

安徽理工大学学报(自然科学版)

第 32 卷第 2 期(总第 122 期)2012 年 6 月

目 次

人工冻土单轴抗压强度 GA - SVM 预测模型	姚兆明,王 璇,陈军浩,等:(1)
基于声卡的水射流反射声信号采集处理系统	陈国凡,张东速,杨洪涛,等(6)
基于 CATIA 逆向工程复杂样条曲线重构方法研究	王开松,周晴晴,倪任重(10)
基于微力测量的微纳米测头系统设计及优化	杨洪涛,蔡春梅,张 炜,等(13)
多元掺杂负载型 TiO ₂ 光催化剂的制备与性能	薛茹君,代新营,黄 静(18)
基于 DSP 的光伏 LED 照明驱动控制系统	祝 青,王晓晨,姜 威,等(22)
低副瓣边馈微带天线阵列设计	徐 锋(26)
矿用降温服性能试验研究	周孟颖,冯立品,梁国治(29)
保护层开采上覆煤岩变形移动及瓦斯抽采效果	方昌才(35)
青东矿 10 煤层水文地质特征及充水因素分析	李书奎(41)
含山陶厂石膏矿构造应力场数值模拟分析	李 全,张永泰,孙远进(45)
新庄孜矿六八采区断裂复杂程度的分形评价	汪敏华,高红远(50)
主成分分析法在煤矿塌陷水域水质评价的应用	冯娜娜,高良敏,卓利玲(54)
采用电法 CT 技术探查树木内部结构	于 仲,张平松,付茂如,等(59)
潘三新西风井井壁变形安全监测分析	颜 宝,夏红兵(63)
参芪颗粒中黄芪甲苷含量的测定	陈 雷,黄帧桢(67)
健康教育在计划性剖宫产孕产妇家属中的应用	苏 琳,田 玲(70)
期刊基本参数:CN34 - 1220/N * 1981 * q * A4 * 74 * zh * P * ¥5.00 * 1000 * 17 * 2012 - 06	

Contents

Forecasting Model for Uniaxial Strength of Artificial Frozen Soil Based on Genetic Algorithm Support Vector Machines Method	YAO Zhao – ming, WANG Xuan, CHEN Jun – hao, et al (1)
Sound Card – based Acquisition and Processing System for Reflected Sound of Water – jet	CHEN Guo – fan, ZHANG Dong – su, YANG Hong – tao, et al (6)
Study on the Complex Spline Reconstruction Method Based on CATIA Reverse Engineering	WANG Kai – song, ZHOU Qing – qing, Ni Ren – zhong (10)
Optimal Design of Micro – nano Probe System Based on Micro – force Measurement	YANG Hong – tao, CAI Chun – mei, ZHANG Wei, et al (13)
Study of Preparation and Performance of carried co – doped TiO ₂ Photocatalyst	Xue Ru – jun, Dai Xin – ying, Huang Jing (18)
Photovoltaic LEDs Lighting Drive Control System Based on TMS320F2812	ZHU Qing, WANG Xiao – chen, JIANG Wei, et al (22)
Design of a Side – fed Microstrip Antenna Array with Side – lobe	XU Feng (26)
Test of Performance of Mine Thermal Protective Vest	ZHOU Meng – ying, FENG Li – pin, LIANG Guo – zhi (29)
The Deformation Characteristic of overlying coal/rock and Gas Drainage Effect with Protective Seam Mining	Fang chang – cai (35)
Analysis of Hydrogeological Characteristics and Water – filling Factors of No. 10 Coal Seam in Qingdong Coal Mine	LI Shu – qui (41)
Numerical Simulation of Tectonic Stress Field in Taochang Gypsum Mine, Hanshan County	LI Qian, ZHANG Yong – tai, SUN Yuan – jin (45)
Fractal Evaluation of Fracture Complexity of No. 6 – 8 Pannel in Xinzhuangzi Coal Mine	WANG Min – hua, GAO Hong – yuan (50)
Application of Principal Component Analysis in Evaluation of Water Quality in Mining Subsidence	FENG Na – na, GAO Liang – min, ZHOU Li – ling (54)
Cellular Structure Detection of Tree by Direct Current CT Technology	YU Zhong, ZHANG Ping – song, FU Mao – ru, et al (59)
Safety Monitoring Analysis of Lining Deformation of New Ventilation Shaft in Pansan Coal Mine	YAN Bao, XIA Hong – bing (63)
Measurement of Astragaloside in Shenqi Granules	CHEN Lei, HUANG Zheng – gui (67)
Application of Clinical – Pathway – Based Health Education in Family Members of Planned Cesarean Section Women	SU Lin, TIAN Ling (70)

人工冻土单轴抗压强度 GA – SVM 预测模型

姚兆明^{1,2,3}, 王璇¹, 陈军浩¹, 徐颖¹

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学冻土研究所, 安徽 淮南 232001; 3. 中煤矿山建设集团有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 为了预计冻结法凿井中井壁结构设计的人工冻土单轴抗压强度, 利用支持向量机在处理小样本分类学习的独到优越性及遗传算法全局并行搜索优化的特点, 结合影响人工冻土单轴抗压强度因素, 提出了人工冻土单轴抗压强度不同核函数的遗传支持向量机计算模型, 并运用该模型预计了两淮地区第四系人工冻土单轴抗压强度。结果表明, 多项式核函数的遗传支持向量机模型较高斯径向基核函数及 Sigmoid 核函数的遗传支持向量机模型较准确地预计人工冻土单轴抗压强度。该模型为人工冻土单轴抗压强度的预计提供了一条新途径。

关键词: 人工冻土单轴抗压强度; 遗传支持向量机; 预计模型

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0001-05

Forecasting Model for Uniaxial Strength of Artificial Frozen Soil Based on Genetic Algorithm Support Vector Machines Method

YAO Zhao-ming^{1,2,3}, WANG Xuan¹, CHEN Jun-hao¹, XU Ying¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001; 2. Artificial Frozen Soil Study Institute, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001; 3. China Coal Construction (group) Corporation Ltd. Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: In order to predict artificial frozen soil uniaxial strength which is an important parameter for the shaft design during freezing sinking, the genetic algorithm support vector machine model is put forward which can calculate artificial frozen soil uniaxial compressive strength, based on the artificial permafrost uniaxial compressive strength test and using genetic algorithm which has the global optimization ability to optimize the support vector machine parameter which can solve small sample. The calculated results show that polynomial kernel function genetic support vector machine is better to calculate the artificial frozen soil strength. The genetic algorithm support vector machine is a new method to predict the artificial frozen soil uniaxial strength.

Key words: Artificial frozen soil uniaxial strength; genetic algorithm support vector machines; forecasting model

安全、经济、合理地将冻结法用于工程建设中是一个重要的研究课题, 两淮地区煤矿矿井穿越深厚的第四系冲积层, 涉及到的土层性质十分复杂。在冻结法凿井中, 人工冻土单轴抗压强度是井壁设计的重要参数。目前计算人工冻土单轴强度有神经网络方法等, 但该方法要求样本空间大, 否则难

以达到所要求精度。

支持向量机 (SVM – Support Vector Machines) 是一种基于统计学理论的小样本学习方法, 采用结构风险最小化原则, 具有良好的推广能力^[1]。该方法具有以下特点: 需要调整的参数少; 估计未知参数时是一个凸目标函数的优化问题, 可以用标准

收稿日期: 2011-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40972188/D0214); 安徽理工大学博士科研启动基金资助项目; 安徽省重点实验室资助项目

作者简介: 姚兆明 (1975-), 男, 安徽黄山人, 副教授, 博士 (后), 从事土体本构理论和岩土数值分析研究。

的二次型问题来解决,计算速度快且不存在局部极小;模型结构由样本集中最能“提供信息的”子样本集-支持向量来决定,通过改变支持向量的数目就很容易地连续改变模型结构;可以得到和控制模型泛化误差的上界,并且独立于训练集和测试集的分布^[2-3]。

影响支持向量机预测能力是其参数,常用的参数经验确定法和网格搜索法很难找到全局最优解。遗传算法是模仿自然界进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法。其基本思想是根据问题的目标构造一个适值函数,对一个由多个解构成的种群进行评估、遗传操作,经多代繁殖,获得适应度值最好的个体作为问题的最优解。

本文将遗传算法与支持向量机相结合,考虑影响人工冻土单轴抗压强度因素,提出了人工冻土单轴抗压强度不同核函数的遗传支持向量机计算模型。运用不同核函数的遗传支持向量机模型预计了两淮地区第四系人工冻土单轴抗压强度,结果表明,多项式核函数的遗传支持向量机模型较高斯径向基核函数及 Sigmoid 核函数的遗传支持向量机模型较准确地预计人工冻土单轴抗压强度。

1 GA-SVM 模型

1.1 支持向量机基本理论

支持向量机是通过某种事先选择的非线性映射将输入向量映射到一个高维特征空间,在这个空间中构造最优分类超平面^[4-6]。

对于样本集

$$(x_1, y_1) \cdots (x_i, y_i) \cdots (x_l, y_l) \in R^N \times R \quad (1)$$

所要求拟合的函数形式为

$$f(x) = W^T \phi(x) + b \quad (2)$$

$$W, \phi(x) \in R^N, b \in R$$

式中: W 为参数列向量; $\phi(\cdot)$ 为一个函数的列向量,它把输入样本从输入空间映射到特征空间。

所求得的拟合函数 $f(\cdot)$ 要使下面的性能指标最小,即结构风险:

$$R_{\text{reg}}^{\varepsilon} = \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \cdot R_{\text{emp}}^{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: C 为惩罚因子,且 $C > 0$, 表示对超出误差的样本的惩罚程度,能使训练误差和模型复杂度之间

取一个折中,以便使所求得的函数 $f(x)$ 具有较好的泛化能力。

经验风险:

$$R_{\text{emp}}^{\varepsilon} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |y_i - f(x_i)|_{\varepsilon} \quad (4)$$

定义为不灵敏损失函数 ε :

$$|y - f(x)|_{\varepsilon} = \begin{cases} 0, & |y - f(x)| \leq \varepsilon \\ |y - f(x)| - \varepsilon, & |y - f(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

把函数近似问题转化为如下的优化问题:

$$\min \left(\frac{1}{2} W^T W + C(v\varepsilon + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (\zeta_i + \zeta_i^*)) \right) \quad (6)$$

$$W^T \phi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \zeta_i \quad (7)$$

$$y_i - W^T \phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \zeta_i^* \quad (8)$$

$$\zeta_i, \zeta_i^* \geq 0, \varepsilon \geq 0, i = 1, \dots, l \quad (9)$$

式中: $0 \leq v \leq 1$; 不灵敏损失函数 ε 为 $W^T \phi(x)$ 在 $y \pm \varepsilon$ 内, 不考虑损失。

解上述优化问题, 定义 Lagrange 函数:

$$L(W, b, \zeta, \zeta^*, \alpha, \alpha^*, \eta, \eta^*) = \frac{1}{2} \|W\|^2 + C v \varepsilon + \frac{C}{l} \sum_{i=1}^l (\zeta_i + \zeta_i^*) - \sum_{i=1}^l (\eta_i \zeta_i + \eta_i^* \zeta_i^*) - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\varepsilon + \zeta_i + y_i - W^T \phi(x_i) - b) - \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (\varepsilon + \zeta_i^* - y_i + W^T \phi(x_i) + b) - \beta \varepsilon \quad (10)$$

$$\text{由 } \frac{\partial L}{\partial W} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} = 0, \frac{\partial L}{\partial \zeta_i^*} = 0 \text{ 得}$$

$$W = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \phi(x_i) \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad (12)$$

$$C v - \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) - \beta = 0 \quad (13)$$

引入一个核函数来求特征空间的点积 $K(x, y) = \phi(x) \cdot \phi(y)$, 由此得到一个二次型的优化问题^[4-6]:

$$\min \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x_j) (\alpha_j^* - \alpha_j) - \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) \right) \quad (14)$$

$$\text{st: } \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) \leq C\nu \quad (16)$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C/l, \quad i = 1, \dots, l \quad (17)$$

用矩阵表示成标准的二次型规划型式:

$$\min \left(\frac{1}{2} (\alpha - \alpha^*)^T Q (\alpha - \alpha^*) + y^T (\alpha - \alpha^*) \right) \quad (18)$$

$$\text{st: } e^T (\alpha - \alpha^*) = 0, e^T (\alpha + \alpha^*) \leq C\nu \quad (19)$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C/l, i = 1, \dots, l \quad (20)$$

式中: e 为单位矩阵。

设 Q 为核函数矩阵, 其元素为

$$Q_{ij} = \phi(x_i)^T \phi(x_j) = K(x_i, x_j) \quad (21)$$

常用的核函数有多项式核函数、高斯径向基核函数、Sigmoid 核函数及自定义函数等。

多项式核函数:

$$K(x, y) = ((x \cdot y) + 1)^d, d = 1, \dots, n \quad (22)$$

式中: d 为待定参数。

高斯径向基核函数:

$$K(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (23)$$

式中: σ 为待定参数。

Sigmoid 核函数:

$$K(x, y) = \tan(\phi(x \cdot y) + \theta) \quad (24)$$

式中: θ 为待定参数。

1.2 支持向量机参数遗传优化算法

遗传算法优化支持向量机参数步骤^[7-9]:

1) 输入 k 个样本 $\{x_i^k\}$, x_i^k 为 k 个样本向量;

2) 根据第 k 个样本的实测值 x_k 和输出层的输出值 Y^k 的差, 求第 k 个样本的误差 ε_k :

$$\varepsilon_k = (Y^k - x_k) \quad (25)$$

3) 遗传算法适应度函数的确定和选择运算, 适应度函数为

$$F = \sum \varepsilon_k / N \quad (26)$$

式中: F 为网络的总体适应度; N 为总样本数。

4) 支持向量机参数交叉律和变异律确定。用 q 代表惩罚因子 C 及各种核函数的参数, q 的遗传操作如下:

交叉律 P_c 和变异律 P_m 的公式为

$$P_c = k_1 (f_{\max} - f_{\text{avg}}) \quad \text{st: } f^l \geq f_{\text{avg}} \quad (27)$$

$$P_c = k_2 \quad \text{st: } f^l < f_{\text{avg}} \quad (28)$$

$$P_m = \frac{k_3 (f_{\max} - f_i)}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})} \quad \text{st: } f_i \geq f_{\text{avg}} \quad (29)$$

$$P_m = k_4 \quad \text{st: } f_i < f_{\text{avg}} \quad (30)$$

式 (27~30) 中: $k_1 \sim k_4$ 为取值范围为 $[0, 1]$ 的常数; f^l 为要交叉的支持向量机参数的个体适应度中较大的一个; f_i 为支持向量机参数要变异的个体的适应度; f_{\max} 为支持向量机参数的种群中最大的适应度; f_{avg} 为支持向量机参数的种群的平均适应度。

交叉变化采用下述方法: 假设要参与交叉操作的两个基因链分别为 W_i 和 W_j , 两个基因链上相对应的基因值分别为 w_i 和 w_j , 并且 W_i 的适应度高于 W_j 的适应度, 定义 Δ_i^l 和 Δ_j^l 两个中间变量:

$$\Delta_i^l = \min \left\{ w_i + \frac{1 + P_c}{2} (w_i - w_j), w_{\max} \right\} w_i \geq w_j \quad (31)$$

$$\Delta_i^l = \max \left\{ w_i + \frac{1 + P_c}{2} (w_i - w_j), w_{\min} \right\} w_i < w_j \quad (32)$$

$$\Delta_j^l = \min \left\{ w_j + \frac{1 - P_c}{2} (w_j - w_i), w_{\min} \right\} w_i \geq w_j \quad (33)$$

$$\Delta_j^l = \max \left\{ w_j + \frac{1 - P_c}{2} (w_j - w_i), w_{\max} \right\} w_i < w_j \quad (34)$$

式中: w_{\max} 和 w_{\min} 分别为 w_i (w_j) 取值上限和下限。

交叉后所产生的两个新个体 y_i 和 y_j 可以用下式确定:

$$y_i = \frac{1 + P_c}{2} \times \Delta_i^l + \frac{1 - P_c}{2} \Delta_j^l \quad (35)$$

$$y_j = \alpha w_i + (1 - \alpha) w_j \quad (36)$$

式中: α 为一个在 $[0, 1]$ 之间的随机函数。

实数编码代表各支持向量机参数的基因, 所采用的变异方法分析如下:

个体 W_i 的基因位 w_i 的变异是在区间 $[w_1, w_2]$ 随机地取一个实数 w_1 代替 w_i , 由下式确定:

$$w_1 = w_{\min} + \left| \frac{w_{\min} \times P_m \times f_i}{f_{\max}} \right| \quad (37)$$

$$w_2 = w_{\min} - \left| \frac{w_{\max} \times P_m \times f_i}{f_{\max}} \right| \quad (38)$$

由式 (37) ~ 式 (38) 可见, 适应度大的个体变

异区间较小,适应度小的个体的变异区间较大。这样既能减小变异操作对好的个体的破坏,又能保证遗传算法的搜索能力。

5) 搜索结束条件。采用遗传算法主要是为了确定全局最优解所在位置,遗传算法的收敛条件由下式确定:

$$F(x^g) \leq E \quad (39)$$

式中: $F(x^g)$ 为 g 代的适应度,本文设 $E=0.95$ 。

采用如上的交叉率和变异率、交叉算子、变异算子对支持向量机参数进行全局搜索,当达到规定适应度要求时共搜索了 1 500 次。

2 GA-SVM 模型预测

人工冻土单轴抗压强度与温度关系密切,强度随温度降低而增长。人工冻土单轴抗压强度受含

水率影响较大,一般情况下,冻土强度随含水率增大而增大,此时含水率大小直接影响着土体颗粒矿物成分骨架与冰之间的粘聚力,但当含水率超过一定值时,人工冻土单轴抗压强度出现拐点,并逐渐降低直至冰的抗压强度。土体密度小、塑性指数大时强度低,反之,则强度大。

两淮地区的人工冻土单轴抗压强度试验在自行研制的 WDT-100 冻土性能试验机上进行,该试验系统比常温下试验增加了控温系统,其难度大、系统复杂、技术要求高。试验装置最大加载能力为 10t,精度为 1%。试验荷载和试验数据全由计算机根据设定好的参数自动控制和采集。试验分别对试样进行 3 个温度水平(-5°C , -10°C , -15°C)下的单轴抗压强度试验(见表 1)。

表 1 人工冻土单轴抗压强度试验结果

序号	土性	含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和度/ %	液限	塑限	塑性 指数	抗压强度/MPa		
								-5°C	-10°C	-15°C
1	粘土	25.79	2.01	1.6	38	18	20	2.44	3.19	4.21
2	粘土	16.04	2.02	1.74	35	19	16	2.12	2.9	3.65
3	粘土	25.15	2.09	1.67	42.5	21.5	21	1.96	3.17	4.45
4	粘土	25.75	2.01	1.6	42.5	22	20.5	3.32	4.85	6.29
5	粘土	30.16	1.92	1.48	44.5	24.5	20	3.18	4.32	6.21
6	粘土	18.63	2.09	1.76	40.5	21.5	19	2.93	4.53	7.44
7	粘土	17.77	2.15	1.83	39.5	20.5	19	3.21	5.78	7.1
8	钙质粘土	24.91	2	1.6	38.5	19.5	19	3.87	6.04	7.65
9	砂质粘土	15.85	2.04	1.76	32	19	13	2.42	3.1	4.23
10	粘土	17.32	2	1.71	31	16	15	2.26	3.28	3.98
11	砂质粘土	15.64	2.19	1.89	30	16	14	2.47	3.41	4.33
12	粘土	21.77	1.99	1.63	46	28	18	2.0	2.95	4.06
13	砂质粘土	17.29	2.01	1.72	30.5	16	14.5	2.63	3.51	4.33
14	粘土	19.07	1.99	1.67	45.5	27.5	18	3.51	5.02	5.67
15	粘土	11.74	2.28	2.04	32	18	14	3.14	4.93	5.58
16	粘土	25.02	1.99	1.6	48	27.5	20.5	3.35	4.57	5.77
17	砂质粘土	11.82	2.26	2.02	31	17.5	13.5	3.75	4.66	5.84
18	粘土	16.33	2.11	1.82	32	19	13	3.08	4.39	5.58
19	粘土	15.11	2.12	1.84	31	17	14	3.78	5.47	6.41
20	粘土	28.97	1.925	1.49	55	27.5	27.5	1.14	2.32	4.51
21	粘土	22.18	2.07	1.69	49	28	21	2.36	3.33	4.96
22	粘土	13.65	2.18	1.92	34.5	18.5	16	2.59	3.87	4.97

编制了采用多项式核函数、高斯径向基核函数、Sigmoid 核函数的遗传支持向量机程序。采用 1~16 号样本对遗传支持向量机进行训练,得到遗传支持向量机模型的参数。

用 17~22 号样本对多项式核函数、高斯径向基核函数、Sigmoid 核函数的遗传支持向量机模型进行验证(见表 2)。

表 2 试验值与模型计算值对比

抗压强度/MPa														
序号	- 10℃							- 15℃						
	试验值	Sigmoid核函数		高斯径向基核函数		多项式核函数		试验值	Sigmoid核函数		高斯径向基核函数		多项式核函数	
		计算值	误差	计算值	误差	计算值	误差		计算值	误差	计算值	误差	计算值	误差
17	4.66	4.35		4.86		4.56		5.84	5.34		5.56		5.81	
18	4.39	4.15		4.25		4.39		5.58	5.25		5.78		5.67	
19	5.47	5.14	0.36	5.77	0.17	5.57	0.05	6.41	6.83	0.33	6.24	0.21	6.32	0.07
20	2.32	2.56		2.28		2.35		4.51	4.31		4.83		4.44	
21	3.33	3.86		3.46		3.28		4.96	4.75		4.86		4.89	
22	3.87	3.34		3.67		3.85		4.97	5.26		4.76		4.92	

对比表 2 中多项式核函数、高斯径向基核函数及 Sigmoid 核函数的遗传支持向量机模型的计算值和误差可知,采用多项式核函数的遗传支持向量机模型能更好地计算人工冻土单轴抗压强度。

3 结语

1) 在两淮地区人工冻土单轴抗压强度试验及分析人工冻土单轴抗压强度影响因素的基础上,利用具有全局优化能力的遗传算法来优化支持向量机参数,建立了遗传支持向量机预测模型;

2) 多项式核函数的遗传支持向量机模型较高斯径向基核函数及 Sigmoid 核函数模型能更好计算人工冻土单轴抗压强度;

3) 可根据新的试验资料对遗传支持向量机模型参数进行实时更新,进而提高计算精度。

参考文献:

[1] VAPNIK V N. Statistical Learning Theory [M]. New York: John and Wiley,1998:713-714.
[2] 赵洪波,冯夏庭. 非线性位移时间序列预测的进化-支持向量机方法及其应用[J]. 岩土工程学报,2003,22(10): 631-633.

[3] 张浩然,韩正之,李昌刚. 基于支持向量机的非线性系统辨识[J]. 系统仿真学报,2003,15(1): 119-121.
[4] PLATT J C. Sequential minimum optimization: A fast algorithm for training support machines [C]// In: Skolopf B, Burges C J C, Smola AJ ed. Advanced in Kernel Methods - support Vector Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 1998: 185-208.
[5] ANTHONY T C GOH, S H GOH. Support vector machines: Their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data [J]. Computers and Geotechnics, 2007(34): 410-421.
[6] GUO G, LI SZ, CHAN KL. Support vector machines for face recognition [J]. Image Vision Comput, 2001, 19(9-10): 631-638.
[7] 田旭光,宋彤,刘宇新. 结合遗传算法优化和 BP 神经网络的结构和参数[J]. 计算机应用与软件,2004,21(6): 69-71.
[8] 姚兆明. 人工冻土温度场影响因素灵敏度分析[J]. 水文地质工程地质,2006,33(3): 38-40.
[9] 姚兆明,周启俊. 人工冻土温度场的智能方法预测[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2005,25(3): 26-29.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

基于声卡的水射流反射声信号采集处理系统

陈国凡, 张东速, 杨洪涛, 张 炜

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了能够用较低的成本实现高压水射流冲击不同几何尺寸靶物时反射声音信号特征值的有效提取, 采用基于 LabVIEW 和声卡的高压水射流反射声信号采集处理系统实现技术。通过对 LabVIEW 软件编程结合声卡和高精度传声器实现了水射流反射声信号的实时采集, 应用 MATLAB 编制小波降噪和模极大值提取程序, 通过调用 MATLAB Script 实现 LabVIEW 与 MATLAB 的通信, 完成信号的降噪和有用成分的分离与提取。实验结果验证, 本系统能实现实时有效地提取对应不同靶物几何参数的特征值。

关键词: 高压水射流; LabVIEW; 声卡; 小波降噪

中图分类号: TP391.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0006-04

Sound Card – based Acquisition and Processing System for Reflected Sound of Water – jet

CHEN Guo – fan, ZHANG Dong – su, YANG Hong – tao, ZHANG Wei

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

Abstract: In order to effectively extract characteristic values of reflected sound signal with low cost when high pressure water – jet impact the targets which have different geometric sizes, based on LabVIEW and sound card this paper introduces the implementation method of acquisition and processing system for reflected sound of high pressure water – jet. Reflected sound signal of high pressure water – jet can be acquired in real – time based on the LabVIEW software combined with sound card and high precision microphone. The program with the function of wavelet denoising and extracting the maximum modulus be programmed in MATLAB language. By calling the MATLAB Script node the communication between LabVIEW and MATLAB be realized, then denoising the acquired signals and separating and extracting the useful component of the acquired signals also be achieved. The results of experiment verified that this system can extract different characteristic values with targets that with different geometric sizes effectively and in real – time.

Key words: high pressure water – jet; LabVIEW; sound card; wavelet denoising

高压水射流是一项迅速发展起来的新技术, 不仅可以实现对靶物的高效切割, 而且通过识别射流冲击靶物时产生的反射声信号的特征值而识别靶物的材质和几何尺寸^{[1]2 434}。要准确识别靶物材质和几何尺寸, 首先需要搭建高速、实时的声音数据采集系统实时采集声音信号, 其后采用先进的信号处理方法进行信号降噪和信号特征值提取。相对于价格昂贵的数据采集卡, PC 机上的声卡价格低

廉, 而且同样具有信号滤波、放大及采样保持、A/D 和 D/A 转换等基本功能。本文通过对 LabVIEW 软件编程结合 PC 机上的声卡以及高精度传声器搭建射流反射声信号采集处理系统, 实现高速、实时的采集声音数据信号。采用小波降噪和模极大值原理并且在 LabVIEW 软件中的 MATLAB Script 节点中, 利用 MATLAB 语言编程实现对采集到的反射声信号降噪和提取反应靶物几何特征的特征

值。通过实验验证,本系统可以实时有效的采集和处理高压水射流反射声信号,以及有效地提取对应不同靶物几何尺寸的特征值。

1 系统硬件组成

高压水射流反射声信号采集处理系统主要由高精度麦克风、PC 机以及 PC 机内置的声卡组成(见图1)。高精度麦克风将声源的声音信号转换为模拟信号,经过声卡进行信号调理和 A/D 转换为数字信号,最后将数据通过 PC 机总线提供给 LabVIEW 应用程序处理。本系统所采用的声卡对音频信号实现双声道 16 位数据采集,最高采样率达到 44.1 kHz。由以上数据可以看出,声卡具有较好地量化精度和较高的采样率,用声卡来代替一些低档的数据采集装置不仅实现了声音数据采集的功能还可以降低系统成本。



图1 系统组成原理图

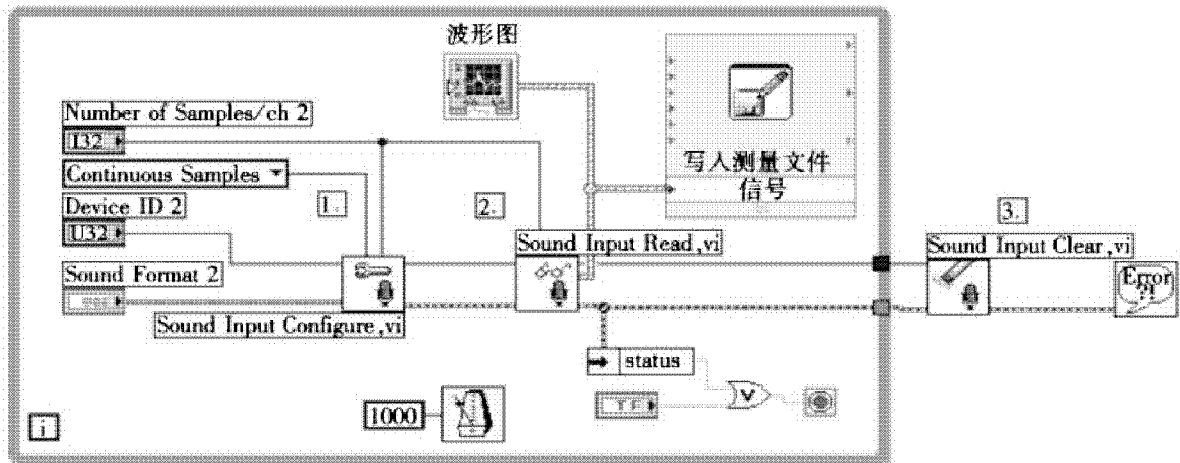


图2 反射声信号数据采集程序框图

2.2 数据处理部分程序设计

2.2.1 小波原理 小波分析具有多分辨率分析的特点,在时域和频域都有表征信号局部信息的能力,时间窗和频率窗都可以根据信号的具体形态动态调整。由基小波生成的小波函数系为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (1)$$

2 采集处理系统软件设计

按照实现功能的不同,本系统划分为高压水射流反射声信号数据采集程序和数据处理程序两部分。

2.1 数据采集部分程序设计

高压水射流反射声信号数据采集程序,使用 LabVIEW 软件中的声音采集数据采集模块进行编程,实现采集参数的设置以及声音数据的循环采集和存储。首先设置声音信号数据采集参数,采样率设置为 22.05 kHz,通道数为 1,采样位数设置为 16 位,采样模式为连续采样,缓存大小设置为每通道 5 000 个样本。采集参数设置好后,在 While 循环内每隔一秒循环调用声音输入 VI 和读取声音输入 VI,采集并显示高压水射流反射声信号,为后续的特征值提取提供数据。采集到的声音信号数据采用 TDMS 文件格式进行存储,具有存取速度快、占用空间小等优点。最后调用声音输入清零 VI,停止采集并进行清除缓存和占用的内存等操作,具体的数据采集部分程序框图如图 2 所示。

有 $x(t) \in L^2(R)$ 对其可允许小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 的连续小波变换为

$$WT_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

由于在正交小波中,正交基的选取比传统方法更接近实际信号本身,所以通过小波变换更容易地分离出噪声或其他不需要的信息。小波分析用于降噪的过程分为如下几步:

1) 信号分解。选定一种小波,对信号进行 N 层小波分解;

2) 作用阈值。对分解得到的各层系数选择一个阈值,并对系数作阈值处理;

3) 信号重建。降噪处理后的系数通过小波重建恢复原始信号。

根据文献 [1]²⁴³⁷ 研究的优化结果,采用软阈值法,小波降噪算法选择 'db3' 母小波,分解层数为 4 的参数,其降噪程度更好,且突变点特征值更明显,可以很好的保留住有用的信号便于后续处理分析。

2.2.2 模极大值算法 当水射流冲击到不同靶物时,会在靶物的边界使传声器采集到的反射声信号幅值产生突变,因此需要采用有效的方法将突变点处的特征值检测出来。采用模极大值算法实现对特征值的检测,其原理如下:

在某一尺度 x_0 存在一个点 (x_0, y_0) , 使得 $\frac{\partial w_f(x_0, y)}{\partial y} = 0$, 则称点 (x_0, y_0) 是局部极值点,且

$\frac{\partial w_f(x_0, y)}{\partial y}$ 在 $y = y_0$ 上有一个模极大值,如果对 y_0 的某一邻域内的任意点 y 有 $|w_f(x_0, y)| \leq |w_f(x_0, y_0)|$, 则称为小波变换模极大值点。

借助模极大值算法可以准确地描述信号奇异点的位置、极性特征,完成对靶物边界的判别^[2]。

2.2.3 MATLAB Script 节点 该节点是为了能够在 LabVIEW 软件中使用 MATLAB 强大的计算功能而特别提供的。在程序框图中将 MATLAB Script 节点拖出之后,选择添加相应的输入变量和输出变量,并且选择好相应的输入输出数据格式,最后将编制的小波降噪以及特征值提取 MATLAB 程序导入到该节点,即可实现 LabVIEW 对 MATLAB 的调用。通过使用 MATLAB Script 节点实现在线对采集到的高压水射流反射声信号进行小波降噪和特征值提取等信号处理(见图 3)。

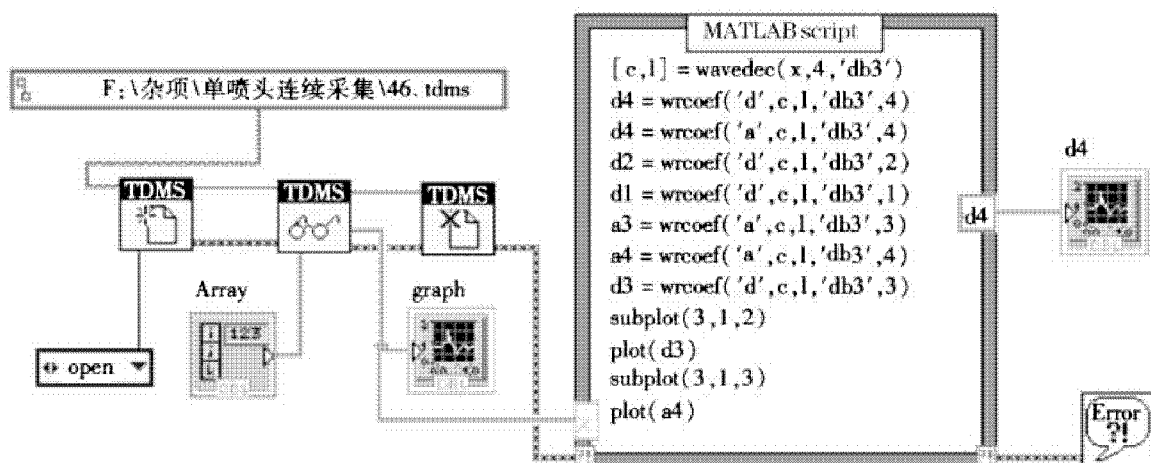


图 3 反射声信号数据处理程序框图

3 实验设计与结果分析

为了验证采集高压水射流反射声信号数据的能力以及特征值提取的效果,利用本校高压水射流研究所自行研发的,前混合磨料射流设备和实验装置作为探测设备,ZL-301 型声音传感器及与其相配套的 PM10B-12 信号调理器用来作为传声器部分,通过 PC 机上的麦克风接口连接到 PC 机内置的声卡,经过声卡采集后送入计算机。控制喷嘴运行的实验装置可以通过选择通道实现单通道射流实验(见图 4)。

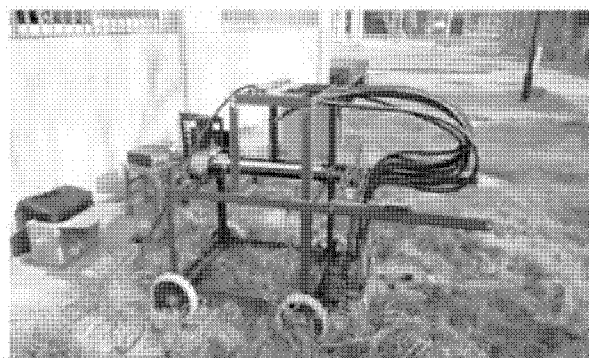


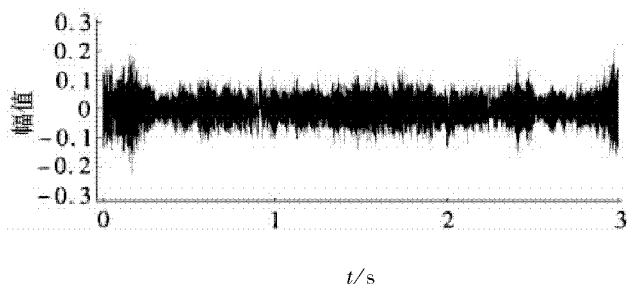
图 4 试验系统硬件组成图

具体实验步骤如下:

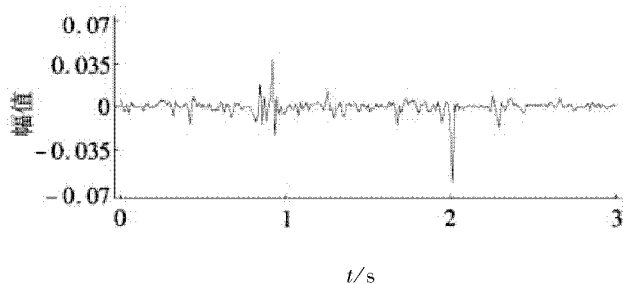
1) 将声音传感器固定在水射流喷嘴后侧,在喷嘴下方放置砖块作为靶物;

2) 开启水射流装置以及实验装置,控制实验装置带动水射流喷头做低匀速定向运动;

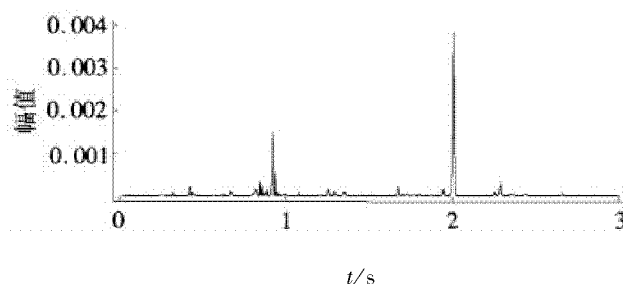
3) 在喷头运动开始之后,运行信号采集处理程序采集存储水射流冲击靶物的声音信号,并对采集到的信号进行降噪和提取特征值处理,采集的反射声信号波形和处理后的信号波形如图5所示。



(a) 高压水射流反射声信号波形图



(b) 小波降噪分解后的信号波形图



(c) 提取模极大值后的信号波形图

图5 高压水射流反射声信号及处理后的信号波形

利用声卡采集到的高压水射流反射声信号,从信号波形图上看不出靶物边界的特征(见图5a)。小波降噪分解后选取其中一层信号波形图,高压水射流移动冲击靶物时可以明显的看出靶物本身的

边界特征(见图5b)。对图5b进一步提取模极大值处理后的信号波形,相对于图5b更加能够明显的指示出靶物的边界位置(见图5c)。实验时采样率设置为22.05 kHz,喷嘴的移动速度设定为56 mm/s,由图5c可以看出两个突变点特征值之间的距离在1秒左右,结合喷嘴的移动速度算出突变点特征值之间的距离在55 mm左右,与实验时所用的靶物边界宽度完全一致。

4 结语

根据上述实验的结果分析可以看出,本文设计的高压水射流反射声信号采集处理系统通过LabVIEW软件编程,能够以PC机自带的低廉的声卡代替价格昂贵的数据采集卡,实现水射流反射声信号的数据采集、存储以及后续的数据处理。对采集到的反射声信号数据,进行小波降噪分解和模极大值算法处理后,有效地得到指示靶物边界的特征值和靶物的几何尺寸以及位置信息,为后续的靶物识别工作提供良好的基础。

参考文献:

- [1] 杨洪涛,王从东,张东速,等. 高压水射流反射声信号特征值提取方法的研究[J]. 中国机械工程,2011,21(20):2 434-2 437.
- [2] 唐东炜,安军,梁启志. 基于LabVIEW和声卡的机床噪声测试分析系统[J]. 实验室研究与探索,2008(9):61-63.
- [3] 金爱娟,莫晓非,李少龙. 基于声卡和LabVIEW的电机噪声测试系统[J]. 电机与控制应用,2010,37(9):29-31.
- [4] 杨根连. 基于声音信号的机床类型、状态及其加工参数识别研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [5] 董长虹,高志,余啸海. Matlab小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004:30-82.
- [6] 刘卫国. MATLAB程序设计与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2006:39-71.

