

安徽理工大学学报(自然科学版)

第32卷第1期(总第121期)2012年3月

目次

低温等离子体协同 CuO/海泡石催化脱除 NO	陈明功,廖 侠,崔 璨,等(1)
新集一矿孔隙结构特征研究	姚晋宝,邓蓉蓉,胡宝林(7)
岩石材料动态断裂韧性的实验研究	高 远,宫能平,罗裕繁(13)
复合铈酸盐的合成和光催化活性的研究	孙明明,吴 正,何 杰(17)
一类具有激波层现象的二次 Dirichlet 问题	史娟荣,刘树德(22)
土内撑开式伞形土锚的钢绞线连接实验研究	张 科,夏红兵(26)
轻钢住宅结构体系的动力特性研究	刘菁华,宗 琦(29)
涡北煤矿地温分布规律及其影响因素分析	张 帅,田道春,刘文中(35)
基于 ARCGIS 的塌陷塘水质特征研究及评价——以淮南矿业集团谢桥矿为例 苏桂荣,姚多喜,李守勤,等(39)
空间插值在地表水质分析与评价中的应用——以淮南矿业集团潘集矿塌陷水体为例 贾 俊,高良敏,尹伶俐,等(43)
基于光纤陀螺的捷联惯导系统的测试设计	连 杰,冯 宏,王继矿(50)
复杂条件下上提蹬空工作面矿压显现特征研究	马菁花,华心祝,杨 科,等(53)
基于 BP 神经网络的工作面周期来压预测	贺超峰,华心祝,杨 科,等(59)
利用 SF ₆ 示踪技术测试煤层瓦斯抽采半径	辛 明(64)
煤层气化上覆岩层温度场分布规律研究	罗吉安,张新亮(67)
直流电机与液力耦合器联合工作特性研究	刘广胜,栾振辉,丁 虹(71)
有限 P -幂零群的一个刻画	顾江永(75)
化妆品过敏原皮肤斑贴试验的临床研究	朱晓敏,张晓军,何韶衡(77)
是“瓦斯”?是“沼气”?是“煤层气”?还是“甲烷”?	(21)
欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿	(70)
期刊基本参数:CN34-1220/N*1981*q*A4*80*zh*P*¥5.00*1000*18*2012-03	

Contents

NO Removal by Non – thermal Plasma Combined with CuO / Sepiolite Catalyst	
..... CHEN Ming – gong, LIAO Xia, CUI Can, et al (1)	
Research on Pore Structure Features of Xinji No. 1 Coal Mine	
..... YAO Jin – bao, DENG Rong – rong, HU Bao – lin (7)	
Experimental Study on Dynamic Fracture Toughness of Rock	
..... GAO Yuan, GONG Neng – ping, LUO Yu – fan (13)	
Preparation and Photocatalytic Activities of Niobate Composites	
..... SUN Ming – ming, WU Zheng, HE Jie (17)	
The Quadratic Dirichlet Problem with Shock Layer Phenomena	SHI Juan – rong, LIU Shu – de (22)
Experiment Research on Strand Connection of Inside – soil – opened Umbrella Type Soil Anchor	
..... ZHANG Ke, XIA Hong – bing (26)	
Analysis of Dynamics Characterstics of Light Steel Structure Residential System	
..... LIU Jing – hua, ZONG Qi (29)	
Geotherm Distribution in Guobei Coal Mine and Its Influencing Factors	
..... ZHANG Shuai, TIAN Dao – chun, LIU Wen – zhong (35)	
Research and evaluation of Water Quality in Subsidence Ponds Based on the ARCGIS	
——A Case Study in Xieqiao Coal Mine of Huainan Mining Group	
..... SU Gui – rong, YAO Duo – xi, LI Shou – qin, et al (39)	
Application of Spatial Interpolation in Analysis and Evaluation of Surface Water Quality	
——A Case Study for Water in Subsidence in Panji Coal Mine	
..... JIA Jun, GAO Liang – min, YIN Ling – li, et al (43)	
The Test and Designe of SINS Based on Fiber – optic Gyroscope	
..... LIAN Jie, FENG Hong, WANG Ji – kuang (50)	
Study on Characteristics of Strata Press Appearing under Complex Conditions with Working Face over Goaf ..	
..... MA Jing – hua, HUA Xin – zhu, YANG Ke, et al (53)	
Forecast of Periodic Weighting in Working Face Based on Back – propagation Neural Network	
..... HE Chao – feng, HUA Xin – zhu, YANG Ke, et al (59)	
Determination of Gas Extraction Radius in Coal Seams by Tracer Technique with SF ₆	XIN Ming (64)
Temperature Field Distribution in Overburden with Coal Seam Gasification	
..... LUO Ji – an, ZHANG Xin – liang (67)	
Joint Working Characteristics of DC Motor with Hydraulic Coupling	
..... LIU Guang – sheng, LUAN Zhen – hui , DING Hong (71)	
A Characterization of Finite p – nilpotent Groups	GU Jiang – yong (75)
Clinical Study on Cosmetic Allergens by Skin Patch Test	
..... ZHU Xiao – min, ZHANG Xiao – jun, HE Shao – heng (77)	

低温等离子体协同 CuO/海泡石催化脱除 NO

陈明功¹, 廖 侠¹, 崔 璨¹, 陈静¹, 荣俊峰¹, 余东旭¹, 颜凌燕¹

陈明强¹, 侯贵华², 许 宁²

(1. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 盐城工学院江苏省新型环保重点实验室, 江苏 盐城 224051)

摘 要:采用硝酸浸泡和硝酸铜改性海泡石并经高温煅烧, 制得改性海泡石催化剂协同介质阻挡放电反应器产生的低温等离子体脱除 NO。通过 XRD 分析发现海泡石原矿经硝酸洗涤可有效去除其中 Mg 以及其他以不同化合物形态出现的杂质, 海泡石原矿经酸洗提纯、浸渍硝酸铜溶液、干燥、煅烧等工艺过程处理可在载体表面形成稳定的 CuO 物相, 并且海泡石基本结构没有发生明显变化, 证明海泡石结构稳定, 是良好的催化剂载体。通过 SEM 测定表明酸洗可有效增加海泡石孔道截面和孔道数, 增大其比表面积; 并且活性组分均匀分布在催化剂表面及孔道中, 在负载量适中时未发现较大聚集颗粒。证明改性海泡石催化剂协同低温等离子体对 NO 具有良好的脱除效果。

关键词:海泡石; 脱除 NO; 低温等离子体; 介质阻挡放电; 催化剂

中图分类号: O643 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0001-06

NO Removal by Non-thermal Plasma Combined with CuO / Sepiolite Catalyst

CHEN Ming-gong¹, LIAO Xia¹, CUI Can¹, CHEN Jing¹, RONG Jun-feng¹

YU Dong-xu¹, YAN Ling-yan¹, CHEN Ming-qiang¹, HOU Gui-hua², XU Ning²

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Key Laboratory for Advanced Technology in Environmental Protection of Jiangsu Province, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: Nitric acid soak and copper nitrate modified sepiolite calcined at high temperatures, the modified catalyst combined with DBD plasma reactor to remove NO. XRD analysis showed that sepiolite ore by nitric acid washing can effectively remove Mg and other forms appear in different compounds, sepiolite ore by acid washing and purifying, soading copper nitrate solution, drying, calcinations technologies process can form a stable CuO phase in the surface, and the basic structure of sepiolite did not change significantly, proof the structure of sepiolite stability and sepiolite is a good catalyst carrier. Determined by SEM showed that acid washing can make sepiolite the cross-section and the number of channel can effectively increase, increasing its surface area; and the active component distributed uniformly in the catalyst surface and pores, in the moderate load large aggregation particles are not discovered. The investigation proved the modified sepiolite catalyst combined with non-thermal plasma had the good ability to remove NO.

Key words: sepiolite; NO removal; non-thermal plasma; dielectric barrier discharge; catalyst

低温等离子体能够产生大量自由电子、离子、活性自由基和多种激发态自由粒子, 具有较高活性能量提高化学反应速率; 介质阻挡放电可产生低温等离子体, 其结构形式一般有线-筒式、线-板式、

板-板式^[1-3], 研究证明介质阻挡放电协同催化剂可有效净化汽车尾气^[4-5]。在汽车尾气净化过程中 NO 氧化成 NO₂ 是控制反应速率的瓶颈, 因为该步反应速率较慢^[6]。汽车尾气中 NO_x 相对浓度不

收稿日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21076002); 2010年江苏省新型环保重点实验室开放课题资助项目(AE201002)

作者简介: 陈明功(1966-), 男, 安徽太和人, 教授, 博士, 主要从事环境化工的研究和教学工作。

高($200 \sim 300 \times 10^{-6}$),要求催化剂具有良好吸附和储存性能,同时还具有良好反应活性和选择性^[7-8]。目前研究较多的催化剂是以 γ - Al_2O_3 、 TiO_2 、分子筛等为载体,但该类载体催化剂价格较高,且在高温时易与金属活性组分(Me)形成尖晶石结构使催化剂失活^[9-10]。

海泡石是天然纤维状含水镁硅酸盐黏土矿,大量细长针状纤维聚集成束状体杂乱交织在一起形成无规则纤维网络;在其结构单元中硅氧四面体与镁氧八面体相互交替,形成层状和链状结构,具有良好及吸附和催化性能^[11-13]。用海泡石替代 γ - Al_2O_3 作为催化剂前驱体具有很多优点,不仅比表面积高具有优良吸附性能,而且具有类分子筛特性,当引入其他金属氧化物活性点时具有良好催化性能;同时价格低廉,具有良好热稳定性,以及无毒、无污染、耐油、耐碱、耐腐蚀、附着力强、不易裂缝等优点^[14-16]。本研究以海泡石为前驱体以及CuO为活性组分制作催化剂并协同低温等离子体催化脱除NO。催化剂制作工艺采用酸洗、浸渍、煅烧等过程;采用XRD、SEM等方法对改性海泡石催化剂进行表征。采用一段线-筒式介质阻挡放电反应器评价催化剂性能,固体催化剂颗粒装填在线筒之间并兼具阻挡放电介质功能,该结构反应器不仅可提高等离子体能量利用效率,同时结构简单、使用方便^[17]。

1 实验部分

1.1 催化剂制备

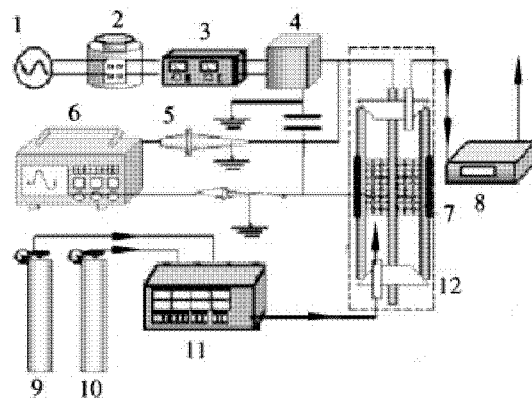
1) 试剂与实验设备。试剂:海泡石原矿粉(河南磊宝海泡石公司,280目,工业级)、硝酸(安徽淮化集团,AR级)、硝酸铜(汕头市西陇化工厂,AR级)、空气钢瓶、NO/ N_2 钢瓶(NO含量 2.011×10^{-6} ,其余为 N_2)。主要设备:汽车尾气在线分析仪(广东佛山分析仪表厂,FGA-4100;NO测量范围: $0 \sim 4.000 \times 10^{-6}$);电热恒温鼓风干燥箱(型号DHG-9240);扫描电镜(SEM,日本岛津公司,KYKY-EM3200)、X射线衍射仪(XRD,北京普析通用有限公司生产XD-3型多晶X射线粉末衍射仪)、马弗炉、气体质量流量计;变压器、功率表、高压电源JNB-208B、高压探头、数字式示波器等。介质阻挡放电催化反应器(自制):反应器由内径27mm、壁厚2mm、长度120mm硼硅酸耐热玻璃管制成,玻璃管外壁粘贴长度60mm厚度0.6mm铝膜为阴极,玻璃管中央安装外径8mm铝棒为阳极;固体催化剂装填在铝棒和铝膜间玻璃管内,两端用硅橡胶

塞密封^[18]。

2) 催化剂制备工艺。海泡石原矿提纯:取200g海泡石原矿粉加入120ml蒸馏水,搅拌10min;静止片刻倾倒入上层悬浮物,取中间层悬浊液,下层沉淀物按上述方法反复处理几次。真空抽滤中间层悬浮液,固体滤饼放入烘箱在105℃下烘干、研碎待用。海泡石酸活化:本实验用硝酸(浓度范围1.0~2.0mol/L)活化海泡石,固(海泡石)液(硝酸)比(g/mL)1:10,在20℃条件下浸泡时间分别为24h、48h、72h。酸化后的海泡石用去离子水反复洗涤4次,过滤滤饼放入马弗炉中120℃温度加热干燥4h,自然冷却后取出研碎。海泡石改性:将上述不同条件酸洗海泡石样品(包括原矿)50g在室温下分别浸渍于 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液中(保证CuO含量8%)24h,而后在60℃水浴锅中蒸发干燥,再研碎至240目左右,放入模具压制成型,成型颗粒自然干燥24h定型,再分别放入马弗炉中在500℃温度条件下加热活化5h,再粉碎成适宜的颗粒体积。

1.2 试验方法

分别把不同条件下制备的催化剂颗粒30g装入相同等离子体固定床反应器中,反应器安装在180℃恒温箱中,向反应器中通入浓度为 297×10^{-6} 的NO模拟气体,入口气体流量7.0L/min,输入电压(V_{pp} ,峰值-峰值)35kV,电源频率50Hz;用FGA-4100汽车尾气在线检测仪测定NO出口浓度,计算NO脱除率,并以NO脱除率表示催化剂活性。 $\text{NO脱除率}/\% = 100 \times (\text{反应器入口NO浓度} - \text{反应器出口NO浓度}) / \text{反应器入口NO浓度}$ 。试验工艺流程如图1所示。



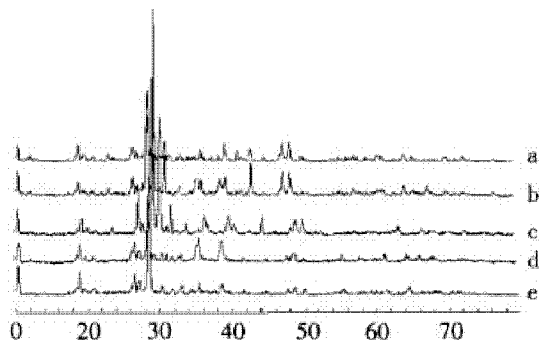
1. 电源; 2. 变压器; 3. 功率表; 4. 高压电源发生器;
5. 高压探头; 6. 数字式示波器; 7. 低温等离子体催化反应器; 8. NO浓度在线分析器; 9. 空气钢瓶; 10. NO气钢瓶; 11. 气体质量控制器; 12. 恒温箱

图1 试验流程示意图

2 结果与讨论

2.1 催化剂表征

1) XRD 物相分析。采用 X 射线衍射仪 (XRD, 北京普析通用有限公司生产的 XD-3 型多晶 X 射线粉末衍射仪) 分析催化剂晶体结构, 衍射条件: Cu 靶, 管电压 36 kV, 管电流 40 mA, 测试结果如图 2 所示。



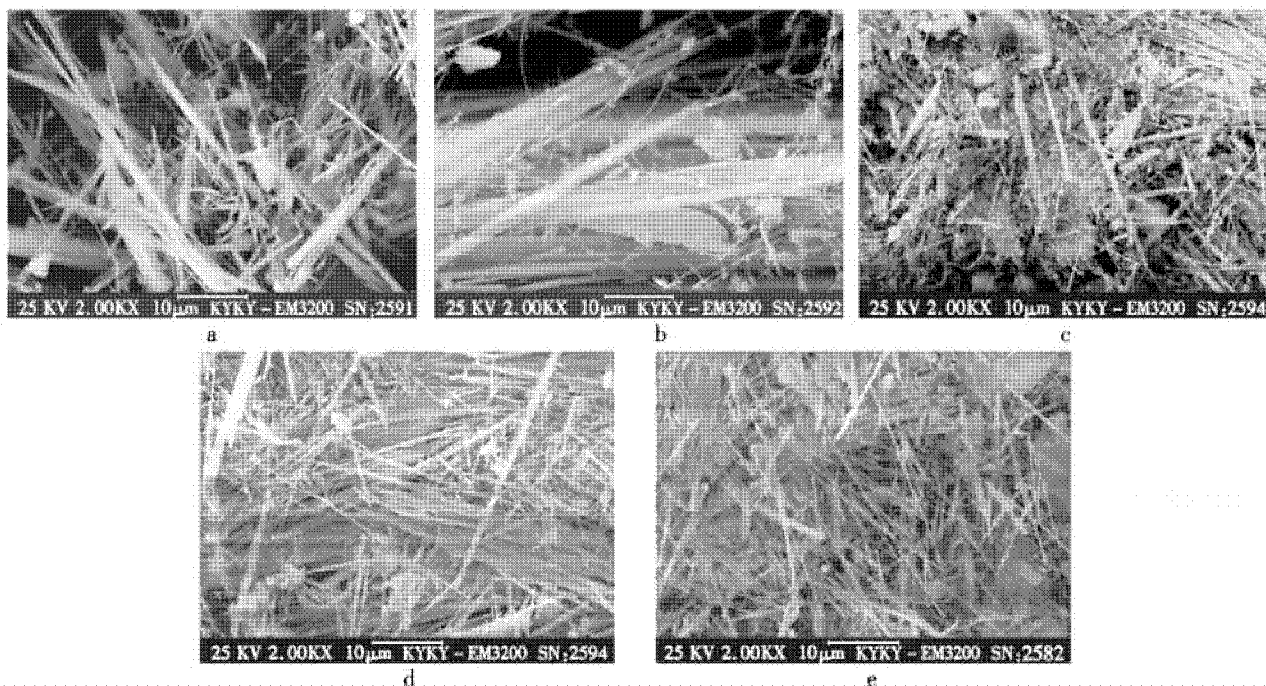
a. 海泡石原矿; b. 未酸洗海泡石原矿直接浸渍硝酸铜溶液 24 h, 500 °C 煅烧; c. 海泡石经 1.0 mol/L HNO₃ 硝酸浸泡 1 d, 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; d. 经 1.5 mol/L HNO₃ 硝酸浸泡 2 d, 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; e. 经 2.0 mol/L HNO₃ 硝酸浸泡 3 d, 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧

图2 海泡石原矿以及改性海泡石催化剂 XRD 谱图

由图 2a 可见海泡石原矿中含有大量 Si、Mg、Al 等元素, 且以不同化合物形态出现, 其中 $2\theta = 26.7^\circ$ 为石英 SiO₂ 特征峰; $2\theta = 29.5^\circ$ 为海泡石中 Mg₄Si₆O₁₅(OH)₂ · 6H₂O 特征峰。当 $2\theta = 35.7^\circ$ 、 39.1° 为 CuO 特征峰。比较图 2 中 a、b、c、d、e 可知经酸洗后在 $2\theta = 29.5^\circ$ 处 Mg₄Si₆O₁₅(OH)₂ · 6H₂O 特征峰有很大程度削弱, 其原因由于 Mg²⁺ 离子脱除导致硅氧四面体结构中 SiO₂ 相对增多, 并在酸性介质中转变为含有 Si-OH 基团的 SiO₂。另外, 海泡石中含量相对较少的 Fe³⁺、K⁺、Na⁺ 等在酸洗过程中去除; 但 SiO₂ 特征峰依然峰强度很高, 其原因可能是海泡石表面脱羟基, 其物相被分解; 或者在高温下发生固相反应生成硅酸盐。经过浸渍硝酸铜并煅烧后 XRD 谱图明显出现 $2\theta = 35.7^\circ$ 、 39.1° CuO 特征峰, 说明在催化剂载体中已形成 CuO 物相。

比较图 2 中 c、d、e (分别为酸洗 1 d、2 d、3 d 后经煅烧 XRD 谱图) 可知酸洗 2 d 可有效去除海泡石原矿中少量杂质, 酸洗 3 d 和 2 d 图谱基本一致, 因此可以认为酸洗 2 d 为优化时间。同时海泡石经酸洗、浸渍、水浴、干燥、灼烧等一系列处理后, 基本结构没有发生明显变化, 氧化铜的引入也没有改变其主体结构, 证明海泡石结构稳定。

2) 催化剂 SEM 分析。经不同工艺处理后海泡石催化剂的 SEM 如图 3 所示。



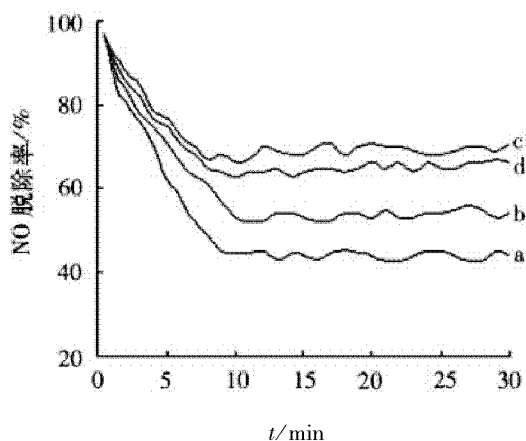
a. 海泡石原矿; b. 未酸洗海泡石原矿直接浸渍硝酸铜溶液 24 h, 500 °C 煅烧; c. 经 1.0 mol/L HNO₃ 硝酸浸泡 1 d 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; d. 经 1.5 mol/L HNO₃ 硝酸浸泡 2 d 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; e. 经 2.0 mol/L HNO₃ 硝酸浸泡 3 d 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧

图3 SEM 照片

比较图 3 中各图可知经酸洗改性后海泡石结构特征更加明显,扩大孔道截面积,增加孔道数目,改善表面性能,达到增强吸附能力目的;同时酸处理还能清除杂质,提高纯度;比表面积、孔径增加有利于活性组分负载。电子探针固定于图 3 (b、c、d、e) 中许多小亮点及其它部位测试,输入定性元素后分析可知亮点内含有铜元素。由图 3 可见活性组分颗粒清晰,粒度分布比较均匀。

2.2 催化剂性能评价

1) 硝酸浓度对 NO 脱除效率影响。海泡石原矿分别在浓度为 1.0、1.5、2.0 mol/L 的硝酸溶液中浸泡 2 d,液固比为 1:10,催化剂煅烧温度 500 °C, CuO 含量 8%,等离子体反应器输入电压 35 kV、电源频率 50 Hz,测得酸浓度与 NO 脱除率关系如图 4 所示。



a. plasma + 未酸洗海泡石原矿,直接浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; b. plasma + 浓度 1.0 mol/L HNO₃ 酸洗浸泡 2 d,再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; c. plasma + 浓度 1.5 mol/L HNO₃ 酸洗浸泡 2 d,再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; d. plasma + 浓度 2.0 mol/L HNO₃ 酸洗浸泡 2 d,再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧

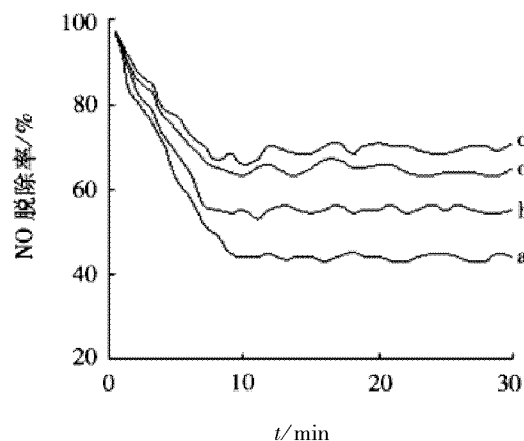
图 4 硝酸浓度与 NO 脱除率关系曲线

从图 4 知在相同试验条件下浸泡海泡石的硝酸浓度对 NO 脱除率具有明显影响,当硝酸浓度在 1.5 mol/L 左右时 NO 脱除效率达到最大值,当硝酸浓度 < 1.5 mol/L 时 NO 脱除率随硝酸浓度增加而增大,当硝酸浓度 > 1.5 mol/L 时 NO 脱除率随硝酸浓度增加而减小,未酸洗海泡石原矿直接浸渍煅烧后所得样品 NO 脱除率最低。

在酸浸反应过程中 H⁺ 代替骨架中的 Mg²⁺,由于天然海泡石具有发达的微孔(小于 1.5 nm)和部分中孔(1.5 ~ 5.0 nm),海泡石纤维间空隙形成大

孔且与纤维间堆积有关;当硝酸浓度较低时部分镁离子被溶解脱除形成新的网孔结构,致使海泡石内部微孔部分相互连通,微孔进一步发展为中孔,尽管微孔比率减小,中孔比率增加,但由于通道连通作用使其总比表面积增加,有利于催化剂活性提高,所以 NO 脱除率增加。当硝酸浓度大于临界值后,大部分微孔和中孔发展为大于 10 nm 大孔,使网状孔径进一步增大,致使比表面积降低,NO 脱除率也随之减小。

2) 酸洗时间对 NO 脱除率影响。海泡石原矿粉在浓度 1.5 mol/L 硝酸溶液中分别浸泡 1 d、2 d、3 d 进行酸洗提纯,液固比为 1:10,然后浸渍硝酸铜溶液(CuO 含量 8%),经 500 °C 煅烧制得催化剂,等离子体反应器输入电压 35 kV、频率 50 Hz,测得酸洗时间与 NO 脱除率关系如图 5 所示。

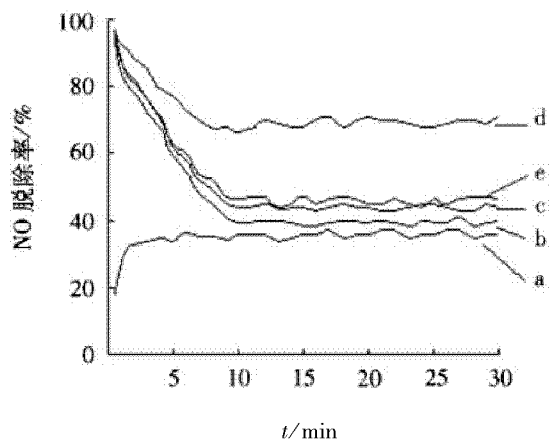


a. plasma + 未酸洗海泡石原矿,直接浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; b. plasma + 浓度 1.5 mol/L HNO₃ 酸洗浸泡 1 d,再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; c. plasma + 浓度 1.5 mol/L HNO₃ 酸洗浸泡 2 d,再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧; d. plasma + 浓度 1.5 mol/L HNO₃ 酸洗浸泡 3 d,再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500 °C 煅烧;

图 5 硝酸酸洗时间与 NO 脱除率关系曲线

从图 5 知在相同试验条件下海泡石酸洗时间对 NO 脱除率也有一定影响规律,未酸洗海泡石为原料制得催化剂 NO 脱除率最低,酸洗 2 d 制取的催化剂 NO 脱除率最高。海泡石酸处理是快速反应^[19],海泡石表面镁离子很容易被溶解脱除形成新的网孔结构;随酸洗时间延长,H⁺ 向孔道深处扩散,H⁺ 浓度逐渐降低,海泡石含镁量逐渐减少;由于受扩散阻力影响,孔道深处脱镁率难有更大提高;如果浸泡时间太长,已经溶解的杂质还可能会重新吸附在海泡石骨架表面,所以存在一个最优酸洗时间。

3) 催化剂活性比较。等离子体反应器输入电压 35 kV、NO 初始浓度 297×10^{-6} 、入口气体流量 7 L/min (空速 10.2 s^{-1}), 相同试验条件下反应器分别: a 单纯等离子体作用, 未装填任何物质; b 装填海泡石原矿 (未经任何处理) 与等离子体协同强化; c 海泡石原矿未酸洗直接浸渍硝酸铜, 并协同等离子体强化; d 海泡石酸洗后 (1.5 mol/L HNO_3 浸泡 2 d)、再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 协同等离子体放电; e 浓度 1.5 mol/L HNO_3 酸洗浸泡 2 d, 再浸渍硝酸铜溶液, 500°C 煅烧。上述五种情况 NO 脱除率与时间变化关系如图 6 所示。



a. plasma (单纯等离子体作用, 未装填任何物质); b. plasma + 装填海泡石原矿 (未经任何处理); c. plasma + 未经酸洗海泡石原矿, 直接浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500°C 煅烧; d. plasma + 浓度 1.5 mol/L HNO_3 酸洗浸泡 2 d, 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500°C 煅烧; e. 浓度 1.5 mol/L HNO_3 酸洗浸泡 2 d, 再浸渍硝酸铜溶液 1 d, 500°C 煅烧;

图 6 装填不同材料条件下 NO 脱除率与时间关系

由图 6 可见: (1) 无论装填海泡石原矿或者是改性后催化剂, NO 脱除率开始阶段较高, 随时间延长逐渐降低, 最后趋向稳定; 由于海泡石具有吸附和储存作用所以起始阶段 NO 脱除率较高, 当吸附达到平衡后 NO 脱除率降低并趋向稳定。 (2) 当反应稳定后 NO 脱除率顺序为: $d > e > c > b > a$ 。NO 稳定脱除率最大值约为 71%, 该结论说明改性海泡石催化剂协同低温等离子体对 NO 具有较好的脱除效果。 (3) 在反应单纯依靠等离子体作用条件下 NO 脱除率最低, 因为仅靠等离子体作用不可能把 NO 有效氧化, 相反还可能使气相中的氮气和氧气激活发生逆向反应生成 NO, 受化学反应平衡条件限制。当反应器装填海泡石催化剂时, 与等离子体协同不仅具有催化、吸附和存储功能, 而且还能发挥阻挡介质作用。

3 结论

通过 XRD 分析发现海泡石原矿经硝酸洗涤可有效去除其中 Mg 以及其他以不同化合物形态出现的杂质, 海泡石原矿经酸洗提纯、浸渍硝酸铜溶液、干燥、煅烧等工艺过程处理可在载体表面形成稳定的 CuO 物相, 并且海泡石基本结构没有发生明显变化, 证明海泡石结构稳定, 是良好的催化剂载体。通过 SEM 测定表明酸洗可有效增加海泡石孔道截面和孔道数, 增大其比表面积; 并且活性组分均匀分布在催化剂表面及孔道中, 在负载量适中时未发现较大聚集颗粒。

试验证明酸洗浓度、酸洗时间、等离子体输入电压等对 NO 脱除率都有一定程度影响; 催化剂活性随酸洗浓度和酸洗时间的增加而增大, 而后减小, 存在最佳峰值; NO 脱除率随输入电压的增大而增加。NO 脱除率开始阶段较高, 随时间延长逐渐降低最后趋向稳定, 说明以海泡石为载体的催化剂对 NO 具有良好吸附和储存功能。当反应基本稳定后 NO 脱除率顺序为: (等离子体 + 海泡石原矿经酸洗、浸渍硝酸铜、 500°C 煅烧) > (海泡石原矿经酸洗、浸渍硝酸铜、 500°C 煅烧) > (等离子体 + 海泡石原矿未酸洗浸渍硝酸铜、 500°C 煅烧) > (等离子体 + 海泡石原矿) > 等离子体。在本研究实验条件下等离子体输入电压 35 kV、浓度 1.5 mol/L 硝酸浸泡 2 d、负载 8% CuO、 500°C 温度煅烧 5 h, NO 最大脱除率可达 71% 左右。该研究证明改性海泡石催化剂协同低温等离子体对 NO 具有量好的脱除效果。

参考文献:

- [1] J H KWAK, J SZANYI, C H PEDEN. Non-thermal plasma-assisted NO_x reduction over alkali and alkaline earth ion exchanged Y, FAU zeolites [J]. Catalysis Today. 2004, 89 (2): 135-141.
- [2] JINHUA NIU, XUEFENG YANG, CHUAN SHI. Plasma-assisted selective reduction of NO_x by C_2H_2 over Co-HZSM-5 catalyst [J]. Catalysis Communications, 2006, (7): 297-301.
- [3] F HE, C J LIU, B ELIASSON, et al. XPS characterization of zeolite catalyst in plasma catalytic methane conversion [J]. Surface and Interface Analysis, 2001, 32: 198-201.
- [4] M M SANTILLAN, A VINCENT, E SANTIRSO, et al. Design of a DBD wire-cylinder reactor for NO_x emis-

- sion control: experimental and modeling approach [J]. Journal of Cleaner Production. 2008, (16): 198 – 207.
- [5] JAN VINOGRADOV, BORIS RIVIN, ERAN SHER. NO_x reduction from compression ignition engines with DCcorona discharge—An experimental study [J]. Energy. 2007, (32): 174 – 186.
- [6] K YUKIMURA, K KAWAMURA, T HIRAMATSU, et al. Efficient decomposition of NO by ammonia radical – injection method using an intermittent dielectric barrier discharge [J]. Thin Solid Films. 2007, (515): 4 278 – 4 282.
- [7] MATSI Y, TAKASIMA K, MIZUNO A. After – treatment of NO_x using combination of non – thermal plasma and oxidative catalyst prepared by novel impregnation [J]. J. of Advanced oxidation. 2005, 8 (2): 255 – 261.
- [8] Y MATSUR, K TAKASHIMA, A MIZUNO. Cleaning of diesel exhaust using discharge plasma and Pt catalyst [J]. J. Institute of electrostatics Japan, 2004, 28 (1): 35 – 40.
- [9] KUNDAKOVIE, FIYTZANI – STEPHANOPOULOS M. Reduction characteristics of copper oxide in cerium and zirconium oxide system [J]. Appl. Catal. B, 1998, 171 (1): 13 – 29.
- [10] FERNANDEZ – GARCIA M, RODRIGUEZ – RAMOS I, FERREIRA – APARICIO P, et al. Tracking down the reduction behavior of copper – on alumina catalyst [J]. J. Catal., 1998, 178 (1): 253 – 263.
- [11] AZNAR A J, GUTIERREZ E, DIAZ P, et al. Silica from sepiolite: Preparation, textural properties and use as Support to catalysts [J]. Microp Mater. 1996, 6 (2): 105 – 114.
- [12] 李松军, 罗来涛. 海泡石的改性及其在负载型催化剂中的应用. 现代化工 [J]. 2001, 21 (10): 21 – 25.
- [13] 李丽, 李巧云, 王道, 等. Cu/海泡石——新型 NO 还原催化剂. 化工学报 [J]. 2005, 56 (1): 64 – 69.
- [14] S SUAREZ, M YATES, A L PETRE, et al. Development of a new Rh/TiO₂ – sepiolite monolithic catalyst for N₂O decomposition [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, 64 (3 – 4): 302 – 311.
- [15] CORMA A, PEREZ PARIENTE J, SORIA J. Physical chemical characterization of Cu²⁺ exchanged sepiolite [J]. Clay Miner, 1985, 20: 467 – 475.
- [16] YEBRA – RODRIGUEZ A, MARTIN – RAMOS J D, DEL REY F, et al. Effect of acid treatment on the structure of sepiolite [J]. Clay Minerals, 2003, 38: 353 – 360.
- [17] MOK Y, KOH D J, SHIN D et al. Reduction of nitrogen oxides from simulated exhaust gas by using plasma – catalytic process [J]. Fuel Processing Technology. 2004, 86 (3): 303 – 317.
- [18] CHEN MING – GONG, K TAKASHIMA, A MIZUNO, et al. Catalyst size impact on non – thermal plasma catalyst assisted deNO_x reactors [C]//11th International Conference on Electrostatic Precipitation, Oct. 20 – 24, 2008. Hangzhou, China. Springer Press, 681 – 684.
- [19] 金胜明, 阳卫军, 唐谟堂. 海泡石的表面酸性法处理研究 [J]. 现代化工, 2001, 21 (1): 26 – 28.

(责任编辑: 姚多喜, 李 丽)

新集一矿孔隙结构特征研究

姚晋宝, 邓蓉蓉, 胡宝林

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为进一步了解新集一矿煤层孔隙结构特征,通过压汞法和低温氮等温吸附法实验手段对新集一矿主采煤层孔隙发育特征进行研究。发现新集一矿主采煤层孔隙度较比两淮矿区其他地区高。其中以8煤层8XJ5号样为代表孔隙分布以小孔最发育,大孔较发育,中孔少见为特征和以13-1煤层13XJ10号样为代表孔隙分布以小孔最发育为特征的基质孔,孔隙之间的连通差,不利于瓦斯的抽排;以11-2煤层11XJ3号样和6-1煤层6XJ15号样为代表中孔发育,孔隙以裂隙性为主,孔隙之间的连通较好,有利于瓦斯的运移。

关键词:孔隙结构;压汞法;低温氮等温吸附

中图分类号:P618.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)01-0007-06

Research on Pore Structure Features of Xinji No. 1 Coal Mine

YAO Jin-bao, DENG Rong-rong, HU Bao-lin

(School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to further understand pore structure in coal seams of Xinji No. 1 Coal Mine, the features of pore structure development in mayor coal seams were investigated with mercury intrusion method and cryogenic nitrogen adsorption method. It is found that porosity in the mayor coal seams of Xinji No. 1 Coal Mine is bigger than in the other regions of Huainan and Huaibei Mining Areas. In sample No. 8XJ5 from coal seam No. 8 micropores are the best developed, macropores well developed, and mesopores rarely developed. In sample No. 13XJ10 from coal seam No. 13-1 micropores are the best developed, connection among pores is poor, which is unfavorable for gas drainage. In sample No. 11XJ3 from coal seam No. 11-2 and in sample No. 6XJ15 from coal seam No. 6-1 mesopores are well developed, in which fissures are predominated, and connection among fissures are good, which is good for gas migration.

