8 个参数的影响规律。

(1) 轴载. 在交通荷载偏载作用下,当轴载 P 由 80 kN 增至 200 kN 时(增幅 150%),最大主应力 σ_1 随着轴载 P 的增大呈线性增加趋势,最大主应力 σ_1 增幅 144%,轴载 P 对 OLSM-25 防裂层底部最大主应力的影响作用显著。

(2) 基础模量. 在 BZZ-100 偏载作用下,最大主应力 σ_1 随着基础模量 E_0 的增大而减小,最大主应力降幅 41%,OLSM-25 防裂层底部最大主应力受基础模量 E_0 的影响较小。

(3) 贫混凝土基层模量及厚度. 最大主应力 σ_1 随基层模量及厚度的增大而减小. 当贫混凝土基层模量 E_1 由 10 000 MPa 增至 30 000 MPa 时(增大 2 倍),最大主应力 σ_1 降幅 8%,贫混凝土基层模量 E_1 对 OLSM-25 防裂层底部最大主应力影响很小;当贫混凝土基层厚度 h_1 由 16 cm 增至 28 cm 时(增幅 75%),最大主应力降幅 18%,OLSM-25 防裂层底部最大主应力受贫混凝土基层厚度 h_1 影响显著。

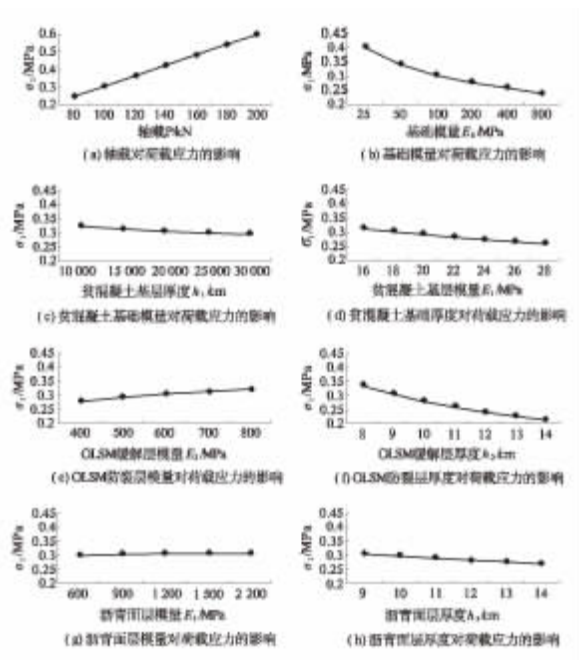


图3 OLSM-25 防裂层荷载应力的参数影响规律

Fig.3 Influence law of parameters for traffic load stress of OLSM-25 anti-cracking layer

(4) OLSM-25 防裂层模量及厚度. 最大主应力 σ_1 随其自身模量的增大而增大, 随其自身厚度的增大而减小. 当 OLSM-25 防裂层模量 E_2 由 400 MPa 增至 800 MPa 时(增大 1 倍), 最大主应力 σ_1 增幅 16%, OLSM-25 防裂层模量对最大主应力影响较大; 当 OLSM-25 防裂层厚度 h_2 由 8 cm 增至 14 cm 时(增幅 75%), 最大主应力 σ_1 降幅 36%, OLSM-25 防裂层厚度 h_2 对最大主应力影响显著.

(5) 沥青面层模量及厚度. 最大主应力 σ_1 随沥青面层模量的增大而增大, 随沥青面层厚度的增大而减小. 当沥青面层模量 E_3 由 600 MPa 增至 2 200 MPa 时(增大 2.7 倍), 最大主应力 σ_1 增幅 3%, 沥青面层模量 E_3 对 OLSM-25 防裂层底部最大主应力几乎无影响; 当沥青面层厚度 h_3 由 9 cm 增至 14 cm 时(增幅 56%), 最大主应力 σ_1 降幅 12%, 沥青面层厚度 h_3 对 OLSM-25 防裂层底部最大主应力影响显著.

以上分析表明, 在轴载 P 等 8 个主要参数中, 轴载、贫混凝土基层厚度、沥青面层厚度、OLSM-25 防裂层模量及厚度等 5 个参数对 OLSM-25 防裂层荷载应力影响显著.

2.2 荷载应力计算公式

为便于进行 OLSM-25 防裂层沥青路面结构设计, 在以上荷载应力参数影响规律分析的基础上, 建立 OLSM-25 防裂层底部最大主应力的计算公式如下

$$\sigma_{pa} = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7 k_8 \sigma_1, \quad (1)$$

式中: σ_{pa} 为交通荷载偏载作用下, OLSM-25 防裂层底部最大主应力, MPa; σ_1 为 BZZ-100 偏载作用下, 试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面基本结构中, OLSM-25 防裂层底部的最大主应力; $k_1 \sim k_8$ 为依次为轴载、基础模量、基层模量及厚度、防裂层模量及厚度、沥青面层模量及厚度的修正系数(表 4 为 OLSM-25 防裂层荷载应力的参数修正系数).

表 4 OLSM-25 防裂层荷载应力的参数修正系数

Tab.4 Correction coefficient of parameters for traffic load stress of OLSM-25 anti-cracking layer

轴载 P/kN	80	100	120	140	160	180	200	$k_1 = 0.0097P + 0.0332 (R^2 = 1)$
轴载修正系数 k_1	0.806	1.000	1.194	1.388	1.579	1.773	1.967	
基础模量 E_0/MPa	25	50	100	200	400	800		$k_2 = 2.0174E_0 - 0.1444 (R^2 = 0.9747)$
基础模量修正系数 k_2	1.322	1.128	1.000	0.918	0.859	0.786		
基层模量 E_1/MPa	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000			$k_3 = -5 \times 10^{-15} E_1^3 + 4 \times 10^{-10} E_1^2 - 2 \times 10^{-5} E_1 + 1.1696 (R^2 = 1)$
基层模量修正系数 k_3	1.056	1.023	1.000	0.984	0.970			
基层厚度 h_1/cm	16	18	20	22	24	26	28	$k_4 = -1 \times 10^{-5} h_1^3 + 0.0009 h_1^2 - 0.0421 h_1 + 1.512 (R^2 = 0.9999)$
基层厚度修正系数 k_4	1.039	1.000	0.967	0.934	0.905	0.875	0.849	
OLSM-25 模量 E_2/MPa	400	500	600	700	800			$k_5 = 6 \times 10^{-10} E_2^3 - 1 \times 10^{-6} E_2^2 + 0.0015 E_2 + 0.5237 (R^2 = 1)$
OLSM-25 模量修正系数 k_5	0.911	0.961	1.000	1.030	1.056			
OLSM-25 厚度 h_2/cm	8	9	10	11	12	13	14	$k_6 = -0.0002 h_2^3 + 0.0135 h_2^2 - 0.2708 h_2 + 2.5243 (R^2 = 1)$
OLSM-25 厚度修正系数 k_6	1.095	1.000	0.918	0.849	0.789	0.740	0.697	
面层模量 E_3/MPa	600	900	1 200	1 500	2 200			$k_7 = 1 \times 10^{-11} E_3^3 - 7 \times 10^{-8} E_3^2 + 0.0001 E_3 + 0.9271 (R^2 = 1)$
面层模量修正系数 k_7	0.980	0.993	1.000	1.003	1.007			
面层厚度 h_3/cm	9	10	11	12	13	14		$k_8 = -0.023 h_3 + 1.207 (R^2 = 1)$
面层厚度修正系数 k_8	1.000	0.977	0.954	0.931	0.908	0.885		

3 结论

(1) 采用三维有限元方法,以试验段 OLSM-25 防裂层沥青路面结构为计算基本结构,分析比较了轴载以及各结构层的厚度和模量等 8 个设计参数对 OLSM-25 防裂层荷载应力的影响规律,结果表明:轴载、OLSM-25 防裂层模量以及贫混凝土基层、沥青面层、防裂层三层厚度对 OLSM-25 防裂层的荷载应力影响显著。

(2) 在综合分析轴载 P 等 8 个参数对 OLSM-25 防裂层荷载应力影响规律的基础上,提出了在交通荷载偏载作用下 OLSM-25 防裂层荷载应力的计算公式,为设置 OLSM-25 防裂层的沥青路面结构设计提供理论基础和计算依据。

参考文献:

- [1] 郭红兵,陈拴发. 沥青路面热-荷载耦合应力数值分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,32(2):15-19.
- [2] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.
- [3] 廖云云,黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2008.
- [4] 郭红兵. 设置开级配大粒径沥青碎石裂缝缓解层的沥青路面抗裂机理研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2013.
- [5] 李彩霞,张争奇. 柔性基层在重载道路补强中的可行性分析[J]. 西安科技大学学报,2014,34(5):574-578.
- [6] 郭红兵. 大粒径沥青碎石缓解层沥青路面结构分析[D]. 西安:长安大学公路学院,2008.
- [7] 付其林,陈拴发,陈华鑫. 级配对开级配大粒径沥青碎石路用性能的影响[J]. 郑州大学学报:工学版,2010,31(3):82-86.
- [8] 付其林,陈拴发,陈华鑫. 开级配大粒径沥青混合料路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(7):72-76.
- [9] 付其林. 开级配大粒径沥青碎石组成设计参数与方法研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2011.
- [10] 彭翀. 贫混凝土基层沥青路面抗反射裂缝结构研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2006.
- [11] 陈拴发,彭翀,王松根,等. 贫混凝土基层沥青路面荷载应力有限元分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(6):1-5.
- [12] 牛力强. 交通荷载作用下港区道路受力特性研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2014,35(6):95-99.
- [13] 郭红兵,陈拴发. 设置 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面疲劳分析[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(10):54-59.

Finite Element Analysis on Traffic Load Stress of Asphalt Pavement with Open-graded Large Stone Asphalt Mixes (OLSM-25) Anti-cracking Layer

ZHAO Ya-lan¹, GUO Hong-bing¹, CHEN Shuan-fa²

(1. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China; 2. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In view of the problem of the reflective cracking in the rigid base asphalt pavement, a method of using Open-graded Large Stone asphalt Mixes (OLSM) as the anti-cracking layer is proposed. On the basis of the reference gradation of OLSM in the domestic and international, combined with the test roads construction, by means of three-dimensional finite element method, the finite element model of asphalt pavement with OLSM-25 anti-cracking layer has been established. Finite element numerical analysis on traffic load stress of asphalt pavement with OLSM-25 anti-cracking layer have been done. And practical formula of traffic load stress for OLSM-25 anti-cracking layer has been proposed. All these provide a theoretical basis for structural design of asphalt pavement with OLSM-25 anti-cracking layer. The result show that: under the action of the asymmetric traffic load, axle load, thickness of lean concrete base, thickness of the asphalt surface layer, modulus and thickness of OLSM-25 anti-cracking layer have significant influence on the traffic load stress of OLSM-25 anti-cracking layer.

Key words: road engineering; open-graded large stone asphalt mixes; three-dimensional finite element; traffic load stress; numerical analysis; anti-cracking layer

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

(桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为了研究高强钢筋活性粉末混凝土(RPC)简支梁的抗剪承载力,开展了 HRB500 级钢筋 RPC 简支梁抗剪性能试验研究,分析纵筋配筋率、配箍率等因素对其抗剪承载力的影响,并将试验数据与国内外规范公式计算结果进行对比分析.基于试验数据,建立半经验半理论抗剪承载力计算公式,计算值与试验值吻合良好,可为类似实际工程设计提供参考.

关键词: 活性粉末混凝土; 高强钢筋; 受剪承载力

中图分类号: TU375.1; TU371.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.020

0 引言

活性粉末混凝土(Reactive Power Concrete,简称 RPC),是一种具有高强度,高耐久性,高延性的超高性能水泥基复合材料^[1],具有广阔的应用前景.单波^[2]采用辅助刚性反力架,绘制出 RPC200 轴心受压的本构关系曲线.李莉^[3]通过对 6 根活性粉末混凝土简支梁正截面受弯性能的试验研究,提出了活性粉末混凝土梁截面抵抗矩塑性系数的计算公式.季文玉等^[4]对 12 根活性粉末混凝土 T 形简支梁进行了斜截面受剪承载力试验研究,显示剪跨比、配箍率和纵筋配筋率等参数对试验梁的抗剪承载力和破坏形态均有一定影响,剪跨比在 1~4 范围内,试验梁的破坏形态均为斜压和剪压破坏.这些研究在材料性能、抗弯承载力、变形特性等方面形成了相对成熟的理论.但是在活性粉末混凝土构件抗剪承载力的研究方面还相对薄弱,笔者在活性粉末混凝土中配置 HRB500 级纵筋,考虑配筋率、配箍率等因素的影响,进行高强钢筋活性粉末混凝土半经验半理论的抗剪承载力计算公式的建立.

1 试验概况

1.1 试件设计

4 根配有 HRB500 级钢筋的 RPC 简支梁,截面尺寸 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,跨度 1 800 mm,混凝土设计强度等级 C160,纵筋直径 25

mm,HRB335 级箍筋,剪跨比 $1 < \lambda \leq 3$,试验主要参数为纵筋配筋率 ρ 和配箍率 ρ_{sv} ,试件参数见表 1.

1.2 原材料

RPC 配合比见表 2,其材料如下:广西兴安海螺牌 52.5 普通硅酸盐水泥;粒径 0.4~0.6 mm 石英砂;平均粒径 0.1 μm ,表面积 15 000~20 000 m^2/kg 硅灰粉(主要成分为二氧化硅);粒径 2 μm 以下,平均粒径 0.31 μm 硅微粉;粒径 4 μm 以下的石英粉;FND 浓缩型高效减水剂;镀铜光面平直钢纤维,长度约 13 mm,直径约 0.15~0.2 mm,抗拉强度 $> 2\,000 \text{ MPa}$.

1.3 测点布置和加载方案

浇筑 RPC 梁之前,在剪跨区的箍筋和纵筋上分别粘贴电阻应变片以测量其应变;浇筑完成后养护 28 d,保持梁体干燥,在剪跨区腹板布置应变花以研究腹板主应变变化规律;将百分表和千分表分别放置在梁的跨中和支座处,以测量梁的整体变形,见图 1.试验方法采用单调静载加载,在距支座 1/4 处两点集中加载,加载方法参考文献[5]执行,应变数据通过 DH3816 静态应变测试系统采集,荷载等级由传感器控制(UMID-ACELL 压力传感器).

2 试验结果与各国规范抗剪强度公式计算结果对比分析

普通钢筋混凝土简支梁在剪力和弯矩共同作

收稿日期:2015-04-14;修订日期:2015-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51368013);广西重点实验室项目资助(11-cx-04)

作者简介:金凌志(1959—),女,桂林理工大学教授,研究方向为结构工程,E-mail:jlz-5904@163.com.

用下,主要有斜拉破坏、斜压破坏和剪压破坏,由于剪压破坏的影响因素很多,国内外设计规范大都通过大量的试验研究,采用数理统计分析的方法,建立半经验半理论的抗剪承载力计算公式.对于高强钢筋 RPC 简支梁,是否可以套用国内外现行设计规范,进行抗剪承载力的计算,是笔者期待

解决的问题,表 3 为混凝土规范计算值与试验值的对比表.

同理,如表 3 分别将试验结果与我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[6]抗剪强度公式计算值比对分析发现,标准差 0.04,离散系数为 0.114. 将试验结果与《加拿大混凝土

表 1 试件参数
Tab.1 Parameters of Specimens

试件编号	f_c /MPa	f_t /MPa	b /mm (剪跨长)	剪跨比 λ	箍筋等级 及间距	ρ_{sv}	纵筋	ρ
LJ001	116.7	4.94	450	2.26	A6@450	0	3D25	4.79%
LJ002	116.7	4.94	450	2.26	A6@450	0	4D25	6.57%
LJ003	116.7	4.94	450	2.26	C8@150	0.447%	4D25	6.57%
LJ004	116.7	4.94	450	2.26	C8@60	0.745%	4D25	6.57%

注: 架立筋和箍筋采用直径 6 mm 光圆直钢; 纯弯段箍筋间距 150 mm; ρ_{sv} 配箍率; ρ 纵筋配筋率.

表 2 RPC 质量配合比
Tab.2 Mix of RPC

材料	52.5 硅酸盐水泥	石英砂	硅灰	石英粉	硅微粉	10mm 钢纤维	小组分
配合比	1	0.9	0.35	0.2	0.35	0.1	0.1

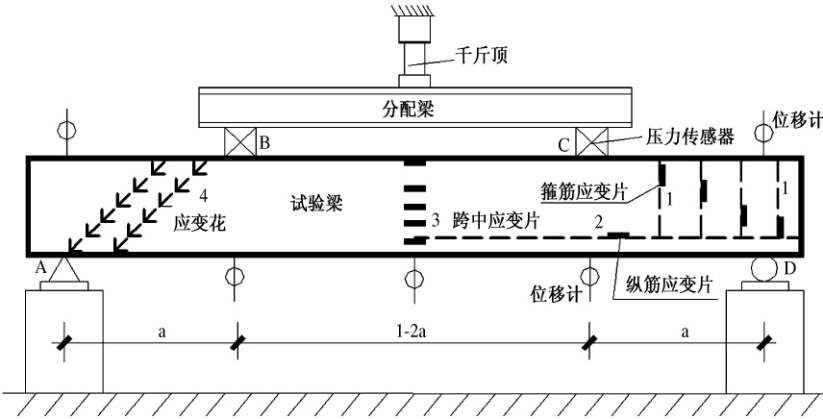


图 1 试件加载及钢筋应变片和混凝土应变花布置示意图

Fig.1 Loading device, geometric parameters of specimens and the arrangement of reinforcement strain gauge and RPC strain rosette

表 3 混凝土规范公式计算值与试验值对比表

Tab.3 Comparison of concrete standard formula calculated value and experimental value

梁的编号	f_t /MPa	剪跨比 λ	h_o	ρ_{sv} /%	V_{cal} /kN	V_{exp} /kN	V_{cal} / V_{exp}
LJ001	4.94	2.26	201.2	0	80.58	320	0.252
LJ002	4.94	2.26	199	0	80.58	360	0.224
LJ003	4.94	2.26	199	0.447	134.50	435	0.309
LJ004	4.94	2.26	199	0.745	169.55	485	0.350
平均值	—	—	—	—	—	—	0.284
标准差	—	—	—	—	—	—	0.049
离散系数	—	—	—	—	—	—	0.173

结构设计规范(CSAA23.3—2004)》^[7]抗剪强度公式计算值以及《美国建筑混凝土结构规范及条文说明(ACI318—08)》^[8]抗剪强度公式计算值进行对比分析,其标准差、离散系数分别为0.146、0.229和0.137、0.329。

可见,试验梁的实测值与按各规范抗剪承载力计算公式的计算值相比,规范的理论计算值都远远小于试验实测值,说明采用前述各规范公式计算高强钢筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力,都过于保守,且离散系数较大,应该进行修正和完善,找到比较适用于在活性粉末混凝土梁中配置强度较高钢筋的抗剪承载力计算公式。

3 高强钢筋 RPC 梁半经验半理论抗剪计算公式探讨

由于剪压破坏的影响因素很多,目前,试验的实测值与按各规范抗剪承载力计算公式的计算值进行对比分析得出规范理论计算值都远远小于试验实测值,过于保守,且离散系数较大。以下对普通混凝土梁抗剪承载力计算公式中的主要参数进行修正和完善,找出了一个比较适用于在活性粉末混凝土梁中配置高强钢筋的抗剪承载力计算公式。

3.1 计算公式主要参数分析

(1) RPC 材料强度 f_c 。RPC 强度对抗剪承载力的影响非常显著,抗压强度越高,抗剪承载力越大,但是两者并不呈线性关系。据参考文献[9—11]的相关研究发现,当扣除箍筋作用之后, f_t 或 $\sqrt{f_c}$ 与抗剪承载力 V_u 近似成线性关系,笔者采用 $\sqrt{0.8f_c}$ 作为影响活性粉末混凝土抗剪强度的主要参数。

(2) 剪跨比 λ 。大量试验研究表明,剪跨比 λ 与钢筋混凝土梁抗剪承载力的关系较为紧密,承载力随着剪跨比的增大而变小($1 < \lambda \leq 3$),当 $\lambda > 3$ 时,承载力急剧下降。根据试验数据,参考文献[6],结合笔者的试验成果,将高强钢筋活性粉末混凝土简支梁剪跨比的影响形式确定为 $2.5/(\lambda + 1)$ 。

(3) 纵向配筋率 ρ 。普通钢筋混凝土中,一般情况下梁抗剪区的纵筋 ρ 很小,钢筋的销栓作用也小,限制斜裂缝宽度的贡献小,骨料的咬合力同样减小。但是活性粉末混凝土构件的配筋率远远大于 1.5%,纵向配筋率对抗剪承载力等的影响不容忽视,通过两种不同纵筋率