(责任编辑:李 丽,范 君)

基于 CATIA 逆向工程复杂样条曲线重构方法研究

王开松, 周晴晴, 倪任重

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:对于复杂零件的逆向设计, 常常是通过激光、三坐标测量仪等方法对样件三维数据进行采集, 可获得高质量的点云文件。但是这些点云文件数量很大, 计算时将耗费过多的计算机资源。基于 CATIA 软件对点云数据进行过滤、划界、分网等处理方法进行了研究, 运用曲线重构的方法, 创建特征曲线组, 利用多段曲线拟合获得点云的特征线网络, 最后将拟合得到的曲线与原始点云数据进行误差分析。研究证明, 通过这种方法可以获得质量更好、占据资源更小的曲线, 为后续曲面和实体的生成奠定了精确基础。

关键词:逆向工程; 点云; 样条曲线; 曲线重构

中图分类号: TH126.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0010-03

Study on the Complex Spline Reconstruction Method

Based on CATIA Reverse Engineering

WANG Kai-song, ZHOU Qing-qing, Ni Ren-zhong

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

Abstract: For the reverse design of complex parts, the laser, coordinate measuring machine and other methods are usually used to obtain 3D data and high quality point cloud files, but the amount of the point cloud data may be very large, calculation will consume too much computer resources. The thesis studied on the method of filtering the data, dividing the area, and creating the Grid etc which based on CATIA software, and made a attempt at the method of the curve reconstruction, got the characteristic curve network of the point cloud with several curve fitting method, created characteristic curve group using NURBS, finally, error analysis was taken between the data from fitting and the original one. Through this method we can get the curve with better quality, and it also provides a firm foundation of precision for the follow-up curve and surface's generation.

Key words: Reverse engineering; point cloud; spline; curve reconstruction

CATIA 三维设计软件是法国达索公司的产品, 它的集成解决方案几乎覆盖了工业产品设计制造的所有领域, 其优势很多, 在逆向造型方面采用 NURBS 方法描述曲线曲面, 解决了自由曲线(面)与初等解析曲线(面)描述不相容的问题, 通过编辑控制点改变曲线形状生成任意复杂曲面, 再利用

光顺功能提高曲面的重构质量和效率; 提供了多曲面整体编辑功能和网格面、风格扫描面的造型方法, 按原产品曲面形状快速实现重构; 采用混合参数的几个方式建模^[1-2]。

随着计算机新技术的不断应用, 汽车工业蓬勃发展, 产品更新迅速, 这就对汽车零部件的设计工

作提出了更高的要求,现代汽车零部件具有外观造型复杂化、功能多样化、生产周期短等特点。然而按照传统的开发过程,从项目确定开始,开发设计产品的零部件模型,再到生产制造样件,测试性能试验等,需要一个较长的过程,从而使得整个生产过程周期较长、成本较高。在这样的背景下,逆向设计工业应运而生。逆向设计开始在现代工业设计中发挥着越来越重要的作用,它是将实物模型转化为数字模型的一个重要部分^[3]。在此过程中,根据点云文件创建特征曲线又是非常重要的一个环节。本文应用CATIA V5软件,论述在对某个零件体逆向造型过程中复杂曲线创建方法的研究工作。

1 前期处理

1.1 点云数据的采集与输入

数据采集是逆向造型的基础,必须准确。目前三维数据的测量设备朝着高速度、高精度、集成化、智能化、系统化的趋势发展^[4]。通常数据采集使用坐标点测量仪器,如三坐标测量仪和激光三维扫描仪。也有一些通过CCD相机拍照获得点云数据,它是利用Tritop软件将得到的数据进行优化、探测特征线条,并进行光顺、简化等操作^[5]。

CATIA软件支持ASCII、ATOS、CGO、IGES等多种点云数据类型的输入。点云文件导入到CATIA V5中,首先需要进入Digital Shape Editor工作平台,利用Import功能导入文件。

1.2 点云数据的处理

如果点云数据是通过两次或多次测量得到,那么当分别导入数据后需要进行调整以对齐云点,并进行合并处理。合并后的点云中数量可能较大,计算时耗费过多计算机资源,并且铺面并不需要那么多的点,因此,可以利用过滤功能将多余的点按照不同的方法去除。CATIA V5提供了两种不同的过滤方式:一种是球过滤法(Homogeneous),它对所选择的点云部分根据用户定义的球半径大小进行均匀过滤;另一种方法是自适应过滤法(Adaptive),它是根据点与点之间的弦长,将某偏差值内的点过滤掉,利用这种方法可以在曲率变化小的地方过滤掉较多的点,曲率变化大的地方过滤掉较少的点,使得产品特征更加明显^[6]。过滤后选择将要处理的部分,利用铺面功能创建出三角网格曲面,能直观了解结构的形状(见图1)。

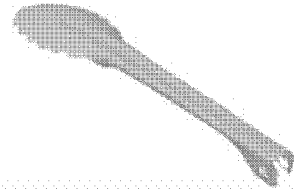


图1 铺面后的零件体

2 曲线重构方法简介

逆向造型最重要的环节就是重构,它不仅修复和解决点云文件的缺陷,还尽可能的再现原有产品的设计思想。重构前,先要对模型进行分析,按照不同的特征将曲面划分为几个区,以确定不同的重构思想。经常会用到数字化外形编辑器(DSE)模块、快速曲面重建(QSR)模块、创成式外形设计(GSD)模块及自由曲面(Free Style)模块。重构的难点在于根据点云数据拟合出符合精度要求的特征曲线。CATIA V5中的线主要分为LN(直线)、ARC(弧线)、SPLINE(由多条ARC线组成)、以及NURBS(采用非均匀有理B样条算法的曲线)。在逆向造型过程中,对于比较复杂的曲线,CATIA V5使用NURBS曲线来创建数学模型,NURBS是一种用途广泛的样条曲线,是贝赛尔曲线(Bezier)的扩展,它克服了Bezier曲线不具备局部性质的缺点,能够很方便的表达由多段圆弧连接而成的复合曲线。自1983年SDRC公司成功的将NURBS模型应用在它的造型软件中,NURBS已经成为计算机辅助设计和制造的几何造型基础,得到了广泛的应用。NURBS样条曲线的数学表达式为

$$C(t) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i P_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(t)} = \frac{\sum_{i=0}^n P_i R_{i,k}(t)}{\sum_{i=0}^n R_{i,k}(t)}$$

式中: ω_i 为对应于控制顶点 P_i 的权因子, $\omega_0 > 0$,其余 $\omega_i \geq 0$; $N_{i,k}(t)$ 为NURBS曲线的基函数^[7]。

NURBS曲线可以精确的表达空间自由曲线,还可以通过调整控制顶点的权因子来修改曲线形状,具有计算稳定、操作方便等优点。但对于形状比较复杂的曲线,除了采用增加控制点的方法来精确的拟合曲线外,还可以采用先分段拟合再顺接和光顺的方法,这种方法的优点在于容易控制每段曲线的拟合精度,从而避免在调节不同曲率段控制点时对别段的影响。零件主要区域通过平面式截面功能得到的一组灰色特征曲线,这些曲线需要进行

拟合(见图 2)。

根据图 2 中的一条曲线,可以实现曲线分段

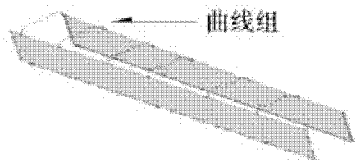


图 2 需要拟合的曲线组



图 3 需要拟合的曲线



图 4 分三段拟合

3 结果评价

曲线经过重构、光顺后,需要评估它的质量以判定是否满足设计要求。优秀的逆向造型结果要求零件体有高品质的曲面,而且要更准确的表达原产品的形状,最大限度的减小重要曲面的误差。高质量的曲面要求曲率连续,相邻曲面之间有相同的曲率半径,用等高线检测时,高亮显示的曲线要有共同的曲率特征等^[8]。CATIA V5 具有功能很强的曲线曲面分析工具,包括距离分析、变形分析、反射分析等,一般会用到曲率分析工具和距离分析工具两种分析方法。对曲率和距离分别采用一次整体拟合与分段拟合进行分析(见图 5~图 8)。



图 5 一次整体拟合曲率图

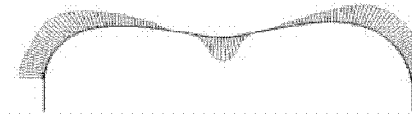


图 6 分段拟合曲率图

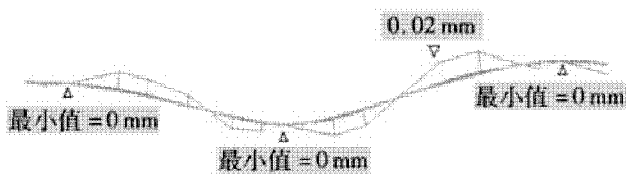


图 7 一次整体拟合距离分析图

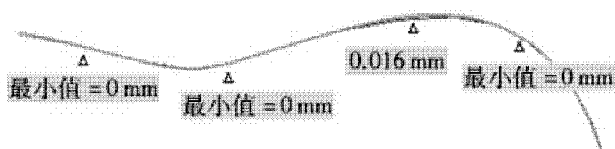


图 8 分段拟合距离分析图

分段拟合得到的样条曲线与原平面式截面曲线的最大距离是 0.016 mm,而一次整体拟合的最大距离是 0.02 mm,分段拟合得到的曲率梳分布比一次整体拟合得到的曲率梳更加平顺,说明采用分段拟

合、顺接和光顺,提高曲线的拟合精度(见图 3~图 4)。

合得到的曲线比一次整体拟合的曲线更加光滑、误差分布更加均匀。所以,在碰到一些较长、曲率变化较大的曲线时,不妨采用分段拟合即方便又准确。

4 结语

本文对点云数据处理的研究,尤其是在对曲线重构方法的选择上做出了新的尝试,将由三坐标测试仪测得的点云数据通过 CATIA 软件进行过滤、划界,利用 NURBS 曲线创建特征曲线组,为后续曲面的建立和实体的生成奠定了精确的基础。最后通过对实例结果的误差分析,说明了该方法的有效性,为逆向造型过程中曲线拟合提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 李江雄,柯映林. 基于特征的复杂曲面反求建模技术研究[J]. 机械工程学报,2000(5):18-22.
- [2] 刘之江. 反求工程[M]. 北京:机械工业出版社,1996:2-5.
- [3] 谢龙汉,单岩. CATIA V5 逆向造型设计[M]. 北京:清华大学出版社,2004:105-108.
- [4] AOYAMA H, SUZUKI Y. Autonomous Measurement of Physical Model Shape for Reverse Engineering[J]. International Journal of Manufacturing System, 2001, 19: 375-382.
- [5] CARBONE V, CAROCCI M, SAVIO, et al. Combination of Vision System and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freedom Surface[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 17: 263-271.
- [6] MING CHIN HUANG. The Pre-processing of Data Points for Curve Fitting in Reversing Engineering[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16: 635-642.
- [7] 徐元凡,刘日良,张承瑞,等. NURBS 曲线插补技术研究[J]. 现代制造工程,2009(3):8-12.
- [8] 振兴,付凯旋,陈志清. 基于反求工程和快速原型技术在产品开发中的应用[J]. 机械设计与制造,2005(1):83-85.

(责任编辑:李 丽,范 君)

基于微力测量的微纳米测头系统设计与优化

杨洪涛, 蔡春梅, 张 炜, 张 晶

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:针对国内外研制的微纳米测头测量时无法实时测量测力的大小和方向,无法实时修正不同方向和大小的测力、不同长度测杆受力变形等引起的测量误差的缺点,研制了一种基于六维微力测量原理的自修正微纳米测头系统,可以实时测量测力的大小和方向,进而获得测头位移和变形量的大小和方向,计算出由于测球测杆受力变形引起的测量误差,通过误差修正模型进行实时自修正,提高测头的测量精度。为了实现测头级的测量灵敏度,应用 ANSYS 软件和正交试验方法进行结构优化设计,确定测头的基本几何尺寸和测头弹性体上测量不同方向测力的最佳测量区域,为后续的测头加工提供理论基础。最终的分析结果证明了测头 x 和 y 方向的测量灵敏度可以达到 $25.5 \mu\text{E}$, z 方向的测量灵敏度可以达到 $11.7 \mu\text{E}$ 。

关键词:微纳米测头;自修正;有限元;优化设计;测量灵敏度

中图分类号:TH721 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)02-0013-05

Optimal Design of Micro – nano Probe System Based on Micro – force Measurement

YANG Hong – tao, CAI Chun – mei, ZHANG Wei, ZHANG Jing.

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

Abstract: The present developed micro – nano probe can not measure force magnitude and direction in real time so that the measurement error caused by the different direction measurement force and the deformation of different length measuring rod can not be corrected in real time. In order to solve this problem, a new self – correction micro – nano probe system was developed based on six – dimensional micro – force measuring principle. It can measure the real time magnitude and direction of the measurement force and the deformation, calculate out the measurement error caused by the measuring rod stress and deformation, and correct the measurement error in real time by building the error correction model. In order to reach the mN level probe measurement sensitivity, the structural optimization design was done by using ANSYS software and orthogonal test method. The geometry of probe and the optimal measurement area in elastic body were determined, which provided the theoretical basis for the following probe processing. The analysis result proves that the probe measurement sensitivity can reach $25.5 \mu\text{E}/\text{mN}$ in x and y direction, and can reach $11.7 \mu\text{E}/\text{mN}$ in z direction.

Key words: Micro – nano probe; self – correction; finite element; optimal design; measurement sensitivity

应用于纳米三坐标测量机的微纳米测量探头的研究是国内外许多著名研究机构的研究热点之

一。文献[1]研制的 Small CMM 和基于电容传感器的 3D 测头,测量范围 $20 \mu\text{m}$,分辨率 3 nm ,探头

直径 0.5 mm 或 1 mm, 重量 350 mg、测量力 0.2 mN; 文献[2]研究的光纤接触式 3D 测头, 是在其同类型商业化二维测头的基础上开发而成, 探球尺寸 25 μm , 接触力小于 1 μN ; 文献[3]研制了一种基于 MEMS 工艺的硅微三维测头, 测头由硅膜和测杆组成, 当测杆的端部受到外力作用的时候, 导致硅膜变形, 通过硅膜上的压阻变化检测出测头端部的位移和力的大小; 文献[4-5]开发了一种基于应变计的三维微接触式传感测头, 校准范围 30 μm , 不确定度 10 nm, 分辨率 1 nm; 文献[6]研究的基于激光捕获技术的测头系统, 是以一个受到光辐射力而悬浮的电介质小球作为敏感测头来检测微小接触力的测头系统; 文献[7]通过改造 CD 播放器读数头的信号处理单元, 得到了一种基于聚焦检测技术的高精度光学探针, 测头在 10 μm 的测量范围内, 线性误差为 1%, 标准偏差为 34 nm。但目前国内外研制的各种测头在测量时, 大都无法实时测量测力的大小和方向。对于不同方向和大小的测力、不同长度测杆、测球受力变形等引起的误差无法实时修正, 因此有必要对具有误差自修正功能的微纳米测头进行进一步的研究。

1 测头系统整体结构设计

本文研制的测头系统是对已研制成功的应变式全剪切六维力传感器加以改进和微型化^[8-10], 主要由测球、测杆、端盖、弹性体、底座组成(见图1)。

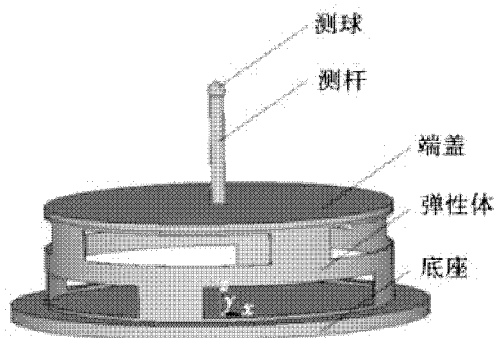


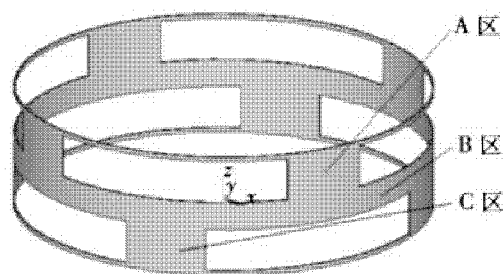
图1 测头系统的结构简图

当测头测球触碰被测物体时, 测力通过测杆传递到弹性体上, 弹性体发生形变, 由分布在弹性体各敏感区域的压阻式传感器组成的桥路, 分别测量空间三个方向测力和力矩。六个电桥输出的电压输入计算机, 经过测量模型和应用独立成分分析方法动态解耦后, 精确测量三维测力的大小和方向, 进而获得测杆测头变形量的大小和方向, 进而计算

出由于测杆变形、受力变形引起的测头测量误差, 通过误差修正模型进行实时自修正。

1.1 弹性体结构设计

弹性体是用来测量三维测力大小和方向的测头核心部分, 采用全剪切六维力传感器的弹性体结构(见图2), 该结构在三个方向(x 、 y 和 z 方向)具有匹配的灵敏度和刚度, 且在理论上无互相干扰。



A. 孔间薄壁; B. 圆环薄壁; C. 孔间薄壁

图2 弹性体结构

弹性体采用薄壁圆筒结构, 在薄壁圆筒上下两层各开有 4 个相位相差 45° 的对称分布槽孔, 形成了具有三层敏感区域的弹性元件。该结构有 A、B、C 三层变形区域, A、C 区域用来测量两水平方向力和轴向扭矩; B 区共有 8 个敏感区域, 用来测量轴向力及两侧向的弯矩。

当弹性体受到水平方向(x 或 y 方向)力作用时, A 区处于受剪切力状态, 4 块间隔 90° 的圆弧薄片以每两块对称片为一组分别测量两个水平方向的力; 当弹性体受到轴向(z 方向)扭矩作用时, C 区的 4 个敏感区域也处于纯剪切状态, 可以取全部四块薄片测量轴向扭矩; 当弹性体受到轴向惯性力或者两侧向弯矩时, B 区有 8 个敏感区域处于剪切状态, 选取其中 4 个测量轴向力和一侧向弯矩, 另外 4 个用来测量另一侧向弯矩。在相应敏感区域分布压阻式传感器, 可以实现沿着三个坐标轴平动的三个力分量和绕着三个坐标轴转动的三个力矩分量测量。

硅具有优良的半导体电学性质, 化学性质稳定。本征电阻率在室温(300K)下达 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, 掺杂后电阻率可控制在 $10^4 \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的宽广范围内, 能满足制造各种器件的需要。硅器件具有耐高压、反向漏电流小、效率高、使用寿命长、可靠性好等优点。弹性体与底座、端盖等合为一体, 材料选用硅晶体, 采用微加工技术进行整体加工, 并在其敏感区域扩散有压阻式传感器。

1.2 测杆及测球结构设计

球形测头能够测定高度、槽宽、孔径和轮廓形状,为通用型测头。本文研制的测头系统采用球形测头结构。

测球的球度误差直接影响测头测量精度。碳化钨具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀、耐高温等性质。因此测球和测杆的材料选用碳化钨,其加工工艺采用的是电火花加工方法。

2 测头系统的优化

2.1 优化方法的选择

测头测力灵敏度和固有频率是反映其静、动态性能的重要指标,由于测头的结构微小,其固有频率均大于 10 000 Hz,对其动态性能影响不大。因此结构优化设计将测力灵敏度作为优化目标,微纳米测头灵敏度定为 1 mN。

影响测头灵敏度的结构因素主要有薄壁圆环直径、厚度、高度,弧长比以及测杆直径和长度(测杆底部到测头顶点的高度)。正交试验设计是安排多因素试验、寻求最优水平组合的一种高效率试验设计方法。因此采用正交试验设计法对测头系统的结构尺寸进行优化。

三坐标只会三个方向(x 、 y 、 z 方向)的力。要实现测头的自标定,只需要分析三个方向测力的影响,不考虑力矩的影响,因此对 x 、 y 、 z 三方向测量灵敏度进行优化。

2.2 试验水平因素的选取

弹性体薄壁圆环厚度越小,灵敏度越好,当厚度增大到 25 μm 时,弹性体的形变就不是很明显了(在同载荷的情况下,弹性体的应变越大,即其灵敏度越高)。考虑到其加工的难度和成本,薄壁的

深宽比应尽量大,即直径大些,深度小一些。由此选定薄壁的直径为 5 mm,厚度为 20 μm ,高度通过正交试验法确定。测杆的直径越细,形变越集中在测杆测球部分,弹性体形变越不明显。结构的形变应集中在弹性体部分,通过试验选定测杆直径为 0.2 mm,长度通过正交试验方法确定。

综上选取对灵敏度影响较大的结构因素即孔间薄壁高度(A)、圆环高度(B)(弹性体三层敏感区域的中间层的高度)、弧长比(C)、测杆长(D)为因素,各因素的水平取 4,获得正交试验表(见表 1)。根据正交试验设计法则,建立不同尺寸的测头系统的三维模型后,应用 ANSYS 软件分别进行测头灵敏度分析。

表 1 正交试验水平表

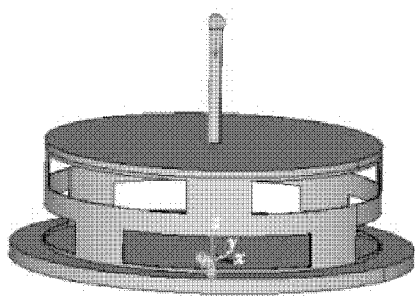
	孔间薄壁高度 /mm	圆环高度 /mm	弧长比	测杆长 /mm
1	0.30	0.3	1.5	1.25
2	0.35	0.4	2.0	1.50
3	0.40	0.5	2.5	1.75
4	0.45	0.6	3.0	2.0

3 ANSYS 仿真分析

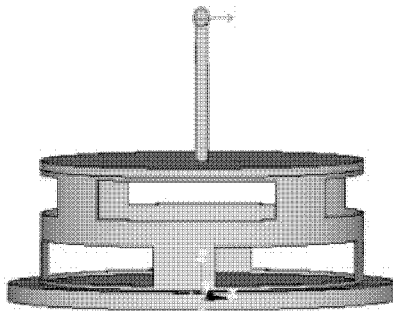
用 ANSYS 软件根据表 1 各尺寸画如图 1 所示模型。测头和测杆部分是碳化钨材料,其弹性模量 $E = 6.5 \times 10^{11}$,泊松比 $\mu = 0.24$;其余部分是硅材料,其弹性模量 $E = 1.28 \times 10^{11}$,泊松比 $\mu = 0.28$ 。

划分网格时由于弹性体部分是薄壁结构,因此采用 SHELL63 网格划分,其余部分采用 SOLID187 网格划分。网格划分方法选择智能划分,等级精度设为 7。

根据测头系统的工作环境,其边界条件为在测头系统底面施加全约束,载荷施加在测球部位(见图 3)。



(a) 轴向(z)受力图



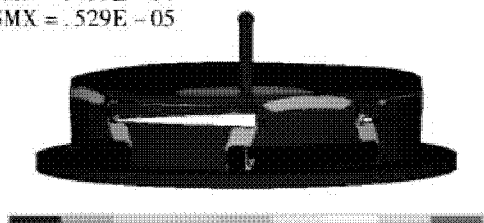
(b) 水平方向(x/y)受力图

图 3 不同方向受力图

通过仿真分析可以得到测头系统的应力应变云图(见图 4)。

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB=1
TIME=1
EPTOEQV (AVG)
DMX = .277E-07
SMN = .499E-14
SMX = .529E-05

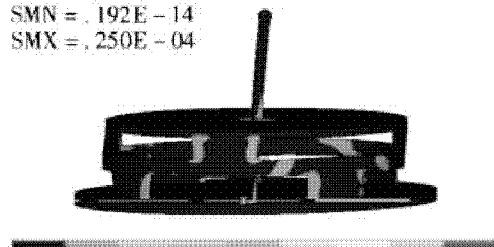
ANSYS
AUG 17 2011
16:35:16



(a) 受轴向(z)载荷的应变云图

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB=1
TIME=1
EPTOEQV (AVG)
DMX = .177E-06
SMN = .192E-14
SMX = .250E-04

ANSYS
AUG 19 2011
23:39:10



(b) 受水平(x/y)载荷的应变云图

图 4 不同载荷应变云图

4 极差分析及结果

施加轴向载荷 $F = 1 \text{ mN}$, 应用 ANSYS 软件对测头灵敏度进行分析。测头灵敏度 ($\mu\text{E}/\text{mN}$) 定义为施加的载荷使弹性体所产生的应变与所受载荷的比值。

利用极差分析法来确定因素的优水平以及因素的主次关系。对轴向载荷下计算结果(见表 2)进行极差分析, 结果如表 3 所示。

表 2 正交表与轴向载荷分析计算结果

	A	B	C	D	灵敏度 $Y/(\mu\text{E}/\text{mN})$
1	1	1	1	1	5.29
2	1	2	2	2	7.06
3	1	3	3	3	8.27
4	1	4	4	4	8.18
5	2	1	2	3	8.40
6	2	2	1	4	4.42
7	2	3	4	1	9.87
8	2	4	3	2	7.08
9	3	1	3	4	10.20
10	3	2	4	3	11.10
11	3	3	1	2	3.87
12	3	4	2	1	5.76
13	4	1	4	2	11.70
14	4	2	3	1	8.97
15	4	3	2	4	6.04
16	4	4	1	3	3.69

表 3 轴向载荷的极差分析及结果 ($\mu\text{E}/\text{mN}$)

	A	B	C	D
K_1	28.80	35.59	17.27	29.89
K_2	29.77	31.55	27.26	29.71
K_3	30.93	28.05	34.52	31.46
K_4	30.40	24.71	40.85	28.84
极差 R	0.53	2.72	5.90	0.66
主次顺序	$C > B > D > A$			
优水平	A_3	B_1	C_4	D_3
优组合	$A_3 B_1 C_4 D_3$			

由于结构的对称性, 水平 x 和水平 y 方向载荷作用下结果相同。同样施加 x 或 y 方向载荷 $F = 1 \text{ mN}$, 其极差分析计算结果如表所示。

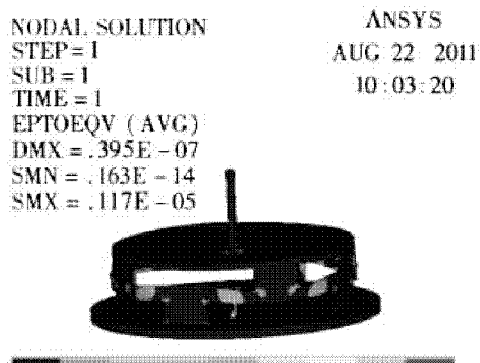
表 4 水平方向载荷的极差分析及结果 ($\mu\text{E}/\text{mN}$)

	A	B	C	D
K_1	60.30	77.40	45.40	62.00
K_2	64.10	72.30	64.70	64.20
K_3	74.60	64.60	77.90	73.80
K_4	75.80	60.50	86.80	74.80
极差 R	3.88	4.23	10.35	3.20
主次顺序	$C > B > A > D$			
优水平	A_4	B_1	C_4	D_4
优组合	$A_4 B_1 C_4 D_4$			

从上述分析可知, 测头在轴向载荷作用下, 最优组合为 $A_3 B_1 C_4 D_3$, $D > A$; 测头在水平方向载荷

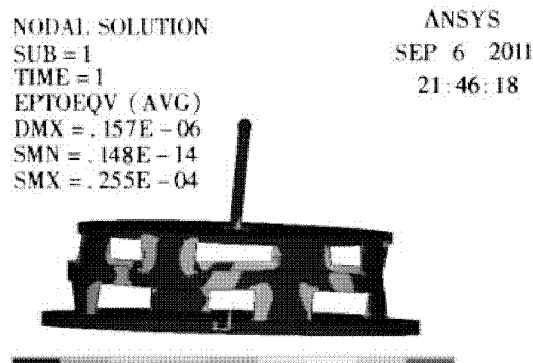
作用下,优组合为 $A_4B_1C_4D_4$, $A > D$;由此选定最终最优组合为 $A_4B_1C_4D_3$,即:

孔间薄壁高度 = 0.45 mm, 圆环高度 = 0.3 mm
弧长比 = 3:1, 测杆长 = 1.75 mm。



(a) 受轴向(z)载荷的应变云图

根据以上参数用 ANSYS 软件建立模型进行仿真分析,得到其受轴向载荷和水平载荷的应力应变如图 5 所示。



(b) 受水平(x/y)载荷的应变云图

图5 不同方向应变云图

由图 5 可计算出,测头理论上轴向载荷的灵敏度达到 $11.7 \mu\epsilon/\text{mN}$, 水平方向载荷的灵敏度达到 $25.5 \mu\epsilon/\text{mN}$ 。

同时确定利用弹性体测量不同方向力和力矩的最佳测量区域,即弹性体应变值大的区域,为后续的测头压阻式传感器的加工位置确定了理论基础。

5 结论

本文设计的基于微力测量原理的自修正微纳米测头系统的结构,创新性地设计了测头的弹性体和探针的组合机构。该部件体积小,具有极低的惯量和极小的运动质量,结构具有对称性,采用高精度加工方法加工的探针位于触发机构的中心,具有各向同性特性。运用 ANSYS 软件和正交试验方法进行结构的优化设计。克服了传统设计方法的局限性,大大减小了试验次数,较全面的反映了各结构参数对测头系统灵敏度的影响,获得了合理的优化结果。通过仿真分析得到测头系统的理论灵敏度值和弹性体的最佳测量区域,为后续测头系统实际制作、性能标和误差实时自修正研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] A WECKENMANN, G PEGGS, J HOFFMANN. Probing Systems for Dimensional Micro- and Nano- Metrology [J]. Meas Sci Technol. 2006 (17):504-509.
- [2] H N HANSEN, K CARNERIRO, H HAITJEMA, et al. Dimensional micro and nano metrology [J]. Annals of the CIRP. 2006,55:1-23.

- [3] S BUTEFISCH, S BUTTGENBACH, T K-B, et al. Micromechanical three-axial tactile force sensor for micromaterial characterization [J]. Microsystem Technologies, 2001,7:171-174.
- [4] W PRIL. Development of High Precision Mechanical Probes for Coordinate Measuring Machines [D]. Eindhoven: Eindhoven University, 2002.
- [5] H HAITJEMA, W PRIL, P H J SCHELLEKENS. A Silicon-Etched Probe for 3-D Coordinate Measurements with an Uncertainty Below 0.1μm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001,50:1519-1523.
- [6] YASUHIRO TAKAYA HSSTTM. Fundamental study on the new probe technique for the nano-CMM based on the laser trapping and Mirau interferometer [J]. Measurement, 1999,9-18.
- [7] K C FAN, C Y LIN, L H SHYU. The development of a low-cost focusing probe for profile measurement [J]. Meas Sci Technol, 2000, 11 (1): 1-7.
- [8] TIANFENG WU, TAO ZHANG, HONGTAO YANG. Research on Complete Shear Mode Six-Axis Force Sensor [C]// Proceedings of WCICA2006, Dalian, China, June. 2006:25-26.
- [9] 张新. 应变式三维加速度传感器设计及相关理论研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.
- [10] 宋伟. 六维力传感器优化设计及静动态特性研究 [D]. 淮南:安徽理工大学, 2010.

(责任编辑:李 丽,范 君)

多元掺杂负载型 TiO_2 光催化剂的制备与性能

薛茹君, 代新营, 黄 静

(安徽理工大学化工学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了提高 TiO_2 光催化剂日光催化性能及解决催化剂回收问题, 采用微乳液法制备了 La^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ce^{4+} 共掺杂 TiO_2 /粉煤灰微珠光催化剂, 用紫外-可见分光光度计测定了光催化剂的可见光吸收性能, 用能谱仪 (EDS) 分析了催化剂的元素含量, 以甲基橙为模型污染物考察了催化剂的光催化性能。实验结果表明: 掺杂复合粒子在可见光区吸光性能均高于 TiO_2 /漂珠; 且多元素掺杂有协同作用, 催化剂的吸收边带红移更多, 对可见光的吸收也更强。日光照射下, $(\text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ce}^{4+})$ 三元共掺杂催化剂的活性 $\approx (\text{La}^{3+}, \text{Ce}^{4+})$ 二元共掺杂催化剂的活性 $> \text{Fe}^{3+}$ 、 La^{3+} 单掺杂催化剂的活性。

关键词: 共掺杂; 负载; TiO_2 ; 光催化剂

中图分类号: TB332: O 614 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0018-04

Study of Preparation and Performance of carried co-doped TiO_2 Photocatalyst

Xue Ru-jun, Dai Xin-ying, Huang Jing

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

Abstract: Co-doped TiO_2 /cenosphere photocatalysts with La^{3+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ce^{4+} were prepared by microemulsion method. The visible light absorption performances of the co-doped TiO_2 /cenosphere photocatalysts were investigated by UV-visible spectrophotometer. The content of the finite element of catalysts were analyzed by EDS. The catalytic activity of the photocatalyst was studied with methyl orange as model pollution. The results show that in visible light range the absorption ability of the doped composite particles was better than TiO_2 /cenosphere. Multi-doping for TiO_2 /cenosphere has synergism effect. Co-doping makes the red-shift of the absorbing band more and the absorption ability for visible light greater. The sunlight photocatalytic activity of the $(\text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ce}^{4+})$ - TiO_2 /cenosphere $\approx (\text{La}^{3+}, \text{Ce}^{4+})$ - TiO_2 /cenosphere $> \text{La}^{3+}$ (or Fe^{3+})- TiO_2 /cenosphere.