Key words: pore structure; mercury intrusion method; cryogenic nitrogen adsorption method

新集一矿位于凤台县城西约17 km处,该矿井年实际生产能力超过310万吨。新集一矿主要含煤地层为二叠系山西组及上、下石盒子组,共含煤45层,累计厚度42.53 m,可采煤层11层,可采煤层厚度27.53 m,矿井主采煤层为13-1煤层、11-2煤层、8煤层和6-1煤层,主采煤层分布较稳定,以中——富灰、富焦油以及中高发热量的气煤为

主,次之为1/3焦煤。近年来人们已逐步认识到煤的孔隙性直接关系到煤的吸附、解吸以及瓦斯在煤中的流动性,同时也是关系到突出的重要因素。煤的孔隙结构特征不仅与孔隙中气体的赋存状态有关,而且也极大影响到孔隙与气液分子间的相互作用。因此,正确认识煤的孔隙结构特征,是研究煤储层孔隙性、空间结构、渗流特征和煤层气可采性

收稿日期:2011-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40872103);国家“十一·五”科技支撑计划资助项目(2007BAK28B02)

作者简介:姚晋宝(1986-),男,山西长治人,在读硕士,研究方向:矿井瓦斯地质。

的重要基础^[1-5]。本次采用压汞法及低温液氮法进行了分析研究。

1 孔隙测试方法及原理

压汞法可定量得到孔半径大于 3.75 nm 以上范围内孔隙大小、孔隙分布、孔隙类型等的所有孔隙分布参数信息;液氮法可测到更小的孔径孔隙。

1.1 压汞法

压汞法的基本原理是毛细管现象,汞对煤无湿润能力,只有在外力作用下,汞才能进入煤的孔隙之中。同时,在压力和汞所能进入的孔隙大小之间存在着固定关系。因此,根据压汞实验过程中的压力和进汞量,可以计算出孔隙的半径和相应的孔隙体积。

根据毛细管束模型,汞进入孔隙时所克服的毛细管阻力为

$$P\pi r^2 = -2\pi r\sigma\cos\theta \quad (1)$$

$$\text{即: } Pr = -2\sigma\cos\theta \quad (2)$$

式中: r 为孔隙半径,Å; θ 为汞对煤的湿润边缘角,一般可取平均值为 140° ; σ 为汞的表面张力, $4.8 \times 10^{-3} \text{ N/cm} = 4.8 \times 10^{-11} \text{ N/Å}$; P 为进汞的压力,MPa;“-”为进汞压力与毛细管阻力的方向相反。

将各项参数值代入式(2)后可得

$$r = \frac{2 \times 4.8 \times 0.766}{P} = \frac{7350}{P} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,汞的压力越大,汞能进入的孔隙直径越小。

本次样品测试采用 Carlo-Erba2000 压汞仪,试样尺寸为 $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$,汞压力 P 汞由小到大逐渐增大,在某一压力 P_r 下,已注入的水银体积就是煤样中半径大于 r 的孔隙的总体积。

1.2 低温氮等温吸附法

煤储层比表面积及孔径分布利用低温氮吸附仪(ASAP2000 型)测定,孔径测试范围在 $1.7 \sim 300 \text{ nm}$,其测试原理是,多孔岩石及其表面分子存在剩余的表面自由场,气体分子碰到固体表面时,部分气体分子被吸附于固体表面且释放出吸附热。在温度和压力恒定的情况下,气体在固体表面达到吸附平衡,吸附量是相对压力(平衡压力 P 与饱和蒸汽压力 P_0 的比值)的函数。测得不同的相对压力下的吸附量即可绘出吸附曲线。根据得到的吸

附等温线,按兰格缪尔方程计算出比表面积,再利用 BJH 法计算孔径分布。

2 煤样汞置换法孔隙特征

2.1 孔隙度

汞置换法只能测量孔隙半径为 $3.75 \sim 7\,500 \text{ nm}$ 之间的孔隙体积,因此计算得到的孔隙度只能称为视孔隙度。本井田煤的视孔隙度 $4.1\% \sim 22.5\%$,平均 10.21% (见表 1)。

表 1 煤储层孔隙度发育情况

样号	煤层	孔隙度/%	孔喉均值/ μm
13XJ9	13-1	4.6	15.428
13XJ10	13-1	4.1	14.874
11XJ1	11-2	5.1	15.816
11XJ2	11-2	13.4	16.33
11XJ3	11-2	22.5	10.473
11XJ14	11-2	5.3	15.823
11XJ31	11-2	16.288	16.288
8XJ5	8	6.3	16.201
8XJ17	8	7.1	16.267
8XJ18	8	4.64	12.57
8XJ19	8	8.87	14.837
8XJ20	8	4.92	13.092
8XJ27	8	15.629	15.629
6XJ15	6-1	13.5	12.099
6XJ16	6-1	19	16.496
6XJ25	6-1	12.169	12.169

2.2 孔隙结构特征

煤样压汞测试空隙分布特征结果如表 2 所示。煤样孔隙分布总体上大孔变化在 $1.34\% \sim 22.17\%$ 之间,平均值为 7.12% ;中孔一般在 $1.15\% \sim 58.9\%$ 之间,平均 13.31% ;微孔-小孔 $18.926\% \sim 96.863\%$,平均 79.463% 。其中 13-1 煤层大孔平均为 5.59% ,中孔含量平均 3.91% ,微孔-小孔含量平均 90.51% ;11-2 煤层大孔平均为 7.12% ,中孔含量平均 13.31% ,微孔-小孔含量平均 79.46% ;8 煤层大孔平均为 7.12% ,中孔含量平均 12.26% ,微孔-小孔含量平均 80.49% ;6-1 煤层大孔平均为 9.79% ,中孔含量平均

18.86%,微孔-小孔含量平均71.13%。

表2 煤样压汞测试法孔隙分布特征

样号	煤层	大孔 >1 000nm	中孔 100 ~ 1 000nm	微孔-小孔 <100nm
11XJ1	11-2	1.88	3.25	94.869
11XJ2	11-2	2.192	1.968	95.838
11XJ3	11-2	22.173	58.9	18.926
8XJ5	8	1.339	1.797	96.863
13XJ9	13-1	6.575	2.868	90.556
13XJ10	13-1	4.6	4.942	90.459
11XJ11	11-2	2.822	2.626	94.55
6XJ15	6-1	16.057	42.55	41.392
6XJ16	6-1	3.109	2.298	94.592
8XJ17	8	2.541	1.15	96.308
8XJ18	8	11.239	38.536	50.225
8XJ19	8	8.848	6.519	83.06
8XJ20	8	10.56	10.791	78.649
6XJ25	6	16.097	30.181	53.722
8XJ27	8	1.614	2.872	95.514
11XJ31	11-2	2.269	1.837	95.894

所测样品不同孔径孔分布如图1所示,其中1~2号为13-1煤层样品;3~7号为11-2煤层样品;8~13号为8煤层样品;14~16号为6-1煤层样品。从图1中可看出,本井田煤层孔隙以微孔-小孔为主。

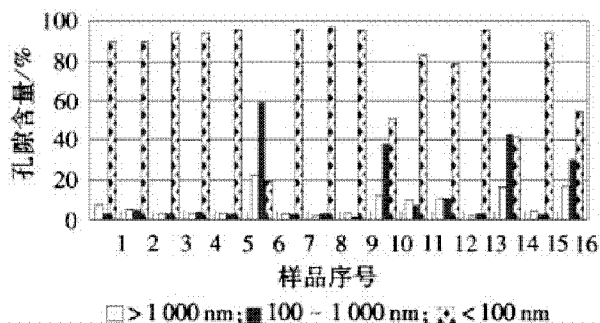


图1 各样品不同孔径孔分布

2.3 压汞曲线特征

压汞实验得出压汞曲线如图2~图5所示。

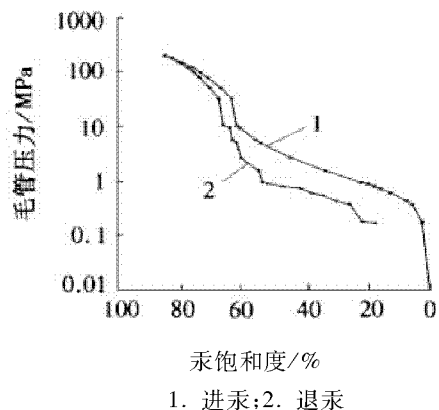


图2 6-1煤层6XJ15号样压汞曲线

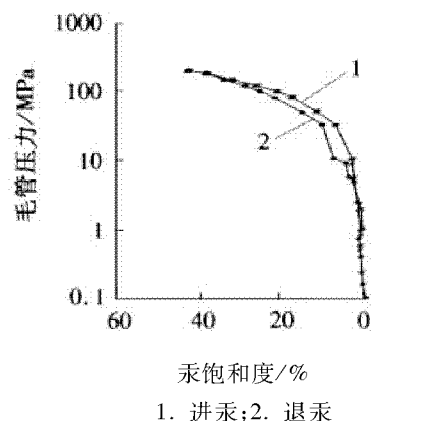


图3 8煤层8XJ5号样压汞曲线

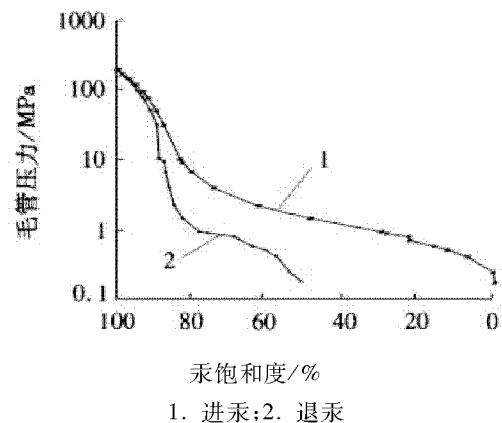


图4 11-2煤层11XJ3号样压汞曲线

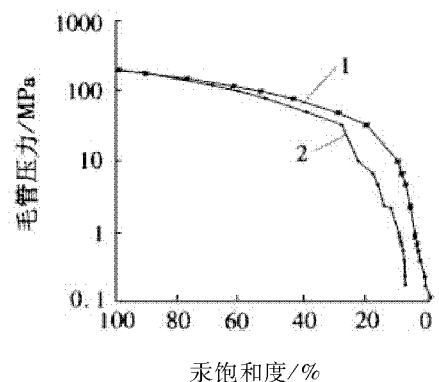


图5 13-1煤层13XJ10号样压汞曲线

根据进退汞曲线形态分析,可将本区各煤层的压汞曲线分为以下类型。

第一类:进汞曲线在大孔范围内上升较快,进入中孔范围曲线平缓,在孔径 100 nm 左右曲线再次变陡,压汞饱和度中值压力小于 10 MPa,退汞效率低,退汞曲线与进汞曲线形态呈分离状。该类煤层孔隙分布特征为中孔发育(见图 2,图 4)。

第二类:进汞曲线在 1 000 ~ 100 nm 范围曲线平缓进汞量少,而进入到小于 100 nm 孔径范围,曲线上升较快;退汞曲线与进汞曲线形态相似,基本上重合。压汞饱和度中值压力在 1 MPa 左右,退汞效率较高,退汞曲线与进汞曲线形态呈基本重合,该类煤层孔隙分布以小孔最发育,大孔较发育,中孔少见为特征(见图 3)。

第三类:进汞曲线上斜率变化较少,退汞曲线斜率小,效率较低,压汞饱和度中值压力小于 10 MPa,退汞效率较低,该类煤层孔隙分布以小孔最发育为特征(见图 5)。

类型 1 反映为一种裂隙性为主的孔隙,孔隙之间的连通较好,有利于甲烷的运移;类型 2 和类型 3

主要为基质孔,孔隙之间的连通差,不利于瓦斯的抽排。

3 煤样低温氮吸附法孔隙特征

3.1 实验样品与设备

为了尽可能反映煤储层的孔隙及比表面积特征及变化情况,采样过程中,充分考虑了煤层的层位及煤岩类型,所采 19 组煤储层岩样均是在矿井下新鲜工作面现场采得。样品的比表面积及孔结构参数测定在美国 Micromeritics ASAP 2000 自动等温吸附仪上进行,采用容量法在 77.4 K 以下氮(99.99%)为吸附介质,在相对压力(测试压力 P 与测试温度下汞饱和蒸气压力 P_0 之比)0.01 ~ 1 之间测定吸附等温线。测试孔径在 1 ~ 100 nm 之间。

3.2 测试结果

本次共测试 19 组煤样,其低温氮等温吸附实验测试主要参数及结果如表 3 所示。

表 3 煤的低温氮测试结果

煤 层	样 号	BET 比表面 /($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 总孔容 /($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 平均孔体积 /($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 累计比表面 /($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径 /nm	中值孔径 /nm
11-2	11XJ2	0.316	0.001 7	13.97	0.477	10.9	28.79
11-2	11XJ3	1.065	0.004 6	9.472	1.947	7.665	15.53
8	8XJ4	0.216	0.001 1	27.65	0.159	9.296	35.03
8	8XJ5	0.158	0.000 81	31.26	0.104	9.942	28.67
11-2	11XJ6	6.735	0.013 1	5.99	8.73	6.229	2.749
13-1	13XJ8	0.232	0.001 2	25.85	0.189	9.852	39.41
13-1	13XJ9	0.447	0.002 3	15.67	0.582	11.09	27.99
13-1	13XJ10	31.4	0.025 6	3.786	27.04	3.569	1.913
11-2	11XJ13	14.17	0.018 3	4.792	15.26	4.794	2.08
6-1	6XJ15	2.773	0.008 5	8.594	3.955	8.287	9.06
6-1	6XJ16	2.452	0.007 7	9.00	3.4	8.592	9.983
8	8XJ17	0.258	0.001 1	19.33	0.225	9.458	31.60
8	8XJ19	0.295	0.001 3	28.91	0.186	10.15	34.00
13-1	13XJ23	0.429	0.001 9	22.69	0.332	9.807	27.28
6-1	6XJ24	7.788	0.014 2	5.127	11.05	6.199	2.033
6-1	6XJ25	0.583	0.001 9	9.661	0.763	8.785	14.23
8	8XJ27	0.731	0.003 3	21.93	0.605	10.23	28.189
11-2	11XJ30	4.177	0.004 7	5.143	3.646	4.131	2.054
13-1	13XJ32	0.291	0.001 3	19.62	0.256	9.672	32.61

从表3中可看出,各煤层的 BET 比表面积为 $0.15 \sim 31.4 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $3.92 \text{ m}^2/\text{g}$, 其中 13-1 煤层 BET 比表面积为 $0.232 \sim 31.4 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $6.56 \text{ m}^2/\text{g}$; 11-2 煤层的 BET 比表面积为 $0.316 \sim 14.17 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $5.293 \text{ m}^2/\text{g}$; 8 煤层的 BET 比表面积为 $0.158 \sim 0.731 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $0.3316 \text{ m}^2/\text{g}$; 6 煤层的 BET 比表面积为 $0.583 \sim 7.788 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $3.399 \text{ m}^2/\text{g}$ 。区内煤层 BJH 总孔容 $0.00081 \sim$

$0.0256 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $0.006032 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中微孔占 $4.4\% \sim 88.4\%$, 平均 32.29% ; 小孔占 $9.9\% \sim 95.6\%$, 平均 54.79% ; 中孔占 $0\% \sim 38.4\%$, 平均 12.9% 。

3.3 煤样低温氮等温吸附类型

根据煤样的低温氮测试结果所得各煤层吸附曲线与孔径分布曲线如图6~图9所示。

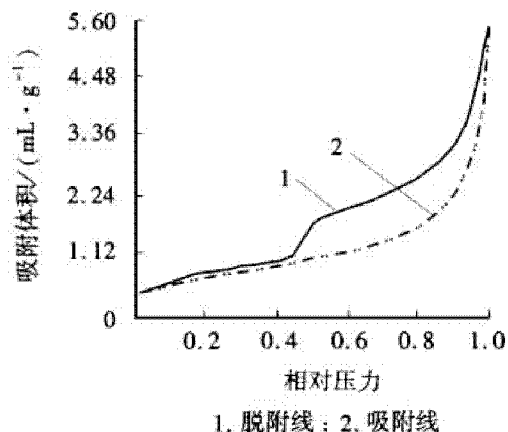


图6 6-1 煤层吸附曲线与孔径分布曲线

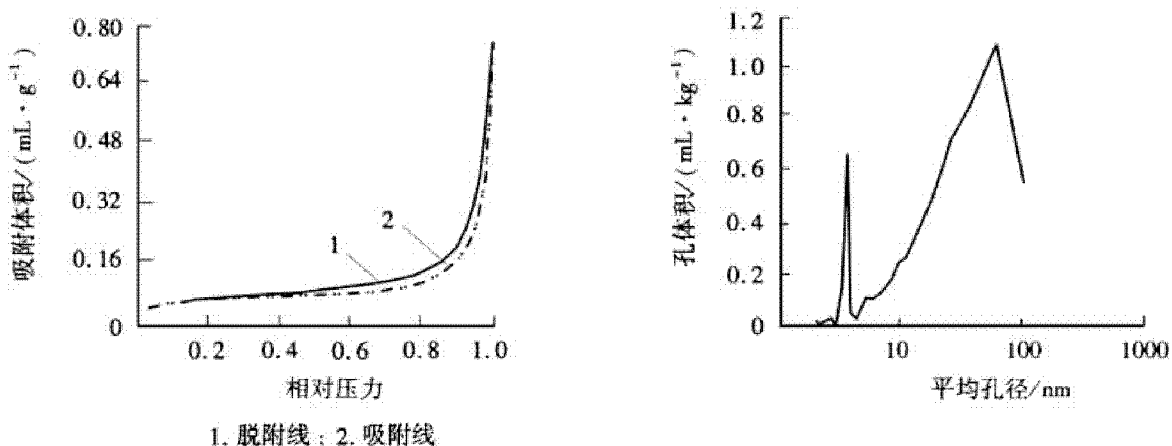


图7 8 煤层吸附曲线与孔径分布曲线

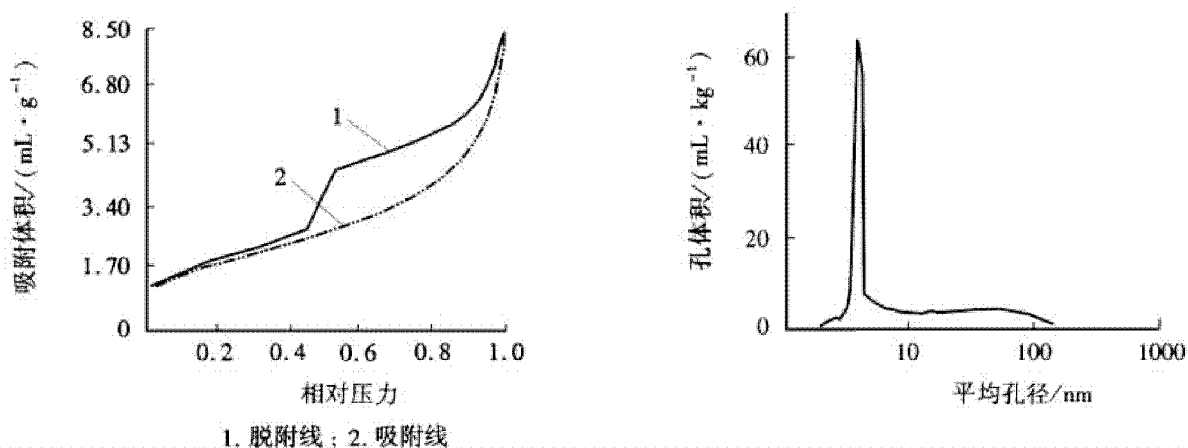


图8 11-2 煤层吸附曲线与孔径分布曲线

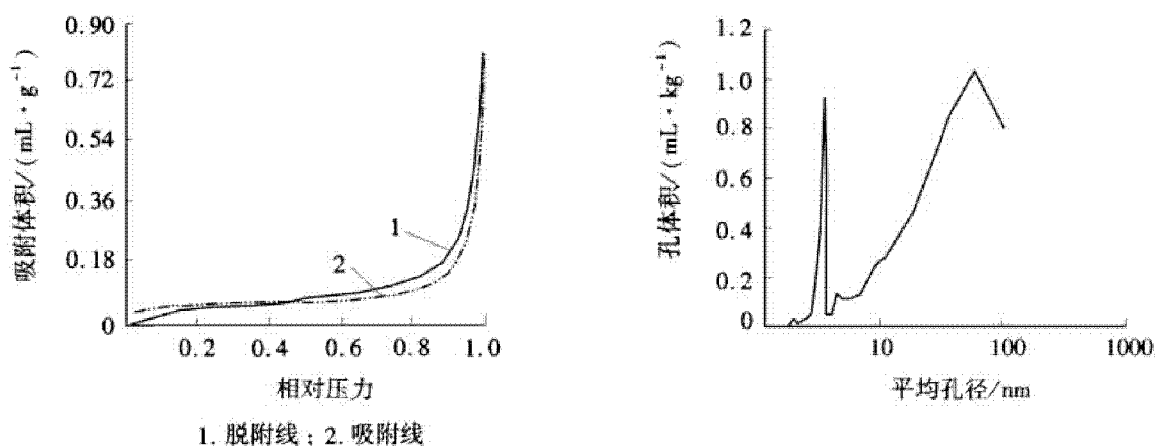


图9 13-1 煤层吸附曲线与孔径分布曲线

从吸附解吸曲线的变化特征可以反映孔隙形态类型^[6]。主采煤层低温氮等温吸附曲线类型主要有三种类型。

第一种类型: 吸附线上升缓慢, 脱附线在中间相对压力时急剧下降。属“墨水瓶”型孔发育(见图6);

第二种类型: 吸附线平缓上升, 只在压力接近 P_0 才迅速上升。而脱附线始终平缓下降, 并和脱附线相重合(见图7, 图9)。这类煤储层多发育一端尖灭的不平行的裂隙。

第三类类型: 吸附线平缓上升, 压力接近 P_0 时才变陡(见图8); 脱附线平缓下降, 在中间相对压力时才迅速下降, 属孔结构是平行板构成的狭缝毛细孔。11-2 煤层显微观测结果也表明煤层微裂隙相当发育。

4 结论

1) 新集一矿主采煤层视孔隙度在 4.1% ~ 22.5% 之间, 平均 10.21%, 两淮地区内相对较高。

2) 主采煤层孔隙结构总体以微孔-小孔为主, 大约占 79.5%, 中孔次之, 大孔很不发育。

3) 孔隙分布特征为中孔发育(如 11-2 煤层 11XJ3 号样和 6-1 煤层 6XJ15 号样) 为一种裂隙性为主的孔隙, 孔隙之间的连通较好, 有利于甲烷

的运移。

4) 孔隙分布特征为小孔最发育, 大孔较发育, 中孔少见为特征(如 8 煤层 8XJ5 号样) 和孔隙分布以小孔最发育为特征(如 13-1 煤层 13XJ10 号样) 主要为基质孔, 孔隙之间的连通差, 不利于瓦斯的抽排。

参考文献:

- [1] 姚艳斌, 刘大锰, 黄文辉, 等. 两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 163-168.
- [2] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 39-43.
- [3] 傅雪海, 秦勇. 多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 19-31.
- [4] 童宏树, 胡宝林. 鄂尔多斯盆地煤储层低温氮吸附孔隙分形特征研究[J]. 煤炭技术, 2004, 23(7): 1-3.
- [5] 赵志根, 唐修义. 低温氮吸附法测试煤中微孔隙及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2001(5): 28-30.
- [6] 陈萍, 唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 552-556.

(责任编辑: 何学华, 范 君)

岩石材料动态断裂韧性的实验研究

高远, 宫能平, 罗裕繁

(安徽理工大学应用力学研究所, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了研究岩石类材料的动态力学性能及动态破坏机理, 防止出现岩石爆裂造成灾难性破坏, 根据中心裂纹圆盘试件断裂韧性测试方法和分离式霍普金森压杆的基本原理, 在 SHPB 装置上测试了花岗岩的动态断裂韧性。对测试结果按照 SHPB 基本原理进行处理, 以试件两端平均载荷带入准静态公式得到动态断裂韧性。处理结果表明, 用试件两端平均载荷获得岩石动态断裂韧性的实验方法有效的; 花岗岩的动态断裂韧性具有加载速率相关性, 随着加载速率的增加断裂韧性增大。

关键词: 岩石力学; Hopkinson 压杆; 动态断裂

中图分类号: TU 45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0013-04

Experimental Study on Dynamic Fracture Toughness of Rock

GAO Yuan, GONG Neng - ping, LUO Yufan

(Institute of Applied Mechanics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to study dynamic mechanical properties and failure mechanism of rock materials, preventing catastrophic damage caused by rock burst, a new testing research for dynamic fracture toughness was carried out based on fracture toughness testing method on Central Cracked Circular Disk specimen and the principle of the Split Hopkinson Pressure Bar. The test data processing was in accordance with principle of SHPB, dynamic fracture toughness was calculated by using the average load in the specimen. Experimental results indicate that proposed dynamic fracture testing method for rock materials is effective. The dynamic fracture toughness is dependent on loading rate and its value increases with loading rate increase.

Key words: rock mechanics; Hopkinson pressure bar; fracture toughness

随着科技的发展, 动态载荷下裂纹的稳定性问题显得日趋重要, 关于材料动态断裂问题的理论和试验技术研究成为多年来学术界关注的热点。然而由于问题的复杂性, 至今都没有形成一个公认的、规范的裂纹动态起始判据, 对这个问题还需要进行大量的、长时间的研究。目前动态断裂韧性的测试和表征大多集中在金属材料, 而矿产资源的开发均涉及岩石类材料^[1], 岩石的稳定与破坏是岩石力学研究的两大问题。为了防止地下工程结构出现岩石爆裂造成的灾难性的破坏, 就必须了解岩

石类材料的动态力学性能并研究其动态破坏机理。

岩石本身是一种典型的含有缺陷的材料即内部含有大量裂隙, 所以岩石动态断裂研究是一个相当复杂的问题, 目前国内外许多学者已经展开基于霍普金森压杆试验装置(SHPB)的断裂韧性测试工作, 文献[2]利用巴西圆盘和短圆柱棒岩石试件研究不同试件形状之间应力强度因子之间的差别, 但其加载方式为准静态的; 文献[3-4]利用短圆柱试件先后研究大理岩断裂韧性的加载速率相关性和温度相关性; 文献[5]利用中心孔槽组合圆盘

收稿日期: 2011-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874004)

作者简介: 高远(1986-), 男, 江苏宿迁人, 在读硕士, 研究方向为材料动态力学分析。

和边切槽试件进行岩石断裂韧性方面研究,将试验得到的载荷历程带入 ANSYS 进行数值模拟,由起裂时间确定动态断裂韧性,不过这需要进行大量的后处理工作。

本文利用 SHPB 技术,对花岗岩试件实施冲击压缩试验,依据试验得到的试件两端平均载荷,推广准静态下中心裂纹圆盘试件应力强度因子 K 的计算公式,以平均载荷的最大值计算获得岩石的动态断裂韧度。

1 SHPB 试验原理

近些年来,随着实验技术的快速发展,Hopkinson 压杆用来测试材料在动态作用下的力学性能(见图 1),而且此项技术已被人们普遍接受,并广泛使用。

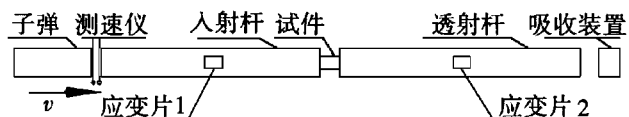


图 1 Hopkinson 压杆实验原理示意图

通过撞击杆对入射杆的撞击,产生一压缩方波脉冲,传至试件与入射杆交界面处,一部分在端面处反射回入射杆,一部分通过试件传入透射杆。入射波、反射波和透射波分别通过贴在入射杆和透射杆的电阻应变片记录,并经动态应变仪放大后送入瞬态波形存储器存储。

根据一维应力波理论^[6]由试件左端面的入射应变信号 $\varepsilon_i(t)$ 、反射应变信号 $\varepsilon_r(t)$ 和试件右端面的透射应变信号 $\varepsilon_t(t)$ 可以得到试件左端面和右端面的载荷 $P_L(t)$ 、 $P_R(t)$ 及位移 u_L 、 u_R 。

$$\text{即: } P_L(t) = EA[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \quad (1)$$

$$P_R(t) = EA\varepsilon_t(t) \quad (2)$$

$$\bar{P}(t) = \frac{P_L(t) + P_R(t)}{2} = \frac{EA}{2}[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

$$u_L = c_0 \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) + \varepsilon_r(\tau)] d\tau \quad (4)$$

$$u_R = c_0 \int_0^t \varepsilon_t(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中: E 为杆的弹性模量; A 为杆的横截面面积(两杆的材料和直径相同); $\bar{P}(t)$ 是试件的平均载荷; c_0 为杆中弹性波速。

2 岩石动态断裂韧性测试方法

2.1 实验设备

试验在安徽理工大学冲击动力学实验室的 Hopkinson 压杆系统上完成的,压杆直径 37 mm,试验设备及其参数如图 2 和表 1 所示。

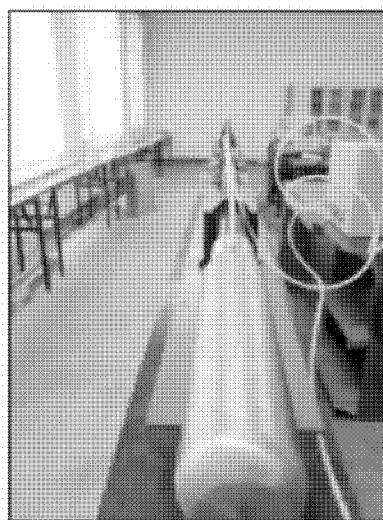


图 2 SHPB 试验设备

撞击杆长度 600 mm,直径 37 mm,由压缩空气驱动共轴撞击入射杆。因为岩石材料属于脆性材料,在高速冲击加载下破坏时间很短。为了滤去矩形入射波的高频振荡,同时延长入射波的脉冲上升沿时间,在入射杆端面贴有厚度 1 mm 塑料片作为波形整形器;为减少约束对试样内部应力分布影响,试验中采用拉紧入射杆和透射杆方法来夹紧试样;在试样和杆端面涂抹凡士林以减小摩擦效应对试验结果的影响。

表 1 SHPB 试验设备参数

杆直径	入射杆长度	透射杆长度	弹性模量	波速	密度	泊松比
/mm	/mm	/mm	/GPa	/(m·s ⁻¹)	/(kg·m ⁻³)	
37	2 000	2 000	70	5 100	2 700	0.3

2.2 试样制备

试件为黑色花岗岩,采自福建福鼎。试件材料质地细腻,颗粒均匀,结构较为致密。试件厚度为13 mm,直径50 mm,裂纹相对长度 $\alpha=0.5$ 。试件的中心裂纹由高压水射流加工而成,然后利用直径为0.26 mm的金刚石线手工制作裂尖。试件采用削边处理即在加载端面加工一平台,保证试件在加载过程中不会出现局部应力集中而影响试验结果(见图3~图4)。

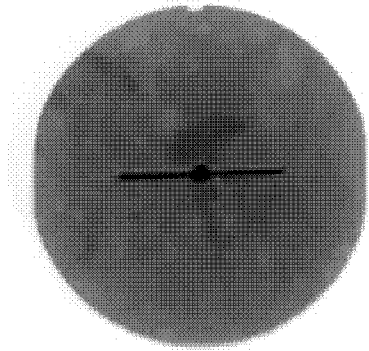


图3 花岗岩试件

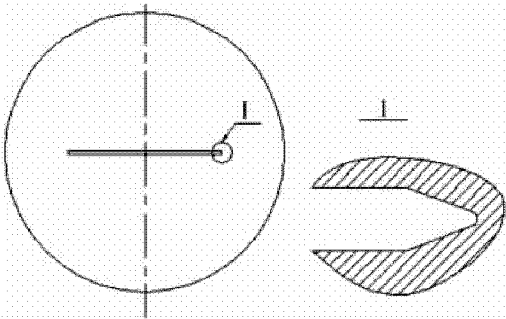


图4 尖槽式中心切口圆盘试件示意

3 试验结果与分析

根据断裂动力学基本原理^[7],动态断裂韧度在最大载荷处为其失稳点,即将试验得到试件两端载荷带入准静态公式计算动态断裂韧性。文献[8]曾推荐使用人字槽中心裂纹圆盘试件去测量岩石的I型断裂韧度,从而奠定了中心裂纹圆盘试件在岩石力学领域断裂参数测试方面的重要地位。但近些年来,中心裂纹圆盘在测试断裂参数时发生不少变化,为了保证中心起裂加载端部从集中力变为弧形分布力加载,考虑到裂纹宽度和尖端对动态断裂韧性影响较大,对裂缝采用细的金刚丝打磨裂尖,由此出现了直槽式圆盘试件和尖槽式圆盘

试件,因此在使用ISRM推荐的CCNBD试件的公式有些不妥。

文献[9-10]曾对PMMA这种典型的脆性材料成功的进行了多方面断裂试验,而且采用权函数法得到中心裂纹圆盘试件在集中力和分布载荷作用下应力强度因子的完整解,并对中心裂纹圆盘应力强度因子测试进行误差分析,给出了一套比较完整的中心裂纹圆盘断裂试验技术。本文试件为尖槽式圆盘试件采用其应力强度因子计算公式,将试验得到最大载荷代入公式求得断裂韧度。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F_I = \frac{P}{\pi B R} \sqrt{\pi a} F_I \quad (6)$$

式中: B 为试件厚度; R 为圆盘试件半径; a 为裂纹半长; F_I 为无量纲应力强度因子(其与裂纹相对长度和加载角 θ 及载荷分布角有关)。

本次试验一共有十二个试件,每三个试件为一组。对第一组试件施加气压为0.06 MPa,之后气压分别为0.1 MPa、0.25 MPa、0.5 MPa。

在实验过程中先进行空打,通过应变片所采集信号观察入射杆透射杆连接情况,判断系统是否满足试验要求。选择不同速率下对试件进行冲击,尽量拉开不同速率下动态断裂韧性,得到更多的可靠的数据。按照SHPB的基本原理,计算得到试件两端载荷,以平均值带入式(6)计算动态断裂韧性在0.06 MPa下试件的平均载荷(见图5)。

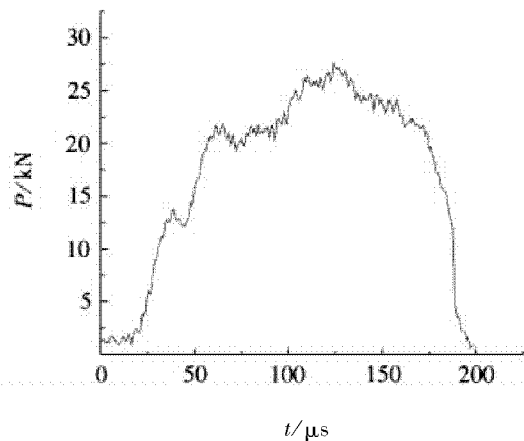


图5 试件平均载荷时间曲线

对该批试件从加载速率由低到高进行冲击试验,在0.06 MPa气压下,岩石试样沿冲击方向主要断裂为两半,在0.1 MPa气压下在试件与杆接触处有三角形区域的粉碎情况出现,在更高气压冲击下岩石断裂为四半甚至更多。虽然在试验过程中严格控制子弹位置和气压大小,但由于岩石本身结构不均匀内部存在大量裂隙以及试验系统本身

问题使得在相同气压下岩石破碎会有一定差异性。试验得到花岗岩断裂韧性在 $5 \sim 17 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ 之间, 在 $5 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1})$ 的加载速率范围内, 随着加载速率的增加, 岩石的断裂韧性也随之增加, 大致呈现线性增加趋势(见图6), 这与文献[11]、文献[12]所计算的动态断裂韧性一致。

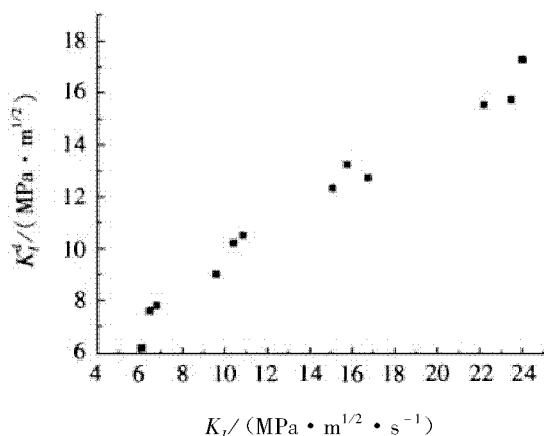


图6 动态断裂韧性和加载速率的关系

4 结论

在霍普金森压杆上对中心裂纹状黑色花岗岩试件进行动态压缩冲击加载, 以试件两端的平均载荷带入应力强度因子 k 计算公式, 计算动态断裂韧性。实验表明, 动态断裂韧性在 $5 \sim 17 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ 之间, 随着加载速率增加动态断裂韧性随之而增加, 但在增加过程中上升趋势明显减弱。由于岩石本身含有大量裂隙和微裂纹以及其它客观因素影响实验结果出现一定离散型, 这需要更多试验来进行研究。

参考文献:

- [1] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 176 - 198.
- [2] M J IQBAL, B MOHANTY. Experimental calibration of stress intensity factors of the ISRM suggested cracked chevron - notched Brazilian disk specimen used for determination of mode - I fracture toughness [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43: 1 270 - 1 276.
- [3] 张宗贤, 俞洁, 蒋根林. 高温状态下岩石动态断裂的试验研究[J]. 有色金属, 1999, 51 (1): 1 - 3.
- [4] Z X ZHANG, S Q KOU, L G JIANG. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37 (5): 745 - 762.
- [5] 张盛, 王启智. 采用中心圆孔裂缝平台巴西圆盘确定岩石的动态断裂韧性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (6): 723 - 728.
- [6] 王礼力. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 51 - 60.
- [7] 范天佑. 断裂动力学原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 570 - 609.
- [8] ISRM TESTING COMMISSION. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens [J]. Int J RockMech Min Sci Geomech Abstr, 1995, 32 (1): 57 - 64.
- [9] 董世明, 汪洋, 夏源明. 中心裂纹圆盘集中载荷作用下的应力强度因子[J]. 中国科学技术大学学报, 2003, 33 (3): 310 - 317.
- [10] ZHOU JUN, WANG YANG, XIA YUANMING. Mode I Fracture toughness of PMMA at high loading rates [J]. Journal of material Science, 2006, 41: 5 778 - 5 781.
- [11] CHEN R, XIA K, DAI F, et al. Determination of dynamic fracture parameters using a semi - circular bend technique in split Hopkinson bar testing [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76 (9): 1 268 - 1 276.
- [12] 满轲, 周鸿伟, 谢敬礼. 平台 CCNBD - SHPB 动态断裂韧性试验方法研究[J]. 金属矿山, 2010 (4): 6 - 9.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

复合铌酸盐的合成和光催化活性的研究

孙明明, 吴 正, 何 杰

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:利用光催化剂降解有机染料具有很好的应用前景, 光催化材料在光催化反应中起着重要的作用, 但是如何制备化学性质稳定、在可见光下具有高的催化活性的催化剂一直是人们探索的一个主题。以 Ag_2O 、 Nb_2O_5 、 Na_2CO_3 为前驱物, 经高温固相反应法合成了具有不同 Na/Ag 摩尔比的 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 复合铌酸盐。采用 X-射线粉末衍射(XRD)、紫外-可见漫反射谱(UV-vis DRS)等方法对样品的结构和光谱响应特征进行了表征, 以亚甲基蓝的降解反应为探针考察不同 Na/Ag 摩尔比的 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 复合铌酸盐在可见光下的光催化活性。结果表明, 由高温固相法合成出的复合铌酸盐的结构随着 Na/Ag 摩尔比的变化而变化, 光谱响应特征随 Na/Ag 摩尔比的减小逐渐红移, 而对亚甲基蓝的降解性能随 Na/Ag 呈规律性变化, 其中 $(\text{AgNbO}_3)_{0.6}(\text{NaNbO}_3)_{0.4}$ 复合铌酸盐呈现最好的光催化活性。

关键词: Ag_2O ; Nb_2O_5 ; 复合铌酸盐; 亚甲基蓝; 光催化降解

中图分类号: TQ426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0017-05

Preparation and Photocatalytic Activities of Niobate Composites

SUN Ming-ming, WU Zheng, HE Jie

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Photocatalytic degradation by using organic dye has good prospects. The photocatalytic material plays an important role in process of dye photocatalytic degradation, however it has been an interesting topic how to prepare photocatalytic materials with high chemical stability and excellent catalytic activity under visible light irradiation. The niobate composites $[(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x]$ were synthesized by a solid-state reaction method, and Ag_2O 、 Nb_2O_5 and Na_2CO_3 were used as precursors. The structure and spectral response characteristics were characterized by means of powder X-ray diffraction (XRD) and ultraviolet visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-vis DRS), and the photocatalytic activity of the niobate composites were evaluated by degradation reaction of methylene blue under natural light. The results showed that the structure of niobate composites change with different Na / Ag molar ratio, and the spectral response existed red shift with the decreases Na / Ag molar ratio, which led to photocatalytic activity to degradation of methylene blue vary with Na/Ag ratio. It was found that $(\text{AgNbO}_3)_{0.6}(\text{NaNbO}_3)_{0.4}$ niobate composite shows the highest photocatalytic activity to degradation of methylene blue.

