

基于最小 Wilcoxon 学习方法的 Hammerstein 模型辨识

张翠梅

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:提出一种基于最小 Wilcoxon 学习方法的非线性动态系统建模方法。用非线性静态子环节和线性动态子环节串联——Hammerstein 模型来描述非线性动态系统。然后,将 Hammerstein 模型的非线性传递函数转换为等价的线性形式,从而建立起线性中间模型。再由最小 Wilcoxon 学习方法辨识出中间模型参数。最后,通过中间模型参数与 Hammerstein 模型参数之间的关系,推出原系统的非线性静态环节和线性动态环节的参数,从而实现原非线性动态系统建模。在系统仿真响应信号有扰动时,该方法比用最小二乘法辨识中间模型表现出更强的鲁棒性。

关键词:非线性动态系统; Hammerstein 模型; 最小 Wilcoxon 学习方法 (LW)

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)03-0001-06

Identification of Hammerstein Model based on Least Wilcoxon Learning Method

ZHANG Cui - mei

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

Abstract: A modeling method for nonlinear dynamic system based on Least Wilcoxon learning method (LW) was proposed. The nonlinear dynamic system is described by Hammerstein model expressed by a nonlinear static subunit followed by a linear dynamic subunit. Through the function expansion, the nonlinear transfer function of Hammerstein model is converted to the equivalent linear form to generate the intermediate linear model. By LW method, coefficients of the intermediate model are obtained. According to the relations between coefficients of intermediate model and that of Hammerstein model, parameters of the nonlinear static subunit and linear dynamic subunit are derived. The original nonlinear dynamic system is modeled. The proposed method has better robustness than least square (LS) method to identify the intermediate model, when there exists disturbance in output signal of the system.

Key words: nonlinear dynamic system; Hammerstein model; least Wilcoxon learning method

辨识是建模的一种重要手段。对于线性系统的辨识,研究理论已趋于成熟。然而,在现实生活中,实际系统常表现出不同程度的非线性,只有当对象只存在弱非线性时,才可将对象看成线性模型处

理^[1]。当对象具有强非线性时,用常规的基于线性模型进行控制往往会带来很大的误差。所以对非线性系统的研究十分必要^[2]。而非线性动态系统辨识是目前控制领域中的一个难点和热点问题。

收稿日期:2012-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61073102)

作者简介:张翠梅, (1979-), 女, 山东泰安人, 讲师, 硕士, 从事微分方程与定性理论研究。

通常,非线性系统辨识问题由建立一个合适参数化的非线性辨识模型,以及通过最优化未知系统辨识与模型输出之间误差的性能函数来调整模型的参数两部分组成。

因为人工神经网络具有丰富的非线性背景、逼近任意复杂非线性函数的能力、自适应学习的能力及并行处理信息的方式,所以以神经网络为代表的智能非线性系统辨识^[3-6]已成为目前该领域研究的重要方向之一。文献[7]将支持向量机算法引入非线性动态系统建模领域,先采用 Hammerstein 模型对非线性系统进行描述并通过函数展开,将 Hammerstein 非线性模型变换成中间模型,再利用支持向量机线性算法对中间参数向量进行估计,最后建立该参数向量与实际 Hammerstein 模型参数之间的变换关系,实现非线性动态系统的 Hammerstein 建模。文献[8]采用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法辨识中间模型。文献[9]采用最小二乘法(LS)辨识中间模型,但是最小二乘法对例外点非常敏感^[10-13],从而无法找到合适的回归模型参数。文献[10]⁶²⁵中提出基于 Wilcoxon 范数(W-范数)的最小 Wilcoxon 学习方法,并指出该方法对例外点鲁棒。

本文采用最小 Wilcoxon 学习方法辨识中间模型,提出一种基于最小 Wilcoxon 学习方法的非线性动态系统建模方法。用非线性静态子环节和线性动态子环节串联——Hammerstein 模型来描述非线性动态系统。然后,将 Hammerstein 模型的非线性传递函数转换为等价的线性形式,从而建立起线性中间模型。再由最小 Wilcoxon 学习方法辨识出中间模型参数。最后,通过中间模型参数与 Hammerstein 模型参数之间的关系,推出原系统的非线性静态环节和线性动态环节的参数,从而实现原非线性动态系统建模。在系统仿真响应信号有扰动时,该方法比用最小二乘法辨识中间模型表现出更强的鲁棒性。仿真结果表明,所提方法是有效的和可行的。

1 Hammerstein 模型辨识

由于 Hammerstein 模型的结构简单,并且能够有效地描述常见的非线性动态系统特性,所以对该模型的辨识长期引起普遍关注。该模型是一种参数模型,这种模型把一个非线性系统看作是一个非线性静态增益和一个线性动态系统两部分的串联组合,其结构如图 1 所示。

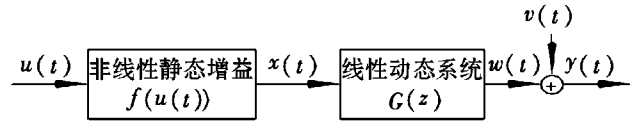


图 1 Hammerstein 非线性动态模型

图 1 中的 $u(t)$, $y(t)$ 和 $v(t)$ 分别是测试输入,系统输出和噪声; $x(t)$ 是中间输入信号,实际过程中是不可测量的。

非线性静态增益可以利用阶次为 p 的多项式近似表达为

$$x(t) = f(u(t)) = c_1 u(t) + c_2 u^2(t) + \cdots + c_p u^p(t) = \sum_{i=1}^p c_i u^i(t) = \mathbf{C}^T \mathbf{U}(t) \quad (1)$$

线性动态系统用传递函数的形式表达

$$G(z) = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n}} \quad (2)$$

式中: m, n 为多项式的阶数,并且一般 $m \leq n$ 。

式(2)的线性传递函数用差分方程描述为

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})x(t) + e(t) \quad (3)$$

式中: $e(t) = A(z^{-1})v(t)$ 可解释为随机拟合误差。

将式(1)代入式(3)得

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1}) \sum_{i=1}^p c_i u^i(t) + e(t) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^p \beta_{ij} z^{-j} u^i(t) + e(t) \quad (4)$$

式中: $\beta_{ij} = c_i b_j, i = 1, 2, \dots, p, j = 0, 1, 2, \dots, m$ 。

从式(4)得到

$$y(t) = - \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^p \beta_{ij} u^i(t-j) + e(t) \quad (5)$$

而式(5)表达为向量形式:

$$y(t) = \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\varphi}(t) + e(t) \quad (6)$$

其中

$$\boldsymbol{\varphi}(t) = [y(t-1), \dots, y(t-n), u(t), u(t-1), \dots, u(t-m), u^2(t), u^2(t-1), u^2(t-m), u^p(t), \dots, u^p(t-m)]^T$$

$$\boldsymbol{\omega} = [-a_1, \dots, -a_n, \beta_{10}, \dots, \beta_{1m}, \beta_{20}, \dots, \beta_{2m}, \dots, \beta_{p0}, \dots, \beta_{pm}]^T。$$

由式(6)可以看出, Hammerstein 模型经过函

数的展开后,已经变换为类似典型的线性模型形式,唯一的差别是模型的输入不是 $u(t)$,而是 $u(t)$ 的各次幂的线性组合,所以该文称其为中间模型, ω 为中间模型的参数向量。

2 最小 Wilcoxon 学习方法

文献[10]⁶²⁵中首次提出 Wilcoxon 范数(W-范数)的概念,并基于此提出对例外点不敏感的 LW 学习方法。W-范数的定义需要一个单调递增的记号(score)函数 $\varphi(u): [0,1] \rightarrow R$,且满足 $\int_0^1 \varphi^2(u) du < \infty$ 。通常,该记号函数被标准化为 $\int_0^1 \varphi(u) du = 0, \int_0^1 \varphi^2(u) du = 1$ 。

向量 $v: = [v_1 \cdots v_l]^T \in R^l$ 的 W-范数定义如下:

$$\|v\|_w := \sum_{i=1}^l a(R(v_i)) v_i = \sum_{i=1}^l a(i) v_{(i)} \quad (7)$$

其中 $R(v_i)$ 表示分量 v_i 在各分量 v_1, \dots, v_l 中的顺序号, $v_{(1)} \leq \dots \leq v_{(l)}$ 是对各分量 v_1, \dots, v_l 的从小到大排序。通过记号函数,可定义记号的联合函数 $a(i) = \varphi(\frac{i}{l+1}), i \in l$,其中 l 为固定的正整数。称式(7)为向量 v 的 W-范数,可以证明它是一种伪-范数(pseudo-norm)。文献[10]⁵⁵⁶给出了几种常用的记号函数,本文采用最常用的线性记号函数 $\varphi(u) = \sqrt{12}(u - 0.5)$ 。

考虑线性回归问题 $y_i = \omega x_i + b_i, i = 1, 2, \dots, M$,其中 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, M$ 为观测点。令 $X = [x_1, \dots, x_M]^T, Y = [y_1, \dots, y_M]^T, b = (b_1, b_2, \dots, b_M)^T$,回归问题可以写成矩阵形式 $Y = \omega X + b$ 。LS 法是最小化残差 $Y - X\omega$ 的 2-范数求得 ω ,即

$$\omega_{LS} = \text{Arg min} \|Y - X\omega\|_2^2 \quad (8)$$

式(8)对 ω 微分得估计方程为

$$\sum_{i=1}^M (y_i - x_i \omega) x_i = 0 \quad (9)$$

$$\text{而 } b_{LS} = M^{-1} \sum_{i=1}^M (y_i - x_i \omega) = \bar{Y}。$$

类比 LS 法,LW 法是最小化残差 $Y - X\omega$ 的 W-范数求得 ω ,如下式所示。

$$\omega_w = \text{Arg min} \|Y - X\omega\|_w \quad (10)$$

式(10)对 ω 求导得估计方程为

$$\sum_{i=1}^M a(R(y_i - x_i \omega)) x_i = 0 \quad (11)$$

不难发现,由式(11)直接求出 ω 有困难,可以采用梯度下降法求每次更新的 ω ,其计算的方式为 $\omega_{k+1} = \omega_k + \eta \sum_{i=1}^M a(R(y_i - x_i \omega)) x_i$,其中 η 为学习率因子。

采用残差的中位数求截距 $b_w = \text{med}_{1 \leq i \leq M} \{y_i - x_i \omega_w\}$,令集合 $P = \{p \mid p = (p(1), \dots, p(M))\}$,其中 $p = (p(1), \dots, p(M))$ 是序列 $1, 2, \dots, M$ 的任一排序。由文献[14]可得, $\|Y - X\omega\|_w = \max_{p \in P} \sum_{i=1}^M a(i) (Y_{p(i)} - X_{p(i)} \omega)$ 。因此 $\min_{\omega} \|Y - X\omega\|_w = \min_{\omega} \max_{p \in P} \sum_{i=1}^M a(i) (Y_{p(i)} - X_{p(i)} \omega)$ 。

3 Wilcoxon 学习方法的模型辨识

本文采用最小 Wilcoxon 学习方法求解中间模型式(6)的参数向量 ω ,实现对相关参数 $-a_1, \dots, -a_n; \beta_{10}, \dots, \beta_{1m}, \beta_{20}, \dots, \beta_{2m}, \dots, \beta_{p0}, \dots, \beta_{pm}$ 的估计。下面通过这些中间参量来获得 Hammerstein 模型参数向量,实现模型辨识。

为使问题简化,将 Hammerstein 模型的线性动态子系统的终态增益设为 1,则有

$$G(\infty) = \frac{b_0 + b_1 + \dots + b_m}{1 + a_1 + \dots + a_n} = 1 \quad (12)$$

从而,式(12)表达为矩阵形式

$$\Psi^T B = \Psi^T A \quad (13)$$

式中: $\Psi = [1, 1, \dots, 1]^T; A = [1, a_1, a_2, \dots, a_n]^T; B = [b_0, b_1, \dots, b_m]^T$ 。

由定义 $\beta_{ij} = c_i b_j$ 可得如下矩阵关系:

$$\Phi = CB^T \quad (14)$$

$$\text{式中: } C = [c_1, \dots, c_p]^T, \Phi = \begin{bmatrix} \beta_{10} & \beta_{11} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{20} & \beta_{21} & \dots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{p0} & \beta_{p1} & \dots & \beta_{pn} \end{bmatrix}$$

式(14)两端同时右乘 Ψ 得

$$\Phi \Psi = CB^T \Psi \quad (15)$$

从而,由式(15), $CB^T \Psi = C \Psi^T B$ 和式(13)可以得到非线性静态环节参数向量 C 为

$$C = \frac{\Phi \Psi}{B^T \Psi} = \frac{\Phi \Psi}{\Psi^T B} = \frac{\Phi \Psi}{\Psi^T A} \quad (16)$$

同理可得到线性动态环节参数向量 B 为

$$B = \frac{\Phi^T \Psi}{\Psi^T C} \quad (17)$$

综上所述,首先按照中间线性模型的形式组织训练样本集 $\{y(t), \varphi(t)\}$, 利用最小 Wilcoxon 学习方法获得中间模型的参数向量 ω , 实现对矩阵 Φ, A 的估计。再由转换关系式(16)和式(17), 实现 Hammerstein 系统的非线性静态增益和线性动态环节的同时辨识, 即就是达到了对非线性动态系统的建模。

4 仿真实验

用仿真实验来验证建模方法的有效性, 设仿真所用非线性动态系统 Hammerstein 模型的静态非线性增益为

$$x(t) = f(u(t)) = 0.9u(t) + 0.4u^2(t)$$

线性动态环节的传递函数为

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.14 + 0.11z^{-1} + 0.03z^{-2} + 0.02z^{-3}}{1 - 1.1z^{-1} - 0.25z^{-2} + 0.65z^{-3}}$$

仿真时, 数据长度为 100, 系统输入 $u(t)$ 采用零均值, 单位方差的不相关可测随机序列。为评价预测模型的性能, 采用均方根误差 RMSE $= \left(\sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_i - \hat{y}_i)^2} \right)$ 对模型的预测准确性和跟踪趋势的能力进行分析, 其中 y_i 为实际数据向量中的第 i 个数据, \hat{y}_i 为预测所得数据向量中的第 i 个数据。采用最小二乘法和最小 Wilcoxon 学习方法得到中间模型参数向量 ω 及 RMSE (见表 1), 表 1 ~ 表 6 中的结果均是 5 次仿真结果的平均值。

表 1 无干扰时中间模型参数向量

| 方法 | 中间模型参数向量 ω | | | | RMSE |
|----|-------------------|---------|----------|---------|-----------------------|
| LS | 1.159 9 | 0.139 4 | -0.589 1 | 0.123 7 | 8.59×10^{-4} |
| | 0.092 3 | 0.029 3 | 0.015 9 | 0.054 4 | |
| | 0.040 7 | 0.013 3 | 0.008 | | |
| LW | 1.120 6 | 0.213 2 | -0.630 1 | 0.126 | 8.91×10^{-4} |
| | 0.096 7 | 0.027 8 | 0.017 6 | 0.056 | |
| | 0.042 8 | 0.011 2 | 0.007 8 | | |

由此可构成参数矩阵 Φ, A 分别为

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 0.1237 & 0.0923 & 0.0293 & 0.0159 \\ 0.0544 & 0.0407 & 0.0133 & 0.0080 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = [1 \quad -1.1599 \quad -0.1394 \quad 0.5891]^T$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 0.1260 & 0.0967 & 0.0278 & 0.0176 \\ 0.0560 & 0.0428 & 0.0112 & 0.0078 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = [1 \quad -1.1206 \quad -0.2132 \quad 0.6301]^T$$

依据式(16)和式(17)可以得非线性静态增益的参数向量 C 和线性动态环节的参数向量 B (见表 2)。

表 2 无干扰时非线性静态增益和线性动态环节的参数向量

| 方法 | C | B |
|----|---------------------------|--------------------------|
| LS | $[0.9013 \quad 0.4017]^T$ | $[0.1367 \quad 0.1021$ |
| | | $0.0327 \quad 0.0183]^T$ |
| LW | $[0.9048 \quad 0.3976]^T$ | $[0.1397 \quad 0.1071$ |
| | | $0.0299 \quad 0.0195]^T$ |

同时为了检验本文方法辨识结果的鲁棒性, 在系统仿真响应信号上进行了叠加。

1) 均值为 0, 方差为 0.02 的高斯噪声, 即 $e(t) \sim N(0, 0.02)$ 。中间模型参数向量 ω 及 RMSE (见表 3)。

表 3 含噪声时中间模型参数向量

| 方法 | 中间模型参数向量 ω | | | | RMSE |
|----|-------------------|---------|----------|---------|---------|
| LS | 1.127 8 | 0.144 4 | -0.574 1 | 0.126 1 | 0.038 6 |
| | 0.101 | 0.043 | 0.042 4 | 0.060 3 | |
| | 0.044 7 | 0.008 6 | 0.017 4 | | |
| LW | 1.038 5 | 0.344 1 | -0.693 6 | 0.123 5 | 0.017 |
| | 0.106 2 | 0.032 1 | 0.026 5 | 0.054 1 | |
| | 0.051 7 | 0.013 8 | 0.008 7 | | |

依据式(16)和式(17)可以得非线性静态增益的参数向量 C 和线性动态环节的参数向量 B (见表 4), 含噪声的非线性动态系统的仿真响应与两种方法的辨识结果的对比如图 2 ~ 图 3 所示。

表 4 含噪声时非线性静态增益和线性动态环节的参数向量

| 方法 | C | B |
|----|---------------------------|--------------------------|
| LS | $[1.0351 \quad 0.4339]^T$ | $[0.1269 \quad 0.0992$ |
| | | $0.0351 \quad 0.0407]^T$ |
| LW | $[0.9270 \quad 0.4125]^T$ | $[0.1326 \quad 0.1179$ |
| | | $0.0343 \quad 0.0263]^T$ |

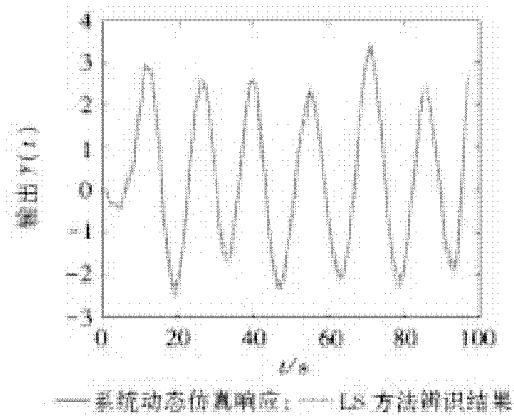


图 2 LS 方法辨识结果

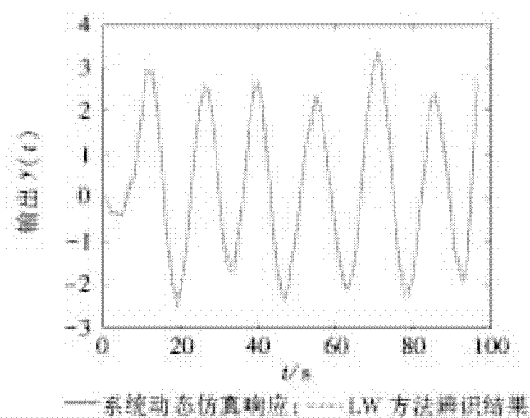


图 3 LW 方法辨识结果

2) 10% 的非线性动态系统的仿真响应加上区间 $[-1, 1]$ 的均匀分布产生的随机数。得到的中间模型参数向量 ω 及 RMSE 如表 5 所示。

表 5 含 10% 例外点时中间模型参数向量

| 方法 | 中间模型参数向量 ω | | | | RMSE |
|----|-------------------|---------|----------|---------|---------|
| LS | 1.035 1 | 0.262 6 | -0.612 1 | 0.109 9 | 0.074 1 |
| | 0.090 8 | 0.066 5 | 0.030 2 | 0.059 | |
| | 0.049 5 | 0.008 9 | 0.014 5 | | |
| LW | 1.025 3 | 0.380 8 | -0.719 3 | 0.126 | 0.004 5 |
| | 0.107 8 | 0.029 4 | 0.019 8 | 0.056 5 | |
| | 0.047 8 | 0.012 | 0.008 2 | | |

依据式 (16) 和式 (17) 得非线性静态增益的参数向量 C 和线性动态环节的参数向量 B (见表 6), 含 10% 例外点的非线性动态系统的仿真响应与两种方法的辨识结果的对比如图 4 ~ 图 5 所示。

表 6 含 10% 例外点时非线性静态增益和线性动态环节的参数向量

| 方法 | C | B |
|----|---------------------------|--------------------------|
| LS | $[0.9459 \quad 0.4195]^T$ | $[0.1237 \quad 0.1027$ |
| | | $0.0552 \quad 0.0327]^T$ |
| LW | $[0.9036 \quad 0.3975]^T$ | $[0.1403 \quad 0.1196$ |
| | | $0.0318 \quad 0.0215]^T$ |

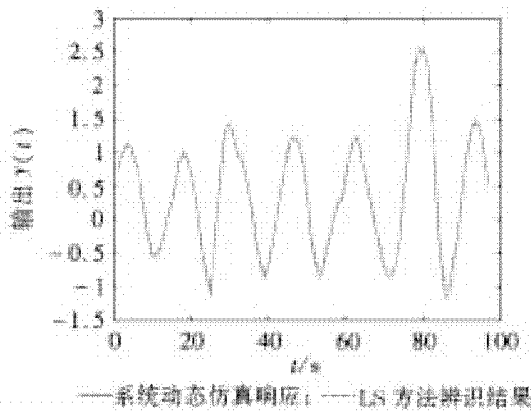


图 4 LS 方法辨识结果

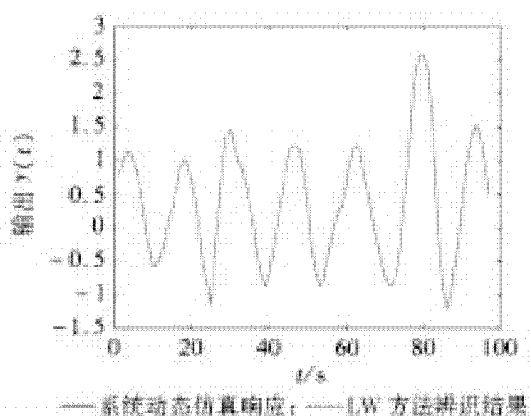


图 5 LW 方法辨识结果

从仿真结果可以得出：

- 1) 在没有噪声的情况下, 两种方法的辨识方法的均方根误差令人满意, 均取得较好效果。
- 2) 在有噪声的情况下, 两种方法的辨识模型输出曲线与非线性动态响应曲线几乎重合, 均方根误差相当, 但均比无噪声时降低两个数量级。
- 3) 在非线性动态系统的仿真响应上出现例外点时, 最小二乘法辨识模型对例外点非常敏感, 均方根误差较大, 而最小 Wilcoxon 学习方法辨识模型对例外点相对鲁棒, 辨识模型输出曲线与非线性动态响应曲线几乎重合, 该辨识算法取得较好结果。

5 结语

本文提出了基于最小 Wilcoxon 学习方法的 Hammerstein 模型辨识。该方法先假设原非线性动态系统可以用 Hammerstein 模型来表示,再将其展开为一种类似线性的形式,然后利用最小 Wilcoxon 学习方法求取中间模型参数,最后建立中间模型与 Hammerstein 模型参数之间的关系来实现非线性动态系统建模。仿真结果显示出了文中方法是有效的。而且在系统仿真响应信号有扰动时,该方法比用最小二乘法辨识中间模型表现出更强的鲁棒性。所以本文为非线性动态系统建模提供了一种新型方法。

参考文献:

- [1] 李言俊. 系统辨识理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 16 - 82.
- [2] SJOBERG J, ZHANG Q H, LJUNG L, et al. Nonlinear black - box modeling in system identification a unified overview [J]. Automatica, 1995, 31 (12): 1 691 - 1 724.
- [3] NARENDRA K S, PARTHASARATHY K. Identification and control of dynamical systems using neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1990, 1 (1): 4 - 27.
- [4] WANG G J, CHENG C C. A fast multilayer neural network training algorithm based on the layer - by - layer optimizing procedures [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1996, 7 (4): 768 - 775.
- [5] ROY A, GOVIL S, MIRANDA R. A neural network learning theory and a polynomial time RBF algorithm [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1997, 8 (6): 1 301 - 1 313.
- [6] 漆为民, 程远楚, 姬巧岭, 等. PID 型 Elman 网络及在动态系统辨识中的应用研究 [J]. 控制与决策, 2005, 20 (10): 1 117 - 1 120.
- [7] 吴德会. 基于 SVR 的非线性动态系统建模方法研究 [J]. 计算机应用, 2007, 27 (9): 2 253 - 2 255.
- [8] 王峰, 邢科义, 徐小平. 非线性动态系统建模方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (10): 7 - 10.
- [9] KE - JUN XU, LIN JIA. One - stage identification algorithm and two - step compensation method of Hammerstein model with application to wrist force sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73 (4): 1 949 - 1 955.
- [10] R V HOGG, J W MCKEAN, A T CRAIG. Introduction to Mathematical Statistics [M]. 6th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall, 2005: 624 - 626.
- [11] C C CHUANG, S F SU, S S CHEN. Robust TSK fuzzy modeling for function approximation with outliers [J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 2001, 9 (6): 810 - 821.
- [12] BABITA MAJHI, G PANDA, B MULGREW. Robust Identification and Prediction Using Wilcoxon Norm and Particle Swarm Optimization [C]// The 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Scotland, August 24 - 28, 2009: 1 695 - 1 699.
- [13] JACEK M, LESKI. TSK - Fuzzy modeling based on ε - insensitive learning [J]. IEEE Trans. Fuzzy Systems, 2005, 13 (2): 181 - 193.
- [14] HARDY G H, LITTLEWOOD J E, POLYA G. Inequalities (2nd ed.) [M]. Cambridge Univ. Press, 1952: 261 - 264.

(责任编辑: 何学华)

紫外光-纳米 TiO_2 催化絮凝净化高浓度有机废水

陈明功¹,倪源满¹,颜凌燕¹,万亚丽¹,范旭¹,侯贵华²

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

摘要:高浓度有机废水传统处理方法是先用大量清水稀释再生化降解,处理流程较长,消耗水资源。以含高浓度苯甲酸有机废水为实验对象,研究了光照时间、絮凝剂用量、废水初始 pH 值、双氧水投加量、曝入空气量、 TiO_2 用量等因素对 COD 脱除率的影响规律。实验发现最佳工艺条件为光照时间 8 h、絮凝剂用量 2% (g/g)、废水初始 pH 值为 8、 H_2O_2 投加量 2.5% (mL/mL)、曝入空气量 2 L/min、 TiO_2 用量 3% (mL/mL),COD 最大降解率达到 69.76%,该研究为高浓度有机废水净化治理提供了理论依据。

关键词:纳米 TiO_2 ;紫外光;絮凝剂;高浓度有机废水

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)03-0007-04

Treatment of High Concentration Organic Wastewater by Flocculation under Catalysis with Ultraviolet and Nano-Titanium Dioxide

CHEN Ming-gong¹, NI Yuan-man¹, YAN Ling-yan¹, WAN Yali¹
FAN Xu¹, HOU Gui-hua²

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

Abstract: In traditional method of treatment, high concentration organic wastewater (HCOW) is diluted by plenty of fresh water firstly and then decomposed by biochemical reaction. By the method wastewater treatment has a long process and consumes much water resources. The effect of time, initial pH value, the amount of flocculant, H_2O_2 , air, and TiO_2 on COD removal rate from the wastewater of containing benzoic acid was investigated. The results showed that the optimal conditions are: illumination time is 8 h, initial pH value is 8, and the amount of flocculant, H_2O_2 , air, TiO_2 is 2% (g/g), 2.5% (mL/mL), 2 L/min, 3% (mL/mL), respectively. Under the conditions the maximum COD degradation rate of the HCOW reached 69.76%. The research provides a basic theory and technology for HCOW treatment.

Key words: nano-titanium dioxide; UV; flocculant; high concentration organic wastewater

高浓度有机废水(如制药厂废水)特点是有机物浓度高(COD一般在20 000左右)、存在时间长、迁移范围广,处理难度大,不能直接排放到综合污水处理厂^[1-4];传统处理方法先用大量清水稀释

再排入综合污水处理厂,不仅消耗了水资源,也增加污水厂负荷^[5-9]。本研究采用UV(紫外光)协同纳米 TiO_2 催化-絮凝净化高浓度有机废水方法,充分发挥紫外光、纳米 TiO_2 催化剂、絮凝剂的

收稿日期:2012-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 21076002);江苏省新型环保重点实验室开放课题资助项目(AE201002);安徽省国际科技合作资助项目(12030603003);安徽理工大学青年科学研究基金资助项目(QN201038)

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

协同效应,处理速度快、效率高。

1 实验部分

1.1 实验药品和仪器

实验药品:COD 分析配套试剂;絮凝剂(PAC、PAM);高浓度有机废水(取自某化工企业,主要成份苯甲酸,平均 COD19840, pH 值 1.2);氢氧化钙(AR)。主要仪器:UV-纳米 TiO_2 催化反应器(自制);COD 分析配套仪器;紫外灯管;配电系统;气体鼓泡器及气体分布头;微涡流絮凝器。

1.2 实验流程

用氢氧化钙固体粉末调节高浓度有机废水 pH 值至中性,把 4 500 mL 水样放入紫外光纳米 TiO_2 反应槽中,接通紫外灯电源;用玻璃转子流量计控制鼓入空气量,气体出口安装分布器;滴加双氧水溶液,再向水样中加入 PAC 絮凝剂,将处理过的水样通过微涡流絮凝器固液分离,分析上层清液 COD 值。本实验采用重铬酸钾法(GB11914-89)测定 COD 值,COD 降解率定义为:COD 降解率 = $(\text{COD}_0 - \text{COD}) / \text{COD}_0 \times 100\%$,其中: COD_0 - 初始溶液 COD 值,COD - 处理后溶液 COD 值。图 1 是高浓度有机废水处理流程图。

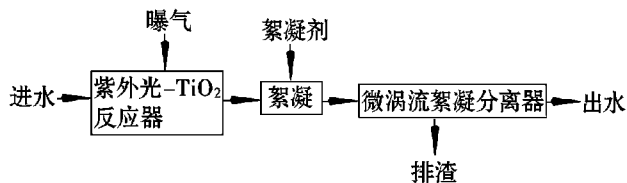


图1 高浓度有机废水净化流程图

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

1) 光强与波长选择。紫外光能够给催化剂电子激发跃迁提供光子能量,光子能量与波长和光强有关,所以光强和波长影响光催化氧化速率。由文献[10-14]知光强较低时降解速率和光强呈线性关系,中等光强时降解速率和光强平方根存在线性关系,较高光强时降解速率和光强无关;短波比长波提供较高的光子能量,短波照射更能有效促进降解,达到同样降解效果所需催化剂量较少。本实验选择强度为 $2\ 600\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$,波长为 $253.7\ \text{nm}$ 的紫外灯。

2) 废水初始 pH 值对 COD 脱除率影响。原水 pH 值分别调节为 6.0、7.0、8.0、9.0,空气鼓入流量为 $2\ \text{L}/\text{min}$,催化剂网涂布浓度 3% (mL/mL) 纳米 TiO_2 ,加入 2% (mL/mL) 双氧水,加入 2% PAC 絮凝剂,测试并计算不同 pH 值条件下光照时间和 COD 脱除率关系如图 2 所示。

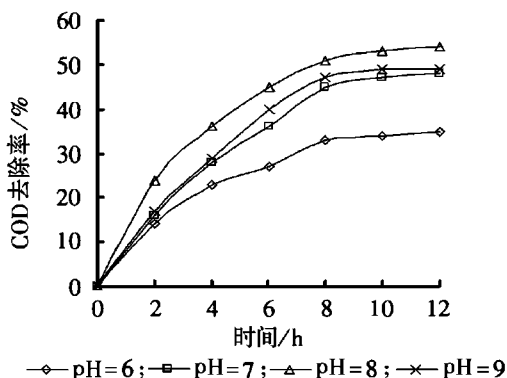


图2 不同 pH 值条件下光照时间与 COD 脱除率关系

从图 2 可见 COD 脱除率随时间延长而增大,8h 以后基本趋于稳定,当 pH=8 时 COD 最大脱除率为 56.07% 。pH 过高或过低都不利于有机物降解,当 pH 较高时有机物降解产生的离子会取代部分 TiO_2 表面的 $-\text{OH}$,当 pH 较低时由 $-\text{OH}$ 与空穴作用生成的氢氧自由基较少,都不利于降解反应。

3) H_2O_2 投加量对 COD 脱除率的影响。向初始 pH=8.0 的高浓度有机废水中分别加入 1.0、1.5、2.0、2.5% (mL/mL) 双氧水,鼓气量为 $2\ \text{L}/\text{min}$,涂网 3% (mL/mL) 浓度的纳米 TiO_2 催化剂,加 2% PAC 絮凝剂,测试并计算不同光照时间条件下双氧水加入量与 COD 去除率如图 3 所示。

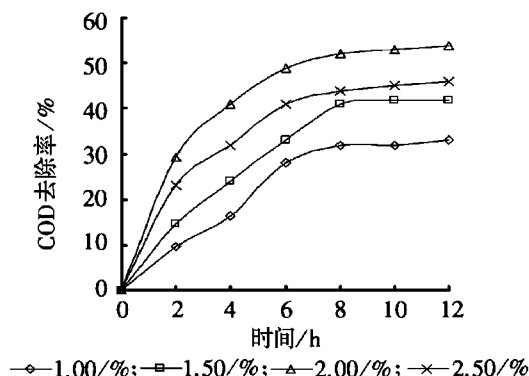


图3 双氧水加入量和光照时间与 COD 脱除率关系

从图 3 知随光照时间延长 COD 脱除率增加,8h 以后基本趋于稳定。当双氧水加入量为 2.0% (mL/mL) 时, COD 最大脱除率为 55.98% 。因为

H₂O₂ 是良好的电子捕获剂,能提高电子-空穴对的分离,增加光降解能力;但实验发现 H₂O₂ 加入量不宜过大。

4) 曝入空气量对 COD 脱除率的影响。向初始 pH=8.0 的废水中分别曝入 1、2、3、4 L/min 空气,涂 3% (mL/mL) 纳米 TiO₂ 催化剂,加入 2% (mL/mL) 双氧水、2% PAC 絮凝剂,不同空气流量条件下时间与 COD 脱除率关系如图 4 所示。

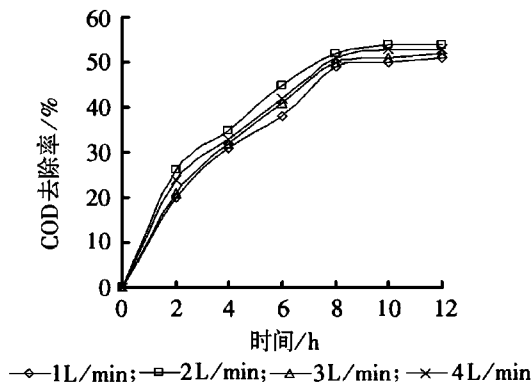


图 4 不同曝入空气流量条件下时间与 COD 脱除率关系

从图 4 可见随时间延长 COD 脱除率始终增大,8h 后基本趋于稳定;随鼓入空气流量增加 COD 脱除率增大,因为鼓入的空气不仅提供氧气加速有机物氧化降解,而且还起到搅拌作用;由于受到氧在水中溶解度限制,不同空气量对 COD 脱除率影响差别不大,考虑到经济成本,本实验确定最佳空气鼓入量为 2 L/min 左右。

5) TiO₂ 用量对 COD 脱除率的影响。纳米 TiO₂ 催化剂网涂浓度分别为 1.0、2.0、3.0、4.0% (mL/mL),鼓入空气流量 2 L/min,投加 2% (mL/mL) 双氧水、2% PAC 絮凝剂,测不同二氧化钛用量下光照时间与 COD 脱除率关系如图 5 所示。

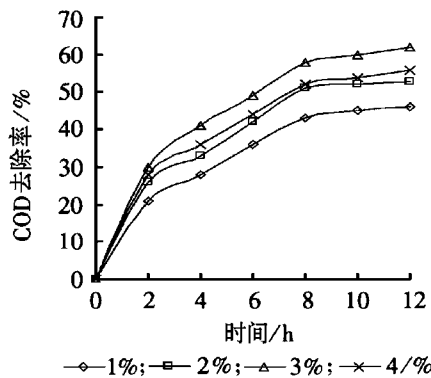


图 5 不同二氧化钛用量下光照时间与 COD 脱除率关系

由图 5 可见随时间延长 COD 脱除率始终增大,当纳米 TiO₂ 用量为 3.0% 时 COD 最大脱除率为 63.58%。因为随催化剂浓度增大在光催化降解反应中提供的活性中心数量增加,有机物降解反应速率增大;但当催化剂用量大于最佳值后,因受分散均匀度的影响 COD 脱除率有所降低。

2.2 正交试验

在单因素实验基础上,以 COD 脱除率为指标,以 A:废水初始 pH 值,B:H₂O₂ 投入量/(%),C:鼓入空气流量/(L/min),D:TiO₂ 用量/(%) 为因素,反应时间均为 8h,各取 3 水平;L₉(3⁴) 正交试验方案设计如表 1 所示,L₉(3⁴) 正交试验结果如表 2 所示。

表 1 L₉(3⁴) 正交试验方案

| 水 | 废水初始 | H ₂ O ₂ 投入 | 鼓入空气流 | TiO ₂ 用量/ |
|---|------|----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 平 | pH 值 | 量/% | 量/(L·min ⁻¹) | % |
| | A | B | C | D |
| 1 | 6 | 1.5 | 2 | 1.0 |
| 2 | 7 | 2.0 | 3 | 2.0 |
| 3 | 8 | 2.5 | 4 | 3.0 |

注:表中(B)双氧水投入量和(D)二氧化钛投入量是指双氧水和二氧化钛占被处理废水的体积百分数。

表 2 L₉(3⁴) 正交试验结果

| 序 | 因 子 | | | | COD 脱除率/ |
|------|---|--------|--------|--------|----------|
| | A | B | C | D | |
| 号 | | | | | % |
| 1 | 6 | 1.5 | 2 | 2 | 43.55 |
| 2 | 6 | 2.0 | 3 | 3 | 50.00 |
| 3 | 6 | 2.5 | 4 | 4 | 64.11 |
| 4 | 7 | 1.5 | 3 | 4 | 61.42 |
| 5 | 7 | 2.0 | 4 | 2 | 56.37 |
| 6 | 7 | 2.5 | 2 | 3 | 60.89 |
| 7 | 8 | 1.5 | 4 | 3 | 55.65 |
| 8 | 8 | 2.0 | 2 | 4 | 63.39 |
| 9 | 8 | 2.5 | 3 | 2 | 59.27 |
| K1 | 157.66 | 166.62 | 177.83 | 159.19 | |
| K2 | 184.68 | 179.76 | 176.69 | 166.54 | |
| K3 | 188.31 | 184.27 | 176.13 | 204.92 | |
| k1 | 52.55 | 55.54 | 59.28 | 53.06 | |
| k2 | 61.56 | 59.92 | 58.90 | 55.51 | |
| k3 | 62.77 | 61.42 | 58.71 | 68.31 | |
| 极差 R | 30.65 | 17.65 | 1.70 | 45.73 | |
| 因素主次 | D A B C | | | | |
| 优方案 | A ₃ B ₃ C ₁ D ₃ | | | | |

由表 2 可知,影响 COD 脱除率的因素主次顺序为:(D) 二氧化钛投入量/(%) > (A) 废水初始 pH 值 > (B) 双氧水投入量/(%) > (C) 鼓入空气流量/(L/min)。最佳条件为 $A_3B_3C_1D_3$ 。即废水初始 pH 值为 8、 H_2O_2 投加量 2.5% (mL/mL)、曝入空气量 2 L/min、 TiO_2 用量 3% (mL/mL),该条件下 COD 最大降解率为 69.76%。

3 结论

采用紫外光协同纳米 TiO_2 催化-絮凝净化工艺,获得了光照时间、絮凝剂用量、废水初始 pH 值、双氧水投加量、曝入空气量、 TiO_2 用量等因素对含苯甲酸高浓度有机废水 COD 脱除率的影响规律。研究表明最佳工艺条件为光照时间 8h、絮凝剂用量 2% (g/g)、废水初始 pH = 8、 H_2O_2 投加量 2.5% (mL/mL)、曝入空气量 2 L/min、 TiO_2 3% (mL/mL) 时, COD 最大降解率达到 69.76% (4 500 mL 原水 COD 为 19 840 直接降到 6 000)。本研究结果为高浓度有机废水净化处理提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 周晓谦,周文淮. 纳米二氧化钛的光催化特性及应用进展[J]. 辽宁化工, 2002, 31(10): 448-451.
- [2] 赵洪,宋晓莉,刘锦平,等. 纳米二氧化钛光催化剂处理印染废水的中试研究[J]. 工业水处理, 2006, 26(7): 36-39.
- [3] 张万忠,乔学亮,邱小林,等. 纳米二氧化钛的光催化机理及其在有机废水处理中的应用[J]. 人工晶体学报, 2006, 35(5): 1 026-1 031.
- [4] 尹晓敏,程永清. 纳米二氧化钛光催化剂在废水处理中的应用研究[J]. 纳米材料与应用, 2005, 2(3): 36-42.
- [5] AMAT A M, ARQUES A, MIRANDA M A, et al. Photo-fenton reaction for the abatement of commercial surfactants in a solar pilot plant[J]. Energy, 2004, 29(5): 559-566.
- [6] STAFFORD SAMUELL, BROSILLON S, FOURCADE F, et al. Integrated process for degradation of amitrole in wastewaters: Photocatalysis/biodegradation [J]. Chemical Reactor Engineering, 2007, 23(5): 1 241-1 247.
- [7] LAPERTOT M, PULGARIN CSAR, FEMFINDEZ IP, et al. Enhancing biodegradability of priority substances (pesticides) by solar photo-Fenton [J]. Water Res. 2006, 40(5): 1 086-1 094.
- [8] 舒启溢,邱俊明,张玉英. 光催化氧化降解处理有机废水研究进展[J]. 广州化工, 2010, 37(4): 126-127.
- [9] MOUSSA DABID, BRISSET JEAN LOUIS. Disposal of spent tributylphosphate by gliding arc plasma [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 21(3): 189-200.
- [10] OOKA C, YOSHIDA H, SUZUKI K, et al. Highly Hydrophobic TiO_2 Pillared Clay for Photocatalytic Degradation of Organic Compounds in Water [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2004, 67(2-3): 143-150.
- [11] SAIEN J, ARDJMAND R R, HOUKHANI H. Photocatalytic Decomposition of Sodium Benzene Sulfonate Under Aqueous Media in the Presence of TiO_2 [J]. Physics and Chemistry of Liquids, 2003, 41(5): 519-531.
- [12] LI X, CHEN G, PO-LOCK Y, et al. Photocatalytic Oxidation of Cyclohexane over TiO_2 Nanoparticles by Molecular Oxygen under Mild Conditions [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2003, 78(12): 1 246-1 251.
- [13] MOON J, YUN C Y, CHUNG KW, et al. Photocatalytic Activation of TiO_2 under Visible Light Using Acid Red 44 [J]. Catalysis Today, 2003, 87(1-4): 77-86.
- [14] SRINIVASAN C, SOMASUNDARAM N. Bactericidal and Detoxification Effects of Irradiated Semiconductor Catalyst TiO_2 [J]. Current Science. 2003, 85(10): 1 431-1 438.