的试验分析,本文取纵筋对抗剪承载力(V_u)的影响系数为 $5.4\sqrt{\rho}$ 。

(4) 箍筋影响系数。抗剪承载力 V_u 随配箍率的提高而增大,但是箍筋率超过一定值,斜截面混凝土被压碎,而箍筋并没有屈服,根据试验结果,对箍筋的影响进行线性分析,对于集中荷载作用下的高强钢筋活性粉末混凝土梁,取 $V_s = 1.25f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} \cdot h_0$,其中 ρ_{sv} 小于 1%。

3.2 RPC 简支梁抗剪承载力计算的建议公式

根据上述分析和陈彬^[12]关于预应力 RPC 梁的抗剪承载力的研究等,高强钢筋 RPC 简支梁抗剪承载力计算也采用两项式相叠加的形式

$$V_u = V_c + V_s. \quad (1)$$

式中: V_c 为混凝土抗剪强度,包含了纵筋配筋率的影响

$$V_c = \frac{2.5}{\lambda + 1} \sqrt{0.8 \cdot f_c} \cdot 5.4 \sqrt{\rho} b h_0. \quad (2)$$

V_s 为箍筋抗剪强度

$$V_s = 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} \cdot h_0. \quad (3)$$

则高强钢筋活性粉末混凝土的计算公式为:

$$V_u = \frac{2.5}{\lambda + 1} \sqrt{0.8 \cdot f_c} \cdot 5.4 \sqrt{\rho} b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} \cdot h_0. \quad (4)$$

式中: f_c 为活性粉末混凝土轴心抗压强度; f_{yv} 为箍筋的屈服强度; λ 为剪跨比,当 $\lambda > 3$ 时取 $\lambda = 3$,当 $\lambda < 1$ 时, $\lambda = 1$;

$$\rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{b s} < 1.0\%.$$

3.3 建议公式与试验结果的比较

表 4 将笔者建议计算公式(4)的计算值与活性粉末混凝土简支梁试验结果进行对比分析,计算结果和试验结果的比值 V_{cal}/V_{exp} 为 0.99,标准差 0.009 6,变异系数 0.009 7,建议公式计算值与试验实测值吻合良好,且变异系数较小,表明采用该公式进行高强钢筋 PRC 简支梁抗剪承载力计算可行而且可信。

4 结论

(1) 将笔者试验数据与各国规范抗剪承载力公式计算结果进行对比分析,规范公式值都偏于保守,而且变异系数都比较大,这是因为 RPC 远高于各国规范所规定的混凝土强度等级取值范围。

表 4 建议公式计算值与试验值的对比表

Tab. 4 The contrast table of the recommended formula calculation value and the experimental value

梁的编号	f_c /MPa	配筋率/%	配箍率/%	V_{cal} /kN	V_{exp} /kN	V_{cal} / V_{exp}
LJ001	116.7	4.88	0	312.96	320	0.978
LJ002	116.7	6.58	0	351.00	360	0.975
LJ003	116.7	6.58	0.447	431.68	435	0.992
LJ004	116.7	6.58	0.745	484.03	485	0.998
平均值	—	—	—	—	—	0.986
标准差	—	—	—	—	—	0.009 6
离散系数	—	—	—	—	—	0.009 7

(2) 结合试验数据和参考文献建立的高强钢筋活性粉末混凝土简支梁半经验半理论抗剪承载力计算公式,计算值和试验结果吻合良好,可以为实际工程承受集中荷载的高强钢筋 PRC 简支梁抗剪承载力计算提供参考,其适用范围为斜截面裂缝出现之前,且剪跨比 $1 < \lambda \leq 3$.

(3) 试验梁数目较少,梁截面形式单一,建立的高强钢筋活性粉末混凝土简支梁半经验半理论抗剪承载力计算公式的实用性有待进一步考证,应该进行更多参数的试验研究与比对分析.

参考文献:

[1] DUGAT J, ROUX N, BERNIER G. Mechanical Properties of Reactive Powder and Structures. 1996, 29 (4): 233 – 240.

[2] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2002.

[3] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2010.

[4] 季文玉, 丁波, 安明喆. 活性粉末混凝土 T 形梁抗剪试验研究 [J]. 中国铁道科学. 2011, (5): 38 – 42.

[5] GB 50152—92, 混凝土结构试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

[6] JTGD62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[7] CSAA23.3—2004, Design of concrete structures [S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2004.

[8] ACI318—05, Building code requirements for concrete [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2008.

[9] 王铁成. 高强混凝土构件斜截面受剪承载力设计 [J]. 天津大学学报, 2001, 34(5): 559 – 663.

[10] 张川, 张百胜, 黄建锋. 钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪承载力研究 [J]. 重庆建报, 2005, 27(1): 48 – 52.

[11] 赵军, 高丹盈. 钢纤维增强钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力塑性极限分析 [J]. 力学季刊, 2005, 26 (2): 235 – 240.

[12] 陈彬. 预应力 RPC 梁抗剪性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007.

Analysis of Shear Capacity Formula of Reactive Power Concrete Beams
with High Strength Reinforcement

JIN Ling-zhi, ZHANG Meng, LI Li

(Key laboratory of Guangxi geotechnical mechanics and Engineering, Guilin University of Technology Guilin 541004 China.)

Abstract: In order to study the shear capacity of the simply supported beams with reactive power concrete (RPC) and high strength reinforcement, this paper carries out the research on shear capacity performance of simply supported RPC beams with HRB500 reinforcement. The influence of longitudinal reinforcement ratio, stirrup reinforcement ratio and other factors on the shear capacity are analyzed, and the data of this experiment and domestic and overseas calculation formulas are compared and analyzed. This paper establishes the half experience and half theory shear capacity calculation formula based on the data of this experiment. The calculation results of the deduced formula agree well with the experiment results, so it can provide references for similar engineering designs.

Key words: reactive power concrete; high strength reinforcement; shear capacity

文章编号: 1671-6833(2015)05-0096-05

基于 DNA 链置换反应的自然数素性判定问题研究

王子成^{1,3}, 豆根生², 周小刚², 叶盟盟¹

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学 理学院, 河南 郑州 450002;
3. 河南省信息化电器重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要: 借助自组装 DNA 计算的显著优势, 采用 DNA 链置换反应原理开展了自然数的素性判定问题研究. 首先, 构造了有关 DNA 分子逻辑门, 并构建了相应的 DNA 分子计算模型, 然后设计了用于自然数素性判定的分子逻辑电路. 最后基于 Visual DSD 仿真平台, 对分子逻辑电路进行仿真. 结果表明: 采用的分子逻辑电路能够实现自然数的素性判断.

关键词: DNA 链置换; 素性判定; 逻辑电路

中图分类号: TP384 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.021

0 引言

素数指大于 1 的自然数中, 仅能被 1 及其自身整除的数. 自然数的素性判定研究具有深远的理论意义. 伴随着现代密码学的兴起, 开展大数的素性判定研究已成为一个新课题, 其在信息安全领域具有重要的应用价值.

基于素数理论, 密码学领域可实现信息的有效加密. 自然界中, 多数生物体为了最大程度避免天敌, 其生命周期也呈现素数性. 在害虫的生长周期内, 若使用素数次杀虫剂则可有效抑制病虫害.

试除法素数判定算法中最基本的算法, 此外还有 AKS, Baillie-PSW 和 Miller-Rabin 等算法. 但当自然数为多位数时, 计算量非常庞大. 且其中 Miller-Rabin 算法已经被证实存在错误率. RSA 公钥加密算法是目前最有影响力的加密算法, 但也仅能强力破解短 RSA 钥匙. 可见, 探索用于自然数素性判定的新型算法, 降低判定难度, 缩短计算时间, 以提高自然数的素性判定速度及效率, 进而实现合数的素因子分解, 具有深远的理论研究及现实意义^[1].

DNA 计算^[2]独特的信息存储方式及巨并行计算能力使其成为了一种新颖计算模式. 其中,

DNA 链置换反应能够在室温下进行, 无需外力作用, 反应周期短, 最近成为一个热门研究课题^[3-5]. 笔者基于 DNA 链置换反应, 设计了用于四位二进制数素性判定的计算模型. 该模型可在室温下进行, 操作简单, 易于实现, 产率较高, 能充分体现 DNA 计算优势.

1 DNA 链置换反应

DNA 链置换反应是指单链 DNA 分子能够与部分互补的 DNA 双链结构产生反应, 并能释放出原有双链结构中的单链 DNA 分子, 生成新的双链 DNA 分子结构的过程^[6-7]. 具有部分互补结构的双链 DNA 分子, 含有悬挂形式的黏性末端, 分子处于热力学非稳定状态. 加入与原始双链 DNA 分子的长链完全匹配的单链 DNA 分子时, 根据系统的自由能最低原理, 通过单链 DNA 分子间的杂交匹配及替换过程, 能够生成更加稳定的双链 DNA 分子结构. 最终实现了以较长单链 DNA 分子为输入信号, 以新的较短单链 DNA 分子为输出信号的信号传输过程.

DNA 链置换反应的基本过程如图 1 所示. 含有黏性末端 t^* 的双链 DNA 分子结构 A 中, DNA 子序列 x 及 x^* 部分为完全互补匹配, 原始构型的

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1304620); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A413371)

作者简介: 王子成(1976—), 河南永城人, 郑州轻工业学院讲师, 主要从事系统建模与仿真研究, E-mail: wzch@zzu-li.edu.cn.

通讯作者: 周小刚(1979—), 河南焦作人, 河南农业大学讲师, 主要从事电路与通信工程研究, E-mail: 20331476@qq.com.

DNA 分子 A 因为具有悬挂状态的黏性末端,处于热力学非稳定状态.当输入结构为 tx 的单链 DNA 分子时,其中的子序列 t 能与 A 中的 t^* 黏性末端通过碱基匹配而键合.之后,分子 tx 中的 x 部分逐步将 A 中的 x 部分剥离出来,最终形成具有稳定结构的双链 DNA 分子 B,并输出单链 DNA 分子 x ,完成链置换过程.将多个 DNA 链置换反应结合成网络回路,可实现某个逻辑运算.

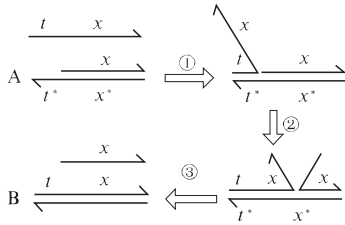


图1 DNA链置换的基本过程

Fig.1 The process of DNA strand displacement

近年来,DNA链置换反应在分子计算、纳米机器及疾病诊断和治疗等领域都得到深入研究,已成为纳米科学领域的重要课题.2006年,Seelig等基于链置换反应原理,设计出与门、或门、非门等逻辑模块,利用这些模块组合成逻辑电路^[8].2010年,QIAN改进设计了单个的门单元,使得逻辑门的设计更加模块化和标准化^[9].2011年,QIAN设计了计算四位二进制数平方根的逻辑电路,用DNA链组成四个相互联系的人工神经元,通过猜心术游戏,证明了DNA分子神经网络具有一定的逻辑推理能力^[10-11].2015年,Cheulee等人基于DNA链置换反应,将核酸电路用于诊断研究^[12].

2 自然数素性判定的DNA计算模型

2.1 逻辑电路

逻辑电路基于二进制编码机制,通过离散信号的传递和处理,最终实现数字信号的逻辑运算和操作.基本逻辑电路有与门、或门、非门、异或门及与非门等.已广泛用于计算机、数字控制、通信、自动化和仪表等诸多领域.

判定四位二进制数对应的自然数素性时,相应的逻辑电路如图2所示.图中的逻辑电路由4个与门、3个或门和3个非门组成. $I_0 \sim I_3$ 分别表示四位输入信号, P 为输出信号,其输出为输入数字的素性判定结果.当输出 P 为1时,表示输入为素数;当输出 P 为0时,则表示输入为非素数.如 $I_0 = 1, I_1 = 0, I_2 = 0, I_3 = 0$ 时,对应的输入信号

为1000,该逻辑电路用于对十进制数字8的素性进行判断.此时对应的输出信号 P 为0.

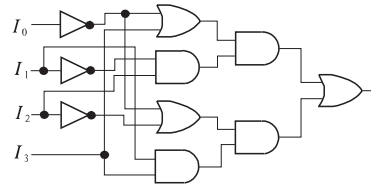


图2 四位二进制数的素性判定逻辑电路

Fig.2 The judgmental logic circuit about four-bit binary prime number

2.2 分子逻辑门及放大器

逻辑门为条件开关,仅当输入信号满足一定条件时,逻辑门才会“打开”,输出信号.图2中用到了3种基本逻辑门——与门、或门、非门.笔者根据3种逻辑门的“打开”条件,设计与其对应的基于DNA链置换反应的分子逻辑门.

(1) 分子与门 对于2输入的门,仅两个输入都为逻辑1时,与门才能“打开”,此时输出为逻辑1,否则,输出为逻辑0.笔者设计的分子与门见图3所示.图3(a)中,单链DNA分子 ts_1 和 ts_2t 对应于逻辑门中的两个输入信号,链 s_2ts_3 为输出信号链.

当仅输入为信号链 ts_1 或 ts_2t 时,分子与门无信号链输出.仅当同时输入信号链 ts_1 和 ts_2t 时,才能确保置换反应正向进行,输出正确的信号链 s_2ts_3 ,最终完成逻辑运算过程.其中,输入信号链 ts_1 用于置换出分子与门中的单链 s_1t .输入信号链 ts_2t 作用有二:①防止单链 s_1t 与链 ts_1 之间再次产生置换反应;②通过置换反应释放分子与门中的单链 s_2ts_3 .为方便分子逻辑模型的构建,设计出分子与门的等价符号,如图3(b)所示.其中,“○”内数字表示分子与门的初始浓度,“○”外数字表示输入信号链的分子浓度.

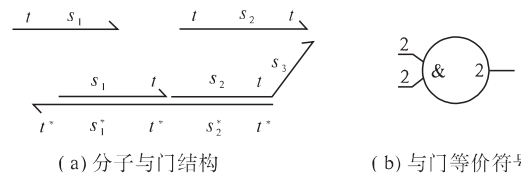


图3 分子逻辑与门结构及符号

Fig.3 The structure and symbol of molecular logic AND gate

(2) 分子或门 2输入分子或门中,当两个输入信号链中有一个逻辑值为1时,或门就可“打开”,输出为逻辑1;仅当所有输入都为逻辑0时,

才能输出逻辑值 0. 根据或门的触发条件, 笔者设计的分子或门如图 4 所示.

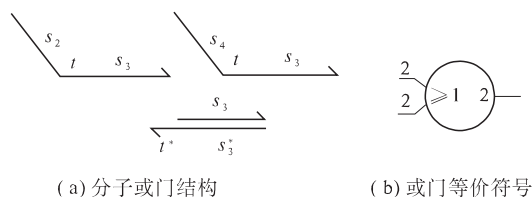


图 4 分子逻辑或门结构及符号

Fig. 4 The structure and symbol of molecular logic OR gate

图 4(a) 中, 分子或门的输入信号分别为链 s_2ts_3 和链 s_4ts_3 , 二者都含有部分单链 s_3 , 都能够置换出分子或门中的单链 s_3 . 图 4 中输入信号链的分子结构能够避免置换反应的逆过程, 有利于最终输出正确的信号链, 完成或逻辑运算过程.

图 4(b) 为分子与门的等价符号, “○”内数字表示分子或门的浓度, “○”外数字表示输入信号链的浓度.

(3) 分子非门笔者中采用两种不同链的分别表示逻辑 1 和逻辑 0.

2.3 分子放大器

DNA 链置换反应过程中存在如下几种影响反应速率和产率的因素

(1) 输入信号链 DNA 分子, 不可能全部参与置换反应;

(2) 随着反应进程的推进, 输入信号链分子浓度逐渐降低, 从而降低反应速度;

(3) 单链 DNA 分子在置换过程中, 会出现碱基错配和降解现象.

含有多个链置换反应的计算模型中, 上述因素将会影响到输出产物的数量, 甚至产物的正确性. 为了确保链置换反应的顺利进行, 提高输出信号链在反应产物中的比例, 笔者设计了基于 DNA 链置换反应的分子信号放大器, 用于提高输出信号链的浓度. 其结构与工作原理如图 5 所示.

图 5(a) 为分子放大器模型. 单链 ts_5 为输入信号链, 单链 s_5t 为燃料链, 单链 s_5ts_6 则为输出信号链. DNA 链置换反应是在溶液中进行的, 为了表述方便笔者设定输入信号链 ts_5 的分子数量为 1 倍浓度(图中标注为“ $I = 1 \times$ ”), 双链结构的 DNA 分子数量为 2 倍浓度(图中标注为“ $A = 2 \times$ ”), 燃料链 s_5t 为 4 倍浓度(图中标注为“ $F = 4 \times$ ”). 加入输入信号链 ts_5 前, 双链结构和燃料链 s_5t 间无反应. 信号链输入前, 双链结构和燃料链

间无反应. 加入输入信号链 ts_5 后生化反应过程, 如图 5(c) 所示. 实线箭头表示正反应方向, 虚线箭头表示逆反应方向. 输入信号链 ts_5 就像一个“打开”信号, 触发了位于顶部位置的链 ts_5 、链 s_5ts_6 及链 s_5t 和位于底部位置的链 $t^*s_5^*t^*$ 之间的反应. 因此, 即便有少量的输入信号链, 只要提高燃料链对底部链 $t^*s_5^*t^*$ 的占有率, 就可以得到较多的输入信号链. 分子放大器结构中, 可以通过提高双链结构和燃料链的浓度来提高输出信号链的产量, 从而达到信号放大的作用. 图 5(b) 为分子放大器的等价符号.

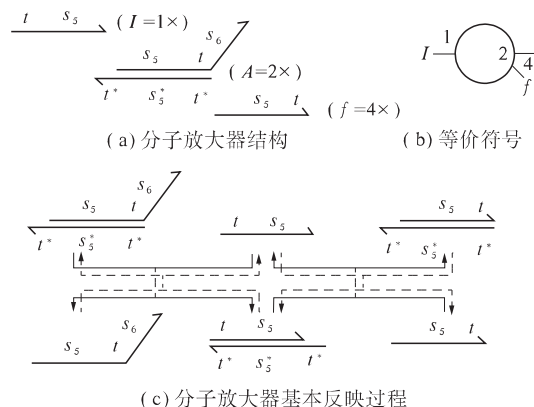


图 5 分子放大器及其反应过程

Fig. 5 The structure and reaction process of molecular amplifier

3 分子逻辑电路

笔者构建了自然数素性判定的分子逻辑电路, 如图 6 所示. 该逻辑电路能对四位二进制数的素性进行判断. 图中标注的数字分别表示各种 DNA 分子的分子浓度.

图 6 中输入信号的逻辑 1 和 0 分别对应两种单链 DNA, 因此, 共有 8 种输入信号链, 分别表示为 $I_{00}, I_{01}, \dots, I_{03}, I_{10}, I_{11}, \dots, I_{13}$, 通过对应的 8 个分子放大器将输入信号放大. 输入信号 $I_0 = 1$ 和 $I_3 = 0$ 对输出结果无影响, 但为了保留逻辑电路的完整性, 确保分子逻辑电路的鲁棒性, 分子逻辑电路中仍然保留这两个信号. 图中 P 为输出信号. 在分子逻辑电路中, 当分子逻辑电路中有信号链输出时, P 的取值为 1, 此时, 所输入的自然数判定为素数; 反之, 输出 P 取值为 0, 所输入的自然数判定为非素数.

4 仿真结果

图 6 所示的分子逻辑电路, 可实现自然数的素性判断. 笔者在 Visual DSD 软件平台中, 对分子逻辑电路的运算过程进行仿真, 验证了本分子

逻辑电路的可行性与运算结果的准确性. Visual DSD 是由 Matthew Lakin 等人^[13-14]设计,主要用于构建和分析 DNA 链置换计算模型.采用图 6 中的分子逻辑电路,以 1 ~ 15 之间自然数的素性判定为例,Visual DSD 的仿真结果如图 7 所示.

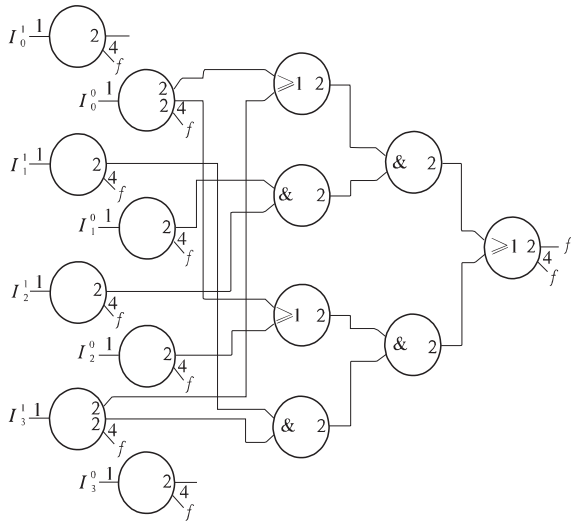


图 6 用于四位二进制数素性测试的分子逻辑电路

Fig. 6 The logic circuit about four-bit binary prime number

在分子逻辑电路运算过程中,4 条输入信号链和输出信号链 P 的分子浓度变化曲线体现出非常明显的阶段性特征.