Key words: co-doped; carried; TiO_2 ; photocatalyst

TiO_2 光催化剂对各类有机物废水有效进行光催化反应分解为 CO_2 和 H_2O , 达到除毒、脱色、矿化, 从而最终消除其对环境的污染^[1]。但由于 TiO_2 只能被紫外光激发, 对太阳能的利用率很低; 且光量子效率较低, 故而影响了其应用。为了提高其光催化过程的量子效率, 有不少研究者从掺杂、表面改性等角度进行了研究。研究表明, 在纳米 TiO_2 的制备中, 通过掺杂特定的离子, 可使 TiO_2 具有某一方面的特性, 以期达到特殊的用途^[2]。可

供掺杂的离子众多, 从经济、实用、理论研究角度来看, 掺杂金属离子的方法更具有优势, 其中过渡金属掺杂和稀土离子掺杂改性日益引起关注^[3-5]。催化剂的固定问题是其应用中一个更为实际的问题, 近年来人们开始研究负载型 TiO_2 光催化剂的制备^[6]。粉煤灰微珠化学性质稳定、热稳定性好、质轻无毒、价格低廉, 作为催化剂载体性能良好^[7]。

本文研究以微乳液法制备共掺杂粉煤灰微珠负载 TiO_2 光催化剂, 旨在解决催化剂回收问题及

收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金重大资助项目 (ZD200903); 淮南市科技专项基金资助项目

作者简介: 薛茹君 (1963-), 女, 教授, 博士, 从事工业催化、纳米材料、矿物加工等方面教学与研究。

日光降解性能,为实现 TiO₂ 光催化剂的工业化应用提供基础。

1 实验部分

1.1 实验药品与仪器

TiCl₄ (C. P),宜兴市展望化工试剂厂;粉煤灰漂珠,淮南电厂;TX-100、油酸、硝酸铁、硝酸镧、硫酸铈、硫酸钴皆为分析纯试剂。

日本日立公司的 UV3010 型紫外-可见分光光度计;上海分析仪器厂的 722 型可见分光光度计;美国 FEI 公司的 FEI-2000 扫描电镜附带 EDS 能谱仪。

1.2 催化剂制备

用油酸、TX-100、正丁醇、环己烷按 1:1:1:4 构成油溶液,分成两份。一份按 3:1.4 与 NaOH 水溶液 (2 mol/L) 配制微乳液 I,将粉煤灰漂珠分散于其中;另一份按 4:1 与 TiCl₄、硝酸铁(或硝酸镧、硫酸铈、硫酸钴)溶液配制微乳液 II,在搅

拌下将两者缓慢混合,得到 Fe(OH)₃、Co(OH)₂、La(OH)₃ 或 Ce(OH)₄ 掺杂 Ti(OH)₄ 包覆的粉煤灰漂珠;然后经破乳、分离、洗涤、干燥、煅烧,得到 La³⁺、Fe³⁺、Co²⁺ 或 Ce⁴⁺ 共掺杂的 TiO₂/漂珠复合光催化剂微粒。

1.3 分析与表征方法

以紫外-可见漫反射光谱表征催化剂的光吸收性能;用 EDS 能谱表征催化剂的化学组成;用可见分光光度计测定甲基橙溶液降解前后的吸光度,计算出脱色率 De ^[6] 表征催化剂活性。

$$De = (A_0 - A_t) / A_0 \times 100\%$$

式中: A_0 为溶液的初始吸光度值; A_t 为反应 t min 时溶液的吸光度值。

2 结果分析与讨论

2.1 EDS 能谱分析

用 EDS 能谱对催化剂的化学组成进行了表征,结果如图 1~图 2 所示。

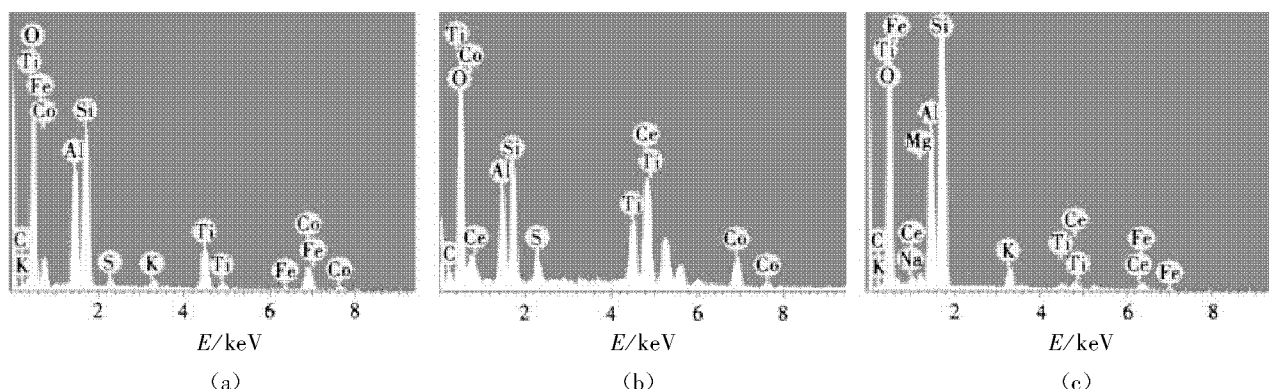


图 1 二元掺杂 TiO₂/漂珠复合粒子的能谱图

由图 1 可以看出,微珠上负载了 TiO₂,且分别含有 Fe-Co(见图 1a)、Co-Ce(见图 1b)和 Fe-Ce 二种掺杂元素(见图 1c)。在图 2 中,微珠上负载了 TiO₂,且分别含有 Fe-Co-Ce(见图 2a)和 La

-Fe-Ce 三种掺杂元素(见图 2b)。由 EDS 能谱分析可知,用微乳液方法确实将金属离子掺杂 TiO₂ 包覆到粉煤灰微珠表面上,获得了多元掺杂负载型 TiO₂ 光催化剂。

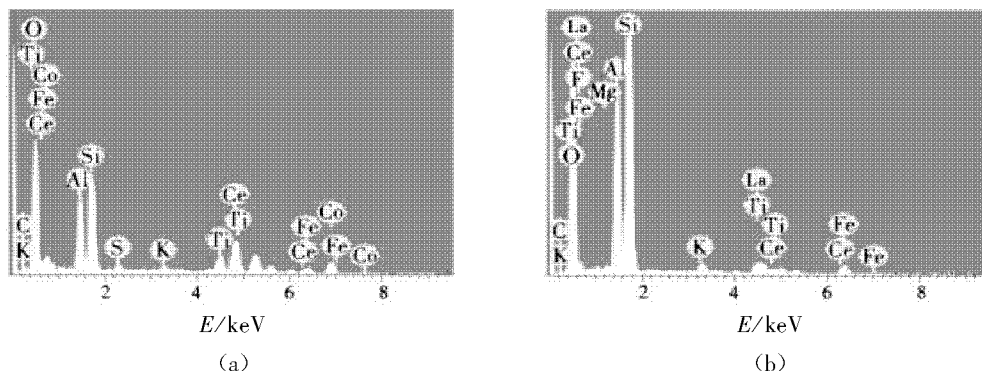
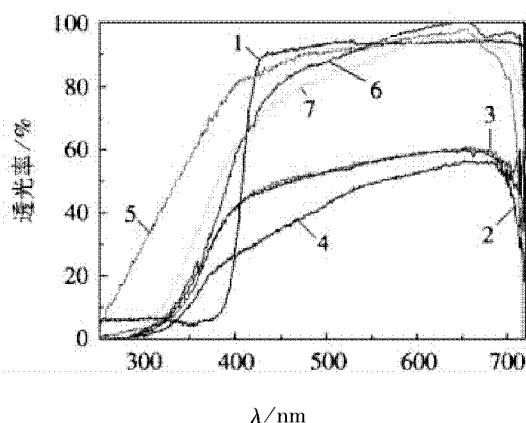


图 2 三元掺杂 TiO₂/漂珠复合粒子的能谱图

由于几种金属离子的溶度积和沉淀的 pH 值范围相差较大,易造成粒子表面上沉淀物的组成不均匀,故需要注意沉淀的工艺条件,使不同金属离子尽可能同时沉淀出来,以保证沉淀物的组成均匀,这样,多元素掺杂才会有很好的协同效应。进行多元掺杂时,应该调整金属离子的加入顺序。

2.2 UV-Vis 光谱 (DRS) 分析

以紫外-可见漫反射光谱对载体漂珠及纯 TiO_2 、 TiO_2 /漂珠、掺杂 TiO_2 /漂珠催化剂的光吸收性能进行了表征(见图 3)。



1. TiO_2 ; 2. $\text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2$ /漂珠; 3. $\text{La}^{3+} - \text{Ce}^{4+} - \text{TiO}_2$ /漂珠; 4. $\text{Co}^{2+} - \text{Ce}^{4+} - \text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2$ /漂珠; 5. 漂珠; 6. TiO_2 /漂珠; 7. $\text{La}^{3+} - \text{TiO}_2$ /漂珠

图3 掺杂 TiO_2 /漂珠光催化剂的 UV-Vis 漫反射光谱图^[8]

由图 3 可见: TiO_2 负载到漂珠上后,其吸收光的能力有所降低,在紫外光区域内尤其如此。但是采用金属离子改性可以使 TiO_2 /漂珠吸收光的能力得到改善,尤其是多元金属离子掺杂后,样品在可见光区域的光吸收能力大大超过了 TiO_2 /漂珠的吸收能力。多元掺杂复合粒子在紫外区和可见光区吸光性能均高于 TiO_2 /漂珠,其中 $\text{La}^{3+} - \text{Ce}^{4+}$ 二元掺杂样品的吸收边带发生了红移,对可见光的吸收比 La^{3+} 单元掺杂样品更强,这说明双元素掺杂有协同作用; $\text{Co}^{2+} - \text{Ce}^{4+} - \text{Fe}^{3+}$ 三元掺杂样品的吸收边带与 $\text{La}^{3+} - \text{Ce}^{4+}$ 二元掺杂样品的相比发生红移更多些,且对可见光的吸收比 $\text{La}^{3+} - \text{Ce}^{4+}$ 二元掺杂样品的更强,主要原因可能是: Fe^{3+} 、 Co^{2+} 取代了部分 Ti^{4+} 的晶格位置,在 TiO_2 带隙中形成杂质能级,使半导体光生电子跃迁到导带所需的能量减少,能量较小的光子也可以激发光生电子跃迁,

故光谱红移,光响应范围扩宽。而 Ce^{4+} 的 5d 空轨道提供了较好的电子转移轨道,可以作为 TiO_2 光催化反应时所产生的光生电子的转移场所,充当电子陷阱;此外掺杂 Ce^{4+} 以氧化物的形态包裹在 TiO_2 的外面阻碍其晶粒长大,且它能够吸收较宽范围的光辐射,并把能量传递给 TiO_2 ,从而提高光吸收率。因此, $\text{Co}^{2+} - \text{Fe}^{3+} - \text{Ce}^{4+}$ 三元共掺杂抑制了光生电子和空穴的复合,提高了光量子效率。

2.3 不同离子掺杂对 TiO_2 /漂珠光催化性能的影响

日光照射下,不同离子掺杂均提高了 TiO_2 /漂珠的催化活性(见表 1),各种掺杂催化剂的光催化活性顺序如下:

$(\text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ce}^{4+}) - \text{TiO}_2/\text{漂珠} > (\text{La}^{3+}, \text{Ce}^{4+}) - \text{TiO}_2/\text{漂珠} \approx \text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠} > \text{La}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠} > \text{TiO}_2/\text{漂珠}$

表 1 不同离子掺杂的 TiO_2 /漂珠对甲基橙的脱色率

催化剂	脱色率/%
$0.5\% \text{Co}^{2+}, 0.5\% \text{Ce}^{3+}, 0.1\% \text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$	65
$0.5 \text{La}^{3+}, 0.5\% \text{Ce}^{4+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$	56
$0.5\% \text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$	55
$1\% \text{La}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$	42.5
$\text{TiO}_2/\text{漂珠}$	17

注:甲基橙溶液 10 mg/L; pH=4; 催化剂用量 1 g/L。

TiO_2 的光催化活性与晶粒大小、比表面积、表面羟基等物理性质相关。一般认为,掺杂金属离子后能够形成捕获中心,使在 TiO_2 表面有效的转移电荷,减缓和消除电子与空穴的复合,改善 TiO_2 的光催化效率,提高量子产率。

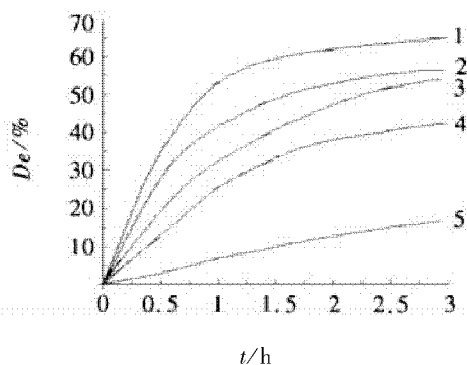
La^{3+} 、 Ce^{4+} 共掺杂催化剂的光催化活性比单掺杂催化剂的活性高的原因是: La_2O_3 (CeO_2) 包裹在 TiO_2 晶粒外面, Ti^{4+} 可进入 La_2O_3 (CeO_2) 的晶格,从而引起电荷不平衡,为弥补这种电荷不平衡, TiO_2 表面将吸附较多的 OH^- ,表面 OH^- 可与光生空穴反应,生成活性羟基 $\cdot\text{OH}$ 。一方面,使光生电子与空穴有效分离;另一方面生成了较多强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ 参与光催化反应,从而有效地提高光催化性能。对于三元掺杂的催化剂来说:掺杂的 Co^{2+} 取代了部分 Ti^{4+} 的晶格位置,在 TiO_2 带隙中形成杂质能级,使半导体光生电子跃迁到导带所需的能

量减少,能量较小的光子也可以激发光生电子跃迁,故光谱红移。 Fe^{3+} 是易变价过渡金属离子, $\text{Fe}^{4+}/\text{Fe}^{3+}$ 能级靠近 TiO_2 价带,而 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 能级靠近 TiO_2 的导带。 Fe^{3+} 的掺入使 TiO_2 同时具有两种势阱,既能作为电子的捕获中心,也能作为空穴的捕获中心,捕获的载流子又容易释放出来,所以 Fe^{3+} 掺杂使催化剂的光催化活性提高。 Co^{2+} 、 Fe^{3+} 取代部分晶格 Ti^{4+} 必然造成氧缺陷,氧空缺的存在被认为可以促进金红石相的晶粒生长,因此, Co^{2+} 、 Fe^{3+} 掺杂对 TiO_2 由锐钛矿型向金红石型的转变有促进作用;而 Ce^{4+} 的掺入可以抑制 TiO_2 由锐钛矿向金红石的转变,提高光催化活性高的锐钛矿型含量,并且使 TiO_2 晶粒减小,量子化效应增大。因此, Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ce^{4+} 共掺杂的协同作用使得催化剂的光催化活性比单一离子掺杂和二元掺杂的更高。

2.4 光照时间对甲基橙脱色率的影响

实验所得日光照射下,掺杂 TiO_2 /漂珠催化剂对甲基橙的脱色率随时间的变化关系如图4所示。

由图4可知,随着反应时间延长,甲基橙脱色率逐渐升高;但日光照射下超过3h后,脱色率升高幅度缓慢。



1. $(\text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ce}^{4+}) - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$; 2. $(\text{La}^{3+}, \text{Ce}^{4+}) - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$; 3. $\text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$; 4. $\text{La}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠}$; 5. $\text{TiO}_2/\text{漂珠}$

图4 甲基橙脱色率与光照时间的关系

3 结论

1) 多元掺杂复合粒子在可见光区吸光性能均高于 $\text{TiO}_2/\text{漂珠}$ 。其中 $\text{La}^{3+} - \text{Ce}^{4+}$ 二元掺杂样品虽然其吸收边带红移不多,但对可见光的吸收比 La^{3+} 单元掺杂样品的更强。 $\text{Co}^{2+} - \text{Ce}^{4+} - \text{Fe}^{3+}$ 三

元掺杂样品的吸收边带发生红移,且对可见光的吸收比 $\text{La}^{3+} - \text{Ce}^{4+}$ 二元掺杂样品的更强。这说明多元元素掺杂有协同作用,催化剂的吸收边带红移更多,对可见光的吸收也更强。

2) 日光照射下,不同离子共掺杂均提高了 $\text{TiO}_2/\text{漂珠}$ 的催化活性,各种掺杂催化剂的光催化活性顺序如下:

$$\text{La}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠} < \text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2/\text{漂珠} \approx (\text{La}^{3+}, \text{Ce}^{4+}) - \text{TiO}_2/\text{漂珠} < (\text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ce}^{4+}) - \text{TiO}_2/\text{漂珠}.$$

日光照射3h后,甲基橙脱色率增加缓慢。

参考文献:

- [1] 卢维奇,赵黎明. 纳米 TiO_2 改性可见光催化降解有机物研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(5): 10-15.
- [2] PAOLA A D, GARCIA - LOPEZ E, IKEDA S, et al. Photocatalytic degradation of organic compounds in aqueous system by transition metal doped polycrystalline TiO_2 [J]. Catalysis Today, 2002, 75 (1-4): 87-93.
- [3] LIU J W, ZHENG Z X, ZUO K H, et al. Preparation and Characterization of Fe^{3+} - doped Nanometer TiO_2 Photocatalysts [J]. J Wuhan Univ. Technol. - Mater. Sci. Ed., 2006, 21 (3): 57-60.
- [4] SHI J Y, LENG W H, CAO J L, et al. Effect of cobalt precursor on microstructures and visible light photoactivity of doped TiO_2 powders [J]. Chinese J Chem Phys, 2006, 19(5): 463-468.
- [5] MASATO W, HIDEKAZU T, YASUO N, et al. Surface structure and visible light photocatalytic activity of titanium - calcium hydroxyapatite modified with $\text{Cr}(\text{III})$ [J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22: 498-503.
- [6] 薛茹君,吴玉程. 微乳液制备负载型共掺杂 TiO_2 光催化剂及性能研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38 (1): 140-143.
- [7] 黄静,薛茹君. 粉煤灰微珠负载的 $\text{Fe}^{3+} - \text{TiO}_2$ 光催化剂的制备及性能[J]. 粉煤灰综合利用, 2011 (1): 11-14.
- [8] 薛茹君,代新营,黄静. 负载型共掺杂 TiO_2 对城市废水的日光降解作用[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2011, 31 (4): 9-12.

(责任编辑:李 丽,范 君)

基于 DSP 的光伏 LED 照明驱动控制系统

祝 青, 王晓晨, 姜 威, 崔荣祥, 周 钰

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 结合光伏电池输出电压变动范围大、输出功率不稳定的特点, 设计了一种基于 TMS320F2812 的 LED (Light Emitting Diode) 照明驱动控制系统, 该控制系统根据负载和电源的变化自适应切换驱动电路, 调节 LED 负载电流, 提高其适应性和调节范围。实验结果证明获得了更大的负载电流调节范围和调光范围, 实现了光伏 LED 的恒流驱动。

关键词: 光伏电池; LED 照明; 驱动控制; 稳定电流

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0022-04

Photovoltaic LEDs Lighting Drive Control System Based on TMS320F2812

ZHU Qing, WANG Xiao - chen, JIANG Wei, CUI Rong - xiang, ZHOU Yu

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: Considering broad range of photovoltaic battery output voltage and instability of the output power, a kind of LED (Light Emitting Diode) lighting - driving control system based on TMS320F2812 was designed, the control system according to changes in load and supply self - adaptively switch driving circuits, adjusting LED load current, to improve their adaptability and adjustment range. Experimental results show that a greater load current adjustment range and dimming range are obtained, and photovoltaic constant current LED driver is realized.

Key words: photovoltaic battery; LEDs lighting; driving control; constant current

随着太阳能的开发利用, 在整个照明领域, 以白炽灯和荧光灯为主力军的角色已经发生改变, 备受人们关注的光伏 LED (Light Emitting Diode) 灯已经开始进入市场。作为一种新型的绿色照明光源, 正在以独特的优势取代传统的电光源。采用 LED 照明主要有以下几个特点: LED 灯的发光效率高, 是荧光灯的 2 倍, 白炽灯的 10 倍; LED 灯的供电电压为低压直流, 而太阳能组件输出电压和蓄电池的储能电压都是低压直流, 省去了交直流转换的逆变器, 节约了设备成本; 寿命长, LED 灯的理论寿命可长达 10 万小时^[1]; LED 是典型的电流型器件, 对工作电流的大小和稳定性要求较高, 电流的波动

会影响 LED 的发光效率和色彩, 而电流超过额定值将损害 LED, 降低其使用寿命与可靠性^[2]。常用的 LED 驱动有降压型 (Buck)、升压型 (Boost)、升降压型 (Buck - Boost) 三种, 而常用的驱动控制器只能适用于其中一种, 因此研制一种具有普适性的驱动控制系统具有很好的应用前景。

1 照明控制系统的组成

LED 光源对电流和电压的稳定有着相当高的要求, 电压过高会使 LED 变色甚至损坏。LED 驱动电路的主要任务是输出稳定的负载电流, 其作用是将太阳能电池板输入的不稳定电压, 通过 DC/

DC-1 变换器输出稳定的负载电流,保证 LED 灯的正常亮度和使用寿命。一般的 LED 驱动电路虽然能基本满足需要,但只能用于特定的电源或特定的电压环境,这种驱动电路受环境因素影响太大。为提高 LED 照明驱动系统的适应性和灵活性。本文设计了基于 TMS320F2812 的 DSP 芯片为控制核心的光伏 LED 照明驱动控制系统(见图 1),它能根据环境的变化实时监控和调节驱动器输出的

负载电流。由于 TI 公司的 TMS320F2812 系列的 DSP 芯片拥有强大的控制功能和高速的处理速度,在控制领域有较好的表现,因此选用它作为控制系统的核心。LED 照明系统的能量来源是太阳能电池板,白天有光照时产生电能并储存在蓄电池中,在光照强度过低时关闭太阳能电源,以蓄电池的储能作为驱动电源点亮 LED 照明负载。

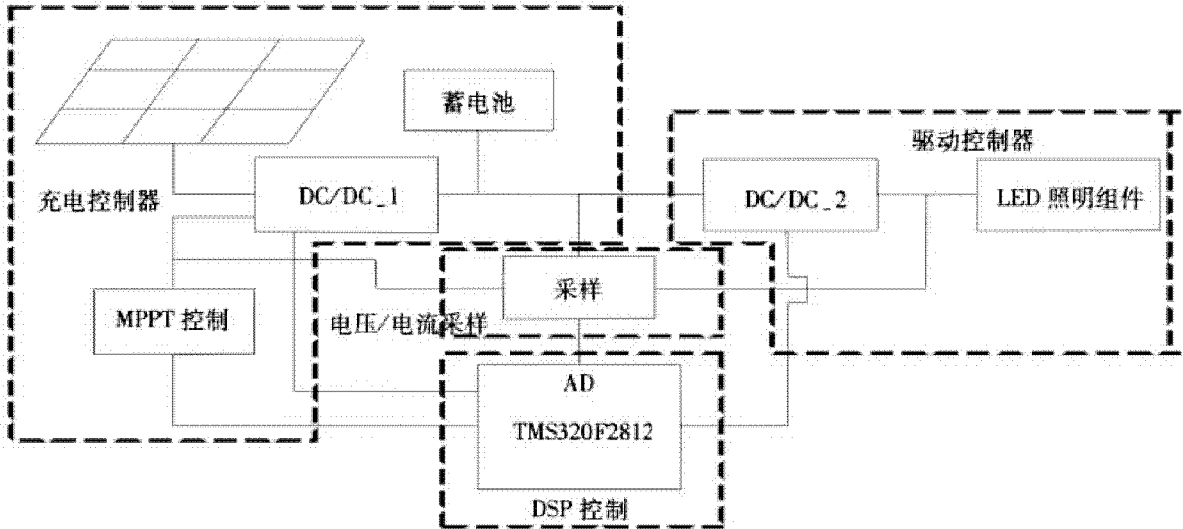


图 1 光伏照明系统结构图

控制系统以 TMS320F2812 为核心,分别由太阳能电池板、充电控制器(DC/DC_1)、蓄电池,驱动控制器(DC/DC_2),电压/电流采样、DSP 控制电路等组成。光伏照明系统工作时,太阳能电池板提供电能,蓄电池的电压为直流 12V LED 照明系统的能量来源是一块太阳能电池板,白天有光照时产生电能并储存在蓄电池中,同时也为 LDE 供电,在光照强度过低时关闭太阳能电源,使用蓄电池作为电源继续工作。为控制芯片和各个驱动电路提供电源,而采样部分将电路中各部分的电压电流数据实时传递给 DSP,DSP 通过输入的采样数据判断系统工作是否正常,并根据数据对输出电路进行控制,从而为 LED 负载提供稳定而持续的电流。

2 驱动控制器的设计

2.1 驱动控制电路

驱动控制电路(见图 2)是直接和照明负载连接的部分,起驱动 LED 负载、稳定负载电流和调光的作用。通过对其储能电感 L、续流二极管 VD、及滤波电容 C 位置的改变,可实现升压或降压的功

能,这些驱动电路又称为直流斩波电路。

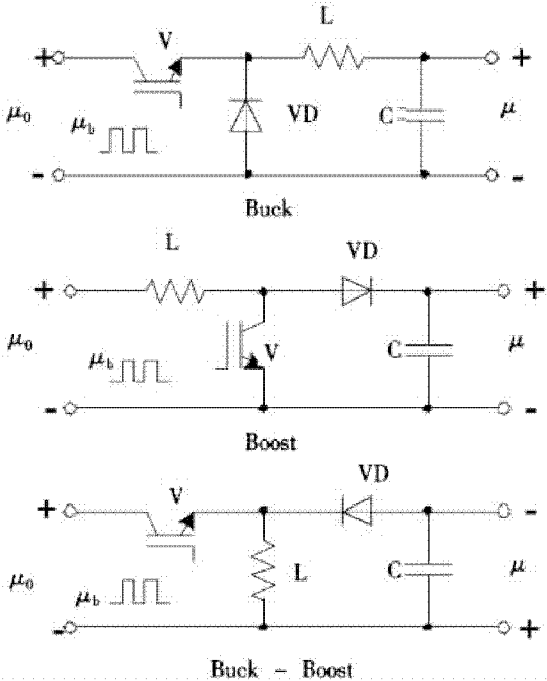


图 2 常见的 LED 驱动电路

在实验中发现,当直流斩波器的负载是 LED 时,调整 PWM 信号占空比的大小对输出电压的影响不大,而对电流的影响很大。以 Buck 电路为例,电感选用 1 mH,电容 100 μ F,负载使用一个普通 1.2 W 的 LED 灯管,输入 5 V 稳压电源,PWM 信号频率设置为 20 kHz,当 PWM 信号占空比从 0.1 至 0.7 变化时,LED 两端电压总在 2.7 V 左右,变化很小,而电流却在 50 mA 到 250 mA 之间大幅变化,LED 的亮度也有变化但变化范围较小。因此可以设计一个两级串联的斩波电路,第一个斩波器起粗

调作用,调节范围较大,根据电源和负载的实际情况决定是 Buck 还是 Boost;第二个斩波器起细调作用,可以使照明亮度保持稳定。另外,Buck 电路只能起降压作用,在调节范围上又有很大的局限性,所以还可以将第二级斩波器设计为双斩波器切换的形式,根据负载的不同和电源的不同灵活切换工作电路,中间用 DSP 控制电子开关实现切换(见图 3)。第一级斩波器以 Buck 型为例,第二级的两个不同的斩波器通过 DSP 的 GPIO 口控制两个电子开关同步切换。

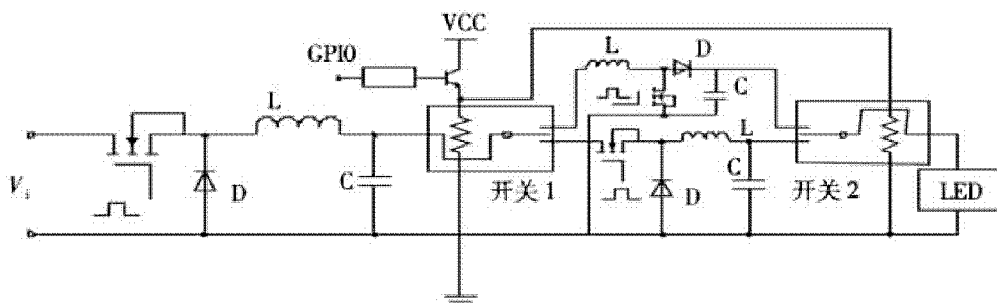


图 3 串联可切换斩波电路

作为输出部分另外一个重要组成部分就是开关管的驱动,开关管选用高速 MOSFET,以 IRF540n 型场效应管为例,实测开启电压是 8 V,而 DSP 输出的 PWM 信号高电平只有 3 V,这就需要在 DSP 与场效应管之间添加转换电路,放大 PWM

信号使之能驱动 MOSFET。另外,为了防止 MOSFET 的高电压串回到 DSP 回路而使之烧毁,必须在 DSP 与驱动电路的之间加入光电耦合器 4N25 进行电气隔离,驱动芯片选择 MOSFET 专用的 IR2125 芯片(见图 4)。

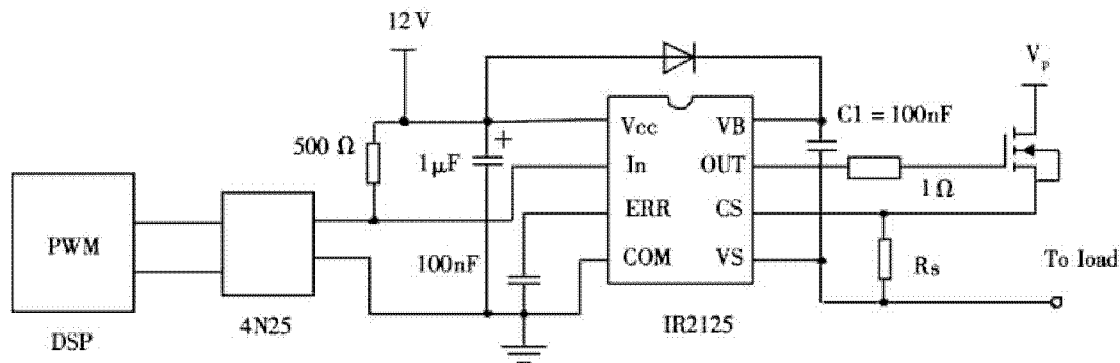


图 4 MOSFET 基本驱动电路

图 4 中 C1 的作用是自举电容,用于抬高 VB 的电压,使驱动芯片能正常输出被放大的 PWM 波。 R_s 为 MOS 管的电流采样电阻,电流采样电压由 CS 与 VS 两端输入,其电压差要求小于 0.5 V,故 R_s 的阻值一般在 1 Ω 以内。

2.2 DSP 控制

DSP 控制集中了对系统的综合监测和控制。DSP 控制分为几个模块,分别是 A/D 模块,EV 事件管理器模块,GPIO 输入输出模块和 CPU 控制模块。

电压/电流信号通过 A/D 转换成 DSP 可识别的数字信号再加以处理,系统共需要 6 路采样信号进行 A/D 转换,分别是太阳能电池输出电压和电流,蓄电池端电压和电流,LED 负载电压和电流。A/D 采样工作方式选择级联模式下的顺序采样,只需开启 ADCINA0 至 ADCINA5 共六个 A/D 端口,用定时器 T_1 启动 A/D 转换,采样周期设置为 1 ms,即采样频率是 1 kHz。每次采样得到的数据先存储起来,采样十次后将这十次的采样值取平均值,根据这个平均值判断系统的工作状态,并对

输出 PWM 波形的占空比进行调整,因此系统的调整频率是 100 Hz。A/D 模块输入信号的最大电压是 3 V,因此要严格控制输入电压的大小。

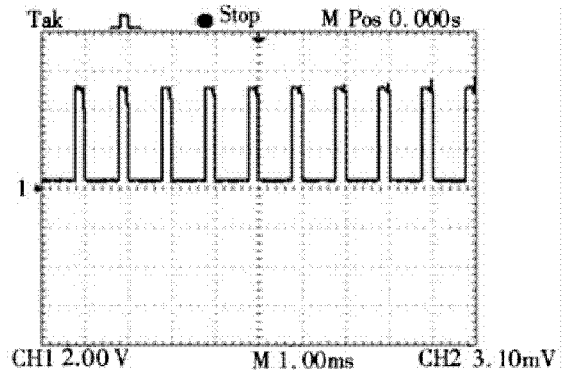
EV 事件管理器用来输出 PWM 驱动脉冲,系统共需要 4 路 PWM 波形,分别用来驱动 4 个功率 MOS 管的导通和关断。4 路 PWM 脉冲分别用 T1PWM ~ T4PWM 产生,PWM 占空比由 A/D 模块反馈回的负载电流大小决定。由于 A/D 采样的触发方式是用 T_1 定时器的上溢信号触发,所以 EV 事件管理器也是控制 A/D 采样的重要组成部分。

GPIO 是 DSP 的通用输入/输出端口,它可以根据采样数据的大小输出高电平或低电平,来控制主电路中的电子开关,从而达到切换工作状态或保护电路的作用。系统为了得到更大的调光范围,采取 boost 电路和 buck 电路相互切换的形式。即当 buck 电路的调压能力达到极限时,CPU 根据这一情况通过 GPIO 输出高低电平把输出电路切换成 boost 工作状态以增大调压范围。

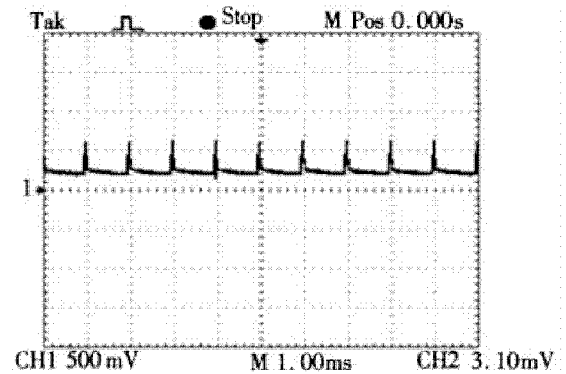
当 DSP 开始工作时,所有数据的初始设定都要使通过 LED 的负载电流为 0,即驱动电路切换成两个 Buck 电路串联,PWM 占空比设为 0,目的是有效地保护 LED 不被开启电路时的涌浪电流损坏。然后,DSP 根据 A/D 模块传回的负载电压电流数据不断增大 PWM 占空比的值直到输出电流值达到预设值。负载电流控制采用滞环比较器,设定一个电流最大值和一个最小值,当输出电流超过最大值或低于最小值时才对 PWM 占空比的值进行调整,使输出电流稳定在设定范围内。当 Buck 电路的调节能力达到极限时,也就是说 Buck 电路已经无法有效地增大电流以满足负载的变化时,DSP 将通过 GPIO 端口及时将驱动电路切换成 Buck 和 Boost 电路串联的形式,以获得更大的调压范围。

3 实验结果分析

驱动电路正常工作时,DSP 产生的 PWM 信号通过光电耦合器传送到驱动芯片 IR2125,信号经过放大后用来驱动场效应管的开通和关断。实验采用 Buck 电路驱动一组 1.2 W 的 LED 灯组,Buck 电路输入端电压为 5 V,储能电感为 0.1 mH,滤波电容为 100 μ F,PWM 信号频率设为 1 kHz。在输出端串联 2.5 Ω 的电流采样电阻,当 DSP 输出的 PWM 信号占空比分别为 30% 和 70% 时,使用示波器测量采样电阻两端的电压波形(见图 5 ~ 图 6)。

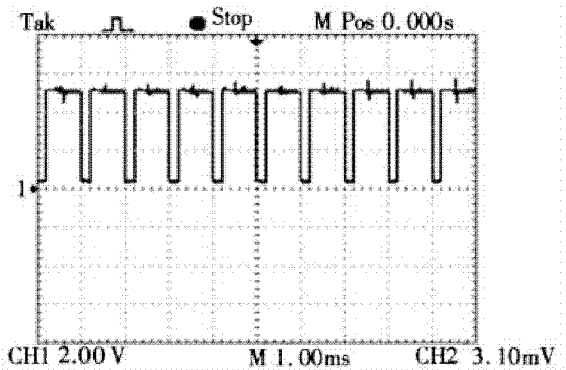


(a) PWM 驱动脉冲

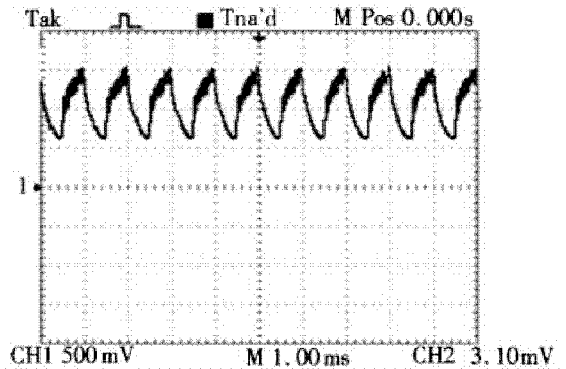


(b) 负载电流采样波形

图 5 PWM 占空比为 30% 时的波形



(a) PWM 驱动脉冲



(b) 负载电流采样波形

图 6 PWM 占空比为 70% 时的波形

(下转第 49 页)

低副瓣边馈微带天线阵列设计

徐 锋

(淮南师范学院电气信息工程学院, 安徽 淮南 232038)

摘 要:在实际应用中要求微带天线具备高增益、低副瓣、波束控制等特性。基于角馈方形微带贴片阵列天线的理论分析,采用中心短路、边缘馈电的方式设计了低副瓣 ku 波段单脉冲微带平面天线阵列。经测试所设计的 10×10 单元单脉冲微带天线阵的副瓣电平达到了 -19.5 dB。结果证明该设计方法对高增益单脉冲天线设计是有效可行的。

关键词:边馈;微带天线阵;旁瓣;单脉冲

中图分类号: TN820.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0026-03

Design of a Side-fed Microstrip Antenna Array with Side-lobe

XU Feng

(School of Electrical And Information Engineering, Huainan Normal University, Huainan Anhui 232038, China)

Abstract: Microstrip antenna array with high gain and low-side lobe is required in many applications. Through the theoretical study on corner-fed square patch array with coplanar feed. A side-fed Ku band monopulse microstrip antenna array with -19.5 dB side-lobe has been realized and measured. The results indicate validity of this method for design of high gain and monopulse antenna.