(责任编辑:李 丽)

高压水射流剥蚀橡胶材料的数值模拟

张东速, 刘 辉

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:将高压水射流技术应用与废旧轮胎的回收是一项新的技术发展趋势。采用光滑粒子流体动力学耦合有限元方法, 对水射流冲击破碎橡胶进行数值仿真分析。较好的反映了水射流与橡胶材料相互作用变形的宏观物理过程, 证明了该仿真方法适用于此类问题, 为理解橡胶颗粒剥蚀机理提供了参考。

关键词:高压水射流; 光滑粒子流体动力学 (SPH); 橡胶剥蚀; 数值模拟

中图分类号: TP69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)03-0011-04

Numerical simulation of high - pressure water jet breaking rubber material

ZHANG Dong - su, LIU Hui

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

Abstract: A new technology trend is recycling of discarded tires by high - pressure water jet technology. Numerical simulation analysis of the process of rubber peeling by water jet was carried out by using finite element method for smooth particle hydrodynamics coupling, which reflects the macroscopic physical process of rubber deformation under interaction between water jet and rubber material. It showed that the simulation method is applicable to such issues, and provides a reference to understanding of rubber particles denudation mechanism.

Key words: high pressure water jet; smooth particle hydrodynamics; rubber denudation; numerical simulation

国内外一些研究人员曾研究过基于高压水射流技术的利用废旧轮胎制备橡胶粉的技术, 这项技术利用超高压射流直接带走轮胎上的橡胶回收纯净的橡胶颗粒^[1]。但目前对于该方法回收橡胶的理论研究仍较少, 有必要继续做深入的研究。本文对水射流冲击剥离橡胶材料的过程进行数值模拟, 以了解水射流剥蚀橡胶的宏观物理过程, 并可为理解橡胶颗粒剥离机理提供参考。

就数值模拟而言, 射流破碎橡胶的过程同时具有大的状态非线性与材料非线性。本文使用一种无网格的纯拉格朗日方法——光滑粒子动力学方法 (SPH 方法) 对水射流进行建模, SPH 方法是具有无网格、自适应属性的流体动力学求解方法, 该

方法对非线性的冲击问题的数值计算对基于网格方法有很大的优势, 它可以描述射流的大变形及水的散裂行为^[2]。橡胶为超弹性材料, 其建模方法一般选用有限单元法 (FEM)。受水射流冲击时橡胶材料的有限元网格会产生畸变, 计算中可为有限元网格设置合适的侵蚀准则, 既防止网格畸变导致的计算中止, 又可等效描述橡胶材料的剥离。将 SPH 方法与有限元方法通过接触算法加以耦合, 以在解决本文问题时充分利用两种算法各自的优点。

1 数值计算的相关理论

SPH 方法是基于核估计的思想发展起来的, 对任意一个函数 $f(x)$, 都有如下积分近似表达式^[3]

收稿日期: 2013-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175139)

作者简介: 张东速 (1958-), 男, 安徽太和人, 教授, 硕士, 主要从事高压水射流技术应用与教学工作。

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx'$$

式中: $\langle f(x) \rangle$ 为函数 $f(x)$ 的近似值; x 为坐标变量; Ω 为包含 x 的积分域; $W(x - x', h)$ 为光滑函数; x' 为积分域内的点; h 为光滑长度。

SPH 方法还要用粒子对求解域离散化, 流体的求解域被离散化为一定数量的粒子, 每个粒子都具有独立的质量、密度和别的物理性质。经过离散化, 函数的积分表达式可写成如下近似式^[3]

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) w_{ij}$$

式中: j 和 i 为粒子编号; m_j 和 ρ_j 分别为 j 粒子的质量和密度 (其比值取代对应原式中的 dx'); N 为紧支域内粒子的总数; $w_{ij} = W(|x_i - x_j|, h)$ 。流体的 Navier - Stokes 方程即用上式的方法进行 SPH 离散求解。

下面再简单介绍有限单元法 (FEM), 有限单元法的基础是变分原理和加权余量法, 其大致思路可以归纳如下: 首先, 将工程中某个连续的实体做空间的离散, 划分成单元网格组成的计算模型; 然后, 在每个单元内将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的表达式, 利用变分原理或加权余量法, 对微分方程进行离散求解。

2 数值模型定义

2.1 本构关系与状态方程

本文水的本构模型选择空模型, 其偏剪应力与偏剪应变率成正比。状态方程采用可描述液体和固体的 Mie - Gruneisen 状态方程, 该方程中材料被

压缩时的压力 P 被定义为

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})v - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}] + (\gamma_0 + a\mu)E}$$

材料被拉伸时 P 可表示为

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E$$

式中: C 为应力波速度与质点速度关系曲线的截距, 即体积声速; γ_0 为 Gruneisen 系数; S_1, S_2 和 S_3 为常数; a 为对 γ_0 的一阶体积修正; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。

水材料参数选用如表 1 所示。

表 1 水射流的相关的物理、力学参数

| 密度/(g · cm ⁻³) | C /(m · s ⁻¹) | S_1 | S_2 | S_3 | γ_0 |
|----------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------------|
| 1.00 | 1 483 | 1.75 | 0 | 0 | 0.28 |

橡胶材料的应变能方程采用 Ogden 形式的三阶模型, 在各种超弹性体应变能方程中, Ogden 的三阶模型在预测较大的变形时仍然有准确性^[4], Ogden 模型是直接用 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 作为自变量的模型, 其应变能函数表达式为^[5]。

$$\begin{cases} W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \\ \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i} & (0 < N \leq 3) \\ \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i, \bar{I}_i = J^{-\frac{2}{3}} I_i \end{cases}$$

式中: J 为体积比; α_i 可取任何实数值; μ_i 为由橡胶试验数据确定的材料常数。

橡胶样本的材料参数选用如表 2 所示。

表 2 橡胶的相关的物理、力学参数

| μ_1 /kPa | μ_2 /kPa | μ_3 /kPa | α_1 | α_2 | α_3 | d_1 | d_2 | d_3 |
|--------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------------------|-------|-------|
| 618 | 1.18 | -9.81 | 1.3 | 5.0 | -2.0 | 4.825×10^{-6} | 0 | 0 |

侵蚀标准的设置是一种补救措施。在计算中的一些拉格朗日单元的严重扭曲, 会严重影响计算的进行, 因此需要将这些单元纳入删除程序的计算, 这个过程并不是描述某种物理意义, 所以无法根据材料的某一物理性质来确定材料的侵蚀应变的值。本文中橡胶材料的侵蚀标准选用 Geometric strain (几何应变) 形式。硫化橡胶的扯断伸长率一般在

450% 以上, 一般侵蚀应变应当选用比扯断伸长率更大的值。经过反复的试分析, 几何应变值取 15。

2.2 水射流冲击橡胶几何模型构建

为方便计算与分析, 本文为水射流和橡胶建立了简化的 2D 轴对称计算模型 (见图 1)。把水射流看做圆柱形的水柱, 高度 8 mm, 直径 1 mm, 水柱轴

心垂直于橡胶靶物上平面,以 400 m/s 速度冲击靶物。建立橡胶靶物模型也使用圆柱体,高度 8 mm,直径 16 mm。水射流用 SPH 粒子按规则的排列填充,节点间隔取 $15\text{ }\mu\text{m}$,在轴对称单侧平面上,每层圆截面上布置 33 个粒子,共有 467 层,共有 15 411 个粒子。由于在分析中水射流会产生大变形,固定值的光滑长度难以满足计算要求^[6],故 SPH 粒子在计算中采用可变光滑长度。另外,橡胶材料有限元网格在划分时采用结构化矩形节点,在射流正下方的网格为正方形网格,网格尺寸 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。

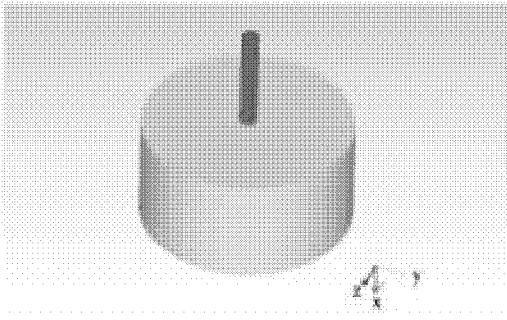


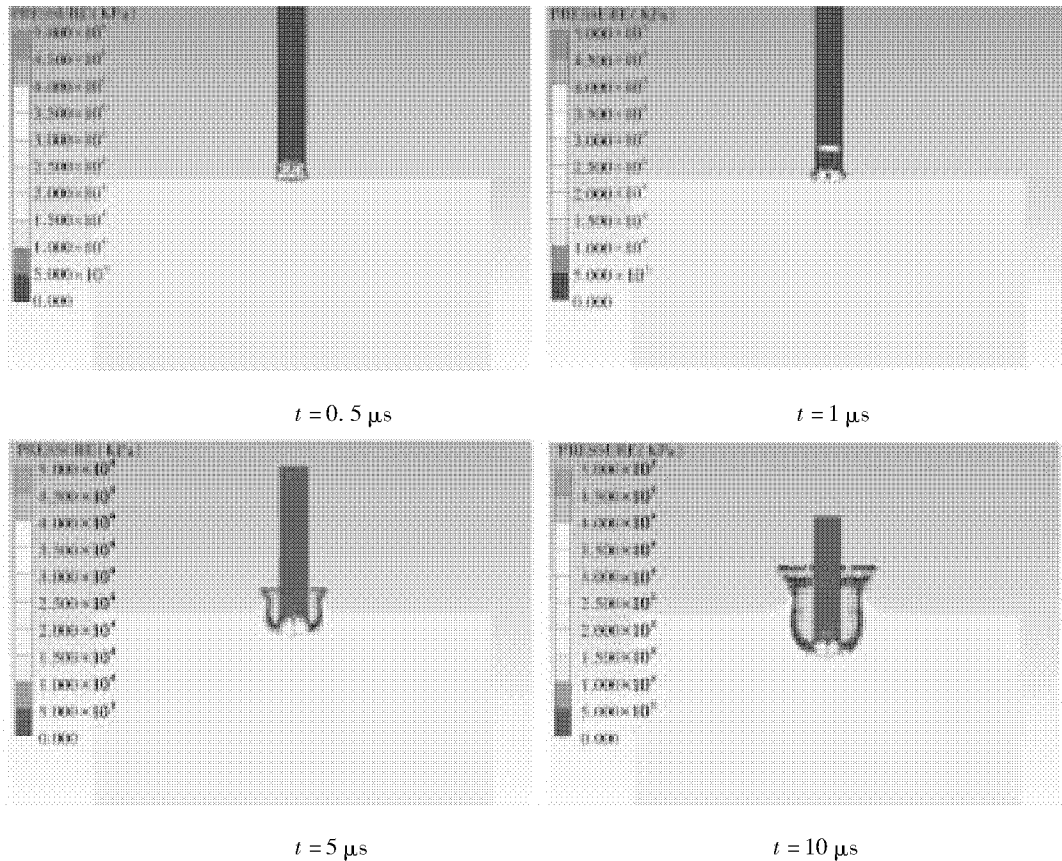
图1 水射流冲击橡胶几何模型

3 计算分析结果

3.1 水射流与橡胶的变形过程分析

橡胶在 400 m/s 受水射流冲击。图 2 给出了不同时刻水射流与橡胶的变形状况,以及伴随这一过程的水的压力变化。在接触开始时,水射流底面压力最先增加到约 $1.9 \times 10^5\text{ kPa}$,在随后的时间内压力波逐渐向圆柱顶部传播,并在传播过程中逐渐降低,对底部液体来说,在接触开始时只有边缘部分的液体可以自由横向流动,靠近轴线部分保持压缩状态无明显的横向流动。随后,接触平面上的压力降到稳定流动状态,射流也同时稳定的反溅。

冲击发生的初期,橡胶材料在水射流的作用下产生应变,射流底部的压力使橡胶材料向四周移动,逐步形成一个形似“火山口”的应变坑。这个阶段以后,橡胶继续产生形变,应变坑底部的橡胶材料开始产生明显的侵蚀,“火山口”的边缘突起也逐渐向外扩展,随着射流与橡胶接触平面上的压力进入稳定流动状态,橡胶材料的侵蚀也进入一种稳定的状态。



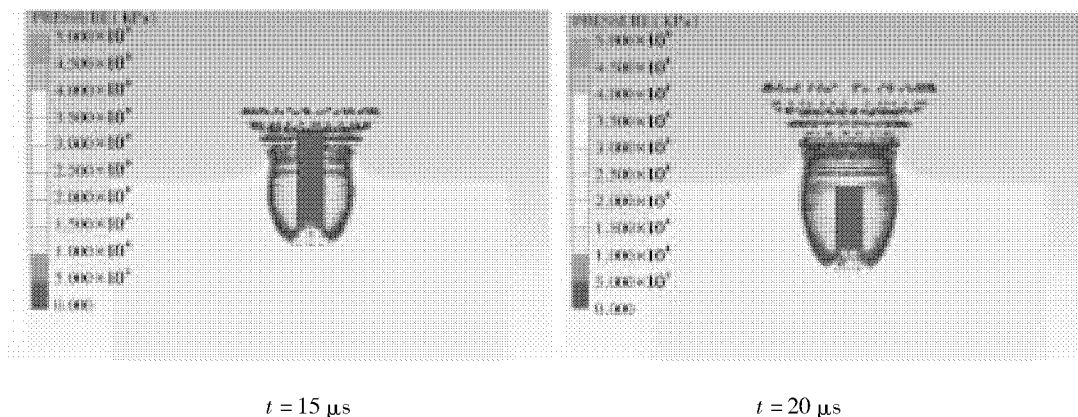


图 2 水射流与橡胶的变形时序图

3.2 橡胶的应变分布

计算橡胶的等效应变采用表达式

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{2}{3} [(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 5(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1) - 3\varepsilon_{12}^2]^{\frac{1}{2}}$$

在 $t = 15 \mu\text{s}$ 时橡胶等效应变的分布如图 3 所示, 在侵蚀坑壁处有复杂的大应变, 往外围逐渐减小。取图中黑色线段为变量输出线, 起点为线段的上端点, 与冲击界面重合, 终点为下端点, 线长 1.5 mm 。

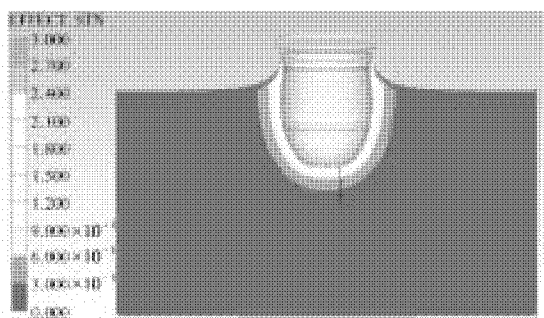
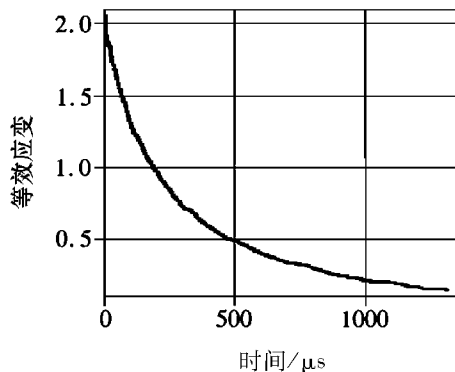
图 3 $t = 15 \mu\text{s}$ 时的橡胶的应变分布

图 4 变量输出线上的等效应变曲线图

图 4 为变量输出线上的主应变曲线图, 通过此曲线图可以看出应变向外围减小的变化趋势, 在橡

胶侵蚀坑壁处(横向坐标 0 点)向外 0.5 mm 厚度内应变值急剧变小, 过了这个区域再向内材料应变曲线开始平滑地减小, 最后应变趋向于 0。此时冲击滑移界面上等效应变超过 210% 的网格均已被删除, 这是因为这些网格内部点的应变值已经达到了侵蚀应变。此曲线图的变化趋势也有力的说明了, 橡胶材料的剥离发生在侵蚀坑的接触界面上很薄的区域内(深度应远小于 0.5 mm)。

4 结论

SPH 耦合 FEM 方法可以良好地模拟高压水射流冲击侵蚀橡胶的宏观过程, 从整个仿真过程可以推论出, 水射流在与橡胶接触时产生局部的高压与摩擦, 由此橡胶材料在接触表面处产生变形, 变形越是接近冲击界面越大, 且应变状态复杂, 当应变超出橡胶破坏应变时橡胶破碎, 被水射流层层剥离。

参考文献:

- [1] 陈波. 基于水射流技术的利用废旧轮胎制备橡胶粉的装置: 中国, CN200988284 Y[P]. 2007-12-22.
- [2] 张志春. SPH-FEM 接触算法在冲击动力学数值计算中的应用[J]. 固体力学学报, 2011(32): 319-323.
- [3] G R LIU, M B LIU. 光滑粒子流体动力学[M]. 韩旭, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005: 8-120.
- [4] 龚科家. 填充橡胶超弹性本构参数实验与应用[J]. 工程力学, 2009(26): 193-198.
- [5] OGDEN R W. Non-Linear Elastic Deformations [M]. Chichester, U K: Ellis Horwood, 1984: 8-100.
- [6] 马利, 陶伟明, 郭乙木, 等. SPH 耦合有限元方法的水射流弹塑性碰撞模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(2): 259-263.

煤层工作面无线电波透视探查效果分析

徐 翀¹, 肖玉林², 李洪明²

(1. 淮南矿业集团煤炭工程技术研究院, 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:无线电波透视 CT 技术在矿井工作面内构造及异常探查中发挥着重要的作用。受不同地质条件及仪器设备因素限制, 其对地质异常的探查效果和能力受到不同程度影响。通过研究淮南矿区当前 4 个主采煤层大量工作面的无线电波透视探查结果与回采揭露对比分析, 总结无线电波透视受煤层面宽、频率差异、煤层厚度以及构造特征等因素的影响, 讨论透视探查效果和能力, 为进一步提高探查准确率提供参考。

关键词:无线电波透视; 透视距离; 频率差异; 煤层条件

中图分类号: P631.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)03-0015-05

Analysis of Exploration Effect of Radio Wave Penetration Technique in Working Face in Mines

XU Chong¹, XIAO Yu - lin², LI Hong - ming²

(1. Hainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Radio wave penetration technique plays a key role in detecting geological structure and abnormality of working faces in mines. Penetrating and detecting effect and ability of radio wave penetration CT for geological abnormality in working faces is affected in different degrees by different geological conditions and apparatus. On the basis of comparative analysis of radio wave perspective exploration results with discovery revealed in currently 4 main mineable coal seams of working faces in Huainan Mining Area, summary can be obtained as the following: radio wave penetration is affected by coal face width, frequency difference, thickness of coal seams, tectonic features and other factors. Perspective exploration effect and capability of penetration were discussed, in order to provide reference to further improve the accuracy.

Key words: radio wave penetration technique; penetrating distance; difference of frequency; conditions of coal seams

目前对于矿井工作面中存在的地质构造及其异常探查的方法种类较多, 总体上分为地震波和电磁法两大类, 且多以透射方法勘探为主, 主要包括震波和槽波 CT 方法^[1-3], 直流电法^[4]、音频电透视和无线电波透视技术^[5-10]等方法。这其中无线电波透视方法技术应用较早, 其技术方法成熟, 操作便捷, 因此在煤矿工作面地质异常探查中发挥着重要的作用。但是受方法技术本身以及煤层地质

条件所限, 无线电波透视技术应用中也存在诸多问题, 其勘探距离及分辨能力存在一定的差异。通过淮南矿区无线电波透视方法的应用与实践, 对电磁波在不同煤层中的穿透距离, 不同频率勘探效果, 煤层厚度、构造特征对勘探结果引起的差异等内容进行分析与讨论, 力求为煤层工作面勘探提供有效的技术参数, 进一步提高对工作面内构造及异常探查的精度和准确率。

收稿日期: 2013-04-05

基金资助: 国家自然科学基金资助项目 (41172137)

作者简介: 徐翀 (1961-), 男, 安徽潜山人, 高级工程师, 本科, 从事矿井地质技术与管理工作的。

1 无线电波透视方法技术

1.1 探查地球物理条件

电磁波在地下煤岩层介质中传播时,由于各种岩、矿电性参数不同,它们对电磁波能量的吸收有一定的差异,电阻率较高的煤层有利于电磁波的穿透,而电阻率较低的岩、矿石具有较大的吸收作用。另外,断裂构造所产生的界面能够对电磁波产生折射、反射等作用,也会造成电磁波能量的损耗。因此,电磁波穿越煤岩层的途径中遇到断层、含水地段、陷落柱、空洞或其它不均匀地质异常时,电磁波能量就会吸收损失或完全屏蔽,接收巷道收到微弱信号或收不到透射信号,形成所谓的透视异常,从而进行地质推断和解释,这是煤层工作面内构造及异常探查的地质地球物理基础。

1.2 测试技术原理

无线电波透视发射和接收分别在工作面两条巷道中进行。在实际应用中,根据巷道条件并考虑方向因子较简单的天线,一般采用长度小于波长的短偶极子。任意观测点P的电磁场强度为

$$H = H_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \quad (1)$$

式中: H_0 为决定于发射功率和天线周围介质的初始强度; β 为介质对电磁波能量吸收系数; r 为P点到A点的直线距离; $f(\theta)$ 为方向因子; θ 为偶极子轴与观测方向的夹角。

从式(1)中看出,决定P点场强值大小的有四个参量。在辐射条件不随时间变化时, H_0 是一个常数。吸收系数 β 是影响场强值的主要参数,因为场强值是以 e 随距离呈指数规律衰减的, β 值越大,场强衰减越快。其方向因子 $f(\theta) = \sin \theta$ 在发射机天线轴的垂直方向上 ($\theta = 90^\circ$), 辐射的电磁场能量最强,当观测点平行于天线方向移动时 (θ 变小) 场强变小,当观测点位于天线轴方向时 ($\theta = 0^\circ$) 场强值为最小。垂直时,则 $\sin \theta \approx 1$, 式(1)可简化为

$$H = H_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} \quad (2)$$

因此,根据现场场强测试值 H 即可对探测介质内部地质条件进行判断与分辨(见图1)。目前,国内主要有三款无线电波透视数据采集仪器,包括煤炭科学研究总院重庆研究院生产的WKT-E型坑透仪,其工作频段有0.3 MHz、0.5 MHz和1.5 MHz;

河北廊坊迪远仪器有限公司生产的WKT-6型,其工作频段有0.365 MHz和0.965 MHz;福州华虹智能科技开发有限公司生产的YCT88,其工作频段有0.088 MHz、0.158 MHz、0.365 MHz和0.965 MHz。随着机械化程度的提高,工作面走向长度和宽度在不断增加,其中工作面宽度多在200~300 m,因此,透视过程中主要采用0.3 MHz左右的低频段工作频率,重点是考虑探查的透视距离。

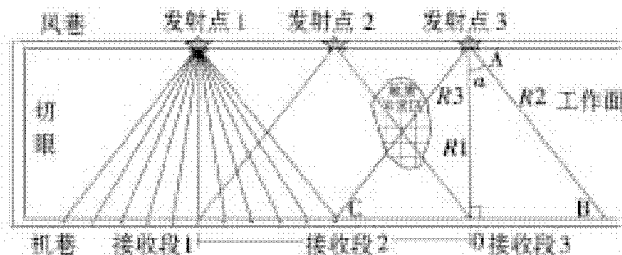


图1 工作面无线电波透视工作方法示意图

2 无线电波透视效果分析

近年来,淮南矿区开展了大量的工作面无线电波透视探查,主要包括13-1煤层、11-2煤层、8煤层、6煤层和3煤层,由于煤层厚度、工作面布设、构造发育条件等差异,其探查效果具有一定的差异性。以下结合煤层工作面赋存煤层厚度、选用不同工作频率和构造发育差异,对无线电波透视效果进行分析。

2.1 煤层条件差异对透视效果影响

煤层厚度对无线电波透视效果具有重要的影响。由于不同煤层厚度及其结构不同,因此在同样装置条件下所获得的煤层探查效果不同。其主要影响因素包括煤层厚度、煤层结构、含水率、巷道条件等。相比较来说,13-1煤层厚度大,稳定性好,其探查效果较好;而对于11-2煤层、8煤层和6煤层等层厚较薄,且存在不同厚度的夹矸,测试巷道中多见不同厚度岩石层,其对电磁波的吸收程度大。某矿2341(3)工作面为13-1煤层,该段平均厚度6.5 m。透视采用频率为0.5 MHz,实测场强值在50~80 dB。实测场强值的在正常段与异常段区分非常明显,而且低值区域与断层影响区域吻合的很一致(见图2a)。某矿1412(1)工作面为11-2煤层,该段平均厚度2.7 m。透视采用频率为0.3 MHz,实测场强值在20~50 dB。实测场强值在正常与异常段区分比较明显,低值区域与断层影响区域较为吻合,但低值收敛性差,其范围较断层影响区有所

放大(见图2b)。

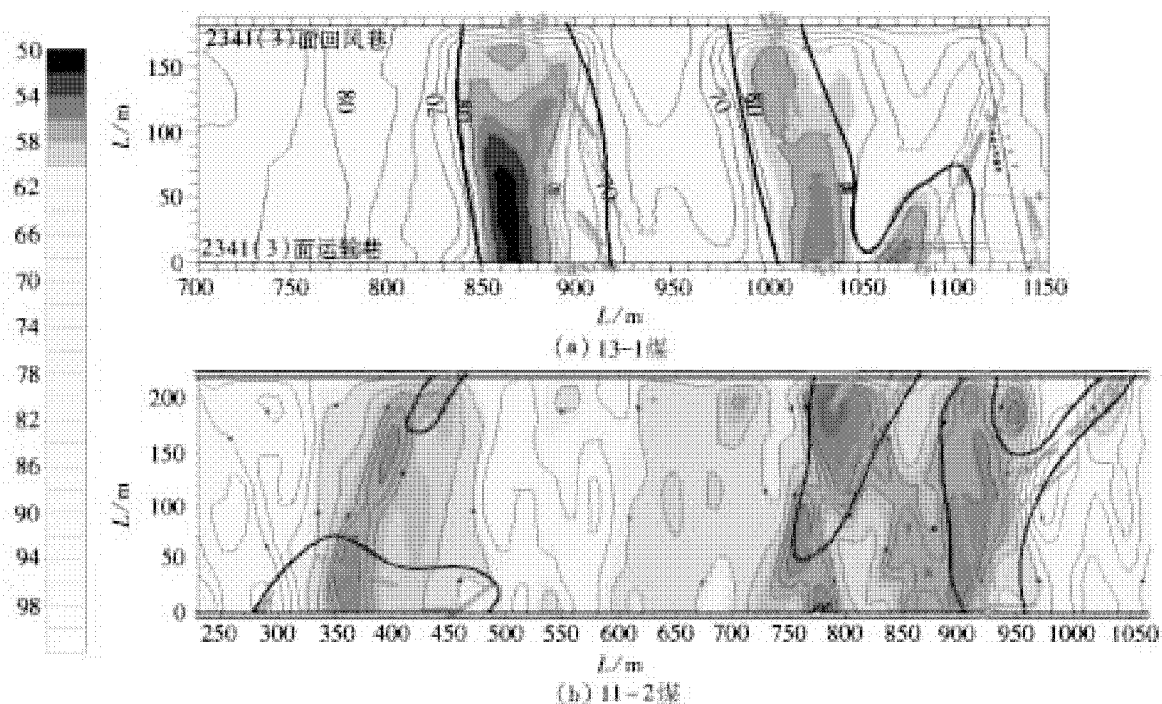


图2 2341(3)和1412(1)工作面实测场强分布图

某矿18318工作面为8煤层,该段平均厚度3.0 m,工作面宽约220 m。透视采用频率为0.365 MHz,实测场强值在15~40 dB,实测场强值的正常段与异常段区分不明显,而且低值区域与断层影响区域吻合性差,低值区域比断层影响区范围

大(见图3a)。某矿12226工作面为6煤层,该段平均厚度2.4 m,工作面宽约190 m。透视采用频率为0.365 MHz,实测场强值在15~45 dB,实测场强值在正常段与异常段区分不明显,且低值区比断层影响区范围大的多(见图3b)。

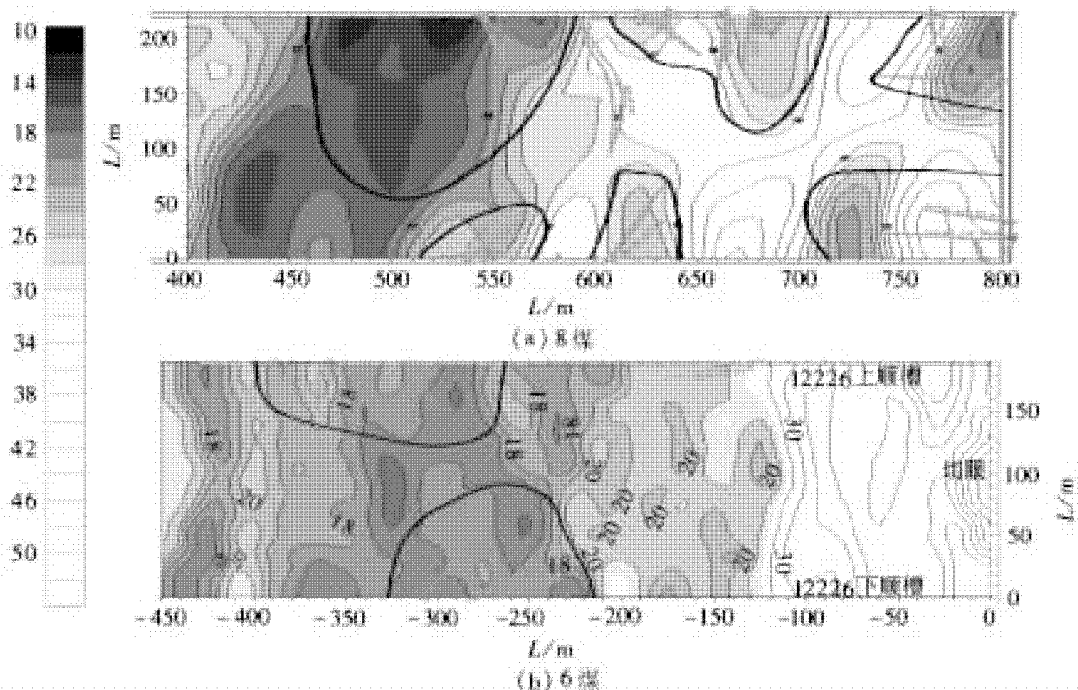


图3 18318和12226工作面实测场强分布图

从淮南矿区4个主采煤层工作面透视实测场强分布可以看出,煤层越厚电磁波穿透越强,煤层越薄电磁波穿透越差或者完全不能穿过去;且

13-1煤层透视效果最好,实测场强低值范围与工作面异常区吻合好,探测的准确率高,而11-2煤层、8煤层和6煤层透视效果差一些,尤其在工作

面构造复杂的工作面效果更差。

2.2 不同频率选择对探查效果影响

目前矿井工作面的倾斜方向长度不等,基本上在200 m左右,个别工作面倾斜宽度达到280 m。由于低频电磁波其穿透距离相对较长,高频电磁波易衰减穿透距离有限,所以对于200 m以上工作面多采用0.3 MHz左右的低频进行探查。但低频分辨率较低,不利于进行构造精细探查与解释。

淮南矿区某矿14138工作面为8煤层,该段平

均厚度3.6 m,工作面宽约240 m。透视分别采用频率0.088 MHz、0.158 MHz、0.3 MHz和0.365 MHz进行实验,实测场强值在15~40 dB(见图4),0.088 MHz频率对异常分辨能力差,实测场强值比较高;0.158 MHz、0.3 MHz和0.365 MHz能够分辨异常位置,其正常与异常段实测场强区分均较为明显,其中频率0.158 MHz测量的低值区域与异常区范围较吻合。因此,工作面宽度越大电磁波的穿透性越差,需选用适合的低频。

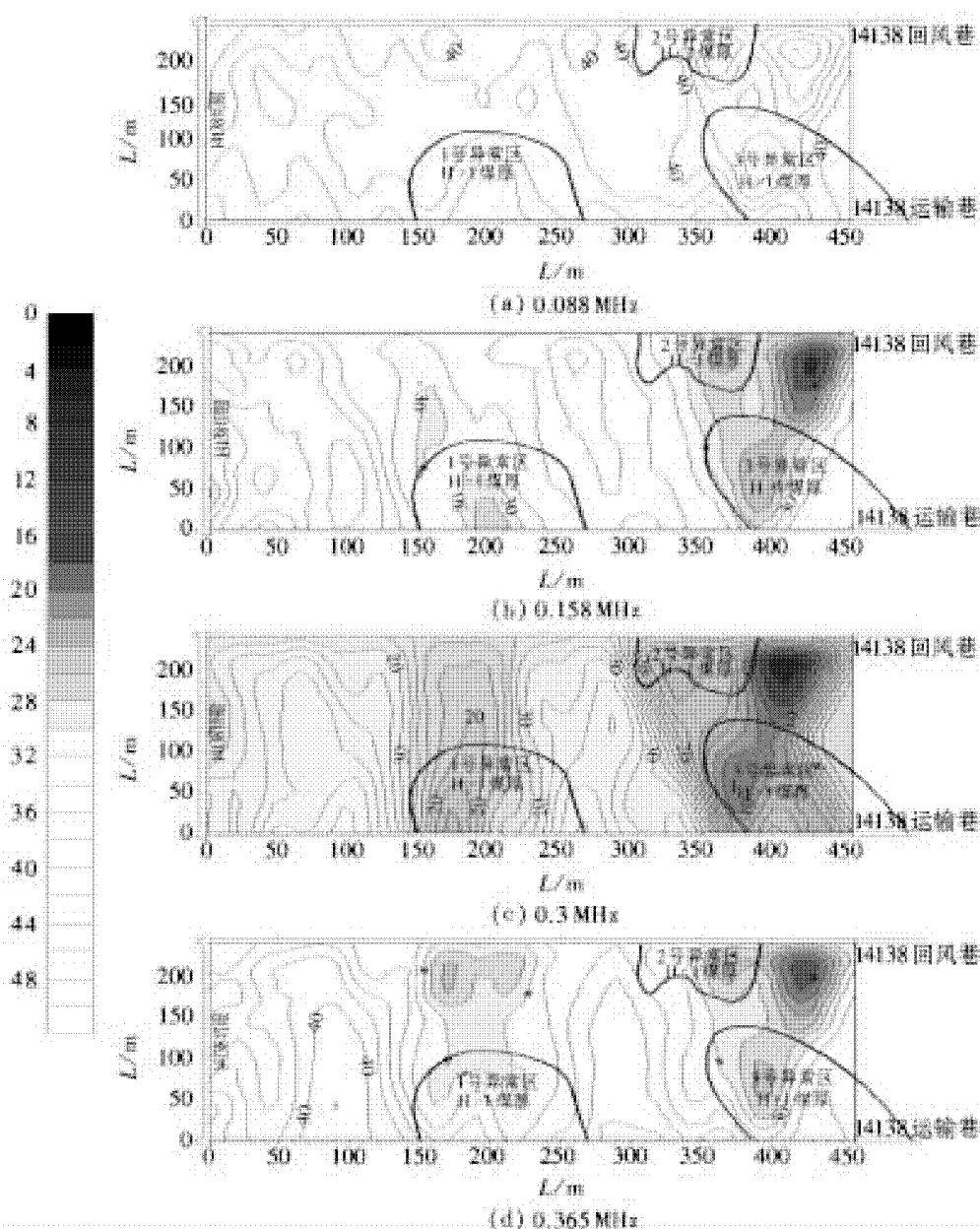


图4 不同工作频率实测场强图

2.3 断层走向对探查效果影响

无线电波透视对走向和倾向断层的分辨能力

与断层延展的长度有密切关系。图5a为前述的1412(1)工作面,图5b为前述的18318工作面。综合对比分析图2~图5,发现倾向断层或近倾向断

层,其断层延展越大,探测效果越好(见图 2a),断层延展越小探测效果越差(见图 2b);走向断层或近走向断层,断层延展越大,探测效果越差(见图

5a),断层延展越小探测效果越好(见图 5b),其重点是具体位置难以判断,因此,需要改进探查数据处理及分析技术,提供对走向断层预报能力。

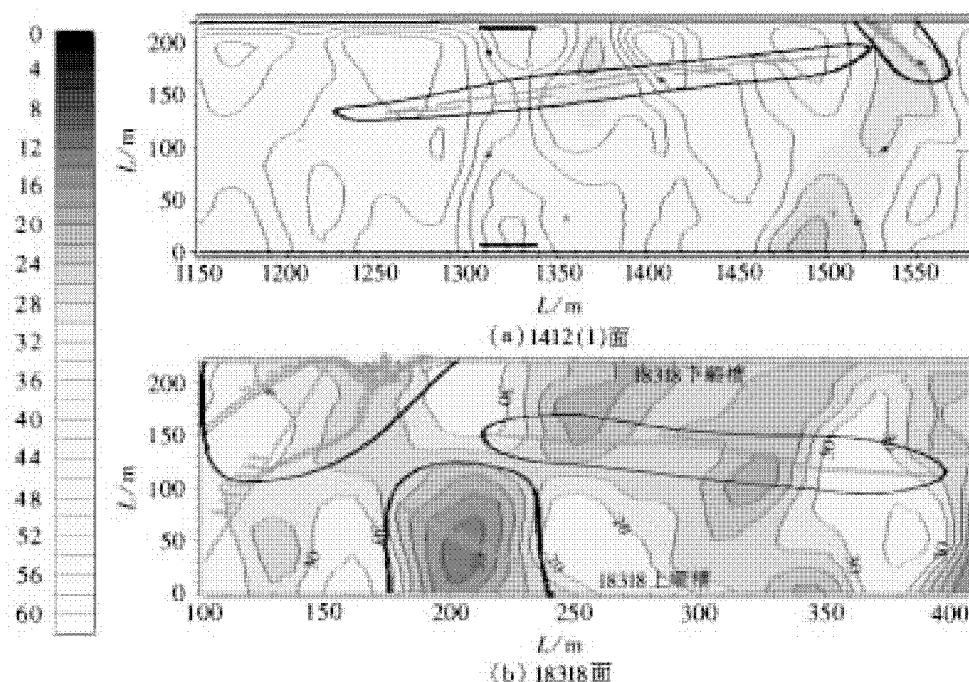


图5 断层走向差异实测场强图

3 结论

1) 淮南矿区探测实践表明,无线电波透视成像对煤层工作面内异常的探查分辨具有一定的差异性,其中煤层厚度、测试工作频率、地质构造特征等是重要的影响因素。由于13-1煤层厚度大,电磁波穿透能力强,其探查效果好;低频段工作频率探查距离大但分辨能力降低,通常选择频率为0.3 MHz,可穿透300 m左右斜长的工作面;走向断层在面内延展长度越大其面内透视阴影范围就越大,降低了对断层特征的分辨程度。因此,实际探查时需根据不同工作面地质条件及其特点进行数据采集、处理与分析,综合运用多种物性参数,取得良好的探查预报效果。

2) 为了精细探查煤层工作面内地质构造及其异常,无线电波透视仪器需要进一步完善,确立有效的电磁波场强及吸收系统异常判定标准,进一步提高透视距离及解释精度。

参考文献:

[1] 张平松,刘盛东,程学丰. 矿井地质安全保障体系中的实用探测技术[J]. 江苏煤炭,2003(2):10-11.

- [2] 程刚,张平松. 矿井工作面地质异常精细探查方法技术研究进展[J]. 工程地球物理学报,2013,10(1):99-106.
- [3] 张平松,刘盛东,李培根. 煤矿井巷间地质构造及其异常多波联合探测技术与应用[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):598-603.
- [4] 李丹,韩德品,石亚丁. 采煤工作面顺煤层透视的电法探测方法[J]. 煤炭学报,2010,35(8):1336-1340.
- [5] 吴荣新,刘盛东,肖玉林. 工作面无线电波透视实测场强成像分析及应用[J]. 岩土力学,2010,31(S1):435-440.
- [6] 梁庆华,马晓莉,宋劲,等. 复杂地质构造煤层坑道透视探测研究[J]. 矿业安全与环保,2010,37(1):15-17.
- [7] 刘焕新,王利宏,刘树才. 坑透高精度CT层析成像测量方法试验研究[J]. 山东煤炭科技,2010(1):103-106.
- [8] 李焕民. 无线电波透视技术在工作面构造煤探测中的应用[J]. 煤炭科学技术,2009,37(3):100-102.
- [9] 王均双,薄夫利,马冲. 坑透CT成像技术在工作面地质构造探测中的应用[J]. 煤炭科学技术,2008,36(10):93-96.
- [10] 肖玉林,吴荣新,张平松. 无线电波透视快速勘探技术及其应用[J]. 中国煤炭地质,2010,22(4):65-68.

(责任编辑:何学华,范 君)

基于 Excel 的钻孔单位涌水量换算

孙尚云¹, 王大设¹, 陈从磊²

(1. 淮北矿业股份公司地测处, 安徽 淮北 235000; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:针对目前利用钻孔单位涌水量评价含水层富水性所存在的问题, 介绍了一种利用抽水试验资料结合 Excel 的函数计算与图表功能进行钻孔单位涌水量换算方法, 在线型绘制、线型的选择判别和综合对比分析的基础上, 只对 1 次或 2 次降深抽水试验数据进行处理, 就可以使单位涌水量换算和含水层富水性评价工作更加完善。该计算过程快捷、简便, 大大提高了运算效率与计算的准确性。

关键词:函数计算; 单位涌水量; 井径换算

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)03-0020-04

Excel – based Conversion of Specific Inflow in Borehole

SUN Shang – yun, WANG Da – she, CHEN Cong – lei

(1. Geological Survey Department, Huaibei Mining Group, Huaibei Anhui 235000, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In view of the existing problems in water – bearing layer evaluation by currently used specific inflow in borehole, a method of conversion of specific inflow in borehole was introduced. On the basis of linear mapping, linear selection criteria and comprehensive analysis of pumping test data with Excel functional calculation and graph function, only processing one or two times drawdown pumping test data, specific inflow conversion and water – rich aquifer evaluation can be more perfect. The calculation process is quick, simple and operational efficiency and calculation accuracy greatly improved.