第一阶段:加入 4 种输入信号链,先与对应的分子放大器发生链置换反应,刚开始反应物浓度高,反应速度快.因为该分子模型的反应是逐级进行的,此时并无链 P 生成;

第二阶段:随着链置换反应的逐步深入,输入信号链的浓度趋于稳定,有些输入情况中有链 P 产生,并且链 P 的产率不断增加;

第三阶段:输入信号链浓度平稳,有链 P 产生情况中,链 P 的生产速率逐渐降低,最后趋于平缓,如图 7 所示.

图 7 中,用于表征纵坐标的信号链分子浓度比是指输出信号链的分子浓度所占整个反应体系中所有分子浓度的比值,仿真实验中反应时间单位为 1 000 s.若输入信号链对应的自然数为 2, 3, 5, 7, 11, 13, 有信号链 P 输出,对应自然数 1 ~ 15 内的素数,证明了分子计算模型的正确性.在链 P 有浓度变化的情况中,链 P 的浓度变化曲线呈“S”形.这与反应物的浓度有关.

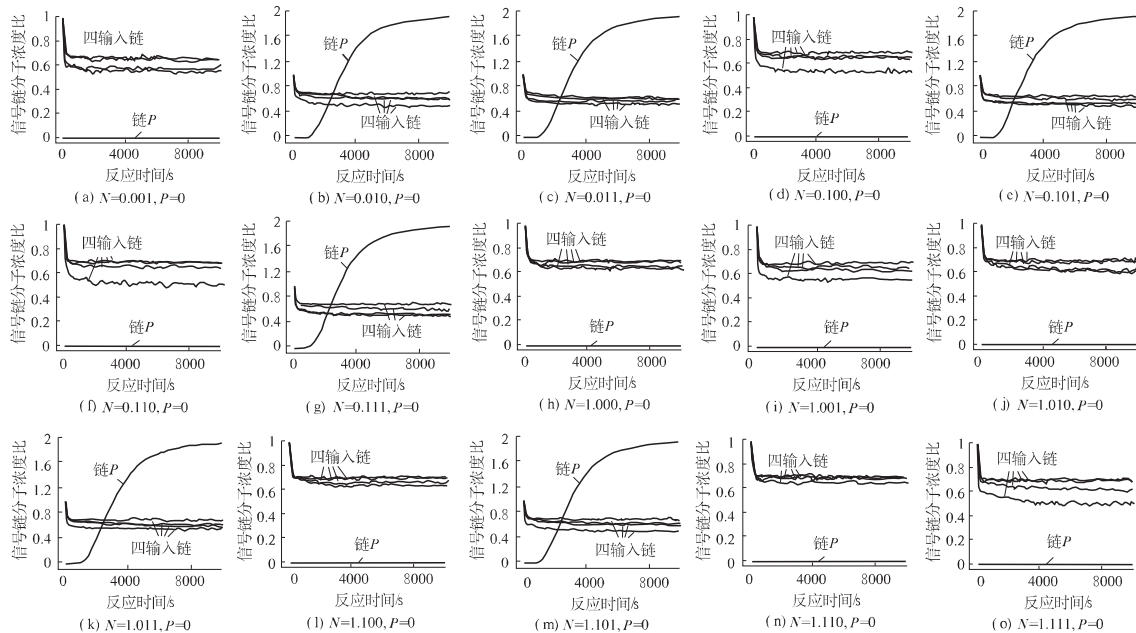


图 7 Visual DSD 平台下分子逻辑电路的仿真结果

Fig. 7 The simulations of logic circuit based on Visual DSD

图中输入信号链定义为 1 倍浓度,而信号链 P 的最终输出浓度约为输入信号链浓度的 2 倍,表现出分子放大器的信号放大作用.输入信号链的浓度之所以在平稳后出现波动性变化,且变化幅度不大,是因为输入信号放大器中大部分的底

部链被燃料链占据,使得分子计算模型后续生化反应对输入信号链的浓度影响不大.

5 结论

DNA 链置换反应在常温下自发进行,成本

低,操作简单. 笔者将 DNA 链置换反应用于自然数的素性判定问题研究. 设计了可执行逻辑运算的 DNA 分子逻辑门以及具有信号放大作用的 DNA 分子放大器. 构造了用于自然数素性判定的分子逻辑电路. 反应过程中,可对目标信号链浓度进行扩增,便于输出信号链的提取,能够有效实现信号传输与处理,保证了传输信号的安全性与有效性.

利用 DSD 平台对 1 ~ 15 之间的自然数的素性判定进行了仿真,结果表明,笔者设计的分子逻辑电路能够有效地用于自然数的素性判定. 通过扩大该分子逻辑电路的规模,可进行更大自然数的素性判定研究.

参考文献:

- [1] 杨学庆,柳重堪. 基于 DNA 有穷自动机的素性测试法[J]. 通信学报,2006,27(10):80-85.
- [2] ADLEMAN L M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems [J]. Science, 1994, 266(5187):1021-1024.
- [3] LAKIN M R, YOUSSEF S, CARDELLI L, et al. Abstractions for DNA circuit design [J]. The Royal Society Interface, 2012, 9(68):470-486.
- [4] ZHANG D Y, WINFREE E. Control of DNA strand displacement kinetics using toehold exchange [J]. J Am Chem Soc, 2009, 131(47):17303-17314.
- [5] CHEN Y J, DALCHAU N, SRINIVAS N, et al. Programmable chemical controllers made from DNA [J]. Nature nanotechnology, 2013, 8(10):755-762.
- [6] LAKIN M R, PARKER D, CARDELLI L, et al. Design and Analysis of DNA Strand Displacement Devices using Probabilistic Model Checking [J]. The Royal Society Interface, 2012, 7(72):1470-1485.
- [7] 张成,马丽娜,董亚非,等. 自组装 DNA 链置换分子逻辑计算模型 [J]. 科学通报,2012,57(31):2909-2915.
- [8] SEELIG G, SOLOVEICHIK D, ZHANG D Y, et al. Enzyme-free nucleic acid logic circuits [J]. Science, 2006, 314(5805):1585-1588.
- [9] QIAN Lu-lu, WINFREE E. A simple DNA gate motif for synthesizing large-scale circuits [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 8(62):1281-1297.
- [10] QIAN Lu-lu, WINFREE E. Scaling up digital circuit computation with DNA strand displacement cascades [J]. Science, 2011, 332(6034):1196-1201.
- [11] QIAN Lu-lu, WINFREE E, BRUCK J. Neural network computation with DNA strand displacement cascades [J]. Nature, 2011, 475(7356):368-372.
- [12] CHEULEE J, ANDREW D. ELLINGTON. Diagnostic applications of nucleic acid circuits [J]. Accounts of Chemical Research, 2014, 47(6):1825-1835.
- [13] LAKIN M R, YOUSSEF S, POLO F, et al. Visual DSD: a design and analysis tool for DNA strand displacement systems [J]. Bioinformatics, 2011, 27(22):3211-3213.
- [14] PHILLIPS A, CARDELLI L. A programming language for composable DNA circuits [J]. Royal Society Interface, 2009, 6(11):419-436.

Research of Prime Number Judgement Based on DNA Strand Displacement Reaction

WANG Zi-cheng^{1,3}, DOU Gen-sheng², ZHOU Xiao-gang², YE Meng-meng¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3. Henan Key Laboratory of Information Appliances, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The prime number judgement is an important theoretical issue in natural number study field. Based on the significant advantages of DNA computing, the DNA strand displacement reaction is used to carry out the prime problem determination study in this paper. Firstly, the molecular logic gates are constructed, and then the corresponding molecular computing model is set up, meanwhile, the molecular logic circuit for prime number judgement is constructed. Finally, the simulation results based on Visual DSD platform show that molecular logic circuits are viable to carry out prime number judgement.

Key words: DNA strand displacement; prime number judgement; logic circuit

文章编号: 1671-6833(2015)05-0101-05

基于 Android 与遥感数据的 PM_{2.5} 监测系统设计与实现

司一丹^{1,3}, 张胜敏², 王玉璟³, 卢延新⁴, 郑逢斌³

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 开封大学 信息工程学院, 河南 开封 475002; 3. 河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004; 4. 西安工业大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710032)

摘 要: 针对传统的地面监测手段无法给出区域尺度 PM_{2.5} 的精细分布, 基于多源卫星遥感数据, 结合 Android 平台, 设计了一个大气污染监测系统, 为普通用户提供高分辨率 PM_{2.5} 分布。利用 My Server 服务器实现了卫星遥感产品生产功能, 手机端则提供监测结果的动态展示功能, 采用 Android 消息推送机制实现了污染超标时的实时提醒功能。经过在北京地区的实验测试, 并将多源卫星反演结果与地面站点的监测结果进行对比, 证明了系统具有高可行性和高有效性等优点。

关键词: 空气污染监测; 卫星遥感; Android 平台; PM_{2.5}; 消息推送

中图分类号: TP39

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.022

0 引言

PM_{2.5}, 又称为细颗粒物, 是环境空气中动力学直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 能较长时间地悬浮于空气中^[1]。自 2013 年起, 我国环保部门已经初步建立了地面监测站点网络。但由于监测仪器较为昂贵, 站点分布相对分散, 导致常规的地面观测只能获取监测站点附近的 PM_{2.5} 浓度信息。相对于地基监测, 卫星遥感数据具有大面积覆盖、准实时获取、动态更新、成本低等特点^[2]。目前, 很多对地观测卫星都具备了对大气污染的监测能力, 如美国 NASA/EOS 发射的 Terra、Aqua 和国产高分系列卫星。随着大气定量遥感算法的不断发展, 相关的大气遥感产品和业务系统也正逐步应用到环保等行业部门中, 如基于组件式的区域霾监测系统, 用于获取我国霾污染的分布和强度等信息^[3]; 基于 J2EE 的火点遥感监测系统, 能够利用卫星数据统计并分析不同省市秸秆燃烧及污染情况^[4]。

相对于行业部门的应用, 普通大众对于了解自身周围 PM_{2.5} 浓度的需求更加迫切, 而传统的地基监测和桌面应用系统通常无法满足上述要求。当前, 基于 Android 平台开发的应用软件因其

使用方便、快捷等特点, 越来越受到公众的青睐, 很多学者也尝试利用其开发一些日常应用程序。如顾聪等设计了一种基于 Android 平台的室内 LBS 系统, 使用户在室内环境下也能享受普适计算带来的便利^[5]; 郭志涛等开发了基于 Android 平台的智能医疗系统, 解决了传统方式达不到实时性传输数据的问题^[6]。目前国内尚无利用 Android 平台开发的卫星遥感监测系统。由于受单一卫星数据源固定的过境时间、重返周期、空间分辨率等因素限制, 导致了卫星数据获取不及时、数据量不够丰富的问题, 因此, 笔者尝试将 Android 平台与多源卫星数据结合, 设计并实现一种大气污染监测系统。

1 系统架构设计

系统的总体结构包括服务器端和手机端, 两部分之间通过网络实现交互。

(1) 服务器端: 包括 My Server 和 Android Push Notification Server(Android 消息推送服务器, 简称 APNS) 两个服务器。My Server 采用开源的 Tomcat 服务器, 用于处理客户端请求和卫星原始数据, 并将得到的 PM_{2.5} 遥感产品保存到数据库中; APNS 采用的是 androidpn-server-tomcat 版本,

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471367)

作者简介: 司一丹(1991—), 女, 河南郑州人, 中国科学院研究生, 主要从事空间数据处理方面的研究, E-mail: siyidan2014@126.com.

主要负责向手机终端推送提示消息。

(2) 手机端: 采用 Android 平台, 通过 WIFI、3G 等方式经过中间 Internet 通道与服务器进行通信, 接收并显示服务器返回的 PM_{2.5} 浓度信息。手机端架构由应用层、应用框架层、系统运行库层和 Linux 内核层 4 个层次组成^[6], 如图 1 所示。

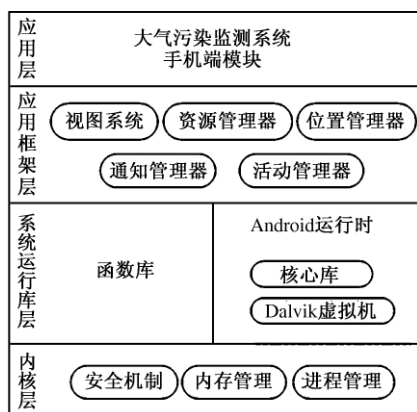


图1 手机端架构图

Fig.1 Framework of mobile terminal

应用层用来存放已开发完成的程序, 如日历、通讯录、浏览器等, 笔者开发的 PM_{2.5} 监测系统的手机端模块也在该层上运行; 应用框架层是 Android 平台为应用程序的开发而提供的 API 框架, 本系统的开发需要调用该层的视图系统、位置管理器、活动管理等组件; 系统运行库层包括组件库和虚拟机, 组件库是连接应用程序框架层和 Linux 内核层的重要部分, 虚拟机为每个 Android 应用程序提供一个运行环境; Linux 内核层作为软硬件之间的抽象层, 本系统的底层依赖于内核层提供的 Android 诸如系统安全、内存管理、显示驱动、网络协议等核心服务。

2 系统功能设计

2.1 服务器设计

2.1.1 My Server 设计

卫星遥感能够获取的最常用的大气参数是气溶胶光学厚度 (AOD: Aerosol Optical Depth), 代表了整层大气内气溶胶颗粒物对可见光的衰减。研究表明, 在给定的条件下卫星观测的气溶胶光学厚度与近地面颗粒物浓度之间存在稳定的关系。但 AOD-PM_{2.5} 相关性也受颗粒物的垂直分布和相对湿度等因素的影响^[7]。

根据多源卫星时间分辨率的不同, 将新获得的卫星原始数据作为处理系统的数据源, 采用应用最为广泛的 NASA 暗像元算法^[8], 通过解决云

识别、气溶胶模式和地表噪声去除这 3 个问题, 反演得到整层的 AOD^[9]。在此基础上, 借助地面或大气化学模式等辅助数据提供的气溶胶垂直分布和相对湿度、风速等环境气象参数, 进行 AOD 的垂直和吸湿校正, 最终得到公众关注的近地面 PM_{2.5} 浓度^[7]。

为了减少网络传输时间和传输错误率, 本系统直接把卫星数据处理系统 (以下简称为处理系统) 部署在 My Server 上。服务器通过发送命令, 把产品数据添加到数据库中。数据库中每条记录包括经度 Lon、纬度 Lat、日期、对应地点名、PM_{2.5} 浓度值和卫星来源等字段。其中, 每个经纬度对作为主键, 唯一区别于其他记录。当手机端发起请求时, 服务器按照 Lon、Lat、请求时间的先后顺序在数据库中进行查询, 选择与查询条件对应的卫星数据记录, 若该请求时间没有卫星过境, 则查找距请求时间最近的记录; 其次根据预先设定的标准, 对记录中 PM_{2.5} 浓度值进行判断; 最终将不同的判断结果发送给消息推送服务器。上述流程如图 2 所示。

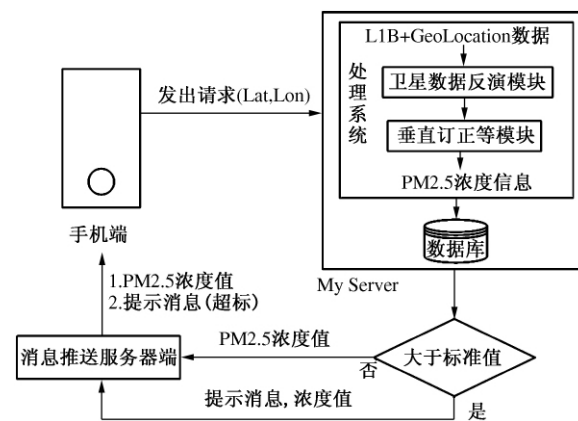


图2 My Server 端流程图

Fig.2 Flow chart of My Server

2.1.2 APNS 设计

现有很多成熟的推送方式可以实现服务器端消息推送和手机端接收消息功能。考虑到网络带宽和成本等多方面因素, 笔者采用 Androidpn 来实现消息的推送^[10]。客户端首先通过 XMPPConnection 类与服务器建立持久连接, 然后进行用户注册和登录认证, 最后根据身份信息接收服务器发送的具体通知。

在本系统中, 当用户发出 PM_{2.5} 浓度查询请求后, 该系统手机端首先进行消息推送注册, 并向 APNS 请求获得一个唯一区别于其他应用程序的 device token, 手机端将从 APNS 上获取的 device

token 发送给 My Server, My Server 将浓度值和提示消息发送给 APNS, APNS 在自身已注册推送服务的 device 列表中查找对应的 device token, 并把浓度值以 XML 形式显示在拥有相应 device 的应用程序上, 把提示消息以通知栏 Push 消息形式发送给相应的 device.

2.2 手机端设计

手机端主要实现显示 My Server 返回的位置信息、该位置信息对应的 PM_{2.5} 浓度以及接收 APNS 消息等功能. 系统通过百度地图 Android 定位 SDK 实现定位功能, 当手机端发起定位请求时, 定位 SDK 会根据当前应用的定位因素(GPS、基站、WIFI 信号) 的实际情况来生成定位依据进行定位. 具体流程如图 3 所示.

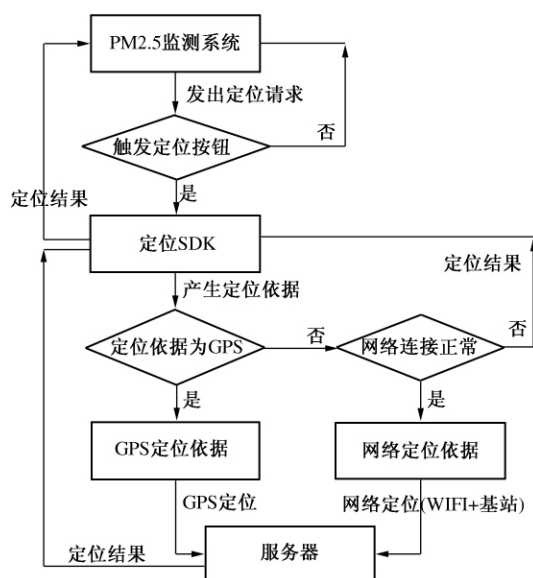


图3 定位流程图

Fig.3 Flow chart of location

利用 GeoPoint 类的 point 对象获取用户当前的经纬度坐标, 并将该点在地图上标记, 此外, 为确保用户能够实时查看当前位置 PM_{2.5} 浓度信息, 对经纬度坐标设计一个监听器接口, 并将监测到的位置信息以及 PM_{2.5} 浓度信息显示在地图上. 本系统基于多源卫星数据可以满足不同用户的多元化需求, 基于高空间分辨率的卫星产品, 用户可以将地图放大到一定程度, 查看一定区域内的 PM_{2.5} 浓度情况. 当超过不同污染程度的规定值时, 系统会通过震动或响铃的方式及时报警并推送消息, 手机端负责接收该消息并显示在通知栏中.

3 系统测试

3.1 卫星数据

采用 Terra/Aqua、Suomi NPP、HJ 和 GF-4 多

个卫星的数据作为该系统的数据源, 统称为多源卫星数据, 具体参数如表 1 所示. Terra 和 GF-4 过境时间均为每日地方时上午 10:30, Aqua 和 Suomi NPP 上搭载的可见光/红外辐射成像仪 VIIRS 的过境时间均为下午 13:30, HJ-CCD 过境时间为上午 6:00.

表1 多源卫星参数信息

Tab.1 Information of Multi-Satellites' parameters

卫星	传感器	产品空间分辨率	观测周期
Terra/Aqua	MODIS	1 km	2 次/1 天
NPP	VIIRS	750 m	2 次/1 天
HJ	CCD	30 m	1 次/2 天
GF-4	WV	16 m	1 次/4 天

为了验证该数据源的有效性, 笔者选择 2015 年 3 月 16 日多源卫星获取的产品数据, 通过处理系统的转换, 得到当天 PM_{2.5} 的卫星遥感监测图, 并与传统地面站点的监测结果进行对比, 如图 4 所示.

如图 4 所示, 地面监测站点的数量有限且相对分散, 而卫星监测 PM_{2.5} 分布的信息量较为丰富, 例如, 门头沟区仅有一个监测站点, 而方框 A 区域及整个中部大部分区域的 PM_{2.5} 分布情况较为复杂, 单纯依靠东南方向的站点来判断门头沟区的污染情况会造成很大的偏差; 怀柔区中部方框 B 所示区域也出现上述问题; 方框 C 代表顺义区中部地区, 站点监测到的 PM_{2.5} 浓度在 150 ~ 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内(如图 4(a)), 而在图 4(b) 中卫星监测此区域的浓度处在 >250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内.