Key words: Ag_2O ; Nb_2O_5 ; niobate composites; methylene blue; photocatalytic degradation

随着人们环保意识的不断增强和对自然能源(太阳能)的充分利用, 人们越来越关注可直接利

用自然光的一类可见光-光敏感催化剂。虽然, 可见光-光敏感催化剂已经被用来分解一些有机化

收稿日期: 2011-12-29

基金资助: 国家自然科学基金面上资助项目(21071004); 安徽省自然科学基金资助项目(11040606M38)

作者简介: 孙明明(1986-), 男, 安徽寿县人, 在读硕士, 研究方向为环境催化及其新材料的研究。

合物,例如 Pd/TiO_2 光催化剂和一些新型催化剂^[1-2]。但是,一类具有高活性的可见光-光敏感催化剂仍然是有必要开发的。

对于高活性的可见光-光敏感催化剂必须满足具有可见光吸收好和光诱发能量小这两个条件。根据文献[3-6],含有 Nb 元素和含有 Ag 元素的氧化物可满足这两点条件,如已报道 AgNbO_3 在可见光照射下,可从硝酸银溶液中分解出氧气,从甲醇水溶液中分解出氢气;用一系列金属对 NaNbO_3 进行了改性,结果发现 Ag/NaNbO_3 在分解甲酸产氢实验中,光催化活性最强。

在本研究中,选取了 AgNbO_3 作为研究对象以及 AgNbO_3 具有相同晶体结构的 NaNbO_3 复合,形成系列 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 复合铌酸盐,通过对其结构、光谱响应特征进行研究,进而研究它们对有机染料亚甲基蓝的光催化降解活性。

1 实验部分

1.1 催化剂的制备

采用固相法,按钠的含量 $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ 和 1.0 制备 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 复合铌酸盐^[7-8]。将 Ag_2O 、 Nb_2O_5 、 Na_2CO_3 按计量比混合,加入适量水调成糊状进行超声一定时间,393 K 干

燥 24 h,然后于 1 073 K 下焙烧 4 h,冷却后研磨,再在 1 173 K 下焙烧 10 h。

1.2 催化剂表征

样品的晶相结构测试在 XD-3 型(北京普析通用仪器有限责任公司)上进行。 Cu 靶, $K\alpha = 0.154\ 06\ \text{nm}$; Ni 滤波片;管压 36 kV;管流 30 mA。

紫外-可见漫反射光谱分析在 TU-1901 紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)上进行,样品用 BaSO_4 作参比。

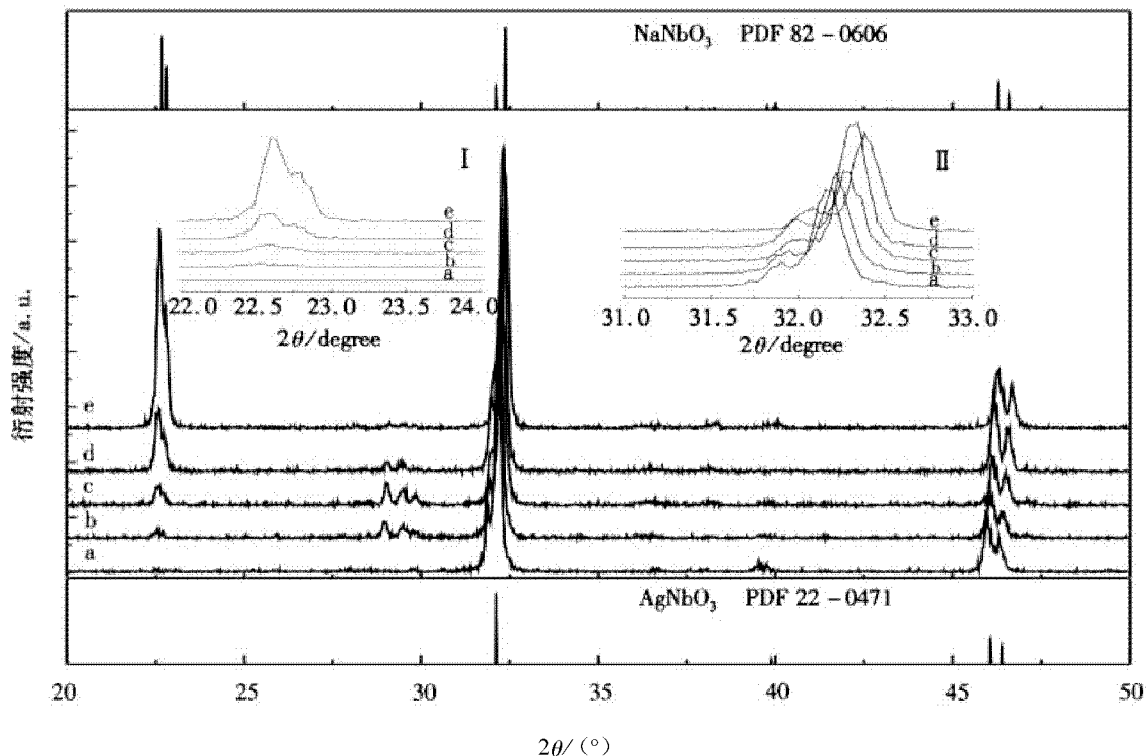
1.3 亚甲基蓝的降解

分别取复合铌酸盐样品 50 mg 加入 100 mL $0.012\ 4\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的亚甲基蓝(MB)水溶液中,在自然光的条件下进行搅拌,每隔一段时间取样分析。以相同体积和浓度的 MB 做空白对照实验。MB 浓度分析在 UV-2550 紫外-可见分光光度计(日本岛津)上进行的。

2 结果与讨论

2.1 X-射线粉末衍射(XRD)谱图分析

采用高温固相法合成的 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 样品的 XRD 衍射花样于图 1 所示。



x 的取值: a. 0.0; b. 0.2; c. 0.4; d. 0.6; e. 1.0

图 1 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 样品的 XRD 衍射花样

从图1可见,当 $x=0$ 时,样品于 $2\theta=32.2^\circ$, 45.98° 和 46.31° 出现衍射峰,分别属于单斜相 AgNbO_3 的(011), (002)和(112)晶面衍射峰(参照 x 射线标准数据库 PDF 22-0471)。当 $x=1.0$ 时,图1e显示,样品于 $2\theta=22.6^\circ$, 22.80° , 32.38° , 46.3° 和 46.68° 处出现衍射峰,分别归属于单斜相 NaNbO_3 的(001), (010), (011), (002)和(020)晶面衍射峰(参照 x 射线标准数据库 PDF 74-2438)。结果表明,在 $x=0$ 和 $x=1$ 时,所获得的样品分别为纯相 AgNbO_3 和 NaNbO_3 。

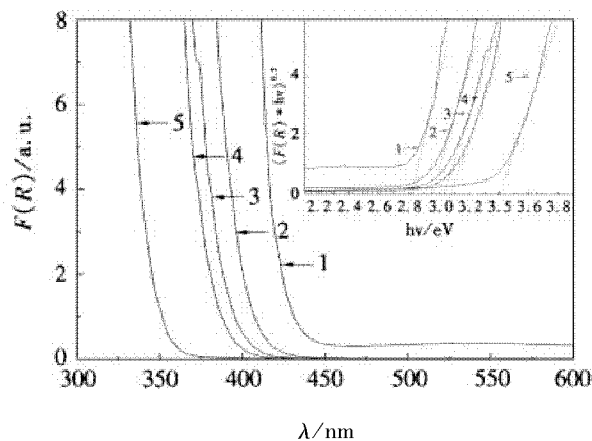
图1中I、II是 $2\theta=22^\circ\sim 24^\circ$ 和 $2\theta=31^\circ\sim 33^\circ$ 的XRD放大图,当 x 由0增加至1.0时,在 $2\theta=31.5^\circ\sim 33.0^\circ$ 之间的衍射峰位置向高角度连续移动,这是体系 NaNbO_3 的比例逐渐增加的结果,这种连续移动表明有固体溶液 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 的形成^[8];而体系在 $2\theta=22.67^\circ$ 显示的是 NaNbO_3 (001)晶面衍射峰,随着 x 的增加,此衍射峰强度不断增大,表明体系 NaNbO_3 含量不断增加。在当 x 在0.2至0.6之间, 2θ 在 29° 附近出现明显的三个衍射峰,这三个衍射峰分别位于 29.02° , 29.5° , 29.84° ,对应的 d 值为0.3076 nm, 0.3027 nm, 0.2993 nm,这些峰不能归属于 NaNbO_3 和 AgNbO_3 的特征峰,进一步检索发现, 29° 附近出现的衍射峰可归属于 $\text{Ag}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$ 这个物质(参照 x 射线标准数据库 PDF 21-1086)。分别对这三个峰进行了积分,结果显示: $x=0.4$ 的三个峰的峰面积和峰高度是最大的,这暗示着当 $x=0.4$ 时,样品中含有的 $\text{Ag}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$ 最多。

根据布拉格方程 $d=\lambda/2\sin\theta$,可计算得出沿(011)面晶面间距,随着体系Na含量的增加,沿(011)面的 2θ 在增大,晶面间距在减小。分析可知,Na的离子半径为0.118 nm,Ag的离子半径为0.128 nm,当体系中Na含量不断增多时,Na将会取代 AgNbO_3 晶格中Ag的位置,这样就会导致晶格收缩,使得沿(011)面的晶面间距在不断减小,Na元素的确取代了Ag元素在晶格里的位置,样品中已有固体溶液的生成。

2.2 紫外-可见漫反射光谱(UV-vis DRS)分析

NaNbO_3 和 AgNbO_3 均是良好的光催化剂^[9-10], NaNbO_3 只有在紫外光照射下才具有光催化活性,而 AgNbO_3 在可见光条件下就表现出良好

的光催化活性。为了研究二者复合样品对光谱的响应特征,实验考察了样品的在紫外与可见区域对光谱的吸收特征(见图2),将带隙能量对Na含量作图结果示于图3。



1. $x=0$; 2. $x=0.2$; 3. $x=0.4$; 4. $x=0.6$; 5. $x=1$
图2 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 紫外-可见漫反射光谱

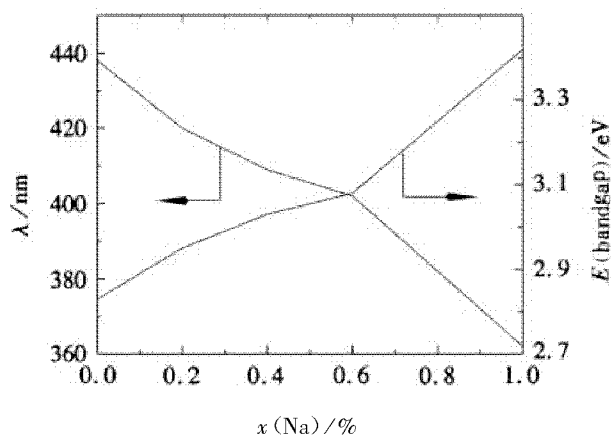


图3 钠的含量 x 与吸收边位置和禁带宽度能量关系图

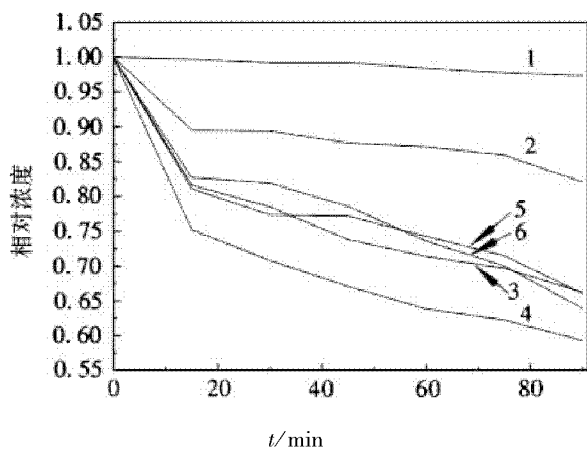
图2显示 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 紫外-可见漫反射光谱经K-M方程处理后的图谱,这里K-M方程定义为 $F(R)=(1-R)^2/2R$,右上方小图为 $(F(R)\times hv)^{0.5}$ 与光子能量 (hv) 的关系曲线图。从样品的吸收边位置看, $x=0$ 的样品即 AgNbO_3 的吸收边位于438 nm,当 $x=0.2, 0.4, 0.6$ 时,吸收边位置分别位于420 nm, 409 nm, 402 nm,而 $x=1$ 的样品即 NaNbO_3 的吸收边位置在362 nm,可以看出随着体系Na含量的增多,吸收边位置逐渐向低波长方向移动,即吸收蓝移。同时还可以看出, AgNbO_3 的带隙能量为2.83 eV, $(\text{AgNbO}_3)_{0.6}(\text{NaNbO}_3)_{0.4}$ 的带隙能量为3.03 eV, NaNbO_3 的带隙能量为3.42 eV,而 AgNbO_3 与 NaNbO_3 的带隙能量相差0.59 eV,它们随着Na含量的增加,能带能量在增

大。根据文献^{[4]7 236}, 知道 AgNbO_3 的价带顶端是由 Ag 的 4d 与 O 的 2p 的杂化轨道构成; 导带底端是由 Nb 的 5d 轨道构成。Ag 只对价带有所贡献, 而且 Ag 的 4d 轨道与 O 的 2p 轨道杂化后, 会提高价带的能量, 然而导带能量不变, 使得禁带宽度减小, 随着 Ag 被 Na 所取代, Ag 对价带的贡献减小, 价带能量降低, 禁带宽度增大, 这样就可以解释为什么随着 Na 含量的增加而样品对光谱响应出现蓝移的现象。

从图 3 中可以看出, 钠的含量 x 与吸收边位置和带隙能量的关系并非线性的, 随着 x 的增大, 吸收边位置和带隙能量变化缓慢; 从 XRD 分析知道, 样品中已经有固体溶液 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 的形成, 这样可推测, 这种缓慢的变化同样是固体溶液造成的。结合 XRD 和紫外分析结果, 得知这种固体溶液的形成对样品的结构和性质造成一定的影响, 而且这种影响是实验所需要的。

2.3 光催化活性结果分析

样品的光催化活性是通过 MB 水溶液的浓度随时间的变化来定量分析的 (见图 4)。



1. 无催化剂, 2. NaNbO_3 , 3. $(\text{AgNbO}_3)_{0.8}(\text{NaNbO}_3)_{0.2}$, 4. $(\text{AgNbO}_3)_{0.6}(\text{NaNbO}_3)_{0.4}$, 5. $(\text{AgNbO}_3)_{0.4}(\text{NaNbO}_3)_{0.6}$, 6. AgNbO_3

图 4 在自然光条件下, 不同样品对 MB 的降解

从图 4 可见, 在不同催化剂作用下, MB 的相对浓度 c_t/c_0 随时间的变化曲线。由图可知, 在自然光照射, 不加任何催化剂条件下, MB 基本不降解; NaNbO_3 在自然光照射条件下, 对 MB 具有一定的光催化降解能力, 但较低, 这是因为在自然光中含有少量的紫外光, 这部分紫外光激发 NaNbO_3 中

电子发生跃迁, 从而达到降解 MB 的作用; AgNbO_3 在自然光照射下, 对 MB 降解能力较强, 90 min 后的降解率可达到 36%; 随着 AgNbO_3 中的 Ag 被 Na 所取代, 样品的光催化活性基本不变化, 但是当 40% 的 Ag 被 Na 所取代后, 样品的光催化活性超过了 AgNbO_3 的光催化活性, 达到了最大值, 此后随着 Na 的进一步增加, 样品的光催化活性开始下降。这是因为在整个体系中, Na 和 Ag 起到协同作用来提高样品的光催化活性, 无论是 Na 含量的增多还是 Ag 含量的降低都会破坏 Na 和 Ag 的协同作用, 所以当 $x=0.4$ 时, 样品的光催化活性有个最大值。

对于选取的这几种光催化剂, 除了 NaNbO_3 紫外漫反射的吸收边在紫外区, 其他光催化剂的吸收边都在可见光区, 把催化剂加入 MB 水溶液中, 催化剂表面将提供活性位去吸附水分子和氢氧根离子, 当可见光照射时, $\text{OH}\cdot$ 和 $\text{HO}_2\cdot$ 基团通过诱发光生空穴的生成来驱动光降解反应, 这样最终导致 MB 的分解。

固体溶液 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 对有机物 MB 的降解作用主要取决于光催化氧化活性和吸附性这两个性能^[8]。从 XRD 和紫外分析结果可知, 当有固体溶液形成时, 样品的结构和性质都有所变化; 在图 4 中曲线 3、5、6 如此接近, 这说明 3、5、6 所代表的样品的光催化活性相近。而对于固体溶液 $(\text{AgNbO}_3)_{0.6}(\text{NaNbO}_3)_{0.4}$, 它对 MB 的降解率最大。把光催化实验结果结合 XRD 和紫外结果分析得知, 固体溶液的形成可有效地增大样品的光催化性能。

3 结论

用 Na 将 AgNbO_3 晶格中的 Ag 取代后得到的复合铌酸盐 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 在结构和性质上都产生了差异, 随着 Na/Ag 的增加, 复合铌酸盐对光谱的响应特征呈现蓝移, $x=0, 0.2, 0.4, 0.6$ 的 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 复合铌酸盐对亚甲基蓝的降解性能相似, 其中 $(\text{AgNbO}_3)_{0.6}(\text{NaNbO}_3)_{0.4}$ 的降解性能最好。在 $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ 复合铌酸盐中, 适当的增加 Na 的含量, 不仅没有影响催化剂的活性, 而且可以有效地减少合成催化剂所需的成本, 可见该系列复合催化剂有较好的光催化活性。

参考文献:

- [1] CHIH - CHIEH CHAN, CHUNG - CHIEH CHANG, WEN - CHIA HSU. Photocatalytic activities of Pd - loaded mesoporous TiO_2 thin films [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 152 (2 - 3): 492 - 497.
- [2] 余灯华, 廖世军, 江国东. 几种新型光催化剂及其研究进展 [J]. 工业催化, 2003, 6 (11): 48 - 52.
- [3] H KATO, H KOBAYASHI, A KUDO. Role of Ag^+ in the band structures and photocatalytic properties of Ag-MO_3 (M: Ta and Nb) with the perovskite structure [J]. Journal of Physics and Chemistry B, 2002, 106 (48): 12 441 - 12 447.
- [4] LI GUOQIANG, YANG NA, WANG WANLING. Band structure and photoelectrochemical behavior of AgNbO_3 - NaNbO_3 solid solution photoelectrodes [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55 (24): 7 235 - 7 239.
- [5] M KRUCZEK, E TALIK, A KANIA. Electronic structure of AgNbO_3 and NaNbO_3 studied by X - ray photoelectron spectroscopy [J]. Solid State Communications, 2006, 137 (9): 469 - 473.
- [6] B ZIELINSKA, E BOROWIAK - PALEN, R J KALENCZUK. Preparation, characterization and photocatalytic activity of metal - loaded NaNbO_3 [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2011, 72 (2): 117 - 123.
- [7] LI GUOQIANG. Photocatalytic properties of NaNbO_3 and $\text{Na}_{0.6}\text{Ag}_{0.4}\text{NbO}_3$ synthesized by polymerized complex method [J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 121 (1 - 2): 42 - 46.
- [8] LI GUOQIANG, TETSUYA KAKO, WANG DEFA. Composition dependence of the photophysical and photocatalytic properties of $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$ solid solution [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2007, 180 (10): 2 845 - 2 850.
- [9] SHI HAIFENG, LI XIUKAI, HIDEO IWAI. 2 - Propanol photodegradation over nitrogen - doped NaNbO_3 powders under visible - light irradiation [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2009, 70 (6): 931 - 935.
- [10] SHU HUOMING, XIE JIMING, LI HUAMING. Structural characterization and photocatalytic activity of $\text{NiO}/\text{AgNbO}_3$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 496 (1 - 2): 633 - 637.

(责任编辑:李 丽)

是“瓦斯”？是“沼气”？是“煤层气”？还是“甲烷”？

由于这一组名词在现实生活中运用得也很广，在全国科技名词委出版的《煤炭科学名词》中得以体现。

甲烷 (methane) 是单一气体化合物，是一个重要的化学词。凡是能够确定是专指甲烷的场合，就不要用“瓦斯”或“沼气”。

沼气 (marsh gas) 这个词在农村能源和生物化工行业，以至日常用语中使用很广泛。甲烷来源于沼气。沼气和甲烷不是同义词，甲烷是单一气体，沼气是混合气体。

瓦斯 (gas, firedamp) 一词来源于日本人用日文汉字瓦斯的发音来翻译很多西方文字中共有的 gas。可定义为：植物在成煤过程中生成的大量气体，又称煤层气 (见中国大百科全书矿冶卷)。

煤层气 (coalbed gas, coalbed methane)，是有机质在古代成煤过程中生成的天然气，以吸附、游离状态赋存于煤层及其围岩中。作为一种较洁净能源今后将会加大开发力度，这一名词使用已日益广泛。

一类具有激波层现象的二次 Dirichlet 问题

史娟荣¹, 刘树德²

(1. 安徽机电职业技术学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽师范大学数学计算机科学学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为了在较弱的条件下研究一类具有内激波层现象的二次 Dirichlet 问题, 用合成展开法构造出该问题的一阶渐近表达式, 并利用不动点定理证明了解的存在性及其当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时的渐近性质。在一定程度上, 它比起传统的微分不等式方法放宽了对所提问题的条件限制。

关键词: 激波层; 二次 Dirichlet; 合成展开法; 不动点定理

中图分类号: O175.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0022-04

The Quadratic Dirichlet Problem with Shock Layer Phenomena

SHI Juan-rong¹, LIU Shu-de²

(1. Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu Anhui 241000, China; 2. College of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu Anhui 241000, China)

Abstract: In order to study quadratic Dirichlet problem with interior shock layer phenomena under relatively weak conditions, this paper constructed a first order formal approximation of the problem using the composite expansions. And then the existence and asymptotic behavior as $\varepsilon \rightarrow 0$ of solutions are proved by virtue of the fixed point theorem. Compared to the traditional way of applying Differential Inequality, to some extent, it relaxes restrictions on conditions regarding the questions proposed.

Key words: Shock layer; quadratic Dirichlet problem; method of composite expansions; fixed point theorem

1 问题的提出

奇摄动边值问题的内层解性态因其在物理学、工程学和应用数学中的广泛应用背景而得到了国内外学术界的充分关注, 其中激波问题在流体力学、量子力学以及电磁学中都有大量的模型。文献[1]利用微分不等式理论讨论了二阶非线性微分方程边值问题的激波解的存在性定理和渐近性态, 文献[2]较详细地论述了关于激波解的基本理论。

近年来, 文献[3-7]也对几类非线性方程的激波解问题作了些研究。本文将进一步讨论如下形式的二次 Dirichlet 问题。

$$\varepsilon x'' = f(t)x'^2 + g(t, x), \quad 0 < t < 1 \quad (1)$$

$$x(0, \varepsilon) = A, \quad x(1, \varepsilon) = B \quad (2)$$

其中 $0 < \varepsilon \ll 1$, A, B 为给定的常数。相应的退化问题分别是

$$f(t)u'^2 + g(t, u) = 0, \quad u(0) = A \quad (3)$$

和 $f(t)u'^2 + g(t, u) = 0, \quad u(1) = B \quad (4)$

在 $t = t_0$ 是 $f(t)$ 的高阶转向点的情形下讨论问题式(1)和式(2), 分析在 $t = t_0$ 处存在激波解的条件, 并构造出在 $[0, 1]$ 上具有 $O(\sqrt{\varepsilon})$ 阶一致有效的渐近解。假设

$[H_1]$ 存在函数 $u_L(t) \in C^2[0, t_0]$, $u_R(t) \in C^2[t_0, 1]$ 分别满足退化问题式(3)和式(4), 使得

$$u_L(t_0) \neq u_R(t_0);$$

[H₂] $f(t) \in C^n[0, 1]$ ($n \geq 3$), 使 $f(t_0) = f'(t_0) = \dots = f^{(n-1)}(t_0) = 0$, 且 $f^{(n)}(t_0) \neq 0$, 即 $t = t_0$ 是 $f(t)$ 的 n 阶转向点; $g(t, x) \in C^1([0, 1] \times R)$ 。

2 形式渐近解的构造

将外部解 $U(t, \varepsilon) = \sum_{j=0}^{\infty} u_j(t) \varepsilon^j$ 代入式(1)和

$u(0, \varepsilon) = A$ 或 $(u(1, \varepsilon) = B)$, 可确定零次近似 $u_0 = u_L(t)$ 和 $u_0 = u_R(t)$, 它们分别是退化问题式(3)和式(4)的解。

因为 $u_L(t_0) \neq u_R(t_0)$, 需要在 $t = t_0$ 附近构造激波层校正项, $V(\xi, \varepsilon) = \sum_{j=0}^{\infty} v_j(\xi) \varepsilon^j$, 其中 $\xi = \frac{t - t_0}{\sqrt{\varepsilon}}$ 为伸展变量。

将 $U(t, \varepsilon) + V(\xi, \varepsilon)$ 代入式(2)得

$$\ddot{V} = \frac{2}{\sqrt{\varepsilon}} f(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0) U' \dot{V} + \frac{1}{\varepsilon} f(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0) \dot{V}^2 +$$

$$[g(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0, U + V) - g(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0, U)] \quad (5)$$

式(5)中 $f(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0)$ 可写为

$$f(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0) = \frac{f^{(n)}(\theta(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0))}{n!} (\xi \sqrt{\varepsilon} \xi \sqrt{\varepsilon} +$$

$$t_0)^n \quad (n \geq 3, 0 < \theta < 1)$$

将式(5)展开,

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{\infty} \ddot{v}_j(\xi) \varepsilon^j &= 2f(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0) \sum_{j=0}^{\infty} u'_j(t) \varepsilon^j \sum_{j=0}^{\infty} \dot{v}_j(\xi) \varepsilon^j + \\ f(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0) &(\sum_{j=0}^{\infty} \dot{v}_j(\xi) \varepsilon^j)^2 + [g(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0, \sum_{j=0}^{\infty} u_j(t) \varepsilon^j + \\ \sum_{j=0}^{\infty} v_j(\xi) \varepsilon^j) &- g(\xi \sqrt{\varepsilon} + t_0, \sum_{j=0}^{\infty} u_j(t) \varepsilon^j)] \end{aligned}$$

令其中 ε^0 的系数相等可得

$$\ddot{v}_0 = g(t_0, u_0(t_0) + v_0) - g(t_0, u(t_0)) \quad (6)$$

其中 $u_0(t_0) = u_L(t_0)$ (或 $u_R(t_0)$)。

当取 $u_0(t_0) = u_L(t_0)$ 时, 相应的 $v_L(\xi)$ 作为激波层在 $(-\infty, 0]$ 上的主要校正项应满足

$$\lim_{\xi \rightarrow -\infty} v_L(\xi) = 0, \lim_{\xi \rightarrow -\infty} \dot{v}_L(\xi) = 0$$

故从式(6)推出

$$\dot{v}_L^2 = 2F(v_L) \quad (7)$$

类似地, $v_R(\xi)$ ($\xi \in [0, +\infty)$) 满足

$$\lim_{\xi \rightarrow +\infty} v_R(\xi) = 0, \lim_{\xi \rightarrow +\infty} \dot{v}_R(\xi) = 0$$

从而有

$$\dot{v}_R^2 = 2G(v_R) \quad (8)$$

其中

$$F(v_L) = \int_{u_L(t_0)}^{u_L(t_0) + v_L} [g(t_0, z) - g(t_0, u_L(t_0))] dz,$$

$$G(v_R) = \int_{u_R(t_0)}^{u_R(t_0) + v_R} [g(t_0, z) - g(t_0, u_R(t_0))] dz.$$

下面讨论 $u_R(t_0) > u_L(t_0)$ 的情形 (另一情形下讨论是类似的)。仍由激波层校正项的性质可知此时 $\dot{v}_0(\xi) > 0$ ($v_0 = v_L$ 或 v_R), 故从式(7)和式(8)推出

$$F(v_L) > 0, G(v_R) > 0 \quad (9)$$

且 $v_L(\xi)$ 和 $v_R(\xi)$ 可分别隐式地表示为

$$\xi = \int_{v_L(0)}^{v_L} \frac{dw}{\sqrt{2F(w)}} \text{ 和 } \xi = \int_{v_R(0)}^{v_R} \frac{dw}{\sqrt{2G(w)}}$$

利用衔接法, 令

$$v_L(0) = \frac{1}{2} [u_R(t_0) - u_L(t_0)] = -v_R(0)$$

使 $\dot{v}_L(0^-) = \dot{v}_R(0^+)$, 就有

$$\int_{u_L(t_0)}^{u_R(t_0)} g(t_0, z) dz = \frac{1}{2} [u_R(t_0) - u_L(t_0)] [g(t_0, u_R(t_0)) - g(t_0, u_L(t_0))] \quad (10)$$

而式(9)可改写为

$$\int_{u_L(t_0)}^{u_L} [g(t_0, z) - g(t_0, u_L(t_0))] dz > 0 \quad (11)$$

及

$$\int_{u_R(t_0)}^{u_R} [g(t_0, z) - g(t_0, u_R(t_0))] dz > 0 \quad (12)$$

其中 $u_L(t_0) < w_L < s, s < w_R < u_R(t_0), s = \frac{1}{2} [u_L(t_0) + u_R(t_0)]$ 。

于是得到式(1)、式(2)的形式零次近似解

$$x_0(t, \varepsilon) = \begin{cases} u_L(t) + v_L\left(\frac{t}{\sqrt{\varepsilon}}\right), & 0 \leq t \leq t_0 \\ u_R(t) + v_R\left(\frac{t}{\sqrt{\varepsilon}}\right), & t_0 < t \leq 1 \end{cases}$$

3 余项估计及激波解的存在性

令

$$x(t, \varepsilon) = u_0(t) + v_0\left(\frac{t - t_0}{\sqrt{\varepsilon}}\right) + R(t, \varepsilon) \quad (13)$$

将式(13)代入式(1)、式(2)可得

$$\varepsilon^2 R + g(t_0, u_0(t_0) + v_0) - g(t_0, u_0(t_0) + v_0 + R) = O(\sqrt{\varepsilon}), R(0, \varepsilon) = 0, R(1, \varepsilon) = 0.$$

再令

$$\bar{R}(t, \varepsilon) = R(t, \varepsilon) - R(0, \varepsilon) - [R(1, \varepsilon) - R(0, \varepsilon)]\varphi(t)$$

其中 $\varphi(t) \in C^2[0, 1]$ 满足

$$\varphi(t) = 0, \quad 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2}$$

$$\varphi(t) = 1, \quad \frac{3}{4}(1 - t_0) \leq t \leq 1$$

就有

$$\varepsilon \bar{R} + g(t_0, u_0(t_0) + v_0) - g(t_0, u_0(t_0) + v_0 + \bar{R}) = O(\sqrt{\varepsilon}) \quad (14)$$

$$\bar{R}(0, \varepsilon) = \bar{R}(1, \varepsilon) = 0$$

引理^[8] (不动点定理) 设 $(N, \|\cdot\|_1)$ 是赋范线性空间, $(B, \|\cdot\|)$ 是 Banach 空间, F 是 N 到 B 的非线性映射, 且满足 $F[0] = 0, F[p] = L[p] + \Psi[p], \forall p \in N$, 其中 L 是 F 在 $p=0$ 的线性化, 算子 L 和 Ψ 满足如下两个条件:

1) L 是双射, 且其逆 L^{-1} 连续, 即存在常数 $c > 0$ 使 $\|L^{-1}[q]\|_1 \leq c \|q\|, \forall q \in B$;

2) 存在 $\bar{\rho} > 0$, 使当 $0 \leq \rho \leq \bar{\rho}$ 时, $\|\Psi[p_2] - \Psi[p_1]\| \leq m(\rho) \|p_2 - p_1\|_1, \forall p_1, p_2 \in \Omega_N(\rho)$, 其中 $\Omega_N(\rho) = \{p \mid p \in N, \|p\|_1 \leq \rho\}$, $m(\rho)$ 当 $\rho \rightarrow 0$ 时单调减少, 且 $\lim_{\rho \rightarrow 0} m(\rho) = 0$ 。

如果 $\rho_0 = \sup\{0 \leq \rho \leq \bar{\rho}, m(\rho) \leq \frac{1}{2c}\}$, 那么,

对满足 $\|\chi\| \leq \frac{\rho_0}{2c}$ 的任意 $\chi \in B$, 总存在 $p \in N$,

使得 $F[p] = \chi$, 且满足 $\|p\|_1 \leq 2c \|\chi\| \leq \rho_0$ 。

现在定义映射 $F: N \rightarrow B$ 如下

$$F[p] = \varepsilon \frac{d^2 p}{dt^2} + g(t_0, u_0(t_0) + v_0) - g(t_0, u_0(t_0) + v_0 + p)$$

其中 $N = \{p \mid p \in C^2[0, 1], p(0, \varepsilon) = p(1, \varepsilon) = 0\}$, $B = \{q \mid q \in C[0, 1]\}$, 其范数分别为

$$\|p\|_1 = \max_{0 \leq t \leq 1} |p| + \varepsilon \max_{0 \leq t \leq 1} \left| \frac{dp}{dt} \right| + \varepsilon^2 \max_{0 \leq t \leq 1} \left| \frac{d^2 p}{dt^2} \right|$$

$$\|q\| = \max_{0 \leq t \leq 1} |q|$$

则 B 是一个 Banach 空间, 而 N 是 Banach 空间的一个闭线性子空间, 故也是一个 Banach 空间。显然 $F[0] = 0$, 且 F 在 $p=0$ 的线性化为

$$L[p] = \varepsilon \frac{d^2 p}{dt^2} - g_x(t_0, u_0(t_0) + v_0)p$$

于是

$$\Psi[p] = F[p] - L[p] = g_x(t_0, u_0(t_0) + v_0)p + g(t_0, u_0(t_0) + v_0) - g(t_0, u_0(t_0) + v_0 + p)$$

检验引理中的两个条件。注意到 $L[p] = 0$ 的两个线性无关的解为^[9]

$$p_1(t, \varepsilon) = A(t, \varepsilon)$$

$$p_2(t, \varepsilon) = B(t, \varepsilon) \exp\left(-\frac{1}{\varepsilon} \int_0^t f(0, u_0(0) + v_0\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)) ds\right)$$

其中

$$A(t, \varepsilon) \sim \sum_{j=0}^{\infty} a_j(t) \varepsilon^j, \quad A(0, \varepsilon) = 1$$

$$B(t, \varepsilon) \sim \sum_{j=0}^{\infty} b_j(t) \varepsilon^j, \quad B(0, \varepsilon) = 1$$

由于

$$\begin{vmatrix} p_1(0, \varepsilon) & p_1(0, \varepsilon) \\ p_2(1, \varepsilon) & p_2(1, \varepsilon) \end{vmatrix} \neq 0$$

故对 $\forall q \in B$, 半齐次边值问题 $L[p] = q, p(0, \varepsilon) = p(1, \varepsilon) = 0$ 有唯一解。也就是说 L 是双射。又因为

$$\|L[p]\| = \max_{0 \leq t \leq 1} \left| \varepsilon \frac{d^2 p}{dt^2} - g_x(t_0, u_0(t_0) + v_0)p \right| \leq$$

$$M(\varepsilon \max_{0 \leq t \leq 1} \left| \frac{d^2 p}{dt^2} \right| + \max_{0 \leq t \leq 1} \left| \frac{dp}{dt} \right| + \max_{0 \leq t \leq 1} |p|) = M\|p\|_1$$

其中 $M = 1 + \max_{0 \leq t \leq 1} |g_x(t_0, u_0(t_0) + v_0)|$, 所以

L 是线性有界算子。根据逆算子定理, L^{-1} 存在, 且 L^{-1} 也是线性有界的。即存在常数 $c > 0$, 使

$$\|L^{-1}[q]\|_1 \leq c \|q\|, \quad \forall q \in B$$

条件 1 成立。

任取 $p_1, p_2 \in \Omega_N(\rho)$ ($0 < \rho < 1$), 有

$$\|\Psi[p_2] - \Psi[p_1]\| \leq \max_{0 \leq t \leq 1} |g_x(t_0, u_0(t_0) + v_0)p_2 - g_x(t_0, u_0(t_0) + v_0)p_1| + \max_{0 \leq t \leq 1} |g(t_0, u_0(t_0) + v_0 + p_1) - g(t_0, u_0(t_0) + v_0 + p_2)|$$

从而存在常数 $l > 0$, 使 $\|\Psi[p_2] - \Psi[p_1]\| \leq l\rho \|p_2 - p_1\|$, 即条件 2 也成立, 其中 $m(\rho) = l\rho$. 不难算出 $\rho_0 = \sup\{\rho \mid 0 \leq \rho \leq 1, m(\rho) \leq \frac{1}{2c}\} = \min\{1, \frac{1}{2lc}\}$.

由于式 (14) 的右边是 $O(\varepsilon)$, 故从引理推出, 对 $\forall \chi \in B: \|\chi\| = O(\varepsilon) \leq \frac{\rho_0}{2c}$, 存在 $\bar{R} \in N$, 使 $F[\bar{R}] = \chi$, 且 $\|\bar{R}\| \leq 2c \|\chi\| = O(\varepsilon)$.

$$\text{由于 } \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} x(t, \varepsilon) = \begin{cases} u_L(t), & a \leq t < t_0 \\ s, & t = t_0 \\ u_R(t), & t_0 < t \leq b \end{cases}$$

$$\text{且 } u_L(t_0) \neq u_R(t_0), s = \frac{1}{2}[u_L(t_0) + u_R(t_0)]$$

介于 $u_L(t_0)$ 与 $u_R(t_0)$ 之间, 故解 $x(t, \varepsilon)$ 在 $t = t_0$ 处呈激波层性态。

综合上述讨论, 得到如下定理

定理 在 $[H_1]$, $[H_2]$ 的假设下, 并假设 $u_R(0) > u_L(0)$, 且条件式 (10) 和式 (11), 式 (12) 成立。则存在充分小的正数 ε_0 , 使对每个 $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0$, 问题式 (1), 式 (2) 在区间 $[a, b]$ 上有一个解 $x(t, \varepsilon)$ 于 $t = t_0$ 处呈激波层性态, 且当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时在 $[a, b]$ 上一致地有

$$x(t, \varepsilon) = x_0(t, \varepsilon) + O(\sqrt{\varepsilon})$$

参考文献:

- [1] F A HOWES, SINGULAR. Perturbed nonlinear boundary value problems with turning points [M]. SLAM. J. Math. Anal. 1975:644 - 660.
- [2] NAYFEH A H. Introduction to perturbed techniques [M]. New York: John Wiley & Sons, 1981:365 - 375.
- [3] MO JIAQI, WANG HUI. The shock solution for quasilinear singularly perturbed Robin problem [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12 - 12:945 - 947.
- [4] MO JIAQI, ZHU JIANG, WANG HUI. Asymptotic behavior of the shock solution for a class of nonlinear equations [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13 - 10:768 - 770.
- [5] 莫嘉琪. 一类拟线性 Robin 问题的激波解 [J]. 数学物理学报, 2008, 28A (05):818 - 822.
- [6] LIU S D, XU H Q. A class of semilinear boundary value problems with nonmonotone interior layer behavior [J]. Math. Appl, 2009, 22 (3):631 - 636.
- [7] 史娟荣, 刘树德. 一类具有内激波层的奇摄动非线性问题 [J]. 安庆师范学院学报: 自然科学版, 2010, 16 (3):8 - 11.
- [8] 谢峰. 不动点原理在奇摄动问题中的应用 [D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2011.
- [9] Q MALLEY R E JR. Introduction to singular perturbations [M]. New York: Academic Press, 1974:10 - 17.

(责任编辑: 何学华)

土内撑开式伞形土锚的钢绞线连接实验研究

张 科, 夏红兵

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 针对用于土内撑开式伞形土锚的钢绞线的连接问题进行了实验研究。将钢绞线用两种不同的连接方式连接, 一种为卡子连接, 另一种为爆压管连接, 分别进行了拉伸破坏实验, 得到各自的最大抗拉力, 通过对比爆压管连接的最大抗拉力值大于卡子连接的最大抗拉力值, 从而得出采用爆压管连接要比卡子连接更为可靠的结果。

关键词: 土层锚杆; 钢绞线; 卡子连接; 爆压管连接

中图分类号: TU753 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0026-03

Experiment Research on Strand Connection of Inside - soil - opened Umbrella Type Soil Anchor

ZHANG Ke, XIA Hong - bing

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Experiment study on strand connection of inside - soil - opened umbrella soil anchor was carried out, in which the strands are connected by two different ways, one is by clamp, and the other is by pressure pipe. For each way, tensile failure experiment was done and the maximum tensile strength were examined. By comparing the maximum tensile strength of the two ways, it shows that connection by pressure pipe is more reliable than by clamp connection.