Key words: function calculation; specific inflow; caliper conversion

煤矿充水含水层富水性等级是矿井水文地质类型划分的重要依据之一, 为准确评价含水层富水性, 要求以口径为 91 mm、抽水水位降深 10 m 的钻孔单位涌水量为标准^[1-2]。若口径、降深与上述不符时, 要进行换算后再比较富水性。为简便计算钻孔单位涌水量, 一般将其概化成四种类型进行计算, 其计算过程涉及到曲线类型的选择、绘制与判断。往往是计算量大, 计算过程复杂, 重复运算多, 运算错误出现频繁等诸多问题。本文通过应用 Excel 的函数计算与图表向导功能实现 $Q=f(s)$ 这些方法, 且综合对比等方法分析换算钻孔单位涌水

量。该计算过程快捷、简便, 提高了运算效率与计算的准确性。

1 钻孔单位涌水量的换算方法

换算钻孔单位涌水量时, 先根据抽水时涌水量 Q 和降深 S 的数据, 用最小二乘法或图解法确定 $Q=f(s)$ 曲线, 根据 $Q-S$ 曲线确定降深 10 m 时抽水孔的涌水量, 再用式 (1) 计算口径为 91 mm 时的涌水量, 最后除以 10 m 便是单位涌水量。

$$Q_{91} = Q_{\text{孔}} \left(\frac{\lg R_{\text{孔}} - \lg r_{\text{孔}}}{\lg R_{91} - \lg r_{91}} \right) \quad (1)$$

收稿日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51174256)

作者简介: 孙尚云 (1974-), 男, 安徽临泉人, 高级工程师, 硕士, 从事水文地质技术工作。

式中: Q_{91} 、 R_{91} 、 r_{91} 分别为孔径 91 mm 钻孔的涌水量、影响半径和钻孔半径; Q_r 、 R_r 、 r_r 分别为孔径 r 钻孔的涌水量、影响半径和钻孔半径。

2 抽水量与降深的曲线类型

在生产实践中,常依抽水试验获得抽水流量 Q 与水位降深 S 的数据,然后利用统计分析方法,确定 Q 与 S 之间关系表达式。

生产实践表明:抽水量与水位降深的关系曲线主要有四种类型,即:直线型、抛物线型、幂函数曲线型以及对数曲线型等四种^[3-4]。

1) 直线型。

$$Q = qS \quad (2)$$

式中: q 为单位涌水量; S 为水位降深; Q 为钻孔抽水流量。

2) 抛物线型。

$$S = aQ + bQ^2 \quad (3)$$

$$S_0 = a + bQ \quad (4)$$

式中: $S_0 = \frac{S}{Q}$; a 、 b 为待定系数。

$$a = \frac{\sum S_0 - b \sum Q}{N} \quad (5a)$$

$$b = \frac{N \sum S - \sum S_0 \sum Q}{N \sum Q^2 - (\sum Q)^2} \quad (5b)$$

3) 幂函数曲线型。

$$Q = n \sqrt[m]{S} \quad (6)$$

其中 n 、 m 为待定系数,对式 (6) 两边取对数,得

$$\lg Q = \lg n + \frac{1}{m} \lg S \quad (7)$$

表1 某矿井对太原组灰岩 1~4 灰抽水试验数据

| 孔号 | 孔径/ mm | 降低水位/ m | 涌水量/ (L·s ⁻¹) | 单位涌水量/ (L·s ⁻¹ ·m ⁻¹) | 渗透系数/ (m·d) ⁻¹ | 影响半径/ m |
|-------|-----------|------------|------------------------------|---|------------------------------|------------|
| 04~07 | 110 | 38.38 | 5.002 | 0.130 3 | 0.579 6 | 292.2 |
| | | 28.28 | 3.894 | 0.137 7 | 0.591 3 | 217.5 |
| | | 18.28 | 2.696 | 0.147 5 | 0.600 6 | 141.7 |

将上述 04~07 孔降低水位 S 、涌水量 Q 数据输入 Excel 表格中,利用 Excel 函数计算功能分别计算出 $S_0 = S/Q$ 、 $\lg S$ 、 $\lg Q$ 的数值(见表 2)。

表2 利用 Excel 数据计算结果

| Q | S | S_0 | $\lg S$ | $\lg Q$ |
|-------|-------|---------|---------|---------|
| 2.696 | 18.28 | 6.780 4 | 1.262 0 | 0.430 7 |
| 3.894 | 28.28 | 7.262 5 | 1.451 5 | 0.590 4 |
| 5.002 | 38.38 | 7.672 9 | 1.584 1 | 0.699 1 |

$$m = \frac{N \sum (\lg S)^2 - (\sum \lg S)^2}{N \sum (\lg S \lg Q) - \sum \lg S \sum \lg Q} \quad (8a)$$

$$\lg n = \frac{\sum \lg Q}{N} - \frac{\sum \lg S}{mN} \quad (8b)$$

式中: N 为抽水试验的落程次数。

4) 对数曲线型。

$$Q = a + b \lg S \quad (9)$$

式中: a 、 b 为待定系数。

$$a = \frac{\sum Q - b \sum \lg S}{N} \quad (10a)$$

$$b = \frac{N \sum (Q \lg S) - \sum Q \sum \lg S}{N \sum (\lg S)^2 - (\sum \lg S)^2} \quad (10b)$$

3 基于 Excel 的钻孔单位涌水量换算

根据上述四种曲线类型,在 Excel 中分别建立 $Q-S$ 直线型、 S_0-Q 抛物线型、 $\lg Q-\lg S$ 幂函数型和 $Q-\lg S$ 对数型数据表,依据数据表生成各类型曲线图形,而后对各图像进行对比分析,选取最合适的曲线类型,计算涌水量。

现以淮北矿区某矿井 04~07 水文试验钻孔抽水试验数据(见表 1)为例,进行钻孔单位涌水量换算。该钻孔对石炭系太原组薄层灰岩含水层一灰~四灰进行抽水试验,钻孔孔径为 110 mm,换算前含水层富水性中等。

1) 利用 Excel 图表向导功能选取“XY 散点图”,点击“折线散点图”,点击“下一步”,而后进入数据编辑框,点击“系列”,在名称栏中输入“ $Q-S$ 曲线”,在 X 值栏中用鼠标拖拽选取数据框 B2~B4,在 Y 值栏中用鼠标拖拽选取数据框 A2~A4(见图 1)。

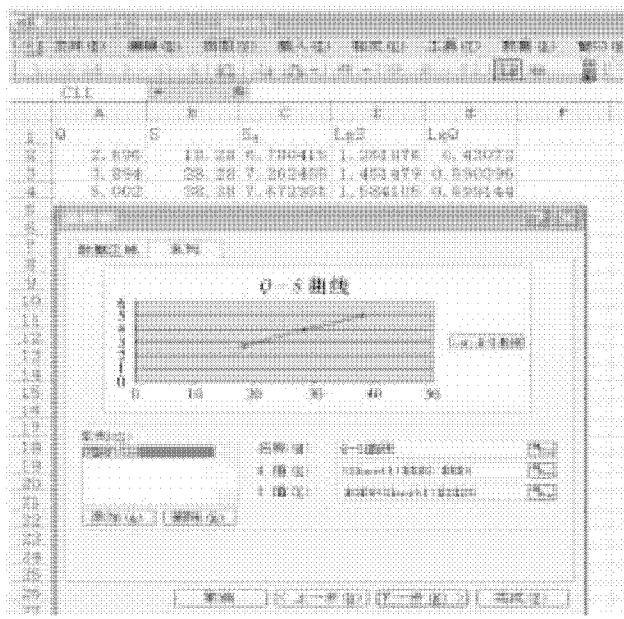
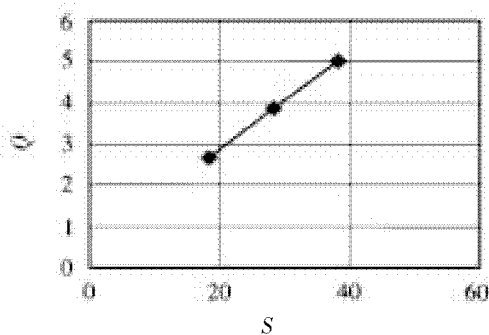
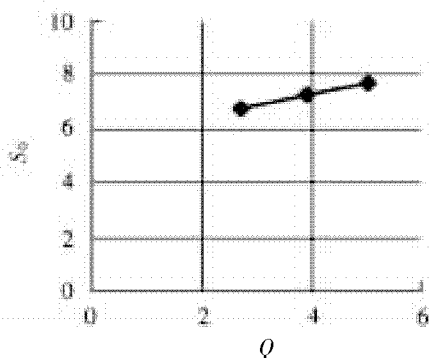
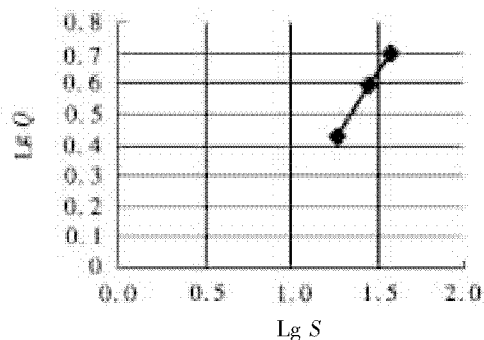
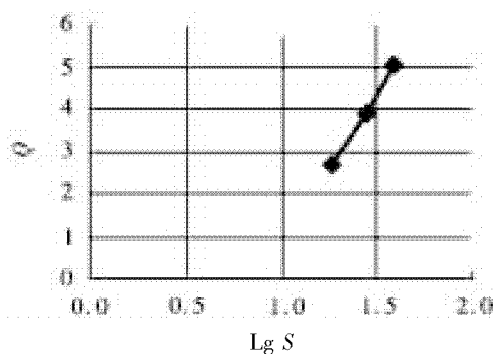


图1 EXCEL 图表向导页面

点击“下一步”,分别命名数值 X 轴为 S , Y 轴为 Q ,点击“完成”,则得到 $Q-S$ 直线型图形(见图2);按照同样步骤操作分别获取 S_0-Q 抛物线型、 $\lg Q-\lg S$ 幂函数型和 $Q-\lg S$ 对数型图形(见图3~图5)。

图2 $Q-S$ 直线型图3 S_0-Q 抛物线型图4 $\lg Q-\lg S$ 幂函数型曲线图5 $Q-\lg S$ 对数型曲线

2) 对4张曲线图进行对比分析,可见 $Q-S$ 曲线和 S_0-Q 抛物线型3点均拟合成一条直线,最接近线性关系,幂函数曲线和对数曲线线性关系相对较差,且幂函数与对数曲线的 $\lg n$ 与 a 值均为负值,与标准曲线图形不符。考虑 $Q-S$ 曲线未过原点,因此确定该曲线类型为抛物线型。

3) 根据式(5a)、式(5b)利用 Excel 函数计算功能分别计算出 a 、 b 值,再取 $S=10\text{ m}$ 代入式(3),仍利用 Excel 函数计算功能,求解水位降深 10 m 时 04~07 钻孔的涌水量 $Q_{\text{孔}}$ 为 1.574 L/s ;再根据式(1),计算出孔径为 91 mm 的钻孔涌水量 Q_{91} 为 1.539 L/s ,再除以水位降深 10 m 即得孔径为 91 mm 的钻孔单位涌水量为 q_{91} 为 $0.1539\text{ L/(s}\cdot\text{m)}$ 。

通过换算得出的单位涌水量较换算前单位涌水量增大,含水层富水性仍为中等。通过钻孔抽水试验资料对比分析,随着钻孔降低水位的减小(由 38.38 m 降为 18.28 m),钻孔单位涌水量有增大趋势,因此解算降深 10 m 时钻孔单位涌水量略有增大较为符合实际,换算结果反映了含水层的真实情况。

4 少于三次降深单位用水量的计算

1) 在野外抽水试验中,由于含水层富水性弱等因素影响,个别钻孔往往只能做一次或二次落程的抽水试验。对于做一次最大落程的抽水试验钻孔,可视其为直线型进行单位涌水量的换算;对于

二次降深的抽水试验钻孔,则根据 $Q-S$ 曲线判定其是否通过原点,若通过原点视其为直线型,否则视其为抛物线型来计算单位涌水量。

2) 两种以上曲线类型较接近线性关系的综合判别。对于两种以上曲线类型较接近线性关系难以判定时,则可利用曲度法进行综合分析判别,其表达式为

$$n = \frac{\lg S_1 - \lg S_2}{\lg Q_2 - \lg Q_1} \quad (11)$$

当 $n=1$ 时,为直线;当 $1 < n < 2$ 时,为幂函数曲线;当 $n=2$ 时,为抛物线;当 $n > 2$ 时,为对数曲线。如 $n < 1$,则抽水资料不可靠。

同时也可结合含水层的渗透性、含水层厚度、含水层补给条件等进行综合分析判定。对于含水层渗透性好,厚度相对较大,补给源相对较差的为幂函数型曲线;对于地下水补给条件差,处在相对隔离的含水岩体和含水构造区的为对数曲线^[5-6]。

5 结论

1) 单位涌水量换算实质上是对这一重要水文地质信息标准化、规范化,使之能在相同的标准下对含水层的富水性进行合理地评价,所以在评价含水层富水性前,单位涌水量必须按文献[1]的标准进行换算。Excel 的函数计算与图表导向功能计算过程快捷、简便,并实现程序化运算,大大提高了运算效率与计算的准确性。

2) 进行单位涌水量换算时最好作 3 次降深抽水。因为只有 3 次降深才能判断 $Q-S$ 曲线是什么类型。因此钻孔抽水试验设计必须符合抽水试验规程,并严格按规程操作。

3) 在引用单位涌水量(q)值时,应同时说明对应的降深和抽水量。如果降深值太小或太大,可能导致计算的 q 值偏差很多,从而导致人们对含水层富水性产生错误的认识。

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定[M]. 北京:煤炭工业出版社,2009: 71-72.
- [2] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定释义[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2009:227-236.
- [3] 房佩贤,卫中鼎,廖资生. 专门水文地质学[M]. 北京:地质出版社,1996:228-230.
- [4] 柴登榜. 矿井地质工作手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,1986:269-271.
- [5] 刘埔,孙亚军,黄鑫磊,等. $Q-S$ 曲线的 MATLAB 拟合单位涌水量换算方法[J]. 煤矿安全,2011, 42(8):11-14.
- [6] 薛建坤,许进鹏,宋淑光. 钻孔单位涌水量换算的探讨[J]. 煤炭技术,2011,30(8):261-262.

(责任编辑:何学华,范 君)

采动煤岩体能量区划及动力灾害防治分析

张向阳

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:基于动力灾害发生机理研究的基础上,分析了采场大范围围岩系统能量控制下的演化机制,旨在为煤矿动力灾害防治提供理论依据。根据采场围岩的变形破坏分布特征和能量在采场围岩中的赋存状态及活动特征,将支承压力范围内围岩分为能量耗散释放区、能量激活敏感区和能量稳定存储区,进一步分析了围岩应力分布与能量分布的关系及影响因素,对能量区划特征和系统能量构成进行了阐述,分析了不同能量区发生变形破坏失稳的能量条件,指出能量激活敏感区是防治煤岩体动力灾害的重点区域,为了避免煤岩体在采动或外部扰动影响下发生动力灾害,应采取措施在静态变形的情况下扩大能量释放耗散区区域面积,减小能量激活敏感区区域面积。尤其是随着采场的持续推进,采场结构不断发生变化,上覆岩层荷载将发生周期性改变,围岩能量区划特征及其激活条件也将受到影响,围岩静态能量被激活后,将表现为动态形式的突变,不同的采场结构参数对应的采场围岩系统状态发生动力灾害的危险性程度不同。

关键词:采动煤岩体;能量区划;动力灾害;失稳分析

中图分类号:TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)03-0024-06

Analysis of Energy Regionalization in Coal and Rock Body Influenced by Mining and Dynamic Disasters Prevention

ZHANG Xiang-Yang

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

Abstract: Based on the mechanism of power disaster research, mechanism of stope surrounding rock system evolution under energy control was analyzed, in order to provide theoretical basis for dynamic disaster prevention in coal mines. According to characteristics of the surrounding rock deformation destruction distribution and existence status of energy in stope surrounding rocks and its behavior characteristics, the surrounding rocks in support pressure area are divided into energy dissipation zone, energy activation sensitive zone and steady energy storage zone. Stress distribution in surrounding rocks and relationship between the energy distribution and its influencing factors were analyzed. The characteristics of energy zoning and constitution of system energy were described. Energy conditions for instability of deformation destruction in different energy zones were analyzed. It was pointed out that energy activation sensitive zone is the key area for dynamic disaster control in coal and rock bodies. In order to avoid dynamic disaster occurrence under influence of mining or external disturbance, measures should be taken to expand energy dissipation zone in the case of static deformation, and decrease energy activation sensitive zone. Especially with stope continuous advancement and the stope structure changing, periodic change of the overlying strata load occurs, the energy zoning characteristics in surrounding rocks and its activation condition are affected. Activated static energy in rocks perform as dynamic mutation, different stope structure parameters cor-

收稿日期:2013-04-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2010CB226806);安徽省高等学校优秀青年人才基金资助项目(2010SQRL044ZD);安徽省高等学校省级自然科学基金资助项目(KJ2013A098)。

作者简介:张向阳(1980-),男,河南睢县人,讲师,博士,从事矿山压力与控制及煤矿动力灾害方面的教学和研究工作。

responding surrounding rocks system status results in different degrees of dynamic disaster occurrence risk.

Key words: coal and rock body influenced by mining; energy regionalization; dynamic disasters; instability analysis

地下煤岩体作为煤矿采掘主要对象,其物理力学性质不同,相应的力学行为及表现形式也不同。通常受到采掘活动的影响,在巷道或工作面周围煤岩体中形成一定的矿山压力现象,其应力分布特征、能量孕育演化规律在某种程度上引起一定范围内的围岩发生拉、压或剪破坏。对于采场大范围围岩而言,受到上覆岩层荷载作用和采掘活动的影响,围岩稳定性问题显得愈加复杂,对于一定结构范围的煤岩体来说,部分区域发生破坏不一定导致围岩系统的整体失稳,而围岩整体失稳时,必定会有部分区域煤岩体发生破坏,其中的内在联系可以理解为围岩破坏失稳是从量变到质变的转化,这种转化往往表现为一种突变,其本质是存储在煤岩体内的能量耗散释放的反映^[1-2]。煤岩体被视为耗散结构^[3],其性能、结构、环境及过程发展都与能量有密切的关系,能量控制着结构的稳定性和过程的进行,所处环境是结构变化、过程发展的外因^[4-5]。

文献[6]分析了地下工程开挖过程中原岩弹性应变能、隧道四周围岩应变能的释放与积聚情况、围岩应变能转移条件、地下工程开挖前方的围岩能量变化以及该能量的突然变化,指出围岩的能量达到该点的极限储存能时,多余的能量将释放,造成塑性变形或破碎,并自动向深部转移。如果释放的能量特别大,又不能向深部转移,将造成岩石冲击。文献[7]根据岩体动力破坏实际释放的能量远大于诱发能量这一事实,提出了岩体动力破坏真正需要消耗的总是单向应力状态的破坏能量,及最小能量原理。

另外,文献[8]运用能量原理研究了冲击地压的分类,并从力学角度解释了冲击地压能量释放机制,最后从降低煤岩体体积聚能量的角度出发,提出了防治冲击地压发生的主要方法;文献[9-10]从能量的角度出发,分析研究了岩石的变形破坏过程

的能量耗散及能量释放特性;文献[11]应用能量耗散的基本原理,求解了弹性损伤的等效应变和损伤演化方程,建立了损伤屈服准则;文献[12]对巷道开挖及形成支护结构后煤体内的能量变化进行了研究,分析了均匀围压下圆形巷道松动区、弹性区及原岩应力区的能量积聚、释放及转移情况,提出了巷道冲击的状态方程和能量判据;文献[13]根据煤岩体在变形过程中宏细观能量耗散,得出了煤岩体裂纹尖端拉应力过大而失稳扩展是冲击地压发生的根本原因,定义了弹性能衰减度和塑性能变化率;文献[14]系统地研究了岩爆孕育发生机理,分析岩爆的影响因素,提出了合理的倾向性指标;文献[15]研究了冲击地压孕育过程中“煤-围岩”系统能量耗散特征和系统内熵的变化,初步建立了基于非平衡态热力学的冲击地压失稳判断方法;文献[16]分析了用能量的方法研究岩石破坏问题的合理性,指出能量是岩石破坏的原动力。

综上,现有研究成果从岩石的强度变化、破坏特征、能量耗散角度出发,分析了能量在岩石变形破坏过程中的作用及演化规律,为进一步深入分析不同条件下岩体失稳提供了理论依据。

1 采动围岩系统能量演化机制分析

对于由无数煤岩块组成、受采掘影响的大范围围岩系统来说,随着采场的持续推进,围岩系统经历一个稳定—失稳—趋于稳定—再失稳状态的反复动态演化过程。根据煤岩体单元变形破坏过程能量分析,大范围煤岩体系统在其演化过程中,其某种结构的形成及动态演化过程的进行都涉及能量的变化,且能量在其演化过程中起主要控制作用。采场围岩物理力学性能、系统结构、地质及技术环境、动态演化过程与能量之间的相互联系如图1所示。

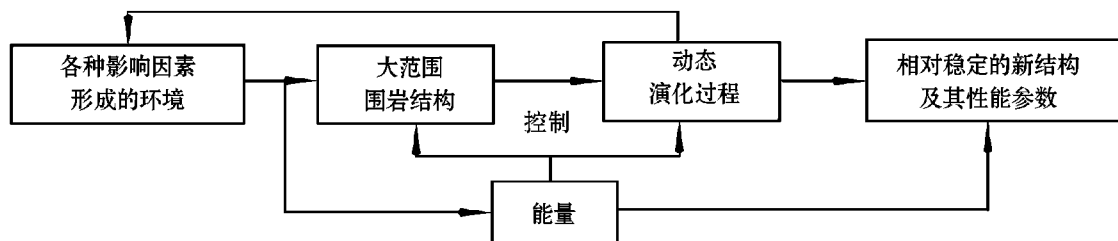


图1 采场围岩煤岩体动态演化流程图

由图1可知,各种影响因素形成的开采环境作用于采场大范围围岩,随着地下煤体的不断采出及围岩的运动,围岩发生一个稳定—失稳—趋于稳定—再失稳的动态循环演化过程,从而产生新的相对稳定的新应力分布形态及其状态下的围岩性能参数。同时,采场围岩动态演化过程的结果也会影响各种影响因素形成的环境,环境与围岩之间进行着能量的交换,而系统能量大小又直接控制着大范围围岩应力壳的稳定性和其动态演化过程的进行。

由于大范围煤岩体存在有应变硬化和应变软化两种变形性质的交互组合作用现象,应变硬化作用和应变软化作用将外部传递给采场围岩体系的能量转变为煤岩体内部应变能,或将煤岩体内部的高应变能转变为其他形式的物理能或化学能,大范围围岩系统的性能、形态、环境、过程和能量之间的相互关系及演化过程,形成了采动煤岩体系统的能量积聚和释放机制,也是采场围岩发生动力灾害的根本所在。

2 采动煤岩体能量区划分析

根据煤岩块变形破坏及煤岩系统的能量分析和采动煤岩体变形破坏分布特点,按照能量在采场围岩中的赋存状态及活动特征,将支承压力范围 L_f 内围岩分为能量耗散释放区、能量激活敏感区和能量稳定存储区,其宽度范围分别用 r_a 、 e_a 和 s_a 表示(见图2)。

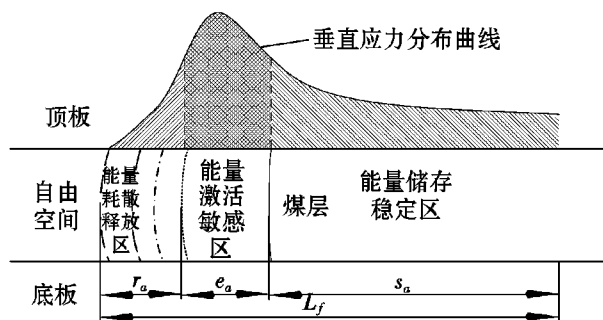


图2 采动围岩能量分布区划图

能量耗散释放区:该区为煤岩体自由表面附近一定宽度的区域,区内存在较大的变形破坏、明显的宏观裂隙和众多微观裂纹。在巷道开挖或煤岩采出的过程中,该区经历释放能量、耗散能量和吸收能量的一个复杂过程,之间相互联系又相互影响。在巷道开挖或煤层采出初期,该区以释放耗散能量为主、吸收能量为辅;成巷后或煤层未采阶段,该区以吸收能量为主,释放耗散能量较少;在煤层

持续开采期间,巷道该区围岩以吸收能量为主,煤壁附近该区围岩以释放耗散能量为主。

能量激活敏感区:该区为距离煤岩体自由面有一定深度的区域,区内煤岩体较完整,承受上覆岩层的荷载和内部应力较高,此区域煤岩体一部分处于峰后塑性强化阶段,一部分处于峰前弹性弱化阶段。此区域储存有较高的能量,而对于煤岩体本身而言,该能量又是其所能承受的极限能量,一旦受到外部扰动和荷载的升高,该区部分煤岩体可能会发生缓慢损伤破坏或突然变形破坏,转化为能量释放耗散区或结构性失稳演化。

能量储存稳定区:该区为距离煤岩体自由面较深的一定区域,且该区域宽度较大,此区域内的煤岩体处于线弹性受力阶段,所受荷载及应力低于其本身所承受的极限荷载,受采动及外部扰动影响程度小。在受到采动影响或外部扰动情况下,该区域应力升高、能量增加,可存储吸收能量且相对稳定。

能量释放耗散区、激活敏感区与储存稳定区之间相互联系又可以相互演化。当受采动或外部扰动干扰时,煤岩体承受的荷载增加并吸收能量,此时能量激活敏感区能量增加超过极限能量而被激活。当激活能量较小时,部分能量激活敏感区在静态的变形下会转化为释放耗散区;当激活能量较大时,激活的能量克服能量释放耗散区的抵抗,煤岩体就会由静态的变形变为动态的运动,甚至引起煤岩体动力灾害。能量储存稳定区部分区域在能量升高到某种程度时,会逐渐转化为能量激活敏感区。

因此,能量激活敏感区是防治煤岩体动力灾害的重点区域,为了避免煤岩体在采动或外部扰动影响下发生动力灾害,应采取措施在静态变形的情况下扩大能量释放耗散区区域面积,减小能量激活敏感区区域面积。

3 应力分布与能量区划联系及影响因素

3.1 应力分布与能量区划的关系

由采掘空间自由面向煤岩体深部,在应力作用下一般分为破坏区、塑性区和弹性区。破坏区内应力较低,煤岩体表现为由原来的三向受力向双向和单向受力演化,区内存在大量宏观裂隙和众多微观裂纹,在裂隙和裂纹的演化过程中释放和耗散能量;塑性区内应力逐渐升高,宏观裂隙很少有大量微观裂纹,能承受较高应力,也能存储较多和耗散掉一部分能量,如果存储的能量达到一定程度时,

裂纹扩展形成宏观裂隙,从而演化成破坏区;弹性区内煤岩体某种情况下不会发生损伤破坏现象,能承受较高应力和存储大量能量,当存储的能量足以使其发生较大变形时就会发生塑性变形,从而演变成弹性区。

因此,从围岩的能量区划和受力分区变形特征可知,破坏区和应力较低塑性区为能量释放耗散区,应力较高塑性区和应力较高弹性区为能量激活敏感区,应力较低且高于原岩应力的弹性区为能量储存稳定区。

3.2 能量区划的影响因素

由于围岩煤岩体能量区划的能量释放耗散区、激活敏感区和储存稳定区与破坏区、塑性区和弹性区有密切的联系,那么,影响围岩能量区划的因素主要有煤岩的物理力学性质、地质特征、开采技术条件、采场结构参数等。

煤岩体的物理力学性质主要影响能量区划内的表现形式进而影响其区域大小。对于表现为强冲击倾向性的煤岩体而言,能量释放耗散区区域较小,激活敏感区区域较大,随着煤岩体冲击倾向性的减弱,释放耗散区逐渐增大,激活敏感区域与储

存稳定区之间也有协调。

在同类煤岩物理力学性质的条件下,地质特征、开采技术条件及采场结构参数等主要影响能量区划间的分布特征,进而影响各区表现形式和能量激活条件。尤其是随着采场的持续推进,采场结构不断发生变化,上覆岩层荷载将发生周期性改变,围岩能量区划特征及其激活条件也将受到影响,围岩静态能量被激活后,将表现为动态形式的转化。

4 采动煤岩体能量构成及其失稳条件

4.1 采动煤岩体能量构成及其特点

对于整个采场大范围围岩系统而言,假设在某种采场结构形态下,上覆岩层存储及转移作用在采场煤层的能量为 U_R ,煤层存储的能量为 U_M ,煤岩体发生损伤及塑性变形耗散的能量为 U_S ,煤岩体所承受的极限能量为 U_J ,煤岩体发生破坏释放的能量为 U_F ,外界及采动对围岩系统的扰动能量为 U_D ,这些不同形式的能量在其演变过程中,遵循煤岩体受力变形破坏的能量耗散及能量释放转化机理,而其自身又有不同的含义(见图3)。

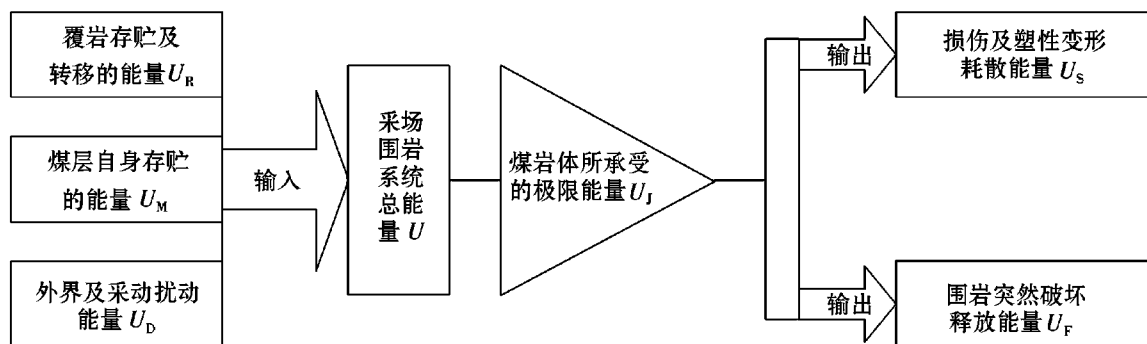


图3 采场围岩系统能量构成

采场结构参数变化引起上覆岩层存储及转移作用在采场煤层的能量 U_R 、采场结构本身储存的能量 U_M 及所承受的极限能量 U_J 发生相应改变,影响采场结构参数变化的因素即为影响上述三种形式能量的因素,如煤柱宽度、采高、埋深、工作面尺寸、开采方法、推进速度等。而采场结构参数改变又与采场围岩宏观应力场的力学特征及几何形态有密切联系。

煤岩体发生损伤及塑性变形耗散的能量 U_S 和破坏释放的能量 U_F 与其变形破坏的特点有关,缓慢变形时,能量耗散释放率较低,快速或突然变形破坏

时,能量耗散释放率较高,变形破坏程度较小时,释放能量少,变形破坏程度较大时,释放能量多。

对于外界或采动对围岩系统的扰动能量 U_D ,多是煤层开采时的动压影响或其他采掘爆破活动引起上覆岩层几何形态的变化及结构的失稳、岩层的破断等,从而造成能量的转移或释放,引起能量的扰动效应,如采掘的机械振动、顶板破断来压、岩层运动等。

4.2 采动围岩失稳能量条件

由采动煤岩体能量构成及其特点可知,煤岩体

主要受上覆岩层作用转移到采场煤层的能量 U_R 、煤层自身存储的能量 U_M 、煤岩体发生损伤及塑性变形耗散的能量 U_S 、煤岩体所承受的极限能量 U_J 、煤岩体发生破坏释放的能量 U_F 、外界及采动对围岩系统的扰动能量 U_D 影响。

在能量耗散释放区,煤岩体存在大量宏观裂隙和细观裂纹,受到顶底板的夹持和深部煤岩体的推力作用,如果在自由空间一侧提供的反力不够大,该区将发生向自由空间变形移动,裂隙和裂纹发生扩展演化消耗能量。该区吸收的能量主要来自上覆岩层存储及转移作用于该区的能量 U_{Rr} 、能量激活敏感区转移的部分能量 U_{ez} 和作用在该区域的部分外界扰动能量 U_{Dr} ,输出的能量主要用于该区内部裂隙和裂纹的扩展 U_{Sr} 及其伴随其他能量的释放 U_{Fr} 。

在能量激活敏感区,煤岩体存在少量细观裂纹,主要受到顶底板的夹持和能量耗散释放区的阻力抵抗作用。在能量耗散释放区和激活敏感区都受到顶底板的夹持,这种夹持表现出覆岩压力对煤岩体的做功,同时又表现为顶底板对煤岩体及煤岩体内部的摩擦阻力抵抗煤岩体的移动变形。

因此,判断采动围岩是否发生变形失稳必须考虑顶底板及煤体内部的摩擦阻力影响,而这种阻力有助于提高某一区域内的煤岩体所承受的极限能量 U_J 。

由于能量存储稳定区对采动围岩的失稳影响作用有限,现分别分析能量耗散释放区和激发敏感区的失稳条件。

1) 能量耗散释放区失稳条件。由能量耗散释放区各能量相互转化机理可知,耗散释放区的能量失稳条件为

$$U_{Rr} + U_{Mr} + U_{Dr} + U_{ez} - U_{Sr} - U_{Fr} \geq U_{Jr} \quad (1)$$

式中: U_{Jr} 为耗散释放区的极限能量。

2) 能量激活敏感区失稳条件。由能量激活敏感区各能量相互转化机理可知,激活敏感区的能量失稳条件为

$$U_{Re} + U_{Me} + U_{De} + U_{sz} - U_{ez} - U_{Se} - U_{Fe} \geq U_{Je} \quad (2)$$

式中: U_{Je} 为激活敏感区的极限能量; U_{ez} 为激活敏感区向耗散释放区的能量转移; U_{sz} 为存储稳定区转移到激活敏感区的能量。

3) 能量存储稳定区失稳条件。由于存储稳定区距离自由空间有一定距离,只有耗散释放区和激活敏感区失稳,存储稳定区一般不会发生失稳现

象,而会发生能量的转移,即当激活敏感区发生失稳时,会从存储稳定区转移部分能量 U_{sz} 。在能量存储稳定区没有能量的耗散和释放,只有能量的转移或转化。

综上分析,由能量耗散释放区和激活敏感区的能量失稳条件可知,煤岩体发生冲击地压的整体失稳条件为

$$\begin{cases} U_R + U_M + U_D - U_S - U_F \leq U_J & \text{系统稳定} \\ U_R + U_M + U_D - U_S - U_F > U_J & \text{系统不稳定} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} U_R = U_{Rr} + U_{Re} + U_{Rs} \\ U_M = U_{Mr} + U_{Me} + U_{Ms} \\ U_D = U_{Dr} + U_{De} + U_{Ds} \\ U_S = U_{Sr} + U_{Se} \\ U_F = U_{Fr} + U_{Fe} \\ U_J = U_{Jr} + U_{Je} \end{cases} \quad (4)$$

采场围岩煤岩体变形破坏分为缓慢变形破坏和瞬间突然破坏两种现象。对于缓慢变形破坏,主要体现在激活敏感区缓慢向能量耗散释放区转化,能量存储稳定区缓慢向激活敏感区转化;对于瞬间突然破坏,是系统能量达到某一临界状态下,受采矿或其他外界扰动影响,能量突然释放导致围岩系统发生大面积破坏而引起的冲击地压等动力灾害。

对于采场煤体及煤柱和上覆岩层组成的围岩系统,能量区划随着采场结构尺寸及覆岩结构形态的改变产生动态变化,各区能量的积聚、耗散及释放是一个动态演化过程。不同的采场结构布置,会改变能量区划相对位置,其围岩失稳的危险程度也不同,这与不同采场结构情况下各区域的能量分布特点及自身特性有关。

5 结论

本文根据采动煤岩体能量演化特点,分析了采场大范围围岩系统能量控制下的演化机制,得出在采场围岩动态的持续演化过程中,表现上是围岩受力状态变化引起的,而究其本质是围岩系统能量起着关键的控制作用。

根据采场围岩的变形破坏分布特征,按照能量在采场围岩中的赋存状态及活动特征,将支承压力范围内围岩分为能量耗散释放区、能量激活敏感区和能量稳定存储区,在同类煤岩物理力学性质的条件下,地质特征、开采技术条件及采场结构参数等

主要影响能量区划间的分布特征,进而影响各区表现形式和能量激活条件。

进一步分析了围岩应力分布与能量分布的关系及影响因素,尤其是随着采场的持续推进,采场结构不断发生变化,上覆岩层荷载将发生周期性改变,围岩能量区划特征及其激活条件也将受到影响,围岩静态能量被激活后,将表现为动态形式的转化;不同的采场结构参数对应的采场围岩系统状态发生动力灾害的危险性程度不同。

根据采动煤岩体的能量区划特征和系统能量构成,分析了不同能量区发生变形破坏失稳的能量条件。指出能量激活敏感区是防治煤岩体动力灾害的重点区域,为了避免煤岩体在采动或外部扰动影响下发生动力灾害,应采取措施在静态变形的情况下扩大能量释放耗散区区域面积,减小能量激活敏感区区域面积。

参考文献:

- [1] 窦林名,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001:45.
- [2] 谢广祥. 综放面及其围岩宏观应力壳力学特征研究[J]. 煤炭学报,2005,30(3):309-313.
- [3] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京:清华大学出版社,1986:30.
- [4] 肖纪美,朱逢吾. 材料能量学——能量的关系、计算和应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,1999:40.
- [5] J H 阿吉里斯. 能量原理与结构分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1999:68.
- [6] 华安增. 地下工程周围岩体能量分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(7):1 054-1 059.
- [7] 赵阳升,冯增朝,万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1 781-1 783.
- [8] 王克杰,李永明,李仕明,等. 能量分析在冲击地压发生过程中的应用[J]. 焦作工学院学报,2004,23(5):334-337.
- [9] 谢和平,彭瑞东,鞠杨,等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2 603-2 608.
- [10] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3 003-3 010.
- [11] 李树忱,李术才,朱维申,等. 能量耗散弹性损伤本构方程及其在围岩稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2 646-2 653.
- [12] 陈国祥,窦林名. 均匀围压下圆形巷道开挖孕冲能量分析[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(1):27-31.
- [13] 姚精明,何富连,徐军,等. 冲击地压的能量机理及其应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(3):808-813.
- [14] 刘滨. 基于最小耗能原理的岩爆孕育发生机理研究[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2009.
- [15] 赵毅鑫,姜耀东,田素鹏. 冲击地压形成过程中能量耗散特征研究[J]. 煤炭学报,2010,35(12):1 979-1 983.
- [16] 赵忠虎,鲁睿,张国庆. 岩石破坏全过程中的能量变化分析[J]. 矿业研究与开发,2006,26(5):8-11.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

氮化改性的 SAPO-34 分子筛的 MTO 性能研究

薛茹君, 陈春阳, 周敏, 陈淑芬

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了提高 SAPO-34 分子筛的低碳烯烃选择性及抗结焦性能, 以三乙胺为模板剂, 在正磷酸-拟薄水铝石-氢氟酸体系中合成了小粒径 SAPO-34 分子筛; 以氨为氮源, 采用高温氮化法对分子筛进行了改性。以 XRD、 NH_3 -TPD、BET 等手段对分子筛样品进行了表征; 在固定床反应器上测定了 SAPO-34 分子筛对 MTO 反应的催化性能。结果表明, 添加氢氟酸有利于提高 SAPO-34 分子筛的结晶度, 并且得到小而均匀的分子筛, 其比表面积、孔体积分别由 $318 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $0.187 \text{ cm}^3/\text{g}$ 增大到 $456 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $0.294 \text{ cm}^3/\text{g}$; 经氮化改性后 SAPO-34 分子筛表面的酸强度及酸量减小, 从而使其催化性能得到改善, 烯烃选择性提高(乙烯+丙烯总选择性由 70.91% 提高到 85.55%), 尤其是乙烯选择性提高(乙烯/丙烯由 1.58 提高到 1.87), 催化剂的抗积碳性能提高($>6.5 \text{ h}$), 催化剂寿命也延长($>6.5 \text{ h}$)。

关键词: 高温氮化; SAPO-34 分子筛; 改性; MTO 催化性能

中图分类号: O643:TQ426

文献标志码: A

文章编号: 1672-1098(2013)03-0030-04

Study on Modification and Methanol-to-Olefins Performance of SAPO-34 Molecular Sieve

XUE Ru-jun, CHEN Chun-yang, ZHOU Min, CHEN Shu-fen

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

Abstract: With triethylamine as template agent, small particle size SAPO-34 zeolite was synthesized in phosphoric acid-quasi boehmite-hydrofluoric acid system. Then with ammonia as the nitrogen source, high-temperature nitrifying method was used to modify the molecular sieve. The molecular sieves samples were characterized by XRD, NH_3 -TPD, BET and other means. The catalytic performance for MTO reaction of SAPO-34 zeolite was determined in a fixed-bed reactor. The results showed that addition hydrofluoric acid in the synthesis system is helpful to improve the crystallinity of SAPO-34 zeolite and to obtain the small uniform molecular sieve which specific surface area and pore volume increases either. After nitrifying modification, the acid strength and the acid site number of SAPO-34 molecular zeolite are reduced, so that the catalytic performance of the molecular sieve is improved. As the result the olefin selectivity of the zeolite catalyst increases (from 70.91% to 85.55%), especially the ethene selectivity raises (the ratio of selectivity of ethene to that of propene increases from 1.58 to 1.87), and the anti-coking performance of the catalyst also improve, thus the catalyst's life is extended.