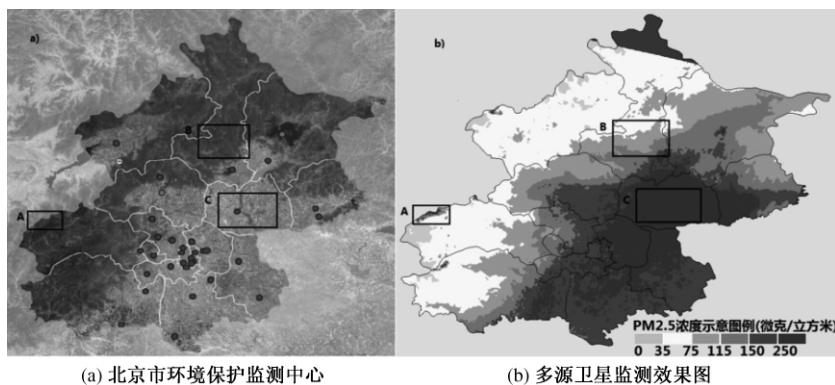
3.2 应用实例

为了验证本系统的可行性, 笔者对服务器端和客户端进行相应的部署和配置, 并在北京地区进行测试. 具体配置参数为: 服务器端运行在 Windows 平台下, 数据库与 My Server 服务器位于同一个 PC 上, 并将 My Server 和 APNS 部署在 Tomcat 上; 客户端采用支持 Android 4.4 版本的小米手机.

打开 APP, 查看所处位置及周围一定区域 PM_{2.5} 污染情况. 如图 5(a), 当前位置的 PM_{2.5} 浓度高达 267 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 根据我国空气质量标准, 已属于严重污染, 则系统提醒用户当前位置污染严重, 注意采取保护措施(图 5(b)); 如图 5(c) 所示, 查看当前位置及四周相距 1.1 km 各个地点的污染情况. 不难发现位于道路一侧的中科院地理所位置相比于其他四个地方的污染值要高, 紧邻

森林公园的的国奥村则相对较低,而采用传统地面站点的监测这五个地方的 PM_{2.5} 浓度均为 168

$\mu\text{g}/\text{m}^3$,进而证明了卫星遥感可以提供更加精细的大气污染信息.



(a) 北京市环境保护监测中心

(b) 多源卫星监测效果图

图 4 2015 年 3 月 16 日 PM_{2.5} 站点监测与卫星遥感监测结果对比

Fig. 4 Comparison between monitoring sites and remote sensing monitoring in Mar. 16, 2015



(a) 定位并请求PM_{2.5}浓度

(b) 消息提醒

(c) 周围地点PM_{2.5}浓度列表

图 5 2015 年 3 月 16 日北京地区测试效果图

Fig. 5 Tested graph in Beijing, Mar. 16, 2015

4 结论

主要介绍了 PM_{2.5} 监测系统的设计思想、整体结构、核心功能及结果展示,利用 My Server 和 APNS 两个服务器,分别实现了卫星遥感产品生产、处理客户端请求和消息推送等功能.相较于目前的空气监测和预报方式,该系统使用户能够主动地了解到所处位置及周围区域的空气质量情况.但由于卫星数据接收时间延迟的限制,目前还无法完全实现实时查看空气质量的请求,未来将考虑与中科院遥感所位于密云、三亚、喀什的三个卫星实时接收系统相结合,并同化地面监测、大气化学模式数据进一步丰富数据源,弥补有云时无法反演的问题,

从而加快该系统的业务化和应用化.

参考文献:

- [1] 杨洪斌,邹旭东,汪宏宇,等. 大气环境中 PM_{2.5} 的研究进展与展望 [J]. 气象与环境学报, 2012, 28 (3): 77-82.
- [2] 谭衢霖,邵芸. 遥感技术在环境污染监测中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2000, 4 (15): 246-251.
- [3] 李莘莘,陈良富,王中挺,等. 基于组件的区域霾监测系统及其反演算法 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (16): 23-24, 28.
- [4] 贺宝华,陈良富,李莘莘,等. 基于 J2EE 的秸秆火点监测系统设计 [J]. 微计算机信息, 2010, 26 (314): 38-39.

- [5] 顾聪,陈益强,刘军发,等. 基于Android平台的室内LBS系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2012,33(1): 396-401.
- [6] 郭志涛,郭忠,王振. 基于Android平台的智能医疗系统的设计与实现[J]. 郑州大学学报:工学版,2016,35(6): 60-63.
- [7] WANG Zi-feng, CHEN Liang-fu, TAO Jin-hua, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in vertical-and RH correcting method [J]. Remote Sensing of Environment,2010,114(1): 50-63.
- [8] KAUFMAN Y J, WALD A E, REMER L A, et al. The MODIS 2.1um channel—correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997,35(5): 1286-1298.
- [9] 李莘莘,陈良富,陶金花,等. 城市与冬季北方亮目标地区气溶胶光学厚度反演[J]. 中国科学,2012,42(8): 1253-1263.
- [10] 付莎. 基于XMPP协议企业级IM的研究与实现[D]. 西南交通大学信息学院,2009.

Design and Implementation of PM2.5 Monitoring Application Based on Android and Remote Sensing Data

SI Yi-dan^{1,3}, ZHANG Sheng-min², WANG Yu-jing³, LU Yan-xin⁴, ZHENG Feng-bin³

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Information Engineering College, Kaifeng University, Kaifeng 475002, China; 3. Computer and Information Engineering College, Henan University, Kaifeng 475004, China; 4. Computer Science and Engineering College, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: The traditional ground-based monitoring network is too coarse to meet people's need to know the air pollution over current location and sounding areas. Based on multi-satellite data and Android platform, an air-pollution monitoring system is designed to provide high-resolution PM2.5 concentrations information. The remote sensing results are generated through My Server and dynamically displayed by smartphone. When the pollutant concentrations exceed the standard value, the real-time alert function is activated by android message pushing mechanism. Through the experiment in Beijing areas and the comparison between satellite-retrieval and ground-based monitoring, our app has been validated with high feasibility and availability.

Key words: air pollution monitoring; satellite remote sensing; Android; PM2.5; message pushing.

文章编号: 1671-6833(2015)05-0106-05

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

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对多组多播的认知无线网络, 提出了一种基于组间协作的多播组配对信息传输机制. 在满足干扰约束和峰值功率约束的情况下, 通过分析瑞利衰落环境下放大转发(AF)和译码转发(DF)协作单中继系统的性能, 将系统总速率作为优化目标, 研究了该传输机制下中继位置和主用户位置对于系统的最优功率分配和系统吞吐量的影响. 仿真结果表明: 中继位置和主用户的位置对于系统性能起着关键的作用, 最优功率分配方案取得相对于等功率分配方案更优的性能, 采用最优功率分配时, 不管是AF还是DF, 当中继位于基站和目的节点连线的中点且靠近认知用户时, 系统性能最优.

关键词: 认知无线电; 多组多播; 功率分配; 中继位置

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.023

0 引言

认知无线电能够充分利用频谱资源, 解决未来频谱资源短缺和现有频谱资源未被充分利用的矛盾^[1]. 认知无线电系统中, 在不对授权用户产生有害干扰的前提下, 非授权用户可以接入授权用户频段, 提高频谱利用率^[2].

中继位置问题在不同的应用场景中引起了普遍的关注, 文献[3]研究了基于中继位置的自适应中继选择方案. 文献[4]运用矢量量化方法, 研究了小区内上行传输的中继位置优化问题. 文献[5]把系统容量作为目标函数, 研究了一个小区内两种协作模式中中继位置优化问题.

多播的主要特征是实现多个用户在一个信道上接收相同业务, 接收相同业务的用户称为一个多播组. 由于小区内不同用户业务需求可能不同, 故存在多组多播的情况. 文献[6]研究了OFDMA系统中下行链路的多播业务, 提出一种基于信道感知的多播方案. 文献[7]中, 作者研究了无线网络终端协作多播技术. 文献[8]中, 提出了一种组间多中继协作的多播机制. 文献[9]研究了协作多播方案以及各种方案吞吐量的性能分析.

基于上述研究成果, 笔者提出了一种基于组间协作的多播组配对信息传输机制, 研究了AF

和DF模式下, 中继位置和主用户位置对于系统最优功率分配和吞吐量影响. 根据系统性能对位置的依赖关系, 找到合适的中继坐标提高系统性能, 并比较最优和等功率分配方案的性能.

1 系统模型

系统模型如图1所示, 包含一对主用户的一个认知无线网络. 为了研究简单起见, 仅仅考虑存在两个多播组的情形. 其中, 第一多播组中有用户CUR、CU1, 第二多播组中有用户CU2, 用户可以是移动用户、办公大楼或者住房, 并且第1组中CUR靠近基站, 而CU1远离基站或者处于深衰落, 需要CUR作为中继进行协作传输. 即第一组中同时存在直接传输和协作传输, 第2组中CU2距离基站较近, 采用直接传输, 这样一个基于组间协作的多播组配对信息传输机制的系统模型可以提高系统的性能. 中继方式采用AF和DF两种, 因为虽然DF性能一般比AF好, 但是DF对条件要求比较高, 有些现实情况只适用AF, 故笔者考虑了两种情况. 所有节点采用单天线且半双工模式, 即同一时刻节点不能同时收发信息.

这个网络最大的特征是采用基于组间协作的多播组配对信息传输机制, 使系统的性能提高. 一个数据周期分为两个时隙.

收稿日期: 2015-05-23; 修订日期: 2015-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271421)

作者简介: 杨守义(1962—), 男, 河南民权人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向为信源编码、宽带无线通信(OFDM, MIMO)及图像数字水印等, E-mail: iesyyang@zzu.edu.cn.

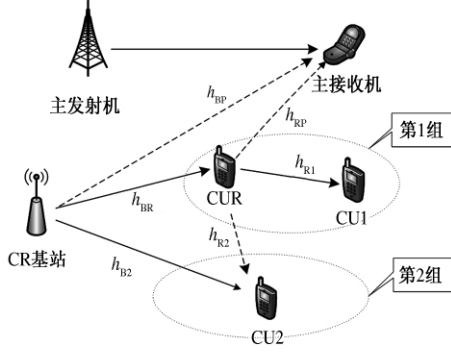


图1 系统模型

Fig. 1 System model

时隙 1, CR 基站向第 1 组中的 CUR、CU1 广播数据 x_1 , 同时第 2 组中的 CU2 也收到 x_1 ;

时隙 2, CR 基站向 CU2 广播数据 x_2 , 同时 CUR 作为中继给 CU1 转发 x_1 . 这样, CU2 同时收到 x_1 和 x_2 . 因此, CU2 在时隙 2 收到 CUR 的干扰信号可以利用它在时隙 1 收到的 x_1 消除, 从而提高系统的吞吐量.

如果把一个频点的一个时隙称为一个资源块, 那么按照轮询制, 由于第 1 组中每次中继传输占用两个时隙, 第 2 组每次传输占一个时隙, 所以两个组每次传输占用三个资源块, 即一个频点三个时隙(轮询制). 基于多播组间协作的配对传输机制占用两个资源块, 即一个频点两个时隙, 从而提高了无线资源利用率和传输效率.

基站与 CUR、主用户节点和 CU2 的信道增益分别表示为 h_{BR} 、 h_{BP} 和 h_{B2} , CUR 与主用户节点、CU1 和 CU2 的信道增益分别表示为 h_{RP} 、 h_{R1} 和 h_{R2} . P_1 表示时隙 1 基站处的发射功率, P_2 和 P_3 分别表示时隙 2 时 CUR 和基站处的发射功率, $n_R[1]$ 和 $n_2[1]$ 分别是时隙 1 在 CUR 和 CU2 处的高斯白噪声, $n_1[2]$ 和 $n_2[2]$ 分别是时隙 2 在 CU1 和 CU2 处的高斯白噪声, 均值为 0, 方差为 σ^2 . 由于 CR 网络对于主用户网络是透明的, 所以主用户对认知用户产生的干扰不能被控制且视为噪声. 显而易见, 这个干扰相当复杂并且比较小, 在下面的分析中不予考虑. 笔者以系统总速率为优化目标, 分析研究 AF 和 DF 两种模式下, 不同中继位置和主用户位置对系统性能的影响, 以及最优分配与等功率分配的比较.

1.1 AF 模式

时隙 1 在 CUR 和 CU2 处接收信号分别为

$$y_R[1] = \sqrt{P_1} h_{BR} x_1 + n_R[1]. \quad (1)$$

$$y_2[1] = \sqrt{P_1} h_{B2} x_1 + n_2[1]. \quad (2)$$

时隙 2 在 CU1 和 CU2 接收的信号分别是

$$y_1[2] = h_{R1} \beta y_R[1] + n_1[2]$$

$$= h_{R1} \beta \sqrt{P_1} h_{BR} x_1 + h_{R1} \beta n_R[1] + n_1[2]. \quad (3)$$

$$y_2[2] = \sqrt{P_3} h_{B2} x_2 + h_{R2} \beta y_R[1] + n_2[2] \\ = \sqrt{P_3} h_{B2} x_2 + \beta h_{R2} (\sqrt{P_1} h_{BR} x_1 + n_R[1]) + n_2[2]. \quad (4)$$

式中: β 为放大转发因子, β

$$= \sqrt{\frac{P_2}{P_1 |h_{BR}|^2 + \sigma^2}}.$$

在 CU1 处的接收信噪比可以表示为

$$\gamma_1 = \frac{P_1 P_2 |h_{BR}|^2 |h_{R1}|^2}{\sigma^2 (P_2 |h_{R1}|^2 + P_1 |h_{BR}|^2 + \sigma^2)}. \quad (5)$$

那么数据 x_1 的传输速率可以表示为

$$R_1(P_1, P_2) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_1). \quad (6)$$

在 CU2 处的接收信号可以形成一个虚拟多输入多输出(MIMO)系统, 可以表示如下^[10]

$$\begin{bmatrix} y_2[1] \\ y_2[2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} h_{B2} \\ \sqrt{P_1} \beta h_{BR} h_{R2} \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{P_3} h_{B2} \end{bmatrix} x_2 + \begin{bmatrix} n_2[1] \\ \beta h_{R2} n_R[1] + n_2[2] \end{bmatrix}. \quad (7)$$

使用迫零(ZF)接收机, 则

$$\gamma_2 = \frac{P_3 |h_{B2}|^4}{\frac{P_2 |h_{R2}|^2}{P_1 |h_{BR}|^2 + \sigma^2} (|h_{BR}|^2 \sigma^2 + |h_{B2}|^2 \sigma^2) + |h_{B2}|^2 \sigma^2}. \quad (8)$$

那么数据 x_2 的传输速率可以表示为

$$R_2(P_1, P_2, P_3) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_2). \quad (9)$$

$$R_a(P_1, P_2, P_3) = R_1(P_1, P_2) + R_2(P_1, P_2, P_3). \quad (10)$$

1.2 DF 模式

时隙 2 在 CU1 和 CU2 接收信号分别是:

$$y_1[2] = \sqrt{P_2} h_{R1} x_1 + n_1[2]. \quad (11)$$

$$y_2[2] = \sqrt{P_3} h_{B2} x_2 + \sqrt{P_2} h_{R2} x_1 + n_2[2]. \quad (12)$$

如果 $|h_{B2}| \geq |h_{BR}|$, 故若 CRU 可以正确译码出 x_1 , CU2 也可以译码出 x_1 , 总速率表示如下

$$R_a(P_1, P_2, P_3) = \min \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_1 |h_{BR}|^2}{\sigma^2} \right), \right. \\ \left. \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_2 |h_{R1}|^2}{\sigma^2} \right) \right\} + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_3 |h_{B2}|^2}{\sigma^2} \right). \quad (13)$$

如果 $|h_{B2}| < |h_{BR}|$, 在 CU2 处的接收信号可以形成一个虚拟的多输入多输出(MIMO)系统, 总速率可以表示为

$$R_a(P_1, P_2, P_3) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_1 P_3 |h_{B2}|^4}{\sigma^2 (P_2 |h_{B2}|^2 + P_1 |h_{B2}|^2)} \right) + \min \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_1 |h_{BR}|^2}{\sigma^2} \right), \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_2 |h_{R1}|^2}{\sigma^2} \right) \right\}. \quad (14)$$

2 总速率优化

2.1 最优功率分配

为了保障授权用户的通信质量, 对认知用户的功率控制是必要的. 最大化认知用户传输速率的优化模型如下

$$\max_{P_1, P_2, P_3} R_a(P_1, P_2, P_3). \quad (15)$$

$$\text{s. t.} \quad P_1 |h_{SP}|^2 \leq I, \quad (16)$$

$$P_3 |h_{SP}|^2 + P_2 |h_{RP}|^2 \leq I, \quad (17)$$

$$P_1 \leq P_{BS}, \quad (18)$$

$$P_2 \leq P_R, \quad (19)$$

$$P_3 \leq P_{BS}. \quad (20)$$

其中, 式(15)和式(16)是授权用户所容忍的两个组产生的干扰, 门限值设为 I . 式(18)、(19)和(20)是每个节点发射功率不大于峰值功率.

根据总速率表达式, CU1 处接收信噪比 γ_1 随 P_1 单调递增, 在 CU2 处 γ_2 也是随着 P_1 递增, 因此 R_1 和 R_2 都是随 P_1 单调递增, P_1 最优值为

$$P_1^* = \min \left\{ P_{BS}, \frac{I}{|h_{SP}|^2} \right\}. \quad (21)$$

时隙 2 基站发射功率 P_3 不影响 R_1, R_2 随 P_3 单调递增, 故 R_a 随 P_3 单调递增, P_3 最优值为:

$$P_3^* = \min \left\{ P_{BS}, \frac{I - P_2 |h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\}. \quad (22)$$

所以 P_2 和 P_3 的最优解应该满足式(22). 下面分为两种情况求 P_2 和 P_3 的值.

$$(1) \text{ 当 } P_2 \leq \frac{I - P_{BS} |h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}, \text{ 可知}$$

$$P_3^* = P_{BS}. \quad (23)$$

$$(2) \text{ 当 } P_2 > \frac{I - P_{BS} |h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}, \text{ 可知}$$

$$P_3^* = \frac{I - P_2^* |h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2}. \quad (24)$$

那么目标函数 $R_a(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 仅含有一个变量 P_2 , 然后求一阶导数, 可得最优功率 $P_{2,2}^*$.

总之, 时隙 1 基站发射功率全局最优解为

$$P_1^* = \min \left\{ P_{BS}, \frac{I}{|h_{BP}|^2} \right\}. \quad (25)$$

时隙 2 在 CUR 处发射功率的全局最优解为

$$P_2^* = \arg \max_{P_{2,i}^*} R_a(P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, P_{3,i}^*), i = 1, 2. \quad (26)$$

$$P_{3,i}^* = \min \left\{ P_{BS}, \frac{I - P_{2,i}^* |h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\}. \quad (27)$$

第二时隙在基站发射功率的全局最优解为:

$$P_3^* = \min \left\{ P_{BS}, \frac{I - P_2^* |h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\}. \quad (28)$$

由于发射功率所有可能区域都考虑了, 所以上述方案所得最优功率分配解是全局最优解.

2.2 等功率分配

传统等功率分配方案就是使 CUR 和基站处的发射功率相等, 那么在同时满足授权用户的干扰约束和各节点的峰值功率约束情况下, 可得

$$P_1 = P_2 = P_3 = \min \left\{ P_{BS}, P_R, \frac{I}{|h_{BP}|^2 + |h_{RP}|^2} \right\}. \quad (29)$$

3 性能分析与仿真

下面研究中继位置和主用户位置对于系统性能的影响. 利用瑞丽块衰落来表征信道模型, 信道增益表达式为

$$|h| = \sqrt{\rho} \varphi. \quad (30)$$

式中: 信道衰落因子服从瑞丽衰落的随机变量, $\rho = d^{-\delta}$, 路径损耗指数为 $\delta = 4$, $\sigma^2 = 1$. 为了限制参数的数目, 如图 2 所示, 我们假设基站、CU1 和 CU2 位置固定, $(0, 0)$ 、 $(2, 0)$ 和 $(1, -1)$. 设主用户位置为 (x, y) , CUR 为 $(r, 0)$. 图 3 ~ 6 中所有曲线仿真了 5 000 次. 设峰值功率约束为 $P_{BS} = P_R = 15$ dB.