Key words: side-fed; microstrip antenna array; side lobe; monopulse

传统的单脉冲系统多采用波导结构,因而天线体积和质量较大。考虑到微带天线的质量轻、易与集成电路实现一体化设计、成本低等特点,微带天线逐渐走入研究人员的视野,成为单脉冲天线大家庭中的一员。

2003 年文献[1]设计出了一个一维的低损耗双向辐射单脉冲微带天线阵,获得大于 -10 dB 的旁瓣电平;在频率较高的毫米波波带,文献[2]给出了一种共面单脉冲微带天线设计,但其副瓣并不理想;在 ku 波段,文献[3]设计出了 16×16 元的矩形贴片单脉冲均匀分布平面阵,最大增益为 24.5 dB,副瓣 < -17 dB;文献[4]中设计的 16 元单脉冲矩形贴片线阵,为了获得较低的旁瓣,每个单元都与衰减器和相位调节器相连。上述的微带阵列设计都是采用中心馈电结构,但在(主被动)双频复合天线或多频复合天线等需要两副或多副馈

电结构时,采用中心馈电会使中心结构拥挤,甚至无法实现。

本文设计了一种中心短路、边缘馈电结构的微带馈电形式,采用两边完全等长的角馈式方形贴片,由四分之一波长阻抗变换段来控制阵列电流分布,获得低造价的低旁瓣电平设计。与传统中心馈电结构相比,这种馈电方式易于实现双频复合天线或多频复合天线模式。

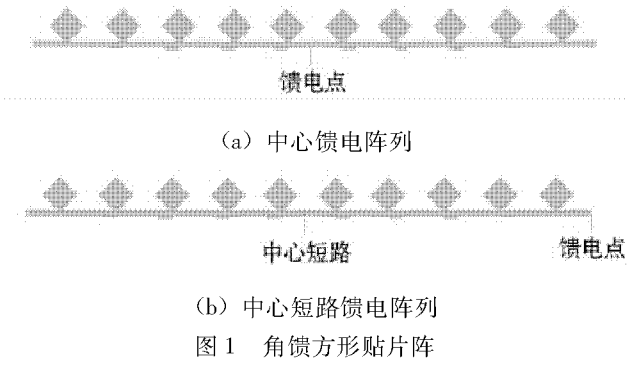
1 角馈方形贴片理论分析

一般的中心馈电角馈方形贴片微带线阵(见图 1a),利用各元间馈线形成四分之一波长阻抗变换段来控制阵列电流分布。采用线阵中心短路,边缘馈电的馈电结构仍采用四分之一波长阻抗变换段来控制阵列电流分布(见图 1b)。因此对多条并列的线阵用锥削馈电网络连接起来,便形成面阵。

收稿日期:2012-04-05

基金项目:企业产学研委托研发课题资助项目(2012HX02)

作者简介:徐锋(1977-),男,安徽淮南人,讲师,硕士,研究方向:电子信息工程。



假设 Y_A 为各贴片的输入导纳, Y_{in} 是由馈电点向左端看去的输入导纳。 Y_{c1} 和 Y_{c2} 分别是两节四分之一波长阻抗变换段的特性导纳。

故对 $N=2n$ 元线阵, 右侧 n 元阵的输入导纳为

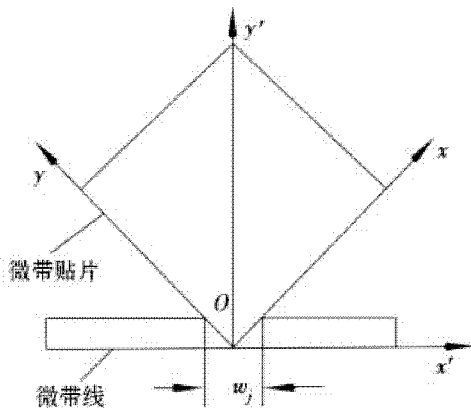
$$Y_{in} = Y_1 = Y_A + n_1^2 Y_2 = Y_A + n_1^2 (Y_A + n_2^2 Y_3) = \dots = Y_A (1 + n_1^2 + n_1^2 n_2^2 + \dots + n_1^2 n_2^2 \dots n_{n-1}^2) \quad (1)$$

即输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{Z_A}{1 + n_1^2 + n_1^2 n_2^2 + \dots + n_1^2 n_2^2 \dots n_{n-1}^2} \quad (2)$$

当工作于谐振频率附近时, 贴片阻抗 $Z_A \approx R_A$, R_A 为谐振电阻 (Ω), 与 f_r (GHz), w 及 h 有关。 w_j 的意义如图2所示。 R_A 的经验公式为

$$R_A = 113 \frac{f_r^{0.354}}{\left[\frac{w_j}{h}\right]^{0.24}} \quad (3)$$



前面定义的 n_i 将决定各贴片的激励电流, 两节四分之一波长阻抗变换段形成一个 $1:n_i$ 的变压器。从而得各贴片电流的相对值 (令中心处的第 $i=1$ 号贴片电流为 $1A$)。

$$I_1 = Y_A V = 1$$

$$I_2 = n_1 Y_A V = n_1$$

$$I_3 = n_2 I_2 = n_2 n_1$$

$$I_i = n_{i-1} n_{i-2} \dots n_1 \quad (5)$$

2 天线阵列设计

2.1 馈电网络设计

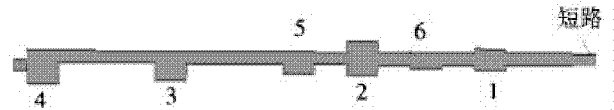
为了减小副瓣, 两子阵间距为 λ_g , 选取电流分布

$$I_1: I_2: I_3: I_4: I_5 = 1: 0.878: 0.669: 0.430:$$

0.258, 因此取 $Z_{c0} = 150 \Omega$, 可以得到

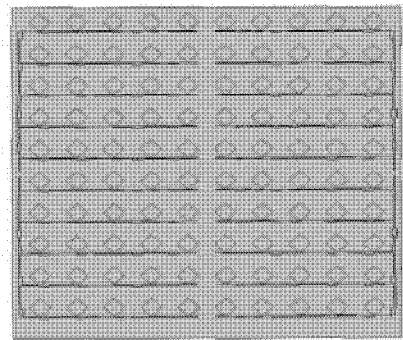
$$Z_A = 150 \times (1 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2) = 369.96$$

知道天线的工作频率 f 以及介质板的厚度 h , 由公式3可以算出, $w_j = 0.376 \text{ mm}$, 由 serenade 软件算得线阵馈线宽度为 0.19 mm 。线阵馈电网络由图3所示, 图3中1、2、3、4四分之一波长阻抗变换段用来控制阵列电流分布, 5、6四分之一波长阻抗变换段可以调节阻抗, 起到降低驻波的作用。



2.2 微带面阵设计

微带面阵主要包括辐射贴片和馈电网络 (见图4)。介质基板介电常数 $\epsilon_r = 2.8$, 基片厚度 0.8 mm , 天线工作频段为 ku 波段。辐射阵面分为4个子阵, 每个子阵为 $5 \text{ 元} \times 5 \text{ 元}$, 四个子阵输入入口采用探针形式与背面和差网络输出口相连, 通过和差网络分别可得到和波束及差波束, 为了减小单脉冲天线阵列的损耗, 和差网络可采用传统的波导结构。



3 计算结果

计算得到 E 面、H 面的和波速方向图 (见图5), E 面天线最大增益为 24.3 dB , 半功率波束宽度为 10.3 度, 副瓣电平为 -19.6 dB ; H 面半功率波束宽

度为 11 度,副瓣电平小于 -19.5 dB。

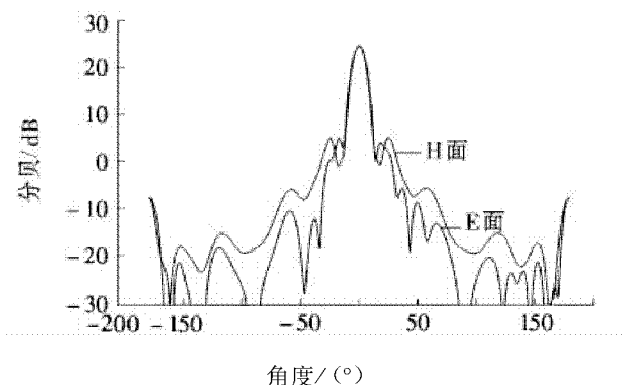


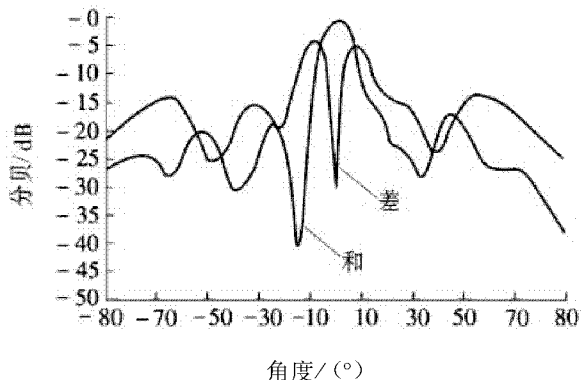
图 5 和波束方向图

天线设计结果基本满足要求,但还有一些不足,如天线增益不高,而且再加上介质基板损耗、金属损耗、功分网络损耗等原因,实测结果一般会比计算值差 2 个 dB 左右,辐射效率较低。此外由于天线采用中心短路,边缘馈电的馈电结构,天线副瓣较高,而且由于添加短路结构同时也引入了导纳,在匹配时须增加多个匹配段,影响了天线的辐射效率。

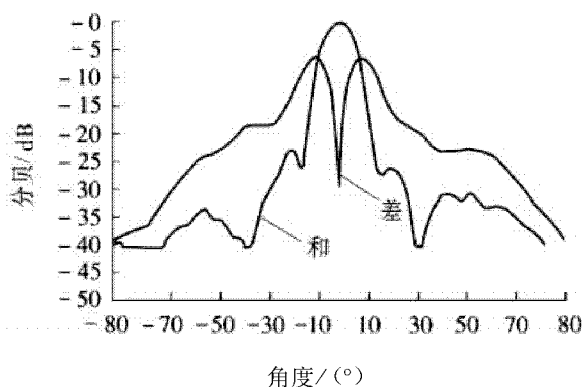
4 测试结果

实际加工测试得到的方向图如图 6 所示,天线 E 面和 H 面和波束副瓣分别为 -18 dB 和 -22 dB,波束宽度分别为 10.9 度和 11.7 度,增益为 22.8 dB,比设计值低了 1.5 dB。

两个面的零深分别为 -28 dB 和 -30 dB,与设计值结果基本吻合。但 E 面和波束方向图左右明显不平衡,这主要是在调试过程中四个子阵与波导和差网络连接的探针长短不完全一致引入的相位差造成的。



(a) E 面和差方向图



(b) H 面和差方向图

图 6 天线测试方向图

5 小结

在对边缘馈电的角馈方形微带贴片天线阵列论分析的基础上进行了设计仿真,并实际制作了一个边馈 ku 波段的共面微带贴片天线阵,测试结果与计算结果基本一致,验证了本设计的正确性。通过本设计,可以得到小于 -19.5 dB 副瓣的边馈单脉冲微带天线阵列,为未来航空航天设备的双频复合或多频复合单脉冲天线设计提供了一个很好的实现途径。

参考文献:

- [1] S G KIM, K CHANG. Low-cost monopulse antenna using bi-directionally-fed microstrip patch array [J]. Electronics Letters, 2003, 39 (20): 1 428 - 1 429.
- [2] 方大纲. 一种结构紧凑的新型微带单脉冲天线阵 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2003, 27 (5): 474 - 477.
- [3] B J ANDREWS. Millimeter wave microstrip antenna for dual polar and monopulse applications [C]//Third International Conference on Antennas and Propagation, 1983, April: 12 - 15
- [4] D M POZAR, B KANFMAN. Design considerations for low sidelobe microstrip arrays [J]. IEEE Trans, 1990, AP-38: 1 176 - 1 185.
- [5] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991: 58 - 61.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

矿用降温服性能试验研究

周孟颖, 冯立品, 梁国治

(安徽省煤炭科学研究院, 安徽 合肥 230001)

摘要:为了解决煤矿热害损伤矿工身体, 影响煤矿安全生产的问题, 研究设计了矿用降温服(含降温帽)。通过实验室基础研究、人工气候仓模拟、正交试验和两淮部分高温矿井井下现场应用等手段, 对其性能进行了综合试验。结果表明: 受试者试验前后血清中的乳酸脱氢酶、肌酐、尿素、钠离子、钾离子等生化指标发生了明显改变, 说明湿热环境下人体肝脏、肾脏、心脏等功能受到了损害; 因此, 降温服不仅使人体热感觉及热舒适性明显好转, 而且对于人体机能所受到的危害在一定程度上也得到了缓解, 为煤矿井下高温环境作业的工人提供了高温保健作用。

关键词:降温服; 热害矿井; 个人防护

中图分类号: TD78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0029-06

Test of Performance of Mine Thermal Protective Vest

ZHOU Meng - ying, FENG Li - pin, LIANG Guo - zhi

(Research Center of Fire and Thermal - damage of Mine, Anhui Province Coal Science Research Institute, Hefei Anhui 230001, China)

Abstract: In order to solve thermal damage to miners, which influences on safety of production in high temperature coal mines, mine thermal protective vest (including cooling helmet) was studied and designed. Performance of thermal protective vest was tested by laboratory study, simulation in artificial climate chamber, orthogonal test and in - situ application in some high temperature mines in Huainan and Huaibei mining areas. The results showed that biochemical indices (Lactate Dehydrogenase, Creatinine, urea, sodium and potassium ion) in serum of tested persons before and after experiment in hot environments are changed, which shows that liver, kidney and heart of tested persons were damaged. Mine thermal protective vest (including Cooling helmet) not only improves thermal sensation and thermal comfort for miners, but also alleviates to some extent damage to function of human body, which protects miners health working in high temperature environment.

Key words: thermal protective vest; mine thermal damage; personal protection

我国是产煤大国,也是高温热害矿井较多的国家。自上世纪80年代以来,我国矿井高温热害的发展异常迅速,煤矿热害对矿工的健康和安全生产造成的危害十分突出。目前矿井采深度平均每年以11 m的速度向深部延伸,有些矿井深度已达1 000 m以上,地温热害现象明显加大,全国约200多对矿井的采掘工作面风流温度超过30℃,部分超过36~38℃,尤其是进入夏季,更多矿井的

采掘工作面风流温度都超过规定的26℃^[1]。据不完全统计从1983年以来,我国煤矿已发生上百次人员高温中暑事故;山东某高温矿井的矿工发病率比常温(26℃)下平均高1.83倍,最高达3.61倍。徐州某矿每年5~9月因高温影响,矿工出勤数明显下降,采掘工作面劳动率下降20%~30%,最高达40%~50%;目前淮南、淮北矿区不少矿井地处高地热区,其井深都在-650 m以下,进入二级热

害区,夏季时采掘工作面温度高达 $33\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$,已发生多起矿工因中暑晕倒在作业地点事故,由于深部开采所带来的岩温高、湿度大等引发的皮肤病使矿工痛苦不堪,部分矿井采掘工作面因风流温度过高而被迫停产;因此,解决矿井高温作业环境问题在采矿业发展中具有十分重要的意义,已成为煤矿亟待研究的课题。

根据实际情况,经过多方论证和比较,研发了无源多功能矿用降温服,降温服各项指标均已通过国家有关部门检测。经性能测试和煤矿井下现场应用表明,降温服满足了煤矿安全规定要求,可为煤矿井下高温环境作业的工人提供保健作用。

1 矿用降温服结构及工作原理

长期在矿井高温、高湿环境中作业,人的机体会出现一系列生理功能的改变,这些变化在一定程度上是属于适应性反应,但如果超过限度,则产生一系列生理功能的不良影响:体温调节发生障碍,主要表现为体温和皮温升高;水盐代谢出现紊乱,使人体的机能受到影响等。一般情况下,人依靠生理性体温调节来维持人体的热平衡,如颤栗、汗毛竖起等能防止体温下降;蒸发、出汗等能防止体温上升,但自律性体温调节仅能在较有限的气温范围内保持体温恒

定。相变材料在低于相变点的冰箱中冷冻后,存储大量的潜热,当环境温度或人体皮肤温度达到服装内相变材料相变点时,相变材料就会吸热融化,通过图4所示传热过程,达到制冷效果。

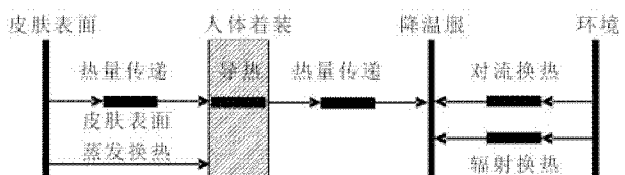


图4 相变材料传热过程

2 矿用降温服性能正交试验

2.1 试验目的

1) 在模拟矿井热湿环境下人体穿着矿用降温服的降温性能。通过测试穿着降温服时的皮肤温度,结合人的主观感觉指标,并与不穿降温服时

定。高温、高湿的矿井环境使人体自身体温调节机能受到一定的限制,产生的热量难以全部散出,在体内蓄存,导致体温上升,感觉不适,甚至影响工作效率及人身安全,因此需要辅以行为性体温调节。因此矿用降温服可显著降低衣内温度上升速率,减缓皮肤温度的变化,延长其热舒适感觉^[2]。

人体发热量最大的是前胸、后背、额头,而且这些部位对温度反应也比较敏感,这些部位温度不高,人体就会感觉比较舒服。矿用降温服及降温帽(见图1~图2)分别在前胸、后背和头围四周设置口袋,口袋内置入我院自主研发的降温材料^[3-4]。该材料是一种由水溶性的高分子溶液在胶凝剂的作用下生成的水凝胶,并添加一定量的降温助剂,形成具有保持一定低温的凝胶型蓄冷材料,经有关部门检验“无毒、对皮肤无刺激”,符合国家技术要求^[5]。使用过程中先将其放入带有隔冷板的袋中,然后插入衣服口袋中。在实验室 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中降温服(含量 200 g)及降温帽(含量 45 g)隔冷袋表面温度随时间的变化如图3所示。该材料除具有相变过程中无过冷、相分离特点外,还具有蓄冷量大,放冷时间长($<22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,降温服达到 4 h ,降温帽 2.5 h)。为了方便起见下面提到的降温服都包含降温帽。

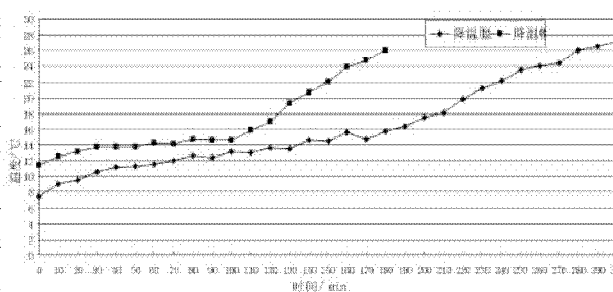


图3 降温帽和降温服隔冷袋表面温度随时间的变化情况

的各项指标的比较,如实的反映出降温服的降温效果。

2) 测试矿用降温服缓解矿井热害对人体生理、生化指标。通过测试受测人员的生理参数(血压、血氧饱和度、脉搏等)及生化参

数(血清乳酸、血清乳酸脱氢酶、血清肌酐、血清尿素、血清钠离子、血清钾离子等)等各项指标,在进行各项指标对比的基础上,了解矿用降温服缓解矿井热害对人体生理、生化指标的影响。

2.2 试验仪器及方法

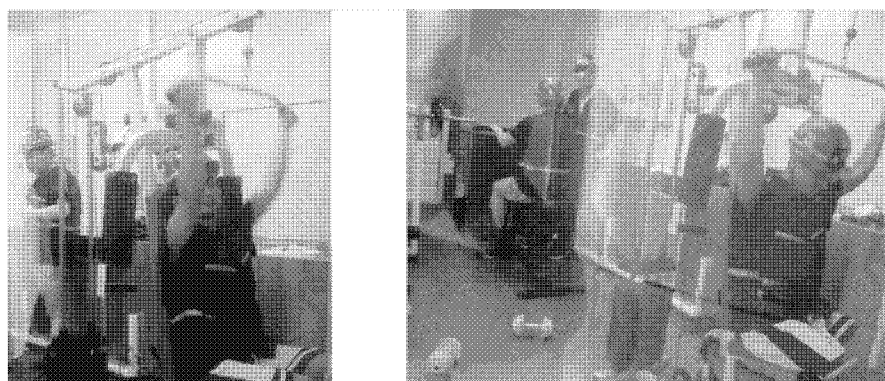
安徽省质量监督局人工气候室,CMS6000多参数监护仪,迈瑞BA-88A半自动生化分析仪,KX-906豪华功能跑步机和哑铃等运动器材。

受试者在自愿的情况下,在人工气候室(室内温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为 95%)内通过体育器材的运动量来模拟井下工人的劳动强度。并在每个受试

者的头部、颈部、前胸、后背贴上传感器,记录四个部位温度随时间的变化情况。

2.3 试验结果分析

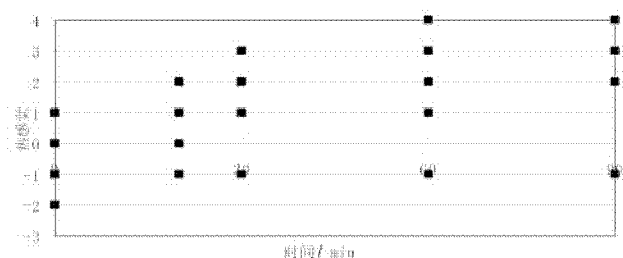
1) 着装热舒适评价。在试验过程中定制了“热感觉”与“热舒适”问卷调查表,受试者可以根据自己的感受填写,统计结果如图5~图8所示。穿着降温服的热感觉大部分集中在-1~2,即介于微凉到稍热之间(见图5),热舒适集中在-1~0,介于轻微不舒服到舒服之间(见图7)。未穿降温服的热感觉主要集中在2~4,介于稍热到很热之间(见图6),热舒适集中在-2~-3,介于不舒服到很不舒服之间(见图8)。可见,就受试者主观调查来看降温服降温效果比较显著。图9所示的是同一个人在两次试验中,一次穿着,一次未穿的测试结果,也说明了降温服有较好的降温效果。但由于室内湿度过大,汗液无法及时蒸发,所以受试者普遍出现衣服被汗水浸湿的情况。



t/min

-3 冷; -2 凉; -1 微凉; 0 中性; 1 暖; 2 稍热; 3 热; 4 很热

图5 穿着降温服人体热感觉统计

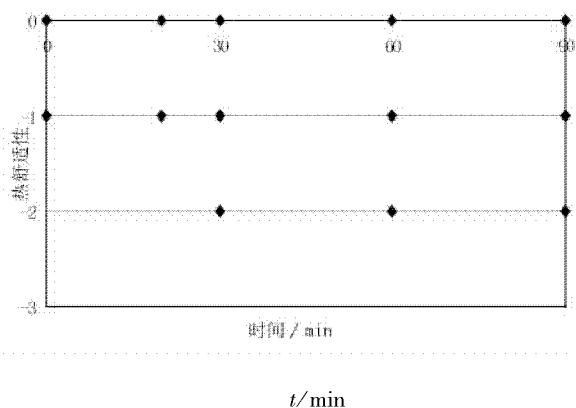


t/min

-3 冷; -2 凉; -1 微凉; 0 中性; 1 暖; 2 稍热; 3 热; 4 很热

图6 不穿降温服人体热感觉统计





-3 很不舒服; -2 不舒服; -1 轻微不舒服; 0 舒服

图8 不穿降温服热舒适统计

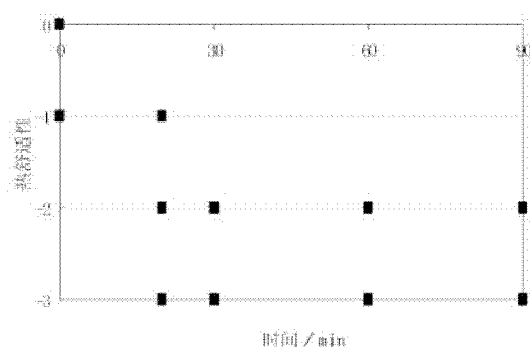


图9 同一个人穿着与不穿降温服热感觉与热舒适统计

2) 降温服降温性能分析。热感觉与热舒适主观评价方法是一种较为可靠简便的人体热舒适评价方法,然而,其评价结果毕竟依赖于受试者的主观判断,因此受人的主观因素影响较大。为此在试验过程中通过传感器,在电脑上客观采集了受试者四个部位(额头、颈部、前胸、后背)温度随时间的变化关系(见表1~表2)。

表1 穿着降温服四部位的平均温度 (°C)

序号	额头	颈部	前胸	后背
1	36.32	35.7	35.82	35.6
2	35.75	36.89	35.18	36.11
3	35.59	36.61	35.21	36.78
4	36.99	36.3	35.16	35.9
5	37.1	36.36	37.14	36.4
6	34.02	32.83	32.68	33.16
7	35.7	35.01	34.46	34.85
8	34.55	34.01	33.95	34.63
9	35.62	34.5	33.44	34.61
10	34.21	33.48	33.53	33.26
11	35.82	35.09	34.84	34.15
均值	35.6	35.16	34.67	34.99

表2 未穿降温服四部位的平均温度 (°C)

序号	额头	颈部	前胸	后背
8	37.13	37	35.39	36.02
10	35.92	36.09	35.67	36.38
12	36.69	36.55	36.25	35.48
13	34.3	33.47	32.97	33.11
均值	36.01	35.78	35.07	35.25

从表1~表2四个部位的温度变化平均值来看,穿着降温服的略低于未穿的,效果不是很明显,这可能由于个体本身温度的差异性所致。但是,从8号和10号两个受试者穿降温服时的温度维持在33~34℃,比未穿降温服的低2~3℃,可见相变材料融化时能有效带走人体热量,维持人体正常体温^[6]。

3) 热害对人体生理、生化指标的影响。本次受试者试验前后的生理指标(血压、脉搏、血氧饱和度),由于个体的差异及试验样本少等因素,并没有呈现出规律性的变化。

受试者试验前后的血清样本,经合肥康力医学检验所检验,血清中的血清乳酸脱氢酶、血清肌酐、血清尿素、血清钠离子、血清钾离子呈现出明显的规律性:不论穿与不穿降温服乳酸脱氢酶、肌酐试验后的值大于试验前;钾离子、尿素、钠离子试验后的值小于试验前。为了分析数据表现出的规律是否具有统计学上的意义,通过SPSS13.0软件,用 t 检验法中的配对检验进行了统计分析,显著性水平以双侧 $P=0.05$ 判断(见表3)。

表 3 t 检验结果

生化指标	样本数	试验前均值	试验后均值	P 值
乳酸脱氢酶	9	146.44	181.33	0.005
肌酐	9	118	133.89	0.045
钾离子	9	4.28	3.92	0.004
钠离子	9	141.43	139.36	0.006
尿素	9	7.3	6.62	0.004

由表 3 可见,所检验的指标 P 值都 <0.05 ,说明都具有显著的统计学意义。人体血液中生化指标的改变直接预示着人体机能受损情况,如血清中的乳酸脱氢酶的增高是因为在热环境下,机体由于散热的需要,血液重新分配,肝脏相对缺血、缺氧,在这种情况下,肝细胞通透性增加,致乳酸脱氢酶在血清中的水平增加,反映了热害对肝脏的影响情况;钾离子、钠离子的减少致使大量的水盐损失,可导致循环衰竭和热痉挛甚至严重中暑;肌酐和尿素

是反映肾脏的排泄功能,测定血清肌酐的含量较测定尿素氮的含量更能反映肾脏的排泄功能,如二者同时升高,说明肾脏有严重损害,由于本次试验中尿素含量并没有升高,反而变低,需要进一步研究,但是肌酐含量明显增加,也一定程度上的反映出热害对肾功能的影响。受试者在高温、高湿环境下从事劳动 2 个小时左右,生化指标就发生了明显的变化。因此,为了长期在井下工作的矿工身体健康,改善矿井极端环境,采取有效的降温措施是非常必要的^[7-8]。

4) 降温服对人体生化指标的作用。试验过程中受试者穿与不穿降温服,试验前后乳酸脱氢酶、钾离子、钠离子、尿素、肌酐的变化规律与趋势是一致的,但 5 个指标中除钾离子外穿着降温服的前后均值的差值都要小于未穿降温服的(见表 4)。这说明了降温服能在一定程度上缓解热害对于人体机能的影响,对于在井下工作的矿工而言,如能长期穿着效果会更显著。

表 4 试验前后生化指标变化情况

指标	未穿降温服			穿着降温服		
	试验前均值	试验后均值	差值	试验前均值	试验后均值	差值
乳酸脱氢酶	125.67	182.67	57 ↑	156.83	180.67	23.04 ↑
钾离子	4.37	4.05	0.32 ↓	4.2	3.81	0.39 ↓
钠离子	141.33	138.13	3.2 ↓	141.52	140.34	1.18 ↓
尿素	7.1	6.45	0.65 ↓	7.46	6.47	0.99 ↓
肌酐	107.25	129.25	22 ↑	126.6	137.6	11 ↑

3 煤矿井下试验

降温服在高温、高湿的满意的效果,为了进一步研究实用性。在淮南某矿(试验地点:1018 翼瓦斯抽采泵站、北翼强力及淮北某矿(试验地点:1018 766 胶带、101 变电所、106 初步现场试验,试验点的;80%~95%左右。由于现场无法进行各观测数据采集,研究人员随同矿工穿着降温服下井进行了问卷调查,试后统计穿着降温服的矿工热感觉和热舒适明显好于未穿降温服的矿工(见图 10~图 11),对衣服的满意度值达到 91%。

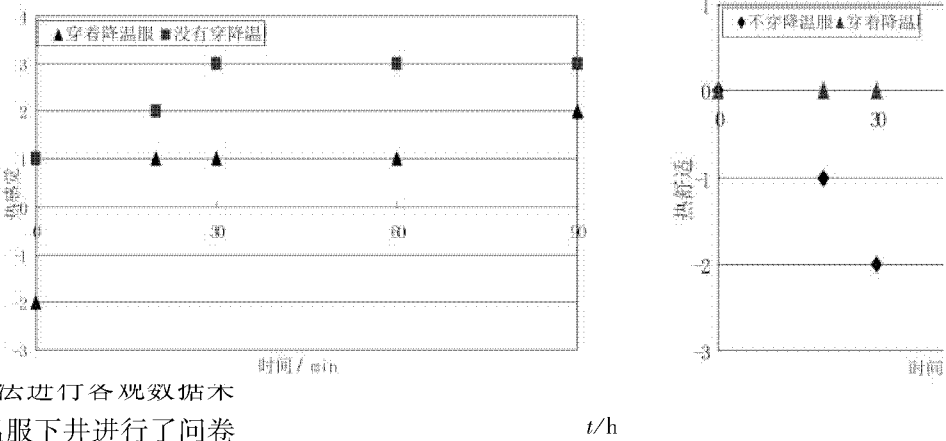


图 10 热感觉指表随时间变化曲线



t/h

0 舒适;1 轻微不舒适;2 不舒适;3 很不舒适

图11 热舒适指标随时间变化曲线

4 结论与建议

1) 人工气候室受试者及现场矿工的主观问卷调查都反映出穿着降温服的热感觉与热舒适性都明显好于未穿降温服的。

2) 人工气候室内同一受试者穿着降温服时额头、颈部、前胸、后背每个点的平均温度比不穿降温服时低 2~3℃, 客观验证了其降温效果。

3) 受试者血清中的乳酸脱氢酶、肌酐试验后值明显增加;钾离子、尿素、钠离子试验后值降低, 从医学的角度可知, 这些生化指标的改变反映了高温、高湿的环境对人体肝脏、肾脏及循环系统等的危害。通过 SPSS13.0 软件, 用 t 检验法中的配对检验进行统计分析, 这些改变都具有显著的统计学意义。

4) 虽穿与不穿降温服和降温帽, 试验前后乳酸脱氢酶、钾离子、钠离子、尿素、肌酐的变化规律

与趋势是一致的, 但通过比较两者前后均值的差值可见, 穿着降温服后 80% 指标的差值变小, 说明了降温服在一定程度上缓解了热害对于人体机能的影响。

总之, 降温服是一种经济、有效、环保的降温方式, 对于在井下极端环境中工作的矿工而言, 如能长期穿着效果会更明显。鉴于试验过程中发现的问题, 建议: 进一步调整降温服质量与结构; 寻找更合适的降温服面料解决衣服潮湿贴身不舒服的问题。

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011: 58-59.
- [2] 崔文广, 郭堂春. 深矿井热害对人体健康危害的研究进展[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2010, 6(33): 463-465.
- [3] 胡春华, 孙玉钗. 相变材料在纺织品种的应用及存在的问题[J]. 化纤与纺织技术, 2009(2): 27-30.
- [4] 韩增旺, 唐世君, 赖军. 国内外冷却服的发展现状及关键技术[J]. 防护装备技术研究, 2009(4): 11-14.
- [5] 中华人民共和国卫生部. (卫监督发【2005】272号) 化学品毒性鉴定技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2005.
- [6] 张冬霞, 郭凤芝. 相变材料在调温服装中的应用[J]. 针织工业, 2007(3): 28-31.
- [7] 张寅平, 王馨, 朱颖心, 等. 医用降温服热性能与应用效果研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(6): 58-61.
- [8] 崔文广. 深井热害对矿工生理和生化指标的影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

保护层开采上覆煤岩变形移动及瓦斯抽采效果

方昌才

(淮南矿业集团潘三矿, 安徽 淮南 232000)

摘要:根据潘三矿东四采区实际开采条件和回采工艺,运用数值模拟和现场试验相结合的方法,分析了近水平煤层保护层开采过程中被保护层应力、变形量、透气性系数在保护层开采过程中的演化机制。结果表明:保护层开采过程中,被保护层存在未受影响区(原始应力区)、增压区、过渡卸压区、稳定卸压区和重新压实区,被保护层边界区域附近过渡卸压区内的透气性系数为原始透气性系数的30倍左右,煤体应力下降,产生了一定的膨胀变形,大大提高了瓦斯抽采效果。

关键词:采矿工程;保护层;瓦斯抽采

中图分类号:TD853.3; TD712.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)02-0035-06

The Deformation Characteristic of overlying coal/rock and Gas Drainage Effect with Protective Seam Mining

Fang chang - cai

(Pansan Coal Mine, Huainan Mining Group Co. Ltd., Huainan Anhui 232000, China)

Abstract: According to the geologic conditions and mining technology of pansan coal mine, the evolution mechanism of stress, permeability and deformation in process of protective coal seam mining are investigated. The results show that there are five zones in the protected coal seam during protective seam mining, which are unaffected zone, pressure increased zone, transitional stress relief zone, stabilized stress relief zone, re-compacted zone. Permeability of protected seam in protected boundary areas increases 30 times than original permeability. Decrease of stress in coal seam results in a certain degree of swelling deformation, which greatly improve effect of gas extraction.

Key words: mining engineering; protective seam mining; gas extraction

我国保护层开采过程中,保护效果的考察,特别是保护边界的确定是沿用前苏联的相关参数与指标^[1]。这与我国煤矿保护层开采的实际情况有一定的出入。根据近年来我国关于保护层开采的研究表明,前苏联关于保护层保护边界的划分偏于保守,特别是在目前地面钻孔广泛运用的前提下,被保护范围边界区域煤岩及瓦斯变化特征的研究

对合理保护范围的确定更有其现实意义。

保护层开采作为最有效的区域防突措施,一直是国内外学者研究的热点。文献[2-3]分别应用数值模拟和相似模拟的方法得出下保护层开采过程中,被保护层卸压范围、膨胀变形、应力分布和透气性系数的变化。文献[4]运用损伤透气性耦合演化方程,研究了保护层开采过程中卸压瓦斯流动

的机理。文献[5-7]对于煤与远程卸压瓦斯安全高效共采、上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽放技术、保护层卸压瓦斯抽采及涌出规律、高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采和软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术进行了系统的研究,为煤与瓦斯共采指明了方向。但是,关于近水平远距离保护层开采过程中,被保护层边界区域煤岩及瓦斯压力变化规律的研究尚不多见。

1 煤岩体变形移动及保护范围

1.1 试验区概况

17171(1)保护层工作面位于潘三矿东四采区,工作面走向长度 1 200 m,倾向长度 240 m,埋深为 -722 ~ -752 m,开采 11-2 煤层,平均倾角为 5°,平均煤厚 2 m,保护 13-1 煤层,13-1 煤层位于 11-2 煤层上方,平均层间距 72 m,被保护层原始瓦斯含量为 12 ~ 22 m³/t,瓦斯压力为 3.5 MPa,煤层原始透气性系数为 2 × 10⁻⁴ m²/MPa² · d。

1.2 数值计算模型

计算模型共建立 16 层煤岩(见图 1),其中第三层和第五层分别代表 13-1 煤和 11-2 煤。煤岩具体力学及几何参数如表 1 所示。模型走向方向长 300 m,垂直方向长 120 m,共划分 300 × 120 个单元,根据煤层赋存实际,上边界施加为 10 MPa 的地应力,左、右、下边界为位移约束边界,保护层(11-2 煤)采用一次采全高,分步开挖全部跨落管理顶板,依据实际开采强度,每步开挖时间间距为 1 d,共开挖 20 步即开采时间为 20 d,总共开挖 100 m。

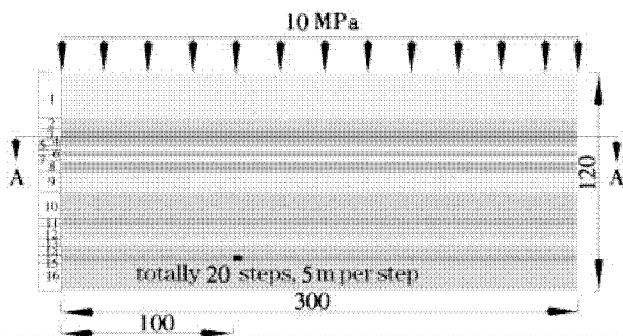


图 1 数值计算模型(单位:m)

表 1 煤岩力学参数

序号	岩性	弹性模量 /MPa	抗压强度 /MPa	自重 /(μN · mm ⁻³)	厚度 /m
1	粉砂岩	57.22	63.0	26	26
2	砂质泥岩	37.47	37.3	24	6
3	13-1 煤层	10	15.0	14	6
4	砂质泥岩	26	33.3	24	3
5	粉砂岩	57.23	50.3	26	3
6	泥岩	20	25.0	24	3
7	粉砂岩	57.23	50.3	26	3
8	泥岩	20	25.0	24	6
9	中粒砂岩	64.55	76.3	26	12
10	砂质泥岩	37.47	37.3	24	15
11	泥岩	20	25.0	2.4	3
12	细砂岩	47.23	50.3	26	8
13	中粒砂岩	64.49	61.6	26	4
14	砂质泥岩	37.47	37.3	24	6
15	11-2 煤	10	20.0	14	2
16	砂质泥岩	37.47	37.3	24	14

1.3 采场围岩空间应力分布特征

保护层开采过程中(见图 2),随着工作面的推进,11-2 煤层上方岩层不断跨落,形成冒落带、裂隙带、弯曲下沉带。在被保护煤层走向方向上形成未受影响区(原始应力区)、过渡卸压区、稳定卸压区、重新压实区(见图 3)。当 11-2 煤层开挖为 100 m 时,垂直方向上,冒落带高度约为 15 m,裂隙带高度约为 35 m,这与实际测量结果比较吻合。随着 11-2 工作面的推进,其采空区上方的 13-1 煤层的最大主应力与剪切应力开始下降,下降幅度与范围随着保护层开采范围的扩大而扩大。当开采达到 75 m 时,13-1 煤层中部(11-2 采空区正上方)最大主应力与剪切应力开始反弹;开采 100 m 时,被保护层中部出现被重新压实现象即卸压开始减小(见图 4)。由此可见在被保护层过渡卸压区、稳定卸压区和重新压实区范围内最大主应力与剪切应力呈现“W”形分布。被保护层在走向方向上经历了未受影响区—增压区(压缩)—过渡卸压区(开始膨胀)—稳定卸压区(膨胀变大)—重新压实区(膨胀减小至稳定)。

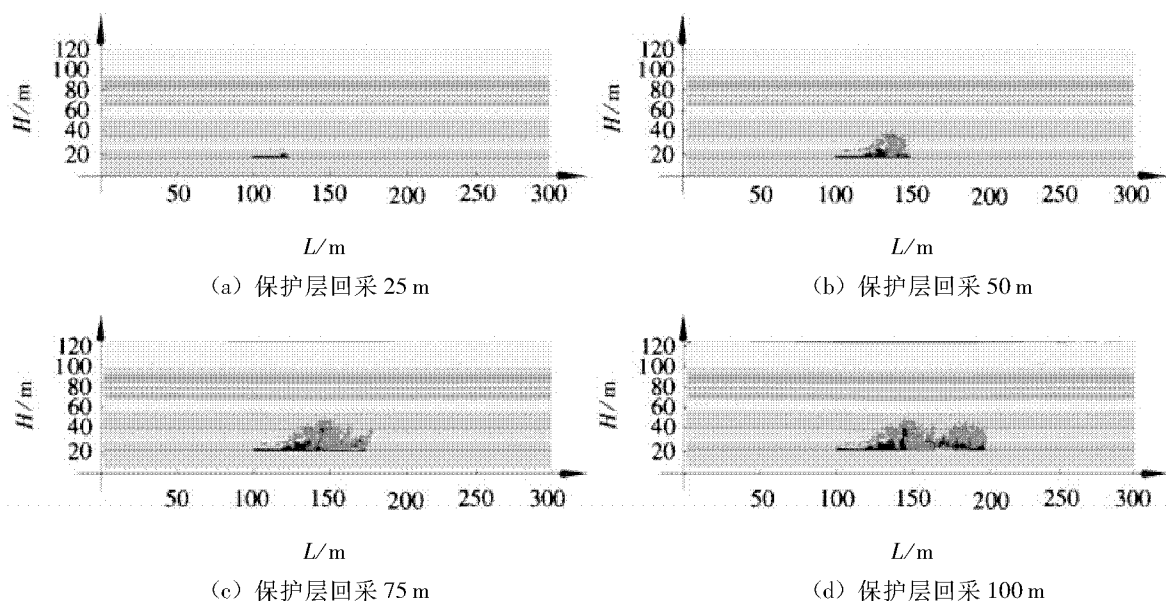


图2 上覆岩层垮落过程

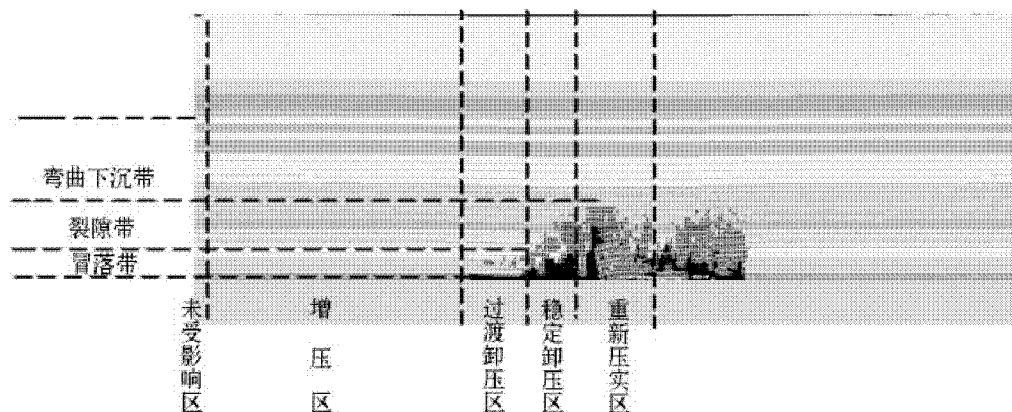
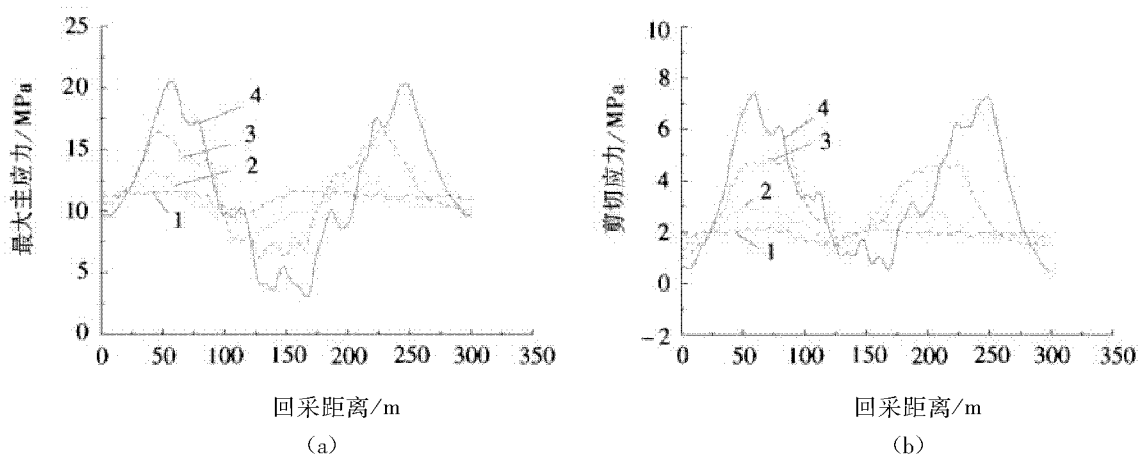