Key words: soil anchor; strand; clamp connection; pressure pipe connection

随着我国建设事业的发展, 锚索在锚固工程的应用越来越广泛, 比如基坑支护, 边坡加固, 结构抗浮, 大坝加固等等, 应用范围逐步扩大, 但在很多复杂的工程应用中传统的锚索已不能满足使用要求。除了传统的锚固结构形式外, 大量的新型锚固结构不断研制成功并得到应用^[1]。这些新的锚固结构在构造上大多有自己的特点, 从而产生许多锚固新工艺。

1 钢绞线连接的应用背景

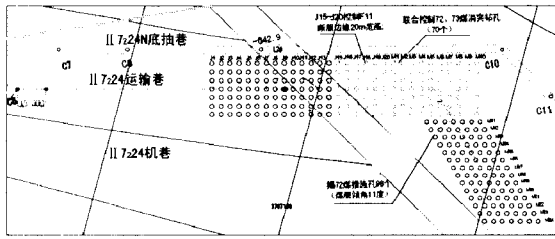
传统的土层锚索一般是通过注浆体与土体的摩擦力来提供抗拔力, 为提高抗拔力, 往往采取增加锚索长度, 加大钻孔直径, 高压注浆等手段来提高抗拔力, 通常存在着施工成本高, 施工工艺复杂, 无法立即承载等问题。针对以上问题, 工程人员进

行了大量研究, 制作出了很多新型的锚索, 其中扩大头锚索是一种应用较为成熟的锚索。文献[2-5]对扩大头锚索作了研究, 证明了扩大头锚索的优势。近年文献[6]提出了一种土层内撑开式伞形土锚并取得了发明专利, 该伞形土锚具有结构简单, 施工容易, 承载力高, 能立即承载等优点。

土层内撑开式伞形土锚锚头由两块锚板组成, 两块锚板上固定有钢绞线, 施工时, 两块锚板呈闭合状态, 由定向钻机顶进土层, 通过撑开装置将两块锚板撑开一定角度, 之后回拽钢绞线使锚板彻底张开。张开后的锚板有效面积大, 能提供很大的端阻力。

本文所研究的对象是土层内撑开式伞形土锚锚板上的钢绞线连接。每块锚板上各有两根钢绞线, 每根钢绞线折成“ σ ”形套在锚板上, 在“ σ ”形的重

叠处将钢绞线固定(见图1)。



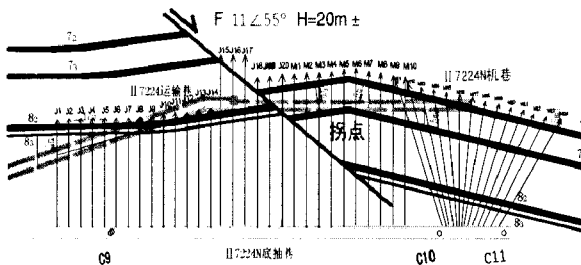
1. 锚板;2. 钢绞线;3. 连接接头

图1 固定在锚板上的钢绞线连接示意图

将钢绞线穿入锚板上的固定螺帽后折成“ σ ”形并连接牢固,并将两块锚板闭合呈合页状,之后用定向钻机将锚头顶入土层中的设计位置,用撑开装置将锚板张开一定角度后退出撑开装置,回拽钢绞线使两块锚板彻底张开,此时便可张拉钢绞线立即施加预紧力,从而起到锚固土层的作用。

2 钢绞线的连接方法与制作

伞形土锚钢绞线的这种“ σ ”形连接固定在工程上很少见,其连接方法也鲜有提出,它不同于日常生活中的普通的简单连接固定,这是因为其在施加预紧力的时候要承担很大的拉力作用,如何将其连接牢固并能承受很大的拉力是伞形土锚的关键工序之一,这是本文研究其连接方法的意义所在。为此作者提出了两种连接方法,一种为卡子连接,另一种为爆压管连接(见图2)。它们是将钢绞线通过卡子或爆压管挤压束缚在一起,使得钢绞线之间以及钢绞线与卡子和爆压管之间产生挤压,当施加拉力的时候,两根钢绞线便会发生相互错动的运动趋势,这时,钢绞线之间以及钢绞线与卡子和爆压管之间便会产生摩擦力。



1. 卡子;2. 钢绞线;3. 爆压管

图2 卡子连接与爆压管连接示意图

实验所用的钢绞线为 $\Phi 12.78 \text{ mm}$, 一根长度为 80 cm , 另一根长度为 60 cm , 搭接长度为 20 cm , 此外搭接处两头留有一定滑动长度。

1) 卡子连接。所用卡子俗称蛤蟆卡, 共用4个卡子, 均匀分布于钢绞线连接接头上。连接固定时, 卡子的上卡顺序为先中间后两端, 避免后上的卡子对先上的卡子的扰动。上卡时, 两个螺帽同时拧紧, 上完所有卡子后再逐一拧紧一次(见图3)。

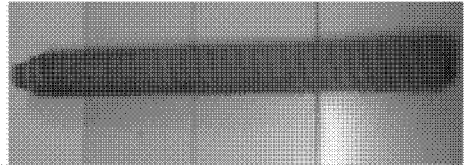


图3 卡子连接实物照片

2) 爆压管连接。爆压管长 20 cm , 先将两根钢绞线穿入管中, 然后用液压钳在接续管上间隔均匀地钳压8次, 钳压时, 先把油压阀门置于关闭状态, 然后反复下压手柄, 直至压紧(见图4)。

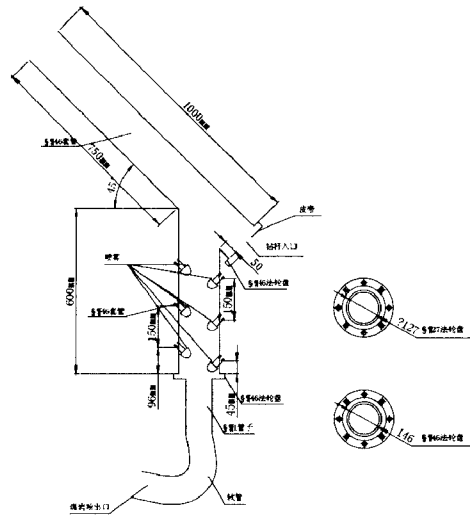
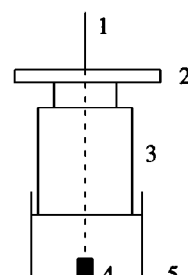


图4 爆压管连接实物照片

3 拉伸实验

为了测得每种连接方式的最大抗拉力, 作者设计制作了一套拉伸实验装置, 本实验用到的仪器设备有: 空心千斤顶, 支撑架, 数字油压表, 锚具, 液压钳, 爆压管, 卡子和钢绞线。实验时, 空心千斤顶放于支撑架上, 把连接固定好的钢绞线穿过空心千斤顶和支撑架, 两头用锚具固定, 然后施加拉力并记录油压表读数(见图5)。



每种连接方式做 6 次拉伸破坏实验,取 6 次试验的最大抗拉力的平均值作为该种连接方式的最大抗拉力。实验装置安装好后,把油压表读数清零,先缓慢施加拉力,以便夹片将钢绞线夹紧,之后匀速加压,记录油压表最大读数(见图 6)。

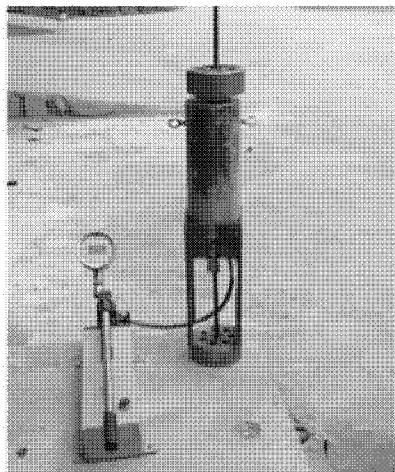


图 6 拉伸实验装置实物照片

实验过程中,时刻观察钢绞线有无滑动发生,一旦发生滑动,实验即刻终止,因为钢绞线发生滑动,失去固定作用。此时油压表的读数即为最大抗拉力所对应的最大油压。拉伸实验获得的数据如表 1 所示。

表 1 拉伸实验数据

连接方式	最大油压 /MPa	换算成拉力 /kN	拉力平均值 /kN
卡子	4.68	21.84	21.29
	4.63	21.61	
	4.38	20.44	
	4.56	21.28	
	4.3	20.07	
	4.82	22.49	
爆压管	9.53	44.47	44.88
	9.28	43.31	
	9.72	45.36	
	9.15	42.7	
	10.18	47.51	
	9.84	45.92	

由实验获得的数据可知,爆压管连接的最大抗拉力是卡子连接的最大抗拉力的 2.1 倍。这两种连接方式均是通过把两根钢绞线“束缚”在一起,依靠钢绞线的相互挤压产生的摩擦力和钢绞线与卡子或爆压管的摩擦力共同抵抗外拉力,钢绞线之间的摩擦力在两种连接方式均“压紧”的情况下可以认为相差不大,但爆压管连接的爆压管和钢绞线的接触面积要比卡子和钢绞线的接触面积大很多,故其抗拉力要比后者大很多。

4 结语

通过对比两种连接方式的拉伸实验,可知在相同连接长度下,爆压管连接要比卡子连接可靠,前者的抗拉力比后者大一倍多,满足土内撑开式伞形土锚的钢绞线连接使用要求。这种“ σ ”形的钢绞线连接是由土内撑开式伞形土锚的构造特点决定的,连接方法可以不限于本文所提及的两种,作者将继续探索和研究,以期得到更简易更牢固的连接方法。

参考文献:

- [1] 刘庆元. 自锁型预应力锚索的应用[J]. 铁道建筑, 2011(8): 72-75.
- [2] 陈浩华, 黄铭, 葛修润. 端头扩大型土锚的新发展——船锚式注浆张开型土锚[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 819-1 822.
- [3] 孙凯, 孙玥. 土体中扩大头压力型预应力锚索研究及工程应用[J]. 预应力技术, 2008(4): 27-31.
- [4] 张小平, 牛道纯, 张元平. 扩大头锚索技术在基坑支护工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2008(12): 27-29.
- [5] 梅国雄, 徐敏, 宋林辉, 等. 新型伞状抗拔锚现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 892-896.
- [6] 夏红兵, 徐颖, 姚直书, 等. 土层内撑开式伞形土锚锚头及其撑开工具: 中国, ZL2009 1 0116447.4 [P]. 2011-01-26.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

轻钢住宅结构体系的动力特性研究

刘菁华, 宗琦

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:通过轻钢结构的动力特性的研究,为今后轻钢住宅的结构设计提供参考。运用 ANSYS 有限元计算软件对多层(6层)和小高层(10层)国家标准 AAA 级住宅进行建模分析,在模型设计中分别采用纯框架结构、框架-支撑结构和框架-核心筒结构,通过模态分析、8度区多遇地震下的反应谱分析和 8 度区多遇、罕遇地震下的时程分析,得到三种结构体系的自振周期、各层质心位移、层间位移角、多遇和罕遇地震下节点位移时程曲线,经过比较分析,总结三种结构形式的动力特性。分析结果表明,纯框架结构适用于低多层和中低烈度的轻钢住宅。

关键词:轻钢住宅;框架结构;框架-支撑结构;框架-核心筒结构;动力特性

中图分类号:TU392.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)01-0029-06

Analysis of Dynamic Characteristics of Light Steel Structure Residential System

LIU Jing-hua, ZONG Qi

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Research on dynamic characteristics of light steel structure is to provide reference to designing of future light steel residence structure. By using finite element software ANSYS multi-storey (6 storeys) and small high-rise (10 storeys) residence of National Institute of Standards AAA-class was modeled and analyzed. In model design pure frame structure, frame-brace structure and frame-tube wall structure were adopted separately. By modal analysis, response spectrum analysis of earthquake frequently occurred in 8-degree intensity region and time history analysis of earthquake frequently or seldom occurred in 8-degree intensity region, self-vibration period, centroid displacement of each storey, drift angle between storeys and node displacement time-history curve in case of earthquake frequently occurred and rarely occurred for the 3 kinds of structure system were obtained. On the basis of comparative analysis dynamic characteristics of the three structure forms were summarized. The analysis showed that pure frame structure is suitable for low multi-storey light steel residence in region of middle or low-intensity earthquake.

Key words: light steel residence; frame structure; frame-brace structure; frame-tube structure; dynamic characteristics

轻钢结构一般指承受相对较小的外加荷载,采用较小的构件截面尺寸,结构自重较轻的钢结构。它是以经济型材构件,包括冷弯薄壁型钢、热轧或焊接 H 型钢、T 型钢、焊接或无缝钢管及其组合构

件作为结构的承重骨架,以压型钢板及其组合板材、PC 板、ALC 板及稻草板等质量轻、保温防火隔热性能好、防水效果佳的轻质材料作为围护结构的一种新型建筑结构体系^[1]。

相对于传统建筑,轻钢结构具有安全可靠、节能环保、建筑表现力强、经济适用等优势,有广阔的市场前景。轻钢住宅的结构体系主要有:纯钢框架体系,钢框架-支撑体系,钢框架-剪力墙体系,交错桁架体系,钢框架-核心筒体系等^[2]。目前,轻钢框架结构多用于低层,对它在静力荷载下的受力和变形性能以及抗震性能已有了一定的研究^[3-6]。据统计,多层住宅占城镇住宅总数的 80%,随着城市用地的紧张,小高层住宅在市场中占的比重也越来越大,所以对多层和小高层轻钢住宅动力特性的研究具有重要的理论和现实意义。本文运用有限元软件 ANSYS 分别对多层(6 层)和小高层(10 层)的纯框架结构、框架-支撑结构和框架-核心筒结构的动力性能进行比较分析,为今后轻钢住宅

的结构设计提供了参考。

1 计算模型

根据文献[7]的评定方法,在 AAA 级住宅套型(三室两厅两卫)的基础上稍作修改,使模型更规则,更利于梁柱的布置(见图 1)。轴线长 23 m,宽 10.2 m,结构层高 2.8 m,楼面恒载取 3.5 kN/m²,楼面活载取 2.0 kN/m²,屋面恒、活载取 0.5 kN/m²,现浇钢筋混凝土楼板,墙体为 ALC 板。基本风压取 0.45 kN/m²,地面粗糙程度为 B 类,8 度近震,Ⅲ类场地,设计地震分组为第一组,结构在多遇地震下的阻尼比取 3.5%,罕遇地震下的阻尼比取 5%。梁柱刚接,框架柱和基础刚接。框架柱采用方钢管,钢梁采用热轧 H 型钢。

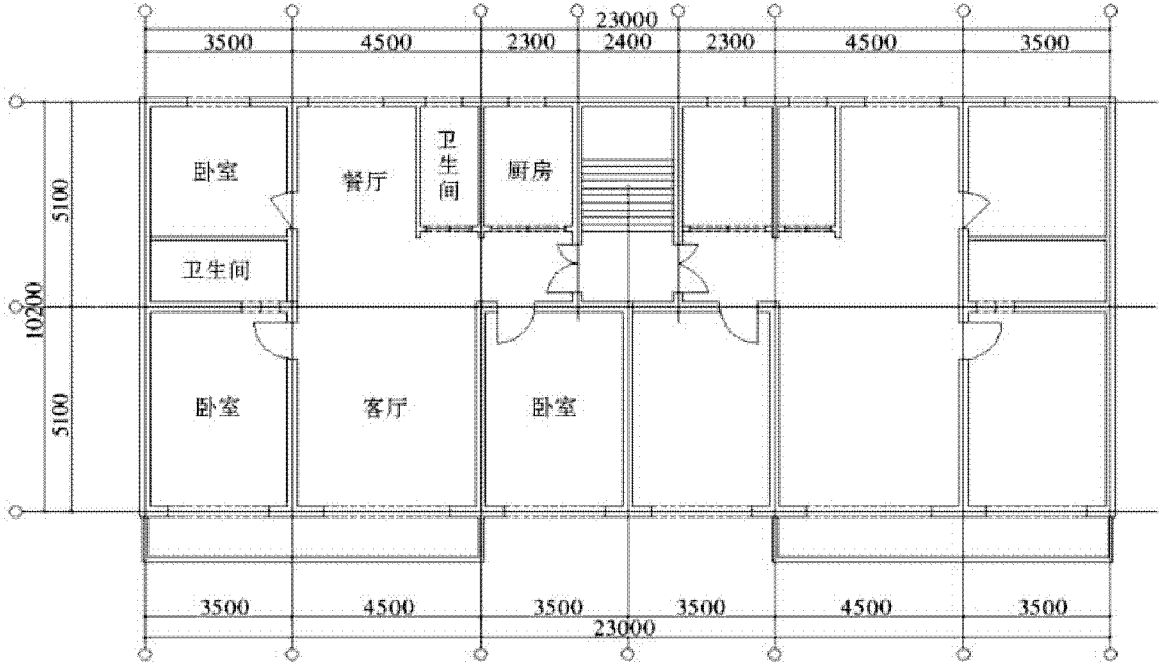


图 1 住宅结构平面图

6 层结构模型的梁、柱钢材型号为 Q235,随着楼层的增加,竖向荷载增大,梁、柱构件的截面和强度都需加大,所以 10 层结构模型的梁、柱构件需使

用 Q345 号钢材。6 层和 10 层纯框架体系、框架-支撑体系、框架-混凝土筒体体系的主要构件如表 1 所示。

表 1 构件截面表 mm

		纯框架结构	框架-支撑结构	框架-核心筒结构
6 层	柱	350 × 350 × 10	300 × 300 × 10	300 × 300 × 10
	主梁	H300 × 150 × 6 × 9	H300 × 150 × 6 × 9	H300 × 150 × 6 × 9
	次梁	H250 × 125 × 6 × 9	H250 × 125 × 6 × 9	H250 × 125 × 6 × 9
	支撑		120 × 120 × 4	120 × 120 × 4
10 层	柱	400 × 400 × 8	300 × 300 × 10	300 × 300 × 10
	主梁	H300 × 150 × 6 × 9	H300 × 150 × 6 × 9	H300 × 150 × 6 × 9
	次梁	H250 × 125 × 6 × 9	H250 × 125 × 6 × 9	H250 × 125 × 6 × 9
	支撑		200 × 200 × 7	200 × 200 × 7

3 计算方法和计算结果比较

在建模过程中,模型的梁、柱采用 Beam188 单元,楼板采用 Shell63 单元,支撑采用 Link10 单元,框架-支撑结构分别在山墙、分户墙和楼梯间处布置交叉支撑,6 层框架-核心筒结构的筒体布置在楼梯间处。小高层住宅需要增设电梯,所以 10 层框架-核心筒结构的筒体布置在楼梯间和电梯井处。建模完成后,运用 ANSYS 有限元软件对结构分别进

行模态分析、反应谱分析和时程分析。

3.1 模态分析

模态分析用来确定结构的固有频率和振型,本文所用的模态方法为子空间迭代法,即假设结构一定数目的特征向量 N ,通过迭代修正求出结构的近似前 N 阶向量,这个 N 维空间就是结构真实空间的子空间。将 ANSYS 模态分析算得的三种结构的自振频率换算成自振周期(见表 2)。

表 2 结构自振周期

	6 层			10 层		
	第一振型	第二振型	第三振型	第一振型	第二振型	第三振型
纯框架结构	1.198 横向平动	0.973 扭转	0.842 纵向平动	1.843 横向平动	1.617 扭转	1.564 纵向平动
框架-支撑结构	0.683 纵向平动	0.551 横向平动	0.396 扭转	1.137 纵向平动	0.982 横向平动	0.708 扭转
框架-核心筒结构	0.507 纵向平动	0.315 横向平动	0.247 扭转	0.691 纵向平动	0.405 扭转	0.296 横向平动

从表 2 可以看出,10 层轻钢结构的自振周期明显大于 6 层轻钢结构,纯框架结构的整体刚度小,自振周期偏长,框架-核心筒结构的整体刚度最大,自振周期最短,而框架-支撑结构的自振周期位于两者之间。由于纯框架结构的横向刚度较低,整个结构没有形成较好的抗扭能力,所以扭转出现在第二振型。框架-支撑结构在横向布置的支撑较多,结构的横向刚度和抗扭刚度较框架结构都有了提高,所以扭转退到了第三振型。10 层框架-核心筒结构的扭转出现在第二振型,这与筒体布置的位置有关,因此在设计上还需改进。总的来说,模态分析可以初步判断模型建立的准确性和有效性,也可以清楚地观察出三种结构的基本振型状况。

3.2 反应谱分析

在模态分析的基础上接着进行谱分析,它是一种将模态分析结果与一个已知的谱联系起来,然后计算模型的位移和应力的分析方法^[8]。本文采用 SPRS 法进行谱分析,即对基底各节点分别沿 X 、 Y 、 Z 方向输入地震加速度反应谱曲线来计算结构的地震响应。

根据模型条件 $T_g = 0.45$ s、 $\alpha_{\max} = 0.16$ 得到地

震响应系数方程

$$\begin{cases} \alpha = 1.08T + 0.072 & (0 < T \leq 0.1) \\ \alpha = 0.18 & (0.1 < T \leq 0.45) \\ \alpha = (0.45/T)^{0.922} \times 0.18 & (T > 0.45) \end{cases} \quad (1)$$

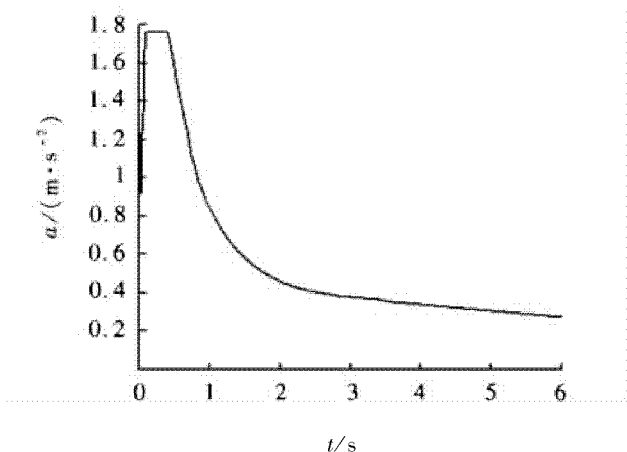


图 2 地震加速度反应谱曲线

将模态分析得到的结构自振周期 T 带入式 (1) 计算地震响应系数值,并得到地震加速度反应谱曲线(见图 2),在结构的 X 、 Y 向输入地震加速度反应谱曲线,然后进行求解。通过谱分析得到结构沿 X 、 Y 向的最大层位移和层间位移角(见表 3)。

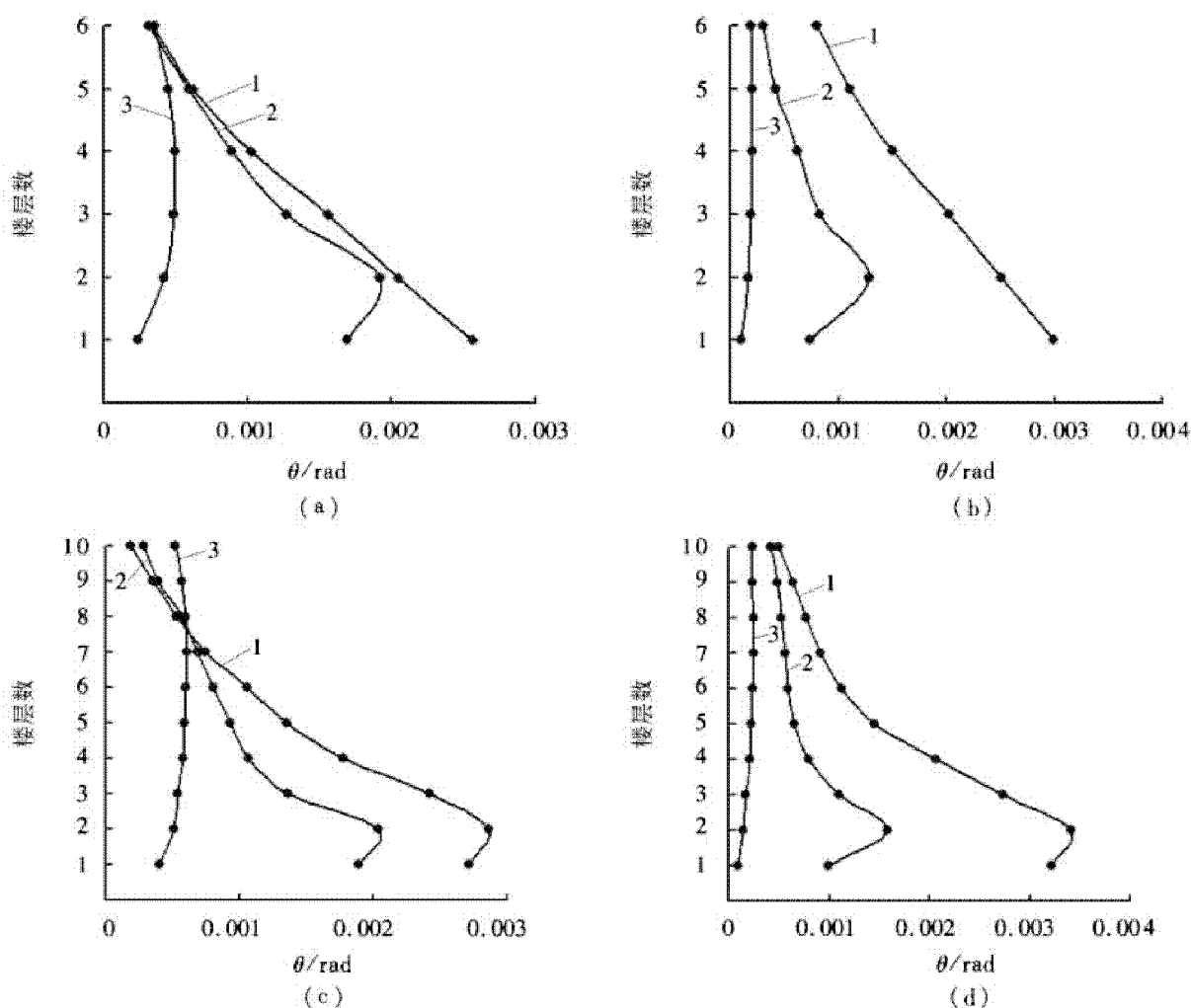
表3 结构最大层位移和层间位移角

	X向最大层位移/mm		Y向最大层位移/mm		X向最大层间位移角/rad		Y向最大层间位移角/rad	
	6层	10层	6层	10层	6层	10层	6层	10层
纯框架结构	22.86	39.48	30.67	48.45	1/389	1/349	1/333	1/289
框架-支撑结构	18.69	27.22	11.76	19.34	1/521	1/484	1/780	1/630
框架-核心筒结构	6.83	15.40	2.94	5.72	1/200 0	1/112 0	1/482 8	1/349 0

由表3可知,对6层结构进行反应谱分析得到,纯框架结构在地震作用下Y向的最大层间位移角为1/333,小于文献[9]规定的1/300,但富余不大;框架-支撑X向最大层间位移角1/521远远小于文献[9]规定的1/300;框架-核心筒结构是一种混合结构体系,它介于混凝土框架-核心筒结构和钢结构之间,所以它的层间侧移角限值不能简单地照搬有关规范对混凝土结构或者钢结构的规定,以剪力墙开裂为判别条件,混合结构在地震荷载下层间侧移角限值可以取1/500^[10],由表3看

出,框筒结构的层间位移角远大于限值。对10层结构进行反应谱分析可知,纯框架结构在水平地震作用下Y向的最大层间位移角1/289大于文献[9]规定的1/300,说明纯框架结构不适用于小高层轻钢住宅,框架-支撑结构和框架-核心筒结构的层间位移角均满足文献[9]的要求。

根据反应谱分析得出的结构层间位移角值,绘出6层和10层计算模型X、Y向层间位移角随高度变化的曲线(见图3)。



1. 纯框架结构;2. 框架-支撑结构;3. 框架-核心筒结构

图3 结构层间位移角

由图3可知,6层和10层轻钢结构在8度多遇地震下层间位移角随楼层的变化趋势基本相同。轻钢纯框架结构在X、Y向的最大层间位移角均发生在结构的底部,符合框架结构剪切型变形模式的情况,由于支撑的加入,框架-支撑结构的层间侧移角明显减小,且Y向的侧移角减少得更为厉害,所以对于Y向榑数较少的轻钢住宅,仅依靠钢框架来抵抗Y方向的侧移,效果不佳,为了满足设计的要求,可增设支撑、剪力墙等抗侧力的结构形式。框架-核心筒结构的层间侧移角最小,X向的最大层间侧移角只有框架结构的20%,Y向只有框架结构的7%,说明筒体大大提高了结构的抗侧刚度。

3.3 时程分析

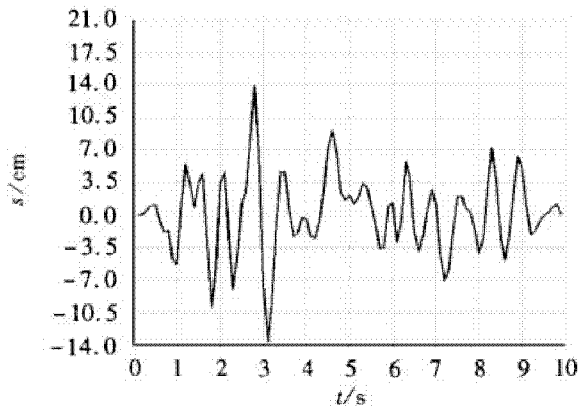
时程分析法又称为直接动力法,该法是根据选定的结构恢复力特性曲线和地震波,输入结构体系的振动方程,用逐步积分的方法对振动方程直接积分,得出结构在地震过程中每一瞬间的位移、速度和加速度反应。它与反应谱法不同的是,反应谱法基于弹性假设,只能分析最大地震反应,而时程分析法综合考虑了地震动强度、谱特性和持时三个要素,并且它考虑结构的弹塑性特性,所以时程分析

法又分为弹性和弹塑性时程分析。由于时间和篇幅的限值,只对结构X向进行8度罕遇地震下的弹塑性时程分析。地震波的选取是进行时程分析的关键,因为选取适合所建工程场地的抗震设防烈度的地震波可以使时程分析具有较强的针对性。所以这里选取具有代表性的El-Centro波,该波的时间间隔为0.01s,场地为Ⅲ类,特征周期为0.45s,加速度峰值为341.7Gal。选好地震波后,需要根据文献[9]的规定,对它的地震加速度持续时间和加速度幅值进行调整,其中持续时间的输入一般不小于结构基本周期的5~10倍,这里取El-Centro波的前10s,将原始的加速度幅值按式(2)进行调整,然后在计算中输入。

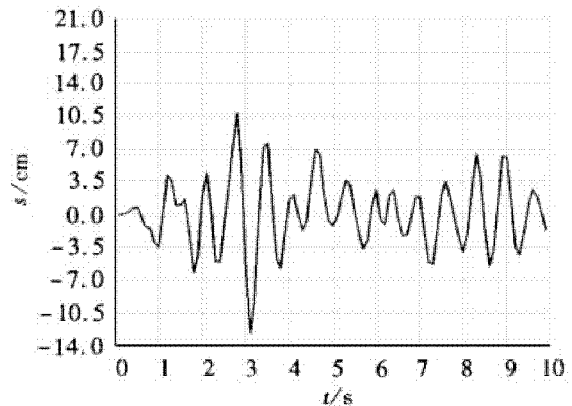
$$a_0(t_i) = \frac{a_{0,\max}}{a_m} a(t_i) = \frac{400}{341.7} a(t_i) = 1.1706 a(t_i) \quad (2)$$

式中: $a_{0,\max}$ 为规范要求设计所需最大加速度,查规范可得,结构在8度罕遇地震下加速度时程曲线最大值为400Gal; a_m 为所选地震记录的最大加速度; t_i 为实际地震加速度时间坐标点。

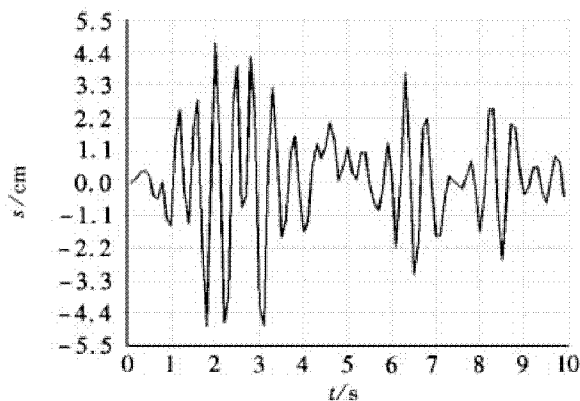
通过弹塑性时程分析得到在8度罕遇地震下结构顶层节点的位移时程曲线如图4所示。



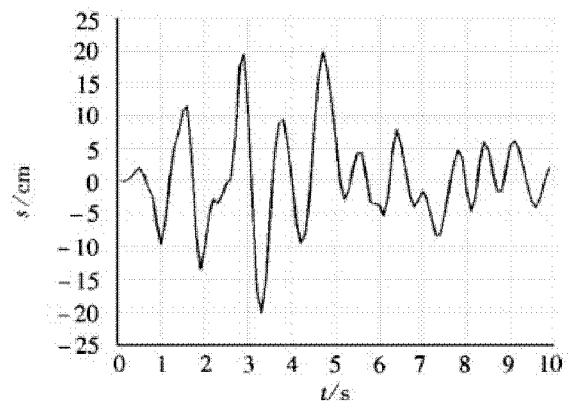
(a) 6层纯框架结构



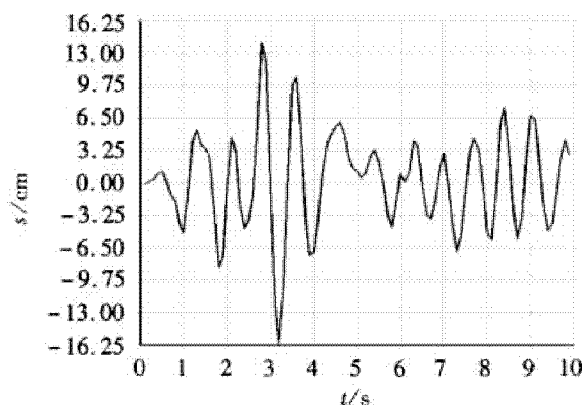
(b) 6层框架-支撑结构



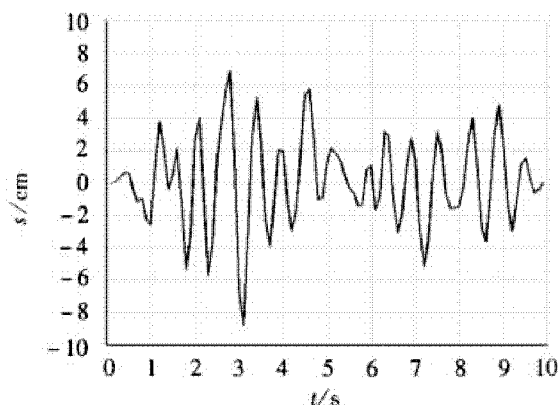
(c) 6层框架-核心筒结构



(d) 10层纯框架结构



(e) 10层框架-支撑结构



(f) 10层框架-核心筒结构

图4 8度罕遇地震下结构顶层节点位移时程曲线

从图4可见,6层纯框架结构顶层节点X向最大层间位移角为1/68,超过了文献[11]规定的1/70,但没有超过文献[9]规定的1/50,说明制定符合轻钢结构设计的规范是有必要的;10层纯框架结构X向最大层间位移角为1/57,超过了文献[11]规定的1/70,说明框架结构不适用于高烈度的轻钢住宅。6层和10层框架-支撑结构X向最大层间位移角分别1/92和1/86,6层和10层框架-核心筒结构X向最大层间位移角分别1/196和1/164,均能满足文献[9]和文献[11]的规定。

4 结论

纯框架结构的抗侧移能力在三种结构中最弱的,对于小高层轻钢框架结构,在地震作用下层间位移角超过限值。但这种结构不易受建筑布局的影响,空间布置比较灵活,在住宅产业中得房率很高,所以结合各方面的条件可知纯框架结构适用于低多层(6层及6层以下)和中低烈度(8度及8度以下)的轻钢住宅。

框架-支撑结构在多高层和中高烈度住宅中的表现鉴于其它两者之间,由于设置了支撑,结构具有良好的耗能能力,抗侧移能力也较纯框架结构有所提高。支撑的布置很重要,既要考虑支撑的形式和布置位置对结构的动力性能的影响,也要考虑户型设计的人性化。如本文的算例,在模型的楼梯间处布置了交叉支撑,而在实际生活中考虑到开户门的设置,楼梯间处应布置偏心支撑。所以在对该结构的轻钢住宅设计时,应首先找到经济性和受力性最为合理的布置形式,以此来设计户型,开发出受大家欢迎的楼盘。框架-支撑结构适合多高层和中高烈度的轻钢住宅。

框架-核心筒结构在多高层和高烈度住宅中的抗震性能最佳,当核心筒的剪力墙高宽比大于4时才体现出一定的耗能性,所以这种结构在多层中的使用效果不如高层。从抗震性和经济性的角度可知框架-核心筒结构更适合高层和高烈度的轻钢住宅。

参考文献:

- [1] 宫铁军. 延长住宅寿命成就“百年建筑”[J]. 21世纪建筑材料, 2011, 9(4): 55-56.
- [2] 黄俊, 戴绍斌, 唐峰. 多层轻钢结构住宅结构体系分析[J]. 国外建材科技, 2004, 25(1): 76-77.
- [3] 叶烈平. 土木工程科学前沿[M]. 北京: 清华大学, 2006: 27-115.
- [4] 黄怡, 王元清, 陈宏, 等. 多层轻钢框架结构的抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(12): 73-75.
- [5] 王飞, 罗永峰, 徐长征. 某轻型钢框架抗震性能分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 109-118.
- [6] 黄炳生, 舒赣平, 吕志涛. 多层轻钢框架的地震时程分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(8): 5-7.
- [7] 建设部住宅产业化促进中心. GB/T 50362-2005 住宅性能评定技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 徐鹤山. ANSYS 建筑钢结构工程实例分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 287-332.
- [9] 中国建筑科学研究院. GB 50011——2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 丁翔. 高层建筑钢——混凝土混合结构弹塑性地震反应的耦合分析[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [11] 中国建筑技术研究院. JGJ 99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

涡北煤矿地温分布规律及其影响因素分析

张 帅¹, 田道春², 刘文中¹

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 淮北矿业集团涡北煤矿, 安徽 涡阳 233600)

摘 要: 涡北煤矿存在地热异常现象, 测温孔地温梯度高达 $3.33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。为揭示矿区地温场特征, 根据测温孔资料和矿山生产地质资料对主采煤层 82 煤底板温度与埋藏深度之间关系及地温梯度等值线分布特征进行研究。结果表明: F_{26} , F_{22} 断层对地温分布控制作用明显, 该区地温异常的原因是深循环地下水上升引起局部地温增高。

关键词: 地热异常; 分布特征; 影响因素

中图分类号: P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0035-04

Geotherm Distribution in Guobei Coal Mine and Its Influencing Factors

ZHANG Shuai¹, TIAN Dao-chun², LIU Wen-zhong¹

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Guobei Coal Mine, Huaibei Mining Group Co. Ltd., Guoyang Anhui 233600, China)

Abstract: Abnormal geotherm exists in Guobei Coal Mine and the highest gradient of temperature in borehole is $3.33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$. In order to reveal characteristics of ground temperature field, based on geo-temperature measured in boreholes and geological data, relationship between temperature in the floor of major mining coal-bed 82 and the coal bed occurrence depth, and the distribution of geothermal gradient contour were studied. The results show that the faults F_{26} and F_{22} play an important role in control of geotherm distribution. The reason of abnormal geotherm is that in the area deep cyclic groundwater elevation results in local high geotherm.