图 3 和图 4 表明主用户位于 $(1, 2)$ 时, 中继位置对于 AF 和 DF 系统最优功率分配的影响. 从图中知, 两种系统中曲线变化趋势相同. 由于 P_1^* 只与基站到主用户链路、峰值约束有关, 故 P_1^* 不随中继位置变化. CU1 的速率仅与 P_1 和 P_2 有关, 而 P_1 不随 r 变化, 故 R_1 仅由 P_2 决定, 并且随 P_2 增大. 虽然 P_2 增加会导致 R_2 减小, r 较小时, 时隙 2 时 CUR 对 CU2 的干扰较小, 故总速率随 P_2 增大. 随着 r 和 P_2 增加, 在时隙 2 时 CUR 对 CU2 干扰越来越大, 同时 CU1 噪声干扰比重大, 因此 P_2^* 随着 r 的增大而减小.

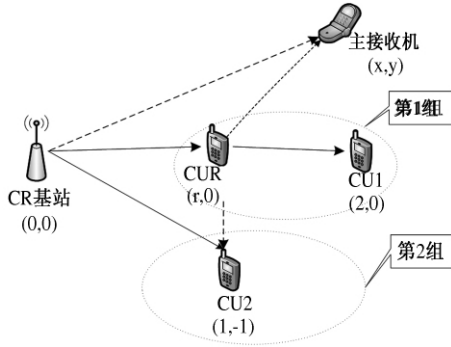


图2 位置说明

Fig. 2 The location illustration

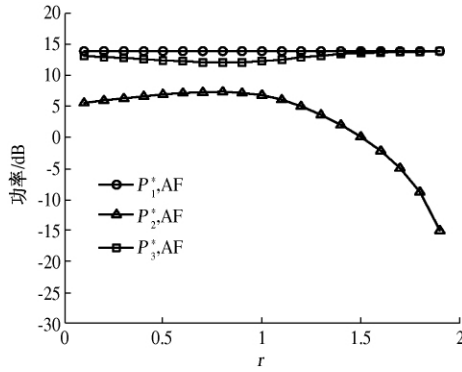


图3 中继位置对 AF 系统最优功率分配影响

Fig. 3 Optimized power solution for different relay locations in AF

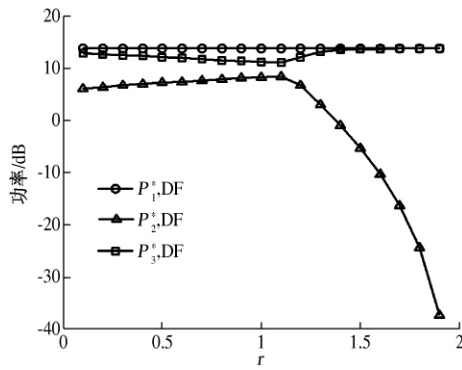


图4 中继位置对 DF 系统最优功率分配影响

Fig. 4 Optimized power solution for different relay locations in AF

图5为等功率和最优功率分配两种方案下, AF和DF系统中的中继位置对于总速率的影响. 在相同条件下, DF系统的性能总优于AF. 不管采用等功率还是最优功率分配方案, 总速率都是随着 r 先增大后减少, 无论中继位于何处, 最优功率分配方案取得相比等功率更优的系统性能. 采用等功率方案时, 当中继节点位于基站和CU1的中点时, 吞吐量最大; 而当采用最优方案时, 中继位于基站和CU1连线的中点且靠近认知用户时, 系统的性能最优.

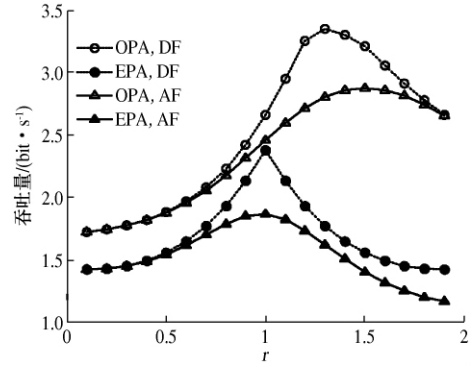


图5 中继位置对系统总速率的影响

Fig. 5 Sum rate for different relay locations

为了限制参数数量, 将主用户位置的纵坐标固定, 改变横坐标, 中继位于 $(1,0)$. 图6和图7表明了DF和AF两种模式下, 主用户位置对于总速率的影响, 两图变化趋势相同. 当 $y=2$, $x \in [-3, 3]$ 时, 两条曲线都是随 x 先减小后增大. 当 $y=5$ 时, 主用户与基站和CRU的距离较远且干扰小, 总速率值都比 $y=2$ 时大. 最优发射功率仅仅与CR网络的结构有关, 因此对于不同的 x , 最优发射功率不变, 所以总速率也不变.

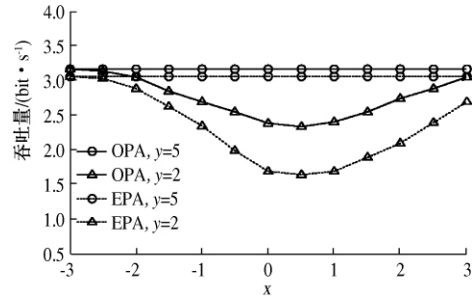


图6 主用户位置对 AF 系统总速率的影响

Fig. 6 Sum rate for different PU locations in DF

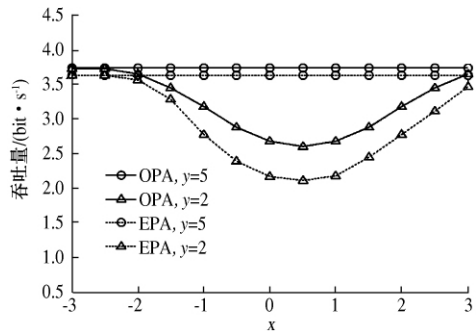


图7 主用户位置对 DF 系统总速率的影响

Fig. 7 Sum rate for different PU locations in DF

4 结论

研究了多组多播的认知网络, 提出了基于组间协作的多播组配对信息传输机制, 每次完整传

输需要两个时隙,比轮询制减少了一个时隙,从而提高了传输效率.在该传输机制下,首先研究了 DF 和 AF 两种模式下,满足授权用户的干扰限制时,认知用户获得最大传输速率时最优功率分配方案,然后和等功率方案性能进行比较.仿真结果表明中继位置和主用户位置对于系统性能起着关键作用,两种模式下最优功率分配方案优于等功率方案性能,采用最优分配时,中继位于基站和目的节点连线中点且靠近认知用户时,系统性能最优.在未来的工作里,增加每一个多播组中用户,继续研究在基于组间协作的多播组配对信息传输机制下,中继位置对系统吞吐量的影响,找到合适中继坐标提高系统性能.

参考文献:

- [1] GALLAGER R G. Information theory and reliable communication [M]. New York: John Wiley and Sons, 1968.
- [2] MITOLA J, MAGUIRE G. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] 卞立安, 韩昌彩, 李媛. 基于中继位置的自适应选择方案 [J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 35-40.
- [4] POURAHMADI V, FASHANDI S, SALEH A, et al. Relay placement in wireless networks: a study of the underlying tradeoff [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 1383-1388.
- [5] DONG Yu, ZHANG Yong, SONG Mei, et al. Optimal relay location in OFDMA based cooperative networks [C]//The 5th International Conference on IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing: IEEE Conference publications, 2009: 1-4.
- [6] AFOLABI R, DADLANI A, KIM K. Multicast scheduling and resource allocation algorithms for OFDMA based systems [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2013, 1(7): 15-16.
- [7] VELLA J, SAVIOUR Z. A survey of multicasting over wireless access networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 718-753.
- [8] HADEF M, APOSTOLARAS. A cooperative multicast resource allocation strategy [C]//IEEE International Conference on Wireless Communication, 2014: 2769-2774.
- [9] ZHAO Hen, SU Wu. Cooperative wireless multicast: performance analysis and power location optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 6(5): 2088-2100.
- [10] CHEN Jun, PRATTY. Energy efficiency of space and polarization MIMO communications with packet erasures over wireless fading channels [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2012, 13(1): 123-125.

Research on Power Allocation and Relay Location for CR Network

YANG Shou-yi, CHEN Feng-die, NING Bing, HAO Wan-ming

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

Abstract: In this paper, a new transmission mechanism called multi-group multicast (MGMC) based on inter-group and inner-group cooperation is proposed for cognitive radio networks. The performance of a single-relay system and the overall rate optimization based on amplify-forward (AF) and decode-forward (DF) is analyzed with interference constraints to the primary user (PU) and peak power constraint at each user in the Rayleigh fading environment. This paper studies the impact of the relay node and the primary users (PU) location on power allocation and system throughput and compares to the optimal power allocation scheme and equal power allocation scheme. The result shows the locations of relay node and PU are crucial to performance and the proposal optimum power allocation (OPA) scheme significantly outperforms the equal power allocation (EPA). The best performances for both AF and DF are achieved when the relay is at an equal distance from the sender and the destination in EPA scheme or the relay is closer to the destination around in OPA scheme.

Key words: cognitive radio; multi-group multicast; power allocation; relay location

文章编号: 1671-6833(2015)05-0111-05

利用噪声能量和卡方分布约束的虚假锋电位剔除方法

李志辉, 刘新玉, 尚志刚

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 神经元锋电位可靠检测在神经科学研究与脑机接口应用中具有重要价值. 针对低信噪比条件下锋电位检测的假阳性问题, 提出了一种利用锋电位信号背景噪声能量和服从卡方分布约束的虚假锋电位去除方法. 首先使用 K-Means 算法对过阈值检测的待判锋电位进行聚类, 并用最小协方差算法估计各聚类总体噪声均值向量与协方差; 进而计算各噪声样本与对应总体之间的马氏距离平方作为锋电位背景噪声能量和的度量指标; 最后利用该指标卡方分布的置信区间对虚假锋电位进行剔除. 不同信噪比条件下的仿真数据和动物实验数据应用结果表明: 与传统的基于锋电位波形特征的阵列去噪算法相比, 该方法可以有效识别出单电极记录神经信号中的虚假锋电位, 正确率在 95% 以上, 并且计算结果不依赖于聚类参数的选择.

关键词: 锋电位检测; 虚假锋电位; 噪声能量和; 马氏距离; 卡方分布; K-Means 聚类

中图分类号: R318.04 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.024

0 引言

神经元锋电位是利用微电极胞外记录方式检测到的神经元动作电位信息, 对其可靠检测在神经信息编码机制、脑机接口研究中具有重要应用价值^[1-2]. 在神经电生理实验中, 尤其是在信噪比较低的清醒动物神经信号采集中, 微电极除了记录神经元放电活动之外, 还会记录到大量的神经系统背景噪声、肌电干扰、电磁干扰、以及设备本底噪声等, 尤其是背景噪声中的一些大幅值有色干扰, 与锋电位具有相似的频域和时域特征, 在以阈值为基础的检测方案中经常会被误检为锋电位, 即产生假阳性问题, 从而降低后续分析结果的准确性和可靠性^[3-5].

对于虚假锋电位的剔除, 模板匹配是最简单最常用的方法, 例如 Quiroga 等^[6]通过对锋电位样本集聚类, 将相似度低于给定阈值的样本作为虚假锋电位剔除. 但该类算法去噪的性能很大程度上取决于聚类的结果, 而虚假锋电位的存在同时又会对聚类效果造成干扰, 去噪效果在低信噪

比条件下不甚理想. Ludwig 等^[7]提出的共同平均参考去噪、Paralika 等^[8]提出的虚拟参考去噪算法则是将不同通道的神经信号叠加平均作为参考信号, 各通道信号与参考信号对消以去除大幅值干扰. 此外, Paralika 等^[4]还提出了电极间相关法 (Inter-Electrode Correlation, IEC) 用于去除虚假锋电位. 这些利用多通道信号去噪算法的一个基本假设是认为噪声一旦发生就会被微电极阵列中多个电极同时记录到, 而且波形相似. 但是对于空间距离 $\geq 250 \mu\text{m}$ 的两个电极而言, 几乎不可能同时记录到来自于同一个神经元且波形相似的神经信号^[6], 而且各类有色噪声引起的大幅值干扰往往只会单个通道中出现, 无法利用上述阵列方法进行去除. 万红等^[8]采用多元小波阈值去噪算法用于去除锋电位检测中的大幅值干扰, 吴丹等^[9]采用主成分和小波阈值相结合的联合去噪方法用于去除锋电位检测信号中的有色噪声. 但是这两种方法只有在不同通道锋电位信号之间相互独立并且包含相关噪声的情况下才能达到较好的效果, 而且在去噪的同时也会对锋电位波形造成畸

收稿日期: 2015-05-01; 修订日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1304602, 61473266, 61305080); 河南省高等学校重点科研资助项目 (15A120016)

作者简介: 李志辉 (1978—), 女, 郑州大学讲师, 博士生, 研究方向为神经信号处理, E-mail: lizhain@zzu.edu.cn.

通讯作者: 尚志刚 (1975—), 男, 郑州大学副教授, 博士, 研究方向为数据挖掘与信号处理, E-mail: zhigang_shang@zzu.edu.cn.

变,对后续锋电位分类造成影响.

鉴于上述方法存在的问题,笔者提出了一种利用噪声能量和卡方分布约束的虚假锋电位剔除方法,并利用仿真数据和动物实验数据对算法性能进行了对比评估.

1 方法

1.1 理论基础

锋电位波形通常被认为是单个(或多个神经元)动作电位波形与本底噪声相叠加形成.在大部分实验中不同采样时刻 i 的本底噪声服从高斯分布,即 $e_i \sim N(0, \sigma_i^2)$ [10]. 对于一个单通道过阈值检测到的包含 p 个采样点的锋电位事件样本,可认为其来自一个服从如下多元高斯分布的总体

$$X \sim N_p(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}). \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\mu}$ 为总体均值向量; $\boldsymbol{\Sigma}$ 为协方差矩阵.

对于单个总体的多元空间异常值(或离群点)的检测,存在以下定理 [11]:

对于 n 个 p 维空间中的样本 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$, 如果 $\mathbf{X}_i \sim N_p(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$, $i = 1, 2, \dots, n$, $\boldsymbol{\Sigma} > 0$, 那么样本马氏距离(Mahalanobis Distance)的平方服从自由度为 p 的卡方分布,即

$$d_{mi}^2 = (\mathbf{X}_i - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{X}_i - \boldsymbol{\mu}) \sim \chi_p^2. \quad (2)$$

因此,总体中的异常样本可以通过设置卡方分布的 $1 - \alpha$ 置信水平阈值来筛选,如果某个样本的平方马氏距离大于该阈值,则认为这个样本为异常值.

在实际应用中,检测到的多个锋电位通常来自多个总体,且总体的个数与均值都未知.无法直接应用上述单个总体异常值检测方法.笔者提出了一种间接思路,采用 K-Means 聚类,对于一个来自 $\mathbf{X} \sim N_p(\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma})$ 总体的锋电位,设其所属聚类的类别均值为 $\boldsymbol{\mu}_{ic}$, 则有

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{X}_i - \boldsymbol{\mu}_{ic} \sim N_p(\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu}_{ic}, \boldsymbol{\Sigma}). \quad (3)$$

对于属于一个聚类类别的样本,其类别均值都为 $\boldsymbol{\mu}_{ic}$, 如果该类别样本确实来自同一总体,则该类别样本与聚类均值的误差都服从相同的多元高斯分布,如公式(2).根据前述单个总体异常值检验方法,该类噪声样本的马氏距离平方应服从卡方分布约束,表征了本底噪声的加权能量和.

为了保证聚类类别中的样本尽可能来自同一总体,在 K-Means 聚类中,给定的聚类个数应相对多些,这样一个真实的总体可能会分裂为多个子类,但聚类数过多会导致聚类后各类样本数过少,无法估计协方差.另外,考虑到单根电极同时能记

录到的神经元活动一般为 4 个,最多不会超过 8 个 [12],因此在设置聚类数时,应保证其取值不小于真实的类别个数.

1.2 虚假锋电位去除算法

在上述分析基础上,笔者提出一种利用聚类样本与类别均值误差的马氏距离作为锋电位辨别特征,根据卡方分布确定的阈值来剔除虚假锋电位.为便于描述,将这种算法命名为 MDD(Mahalanobis Distance Denoising, MDD) 算法.

在 MDD 算法中,最重要的步骤就是准确估计聚类后各类别中的噪声样本的均值与协方差.在采用 K-Means 算法获得各聚类样本与类别均值的噪声样本后,笔者采用最小协方差行列式(Minimum Covariance Determinant, MCD) 算法对噪声的均值和协方差进行估计. MCD 是一种常用的多元位置参数和尺度参数估计算法 [13],可以有效减小奇异样本对估计结果的影响,提高均值和协方差估计的鲁棒性.

综上所述,对于给定的多个锋电位事件样本, MDD 算法的主要步骤如下.

① 对信号进行预处理,即将所有样本的负峰值点沿着同一竖线对齐.

② 利用 K-Means 算法对所有样本进行聚类,期望聚类数设为 10 ~ 16 个,计算聚类后各类样本个数.考虑到协方差估计的需要,因此在初步聚类后对于样本数较少的类别与其距离近的类别融合,保证各类中样本数大于特征维数 p .

③ 利用 MCD 算法分别估计出每个聚类总体噪声样本的均值向量与协方差.

④ 利用式(2)计算噪声样本与对应聚类总体之间的马氏距离平方.

⑤ 根据预设的 $1 - \alpha$ 置信水平,计算虚假锋电位检测阈值 $\chi_{1-\alpha}^2(p)$, 将④中计算结果大于阈值的对应样本判定为虚假锋电位事件,进行剔除.

2 算法应用结果

2.1 仿真实验结果

为了测试 MDD 算法的性能,首先利用仿真数据对算法进行了验证.仿真数据来自参考文献 [14],由真实锋电位、背景噪声和虚假锋电位组成,真实锋电位分别来自于 3 个不同的神经元.虚假锋电位与真实锋电位具有相同的幅度水平和频带.仿真数据共由噪声水平分别为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 和 0.40 的 8 段数据组成.噪声水平定义为背景噪声的标准差.图 1 为

噪声水平为 0.1 时从仿真数据中检测出的信号波形及聚类结果,共包括 521 个锋电位及 51 个虚假锋电位. 图 1(a) 为所有锋电位事件波形图(幅值经过方差归一化); 图 1(b) 为利用 K-Means 和 MCD 算法估计出的不同聚类的锋电位均值的波形图,此处设置 K-Means 的期望聚类数为 16 个; 图 1(c) 为 K-Means 算法获得的不同类别的锋电位波形图.

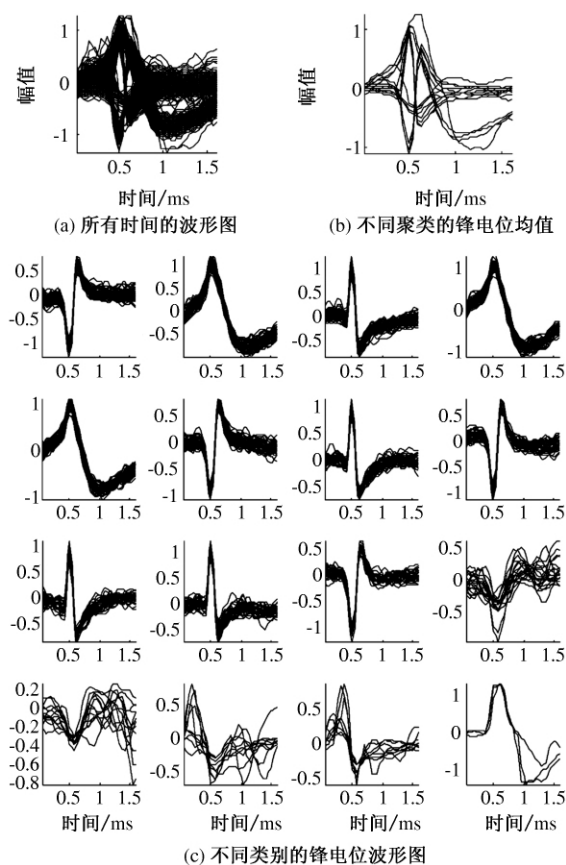


图 1 Spike 仿真信号波形及其 K-Means 聚类

Fig.1 Waveform of simulated Spikes and K-Means clustering result

表 1 不同噪声水平下 MDD 算法识别正确率

Tab.1 The accuracy of MDD algorithm under different noise levels

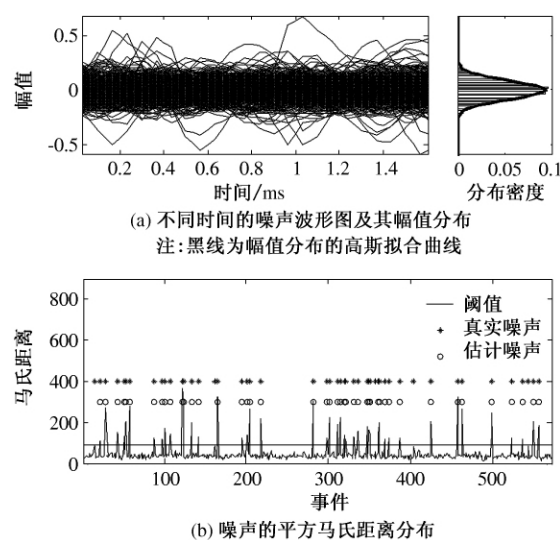
噪声水平	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
SNR	32.06	16.26	10.78	8.24	6.61	5.67	4.96	4.49
正确率	100%	99.62%	99.24%	99.24%	99.24%	98.85%	97.72%	97.72%

2.2 实验结果

为了进一步测试算法的性能,笔者利用动物实验实测数据对 MDD 算法进行验证,并将其与多通道相关法 IEC 算法进行了对比. 实测数据采用神经信号采集系统 (CerebusTM, Blockrock Inc.), 在 7 只 LE (Long Evans) 大鼠 V1 区利用微电极阵列 (Microprobe Inc., 2×8 铂铱合金微电极

图 2 为从图 1 信号中获得的噪声及其马氏距离分布. 图 2(a) 中左图为从信号中提取的多个噪声波形,右图为其波形的幅值统计分布及高斯拟合曲线(拟合精度 $R - square = 0.99$); 图 2(b) 为噪声样本的马氏距离分布图,图中的直线是根据卡方分布设定的临界值, MDD 算法共识别出了 49 个虚假锋电位,正确率 96%.