Key words: high-temperature nitrification; SAPO-34 zeolite; modification; MTO catalytic performance

近年来, 甲醇制烯烃(MTO)和甲醇制丙烯(MTP)技术成为关注焦点。MTO技术采用 SAPO-34 分子筛为催化剂, 使甲醇转化为乙烯和丙烯。

催化剂的孔道和表面酸性决定其反应性能, SAPO-34 分子筛具有较小的孔道及中等酸性, 乙烯和丙烯总选择性(碳基)可达 80% 左右, 碳四以上的

较重组分的收率较低,但该催化剂较易结焦失活,通常情况下单程寿命不到5 h^[1]。因此,延长SAPO-34分子筛的单程寿命是研究工作的重点。已有的研究表明,分子筛的表面酸性(包括酸种类、酸强度和酸量)和晶粒尺寸是影响SAPO-34单程寿命的重要因素。众所周知,表面酸性强易引起催化剂积碳失活,降低表面酸性可以提高催化剂的抗积碳性能。此外,由于SAPO-34分子筛的孔道较小,内扩散阻力的存在使得乙烯易在分子筛表面发生齐聚,降低了乙烯的选择性,并增加了催化剂的结焦失活^[2]。减小SAPO-34分子筛的粒径,降低内扩散阻力,可以提高其乙烯选择性,增加抗结焦能力。因此,目前主要是从表面酸性和孔道尺寸两个方面着手进行SAPO-34分子筛的改性研究。刘红星等^[3]在SAPO-34分子筛合成体系中加入HF,得到了高结晶度的小晶粒SAPO-34分子筛。杨德兴等^[4]则采用分步晶化方法合成了小晶粒SAPO-34分子筛。关新新等^[5]通过对SAPO-34分子筛进行氮化改性,调变其表面酸性,适当地增加其碱性,氮杂化处理后的SAPO-34分子筛在MTO反应中呈现高选择性和高稳定性等催化性能。

本文为提高SAPO-34分子筛的低碳烯烃选择性及抗结焦性能,调变其表面酸性和孔道结构,采用了氢氟酸-三乙胺合成体系以及氮杂化处理对SAPO-34分子筛进行改性,以获得更加优异的甲醇制烯烃催化性能。

1 实验部分

1.1 SAPO-34分子筛的合成

按文献[3]方法合成SAPO-34分子筛,将分子筛原粉在550℃下,经5.0 h烧去模板剂。分子筛氮化改性在管式炉中进行,氮化开始前先用NH₃置换炉管中的抽空气(具体描述抽空的程度,如真空度等)30 min,然后控制NH₃流速为30 mL/min,在一定温度下氮化一段时间。氮化结束后,抽空炉管中用N₂置换炉管中的NH₃,并在通入N₂状态下冷却样品。

1.2 分子筛的表征

采用日本岛津XRD-6100型X射线衍射仪进行物相分析:CuK α 射线,石墨单色器,管电压40 kV,管电流30 mA,2 θ 扫描范围为5°~35°,扫描速率为4°/min。

采用美国Micromeritics ASAP2000比表面测定仪测定比表面积;粒度及粒度分布用西安明克斯BT-9300S激光粒度分析仪分析。

NH₃-TPD在天津先权TP-5000多用吸附仪上测定。分子筛样品活化处理后,冷却至100℃吸附NH₃气35 min,再用N₂气流吹扫20 min,以脱除样品表面物理吸附的NH₃;然后以10℃/min的速率升温至600℃,此过程中由色谱工作站采集NH₃脱附数据,得到NH₃-TPD谱图。CO₂-TPD测试采用热重检测方法,将样品在真空下加热处理,冷却至室温后吸附CO₂,达到平衡后,用高纯He吹扫脱除物理吸附至恒重,程序升温脱附至平衡,记录脱附曲线。

1.3 SAPO-34的MTO反应催化性能评价

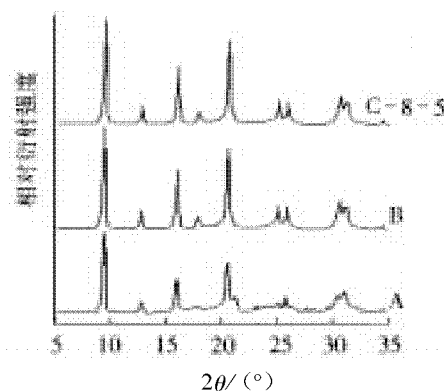
SAPO-34分子筛催化性能评价在固定床反应器上进行,催化剂装填量0.3 g,反应温度450℃,甲醇质量空速1 h⁻¹,氮气为稀释气体,气态甲醇与氮气的体积比为1:4。反应产物由在线气相色谱进行分析。

2 结果与讨论

2.1 合成的SAPO-34分子筛的表征

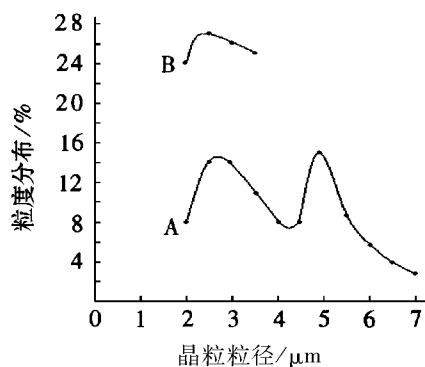
模板剂的选择对SAPO-34分子筛的合成有很大影响。以三乙胺为模板剂合成SAPO-34分子筛虽然比TEAOH模板剂价廉易得,但单一三乙胺模板剂合成的SAPO-34分子筛结晶度低,且易结焦。为此选用HF-三乙胺合成体系制备SAPO-34分子筛,晶化液配比为1.0Al₂O₃:1.0P₂O₅:

0.6SiO₂:3.0Et₃N:60H₂O:0.03HF,在200℃自生压力下静止晶化60 h。



A: 三乙胺为模板剂; B: HF-三乙胺为模板剂

图1 分子筛样品的XRD图谱



A: 三乙胺为模板剂; B: HF - 三乙胺为模板剂

图 2 分子筛样品的晶粒粒度分布

图 1 给出了分子筛样品的 XRD 图谱, 图 2 给出了其晶粒粒度分布, 其中样品 A 以三乙胺为模板剂合成, 样品 B 以 HF - 三乙胺为模板剂合成, 将样品 B 在 800 °C 氮化 5h 后记作 C - 8 - 5。由图 1 可见, 样品 A 的衍射峰强度总体偏低, 说明样品 A 的结晶度偏低; 样品 B 不仅衍射峰的强度高, 而且 $2\theta = 26^\circ, 31^\circ$ 处的双峰相对于样品 A 而言, 变得清晰, 同时峰强度增加, 这表明合成分子筛时加入氢氟酸有利于提高 SAPO - 34 分子筛的结晶度。由图 1 可进一步看出 800 °C 氮化后分子筛能够保持完好的晶体结构。从图 2 看出, 样品 B 的粒度分布范围很窄, 为 2.0 ~ 3.5 μm ; 而样品 A 的粒度分布范围宽, 从 2.0 μm 到 7.0 μm , 且有两个粒度分布中心, 45% 以上是粒径大于 4 μm 的大晶粒。这说明, 氟离子的存在消除了凝胶中的大核中心, 其原因可能是氢氟酸与铝源、硅源形成螯合物, 改变晶核形成的速率和数量。晶核数量多利于形成粒度小而均匀的晶体。合成的 SAPO - 34 分子筛的比表面积、孔体积如表 1 所示。

表 1 氮化前后 SAPO - 34 分子筛样品的比表面积与孔体积

| 样品 | 氮化条件 | 比表面积 (BET) / ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) | 孔体积 / ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) |
|------------|-------------|--|--|
| A | - | 318 | 0.187 |
| B | - | 456 | 0.294 |
| C - 7 - 5 | 700 °C, 5h | 447 | 0.281 |
| C - 7 - 10 | 700 °C, 10h | 440 | 0.285 |
| C - 8 - 5 | 800 °C, 5h | 425 | 0.267 |
| C - 8 - 10 | 800 °C, 10h | 424 | 0.275 |

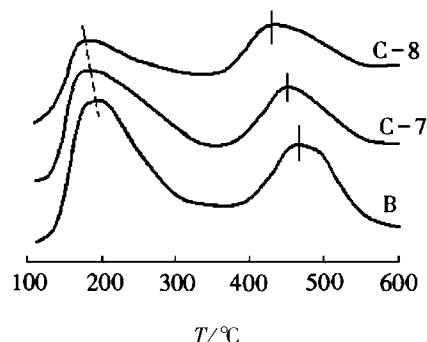
注: 将样品 B 在 800 °C 氮化 5h 后记作 C - 8 - 5, 其他类推。

由表中数据可知, 样品 B 的比表面积和孔体积均大于样品 A 的。这说明, 合成分子筛时添加氢氟酸有利于形成较大的比表面积和孔体积。其原因可能是晶化时形成了氟化物, 在分子筛的晶化过程中起填孔作用使得孔体积和比表面积增大。700 ~ 800 °C 氮化的 SAPO - 34 分子筛的比表面积、孔体积均变化不大; 而氮化时间对分子筛的比表面积、孔体积均没有影响。

2.2 含氮分子筛的酸碱性表征

由于氮原子和氧原子的电负性不同, 采用氮取代氧后可以在分子筛骨架中引入部分碱性, 从而在一定程度上改变催化剂的性能。

1) NH_3 - TPD 分子筛氮化前后的 NH_3 - TPD 测定结果如图 3 所示, 分子筛氮化前后都有 2 个 NH_3 脱附峰, 脱附温度 300 °C 以上的是强酸, 脱附温度低于 300 °C 的是弱酸。由图 3 可见, 分子筛氮化后无论其低温脱附温度还是高温脱附温度都比氮化前降低 (B: 190 °C 和 470 °C; C - 8: 178 °C 和 430 °C), 说明氮化后无论是分子筛的强酸和弱酸, 其酸性均有所降低, 尤其强酸的酸强度降低得多; 图中还可见, 无论强酸和弱酸的峰面积都减少, 说明氮化后其酸量也均减少。文献 [5] 认为, 分子筛在高温氮化过程中, N 原子有可能取代了桥联羟基生成桥胺基 ($\text{Si} - \text{NH} - \text{Al}$), 减少了分子筛中酸性较强的 B 酸位。这种变化有利于消除分子筛的积碳中心, 提高催化剂的抗积碳性能, 延长其使用寿命。

图 3 分子筛氮化前后的 NH_3 - TPD 曲线

2) CO_2 - TPD 分子筛氮化前后的 CO_2 - TPD 测定结果如图 4 所示, 分子筛氮化前后都有 2 个 CO_2 脱附峰, 分别对应于 125 °C 和 220 °C 左右, 低脱附温度对应物理吸附, 高脱附温度对应弱碱位的化学吸附, 如 O^{2-} 或 $-\text{OH}$ 与 CO_2 形成双齿碳酸盐

等。由图4可见,分子筛氮化后在435℃还有个新的CO₂脱附峰,说明分子筛表面产生了新的碱位,尽管其碱量小但碱强度更大。

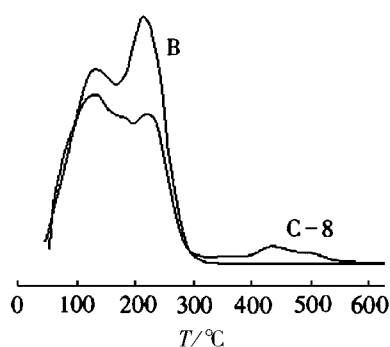


图4 分子筛氮化前后的CO₂-TPD曲线

2.3 含氮SAPO-34分子筛的催化性能

表2列出了各种催化剂上甲醇转化为低碳烯烃的转化结果。

表2 各种催化剂上甲醇转化为低碳烯烃的转化结果

| 催化剂样品 | 氮含量/% | 甲醇转化率/% | 烯烃选择性/% | | | $w(C^{2=})w(C^{3=})$ 选择性比 |
|--------|-------|------------------|-------------|-------------|----------------------|------------------------------|
| | | | $w(C^{2=})$ | $w(C^{3=})$ | $w(C^{2=} + C^{3=})$ | |
| A | — | 100 (2.5h时,开始积碳) | 35.34 | 25.35 | 60.69 | 1.39 |
| B | — | 100 (6.5h时,开始积碳) | 43.41 | 27.50 | 70.91 | 1.58 |
| C-7-5 | 0.81 | 100 (6.5h时,无积碳) | 53.60 | 29.74 | 83.34 | 1.80 |
| C-7-10 | 0.88 | 100 (6.5h时,无积碳) | 53.70 | 29.40 | 83.10 | 1.83 |
| C-8-5 | 1.24 | 100 (6.5h时,无积碳) | 55.70 | 29.85 | 85.55 | 1.87 |
| C-8-10 | 1.34 | 100 (6.5h时,无积碳) | 54.84 | 29.36 | 84.20 | 1.87 |

3 结论

1) 添加氢氟酸有利于提高SAPO-34分子筛的结晶度,并且得到小而均匀的分子筛,其比表面积、孔体积分别由318m²/g、0.187cm³/g增大到456 m²/g、0.294cm³/g增大;

2) 采用氨气高温氮化改性后SAPO-34分子筛的酸碱性发生变化,酸强度减弱、酸量减少,并产生新的碱性中心;处理方法得到含氮SAPO-34分子筛,其晶体结构、比表面积以及孔径分布等均未发生明显变化(氨气高温处理方法目的是改性表面酸碱性,可就此得出结论);

3) 氮化改性后SAPO-34分子筛的酸碱性发

由表2数据可以看出,不同催化剂上甲醇转化率均为100%,样品B的(乙烯+丙烯)选择性略高于样品A的,但其出现结焦的时间为6.5h,远比样品A的2.5h长,这是由于氢氟酸的添加使分子筛的晶粒减小,有利于产物扩散而延缓了结焦。比较氮化前后低碳烯烃选择性可见,随着分子筛氮含量(质量分数)增加,丙烯选择性变化不大,但乙烯选择性有明显提高,可由43.41%提高到55.70%,乙烯与丙烯的选择性比可由1.58提高到1.87。这是因为氮化降低了催化剂的酸性,可以较大幅度地减少乙烯的低聚,提高乙烯与丙烯的选择性比,有利于提高乙烯收率。由此可知,采用氮化方法对分子筛的酸性进行调变,既能保持分子筛原有的孔结构又能根据反应要求调变分子筛的酸性,是一种很有实用意义的分子筛改性方法。

生变化,酸强度减弱、酸量减少,并产生新的碱性中心;从而使分子筛在MTO反应中催化性能得到改善,烯烃选择性提高(乙烯+丙烯总选择性由70.91%提高到85.55%),尤其是乙烯选择性提高(乙烯/丙烯由1.58提高到1.87);催化剂的抗积碳性能提高(>6.5h),催化剂寿命也延长(>6.5h)。

低碳烯烃的低聚反应被抑制(红字部分的“低聚反应被抑制”在文中没有实验结果的支持,带有分析和推测的性质),提高了烯烃选择性,催化剂的抗积碳性能也提高(“抗积碳性能提高”这一结论在文中应有积碳的测试给与支持),催化剂寿命延长。

新型的门禁系统结构的设计

王 宾

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:在屏弃了传统的通讯单一化,或者无网络单点刷卡门禁系统结构的同时,将射频网络、GSM网络及以太网引入到了门禁系统中,形成了2级网络结构,极大的增强了系统的适应性,提高了性价比。初级网络采用资源丰富的ATMEGA128L作为主控器,次级网络由ATMEGA16L负责控制,并采用了自动请求重传机制,保证通讯的可靠性。

关键词:ATMEGA128L; GSM; 以太网; 射频; 门禁系统

中图分类号:TP29 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)03-0034-05

Design of A New Type of Access Control System Structure

WANG Bin

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

Abstract: Traditional simple communication or access control system structure without network was rejected. RF network, GSM network and Ethernet were introduced into access control system, forming a 2nd level network, which greatly improves the system's adaptability and cost-performance. ATMEGA128L of abundant resources was used as main controller in primary network and ATMEGA16L is responsible for controlling in secondary network and ARQ mechanism is adopted in software to ensure reliability of communication.

Key words: ATMEGA128L; GSM; Ethernet; RF; access control system

门禁系统在公司、学校、宾馆等场所被广泛应用。随着生物识别技术、射频识别技术的发展和日渐成熟,门禁系统也朝着安全化、智能化、网络化方向发展^[1]。以往的门禁系统,有仅识别射频卡的、通过GSM发送数据的,和通过以太网传送数据构成网络的这么几种,都存在不同的缺陷。本着稳定安全、性价比优先的原则,本文设计了一种新型的门禁系统,兼顾了系统的多方面性能,将多种数据传输机制、射频识别技术等应用到了本系统中,构成了2级网络结构,并在软件中加入了自动请求重传(ARQ)机制,对数据的传输做了有力保障,使系统的安全和可靠性大大增强,同时降低了系统成本。

1 系统总体结构

总体来说,本系统由2级网络构成——高层的以太网和GSM网络;接入方便、传输距离远、安全

可靠;次级的射频网络:适合楼层间的通讯,组建、运行费用低廉。本系统由两类控制板构成(见图1):第一类是门锁板,安装在门锁内部。采用ATMEGA16L为主控芯片,它具有封装体积小,价格低廉等优点,通过SPI总线连接FM1702S射频卡读写芯片和NRF905射频通讯模块(负责与AP板通讯),FM1702S通过连接的天线与射频卡发生感应,进行数据的读写操作,并连接有电机驱动电路,控制电控锁的开、合,同时扩展了一个薄膜式独立键盘,用于用户发送各种服务请求;第二类是AP板,采用ATMEGA128L为主控芯片,通过RTL8019AS芯片与以太网连接,并通过TC35I模块连入GSM网络。AP板负责在通过以太网接收到PC机(或通过TC35I接收到手机)命令后,通过NRF905模块再转发给对应地址的终端门锁板,就是说:AP板就是个中转站,引入它的目的主要是降

低系统成本,因为它和门锁板间的次级网络由 NRF905 射频网络构成,使用的是免费频段。

门锁板只能采用电池供电,AP 板亦可,所以都

加入了电压检测电路,当电池电压过低时,门锁板通过 NRF905 发警报数据给 AP 板,AP 板再通过以太网和 TC351 向高层发送,确保了整个系统的安全性。

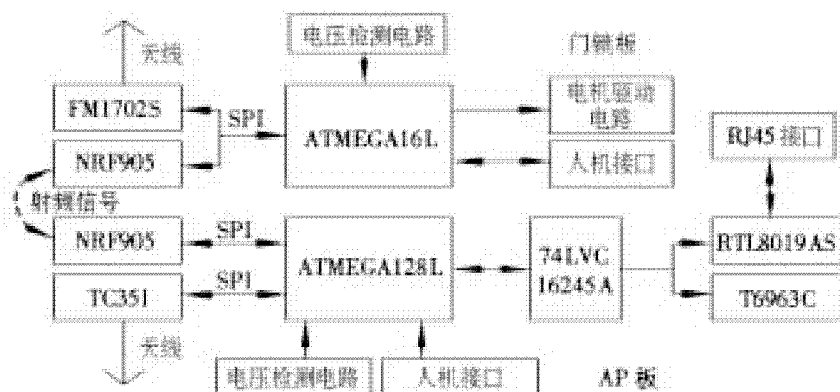


图1 系统总体结构图

2 硬件设计部分

2.1 射频卡读写电路

FMI702S 是复旦微电子股份有限公司设计的射频卡专用读卡芯片,它兼容 ISO14443A 非接触式 IC 卡通信标准,内部集成模拟信号处理单元、ISO14443A 通信处理单元、通信加密协处理单元和串行 SPI 微处理器接口单元,可以方便与 MCU 的 SPI 接口连接^[2]。

卡的操作是一个相对复杂的程序执行过程,要执行一系列的操作,包括询卡 Request()、防冲突读卡系列号 AntiColl()、选卡 Select_Card()、装载密码 Load_keyE2_COPY()、密码验证 Authentication()、读卡 MIF_Read()、写卡 MIF_Write() 等。这一系列的操作必须按固定的顺序进行, FMI702S 每对卡进行一步操作,卡就会有相应的反馈状态,在正确的情况下,才可以继续进行下一步操作。CN1 接口用于连接环形天线(见图2)。

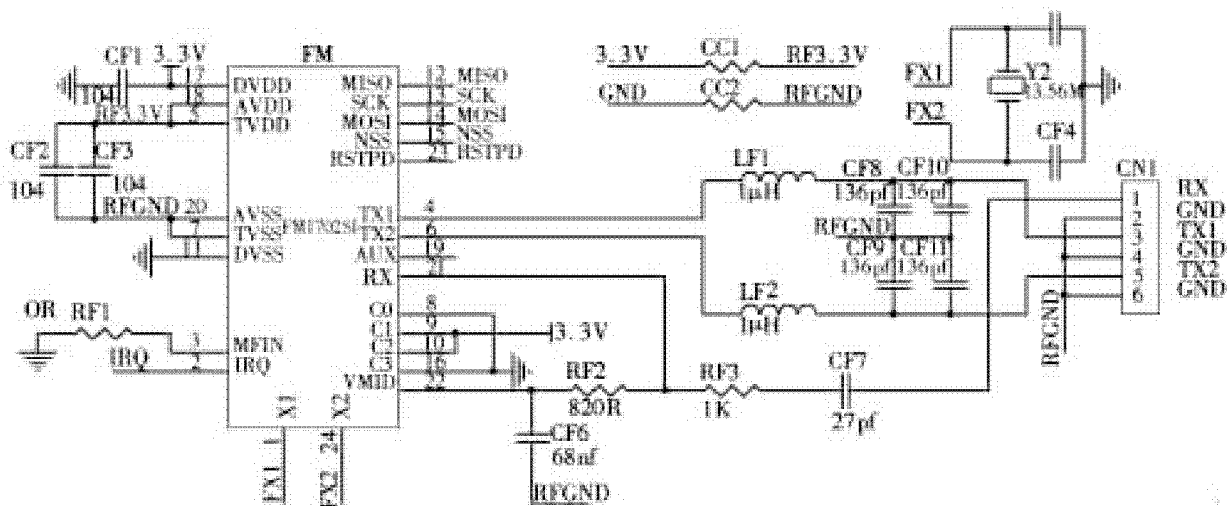


图2 FMI702S 外围电路图

2.2 NRF905 模块

NRF905 是挪威 Nordic 公司推出的单片射频发射器芯片,可以自动完成处理字头和 CRC 校验工作,各节点都可以配置地址,只有地址相符的节点才能接收数据,使用 SPI 接口与 MCU 通信,配置方便,

其功耗非常低,适合于低功耗系统的要求。为缩减开发周期,采用了成品插件模块,接口如图3所示。TX_EN 与 TRX_CE 负责模式选择,PWR_UP 是电源使能脚,CD、AM、DR 分别是载波检测、地址匹配、收发完成状态信号脚,是硬件驱动层做决策的依据,MISO、MOSI、SCK、SPI-EN 这4个脚与 SPI 接口相对应。

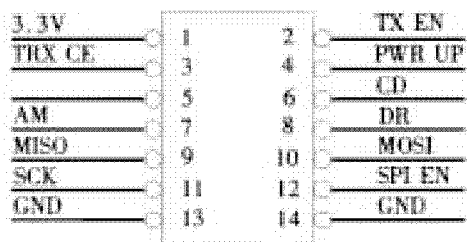


图 3 NRF905 模块接口

2.3 GSM 模块

TC35I 是西门子公司的一款双频 900/1800MHz 高度集成的 GSM 模块,它易于集成,可以在较短的时间内花费较少的成本开发出新颖的产品,常应用在远程监控、无线 POS 终端等领域。图 4 中的 SIM 接口是 SIM 卡的插座,连接到了 TC35I

的 ZIF40 接口引脚上;SYNC 用于状态指示,连接的 DG3 灯如果 600 ms 亮/600 ms 灭表明正在寻找网络,或者未插入 SIM 卡,当为 75 ms 亮/3 s 灭时,表明 TC35I 已登录进网络,处于待机状态。然后程序可以通过 SCI 总线向 TC35I 传输数据。设计时需要注意的是:IGT 是点火脚,系统加电后为使 TC35I 进入工作状态,必须给 IGT 加一个大于 100 ms 的低脉冲,电平下降持续时间不可超过 1 ms;在发射数据时,TC35I 要求的瞬间电流达到了 2.5 A,所以对供电电源要求较高,并且必须在 TC35I 的 VBATT 电源脚并联 1 000 μ f 以上的大电容;SIM 座与 ZIF40 间的连线要求短而粗,否则可能会造成“掉线”、难以登陆网络等故障。

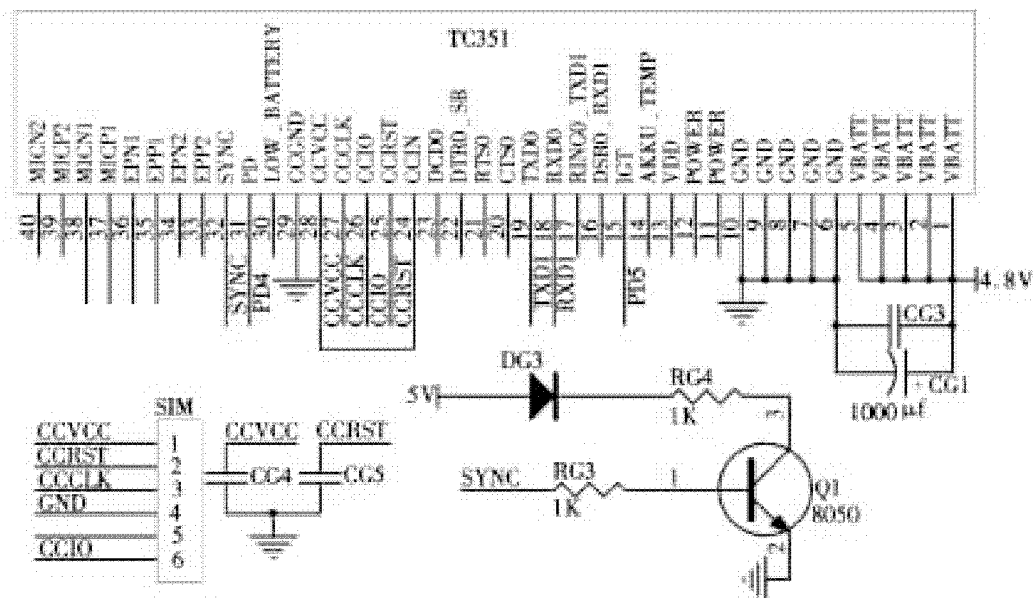


图 4 TC35I 电路原理图

2.4 以太网硬件设计

RTL8019AS 是一种全双工即插即用的以太网控制器,是目前以太网中使用最多的物理层收发芯片之一。以太网运输层有 2 种协议:TCP 和 UDP,TCP 协议提供可靠的网络传输服务,但它对 RAM 需求量大,计算较复杂,速度慢,所以嵌入式领域通常采用不可靠的 UDP 协议传输数据,并在应用层进行校验。本系统采用了 UDP 协议,在链路层做了 ARQ 机制,确保可靠性,限于篇幅,硬件图不再给出。

3 软件设计部分

3.1 软件结构设计

AP 板的软件结构采用了良好的多层结构(见

图 5),层次划分明确:硬件层向中间层提供必须的驱动接口函数,中间层再进行相关管理与运算,并向调度层的各个任务提供 API 函数,调度层采用 UCOSII 操作系统,各任务在应用层被创建。

比如以太网部分,在应用层任务中,先调用 SetSocket (SOCKET * s, uint8 IP[], uint16 PORT),创建套接字,使双方 IP 地址与端口号建立连接,然后当需要发送数据时,调用 Net_SendData (SOCKET * s, SOCKET * d, uint8 * pData, uint16 len),指明通讯双方套接字,将要发送的缓冲区 pData,以及数据长度 len 传递给此函数,它会对数据进行层层打包,最终通过硬件层的数据流发送函数传送到网络中。

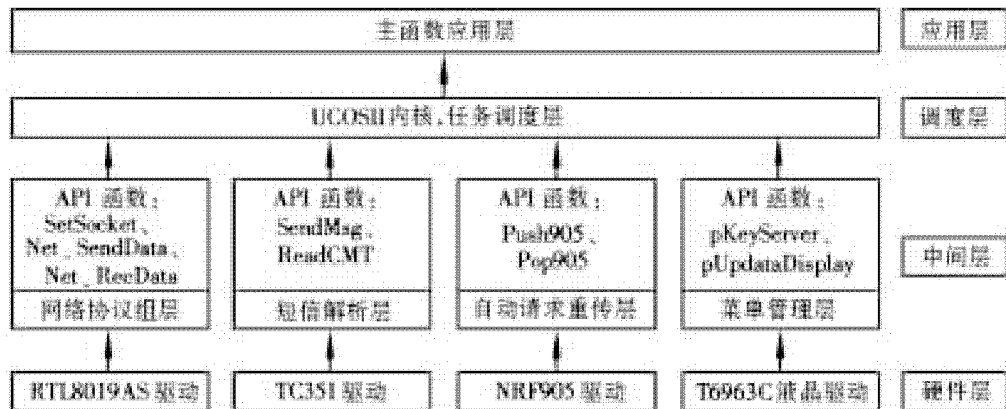


图5 AP板软件结构

3.2 通讯协议与射频网络配置

各门锁板的 NRF905 物理地址都被设置为 0。每层楼设置一块 AP 板, 它的 NRF905 物理地址通过键盘设定, 并通过 AP 板的设置菜单 (发送射频设置命令) 给门锁板设置软地址, 这样做的好处是: AP 板总可以选中门锁板, 方便对门锁进行软编址, 转发数据时采用广播形式, 每块门锁板都会接收到, 并解析出数据包 (见表 1) 中 4 字节的房间编号, 与自身的软地址校验, 若匹配, 就对 8 字节的命令作出响应; 在配置软地址时, 门锁板会记录下配置它的父级 AP 板硬地址, 当它给 AP 板发送数据时, 将目的地址配置为父级 AP 板硬地址, 这样则是点对点的通讯, 并不影响其他的门锁。

表1 数据包结构

| 门店编号 | 房间编号 | 命令 | 长度 | 数据 |
|-------|-------|-------|-------|----|
| 4 个字节 | 4 个字节 | 8 个字节 | 2 个字节 | N |

AP 板接收到以太网或者短消息后, 将数据包提取出来, 再利用 Push905 () 将包送入 ARQ 层的数据队列中, 通过 NRF905 进行转发, 如果一定时间内多次重发仍然失败, 将通过高层网络报告给 PC 机 (或手机); 若成功发送 (收到应答), Pop905 () 将此包从队首删除; 门锁板在收到数据包后, 会将包再重传给 AP 板, 即应答信号。编写射频的 ARQ 协议时, 参照了以太网的链路层 ARQ 实现原理, 设计了基于超时定时器的软件状态机, 其流程如图 6 所示。

3.3 GSM 短信数据的收发

GSM 模块的短信模式有 2 种: TEXT 模式和

PDU 模式。PDU 模式采用 unicode 编码可以发送英文及汉字, 但实现较复杂, 由于本系统只需要传送字符数据, 所以采用简单的 TEXT 模式 (只能发送 ASCII 码), 并采用“实时”接收短信的方式, 即 SCI 总线接收到短信后, 并不存储在 SIM 卡中, 而是中断方式直接通知 MCU 读取, 既提高了效率, 又增强了可靠性。以上 2 步必须在初始化时, 利用 AT 指令对 TC35I 进行正确配置。正确接收短信后, 解析出表 1 中的数据包, 并交付于 NRF905 的 ARQ 层转发给门锁板。

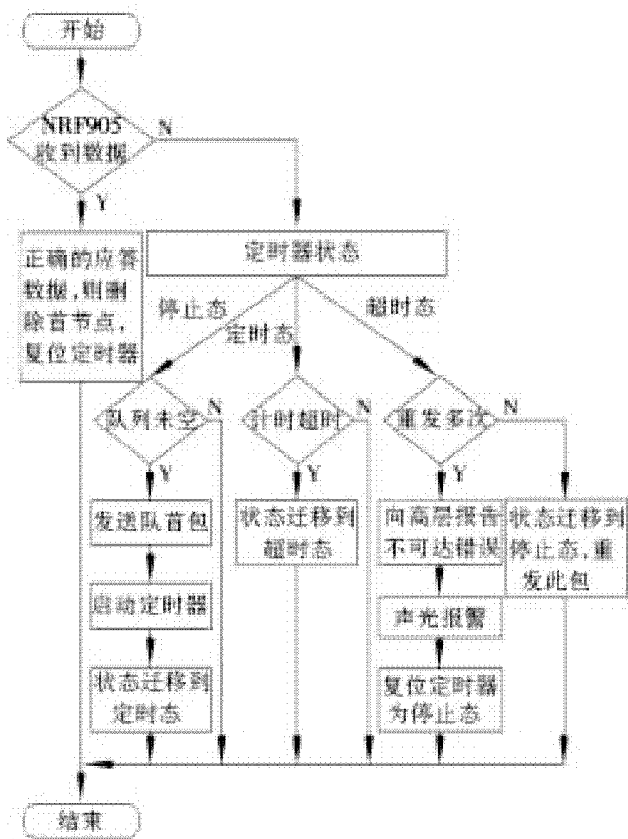


图6 射频 ARQ 状态机流程图

4 总结

本文设计了合理的 2 级网络结构,使得传统的门禁系统结构得到了改善,提高了系统的安全性和性价比,具有很好的市场前景。

参考文献:

- [1] 荣锋,厉彦峰. 基于网络的门禁系统的设计[J]. 天津

工业大学学报,2008,27(1):56-59.

- [2] 睦碧霞,朱越奇. 非接触式 IC 卡弱电集中管理系统的开发[J]. 工矿自动化,2006(5):106-108
[3] 谢希仁. 计算机网络[M]. 第 4 版. 北京:电子工业出版社,2006:74-78.
[4] 吕昌泰,罗永刚. 嵌入式以太网接口的研究与设计[J]. 微计算机信息,2006,22(2):68-70

(责任编辑:何学华,吴晓红)

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] 李俊汾,樊卫斌,董梅,等. SAPO-34 分子筛的合成及甲醇制烯烃催化性能[J]. 高等学校化学学报,2011,32(3):765-771.
[2] HU H, YING W Y, FANG D Y. Reaction and deactivation kinetics of methanol-to-olefins process based on a special TGA reactor[J]. J Natural Gas Chem, 2010(19):409-416.
[3] 刘红星,谢在库,张成芳,等. 用氟化氢-三乙胺复合模板剂合成 SAPO-34 分子筛[J]. 催化学报,2003,24(4):279-283.
[4] 杨德兴,王鹏飞,徐华胜,等. 两步晶化法合成纳米 SAPO-34 分子筛及其催化性能[J]. 高等学校化学学报,2011,32(4):939-945.
[5] 关新新,刘克成,武光军,等. SAPO-34 分子筛的氮

化及在甲醇制烯烃(MTO)中的应用[J]. 分子催化,2006,20(3):270-272.

- [6] 邢爱华,岳国,蒋立翔,等. SAPO-34 制备方法研究进展[J]. 现代化工,2010,30(6):25-29.
[7] MAHDI DARGAHI, HOSSEIN KAZEMIAN, MOHAMMAD SOLTANIEH, et al. Rapid high-temperature synthesis of SAPO-34 nanoparticles[J]. Particuology, 2011,9:452-457.
[8] YAN Z M, ZHUANG J Q, XU L, et al. Direct Observation of Various Al Sites in SAPO-34 by ^{27}Al Multiquantum (MQ) Magic Angle Spinning (MAS) NMR [J]. Chinese Chem Lett, 2003,14(1):87-90.

(责任编辑:李丽,范君)

复杂条件下综采工作面安全高效开采技术研究

张宏忠

(皖北煤电集团公司, 安徽 宿州 234000)

摘要:针对钱营孜煤矿 3_2 煤层赋存结构复杂、顶板为富水软厚泥岩、断层及褶曲构造带较多等复杂工程地质条件,在分析部署安全高效工作面难点的基础上,提出钱营孜煤矿“一矿一面唯一型”安全高效开采模式,确定 3_213 工作面为超长(287 m)大推进度(3 354 m)工作面并采用安全高效、可靠性较高的大功率综采工艺,制定包括超长工作面矿压规律研究、大推进度回采巷道围岩稳定控制和瓦斯治理以及安全辅助运输保障在内的安全高效开采保障技术体系,取得了良好的效果:提高了工作面生产效率及回采率,新增大量产值,给企业和社会带来了巨大的经济和社会效益。

关键词:复杂地质条件;安全高效开采模式;超长工作面

中图分类号:TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)03-0039-06

Research on Safe and Efficient Mining Technology of Fully Mechanized Longwall under Complicated Conditions

ZHANG Hong-zhong

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

Abstract: According to the complex engineering geological conditions of 3_2 coal seam's complex occurrence, roof of water-rich soft thick mudstone, many faults and folds in Qianyingzi Coal Mine, on the basis of analysis of difficult aspects in safe and efficient mining face deployment, “one mine, one face, unique type” safe and efficient mining model was proposed. Length of overlong longwall 3_213 was determined as 287 m and large distance mining on the strike as 3 354 m, safe and efficient, high-power fully mechanized mining process of high reliability was adopted, with safe and efficient exploitation guarantee technology system including strata pressure regularity study for overlong longwall mining, stability control of rocks surrounding roadways for large distance mining on the strike, gas control and auxiliary transport safety ensurance. By the method good results were obtained, improving the mine face production efficiency and mining rate, adding large new output value, bringing great economic and social benefits for the enterprise.