Key words: abnormal geotherm; distribution characteristics; influencing factors

随着浅部煤炭资源日益减少, 深部开采已成为一种趋势, 而热害是矿井向深部发展不可避免的。在我国预测的煤炭储量中, 超过 1 000 m 的煤炭资源储量占总的 73.2%, 按平均地温梯度 $0.035\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 计算, 千米深井围岩地温将达到 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上^[1], 地温已经成为煤矿生产建设中一个亟待解决的问题, 受到学者的普遍关注^[2-3]。关于地温场特征及其影响因素方面, 文献[4]对任楼煤矿 38 个测温孔资料进行分析, 并在此基础上分析了地温特征, 建立了地温方程; 文献[5]认为新郑矿区异常高热流值、高地温梯度是构造和地下水综合作用的结果; 文献[6]绘制了淮北煤田宿临矿区地温-深度关系图、地温梯度-深度关系图以及不同构造单元

的地温分布图, 分析了宿临矿区地温场的分布特征及其影响因素; 文献[7]分析了淮南矿区地温变化规律及引起地温异常影响因素; 文献[8]对刘庄井田的地温状况分布规律进行了研究和总结, 分析了引起地热异常的地质因素。

随着开发建设速度的加快, 涡北井田已经存在矿山热害, 但其地热研究程度较低, 在以往的地质勘探过程中, 地温只作为钻孔常规的测试项目提供了测试结果, 有必要对该井田地温的变化规律及其影响因素进行分析研究。结合前人研究成果, 通过对涡北矿井地温状况的研究, 找出本区地温分布规律, 分析引起高温的地质因素, 为下一步矿井安全生产过程中采取经济、合理的降温措施提供依据。

1 井田概况

涡北煤矿位于淮北煤田涡阳矿区的东北部,南起 F_9 断层,北至刘楼断层;东起太原组第一层灰岩顶界面的隐伏露头线,西止于 3_2 煤层 -1 000 m 水

平等高线的地面投影线。

矿井总体构造形态为一走向近南北,遭受断层切割了的,向西倾斜的单斜构造,褶曲不发育,在局部见有宽缓波状起伏,断裂构造较为发育(见图 1)。

2 井田地温状况

勘探期间共有 29 个钻孔进行了测温,其中近似稳态 3 个,简易测温 26 个。其中地温梯度大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 有 6 个测温孔,根据该区的恒温带深度和温度值(30 m, $16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$),计算出各孔的平均地热梯度值为 $1.88\sim 3.33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,全区平均地温梯度值为 $2.75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,为正常地温梯度区,增温率为 $36.4\text{ m}/^{\circ}\text{C}$ 。

为了检验地面钻孔井温测量的可靠性,涡北矿实施了巷道井温测量,井下测温孔在不同标高(-600 ~ -840 m)不同巷道(3 处)布置测温孔 9 个(见表 1)。巷道井温测量 9 个孔平均地温梯度为 $2.75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,与地面测温孔平均地温梯度 $2.75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 相等,所以地面钻孔井温测量是可靠的。

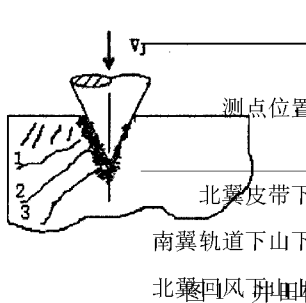


表 1 涡北煤矿井下测温情况汇总表									
1				2					
标高/m	深度/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	地温梯度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1})$	标高/m	深度/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	地温梯度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1})$	标高/m	深度/m
-640	670.5	32.43	2.44	-640	670.5	32.97			
-840	871	41.70	2.96	-840	871	41.50			
-600	630.5	33.48	2.78	-600	630.5	33.55			

注:恒温带温度为 $16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;恒温带深度为 30 m

表 2 涡北矿 8_2 煤底板钻孔测温结果统计表

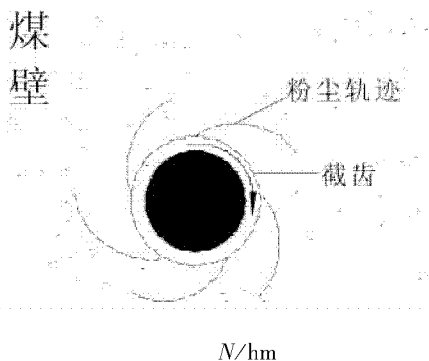
孔号	1-3	2-3	2-4	3-3	4-5	8-3	8-4	8-8	8-9
标高/m	-781.12	-789.09	-454.14	-806.18	-749.80	-606.08	-739.68	-396.94	-878.71
温度/ $^{\circ}\text{C}$	38.74	37.69	29.91	37.20	35.74	33.96	37.94	29.53	43.93

3 地温分布规律及其影响因素

3.1 地温分布规律

在纵向上,温度随深度的增加而增加,且呈现良好的线性趋势。主采煤层 8_2 底板温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 与埋藏深度 $H(\text{m})$ 成正比关系,且相关性较好(见表 2,图 2)。

(见图 3)。在 F_{26} 以北,地温向着刘楼和 F_{26} 断层附近逐渐增高;在 F_{26} 以南,地温分布主要受 F_{22} 断层



$$T = -0.026H + 17.85; R^2 = 0.916$$

图 2 涡北矿 8_2 煤底板标高与温度值相关性

在平面分布上,地温分布主要受断层构造控制

控制,地温梯度由西向东逐渐增大,从图3上可以看出,地温梯度大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 的钻孔大都集中在 F_{22} 断层附近。

3.2 地温分布的影响因素

3.2.1 煤系地层与松散层对地温的影响 湖北煤矿属于石炭一二叠系煤田,煤系地层岩性主要为粉

砂岩、砂质泥岩、泥岩、砂岩及煤层等,岩石导热率低,不利于热传导,表现出地温的正异常。另外,煤系地层上覆有较厚(400~420m)的第四系松散层,由于新生代盖层导热性能差,阻碍了深部上导的热流向大气散发而积聚在煤系地层内,致使井田内地温变高。

3.2.2 断裂构造对地温的影响

张性和张扭性断裂是地下水和地下热水运移的良好通道。它既可以使表层和上部凉水不断地渗透到地下深层,使原始地温降低,也可以使地下深处的热水或断层生成的热,源源不断地输送到上部,使原始地温增高。压性或压扭性断裂,结构面两侧岩石挤压强裂,结构致密,地下水在垂直断面的方向上不易渗透流过。当地下水在深部向排泄区水平迳流时,遇到隔水的压性断裂,就造成了地下水的富集,而改变了迳流条件,地下热水就沿着压性结构面的相对开启部分或派生的张性羽状断裂向上运移,因而改变了原来的地温状况。所以断层带,尤其是较大的断层带附近,常产生低温或高温的异常现象。湖北井田 F_{22} 断层对地温分布的影响如图4所示,12₇孔和12₆孔位于 F_{22} 断层下盘,12₅孔位于断层上盘并穿过该断层带,12₄孔位于 F_{22} 断层上盘且穿过 F_1 断层。12₄孔和12₅孔的地温梯度和-650 m水平的温度值分别为 $3.16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 、 $3.20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 和 $36.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $36.92\text{ }^{\circ}\text{C}$,而12₆孔和12₇孔的地温梯度和-650 m水平的温度值分别为 $2.55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 、 $2.41\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 和 $32.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $31.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见 F_{22} 断层上盘区域的地温明显高于其下盘, F_{22} 断层对湖北矿南部的地温分布有显著影响。

3.2.3 地下水对地温的影响 湖北井田由于覆盖层厚,隔水性良好,地表水一般对矿井建设及矿床开采无影响,地表水与煤系含水层之间无水力联系,所以本井田的水文地质条件属于深循环地下水。煤系基底的太原组石灰岩岩层,为裂隙岩溶含水层,是地下水运移、活动的主要场所,也成为地下热水的储存、运移空间。由于井田周围断层的切割,地下水的径流补给受到阻碍,使其交替循环极

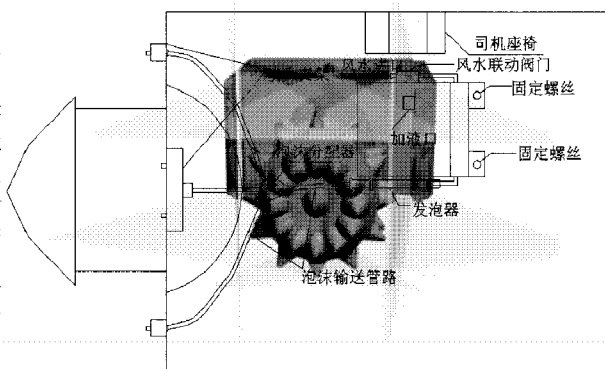


图3 湖北煤矿地温梯度等值线和测温孔分布

图4 湖北井田 F_{22} 断层对地温分布的影响

为缓慢。井田内地下水处于滞缓的水平径流状态和压力影响下的垂直运动状态,而使其能够成为深部地热向上传导的重要载体。在垂直运动并不断被加温上升后,遇煤系地层阻隔,并与上覆煤系地层进行温度交换,导致出现地温异常。本矿井已查出大小断

层118条,其中断距大于或等于10 m的68条,小于10 m的50条,一些较大的断裂带本身虽不含水,导水性也差,但是在其两侧派生的一些次级小断层及裂隙带往往含水丰富,导水性也较强。如湖北矿 F_{26} 断层,其走向长度约3.7 km,落差在90~310 m之间,倾角 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。断层破碎带宽度150 m,充填物以泥岩为主,含少量砂岩碎块,呈碎粒状,抽水试验表明断层导水性差。但北翼-600 m总回风巷揭露 F_{26} 断层时从巷道左肩涌水,最大突水量 $15\text{ m}^3/\text{h}$,水温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 F_{26} 断层对地温控制作用明显(见图3),其原因是深循环的地下水在循环过程中被岩温加热之后,地下热水通过断层的运移或由于断层的阻水作用而影响到局部的地温分布,在断层带附近形成局部地温异常区。

4 结论

1) 湖北煤矿第一生产水平为-640 m,该水平地温最高达 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均为 $34.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,处于一级高温热害区($\geq 31\text{ }^{\circ}\text{C}$),须采取相应降温措施。

2) 在纵向上,地温随深度的增加而增加,且呈现良好的线性趋势;在平面上地温分布主要受分区断层 F_{26} 、 F_{22} 控制。

3) 本区地温较高的主要原因是:①煤系地层上覆有较厚(400~420 m)的第四系松散层;②地质构造比较复杂,断层多,将深部热流导入浅部致

使岩温升高,在大的断层附近产生高温的异常现象。重要因素,深循环上升地下水引起井田局部热异常。

象,本基田地温梯度大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 的钻孔大都集中

(下转第63页)
Vol. 32 No. 1

2012, 22 断层附近; ③地下水是造成矿区地热异常的主要原因

Mar. 2012

基于 ARCGIS 的塌陷塘水质特征研究及评价

——以淮南矿业集团谢桥矿为例

苏桂荣¹,姚多喜¹,李守勤²,高良敏¹,陈萍¹,陈永春²

(1. 安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001; 2. 淮南矿业(集团)有限责任公司煤矿生态环境保护国家工程实验室,安徽 淮南 232001)

摘要:为了解矿区塌陷水体的水质污染特征及规律,结合物理、化学和生物指标,运用营养状态综合指数法及基于 ARCGIS 的空间差值分析法对淮南矿业集团谢桥矿塌陷塘水质进行了分析与评价。矿区塌陷塘水质 pH 值呈弱碱性,透明度较低, BOD_5 、 COD_{Mn} 指标含量较高;用营养状态综合指数法对塌陷塘水质富营养化进行了评价,其污染级别为轻度富营养;运用 ARCGIS 的空间分析模块,利用总磷、总氮、 BOD_5 、 COD_{Mn} 4 个因子的空间插值栅格图建立多因子综合污染模型进行综合评价,得出水体综合水质标准处于地表水Ⅲ类到Ⅳ类之间,水质有待改善。本研究结果为塌陷塘水体水质监管及管理提供科学依据。

关键词:煤矿塌陷塘;理化特征;富营养化;空间插值;综合污染评价

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:1672-1098(2012)01-0039-04

Research and evaluation of Water Quality in Subsidence Ponds Based on the ARCGIS

——A Case Study in Xieqiao Coal Mine of Huainan Mining Group

SU Gui-rong¹, YAO Duo-xi¹, LI Shou-qin², GAO Liang-min¹

CHEN Ping¹, CHEN Yong-chun²

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. State Key Lab of Mine Ecological Environment Protection of Huainan Coal Mining Group Corporation Ltd, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to understand the features and regularity of water pollution in subsidence, combining with physical, chemical and biological indicators, using nutrition state comprehensive index method and space difference analysis method which based on ARCGIS, analyzed and evaluated the water quality of Xieqiao Coal Mine subsidence pond of Huainan Mining Group. The pH value of water was weak alkali; the SD of water was low; the index of BOD_5 , COD_{Mn} were high. Evaluated the degree of eutrophication with the method of trophic state comprehensive index, the pollution level was light eutrophication. Through the ARCGIS spatial analysis module, Draw out the contaminated distribution simulation diagrams of TP, TN, BOD_5 , COD_{Mn} , and based on the more comprehensive pollution factor ARCGIS model, drawing the comprehensive pollution evaluation simulation diagram of Huainan Xieqiao mine subsidence ponds water quality, obtaining the result that the comprehensive water quality standard of Xieqiao mining located in III to IV, the quality of water should improved. The results of this study provided the scientific basis for water quality supervision and management of collapse pond.

Key words: coal mine subsidence pond; physical - chemical characteristics; eutrophication; spatial interpolation; comprehensive pollution evaluation

收稿日期:2011-11-26

基金项目:淮南矿业集团2010科学技术资助项目

作者简介:苏桂荣(1985-),女,山东潍坊人,在读硕士,研究方向:水污染控制工程。

8. 25 4. 30 54. 62 0. 12 1. 00 6. 02

3.2 塌陷塘水质营养状态评价

引用湖泊、水库富营养化状况评价方法——综合营养状态指数法对谢桥矿塌陷水域营养化程度进行评价,其计算公式为

$$TLI(\sum) = \sum W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中: $TLI(\sum)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为代表第 j 种参数的营养状态指数。

以叶绿素 a (chl_a) 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重 W_j 计算公式^{[7]134}为

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (2)$$

式中: r_{ij}^2 为第 j 种参数与基准参数 chl_a 的相关系数; m 为评价参数的个数。

营养状态指数 $TLI(j)$ 计算公式为

$$TLI(\text{chl}_a) = 10 (2.5 + 1.086 \ln \text{chl}_a) \quad (3)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10 (9.436 + 1.624 \ln \text{TP}) \quad (4)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10 (5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (5)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10 (5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (6)$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10 (0.109 + 2.661 \ln \text{COD}_{\text{Mn}}) \quad (7)$$

在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重。根据文献[7]¹³⁴中 r_{ij}^2 相关系数,求出各个指标的营养状态指数值,最后对各个营养状态指数值相加。得到谢桥矿水体营养状态综合指数为 58.95,知其水质级别为轻度富营养。水体中的氮、磷等是导致水体富营养化的根本原因,水体的富营养化可以直接导致水体透明度下降,溶解氧减少。谢桥矿塌陷塘大多是原来耕种的农田塌陷而成,现周边又被农田环绕,农药化肥的使用可为其输入大量的氮、磷等营养物质。谢桥矿塌陷水域透明度较低,在实地调查中渔民养殖的鱼类也因缺氧而部分死亡,这从一定程度上都能证实水体已富营养化这一结果。

3.3 基于 ARCGIS 空间插值的多因子综合评价

采样数据的空间内插值方法比较常见的有边界内插法、整体内插法、局部内插法及 Kriging 方法(克里格)等,其中 Kriging 方法是一种无偏的最优插值方法^[8]。Kriging 方法使用前需保证数据的正态分布^[9]。利用 Spass 软件通过非参数检验方法对数据进行 Shapiro - Wilk (W 检验)得知总磷、总氮、BOD₅、COD_{Mn}这四组数据的 sig. 值即 P 值均大于 0.05 (见表 2),符合正态分布。

表 2 总磷、总氮、BOD₅、COD_{Mn}的非参数检验

	Kolmogorov - Smirnov ^a			Shapiro - Wilk		
	统计量/(mg · L ⁻¹)	自由度/(个)	显著性概率 P 值	统计量/(mg · L ⁻¹)	自由度/(个)	显著性概率 P 值
BOD ₅	0.152	16	0.200 *	0.938	16	0.323
总磷	0.198	16	0.093 *	0.922	16	0.183
总氮	0.128	16	0.200 *	0.963	16	0.715
COD _{Mn}	0.143	16	0.200 *	0.980	16	0.961

注: * 这是真实显著水平的下限; a. Lilliefors 显著水平修正

运用 ARCGIS 软件,利用 Kriging 插值分别对总磷、总氮、BOD₅、COD_{Mn}进行插值后得到每个因子的空间插值栅格图,然后利用这 4 个因子的空间

插值栅格图,建立多因子综合污染模型,以此来综合评价谢桥矿塌陷水域的污染情况。

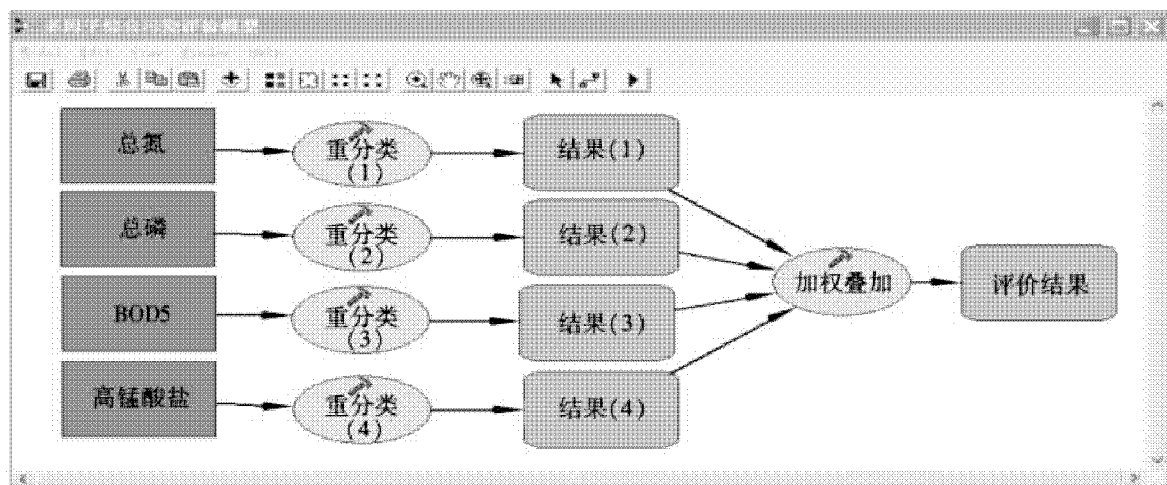


图2 基于 ARCGIS 的多因子综合污染评价模型

多因子综合污染模型的建立是将单因子插值栅格分布图进行重分类,然后根据文献[6]²的标准限值把所测因子的浓度划分为不同的等级,并赋予每个等级与国家地表水环境质量标准等级相同的新值,然后进行加权叠加,其权重系数与模糊综合评价法相同,最后运行计算得到综合污染的分布图(见图3)。

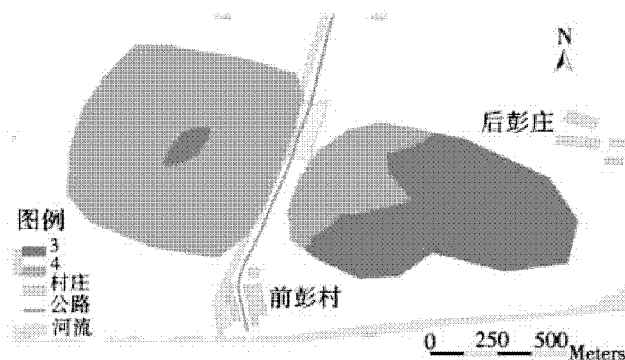


图3 谢桥矿塌陷水域综合污染评价模拟图

通过图3可以清楚的看出谢桥矿塌陷水域水质的综合污染状况,其综合水质标准基本处于地表水环境质量标准的Ⅲ类到Ⅳ类之间,并且呈现出塌陷塘周边较中心污染严重的状况。

4 结论

1) 通过单因子分析,谢桥矿塌陷水域 BOD₅ 与 COD_{Mn} 含量偏高,分别达到地表水环境质量标准中的Ⅲ类与Ⅳ类。总磷、总氮的值也较高,达到地表水环境质量标准中的Ⅳ类标准。

2) 根据营养状态综合指数法,谢桥矿塌陷塘水体污染级别为轻度富营养,较2008年其营养状态为中度富营养程度相比^[10],水质已有所改善。

3) 基于 ARCGIS 的空间插值分析,利用总磷、总氮、BOD₅、COD_{Mn}这4个因子的空间插值栅格图建立多因子综合污染模型,运行得出水体综合水质标准处于地表水Ⅲ类到Ⅳ类之间,相关部门应继续采取积极有效地措施对塌陷塘水体进行有效的治理和保护。

参考文献:

- [1] 淮南市环境保护局. 淮南市生态环境现状调查报告[R]. 淮南:淮南市环境保护局出版,2001.
- [2] 郭志达,盛业华,胡明星,等. 矿区生态环境灾害监测与分析评价[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998:19-36.
- [3] 王振红,桂和荣,方文慧,等. 夏季采煤塌陷塘水质影响因素分析[J]. 能源环境保护,2005,19(3):61-64.
- [4] 国家环保总局. 水和废水检测分析方法[M]. 第4版. 北京:中国科学出版社,2002:11.
- [5] 方文慧,桂和荣. 淮南矿区塌陷塘理化环境状况[J]. 矿业安全与环保,2006,33(1):24-26.
- [6] 国家环保总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [7] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:121-129.
- [8] 姚焕玖. 基于 GIS 技术的湖泊水质污染综合评价的研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [9] 刘庆,杜志勇,史衍玺,等. 基于 GIS 的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(10):258-262.
- [10] 何春桂,刘辉,桂和荣. 淮南市典型采煤塌陷区水域环境现状评价[J]. 煤炭学报,2005,30(6):754-758.

(责任编辑:何学华,范 君)

空间插值在地表水质分析与评价中的应用

——以淮南矿业集团潘集矿塌陷水体为例

贾俊¹, 高良敏¹, 尹伶俐¹, 姚多喜¹, 李守勤², 陈萍¹, 陈永春²

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 淮南矿业(集团)有限责任公司煤矿生态保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了解矿区塌陷水体的污染情况, 以潘集采煤塌陷水体为研究对象, 通过 ARCGIS 软件中的空间插值模块, 对潘集水体中的总氮、总磷进行插值分析, 得到潘集塌陷水体总氮和总磷的最佳空间插值分布图, 并检验了插值预测精度。从插值图中, 分析得出总氮、总磷的最高质量浓度出现在泥河入口处, 分别为 13.373 mg/L 和 3.000 mg/L。建立了基于 GIS 的多因子综合污染评价方法, 并与模糊综合评价法分别对塌陷水体进行评价, 得出基于 GIS 的多因子综合污染评价方法结果为 5、4 级; 而模糊综合评价法评价结果为五级。

关键词: 空间插值; 塌陷水体; 污染; 综合评价

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0043-07

Application of Spatial Interpolation in Analysis and Evaluation of Surface Water Quality

——A Case Study for Water in Subsidence in Panji Coal Mine

JIA Jun¹, GAO Liang-min¹, YIN Ling-li¹, YAO Duo-xi¹

LI Shou-qin², CHEN Ping¹, CHEN Yong-chun²

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. State Key Lab of Mine Ecological Environment Protection of Huainan Coal Mining Group Corporation Ltd, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: The research object is water in subsidence in Panji Coal Mine. Water pollution in mining subsidence was analyzed. By using the module of spatial interpolation of the ARCGIS software, the best spatial interpolation distribution graph of total nitrogen and total phosphorus in water in subsidence in Panji Coal Mine were drawn out and the prediction precision by interpolation was tested. On the basis of interpolation graph, the highest mass concentration of total nitrogen and total phosphorus was obtained, which appear at the entrance to Nihe River, and separately were 13.373 mg/L and 3.000 mg/L. GIS-based multi-factor integrated pollution evaluation method was established. Separately by using the method and fuzzy comprehensive evaluation method, water bodies in subsidence was evaluated. The obtained result by GIS-based multi-factor integrated pollution evaluation method shows the water quality is category 5 or 4, and by fuzzy comprehensive evaluation method is category 5.

Key words: Spatial interpolation; water in subsidence; pollution; comprehensive evaluation

收稿日期: 2011-11-26

基金项目: 淮南矿业集团 2010 年科学技术项目

作者简介: 贾俊(1986-), 男, 安徽芜湖人, 在读硕士, 研究方向: 水污染控制工程。

空间插值常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面,以便与其它空间现象的分布模式进行比较,它包括了空间内插和外推两种算法。空间内插算法:通过已知点的数据推求同一区域未知点数据;空间外推算法:通过已知区域的数据,推求其它区域数据。

空间插值方法分为两类:一类是确定性方法;另一类是地质统计学方法。确定性插值方法是基于信息点之间的相似程度或者整个曲面的光滑性来创建一个拟合曲面,比如反距离加权平均插值法(IDW)、趋势面法、样条函数法等;地质统计学插值方法是利用样本点的统计规律,使样本点之间的空间自相关性定量化,从而在待预测的点周围构建样本点的空间结构模型,比如克立格(Kriging)插值法。

随着技术的发展,空间插值理论与地理信息系统(GIS)结合起来,其把地图这种独特的视觉化效果和地理分析功能,与一般的数据库操作(例如查询和统计分析等)集成在一起的优势,使其得到迅猛的发展和广泛的应用。例如,利用GIS中的空间插值分析模块,研究了山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征,得到了8种重金属Cu、Cd、Cr、Zn、Ni、Pb、As、Hg的空间分布图^[1]。

本次研究是以淮南潘集采煤塌陷水体为研究对象,利用ARCGIS9.2桌面版中Geostatistical Analyst分析模块对塌陷水体中的总氮和总磷进行插值分析,并建立基于GIS的水质综合污染评价模

型,对塌陷水体进行综合评价。

1 研究区概况

潘集地区位于淮南市北部,南濒淮河,北临茨淮新河,东与怀远县接壤,西与凤台县毗邻。整个潘集地区的煤矿开采地带即潘集矿区位于潘集谢桥矿区的最东部,拥有潘一矿、潘二矿、潘三矿、潘北和朱集五个现代化矿井。现已投入生产的有潘一矿、潘二矿和潘三矿3对矿井。矿区地处淮河冲击平原,地形平坦,淮河是邻近本区的主要河流,并且矿区塌陷水域大多与淮河的支流泥河相连。泥河从本区西南方流过,由西北向东南经青年闸流入淮河,沿岸地势低洼,雨季容易造成内涝。

潘集矿井经过二十多年的开采导致地面的移动、变形及破坏,造成大面积的地表塌陷,加上浅层地下水和大量雨水的汇入,潘集矿区已形成许多大大小小的塌陷水域,总面积超过1 078.8万平方米,其中塌陷水域最深处已达到9~10 m^[2]。

2 采样点的布置

采样点的设置依据水体的流向,在其中轴线上(近似位置)布置3、4、5、7、9、11、12、14共8个采样点,并在特殊位置——西南上游处的排污口和正北拐弯处(弯处产生回流)布置1、2和排污口点(16)共3个采样点。为了进行空间插值精确度的验证,分别加采6、8、10、13、15共5个采样点,总共16个采样点(见图1)。

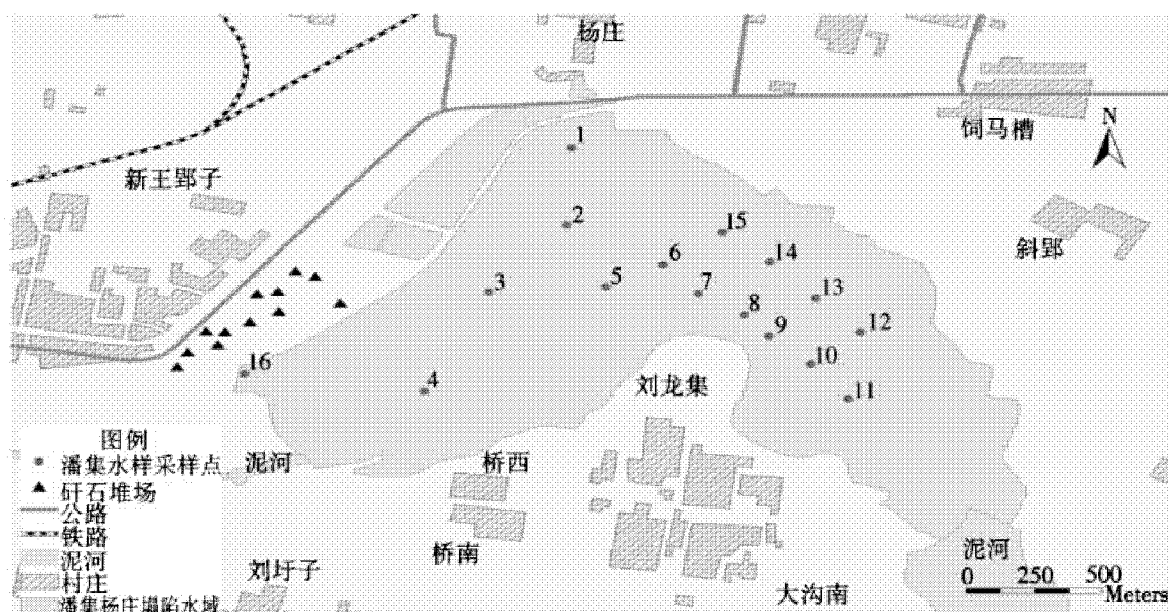


图1 潘集塌陷水体采样点

3 空间插值分析

3.1 正态分布性验证

不同的插值方法都有各自特点,也有应用的条件。确定性插值方法的特点是在样本点处的插值结果和原样本点实际值基本一致,若是利用非确定性插值方法的话,在样本处的插值结果与样本实测值就不一定一致,有的相差甚远。而克里格插值法的前提需要保证数据的正态分布,只有当数据服从正态分布时,克里格插值方法的结果才可靠。如果数据不服从正态分布,会使实验插值函数发生畸变,降低估计精度。数据符合正态分布的检验方法有很多,如果中值和均值大致相等,其偏度为 0,峰度接近于 3 时(有分析软件为 0),则可以数据断定服从正态分布。只要符合前两个条件也基本具备正态分布的条件。本文利用 ArcGIS 软件分析得到潘集塌陷水体中总氮、总磷的 QQ 图及统计特征值,并判断其是否属于正态分布^[3-4](见图 2~图 3,表 1)。

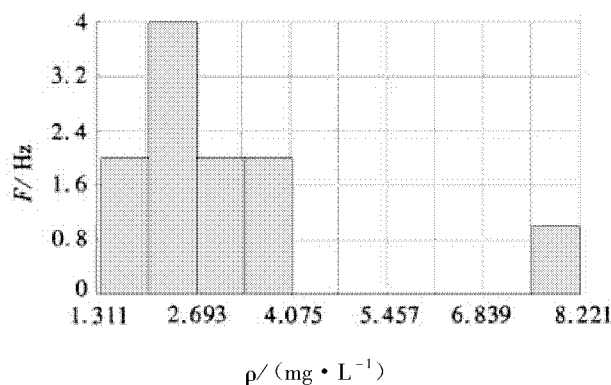


图 2 总氮的 QQ 图

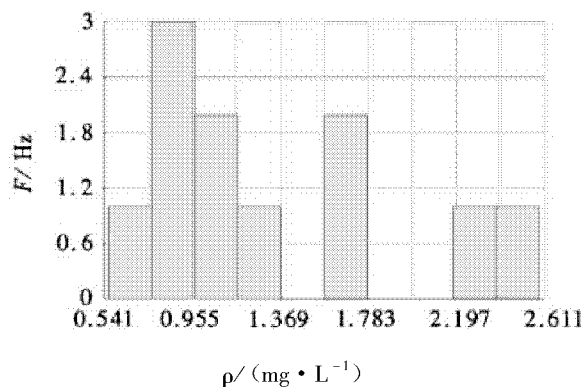


图 3 总磷的 QQ 图

表 1 潘集塌陷水体总氮、总磷特征统计值

因子	样品数/个	最小值 /(mg · L ⁻¹)	最大值 /(mg · L ⁻¹)	平均值 /(mg · L ⁻¹)	中值 /(mg · L ⁻¹)	标准差 /(mg · L ⁻¹)	偏度	峰度
总磷	11	0.06	0.26	0.13	0.11	0.066	0.796	2.417
总氮	11	1.38	8.22	3.05	2.60	1.852	2.129	6.812

从图 2、图 3 的直方图和表 1 中的特征统计值可以得到:淮南潘集塌陷水体中的总氮和总磷不符合正态分布。因此在应用空间插值法时,无法应用克里格插值法,只能应用确定性插值方法。

3.2 选取最佳插值法

最佳插值方法的选取是根据均差 (ME) 和

均方根误差 (RMSE) 大小,最佳插值方法的均差和均方根误差最小,在均差相同时优先考虑均方根误差。本次研究应用 ArcGIS 软件,选取不同类型的插值方法对潘集水体中的总氮和总磷进行插值验证,其结果如表 2 所示。

表 2 总氮和总磷的插值交叉验证值

指标	误差	IPW	GP	LP	CRS	ST	TPS
总氮	ME	-0.171	0.150 5	0.138 4	0.032	0.164 8	0.290 6
	RMSE	1.734	2.327	2.37	0.114 3	2.251	2.649
总磷	ME	-0.007 2	0.004 8	0.001 3	-0.002 7	-0.002 7	-0.000 8
	RMSE	0.043 5	0.043 8	0.041 1	0.043 7	0.035 6	0.042 6

注:IPW 为反距离加权平均插值法;GP 为全局多项式插值法;LP 为局部多项式插值法;CRS 为完全规则样条函数插值法;ST 为张力样条函数插值法;TPS 为平面样条函数插值法。

从表2中可以得出:对于不同的插值方法,总氮验证的 RMSE 值为 $TPS > ST > LP > GP > IPW > CRS$,最佳插值法是 CRS;而总磷验证的 RMSE 值为 $GP > CRS > TPW > TPS > LP > ST$,最佳插值法是 ST。

3.3 插值分布图

用 CRS 插值法对潘集水体中总氮进行插值,用 ST 插值法对潘集水体中总磷进行插值,分别得到各自的浓度分布图(见图4~图5)。

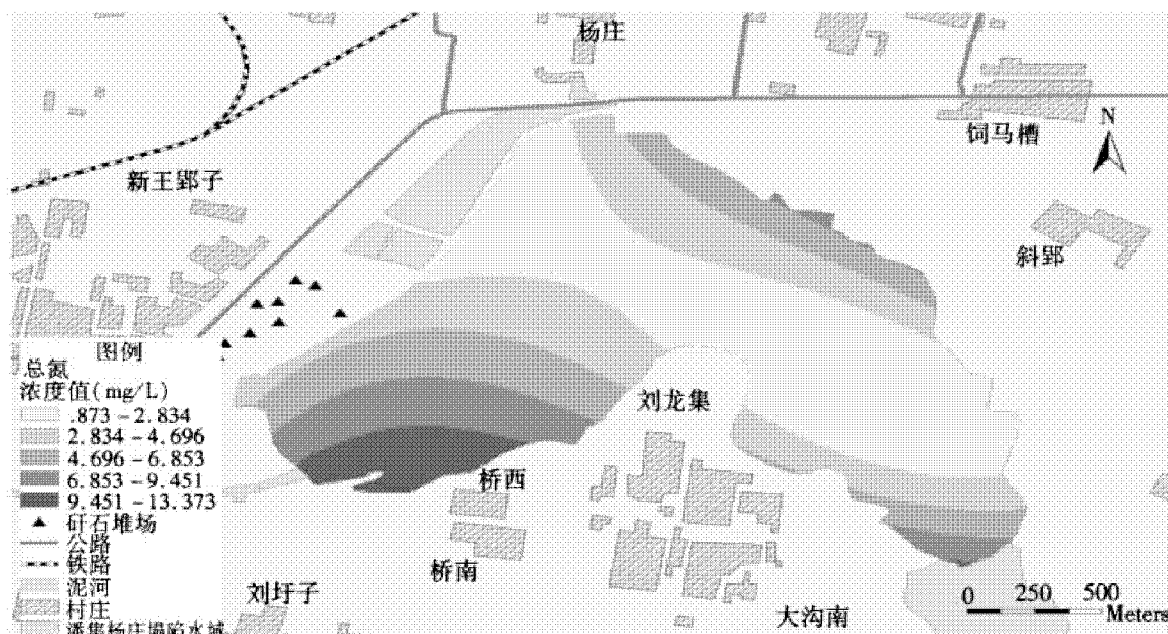


图4 总氮最佳插值的分布

从图4中可以看到潘集塌陷水体总氮的整体分布情况。泥河入口处总氮的含量最高,超过国家地表水五类标准^{[5]2}。这可能与周边居民的生活污水直接排入泥河有很大关系。随着泥河水体进入塌陷水体,总氮的浓度在不断减小,这是因为总氮进入大面积的塌陷水体后被稀释,同时随着水体流

动,也被水中的植物吸收,使其浓度逐渐降低。塌陷水体的东北角总氮的浓度偏高,这和东北角是农业用地有直接的关系,而随着水流的方向,在出口处总氮浓度又有增大的现象,这可能是出口流量突减,造成水中生物在出口处大量堆积、腐烂,从而释放部分氮元素。

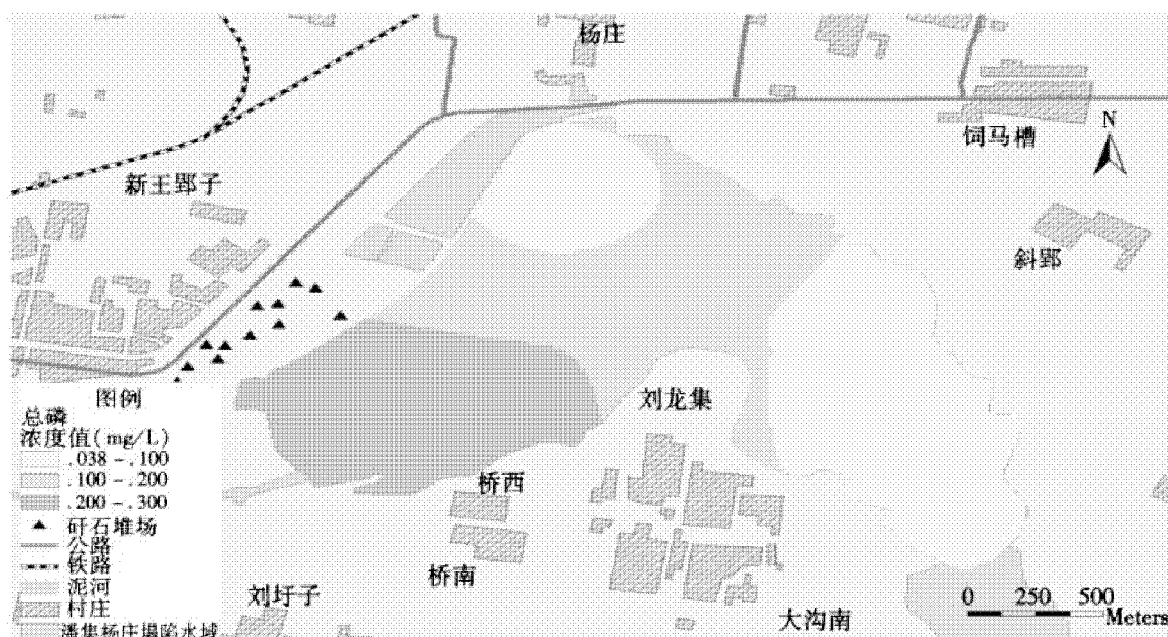


图5 总磷最佳插值的分布

从图 5 中可以看到潘集塌陷水体总磷的分布情况。泥河入口处总磷的含量最高,超过国家地表水三类水标准^{[5]2},随着水流方向,总磷的含量逐渐降低,一方面是被水体稀释,另一方面是被水中植物吸收。在图 5 中正北方向有一大块小于国家地表水二类的区域,这可能是因为此片区域为塌陷水体的拐弯处,会造成水体的回流现象,水体的净化时间比其他地方要长。

3.4 预测精度验证

预测精度检验需要用到独立于插值数据集的校验数据集,校验数据为一组实测数据,检验的方

法是以校验数据集的平均预测误差(MPE)和均方根预测误差(RMSPE)大小来评价预测的精度^[6]。

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_i^n [X_i^* - X_i]$$

$$RMSPE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_i^n [X_i^* - X_i]^2 \right\}^{0.5}$$

式中: n 为校验数据集样点个数; X_i^* 为 i 点上的实测值; X_i 为 i 点上的预测值。

用 6、8、10、13、15 共 5 个采样点所测得数据为校验数据集,对潘集总氮、总磷所得的浓度分布进行插值精度验证,其验证结果如表 3 所示。

表 3 预测精度验证表

		mg · L ⁻¹					
指标	误差/(mg · L ⁻¹)	IPW	GP	LP	CRS	ST	TPS
总氮	MPE	-0.184	-0.2	0.064	-0.104	-0.064	-0.014
	RMSPE	0.512	0.545	0.622	0.753	0.641	0.637
总磷	MPE	0.012	0.02	0.022	0.014	0.018	0.018
	RMSPE	0.028	0.044	0.035	0.029	0.031	0.031

从表 3 中可以得到:总氮的 LP 插值法的 MPE 为正值,表现为正偏差,其他都为负值,表现为负偏差;而总磷的 MPE 全为正值,全部表现为正偏差。总氮的最高 RMSPE 值是 0.753;总磷的最高 RMSPE 值 0.044,都符合插值精度要求。此外,总氮的 RMSPE 值是 IPW < GP < LP < TPS < ST < CRS,说明在此验证数据集下,其总氮预测精度最高的为 IPW 插值法,最低的为 CRS 插值法;而总磷的 RMSPE 值是 IPW < CRS < TPS = ST < LP < GP,说明在此验证数据集下,其总磷预测精度最高的为 IPW 插值法,最低的为 GP 插值法。

4 多因子综合污染评价

4.1 多因子综合污染模型建立

通过各因子的空间插值,得到每个因子在塌陷水域的浓度分布情况,利用总氮和总磷的浓度分布图,建立多因子综合污染模型(见图 6),以此来综合评价潘集塌陷水域的污染情况。

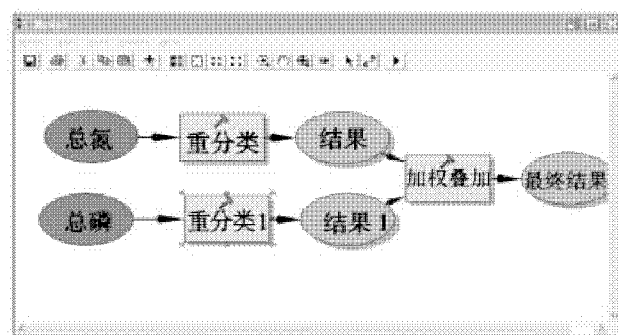


图 6 多因子综合污染模型

多因子综合污染模型的建立是将单因子插值得到的浓度分布进行重分类,根据所测因子的浓度范围,按照文献^[5]标准进行不同等级的浓度划分,并赋予每个等级新值,新值与国家标准等级相同为 1~5,然后进行加权叠加,其权重系数与模糊综合评价法相同,最后进行运行计算得到综合污染的分布图(见图 7)。

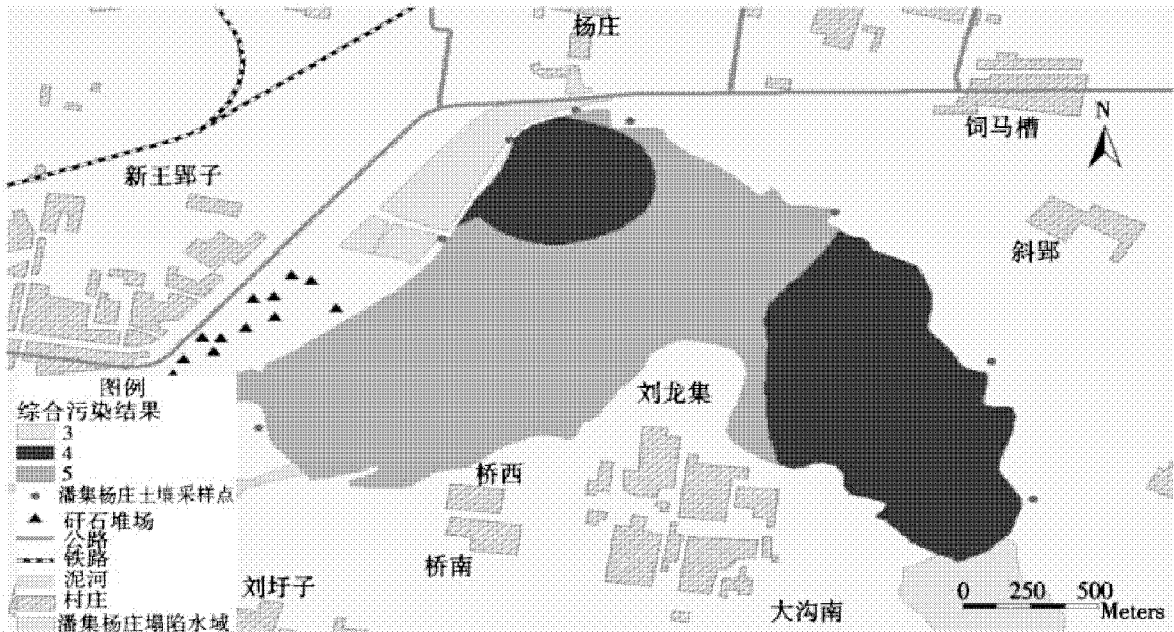


图7 综合污染分布

从图7中可以得到:潘集塌陷水体的综合污染程度可分为两等级——上游的5级、下游的4级以及正北处一片区域的4级。

4.2 模糊综合评价

模糊综合评价法是水质评价中常见方法^[7],其评价的步骤如下:

1) 建立评价对象的因素集。假设影响水质的主要污染因素有 n 个,则这 n 个因素构成的集合为 $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$;

2) 建立评价集。评价集是与因素集中评价因子相应的评价标准集合,在水质评价中,是各个污染因子相应的环境质量标准等级的集合为 $\nu = \{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m\}$;

3) 建立隶属函数。以水质质量评价为标准,以隶属函数为基础,建立了模糊综合评价集合。本文采用降半梯形分布函数确定某种因素的隶属度。

当 $j = 1$ 时,为一级水,隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_i \leq S_{ij} \\ \frac{S_{i,j+1} - x_i}{S_{i,j+1} - S_{ij}} & S_{ij} < x_i \leq S_{i,j+1} \\ 0 & S_{i,j+1} < x_i \end{cases} \quad (1)$$

当 $j = 2, 3, 4$ 时,为二级到四级水,隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_i \leq S_{i,j-1}, x_i \geq S_{i,j+1} \\ \frac{S_{i,j-1} - x_i}{S_{i,j-1} - S_{ij}} & S_{i,j-1} < x_i < S_{ij} \\ \frac{x_i - S_{i,j+1}}{S_{ij} - S_{i,j+1}} & S_{ij} < x_i \leq S_{i,j+1} \end{cases} \quad (2)$$

当 $j = 5$ 时,为五级水,隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \geq S_{ij} \\ \frac{S_{ij} - x_i}{S_{ij} - S_{i,j-1}} & S_{i,j-1} < x_i \leq S_{ij} \\ 0 & x_i < S_{i,j-1} \end{cases}$$

以潘集水体中总氮、总磷浓度的平均值对潘集塌陷水体进行模糊综合评价,其浓度平均值如表4所示。

表4 总氮、总磷的浓度平均值		mg · L ⁻¹
评价因子	总氮	总磷
浓度平均值	3.50	0.16

根据所得数据建立 R 矩阵

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据 2 种指标的标准等级建立权重系数矩阵

$$A = (\overline{A_1}, \overline{A_2}, \dots, \overline{A_n}) = [0.81 \quad 0.19]$$

将矩阵进行运算得

$$B = A \circ R = (\overline{A_1}, \overline{A_2}, \dots, \overline{A_n}) \circ$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} =$$

$$[0 \quad 0.133 \quad 0.057 \quad 0 \quad 0.81]$$

从运算结果中可以得到:潘集塌陷水体的综合污染为五类水。

比较两种综合评价方法。基于 GIS 的多因子评价法得出塌陷水体的分为 5 级和 4 级,而模糊综合评价法得出塌陷水体为五类,为地表水污染最高等级。这是因为两种方法基于的评价原理不一样,模糊综合评价法是通过离散点的平均值来评价水体的污染情况,当水体各区域污染浓度相差不大时,则综合评价结果较为准确,反之则误差较大;而基于 GIS 的多因子评价法则是在获得评价因子浓度分布图的基础上,将各因子浓度按国家地表水环境质量的浓度等级进行划分,并赋予每个等级新值,进行加权叠加计算,所以基于 GIS 的多因子评价方法评价的结果更符合污染物扩散和水体自净的规律。

5 小结

1) 验证了潘集塌陷水体的总氮和总磷的正态分布性,确定了其空间插值法采用确定性插值法。

2) 比较各类确定性插值法误差,确定了潘集

塌陷水体总氮和总磷的最佳插值方法,得出其最佳插值分布图,分析了总氮、总磷的分布规律及其原因。

3) 检验了各插值方法的预测精度,并且在选用的验证数据集下,得出了各类插值法的预测精度高低。

4) 建立了基于 GIS 的对因子综合污染评价模型,并使用此模型和模糊综合评价法分别对潘集塌陷水体进行综合评价,比较两种结果,得出基于 GIS 的多因子综合污染评价法更优。

参考文献:

- [1] 刘庆,杜志勇,史衍玺,等. 基于 GIS 的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (10): 258 - 262.
- [2] 童柳华. 潘集矿区塌陷水域水质评价及其综合利用[J]. 中国环境监测, 2009, 25 (4): 76 - 80.
- [3] 刘付程,史学正,于东升,等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例[J]. 土壤学报, 2004, 41 (1): 20 - 27.
- [4] 林金宝. 基于 RS 与 GIS 的连江山仔水库周边 LUCC 动态变化监测及水环境影响评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [5] 国家环境保护总局. GB3838 - 2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 杨劲松,姚荣江. 基于磁感式土壤表观电导率空间变异性的插值方法比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (9): 50 - 57.
- [7] 刘晓庆. 沙颍河下游水污染控制决策支持系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.