图3 根据应力与透气性对13-1煤层的分区划分



1. 25 m; 2. 50 m; 3. 75 m; 4. 100 m

图4 13-1煤应力分布

对比数值模型与模型实验^[8](见图5)可知,被保护层切眼沿走向方向依次经历了压缩—膨胀—膨胀变形变大—膨胀变形减小—稳定阶段。这与

数值模拟得出在被保护煤层走向方向上存在未受影响区(原始应力区)、过渡卸压区、稳定卸压区、重新压实区的结论基本一致。对比图4和图5可

以看出,本次数值模拟得出最大主应力分布与模型实验中被保护层厚度变化趋势基本一致。

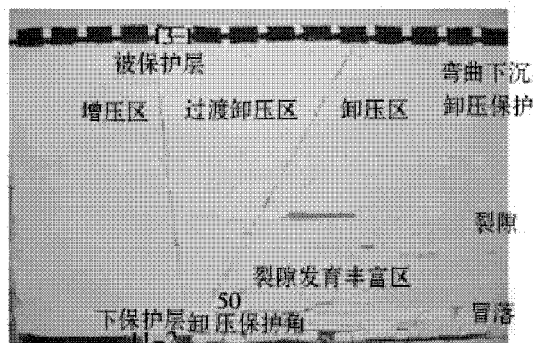


图5 模型实验

为了考察保护层开采过程中上覆煤层移动变形特性,在13-1煤层中测定了瓦斯压力、抽放半径,膨胀变形量等参数,所有数据均实现在线监测。

测压钻孔具体布置如图6所示,4[#]测压钻孔处于理论保护线与13-1煤相交位置;28[#]、29[#]钻孔压力在保护层开采过程中持续下降但下降幅度要比4[#]钻孔压力下降幅度小(见图7a~图7b),这说明应力在稳定卸压区要比过渡卸压区会下降更大的幅值;4[#]、15[#]测压钻孔在保护层开采过程中持续下降,即4[#]、15[#]测压钻孔处于应力降低区,这与数值模拟结果基本一致。

轨1[#]、轨2[#]钻孔压力随着保护层工作面的推进持续增加,说明轨道顺槽向外一定区域存在应力增高区,这与数值模拟存在增压区的结果基本符合(见图7c)。

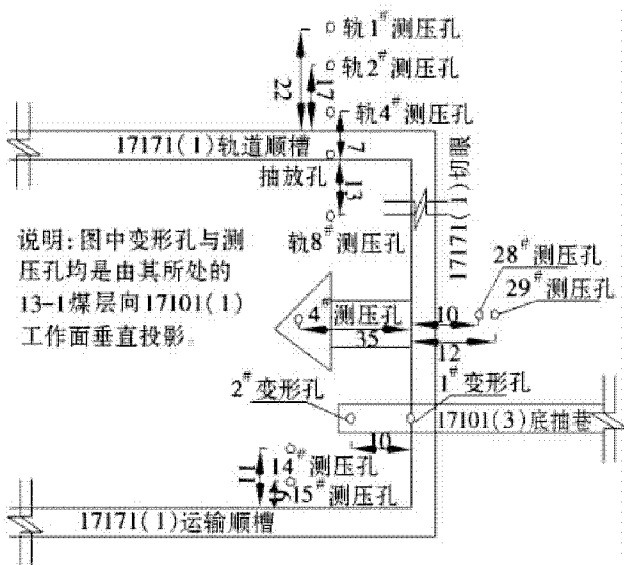
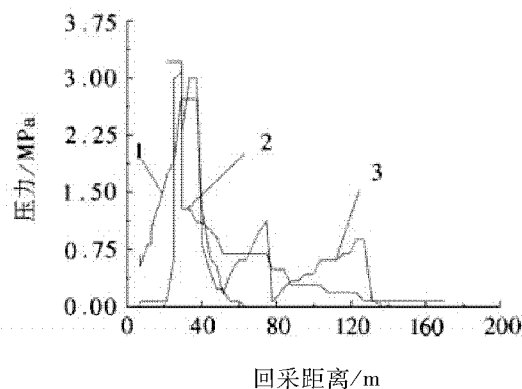
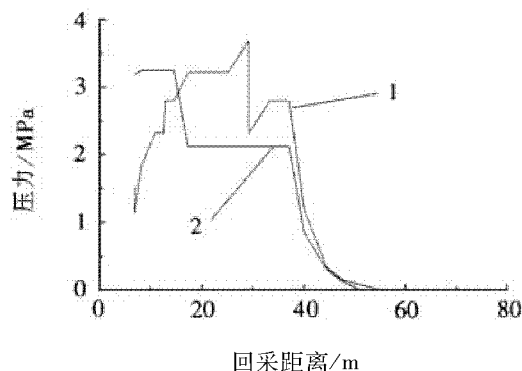


图6 测点布置图(单位:m)



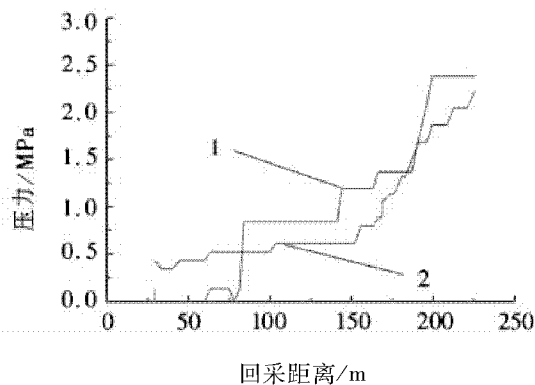
1. 4[#]测压孔;2. 29[#]测压孔;3. 28[#]测压孔

(a)



1. 15[#]测压孔;2. 14[#]测压孔

(b)



1. 轨2[#]测压孔;2. 轨1[#]测压孔

(c)

图7 保护层开采过程中实测13-1煤层瓦斯压力

1.4 被保护层透气性和变形分布特征

随着保护层开采范围的扩大,被保护层透气性系数随之增大,分布范围也扩大(见图8)。当保护层开挖100 m,实测被保护层最大透气性系数为 $0.12 \text{ m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$,是原始透气性系数的600倍,高透气性系数分布在稳定卸压区,透气性系数在重新压实区有所减小但也维持在较高的范围,在过渡卸压区范围内透气性系数有所增加,约为原始透气性系数的30倍左右。

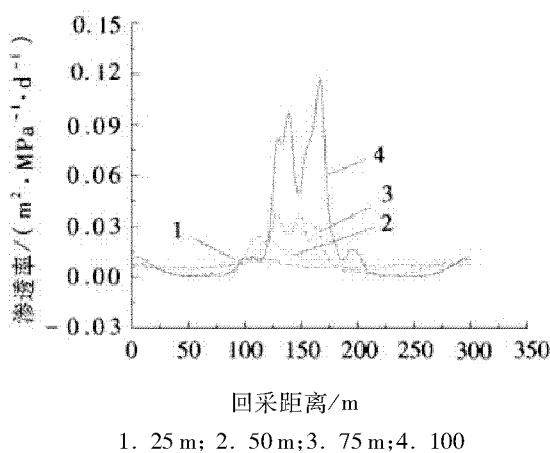


图8 开采引起13-1煤层透气性的变化

当保护层开采100 m时,被保护层最大膨胀变形约为225 mm,为13-1煤层的3.75%,在重新压实区,由于最大主应力的下降,被保护层的膨胀变形减小但仍然保持在较高范围,这与透气性系数分布较为一致(见图9)。

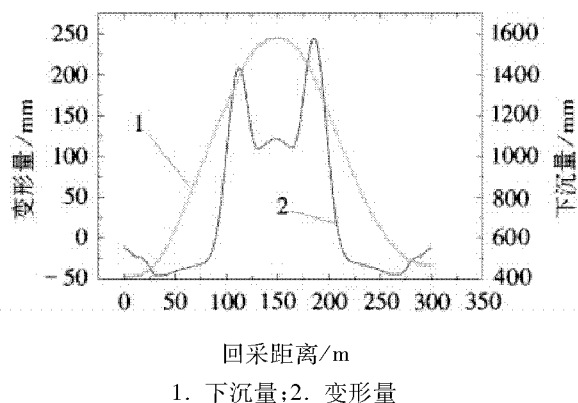


图9 开采引起13-1膨胀变形

由图8、图9可知,被保护层透气性系数和膨胀变形在卸压区、稳定卸压区、重新压实区范围内呈现“M”形分布,与应力的“W”形分布正好对应。

当保护层开采100 m时的膨胀变形量是225 mm,与数值模拟结果基本上吻合(见图10)。

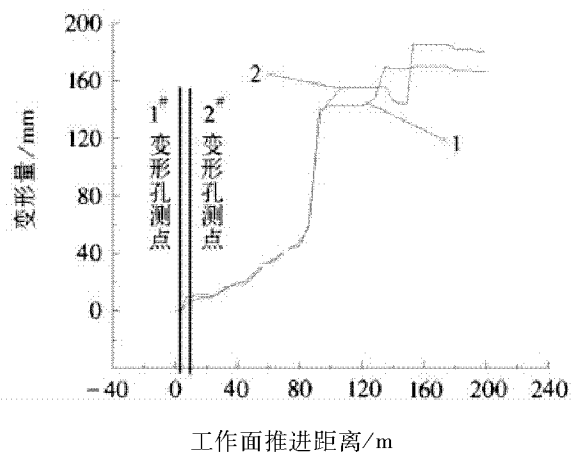


图10 实测13-1煤顶底板相对变形量

2 边界区域瓦斯压力及抽采效果

保护层开采稳定后,为考察地面钻孔抽采对17101(3)被保护层采面瓦斯压力所造成的影响,沿着17101(3)采面布置有3组考察孔(见图11)。在17101(3)轨顺布置A组考察孔;在17101(3)运顺布置B组考察孔;在17101(3)切眼沿走向布置C组穿层钻孔。在17101(3)采面布置的瓦斯抽采钻孔有1#、2#地面瓦斯抽采钻孔。上、下顺槽及切眼残余瓦斯压力和含量如表2所示。

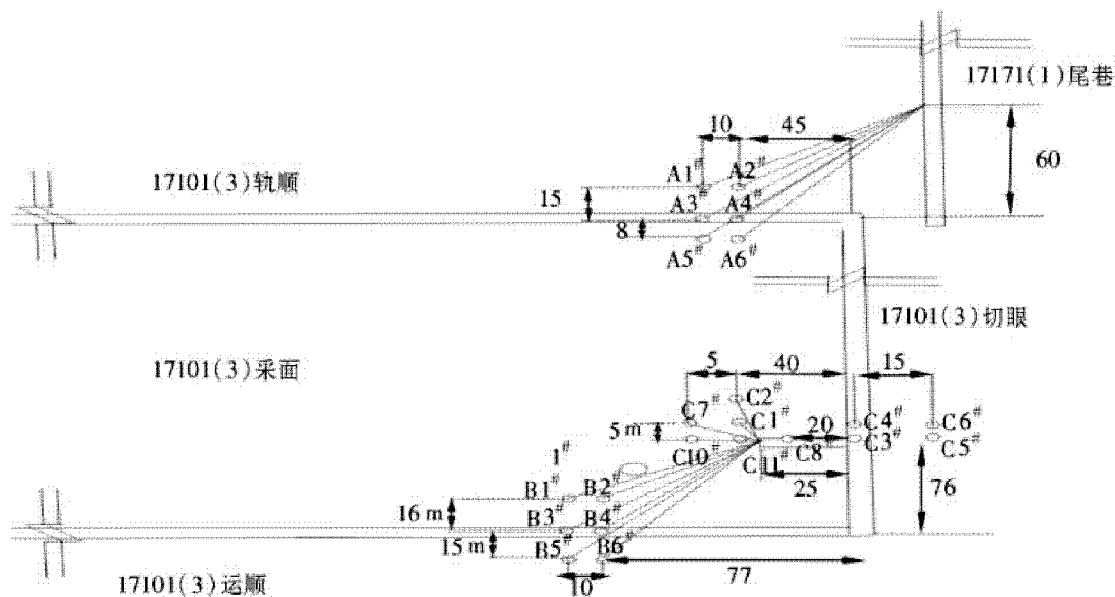


图11 被保护层扩界范围(单位:m)

表 2 残余瓦斯压力和残余瓦斯含量

孔号	瓦斯压力 /MPa	瓦斯含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	孔号	瓦斯压力 /MPa	瓦斯含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
A1	0.27	2.42	C1	0.22	2.04
A2	0.27	2.42	C2	0.23	2.12
A3	0.07	0.73	C3	0.39	3.23
A4	0.05	0.53	C4	0.39	3.23
A5	0.07	0.73	C5	0.73	4.97
A6	0	/	C6	0.67	4.71
B2	0.1	1.02	C7	0.11	1.11
B3	0.13	1.29	C9	3.86	9.57
B4	0.14	1.38	C10	0.48	3.76
B5	0.16	1.55	C12	3.54	9.52
B6	0.09	0.92	C13	3.45	9.47

17101(3)被保护层在地面抽采钻孔抽采条件下,切眼附近区域平均抽采率为 55.74%。在此抽采率条件下,17101(3)工作面上部边界瓦斯压力为 0.27 MPa,17101(3)工作面下部边界瓦斯压力为 0.16 MPa,17101(3)工作面切眼附近瓦斯压力为 0.39 MPa,17101(3)工作面切眼向外 15 m 瓦斯压力为 0.73 MPa。因此保护层开采配合地面抽采钻孔,在满足一定抽采率条件下,可以使保护层工作面与被保护层工作面等宽等长布置,但考虑到切眼向外 15 m 处瓦斯压力还处于相对高值,因此在进行切眼掘进工作时要采取局部防突措施。

3 结语

在保护层开采过程中,被保护层存在五个区域

分别为:原始应力区、增压区、过渡卸压区、稳定卸压区、重新压实区;被保护层透气性系数和膨胀变形呈现“M”形分布,与应力的“W”形分布正好对应;由于被保护层在一定区域卸压膨胀,瓦斯抽采率大大提高。

参考文献:

- [1] 石必明,俞启香. 远距离保护层开采煤岩移动变形特性的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(2): 39-45.
- [2] 石必明,刘泽功. 保护层开采上覆煤层变形特性数值模拟[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 17-22.
- [3] 石必明. 远距离下保护层开采覆岩(煤)变形及透气性变化规律的研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2004.
- [4] 杨天鸿,徐涛,刘建新,等. 应力-损伤-渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压实践中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 900-2 905.
- [5] 程远平,俞启香,袁亮,等. 煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 132-136.
- [6] 俞启香,程远平,蒋承林,等. 高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 127-131.
- [7] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-18.
- [8] 涂敏,缪协兴,黄乃斌. 远程下保护层开采被保护煤层变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 253-257.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

青东矿 10 煤层水文地质特征及充水因素分析

李书奎

(淮北矿业集团地测处, 安徽 淮北 23500)

摘要: 为了评价 10 煤层开采可能产生的水害影响, 根据矿井含、隔水层的水文地质特征, 指出 10 煤层受采动破坏, 顶底板砂岩裂隙水、太原组和奥陶系岩溶水沿采动裂隙和断层溃入矿井, 对矿井开采形成威胁。根据对矿井充水因素的分析, 得出矿井的充水强度不大, 充水通道主要为隔水层薄弱地段采动裂隙和断层破碎带。

关键词: 矿井水害; 水文地质特征; 充水因素

中图分类号: P641.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0041-04

Analysis of Hydrogeological Characteristics and Water - filling Factors of No. 10 Coal Seam in Qingdong Coal Mine

LI Shu - qui

(Geological Survey Department, Huaibei Mining Group Co. Ltd., Huiabei Anhui 23500, China)

Abstract: In order to evaluate possible water hazard of No. 10 coal seam mining, on the basis of analysis of Hydrological characteristics of aquifer and water - resisting layers, it's pointed out that No. 10 coal seam will be damaged by mining, resulting in crevice water in roof and floor sandstone, water in Taiyuan Formation and the Ordovician karst inflowing into the mine along the mining fissures and faults, which creates threat to underground mining. Analysis of mine water filling factors showed that mine water - filling intensity is small, mining - induced fissures and fault fracture zone in the aquiclude weak lots form water - filling channel.

Key words: mine water hazard; hydrogeological characteristics; water filling factors

青东煤矿是淮北矿业(集团)公司新建矿井位于安徽省淮北市濉溪县李小明至大刘家一带, 行政区划属濉溪县, 井田东距宿州市、北东距淮北市均为 45 km^[1]。地理坐标: 东经 116°25'44 ~ 116°34'44, 北纬 33°36'34 ~ 33°40'29。井田内发育的主要地层有奥陶系、石炭系、二叠系、第三系和第四系。主要含煤地层为二叠系的上石盒子组、下石盒子组及山西组。

据钻孔 2-1 孔揭露奥陶系中下统老虎山组 ~ 马家沟组, 厚度 14.97 m, 岩性为灰褐色, 中厚层状石灰岩。上石炭统太原组含 13 ~ 14 层灰岩期间夹泥岩、砂岩和粉砂岩, 井田 77 个钻孔揭露一般揭露 1 ~ 2 层, 全组层厚平均 140.12 m。山西组下部以太原组顶部一灰之顶为界, 上界为铝质泥岩之底, 地层平均厚度 101.59 m。岩性由砂岩、砂、泥岩互

层、粉砂岩、泥岩和煤层组成; 主采 10 煤层位于此地层中。第三、第四系地层由浅黄、棕黄色细砂、粉砂及粘土质砂, 间夹 3 ~ 5 层砂质粘土及粘土组成, 含有四个含水层。

1 水文地质条件分析

1.1 主要含水层

1.1.1 孔隙潜水 - 承压含水层 至上而下分为四个含水层, 分别为第一、二、三和“四含”含水层, 由于第三隔水层厚度大、分布稳定, 有效地阻隔了上、下含水层的联系。第四系含水层是影响 10 煤层开采的主要充水含水层。

第四含含水层(简称“四含”)平均厚度 5.94 m, 分布不稳定, 岩性复杂, 厚度变化较大, 主要由棕黄

色、灰黄色的细砂、粉砂、砂砾、粘土砾石、粗砂及粘土质砂等组成,分选差。根据抽水试验资料: $k=0.0497\text{ m/d}$ 、 $q=0.01792\text{ L/s}\cdot\text{m}$ 、矿化度 1.21 g/L 、水化学类型 $\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型,弱富水性。

1.1.2 10煤顶底板砂岩裂隙含水层 平均厚度为 20.50 m ,一般由2~3层的中砂岩、细砂岩构成,岩性较致密,裂隙不发育,据7西-1孔抽水试验资料:水位标高 22.98 m ,按降深为 10 m 孔径为 91 mm 折算后 $q=0.004623\text{ L/(s}\cdot\text{m)}$, $k=0.0415\text{ m/d}$,矿化度 2.43 g/L ,水质为 SO_4-Na 型水,富水性较弱^[2]。

1.1.3 岩溶裂隙含水层

1) 太原组灰岩岩溶裂隙含水层。矿井共有77个钻孔揭露太原组地层,最大揭露厚度 62.01 m (09-观3孔),据邻区临涣煤矿资料,太原组地层厚度 $133.81\sim144.01\text{ m}$,平均 140.12 m ,有石灰岩9~12层,石灰岩总厚度 59.94 m ,占太原组总厚的 42.8% 。一灰厚度 $0.63\sim3.89\text{ m}$,平均 2.20 m ;二灰厚度 $1.79\sim4.05\text{ m}$,平均 3.15 m ;三灰厚度 $2.88\sim12.54\text{ m}$,平均 8.34 m ;四灰厚度 $6.15\sim27.29\text{ m}$,平均 14.14 m 。一~四灰累计平均厚度 27.83 m ,厚度大,含有燧石结核,底部常有薄煤层,水动力条件好,各含水层段之间距离仅数米,可视为一个含水层,为10煤层开采主要补给水源, $k=0.7738\text{ m/d}$, $q=0.178\text{ L/(s}\cdot\text{m)}$,矿化度 2.66 g/L ,水质类型 $\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$,中等富水性。

2) 奥陶系石灰岩岩溶裂隙含水层。据钻孔2-1资料,揭露厚度为 14.97 m 。岩性以灰色泥质灰岩和灰岩为主,岩溶裂隙发育,钻孔揭露时泥浆消耗量达 $0.80\sim1.60\text{ m}^3/\text{h}$,而后发生漏水,漏失量达 $12\text{ m}^3/\text{h}$,强富水性。

1.2 主要隔水层

1.2.1 4~6煤隔水层 隔水层厚 $13.06\sim212.20\text{ m}$,平均 118.70 m 左右,岩性以泥岩、粉砂岩为主,夹2~7层的细砂岩与中砂岩。岩性致密完整,裂隙不发育,资源勘探时仅在9-3孔发生漏水,漏失量达 $15\text{ m}^3/\text{h}$ 。有6个钻孔在砂岩段泥浆消耗量稍大,可达 $0.56\sim1.2\text{ m}^3/\text{h}$,钻孔泥浆消耗量一般为 $0\sim0.48\text{ m}^3/\text{h}$,隔水性能较好。

1.2.2 10煤下~太原组第一层石灰岩间隔水层 主要为深灰色的海相泥岩和粉砂岩,夹1~3层细砂岩,部分地段有砂泥岩互层,多为砂岩泥岩互层组合结构。10煤层底至太灰间距(真厚)为

$21.00\sim47.37\text{ m}$,平均间距为 34.19 m ;6509钻孔由于受 F_{11} 断层影响其间距为 21.00 m ;一般情况下开采10煤时此层(段)能起到隔水作用。但局部地段由于受断层影响,导致间距缩短,太灰含水层与煤层距离大幅减小,隔水层厚度变薄,岩芯破碎,其隔水性大幅度降低。

1.2.3 石炭系本溪组铝质泥岩隔水层 采区内无钻孔揭露资料,据童亭矿、临涣煤矿资料该隔水层厚度在 $10.97\sim15.71\text{ m}$ 。岩性主要有铝质泥岩、泥岩组成,铝质泥岩为灰白色、紫红色、致密性脆,含少量菱铁鲕粒,正常情况下能起一定隔水作用。

1.3 各含水层补给、径流、排泄条件及水力联系

矿井内“四含”不发育,含水层厚度薄,分布范围小,其上因存在隔水性能较好的三隔,地表水不能补给“四含”。因4~6煤隔水层隔水性能较好,能有效阻止“四含”水补给砂岩含水层,因此“四含”水对10煤层影响微乎其微,但在“天窗”分布地段,可能造成“四含”水溃入矿井。

10煤层顶底板砂岩裂隙含水层(段),裂隙不发育,连通性差,水平径流微弱,补给条件差,富水性弱,属于以储存量为主的承压含水层,除因导水张性断层沟通外,一般都为独立含水层,主要受区域层间径流补给、排泄。在井巷开拓和煤层开采条件下,砂岩裂隙水以突水、淋水和涌水的形式向矿坑排泄。

太原组和奥陶系石灰岩岩溶裂隙含水层(段)均为承压含水层,主要以层间径流、补给为主,在浅部露头带接受“四含”水的补给,区域范围内,若出现大的水位差,则径流、排泄、补给明显,与二叠系主采煤层砂岩裂隙含水层(段)之间的地下水,或因构造影响,它们之间将发生水力联系。

2 充水因素分析

2.1 充水水源

10煤层的直接充水水源主要是10煤顶底板砂岩裂隙水,主要以淋水、渗水为主,同时在采动造成的顶底板破坏或原生断层的影响下,亦可发生突水事故。

另一个直接充水水源为太灰水,太灰水富水性强,水动力大,且在岩溶陷落柱的导通下和奥灰水亦产生水力联系。采动造成的裂隙和断层都可能引发强突水事故,经分析,本矿井存在岩溶陷落柱的可能行较小,所以太灰水和奥灰水不甚联系。但

太灰水仍是 10 煤层主要充水水源。

此外,“四含”水属弱富水性,因第三隔水层和 4~6 煤隔水层的存在对 10 煤层本无影响,但在“天窗”分布地段的影响,“四含”水也将成为 10 煤层直接充水水源。

2.2 充水通道

2.2.1 顶底板裂隙 裂隙导水通道通常有两种类型:一种是地质发育期间形成的自然裂隙;另一种是在采动的作用下新生成的裂隙。

采动裂隙的形成和规模以及是否引发突水,主要和顶底板岩层厚度、岩性结构、物理力学性质和突水系数有关。

青东煤矿 10 煤层底板隔水层厚度,平均间距 50 m,隔水底板厚度分布如图 1 所示。钻孔编号

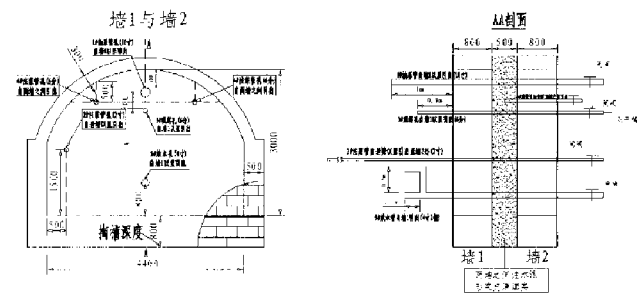


图 1 10 煤层底板隔水层厚度分布示意图(m)

10 煤层底板岩性多为砂泥岩互层,泥岩含量较多时隔水性能较好,反之较差,10 煤层底板砂泥岩比如表 1 所示。

表 1 青东 10 煤层隔水底板相关参数

十煤至一灰隔水层厚度/m 泥岩厚度/m 砂岩厚度/m 泥岩占隔

28.81	22.15	6.66	76.88	3.33
52.67	6.64	44.76	12.61	0.15
46.15	13.7	32.45	29.69	0.42
57.22	11.94	45.28	20.87	0.26
47.53	28.38	19.15	59.71	1.48
46.55	37.28	9.27	80.09	4.02
49.21	4.51	44.05	9.16	0.10
41.03	8.66	32.37	21.11	0.27
46.01	0	46.01	0.00	0.00
50.98	20.49	29.72	40.19	0.69
51.33	0	51.05	0.00	0.00
29.36	12.56	16.8	42.78	0.75
54.24	0.73	53.51	1.35	0.01
75	3.41	71.59	4.55	0.05
54.92	0	54.51	0.00	0.00
35.93	14.56	21.37	40.52	0.68
47.85	6.77	40.79	14.15	0.17
63.63	0.14	63.21	0.22	0.00
43.33	0.45	42.88	1.04	0.01
10.35	2.27	8.08	21.93	0.28
35.83	12.88	22.95	35.95	0.56
85.35	30.71	54.64	35.98	0.56
41.58	19.29	21.65	46.39	0.89
44.47	6.79	37.68	15.27	0.18
14.5	4.85	9.65	33.45	0.50
46.53	12.42	33.09	26.69	0.38
47.74	7.76	39.98	16.25	0.19
50.32	0.24	49.65	0.48	0.00
54.3	0.27	82.85	0.50	0.00
55.33	11.07	43.21	20.01	0.26
39.58	13.81	24.4	34.89	0.57
50.17	24.44	25.73	48.71	0.95
44.73	10.17	34.56	22.74	0.29
52.33	6.34	45.99	12.12	0.14
48.02	0	48.02	0.00	0.00
47.51	30.77	16.21	64.77	1.90
47.36	28.99	17.55	61.21	1.65
58.23	13.99	44.24	24.03	0.32
55.88	29.02	26.86	51.93	1.08
24.28	3.21	14.41	13.22	0.22

根据矿井抽水试验资料,10 煤底板太灰突水系数为 0.15~2.946 4,变化较大(见表 2)。尽管

10 煤层底板隔水性能较好,但突水系数远大于临界值,在采动破坏下,形成导水通道的可能性较大。

表2 青东矿太灰水突水系数表

孔号	一灰至10煤层间距/m	一灰顶板标高/m	水位标高/m	突水数/(MPa·m ⁻¹)	孔号	一灰顶至10煤层间距/m	一灰顶板标高/m	水位标高/m	突水系数/(MPa·m ⁻¹)
9西-1	47.51	-511.99	-28.70	0.15	9-2	27	-619.71	4.245	0.5523
09-3	31	-627.55	4.245	0.4109	9-7	29.36	-547.58	4.245	0.4027
09-4	52.51	-694	4.245	0.1871	9西-2	34.94	-620.74	4.245	0.3222
09-6	32.45	-545.2	4.245	0.3259	2010-6	46.89	-549.39	4.245	0.1753
2010-5	4.24	-462.72	4.245	0.3915	2010-8	29.79	-640.07	4.245	0.4556
2010-7	61.71	-545.25	4.245	0.1176	5-1	57.22	-459.54	9.08	0.1112
2010-9	35.91	-667.3	4.245	0.3294	7-86	46.53	-353.21	15.81	0.1182
6509	14	-576.01	4.245	2.9464	9西-4	47.36	-394.06	-28.70	0.1139

2.2.2 断层破碎带 根据钻探揭露资料,断层破碎带宽度2~60 m,岩性较混杂,主要以泥岩、粉砂岩为主,夹少量细砂岩,胶结物以泥质为主,挤压和揉皱现象严重,岩芯较破碎,泥岩呈糜棱状,砂岩呈碎块状、角砾状。

断层破碎带可沟通太灰水,使其沿断层带进入矿井,因此断层破碎带也是10煤层开采的充水通道之一(见表3)。

表3 太灰含水层与主采煤层对接情况统计表

位置	深度/m	影响断层	煤层
9-7孔N4° E238 m	-570	F ₁₁	10
9西-2孔S3° W28 m	-610	F ₂₀	10
9-10-3孔N7° E143 m	-580	FS ₁₁₋₁	10
10东-4孔N10° E53 m	-520	F ₆	10

2.3 充水程度

充水程度用矿井涌水量表示,因顶底板砂岩水主要以淋水、渗入形式进入矿井,主要涌水水源还是太原组灰岩含水层水,涌水量计算采用井底进水的非完整井公式^[3]:

$$Q = \frac{2\pi k S r_0}{\frac{\pi}{2} + \frac{r_0}{M} [1 + 1.185 \lg (\frac{R_0}{4M})]}$$

式中: $R = 10S\sqrt{k}$; $r_0 = \sqrt{F/\pi}$; $R_0 = R + r_0$

计算结果显示太原组灰岩含水层水涌水量为498.35 m³/h,在矿井排水能力范围之内(见表4)。

表4 井底进水的非完整井公式计算结果

开采煤层	k/(m·d ⁻¹)	M/m	S/m	R/m	r ₀ /m	R ₀ /m	Q/(m ³ ·h ⁻¹)
10煤层	0.6727	27.83	677.47	5556.49	11.97	5568.46	498.35

3 结论

影响矿井开采的主要充水水源是太原组灰岩裂隙水和“四含”水;其次是10煤层的顶、底板砂岩裂隙水。矿井的充水强度不大,充水通道主要为隔水层薄弱地段采动裂隙和断层破碎带。开采时应根据“预测预报,有疑必探,先探后掘,先治后采”^[2]的原则,制定疏水降压、底板隔水层注浆改造、留设防水煤柱等防治水措施。

参考文献:

- [1] 淮北矿业集团.青东矿建井地质报告[R].宿县:安徽省煤田第三勘探队,2007.
- [2] 国家安全生产监督管理局,国家宽矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009:91.
- [3] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,2005:275-276.

含山陶厂石膏矿构造应力场数值模拟分析

李全,张永泰,孙远进

(皖北煤电集团有限责任公司,安徽 宿州 234000)

摘要:为了分析井田内主要构造断裂的导水性,为断层岩柱留设提供依据,运用有限元法的三维数值模拟程序,对陶厂石膏矿现代构造应力场进行了模拟。模拟结果表明,在断层 F_{17} 附近存在较大的压应力,在 F_1 及 F_2 断层附近的石膏矿体中存在拉应力,在石膏矿体中的应力水平相对较低且均一。断层附近的 Z 方向的应力相对石膏矿体的应力低。应力矢量分布中拉应力矢量主要分布在石膏矿体靠近断层附近,随着石膏矿体与断层距离的增加,逐渐转化为压应力,而在断层的交汇处压应力值较高。

关键词:石膏矿;地质构造;断层;应力场

中图分类号:P554 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)02-0045-05

Numerical Simulation of Tectonic Stress Field in Taochang Gypsum Mine, Hanshan County

LI Qian, ZHANG Yong-tai, SUN Yuan-jin

(Wanbei Coal and Electricity Group Co., Suzhou Anhui 234000, China)

Abstract: In order to analyze water permeability of big tectonic faults and provide the basis of fault waterproof rock pillar setting, modern tectonic stress field of Taochang gypsum mine was simulated by using three dimensional numerical simulation program of finite element method. The simulation results showed that relatively large compressive stress exists near the F_{17} fault, tensile stress in gypsum ore body near F_1 and F_2 fault. Relatively small stress uniformly distributes in the gypsum ore body. The stress in Z direction nearby the fault is lower than that in the ore body. Tensile stress vector in stress vector distribution mainly distributes in the ore bodies near fault. Stress gradually transforms into compressive stress from tensile stress, with increase of distance between gypsum ore body and fault, and the compressive stress is higher at the crossroads of the faults.