Key words: complex geological conditions; safe and efficient mining model; overlong longwall

我国的安全高效矿井多分布在受断层、水及瓦斯等影响小的开采技术条件简单的西北部矿区,但在我国东部诸多矿区,由于煤层赋存工程地质、水文及瓦斯地质条件均较为复杂,受制于这些客观困难条件的制约,长推进度与超长工作面的安全高效

开采实践较少^[1-3]。为此,以钱营孜矿 3_213 工作面为研究对象,深入分析矿井实行安全高效开采模式的影响因素,研究受水、瓦斯等影响条件下的安全高效开采模式及保障技术体系,具有重要的理论价值和社会经济效益。

1 开采技术难点

钱营孜煤矿位于淮北煤田南部中段,处于北东向南坪断层、双堆断层所夹持的断块内;区内断层较发育,共查出断层45条,其中正断层26条,逆断层18条,断层走向以北东向为主,少数近南北向及北西向;区内总体构造形态为一较宽向南仰起的向斜,并被一系列北东向断层切割。

工作面开采煤层为 3_2 煤,煤层厚度2.23~3.98 m,平均3.07 m,倾角 $9^\circ \sim 15^\circ$,煤层涌水量为 $22 \text{ m}^3/\text{m}$,属于高瓦斯煤层;煤层结构较复杂,具夹矸,夹矸以泥岩和炭质泥岩为主,少数为含炭泥岩,内生裂隙较为发育,地质条件复杂。 3_2 煤层为“三软”煤层,自燃趋势不同地点倾向不同,具爆炸危险性。 3_2 煤层顶底板岩层特性(见表1)。

表1 3_2 煤层顶底板岩层特性

| 顶底板名称 | 岩石类型 | 厚度/m | 普氏硬度系数 | 岩性特征 |
|-------|------|-----------|--------|---|
| 老顶 | 泥岩 | 5.0 | 4 | 灰色,夹紫斑,泥质结构,块状,致密,细腻,少含铝质和粉砂质,平坦~参差状断口,水平层理,裂隙发育。 |
| 直接顶 | 泥岩 | 2.64 | 4 | 深灰色,相对底板色深、发青灰色,块状,性硬,含粉砂质,局部较高,平坦状~参差状断口。 |
| 伪顶 | 泥岩 | 0.2~0.346 | 4 | 深灰色,块状,细腻,均匀,性硬,含砂质,局部较高。 |
| 直接底 | 泥岩 | 1.90 | 4 | 深灰色~灰色,相对顶板颜色浅、发白,块状,性硬,含细砂质及铝质,遇水膨胀,浸水后滑腻,有裂隙。 |
| 老底 | 细砂岩 | 6.20 | 12 | 浅灰色,局部浅绿灰色,细粒,块状~层状,微斜层理,成份以石英、长石为主,硅钙质胶结,有裂隙。 |

3_2 煤层顶板为7.6 m厚的软弱泥岩,岩体结构松散,节理发育,张度低,岩石抗水浸和风化能力差,易软化,抗压及抗变形能力差,为不稳定岩层,属易冒落的松散顶板。

对比我国其它矿区安全高效矿井开采技术条件,钱营孜煤矿实施安全高效开采具有一定困难。

1) 埋深大,围岩应力大。地质条件复杂,断层、褶曲等构造带较多,对工作面开采部署、采煤工艺选择影响较大,煤层厚度变化较大影响开采设备的选型、配套以及回采的连续性,降低开机率。

2) 煤层瓦斯涌出量较大,具有自燃发火倾向,煤尘大且具有爆炸危险性,很难布置超长工作面。

3) 煤层顶底板多为软弱泥岩,少数为粉砂岩、细砂岩、中砂岩,围岩强度总体较低,支护难度较大,不利于布置超长、服务年限较长的回采巷道,且煤质较松软,巷道在服务期限内维护困难,容易发生断面冒落及偏帮,工作面维护困难。

2 安全高效开采模式确定

“一矿一面唯一型”开采模式在美国、澳大利亚等先进采煤国家应用较多,此开采模式具有占用设备少、用人少、系统最为简单、生产高度集中,适

应不同工艺方式和不同井型的矿井等优点。为保证矿井生产的连续性和持续性,要求矿井具有高水平的管理队伍和高素质的施工人员。随着矿井装备技术水平、管理水平及人员素质的不断提高,基于高可靠性的“一矿一面唯一型”开采模式是安全高效矿井的发展方向。

钱营孜矿采用“一矿一面唯一型”的安全高效开采模式^[4-5]。主采 3_2 煤的工作面有西一采区,西二采区和东一采区。三个采区根据地质条件和开采技术条件布置不同数目的工作面。

2.1 关键技术参数

1) 优化工作面长度。在钱营孜煤矿 3_2 13工作面特定的装备和地质条件下,通过建立合理的经济-数学模型,得到最优工作面长度。

工作面生产成本 $F(L)$ 由以下几部分组成:设备的折旧和维修费 f_1 ,回采巷道掘进和维护费用 f_2 ,工人工资 f_3 ,设备运行电费 f_4 ,材料消耗费用 f_5 ,搬家费用 f_6 ,切眼掘进费用 f_7 。

$$F(L) = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 = \frac{q_0 L + q_1}{PLV} + \frac{q_2 + q_3 + q_4 + q_5}{PL} + \frac{b_1 L + b_2}{PLV} q_6 +$$

$$\frac{q_7}{PLS} + e_1L + e_2 + \frac{G_j c_d + q_8}{PLV} + \frac{jL}{PLV} \quad (1)$$

式中: P 为煤层生产能力, t/d ; L 为工作面长度, m ; V 为工作面日推进度, m/d ; q_0 为与工作面长度有关的设备每米折旧和大修费用, $元/m \cdot d$; q_1 为与工作面长度有关的设备的折旧费和大修理费用, $元/d$; q_2 、 q_3 为上、下顺槽掘进费, $元/m$; q_4 、 q_5 为上、下顺槽维护费, $元/m$; q_6 为采煤工作面工人日平均工资, $元/工$; b_1 为与工作面长度有关的工人人数, $人/m$; b_2 为与工作面长度无关的工人人数, $人$; q_7 为工作面搬家费用, $元/m$; S 为工作面连续推进长度, m ; e_1 为与工作面长度有关的吨煤材料消耗, $元/(m \cdot t)$; e_2 为与工作面长度无关的吨煤材料消耗, $元/t$; q_8 为通风费用, $元/d$; G_j 为工作面每日用电量, $度$; c_d 为电费单价, $元/度$; j 为开切眼掘进单价, $元/(m \cdot d)$ 。

对回采工作面成本进行分析,有一部分费用是随着工作面长度加大而增加的,有一部分费用是随之减少,还有一部分费用是固定不变的。这样就可以通过对有关费用的计数得出吨煤费用与工作面长度之间关系的数学表达式,整理后简化为

$$L^* = \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{\frac{cq_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + b_2cq_6 + q_7/S + G_j c_d c + q_8c}{q_0d + b_1dq_6 + e_1P + jd}} \quad (2)$$

式中: q_1 为与工作面长度有关的设备的折旧费和大修理费用, $元/d$; q_2 、 q_3 为上、下顺槽掘进费, $元/m$; q_4 、 q_5 为上、下顺槽维护费, $元/m$; q_6 为采煤工作面工人日平均工资, $元/工$; b_1 为与工作面长度有关的工人人数, $人/m$; b_2 为与工作面长度无关的工人人数, $人$; q_7 为工作面搬家费用, $元/m$; S 为工作面连续推进长度, m ; e_1 为与工作面长度有关的吨煤材料消耗, $元/(m \cdot t)$; c 、 d 为工作面长度与工作面日推进度之间的关系系数; q_8 为通风费用, $元/d$; G_j 为工作面每日用电量, $度$; c_d 为电费单价, $元/度$; j 为开切眼掘进单价, $元/(m \cdot d)$ 。

把现场收集和综合分析得出工作面系统费用参数带入式(1)得到工作面长度与吨煤关系如图1所示。

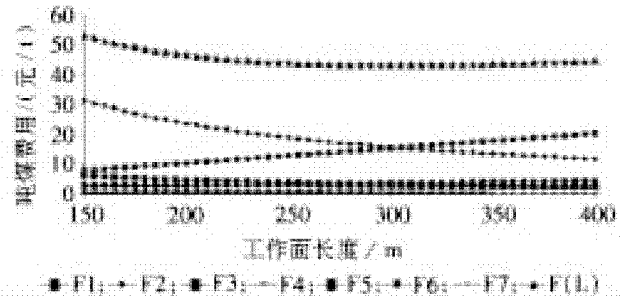


图1 工作面长度与吨煤关系图

从图1可以看出,以吨煤费用最低原则,钱营孜矿3₂13工作面长度在250~350m范围内吨煤费用变化不大,而较为经济、合理的取值范围在260~310m之间。

把工作面系统费用参数带入式(2),得

$$L^* = 287.5 \text{ m}$$

钱营孜煤矿3₂13工作面长度确定为283m,接近吨煤费用最低点的工作面长度在287.5m。

2) 合理工作面推进长度。加大工作面长度和推进长度,可以提高采区的回采率,降低巷道的掘进率。在采区范围一定情况下,适当加大工作面长度和推进长度,减少区段数目及为其服务工作面回采巷道和采区车场的数量,有效的降低了巷道的掘进量。同时,随着区段数目的减少,区段保护煤柱留设也相应较少,提高采区的资源回收率。

为了保证综采工作面的稳产高产,工作面的走向长度应满足工作面能够连续推进一年左右的时间。因此,3₂13工作面推进长度以3300m左右为宜,根据钱营孜煤矿实际的地质条件确定3₂13工作面推进长度为3354m。

3) 大推进度回采巷道围岩控制。针对3₂13大推进度回采巷道具有距离长、软厚泥岩顶板及服务年限长等特点、难点,运用围岩强化理论,采用高强度锚杆支护体系,维护巷道围岩的稳定性^[6-8]。

4) 工作面安全运输。钱营孜矿机械化程度较高,生产较为集中,采用胶带输送机运输方式,能充分发挥综采工作面设备的能力,提高大巷运输的自动化程度,因此工作面运输平巷采用胶带输送机运输煤炭。针对3₂13工作面煤层倾角大的特点,轨道平巷采用无极绳绞车连续运输。

2.2 工作面装备

建设安全高效矿井的根本途径是发展采掘机械化^[9-10]。采掘机械化的发展,不仅提高了单产、单进,而且简化了矿井和采区生产系统,有利于集中生产,减人提效、降本增效。具体工作面装备主

要技术参数如表 2 所示。

表 2 工作面装备主要技术参数

| 设备名称 | 型号 | 主要技术参数 |
|------------|-----------------|--|
| 采煤机 | MG650/1620 - WD | 采高 1.9 ~ 4.56 m, 总功率 1 620 kW, 牵引方式为销轨式无链电牵引, 牵引力为 (932/466, 756/378) kN, 牵引速度 (0 ~ 10.4/20.80 ~ 12.8/25.6) m/min。 |
| 液压支架 | ZY8800/21/42 | 支撑高度 2.1 ~ 4.2 m, 初撑力 7 916 kN, 工作阻力 8 800 kN, 中心距 1.75 m, 支护强度 0.98 ~ 1.0 MPa。 |
| 刮板输送机 | SGZ - 1000/2000 | 长度 350 m, 装机功率 2 × 1000 kW, 输送能力 2 500 t/h, 链速 1.33 m/s, 卸载方式为交叉侧卸式。 |
| 超前支护 支架 | ZT2X3200/18/35 | 支撑高度 1.8 ~ 3.5 m, 初撑力 2 × 2616 kN, 工作阻力 2 × 3200 kN, 中心距 1.5 m, 支护强度 0.42 MPa。 |
| 转载机 | SZZ - 1000/400 | 长度 70 m, 工作面铺设长度 50 m, 装机功率 400 kW, 输送能力 3 000 t/h, 刮板链速 1.58 m/s, 电压 3 300 V。 |
| 破碎机 | PLM3500 | 破碎能力 3 500 t/h, 电机功率 200 kW, 入料口尺寸 1000 mm × 1000 mm, 出料口尺寸 1000 mm × 400 mm。 |
| 胶带输送机 | DSJ120/200 | 胶带带宽 1 200 mm, 速度 4 m/s, 输送能力 1 800 t/h, 输送机长度 1 800 m, 电机功率 2 × 400 kW。 |

3 安全高效开采保障技术体系

3.1 大推进度回采巷道围岩控制技术

针对巷道围岩应力大的特点,采用高性能锚杆进行支护;包括高强度杆体、高强度螺母、高强度托盘以及螺母与托盘之间的减摩垫圈。

为确定 3₂13 工作面回采巷道顶板岩体内部破裂情况,采用 TYGD10 岩层钻孔检测仪进行不同类型顶板锚固区范围内围岩破裂情况进行窥视。

对录像分析可知:顶板在开挖初期围岩较破碎,随时间推移,裂隙由巷道浅部向围岩深部逐渐扩散,裂隙数目由少及多,至掘后稳定期,巷道围岩非常破碎,巷道维护情况较差,围岩极不稳定,以浅部裂隙发育,在围岩深部存在少量裂隙,且在深部发现少量的纵向裂隙。围岩破裂区内呈现非均匀性,围岩变形破坏以浅部为主,深部裂隙较少,为此按照裂隙发育程度的不同将破裂区分为裂隙发育区和微裂隙区。

以 3₂13 工作面两巷顶板为主要研究对象,针对在 3₂13 工作面两条巷道围岩控制特点,科学地提出了“三顶二区三支护”的分类标准,并有针对性的提出了巷道围岩控制技术体系。

1) “三顶”的提出是结合煤巷顶板软弱夹层且泥岩较厚的特点,将顶板划分为完整顶板、无水

破碎顶板和有水破碎顶板 3 种类型。其中,完整顶板变形破坏不严重,采用锚带网索联合支护技术;而无水破碎顶板在掘进初期变形破坏速度较快,采用高性能锚杆和预应力锚索联合支护技术,加大锚索的支护密度;支护难度较大的是有水破碎顶板,掘进初期围岩变形破坏速度比较快,而且在掘进稳定期具有流变性,极易发生冒顶,针对这种情况,在高性能锚杆和预应力锚索联合支护基础上,对局部再进行滞后注浆加固。

2) “二区”的提出是将煤巷分为裂隙发育和微裂隙两个控制分区,采用不同的支护方式实行分区治理。其中,裂隙发育区在开挖初期,通过足够的初始预紧力、高性能支护材料和合理的支护强度,巷道掘后第一时间对围岩进行强有力的作用,消除围岩的初期松动变形,调动围岩整体承载能力,消减裂隙发育区的扩展;微裂隙区围岩裂隙较少,发育程度也比较低,在开挖初期,围岩变形大,以锚杆的柔性支护为主,随着围岩变形量增大,锚固体的承载能力和自稳性降低,此时需安装锚索,将锚固体悬吊于上部稳定岩层中,达到保持围岩稳定的效果。

3) “三支护”的提出是在煤巷锚网支护过程中所采用的三个关键性技术手段。第一支护手段为高性能锚杆支护技术,主要包括高强度成套锚杆、高性能配套辅助支护材料与高预紧力;第二支

护手段为增强的锚索支护技术,主要包括大直径钢绞线、轻型槽钢梁配合小托盘,增大护表面积。第三支护手段为局部加强的围岩注浆加固技术。

为确定 3_213 工作面回采巷道锚杆支护的具体参数,结合有限差分数值计算程序FLAC^{3D}进行多方案模拟分析比较,最后得出符合该复杂地质条件要求下的合理锚杆支护初始设计参数。 3_213 工作面回采巷道支护如图2和图3所示。

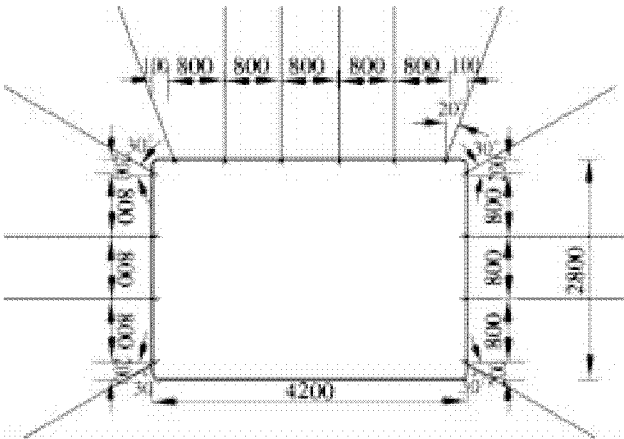


图2 3_213 工作面回采巷道全断面支护方案

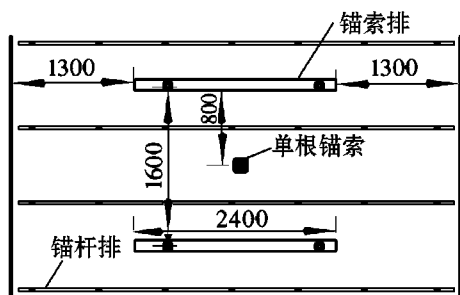


图3 3_213 工作面回采巷道顶板加强支护方案

对 3_213 工作面回采巷道围岩表面位移进行观测,巷道维护情况较好,巷道掘出约12天左右,顶底板及两帮相对变形量趋于稳定,围岩整体变形量不大,控制效果较好,能满足工作面回采期间的运输和通风要求。

3.2 超长工作面矿压规律

采用 UDEC 数值模拟软件模拟工作面支承压力分布特征以及采场围岩塑性区分布范围;工作面推进过程中前方顶板处发生应力集中,支承压力最大为 35 MPa,工作面其它位置的支承压力分布情况变化不大;底板严重破坏范围为 2.0 m,完全处于屈服状态;继续向下 3.0 m 范围为较严重破坏,大部分岩块处于屈服状态;再向下 15 m,只有个别块

体受到破坏,为微弱影响;以下为无影响区。

3.3 超长大推进度工作面瓦斯治理

钱营孜矿 3_213 工作面相对瓦斯涌出量为 $2.44 \text{ m}^3/\text{t}$,属于低瓦斯工作面,但由于 3_213 工作面为安全高效工作面,采用大功率综采工艺进行回采,工作面日产原煤超过1万吨,瓦斯涌出量较大;根据工作面瓦斯涌出来源分析, 3_213 工作面瓦斯抽采分为两个阶段:回采前,采用顺层钻孔预抽本煤层瓦斯;回采时,采用风巷上隅角立管抽放上隅角及采空区瓦斯,辅助(钻场)高位钻孔、立孔抽采采空区冒落带瓦斯对工作面瓦斯进行治理。

3.4 辅助运输系统

由于西一采区是钱营孜矿首采区,距离井筒较近,辅助运输站点较少,大巷辅助运输采用蓄电池电机车牵引固定式矿车,采区斜巷采用绞车运输,工作面回采巷道采用无极绳绞车、齿轨卡轨车连续运输;此运输系统成熟可靠、运量大、投资少,对不同倾角煤层适应性强。

4 结论

1) 通过对钱营孜煤矿的调研与系统分析,总结出钱营孜煤矿安全高效开采的技术难点:埋深及围岩应力较大,断层、褶曲构造带较多,煤层倾角、厚度变化大,赋存不稳定,顶板为软弱厚层泥岩,富含水,围岩完整性较差。

2) 针对钱营孜煤矿实行安全高效开采的技术难点,在皖北矿区首次提出了“一矿一面唯一型”安全高效开采模式,确定 3_213 工作面为超长(287 m)大推进度(3 354 m)工作面并采用安全高效、可靠性较高的大功率综采工艺,实现工作面日产万吨。

3) 针对 3_213 工作面大推进度回采巷道服务时间较长、顶板围岩较软弱的特点,结合FLAC^{3D}数值模拟分析,制定大推进度回采巷道围岩稳定控制方案,巷道控制效果较好,能满足工作面回采期间的运输和通风要求。

4) 根据钱营孜煤矿工程地质和开采技术条件,进行综采设备选型配套,选用大功率高可靠性的综采设备,大大提高了安全性与效率;并在皖北矿区首次选用齿轨卡轨车作为主要辅助运输设备,大大提高了 3_213 工作面辅助运输效率。

5) 设计优化后的 3_213 工作面提高了劳动效率,新增大量产值,给企业和社会带来了巨大的经

济和社会效益。同时钱营孜矿超长大推进度3,13工作面安全高效开采模式的实现,为皖北矿区其它矿井类似条件下的工作面部署提供了参考。

参考文献:

- [1] 杜计平,孟宪锐. 采矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2009:55-57.
- [2] 尹中凯,贺兴源. 提高大采长综采工作面产量和效益的研究与实践[J]. 煤炭工程,2007(1):42-44.
- [3] 曹胜根,张东升,杜卫新. 超长综放工作面开采关键技术[J]. 矿山压力与顶板管理,2003(4):69-71.
- [4] 张东升,张明,王宝岭. 高产高效矿井开采模式及其选择[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(7):363-367.
- [5] 张东升,赵海云,孙忠辉,等. 高产高效矿井开采模式的风险分析[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(3):133-135.
- [6] 马占国,张帆,柏建彪. 超长面巷道矿压显现规律研究[J]. 矿山压力与顶板管理,2001(3):39-43.
- [7] 邢平伟,宋选民,付玉平,等. 神东大采高超长工作面矿压显现强度预测研究[J]. 中国煤炭,2009(8):43-47.
- [8] 马平,申红军,邢平伟. 超长工作面高强度开采矿压显现规律实测研究[J]. 中国煤炭,2010(4):48-50.
- [9] 袁晓翔,屈永利,许满贵,等. 煤矿安全质量标准化建设原理[J]. 西安科技大学学报,2001,31(11):786-789.
- [10] 王振山. 汝箕沟煤矿安全高效开采的实践与效果[J]. 矿业安全与环保,2010,37(8):85-86.
- [11] 李兴华,梁顺,姚强岭,等. 泥岩顶板巷道围岩裂隙演化规律[J]. 煤炭学报,2011,36(6):903-908.

(责任编辑:何兴华,吴晓红)

欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿

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

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

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

邮政编码:232001

电 话:0554-6668044

E-mail:xbzrb@aust.edu.cn

采动岩体应变-渗流耦合效应与致灾机理分析

牛多龙¹, 杨科², 华心祝², 周广飞²

(1. 淮南矿业(集团)有限责任公司潘一煤矿, 安徽 淮南 232082; 2. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了研究承压开采背景下顶板岩层破断和渗流规律的时空关系特征, 在理论分析的基础上建立了基于有限元数值分析的等效连续介质流固耦合数学模型, 嵌入了应变-渗透系数的耦合本构关系, 应用于工程实践。得出采场围岩渗透性演化规律、含水层中孔隙压力演化规律及采动破坏区发育范围与渗透性增大区对比关系。研究表明: 将岩体渗透性演化规律与岩体采动破坏区发展规律共同作为计算和设计防水煤柱的判据, 更加符合现场实际; 研究成果对厚松散层高承压含水层下安全高效开采具有指导意义。

关键词: 采场围岩; 渗流场; 应变场; 防水煤柱; 流固耦合

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)03-0045-07

Analysis of Strain - Seepage Coupling Effect of Rock Mass Affected by Mining and Disaster - Causing Mechanism

NIU Duo-long¹, YANG Ke², HUA Xin-zhu², ZHOU Guang-fei²

(1. Panji No. 1 Coal Mine, Huainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan Anhui 232082, China; 2. The Key Laboratory of Coalmine Safe and Efficient Mining of MOE, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to study characteristics of space-time relations of regularity of roof rock breaking and seepage under the background of mining on confined aquifer, the equivalent continuum media fluid-solid coupling mathematical model based on the finite element numerical analysis was established on the basis of theoretical study, in which coupling constitutive relationship between strain and permeability coefficients is embedded, applied to practical engineering. The evolution rule of permeability and aquifer pore pressure, relationship between strata failure and increased permeability zone were obtained. The results showed that the evolution law of permeability and development law of strata failure applied as the criteria to calculate and design waterproof coal pillar, is more in line with the actual site. The research results provide a reference to safe and efficient mining on thick unconsolidated confined aquifer.

Key words: rock strata; seepage field; strain field; waterproof coal pillar; fluid-solid coupling

据统计我国约有60%的矿井不同程度的受到承压水的影响, 受水害威胁程度占世界各主要产煤国的首位^[1], 目前国内外有关承压水作用下煤层开采的研究做了大量的工作, 提出了一些理论和判据^[2], 针对顶板承压水主要有“上三带”理论和关

键层理论。这些成果为防治煤矿顶板突水具有积极的指导意义, 但也有明显的不足, 把岩体和水体分开研究, 或直接把承压水作为外载荷施加于边界上, 没能考虑渗流场与应力场的耦合作用。

由于岩土介质的复杂性, 目前耦合模型有六大

类型^[3]:连续介质模型、等效连续介质模型、裂隙网络耦合模型、双重介质模型。当岩体中含有大规模的结构面时,不能将问题视为典型的连续介质力学问题,但可以将其抽象为由大型结构面单元和结构体单元组成的结构。这种结构体本身可能具有碎裂结构,但可视为连续介质区域。这两类单元虽然具有不同的力学性质,但是其本身都可视为连续介质单元。而且两者的联结处满足变形连续条件。这种介质的力学分析很容易通过有限元法加以实现。很明显,不论实际岩体多么复杂,都可以采用等效连续体这种功能模型来模拟。煤层围岩破断突水一个显著标志就是渗透系数的变化^[4],岩石损伤破坏导致缺陷结构变化是渗透系数演化的本质特征。大量的岩石应力应变渗透率试验和现场测试研究表明^[5],岩石破坏峰值前后的渗透率发生阶跃性增大变化,破坏带形成了完全贯通的导水通道,渗流过程集中在破坏带。耦合本构关系是研究渗流场和应力场之间的桥梁,目前主要的耦合关系有:应力-渗透系数关系、体应变-水头关系、应变-渗透系数关系、渗透压力-位移关系等^[6]。

本文以淮南矿区某矿承压含水层下开采为研究背景,建立了基于有限元数值分析的等效连续介质流固耦合数学模型,采用应变-渗透系数的耦合本构关系,研究了承压开采背景下顶板岩层破断和渗流规律的时空关系特征。本文的研究成果对于缩小防水煤柱安全开采具有重要的科学意义。

1 裂隙岩体等效渗透系数

文献[7]提出,把岩体理想化为平行、光滑的板系,并设想所有渗流都发生在板系之间。对于由平行墙组成的三组互相垂直的断裂,其张开度和间距都相等并理想光滑。这样断裂的张开度和间距就成为岩体的一种定量指标。

通常岩体初始渗透系数假设为各向同性(见图1a),各向同性介质模型可以用等效的非连续介质模型表示(见图1b),非连续介质模型受大规模工程活动(如长壁开采)影响会产生变化(见图1c),采动影响后的非连续介质模型可以用等效的各向异性孔隙介质模型代替(见图1d)^[8]。

忽略岩块渗透系数的影响,对于相互平行的裂隙组,其等效渗透系数可表示为^[9-10]

$$K_0 = \frac{\rho g b^3}{12\mu s} \quad (1)$$

式中: K_0 为裂隙组的渗透系数; ρ 为流体的密度;

g 为重力加速度; b 为裂隙隙宽; s 为裂隙间距; μ 为流体动力黏滞系数。

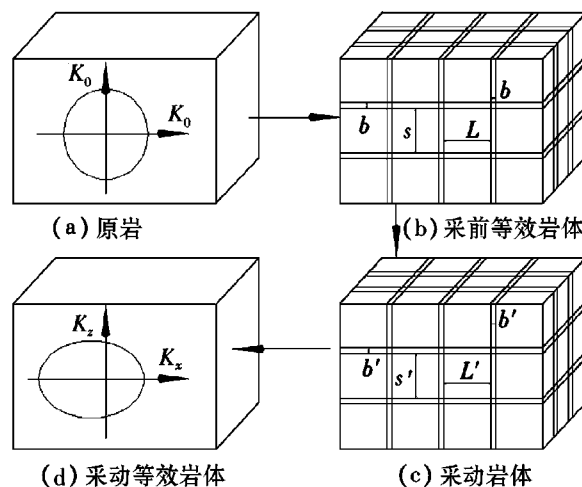


图1 等效渗透系数转化

当裂隙的宽度变化时,渗透系数为

$$K' = K'_0 \left(\frac{1 + \Delta\mu_f}{b_x} \right)^3 \quad (2)$$

式中: K'_0 为裂隙变化前的渗透系数; $\Delta\mu_f$ 为隙宽变化量(压位移为正)。

1.1 裂隙位移变化量

岩体中应力的变化导致裂隙宽度的变化,进而导致岩体渗透性的改变。以往的研究仅仅考虑裂隙变形对渗透性的影响而忽略了岩块变形对渗透性影响。下面综合考虑由于应力变化导致的裂隙及岩块的变形对渗透性的影响,并建立计算模型(见图2)。

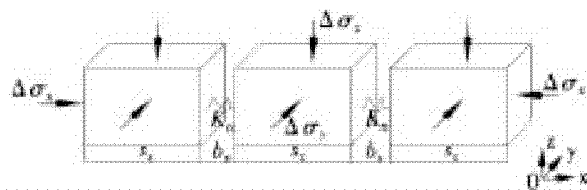


图2 三向应力条件下裂隙岩体应力-渗透性计算模型

沿 x 方向岩体的总位移($\Delta\mu_{tx}$)等于裂隙的位移($\Delta\mu_{fx}$)与岩块位移($\Delta\mu_{rx}$)之和,则裂隙位移为

$$\Delta\mu_{fx} = \Delta\mu_{tx} - \Delta\mu_{rx} \quad (3)$$

式中: f 为裂隙; t 为裂隙与岩块; r 为岩块。

表示成应变形式,则为

$$\Delta\mu_{fx} = (s_x + b_x) \Delta\epsilon_{tx} - s_x \Delta\epsilon_{rx} \quad (4)$$

式中: s_x, b_x 分别为沿 x 方向的裂隙间距及裂隙宽度; $\Delta\epsilon_{tx}, \Delta\epsilon_{rx}$ 分别为岩体与岩块的应变增量。

裂隙间岩块中的应力变化 $\Delta\sigma_{rx}$ 和裂隙中的应力变化 $\Delta\sigma_{fx}$ 应该相等,即

$$\Delta\sigma_{rx} = \Delta\sigma_{fx} = \Delta\sigma_x \quad (5)$$

根据胡克定律,在应力 $\Delta\sigma_x$ 作用下裂隙间的岩块应变 $\Delta\epsilon_{rx}$ 满足下列关系式

$$\Delta\epsilon_{rx} = \frac{\Delta\sigma_x}{E_r} \quad (6)$$

式中: E_r 为岩石的弹性模量; s_x 为岩体裂隙间距。

岩块上的位移为

$$\Delta\mu_{rx} = s_x \Delta\epsilon_{rx} \quad (7)$$

在应力 $\Delta\sigma_x$ 作用下裂隙的变形应满足

$$\Delta\mu_{fx} = \frac{\Delta\sigma_x}{K_n} \quad (8)$$

式中: K_n 为裂隙法向刚度系数。

由式(5~8)得到

$$\frac{\Delta\mu_{rx} E_r}{s_x} = \Delta\mu_{fx} K_n \quad (9)$$

将式(9)代入式(3),可得裂隙法线方向上的总位移为

$$\Delta\mu_{tx} = \Delta\mu_{fx} + \Delta\mu_{rx} = \Delta\mu_{fx} + s_x \Delta\epsilon_{rx} \quad (10)$$

将式(10)整理后可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\mu_{fx}}{\Delta\mu_{tx}} &= \frac{\Delta\mu_{fx}}{s_x \Delta\epsilon_{rx} + \Delta\mu_{fx}} = \\ &= \frac{\Delta\mu_{fx}}{\frac{s_x \Delta\mu_{fx} K_n}{E_r} + \Delta\mu_{fx}} = \frac{E_r}{s_x K_n + E_r} \end{aligned} \quad (11)$$

进一步整理式(11)可得

$$\Delta\mu_{fx} = \frac{E_r \Delta\mu_{tx}}{s_x + E_r} = \frac{E_r (s_x + b_x) \Delta\epsilon_{tx}}{s_x K_n + E_r} \quad (12)$$

1.2 岩体弹性模量比 R_m

岩体应变可定义为

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{tx} &= \frac{\Delta\mu_{fx} + \Delta\mu_{rx}}{s_x + b_x} = \left(\frac{s_x}{E_r (s_x + b_x)} + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{K_n (s_x + b_x)} \right) \Delta\sigma_x \end{aligned} \quad (13)$$

根据胡克定律,由式(13)导出岩体弹性模量:

$$\frac{1}{E_t} = \frac{s_x}{E_r (s_x + b_x)} + \frac{1}{K_n (s_x + b_x)} \quad (14)$$

即

$$E_t = \frac{(s_x + b_x) E_r K_n}{s_x K_n + E_r} \quad (15)$$

整理式(15)可得到弹性模量比 R_m

$$R_m = \frac{E_t}{E_r} = \frac{\frac{1 + b_x}{s_x}}{\frac{1 + E_r}{s_x K_n}} \quad (16)$$

式(16)表明弹性模量比 R_m 是裂隙密度 ($\frac{1}{s_x}$) (1 m 含多少条裂隙),裂隙空隙度 ($\frac{b_x}{s_x}$) 和 $\frac{E_r}{K_n}$ 比值的函数。

1.3 应变与裂隙岩体渗透系数 K 的关系

1) 当 $0 < R_m < 1$ 时,控制着岩块应变和裂隙应变的比值,由式(12)得

$$\Delta\mu_{fx} = ((1 - R_m) s_x + b_x) \Delta\epsilon_{tx} \quad (17)$$

将式(17)代入式(2)可得

$$K' = K'_0 \left(1 + \Delta\epsilon_{tx} \frac{(1 - R_m) s_x + b_x}{b_x} \right)^3 \quad (18)$$

2) 当 $R_m = 1$ 时,岩块和岩体具有相等的模量,应变均匀分布在岩块和裂隙之间,由式(16)得:

$$K_n = \frac{E_t}{b_x} \quad (19)$$

$$\Delta\mu_{fx} = \Delta\epsilon_{tx} b_x \quad (20)$$

式(20)代入式(2)可得

$$K' = K'_0 (1 + \Delta\epsilon_{tx})^3 \quad (21)$$

此时渗透系数变化最小;

3) 当 $R_m = 0$ 时,外部应变全部施加于裂隙中。

$$\Delta\mu_{fx} = \Delta\epsilon_{tx} (s_x + b_x) = \Delta\mu_{tx} \quad (22)$$

代入式(2)可得

$$K' = K'_0 \left(1 + \Delta\epsilon_{tx} \frac{s_x + b_x}{b_x} \right)^3 \quad (23)$$

此时渗透系数变化最大。

1.4 三维正交裂隙渗透系数 K

二维裂隙岩体渗透系数可以进一步扩展到三维情况,对于三维正交裂隙介质,某一方向上传到系数的变化是其它2个正交方向上因采动影响产生应变的函数。

令

$$\beta_x = 1 + \frac{(1 - R_m) s_x}{b_x} \quad (24)$$

$$\beta_y = 1 + \frac{(1 - R_m)s_y}{b_y} \quad (25)$$

$$\beta_z = 1 + \frac{(1 - R_m)s_z}{b_z} \quad (26)$$

则 3 个正交方向上的渗透系数表示如下:

$$K_x = \frac{1}{2}K_{x0}[(1 + \beta_y\Delta\varepsilon_y)^3 + (1 + \beta_z\Delta\varepsilon_z)^3] \quad (27)$$

$$K_y = \frac{1}{2}K_{y0}[(1 + \beta_x\Delta\varepsilon_x)^3 + (1 + \beta_z\Delta\varepsilon_z)^3] \quad (28)$$

$$K_z = \frac{1}{2}K_{z0}[(1 + \beta_x\Delta\varepsilon_x)^3 + (1 + \beta_y\Delta\varepsilon_y)^3] \quad (29)$$

式中: K_{x0} 、 K_{y0} 和 K_{z0} 为初始主渗透系数。

$$R_x = \frac{K_x}{K_{x0}} = \frac{1}{2}[(1 + \beta_y\Delta\varepsilon_y)^3 + (1 + \beta_z\Delta\varepsilon_z)^3] \quad (30)$$

$$R_y = \frac{K_y}{K_{y0}} = \frac{1}{2}[(1 + \beta_x\Delta\varepsilon_x)^3 + (1 + \beta_z\Delta\varepsilon_z)^3] \quad (31)$$

$$R_z = \frac{K_z}{K_{z0}} = \frac{1}{2}[(1 + \beta_x\Delta\varepsilon_x)^3 + (1 + \beta_y\Delta\varepsilon_y)^3] \quad (32)$$

式中: R_x 、 R_y 和 R_z 为 3 个正交方向的渗透系数比。

2 工程应用

2.1 工程背景简介

本计算模型以淮南矿区某矿提高回采上限综采工作面的地质条件和开采条件为应用基础,沿煤层走向将研究区域概化为平面应变模型。工作面标高 $-377.5 \sim -407.1$ m, 开采煤层厚度 3.4 m, 煤层顶板至第四系松散层底部距离为 42 m, 工作面上覆第四系下部含水组砂砾层累计迭加厚度约 50.76 m, 经长期水文长观孔观测, 下含水位基本稳定, 下部含水组与下伏基岩呈不整合接触, 基本无粘土隔水层, 为 I 类水体, 是对提高回采上限开采造成威胁的主要含水层。新生界下部含水组与中部含水组之间无水力联系。

2.2 有限元模型建立

有限元模型长 200 m, 宽 4 m, 高 95 m, 共划分单

元 3 400 个。边界条件为: 两端水平约束, 底部固定, 上部为应力边界。在模型顶部含水层为透水边界, 固定水头。模型围岩本构关系采用 Mohr - Coulomb 模型, 各岩层物理力学参数通过岩石物理力学参数试验来确定 (见图 3)。

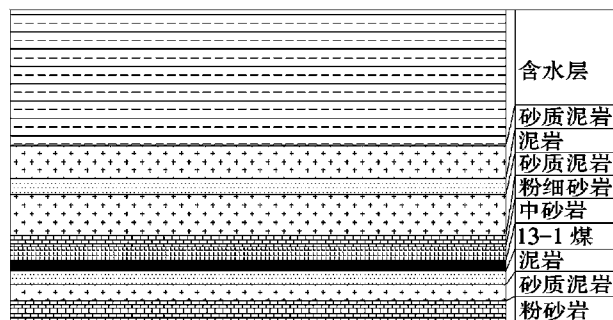


图 3 数值模拟模型

3 采动影响及应变-渗流耦合分析

应用建立的有限元数值分析的等效连续介质流固耦合模型, 研究了承压开采背景下顶板岩层破坏和渗流规律的时空关系特征。

3.1 岩体垂直渗透性增大区演化规律

在工作面不同推进距离下, 围岩垂直渗透系数与采前渗透系数之比的等值线如图 4 所示。随着工作面的推进, 煤层直接顶板所受的应力超过其破坏强度, 直接顶板岩层弯曲变形增加, 出现破坏, 在开切眼后上方和前方煤壁处出现应力集中, 渗透性开始增大, 渗透性增加的范围已发育到采空区上方以外, 且渗透性增加区的最大高度在采空区端部的正上方左右 (见图 4a)。随着开采面积的增大, 当工作面推进到 40 m (见图 4b), 岩体渗透性变化范围进一步扩大, 含水层的渗透出现渗透相对升高区域, 当直接顶板形成的渗透性增大区与含水层内形成的渗透性升高区相交时, 形成导水裂隙通道。据现场实测, 当工作面推进到 44 m 时, 初次来压, 工作面中部液压支架安全阀大面积卸液, 支架立柱伸出量迅速减少, 部分支架被压死。由于工作面矿压显现剧烈, 每次卧好链板机及架脚后待拉架时, 支架立柱又被压死, 这样导致工作面重复卧底、拉架、压架, 在推进 7 m 后工作面出现大量涌水现象, 最大涌水量达到 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

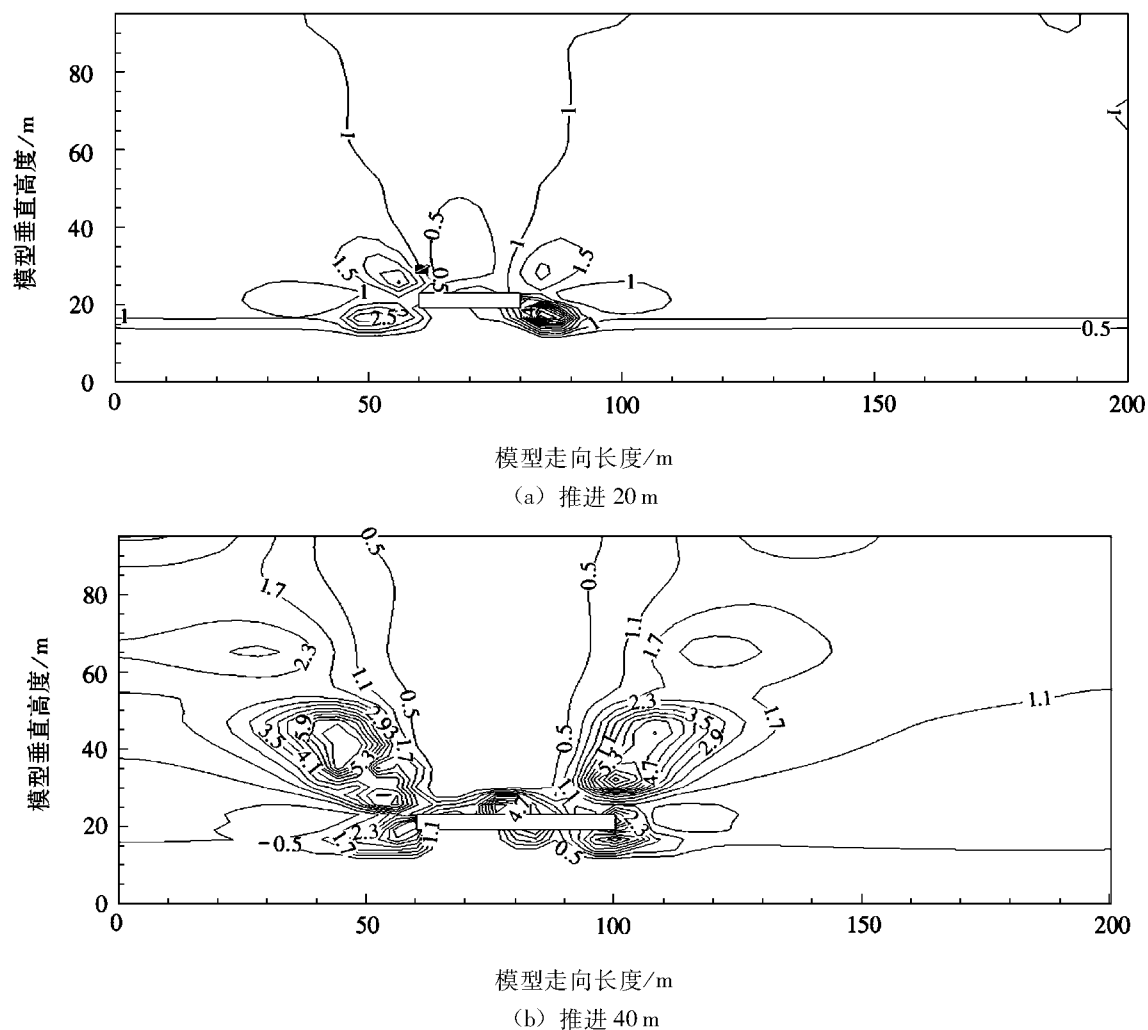
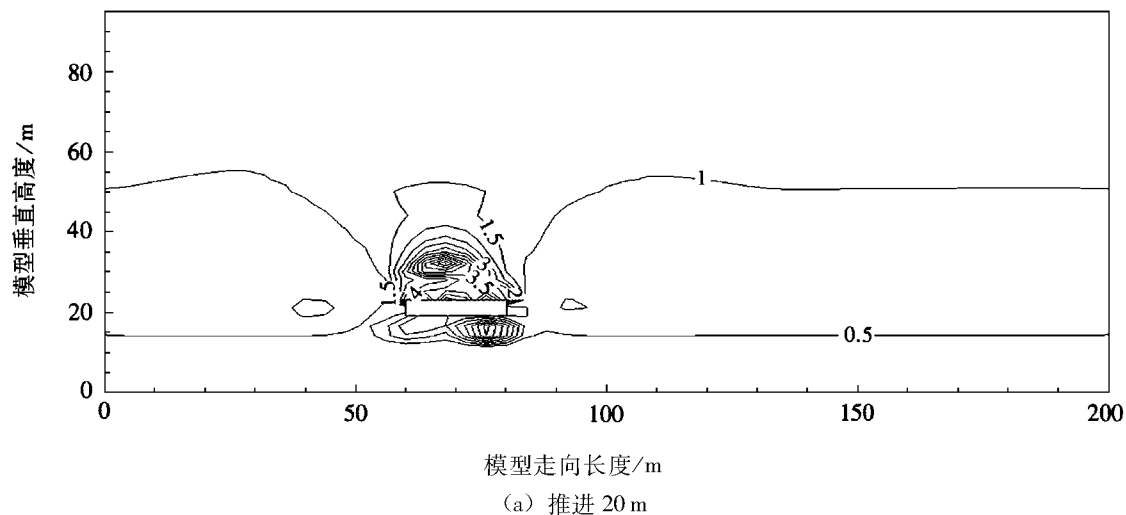


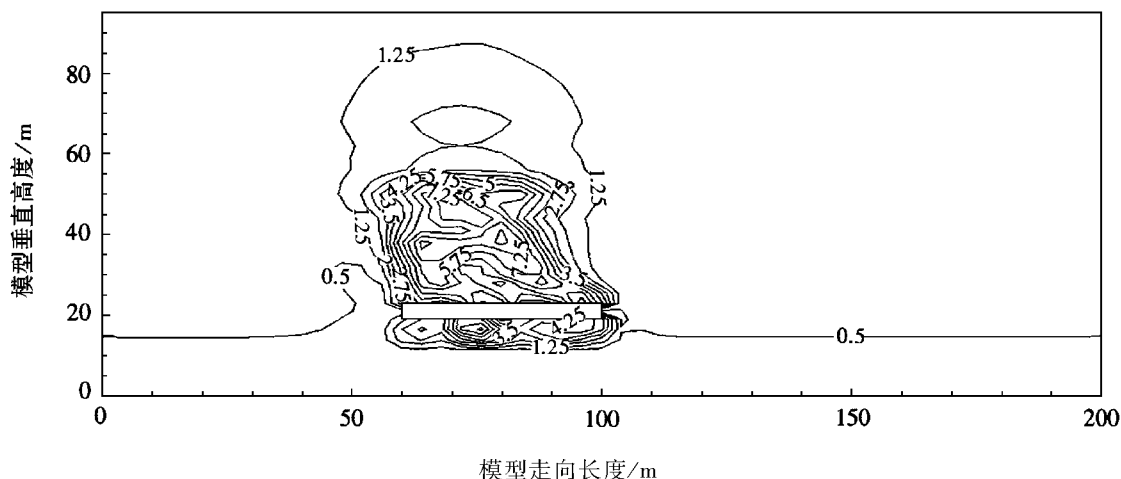
图4 不同推进距离下垂直渗透比等值线

3.2 岩体水平渗透性增大区演化规律

煤层采出后,沿水平方向渗透性也发生变化。不同距离下,围岩水平渗透系数与采前渗透系数之比的等值线如图5所示。在采空区正上方顶板岩层的渗透性增大,且在顶板岩层中渗透性增加的形

状近似为半椭圆形,通过图4、图5对比可知,水平方向与垂直方向渗透性增大区的形状不同。即垂直方向渗透性增大区的最大高度出现在开采区域边界的正上方左右,而水平方向渗透性增加区域的最大高度出现在开采区域中部的正上方。



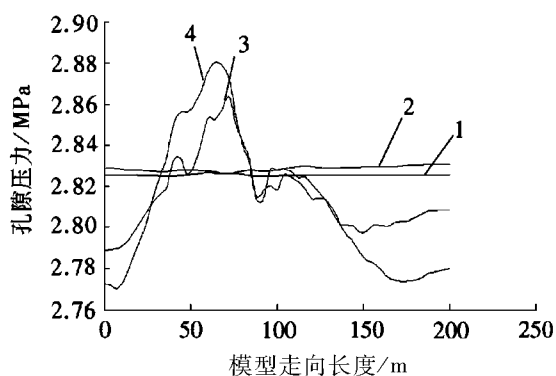


(b) 推进 40 m

图 5 不同推进距离下水平渗透比等值线

3.3 含水层中孔隙压力演化规律

根据开采时间、开采距离与孔隙压力曲线,可在上覆承压含水层内监测到孔隙压力变化(见图6),孔隙水压力变化受到开采顶板的控制,顶板变形越大,孔隙压力变化幅值就越大^[11]。当工作面推进 10 m 后,孔隙压力基本无变化,此时顶板变形量较小;当工作面推进 20 m 时,直接顶初次垮落,采空区上方孔隙压力略降低,未开采煤层上部孔隙压力略升高。



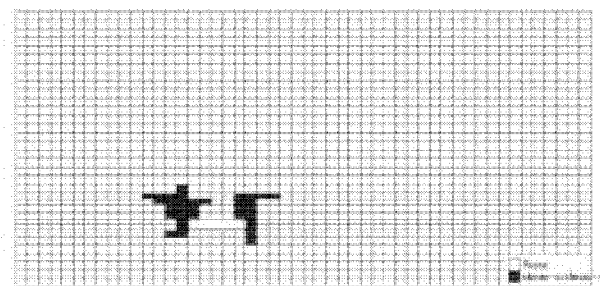
1. 开挖 10 m; 2. 开挖 20 m; 3. 开挖 30 m; 4. 开挖 40 m

图 6 含水层孔隙压力变化曲线

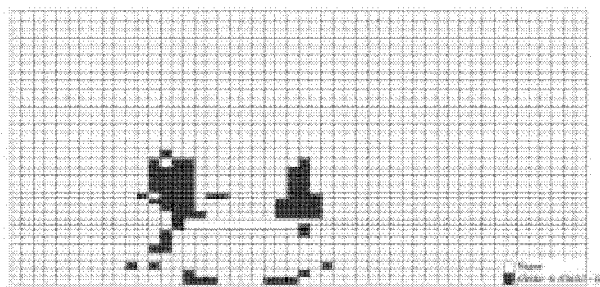
当工作面推进 30 m 时,采空区正上方孔隙压力达到峰值,此时采空区上部为孔隙压力增大区,两端未开采煤层上部为孔隙压力降低区,但是在工作面前方孔隙压力略微升高。当工作面推进 40 m 时,由前述可知,老顶发生初次来压,工作面出现涌水现象,孔隙压力达到最大值,同时,在未开采煤层上部孔隙压力迅速降低。

3.4 采动破坏区与渗透性增大区对比

通过有限元计算,得到采动破坏区范围(见图7),与图4、图5进行对比分析可知:塑性破坏区与渗透性增大区并不完全对应,更不能反映渗流的动态变化规律,因为岩体渗透性增大区的范围比塑性破坏区的范围要大,即使岩体尚未发生破坏,但由于应变变化也会导致渗透性增大,因此单纯依靠岩体是否发生破坏来计算防水煤柱的高度往往不够,需结合岩体实际的渗透性变化共同作为设计防水煤柱的判据。



(a) 推进 20 m



(b) 推进 40 m

图 7 不同推进距离下采动破坏区范围

4 结论

1) 在基于有限元数值分析等效连续介质流固耦合数学模型内,嵌入应变-渗透系数的耦合本构关系,能有效研究承压开采背景下顶板岩层破断和渗流规律的时空关系特征。

2) 将岩体垂直渗透性增大区演化规律、岩体水平渗透性增大区演化规律及岩体采动破坏区发展规律共同作为计算和设计防水煤柱的判据,更加符合现场实际。

3) 研究成果对厚松散层高水压含水层下安全高效开采具有指导意义。

参考文献:

- [1] 郑少河,朱维申,王书法. 承压水上采煤的固流耦合问题研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000(7):421-424.
- [2] 王作宇. 承压水上采煤[M]. 北京:煤炭工业出版社,1993:16-85.
- [3] 仵彦卿. 岩土水力学[M]. 北京:科学出版社,2009:134-196.
- [4] 刘洪磊,杨天鸿,陈仕阔,等. 岩体破坏突水失稳的水压致裂机理及工程应用分析[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(3):356-362.
- [5] 王金安,魏现昊,陈绍杰. 承压水体上开采底板岩层破断及渗流特征[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(4):536-542.
- [6] 杨伟峰. 薄基岩采动破断及诱发水砂混合流运移特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
- [7] SNOW D T. Rock Fracture Spacing Opening and Porosities[J]. J. Soil Mech. Found. Div., Proc. ASCE, 1968, 94(SMI):73-91.
- [8] LIU J, ELSWORTH D. Three-dimensional effects of hydraulic conductivity enhancement and desaturation round mined panels[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997,34(8):1139-1152.
- [9] OUYANG Z, ELSWORTH D. Evaluation of Groundwater Flow into Mined Panels[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1993,30(2):71-79.
- [10] 张金才,王建学. 岩体应力与渗流的耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):1981-1988.
- [11] 隋旺华,董青红. 近松散层开采孔隙压力变化及其对水砂突涌的前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1908-1916.