表 1 为不同噪声水平下 MDD 算法的识别正确率. 识别正确率定义为正确识别的锋电位个数 (TP) 与正确识别锋电位个数及漏检的锋电位个数 (FN) 和误判的锋电位个数 (FP) 之和的比 (即 $TP / (TP + FN + FP)$). 由表 1 可知,在不同噪声水平下, MDD 算法的识别正确率都在 95% 以上.



注: 图中星号 (*) 标记的事件为真正的虚假锋电位; 圆圈 (○) 标记的事件为识别出的虚假锋电位.

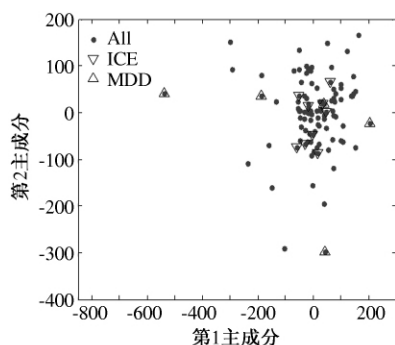
图 2 信号的噪声波形及其马氏距离分布

Fig.2 Waveforms of noise and their Mahalanobis distance distribution

阵列,电极阻抗在 1 kHz 下为 0.5 ~ 1.0 MΩ) 记录得到. 视觉刺激和实验过程详见参考文献 [15]. 采集后的信号使用通带为 0.25 ~ 5 kHz 的二阶带通 Butterworth 滤波器滤波,并采用内置的幅度阈值方法进行锋电位检测,各通道的锋电位检测阈值为 4 或 5 倍噪声标准差. 将检测后的锋电位负峰值点沿同一竖线对齐. 数据运算在 MATLAB 7.6.0

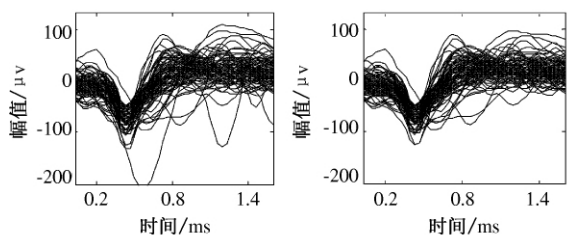
(R2008a) 环境下进行. 从 7 只大鼠共 112 个通道中去除无效通道后(信噪比较差或检测到的事件个数小于 500 的通道被视为无效通道), 共提取了 46 个有效通道.

MDD 算法与 IEC 算法的对比结果如图 3 所示. 图 3(a) 为信号最大的两个主成分散点图, 由图可见, IEC 算法识别出的虚假锋电位大多离聚类中心较近, 而 MDD 算法识别出的大都远离聚类中心. 图(b)和(c)分别为 IEC 算法和 MDD 算法识别出的有效锋电位波形图, 对比二者可以看到, 采用 MDD 算法筛除虚假锋电位后的锋电位波形变异要明显小于 IEC 算法.



(a) 信号波形的二维主成分散点图

注: 图中灰色圆点(●)代表记录到的事件; 黑色下三角形(▽)为 IEC 算法识别出的虚假锋电位; 黑色上三角形(△)为 MDD 算法识别出的虚假锋电位.



(b) IEC算法识别的锋电位

(c) MDD算法识别的锋电位

图 3 IEC 算法和 MDD 算法识别结果对比图

Fig. 3 The comparison of identify result between IEC and MDD

笔者进一步比较了 MDD 算法与 IEC 算法的去噪效果. 选用锋电位平均信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)和噪声标准差(Standard Deviation of Noise, STD_N)作为评价指标. 对于检出的单个锋电位信号 s_i , 其中噪声成分为 $\varepsilon_i = s_i - \bar{W}$, \bar{W} 为其所在聚类的均值. 则锋电位平均信噪比为一个通道检出所有 Spike 的平均信噪比, 即

$$\text{SNR} = \sum_{i=1}^k \text{SNR}_i / k. \quad (4)$$

其中单个锋电位的信噪比计算公式为

$$\text{SNR}_i = \frac{\max(s_i) - \min(s_i)}{2 \times \text{std}(\varepsilon_i)}. \quad (5)$$

式中: $\text{std}(\cdot)$ 为标准差; $\max(\cdot)$ 为最大值; $\min(\cdot)$ 为最小值.

噪声标准差为各锋电位信号噪声成分的平均标准差, 计算公式为

$$\text{STD}_N = \sum_{i=1}^k \text{std}(\varepsilon_i) / k. \quad (6)$$

获得的 46 组神经信号在去噪前、IEC 算法去噪后、MDD 算法去噪后的信噪比、噪声标准差对比结果如表 2 所示. 经过去噪之后, MDD 算法去噪后信号的信噪比高于 IEC 算法($p < 0.05$), 而噪声能量低于 IEC 算法($p < 0.05$), 展现出良好的去噪性能.

表 2 IEC 算法和 MDD 算法去噪性能对比

Tab. 2 The comparison of de-noising performance between IEC and MDD

信号特征	原始信号 (RAW)	IEC 算法	MDD 算法
SNR	3.61 ± 2.13	4.01 ± 1.14	4.94 ± 0.97
STD_N	15.40 ± 5.43	14.15 ± 3.55	12.94 ± 3.15

3 结论

通过对实验结果的分析可以看到, 笔者提出的 MDD 算法可以有效识别出锋电位中混杂的虚假锋电位事件, 识别正确率在 95% 以上; 与基于多通道信息的 IEC 算法相比, MDD 算法表现出了更好的去噪效果. 仿真数据和实测数据的应用结果表明, 笔者提出的 MDD 算法可以有效筛除神经信号中的虚假锋电位.

虚假锋电位的筛除目前并没有通用有效的方法. 笔者提出的 MDD 算法是一种单通道去噪算法, 利用真实锋电位背景噪声能量和应服从卡方分布这一约束来实现对虚假锋电位的辨别, 可以避免如平均参考去除、小波分解等算法在锋电位检测前进行去噪而造成信号畸变、识别准确率下降的问题. 此外, MDD 算法中虽然采用了 K-Means 聚类, 但并不需要精确对锋电位进行聚类, 聚类数目的选择并不影响虚假锋电位的筛除效果. 不过, MDD 算法会把叠加的锋电位信号识别为虚假锋电位, 因此对于识别出的虚假锋电位事件还需要进一步筛选出叠加锋电位信号, 并利用相应的方法进行解耦合处理.

参考文献:

- [1] HOHL S S, CHAISANGUTHUM K S, LISBERGER S

- G. Sensory population decoding for visually guided movements [J]. *Neuron*, 2014, 79(1): 169–179.
- [2] BECEDAS J and QUIROGA R Q Real time decoding for brain-machine interface applications [J]. *Journal of Bioinformatics and Biological Engineering*, 2014, 2(1): 20–32.
- [3] WAN Hong, LIU Xin-yu, NIU Xiao-ke, et al. The design and implementation of anti-interference system in neural electrophysiological experiments [J]. *Electrical Engineering and Control, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2011(98): 605–611.
- [4] PARALIKAR J K, RAO C R, CLEMENT R S. New approaches to eliminating common – noise artifacts in recordings from intracortical microelectrode arrays: inter-electrode correlation and virtual referencing [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2009, 181(1): 27–35.
- [5] HILL D N, MEHTA S B, KLEINFELD D. Quality metrics to accompany spike sorting of extracellular signals [J]. *Journal of Neuroscience*, 2011, 31(24): 8699–8705.
- [6] QUIROGA R Q, NADASDY Z, BEN S Y. Unsupervised spike detection and sorting with wavelets and superparamagnetic clustering [J]. *Neural Computation*, 2004, 16(8): 1661–87.
- [7] LUDWIG K A, MIRIANI R M, LANGHALS N B, et al. Using a common average reference to improve cortical neuron recordings from microelectrode arrays [J]. *Journal of Neurophysiology*, 2009, 101(3): 1679–1689.
- [8] 万红, 李晓燕, 刘新玉, 等. 锋电位检测信号的多元小波去噪方法研究 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(10): 2487–2498.
- [9] 吴丹, 封洲燕, 王静. 微电极阵列神经元锋电位信号的去噪方法 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2010, 44(1): 105–110.
- [10] FAISAL A A, SELEN L P, WOLPERT D M, Noise in the nervous system [J], *Nat Rev Neurosci*, 2008, 9(4): 292–303.
- [11] 高惠璇. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [12] PEDREIRA C, MARTINEZ J, ISON M J, et al. How many neurons can we see with current spike sorting algorithms [J]. *Journal of Neuroscience Methods*. 2012, 211(1): 58–65.
- [13] HUBERT M, DEBRUYNE M, Minimum covariance determinant [J], *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2010, 2(1): 36–43.
- [14] MARTINZE J, PEDREIRA C, ISON M J, et al. Realistic simulation of extracellular recordings [J]. *Journal of Neuroscience Methods*. 2009, 184(2): 285–293.
- [15] 刘新玉. 神经元锋电位干扰抑制算法研究及实现 [D]. 郑州: 郑州大学电气工程学院, 2012.

A Method to Remove Fake Spikes by Means of Chi-Square Distribution Constraint of Noise Energy Sum

LI Zhi-hui, LIU Xin-yu, SHANG Zhi-gang

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

Abstract: The reliable detection of neuronal spikes plays an important role from basic research in neuroscience to brain-machine interface applications. In order to solve the false positive problem in spike detection, a method was proposed to remove fake spikes, by using the chi-square distribution constraint of noise energy sum. First, the detected spikes over the threshold were separated by K-Means clustering, and the noise samples were acquired so that its means and covariance could be estimated by minimum covariance determinant (MCD) algorithm. Then, the Square of Mahalanobis Distribution (SMD) between each noise event and corresponding population was calculated to indicate the energy sum of noise. Finally, fake spikes were identified if their SMD value were not included in the confidence interval of corresponding chi-square distribution. The results from synthetic data and real neural data showed that the de-noising performance of this method is superior to the traditional methods. Its accuracy rate to identify the fake spikes is above 95%, and its performance is not dependent on the choice of clustering number.

Key words: Spike detection; fake spike; noise energy sum; mahalanobis distance; chi-square distribution; K-Means clustering

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

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对人脸识别算法运行速度与识别率的矛盾, 提出了一种将 KPCA 和 LDA 相结合的算法. 首先对人脸图像进行白化、低通滤波预处理, 去除干扰、噪声的同时平衡图像的能量谱; 然后利用 KPCA 和 LDA 的改进方法, 有效降低样本空间维数的同时又解决了“小样本”和边缘数据的分类问题; 最后利用最近邻分类器进行分类识别. 通过大量的实验证明此方法是可行的.

关键词: 白化; 低通滤波; 预处理; KPCA; LDA

中图分类号: TP0352.7; TP0352.9 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.025

0 引言

人脸识别一直是生物识别领域的研究热点, 基于统计和基于几何的方法是比较常用的两种人脸识别方法^[1]. 现在最受欢迎的是基于子空间的方法, 它具有较高的计算效率和表征能力. 最基本的线性子空间方法有主成分分析法(PCA)、线性鉴别分析法(LDA); 非线性子空间方法主要有拉普拉斯特征映射法、核主成分分析法(KPCA)等. 其中 PCA 和 LDA 方法在人脸识别中容易受姿态、光照、表情等因素的影响, 又加上 PCA 方法不能解决人脸样本的非线性问题和 LDA 方法使用时容易产生“小样本”和边缘数据的分类问题; 而 KPCA 虽然能解决 PCA 不能解决的非线性问题, 但同时它会提取到过多的不相关特征, 从而影响到人脸识别的速度和识别率, 因此笔者提出了 KPCA 和 LDA 融合改进的方法. 首先对人脸图像进行预处理, 然后利用 KPCA 最佳样本均值估计向量代替原始样本向量, 降低样本维数, 进而提高了算法运算速率; 最后对降维后的样本使用改进的 LDA 方法.

1 白化和低通滤波的预处理

获得的每一幅人脸图像, 不能保证它是正规的, 它或多或少受外界环境影响, 进而影响人脸的识别. 人脸识别的预处理可以减少这些外界环境

影响, 提高识别率. 笔者拟采用白化和低通滤波预处理.

人脸图像就像一个平静的水面上投去一颗石子, 周围产生不平衡的能量谱, 根据这一系列能量谱进行提取信息. 根据这个原理, Liao Ling-zhi 等提出用一个白化滤波器分离低频和高频信息, 优化人脸能量谱, 然后用一个低通滤波来滤除用白化预处理分离开的高频部分的噪声^[2].

白化处理的具体过程就是选取一个白化矩阵 W , 将原始图像 X 经过一个矩阵变换 $Y = WX$, 利用此式求取其特征值. W 的具体表达式如下

$$W(f) = f^{\frac{\alpha_w}{2}}, \quad (1)$$

式中: α_w 为白化参数.

用指数低通滤波器滤除白化过程分离开的高频噪声, 设计如下

$$H(u, v) = \exp\left[-\frac{D^2(u, v)}{2\sigma_0^2}\right], \quad (2)$$

式中: $D(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$; σ_0 为截止频率.

2 双树复小波和 Gabor 小波分解

双树复小波变换(Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DT-CWT)^[3]和 Gabor 小波^[4]是人脸识别中常用的特征提取方法. DT-CWT 可以解决很多小波变换不能解决的问题, 它具有很多优点, 如多方向选择性、良好的平移性、计算复杂度低等,

收稿日期: 2015-04-21; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 河南省教育厅重点科技攻关计划项目(13A510684)

作者简介: 张震(1966—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事信号处理, 图像处理与模式识别研究, E-mail: zhangzhen66@126.com.

又因为 DT-CWT 由可分离小波变换演变而来,计算复杂度比 Gabor 小波低得多,这使得它在人脸识别中迅速流行开来.但 DT-CWT 的方向选择也是有局限的,它仅能提取特定的几个方向,就连比较重要的水平和竖直这 2 个方向都不能提取,Gabor 小波可根据应用进行参数设定,进而提取任何方向的信息,因此选择二者结合的方法.

3 KPCA 和 LDA 融合改进算法

3.1 核主成分分析法(KPCA)

从选取的人脸库中任意选取一个样本集,选取其中的 n 个作为训练样本集,其余为测试样本集,将每个样本按从上到下,再从左到右的顺序排列成一个 N 维列向量,从而训练样本集的矩阵为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$. $\varphi: x \rightarrow \varphi(x) \in F$ 是对其实施的非线性映射,称 φ 为核映射, F 为核空间,已知在特征空间中作子空间降维变换有^[5-6]

$$Y = W^T \varphi(x). \quad (3)$$

对 $\varphi(x)$ 进行求解,对求得的特征值进行排列,然后选取 d 个最大的特征值 λ_i 及其对应的特征向量 u_i ,根据公式(3)即可求出降维后的投影矩阵 $W = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_d)$.

3.2 KPCA 的改进算法

传统的 KPCA 算法虽然将人脸的非线性信息包括在了核矩阵中,但这样将原来就很高的样本维数,变得更高,因此,传统的 KPCA 算法有计算难度大、时间长等问题.为了解决上述问题,提出了改进的 KPCA 算法.它的具体操作就是用最佳均值向量代替原始样本向量,这样以来投影到核空间的样本维数也跟着降低了.具体描述如下^[7-8].

从选取的人脸库中任意选取一个样本集,从样本集中选取 m 个人,每个人 c 张图片,总共 n 个样本作为训练样本集,将每个样本按从上到下,再从左到右的顺序排列成一个 N 维列向量,从而训练样本集的矩阵为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$.

(1) 假设第 i 类的样本向量为

$$X_i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_c^i]. \quad (4)$$

(2) 求第 i 类样本中 x_b^i 的样本均值为

$$\mu_b^i = \sum_{j=1}^n x_{bj}^i. \quad (5)$$

(3) 第 i 类的样本均值 $\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^c x_{ij}.$ (6)

(4) 令 $X'_i = [\mu_1^i - \mu_i, \mu_2^i - \mu_i, \dots, \mu_c^i - \mu_i].$ (7)

选择合适的均值向量系数对样本均值向量进行估计,使映射到核空间的维数降低,这相当于进行了一次降维,减小了计算量,设均值估计系数矩阵为 $u(c \times c)$.

用公式(7)乘以均值向量系数求得最佳均值向量,则

$$\hat{X}_i = X_i^T \cdot u_i, \quad (8)$$

$$\hat{X} = [\hat{X}_1^T, \hat{X}_2^T, \dots, \hat{X}_c^T]. \quad (9)$$

为了求得最佳均值估计系数,笔者首先构造一个 α_i 函数,其中 u_i 为函数 α_i 的自变量.

$$\text{令: } \alpha_i = \sqrt{\frac{\hat{X}^T - X_i'}{X_i'}}.$$

求 $\arg\max(\alpha_i^T \alpha)$ 时的 u_i ,即为最佳均值估计系数矩阵.

\hat{X} 是 $c \times m$ 维矩阵,其维数明显小于原始样本向量集 X .

3.3 线性鉴别分析法(LDA)

传统的 LDA 方法定义类内离散度矩阵 S_W 和类间离散度矩阵 S_B 如下^[9-10]:

$$S_W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^c p_i (x_j^i - \mu_i) (x_j^i - \mu_i)^T, \quad (10)$$

$$S_B = \sum_{i=1}^m p_i (\mu_i - \mu) (\mu_i - \mu)^T, \quad (11)$$

$$J_F(W) = \arg\max \frac{|W^T S_B W|}{|W^T S_W W|}, \quad (12)$$

式中: W 满足 $S_B W = \lambda S_W W$.

3.4 改进的 LDA 算法

众所周知,传统 LDA 有两个突出缺点:一是处理高维图像时容易产生“小样本问题”,二是由由此引发的边缘数据分类的问题.为了解决这两个问题,笔者对传统算法做如下两点改进.

(a) 对 S_B 作如下变化

为了更好地区分样本类内、类间的关系,使难以区分的样本区分开,相同的样本紧密联系在一起,笔者在求取类间散度矩阵时,进行了一定的加权值处理,使得类间信息区分更加明显,同时类内信息更加紧凑.

$$S'_B = \sum_{i=1}^{c-1} \sum_{j=i+1}^c p_i p_j w_{ij} (d_{ij}) (\mu_i - \mu_j) (\mu_i - \mu_j)^T, \quad (14)$$

$$d_{ij} = (\mu_i - \mu_j)^T (\mu_i - \mu_j), \quad (15)$$

$$w(d_{ij}) = \exp(-ad_{ij}^2). \quad (16)$$

(b) 提取 S_W 的零空间和去除 S'_B 的零空间

由准则可知最具有辨别力的特征就是 S_B 的非零空间和 S_W 的零空间的交集空间。

(1) 提取 S_W 的零空间 U

$$U^T S_W U = 0, (U^T U = I). \quad (17)$$

(2) 将 S_B 投影到 S_W 的零空间 U 上

$$\hat{S}_B = U^T S_B U. \quad (18)$$

(3) 求 \hat{S}_B 的最佳投影方向 V_B

$$V_B = \operatorname{argmax} |V^T \hat{S}_B V|. \quad (19)$$

通过以上两步投影变换,零空间线性判别分析的最佳投影变换矩阵为: $\hat{W} = UV_B$.

3.5 KPCA 和 LDA 的融合改进方法

首先利用改进的 KPCA 求取降维的 Y' , 然后根据改进 LDA 求取 S_W 、 \hat{S}_B , 进而求取最佳投影矩阵 \hat{W} , 最终求得 KPCA 和 LDA 融合改进方法的特征数据 $\hat{Y} = \hat{W}^T \hat{X}$.