(责任编辑:何学华,范 君)

基于光纤陀螺的捷联惯导系统的测试设计

连杰, 冯宏, 王继矿

(中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安 710077)

摘要:我国煤矿井下瓦斯治理钻孔工程量巨大, 目前主要采用人工丈量的方法测量标定开孔方位与角度参数, 稳钻时间长、效率低、精度差。针对这一问题, 提出基于光纤陀螺的捷联惯导系统开孔参数新方法, 该系统采用陀螺与加速度计的捷联惯导系统对钻孔的方位角、倾角进行测量, 可以显著提高钻孔方位与角度参数的标定效率与精度, 降低管理成本。

关键词: 瓦斯治理; 钻孔定位; 捷联惯导

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0050-03

The Test and Design of SINS Based on Fiber-optic Gyroscope

LIAN Jie, FENG Hong, WANG Ji-kuang

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: In China, drilling engineering is a huge project in coal mines. Currently parameters of borehole opening position and azimuth angle as a main method measured and demarcated artificially, which results in long drill stabilizing time, low efficiency and poor accuracy. In order to solve this problem, a new method of borehole opening parameters determination by SINS based on FOG was proposed. The system uses inertial navigation system with gyro and accelerometer to measure borehole opening azimuth angle and inclination, which significantly improves efficiency and accuracy of borehole opening position and angle parameters calibration, and reduces administration costs.

Key words: gas control; borehole positioning; SINS

我国煤矿生产中钻孔的施工工程量巨大^[1], 仅2010年全国煤矿井下施工瓦斯治理钻孔就达73500 km, 相当于围绕地球赤道1.83圈。成吨重的钻机设备在井下有限的空间按照给定的方位、角度快速瞄准给定的设计点施工, 本身就存在较大的难度, 加上罗盘受钻机等磁性物质的影响无法进行钻孔方位标定, 使钻孔施工方位准确标定难度进一步增加。目前井下现场钻孔方位标定与验收, 大多采用几何方法, 单孔方位标定时间少则几十分钟, 多则数小时, 消耗了大量的人力资源, 造成管理成本的增加, 同时也增加了井下的安全风险。为改变现状, 本文提出基于光纤陀螺的捷联惯导系统测量井下开孔参数新方法, 既可提高煤矿井下钻孔的施工精度, 也能提高管理水平, 降低管理成本。该系统研发具有重要的现实意义与良好的市场前景。

1 系统原理

1.1 光纤陀螺基本原理

光纤陀螺的工作原理是 Sagnac 效应, 它是相对惯性空间转动的闭环光路中所传播光的一种普遍的相关效应, 理想条件下, 环形光路系统中的 Sagnac 效应如图1所示。一束光经分束器 M 进入同一光学回路中, 分成完全相同的两束光 C_c 和 C_w , 分别沿顺时针方向和逆时针方向相向传播, 当回路绕垂直于自身的轴以 Ω 的角速度转动时, 两束光将产生相位差 $\Delta\phi$, 该相位差的大小与光回路的旋转速率成正比^[2]。

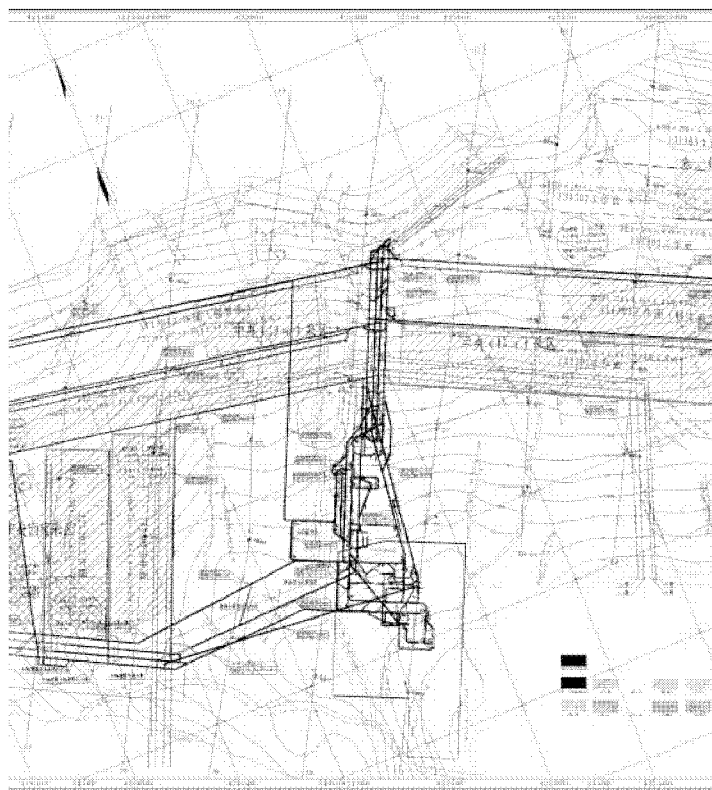


图 1 环形光路中的 Sagnac 图

如图 1(a) 所示, 在无旋转条件下, 两束光传输时间相等, 为 $t_c = t_w = \frac{L}{c} = \frac{2\pi R}{c}$

如图 1(b) 所示, 旋转条件下

$$t_c = \frac{2\pi R}{c - \Omega R}, t_w = \frac{2\pi R}{c + \Omega R}$$

$$\text{传输时间差: } \Delta t = t_c - t_w = \frac{4\pi\Omega R}{c^2}$$

$$\text{传输光程差: } \Delta L = \Delta t \cdot c = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c}$$

$$\text{传输相位差: } \Delta\Phi_s = \frac{4\pi R L \Omega}{\lambda_0 c}$$

因为旋转角速率产生的光程差太小, 很难被检测, 所以可以通过检测光强来检测相位差, 进而检测转动角速率。

1.2 捷联式惯导系统基本原理

惯导系统是一种应用高精度的陀螺仪和加速度计等惯性敏感器件测量运动载体在惯性参考系的加速度, 将其对时间进行积分, 并变换到导航坐标系中, 通过计算得出运动载体的速度、位置、姿态等导航参数的自主式导航系统^[3]。

捷联式惯性导航系统结构如图 2 所示, 加速度计和陀螺仪直接安装在载体上, 在计算机中实时计

算姿态矩阵, 即计算出载体坐标系与导航坐标系之间的关系, 从而把载体坐标系的加速度计信息转换

层序	厚度/m	岩性描述	层序	厚度/m	岩性描述
1	0.70	灰色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	11	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
2	2.53	灰绿色, 碎块状, 砂状, 粉状, 以砂质为主, 多含壳类, 磨圆, 内部含微化石, 具半暗半亮型, 含微化石片。	12	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
3	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	13	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
4	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	14	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
5	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	15	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
6	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	16	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
7	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	17	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
8	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	18	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
9	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	19	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。
10	0.26	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。	20	0.30	灰绿色, 块状, 含砂质, 平坦断口, 薄层发育, 见微化石片。

图 2 捷联惯导系统结构原理图

为导航坐标系下的信息, 然后进行导航计算^[4]。

捷联式惯导系统敏感元件便于安装、维修和更换, 适合井下复杂、恶劣环境的使用, 且捷联系统敏感元件易于重复布置, 去掉了常平架平台, 既在惯性敏感元件级别上实现冗余技术, 可提高性能和可靠性, 又消除了稳定平台稳定过程的各种误差, 同时还可减小系统的体积。故在设计中采用捷联式惯导系统, 把加速度计和陀螺仪直接固连在钻机载体上, 实时计算姿态矩阵, 通过姿态矩阵把陀螺测得的角速度信息和加速度计测得的加速度信息变换至导航坐标系进行导航计算, 从而测得钻机姿态信息^[5-9]。

2 钻机开孔参数测量系统设计

2.1 钻机开孔参数测量系统的结构

测量井下钻机开孔参数在陀螺选型上选用光纤陀螺, 与传统机电陀螺相比, 光纤陀螺无运动部件和磨损部件, 为全固态仪表, 成本低, 寿命长, 重量轻, 体积小, 动态范围大, 精度应用覆盖面广, 抗电磁干扰, 无加速度引起的漂移, 结构设计灵活, 生产工艺简单, 应用范围广。与激光陀螺相比, 光纤陀螺无需几千伏的点火电压, 无克服“自锁”用

的机械抖动装置,无超高精度的光学加工,不必非常严格的气体密封,装配工艺简便,功耗低,可靠性高。

加速度计是捷联惯导系统中另一个关键性元件,在设计中采用微机械加速度计,其体积小、功耗低、成本低,易集成,精度也符合设计需要。系统结构如图3所示。

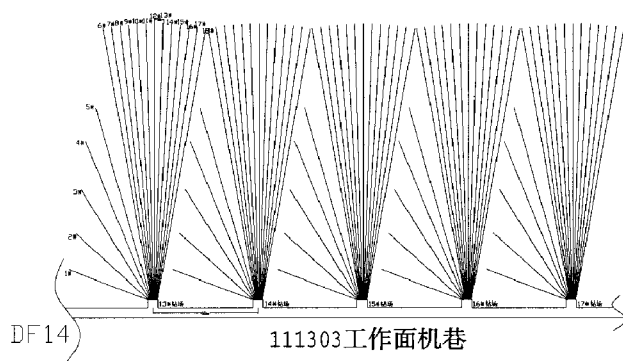
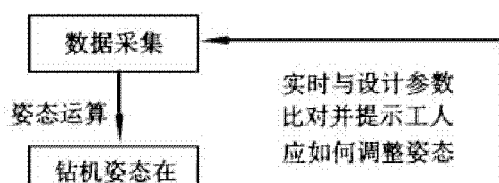


图3 钻机开孔参数测量系统

从图3可见,在捷联式惯导系统中嵌入式导航计算机,主要负责计算姿态矩阵,在线补偿陀螺仪和加速度计的误差并实现数据管理、传输等功能。系统采用主从式双处理器方式,同时使用DSP芯片和单片机进行处理。单片机具有较强的控制能力,完成数据交换、外设控制等操作;DSP拥有强大的高速运算能力,进行姿态解算、误差补偿等运算工作,而且DSP芯片集成了内部存储器以及丰富的端口资源,减少了系统的外设,便于系统小型化^[10]。

2.2 钻机开孔参数测量系统的测试方法

该系统的操作流程如图4所示,将仪器带入到井下前,工作人员通过连接计算机的USB接口导入设计好的钻孔施工参数,固定到井下钻机上,系统便可以对比测得的钻机给轴线的姿态信息与施工设计参数,并使用语音提示,指导施工人员如何调整钻机姿态,实现精确、快速稳固钻机。同时仪器把开孔时测得的姿态信息通过已有的通信网络传送到地面监控管理系统,显示并记录每一个钻孔开孔的实际参数,方便管理、设计人员进行后续的调整。



3 结束语

钻机开孔参数测量系统可应用在煤矿井下,既可以智能语音提示,指导施工人员按照设计的技术参数调整钻机姿态,稳固钻机,可显著的降低井下钻孔的标定时间与劳动强度,又可以辅助监督钻孔施工进行钻孔施工信息的管理。对系统进一步开发,可以实现实时测量钻机更多的技术参数,比如钻机转速、扭矩、给进力、进尺速度等信息的采集、统计与分析,实现自动识别孔内岩性,自动绘制钻孔地质柱状、地质剖面图等,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李钢,范喜生,马丕梁,等. 本煤层瓦斯预抽钻孔合理布置间距的确定[J]. 煤炭科学技术,2011,39(3): 56-58.
- [2] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010:28-35.
- [3] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006:203-216.
- [4] DAVID H TITTERTON, JOHN L WESTON. 捷联惯性导航技术[M]. 张天光,王秀萍,王丽霞,等译. 第2版. 北京:国防工业出版社,2010:12-39.
- [5] 朱金冬,任建新,唐品利,等. 一种新型陀螺测斜仪的硬件设计及其误差补偿技术[J]. 测井技术,2006,30(6):580-582.
- [6] 李艳. 用于油井测斜仪的光纤陀螺研究[J]. 测井技术,2007,31(1):14-16.
- [7] 徐海刚,郭宗本. 旋转式光纤陀螺寻北仪研究[J]. 压电与声光,2010,32(1):38-41.
- [8] 高爽,张春熹,颜廷洋. 光纤陀螺油井测斜仪研究与设计[J]. 测井技术,2006,30(6):571-573.
- [9] 刘飞,周卫宁,林恒. 捷联惯导系统加速度计采集电路设计[J]. 电光与控制,2011,18(7):86-89.
- [10] 王宇飞,陈俊,孙芳. 陀螺测斜仪中的陀螺设计选型[J]. 测井技术,2004,28(3):234-236.

(责任编辑:姚多喜,李 丽)

复杂条件下上提蹬空工作面矿压显现特征研究

马菁花, 华心祝, 杨 科, 贺超峰

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:为了解决蹬空对巷道围岩变形影响严重等问题, 针对张集矿1410(1)工作面复杂的地质条件, 采用计算机数值模拟(UEDC)系统和现场工程实践相结合的方法, 对工作面推进不同距离时上覆岩层垮落形态、初次来压步距、周期来压步距、液压支架受力以及巷道围岩的变形特征进行研究。研究表明: 工作面老顶初次来压步距约为32 m左右, 周期来压步距约为16 m左右。工作面液压支架所需支撑的最大岩层高度约为25 m。在工作面每天正常推进8 m的情况下, 工作面压架的危险性较小。

关键词:上覆岩层垮落形态; 初次来压步距; 周期来压步距

中图分类号:TD323 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)01-0053-06

Study on Characteristics of Strata Press Appearing under Complex Conditions with Working Face over Goaf

MA Jing-hua, HUA Xin-zhu, YANG Ke, HE Chao-feng

(School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to solve the problem of serious impact of working face over goaf on the surrounding rock deformation and other issues, under complex geological conditions of 1410 (1) working face in Zhangji Coal Mine, by use of computer numerical simulation system (UEDC) and on-site engineering practice, at different distance of the working face advancement overburden caving form, the initial weighting step, circular press step, force on hydraulic support, as well as the surrounding rock deformation characteristics were studied. The study shows that: the first weighting step in the basic roof is about 32 m, the circular press step is about 16 m. The rock height required to be supported by hydraulic props is about 25 m. The risk of props blocked is minimum, when working face advances 8 m per day.

Key words: Overburden caving form; initial weighting step; circular press step

由于受地质条件的限制, 不同地区都规定有最小防水煤柱线, 位于防水煤柱线以内的煤层不允许开采, 但是随着“三下”采煤技术的不断提升, 许多煤矿已经开始回采那些位于防水煤柱线以内的煤炭, 以此来提高煤炭的回采率。上提工作面围岩变形特征^[1]: 岩石强度降低, 粘结力和内摩擦角变

小; 塑性能力增强, 自身承载能力变差。岩石或岩体的强度降低的幅度也增大, 亲水能力强, 软化系数低。蹬空段围岩变形特征^[2]: 上部煤层因下部煤层的开采会导致上部煤层原岩应力平衡破坏, 煤层与煤层的顶底板产生裂隙、变形, 岩层结构不完整, 围岩的压力也不均衡, 难于支护。由于上提和

蹬空工作面的围岩的特殊性,往往对工作面安全高效回采造成严重影响,甚至造成重大人员伤亡事故,因此研究上提蹬空工作面的矿压显现特征具有重要的实际意义。

1 工作面概况

1410(1)工作面位于西二采区,南临 1411(1)采空区,北为 11-2 煤实体。当回采到新切眼时,工作面大部分处于 14128 采空区内,14128 采空区与该面呈斜交形式(见图 1),14128 采空区与该面的垂距平均为 81 m。工作面煤层底板标高 $-387 \sim -417$ m,直接顶板岩性组合为泥岩、砂质泥岩、砂岩;老顶为中砂岩(见图 2)。煤层结构简单~复杂,工作面范围内共发育断层 19 条,均为落差 $0 \sim 5$ m 的正断层。工作面主要充水因素为 11-2 煤层顶板砂岩裂隙含水层以及其上覆新生界松散层含水层,岩性主要为粘土和少量的砾石层组成,可作为复合隔水岩柱来利用。水体采动等级为Ⅲ类水体。风氧化

带深度为 $15.1 \sim 25.09$ m,平均为 20.22 m。工作面留设的最小防水煤柱 55.9 m。最大防水煤岩柱高度 65.13 m。

该面煤层倾角平均 9° ;煤厚平均 2.88 m;工作面基本沿东西走向布置,面宽 $120 \sim 240$ m(其中面宽 240 m 的面长平均 950 m、面宽 120 m 的面长 700 m)。可采长度平均 $1\,580$ m,可采储量 100.4 万吨。工作面采用后退式倾斜长壁、一次采全高的综合机械化采煤方法。

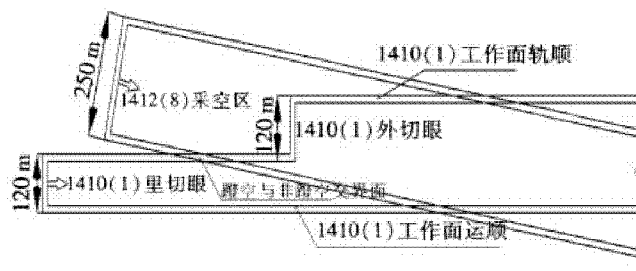


图 1 1410(1)和 1412(8)工作面位置关系图

岩性	平均厚度 / m	柱状	岩性描述
粉细砂岩	5.50		灰色~浅灰色,成份以石英为主,次为长石、云母及暗色矿物,钙质胶结,较坚硬
11-3 煤	0.3		局部受冲刷丢失
砂质泥岩	5.50		浅灰色~灰色,厚层块状,性脆易碎;见较多的结核体,含植化碎片。
11-2 煤	2.8		块状、粉末状为主,内生裂隙发育。暗煤为主,含少量亮煤及镜煤条带,属半暗型~半亮型煤。中下部常有一层泥岩夹矸,煤层结构复杂
泥岩	2.88		灰色~深灰色,泥质结构,块状,含化石碎片,局部较破碎,滑面发育。
11-1 煤	0.58		小块状、半亮型,油脂光泽。
泥岩	3.37		灰色~深灰色,泥质结构,块状。

图 2 1410(1)工作面 11 煤层柱状图

2 数值模拟

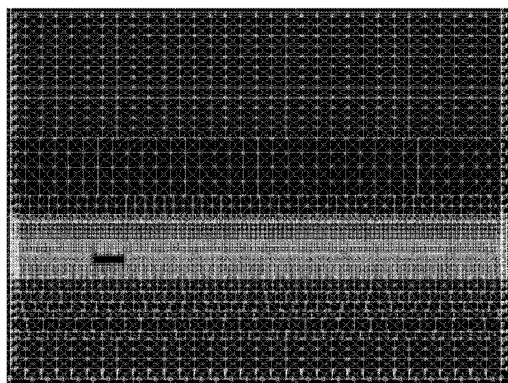
以张集矿 1410(1)工作面地质条件和工程背景为依据,运用 UEDC 数值模拟软件建立分析模型,模拟分析工作面推进不同距离时上覆岩层垮落形态、初次来压步距、周期来压步距(见图 3)、液压支架受力等问题。

2.1 模型建立及参数选取

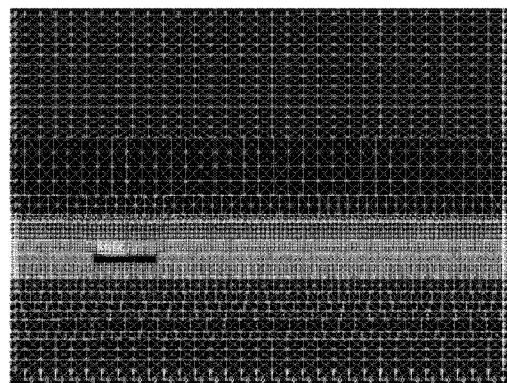
采用摩尔-库伦本构模型,模型左右及底部采用固支位移边界条件,顶部采用应力边界条件。数值模型总的宽度为 120 m,总高度为 89.1 m,部分岩层的力学参数如表 1 所示。

表1 岩层的岩石力学参数

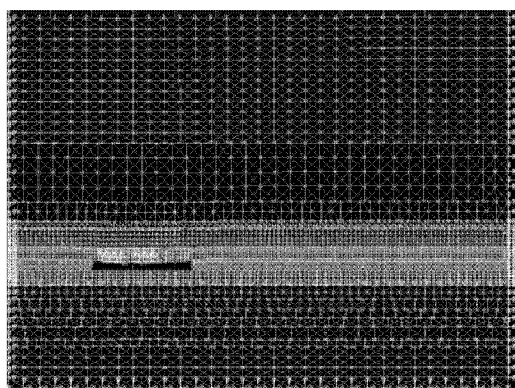
序号	岩 性	厚度 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa	泊松比
1	底部岩层	10.0	2 400	2.54	1.38	1.36	30	0.12	0.27
2	泥岩	1.7	2 400	2.54	1.38	1.76	30	0.16	0.27
3	中粗砂岩	3.0	2 816	30.4	22.6	11.88	45	1.08	0.20
4	细砂岩	2.1	2 571	20.5	7.72	6.78	42	0.62	0.33
5	粉细砂岩	2.0	2 514	2.32	1.89	2.83	40	0.26	0.18
6	粉砂岩	2.55	2 816	30.4	22.6	11.88	45	1.08	0.20
7	泥岩	3.37	2 400	2.54	1.38	1.76	30	0.16	0.27
8	11-1 煤	0.58	1 400	1.90	0.930	1.65	27	0.15	0.29
9	泥岩	2.88	2 400	2.54	1.38	1.76	30	0.16	0.27
10	11-2 煤	2.8	1 400	1.90	0.930	1.65	27	0.15	0.29
11	泥岩	3.0	2 400	2.54	1.38	1.76	30	0.16	0.27
12	粉细砂岩	2.16	2 514	2.32	1.89	2.83	40	0.26	0.18
13	砂质泥岩	2.16	2 392	1.02	0.880	1.52	35	0.14	0.17
14	粉砂岩	0.47	2 816	30.4	22.6	11.88	45	1.08	0.20
15	泥岩	1.41	2 400	2.54	1.38	1.36	30	0.12	0.27
16	石英砂岩	4.69	2 571	20.5	7.72	6.78	42	0.62	0.33
17	砂质泥岩	14.24	2 407	1.12	0.951	0.77	27	0.07	0.17
18	顶部岩层	30.0	2 300	1.00	0.462	0.55	25	0.05	0.30



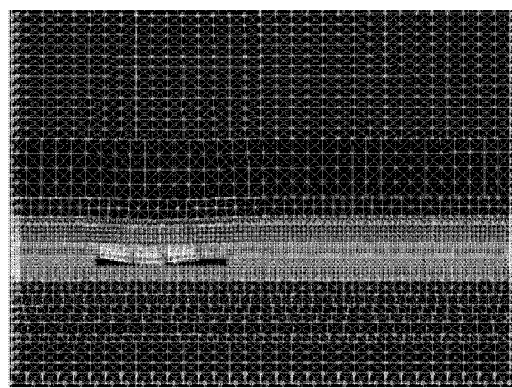
(a) 工作面推进 8 m



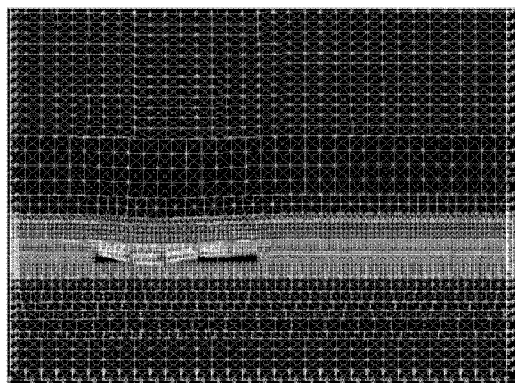
(b) 工作面推进 16 m



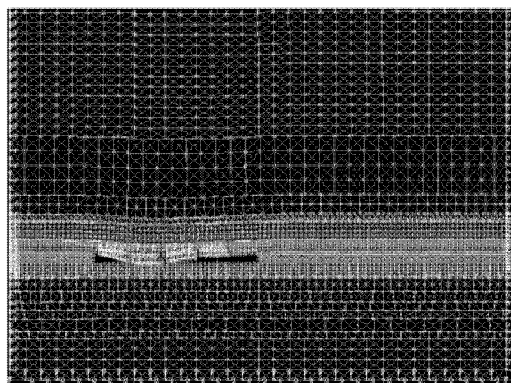
(c) 工作面推进 24 m



(d) 工作面推进 32 m



(e) 工作面推进 40 m



(f) 工作面推进 48 m

图 3 工作面推进不同距离时上覆岩层的垮落形态

2.2 液压支架上方岩层的垂直应力

根据“砌体梁”理论,上覆岩层的骨架是覆岩中的坚硬岩层,可将上覆岩层划分为几个组,每组以坚硬岩层为底层,其上部的软弱岩层可视为直接作用于骨架上的载荷。在上覆岩层中存在一层至数层厚坚硬岩层,在岩层活动中起主要控制作用的关键层。随着工作面向前推进,上覆岩层载荷主要由关键层承载,关键层下方软弱岩层与关键层产生离层,离层后的软弱岩层主要由老顶承载,当老顶达到极限载荷时,老顶发生破断^[3]。当关键层暴露一定长度时,会发生弯曲下沉变形,甚至破断,关键层下沉变形时,其上覆岩层或局部岩层下沉量同步协调。离层处的岩层垂直应力较小,主要承载的坚硬岩层的垂直应力较大。液压支架上方岩层的垂直应力与距离的变化曲线(见图4),可以确定主要由液压支架来承载的岩层厚度。

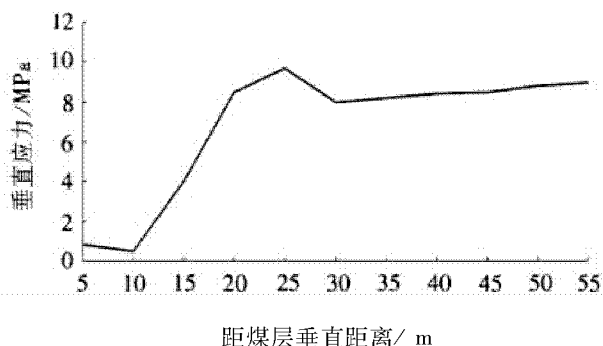


图 4 液压支架上方岩层垂直应力变化曲线

通过 UEDC 数值模拟,得到如下结论:

- 1) 1410 (1) 工作面老顶初次来压步距约为 32 m, 周期来压步距约为 16 m;
- 2) 工作面液压支架所需支撑的的最大岩层高

度约为 25 m;

3) 在工作面每天正常 8 m 的情况下,工作面压架的危险性较小。如果由于工作面设备故障原因,在工作面在推进到 32 m (初次来压)、48 m (周期来压) 应注意加强工作面顶板管理。

3 工程实践

3.1 测点的布置

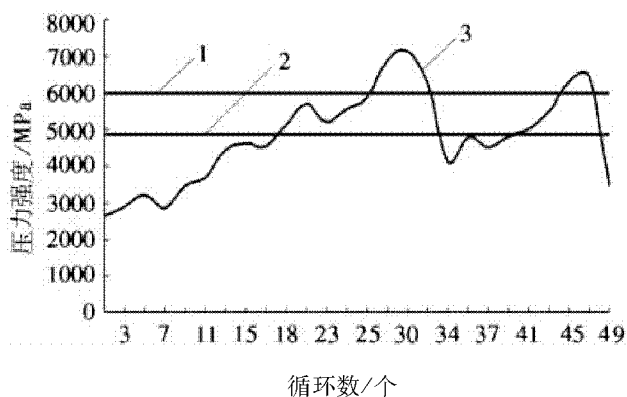
由 1410 (1) 和 1412 (8) 工作面位置关系图可知当工作面推进到 340 m 位置时,轨顺开始进入 1412 (8) 工作面的采空区,因此可以认为轨顺 340 m 之前处于非蹬阶段,之后处于蹬空阶段。

1410 (1) 工作面选用 ZZ7200/18/38 型液压支架,端头选用 ZZG7200/18/38 型过渡支架,回采期间沿工作面布置上 (70#、80#架)、中 (40#、50#、60#架)、下 (10#、20#、30#架) 3 个矿压观测站。选取轨顺 160 m、380 m、420 m 断面布置表面位移测点,作为蹬空与非蹬空对巷道影响的对比,每个断面布置 5 个测点,相邻测点间距 5 m,采用十字布点法观测。

3.2 结果分析

3.2.1 来压步距分析 以观测循环次数 (N) 和退尺数为横坐标,以各循环末阻力 p_m 、平均阻力 + 其一倍均方差与平均阻力为纵坐标,绘出支护阻力沿工作面推进方向的分布曲线 (见图 5);

以实测加权阻力平均值 p 加其一倍均方差 σ_p 为周期来压的判据 p' ^[4]。

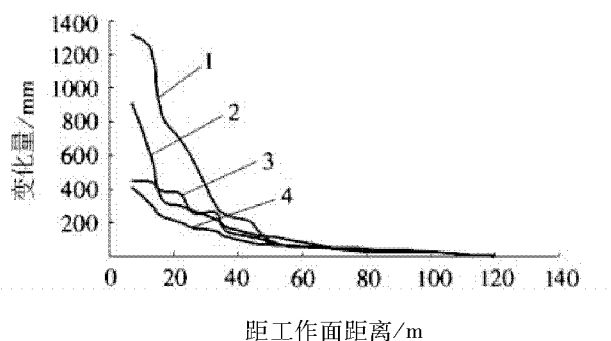


1. 平均值 + 一倍均方差; 2. 平均值; 3. 循环阻力

图5 沿工作面推进方向中间测站支架加权工作阻力总图

从图5可以看出大于判据 p' 的位置与顺序,在工作面推进至27~33个循环过程中,为工作面经历初次来压阶段,因为切眼为8m,所以来压步距为(21.6~24.8)m+8m,平均来压步距为31.6m,在工作面推进至43~52个循环时,工作面经历第一次周期来压,来压步距平均为15.7m。通过现场实测与数值模拟结果做对比,两者结果相互吻合。

3.2.2 巷道围岩表面位移 分析处于上提和蹬空段的巷道的表面位移变化量和变化速度,能够较为准确的反映工作面在回采过程中,受到上提和蹬空影响范围内巷道围岩的变形规律,为工作面确定超前支护距离、超前卧底距离及深度提供准确依据,确保巷道断面能够满足生产运输和通风的需要。回采期间轨道巷的表面规律如图6~图7,表3所示。



1. 非蹬空段顶底板; 2. 非蹬空段两帮; 3. 蹬空段两帮; 4. 蹬空段顶底板

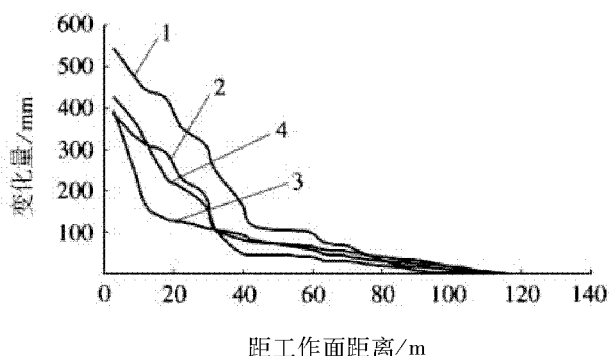
图6 蹬空段(40m处)与非蹬空段轨顺表面位移变化量对比

表3 巷道表面位移变化速度统计表

距离工作面 距离/m	非蹬空阶段		进入蹬空段40m处		进入蹬空段80m处	
	顶底板/(mm·d ⁻¹)	两帮/(mm·d ⁻¹)	顶底板/(mm·d ⁻¹)	两帮/(mm·d ⁻¹)	顶底板/(mm·d ⁻¹)	两帮/(mm·d ⁻¹)
15	71	62	376	315	66	53
20	80	83	370	248	56	40
25	62	24	277	70	109	100
30	54	54	275	55	64	85
35	20	78	89	83	78	55
40	17	53	81	81	55	10
45	17	15	77	75	25	8
50	3	8	60	33	23	5
55	2	2	51	16	14	5

由图6和表3可以看出,在进入蹬空段40m范围巷道表面位移累计变化量和变化速度都远大于非蹬空段。表3蹬空段顶底板位移速度最大可达376mm/d,非蹬空段最大仅为83mm/d;表面位移累计变化量方面蹬空段在距工作面距离5m位置时,蹬空段顶底板累计变化量最大为1324mm,两帮位移量为909mm,而非蹬空段在距工作面退

尺相同位置时顶底板位移变化量为409mm,两帮位移变化量为447mm。而当进入蹬空段80m范围时轨顺表面位移有所减小,但蹬空段表面位移变化量和变化速度依然大于非蹬空段轨顺表面位移量和位移速度,在此阶段蹬空段巷道顶底板最大位移速度为109mm/d,顶底板最大位移变化量为543mm,两帮最大移近量为384mm(见图7)。



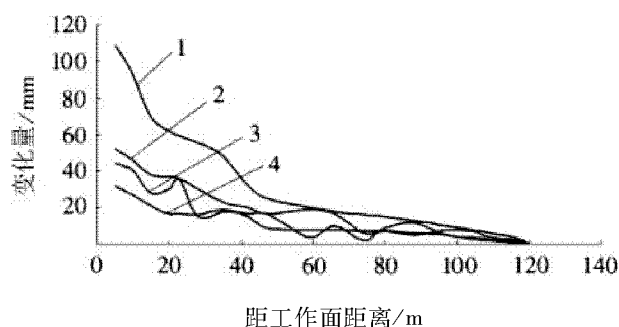
1. 蹬空段顶底板;2. 蹬空段两帮;3. 非蹬空段顶底板;
4. 非蹬空段两帮

图7 蹬空段(80 m处)与非蹬空段轨顺表面位移变化量对比

3.3 巷道围岩深部位移

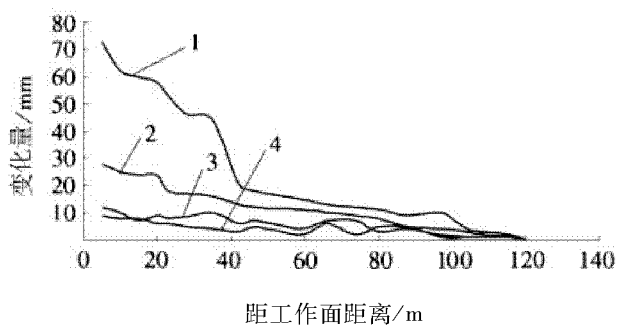
分析巷道两帮围岩的深部位移,可以判断煤体的松动破坏范围,为确定锚杆锚索支护长度提出依据^[5]。

巷道围岩深部位移规律如图8~图9所示。



1. 2 m;2. 4 m;3. 6 m;4. 8 m

图8 轨顺530 m(蹬空上提段)下帮深部位移变化曲线



1. 2 m;2. 4 m;3. 6 m;4. 8 m

图9 轨顺530 m(蹬空上提段)上帮深部位移变化曲线

工作面推进方向:随工作面的推进,在距工作面平均60 m左右处各基点位移变化开始明显,说明工作面前方60 m范围内受回采采动影响较明显(见图8~图9)。

垂直工作面推进方向:轨顺下帮深部2 m与4 m的位移变化发生了突变,最大值分别为109 mm和51 mm,相差58 mm(见图8);轨顺上帮深部2 m与4 m的位移变化发生了分离(见图9),最大值分别为73 mm和29 mm,相差44 mm,而4 m到更深处位移变化不是太大,由此可以判断巷道塑性区宽度在2~4 m之间,且下帮深部位移变化明显大于上帮深部位移变化。

4 结论

1) 通过计算机模拟和现场实测得出:1410(1)工作面老顶初次来压步距约为32 m左右,周期来压步距约为16 m左右。工作面液压支架所需支撑的最大岩层高度约为25 m。在工作面每天正常8 m的情况下,工作面压架的危险性较小。工作面在推进到32 m(初次来压)、48 m(周期来压)时应注意加强工作面顶板管理。

2) 轨顺在刚进入蹬空阶段时,巷道围岩的变形较为严重,随着工作面的回采,当轨顺完全进入蹬空段后,巷道围岩变形将有所减轻,但整体仍大于非蹬空阶段巷道的围岩变形量。轨顺巷道围岩在一定范围内发生分离(离层),松动区范围较大。

参考文献:

- [1] 杨本水,刘效云,尹纯刚,等. 上提采面矿压显现特征及其控制[J]. 矿山压力与顶板管理,2000(2):58-59.
- [2] 曹继生. 煤矿蹬空开采的探索研究与分析[J]. 山东煤炭科技,2009(3):112-113.
- [3] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:61-68.
- [4] 刘清利,李俊杰. 2307综采工作面矿压观测实践[J]. 科技情报开发与经济,2005,15(4):190-191.
- [5] 谢广祥,曹伍富,华心祝,等. 综放沿空掘巷矿压显现规律及支护参数优化[J]. 煤炭科学技术,2002,3(12):10-13.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

基于 BP 神经网络的工作面周期来压预测

贺超峰, 华心祝, 杨 科, 马菁花

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:针对现有工作面周期来压预测方法在算法结构复杂、计算量较大等问题,探索一种高效、准确、易于使用的工作面周期来压预测方法。以淮南潘集矿区 20 个已采工作面作为工程研究背景,采用 BP 神经网络预测原理,在分析工作面周期来压的影响因素基础之上,设计出一种基于 BP 神经网络的工作面周期来压预测方法,通过 MATLAB 编程实验表明 BP 神经网络在工作面周期来压的预测中具有较高的精度。

关键词:工作面周期来压;BP 神经网络;MATLAB 编程

中图分类号:TD844.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)01-0059-05

Forecast of Periodic Weighting in Working Face Based on Back-propagation Neural Network

HE Chao-feng, HUA Xin-zhu, YANG Ke, MA Jing-hua

(School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex algorithm structure and heavy workload of calculation in periodic weighting forecasting, a kind of high efficient, accurate and easy to use method of periodic weighting forecasting was developed. 20 working faces in Huainan Panji mining area were taken as study objects, adopting BP neural network principles, on the basis of analysis of influencing factors on periodic weighting, a kind of periodic weighting forecasting method based on BP neural network was developed. Experiments based on MATLAB programming showed that by BP neural network periodic weighting prediction is precisions.