(责任编辑:何兴华,吴晓红)

注意正确使用“百分点”

百分点(1百分点=1%)的使用现在越来越多,但不少媒体用错了。例如某期刊中说:“2007年产量为100万t,2008年达112万t,增加了12个百分点。”

百分点是一个新的基础数学概念,它只用于比较采用百分数形式表示的数值的增减,例如个人存款的年利率从3.25%降至2.25%,可以说降了1

百分点,但决不能说降了1%。如果是降了1%,则新利率应为 $3.25\% - 3.25\% \times 0.01 = 3.2175\%$ 。可见,上述年产量的增加应该用百分数表示,即说“增加了12%”。

百分点是一个单位,书写时其前面的“个”应删去,正如“5小时”“10厘米”不应写作“5个小时”“10个厘米”一样。

摘自《编辑学报》2010年第5期

反应磁控溅射方法制备 BCN 薄膜的高温抗氧化性

陈向阳¹, 张 瑾¹, 胡海霞¹, 马胜利²

(1. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 为了考察 BCN 薄膜的高温抗氧化, 用反应磁控溅射方法在高速钢基体上制备了 BCN 硬质薄膜材料, 用 X 射线衍射仪 (XRD)、高分辨透射电镜 (HRTEM)、扫描电镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和显微硬度计等方法研究了 BCN 薄膜的高温抗氧化行为。结果表明: BCN 薄膜在 500 ℃ 以下具有较好的抗氧化性能, 氧化温度高于 600 ℃, 薄膜被严重氧化, 薄膜中 C 含量的增加使薄膜的高温抗氧化性能降低。分析认为, 薄膜在 500 ℃ 以下氧化时, 氧气在薄膜内的扩散比较困难, 薄膜不易被氧化; 当氧化温度高于 600 ℃ 时, 由于薄膜中的 C - C 键和 C - N 键被氧化, 在薄膜中留下较多的微孔, 这些微孔能为氧气扩散提供快速通道, 加速薄膜的氧化。

关键词: BCN 薄膜; 抗氧化; C 含量

中图分类号: TG174. 44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 1098 (2013) 03 - 0052 - 06

Oxidation Resistance Behavior of BCN Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering

CHEN Xiang - yang¹, ZHANG Jin¹, HU Hai - xia¹, MA Sheng - li²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University Of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi' an Jiaotong University, Xi' an Shaanxi 710049, China)

Abstract: The BCN films were deposited on HSS substrates by reactive magnetron sputtering (AEMS). The oxidation behavior of BCN films was studied by X ray diffraction (XRD), High - resolution transmission electron microscopy (HRTEM), scanning electron microscope (SEM), Fourier - transform infrared absorption (FTIR), and micro - hardness indentation. The results indicated that the BCN films has good oxidation resistance below 500 ℃, however, further increase of the annealing temperature to 600 ℃ leads to its oxidation or decomposition of BCN films, and higher carbon content in the films is found harmful to the oxidation resistance of the BCN films. It is considered that oxygen cann' t diffuse easily in the BCN films, and the films cann' t be oxidized easily at 500 ℃, however, when the annealing temperature is higher than 600 ℃, the C - C chemical bonds and C - N chemical bonds can be oxidized easily, and lots of micro - voids occure in the films. These micro - voids provide hyperchannel for oxygen diffusion, and the oxidation process of the films is speeded.

Key words: BCN films; oxidation; C content

早期研究表明, 氮化碳 (CN_x) 薄膜^[1-8] 和立方氮化硼 (c - BN) 薄膜^[9-13] 具有硬度高、摩擦系数

低等优异性能, 在耐磨减摩及表面改性领域应用潜力很大。但 CN_x 薄膜在温度高于 400 ℃ 后容易被

收稿日期: 2013 - 03 - 09

基金项目: 安徽理工大学青年基金资助项目

作者简介: 陈向阳 (1979 -), 男, 河南周口人, 讲师, 博士, 主要从事金属材料表面改性相关研究与教学工作。

氧化^[7], c-BN 虽有较好的抗氧化性能,但薄膜制备过程中存在有较大的残余应力,这些不足限制了 CN_x 和 c-BN 薄膜的进一步广泛应用。

随后研究者开始探索在 CN_x 和 c-BN 薄膜中分别掺入硼、碳元素,形成 BCN 薄膜,以期通过成分和微结构优化,改善薄膜的力学性能和应用效果。BCN 薄膜先后被研究者用等离子体增强化学气相沉积方法(PCVD)、离子束增强沉积(IBED)方法及磁控溅射(MS)方法制备出来^[14-20]。研究结果表明,BCN 薄膜微观结构以非晶为主,薄膜的硬度随着沉积工艺的不同在 6~35 GPa 之间变化。然而,BCN 薄膜的摩擦学性能并不理想,如 F ZHOU 等人用销盘摩擦磨损试验仪测量的 B 原子含量 49%、C 原子含量 42%、N 原子含量 9% 的 BCN 薄膜与 SUS440C 钢球在室温下对磨的摩擦系数为 0.8,远远高于 CN_x 薄膜的摩擦系数^[21]。本课题组的前期研究表明,C 含量的增加有利于提高薄膜的硬度,降低薄膜的摩擦系数,从而改善薄膜的摩擦学性能^[22-23]。但 C 含量的增加对薄膜抗氧化性能的影响的研究目前却很少涉及,而这对 BCN 薄膜作为耐磨涂层应用具有重要意义。

本文采用 AEMS 方法制备了系列 BCN 薄膜,通过改变薄膜中 C 的含量来调节薄膜的微观结构,并研究了不同 C 含量 BCN 薄膜的高温抗氧化行为,以为 BCN 薄膜作为耐磨涂层研究提供技术支持和理论基础。

1 实验过程

采用 AEMS 制备了 BCN 薄膜材料,采用 Ti 柱弧与 N₂ 的反应来沉积 TiN 过渡层,以提高薄膜的结合力。通过调节石墨靶的功率来改变 BCN 薄膜中碳元素的含量。BCN 薄膜的具体沉积参数如表 1 所示。

表 1 BCN 薄膜的制备工艺参数

| 沉积参数 | TiN 过渡层 | BCN 薄膜 |
|-------------------------|---------|--------|
| 基体偏压/V | -200 | -100 |
| 基体温度/℃ | 300 | 230 |
| N ₂ /Ar 流量比 | 0.3 | 0.2 |
| Ti 靶功率/kW | 2 | 0 |
| 石墨靶功率/kW | 0 | 0~6 |
| B ₄ C 靶功率/kW | 0 | 2 |
| 沉积时间/min | 20 | 120 |

BCN 薄膜的高温氧化试样采用 SRJXZ-9 型高温电阻炉制备,薄膜在大气条件下进行氧化处理,氧化温度 400~700℃,保温时间为 1 h,随炉冷却后取出。

用 AXIS ULTRA 型 X 射线光电子能谱仪表征 BCN 薄膜的元素组成,能谱仪采用 Al 靶 Ka 单色 X 射线激发源,靶材电压为 15 kV,通过能量为 160 eV,步长为 1 000.0 meV;用 JSM 7000F 型扫描电镜观察 BCN 薄膜的表面形貌,加速电压为 20 kV,工作距离为 10 mm;用 EQUINX55 型傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)对薄膜的化学键类型进行表征,测量波数范围 680~4 000 cm⁻¹,波数精度为 0.01 cm⁻¹,分辨率为 0.5 cm⁻¹;用 D/max-2400 X 射线衍射仪表征薄膜的物相结构,实验以 Cu 的 K_α 为 X 射线源,管压 40 kV,管电流 20 mA;用 JEM 2100F 高分辨透射电子显微镜表征薄膜的微观结构,电子枪为六硼化钨,加速电压为 100~300 kV,点分辨率 0.19 nm,晶格分辨率 0.14 nm;用 MH5 型显微硬度计测量薄膜的硬度,载荷为 20 mN,保载时间为 5 s。

2 实验结果

BCN 薄膜的各元素组成随着石墨靶功率的变化而变化。随着石墨靶功率由 0 kW 增加到 6 kW,薄膜中的 C 原子含量逐渐由 27.3% 增加到 61.9%,而 N 和 B 的含量则呈逐渐下降趋势。石墨靶功率增加对应着溅射电流的增加,单位时间内更多的碳原子被溅射到沉积室内使沉积室内参与反应的碳原子密度增加,更多的碳原子被沉积在薄膜表面,因此薄膜中的 C 碳原子含量增加(见图 1)。

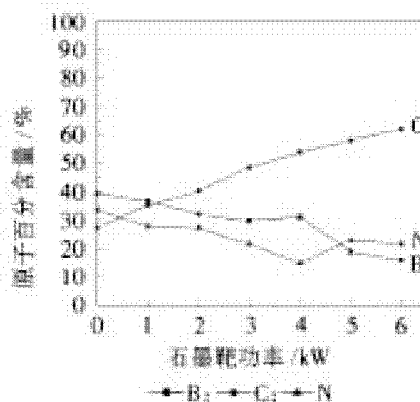


图 1 BCN 薄膜的各元素组成随石墨靶功率的变化曲线

图 2 为不同 C 含量的 BCN 薄膜高温氧化后的 XRD 图谱。从图 2 可以看出,薄膜在 500℃ 以下氧化后,薄膜的 X 射线衍射图谱中除了高速钢基体

和 TiN 过渡层的衍射峰外,没有出现氧化物对应的衍射峰,说明薄膜在 500 °C 以下氧化退火后并没有被氧化;当氧化温度达到 600 °C 时,XRD 图谱中已经出现了其它物相的衍射峰,但强度较弱,经标定,确认其为 TiN 过渡层被氧化所产生 TiO_2 和 Ti_3O_5 产物;随着氧化退火温度提高到 700 °C,薄膜中的氧化产物的衍射峰的强度已经非常明显,说明薄膜大部分已经被氧化,且随着薄膜中 C 含量的升高,薄膜中的氧化产物的 X 射线衍射峰强度越高,薄膜的氧化程度越严重。

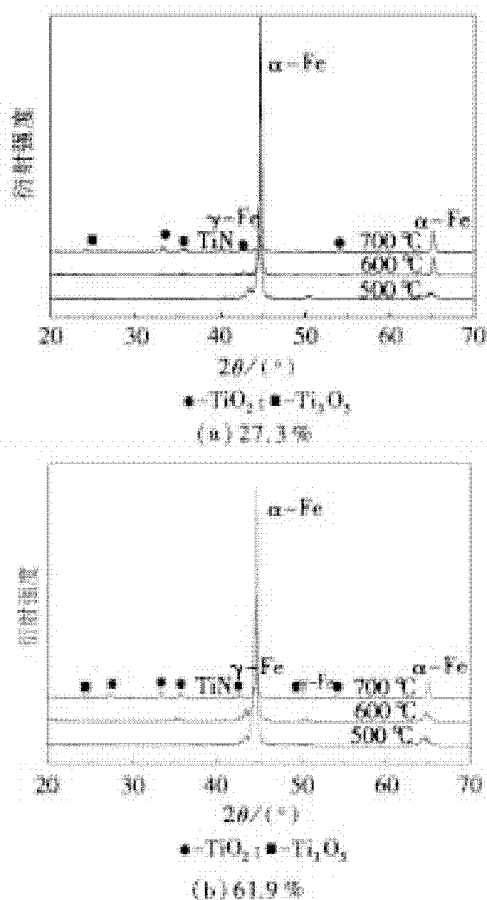
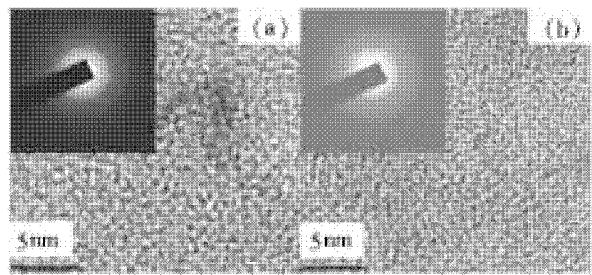


图2 不同 C 原子含量的 BCN 薄膜氧化后的 XRD 图谱

图3为不同 C 含量的 BCN 薄膜在 500 °C 氧化退火后的 HRTEM 形貌及对应的 SED 斑点。从图3可以看出,薄膜中的原子呈短程有序排列,说明薄膜在 500 °C 氧化退火后仍然是非晶结构。与沉积态薄膜的结构相比并没有明显的差别,电子衍射花样为一个光晕,进一步证明薄膜为非晶结构。HRTEM 形貌及对应的电子衍射花样说明薄膜在 500 °C 具有较好的抗氧化性能。



(a) 27.3%; (b) 61.9%

图3 不同 C 原子含量的 BCN 薄膜 500 °C 氧化后的 HRTEM 形貌及对应的 SED 斑点

图4为不同 C 含量 BCN 薄膜的硬度随着氧化退火温度的变化曲线。从图4可以看出随着氧化退火温度的升高薄膜的硬度逐渐降低,在 600 ~ 700 °C 氧化退火后薄膜硬度的下降幅度较大。由薄膜的微观结构分析可知,在 300 ~ 500 °C 氧化退火后薄膜的硬度下降是由于薄膜高温氧化退火导致薄膜沉积过程中形成的压应力得到释放,从而使薄膜的硬度有了小幅的降低;当薄膜的氧化退火温度上升到 600 °C 和 700 °C 后,薄膜被严重氧化,进而使薄膜的硬度大幅下降。

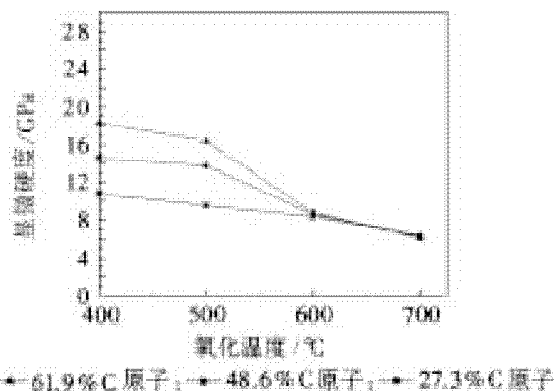


图4 BCN 薄膜的硬度随着氧化温度的变化曲线

图5为不同 C 含量的 BCN 薄膜单位面积重量变化随着氧化退火温度的变化曲线。从图5可以看出,500 °C 氧化退火后薄膜的重量稍有损失,这可能是退火后薄膜表面的吸附碳挥发所致;600 °C 氧化退火后薄膜重量损失较多,这可能是 BCN 薄膜被氧化生成 CO 、 N_2 等产物,这些产物挥发到空气中导致薄膜的重量减小;当氧化退火温度进一步升高到 700 °C 时,薄膜大部分已经被氧化,因此失重也进一步增加,而 TiN 氧化所生成的氧化物在高温下是固相,会对薄膜的失重有一定的补偿作用。

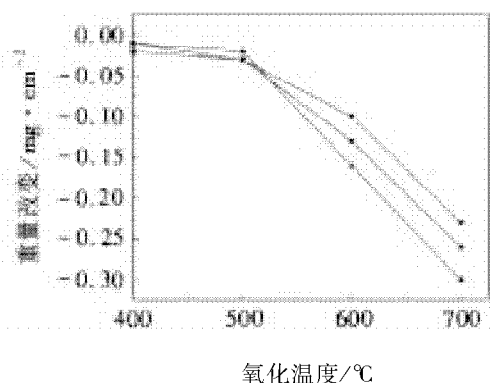


图5 BCN 薄膜单位面积重量变化随着氧化温度的变化曲线

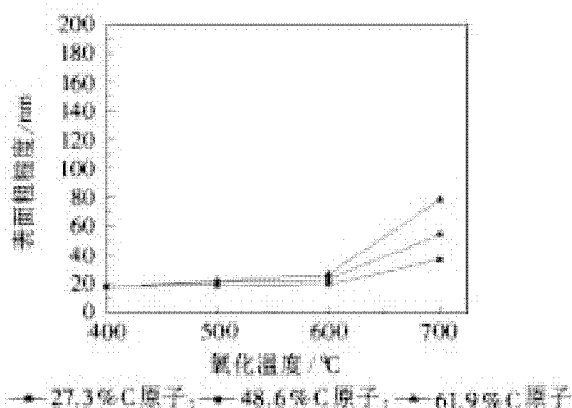
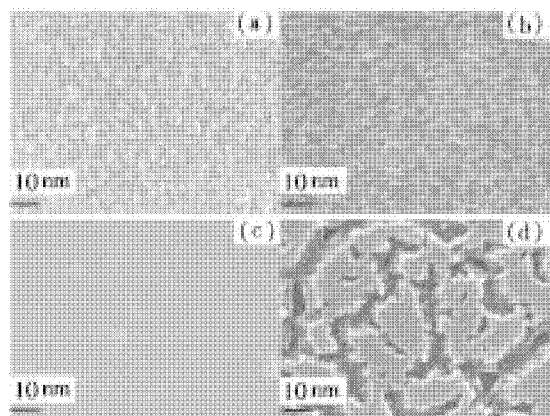


图6 BCN 薄膜表面粗糙度随氧化温度的变化曲线

图6为不同C含量的BCN薄膜氧化退火后的表面粗糙度随着氧化退火温度的变化曲线。从图可以看出,当氧化退火温度高于500℃时,随着退火温度的升高,薄膜的粗糙度逐渐增加,且C含量越高,粗糙度的增加速率越快。薄膜表面粗糙度随着温度的增加是由薄膜的氧化程度随温度升高造成的。随着退火温度的升高,薄膜的氧化程度也加剧,从而导致薄膜中的微观缺陷增多,薄膜的粗糙度增加。



(a) 沉积态; (b) 500℃; (c) 600℃; (d) 700℃

图7 C 原子含量 27.3at.% 的 BCN 薄膜氧化后的表面形貌

图7是C含量27.3at.%的BCN薄膜不同温度氧化退火后的表面形貌。从图7可以看出,与沉

积态薄膜的表面形貌相比,在500℃氧化退火之后,BCN薄膜表面形貌并未出现太大变化,说明薄膜在500℃具有较好的抗氧化性能;600℃氧化退火后,薄膜表面的球状突起结构已经消失,薄膜变得疏松,表面出现了许多大小不一的孔洞;随着氧化退火温度进一步升高到700℃,薄膜表面孔洞尺寸和深度逐渐变大并粘连,形成尺寸较大的裂纹,其中较大的裂纹内部出现空洞,这应该是过渡层被氧化的主要原因。

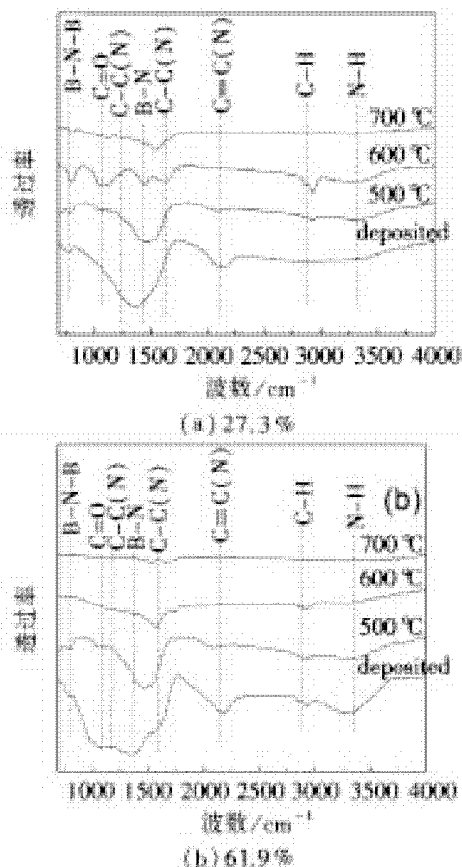


图8 不同C原子含量的BCN薄膜氧化退火后的FTIR图谱

图8是不同C含量的BCN薄膜不同温度氧化退火后的FTIR图谱。从图8可以看出,薄膜在500℃氧化退火后,1100~1600cm⁻¹吸收峰强度有所降低,这是薄膜表面的吸附碳解吸所致;当氧化退火温度升高到600℃和700℃时,1100~1600cm⁻¹吸收峰强度降低很多,薄膜已经明显被氧化,但薄膜中的C=O键含量却很少,这可能是由于加热温度达到600℃和700℃时,C=O键逸出所致。对比BCN薄膜氧化后的FTIR图谱我们发现,B的加入使薄膜的抗氧化温度由400℃提高到500℃,但高C含量BCN薄膜中的B-N键在

600℃已经被氧化,这与其他人报道的h-BN在800℃以下具有较好的抗氧化性能相矛盾^[10]。分析认为,这可能是由于高温氧化后BCN薄膜中存在着较多的微观缺陷,使非晶BN相与O₂反应的几率增加所致。

BCN薄膜的氧化过程及对应的机理可以用图9描述,当薄膜在300~500℃氧化退火时,从退火开始到退火结束,薄膜中并没有产生气孔等微观缺陷,此时由于薄膜较致密,氧气在薄膜内的扩散比较困难,薄膜的氧化速率较慢;当氧化退火温度升高到600℃时,薄膜中由于少量的C-C和C-N键被氧化而挥发,在薄膜中留下较多的微孔,这些微孔能够为氧气扩散提供快速通道,使氧气能够很容易扩散到薄膜内部,加速了薄膜的氧化,薄膜的氧化速率由生成氧化物的速率决定,氧化速率符合氧化动力学的直线规律;当氧化退火温度升高到700℃时,薄膜由于部分被氧化形成微孔,且随着保温时间的延长,这些微孔又相互聚集,最终形成尺寸较大的微观裂纹,这些裂纹的存在使薄膜与氧气的接触面积进一步加大,薄膜的氧化程度进一步加剧,薄膜氧化速率同样符合氧化动力学的直线规律,只是系数较600℃时大。由上可知,薄膜由于氧化所产生的微观缺陷及裂纹的数量和尺寸对薄膜的氧化速率起着决定作用。

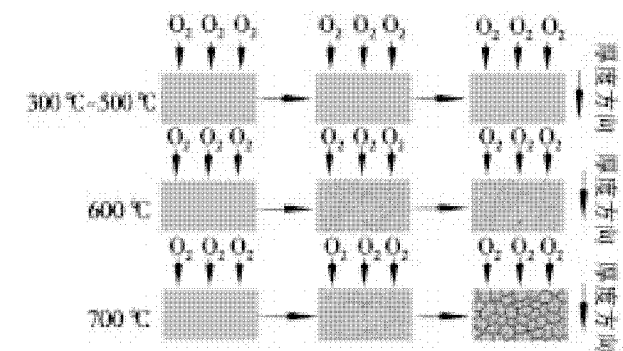


图9 BCN薄膜不同温度的氧化过程及机理示意图

3 结论

采用RMS技术制备了系列BCN薄膜,重点研究了薄膜中C含量对薄膜抗氧化性的影响。结果表明,BCN薄膜在600℃开始发生氧化反应,且随着温度升高,薄膜氧化程度加剧,薄膜中C含量的增加使BCN薄膜的抗氧化性能降低。分析认为在500℃以下薄膜结构比较致密,氧气在薄膜内的扩散比较困难,薄膜不易被氧化;当氧化温度高于

600℃时,薄膜中的C-C键和C-N键易被氧化,在薄膜中留下较多的微孔,这些微孔能够为氧气扩散提供快速通道,加速了薄膜的氧化。

参考文献:

- [1] A Y LIU, M L COHEN. Prediction of new low compressibility solids[J]. Science, 1989, 245: 841-842.
- [2] A Y LIU, M L COHEN, K C HAS, et al. Structural properties of a three dimensional all-sp² phase of carbon[J]. Physical Review B, 1991, 43: 6742-6745.
- [3] M L COHEN. Structural, electronic and optical properties of carbon nitride[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 209: 1-4.
- [4] R K UM, M L COHEN, G MARTINEZ. Allalytic relation between bulk moduli and lattice constants[J]. Physical Review B, 1987, 35(17): 9190-9194.
- [5] L J CORKILL, M L COHEN. Calculated quasiparticle bandgap of beta-C₃N₄[J]. Physical Review B, 1993, 48: 17622-17624.
- [6] D M TETER, R J HEMLEY. Low-compressibility carbon nitrides[J]. Science, 1996, 271(5245): 53-55.
- [7] 吴大维, 吴越侠, 彭友贵, 等. 高速钢刀具镀氮化碳超硬涂层研究[J]. 中国机械工程, 2002, 24(13): 2154-2156.
- [8] 刘广为. 近年国内氮化碳薄膜的研究现状与应用展望[J]. 甘肃广播电视大学学报, 2003, 13(3): 35-38.
- [9] 王玉新, 冯克成, 张先徽, 等. 射频磁控溅射制备硼碳氮薄膜[J]. 功能材料, 2007, 6(38): 889-891.
- [10] T S YANG, T H TSAI, C H LEE, et al. Deposition of carbon-containing cubic boron nitride films by pulsed-DC magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2001, 398-399: 285-290.
- [11] M A DJOUADI, V MORTET, S KHANDOZHKO, et al. Dynamic stress investigations for cubic boron nitride films deposited by triode sputtering technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142-144: 899-905.
- [12] 王玉新, 冯克成, 吴云, 等. 硼碳氮薄膜的内应力研究[J]. 长春理工大学学报, 2006, 1(29): 8-10.
- [13] 岳金顺, 贺德衍, 陈光华. BCN薄膜的结构及其内应力研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 1(37): 23-26.
- [14] F L FREIRE, G MARIOTTO, C A ACHETE, et al. Amorphous hydrogenated carbon nitride films obtained by plasma-enhanced chemical vapour deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 74-75: 382-386.
- [15] W J PAN, J SUN, H LING, et al. Preparation of thin

- films of carbon – based compounds [J]. Applied Surface Science, 2003, 218: 297 – 304.
- [16] H AHN, L ALBERTS, J WOHL, et al. Transparent BCN coatings by RF PACVD at low temperature using metallo – organic precursors [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142 – 144: 894 – 898.
- [17] F JIA, C ZHUANG, C GUAN, et al. Preparation of B – C – N films by magnetron sputtering with different N_2/Ar flow ratio [J]. Vacuum, 2011, 85: 887 – 891.
- [18] T THAMM, K U KORNER, W BOHNE, et al. Characterization of PECVD boron carbonitride layers [J]. Applied Surface Science, 2005, 252: 223 – 226.
- [19] R GAGO, I JIMENEZ, J M ALBELLA. Boron – carbon – nitrogen compounds grown by ion beam assisted Evaporation [J]. Thin Solid Films, 2000, 373: 277 – 281.
- [20] F ZHOU, Q WANG, B YUE, et al. Mechanical properties and bonding structure of boron carbon nitride films synthesized by dual ion beam sputtering [J]. Materials Chemistry and Physics 2013, 138: 215 – 224.
- [21] F ZHOU, K ADACHI, K KATO. Friction and wear behavior of BCN coatings sliding against ceramic and steel balls in various environments [J]. Wear, 2006, 261: 301 – 310.
- [22] X CHEN, Z WANG, S MA, et al. Microstructure and tribological properties of ternary BCN thin films with different carbon contents [J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19: 1 225 – 1 229.
- [23] X CHEN, Z WANG, S MA, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of Ti – B – C – N films prepared by reactive magnetron sputtering [J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19: 1 336 – 1 340.

(责任编辑:李 丽,范 君)

推荐性国家标准的编号可以写为“GB × × × × — × ×”吗?

问 引用编号为“GB × × × × — × ×”的推荐性国家标准要改为“GB/T × × × × — × × × ×”吗?

答 1991 年以前发布的所有国家标准,其编号形式均为“GB × × × × — × ×”,标准代号“GB”与顺序号“× × × ×”间留 1/2 字空,顺序号与简称的年份号间用一字线连接,如“GB7713—87”。1992 年以后发布的国家标准,强制性标准的编

号形式为“GB × × × × — × × × ×”,即年份用全称表示,如“GB 3100—1993”;推荐性标准的编号形式为“GB/T × × × × — × × × ×”,即代号中增加了“T”,意为“推荐”,如“GB/T 3179—1992”。经有关部门论证,直接为编辑出版行业制定的标准都是推荐性的,因此在书写原编号为“GB/T × × × × — × ×”的推荐性标准时,都应改为“GB/T × × × × — × × × ×”。

(郝 远)

不同初始条件下预混气体爆轰波传播研究

曲忠伟¹, 林谋金²

(1. 安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了研究预混气体爆轰波的传播速度与初始压力、温度、预混气体密度等因素之间的关系, 首先分析了丙烷和空气的混合气体爆轰波的传播速度与各影响因素的关系, 利用自制的方形激波管, 通过实验测试了预混气体的爆轰波传播特性, 然后采用定性矩阵的分析手段来定性分析各个初始条件对爆轰波传播速度的影响, 结合定量的实验和定性的分析可以看出, 预混气体爆轰波的传播速度与初始条件 (ρ 、 T 、 C 、 P) 之间定量的影响结果和定性的分析是一致的。该手段验证了实验结果, 为研究未知初始条件的影响提供了一种方法, 对于爆轰波传播机理的深入研究具有重要意义。

关键词: 初始条件; 预混气体; 爆轰条件; 传播速度

中图分类号: O381 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 1098 (2013) 03 - 0058 - 05

Study on Premixed Gas Detonation Wave Propagation under Different Initial Conditions

QU Zhong - wei¹, LIN Mou - jin²

(1. School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: In order to study relationship among premixed gas detonation wave propagation velocity and the initial pressure, temperature, premixed gas density and other factors, relationship among propane, oxygen and air mixed gas detonation wave propagation velocity and each factor was firstly analyzed. The premixed gas detonation wave propagation characteristics were tested by experiment using home - made square shock tube, and then influence of various initial conditions (ρ 、 T 、 C 、 P) on propagation velocity of detonation was qualitatively analyzed using qualitative matrix. On the basis of quantitative experiments and qualitative analysis, it was showed that the qualitative result of the premixed gas detonation wave propagation velocity and the initial conditions is consistent with qualitative analysis. The method validated the experimental results, providing a reference to study of influence of unknown initial conditions, which has important significance for detonation wave propagation mechanism study in deep.

Key words: initial conditions, premixed gas, detonation wave, propagation velocity

当前, 我国的天然气、氢气等气体能源的远距离运输、贮存和使用过程中普遍存在可燃性气体的安全防爆问题。国外对爆轰波传播特性也进行了研究, 科研单位和工业领域对预混气体的爆轰波传

播特性也开展了很多研究。文献[1]研究了氢/空气混合气的球形爆轰; 文献[2]对不同点火位置造成氢/空气混合气加速距离的差异性进行了研究; 文献[3 - 6]研究了平面爆轰波在管道面积突变处

的绕射问题;文献[7]对高速湍流条件下氢/空气混合气的DDT过程进行了研究;文献[8]利用吸收光谱技术分析了激波管中氢/氧气/氩气混合气的爆轰驱动;文献[9-10]利用烟迹捕捉技术研究了氢/氧气/氩气混合气爆轰声学吸收下衰减-再加强的过程,以及氢/氧气/氩气混合气爆轰横波强度变化及柔性壁面对横波的作用和影响。

在研究爆轰波传播特性的过程中,胞格结构能够有效反映可燃气管道内爆轰、爆燃的过程,烟迹捕捉技术是研究胞格结构的重要手段。但气相爆轰波在弯管中的胞格演化比较复杂,国内外公开报道的较少。利用胞格结构分析手段,文献[11]研究了三波点迹线随楔角角度增大而倾斜的实验现象;文献[12]研究了在管道中放置后向梯形块时气体爆轰波的绕射现象;文献[13]研究了爆轰波演变与入射爆轰波横波间距的关系;文献[14]利用烟迹技术分析了气相爆轰波在90°弯管的管道中的绕射过程;文献[15]实验研究了爆轰波通过管道狭缝时胞格的演变过程;文献[16]研究了胞格尺寸与超压的关系;文献[17-19]研究了丙烷/氧/空气混合气非稳定爆轰波传播特性和通过90°弯管时的传播特性,和90°矩形弯管中氢/氧/氩混合气爆轰波的胞格结构。预混气体在不同的初始条件下其传播规律是不同的,由于建模的复杂性,当前很少有人综合分析多重因素影响下预混气体爆轰波传播特性,该实验的研究有利于对预混气体爆轰波传播特性进行深入的探讨。

1 爆轰波传播速度 V 与初始条件的关系

1.1 气体密度 (ρ)

实验预混气体的初始压力为0.1 MPa,由于丙烷和空气是按照化学反应的当量系数进行混合,所以随着丙烷的质量百分比浓度的增加,预混气体的密度也增加,非稳定性的气体爆轰波化学反应热能释放率也相应地增加,从而增加了稳定爆轰波的传播速度。

1.2 温度 (T)

随着初始温度 T 的增加,爆轰波传播速度表现出来的规律是逐渐增大,因为初始温度的增大有利于增加预混气体爆轰波反应能量,从而加快预混气体爆轰波的传播速度。

1.3 管道结构 (C)

在预混气体初始浓度和初始压力相同的情况下,预混气体非稳定性的爆轰波在不同的角度弯管和直管道传播时,速度都会受到明显程度的影响,即随着弯管角度的增加,气体爆轰波经过弯管后的传播速度是先增大后减少,在某个极值的弯管时候传播速度达到最大。

1.4 压力 (p)

预混气体非稳定爆轰波的传播速度是随着初始压力的增大而加快的,这是由于初始压力的增加导致了初始密度也相应的增加,从而增加了丙烷的气体含量,因此相应的增加了支持非稳定爆轰波传播所需要的反应能量,最终增加了非稳定性爆轰波的传播速度(见图1)。

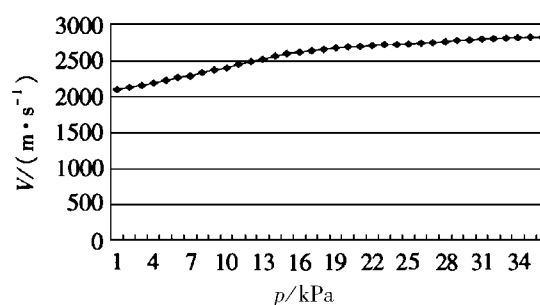


图1 爆轰波传播速度与初始压强间的关系

2 实验装置介绍及测量

本实验利用自制的方形激波管,在管中充满事先混合均匀的丙烷/空气的气体混合物。爆轰激波管由管体、点火装置、配气系统和测试系统四部分组成(见图2)。

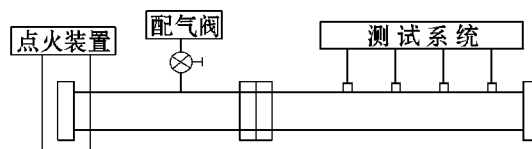


图2 方形激波管

管体长为13.6 m。截面为方形双层结构,分为点火段、过渡段和测试段,分别用法兰连接。内层为不锈钢,外层为方形钢管。点火装置为脉冲放电系统,电压500 V,探针之间的间隙及起爆能量均可调节控制。配气系统包括配气柱,气瓶,混合罐,真空泵和水银压力表等。测试系统包括压力传感器,前置放大器,瞬态波形存储器以及示波器等。

火焰速度测量:48支光电传感器。数据采集

系统设备有 8 通道, 采样速率 40 M/s, 包括电荷放大器、采集软件 (DasView);

压力测量: 8 通道压力测量系统, 4 通道泰克示波器, 4 通道安捷伦示波器;

实验测试中开启各种探测记录设备, 采用高压放电系统对丙烷/空气混合气体点火, 产生爆燃、爆轰过程; 同时根据实验的目的, 改变气体密度、压力、温度和管道结构重复实验。相邻压力传感器之间距离和相邻光电传感器之间距离均为 80 mm。

3 实验结果与分析

在经过大量的实验后取得的数据 (见表 1), 不

表 1 爆轰波传播速度与各因素的关系表

| 温度/ ℃ | 湿度/ % | 当日大气压/ kPa | 管内真空度/ kPa | 管内超压/ kPa | 管内气体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$) | 平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----------|----------|---------------|---------------|--------------|---|---|
| 20 | 66 | 101.17 | 0.67 | 0.47 | 0.50 | 2 802 |
| 20 | 66 | 101.17 | 0.53 | 0.93 | 0.50 | 2 803 |
| 21 | 62 | 101.17 | 0.93 | 2.27 | 0.50 | 2 828 |
| 21 | 62 | 101.17 | 0.80 | 1.73 | 0.50 | 2 825 |
| 21 | 62 | 101.17 | 0.53 | 0.47 | 0.50 | 2 825 |
| 21 | 62 | 101.17 | 0.40 | 0.13 | 0.50 | 2 824 |
| 22 | 64 | 100.77 | 0.67 | 0.47 | 0.49 | 2 746 |
| 22 | 64 | 100.77 | 0.67 | 1.33 | 0.50 | 2 763 |
| 22 | 68 | 101.17 | 0.53 | 0.27 | 0.49 | 2 727 |
| 22 | 68 | 101.17 | 0.53 | 1.27 | 0.50 | 2 818 |
| 23 | 58 | 101.17 | 0.67 | 1.47 | 0.50 | 2 840 |
| 23 | 58 | 101.17 | 0.53 | 0.67 | 0.49 | 2 831 |
| 23 | 58 | 101.17 | 0.40 | 0.67 | 0.49 | 2 818 |
| 23 | 58 | 101.17 | 0.40 | 2.40 | 0.50 | 2 827 |
| 25 | 46 | 101.03 | 0.67 | 1.13 | 0.49 | 2 811 |
| 25 | 46 | 101.03 | 0.53 | 1.00 | 0.49 | 2 805 |

设计一个定性的矩阵 (见表 2 ~ 表 3) 展开分析, 每一个参数发生一些变化都会对爆轰波传播特性产生一定的预期影响, 这也体现出来预混气体爆轰波的稳定性。

考虑气体密度 (ρ) 对爆轰波传播速度的影响, 当气体密度 (ρ) 增加时爆轰波传播速度也增加, 定义 $V = \text{Fun}(\rho +)$, 其中 (+) 表示 V 与 ρ 有一个定性正比的关系; 其次, 类似的有 $V = \text{Fun}(p +)$, $V = \text{Fun}(T +)$, $V = \text{Fun}(C_{(0, \max)} +, C_{(\max, 180^\circ)} -)$, 在弯