Key words: Gypsum mine; geological structure; fault; stress field

陶厂石膏矿位于含山县城南17 km的陶厂集镇,是亚洲石膏储量最大的矿区之一。2008年3月18日在I22回风巷掘进过程中探眼遇断层突水,最大涌水量大于 $19\ 200\text{ m}^3/\text{h}$,造成矿井被淹。其主要原因是巷道掘进遇导水断层,因此开展矿区构造应力场研究,对分析断层导水性,合理留设断层岩柱,保证矿井生产安全,采场设计及采房稳定性分析等具有一定意义。近年来随着计算机技术的高速发展,特别是把计算数学中的有限单元法用于构造应力场分析后,构造应力场数学模拟得到迅

速发展和广泛应用,有限单元法已成为构造应力场定量研究的一个重要手段^[1-4]。构造应力场三维数值模拟由于采用了更符合实际情况的边界条件,同时考虑了不同层位之间的相互影响、各层厚度变化、岩层产状、断裂产状变化,其模拟结果不仅可揭示矿层面在平面上的应力分布,还能反映剖面上的应力分布,能更好地揭示地质体在三度空间的应力特征和展布规律^[5]。

1 地质概况

研究区出露的地层主要有三叠系下统和龙山组、南陵湖组、中统东马鞍山组、月山组、铜头尖组以及白垩系上统、第四系地层,硬石膏矿层为三叠系中统东马鞍山组,矿体控制厚度47.27~562.35m,平均468.60m,石膏储量达58.2亿吨。矿井采用竖井中央石门开拓方式,采用水平分层房式采矿法,目前,矿井生产水平为-400m水平。

矿区区域构造位置属于含山—庐江隆褶带,其中次级褶皱—陈夏背斜(东段)位于本区北缘,太湖山背斜(东段)位于本区南侧^[6],两背斜之间为陶家厂向斜(见图1)。矿区南北被北东向 F_1 和 F_2 相向倾斜正断层切割,东西各北 F_{13} 及耙齿山断层斜切, F_{19} 及 F_{18} 断层为一组轴向北西的正断层,其间发育同走向 F_{17} 逆断层。-400m水平上, F_1 断层和 F_2 断层之间是石膏矿体,在 F_1 断层和 F_2 断层下盘主要为灰岩(见图2~图3)。

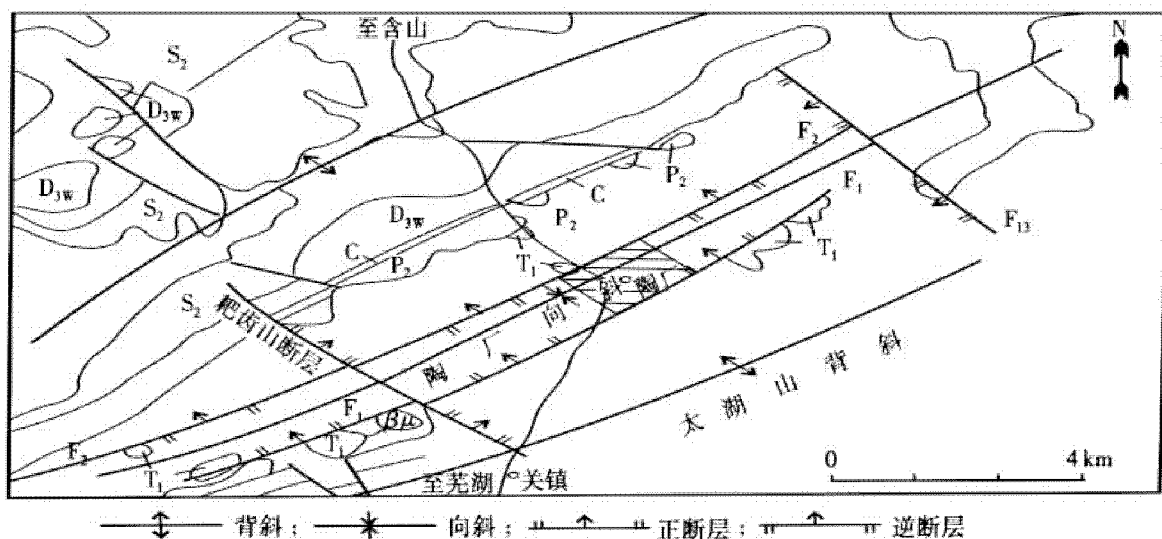


图1 陶厂石膏矿区域构造图

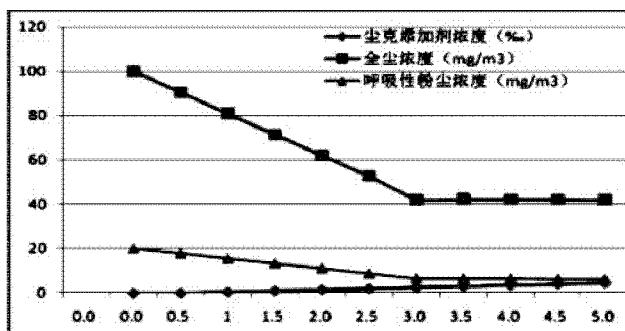


图2 陶厂石膏矿4勘探线剖面图(单位:m)

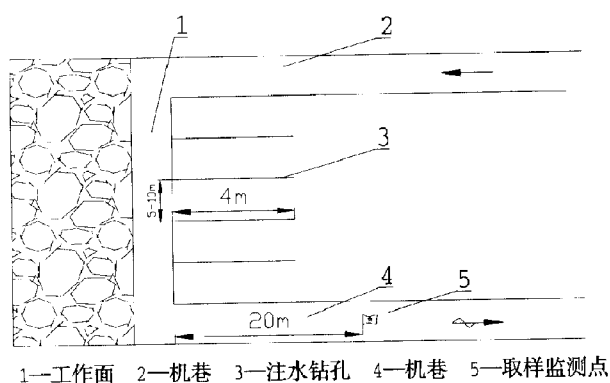


图3 陶厂石膏矿-400m构造分布图

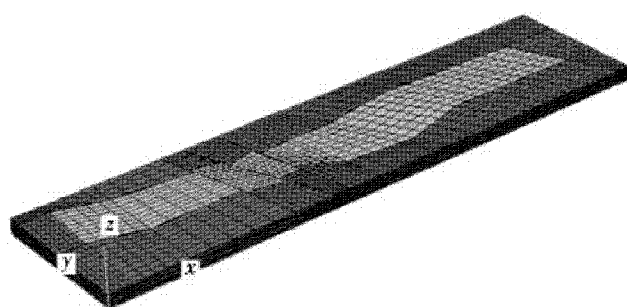
2 模型的建立

本文主要研究含山陶厂石膏矿-400m水平地质构造对矿体应力场的影响,为分析井田内主要构造断裂的导水性,为断层岩柱留设提供依据。因此,计算模型的建立主要根据石膏矿体埋深-400m构造分布(见图3)。

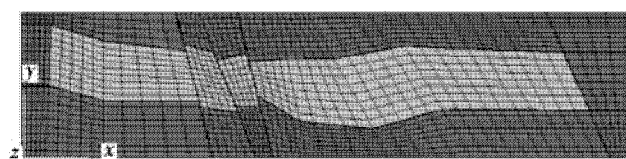
2.1 几何模型及边界条件

根据-400m地质情况,三维数值计算模型划分175500个单元,节点数213510个(见图4)。在数值计算模型中对原有的矿体边界和断层走向进行了简化,即采用折线方式代替了矿体边界的曲线分布。在数值模型中主要包括石膏矿体、断层和外围灰岩。由于计算的目的是研究断层对矿体的应力场的影响,所以在数值模型的高度上只

包括了 200 m,即标高 -400 m 上、下各自 100 m 作为计算区域。断层外围岩体的最小宽度为 100 m,以便消除数值计算模型的边界影响。



(a) 三维模型



(b) 平面计算模型

图4 数值计算模型

在模型前、后和左、右边界,采用零位移边界条件。图 4a 前后和左右边界取 $u=0, v \neq 0$ (u 为 x 方向位移, v 为 y 方向位移),即单约束边界;图 4b 下部边界取 $u=v=0$,为全约束边界。在模型上部施加载荷以代替没有模拟的上覆岩层,每 100 m 埋深的地层自重载荷增加 2.5 MPa。然后计算至各个

单元应力平衡后应力场值大小。

2.2 力学模型与破坏准则

模型中均采用 Mohr - Coulomb 屈服准则判断岩体的破坏,并且均不考虑塑性流动(不考虑剪胀)。

Mohr - Coulomb 屈服准则其判别表达式为

$$\begin{cases} f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2C \sqrt{N_\phi} \\ f^t = \sigma_3 - \sigma^t \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_1, σ_3 分别为最大和最小主应力; C, ϕ 分别为材料的粘结力和内摩擦角; σ^t ($\sigma^t_{\max} = \frac{C}{\tan \phi}$) 为

抗拉强度; $N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ 。当 $f^s = 0$ 时,材料将发生剪切破坏;当 $f^t = 0$ 时,材料产生拉伸破坏。

2.3 力学参数

由于石膏矿体总厚度在 550 m 左右,在数值计算模拟中开采层的上、下计算范围均在石膏矿体内,即开采层的顶板和底板均为石膏矿体。由于断层没有试验的力学参数,在本次模拟中参考相似矿区断层常规实验得到的强度和变形参数,作为断层力学参数;数值计算模型断层下盘岩体力学参数利用灰岩的力学参数(见表 1)。

表1 岩石力学参数

岩体	容重 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /($^\circ$)	内聚力 /kPa	体
3.97	63.72	0.222	36.58	5.38	21.24	26.07	
0.55	15	0.4	22.5	0.21	0.1	0.17	
3.0	30	0.3	35	6	4.86	4.2	

3 计算结果及分析

根据模拟计算结果,分别从不同方向反映了应力分布情况(见图 5 ~ 图 6)。 X 方向最大压应力值为 5.699 MPa,最大拉应力值为 2.957 MPa,在断层 F_{17} 附近存在较大的压应力,在 F_{18} 断层附近的石膏矿体中存在拉应力,在石膏矿体中的应力水平相对较低; Y 方向最大压应力值为 5.708 MPa,最大拉应力值为 2.479 MPa,在石膏矿体中的应力水平相对较低,分布均一,而在断层 F_{17} 附近存在

较大的压应力, F_1 及 F_2 断层周围以拉应力为主; Z 方向的应力分布表现为最大压应力值为 12.61 MPa,最大拉应力值为 1.555 MPa, F_1 及 F_2 断层周围的应力值在 6 MPa 左右,在石膏矿体中的应力为 9 MPa 左右。

主压力分布(见图 7)表明,压应力主要是在 F_{17} 逆断层位置,拉主应力主要在 F_{19} 断层和 F_{17} 断层之间,最大压主应力值为 5.20 MPa,拉主应力值为 3.43 MPa,石膏矿体主要应力较均一,应力值相对较低。

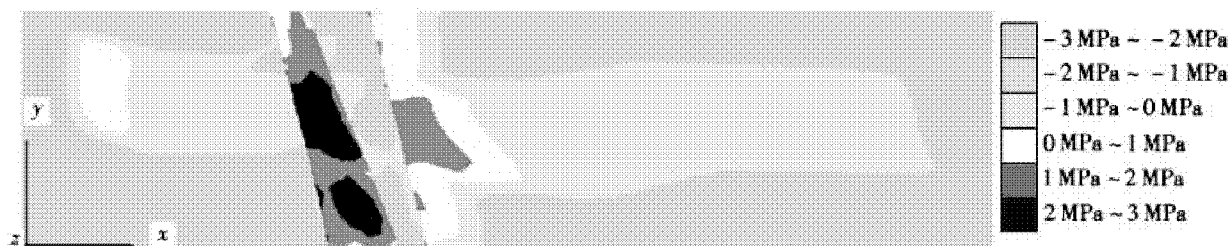


图5 X方向的应力分布图

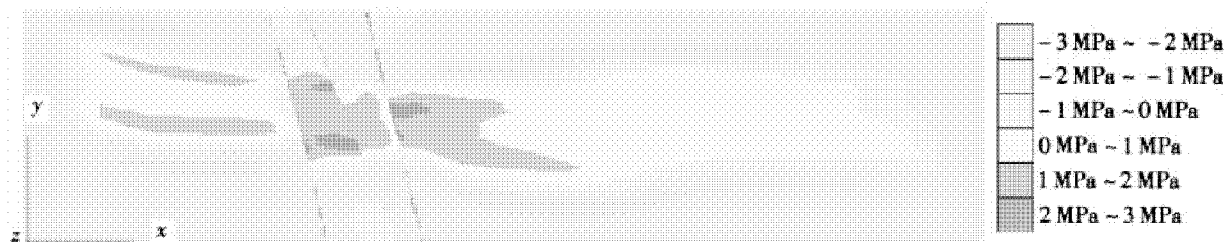


图6 Y方向的应力分布图

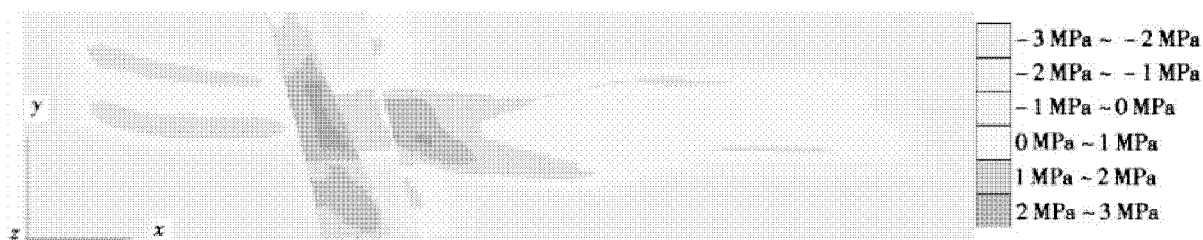


图7 主应力分布图

应力矢量分布图表明,主压应力主要分布在石膏矿体靠近断层附近,最大压应力为 23.9 MPa,而最大拉应力为 3.58 MPa,石膏矿体距离断层越远逐渐转化为压应力;在断层的交汇处压应力的水平较

高,在 F_{19} 断层和 F_{17} 断层之间的矿体主要是拉应力为主;在 F_{17} 断层和 F_{18} 断层之间的石膏矿体均分布有拉压应力(见图8)。

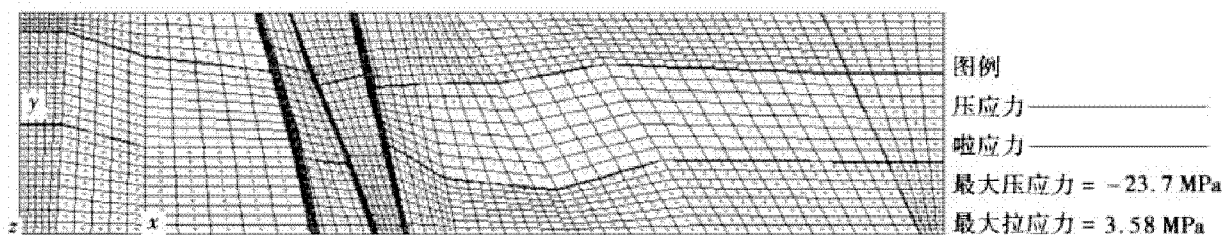


图8 应力矢量分布图

4 结论

1) 在断层 F_{17} 附近存在较大了压应力,在 F_1 及 F_2 断层附近的石膏矿体中存在拉应力,石膏矿体中的应力水平相对较低且均一。其他断层则是以拉应力为主。 Z 方向的应力分布中断层位置的

应力相对石膏矿体的应力低。

2) 对于构造影响的主应力分布情况压主应力值为 5.20 MPa,拉主应力值为 3.43 MPa。压应力主要是在 F_{17} 逆断层位置,拉主应力主要是在 F_{19} 断层和 F_{17} 断层之间。石膏矿体主要应力较均一,应力值相对较低。

3) 应力矢量分布中拉应力矢量,主要分布在石膏矿体靠近断层附近,随着石膏矿体与断层距离的增加,逐渐转化为压应力。而在断层的交汇处压应力的水平较高。在 F_{19} 断层和 F_{17} 断层之间的矿体表现拉应力为主,而在 F_{17} 断层和 F_{18} 断层之间的石膏矿体均分布有拉压应力。

4) F_{18} 断层以北区域,石膏矿体受力状态较均一,仅在 F_1 及 F_2 断层附近局部出现应力异常。

参考文献:

- [1] 宋卫华,张宏伟,徐秀茹. 区域构造应力场的数值模拟与应用[J], 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2006, 25 (1): 39 - 41.

- [2] 孙晓庆. 古构造应力场有限元数值模拟的应用及展望[J]. 断块油气田, 2008, 15 (3): 31 - 33.
- [3] 田宜平,刘雄,李星,等. 构造应力场三维数值模拟的有限单元法[J]. 地球科学 - 中国地质大学学报, 2011, 36 (2): 375 - 380.
- [4] 张胜. 构造应力场模拟——有限元理论、方法和研究进展[J]. 西北地震学报, 2010, 32 (4): 405 - 409.
- [5] 杨伟利,王毅,李亚辉,等. 准噶尔盆地燕山运动期构造应力场模拟[J]. 新疆石油地质, 2003, 24 (2): 124 - 127.
- [6] 孙远进,胡宝林,吴诗勇,等. 陶厂石膏矿地质构造三维模拟及分析[J], 安徽理工大学学报:自然科学版, 2011, 31 (1): 63 - 67.

(责任编辑:何学华,范 君)

(上接第 25 页)

当 PWM 信号占空比是 30% 时,LED 亮度很低,此时的负载电流平均值为 100 mA,输出电流在 MOS 管关断时有少许尖刺,当 PWM 占空比为 70% 时,负载电流平均值为 400 mA,LED 达到正常工作亮度,由于未串滤波电感,负载电流有一定的波动。因此在实际的应用中可以串入 1 kHz 的滤波电感,减少负载电流的波动。

4 结论

本文对太阳能光伏发电 LED 照明驱动控制技术进行了分析和研究,并针对太阳能光伏电池输出电压变化范围大,以及 LED 照明负载的驱动特性,设计了 Buck、Boost 相互切换的主电路结构,采用 DSP 控制,获得了更大的负载电流调节范围和调光范围,得出了正确的实验结果,实现了光伏发电和 LED 恒流节能照明,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 艾叶,刘廷章,王世松. 独立式 LED 太阳能光伏照明系统的设计[J]. 电力电子技术, 2010 (2): 18 - 20.
- [2] 薛勇,毛明科,汪明健. 太阳能照明系统关键技术的研究[J]. 硅谷, 2010 (3): 147 - 148.
- [3] 王平. 光伏发电 LED 照明的最大功率跟踪及控制技术研究[J]. 光机电信息, 2009 (11): 30 - 34.
- [4] 薛勇,马双宝. 太阳能光伏照明系统中功率 LED 驱动电路的研究[J]. 武汉科技学院学报, 2008 (10): 45 - 47.
- [5] 苏奎峰. TMS320X281xDSP 原理及 C 程序开发[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008: 45 - 55.

(责任编辑:何学华 吴晓红)

新庄孜矿六八采区断裂复杂程度的分形评价

汪敏华¹, 高红远²

(1. 淮南矿业集团生产部, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了掌握井田断裂构造对矿区的控制情况, 基于矿井地质构造的资料, 采用分形几何学理论计算分维值, 定量评价了淮南矿区新庄孜矿六八采区断裂构造的复杂程度, 并根据复杂程度分为四类。六八采区分维值由北向南逐渐减小, 形成了北部断层发育而南部断层不发育的总体构造格局, 断裂构造复杂程度主要以Ⅱ~Ⅲ类为主。断裂构造复杂程度的评价为矿井安全高效生产提供了科学依据。

关键词: 分形几何学; 断裂; 复杂程度

中图分类号: P542.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0050-04

Fractal Evaluation of Fracture Complexity of No. 6-8 Pannel in Xinzhuangzi Coal Mine

WANG Min-hua¹, GAO Hong-yuan²

(1. Production Department, Huainan Mining Group Co. Ltd., Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to know about distribution of field's fracture structure in the pannel, based on the mine geological tectonics information, by using fractal geometry theory the fractal value was calculated, and fracture tectonics complexity of No. 6-8 Pannel in Xinzhuangzi Coal Mine was quantitatively evaluated. Based on complexity, fracture tectonics were divided into four categories. In No. 6-8 Pannel fractal value gradually decreases from the north to the south, in the northern part faults are developed and in the southern part faults not developed, and Ⅱ and Ⅲ categories of fracture dominate. Evaluation of complexity of the faults provides a scientific basis for safety and efficient production of the mine.

Key words: Fractal geometry; fracture; complexity degree

煤矿断裂网络对开采条件、瓦斯突出、矿井突水等都有显著的影响。定量评价断裂网络复杂程度, 对合理开发煤炭资源以及防止和减少矿井地质灾害有着十分重要的现实意义^[1-3]。如何确定矿井构造复杂程度的评价指标, 将直接影响到评价结果的合理性和准确性。研究煤矿地质构造, 大多利用传统的数学思维, 采用线性或多因素相关研究,

很难定量研究极为复杂的煤矿地质构造现象和规律。国内外学者大多选用统计面积内的断裂条数、水平延伸长度、落差、断裂的影响面积等作为定量评价指标。在煤矿生产实际中, 很难用其中某一指标来合理、准确地进行断裂网络复杂程度的定量评价。断裂网络是一种复杂的、具有自相似性的分形体系, 可以用定量描述几何不规则性的分维指标来

定量评价矿井断裂发育的复杂程度。本文基于大量实际资料,采用分形理论和计算机技术对地质构造因素及复杂程度进行评价,目的就是用来指导对未知区的地质构造的判断和预测。

1 分形几何学原理简介

分形是一种局部与整体之间存在的某种相似形。分形的度量称为分维值,简称分维。分维的种类很多,最常用的为相似维(D_s)。其定义为:设 $F(r)$ 是 R^n 上任意非空有界子集, $N(r)$ 为覆盖 $F(r)$ 所需的分形基元 B 的相似集 rB 的最小个数集合,如果 $r \rightarrow 0$ 时, $N(r) \rightarrow \infty$, 则定义集合 $F(r)$ 的相似维为

$$D_s = \dim F(r) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{-\lg r}$$

分维值包含着断裂条数、延伸长度、交叉关系等多方面的变化信息,是一项综合性指标。对断裂构造发育程度进行定量评价具有较好的理论基础。

2 分维值计算与构造复杂程度划分

2.1 矿井概况

新庄孜煤矿位于淮南市西部,八公山东麓,蔡家洼与毕家岗一带,西北延续至山王集大断层,与二道河勘探区遥望,井田横跨淮南北两岸,井田范围为宽广的山前平原,本井田西北与李咀孜矿接界,东南与谢一矿毗邻,为八公山煤田组成部分之一。井田南北走向长 5.40 km,东西倾斜宽 3.75 km,面积 17.786 1 km²。

井田内断裂构造发育,断层走向主要是 N60°~80°E,倾向 N20°~50°W (见图 1~图 2),这与井田北东东向与北东向断裂构造发育特征是一致的,从而显示了井田断裂构造对矿区的控制作用。

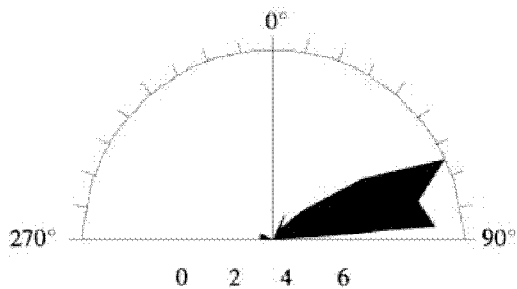


图1 走向玫瑰花图(单位:条数)

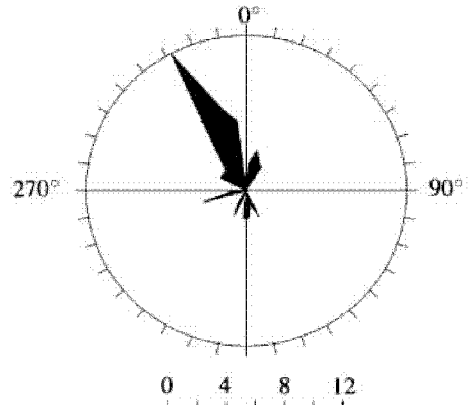


图2 倾向玫瑰花图(单位:条数)

六八采区位于新庄孜井田北翼,南起 F_5 断层,煤系地层总体呈单斜构造,倾向 NE。从走向上看,在李 VII 线与李 VI~VII 线附近,受 F_5 断层影响,煤岩层产状变化较大,其走向为 285°~320°;在正常块段,岩层倾角 28°~32°,向北煤层倾角逐渐增大,最大倾角达 50°;从倾向上看,相对而言浅部煤层倾角小深部煤层倾角大,且越向北边界深部煤层倾角越大。靠近李 V 勘探线附近的底部煤层受到 F_{3-4} 斜切正断层牵引作用,走向西扭。总体煤岩层走向趋势 295°~300°之间,倾向 NE,煤岩层倾角自南向北呈增大趋势,变化范围在 50°~72°之间。

2.2 断裂分维计算

分维的计算方法众多,其中盒维数法是一种既简便又客观的分维量测方法,此次计算采用盒维数法,具体步骤如下:

- 1) 首先按相同比例尺 (1:5000 或 1:2000) 将煤层底板等高线图上的所有断裂转绘到透明纸上;
- 2) 选取边长为 20 cm 作为一个单位长度的正方形网格覆盖研究区,采用重合迭加覆盖法;
- 3) 对初始网格所圈闭的块段进行编号,记在每个方格的中心位置,然后对采区划分单元并依次编号;
- 4) 在初始网格的基础上,取 $r = 1/2, 1/4, 1/8, 1/16$ 网格分别求得各标度下含有断裂迹线的网格 $N(r)$, 在 $\lg(1/r) - \lg N(r)$ 坐标系中作图,用计算机回归技术求得最佳回归直线的斜率即为分维值 D_s , 同时求得相关系数 R 。依次类推,求得各块段的分维值 D_s 和相关系数 R (见表 1)。

本次分维计算建立在 B6 煤底板等高线 (1:2000) 上,研究单元设定为正方形,边长 1 000 m、滑动步长 500 m。根据求相似维数的方法将六八采区划分

为48个边长为1 000 m的正方形块段,记录各划分单元含有断层痕迹的网格数,用线性回归技术求得各个块段的相似维数(见图3)。通过计算,勘探阶段所揭露的新庄孜矿六八采区断裂分布的分维值在0.64~1.58之间,各块段的相关系数均在0.90以上,表明相关性较好,煤层中断裂体系的分布在所采用的标度下具有分形特性。利用各块段的分维值作分维等值线图(见图4),并与断裂分布进行比较,可知,断裂分布密集且复杂的区域,分维值较大;反之,分维值较小,二者具有良好的一致性与对应性。

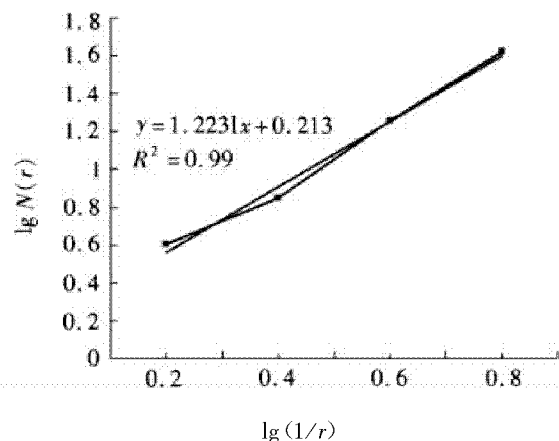


图3 某块段回归直线及其分维示意图

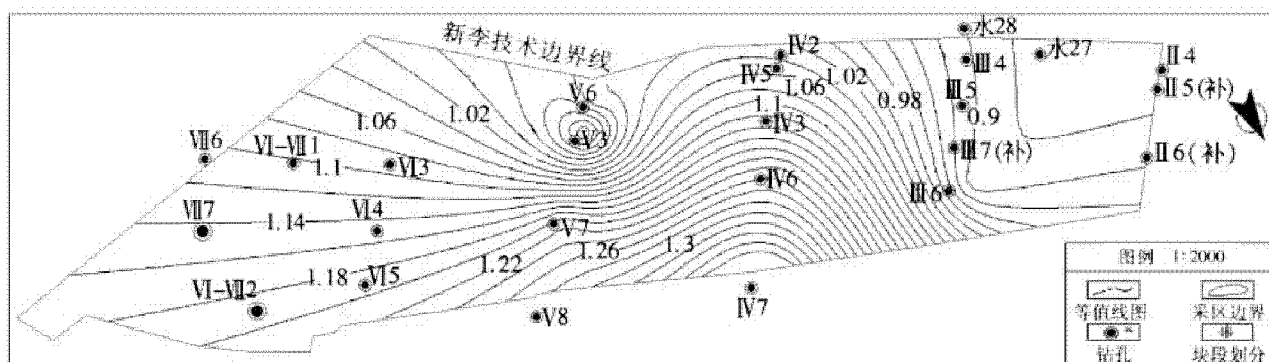


图4 新庄孜矿六八采区断裂分维等值线

表1 各块段断裂分维值统计表

块段	D_s	R^2	块段	D_s	R^2	块段	D_s	R^2
1	1.170 0	0.990 0	17	1.181 3	0.954 7	33	1.325 1	0.979 6
2	1.160 0	0.987 7	18	1.179 4	0.999 1	34	1.460 0	0.977 6
3	1.140 0	0.997 5	19	1.586 3	0.997 6	35	1.384 7	0.992 2
4	1.125 0	0.988 8	20	1.210 0	0.994 2	36	1.205 7	0.994 9
5	1.150 0	0.985 0	21	0.875 6	0.986 3	37	1.027 9	0.962 9
6	1.040 0	0.976 8	22	1.059 4	0.981 5	38	0.815 6	0.996 0
7	0.985 2	0.979 9	23	1.048 6	0.991 6	39	0.724 6	0.998 0
8	1.212 0	0.996 1	24	1.058 7	0.964 1	40	0.640 0	0.871 9
9	1.181 2	0.997 6	25	1.223 1	0.987 1	41	1.192 6	0.974 4
10	1.159 2	0.998 5	26	1.241 6	0.910 1	42	1.045 7	0.995 1
11	1.146 8	0.999 2	27	1.239 8	0.993 7	43	0.975 1	1.460 9
12	1.156 4	0.984 6	28	1.198 2	0.983 6	44	0.768 3	1.401 1
13	1.064 0	0.987 5	29	1.230 0	0.999 7	45	0.890 0	1.228 5
14	0.851 2	0.982 1	30	1.189 0	0.993 4	46	0.871 5	1.366 7
15	0.648 9	0.998 4	31	1.024 9	0.990 1	47	0.942 6	1.495 2
16	1.201 6	0.997 2	32	0.945 1	0.997 8	48	0.897 7	1.431 0

2.3 断裂构造复杂程度划分

根据断裂构造发育程度与分维值之间的关系,

以分维值为基本特征量,将研究区六八采区断裂构造发育程度分为四类(见表2)。

表2 断裂构造复杂程度分维值评价标准

级别	复杂程度	D_s	级别	复杂程度	D_s
I	简单	$D_s \leq 1.10$	III	复杂	$1.35 < D_s \leq 1.55$
II	中等	$1.10 < D_s \leq 1.35$	IV	极复杂	$D_s \geq 1.55$

由表2可知,六八采区断裂构造复杂程度以II~III为主。分维值由北向南逐渐减小,反映了南北构造发育程度的差异性,形成了北部断层发育而南

部断层不发育的总体构造格局(见图5),与前面的统计分析结果吻合。

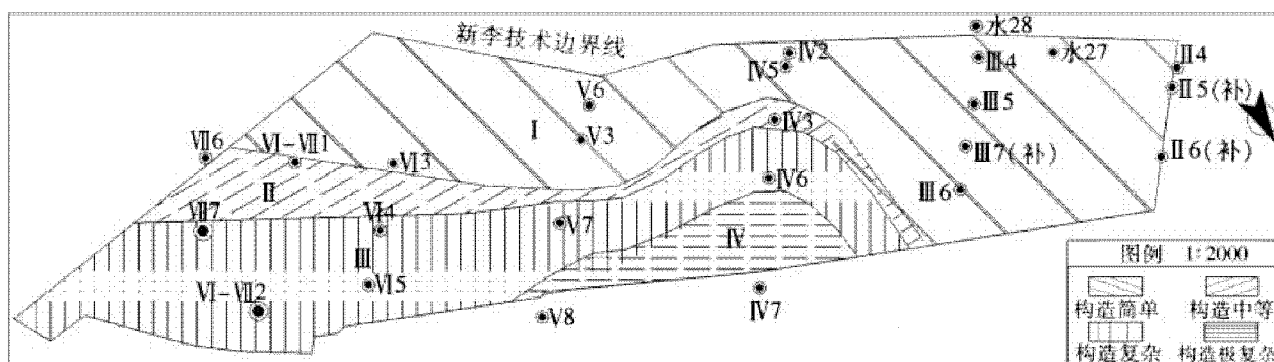


图5 新庄孜矿六八采区断裂复杂程度分区图

3 结论

1) 通过分形几何学理论中的评价指标分维值能较好的定量描述新庄孜矿六八采区断裂构造的发育复杂程度;

2) 分维值越大,表示断裂长度较长,小断层及分支断层繁多,对岩体切割越严重;反之,分维值越小,则断层较为稀少,小断层及分支断层也相应较少,对岩体的切割相对较轻。新庄孜矿六八采区分维值由北向南逐渐减小,反映了南北构造发育程度的差异性,表现出北部断层发育而南部断层不发育的总体构造格局;

3) 分形几何学理论对于开采前矿井或采区的断裂构造发育复杂程度的定量评价具有重要的理

论和实际意义,对于不规则的开采边界也具有指导意义。

参考文献:

- [1] 鞠玮,侯贵廷,潘文庆,等.塔中I号断裂带北段构造裂缝面密度与分形统计[J].地学前缘,2011,18(3):317-323.
- [2] 张春光,姜波,朱慎刚.矿井构造分形定量评价与突水耦合分析[J].矿业安全与环保,2011,38(5):40-43.
- [3] 黄月,廖太平,邓吉州,等.分形理论在断裂构造研究中的应用前景[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2010,12(6):83-85.

(责任编辑:姚多喜)

主成分分析法在煤矿塌陷水域水质评价的应用

冯娜娜, 高良敏, 卓利玲

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:定期对塌陷水域水质进行综合评价, 帮助相关部门及时掌握水体水质状况, 为保护和开发塌陷水域水体提供科学的基础资料。采用主成分分析法对淮南潘集杨庄塌陷水域4月份的水质进行了评价, 选取COD、高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮、硝酸盐氮、Cd、Cr(VI)、Zn、Pb、Cu 11个指标进行分析, 借助统计分析软件SPSS, 矩阵计算软件Matlab, 使计算结果更加精确, 可靠。根据综合评价函数得分结果表明, 杨庄塌陷水域4月份水质状况处于Ⅲ类~Ⅳ类之间, 以Ⅲ类水质为主, 主要受到总磷、总氮、硝酸盐氮污染与重金属Pb的污染, 这与塌陷水域的实际情况相符合。证实主成分分析方法能够真实、客观、准确地评价水体的现实状况, 是一种有效的水质评价方法。

关键词:塌陷水域; 主成分分析; 水质评价

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0054-05

Application of Principal Component Analysis in Evaluation of Water Quality in Mining Subsidence

FENG Na-na, GAO Liang-min, ZHOU Li-ling

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

Abstract: Comprehensive evaluation of water quality in subsidence on a regular basis helps the relevant departments to timely hold water quality conditions, which provides the scientific fundamental data for protection and development of the water area. By using principal component analysis water quality for April from subsidence of Panji Yangzhuang was evaluated. 11 indicators were selected and analyzed such as COD, permanganate index, total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, Cd, Cr(VI), Zn, Pb and Cu, because of using statistical analysis software SPSS and matrix computation software Matlab, the calculation results are more accurate and reliable. The result score from comprehensive evaluation function shows that the water quality from Yangzhuang subsidence for April is between category III and IV, category III dominates, which primarily due to total phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen pollution and Pb pollution. This is consistent with the actual situation of the waters in subsidence. It's confirmed that the principal component analysis can objectively, accurately evaluate reality of the water, and is an effective method of water quality evaluation.

Key words: water in subsidence; principal component analysis; water quality evaluation

收稿日期: 2011-11-26

基金项目: 淮南矿业集团2010年科学技术资助项目

作者简介: 冯娜娜(1984-), 女, 陕西咸阳人, 在读硕士, 研究方向: 水污染控制工程。

煤炭的大量开采导致地面移动、变形及至破坏,最终形成大规模的塌陷地带,又由于浅层地下水和大量雨水的汇入,形成了面积大小不等的塌陷水域^[1]。由于塌陷水域多为农田所包围,农药、化肥和污水灌溉严重影响水体水质,加之塌陷水域处于煤矿周围,矸石山大量堆积,经日晒、风化、淋溶后,许多污染物溶入水体,造成土质和水质改变^[2]。水质恶化破坏了水体的自净功能,制约了对塌陷区水资源的利用,如果不及时予以改善和治理,将影响到当地居民的生活,阻碍矿区生态环境修复。因此对塌陷区域的水质状况进行真实评价,具有一定的现实指导意义。

水质综合评价的难点在于:水质系统是由多维因子(各种污染物含量指标变量)组成的复杂系统,因子间具有不同程度的相关性,每一因子从某一方面反映了水质质量,但依据它们作综合评价有一定难度^[3]。目前,水质评价方法有污染指数法、模糊综合评判法、模糊识别法、灰色聚类分析、灰色关联分析法、神经网络法等,都无法回避多因子这个问题,从而使上述方法在进行水质评价时表现出一定的局限性^[4]。而主成分分析方法(PAC法)是一种将多维因子纳入同一系统中进行定量化研究,理论比较完善的多元统计分析方法^[5-6]。它是在确保不损失原有信息的前提下,将多种影响水质的指标重新组合成一组新的、相互之间无关的、较少的综合指标来反映指标的信息,以达到降维、简化数据和提高分析结果的可靠性目的^[7]。

本文采用主成分分析法,对淮南市潘集矿区杨庄塌陷水域水质进行综合评价,分析影响区域水质指标的关键因素,以期为后续的塌陷水域水质改善工作和水环境质量的科学管理和规划提供决策指导。

1 研究区概况

潘集区位于安徽省淮南市北部,南濒淮河,北临茨淮新河,东与怀远县接壤,西与凤台县毗邻。杨庄塌陷水域位于淮南市潘集区,地处E116.830 0°~116.854 3°与N32.790 9°~32.802 0°之间,附近被村庄包围,北邻杨庄,南邻刘龙集、桥西、桥南,西邻新王郢子,东邻饲马槽,斜郢。经过多年的煤矿开采,造成大面积的地表塌陷,加上浅层地下水和大量雨水、附近生活污水的汇入,形成了现在的塌陷水域。采样区域,最浅水深约2.0m,最深的约6.0m,目前,杨庄塌陷区塌陷面积还在不

断扩大中。

2 主成分分析法水质评价步骤

主成分分析法在水质评价中的应用主要有两方面:一是建立综合评价指标,评价各采样点间的相对污染程度,并对各采样点的污染程度进行分级;二是评价各单项指标在综合指标中所起的作用,指导删除那些次要的指标,确定造成污染的主要成分^[8]。

1) 建立原始变量矩阵 X , 水质指标数为 n , 样本数为 m 的数据矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

2) 对原始变量矩阵 X 进行标准化处理(目的是为了消除原始数据量纲和数量级的影响), 标准化处理即对同一变量减去其均值再除以标准差。

3) 经标准化处理后的矩阵, 计算该矩阵的相关系数矩阵 R 及该矩阵的特征值, 贡献率, 累积贡献率, 确定主成分的相关信息。

4) 确定主成分的个数。在已确定的全部主成分中合理选择前 P_i 个来实现最终的评价分析。一般根据累积方差贡献率来进行确定, 通常取累积方差率 $\geq 85\%$ 。

5) 确定主成分的表达式。计算标准化处理矩阵的协方差矩阵 S , 求其特征向量, 即为主成分 Y_i 相对应的系数。当主成分所对应的特征向量, 原始各指标对综合指标都为正指标时, 特征向量中系数绝对值较大者应有同样的符号且都为正值。若系数绝对值较大者都为负值, 那该主成分与评价指数是负相关的, 此时应把相应特征向量改向, 使主成分为 $-Y_i$, 再与其他主成分综合^[9]。

6) 确定综合评价函数。将各待评价水体样点的标准化数据分别代入各主成分 Y_i 的表达式中, 计算得到各样点的各主成分 Y_i 值。以每个主成分所对应的特征值, 占所提取主成分总的特征值之和的比例, 作为权重计算主成分综合评价模型:

$$F_i = \sum K_i Y_i (i = 1, 2, 3, \cdots, n)$$

7) 将国家或地区在水质评价级别中规定各个指标上的每一级标准值, 作为一个特殊的水质样点的各项观测值, 把这些特殊样点当作待评样点参与上述评价过程, 它们的得分作为划分水质级别

的界点^[10]。

3 水样采集与实验分析

3.1 水样采集

根据文献[11]中规定的水样采集方法和要求,结合水样采集区域地形具体情况,于 2011 年 4 月在潘集杨庄塌陷区域采集 16 个水样样品。采样过程中详细记录采样点的名称、位置、坐标等信息,并对同一水样不同测量指标单独装瓶,部分测量指标现场进行预处理,之后迅速运回实验室。

3.2 数据处理方法

借助 Microsoft Excel 2007 对实验测定的基本

数据进行编辑,利用 Spss17.0 统计软件对原始数据进行标准化变化,并求解其相关系数矩阵、相关阵矩的特征值、贡献率、累积贡献率。采用 Matlab7.0 软件计算出标准化数据的项间协方差矩阵,并求其特征向量。

4 结果与讨论

4.1 标准化处理

根据文献[12]的标准,结合当地的地表水环境质量特点与试验测量数据,选取 COD、高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮、硝酸盐氮、Cd、Cr(VI)、Zn、Pb、Cu 11 个指标进行主成分分析,数据标准化处理结果如表 1 所示。

表 1 潘集杨庄塌陷水域水质指标标准化处理数据

(mg/L)

样点 编号	COD	高锰酸 盐指数	总磷	总氮	氨氮	硝酸 盐氮	Cd	Cr(VI)	Zn	Pb	Cu
1	-0.63	1.41	-0.58	-0.09	-0.12	-0.54	-0.34	-0.97	-0.25	-0.13	-0.37
2	-1.33	-0.56	-0.81	-0.27	-0.06	0.06	-0.49	-2.55	-0.52	-1.26	-0.38
3	-1.64	-0.12	0.66	0.53	-0.51	0.50	-0.28	-1.20	-0.61	-0.19	-0.39
4	-0.30	0.52	2.26	3.43	-0.34	1.39	-0.21	0.63	-0.50	-0.47	-0.38
5	1.78	-0.32	0.66	0.01	0.08	-0.14	3.72	-0.51	-0.58	-0.52	-0.39
6	-0.17	-1.62	-0.34	-0.71	-0.46	-0.25	-0.36	-0.97	-0.20	0.83	-0.37
7	-0.43	-0.12	-0.22	-0.34	-0.37	-0.19	-0.32	-0.74	2.66	0.47	2.53
8	0.38	-0.32	0.01	-0.40	-0.71	-0.79	-0.40	0.17	-0.55	1.60	2.59
9	1.59	0.15	-0.46	-0.73	-0.46	-0.77	-0.15	0.17	0.08	-0.60	-0.37
10	0.45	-0.21	-0.93	-0.26	0.25	-0.60	-0.29	0.29	-0.59	-0.21	-0.37
11	1.26	-1.08	-1.23	-0.85	-0.32	-0.66	-0.04	1.32	2.31	1.38	-0.35
12	-0.76	-0.02	-0.69	-0.66	-0.23	-0.93	-0.19	0.98	0.18	1.94	-0.34
13	-0.11	-1.09	-0.87	-0.28	-0.12	-0.77	-0.17	0.06	-0.32	-0.43	-0.35
14	-0.76	1.90	-0.10	0.28	-0.18	-0.25	-0.29	0.75	-0.38	-0.22	-0.37
15	-0.30	-0.36	0.78	-0.08	-0.09	2.74	-0.09	1.09	-0.53	-0.50	-0.33
16	0.97	1.85	1.85	0.43	3.64	1.18	-0.10	0.52	-0.20	-1.68	-0.36