Key words: periodic weighting; Back-propagation neural network; MATLAB programming

要实现工作面的安全高效生产,其周期来压步距及强度必须掌握。因此必须以科学的方法来正确预测周期来压步距及强度,传统的预测方法主要有:经验估算法、威尔逊估算法、老顶结构平衡关系估算法等。近几年来,人工神经网络在岩土工程中得到大量应用,用神经网络来预测工作面周期来压是一种新的尝试。周期来压规律直接影响工作面的安全与生产,对其来压步距及强度的预测具有实际意义。

1 工作面周期来压的影响因素分析

为了精确地预测工作面周期来压,首先应正确地分析其影响因素,影响工作面周期来压的因素主要有①采场顶板结构稳定性;②采深;③煤层倾角;④工作面长度。

1.1 采场顶板结构稳定性的影响

工作面周期来压实质是上覆岩层“板”或“梁”

结构经历“稳定-失稳-再稳定”的过程。文献[1]于 1981 年颁发了“缓斜煤层工作面顶板分类”试行

方案,方案中对老顶来压强度进行分级,分级结果如表 1 所示。

表 1 老顶来压强度分级表

分级	I 级	II 级	III 级	IV 级
来压显现	不明显	明显	强烈	极强烈
指标	$N > 3 \sim 5$	$0.3 < N < 3 \sim 5$ $L_0 = 25 \sim 50$	$0.3 < N < 3 \sim 5, L_0 > 50$ $N < 0.3, L_0 = 25 \sim 50$	$N < 0.3$ $L_0 > 50$

在此分类中量化老顶来压强度主要指标为直接顶厚度 Σh 与采高 M 的比值 N 及老顶来压步距 L_0 。

1) $N > 3 \sim 5$, 这种老顶的垮落或错动对工作面支架受力无多大影响,称为无周期来压或周期来压不明显的顶板;

2) $0.3 < N < 3 \sim 5$ 且 $L_0 = 25 \sim 50$ m, 这时老顶的失稳对工作面支架所受载荷有较为严重的影响,称为周期来压明显的顶板;

3) $0.3 < N < 3 \sim 5$ 且 $L_0 > 50$ m 或 $N < 0.3$ 、 $L_0 = 25 \sim 50$ m, 这时老顶的暴露与垮落都将对工作面安全产生严重影响,这种顶板称为周期来压严重的顶板;

4) $N < 0.3$ 且 $L_0 > 50$ m, 由于老顶特别坚硬,因而常能在采空区暴露上万平方米而不垮落。当其垮落时,则在工作面形成剧烈的矿山压力显现,这种顶板称为周期来压极强烈的顶板。

1.2 采深影响

从矿山岩体力学角度来分析工作面周期来压。周期来压是岩体应力场在开采空间周围重新分布的结果,铅直应力是岩体应力场的主要组成部分,铅直应力 $\sigma_x = \gamma H$, γ 为上覆岩层的平均体应力, kN/m^3 ; H 为开采深度,由此可见开采深度 H 是岩体应力场中的的重要参数,且 H 正比例于 σ_x ,随着采深的增加,工作面在周期来压期间的矿压显现也将较为强烈。

1.3 煤层倾角影响

煤层倾角对采场支承压力的影响是很大的。随着倾角 (θ) 的增加,采空区顶板冒落矸石不一定能在原地留住,很可能沿着底板滑移,采空区下部冲填较上部充分(见图 1),从而改变上覆岩层的运动规律。 θ 的增加会使工作面下部周期来压步距增加,强度降低;上部周期来压步距减小,强度升高。

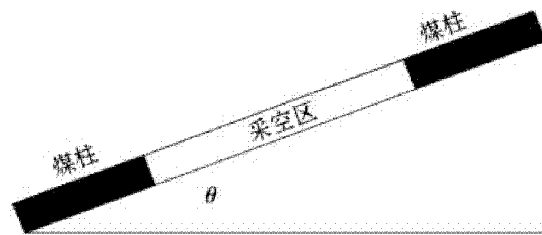


图 1 煤层倾角 θ 对工作面影响简化力学模型

1.4 工作面长度影响

工作面长度 (a) 对老顶断裂步距及其极暴露面积的影响均呈“W”形曲线关系,在顶板性质和开采边界条件一定的情况下,断裂步距总是随工作面长度增减在一条呈“W”形曲线上变化^[2]。所以工作面长度是影响采矿矿压显现的重要因素。

2 BP 神经网络原理

人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是对生理上真实的人脑神经网络的结构和功能及基本特征进行理论抽象、模拟和简化而构成的一种信息系统,ANN 作为一种并行分散处理模式,具有较强容错性、非线性映射和自适应学习的特点,可以应对多变的采场环境。在众多神经网络模型中,选用目前广泛使用多层前馈神经网络模型^[3] (Back-Propagation, BP),它是基于误差反向传播算法的一种多层前向神经网络,可以实现输入与输出间的任意非线性映射。

2.1 BP 算法

BP 算法作为人工神经网络的一种有监督学习 (Supervised Learning, LS) 算法,即误差反向传播算法,主要结构是由一个输入层,一个或多个隐含层,一个输出层组成,各层是由若干个神经元 (节点) 构成的,每一个节点输出值由输入值、作用函数和阈值决定 (见图 2)。

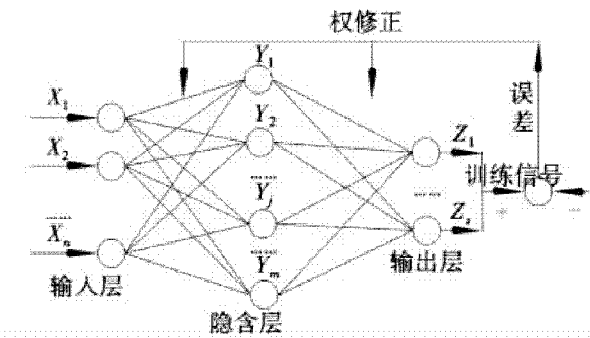


图 2 BP 神经网络训练过程原理图

BP 算法的基本思想^[4]是,学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成。正向传播时,输入样本从输入层传入,经各隐层逐层处理后,传向输出层。若输出层的实际输出与期望的输出不符,则转入误差的反向传播阶段。误差反传是将输出误差以某种形式通过隐含层向输入层逐层反传,并将误差分摊给各层的所有单元,从而获得各层单元的误差信号,此误差信号即作为修正各单元权值的依据。这种信号正向传播与误差反向传播的各层权值调整过程,是周而复始地进行的。

权值不断调整的过程,也就是网络的学习训练过程。此过程一直进行到网络输出的误差减少到可接受的程度,或进行到预先设定的学习次数为止。

2.2 激活函数

神经元在获到网络输入后,应该给出适当的网络输出信号。按照生物神经特性,每一个神经元有一个阈值,当该神经元获到的输入信号累积效果超过阈值时,就处于激发态,否则处于抑制态。用来对神经元的网络输入进行变换的函数,称为激活函数,典型的激活函数有线性函数、S 型函数、阶跃函数等。

3 网络模型构建与应用

利用淮南潘集矿区包括上提面在内的 20 个工作面矿压观测数据,选取 17 个作为训练样本(见表 2),对构建的网络进行学习训练,取余下的 3 个作为考核本系统的检验样本。学习完成后即建立了预测模型,然后对检验样本进行预测。

表 2 网络训练样本

样本	初次来压强度 /kN	初次来压步距 /m	采深 /m	倾角 /(°)	工作面长度 /m	比值 N	周期来压步距/来压强度 m/kN
1	5 892.00	32.50	-498.40	5.00	238.00	4.30	13.30/5 588
2	7 339.00	36.60	-608.00	7.00	240.00	3.70	15.40/7 651
3	8 437.00	37.70	-480.00	8.00	200.00	1.70	15.00/6 456
4	6 821.00	28.40	-424.00	8.50	120.00	2.70	16.20/8 335
5	10 012.00	33.30	-435.00	6.00	140.00	2.30	14.40/9 878
6	6 435.00	32.80	-546.00	9.00	145.00	4.20	12.70/6 775
7	5 541.00	28.70	-536.90	11.50	185.00	2.00	13.50/5 466
8	9 592.00	32.20	-747.00	5.00	203.00	1.50	9.40/9 810
9	7 764.00	28.90	-633.00	15.00	160.00	3.00	10.40/7 020
10	5 438.00	28.00	-673.00	7.00	180.00	3.40	12.40/6 551
11	5 939.00	30.00	-554.00	11.00	160.00	2.00	11.40/5 477
12	6 679.00	32.30	-660.00	8.50	240.00	3.50	13.40/6 889
13	7 892.00	29.00	-785.00	7.00	180.00	2.30	12.00/7 101
14	8 120.00	27.50	-538.00	5.00	150.00	1.50	10.00/8 599
15	7 571.00	28.50	-677.00	11.00	220.00	0.80	11.50/6 541
16	6 790.00	31.30	-680.00	9.00	175.00	2.10	9.80/5 449
17	7 546.00	27.50	-579.00	10.70	152.00	1.40	13.00/7 892

3.1 输入层和输出层

采深、倾角、采高、工作面长度、初次来压步距以及初次来压强度作为输入层节点,因此输入层节点数 $X=6$;选择工作面周期来压步距 L_m 和来压强度 Q_m 作为输出层节点,因此输出层节点数目 $Z=2$ 。由于样本各指标的量纲会对网络精度产生严重影响,必须进行标准化处理,其处理公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \{x_{ij}\}_{\min}}{\{x_{ij}\}_{\max} - \{x_{ij}\}_{\min}} \quad (1)$$

式中: $\{x_{ij}\}_{\min}$ 为第 j 个指标实测中最小值; $\{x_{ij}\}_{\max}$ 为第 j 个指标实测中最大值。

3.2 隐含层

隐含层节点数的确定是神经网络设计中非常重要的一个环节,究竟选取多少隐含层节点数比较合适,至今都没有一个很好的解析式来表达。当隐含层节点过少时网络从样本中获得的信息量少,不足以存储训练样本中蕴涵的所有规律;隐含层节点数目过多时,不但会延长训练时间,而且还可能把样本中的非规律内容也存储进网络,从而出现所谓“过度吻合”问题,反而使泛化能力降低,因此,一般的隐含层单元数只是一种粗略的估计值,可作为试凑法的初值^[5]。

1) 由经验公式确定。

$$Y = \sqrt{X \times Z} + \delta \quad (2)$$

式中: Y 为隐含层节点数; X 为输入层节点数; Z 为输出层节点数; δ 为 1~10 之间的取值。

2) 根据模型的输入层、输出层节点数目,改变 Y ,用同样的样本集训练,从中确定网络误差最小时对应的隐含层节点数为 5。

3.4 Matlab 的 BP 网络程序设计

3.4.1 程序算法

步骤 1 对 BP 网络初始化,确定输入样本数据矩阵 $P_{s \times n}$,其中 s 表示样本序列号, n 表示样本的指标序列号;

步骤 2 确定输入样本和相应的输出矩阵 $T_{n \times m}$,其中 m 表示输出层节点数目;

步骤 3 确定输入层采用线性激活函数,隐含层采用阶跃激活函数,输出层采用 S 型激活函数;

步骤 4 设定最大循环次数为 500、修正权值的学习率 lr 为 0.05、期望最小误差为 0.05 等,并用小的伪随机数对每层的权值和阈值进行初始化;

步骤 5 利用网络训练函数 trainrp、trainbfg、traingd 等训练神经网络;

步骤 6 判断误差函数 E 是否收敛到给定的学习精度以内,如果满足,则学习结束,否则,转向步骤 2 继续进行。

3.4.2 代码实现

//样本工作面的指标分别为:采深(m)、倾角(°)、比值、工作面长度(m)、初次来压步距(m)以及初次来压强度(kN)

;输入归一化处理后的输入矩阵 P

;输入期望输出的矩阵 T

net = newff (minmax (P'), [5,2], {'tansig', 'purelin'}, 'trainrp');

net.trainParam.lr = 0.05

net.trainParam.epochs = 500

net.trainParam.goal = 1e-5

[net, tr] = train (net, P', T');

;输入验证样本矩阵 Q

$B = \text{sim}(\text{net}, Q')$;

经过以上 Matlab 程序计算,构建的 BP 网络对检验样本的预测结果如表 3 所示。通过预测值与实测值之间的对比可以看出,运用该网络模型进行的预测具有很高的精度。

表 3 网络对检验样本的预测结果

序号	初次来压强度 /kN	初次来压步距 /m	采深 /m	倾角 /(°)	工作面长度 /m	比值 N	周期来压步距/来压强度 m/kN	
							实测值	预测值
1	6 590.00	31.60	-655.00	8.00	165.00	2.40	12.30/5 669.00	11.80/5 540.35
2	7 655.00	34.70	-554.00	10.00	240.00	1.40	13.70/7 034.00	14.10/7 102.94
3	8 431.00	29.50	-695.00	9.00	180.00	3.20	11.40/7 967.00	12.10/7 788.73

4 结论

在考虑工作面的主要影响因素的基础上,根据BP神经网络构建原理,利用淮南矿业集团潘集矿区17个工作面的实测数据,进行神经网络训练,并对3个工作面周期来压进行预测,通过预测值与实测值分析比较,证明BP神经网络在工作面周期来压的预测中具有相对较高的精度。

参考文献:

[1] 陈炎光,钱鸣高.中国煤矿采场围岩控制[M].徐州:

中国矿业大学出版社,1994:66.

[2] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:82.

[3] MCCLELLAND, RUMELHART. Parallel Distributed Processing[M]. Volume 2, MIT Press, 1986:92-97.

[4] 吴微.神经网络计算[M].北京:高等教育出版社,2004:9-15.

[5] 张德丰. MATLAB神经网络应用设计[M].北京:机械工业出版社,2009:33-34.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

(上接第38页)

参考文献:

[1] 袁东升,王德银,全洪昌,等.矿山热灾害防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008:1-2.

[2] 李伟,刘国庆.龙固矿井高温热害分析与综合治理[J].山东煤炭科技,2008(专刊):41-44.

[3] 王洪义,陈启永,刘桂平.平顶山矿区热害产生原因及治理对策[J].煤炭科学技术,2004,32(9):19-22.

[4] 袁文华,桂和荣.任楼煤矿地温特征及在水源判断中的应用[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2005,25(4):9-11.

[5] 朱绍军.新郑矿区地温异常及成因分析[J].煤矿安

全,2005,36(2):27-28.

[6] 谭静强,琚宜文,侯泉林,等.淮北煤田宿临矿区现今地温场分布特征及其影响因素[J].地球物理学报,2009,52(3):732-739.

[7] 李红阳,朱耀武,易继承.淮南矿区地温变化规律及其异常因素分析[J].煤矿安全,2007(11):68-71.

[8] 胡绍龙.刘庄井田地温分布规律及其因素分析[J].矿业安全与环保,2004,31(5):26-28.

(责任编辑:何学华,范 君)

利用 SF_6 示踪技术测试煤层瓦斯抽采半径

辛 明

(淮南东辰集团恒力伟业公司, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了合理布置煤层抽放钻孔数量, 采用 SF_6 示踪技术测定煤层瓦斯抽采半径。沿煤层布置一排试验钻孔, 选定其中某几个孔作为 SF_6 释放孔, 其余作为抽采试验孔, 在一定的抽采负压条件下, 通过观测抽采试验孔的瓦斯浓度随时间的变化情况, 可以确定煤层瓦斯抽采半径。在朱集矿的试验中, 通过一个月的连续观测, 测得该矿 11-2 煤层瓦斯抽采半径可以达到 5 m。利用 SF_6 示踪气体可以较好的测定煤层瓦斯抽采半径。

关键词: 瓦斯抽采; 示踪技术; 抽采半径

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0064-03

Determination of Gas Extraction Radius in Coal Seams by Tracer Technique with SF_6

XIN Ming

(Hengli Weiye Company, Dongcheng Group, HuaiNan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to rationally determine the number of boreholes for gas extraction in coal seams, gas extraction radius in coal seams was tested by using tracer technique with SF_6 . One row of testing boreholes in coal seam were performed, some of which are selected as SF_6 releasing boreholes, the rest as gas extraction boreholes. Under certain extraction depress in testing boreholes by observing gas concentration changes with time, gas extraction radius in coal seams was determined. In test in Zhuji Coal Mine, for one month of continuous observation, gas extraction radius in coal seam 11-2 was measured as 5 m. By using tracer technique with SF_6 , gas extraction radius in coal seams can be accurately determined.

Key words: gas extraction; tracer technique; extraction radius

煤层开采前采用煤层瓦斯抽采技术, 降低煤层瓦斯含量, 以使工作面开采后瓦斯在可控范围之内。煤层瓦斯抽采半径的确定, 为合理布置抽放钻孔数量提供了重要的科学依据。本文介绍采用 SF_6 示踪气体的方法, 方便快捷的确定煤层瓦斯合理抽放半径。朱集煤矿位于淮南潘谢井田境内, 煤层埋藏深、瓦斯含量高, 属高突瓦斯矿井, 为了提高 11-2 煤层瓦斯抽采效果, 矿上决定采用 SF_6 示踪技术测定煤层抽采半径。

1 SF_6 气体测煤层抽放半径的机理

1.1 示踪气体的选取

根据井下特殊的环境条件, 必须要求示踪气体

具有无毒、不爆等特点, 同时要求示踪气体本身化学性质稳定且易于检测, 释放的示踪气体必须满足以下条件:

- 1) 化学性质稳定, 在常温下不分解, 不与其他物质发生化学反应;
 - 2) 无毒、无腐蚀、不燃、不爆、无放射性、不溶于水;
 - 3) 色谱分析灵敏度高(最小检测浓度达到 10^{-10});
 - 4) 自然本底浓度低, 一般要求在 10^{-12} 以下。
- 根据以上原则, 选取 SF_6 为示踪气体。

1.2 测试机理

煤层中的瓦斯有两种存在形态: 即游离态和吸

附态。煤层进行瓦斯抽采时,煤层中的游离态瓦斯可通过煤层裂隙,沿着抽放钻孔被抽走,在这过程中吸附态瓦斯因抽采负压的作用,不断变成游离态瓦斯,使煤层瓦斯不断被抽出。评价煤层抽采难易程度是煤层透气性系数大小,这指标也是影响煤层抽采半径的关键因素。在抽采系统、抽采负压一定的前提下,煤层抽采半径与煤层透气性系数和抽采时间都有关系。在刚开始抽采的一段时间里,抽采半径随时间逐渐增加,一段时间后抽采半径趋于稳定值。

为测定11-2煤的抽采半径,事先在11-2煤1112(1)工作面运顺底板抽采巷选择测定区域,测定区域的选取原则要求避开特殊地质构造地带及采动影响区域。在选取的测定区域向11-2煤打抽排试验孔7个(见图1~图2),设计三组小钻场,每组间隔20m。1[#]孔为SF₆示踪气体释放孔,2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]为抽放检验孔。1[#]孔在释放SF₆示踪气体后封闭,同时2[#]~7[#]抽放检验孔接入地面瓦斯抽放管路进行抽采。在地面抽采负压的作用下,1[#]孔内SF₆气体会随着煤层瓦斯一起沿着煤层裂隙与孔隙流向各检测孔,并被地面抽放泵站抽走。由于瓦斯在煤层中流动受到阻力作用,地面瓦斯抽放泵站在一定系统抽采负压与抽采时间的前提下只能使一定范围煤体内的瓦斯被抽出,瓦斯在煤层因抽采而定向流动的最远点距抽放钻孔的距离为煤层瓦斯抽采半径。

为了更有效利用抽采半径的数据,本次测定了11-2煤层连续抽采1d、7d、15d及30d的抽采半径,以便为不同抽采时间条件下提供合理的11-2煤层的抽采半径。

2 测定方法

事先在所测定区域打好抽排孔,并且保留一个抽排孔不进行封闭,该孔用来释放SF₆气体。在释放SF₆气体后,用事先准备的黄泥对该孔进行封堵(防止SF₆气体从孔内溢出)。当释放一定量的SF₆气体之后,大约20~30min就可以通过地面抽排系统进行抽气。由于抽排孔能抽出游离的瓦斯,而SF₆具有优越的灵敏性,将会同游离瓦斯一起被抽出。此时就可以利用事先准备好的取样器、真空袋等一系列的设备进行取样进行化验分析。

SF₆示踪气体释放孔与检验钻孔布置如图1和图2所示。钻孔沿1112(1)运顺高抽巷向11-2煤布置,为下行孔。

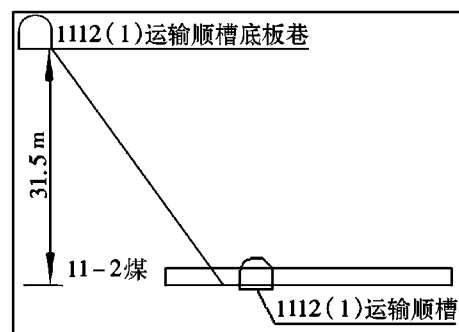


图1 1112(1)运顺高抽巷抽采半径测定钻孔布置剖面

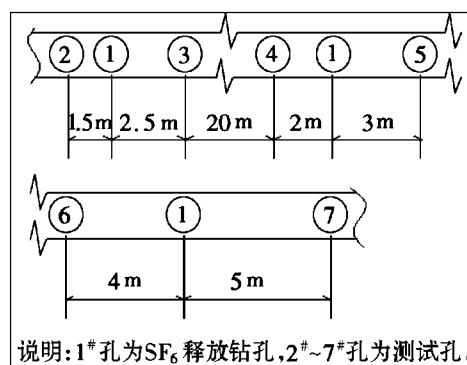


图2 1112(1)运顺高抽巷抽采半径测定钻孔布置图

施工组织安排要求:

1) 钻孔施工严格按照钻孔设计参数施工,确保钻孔施工质量;

2) 各项原始记录要及时、完整、清楚、正确,对开孔位置、岩孔长度、煤孔长度、终孔长度、施工时间、钻孔各段岩性、施工期间各种动力现象如喷孔、顶钻、夹钻等要详细记录。封孔确保严密,防止漏气影响测试结果;

3) 抽放主管处要安装孔板流量计或WGC瓦斯抽放管道参数测定仪等一些相关的仪器设备,观测抽放管路气体流量、温度和瓦斯浓度、抽放负压以及压差等相关参数。

3 测定结果及结果分析

在1[#]钻孔释放SF₆时间是2011年2月19日下午14:30,在1112(1)运顺高抽巷的2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]钻孔在合茬抽采后对卸压瓦斯抽采半径进行了测定,从即2月19日,在井下进行抽采1d、3d、7d、15d、25d等瓦斯抽放半径数据,测定结果如表1~表4所示。

表1 抽采1d 2[#]~7[#]钻孔及巷道 SF₆ 浓度测定表

时间	巷道 ×10 ⁻⁹	2 [#] ×10 ⁻⁹	3 [#] ×10 ⁻⁹	4 [#] ×10 ⁻⁹	5 [#] ×10 ⁻⁹	6 [#] ×10 ⁻⁹	7 [#] ×10 ⁻⁹
14:30	2.30	8.36	7.52	2.359	2.682	0.76	1.689
14:40	64.92	20.44	31.67	4.082	3.749	0.793	1.671
14:50	45.10	40.84	48.10	3.875	4.274	0.781	1.577
15:00	24.90	55.48	61.25	4.094	3.647	0.745	1.503
15:10	20.53	65.22	69.70	4.304	3.883	0.831	1.555
15:20	16.05	62.06	75.00	4.129	3.679	0.693	1.499
15:30	10.00	55.29	66.24	3.843	4.087	0.67	1.465

表2 抽采3d 2[#]~7[#]钻孔及巷道 SF₆ 浓度测定表

时间	巷道 ×10 ⁻⁹	2 [#] ×10 ⁻⁹	3 [#] ×10 ⁻⁹	4 [#] ×10 ⁻⁹	5 [#] ×10 ⁻⁹	6 [#] ×10 ⁻⁹	7 [#] ×10 ⁻⁹
14:30	0.567	1.231	3.117	21.65	24.20	4.053	5.56
14:40	7.018	6.773	23.38	23.37	25.27	4.086	5.542
14:50	17.45	27.17	39.81	23.17	25.80	4.074	5.448
15:00	13.10	41.81	52.96	23.38	25.17	4.038	5.374
15:10	5.474	51.55	61.41	23.59	25.40	4.124	5.426
15:20	5.219	48.39	66.71	23.42	25.2	3.986	5.37
15:30	2.132	41.62	57.95	23.13	25.61	3.963	5.336

表3 抽采15d 2[#]~7[#]钻孔及巷道 SF₆ 浓度测定表

时间	巷道 ×10 ⁻⁹	2 [#] ×10 ⁻⁹	3 [#] ×10 ⁻⁹	4 [#] ×10 ⁻⁹	5 [#] ×10 ⁻⁹	6 [#] ×10 ⁻⁹	7 [#] ×10 ⁻⁹
14:30	0.37	28.37	28.59	28.80	29.02	29.23	29.45
14:40	3.24	28.59	28.80	29.02	29.23	29.45	29.67
14:50	3.77	28.8	29.02	29.23	29.45	29.66	29.88
15:00	3.11	29.02	29.23	29.45	29.66	29.88	30.10
15:10	3.30	29.23	29.45	29.66	29.88	30.09	30.31
15:20	2.23	29.45	29.66	29.88	30.09	30.31	30.53
15:30	1.30	29.66	29.88	30.09	30.31	30.52	30.74

表4 抽采25d 2[#]~7[#]钻孔及巷道 SF₆ 浓度测定表

时间	巷道 ×10 ⁻⁹	2 [#] ×10 ⁻⁹	3 [#] ×10 ⁻⁹	4 [#] ×10 ⁻⁹	5 [#] ×10 ⁻⁹	6 [#] ×10 ⁻⁹	7 [#] ×10 ⁻⁹
14:30	2.30	8.362	7.515	2.36	2.68	0.76	1.69
14:40	64.92	20.44	31.67	4.082	3.749	0.793	1.671
14:50	45.10	40.84	48.10	3.875	4.274	0.781	1.577
15:00	24.90	55.48	61.25	4.094	3.647	0.745	1.503
15:10	20.53	65.22	69.70	4.304	3.883	0.831	1.555
15:20	16.05	62.06	75.00	4.129	3.679	0.693	1.499
15:30	10.00	55.29	66.24	3.843	4.087	0.67	1.465

根据每天监测到的 SF₆ 浓度增加幅度, 根据浓度增加幅度与抽采半径等比增加的原理, 可以推算出不同抽采时间条件下的抽采半径值(见表5)。

表5 抽采时间与抽采半径值一览表

抽采天数/d	抽采半径/m	备注
3	2.3	
7	3.1	
10	3.9	抽采孔之间煤质均匀性一致
15	4.4	
25	4.5	

根据表5 作出抽采半径与抽采时间关系见图3。

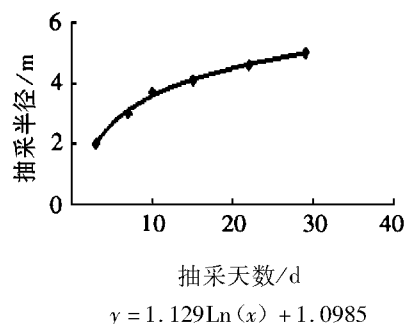


图3 抽采半径与抽采时间关系图

从图3 可知: 朱集煤矿 1112(1) 运顺高抽巷的 11-2 煤层, 在现有的抽采负压情况下, 抽采半径与抽采时间成指数关系。抽采半径与抽采时间关系图拟合出朱集煤矿 11-2 煤层抽采半径与抽采时间的关系为:

$$R = 1.129 \ln(x) + 1.0985$$

式中: R 为抽采半径, m; x 为抽采天数, d。

并从上式知, 当抽采时间超过一个月后, 抽采半径达到 5 m。

4 结语

1) SF₆ 作为示踪气体, 无毒, 性质稳定, 且易于检测。

2) 煤层瓦斯抽采半径的测定方法有多种, 利用 SF₆ 测试技术, 方法简单, 且测试结果较准确。

3) 本次试验只是基于一个特定的抽采负压条件下的煤层瓦斯抽采半径, 未进行不同抽采负压条件下的试验比较工作。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 73-85.
- [2] 姚尚文. 改进抽放方法提高瓦斯抽放效果[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 721-726.
- [3] 赵兴旗. 提高矿井瓦斯抽放效果的途径[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(5): 38-41.

(责任编辑: 姚多喜, 何学华)

煤层气化上覆岩层温度场分布规律研究

罗吉安^{1,2}, 张新亮³

(1. 安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 国家安全生产监督管理总局, 北京 100713)

摘要: 由于温度对岩石的影响作用, 高温下岩体的物理力学性能及破坏规律与常温下岩体的大不相同; 通过对气化炉上覆岩层岩石导热系数试验, 取得了不同温度下岩石的导热系数及规律方程, 采用 comsol 多物理场耦合软件进行传热数值计算。研究表明: 岩石的导热系数随温度增加呈下降趋势, 随岩性不同下降的速度基本相同; 在不同的温度下, 各岩性的导热系数有一定的差异。通过模拟软件的分析得到了煤层气化上覆岩层温度分布随高度方向变化的规律, 温度下降梯度随岩性不同而不同。这一结果为进一步研究煤炭地下气化上覆岩层强度变化及破坏规律提供了理论指导。

关键词: 岩层; 导热系数; 温度场; 模拟

中图分类号: TD823 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0067-04

Temperature Field Distribution in Overburden with Coal Seam Gasification

LUO Ji-an^{1,2}, ZHANG Xin-liang³

(1. School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China; 3. State Administration of Work Safety, Beijing 100713, China)

Abstract: Due to the effect of temperature on the rock, rock's physical and mechanical properties and destruction rules under the high temperature are different from that under normal temperature. Through the experiment on the coefficient of thermal conductivity of the overlying strata rock, we get the coefficient of thermal conductivity of the rock and rule equation under different temperatures. Using comsol multi-physical coupling software, we calculate the value of heat transfer. The result shows that: the thermal conductivity of rock declines with temperature increasing. The speeds of the decline are the same for different lithology. Under different temperatures, the thermal conductivity of the lithology is of certain differences. With the help of the simulation software, the variation rule of the temperature distribution of the overlying strata is obtained. Temperature gradients vary for different types of rock. The results provide theoretical guidance for further study on the strength variation and damage rule of the overlying strata in the process of underground coal gasification.

Key words: stratum; thermal conductivity; temperature field; simulation

目前, 国内外对砂岩、花岗岩在高温作用下的力学性质有所研究, 但对于煤层气化炉高温状态下煤系地层的岩体研究较少, 尤其是对温度场的研究较少, 本次试验以西部煤层顶板岩石试件为样本, 采用固体材料高温导热系数测定仪对岩石在高温状态导热系数进行试验测定, 通过数值模拟获得煤炭地下气化上覆岩层稳定温度场分布规律, 得到各高温参数随温度变化规律方程, 为进一步研究煤层

地下气化应力场和位移运移规律, 为地下气化的安全有效生产提供了理论指导^[1-11]。

1 岩样导热系数试验及结果分析

1.1 试件制备

选取长度大于 150 mm 的岩芯, 检查岩芯组织外观, 不得有天然缺陷。将选好的岩芯加工成为高

150 mm 的圆柱体,沿纵向切分成两块,两剖面合在一起无空隙。本实验选取的岩样岩性为顶板粉砂岩、顶板细砂岩、底板砂质泥岩、顶板泥岩、顶板粗砂岩、顶板砂质泥岩 6 种,每种岩性岩样选取 3 块进行实验。

1.2 试验装置及试验过程

实验所用仪器设备主要有 DRX - II 导热系数测定仪及测试控制软件系统、附件等。

在每次实验前将试样在 100 °C 恒温 2 h,将试样烘干,试验时先将试件加热到试验温度(50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 °C),而后由计算机实现全自动测试、计算岩石导热系数。

1.3 试验结果及分析

通过以上试验设备得到图 1 导热系数 λ 随温度的变化曲线。通过数据可以看出:不同岩性的岩样,在不同温度下导热系数的变化范围为 0.693 ~ 1.412 W/(m · K);不同岩性的岩样导热系数随着温度的升高基本上呈现下降趋势。

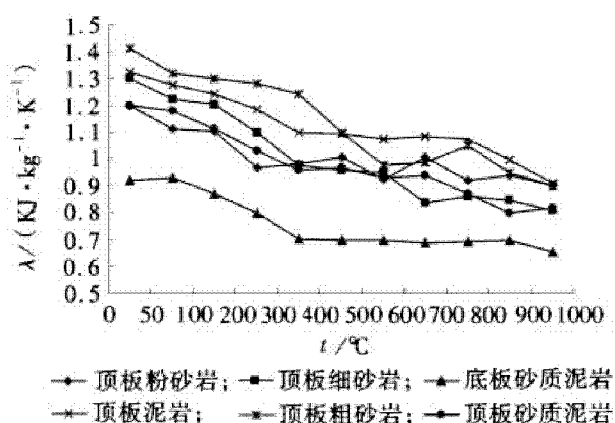


图 1 同岩性试样导热系数 λ 随温度的变化曲线

2 上覆岩层温度场分布数值模拟

COMSOL Multiphysics 是一款大型的高级数值仿真软件^[12],适用于模拟科学和工程领域的各种物理过程。本文采用 COMSOL 热传导模块(Heat Transfer Module)对煤炭地下气化上覆岩层温度场进行数值模拟,以得到上覆岩层温度梯度变化的规律。

2.1 计算模型

由于岩土是热的不良导体,高温气化炉上覆岩层温度变化主要靠热传导作用传递热量,根据温度扩散现场经验,采用计算模型尺寸为:240 m × 20 m

的平面模型;边界条件为周边温度为 20 °C。

2.2 模型网格划分

由程序将模型进行网格划分,网格点数 3302,三角形单元数 6511,边界单元数 1574,划分后的网格图像如图 2 所示,水平方向 X 代表岩体长度,垂直方向 Y 代表岩体高度,单位为 m。

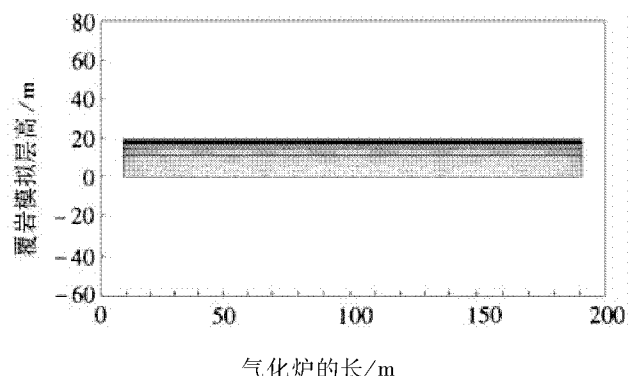


图 2 模型网格图

2.3 岩石热力学参数

通过 COMSOL 软件模拟过程中对求解域参数设定,可以将热传导参数随温度的变化方程代入到模拟的过程中,更真实的反应物理参数的实际情况,方程表达式见表 1。

表 1 导热系数随温度变化的拟合方程

岩性	导热系数
顶板粉砂岩	$\lambda = 1.18965 - 0.000600763 \times t + 3.41831 \times 10^{-7} \times t^2$
顶板细砂岩	$\lambda = 1.34053 - 0.00106 \times T + 5.48226 \times 10^{-7} \times t^2$
底板砂质泥岩	$\lambda = 0.97918 - 0.00075769 \times t + 4.66751 \times 10^{-7} \times t^2$
顶板泥岩	$\lambda = 1.23052 - 0.000666441 \times t + 2.54137 \times 10^{-7} \times t^2$
顶板粗砂岩	$\lambda = 1.43916 - 0.000742995 \times t + 2.13325 \times 10^{-7} \times t^2$
顶板砂质泥岩	$\lambda = 1.32811 - 0.000483141 \times t + 1.161 \times 10^{-7} \times t^2$

2.4 煤炭地下气化采场围岩温度场演化规律

气化采场顶板温度场对工作面前方“三带”的形成和超前支承压力的分布有显著影响,因此了解采场前方煤体内的温度场分布及规律具有重要意义。

义,温度场 COMSOL 数值模拟结果。

1) 温度场变化规律。通过 COMSOL 模拟得到图 3,沿走向所作气化采场围岩的垂直剖面内推进结束后的温度场变化云图,从图 3 可以看出煤层气化顶板上覆各岩层温度分布的规律变化,表 2 具体列举了气化炉上覆岩层温度划值。

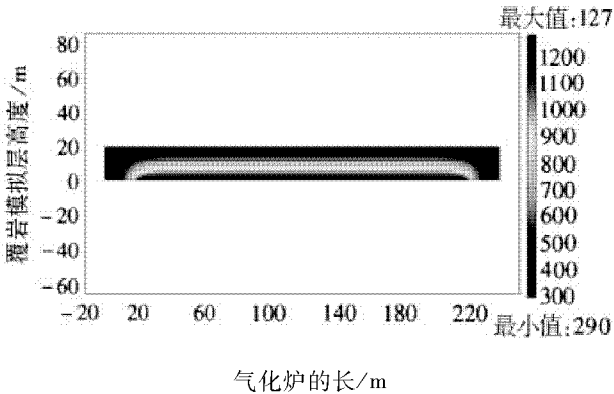


图 3 气化采场覆岩温度场云图

表 2 煤层顶板岩层温度值

层位	岩性	模型厚度 /cm	距离煤层 高度/m	层平均温度 /℃
11	泥岩	0.45	20	20
10	细粒砂岩	1.10	19.55	42
9	泥岩	0.60	18.45	80
8	粉砂岩	0.80	17.85	115
7	泥岩	2.55	17.05	189
6	煤层	2.9	14.5	307
5	泥岩	3.1	11.6	440
4	砂质泥岩	1.17	8.5	554
3	炭质泥岩	0.30	7.33	594
2	砂质泥岩	2.88	7.03	681
1	泥岩	4.15	4.15	880
0	煤层	8.45	0	1 000

2) 温度梯度变化规律。气化炉随着工作面煤体的燃烧,温度的变化随高度增加逐渐减小到常温;随着垂直高度的增加温度梯度逐渐减小,在垂直高度 12~14 m 附近温度梯度变化较大,此处是由于存在煤层的缘故,其热导系数变化特征和岩石存在差别,变化规律如图 4,图 5 所示。

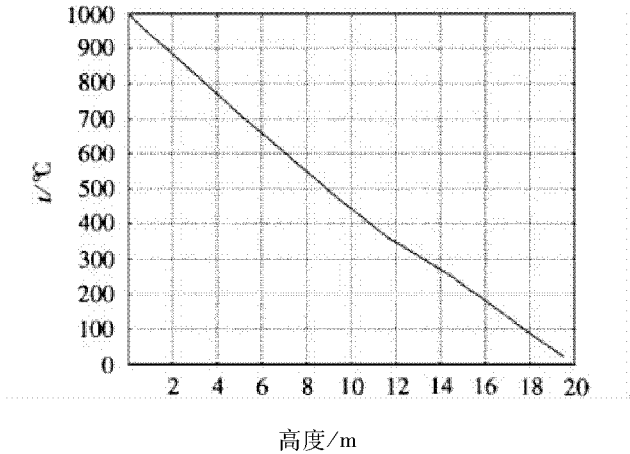


图 4 煤层顶板温度分布梯度线

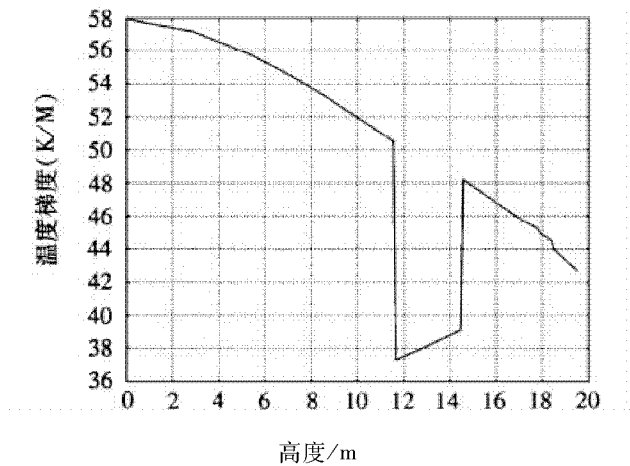


图 5 温度梯度变化曲线

3 结论

1) 各岩性的导热系数随温度的增加呈下降的趋势,随岩性的不同下降的速度基本相同;在不同的温度下,各岩性的导热系数有一定的差异;

2) 通过 COMSOL 数值模拟软件的计算得到了煤层气化上覆岩层温度分布准确值,温度随气化炉高度方向呈下降趋势,下降梯度随岩层不同而不同,为研究气化炉顶板高温强度及破坏奠定了重要基础;

3) 通过以上试验和数值模拟的研究,其温度场分布结果对研究上覆岩层强度变化具有重要意义,为今后研究复杂岩体温度场分布规律提供了方法。

参考文献:

[1] 张祖培. 煤炭地下气化技术[J]. 探矿工程, 2000 (1): 6-9.