难发现, 爆轰波在管道中的传播速度与不同初始条件之间都有着密不可分的关系, 在单个因素的影响下, 容易找出爆轰波传播速度的变化情况, 但是综合考虑多个因素的共同作用时, 爆轰波的传播特性就变得异常的复杂化。对于多重因素的影响, 假定在某个时刻速度 V 与气体密度 (ρ)、压力 (p)、温度 (T) 和管道结构 (C) 关系为

$$V = \text{Fun}(\rho, p, T, C)$$

管角度增大达到某个值使得传播速度达到最大值前, 传播速度 V 是随着 C 的角度增大而加快的, 当速度达到最大值而弯度达到相应的角度之后, 随着角度增加传播速度却是不断减小的, 在爆轰波传播的过程中多个因素的共同作用, 会使得传播特性变得不稳定。当弯度 C 超过使得产波速度达到最大值后的弯度值后, 传播速度随着弯度的继续增加而减慢, 这样就出现了一个正比和反比的影响关系。下面矩阵中的“1”表示的是增加、“0”表示的是保

持不变,“-1”表示的是减少。

表 2 初始压强 p 和弯度 C 对传播速度 V 的综合影响
 $V = \text{Fun}(p+) \oplus \text{Fun}(C_{(\max, 180^\circ)}-)$

| V | $\text{Fun}(C_{(\max, 180^\circ)}-)$ | | | |
|------------------|--------------------------------------|------|--------|------|
| | \oplus | 1 | 0 | -1 |
| | 1 | inc | inc | inc2 |
| $\text{Fun}(p+)$ | 0 | dec | steady | inc |
| | -1 | dec2 | dec | dec |

注:表中“inc”表示增加,“dec”表示减少,“steady”表示“保持稳定不变”,“inc”表示的是两种相异影响因素共同作用导致影响的结果难以判断,无法直接获得爆轰波传播速度是直接增加还是减少

给出每种影响因素添加一个变量——权值 $\text{strength}()$,表示各个影响因素作用于爆轰波传播速度的影响大小,例如:如果设定 $\text{strength}(\text{Fun}(p+)) > \text{strength}(\text{Fun}(C_{(\max, 180^\circ)}-))$,那么上面的表 2 可以进一步计算(见表 3)。

表 3 初始压强 p 和弯度 C 对传播速度 V 的综合影响
 $V = \text{Fun}(p+) \oplus \text{Fun}(C_{(\max, 180^\circ)}-)$

| V | $\text{Fun}(C_{(\max, 180^\circ)}-)$ | | | |
|------------------|--------------------------------------|------|--------|------|
| | \oplus | 1 | 0 | -1 |
| | 1 | inc | inc | inc2 |
| $\text{Fun}(p+)$ | 0 | dec | steady | inc |
| | -1 | dec2 | dec | dec |

注: $\text{strength}(\text{Fun}(p+)) > \text{strength}(\text{Fun}(C_{(\max, 180^\circ)}-))$

通过表 1 可以看出,其他影响因素不变的时候,随着温度的升高,爆轰波传播速度是呈现出上升趋势的。将表 1 的第二行和第三行组成表 4,在温度、湿度、当日大气压和管内气体密度相同的情况下,从管内真空度和超压的关系可以看出,真空压减少 0.14 kPa 而超压增加一倍的时候,爆轰波传播速度提高了一个单位,这说明了相当单位的真空度和超压时,真空度的 $\text{strength} >$ 超压的 strength 。

表 4 管内真空压和超压的关系

| 温度/ $^\circ\text{C}$ | 湿度/ $\%$ | 当日大气压/ kPa | 管内真空度/ kPa | 管内超压/ kPa | 管内气体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----------------------|----------|---------------|---------------|--------------|--|---|
| 20 | 66 | 101.17 | 0.67 | 0.47 | 0.50 | 2 802 |
| 20 | 66 | 101.17 | 0.53 | 0.93 | 0.50 | 2 803 |

当温度、湿度、当日大气压和管内气体密度一定,而管内真空度和超压均减少的时候,按照前面的定性矩阵分析,这个时候爆轰波传播速度应该是

减小的,将表 1 的第十五和十六行组成表 5。对比表 4 和表 5 不难发现真空度和管内超压对爆轰波传播速度的影响与上面的矩阵分析是一致的。

表 5 管内真空压和超压的关系

| 温度/ $^\circ\text{C}$ | 湿度/ $\%$ | 当日大气压/ kPa | 管内真空度/ kPa | 管内超压/ kPa | 管内气体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----------------------|----------|---------------|---------------|--------------|--|---|
| 25 | 46 | 101.03 | 0.67 | 1.13 | 0.49 | 2 811 |
| 25 | 46 | 101.03 | 0.53 | 1.00 | 0.49 | 2 805 |

4 结语

预混气体爆轰波的传播速度与初始条件之间存在着密不可分的关系,通过研究丙烷和空气的混合气体爆轰波的传播速度与各影响因素的关系,综合分析了各种因素的作用,采取了定性矩阵的分析手段来定性的分析了各个初始条件对爆轰波传播速度的影响,这样不但佐证了定量的实验结果,同时也对未知的初始条件影响的研究提供了一种方

法,方便研究者综合考虑多个初始条件,并且利用这些影响条件设置出合适的实验环境,同时也可以综合初始条件让爆轰波的传播速度控制在一定的范围内,这对深入研究预混气体爆轰波的特性很有帮助。

参考文献:

[1] R ATKINSON, D C BULL, P J SHUFF. Initiation of spherical detonation in hydrogen/air [J]. Combustion

- and Flame, 1980, 39 (3): 287 – 300.
- [2] ROBERT BLANCHARD, DETLEF AMDT, TAINER GRATZ, et al. Effect of ignition position on the run – up distance to DDT for hydrogen – air explosions [J]. Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24 (2): 194 – 199.
- [3] EDWARDS D H, THOMAS G O. The diffraction of a planar detonation wave at an abrupt area change [J]. Fluid Mech, 1979, 95 (1): 79 – 96.
- [4] EDWARDS D H, FEAMLEY P, NETTLETON M. A shock diffraction in channels with 90° bends [J]. Fluid Mech, 1983, 132 (3): 257 – 270.
- [5] EDWARDS D H, THOMAS G O. The diffraction of detonation wave in channels with 90° bends [J]. Combustion, 1983, 3 (1): 65 – 76.
- [6] THOMAS G O, WILLIAMS R L. Detonation interaction with wedges and bends [J]. Shock waves, 2002, 11 (3): 481 – 492.
- [7] JOHN H S, LEE R, KNYSTAUTAS A, et al. High speed turbulent deflagrations and transition to detonation in H_2 – air mixtures [J]. Combustion and Flame, 1984, 56 (4): 227 – 239.
- [8] RYU SOON, MUK HWANG, MARTIN JAY RABINOWITZ. Rate Coefficient of the $O + H_2 = OH + H$ Reaction Determined via Shock Tube – laser Absorption Spectroscopy [J]. Chemical Physics Letters, 1995, 32 (4): 279 – 284.
- [9] 年伟民, 周凯元, 王汉良, 等. 气体爆轰波在声学吸收壁下游的再加强过程 [J]. 实验力学, 2005, 25 (1): 37 – 43.
- [10] 周凯元, 李宗芬, 陈志坚. 气相爆轰波平衡胞格稳定性试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1990, 21 (3): 129 – 134.
- [11] THOMAS G O, WILLIAMS R L I. Detonation interaction with wedges and bends [J]. Shock Waves, 2002, 11 (4): 481 – 485.
- [12] OHYGA I S, OBARA T, NAKATA F. A numerical simulation of reflection process of a detonation wave on a wedge [J]. Shock Waves, 2000, 10 (3): 185 – 190.
- [13] BARTLMA F, SCHRODER K. The diffraction of a plane detonation wave at an convex corner [J]. Combustion and Flame, 1986, 66 (5): 237 – 240.
- [14] EDWARDS D H, THOMAS G O. The diffraction of detonation waves in channels with 90° bend [J]. Combustions, 1983, 3 (1): 137 – 140.
- [15] 郭长铭, 张德良, 谢巍. 气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射的实验分析 [J]. 实验力学, 2000, 15 (3): 298 – 305.
- [16] HUANG ZHONG WEI, XU BIN. Relation between cell size and detonation parameters in overdriven gaseous detonation [J]. Combustion and Flame, 1987, 67 (4): 95 – 99.
- [17] 夏昌敬, 周凯元, 沈兆武, 等. 可燃气体非稳定爆轰波通过 90° 圆弯管传播特性的实验研究 [J]. 实验力学, 2002, 17 (4): 438 – 443.
- [18] 夏昌敬, 周凯元. 气相爆轰波在 90° 矩形弯管中传播时胞格结构的演化 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25 (2): 151 – 156.
- [19] 夏昌敬, 周凯元, 沈兆武. 初始条件影响气体非稳定爆轰波在弯管中传播特性的实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34 (1): 92 – 97.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

综采工作面过断层超前深孔注浆技术应用研究

张 永

(煤炭工业合肥设计研究院, 安徽 合肥 230041)

摘 要:分析了块裂结构块体滑落破坏和碎裂结构散体漏冒破坏的注浆加固机理,并结合张集煤矿1413(3)工作面的地质及开采条件,提出了预防断层破碎带顶板垮落的超前深孔注浆加固技术,分析了注浆加固材料的力学性能、注浆加固工艺及加固参数。现场实践表明,超前深孔注浆技术具有较好的技术经济效果。

关键词:工作面断层;注浆加固机理;超前深孔注浆技术

中图分类号:TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)03-0063-06

Application of Reinforcement by Pre-grouting in Long Borehole for Mechanized Longwall Passing through Faults

ZHANG Yong

(Hefei Design Research Institute for Coal Industry, Hefei Anhui 230041, China)

Abstract: On the base of analysis of mechanism of grouting reinforcement for sliding destruction of block structure and dispersion leakage failure of fragmentation structure, and taking into account geological and mining conditions of 1413(3) face in Zhangji Coal Mine, pre-grouting reinforcement technology was proposed to prevent roof from collapse in crack zone. Grouting material, grouting technology and mechanical properties of reinforcement parameters were analyzed. Engineering practice showed that pre-grouting reinforcement technology has good technical and economical benefits.

Key words: faults of coal working face; mechanism of grouting reinforcement; pre-grouting

综采装备水平的日益提高,为煤矿高产高效提供了有利保障,但对于地质条件相对复杂的综采工作面,就缺少灵活性,在通过地质构造带期间,防片帮、掉顶等技术管理难度较大。目前工作面过断层主要采取的是被动工艺方法,提前飘车或刹车,以最短的破顶或破底的回采距离逮住上盘或下盘的顶板,在断层的揭露处采取支架少降快拉、及时支护顶板等工艺,这样的工艺对于断层落差较大,全岩大断面的工作面,经常造成煤壁片帮、顶板冒漏,给正常回采工作带来很大的困难。

本文结合张集矿的1413(3)工作面的实际地质条件,对综采工作面过断层采用超前深孔注浆主动加固工艺,制定了合理的超前深孔注浆加固方

案,取得了良好的应用效果。

1 工作面概况

张集矿1413(3)工作面东邻西二13-1(上)采区系统巷道,南为未采区,西以断层F209为界,北邻1412(3)工作面采空区。煤层结构简单;煤层厚度2.1~5.0 m,平均3.86 m;煤层倾角8°~12°;工作面倾斜长约1 902.5 m,工作面长约为199.6 m。在通过1#异常区断层面附近工作面曾多次出现片帮掉顶,造成压车,工作面无法正常推进,严重影响了工作面单产,造成矿井产量被动,因此必须采取超前加固措施,以保证工作面正常推进。4#异常区与1#异常区极为相似,为Fw201断层影响(其产状

为 $\angle 60^\circ \sim 70^\circ$, 落差 $H=4 \sim 7$ m), 断层走向影响范围约80 m, 贯穿整个工作面。

2 超前深孔注浆加固原理

2.1 工作面顶板冒顶类型

在断层、褶曲等地质构造带, 工作面顶板极为破碎, 控顶时往往产生漏冒现象, 在支护范围内若护顶不严, 也会漏冒。工作面顶板可分为块裂结构和碎裂结构两种基本类型, 相应地工作面顶板冒顶分为块体滑落破坏和散体漏冒破坏两类, 这两类冒顶形式其注浆加固机理各不相同。

2.2 块体滑落破坏与顶板注浆加固机理

断层附近的岩体较为破碎, 在自然条件下, 这些块体处于静力平衡状态, 随着采煤工作面的推进, 端面出现无支护空间, 位于该空间的块体可能会失去原有的静力平衡状态, 沿结构面产生剪切滑移(见图1)。

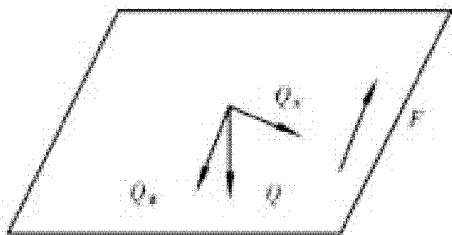


图1 块体受力分析

块体所受垂直方向载荷以 Q 表示, 将其沿结构面方向分解可得下滑力 $Q_w = Q \sin \theta$ 及正压力 $Q_N = Q \cos \theta$, 其中 θ 为结构面倾角。考虑到直接顶块裂结构块体滑落破坏时, 块体侧向上表面已与围岩脱落, 则抗滑力

$$F = CS + fQ_N \quad (1)$$

式中: C 为裂隙面上的粘结力; S 为块体裂隙面上表面积; f 为裂隙面的摩擦系数, $f = \tan \varphi$, φ 为结构面的内摩擦角。

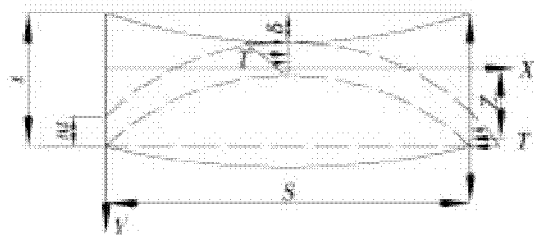
因此, 块体的稳定性系数为

$$m = \frac{F}{Q_w} = \frac{CS}{Q \sin \theta} + \tan \varphi \cot \theta \quad (2)$$

注浆加固后, 相邻岩块间的接触面积 S 将大幅增加, 浆液的粘结性能使得注浆后裂隙面上的粘结力 C 比注浆前提高, 因而注浆后岩块的稳定性系数 m 增加, 从而增加了工作面顶板的稳定性。

块体顶板在横向挤压力 and 支护阻力作用下, 在

一定跨度内成拱而保持平衡, 拱的稳定性通过拱的高度及拱推力线的长短来反映(见图2)。



t —梁厚度; nt —拱压力作用高度; s —梁跨度; z —拱高度;
 δ —梁的最大弯曲挠度; T —拱推力

图2 节理岩梁抛物线拱力学模型

拱推力线的压缩变形为

$$\Delta L = \sum \frac{f_{av} j_i}{E_i} + \frac{f_{av}}{E_c} \left(l - \sum \frac{f_{av} j_i}{E_i} \right) \quad (3)$$

式中: j_i 为第 i 个节理裂隙张开度; E_i 为第 i 个节理裂隙的法向刚度; E_c 为节理岩梁的压缩模量; l 为岩梁横向压缩变形量; f_{av} 为平均拱推力。

$$\Delta z = \frac{\Delta L z^3}{\frac{s^2}{8} \ln \left[\frac{4z}{s} + \sqrt{1 + \left(\frac{4z}{s} \right)^2} \right] - \frac{8z^3}{\sqrt{s^2 + (4z)^2}} \Delta L z} \quad (4)$$

注浆加固后, 节理裂隙张开度 j_i 减小, 假设 $j_i = 0$, 则拱推力线的压缩变形 $\Delta L = \frac{l f_{av}}{E_c}$ 变小, 从而引起拱高度的变化值 Δz 也减小。

由此可见, 注浆后工作面顶板拱推力线的压缩变形量减小, 拱高度的变化值也减小, 工作面顶板向采空区水平移动的趋势减弱, 有利于工作面顶板维护。同时, 注浆加固后, 提高了岩层层面间的结合力, 形成组合梁结构, 能承受较大载荷。

2.3 散体漏冒及顶板注浆加固机理

断层带内顶板破碎、裂隙丛生, 一旦裸露, 就会导致架前掉碴抽空, 支架受力较小, 使得支架处于不稳定状态, 在受到放炮、放顶或其它工序的影响, 可能导致支架失稳, 从而引起冒顶事故。如果在顶板暴露前, 利用泵的压力把配置好的、具有充塞胶凝性质的水泥浆液, 通过注浆孔注入断层裂隙中, 并将其中的空气、水分排出使其胶结, 形成具有一定强度和抗渗阻水能力的固结体, 从而提高围岩的整体性、抗渗性和稳定性, 达到封堵裂隙、防止煤壁片帮及顶板漏顶的作用。固结体的整体强度取决于注浆材料的力学性能。

3 超前深孔注浆材料性能分析

影响注浆材料强度的因素很多也很复杂,但在注浆材料品种、施工工艺等一定的条件下,主要应考虑减少水泥用量及水灰比对混合材料流动性、析水性和抗压强度的效应。

注浆材料流动性直接影响注浆工艺,注浆材料流动性好,管道输送容易,注浆扩散半径大;反之,管道输送困难,注浆扩散半径小。不同水灰比的浆液流动性试验结果如图3所示,水灰比从0.64增大到0.72时,浆液的扩散半径增大了24.9%,增加幅度较大,随后浆液的扩散半径随水灰比的增加呈缓慢增加趋势。

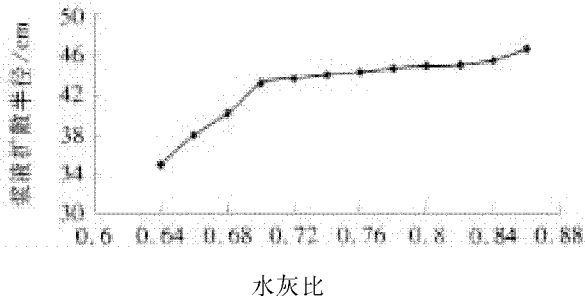


图3 不同水灰比的浆液流动性曲线

浆液的析水性是由水泥浆液颗粒沉降和体积收缩引起的。析水性较小的浆液,其性能变化较小,注浆时易控制,对注浆效果影响较小;而析水性较大的浆液,对注浆及其效果影响较大。析水性较大的浆液在裂隙中流动,随着水泥颗粒沉降,浆液流动断面减小,容易堵塞裂隙,阻止浆液向前流动、扩散,降低浆液扩散半径;同时,析水性较大的浆液停止注浆后,裂隙中浆液因沉降和体积收缩,使得固结体重新产生新的裂隙,降低了浆液的凝结性能和浆液充填的密实性。不同水灰比的浆液析水性试验结果如图4所示,水灰比在0.70~0.76范围变化时,析水率变化较大,水灰比超过此范围时,析水率变化较缓慢。

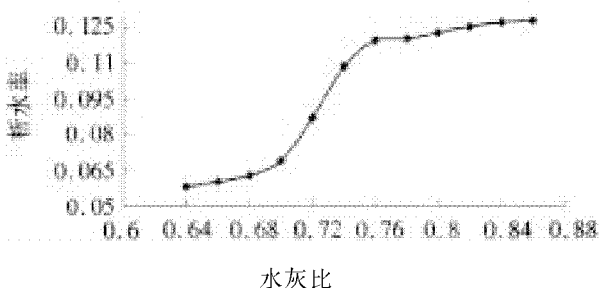


图4 不同水灰比的浆液析水性曲线

为了获得注浆材料适宜配比参数,在实验室做了28d龄期不同配比注浆材料的强度试验,得到一系列的试验数据,浆液材料的抗压强度随着水灰比的变化情况如图5所示,水灰比在0.72及其以下时,28d龄期浆液材料的抗压强度随水灰比变化幅度较小,可获得较稳定的浆液材料抗压强度。

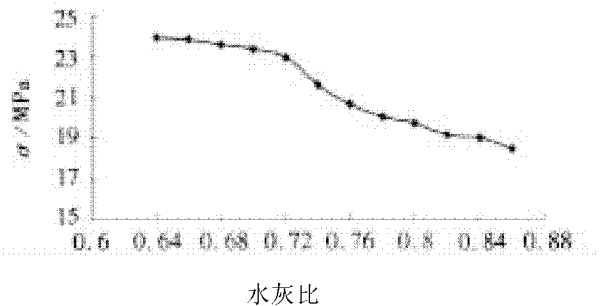


图5 不同水灰比浆材的抗压强度曲线

综合考虑浆液的流动性、析水性和抗压强度,以单液水泥浆为主,确定水灰比为0.72:1。

4 超前深孔注浆加固工艺及参数

4.1 注浆加固参数

4.1.1 注浆孔的几何参数 根据地质资料及钻孔设计技术要求,轨道顺槽打钻设计二个方案:

方案一:在8#钻场内施工20个长钻孔,钻孔沿工作面倾斜方向呈扇形布置(见图6),钻孔全孔下6分注浆管,迎头10m为花管;花管与实管采用专用封口器连接;钻孔孔壁与管壁之间采用袋装聚胺脂与水泥浆联合封孔,封孔长度不小于4m;通过注浆管向断层面内注水泥浆。

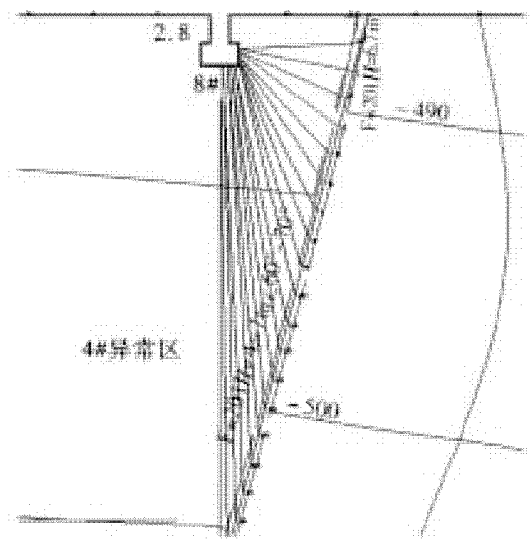


图6 方案一轨道顺槽钻孔平面图

方案二:在9#钻场内施工(见图7),工序同方案一。

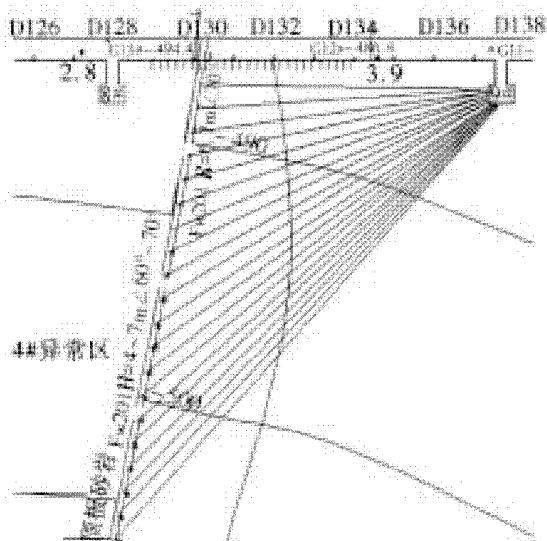


图7 方案二轨道顺槽钻孔平面图

1) 钻孔量比较。方案一的钻孔量为2 413.8 m, 方案二钻孔量为3 356 m, 方案一较方案二钻孔量少942.2 m, 平均轨道顺槽每孔少47.1 m。

2) 钻孔倾角比较。方案一前5个孔为仰角打钻, 对注浆效果不利, 随着煤层的变化从6#孔开始, 钻孔变为俯角, 方案二20个钻孔均为俯角。

综合钻孔量、钻孔倾角的比较后, 采用方案一。

4.1.2 注浆压力 注浆压力除了克服浆液在管路中的沿程阻力外, 主要是克服浆液在煤岩体裂隙中流动时的摩擦阻力。注浆压力大时, 浆液在煤岩体裂隙中的扩散、充填效果好, 浆液的扩散距离远, 但注浆压力应有一个上限值, 防止产生新的破裂面和贯穿阻力小的缝隙造成大量跑浆。根据断层带煤岩体的承受能力、最小抵抗面及工作面围岩条件, 当供风量不低于 $3 \text{ m}^3/\text{min}$, 供风压力不低于 0.5 MPa , 注浆终压应为 $10 \sim 15 \text{ MPa}$ 。

4.1.3 渗透半径 由于浆液扩散半径受裂隙孔隙影响较大, 在破碎顶板条件下, 浆液在煤岩体中的渗流较好。根据经验, 按浆液扩散半径2.5 m来确定注浆孔距, 初步确定孔间距范围5 m。

4.1.4 封孔长度 在正常情况下, 封孔长度决定了封孔的质量。封孔的长度, 不仅要能承受注浆孔内浆液的外冲压力, 而且还要尽可能防止孔内浆液沿封孔段围岩外渗流失。因此确定封孔长度除了要考虑阻止孔内浆液的压力外, 还要考虑煤岩松塌区的大小。现场采用袋装聚胺脂与水泥浆联合封孔工艺, 两端用不少于1.0 m袋装聚胺脂封孔, 中部

用一根注浆短管注水泥浆, 长度为2.0 m(见图8)。

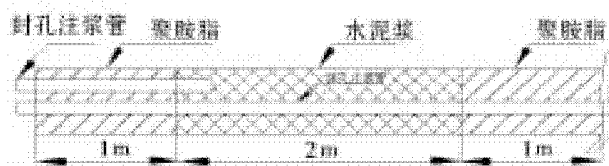


图8 封孔示意图

4.1.5 注浆量 采用ZDY-372钻机配 $\Phi 73 \text{ mm}$ 螺旋钻杆, 钻头直径 $\Phi 94 \text{ mm}$ 打注浆孔, 钻孔直径取 $\Phi 96 \text{ mm}$, 每孔的注浆体积为

$$V_{\text{孔}} = A\pi R^2 L_{\text{孔}} \eta \beta$$

式中: $V_{\text{孔}}$ 为钻孔体积, m^3 ; R 为孔半径, m ; $L_{\text{孔}}$ 为孔深度, m ; A 为浆液消耗系数, 一般为 $1.2 \sim 1.5$; η 为岩石的孔隙率, 一般为 $1\% \sim 10\%$; β 为浆液的充填系数, 一般为 $0.7 \sim 1.0$ 。

注浆体积为

$$V_{\text{浆}} = \frac{M_{\text{水泥}}}{\rho_{\text{水泥}}} + \frac{0.8 M_{\text{水泥}}}{\rho_{\text{水}}}$$

式中: $M_{\text{水泥}}$ 为水泥质量, t ; $\rho_{\text{水泥}}$ 为水泥密度, t/m^3 。

轨道顺槽20个孔共注水泥18.55 t, 其中孔内水泥量约为7.04 t, 注入断层裂隙带的水泥量为11.52 t。

4.2 注浆加固工艺

超前钻孔注浆流程如图9所示。

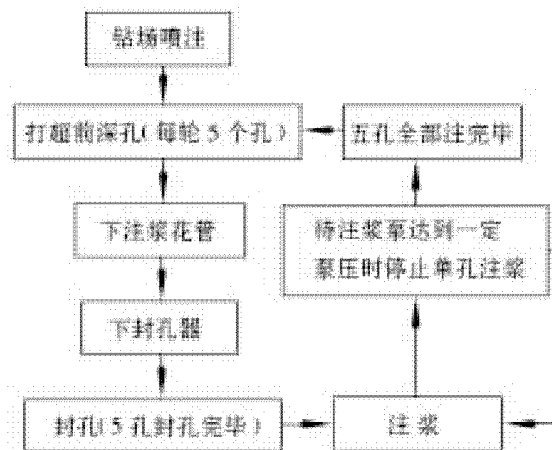


图9 超前钻孔注浆流程图

4.2.1 施工工艺

1) 按设计钻孔位置、参数和规定的施工顺序, 采用ZDY-372钻机配 $\Phi 73 \text{ mm}$ 螺旋钻杆, 钻头直径 $\Phi 94 \text{ mm}$ 打注浆孔;

2) 下注浆管及封孔器。钻孔全孔下6分注浆

管,迎头 10 m 为花管(断层面两侧各 5 m);花管与实管采用专用封口器连接。

3) 封口。为防止注浆时,浆液由于注浆压力大而从钻孔口流出,采用聚胺脂药包与水泥浆联合封孔,封孔范围不低于 4 m。

4) 注浆。注浆采用 2ZBQ5/18 型电动注浆泵,将注浆管路 with 孔口管连接,开泵开始注浆。

5) 待注浆压力顺时逐渐升高至设计注浆压力时或注不动时,关闭压风停泵,结束单孔注浆。

6) 注浆采取每打 5 个孔(隔排)→注浆(5 个孔全部注齐)→打 5 个孔(隔排)→注浆(5 个孔全部注齐)的循环施工方法,按顺序施工钻孔,直至每班或区域注浆施工结束。

4.2.2 钻孔设计技术路线 采用 ZDY-372 钻机配 $\Phi 73$ mm 螺旋钻杆,钻头直径 $\Phi 94$ mm。钻孔终孔点间距 5 m,考虑到工作面提前飘车的因素,钻孔打在距断层下盘煤底板上方约 1.0 m 处,穿过断层面 5 m。钻孔设计技术路线如图 10 所示。

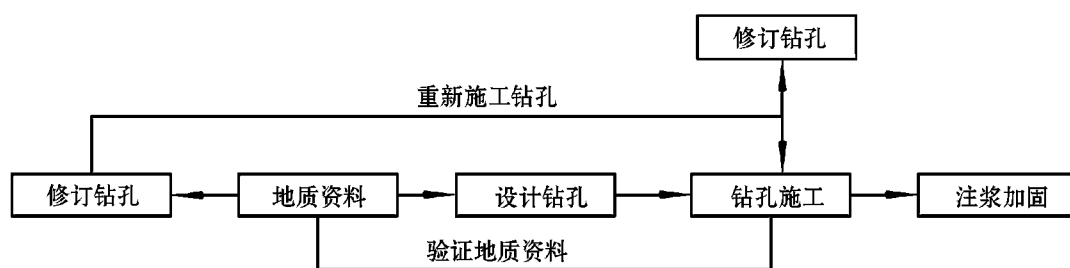


图 10 钻孔施工技术路线图

4.3 钻场的喷注工艺

为防止出现深孔注水泥浆从钻场岩层中漏浆现象,对钻场进行了全断面的喷浆及浅孔注浆措施,封闭了钻场的岩层裂隙。

1) 喷浆范围。钻机窝内部及钻机窝前后煤壁侧 10 m,厚度 100 mm,顶板完好时,喷浆至顶板靠沿空侧第一排锚索;顶板破碎时,喷浆至顶板巷道中心线,喷射砼强度 C20。

2) 喷射砼配合比(质量)。水泥:黄沙:瓜子片 = 1:2:2,水灰比为 0.4 ~ 0.45,速凝剂加入量为水泥的 3%,水泥采用 P. S32.5 级普通硅酸盐水泥。

3) 在钻机窝三个侧面,每个侧面平均布置 2 排注浆眼,顶眼距离顶板 500 mm,底眼距离地板 500 mm,孔深 1 000 mm。

4) 注浆管规格。前端 200 mm 为花管,规格为 $\Phi 26.75 \times 3.25 \times 600$ mm,封堵长度不小于 300 mm,外露长度为 50 mm,待封口牢固后方可注水泥浆。

5) 注浆管封孔采用水泥以及树脂锚固剂(型号为 2360)。

6) 注浆以单液水泥浆为主,浅孔注浆压力 1.5 ~ 2.5 MPa。

7) 单液水泥浆水灰比(质量比)为 (0.6 ~ 0.8):1。

8) 喷浆采用 HPC-V(转 V)型喷浆机。

5 超前深孔注浆加固效果分析

从注浆量分析来看,轨道顺槽钻场的水泥浆注入量明显大于运输顺槽钻场注浆量,这是由于运输顺槽由断层下盘往上盘打钻,钻孔是由煤层向岩层钻,煤的距离较长,瓦斯大 4#、7#孔由于瓦斯喷孔无法注浆,10#孔注浆量不足,另外 13-1 煤硬度较低导致 3#孔塌孔,还有是运输顺槽的钻孔均为仰角,加大了注浆的难度,所以以上三个原因导致这种现象。

现场每打完五个孔,下完注浆管后,注浆时都存在一定程度的串浆,为防止其他孔出现堵孔的现象,这时采取对其他注浆管进行注水的方案,有效地保证了注浆的质量。

轨道顺槽打钻由上盘向下盘打钻,虽然比方案二钻孔距离短,但是由岩层向煤层打,只有打到断面向前 5 m 为煤,所以钻孔施工进度缓慢,对于这种方案设计,在今后的工程实践中要综合考虑,重新做一个钻场,尽量由煤层向岩层中打钻,以保证施工进度。

1413(3)工作面采用断层破碎带超前深孔注浆加固技术后,取得了显著的技术经济效益。注浆加固前后工作面片帮、冒顶情况对比如表 1 所示。

表1 工作面注浆前、后的对比

| | 片帮深度/m | 片帮频次/(次/班) | 冒顶深度/m | 冒顶频次/(次/班) | 含矸率/% |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|-------|
| 1#异常区(未注浆) | 0.40~1.50 | 3 | 1.50~2.50 | 2 | 5.34 |
| 4#异常区(注浆后) | 0.2~0.3 | 2 | 0.25~0.30 | 1 | 3.20 |

通过表1可以看出,未注浆区和注浆区相比较,后者的片帮深度、片帮频次、冒顶深度、冒顶频次和含矸率均有较大程度降低,说明通过超前深孔注浆取得了良好的加固效果。

6 结论

1) 分析了块裂结构块体滑落破坏和碎裂结构散体漏冒破坏的注浆加固机理。块裂结构岩体顶板端面块体的稳定性与 C, S 有关。注浆加固在提高 C, S 值以及提供层间粘结力的同时,浆材的充填使节理裂隙的张开度减小,从而使节理岩梁拱推力线的压缩变形、拱高度变化值减小即顶板下沉量减小;碎裂结构直接顶注浆后浆液把松散的块固结成整体,保证了顶板的稳定。固结体强度取决于注浆材料的力学性能。

2) 从实验室对水泥注浆材料的流动性、析水率以及抗压强度试验表明:水灰比从0.64增大到0.72时,浆液的扩散半径增大了24.9%,增加幅度较大,随后浆液的扩散半径随水灰比的增加呈缓慢增加趋势;水灰比在0.70~0.76范围变化时,析水率变化较大,水灰比超过此范围时,析水率变化较缓慢。水灰比在0.72及其以下时,28d龄期浆液材料的抗压强度随水灰比变化幅度较小,可获得较稳定的浆液材料抗压强度。综合考虑浆液的流动性、析水性和抗压强度,以单液水泥浆为主,确定水灰比为0.72:1。

3) 详细分析了断层破碎带超前深孔注浆加固

参数如注浆孔几何参数、渗透半径、封孔长度、注浆压力、注浆量等的确定原则、具体确定方法和影响因素,这对保证注浆加固的顺利实施和取得良好的效果是非常重要的。

4) 张集矿1413(3)工作面的生产实践表明,采用断层破碎带超前深孔注浆加固技术基本解决了断层破碎带顶板的垮落问题,取得了很好的技术经济效益,并且有广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 曹胜根,刘长友.采场破碎顶板注浆加固机理[J].中国矿业大学学报,1998,27(3):288-290.
- [2] 肖远,丁恩保.节理化顶板及其稳定性问题研究.岩石力学与工程学报,1993,12(4):353-365.
- [3] 华心祝,吕凡任,谢广祥.锚注软岩巷道流变研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):297-303.
- [4] 林登阁,宋克志.跨采软岩巷道锚注支护试验研究[J].岩土力学,2002,23(2):238-241.
- [5] 周华强,侯朝炯,易宏伟,等.国内外高水巷旁充填技术的研究与应用[J].矿山压力与顶板管理,1991(4):2-6.
- [6] 张金接,刘嘉材.低含水量稳定性水泥浆体灌浆性能研究[J].水利水电技术,1991(4):52-56.
- [7] 刘嘉材.化学灌浆[M].北京:水利电力出版社,1988:10-25.

(责任编辑:何兴华,吴晓红)

时间序列和神经网络对迷你型洗衣机销量预测

石磊

(阜阳职业技术学院信息技术系, 安徽 阜阳 236031)

摘要:迷你型洗衣机价格便宜,使用方便,近年来销售量不断增加。缺点是功能单一导致消费受众面窄,同时受季节性因素影响较大,企业往往难以准确制定生产销售计划,导致库存和缺货现象时有发生。将合作企业生产的迷你型洗衣机近4年销售数据和影响销售的关联因素作为训练样本,先建立时间序列回归模型和BP神经网络模型对洗衣机销量进行预测,然后建立遗传算法优化的灰色神经预测模型。通过对三种模型预测结果的对比分析,表明经由遗传算法优化参数的灰色神经网络能较好的预测销量未来变化,辅助企业决策订单生产计划。

关键词:订单预测;灰色神经网络;遗传算法

中图分类号:TP3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)03-0069-05

Mini Washing Machine Sales Prediction Based on Time Series and Neural Networks

SHI Lei

(Department of Information Technology, Fuyang Vocational College, Fuyang Anhui 236031, China)

Abstract: Mini washing machines are cheap and easy to use, their sales have been increasing for recent years. The disadvantage of simple function results in narrow range of users, and their sales are heavily affected by seasons. So it's hard for enterprises to set production and sales plan accurately, which leads to inventory and shortage occurrence. The sales data and associated factors affecting sales of mini washing machine produced by cooperative enterprises of recent four years were used as training samples to establish time series regression model and BP neural network model to predict washing machine sales and then the gray neural prediction model optimized by genetic algorithm was built. Comparative analysis of the prediction results with these three models showed that prediction of sales changes in the future by the gray neural prediction model optimized by genetic algorithm is better, which assists the enterprises to make production plan for ordering.