4.2 相关系数矩阵的特征值、贡献率和累计贡献率

将原始监测数据进行标准化后求出相关系数

矩阵,利用 SPSS 软件分别对 11 个评价指标的相关系数矩阵的特征值进行计算。根据特征值方差累计贡献率确定选取主成分的个数(见表 2 ~ 表 3)。

表2 相关系数矩阵 R

	COD	高锰酸盐指数	总磷	总氮	氨氮	硝酸盐氮	Cd	Cr(VI)	Zn	Pb	Cu
COD	1.000	-0.072	0.039	-0.196	0.273	-0.162	0.531	0.412	0.170	-0.034	-0.007
高锰酸盐指数	-0.072	1.000	0.431	0.374	0.502	0.194	-0.078	0.178	-0.187	-0.394	-0.088
总磷	0.039	0.431	1.000	0.781	0.439	0.742	0.203	0.159	-0.319	-0.431	-0.044
总氮	-0.196	0.374	0.781	1.000	0.105	0.530	0.008	0.099	-0.298	-0.357	-0.151
氨氮	0.273	0.502	0.439	0.105	1.000	0.325	0.061	0.144	-0.103	-0.535	-0.210
硝酸盐氮	-0.162	0.194	0.742	0.530	0.325	1.000	-0.002	0.145	-0.237	-0.490	-0.189
Cd	0.531	-0.078	0.203	0.008	0.061	-0.002	1.000	-0.022	-0.124	-0.142	-0.147
Cr6 +	0.412	0.178	0.159	0.099	0.144	0.145	-0.022	1.000	0.161	0.299	-0.074
Zn	0.170	-0.187	-0.319	-0.298	-0.103	-0.237	-0.124	0.161	1.000	0.397	0.411
Pb	-0.034	-0.394	-0.431	-0.357	-0.535	-0.490	-0.142	0.299	0.397	1.000	0.412
Cu	-0.007	-0.088	-0.044	-0.151	-0.210	-0.189	-0.147	-0.074	.411	.412	1.000

表3 特征值和主成分贡献率及累积贡献率

	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
第一主成分	3.555	32.316	32.316
第二主成分	1.811	16.467	48.783
第三主成分	1.494	13.583	62.366
第四主成分	1.152	10.472	72.838
第五主成分	0.984	8.949	81.787
第六主成分	0.740	6.731	88.518
第七主成分	0.498	4.526	93.044
第八主成分	0.350	3.183	96.228
第九主成分	0.282	2.561	98.789
第十主成分	0.102	0.925	99.713
第十一主成分	0.032	0.287	100.000

根据表3,第一~第四主成分的特征值均大于1,方差贡献率累计达到72.838%。依据主成分的方差贡献率的多少来选择评价指标。当第一主成分的方差贡献率<80%时,按照贡献率的大小,依次将前几个主成分进行线性加权综合^[13],使得方差贡献率的总和超过85%。依此标准,本文选取前六个主成分进行线性加权综合,其累积贡献率达到88.518%,认为它们基本包含了以上11个指标的所有信息。

4.3 确定主成分表达式

计算出标准化数据的项间协方差矩阵,并求其特征向量,依此列举符合要求的前六个主成分表达式:

$$Y_1 = -0.0097X_{11} + 0.3159X_{12} + 0.4552X_{13} + 0.3835X_{14} + 0.3217X_{15} + 0.3971X_{16} + 0.08X_{17} + 0.0488X_{18} - 0.2714X_{19} - 0.3971X_{10} - 0.2109X_{111}$$

$$Y_2 = 0.6781X_{11} + 0.0327X_{12} + 0.0546X_{13} -$$

$$0.1512X_{14} + 0.2690X_{15} - 0.0801X_{16} + 0.4078X_{17} + 0.4680X_{18} + 0.2116X_{19} + 0.0655X_{10} - 0.0121X_{111}$$

$$Y_3 = -0.1406X_{11} + 0.2007X_{12} + 0.2292X_{13} + 0.2523X_{14} - 0.0276X_{15} + 0.1854X_{16} - 0.4074X_{17} + 0.4499X_{18} + 0.3563X_{19} + 0.3371X_{10} + 0.4239X_{111}$$

$$Y_4 = -0.0543X_{11} + 0.4659X_{12} - 0.2796X_{13} - 0.3434X_{14} + 0.5214X_{15} - 0.2205X_{16} - 0.4324X_{17} - 0.0274X_{18} + 0.1406X_{19} - 0.2220X_{10} - 0.0809X_{111}$$

$$Y_5 = 0.0868X_{11} + 0.0378X_{12} + 0.1936X_{13} - 0.0256X_{14} + 0.1682X_{15} + 0.0083X_{16} + 0.2389X_{17} - 0.5536X_{18} + 0.3018X_{19} - 0.2040X_{10} + 0.6544X_{111}$$

$$Y_6 = -0.0040X_{11} + 0.5754X_{12} + 0.0333X_{13} + 0.2096X_{14} - 0.1862X_{15} - 0.5542X_{16} + 0.2208X_{17} + 0.0031X_{18} - 0.3934X_{19} + 0.2072X_{10} + 0.1886X_{111}$$

根据第一主成分线性组合表达式,可以看出总磷、总氮、硝酸盐氮、Pb四个指标的系数绝对值较高,第一主成分反映了塌陷水域氮、磷污染较为严重,且附有重金属Pb污染迹现。依此类推,与第二主成分密切相关的水质指标是COD、Cd、Cr(VI);与第三主成分密切相关的水质指标是Cd、Cr(VI)、Cu;与第四主成分密切相关的水质指标是高锰酸盐指数、氨氮、Cd;与第五主成分密切相关的水质指标是Cr(VI)、Cu;与第六主成分密切相关的水质指标是高锰酸盐指数、硝酸盐氮。根据以上分析,塌陷水域水质主要受有机污染与重金属污染,这与塌陷水域的实际情况相符合。主要是由于塌陷水域水体主要受附近的农业非点源污染与当地矿区生产环境影响。

4.4 水质综合评价结果

根据综合主成分与各监测指标的关系,参考文

献[12]水质等及分类标准方法,将水环境质量标准中相关数据同样标准化处理,计算综合主成分得分的 F 值,可以得到潘集杨庄塌陷水域水质综合主成分的分级标准(见表4)。

表4 综合主成分的分级标准

综合主成分	水质等级
$F \leq -2.9652$	I
$-2.9652 < F \leq -1.1720$	II
$-1.1720 < F \leq -0.3877$	III
$-0.3877 < F \leq 1.3901$	IV
$1.3901 < F \leq 3.3950$	V

根据公式 $F_i = \sum K_i Y_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 计算出16个样点的主成分综合得分,分别对各监测样点水质污染程度进行定量化描述,得分越大,表明污染程度越严重,由此对采样点污染程度进行排序和分级(见表5)。

表5 综合主成分得分排名及等级

样点编号	综合主成分 F 值	水质等级	水质排名
1	-0.041 4	IV	11
2	-0.679 2	III	2
3	-0.227 6	IV	8
4	1.117 9	IV	15
5	0.331 7	IV	12
6	-0.953 5	III	1
7	-0.234 9	IV	7
8	-0.356 3	IV	6
9	-0.093 2	IV	10
10	-0.204 1	IV	9
11	-0.626 2	III	3
12	-0.568 7	III	5
13	-0.569 8	III	4
14	0.432 6	IV	14
15	0.406 5	IV	13
16	2.154 6	V	16

由主成分得分评价结果可知,水质监测样点Ⅲ类水占到总数的62.5%,Ⅳ类水占到总数的31.25%,Ⅴ类水占到总数的6.25%。整体而言,塌陷水域水体处于Ⅲ~Ⅳ之间。综合评价函数 F 的值越小越好,按照 F 值的大小进行得分排序, F 值越小,排序越靠前,水质越好。

塌陷水域水质主成分的评分结果,与其塌陷水域的现实状况较为符合。距离岸边较近的采样点,受附近地表径流的影响,水质较差一点。位于塌陷水域中心位置的采样点,因塌陷中心区为最凹处,

四处的污染物随水流趋势在最低处有聚集现象,影响了上覆水的水质,其采样点处的水质较差。而位于排污口附近的采样点,水质最差,综合主成分的水质等级计算结果为Ⅴ类。

根据此次塌陷水域4月份的水质评价结果,建议当地煤矿塌陷水域管理部门从以下两个方面着手对水体水质进行改善:

1) 消减当地农业面源污染与农村生活污水的流入,减少有机污染物排入水体。

2) 由于重金属污染主要受当地采矿污染,因此矿区开采、矿业生产过程中应尽量减少含有重金属的废水、废气、废渣排放,以免对当地环境造成影响与危害。

参考文献:

- [1] 童柳华,刘劲松.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.
- [2] 计承富,桂和荣,王和平,等.淮南矿区塌陷塘水体水质的变化[J].煤炭地质与勘探,2008,36(1):45-48.
- [3] 李亚鹏.白洋淀的水环境质量与保护对策研究[D].河北:河北农业大学,2006.
- [4] 王群妹,梁雪春.基于主成分分析的水质评价研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):140-154.
- [5] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2006:53-54.
- [6] RICHARD A JOHNSON, DEAN W WICHERN. Applied Multivariate Statistical Analysis [M]. Prentice Hall, 2001:68-69.
- [7] 郭翔云,崔慧敏.主成分分析法在白洋淀水质评价中的应用[J].海河水利,2005(5):55-56.
- [8] 刘小楠,崔巍.主成分分析法在汾河水水质评价中的应用[J].中国给水排水,2009,25(18):105-108.
- [9] 姚焕玫,黄仁涛,甘复兴,等.用改进的主成分分析法对东湖的水质污染进行评价[J].武汉大学学报:信息科学版,2005,30(8):732-735.
- [10] 李亚鹏.白洋淀的水环境质量与保护对策研究[D].河北:河北农业大学,2006.
- [11] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M].第4版.北京:中国环境科学出版社,2011:39-42.
- [12] 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.
- [13] 万金保,曾海燕,朱邦辉.主成分分析法在乐安河水水质评价中的应用[J].中国给水排水,2009,25(16):104-108.

(责任编辑:何学华,范 君)

采用电法 CT 技术探查树木内部结构

于 仲, 张平松, 付茂如, 程 刚

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:为探讨直流电法应用于树木内部结构探测的成像效果,通过直流电法层析成像技术对不同种类的树木进行了检测实验研究。运用并行电法进行数据采集,利用弧度修正系数对电性参数进行了修正,获得了较为理想的树干电阻率剖面。三种树木电性剖面对比发现,不同材质的树木电阻率值差异明显,且树干断面电阻率分布整体表现为里高外低的特征。电阻率分布特性可为树木健康状况诊断提供相关技术参数。

关键词:直流电 CT 检测技术;电阻率反演;圆柱体结构;弧度修正

中图分类号:S758.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)02-0059-04

Cellular Structure Detection of Tree by Direct Current CT Technology

YU Zhong, ZHANG Ping-song, FU Mao-ru, CHENG Gang

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

Abstract: With direct current CT technology, the detection experiment among different tree species has been carried out for the sake of studying the imaging results of inner structure of tree trunks. Ideal resistivity distribution profiles have been obtained by the process of data collecting with the Network Parallel Galvanic Exploration System initially and curvature correction for modifying electrical parameters then. By contrast, the conclusion can be drawn that there's a large variation range among three kind of trees in resistivity. Besides, the internal electrical distribution of tree trunk is that resistivity of the trunk profile is higher inside, and lower outside respectively. Related technical parameters can be provided by resistivity distribution characteristics for diagnosing health symptoms of trees.

Key words: Direct current CT technology; resistivity inversion; cylindrical structure; curvature correction

近年来,采用物探方法进行林木健康状况检测是一个新的应用方向,其中应力波法^[1]、超声波法^[2-5]、X射线法^[3,5]及振动检测^[6]等方法多被应用,并取得了较好的测试效果。应力波、超声波检测和振动检测方法是利用拾取波穿透林木的初至(即首波到时),解析波场传播速度或频谱特征变化来确定林木内部结构特征;X射线检测法是测试射线穿透介质后场强衰减变化情况,用吸收系数表征,评价木材及木质复合材料的密度、含水率变化以及缺陷等。受树木结构限制,所布设的数据采集观测系统对探测分辨率及成像效果等将带来一定影响。由于树木内部结构差异其电性参数明显,因

此笔者所在的课题组利用直流电法进行了相应的探测试验研究。

直流电法已是较为成熟的探测手段,同时具备数据采集智能程度高以及高精度成像等特点,在工程检测领域应用广泛^[7-9]。利用电法在砍伐后的树干上布置一圈电极监测其内部视电阻率,并采用有限元法进行反演从而获取了树干单个截面的二维电阻率分布图像,得出健康树干截面电阻率分布呈现一系列同心圆形的结构,且从核心部沿径向向外有一个递减趋势。由此可推断出树干截面水分分布与电阻率分布存在着密切的负相关关系^[10-11]。我国相关研究人员利用高密度电阻率成

像法对健康树木进行电阻率变化检测,探讨了树干中水份的运移特性。提出了针对圆柱体的电法探测数据修正方法,以解决圆柱体中电阻率计算问题,并将该方法应用于对树干电阻率的修正^{[12]2}。本文利用并行电法微电极系统进行数据高效采集,对不同树质进行了观测试验,获得了相应的认识。

1 直流电法 CT 检测技术

1.1 树木探查地球物理条件

木材的物理化学结构决定了它几乎不含有导电性良好的自由离子,但在电场作用下有电离现象,通常认为木材微弱的导电性是离子引起的,是与构成木材的聚合物的离子基缔合在一起的离子或是由木材的无机成分中含有的杂质所产生的离子^[13]。健康林木内部正常介质如韧皮部、木质部和髓心之间不同的电性差异为直流电法检测提供良好的测试前提。通过在树干表层布置测试电极,按照一定的数据处理方法,可计算获取树干任一测试截面内部的电阻率分布特征,从而可诊断树木内部结构状况,同时为进一步分析研究圆柱体结构电法 CT 成像精度提供参考。

1.2 并行电法检测原理

1.2.1 测试原理 电场数据观测采用并行电法采集技术,包括 AM 法和 ABM 法两种方式。与传统电法测试相比,并行电法测试技术较为先进,工作效率高,例如:在观测系统内一次布置 N 个电极,对于 AM 法采集时,任一电极供电时,其余 $N-1$ 个电极同时采集电位,其数据采集效率与串行采集相比至少提高了 $N-1$ 倍;而 ABM 法一次采集的数据可进行所有双点电源场的电阻率反演,包括温纳对称四极、温纳偶极、温纳微分装置,而且可进行多种装置电阻率反演。通过 AM 法或 ABM 法装置自动顺次切换电极,可获得大量的电法数据。

并行电法采集数据为测试区域空间电场分布的特征值,含有零次场、一次场和二次场电位值,利用电阻率反演软件可计算测试空间电阻率。由于并行电法数据为同步测试,避免不同时间观测误差干扰问题,使得电阻率反演可达到极小拟合差,从而给出高分辨率电阻率反演电阻率图像。

为方便后续检测效果评价,将树干的形状近似处理为圆柱体。由于电极布置环绕树干表层且位于同一平面,因此通过电极供电,其余测量电极进

行两两电位差测试,可形成电场观测空间,获得大量射线数据(见图1)。

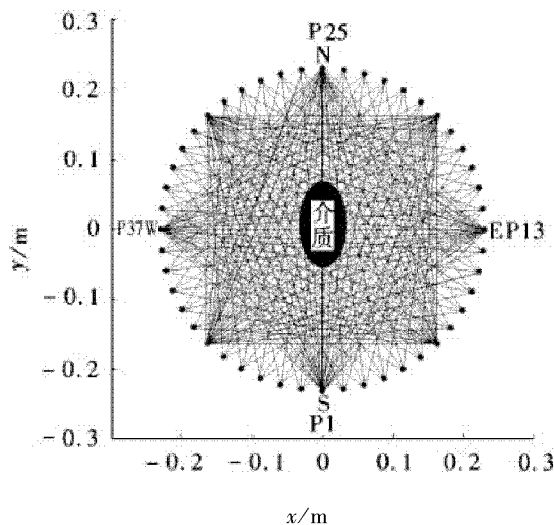


图1 模型试验电位场观测布置图

对于常规的对称四极装置探测而言,当通过供电电极向地下发送电流时,在介质电阻率为 ρ 的均匀半空间建立起稳定的电流场,相邻两测量电极之间的电位差 ΔU 为

$$\Delta U = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right)$$

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

式中: I 为流经两个供电电极的电流; r_{ij} ($i, j=1, 2$) 为第 i 号电极至第 j 号电流电极之间的距离; K 为装置系数。

如果已知装置系数和输入电流,就可以通过测定电势电极间的电压求出介质的电阻率。

1.2.2 观测系统校正 树干探测中观测系统布设为圆形,通过对圆柱体电阻率探测方法进行研究^{[12]3},可得出以下结论:对于类似树干的圆柱体,由于电极所在的面为曲面,电流在空间上的分布与较平面半无限空间发生变化,所以通过式(1)计算出的电阻率不能直接使用。因此,对于测得的每一处的电阻率值,定义弧度修正系数

$$k = \frac{\rho}{\rho_T} \quad (2)$$

式中: ρ 为式(1)计算得出的电阻率; ρ_T 为探测目标的实际电阻率。

通过对圆柱筒溶液电阻率探测试验得出弧度修正系数 k 与测量对象内部的实际电阻率及圆柱体半径无关;同时通过对多次实验数据进行处理建立弧度修正系数函数对应关系为

$$k = -0.0962x^2 + 0.5148x + 0.6796 \quad (3)$$

式中: x 为电极间的弧度; k 为该弧度所对应的弧度修正系数。

根据测量电极所夹的弧度值找到对应的弧度修正系数 k , 然后通过式 (2) 可获得测量对象真实电阻率。

2 探查试验研究

2.1 数据采集

试验选取学校校园内三种不同健康树木进行测试(见表1), 其中泡桐树树龄最小, 其次是梧桐树, 重阳木树龄最大。圆形观测系统均布置在距地面1m左右位置, 形成探测截面。为使探测侵入破损程度降至最低, 电极一律使用大头针或图钉形成微电极系统进行数据采集, 将一定数量的微电极等间距环绕布置在探测截面周围。利用 WBD 型并行电法仪完成 AM 和 ABM 两种供电形式的数据采集(见图2), 获得了相应的测试数据。



图2 梧桐树电法 CT 数据采集测试现

表1 测试数据采集信息统计表

测试树木	截面直径 /cm	测试电极数 /个	电极间弧长 /cm
1 泡桐树	50.16	63	2.5
2 梧桐树	50.96	64	2.5
3 重阳木	61.15	64	3.0

2.2 数据处理与分析

由于 ABM 法具有采集数据量大、数据体类型丰富、成像分辨率高等优点, 试验中以 ABM 采集数据为基础进行成像处理与表达。按照数据采集观测系统的布置, 1 倍电极间距所对应的弧度为 0.099 683, 根据式 (3) 求出该弧度对应弧度修正系数 k 为 0.729 961; 同理, 2 倍电极间距弧度所对应的弧度修正系数为 0.778 41。依此类推, 可获得不同电极间距 20 种不同的测量电极组合方式。对电阻率数据进行解编处理之后, 将处理得到的温纳四极、温纳偶极、温纳微分数据体中的每组探测数据进行弧度修正。同时按 URF 文件格式把电极坐标进行相应归位、修正后的所有探测数据进行重组, 并导入电阻率反演软件 AGI (Earth Imager 2D), 设置反演参数, 开始反演至符合反演迭代条件时, 导出模型电阻率数据。

将泡桐树探测获得截面测试数据进行如上方法处理后, 对层析切片导入等值色标, 即可获得探测截面的电阻率剖面(见图3b), 与未进行弧度修正的电阻率分布(见图3a)对比, 探测数据进行弧度修正后尤为突出断面内部介质电阻率分布异常区域, 易于进行对比与解释。

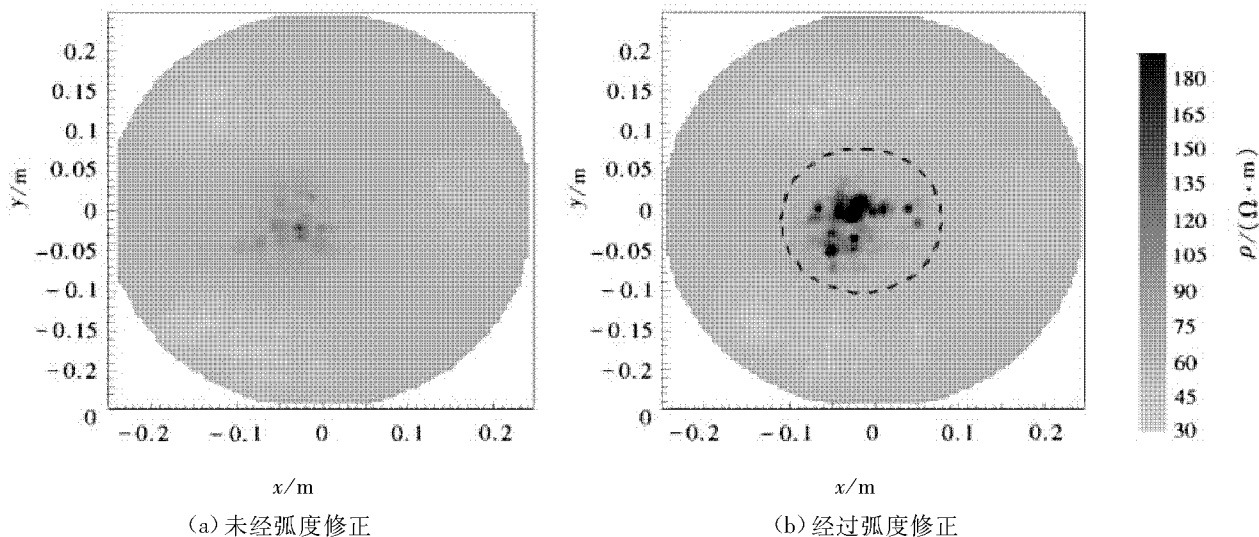


图3 泡桐树内部截面电阻率分布

2.3 探测成像对比与解释

对三种树木探测数据进行相应数据处理后,将

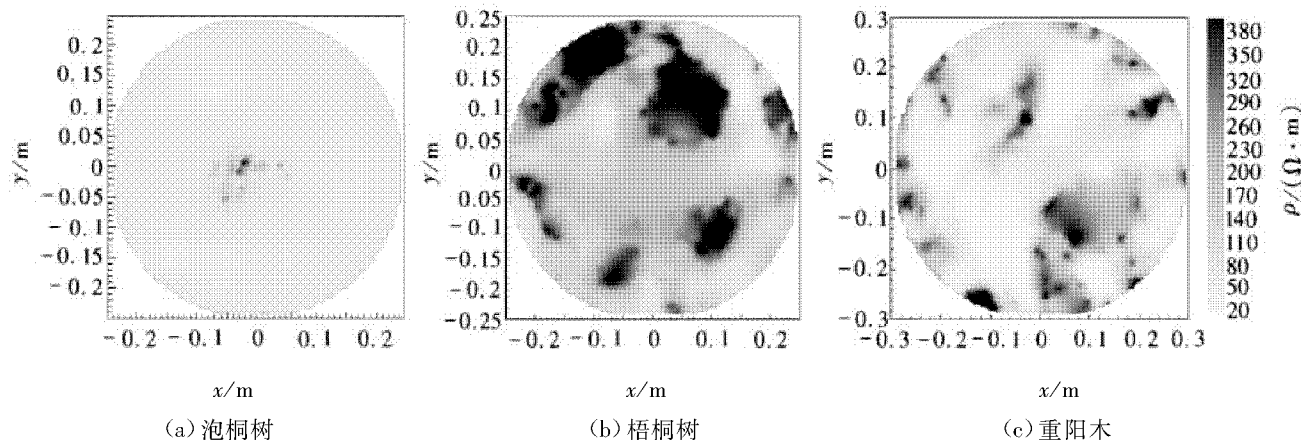


图4 三种树木电法CT成像内部电阻率分布

对比三种树木电性剖面:测试系统一定条件下,不同树木断面中介质电阻率具有明显差别,其中泡桐树内部材质的电阻率主要在 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 左右;梧桐树内部材质平均电阻率在 $100 \sim 300 \Omega \cdot \text{m}$ 之间;而重阳木内部材质电阻率变化范围较大,与重阳木树龄最长,各阶时间段木质部材质不断累积叠加导致电阻率分布复杂的原因有关。因此,在环境温度、土壤酸碱度、树木年龄等相关参数确定的条件下,探测所获得的内部电阻率可为木材含水率的测定提供参考依据。

泡桐树内部材质电阻率分布均匀,且阻值较低,与其树龄较小的因素有关,其中心位置呈现高阻状态,可见其特有的生长特性;梧桐树、重阳木内部材质较泡桐树复杂,其局部存在的高电阻率值区域则反映孔洞和腐朽木质存在的可能。电阻率分布特性可为树木介质健康状况诊断提供相关技术参数。

3 结论

试验结果表明,电法CT探测技术其数据采集量大,易于操作,因此在树木结构及内部健康诊断中具有一定的优势。

针对于圆柱体电法CT成像探测,弧度修正将使探测数据结果更趋于真实值,成像效果中更能凸显高阻材质的分布状态,从而增强了分辨精度。

实验中将探测树木的截面都视为圆形,难以避免树木截面成像中髓心位置的偏移。如何实现针对任意不规则截面的闭合曲线柱体内部结构CT层析,对电极点位置精确测量,实现现场快速精确探测仍需要进一步试验研究。同时,宏观地球物理探测方法所确定的边界条件可否适用于全空间微型化目标体内部探测需要进一步验证分析。

断面层析切片导入统一在 $400 \Omega \cdot \text{m}$ 以内电阻率的等值色标,即可获得三种树探测截面的CT电阻率剖面(见图4)。

参考文献:

- [1] 王欣,申世杰.木材无损检测研究概况与发展趋势[J].北京林业大学学报,2009,31(S1):202-205.
- [2] 戚大伟,牟洪波.人工神经网络在木材缺陷检测中的应用[J].森林工程,2006,22(1):21-23.
- [3] 于雷,戚大伟.计算机断层扫描技术检测木材缺陷的研究[J].森林工程,2006,22(5):13-15.
- [4] 叶云长.计算机层析成像检测[M].北京:机械工业出版社,2006:75-91.
- [5] 段新芳,李玉栋,王平.无损检测技术在木材保护中的应用[J].木材工业,2002(5):14-16.
- [6] 朱晓冬,王逢瑚,曹军,等.基于虚拟仪器的木材振动无损检测系统研究[J].西北林学院学报,2010,25(5):182-186.
- [7] 刘盛东,张平松.分布式并行智能电极电位差信号采集方法:中国,zl200410014020[P].2006-7-20.
- [8] SHIMA H. 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using alpha centers[J]. Geophysics, 1992, 57(10):1270-1281.
- [9] LOKE M H, BARKER R D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44:499-523.
- [10] H AGREY SA. Electrical resistivity imaging of wooden tree trunks[J]. Near Surface Geophysics, 2006, 4:177-185.
- [11] 吴华桥,周启友,刘汉乐,等.电阻率成像法在树干水分吸收过程研究中的应用[J].生态学杂志,2009,28(2):350-356.
- [12] 徐速,周启友,刘汉乐.ERT法在树干水分运移监测中的运用[J].桂林工学院学报,2006,26(3):347-352.
- [13] 杜洪双,李荣,修洪波,等.柞木干燥中电阻率与温度和含水率的关系[J].北华大学学报:自然科学版,2002,3(4):349-350.

(责任编辑:何学华,范君)

潘三新西风井井壁变形安全监测分析

颜 宝, 夏红兵

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了反映井壁的安全状态, 以淮南潘三矿新西风井井壁为研究背景, 通过利用安全监测系统对2011年9月8日-2012年2月15日这段时间内的井壁钢筋混凝土的应力应变进行实测, 得到并记录一系列监测点的数值, 从而绘制出应力应变数值变化曲线, 分析曲线变化趋势以便发现问题及时处理, 以保证井筒的整体安全性。

关键词: 应力; 井壁变形; 监测; 井壁安全

中图分类号: TD265.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0063-04

Safety Monitoring Analysis of Lining Deformation of New Ventilation Shaft in Pansan Coal Mine

YAN Bao, XIA Hong-bing

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

Abstract: In order to study safety status of shaft lining, lining of the new ventilation shaft in Pansan Coal Mine was studied as research background. By use of safety monitoring system, stress and strain in reinforced concrete of shaft lining were measured in the period from September 8, 2011 to February 15, 2012, and series of monitoring point values were obtained, by which a stress-strain curve was drawn out. By analysis of the curve trend, to deal with discovered problems in time, and ensure overall safety of shaft.

Key words: Stress; shaft deformation; monitoring; shaft safety

淮南潘三矿新西风井是根据潘三矿二水平延深及安全改进工程需要而新建的井筒, 位于潘三矿与潘北矿交界的XⅢ~XⅣ勘探线附近, 工厂内原风井已经回填, 新西风井距离原西风井57m, 设计净直径7.0m, 井筒深度653.2m。根据生产需要, 井筒需开凿两个马头门, 其中一水平马头门标高为-513m(累深536.2m); 二水平马头门标高为-623m(累深646.2m), 由于新西风井穿过的冲积层深厚、基岩段预计涌水量大, 为了安全、高效地建设该井筒, 采用“上冻下注”的方法进行施工, 即上部冲积层采用冻结法凿井, 冻结深度508m^[1]; 下部基岩段采用地面直孔预注浆方法进行封水和加固马头门处软弱岩层, 注浆范围为460~710m^[2]。

1 监测方法及位置

1.1 监测方法

对于钢筋混凝土井壁, 可以采用压力传感器直接监测井壁外荷载大小, 通过监测井壁内部钢筋的应力和混凝土的微应变来反映井壁实际受力状况。

监测井壁结构钢筋应力和混凝土应变采取精度高、抗干扰性强、稳定性好的振弦式传感元件作为一次仪表, 振弦式频率仪作为二次仪表。测试元件随工程施工埋入混凝土井壁中, 其中钢筋应力采用振弦式钢筋应力计监测; 混凝土应变采用振弦式混凝土应变计监测, 并利用振温度测试元件监测井

壁混凝土的温度变化埋设的元件(见图 1~图 2)。

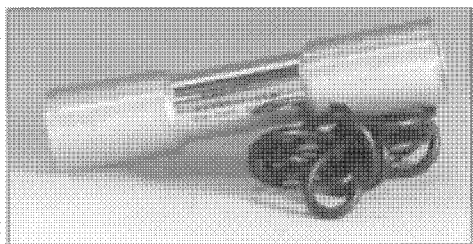


图 1 振弦式钢筋应力计

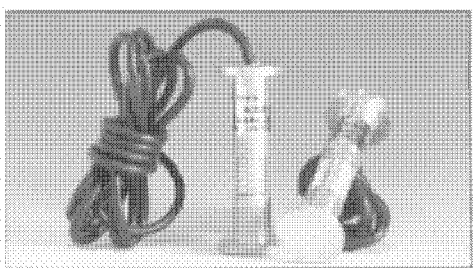


图 2 振弦式混凝土应变计

根据监测内容确定传感器的规格和数量,购买测试元件,并将其在实验室内逐个做好标定、接头防水处理等准备工作;当井筒套壁到指定位置时埋设元件,将元件及其导线通过防水接线盒与集中电缆相联接,通到地面观测站,按时进行观测。对电缆与元件引出线的接头进行严格密封,确保监测元件正常工作。

每个观测水平布置一根多芯铠装屏蔽信号控制电缆,电缆采用钢丝绳、滑子悬吊下放,下放到测试水平后,下端与防水接线盒连接,上端固定在固定盘大梁上。

1.2 监测位置

在潘三新西风井井筒外壁共布置了 2 个测试水平,根据井筒开挖揭露的土层状况,各水平对应的土层和井壁结构如表 1 所示。

表 1 主井信息化施工监测水平一览表

	1	2
井壁类型	内壁	大壁座
累深/m	393	477
岩性	粘土质砂	砂岩
层厚/m	3.1	
环筋直径/mm	28	25
竖筋直径/mm	25	25
混凝土强度	C70	C60
外壁厚度/mm	900	1 750

测试元件的埋设位置如下:

1) 土压力计 6 个。在外层井壁外表面等间距布置 6 个土压力计,以确定冻结压力的大小及不均匀性。

2) 钢筋测力计 18 个。在外层井壁内排钢筋上等间距布置 6 个测试断面,每个测试断面沿环向、竖向和径向各布置一个钢筋测力计。

3) 混凝土应变计 18 个。在外层井壁内缘等间距布置 6 个测试断面,每个测试断面沿环向、竖向和径向各布置一个混凝土应变计。

井壁温度的量测利用振弦式传感器内部附带的测温功能。对于元件设计埋设方案具体情况为:2 个测试水平元件的实际布设严格按设计方案进行;6 个测试断面分别为东北、东、东南、西南、西、西北 6 个方位,每个方位均布置土压力计 1 个、钢筋计 3 个(环向、竖向和径向各 1 个)、混凝土应变计 3 个(环向、竖向和径向各 1 个)(见图 3)。

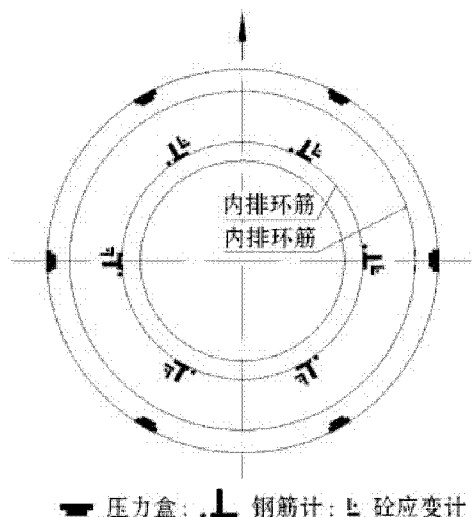


图 3 测试水平元件布置示意图

2 监测结果及分析

经过跟踪监测,从 2011 年 9 月 8 日起,到 2012 年 2 月 15 日截止,第一测试水平观测时间已达 172 天,第二测试水平观测时间已达 160 天,获得实测数据 100 多个,得出一系列点的时间-变形曲线。

2.1 井壁温度

井壁温度在很大程度上影响着井壁和冻结壁的力学特性。井壁混凝土温度变化曲线如图 4~图 5 所示。

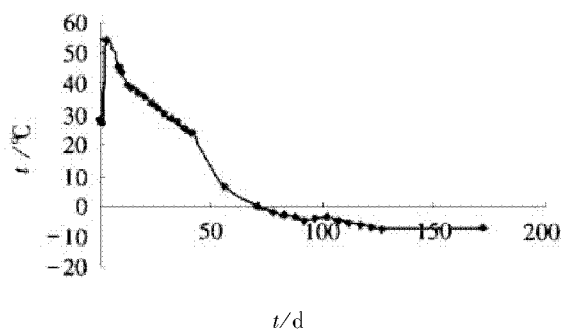


图4 第一水平井壁温度随时间变化曲线

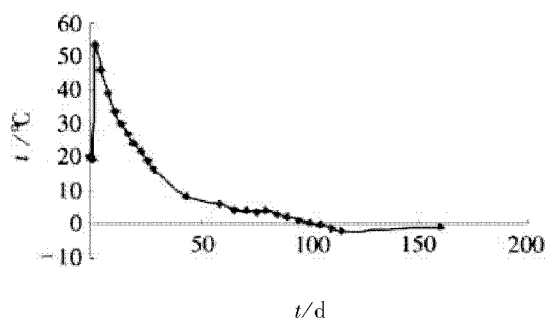


图5 第二水平井壁温度随时间变化曲线

由图4~图5分析可见,由于水泥的水化反应产生很多的热量,当井壁较厚时,混凝土的热量不易释放,因此在混凝土浇注的前几天,井壁内部产生的温度直线上升。此后在冻结壁的影响作用下,温度由此而逐渐下降。在井壁内壁浇筑时期,外壁温度逐渐升高,然后随着井壁内壁逐渐由下向上浇筑,测点位置井壁温度再次下降,后期逐渐趋于稳定。

2.2 井壁竖向钢筋应力

各水平井壁竖向钢筋应力测试结果如图6~图7所示(受拉为正、受压为负)。

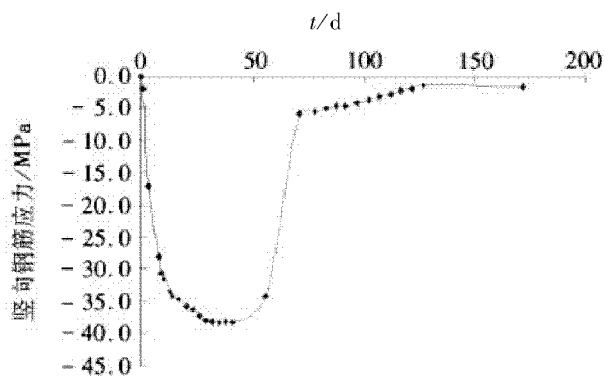


图6 第一水平竖向钢筋应力随时间变化曲线

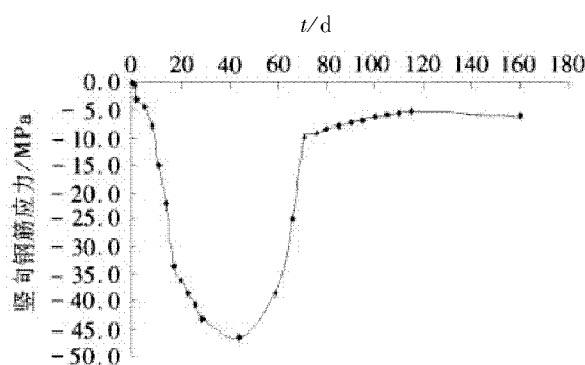


图7 第二水平竖向钢筋应力随时间变化曲线

由图6~图7分析可见,第一水平竖向钢筋应力在井壁浇筑后一个月内压应力迅速增大,在井壁浇筑40天后,钢筋压力开始逐渐减小,直至转为受拉。现阶段竖向钢筋应力最大位于井壁北侧,其拉应力达44.6 MPa,各监测位置平均应力为27.6 MPa,远小于钢筋应力预警值和设计值。

由竖向钢筋应力监测结果并结合井壁混凝土温度变化情况,可知竖向钢筋应力变化过程大致可分为如下3个阶段:

1) 拉应力急剧增长阶段(0~20 h)。在井壁浇筑的初期,随着混凝土水化热的释放,井壁温度急剧升高,随后开始降温,在此阶段竖向钢筋即刻发生收缩变形,进入拉应力状态,且拉应力增长速度较快。