[2] 杨兰和,梁杰,余力,等. 徐州马庄煤矿煤炭地下气化

- 试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25 (1): 87 - 90.
- [3] 杨兰和, 刘裕国, 江国. 倾斜煤层煤炭地下气化模型试验研究[J]. 中国矿业大学学报: 自然科学版, 2002, 31 (01): 10 - 13.
- [4] 王颖轶, 张宏君, 黄醒春, 等. 高温作用下大理岩应力一应变全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 22 (21): 2 345 - 2 349.
- [5] HOMAND - ETIENNE F, HOUPERT R. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1989, 26 (2): 125 - 134.
- [6] 徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. 中国矿业大学学报: 自然科学版, 2008, 37 (3): 402 - 406.
- [7] 谢卫红. 温度载荷作用下岩石变形破坏的力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学理学院, 2004.
- [8] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (14): 2 359 - 2 364, (Du Shouji, Liu.
- [9] 李传统, 彭伟. 热工学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 10 - 100.
- [10] 贾力, 方肇洪. 高等传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 9 - 180.
- [11] 马慧, 王刚. COMSOL Multiphysics 基本操作指南和常见问题解答[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 2 - 80.
- [12] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 22 (3): 332 - 335.

(责任编辑: 李 丽, 范 君)

欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》, 欢迎投稿

《安徽理工大学学报(自然科学版)》1981 年创刊, 季刊, 每期定价 5.00 元, 全年定价 20.00 元。《安徽理工大学学报(自然科学版)》为安徽理工大学主办的综合性学术刊物, 主要刊载地质工程、环境工程、测绘工程、采矿工程、安全工程、信息管理与信息系统、土木工程、建筑学、机械工程、测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、计算机科学与技术、矿物加工工程、化学工程与工艺、弹药工程与爆炸技术、制药工程、信息与计算科学、应用物理学、医学以及相关基础学科的学术论文和最新研究成果等。

本刊国内外公开发行人, 侧重体现本校特色, 面向国内外组稿。本刊是《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊, 美国《化学文摘》(CA) 源期刊, 美国《剑桥科学文摘》(CSA) 源期刊, 俄罗斯《文摘杂志》(VINITI) 源期刊, 《中国科技论文统计》源期刊, 《中文科技期刊数据库》源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊, 此外, 我刊还是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊和《万方数据——数字化期刊群》上网期刊。另外, 我刊和全国各高校学报、科研院所出版的刊物均有学术交流, 凡被本刊发表的研究成果及论文, 能很快地传播并及时为国内外同行专家引用。

本刊参加全国非邮发报刊联合征订, 请读者向天津市大寺泉集北里别墅 17 号(邮编 300385) 天津市河西区联合征订服务部直接汇款订阅, 不必先索取订单, 由本刊负责将刊物寄给订户。也可直接向本刊订阅, 由邮局汇款到安徽省淮南市安徽理工大学学术出版中心。

邮政编码: 232001

电 话: 0554-6668044

E - mail: xbzrb@ aust. edu. cn

直流电机与液力耦合器联合工作特性研究

刘广胜, 栾振辉, 丁虹

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了减少直流电机启动时大电流的作用时间, 在电机和负载之间增加液力耦合器降低电机过热烧毁的危险。通过对直流电机和液力耦合器特性的分析, 建立直流电机单独工作、直流电机-液力耦合器联合工作情况下的数学模型。运用 Matlab 软件作系统仿真, 绘制系统运行的电流 I 、输出转速 n 、输出转矩 T 的特性曲线图。通过对特性曲线的分析可以得出, 电机与液力耦合器联合工作降低了启动电流和启动转矩, 减少了电机过流过热和启动转矩对设备零部件冲击破坏的风险, 设备抗振动能力提高, 对安全作业具有指导意义。

关键词: 直流电机; 液力耦合器; 联合工作特性

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0071-04

Joint Working Characteristics of DC Motor with Hydraulic Coupling

LIU Guang-sheng, LUAN Zhen-hui, DING Hong

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to reduce time of large startup current acting on DC motor, a hydraulic coupling is added between motor and load to reduce the risk of motor overheating. Based on analysis of the characteristics of hydraulic Coupling and DC-motor, mathematical models were established for separate working of DC motor and joint working of hydraulic coupling with DC-motor. With simulation software Matlab, graphs are drawn as characteristics of current I and rotation speed n and torque T . On the basis of analysis of the characteristics, it is shown that joint working of DC-motor with hydraulic coupling makes starting-up current and torque decrease, which reduces risk of over-current or over-load. It improves antivibration ability of equipment, and provides a guidance to work safety.

Key words: DC-motors; hydraulic coupling; joint working characteristic

直流电机直接驱动负载时, 电机的启动电流大, 启动时间长, 常常导致电机过流过热, 系统运行的安全性受到威胁。如果在电机与负载之间增加液力耦合器, 电机轻载启动, 启动迅速, 启动电流较小, 系统运行更加平稳^[1]。所以在实际生产中, 通常采用电机与液力耦合器联合工作方式, 以确保生产设备安全运行^[2]。本文重点分析直流电机和液力耦合器联合工作的输出特性, 为在实际生产中控制设备的启动及运行提供依据。

1 直流电机的机械特性

电机的转速和电磁转矩之间的关系称为电机的机械特性, 是直流电机的主要特性, 表示为函数 $n = a - bT$, 其中 n 是电机的转速, T 是电磁转矩^[3], a, b 是电机的特性参数。

1.1 直流电机的启动电流

直流电机启动的瞬间, 电枢是静止的, 即 $n =$

0, 没有感应电动势, 通过电枢的电流

$$I = \frac{U}{R_a} \quad (1)$$

式中: U 为电压; R_a 为电枢电阻。电枢电阻 R_a 一般很小, 只有 $0 \sim 2\Omega$, 所以启动电流很大。根据 $E = I^2 R_a t$, 大电流长时间作用于电枢, 电枢温度很快升高, 可能导致烧毁。

1.2 直流电机的启动转矩

直流电机的输出转矩为

$$T = C_T \Phi I \quad (2)$$

式中: C_T 为转矩系数; Φ 为磁通。由式(2)可知, 电磁转矩 T 与电流 I 成正比。电机启动电流很大, 启动转矩也很大, 是额定转矩的十几倍甚至几十倍, 因此负载受到的冲击应力巨大, 易造成设备损坏。

1.3 直流电机的转速、转矩关系

他励直流电机的电源电压、磁通为额定值, 机械特性比较简单。当电枢回路不串接附加电阻时称为固有机械特性, 可表示为^[3]

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3)$$

式中: U_N 为额定电压; Φ_N 为额定磁通量; C_e 为电动势系数。

1.4 直流电机直接驱动负载的仿真模型

由式(2)(3)可得直流电机的输出特性。下面分析直流电机直接驱动一转动惯量为 J 的简单惯性系统, 利用 Matlab 软件建立仿真模型(见图1)。Scope_n、Scope_T、和 Scope_I 分别是电机的转速输出、转矩输出和电流输出。

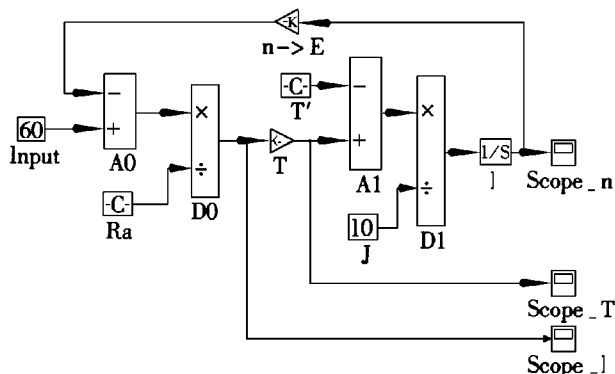


图1 电机直接驱动负载 Matlab 仿真模型

2 液力耦合器的机械特性

液力耦合器是一种利用液体介质传递转速和扭矩的机械设备, 其主动轮泵轮输入轴端与电机相联结, 从动轮涡轮输出轴端与负载联结。泵轮驱动工作介质循环时, 把原动机的机械能转化为工作介质的动能; 工作介质携带动能在进入涡轮后, 对涡轮做功, 推动涡轮旋转, 工作介质的动能又转化为输出端的机械能^[4]。

液力耦合器的输出扭矩计算方程为^[5]

$$T_1 = \rho g \lambda_T n^2 D^5 \quad (4)$$

式中: ρ 为工作介质的密度; n 为泵轮转速, 与电机的输出转速相等; D 为循环有效直径; λ_T 为涡轮扭矩系数, 其值按式(5)计算

$$\lambda_T = \frac{\psi a_2 AB}{30g} \frac{\pi^3}{120} (a_2^2 - a_1^2) \sqrt{\frac{(1 - i^2)(1 - a^2)}{\lambda}} \quad (5)$$

式中: ψ 为流道截面排挤系数; a_1 为泵轮入口直径系数; a_2 泵轮出口直径系数; A 过流断面有效半径系数; B 为过流断面有效长度系数; i 为涡轮转速与泵轮转速之比; a 为泵轮入口半径与出口半径之比。

3 直流电机与液力耦合器工作仿真模型

由电机的特性方程和液力耦合器的特性方程即可得到联合工作的方程

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_0 \quad (6)$$

$$T_1 = \rho g \lambda_T n^2 D^5 \quad (7)$$

利用 Matlab 软件, 对直流电机-液力耦合器联合驱动转动惯量为 J 的简单惯性系统建立仿真模型(见图2)。Scope_n、Scope_T 和 Scope_I 分别是电机的转速输出、转矩输出和电流输出。

4 实例

电池电压为 60 V, 额定电流 10 A, 电机电枢绕组的电阻为 0.208Ω , $C_e \Phi_N = 0.05$, $C_T \Phi_N = 1.24$, 电机轴承阻尼为 0.01 Nm , 负载的转动惯量 10 kgm^2 , 负载系统阻尼 1.6 Nm , 液力耦合器循环有效直径 0.1 m , 扭矩系数 $2 \times 10^{-5} \times (1 - i^2)^{1/2}$ 。

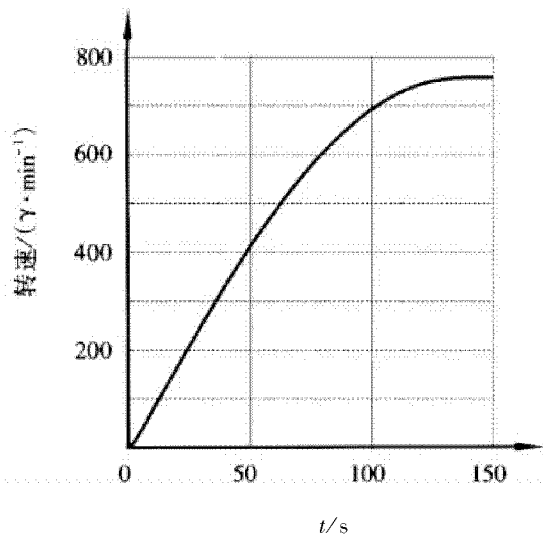


图7 电机-液力耦合器联合驱动负载转速曲线

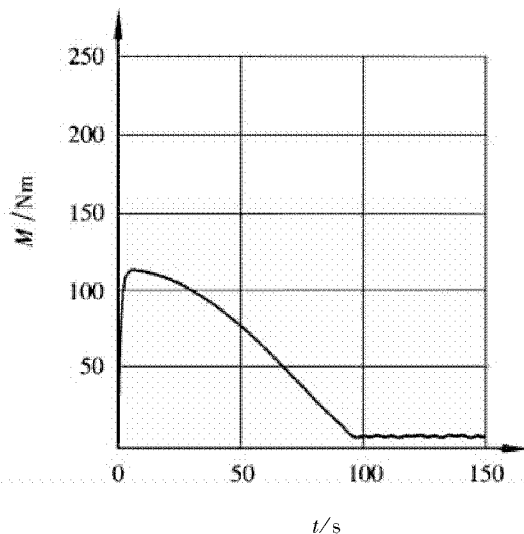


图8 电机-液力耦合器联合驱动负载转矩曲线

从图3可以看出,电机直接驱动负载时,启动电流大,且持续时间较长,超出电池额定电流10 A的时间长达100多秒,这样很容易导致电池和电机电枢的过流过热。而从图6可以看出,电机-液力耦合器联合工作的启动时间很短,不到5 s的时间,电流就降低到10 A以下,电机启动过程的发热很少,对电机的安全运行和寿命延长都有积极的作用。图4、图7的转速曲线区别不大,电机-液力耦合器联合工作时,系统可以较快到达额定转速。从图5和图8可以看出,电机直接驱动负载时的启动转矩很大,而电机-液力耦合器联合工作时的启动转矩从0开始逐渐增大,最大转矩也只有前者的一半左右。

5 结语

运用Matlab软件,对电机直接启动负载和电机与液力耦合器联合启动负载进行仿真分析,得到电流、转速和转矩的特性曲线。对比特性曲线可以看出,电机与液力耦合器联合启动负载比电机直接

启动负载具有以下优点:启动电流小,可防止过流过热;更容易到达额定转速;可降低启动转矩,减小启动时带来的刚性冲击。因此,使用电机-液力耦合器联合工作的驱动方式,提高了设备启动的可靠性和安全性。

参考文献:

- [1] 杨旭彬. 液力耦合器在煤矿的应用[J]. 机械管理开发, 2011(1): 126-129.
- [2] 邢小聪, 程秀芳. 电机与液力传动联合工作特性分析[J]. 煤矿机械, 2011(1): 98-100.
- [3] 何巨兰. 电机与电气控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 2-80.
- [4] 杨乃乔. 液力耦合器应用于风机的节能减排效果[J]. 风机技术, 2010(6): 53-55.
- [5] 马文星. 液力传动理论与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 10-100.

(责任编辑: 李 丽, 范 君)

有限 p -幂零群的一个刻画

顾江永

(宿迁学院教师教育系, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 利用有限群 G 的 Sylow p -子群的极大子群给出了有限群成为 P -幂零群的一个充分条件: 若 G 的 Sylow p -子群 P 的所有极大子群在 G 中 s -半正规, 则 G 为 P -幂零群。同时, 推广了有关 P -幂零性的几个已知结果。

关键词: p -幂零群; 极大子群; s -半正规子群

中图分类号: O152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)01-0075-02

A Characterization of Finite p -nilpotent Groups

GU Jiang-yong

(Department of Teacher Education, Suqian College, Suqian Jiangsu 223800, China)

Abstract: By using the maximal subgroups of Sylow p -subgroups of G , sufficient conditions of a finite group being p -nilpotent is given: let P is the Sylow p -subgroups of G , if all the maximal subgroups of P is s -seminormal subgroups in the group of G , then G is p -nilpotent group, and which generalize some known results on this topic.

Key words: p -nilpotent groups; maximal subgroups; s -seminormal subgroups

本文涉及的群均为有限群, 所使用的符号及定义如文献[1]¹³⁰⁻¹⁵⁸所示。

设 G 为有限群, $1 = G_0 \triangleleft G_1 \triangleleft \cdots \triangleleft G_{n-1} \triangleleft G_n = G$ 是 G 的一个正规群列。若 G_i/G_{i-1} 包含在 G/G_i ($i = 1, 2, \cdots, n$) 的中心内, 则称这个群列为 G 的一个中心群列。具有中心群列的(有限)群称为幂零群。设 $H \leq G$, 对于群 G 的任一子群 K , 只要 $(|H|, |K|) = 1$, 就有 $HK = KH$, 则称 H 是半正规的; 若对于任意的素数 $p \mid |G|$, 只要有 $(|H|, p) = 1$, 就有 $HP = PH$, 其中 P 为 G 的 Sylow p -子群, 则称 H 是 s -半正规的^[2]。

利用子群的一些特性来研究群的结构是一种常用的方法, 素数阶子群, 极大子群等对研究群的 p -幂零性起着非常重要的作用。例如: 文

献[1]¹⁴⁴中证明了若奇数阶群 G 的所有极小子群在 $Z(G)$ 中, 则 G 是 p -幂零群; 文献[3]利用极小子群的拟正规性得到了有限群 p -幂零性的充分条件等。本文利用 Sylow p -子群的极大子群给出了有限群成为 p -幂零群的充分条件, 推广了有关 p -幂零性的几个已知结果。

1 预备知识

引理 1^{[1]34} 设 $H \leq G$, 则 $N_G(H)/C_G(H)$ 同构于 $\text{Aut}(H)$ 的一个子群。

引理 2^[4] 设 G 为有限群, P 为 G 的 s -半正规子群。

1) 若 $P \leq H \leq G$, 则 P 在 H 中 s -半正规。

2) 若 P 为 p -群, $N \triangleleft G$, 则 PN/N 在 G/N 中

s - 半正规。

引理 3^{[1]142-143} 设 G 为内幂零群, 则 $|G| = p^a q^b$, $p \neq q$ 均为素数, 且适当选择符号便有 G 的 Sylow p - 子群 $P \triangleleft G$ 。

2 主要结果

定理 1 设 G 为有限群, p 为 $|G|$ 的最小素因子, P 为 G 的 Sylow p - 子群。若 P 是循环群, 则 G 为 p - 幂零群。

证明 因为 $P \leq G$, 所以由引理 1 知, $N_G(P)/C_G(P)$ 同构于 $\text{Aut}(P)$ 的一个子群。设 $|P| = p^n$, 因为 P 是循环群, 所以 $|\text{Aut}(P)| = \varphi(p^n) = p^{n-1}(p-1)$ 。又因为 $P \leq C_G(P)$, 所以 p 不整除 $|N_G(P)/C_G(P)|$, 由题设 p 为 $|G|$ 的最小素因子, 得 $|N_G(P)/C_G(P)| = 1$, 从而 $N_G(P) = C_G(P)$ 。

考虑映射 $V_{G \rightarrow P}$, 设 $1 \neq h \in P$, 由 $P' = 1$, 得

$V_{G \rightarrow P}(h) = \prod_{i=1}^t x_i h^{f_i} x_i^{-1}$ 。由 $h^{f_i} \in P$ 和 $x_i h^{f_i} x_i^{-1} \in P$, 且 P 可交换知, $P \leq C_G(h^{f_i})$, $P \leq C_G(x_i h^{f_i} x_i^{-1})$, 故 $P \leq x_i C_G(h^{f_i}) x_i^{-1}$, 所以 $C_G(h^{f_i}) \geq x_i^{-1} P x_i$ 。这就是说在 $C_G(h^{f_i})$ 中有两个 G 的 Sylow p - 子群 P 和 $x_i^{-1} P x_i$ 。由 Sylow 定理, 存在 $g \in C_G(h^{f_i})$ 使得 $g^{-1} P g = x_i^{-1} P x_i$ 。从而 $x_i g^{-1} \in C_G(P) = N_G(P) \leq C_G(h^{f_i})$, 所以 $x_i \in C_G(h^{f_i})$, 即 $x_i h^{f_i} x_i^{-1} = h^{f_i}$ 。故

$V_{G \rightarrow P}(h) = \prod_{i=1}^t h^{f_i} = h^{|G:P|}$ 。因为 $(p, |G:P|) = 1$,

且 $h \neq 1$, 所以 $V_{G \rightarrow P}(h) \neq 1$ 。从而 $V_{G \rightarrow P}$ 是单射。又因为 P 是有限群, 所以 $V_{G \rightarrow P}$ 也是满射。故 $V_{G \rightarrow P}(P) = P$ 。由 $C_G(P) = N_G(P)$ 知 P 为交换群, 故由同态基本定理^{[1]14} 知 $\text{Ker}(V_{G \rightarrow P})$ 是 G 的正规 p - 补, 所以 G 为 p - 幂零群。

定理 2 设 G 为有限群, p 为 $|G|$ 的最小素因子, P 为 G 的 Sylow p - 子群。若 P 的所有极大子群在 G 中 s - 半正规, 则 G 为 p - 幂零群。

证明 假设定理不成立, 即 G 不是 p - 幂零群, 且 G 为极小阶反例。

1) 先证 $O_p(G)$ 是 G 的唯一极小正规子群, 且 $\Phi(O_p(G)) = 1$ 。假设 $\Phi(O_p(G)) \neq 1$, 考虑商群 $G/\Phi(O_p(G))$, 由引理 2 知 $P/\Phi(O_p(G))$ 的极大子群在 $G/\Phi(O_p(G))$ 中 s - 半正规, 由 G 的极小性

知, $G/\Phi(O_p(G))$ 为 p - 幂零群。又因为 $\Phi(O_p(G)) \leq \Phi(G)$, 所以 $G/\Phi(G)$ 为 p - 幂零群, 从而 G 为 p - 幂零群, 矛盾, 故 $\Phi(O_p(G)) = 1$, 且 $O_p(G)$ 为初等交换群。

设 N 为任一包含于 $O_p(G)$ 的 G 的极小正规子群, T/N 为 G/N 的正规 p - 补。由 Schur - Zassenhaus 定理知, $T = NH$, 其中 H 为 G 的 $\text{Hall}_{p'}$ - 子群。再由 Frattini 论断得, $G = NN_G(H)$ 且 $O_p(G) = N(O_p(G) \cap N_G(H))$ 。若 $N \neq O_p(G)$, 则 $O_p(G) \cap N_G(H) \triangleleft N_G(H)$, 且 $O_p(G) \cap N_G(H) \neq 1$ 。因为 $O_p(G)$ 为初等交换群, 所以 $O_p(G) \cap N_G(H) \triangleleft G$, 矛盾。故 $N = O_p(G)$, 即 $O_p(G)$ 是 G 的唯一极小正规子群。

2) 再证 $O_{p'}(G) = 1$, $O_p(G) \neq 1$ 。假设 $O_{p'}(G) \neq 1$ 。考虑商群 $G/O_{p'}(G)$, 易知 $PO_{p'}(G)/O_{p'}(G)$ 是 $G/O_{p'}(G)$ 的 Sylow p - 子群。由引理 2 知, $PO_{p'}(G)/O_{p'}(G)$ 的极大子群在 $G/O_{p'}(G)$ 中 s - 半正规。再由 G 的极小性知, $G/O_{p'}(G)$ 是 p - 幂零群。所以 G 为 p - 幂零群, 矛盾。故 $O_{p'}(G) = 1$ 。

因为 G 不是 p - 幂零群, 所以存在 P 的非平凡特征子群 M , 使得 $N_G(M)$ 不是 p - 幂零群^[2]。若 $N_G(M) < G$, 因为 $P \leq N_G(M) < G$, 所以由引理 2 知 P 在 $N_G(M)$ 中 s - 半正规, 再由 G 的极小性知, $N_G(M)$ 为 p - 幂零群, 矛盾。从而 $N_G(M) = G$, 所以 $O_p(G) \neq 1$ 。

3) G 的 p - 幂零性。考察商群 $G/O_p(G)$, 由 G 的极小性知, $G/O_p(G)$ 是 p - 幂零群。设 $H/O_p(G)$ 为 $G/O_p(G)$ 的正规 p - 补。由 Schur - Zassenhaus 定理知, 存在 H 的 $\text{Hall}_{p'}$ - 子群 H_1 , 使得 $H = O_p(G)H_1$ 。再由 Frattini 论断可知, $G = O_p(G)N_G(H_1)$ 。设 $P_1 (< P)$ 是 $N_G(H_1)$ 的 Sylow p - 子群, 则存在 P 的极大子群 T_1 , 使得 $P_1 \leq T_1$ 。因为 T_1 在 G 中 s - 半正规, 所以 $T_1 N_G(H_1) = T_1 H_1 \leq G$ 。又 $|G:T_1 H_1| = p$, 由引理 3 知 $T_1 H_1 \triangleleft G$ 。因为 $G = O_p(G)N_G(H_1)$, 所以 $G = O_p(G)(T_1 H_1)$ 。又 $O_p(G)$ 是 G 的唯一极小正规子群, 故 $O_p(G) \cap T_1 H_1 = 1$ 。从而 $T_1 H_1 \cong G/O_p(G)$, $H_1 \triangleleft G$, $T_1 H_1$ 是 p - 幂零群, 所以 G 为 p - 幂零群。

化妆品过敏原皮肤斑贴试验的临床研究

朱晓敏, 张晓军, 何韶衡

(江苏省人民医院临床实验研究室, 江苏 南京 210029)

摘要:研究的目的是查找出化妆品中易导致人体化妆品皮炎的原料成分,以减少化妆品皮炎的发生几率。采用临床试验筛选研制出的过敏原60种,然后将其中20种过敏原作为实验组和瑞典化学诊断试剂公司生产的“瑞敏”相同成分20种过敏原作为对照组,为临床疑因接触化妆品而导致的过敏性皮炎患者做斑贴试验。156例患者使用研制的60种过敏原斑贴试验有145例出现阳性反应,总阳性率92.95%;其中有9种过敏原斑贴试验的阳性率超过10%。50例患者用研制的20种过敏原与“瑞敏”20种相同成分过敏原对照斑贴试验,结果完全一致的37例,占74%。206例患者均没有出现不良反应。本试验的60种化妆品筛选过敏原用于临床斑贴试验安全、有效。

关键词:化妆品;过敏原;斑贴试验

中图分类号:R758.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)01-0077-04

Clinical Study on Cosmetic Allergens by Skin Patch Test

ZHU Xiao-min, ZHANG Xiao-jun, HE Shao-heng *

(Clinical Research Centre, the People's Hospital of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu 210029, China)

Abstract: The purpose of the study is by examining potential allergens in cosmetics, to reduce incidence of dermatitis. Skin patch test was performed for the patients with cosmetic dermatitis by using clinically selected 60 candidate allergens. Among them, 20 allergens were compared with the same allergens from Chemotechnique Diagnostics, Sweden. 145 of 156 patients treated with the above 60 candidate allergens showed positive skin reactions, which counts for 92.95% of total patients examined. For 9 of 60 allergens, the rate of positive results exceeded 10%. Furthermore, skin patch test to 50 patients was performed with our own 20 allergens and with the same allergens purchased from Chemotechnique diagnostics, Sweden. The results showed that 37 of 50 patients (counting for 74%) have similar positive skin reaction to the same allergens from two different sources. None of the 206 patients had skin adverse reaction. The selected 60 different cosmetic candidate allergens for patch test are safe and effective for clinical use.

Key words: Cosmetics; allergen; patch test

随着化妆品市场的日益繁荣,化妆品导致的化妆品皮炎的报告也随之增多^[1-2]。近年来通过对化妆品品种的分析,筛选出60种化妆品中的常用成分^[3-4],将其研制成适用于皮肤斑贴试验的过敏原,以筛查出易导致人体化妆品皮炎的化妆品成分,为化妆品研发机构和使用者提供帮助。

1 材料与方法

1.1 过敏原及斑试器

研制过敏原60种,分三组,每组20种,其具体成分如表1所示。实验组过敏原20种(为研制过

敏原 60 种中的与对照组 20 种成分相同的过敏原)。对照组“瑞敏”过敏原 20 种(由瑞典化学诊断试剂公司提供),具体成分如表 2 所示。

斑试器为聚丙烯小室,有效接触面积为 50 mm^2 【由芜湖润敏江生物科技公司提供】。

1.2 受试者

2010 年 6 月至 12 月来我院就诊的临床疑因接触化妆品而导致的过敏性皮炎,包括诊断明确的接触性皮炎,湿疹等临床疑有接触过敏的皮炎患者,其中接触性皮炎 166 例,湿疹 40 例,共计 206 例。男性 31 例,女性 175 例;年龄 7~84 岁;以门诊病人为主;一周内未接受过皮质类固醇激素治疗(包括内服、外用)。206 例患者中 156 例单用研制过敏原 60 种做斑贴试验,50 例采用研制过敏原 20 种与“瑞敏”相同成分过敏原 20 种做对照斑贴试验。

随机选取 30 人作为阴性对照组,男 10 例,女 20 例,年龄 20~52 岁。

2 临床实验及观察

将 60 种化妆品过敏原分别置于斑试器中后贴敷患者上背部脊柱两侧,密封 48 h 后去除斑试物,

间隔 20 min 后待因压迫所造成的非特异性红斑消退后观察结果。共观察 3 次,分别是斑试后 48 h、72 h、96 h 各观察 1 次,并记录结果。结果的判定以文献[5]规定的标准为依据。可疑反应(?):仅有轻度红斑;阳性反应(+):红斑、浸润,可有小丘疹;强阳性反应(++):红斑、浸润、丘疹、小水疱;极强阳性反应(+++):红斑、浸润、大水疱;阴性反应(-):无反应。可疑阳性者不记入阳性结果。50 例患者两组(实验组与对照组)相同成分过敏原斑贴试验方法和判定标准同上。

3 实验结果

3.1 60 种过敏原斑贴试验

156 例患者使用研制的 60 种过敏原斑贴试验有 145 例出现阳性反应,总阳性率 92.95%(见表 1);对 1 种斑试物阳性者 19 例(13.1%),对 2 种及 2 种以上斑试物阳性者 126 例(86.9%)。阳性率最高的为硫柳汞 53 例(36.55%),其次为硫酸镍 45 例(31.03%),十二烷基硫酸钠 41 例(28.28%),甲醛 33 例(22.76%),氯化钴及戊二醛各 32 例(22.07%)。

表 1 156 例患者 60 种过敏原斑贴试验结果

斑试物	阳性 例数	阳性率 /%	斑试物	阳性 例数	阳性率 /%	斑试物	阳性 例数	阳性率 /%
重铬酸钾	12	7.69	对羟基苯甲酸甲酯	2	1.28	戊二醛	32	20.51
对苯二胺	3	1.92	对羟基苯甲酸乙酯	5	3.21	己二醇二丁醚	11	7.05
山梨酸	1	0.64	对羟基苯甲酸丙酯	2	1.28	甲萘酚	4	2.56
硫酸新霉素	0	0.00	对羟基苯甲酸丁酯	5	3.21	苯并三唑	1	0.64
氯化钴	32	20.51	α -戊基肉桂醛	5	3.21	对氨基苯酚	8	5.13
丙二醇	1	0.64	肉桂醛	9	5.77	吐温-40	11	7.05
硫酸镍	45	28.85	肉桂醇	9	5.77	间苯二酚	1	0.64
松香	9	5.77	丁子香酚	3	1.92	肉桂酸苄酯	6	3.85
司盘-83	18	11.54	异丁香酚	5	3.21	过氧化苯甲酰	9	5.77
吐温-80	14	8.97	香叶醇	6	3.85	对氨基苯甲酸	2	1.28
三乙醇胺	9	5.77	羟基香茅醛	7	4.49	甲醇	9	5.77
卡松 CG	25	16.03	丁化羟基甲苯	8	5.13	葵子麝香	5	3.21
羊毛脂醇	2	1.28	薰衣草油	6	3.85	苯甲醛	5	3.21
秘鲁香油	4	2.56	薄荷油	5	3.21	对苯二酚	16	10.26
6-甲基香豆素	3	1.92	桉叶油	5	3.21	苯酮	5	3.21
水杨酸苯酯	7	4.49	茉莉	5	3.21	硫酸铜	15	9.62
甲醛	33	21.15	香兰素	4	2.56	十二烷基硫酸钠	41	26.28
水杨酸苄酯	5	3.21	柠檬油	4	2.56	邻苯二甲酸二丁酯	4	2.56
苯甲醇	0	0.00	丁子香油	3	1.92	水杨酸	1	0.64
硫柳汞	53	33.97	橙油	1	0.64	水杨醛	7	4.49

30 例随机人选使用研制的 60 种过敏原斑贴试验,有 7 人出现阳性反应,阳性率 23.3%;肉桂醇、肉桂醛各 2 例,硫酸镍 3 例,硫柳汞 2 例。

3.2 20 种相同成分过敏原对照斑贴试验结果

50 例患者用研制的 20 种过敏原(实验组)与“瑞敏”相同成分 20 种过敏原(对照组)对照斑贴试验,实验组 23 例出现阳性反应,阳性率 46%;对照组 32 例出现阳性反应,阳性率 64%。两组斑贴结果完全一致的 37 例,占 74%。两组斑试物阳性结果如表 2 所示。

表 2 50 例患者两组相同成分过敏原对照斑贴试验结果

斑试物	阳性例数(阳性率/%)	
	实验组	对照组
重铬酸钾	3 (6.00)	4 (8.00)
对苯二胺	2 (4.00)	2 (4.00)
山梨酸	0 (0.00)	0 (0.00)
硫酸新霉素	0 (0.00)	0 (0.00)
氯化钴	5 (10.00)	5 (10.00)
丙二醇	0 (0.00)	0 (0.00)
硫酸镍	6 (12.00)	6 (12.00)
松香	0 (0.00)	1 (2.00)
司盘-83	0 (0.00)	2 (4.00)
吐温-80	0 (0.00)	0 (0.00)
三乙醇胺	1 (2.00)	1 (2.00)
卡松 CG	5 (10.00)	8 (16.00)
羊毛醇	0 (0.00)	0 (0.00)
秘鲁香油	1 (2.00)	1 (2.00)
6-甲基香豆素	0 (0.00)	0 (0.00)
水杨酸苯酯	2 (4.00)	2 (4.00)
甲醛	6 (12.00)	8 (16.00)
水杨酸苄酯	0 (0.00)	0 (0.00)
苯甲醇	0 (0.00)	1 (2.00)
硫柳汞	6 (12.00)	7 (14.00)
合计	23 (46.00)	32 (64.00)

统计学分析 实验组与对照组数据采用 SPSS11.5 软件包处理,统计学方法为 χ^2 检验(Pearson Chi-Square), $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。60 种过敏原斑贴试验 156 例患者和 30

例随机人选阳性检出率经 χ^2 检验, $\chi^2 > 3.84$, $P < 0.05$,有统计学意义。实验组与对照组阳性例数经 χ^2 检验, $\chi^2 = 1.636$, $P > 0.05$ 。实验组与对照组阳围检变徙甸统计学意义。

3.3 安全性

在本研究中,采用研制的过敏原和“瑞敏”过敏原斑贴试验的 206 例病人,以及 30 例随机人选均没有出现不良反应。

4 讨论

斑贴试验是接触性皮炎、湿疹类疾病诊断中的一种重要手段,具有很高的临床实用价值,受到各国皮肤及变态反应工作者的重视^[2]。化妆品皮炎为目前皮肤科门诊中常见的疾病,其致病的原因较多。有些患者能提供可引起化妆品皮炎的致敏原,但不少患者不能在病史中提供。因此,对日常生活中常用的化妆品中的易导致过敏的原料成分、浓度进行了调查、筛选,形成了一套化妆品过敏原斑贴试验检测试剂并实现标准化,以此为化妆品皮炎患者提供常规的过敏原斑贴试验的检测,从而帮助临床医师为患者寻找出或确定可能的致敏原。

在此次的临床研究中,选择的病例均为疑使用化妆品而导致的皮炎、湿疹患者,60 种研制过敏原斑贴试验的阳性率为 92.95%,阳性率超过 10% 的过敏原有 9 种,特别是阳性率高的硫柳汞、硫酸镍、十二烷基硫酸钠、甲醛、氯化钴等,这说明在化妆品原料中有易致人体发生化妆品皮炎的诱因,提示对大部分疑使用化妆品而发生的化妆品皮炎患者可通过斑贴试验方法寻找出可疑致敏原,从而给临床医师提供诊断和治疗的依据,有助于患者的预防和治疗工作。但仍有 7.05% 没有检测出可疑致敏原,这可能与研制的过敏原种类有关,也有可能是使用化妆品后受到环境等因素的影响,比如日光的照射等,还有可能是由于斑试过敏原均为单一成分,而化妆品的成分是多种原料混合而成,若将有关的单一成分配制成混合过敏原或根据化妆品成分原料之间的配伍关系配制特定的过敏原,另外再对光敏感的化妆品过敏原加做光敏感试验,则有可能提高阳性检出率。这一方面的工作,有待于今后进一步去研究。

另研制的化妆品过敏原中的成分不仅仅出现在化妆品中,在日常接触的许多物质中也含有其成分,因此对非化妆品接触患者也有诊断指导意义。

参考文献:

- [1] 蔡瑞康, 刘玮. 我国化妆品皮肤病的现状防治[J]. 中华预防医学杂志, 1993, 27(3): 181 - 182.
- [2] 赵辩. 化妆品皮炎与化妆品管理[J]. 临床皮肤科杂志, 1994, 23(1): 38 - 39.
- [3] 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所, 上海市皮肤病性病医院. GBZ18 - 2002 职业性皮肤病诊断标准总则[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2009.
- [4] BRASCH J, SCHNUCH A, GEIER J, et al. Iodopropylbutyl carbamate 0.2% is suggested for patch testing of patients with eczema possibly related to preservatives[J]. Br J Dermatol. 2004, 151(3): 608 - 615.
- [5] 黄畋, 蔡瑞康, 刘玮, 等. GB 17149.2 - 1997 化妆品接触性皮炎诊断标准及处理原则[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 1998.

(责任编辑: 何学华)

(上接第 76 页)

综上, G 的极小阶反例不存在, 且 G 为 p -幂零群。

推论 1 设 G 为有限群, p 为 $|G|$ 的最小素因子, P 为 G 的 Sylow p -子群。若 P 的 2-极大子群在 G 中 s -半正规, 则 G 为 p -幂零群。

推论 2 设 G 为有限群, $N \triangleleft G$ 且 G/N 为 p -幂零群。 p 为 $|G|$ 的最小素因子, P 为 N 的 Sylow p -子群。若 P 的 2-极大子群在 G 中 s -半正规, 则 G 为 p -幂零群。

参考文献:

- [1] 徐明曜. 有限群导引(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 130 - 158.
- [2] 陈重穆. Sirinivasan 定理的一个推广[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1987, 12(1): 1 - 4.
- [3] LI SHIRONG. On minimal subgroups of finite groups[J]. Comm Algebra, 1998, 26(8): 2 453 - 2 461.
- [4] CHEN ZHONGMU. Generalization of the Schur - Zassenhaus Theorem[J]. J Math (PRC), 1998, 18(3): 290 - 294.
- [5] 韩章家. p -幂零群的几个充要条件[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 34(5): 7 - 13.

(责任编辑: 何学华)