4 实验及结果分析

以上算法用 ORL 人脸库在 MATLAB 2010a 上进行仿真实验. 首先对人脸图像进行预处理, 这个过程就是用一个白化滤波器分离低频和高频信息, 给人脸图像进行优化能量谱, 然后用一个低通滤波来滤除用白化处理分离开的高频部分的噪声. 预处理之后, 对人脸图像运用 DT-CWT 与 0° 和 90° Gabor 小波进行特征提取共同构成人脸图

像的特征向量, 预处理前后的图像如图 1.

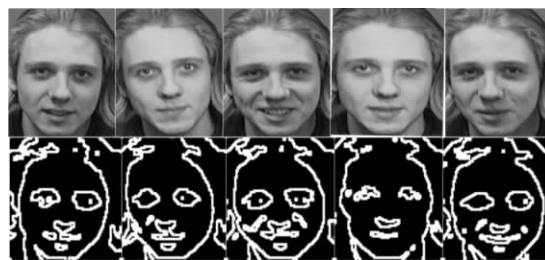


图1 ORL 人脸库部分原图像和预处理后的图像
Fig.1 ORL database the original image and the preprocessed image of the section

4.1 样本个数对各算法识别率和耗时的影响

本次实验采用的 ORL 人脸库, 共 40 个人, 每人 10 幅图像, 从每类样本中任意选取 $x = 2, 3, 4, 5, 6$ 张图片作为训练样本, 其余的作为测试样本, 特征维数为 40, 具体实验结果如表 1 所示.

根据表 1 可知, 这几种算法随着训练样本数的增加, 识别率都随之提高, 同时运算时间也显著增加. 随着训练样本数的增加, PCA、LDA 和改进 LDA (GLDA) 的训练时间明显高于改进 KPCA (GKPCA) 和改进 KPCA + LDA (GKL); GKPCA 和 GKL 在处理小样本时, 与 KPCA 相比并无很大优势, 但是随着样本数量逐渐增加, 训练时间明显减少, 识别率也有所提高; 相同样本数的情况下 GKPCA + LDA 仅比 KPCA 多耗一点时间, 但识别率也得到提高, 这是值得的.

表1 不同算法的人脸识别速度和识别率

Tab.1 The face recognition speed and rate of different algorithm

算法	样本数 2		样本数 3		样本数 4		样本数 5		样本数 6	
	耗时 /s	识别 率/%	耗时 /s	识别 率/%	耗时 /s	识别 率/%	耗时 /s	识别 率/%	耗时 /s	识别 率/%
PCA	4.537	65.51	8.637	70.32	12.269	74.28	18.865	82.34	26.735	83.12
LDA	4.438	66.73	7.241	72.86	11.853	78.36	16.691	86.87	24.473	88.68
KPCA	4.270	73.50	5.863	81.56	10.216	87.15	14.446	94.03	23.274	94.78
GLDA	4.446	76.39	6.137	85.57	10.217	88.26	14.935	93.18	23.370	94.83
GKPCA	4.327	80.26	5.416	87.36	8.026	90.79	11.529	94.82	18.853	95.57
GKL	4.379	84.48	5.618	90.75	8.175	93.68	12.316	96.05	20.018	96.63

4.2 样本维数对各算法识别率的影响

本实验选取 ORL 人脸库的前 5 幅人脸图像作为训练集, 其它图像作为测试集, 在特征维数分别为 20 ~ 60 时通过以下 6 种方法进行对比实验, 实验结果如表 2.

通过实验可以看出, 各个算法随着特征维数的变化, 识别率也随之改变, 特征维数在 40 左右时, 识别率达到最佳. 实验说明了特征维数过小或

过大都影响识别率, 过小不能包含图像的全部信息, 过大影响识别速度和包含过多的冗余信息.

4.3 特征向量数对各算法识别率的影响

本实验选取 ORL 人脸库的前 5 幅人脸图像作为训练集, 其它图像作为测试集, 特征维数为 40, 通过以下 6 种方法进行对比实验, 实验结果如表 3.

根据表 3 可知, 随着特征向量数的增加, 各个

算法的总体趋势是一致的,识别率都在提高.当特征向量数趋于 90 左右时,识别率趋于稳定.这说明特征向量数为 90 时基本上达到最佳,随着特征向量数的增加,测试的时间也会越来越长,并且变化很大.几种算法的对比比较,充分体现了笔者提出的人脸识别算法的优势.

5 结论

对人脸图像进行白化和低通滤波预处理后,运用 DT-CWT 与 Gabor 小波进行 8 个方向的特征提取;然后利用改进 KPCA 的最佳样本均值估计向量代替原始的样本向量和对 LDA 的类间散度矩阵和类内散度矩阵进行改进,降低样本维数

的同时还保留了最具有辨别力的信息,进而提高了算法的识别率.

表 2 不同算法的识别率随维数的变化情况

Tab.2 Identification rates of different algorithms varies with the dimension

算法	维数				
	20	30	40	50	60
PCA	61.34	62.17	63.89	61.45	59.64
LDA	64.56	67.79	78.00	77.89	76.69
KPCA	84.04	87.21	91.45	90.23	89.37
GLDA	84.62	88.57	92.76	91.56	90.18
GKPCA	86.35	90.63	93.35	92.46	92.13
GKL	88.27	91.16	94.58	93.86	93.29

表 3 样本向量数对各算法识别率的影响

Tab.3 Effects of sample vector number on each algorithm identification rate

算法	特征向量数									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
PCA	62.69	67.34	71.56	75.46	77.37	79.29	80.07	81.25	81.83	81.87
LDA	64.05	68.79	73.24	76.97	78.62	81.03	81.47	82.17	83.74	84.02
KPCA	68.48	79.63	83.56	88.74	89.95	91.24	92.73	93.57	93.86	93.92
GLDA	71.46	80.21	85.67	90.04	91.67	92.35	93.17	94.36	94.68	94.75
GKPCA	73.24	81.63	86.79	90.45	92.04	92.74	93.31	94.87	95.24	95.34
GKL	74.46	84.17	88.37	91.57	92.38	93.26	94.56	95.58	96.05	96.37

参考文献:

- [1] CHELLAPPA R, WILSON C L, Sirohey human S machine recognition of faces: a survey [J]. Proceedings of IEEE, 1995, 83(5): 705-741.
- [2] LIAO Ling-zhi, LUO Si-wei, TIAN Mei. Whitened faces recognition with PCA and ICA [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(12): 1008-1011.
- [3] SELESNICK IW, BARANIUK R G, KINGSBURY N C. The dual-tree complex wavelet and 2-D Gabor transform [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 22(6): 123-151.
- [4] LIU C, WECHSLER H. Independent component analysis of Gabor features for face recognition [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14(4): 919-928.
- [5] SEBASTIAN M, GUNNAR R, JASON W, et al. Fisher discriminant analysis with kernels [A]. Proceeding of the IEEE Workshop on Networks for Signal Process-

ing [C]. Pis-cataway, 1999: 41-48.

- [6] 邓貌, 陈旭, 陈天翔, 等. 采用核聚类分析的 KPCA 改进算法 [J]. 智能系统学报, 2010, 5(3): 221-226.
- [7] 韩争胜, 李映, 张艳宁. 基于 LDA 算法的人脸识别算法的研究 [J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(7): 131-138.
- [8] 王永茂, 徐正光, 吴金霞. 基于类别多核局部判别嵌入的人脸识别 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2012, 33(3): 125-128.
- [9] SHERMINA J. Illumination invariant face recognition using discrete cosine transform and principal component analysis [C] // Proceedings IEEE Conference on Electrical and Computer Technology. Tamil Nadu: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2011: 826-830.
- [10] 谢永林. LDA 算法及其在人脸识别中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(19): 189-192.

Study of Face Recognition Algorithm Based on Improved KPCA and LDA

ZHANG Zhen¹, ZHANG Xue-zhong², LI Long³

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

Abstract: In view of the contradiction between running speed and recognition rate of face recognition algorithm, a new algorithm has been proposed that combines KPCA and LDA. Firstly, the face images is conducted pretreatment of whitening and low pass filtering to remove the interference and noise, and at the same time it also can balance the energy spectrum of the image. Then, combining with the improved of KPCA and LDA method, we effectively reduce the sample space dimensionality and solve the “small sample” and edge data classification problems. Finally, the nearest neighbor classifier is used for classification and recognition. The experimental results verify that the method is feasible.

Key words: whitening; low pass filter; preprocessing; KPCA; LDA

郑州大学“河南资源与材料产业协同创新中心”介绍

郑州大学牵头的河南资源与材料产业协同创新中心以河南资源与材料产业转型发展的重大需求为导向,以绿色选冶与材料加工为技术主线,以中铝集团和平煤神马集团为示范基地,联合中铝研究院、中钢洛耐院等组建河南省资源与材料工业技术研究院,并以此作为协同创新载体,致力于构建“资源绿色选冶与材料高端加工”产业发展新模式,推动产业转型。

中心起步于 1996 年成立的 国家橡塑模具工程中心和国家钙镁磷复合肥料技术研究推广中心。1996 年和 2000 年,霍裕平院士团队和钟香崇院士团队先后加盟郑州大学。2012 年组建先进材料及加工协同创新中心获省级认定,申长雨院士任主任。2013 年,引进刘炯天院士,与中铝研究院等共同组建郑大绿色选冶协同中心;河南资源与材料产业协同中心获省级认定(刘炯天院士任主任,申长雨院士任学术委员会主任)。2014 年,何季麟院士担任河南省资源与材料工业技术研究院院长,随后联合河南省六家转制院所,组建河南省资源与材料工业技术研究院并获河南省政府批准。随后,赵振业院士团队加盟中心。中心已汇聚院士 7 人、“千人计划”4 人,全员 171 人;材料加工工程等国家级重点(培育)学科 6 个;煤加工与洁净化等国家级机构 13 个。

河南资源与材料产业协同创新中心组建以来,整合材料、化学、化工、物理、力学等学科优势资源,形成资源材料优势学科群,引进中国工程院院士 2 人,“千人计划”2 人、长江学者和青年千人各 1 人;新增科技部重点领域创新团队 1 个,汇聚了一批区域创新发展急需的优秀人才;形成了“绿色选冶”学科方向,创建了“选—冶—材”复合型人才培养新模式;落实了一批重大创新任务,产出了一批重大创新成果。

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

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 响应面方法可以用来建立工程结构极限状态函数的显式数学表达式, 而椭球模型和区间模型则是计算结构非概率可靠性指标的两种基本模型. 笔者基于响应面方法, 用二次多项式近似拟合结构的极限状态函数, 然后分别采用椭球模型和区间模型对结构的非概率可靠性指标进行计算, 最后以悬臂梁作为算例, 对不同模型计算出的可靠性指标进行了比较. 结果表明: 在对结构进行非概率可靠性设计时, 使用区间模型要比椭球模型更安全.

关键词: 非概率可靠性; 椭球模型; 区间模型; 响应面方法

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.026

0 引言

在工程结构设计中, 不确定因素很多, 如材料属性、载荷和几何尺寸的不确定性, 这些因素往往对结构的可靠性产生直接影响. 基于概率的可靠性设计是处理不确定因素的有效途径之一, 近几十年的研究在理论和应用上都已有充分的证明^[1]. 概率可靠性模型需要足够的数据来描述不确定变量的概率特征, 然而在工程实践中, 这些数据难以获得, 并且概率可靠性对随机参数的分布信息非常敏感, 即模型数据的小误差可能导致结构可靠性计算出现较大的误差^[2].

在工程实践中, 不确定变量的概率分布虽不易确定, 但其界限一般较易获得, 可使用凸模型(包括超椭球模型和超立方盒模型)处理这类不确定但有界的参数. 20 世纪 90 年代 Ben-haim^[3]和 Elisbakoff^[4]提出了基于凸集模型的非概率可靠性概念, 与概率可靠性强调系统可接受不确定性的概率不同, 它强调系统可接受不确定性的范围. 郭书祥等^[5]对结构非概率可靠性方法和概率可靠性方法进行了比较, 验证了当掌握的信息数据较少时, 非概率可靠性方法的适用性. 亢战等^[6]建立了基于凸模型的非概率理论体系, 用椭球模型计算了非概率可靠性指标, 并用于优化. 郭书祥等^[7]建立了基于区间模型的非概率可靠性

理论体系以及对非概率可靠性指标的求解方法. 非概率可靠性技术已经成功地应用到一些相对简单的结构实例分析中, 但对于解决较复杂的工程问题仍具有一定的挑战性, 这些复杂结构的功能函数一般不可以用显式函数来表达, 故其可靠性分析比较困难. 响应面方法^[8]能够拟合出一个基于显式函数的功能函数模型, 从而可以完成非概率可靠性分析.

笔者运用响应面方法构建极限状态方程, 基于椭球模型和区间模型分别计算结构的可靠性指标并进行比较, 最后以悬臂梁作为算例验证笔者提出方法的正确性.

1 非概率可靠性指标

1.1 椭球模型

在结构可靠性分析中, 结构的极限状态方程一般由功能函数或极限状态函数描述

$$g(\mathbf{X}) = 0, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^n$ 表示所有具有不确定性的设计变量. 极限状态方程将设计空间划分成可靠性区间($g(\mathbf{X}) > 0$)和失效区间($g(\mathbf{X}) < 0$)两部分. 不确定变量 \mathbf{X} 的界定可用以下椭球模型^[9]确定

$$(\mathbf{X} - \mathbf{X}^c) \mathbf{G} (\mathbf{X} - \mathbf{X}^c) \leq 1,$$

式中: \mathbf{X}^c 为 \mathbf{X} 的均值; 矩阵 \mathbf{G} 是一个表示椭球模

收稿日期: 2015-04-29; 修订日期: 2015-07-28

基金项目: 河南省科技攻关重点资助项目(132102210107); 河南省教育厅科学研究重点项目(13A460719)

作者简介: 陈江义(1974—), 男, 湖北仙桃人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事结构动力学, CAD 技术方面的研究,
E-mail: cjiy1974@zzu.edu.cn.

型特征的正定矩阵,用来确定椭球体的主轴方向和大小.

为便于计算可靠性指标,首先将不确定变量 \mathbf{X} 中各元素归一化为

$$u_i = (x_i - x_i^c) / x_i^w, \quad (3)$$

式中: $u_i = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ 为归一化变量空间; x_i^c 和 x_i^w 表示各不确定变量的均值和离差,且

$$x_i^c = (x_i^l + x_i^u) / 2; x_i^w = (x_i^u - x_i^l) / 2, \quad (4)$$

式中: x_i^l 和 x_i^u 分别表示不确定变量的下限和上限.

基于标准变换,转化为在 \mathbf{U} 空间上的等效椭球模型

$$\mathbf{U}^T \mathbf{W} \mathbf{U} \leq 1, \quad (5)$$

式中: \mathbf{W} 表示在 \mathbf{U} 空间上的特征矩阵.

对 \mathbf{W} 进行特征值分解

$$\Phi^T \mathbf{W} \Phi = \Lambda, \Phi^T \Phi = \mathbf{I}, \quad (6)$$

式中: Φ 是由特征向量组成的正交化矩阵; Λ 是由矩阵 \mathbf{W} 的特征值组成的对角矩阵; \mathbf{I} 是单位矩阵,引入向量 δ

$$\delta = \Lambda^{1/2} \Phi^T \mathbf{U}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(2),椭球模型转化为

$$\delta \in \Omega_\delta = \{\delta \mid \delta^T \delta \leq 1\}. \quad (8)$$

同样在 δ 空间内,可以获得转化的极限状态方程

$$g(\delta) = 0. \quad (9)$$

1.2 区间模型

与椭球模型类似,如果 $M = g(\mathbf{X})$ 是表征由结构的失效准则确定的极限状态函数,且 $x_i \in [x_i^l, x_i^u]$ 为区间变量,则当 $g(\mathbf{X})$ 为 x_i 的连续函数时, M 亦为区间变量. 对 x_i 作标准化变换

$$x_i = x_i^c + x_i^w \delta_i, \quad (10)$$

式中: $\delta_i \in [-1, 1]$ 为标准化区间变量; x_i^c 和 x_i^w 按式(4)定义. 函数 M 相应地转化为

$$M = g(\mathbf{X}) = G(\delta), \quad (11)$$

式中: $\delta = \{\delta_1, \dots, \delta_n\}$.

1.3 非概率可靠性指标

为便于直观了解非概率可靠性指标,图1展示了二维情形下椭球模型和区间模型非概率可靠性指标的几何意义. 图中曲线为极限状态曲线,曲线两侧分别为失效区域和安全区域. 图(a)中单位圆和图(b)中正方形为不确定设计变量对应的标准化凸域,可靠性指标 β 定义为从原点到极限状态曲线的最短距离,只不过椭球模型按二范数来度量距离,而区间模型按无穷范数来度量距离. 因此基于椭球模型的可靠性指标为

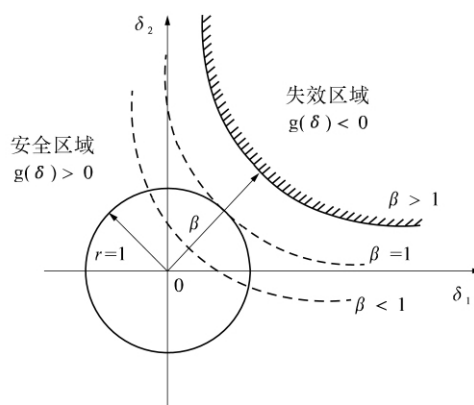
$$\beta = \min \|\delta\|, \quad \text{s. t. } g(\delta) = 0, \quad (12)$$

式中: $\|\cdot\|$ 代表向量的二范数. 基于区间模型的可靠性指标为

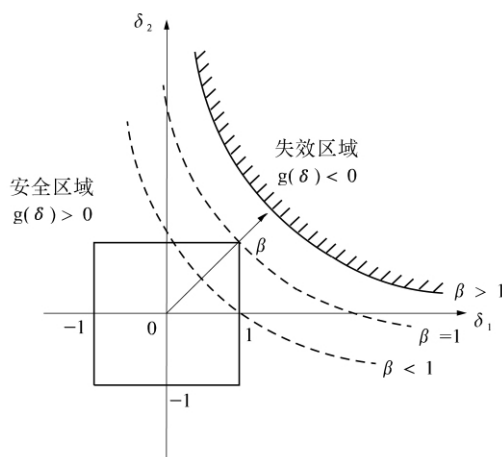
$$\beta = \min(\|\delta\|_\infty), \quad \text{s. t. } G(\delta) = 0, \quad (13)$$

式中: $\|\delta\|_\infty$ 表示无穷范数. 这样非概率可靠性指标 β 的求解转化为式(12)和式(13)的优化问题.

从图1还可以看出,若 $\beta \leq 1$,失效区与不确定变量凸域有交集,所以结构可能处于失效状态;当 $\beta > 1$,表示结构完全可靠. β 值越大,结构能容许的不确定变量变差程度越大,结构越可靠.



(a) 椭球模型



(b) 区间模型

图1 基于两种模型的非概率可靠性指标

Fig.1 Non-probabilistic reliability index based on two different models (a) Ellipsoid model (b) Interval model

2 响应面方法

响应面方法是一种数学建模方法,其基本思想是通过一系列的试验设计点拟合出一个显式函数,用来近似代替复杂的物理模型,在可靠性分析中可以用来构造功能函数.

响应面的数学表达式在能描述真实功能函数的前提下应尽可能简单,一般可选用二次多项式进行回归分析

$$\hat{y} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_i x_j, \quad (14)$$

式中: α_0 、 α_i 、 α_{ij} 为待定因子,通常用最小二乘法确定. 通过变量代换将其化为形式上的线性函数,便于下面的推导,得到统一的形式

$$\hat{y} = y + \varepsilon = \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i x_i + \varepsilon, \quad (15)$$

式中: λ_i 为待定系数.

通过试验设计,得到 m ($m \geq k$) 个样本点,将其带入式(15)中,得到一系列的数据. 利用最小二乘法原理拟合所有试验数据点,可将其误差的平方和表示为

$$S(\lambda) = \sum_{j=0}^{m-1} (\varepsilon^{(j)})^2 = \sum_{j=0}^{m-1} \left(\sum_{i=0}^{k-1} \lambda_i x_i^{(j)} - y^{(j)} \right)^2, \quad (16)$$

式(16)取极小值的必要条件是

$$\partial S / \partial \lambda_l = 2 \sum_{j=0}^{m-1} \left[x_l^{(j)} \left(\sum_{i=0}^{k-1} \lambda_i x_i^{(j)} - y^{(j)} \right) \right] = 0, \quad l = 0, 1, \dots, (k-1). \quad (17)$$

将这 k 个方程化简并整理成矩阵形式为

$$(X\lambda - y)^T X = 0, \quad (18)$$

解式(18)可得

$$\lambda = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (19)$$

将其代入式(15)中,经过变量代换得出响应面的二次多项式.