2) 拉应力缓慢增长阶段(21~50 h)。随着时间的不断增长,井壁温度是呈缓慢趋势下降的,而壁后泡沫板逐渐被压实,冻结壁对混凝土产生约束作用,进一步阻碍钢筋混凝土收缩,使得竖向钢筋中依然承受较大的拉应力,并呈缓慢增长趋势。且井壁竖向拉应力大小和冻结壁变形大小有关,当冻结壁变形大,外壁受到的冻结压力增加,井壁收缩受到的约束将变大,钢筋中受到的拉应力随之增加。

3) 套壁期应力变化阶段(51~172 h)。在混凝土的内壁浇筑阶段,外壁的温度呈上升趋势,当套壁到监测水平时,外壁的温度达到最大值。在这个阶段过程中,竖向钢筋产生温度压应力,压应力的叠加使得钢筋拉应力逐渐减小直至达到最小值。随后,随着井壁内壁不断的向上浇筑,测点位置井壁温度则再次下降,使得竖向钢筋拉应力又呈现逐渐增长的趋势。

2.3 井壁混凝土竖向应变

各水平井壁混凝土竖向应变测试结果如图 8 ~ 图 9 所示(受拉为正、受压为负)。

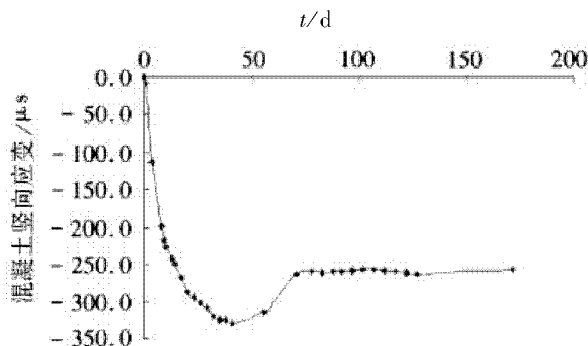


图 8 第一水平混凝土竖向应变随时间变化曲线

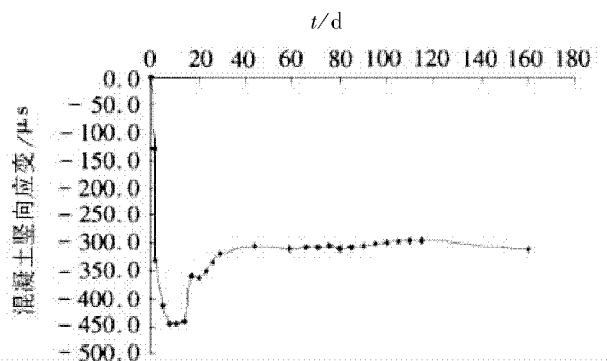


图 9 第二水平混凝土竖向应变随时间变化曲线

初期外壁三个水平混凝土受到的竖向拉应变呈增长趋势,是由于混凝土竖向收缩变形受到冻结壁约束所致,加上自重吊挂作用,从而产生较大的竖向拉应变。混凝土竖向应变和竖向钢筋应力的变化趋势基本一致。对于混凝土试件,通过单轴拉伸试验得到混凝土的极限拉应变为 140μ 左右,而在井壁中,由于约束作用,混凝土的拉应变极限值得到较大提高。如监测过程中第一水平井壁的竖向混凝土应变较大,井壁混凝土只出现了很少的环向裂纹。

目前,根据监测结果分析,第一、二水平的环向及竖向钢筋最大拉应力,环向及竖向钢筋最大拉应变均小于钢筋的设计屈服强度(见表 2)。

表 2 第一、二水平主要监测结果

	环向钢筋应力/MPa		竖向钢筋应力/MPa	
	实测	设计	实测	设计
一	-47.9	± 360	0.5	± 360
二	-33.7	± 360	-27.6	± 360
	混凝土环向应变/ $\mu\epsilon$		混凝土竖向应变/ $\mu\epsilon$	
	实测	设计	实测	设计
一	-377.4	-2 000	-120.9	140
二	-269.6	-2 000	-60.1	140

注:实测值均为平均值。

3 结论

由于在井筒施工期间,冻结井外壁主要承受水平冻结压力,对于水平荷载作用下的井壁结构,其安全性主要参考环向钢筋应力和混凝土环向应变两项。由表 2 可知,在外壁施工期间,第一、二监测水平的环向钢筋应力和混凝土环向应变的实测值均小于设计值,故第一、二监测水平的井壁混凝土结构并未受到损伤,井筒处于安全状态。井壁安全监测系统可以长期有效地监测井壁的应力应变变化情况,得到的监测数据反映井壁的安全状态,因此应坚持长期的监测,发现问题及时处理,以保证井壁的安全。

参考文献:

- [1] 姚直书,程桦,张国勇,等. 特厚冲积层冻结法凿井外壁井壁受力实测研究[J]. 煤炭科学技术,2004,32(6):49-52.
- [2] 张勇. 地面注浆控制井壁破裂变形的机理与工程分析[J]. 矿业安全与环保,2009,36(6):46-49.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

参芪颗粒中黄芪甲苷含量的测定

陈 雷^{1,2}, 黄顿桢¹

(1. 皖南医学院药理教研室, 安徽 芜湖 242002; 2. 淮南职业技术学院药理教研室, 安徽 淮南 232001)

摘 要:目的:建立高效液相色谱-蒸发光散射检测器(HPLC-ELSD)测定黄芪甲苷含量的方法。方法:采用蒸发光散射检测器(ELSD)以黄芪甲苷为对照品对参芪颗粒中黄芪甲苷进行HPLC分析,色谱柱 Agilent C₁₈ (250 mm × 4.6 mm, 5 μm),流动相乙腈-水(32:68),流速0.8 mL/min,柱温30℃,ELSD漂移管温度105℃,载气流速2.5 L/min。结果:黄芪甲苷在30.48 μg/mL ~ 304.8 μg/mL范围内线性关系良好,回收率为97.64%, (RSD=1.11%)。结论:HPLC-ELSD法具有良好的精密度和重现性,可用于参芪颗粒中黄芪甲苷含量测定的质量控制。

关键词:高效液相色谱;蒸发光散射检测器;参芪颗粒;黄芪甲苷

中图分类号:R917 文献标识码:A 文章编号:1672-1098(2012)02-0067-03

Measurement of Astragaloside in Shenqi Granules

CHEN Lei^{1,2}, HUANG Zheng-gui¹

(1. Department of Pharmacology, Wannan Medical College, Wuhu Anhui 241002, China; 2. Department of Pharmacology, Huainan Vocational Technical College, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: The research is to establish the method using the high-performance liquid chromatography-evaporative light scattering detection (HPLC-ELSD) to determine the contents of Astragaloside. ELSD was used to measure the contents of Astragaloside in Shenqi granules on the basis of astragaloside standards for control with HPLC analysis. Other conditions were set as follows: Chromatographic column Agilent C₁₈ (250 mm × 4.6 mm, 5 μm), mobile phase of acetonitrile-water (32:68), flow rate 0.8 in mL/min, column temperature at 30℃, ELSD drift tube temperature at 105℃, flow rate of carrier gas in 2.5 L/min. The Results showed that when astragaloside is between 30.48 μg/mL and 304.8 μg/mL, the linear relationship is fine and the recovery rate is 97.64% (RSD = 1.11%). HPLC-ELSD is precise and reproducible, and can be used to control the quality of the preparation.

Key words: High performance liquid chromatography; evaporative light scattering detector; Shenqi granules; astragaloside

参芪颗粒是以党参、黄芪两味中药材作为原料,经提取其有效成份研制成颗粒剂,具有补益中气的治疗功效,用于气虚体弱,四肢无力。黄芪药材中黄芪甲苷的含量测定常采用薄层扫描法^[1];又由于皂苷类为极性较大、结构复杂的化合物,它只在紫外末端有吸收(200~210 nm),有干扰峰,而文献[2]采用HPLC-蒸发光散射检测仪(ELSD)

法对于黄芪进行质量监控,试验表明方法快捷,无干扰。因此本实验采用ELSD作为检测手段,采用HPLC法测定参芪颗粒中黄芪甲苷的含量,以控制该制剂的质量。

1 材料

仪器:岛津LC-10ATvp高效液相色谱仪,All-

收稿日期:2012-02-14

基金项目:淮南职业技术学院科学研究资助项目(HKJ11-4)

作者简介:陈雷(1983-),男,安徽怀远人,助教,硕士,研究方向:临床药理。

tech-ELSD 蒸发光散射检测仪, 色谱柱 Agilent C₁₈ (250 mm × 4.6 mm, 5 μm)

试剂: 乙腈(色谱纯), 水(重蒸馏水), 其它试剂均为分析纯。

黄芪甲苷对照品(中国药品生物制品检定所, 供含量测定用, 批号: 110753-200212), 参芪颗粒(市售, 陕西春晖药业有限公司, 批号: 070811、070812、070813)

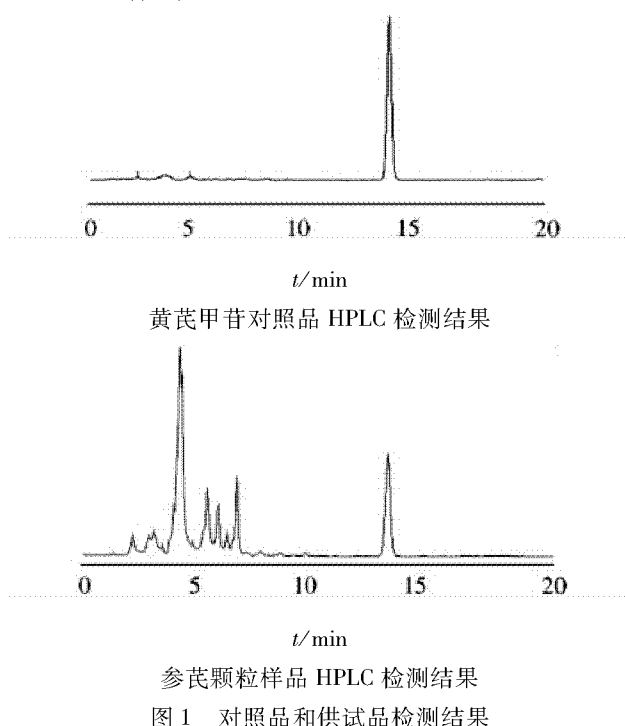
2 方法与结果

2.1 供试品溶液的制备

取本品适量研细, 精密称取 5 g, 加入甲醇 60 mL, 用索氏提取器回流提取 5 h, 甲醇提取液蒸至尽干, 加水 20 mL 微热溶解, 将溶液转移至分液漏斗中, 用水饱和后, 再用正丁醇萃取 3 次, 每次 20 mL, 合并正丁醇萃取液, 以 5% 氢氧化钠溶液洗涤 2 次^[3], 每次 20 mL, 将正丁醇液蒸干, 残渣加甲醇使溶解, 溶液转移至 2 mL 容量瓶中, 加甲醇稀释至刻度, 摇匀, 用 0.45 μm 微孔滤膜滤过, 即得。

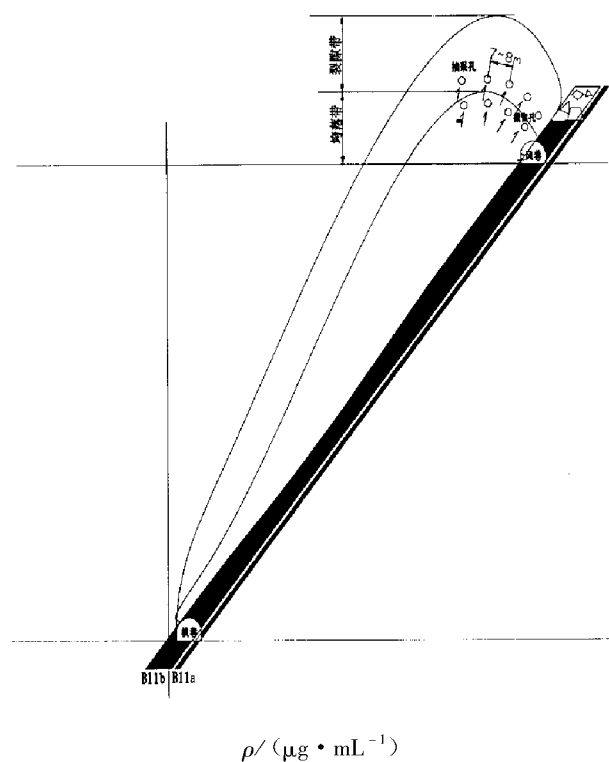
2.2 色谱检测

色谱柱 Agilent C₁₈ (250 mm × 4.6 mm, 5 μm), 流动相乙腈-水(32:68), 流速 0.8 mL/min, 柱温 30 ℃, ELSD 漂移管温度 105 ℃, 载气流速 2.5 L/min, 进样量 20 μL, 理论板数以黄芪甲苷峰计大于 3 000, 色谱图如图 1 所示。



2.3 标准曲线及线性范围

精密称取黄芪甲苷对照品 15 mg, 置 50 mL 容量瓶中, 加甲醇溶解并稀释至刻度, 摇匀, 即得 304.8 μg/mL 的对照品溶液, 分别精密吸取此对照品溶液 1 mL、2 mL、3 mL、5 mL、8 mL、10 mL 置 10 mL 容量瓶中, 加甲醇稀释至刻度, 摇匀, 分别进样 20 μL, 测定峰面积, 以峰面积积分值的自然对数(Y)与对照品浓度(μg/mL)(X)进行线性回归, 得回归方程如图 2 所示。



结果表明: 黄芪甲苷在 30.48 μg/mL ~ 304.8 μg/mL 范围内线性关系良好, 因该曲线不过原点, 样品测定采用外标两点法计算。

2.4 精密度试验

取批号为 070812 的样品, 按供试品溶液制备方法制成供试品溶液, 连续进样 6 次, 每次 20 μL, 测定峰面积, RSD(相对标准偏差)为 0.65%。

2.5 稳定性试验

取三批样品, 按供试品溶液制备方法制成 3 份供试品溶液, 分别在 0 h、4 h、8 h、12 h、24 h 进样, 测定结果表明, 在 24 h 内黄芪甲苷基本稳定。RSD 分别为: 070811 批 1.31%, 070812 批 1.55%,

070813 批 0.96%。

2.6 重复性试验

取 070811 批样品,按供试品溶液制备方法制成 6 份供试品溶液,分别进样,测定黄芪甲苷的峰面积,计算含量, RSD 为 1.25%

2.7 回收率试验

取已知含量同一批样品(070811 批)2.5 g 共 6

表 1 加样回收率试验结果(N=6)

	样品量 /g	样品中黄芪 甲苷量/mg	加入黄芪甲苷 对照品量/mg	测得总量 /mg	回收率 /%	平均回收率 /%	RSD /%
1	2.501 6	0.155 1	0.152 4	0.304 2	97.85	97.64	1.11
2	2.486 5	0.154 2	0.152 4	0.300 8	96.23		
3	2.625 3	0.162 8	0.152 4	0.312 8	98.42		
4	2.476 9	0.153 6	0.152 4	0.304 7	99.16		
5	2.518 3	0.156 1	0.152 4	0.303 5	96.68		
6	2.553 2	0.158 3	0.152 4	0.306 9	97.49		

2.8 样品含量测定

取三批样品,按供试品溶液制备方法制成 3 份供试品溶液,按含量测定方法测定,结果如表 2 所示。

表 2 三批参芪颗粒样品含量测定结果

样品批号	070811	070812	070813
含量 mg/袋(10g)	0.62	0.58	0.55

3 讨论

1) 黄芪中药及其制剂中黄芪甲苷含量测定方法已报道的方法较多,常见的有薄层扫描法、比色法、HPLC 法和 HPLC-ELSD 法。但是在实际工作中发现,用薄层扫描法、比色法测定,受实验条件的影响较大,重现性比较差。由于黄芪含有多种成分,故在进行黄芪复方制剂中黄芪甲苷含量测定时须经多步分离纯化,以排除其它成分的干扰。而且由于黄芪甲苷仅在紫外末端 200.8 nm 波长处有微弱的吸收,响应值很小;用 UCD 检测,操作条件十分严格,而且检测结果受噪音影响的程度很大;且用 HPLC 法低波长紫外检测时,流动相的影响难以消除;而 ELSD 灵敏度较高,检出限可达 10 ng^[5]。因此本试验采用此检测器,可充分排除流动相紫外吸收对含量测定的影响^[6]。本实验采用的 HPLC-

份,分别精密称定,再加入 4.1 项下浓度为 152.4 μg/mL 的对照品溶液各 1 mL,按供试品溶液制备方法制成 6 份供试品溶液,分别进样 20 μL,测定峰面积,计算平均回收率 RSD(见表 1)。

ELSD 法,不受流动相溶剂的干扰,对黄芪甲苷类等具有紫外末端吸收的物质,各项检测数据显示检测效果良好,可以作为该制剂的含量测定方法。

2) 在进行对照品线性关系考察的过程中,如果直接以峰面积对对照品浓度(μg/mL)作图,所得的回归方程 r 值较小,一定浓度范围内的线性关系不理想。如果进行必要的数学转换,即以峰面积的自然对数对对照品浓度(μg/mL)作图,在一定范围内呈现出较好的线性关系。这种现象与参考文献报道的现象相一致^[7-8]。

总之,HPLC-ELSD 法在一定范围内线性关系良好,精密度和重现性佳,具有较高的加样回收率,可用于黄芪复方制剂的质量控制。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京:中国医药科技出版社,2010:283-284.
- [2] 夏英,林新文,王刚. HPLC-ELSD 法测定黄芪、蜜黄芪中得黄芪甲苷含量[J]. 中医药导报,2007,13(9):77-78.
- [3] 孙永慧,李丈春. 高效液相色谱-蒸发光散射法测定十味降糖片中黄芪甲苷的含量[J]. 中国现代实用医学杂志,2005,4(12):25-26.
- [4] 宗鸣,郭靖,王和平. 高效液相-蒸发光散射法测定解毒维康胶囊中黄芪甲苷的含量[J]. 中国实验方

- 剂学杂志,2006,12(5):19-20.
- [5] 吴静. HPLC 法测定罗红霉素片的溶出度[J]. 中国药事,2008,22(1):70-71.
- [6] 国家药典委员会. 中国药典高效液相色谱图集[M]. 北京:人民卫生出版社,2005:511.
- [7] 冯小权一,黄可儿,魏刚,等. 黄芪总皂苷与黄芪甲苷在酸碱中的含量变化分析[J]. 中药新药与临床药理,2010,21(9):533-537.
- [8] 冯埃生,邹汉法,汪海林,等. 影响高效液相色谱/挥发激光散射检测器检测性能基本因素的考察[J]. 药物分析杂志,2006,16(6):414-416.
- (责任编辑:何学华)

健康教育在计划性剖宫产孕产妇家属中的应用

苏琳¹, 田玲²

(1. 蚌埠医学院护理学系, 安徽 蚌埠 233030; 2. 蚌埠市第三人民医院妇产科, 安徽 蚌埠 233000)

摘要:目的: 探讨基于计划性剖宫产临床路径的健康教育方法和效果。方法: 将165名接受计划性剖宫产的孕产妇陪护家属根据孕妇入院时间的不同分为对照组($n=80$)和干预组($n=85$), 分别按常规诊疗护理模式和基于临床路径的程序化健康教育路径表进行健康教育, 比较2组产褥期保健和新生儿保健知识达标率、新生儿护理操作技能达标率、对医疗护理的满意度及住院时间和并发症发生率。结果: 干预组产褥期保健和新生儿保健知识、新生儿护理操作技能各项指标的达标率及对医疗护理的满意度分别91.76%、94.12%、89.41%和96.47%, 优于对照组(80.00%、72.50%、61.25%和75.00%), 2组比较有显著性差异(均 $P<0.05$); 干预组住院时间(9.41 ± 1.21)较对照组(10.03 ± 2.14)短, ($P<0.05$); 干预组无并发症, 明显低于对照组(5%), 差异有统计学意义($P<0.05$)。结论: 利用临床路径对陪护家属实施健康教育, 更有利于产妇和新生儿的康复和护理。

关键词: 临床路径; 计划性剖宫产; 健康教育; 陪护家属

中图分类号: R17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)02-0070-05

Application of Clinical – Pathway – Based Health Education in Family Members of Planned Cesarean Section Women

SU Lin¹, TIAN Ling²

(1. Department of Nursing, Bengbu Medical College, Bengbu Anhui 233030, China; 2. Department of Obstetrics and Gynecology, No. 3 the People's Hospital, Bengbu Anhui 233000, China.)

Abstract: Objective: to evaluate the application effect of health education path in planned cesarean section. Methods: 165 cases of planned cesarean section women and family members were divided into experiment group ($n=85$) and control group ($n=80$) according to hospital admission date and self-prepared clinical health education path and conventional methods were carried out in experiment group and control group respectively. The items including grasp degree of disease-related knowledge, nursing skills, satisfaction degree for hospital nursing service, days of hospitalization and the incidence of complications were used to evaluate the application effect of health education in the planned cesarean section through the comparison with control group. Results: The project compliance rate including puerperium health knowledge, newborn health knowledge, newborn nursing skills and the satisfaction degree for hospital nursing service in experiment group were 91.76%、94.12%、89.41% and 96.47% respectively, which were better than that of control group (80.00%、72.50%、61.25% and 75.00%) ($P<0.05$). Compared with control group, days of hospitalization and the incidence of complications in experiment group (9.41 ± 1.21 days and 0 accident rate) were less than that of control group (10.03 ± 2.14 days and 5% of accident rate) ($P<0.05$). Conclusion: The application of Clinical – Pathway – Based health education in planned cesarean section promotes rehabilitation and nursing of parturients and newborns.

Key words: Clinical pathway; planned cesarean section; health education; member of patient family

临床路径(Clinical pathway)是指医院里一组成员共同针对某一病种的监测、治疗、康复和护理所制定的一个有严格工作顺序、准确时间要求的照护计划,使服务对象获得最佳的医疗护理服务质量^[1]。临床路径极大促进患者及家属积极配合治疗,防止各种并发症的发生,提高患者生活质量^[2]。在很多疾病的治疗中都显示出明显的优势^[3],因此,临床路径在现代医疗中的推广有其现实意义。而在此过程如何实施健康教育,可谓是一项有针对性、具体性、目的性的辅助治疗方法和手段。随着现代产科技术的发展和完善,加上我国特定的社会因素,剖宫产逐年增加,特别是孕妇要求剖宫产的增加,不但使分娩费用大幅度增加,也增加母儿近远期并发症^[4]。由于社会因素剖宫产和“珍贵儿”的出现,孕产妇及陪护家属对相关需求增长,因此,推行相应健康教育势在必行。而我国目前实施的健康教育模式固定,对计划性剖宫产的健康教育多采用常规健康宣教模式,实施过程中存在着诸多问题,如与医生的健康指导相重复,甚至

有出入,致使健康教育流于形式,缺乏针对性,不仅耗费人力和时间,也无法起到健康教育的目的^[5-6]。为了有效利用人力资源,避免健康教育中存在盲目性、重复性、低效性,2011年我科采用临床路径的健康教育模式,取得了一定的效果。

1 资料与方法

1.1 研究对象

1.1.1 一般资料 来源于2011年6~9月蚌埠市第三人民医院妇产科接受计划性剖宫产的孕产妇家属(每例孕产妇选1名家属),计165名。将2011年6~7月入院的孕产妇家属80例设为对照组,2011年8~9月入院的孕产妇家属85例设为干预组,两组孕产妇在年龄、剖宫产指征、文化程度方面比较,差异无统计学意义($P > 0.05$,见表1);将两组陪护家属在年龄、性别、职业、文化程度、与产妇产缘关系及相关知识和技能的掌握情况等方面进行比较,差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$,见表2)。

表1 两组孕产妇一般资料

例数	年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	计划性剖宫产指征						文化程度		
		头盆不称	社会因素	高龄产妇	脐带因素	羊水因素		小学	初中	大专及以上
干预组	85	26.22 \pm 4.21	35	32	6	5	7	2	50	33
对照组	80	26.53 \pm 4.19	31	33	6	5	5	1	47	32

注:干预组与对照组比较, $P > 0.05$

表2 两组陪护家属一般资料

例数(男/女)		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	与产妇的关系			文化程度		
			母女	婆媳	夫妻	小学	初中	大专及以上
干预组	85 (11/74)	49.23 ± 12.18	40	36	9	10	50	25
对照组	80 (9/71)	48.56 ± 9.92	29	39	12	8	45	27

注:干预组与对照组比较, $P > 0.05$

1.1.2 孕产妇纳入和排除标准 纳入标准:①计划性剖宫产实施临床路径者;②均为腰硬联合麻醉;③无输血、术后并发症;④均实行24h母婴同室。排除标准:①经产妇;②产妇职业系医务工作者。

1.1.3 陪护家属纳入和排除标准 纳入标准:①同意参加本研究;②本次入院前未进行过相关知识和技能的培训;③与孕产妇的关系为母女、婆媳、夫妻;④具有书面阅读和沟通能力。排除标

准:①月嫂;②年龄 >75 岁;③体力不支者。

1.2 方法

1.2.1 对照组 按传统的“计划性剖宫产诊疗流程”方式执行,护士按照常规健康宣教进行。

1.2.2 干预组 ①健康教育路径的拟定:科室成立健康教育路径组,参照卫生部计划性剖宫产临床路径,结合我院实际情况及自身经验,同时,评估陪护家属的健康教育需求,结合孕产妇自身状况及陪

护家属的文化程度、年龄、生活背景等制定个性化、程序化健康教育路径表(见表3)。其中包括教育参照时间、教育内容、教育方式、实施的医生和护士、效果评价;②健康教育的实施:实施前,路径组长对所参与的医护人员进行统一的规范化培训;孕妇产入院后,接诊医生根据纳入标准选择入选对象并进行问卷调查,健康路径组结合调查结果制定个体化的健康教育路径表,并将其发放与陪护家属,讲述路径的有关内容和最后要达到的目标,取得家属

的理解与合作。实施中,医护人员依据健康教育表的内容,对陪护家属进行连续、动态、有针对性、规范的健康教育,指导家属参与渐进式模仿操作练习;路径组不断根据孕产妇及陪护家属、医护人员的意见进行修改和完善。实施后,实施者与家属在表格上签名;路径组长评价健康教育效果,对发现的问题及时纠正;产妇出院时,路径组对健康教育表的各项指标进行总体评价,完善健康教育路径表。

表3 健康教育路径表

时间	健康教育内容及方式
住院日	阅读入院介绍、探视和陪护制度;介绍主管医师、责任护士及联系电话;讲解剖宫产前必查项目、配合要点;协同孕妇做相关检查。
手术日	告知术前沐浴、更衣、禁食水,解释备皮、插尿管的目的和配合事项;指导家属对孕妇进行心理调试;嘱家属备齐母婴所需物品;解释术后去枕平卧、腹带和腹部压沙袋的作用,强调保持尿管、输液管的通畅;协助产妇床上翻身;告知术后6小时内禁食水,若产妇口渴,嘱家属喂少量温水;嘱术后6小时后进流食;讲解产后出血观察的重要性,协助产妇更换卫生垫,出血较多时,保留卫生垫,以便评估出血量。
术后第1天	讲解产妇早期排尿的重要性,拔尿管后协助产妇排尿;讲解早期下床的益处,强调安全保护;协助清洗会阴部;讲解母乳喂养的好处、新生儿观察内容;帮助产妇早接触、早开奶、早吸吮;示范哺乳正确姿势,指导第1次母乳喂养。
术后第2天	强调排气后的饮食要求;讲解子宫复旧的意义和表现;家属观摩护士协助产妇第一次下床;协助产妇刷牙、更换汗湿衣服;讲解经皮测胆红素的意义、初乳的益处、按需哺乳的重要性;观摩护士给新生儿进行眼部和口腔护理;告知喂奶前洗手,温开水擦乳头;示范手工挤奶的方法。
术后第3天	讲解均衡营养的重要性,分析产后大量食入高脂、产气饮食的害处;列出预防便秘的措施;挂图示产妇康复体操-腹部运动;讲解筛查先天性甲状腺功能低下症和苯丙酮尿症的意义,嘱家属协助新生儿吃足6次奶后采足跟血;演示新生儿脐带护理,家属观摩护士给新生儿换尿布,指导家属包裹新生儿、更换尿布;讲解新生儿沐浴、抚触、游泳对新生儿生长发育的好处等。
术后第4天	分析母乳不足的原因,讲解排空母乳的重要性;列出乳头凹陷和乳头皲裂的处理方法;挂图示产妇康复体操-臀肌及腰背部肌肉的运动;演示按摩子宫的方法;指导做好产妇的皮肤护理;讲解观察新生儿生理现象和异常情况的方法;家属观摩护士给新生儿沐浴,并讲解注意事项,指导家属给新生儿换尿布。
术后第5天	讲解乳汁淤积、乳房脓肿的害处和处理、恶露三个阶段的性质、量及观察;调查产妇居住的环境,讲解产褥期的环境要求;挂图示产妇康复体操-提肛肌的运动;解释新生儿黄疸的原因、消退时间及处理方法;家属示范给新生儿沐浴,护士给予评价,观摩护士给婴儿抚触。
术后第6~9天	列出产妇情绪的调节的方法;讲解新生儿体温检测的意义,演示身高、头围的测量方法;家属在模拟儿上示范婴儿换尿布、沐浴和抚触,护士指导和纠正;家属对新生儿实施换尿布、沐浴和抚触。
出院日	协助办理出院手续;讲解出院后产妇的运动、饮食要求,计划生育指导;告知产后母婴复诊的时间、目的。

1.3 评价

1.3.1 评价方式 术后第6~7天,路径组成员测试相关技能(新生儿护理操作技能);出院前,路径组长发放问卷调查表,测试相关理论(产褥期保健和新生儿保健知识);出院结账处设立满意度调查

台,孕产妇及家属在无人观察下填写满意度调查表;路径组负责人统计理论和技能成绩,统计孕产妇住院时间和并发症发生率。

1.3.2 评价指标 ①理论评分表,为路径组制定,产褥期保健知识包括10项内容:产后饮食、活动、便秘的预防、皮肤护理、口腔护理、会阴部护理、乳

房护理、母乳喂养、居住环境、情绪的调节;新生儿保健知识内容包括 8 项内容题:体温监测、喂养、新生儿黄疸观察、脐带护理、大小便观察和护理、皮肤护理、眼及口腔护理、免疫(避免不必要的接触)。评分等级有掌握(3 分)、部分掌握(2 分)、未掌握(1 分), <60 分为未达标^[7];②技能评分表,包括奶粉配制、清洗臀部换尿布、洗澡、生长发育测量 4 项操作技能,参照国家育婴师初、中级操作技能考核评分标准^[8],每项分值为 25 分,合计 100 分, <60 分为未达标;③医疗护理满意度调查表,本院制定,满分 100 分,90 分以上为满意;④住院时间和并发症发生率。

1.4 统计学方法

运用 SPSS13.0 对资料进行统计学分析。计量

表 4 两组并发症发生率、健康知识技能达标率及患者满意度的比较

分组	例数	并发症	健康教育知识技能达标率			医疗护理满意度
			产褥保健	新生儿保健	新生儿护理技能	
干预组	85	0 (0.00)	78 (91.76)	80 (94.12)	76 (89.41)	82 (96.47)
对照组	80	4 (5%)	64 (80.00)	618 (72.50)	49 (61.25)	60 (75.00)
χ^2		4.355 6	4.754 9	14.072 4	17.796 8	15.836 7
p		<0.05	<0.05	0.01	<0.01	0.01

3 讨论

随着社会经济和医疗保健工作的进步与发展,母婴保健越来越受到人们的关注,孕产妇及家属不再单纯满足于护理服务,还迫切需要懂得产褥期保健、母乳喂养、婴儿护理等方面的知识和技能,以提高保健水平和育儿能力。健康教育是一项经济、有效的干预措施,基于临床路径制订的健康教育路径表,以住院时间为序,把健康教育的内容细化到孕产妇住院的每一天^[9],这种模式的对象往往是住院患者,忽略了患者家属的健康教育需求。本研究以家庭为中心,以良好医患关系为基础,把陪护家属健康教育纳入路径中,评估其健康教育需求,传授相关理论知识和操作技能。由于陪护家属知晓整个医疗过程及其健康教育内容,使健康教育具有可操作性^[10]。

医生和护士专业化协助和配合,提高了健康教育效果。传统健康教育形式多以护士为主,不规范且随意性大。相比之下,临床医生掌握专业的医疗保健知识,在患者和家属面前有很高的权威性,是

资料用 $\bar{x} \pm S$ 表示,比较采用 T 检验;率的比较采用 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

1) 两组并发症发生率、健康知识技能达标率及患者满意度的比较,对照组发生新生儿高胆红素血症 3 例,脱水热 1 例,干预组未发生 1 例并发症, $P < 0.05$;两组在产褥期保健和新生儿保健知识、新生儿护理操作技能测评及满意度评分方面差异有统计学意义(均 $P < 0.05$,见表 4)。

2) 两组住院时间比较。干预组住院时间 (9.41 ± 1.21) 天,比对照组 (10.03 ± 2.14) 天短, $t = 2.308$,两组比较差异有统计学意义($P < 0.05$)。

开展健康教育的重要力量。基于临床路径的健康教育有严格的时间框架,规定了医生和护士有计划性和预见性的健康教育,克服了传统健康教育的盲从性、随意性和重复性,也克服了护理工作的局限性,从而使患者和陪护家属得到系统、规范和针对性的健康指导,保证了健康教育的效果。程序化的健康教育模式极大地提高整个健康教育过程的透明度,发挥了家属的主观能动性,建立了共同参与型的医患关系^[11],进而提高了医疗效果^[12]。按程序化健康教育表对陪护家属进行相关知识和技能的培训,特别是新生儿保健及新生儿护理技能有序梯度的培训,改变了传统新生儿保暖过度及喂养不合理等现象,使新生儿都得到良好而科学的护理。本研究统计显示:干预组产褥期保健和新生儿保健知识、新生儿护理操作技能三项指标的达标率明显优于对照组,且未发生 1 例并发症,对照组发生新生儿高胆红素血症 3 例,脱水热 1 例。

良好的家庭、社会支持系统能更好地促进患者配合治疗和护理。阴道分娩是一个正常的生理过程,而剖宫产术是一个有损伤的分娩手段,孕妇不

仅要尽快地实现从孕妇到母亲的**家庭角色转变,还要遭受手术的痛苦和损伤,其间家属的有效照顾和心理支持是孕妇强大的精神支柱,对孕妇的康复和角色转变有着重要的作用,对出院后的延续护理也有着不可估量的效果;同时也增强孕产妇对医生、护士的信任度,提升了家属对医疗护理质量的满意度^[13-14]。与对照组比较,干预组陪护家属对医疗护理质量的满意度明显提高。

根据家属对健康教育的需求,制定个体化的健康教育表,将健康教育内容分解到住院的每一天,它规范了医护行为,使医护配合,在规定时间内做什么、怎样做,减少了健康教育的随意性、盲从性,保证了健康教育的连续性、动态性和完整性;而传统健康教育没有一个标准的流程,很多护理人员缺乏健康教育意识,加之施教者水平参差不齐,往往存在健康教育工作形式化,缺乏动态、连续、完整的反馈机制,使陪护家属的教育落不到实处,造成健康教育效果不理想。基于临床路径实施健康教育的施教医生和护士依据路径表的内容及目标要求,对陪护家属进行施教、评价,再施教、再评价,直到达标的过程,这种过程使得健康教育程序化、具体化、目标化,通过监测和反馈使之更加完善和具体^[15-17]。

综上所述,应用临床路径将孕产陪护家属作为特殊群体实施健康教育,不仅提高了陪护家属相关理论和技能水平,同时也增强了孕产妇的自我护理意识,最大限度提高她们的自我护理及对新生儿护理的能力,有效的减轻她们分娩前后的身心压力^[18],防止产后并发症的发生。值得注意的是在应用健康教育路径过程中,应详细记录路径实施过程中变异因素,及时修正和完善路径的内容,提高健康教育效果。

参考文献:

- [1] FINKBEINER BL. Four-handed dentistry: instrument transfer. *J Contemp Dent Pract*. 2001 Feb 5; 2 (1): 57-76.
- [2] HARATI H, HADAEGH F, MOMENAN AA, et al. Reduction in incidence of type 2 diabetes by lifestyle intervention in a middle eastern community [J]. *Am J Prev Med*, 2010, 38 (6): 628-636.
- [3] LESS LA, RAGOOBIRSINGH D, MORRISON EY, et al. A preliminary report on an assessment of a community-based intervention for diabetes control in adults with type 2 diabetes [J]. *Fam Pract*, 2010, 27 (1): 146-152.
- [4] 张为远. 中国剖宫产现状与思考 [J]. *实用妇产科杂志*, 2011, 27 (3): 161-163.
- [5] 华晴岚, 梅柳蓉. 对住院患者实施健康教育的现状与进展 [J]. *上海护理*, 2005, 5 (2): 52-54.
- [6] 黄昊, 孟开. 健康教育对社区高血压患者服药依从性的系统评价 [J]. *中国全科医学杂志*, 2012, 5 (1B): 120-124.
- [7] 陈建英, 梁燕玲, 庞宇容. 临床路径在乳腺癌手术患者健康教育中的应用 [J]. *广东医学院学报*, 2011, 29 (2): 173-175.
- [8] 刘康. 国家职业技能鉴定考试指导手册 [M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2008: 82.
- [9] 戴红芳, 施京华, 苏强. 健康教育路径在择期剖宫产护理质量中的成效 [J]. *护士进修杂志*, 2009, 24 (5): 433-434.
- [10] 孟伟娜, 李丹, 彭丽萍, 等. 慢性阻塞性肺疾病急性加重期患者治疗中实施临床路径的效果 [J]. *中国老年学杂志*, 2012, 32 (4): 807-808.
- [11] SIMMONS D, VOYLE J, RUSH E, et al. The New Zealand experience in peer support interventions among people with diabetes [J]. *Fam Pract*, 2010, 27 (1): 153-161.
- [12] NETTLES A, BELTON A. An overview of training curricula for diabetes peer educators [J]. *Fam Pract*, 2010, 27 (1): 133-139.
- [13] 陆彩萍, 奚庆红, 曹丽, 等. 健康教育路径对胆囊切除术患者出院后自我护理的影响 [J]. *上海护理*, 2010, 10 (1): 18-20.
- [14] DENNIS CL. Preventing postpartum depression part II: A critical review of nonbiological interventions. *Can J Psychiatry*, 2004 Aug, 49 (8): 526-38.
- [15] 郑淞元, 方艳春, 段功香. 健康教育路径在产科的应用 [J]. *南华大学学报: 医学版*, 2010, 8 (1): 144-146.
- [16] 董凤齐, 白燕. 健康教育路径在结直肠癌肿瘤患者围手术期的应用 [J]. *天津护理*, 2010, 18 (1): 29-30.
- [17] 健康教育路径对乳腺癌患者术后患肢功能康复的影响 [J]. *中国全科医学*, 2008, 11 (11A): 1 971-1 974.
- [18] 闫华, 贺爱勤, 李爱荣. 临床护理路径在产科健康教育中的应用 [J]. *蚌埠医学院学报*, 2011, 36 (7): 781-782.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)