3 算例及分析

以图2中的悬臂梁结构^[9]为对象进行非概率可靠性分析,该结构尽管简单,但足以说明笔者提出的方法. 梁的长度为 L , 宽度和高度分别为 b 和 h , 受水平和垂直载荷分别为 $P_x = 50$ kN 和 $P_y = 25$ kN. 极限状态方程定义为最大应力小于许用屈服强度 S ,

$$g(b, h, L) = S - \sigma_{\max}(b, h, L), \quad (20)$$

式中: L 、 b 和 h 为不确定变量,其变化范围分别为 $L \in [900 \text{ mm}, 1100 \text{ mm}]$ 、 $b \in [90 \text{ mm}, 110 \text{ mm}]$ 和 $h \in [180 \text{ mm}, 220 \text{ mm}]$.

对于式(20)所表示的极限状态方程,可通过有限元方法获得模拟试验样本点,然后采用响应面方法将其转化为显式的二次多项式

$$g(b, h, L) = S - 815.942 + 12.908b - 0.420L - 0.047b^2 + 0.0012hL. \quad (21)$$

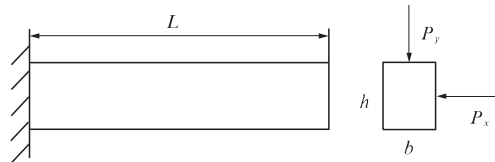


图2 悬臂梁结构

Fig. 2 A cantilever beam

表1为利用椭球模型和区间模型计算出的非概率可靠性指标 β . 为了检验响应面方法的正确性,在用上述模型计算可靠性时,分别采用有限元方法(FEM)和响应面方法(RSM).

表1 悬臂梁的可靠性指标 β

Tab. 1 Reliability index of the cantilever beam

S/MPa	椭球模型		区间模型	
	FEM	RSM	FEM	RSM
170	-0.374 5	-0.379 1	-0.246 4	-0.247 6
200	0.243 4	0.225 2	0.160 7	0.149 1
210	0.425 5	0.414 1	0.281 3	0.275 1
230	0.760 5	0.755 6	0.504 0	0.519 3
250	1.062 0	1.117 8	0.705 6	0.753 8
270	1.335 4	1.443 3	0.889 4	0.979 7
290	1.584 7	1.754 0	1.058 1	1.197 9

由表1可以得出: ①对于同一种模型,利用RSM方法与FEM方法计算出的可靠性指标基本相同,尤其是在 S 较小的区域,说明用响应面方法构建分析模型是可行的; ②在 $\beta > 0$ 区域,在同一许用屈服强度 S 下,基于区间模型的可靠性指标小于基于椭球模型可靠性指标,说明在进行结构非概率可靠性设计时,如果满足同一可靠性指标的要求,区间模型相对于椭球模型更安全些.

4 结论

工程结构的极限状态方程一般以隐式函数形式存在,不易进行非概率可靠性分析. 笔者基于响应面方法对结构进行非概率可靠性分析,用二次多项式近似代替结构的极限状态函数,一方面避免了结构的隐式函数,另一方面可以提高工程结构计算效率. 同时用RSM和FEM计算出的可靠性指标结果相差很小,验证了响应面方法的正确性和可行性. 另外,笔者还比较了椭球模型和区间模型下的可靠性指标,算例表明两种模型都能较好地对结构进行可靠性分析,但区间模型相对于椭球模型更安全些.

参考文献:

- [1] DOLTSINIS I, KANG Zhan. Robust design of struc-

- tures using optimization methods [J]. Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg, 2004(193) : 2221 – 2237.
- [2] ELISHAKOFF I. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: from A. M Freuden-thal's criticisms to modern convex modeling [J]. Computers & Structures, 1995, 56(6) : 875 – 895.
- [3] BEN-H Y. A non-probabilistic concept of reliability [J]. Structural Safety, 1994, 14(4) : 227 – 245.
- [4] ELISHAKOFF I. Discussion on: A non-probabilistic concept of reliability [J]. Structural Safety, 1995, 17(3) : 195 – 199.
- [5] 郭书祥, 吕震宙. 结构的非概率可靠性方法和概率可靠性方法的比较 [J]. 应用力学学报, 2003, 20(3) : 107 – 110.
- [6] KANG Zhan, LUO Yang-jun, ALEX L. On non-probabilistic reliability-based design optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters [J]. Structure Safety, 2011(33) : 196 – 205.
- [7] 郭书祥, 张陵, 李颖. 结构非概率可靠性指标的求解方法 [J]. 计算力学学报, 2005, 22(2) : 227 – 231.
- [8] 隋允康, 宇慧萍. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] JIANG Chao, BI Ren-gui, LU Guo-ying, et al. Structural reliability analysis using non-probabilistic convex model [J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, 2013(254) : 83 – 98.

Analysis of Structural Non-probabilistic Reliability Based on Response Surface Method

CHEN Jiang-yi, WEN Wei-chao, WANG Ying-jia

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

Abstract: Response surface method (RSM) is often employed to construct the explicit mathematical expression of the limit state function of engineering structure. And the non-probabilistic reliability of engineering structure can be evaluated by using two basic models which are ellipsoid model and interval model. Based on RSM, the quadratic polynomial is adopted to replace approximately the limit-state function in this paper. Then ellipsoid model and interval model are used to evaluate the non-probabilistic reliability of engineering structure. Finally, as a numerical example, the non-probabilistic reliability of a cantilever beam is analyzed and compared. The numerical result shows that interval model is safer than ellipsoid model for evaluation of the non-probabilistic reliability of structures.

Key words: non-probabilistic reliability; ellipsoid model; interval model; response surface method

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

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于 Ansoft 有限元分析, 对轴向永磁涡流联轴器的安装误差进行分析, 包括轴向间距的变化对输出转矩和转速的影响, 不同径向轴间距下转矩的变化, 不同端面夹角下转矩和轴向力的变化. 通过不同条件下的传递转矩与轴向力对比讨论, 得到轴向永磁涡流联轴器安装误差的影响, 以及所容许误差范围大小. 笔者的研究方法对轴向永磁涡流联轴器的设计与安装提供了参考.

关键词: 永磁联轴器; 涡流; 有限元分析; 安装误差

中图分类号: TH133.4 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.027

0 引言

现阶段永磁涡流联轴器已在化工、矿山等行业应用, 以其优点被广泛地接受, 得到快速发展. 永磁涡流联轴器通过气隙磁场来传递转矩和转速, 实现了主动端和从动端的独立, 两者没有直接的机械连接. 由于存在气隙, 永磁涡流联轴器能够实现隔离振动, 两轴线可以有夹角和径向位移, 在安装时降低精度要求.

对于永磁涡流联轴器的设计计算, 国内外有多种方法, 其中文献[1-2]根据导体盘所产生涡电流密度计算出损失功率的大小, 通过功率的关系计算出传递扭矩的大小. 现有的文献中较多是研究永磁体和导体盘等参数对转矩的影响, 而对联轴器工作中所能承受误差进行分析的文献较少. 文献[3]分析了安装过程中侧向位移与温度的影响, 但缺少径向和端面夹角误差的分析.

笔者通过有限元分析, 较为全面地对现有的永磁涡流联轴器所能承受的安装误差进行分析, 包括气隙的变化、两轴线的径向位移以及导体盘与永磁体盘的端面夹角对转矩和轴向力的影响. 通过与原模型的传递性能对比, 确定永磁涡流联轴器所能承受的安装误差, 以及不同误差对传递性能的影响.

1 基本原理

轴向永磁涡流联轴器的基本结构如图1所示, 其主要由两部分构成: 导体转子和永磁体转子. 整体结构是对称的, 左右产生的轴向力相互抵消, 消除对外界的影响. 由于导磁体的导磁系数比较大, 导体盘的导电系数较大, 图1中的装配方式实现了两者优点的结合; 永磁体转子中的永磁体按 N、S 极相间排列, 并通过导磁系数较低的铝盘固定间隔, 背面通过导磁体为磁感线提供路径, 其中磁感线从 N 极发出经过气隙、导体盘、导磁体, 再由导体盘和气隙回到 S 极, 最后经背面的导磁体形成闭合路径. 导体转子为主动端, 切割永磁体所产生的磁感线, 形成涡电流, 涡电流产生感应磁场, 反感磁场与原磁场形成转矩.

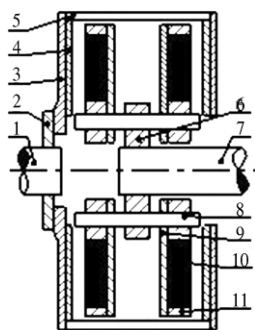
笔者通过轴向永磁涡流联轴器三维有限元模型进行计算, 直接得出转矩大小. 由于整体结构是左右对称的, 仅对一侧进行分析即可得到相关参数对性能的影响.

建立有限元几何分析模型如图2所示. 其中, H 为转子扼铁厚度, mm; H_m 为永磁体厚度, mm; H_c 为导体盘厚度, mm; δ 为气隙长度, mm; R_1 为永磁体外径, mm; R_2 为永磁体内径, mm.

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475436)

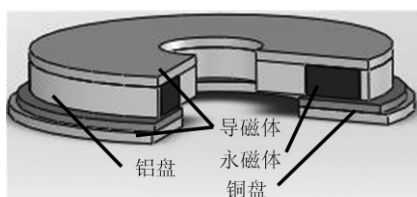
作者简介: 李延民(1964—), 男, 河南开封人, 郑州大学副教授, 博士, 研究方向永磁涡流联轴器, E-mail: ymli64@163.com.



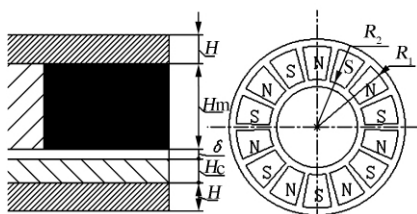
1、主动轴 2、法兰 3、导磁体 4、导体盘
5、连接板 6、传动盘 7、负载轴 8、传动销轴
9、扼铁 10、永磁体 11、铝盘

图 1 永磁涡流联轴器的基本结构

Fig. 1 The basic structure of permanent magnet eddy-current coupling



(a) 分析模型



(b) 结构尺寸

图 2 永磁涡流联轴器一侧分析模型

Fig. 2 The one side analysis model of permanent magnet eddy-current coupling

在分析模型中,整个求解域为 Ω ,模型的内外侧面为 Γ_1 ,不同介质交界面为 Γ_2 ,导体盘沿从动转子半径方向的侧面为 Γ_3 ,在求解域 Ω 内求解磁矢位 A 的数学模型^[4]

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x}(\beta \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta \frac{\partial A}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta \frac{\partial A}{\partial z}) = 0 \\ \Gamma_1: A = 0 \\ \Gamma_2: (\beta \frac{\partial A}{\partial n})_{r_2^+} = (\beta \frac{\partial A}{\partial n})_{r_2^-} \\ \Gamma_3: (\beta \frac{\partial A}{\partial n})_{r_3^+} - (\beta \frac{\partial A}{\partial n})_{r_3^-} = J \end{cases} \quad (1)$$

式中: β 为材料的磁阻率; n 为 Γ_2 和 Γ_3 的法线方向; μ_0 为空气的磁导率;钕铁硼 N35 材料取 $\beta \approx 1/1.099\mu_0$;导磁体材料 Q345,其磁化曲线 $B = f(H)$.

磁感应强度 B 由磁矢位 A 得到

$$B = \nabla \times A. \quad (2)$$

由式(1)求得 $A(x, y, z)$ 后,可根据式(2)求得 $B(x, y, z)$,从而得到联轴器的磁场分布.求得联轴器磁场分布后,即可求得磁力联轴器的转矩为

$$T = \frac{1}{2} \int_V (\int_{R_2}^{R_1} J \times B \times dr) dV. \quad (3)$$

式中: V 为主从动盘间气隙体积, mm^3 ; R_1 、 R_2 为导体盘的外半径和内半径, mm .

2 安装误差

笔者主要对轴向永磁涡流联轴器的安装误差进行分析,所分析的轴向永磁涡流联轴器匹配功率为 7.5 kW、4 极电机,采用的参数如表 1.

表 1 分析模型的基本参数

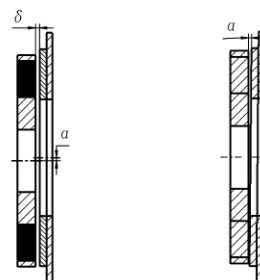
Tab. 1 The basic parameters of the analysis model

参数	参数值	参数	参数值
永磁体内径/mm	63	永磁体外径/mm	99
永磁体数量/mm	12	永磁体厚度/mm	18
铜盘厚度/mm	7	气隙大小/mm	2
相对转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	50	永磁体材料	NdFe35

轴向永磁涡流联轴器在安装的过程中,主要有轴向的间距变化、径向的轴心距误差以及导体盘与永磁体盘端面夹角的误差.笔者通过 Ansoft Maxwell 进行有限元分析,对比分析传递转矩和轴向力随参数的变化,得出相应结论.

2.1 轴向间距的变化

轴向间距 δ 是指永磁体盘与导体盘的间距,相当于气隙大小,如图 3(a).导体盘通过切割永磁体所产生的磁感线,产生涡电流,相应有感应磁场产生.永磁体所产生的磁感线主要有三条路径:经过气隙闭合、经过铜盘闭合、经过导磁体闭合.导磁体为有用路径,并且是主要路径;经过气隙和铜盘的磁感线为漏磁.当气隙值较大时,气隙磁阻



(a) 轴向间距与径向轴距

(b) 端面夹角

图 3 建立的误差模型

Fig. 3 The models of the assembling deviations

较大,那么相应的经过气隙所产生的漏磁较多;气隙值较小时则相反。

涡流联轴器正常工作时的转速差为 50 r/min,图 4 是不同气隙在转速差为 50 r/min 所对应的转矩与轴向力大小。

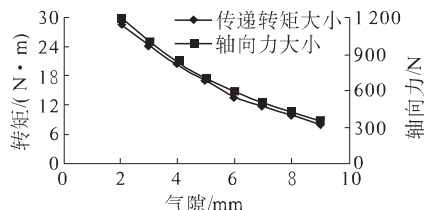


图4 不同气隙所对应的转矩和轴向力
Fig.4 The torques and axial forces under different air gaps

通过图4可以看出,在相同转速下随着气隙增大,转矩下降得非常快。这说明永磁体与导体盘的端面间距是联轴器的一个重要参数,也证实了永磁涡流联轴器调速和过载保护功能。

如果在安装的过程中,出现轴向间距误差,那么输出轴所获得的转速会有变化。图5是在不同气隙值下,获得转矩 28 N·m 时所需要的转速差大小。

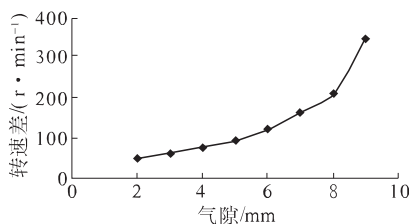


图5 不同气隙所需要的转速差
Fig.5 The speeds under different air gaps

通过图5可以看出,随着轴向间距增大,达到一定转矩值所需要的转速差越来越大。正常工作时,误差气隙变大,输出的转速会变小;误差气隙变小时,则相反。永磁涡流联轴器所能容许的轴向间距为 2~5 mm。

2.2 径向轴间距的变化

径向轴间距 a 是指输入轴与输出轴的轴线间距,如图 3(a)。永磁涡流联轴器的工作原理:通过导体盘切割永磁体所产生的磁感线,传递转矩和转速。那么可以认为,只要导体盘旋转的区域覆盖着永磁体盘所对应的区域,传递的转矩是基本不变的。图6是在不同径向轴间距下,传递转矩的变化。

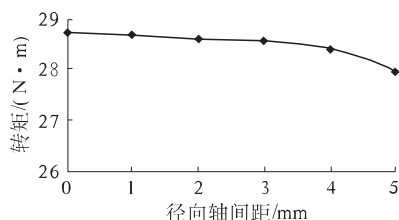


图6 不同径向轴间距下传递转矩大小
Fig.6 The torques following different radial axial range

通过图6可以看出,在结构允许的情况下,轴向间距的变化对传递转矩和轴向力基本没有影响。导体盘相对永磁体盘较大,在径向轴间距变化时,一直覆盖着永磁体盘。正常工作时,导体盘上所产生的转矩为一圆周分布,当存在轴向间距时,相当于导体盘上圆周转矩的圆心变化,通过数学积分可知转矩圆周的圆心变化对总的输出转矩大小没有影响。

2.3 端面夹角的变化

端面夹角 α 的变化是指在保证轴线位置气隙大小不变,改变导体盘的角度,导体盘与永磁体盘端面夹角的变化,如图 3(b)。端面夹角变化使得永磁体盘与导体盘之间的气隙分布不均匀,事先假定端面轴线位置的气隙不变,为 2 mm,这样有了夹角后,上部气隙会变大,下部气隙变小。通过 2.1 节中的介绍,可知气隙较小时导体盘区域漏磁较小,磁感应强度较大;气隙较大时导体盘区域漏磁较大,磁感应强度较小。那么所产生的传递转矩相比于无误差情况下会有变化。图7是在不同的端面夹角下,传递转矩和轴向力的变化趋势。

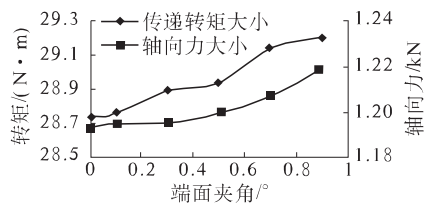


图7 不同端面夹角下转矩大小与轴向力大小
Fig.7 The torques and axial forces under different transverse angles

由图7可以看出,随着端面夹角变大,联轴器的传递转矩有少许增加。下部端面气隙变小,导体盘区域磁感应强度增大;上部端面气隙变大,导体盘区域磁感应减小。因为在永磁体外部随着距离增大,磁感应强度衰减越来越快,那么有端面夹角时,导体盘区域磁感应强度整体是增加的,传递的

转矩也相应增加.

3 结论

(1) 轴向间距对传递转矩和转速有非常大的影响. 间距较大时, 达到额定转矩所需的转速差较大, 输出的转速变小. 所能容许的气隙为 2 ~ 5 mm.

(2) 由于导体盘一直覆盖着永磁体盘, 径向轴间距的变化对输出转矩基本没有影响.

(3) 端面夹角的变化使得导体盘区域所获得的磁感应强度增大, 总的输出转矩是增加的.

综上所述, 轴向永磁涡流联轴器在安装的过程中能够容许较大误差, 降低安装精度的要求.

参考文献:

- [1] WANG Jian, LIN He-yun, FANG Shu-hua. A general analytical model of permanent magnet eddy current couplings [J]. IEEE Transactions on Magnetic. 2014, 50(1): 335-343.
- [2] 李桃, 林鹤云, 黄云凯. 基于三维运动涡流场分析的永磁涡流联轴器特性 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 301-305.
- [3] WALLACE A, WOHGEMUTH C, LAMB K. A high efficiency alignment and vibration tolerant coupler using high energy-product permanent magnets [C]// IEEE Seventh Electrical Machines and Drives Conference. Durham: Institution of Electrical Engineers, 1995(412): 232-236.
- [4] 赵博, 张宏亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [5] THIERRY L, ABDERREZAK R. Steady-state and Transient performance of axial-field eddy-current coupling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014, 8(8): 162-170.
- [6] 杨超君, 管春松, 丁磊. 盘式异步磁力联轴器传动特性 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 76-84.
- [7] 徐伟, 孙建军. 永磁调速器的涡流场分析 [J]. 机械传动, 2015, 39(2): 115-118.
- [8] 刘伟, 佟强, 杨帛润. 永磁调速器的有限元分析与性能计算 [J]. 微特电机, 2015, 43(4): 10-13.

Anasylis of the Assembling Deviations for Axial Permanent Magnet Eddy-Current Coupling

LI Yan-min, LI Shen, HONG Zhen, SU Yu-feng

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

Abstract: The application and development of permanent magnet eddy current coupling are sketched as well as the basic structure and principle. The assembling deviations of the axial permanent magnet eddy-current coupling are analyzed based on the Ansoft software, including the variations of the output torque and rotational speed following the air gaps, the variation of the torque following different radial axial range, the variations of the torque and axial force following different transverse angles. The effects of assembling deviations and the range assembling deviations ensured for the axial permanent magnet eddy current coupling are obtained by the comparison of the axial force and torque under different conditions. The research methods and conclusions in the paper provide reference for the design and installation of the axial permanent magnet eddy-current coupling.

Key words: permanent magnet coupling; eddy-current; finite element analysis; essembly deviation