Key words: order prediction; grey neural network; genetic algorithm

国内家电市场经过近30年的发展,市场日趋成熟,竞争激烈,中小型家电制造企业由于市场规模有限,对销售市场的整体把握能力较弱,无论是产销量还是市场推广上都处于劣势。近年来,随着原材料价格和人工成本的不断上涨,家电制造进入

微利时代,进一步加剧中小企业的生存危机。为了能在激烈的市场竞争中立于不败之地,这些企业必须能更快捷有效的反馈市场变化,进一步细分市场,同时通过降低库存和控制原材料成本来提高市场竞争力^[1-2]。

收稿日期:2012-12-31

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(KJ2011B129)

作者简介:石磊(1981-),男,安徽淮北人,讲师,硕士,研究方向:神经网络应用。

课题组合作企业是一家地方性家电制造企业,考虑目前家电企业普遍出现的产能过剩和产品同质化现象,该企业针对大型家电企业关注较少的迷你型洗衣机市场推出了多款产品,销量和品牌认可度不断提升,在小型洗衣机市场上呈现良性发展态势。迷你型洗衣机优点在于价格便宜,洗涤少量的衣服时节省水量和电能;缺点在于功能单一,购买者一般作为单身生活用品或家中大洗衣机的补充,消费受众面较窄。另外在调研中发现迷你型洗衣机的销售受季节性影响较大,一般在夏季进入销售高峰期,但有时也会出现峰期提前或滞后的波动。由于存在以上多方面因素,合作企业目前难以准确制定生产计划来配置生产线,导致库存和缺货现象时有发生。企业要提高产品的竞争力,就必须制定合理的生产计划来降低库存,提高资金周转率。因此,建立一个科学的订单预测模型可以为企业生产计划提供科学依据,形成批量效应降低成本,还能保证供应链和企业内部生产的稳定性,缩短对紧急订单的响应时间。

1 预测理论基础

订单数据^[3-4]是典型的小样本数据,具有非线性强、未知因素多的特点,目前主要有遗传算法预测、神经网络预测、混沌预测和时间序列预测等多种建模方法应用于订单预测。但这些方法均具有一定限制条件:如时间序列预测要求数据本身满足一定数学条件;神经网络建模需要对网络结构前期分析,随机选取权重阈值等参数等都会对预测准确性产生负面影响;遗传算法在种群数量和交叉变异概率方面也有同样的问题。灰色神经网络^[5]既具有灰色理论用小样本数据建模的独特方法,又具有神经网络模型对非线性自适应能力强的优点,实现较好的数据处理和预测精度。针对实验中洗衣机订单的信息处理,拟采用灰色神经网络来建立预测模型,遗传算法优化网络参数,组合预测洗衣机订单走势,并与其他单一预测方法的预测结果进行横向比较,得出相关结论和后期研究改进方向。

1.1 AR 预测模型

AR 模型^[6]一般也称为自回归模型,是典型的时间序列预测模型,反映在不同时间点上变量和值之间的关系,一般的 AR 模型形式为

$$x_t = \sum_{i=1}^n x_{t-i} + a_t \quad (1)$$

式中: x_{t-i} ($i = 0, 1, \dots, n$) 为时间序列; a_t 为白噪声序列; n 为模型阶数,上述模型一般表示为 $AR(n)$ 。这是一类在工程领域应用广泛的模型。

1.2 BP 神经网络模型

BP 神经网络^[7]是一种典型的误差反向传播人工神经网络,一般包括输入层,隐含层,输出层三部分,每层由若干神经元来构成,每个神经元在激活函数和阈值的作用下将接收到的信息以一定权重传递至下一层神经元,并根据反向传播的误差及时调整权重和阈值的大小,从而尽可能的逼近训练样本的模型。BP 神经网络具有良好的非线性逼近能力和对杂乱信息的综合处理能力。订单生产有很大的随机性和非线性,基于 BP 神经网络建立预测模型来预测订单在理论上是可行的。

1.3 遗传算法

遗传算法^[8]是通过模拟自然界进化法则对编码染色体群进行复制交叉和变异淘汰等一系列操作,使得种群以优胜劣汰的方式进化,从而达到最大限度适应环境的目的。遗传算法在优化问题中有较多应用。在本文中主要利用遗传算法优胜劣汰的进化特性来对神经网络模型参数进行优化,从而进一步来优化网络结构。

1.4 灰色模型

灰色模型^[9]是针对样本小,信息少的不确定性数据序列进行预测的一种行之有效的方法,它通过对原始数据进行处理,找到系统的内在变化规律,生成规律性突出的数据从而建立微分方程,对数据的未来发展进行预测。该方法可做到较长期的精确预测。设有时间数据序列

$$x^{(0)} = \{x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}\} \quad (2)$$

对数据进行累加,得到

$$x^{(1)} = \{x_1^{(0)}, \sum_{i=1}^1 x_i^{(0)}, \sum_{i=1}^2 x_i^{(0)}, \dots, \sum_{i=1}^n x_i^{(0)}\} \quad (3)$$

根据新的数据序列 $x^{(1)}$, 建立微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (4)$$

求解,得到

$$x_t^{*(1)} = (x_1^{(0)} - u/a)e^{-a(t-1)} + u/a \quad (5)$$

累减之后可得 $x_t^{(0)}$ 的预测值 $x_t^{(*0)}$ 为

$$x_t^{(*0)} = x_t^{*(1)} - x_{t-1}^{*(1)}, t = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

1.5 灰色神经网络

灰色神经网络的结构图如图1所示。

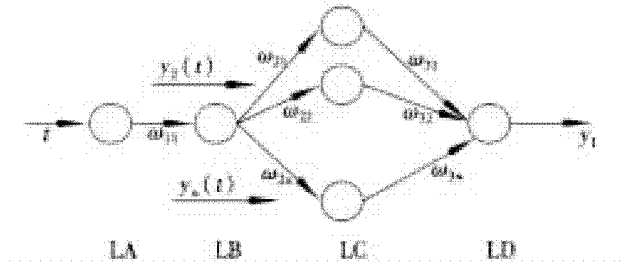


图1 灰色神经网络结构图

其对应的微分方程为

$$\frac{dy_1}{dt} + ay_1 = b_1y_2 + b_2y_3 + \cdots b_{n-1}y_n \quad (7)$$

式中: y_1 为网络预测值; y_2, \cdots, y_n 为系统输入参数; b_2, \cdots, b_{n-1} 为微分方程系数。

权值 $w_{11}, w_{21}, \cdots, w_{2n}, w_{31}, \cdots, w_{3n}$ 对应的计算公式为

$$w_{11} = a, w_{21} = -y_1(0), w_{n+1} = u_1, \cdots, w_{2n} = u_{n-1}w_{31} = w_{32} = \cdots = w_{3n} = 1 + e^{-at} \quad (8)$$

式中: $u_1 = \frac{2b_1}{a}, u_2 = \frac{2b_2}{a}, \cdots, u_{n-1} = \frac{2b_{n-1}}{a}$, LD层中的输出节点阈值 $\theta = (d - y_1(0))(1 - e^{-at})$ 。

2 遗传算法优化的灰色神经网络模型

2.1 企业订单销售分析

生产订单计划是企业运转的核心链条,利用神经网络模型来预测订单的走势,就需要对影响订单的关键因素进行分析整理。对于洗衣机市场来说,影响其需求量的因素很多,比如季节性因素、销售价格、消费群体价格敏感性、产品质量、售后服务、产品生命周期、成本、竞争对手等。由于合作企业洗衣机产品以三、四线城市乡镇为主要销售市场,因此产品在市场定位、销售渠道建立、促销政策制定、市场特征、性能价格比等方面具有销售地本土化的一些特征。课题组为了能够将预测模型的预测应用范围更适合集团的整体销售管控,调研了区域之间相对分散的5个办事处来分析销售影响因素,使数据来源更具有普遍性。

2.2 遗传算法优化

课题组通过对合作企业自2009以来的销售数

据进行分析梳理,并赴该企业销售部门和驻外办事处进行了调研,筛选出对迷你洗衣机销售影响的4个关键因素:销售量、销售价格波动、经销商预测和缺货量,作为样本参数对销量进行预测。同时针对以往文献中网络权值随机化后导致网络预测精度下降,训练时间过长易导致发散的情况,实验模型采取先用遗传算法对灰色神经网络权值进行优化,然后运用样本数据对网络模型进行训练,最后将预测输出结果与实际销量进行对比分析(见图2)。

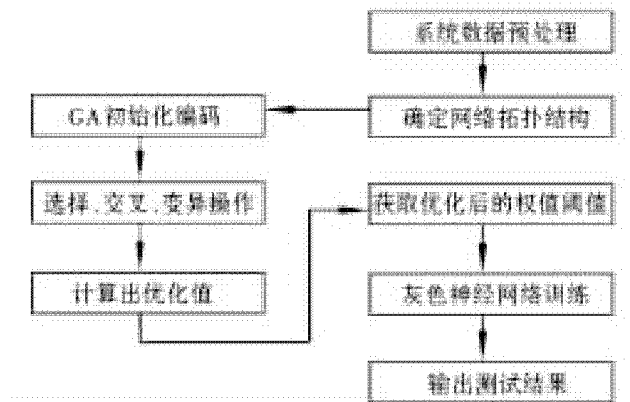


图2 算法流程结构图

通过多次的实验对比测试,将遗传算法中参数值设定如下:遗传算法选择种群个体的数目设定为200,交叉概率设定为0.4,变异概率设定为0.2,精英保留比例为15%,而进化次数设置成40次。灰色神经网络选择1-1-4-1结构,各层输入分别为

$$\text{LA层: } a = \omega_{11}t$$

$$\text{LB层: } b = \frac{1}{1 + e^{-w_{11}t}}$$

$$\text{LC层: } c_1 = b\omega_{21}, c_2 = y_2(t)b\omega_{22},$$

$$c_3 = y_3(t)b\omega_{23}, \cdots, c_n = y_n(t)b\omega_{2n}$$

$$\text{LD层: } d = \omega_{31}c_1 + \omega_{32}c_2 + \cdots + \omega_{3n}c_n - \theta_{y_1}$$

3 仿真测试分析

3.1 模型训练样本分析和处理

为了获取更理想的销售预测效果,在数据选择上对合作企业销售的多个型号洗衣机经行数据预处理,在数据统计中发现以下问题:

第一,暂时性大力度促销活动对于洗衣机的销量在短期内有明显的拉动作用,但对于长期的统计分析是不利的,销量的大幅波动给预测带来一定的负面影响。

第二,家电下乡中标产品的销售受到政策影响

较大,尤其在家电下乡补贴政策开始和临近结束时期,销量会有大幅提升,而这两个时间段在往年是洗衣机销售的传统淡季。由于家电下乡中标产品有效期为一年,每年重新投标,因此有些产品在2009年至2012年4年间有中标和非中标年份,销售规律被打破,预测效果难以保证。

第三,近年来部分配件原材料市场价格出现过短期的大幅涨跌现象,导致合作企业生产的洗衣机价格出现成本因素的涨跌,主要体现每一年同时期的出厂价格和促销力度的变化,同时各型号洗衣机因配件成本受影响程度也各不相同。因此给预测带来一些短期的不确定因素。

通过分析合作企业多个型号产品的销售实情,排除受上述原因影响较大产品,最终选定XPB系列迷你型洗衣机的销售数据及关联因素作为训练样本。实验选取自2009年2月至2012年7月共计43个月的统计数据,包括销售时间、销售数量、出厂价格、经销商预测和缺货量统计。选取其中前37个月的数据作为训练样本,对后6个月的洗衣机销量进行预测,并与实际销量进行比较分析。

3.2 基于3种模型预测结果对比

对同一训练样本,先后采用时间序列模型、BP神经网络模型和遗传算法优化的灰色神经网络模型来分别预测。对比分析三种模型对产品销量的预测效果。

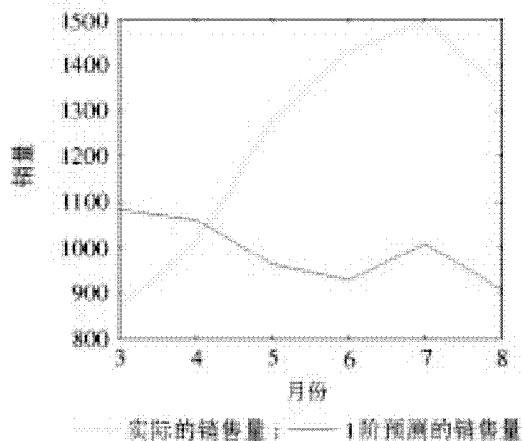


图3 AR(1)模型预测与实际销量比较(2012年)

图3为基于时间序列模型的预测销量和实际销量结果比较,从图3中可以看出,6~8月的预测出入较大,而6~8月是小型洗衣机销售的全年黄金期,未能反映出产品销量实际走势。

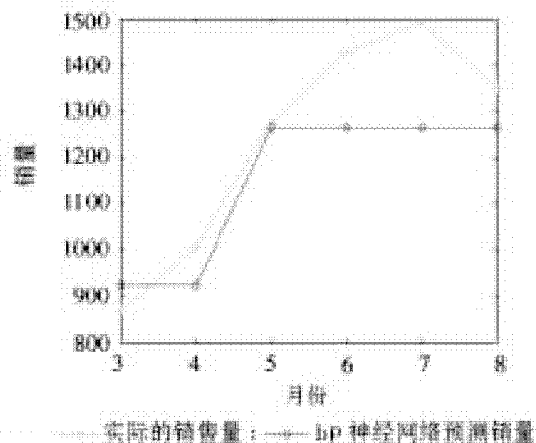


图4 BP神经网络预测与实际销量比较(2012年)

图4为基于BP神经网络的预测销量与实际销量对比效果,BP模型中选择学习率0.2,动量因子0.9,构造3-10-1结构的BP神经网络,每层的函数分别为'tansig', 'tansig', 'purelin', 训练方法为'trainbr'。相对于时间序列预测准确率有所提高,但通过网络训练依然未能较好的反映出产品实际销售规律,在3~5月期间预测值和实际销量较为接近,6~8月的销售预测依然有较大差距。

基于遗传算法优化的灰色神经网络预测模型中遗传算法适应度函数为预测值与实际值误差绝对值,遗传算法对灰色神经网络 m_1, m_2, m_3, m_4 四个初始化参数进行优化,优化之后的参数如下表所示。

表1 经遗传算法优化之后灰色神经网络参数取值

| 参数 | m_1 | m_2 | m_3 | m_4 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 优化值 | 0.300 | 0.300 | 0.200 | 0.400 |

图5为遗传算法优化后的网络预测模型与实际销量对比,从图中可以看出,该模型预测效果好于时间序列预测模型和BP神经网络预测模型。

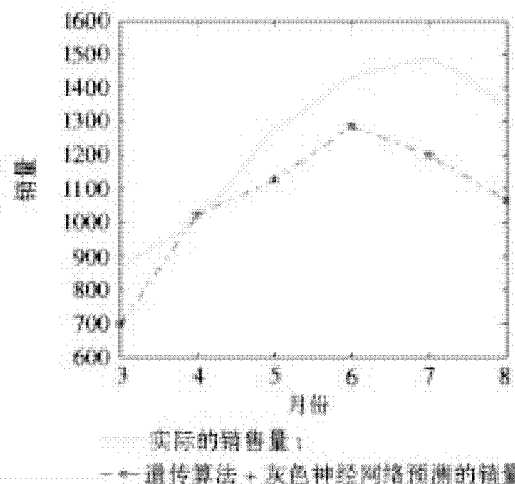


图5 遗传算法优化灰色神经网络预测与实际销量比较(2012年)

4 总结分析

AR(1)阶时间序列预测模型、BP神经网络预测模型和遗传算法优化的灰色神经网络预测模型的三种预测结果比较如图6所示。

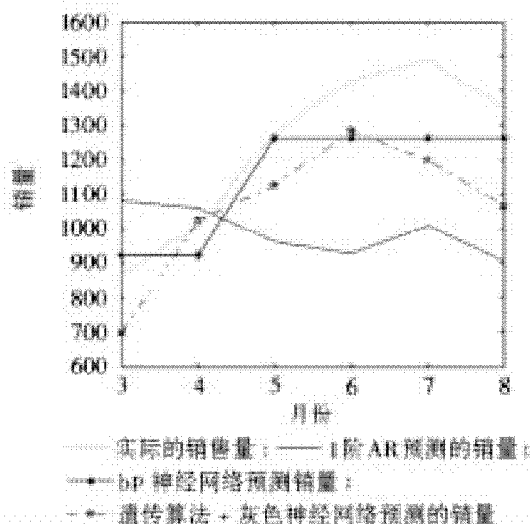


图6 各种模型预测结果比较(2012年)

如图6所示,通过对比上述3种模型的预测结果可以发现:AR(1)模型预测误差较大,甚至不能明确反映销量走势,在仿真实验中不仅是AR(1)阶模型预测误差较大,即便基于AR(2)阶甚至更高阶预测,预测销量与实际销量也存在较大误差,均无法反映真实销售走势,因此分析认为:该销量数据是不符合时间序列预测的前提数学条件,因非本实验主要研究问题,在此不作进一步讨论。之后进行的BP神经网络预测虽能在一定程度上反映出销量走势,但有明显饱和现象,即销量到达一定程度之后,网络输出值无法根据输入变化而改变,初步分析认为是由于输入向量维数(即影响销量因素个数)导致。而对于遗传算法优化灰色神经网络的预测模型,虽然预测销量与实际销量有一定误差,但从整体走势来看,基本能正确反映出销量随销售月份变化的趋势,并且也符合一般洗衣机在夏秋换季时达到销售旺季的市场经济规律,仔细分析曲线发现遗传算法优化灰色神经网络的预测具有一定超前平移性,如预测曲线的峰值出现在6月,而实际销售的峰值出现在7月,这一方面是由有限的数据量造成,另一方面对企业安排生产并无负面影响,假定企业按照此预测曲线安排生产,在

6月份生产量最大,正好能够有效防止7月和8月销售旺季时出现供不应求的现象。因此,基于遗传算法优化的灰色神经网络模型对合作企业的订单预测是基本可行的,能够对订单计划的安排起到指导性的作用,辅助企业合理安排生产线的生产分配并降低原材料和产品库存。

实验针对已有洗衣机销售数据建立灰色神经网络模型,并采用遗传算法对以往文献中随机分配网络参数值的方法进行改进,建立了基于遗传算法优化的灰色神经网络预测销量模型,对企业安排生产计划具有指导参考意义。当然,要进一步提高预测的准确度,需要企业积累更多的销售数据和关联因素统计,并加大市场调研的力度。就预测模型本身而言,将考虑其前步预测销量与实际销量的误差累加积分甚至加权,作为后步预测的一个影响因素,在遗传算法优化网络参数之后在此参数值范围内再进行动态调整,使之能够更加准确的预测产品销量。

参考文献:

- [1] 郭广沁. 面向订单生产的钢铁企业原材料成本控制研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [2] 彭雪丽. 面向订单汽车制造企业生产计划中若干问题的研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.
- [3] 葛彦强,汪向征,王爱民. 改进灰色神经网络的冰箱订单需求预测研究[J]. 计算机仿真,2012(5):219-222.
- [4] 戴宝印,谭家华. 改进灰色预测模型在我国船舶订单预测中的应用[J]. 物流科技,2009(6):44-47.
- [5] 马雄威,朱再清. 灰色神经网络模型在猪肉价格预测中的作用应用[J]. 内蒙古农业大学学报,2008,10(40):91-93.
- [6] 赵仁义,朱玉辉. 关于时间序列预测法的探讨[J]. 科技信息,2011(15):192-193.
- [7] 王美玲,王念平,李晓. BP神经网络算法的改进及应用[J]. 计算机工程与应用,2009,45(35):47-49.
- [8] 潘晓明,吴建生. 基于遗传算法神经网络集成股票市场预测研究[J]. 广西师范大学学报:自然科学版,2007,24(1):77-84.
- [9] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

(责任编辑:李丽,范君)

排风热回收换热器性能的数值研究

张 峥¹, 庞建勇¹, 周恒良¹, 李庆姝²

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 江苏美孚太阳能有限公司, 江苏 无锡 214028)

摘 要: 为研究通道结构及流速对换热器性能的影响, 建立了 150 mm × 150 mm 排风热回收换热器的三维物理模型。分别针对五种不同通道结构的换热器, 通过 Fluent 软件研究其(模型 0 流动及传热特性, 模拟了速度场及温度场, 分析了通道结构和进口流速改变, 换热器的换热效率和压降的变化规律。结果表明, 中间无支撑板的情况下, 换热效率最好, 且压降也是最小。对于矩形通道, 随长宽比的增加, 换热热效率略有提高, 压降有所减小, 其整体性能仅次于无支撑板结构。三角形通道的换热效率明显低于其它几种通道形式, 且压降最大。

关键词: 换热效率; 压降; 数值模拟

中图分类号: TU834. 3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 1098 (2013) 03 - 0074 - 04

Numerical Investigation of Heat Recovery Exchanger Performance from Exhaust Air

ZHANG zheng¹, PANG Jian - yong¹, ZHOU HEN - liang¹, LI Qing - shu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science And Technology, Huainan Anhui 232001, China;
2. China Hitek Solar Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214028, China)

Abstract: Three - dimensional physical models of 150mm150mm heat? recovery? exchanger? from? exhaust? air were established to investigate effects of tunnel structure and flow velocity on heat exchanger performance. Characteristics of flow and heat transfer in five types of tunnel structure of heat exchangers were studied by using softwae FLUENT. In addition, the velocity field and temperature distribution are obtained by numerical simulation. Effects of heat exchanger tunnel structure and inlet velocity on the heat exchange efficiency and pressure drop were analyzed. The results showed that heat exchange efficiency is the highest and pressure drop the lowest in case of heat exchanger without intermediate support plates. Efficiency of exchanger with rectangle tunnel structure slightly improves with increase of length - width ratio, and its performance is just inferior to that without intermediate support plates. Efficiency of exchangers with triangle tunnel is the lowest and its pressure drop is the highest.

Key words: heat exchange efficiency, pressure drop, numerical simulation

目前,我国空调耗能已经达到建筑能耗的60%以上。在建筑空调系统中,处理新风的负荷大致要占总负荷的25%~30%,对于高级宾馆和办公建筑可高达40%^[1]。所以,热回收技术的研究是建筑节能技术的重要研究方向。文献[2]明确提出了在空调设计过程中,在技术经济分析合理的

情况下应优先考虑采用排风能量的热回收,并强制规定了一些必须采用热回收装置的系统。空调系统中常用的排风热回收器的换热芯体是静止板翅式换热器,它是在新风和排风之间进行热交换的设备,作用是回收排风中的热量。通过新风和排风之间的热交换,预热(冷)新风,从而节省空气处理

收稿日期:2012 - 11 - 10

基金项目:安徽理工大学青年教师科学研究基金资助项目(2012QNY46)

作者简介:张峥(1980-),男,安徽芜湖人,助教,硕士,研究方向:建筑节能技术。

的能耗。

铝制排风热回收换热器是在数层平铝板之间放置支撑板,支撑板和平隔板材质相同(见图 1)。支撑板对流动有扰动作用,使边界层不断破裂,能够强化传热,并增强两板结构强度,在这种热交换器中相邻两通道之间的热交换,一部分通过平板传递热量,另一部分热量是通过支撑板传递的,因而增加了传热面积,它具有传热面积大、传热效率高、热容量小、结构紧凑等优点。

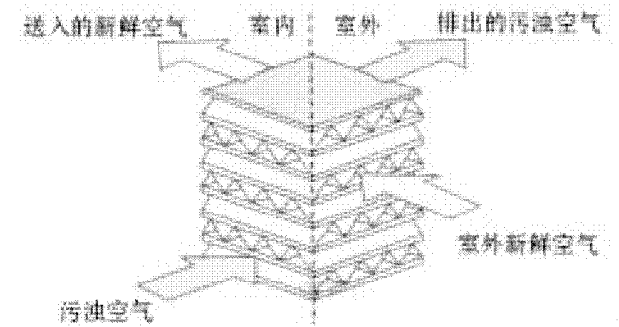


图 1 排风热回收换热器的换热原理图

目前,国内外有很多学者用数值传热学的方法来计算、评价换热器的性能及效果,其优点是结果直观,花费也教少。文献[3]介绍了几种典型的 CFD 商业软件及其在板翅式换热器中的应用。文献[4-5]利用 FLUENT 对板翅式换热器的通道内流动进行了模拟,研究通道中流体的流动与传热特性。文献[6]对薄膜式全热换热器的通道构型对其性能的影响进行了数值模拟。文献[7]对板式热交换器芯体进行了传热性能比较实验分析,结果表明当膜间距在 2.4 mm,风速在 1 m/s 以内时,热效率及阻力特性较为满意。本文通过利用 FLUENT 数值计算,比较了不同通道结构换热器换热效率和压降的差异,为热回收换热器的优化设计及经济性评价提供方向。

1 模型的建立

1.1 物理模型

新风和排风以叉流方式在各自的流道内流动,通过隔板和支撑板进行热交换(见图 2)。由于换热器的通道是周期对称的,所以只需计算其中一对进气和排气通道。整个换热过程是对流换热过程,固体边界上的温度及热流密度随状态参数变化而变化的,对流换热系数受多种因素的影响^[8],无法预先确定,所以说换热过程属流固耦合换热。

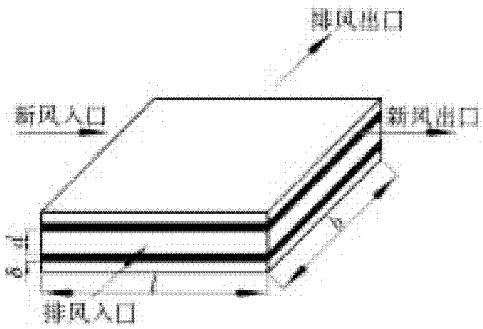


图 2 热交换器的换热模型

隔板和支撑板的材料均为铝箔,在 fluent 软件中设置为固体区域,其导热系数设为 $230 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。四周边界不做设置,自动默认为绝热边界,中间平隔板的厚度为 $\delta = 0.15 \text{ mm}$,隔板与隔板间的通道高度为 $d = 2.5 \text{ mm}$,中间有支撑板的通道形状分别为三角形,梯形,矩形及无支撑板结构。长度 l 和宽度 b 均为 150 mm (见表 1)。

表 1 换热芯体内通道尺寸

| 序号 | 通道结构 | 图形尺寸 |
|----|--------|------|
| 1 | 无支撑板 | |
| 2 | 矩形 1:2 | |
| 3 | 矩形 1:1 | |
| 4 | 梯形 | |
| 5 | 三角形 | |

建立模型过程中作以下假设:

- 1) 辐射换热忽略不计;
- 2) 认为空气是不可压缩流体;
- 3) 空气的进口速度和温度恒定不变;
- 4) 不考虑隔板和支撑板之间的接触热阻;
- 5) 通道中心切面两边的换热忽略不计。

1.2 数学模型

对于常物性、不可压缩流体,无内热源的稳态流动,在三维直角坐标系中,基本控制方程组为

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \\ \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \\ \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \end{aligned} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} (\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}) \quad (3)$$

式(1~3)中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; t 为空气温度, K ; u, v, w 为空气在 x, y, z 方向上的速度分量, m/s ; p 为空气静压力, Pa ; λ 为空气导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$; c_p 为空气定压比热容, $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

数值计算采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 采用二阶迎风格式进行稳态计算。

新风和排风的入口均设置为速度进口边界条件, 给定流速和温度, 进口处温度条件为

$$\text{新风侧: } T_{in}|_{l=0} = 308 \text{ K}$$

$$\text{排风侧: } T_{in}|_{b=0.15} = 298 \text{ K}$$

进风侧速度和排风侧速度相同:

$$v_{in}|_{l=0} = v_{in}|_{b=0.15} = 0.5 \text{ m/s}, 0.75 \text{ m/s}, 1 \text{ m/s}, 2 \text{ m/s}, 3 \text{ m/s}, 4 \text{ m/s}.$$

新风和排风侧的出口均设置为压力出口条件, 设为一个大气压即 $101\,325 \text{ Pa}$ 。

2 数值模拟的结果及分析

为了解温度场, 对模型(见图2)的平隔板的中位置进行了切片处理。图3显示了无支撑板通道, 不同进口流速下平隔板的温度分布(图中数字为绝对温度), 随着进口速度的提高, 高温区域和低温区域所占面积均有减小的趋势, 说明随着速度的提高, 湍流度增加, 换热增强。因为空气流速越大则在换热空间所停留的时间就越短, 所以虽然换热能力增强, 但换热效率并不是随流速的增加而提高。

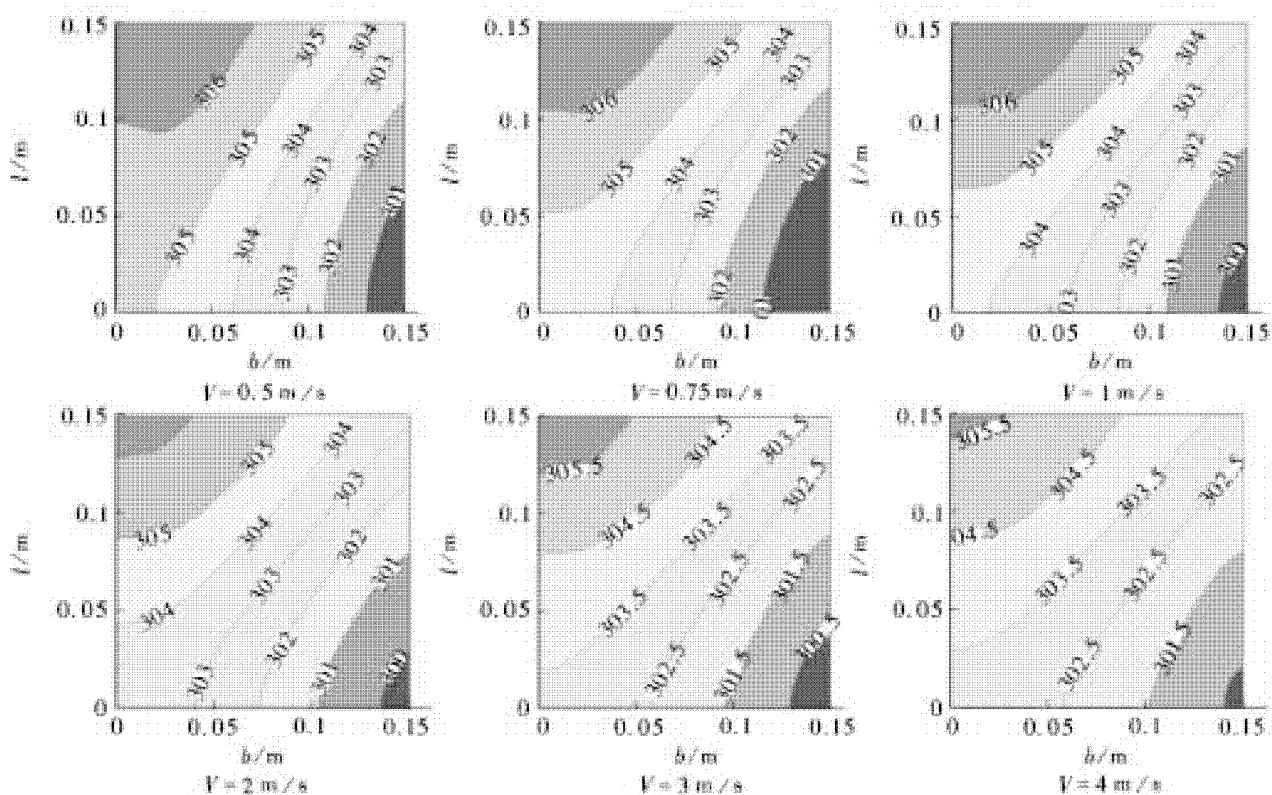


图3 中间隔板处温度分布云图

不同进口流速情况下, 各通道结构换热器的换热效率如图4所示, 换热效率随着空气流速的增大而减小, 在几种通道构型中, 三角形通道结构的换

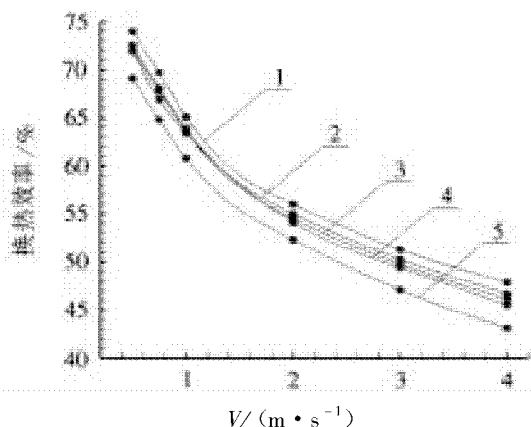
热效率最低, 无支撑板结构的换热效率最好。矩形和梯形结构介于两者之间, 换热效率也非常的接近, 矩形结构换热效率略高于梯形结构, 且在矩形

结构中,长宽比大的结构换热效率大于长宽比小的结构。

换热效率的计算公式为

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3} \times 100\% \quad (4)$$

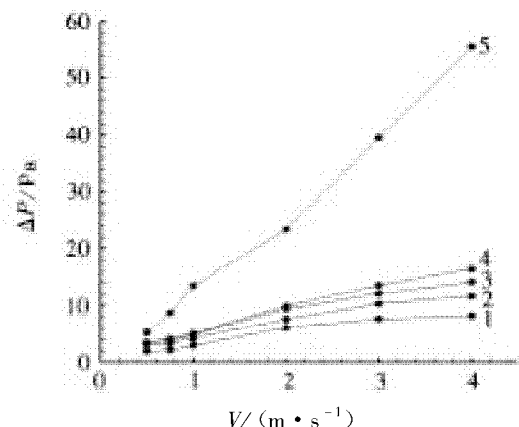
式中: η 为换热效率; t_1 为新风进口干球温度,℃; t_2 为新风出口干球温度,℃; t_3 为排风进口干球温度,℃。



1. 无支撑结构; 2. 矩形 1:2 结构; 3. 矩形 1:1 结构;
4. 梯形结构; 5. 三角形结构

图4 不同通道结构不同流速的换热效率对比图

三角形通道结构的压力损失最大,随着流速的增加,这种效应越为明显(见图5),而无支撑板结构的压损最小,这反应了支撑板的摩擦力对流动的阻碍作用,三角形结构的支撑板面积最大,故其压力损失远大于其他几种结构形式。



1. 无支撑结构; 2. 矩形 1:2 结构; 3. 矩形 1:1 结构;
4. 梯形结构; 5. 三角形结构

图5 不同通道结构不同流速的压力损失对比图

3 结论

本文通过数值模拟研究排风热回收换热器在不同通道构及不同流速下的流动及传热特性,分析了通道结构和进口流速改变时,对换热器的换热效率和压降的影响。结果表明,三角形通道结构的换热效率最差,而无支撑板结构的换热效率最好,压力损失和支撑板的面积有一定的关系,支撑板面积大则压降较大。考虑到支撑板对换热器的强度结构的影响,支撑板为必不可少的构件,通道结构采用矩形结构最为合理。

参考文献:

- [1] 庄琛,顾平道,李英娜. 热管换热器在宾馆排风能量回收中的经济性分析[J]. 制冷与空调,2004,18(3): 79-82.
- [2] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 公共建筑节能设计标准 GB50189-2005[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] 张哲,厉彦忠,田津津. CFD技术在板翅式换热器设计中的应用[J]. 低温与超导,2002,30(3):42-45.
- [4] 施晨洁,陈亚平,施明恒. 板翅式换热器空气冷却侧传热性能的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2007,28(4):664-666.
- [5] 祝银海,厉彦忠. 板翅式换热器翅片通道中流体流动与传热的计算流体力学模拟[J]. 化工学报,2006,57(5):1102-1106.
- [6] 苏铭,闵敬春. 通道构型对全热换热器性能的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(8):1485-1488.
- [7] 罗新梅. 板式全热交换器芯体传热性能研究[J]. 华东交通大学学报,2009,26(3):16-19.
- [8] 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998:132.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

一类分形插值迭代函数系及其性质

王丽丽, 王宏勇

(南京财经大学应用数学学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 基于分形插值方法, 构造了一类具有较大灵活性的分形插值迭代函数系。证明了这类迭代函数系的吸引子是经过给定插值点的分形插值曲线, 并给出两个具体的例子, 展示了此类分形插值曲线的形状。研究了这类分形插值函数关于自由参数的连续依赖性。最后, 讨论了此类迭代函数系发生扰动时相应的分形插值函数的变化规律。在一定条件下, 给出了由扰动迭代函数系和原始迭代函数系所产生分形插值函数之间的误差估计式。

关键词: 迭代函数系; 分形插值函数; 吸引子; 连续依赖性; 扰动误差

中图分类号: TM344. 1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 1098 (2013) 03 - 0078 - 05

A Class of Iterated Function Systems of Fractal Interpolation and Their Properties

WANG Li - li, WANG Hong - yong

(School of Applied Mathematics, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing Jiangsu 210023, China)

Abstract: Based on the method of construction of fractal interpolation, a class of fractal interpolation iterated function systems with more flexibility is constructed. It's proved that the attractor of this iterated function system is the fractal interpolation curve which passing through the given interpolation points, and two specific examples are given, which shows the shapes of such fractal interpolation curves. It is studied that the continuous dependence of this fractal interpolation function with respect to free parameters. Finally, the character of changes for the corresponding FIF is investigated when this kind of iterated function systems has a small perturbation. Under certain conditions, the error estimation between the FIF generated by the perturbed IFS and the FIF generated by the original IFS is established.

Key words: iterated function system; fractal interpolation function; attractor; continuous dependence; perturbation error

基于迭代函数系 (Iterated Function System, IFS) 理论, 文献[1]中首先提出了分形插值函数 (Fractal Interpolation Function, FIF) 的概念。自此, 分形插值的理论与方法在科学与工程众多领域中引起了广泛的关注。许多学者对 IFS 和 FIF 的性质、构造方法以及应用等问题进行了深入的研究, 得到了许多重要的结果。文献[2]讨论了分形插值函数的稳定性问题, 并证明了当迭代函数系有一个微小扰动时, 相应的分形插值函数也有一个小的

扰动。文献[3]在 \mathbf{R}^2 中构造了定义在网格区域内 FIF, 并且要求网格区域边界上的插值点共线。文献[4]利用 IFS 提出了一种新的构建分形插值曲面的方法, 他所选取的插值点是矩形区域内的任一点, 同时给出了所构造曲面的计盒维数下界。文献[5]计算出了线性 FIFs 盒维数的公式, 证明了线性 FIF 经过的分数阶积分后还是线性 FIF, 并且指出经过的分数阶积分后 FIF 与相应的 FIF 的盒维数之间存在与阶数有关的一个线性关系。文献[6]研究

收稿日期: 2012 - 12 - 19

基金项目: 南京财经大学预研究资助项目 (A2011019); 研究生教育课题资助项目 (M12059)。

作者简介: 王丽丽 (1987 -), 女, 安徽马鞍山人, 在读硕士, 研究方向: 分形理论及应用。

了 FIF 及其矩量的扰动误差分析,并得到了相应的误差估计式。文献[7]探讨了具有函数纵向尺度因子的分形插值函数的光滑性、稳定性和敏感性等分析特征。文献[8]在矩形网格中选取任意数据点集来构造分形插值曲面,同时估计出了所构造的分形插值曲面的计盒维数。

由于 FIF 是由 IFS 生成,并且 FIF 的图像就是 IFS 的吸引子,所以不同类型的 IFS 生成的 FIF 在性质、形状等方面有很大的差异,从而在一些实际应用中产生的效果也不尽相同。人们通过增加参数的数量、将纵向尺度因子表示成函数等方法,来增强 IFS 及相应的 FIF 的灵活性,以便提升 FIF 的可应用性。然而,这些研究成果大部分都局限于使用线性或者含二次多项式函数的 IFS 所生成的 FIF 来拟合实验数据、逼近现实图像。本文将在分形插值的基本理论与方法的基础上构造一类具有较大灵活性的分形插值 IFS,它不仅涵盖了已有的由一次或二次多项式函数所构成的分形插值 IFS,而且具有更一般的形式,即它是由 Lipschitz 函数所构成,该 IFS 将由任意 n 次多项式函数构成的 IFS 作为其特例,这里的 n 可以取任意正整数。同时,研究这类 IFS 所产生的 FIF 的一些性质,给出了一些扰动误差估计结果。

1 一类 IFS 及其吸引子

设 $I = [0, 1]$, $K = I \times [h_1, h_2]$, $-\infty < h_1 < h_2 < +\infty$ 。令 $0 = x_0 < x_1 < \cdots < x_N = 1$ 是 I 的一个划分,记 $I_i = [x_{i-1}, x_i]$ 。设 $\Delta = \{(x_i, y_i) : i = 0, 1, \cdots, N\} \subset K$ 是一个给定的插值点集,其中 $y_i \in [h_1, h_2]$ 。

对任意的 $i = 1, 2, \cdots, N$, 令 $L_i(x) : I \rightarrow I_i$ 是一个压缩同胚,满足条件:

$$L_i(x_0) = x_{i-1}, L_i(x_N) = x_i \quad (1)$$

$$|L_i(b_1) - L_i(b_2)| \leq l_i |b_1 - b_2| \quad \forall b_1, b_2 \in I, 0 < l_i < 1 \quad (2)$$

令 $F_i : K \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个连续函数,满足条件:

$$F_i(x_0, y_0) = y_{i-1}, F_i(x_N, y_N) = y_i \quad (3)$$

$$|F_i(b, c_1) - F_i(b, c_2)| \leq q_i |c_1 - c_2|, \quad \forall b \in I, \forall c_1, c_2 \in [h_1, h_2], 0 < q_i < 1 \quad (4)$$

定义映射, $w_i : K \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, 2, \cdots, N$, 使得

$$w_i(x, y) = (L_i(x), F_i(x, y)), (x, y) \in K$$

则 $\{K; w_i, i = 1, 2, \cdots, N\}$ 构成了一个 IFS。文献[1]³⁰⁶证明了下列定理。

Barnsley 定理 上述定义的 IFS $\{K; w_i, i = 1, 2, \cdots, N\}$ 存在唯一一个吸引子 G , 且 G 是定义在 I 上的连续函数 f 的图像, 并满足 $f(x_i) = y_i, i = 0, 1, 2, \cdots, N$ 。

上述定理中的连续函数 f 称为 FIF, 文献[1]³⁰⁶提出了分形插值的一般理论,并讨论了由一类仿射 IFS 生成的 FIF 的维数、矩量积分等问题。

下面基于分形插值理论,构造一类迭代函数系。对 $i = 1, 2, \cdots, N$, 设

$$\begin{cases} L_i(x) = a_i x + x_{i-1} \\ F_i(x, y) = s_i g_i(y) + \varphi_i(x) \end{cases} \quad (x, y) \in K \quad (5)$$

其中 $a_i = x_i - x_{i-1} > 0, s_i$ 是自由参数,满足 $|s_i| < 1, g_i(y)$ 是 $[h_1, h_2]$ 上的给定的 Lipschitz 函数,满足 $|g_i(y) - g_i(y')| \leq r_i |y - y'|, r_i > 0, \varphi_i(x)$ 是 I 上的连续函数,且使式(3)成立。

设由式(5)构成的一组映射为 $w_i : K \rightarrow \mathbb{R}^2, i = 1, 2, \cdots, N$, 其中 $w_i(x, y) = (L_i(x), F_i(x, y))$ 。

于是,得到一个 IFS:

$$\{K; w_i, i = 1, 2, \cdots, N\} \quad (6)$$

定理 1 对于给定的插值点集 Δ 以及由式(6)定义的 IFS $\{K; w_i, i = 1, 2, \cdots, N\}$, 若

$$A = \max\{|s_i r_i| : i = 1, 2, \cdots, N\} < 1 \quad (7)$$

则式(6)存在唯一的吸引子 G , 且 G 是定义在 I 上的连续函数 f 的图像, 满足 $f(x_i) = y_i, i = 0, 1, 2, \cdots, N$ 。

证明 易见,在式(5)中定义的函数 $L_i(x), F_i(x, y)$ 满足式(1) ~ 式(3)。另外, $\forall b \in I, \forall c_1, c_2 \in [h_1, h_2]$, 有

$$|F_i(b, c_1) - F_i(b, c_2)| = |s_i (g_i(c_1) - g_i(c_2))| \leq |s_i r_i| |c_1 - c_2| \leq A |c_1 - c_2|$$

其中 $A = \max\{|s_i r_i| : i = 1, 2, \cdots, N\} < 1$ 。因此,根据 Barnsley 定理,式(6)存在唯一的吸引子 G, G 是定义在 I 上的连续函数 f 的图像,且经过给定的插值点集 Δ 。

下面给出所构造的分形插值 IFS 的两个具体的例子,并绘制所产生的 FIF 的图形。

例1 给定 $I = [0, 1]$ 上一组插值点集: $(0, 0)$, $(\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$, $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3})$, $(1, 1)$ 。取 $s_1 = \frac{1}{4}$, $s_2 = \frac{1}{3}$, $s_3 = \frac{1}{5}$ 。构造分形插值迭代函数系为

$$L_1(x) = \frac{1}{3}x$$

$$L_2(x) = \frac{1}{3}x + \frac{1}{3}$$

$$L_3(x) = \frac{1}{3}x + \frac{2}{3}$$

$$F_1(x, y) = \frac{1}{4}(y^2 + 2) + \frac{5}{12}x - \frac{1}{2}$$

$$F_2(x, y) = \frac{1}{3}(y^2 + 2) - \frac{2}{3}x$$

$$F_3(x, y) = \frac{1}{5}(y^2 + 2) + \frac{7}{15}x - \frac{1}{15}$$

容易验证, 所构造的 IFS 满足式(1)~式(4)或式(7), 它所生成的 FIF 的图像如图1所示。

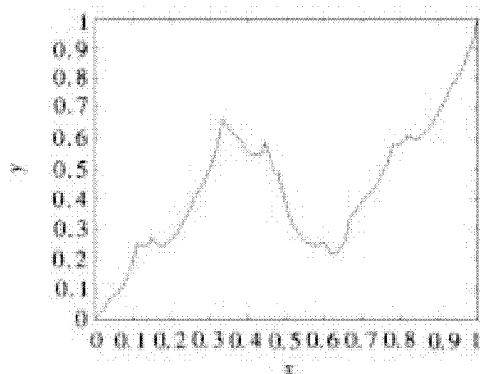


图1 FIF的图像

例2 给定 $I = [0, 1]$ 上一组插值点集: $(0, 0.5)$, $(0.25, 0.2)$, $(0.5, 0.6)$, $(0.75, 0.5)$, $(1, 1)$ 。取 $s_1 = \frac{1}{6}$, $s_2 = \frac{1}{5}$, $s_3 = \frac{1}{5}$, $s_4 = \frac{1}{4}$ 。构造分形插值迭代函数系为

$$L_1(x) = 0.25x$$

$$L_2(x) = 0.25x + 0.25$$

$$L_3(x) = 0.25x + 0.5$$

$$L_4(x) = 0.25x + 0.75$$

$$F_1(x, y) = \frac{1}{6}(y^3 + 1) - \frac{107}{240}x + \frac{5}{16}$$

$$F_2(x, y) = \frac{1}{5}(y^3 + 1) + \frac{9}{40}x - \frac{1}{40}$$

$$F_3(x, y) = \frac{1}{5}(y^3 + 1) - \frac{11}{40}x + \frac{15}{40}$$

$$F_4(x, y) = \frac{1}{4}(y^3 + 1) + \frac{9}{32}x + \frac{7}{32}$$

易见, 它们满足分形插值的条件, 由其产生的 FIF 的图像如图2所示。

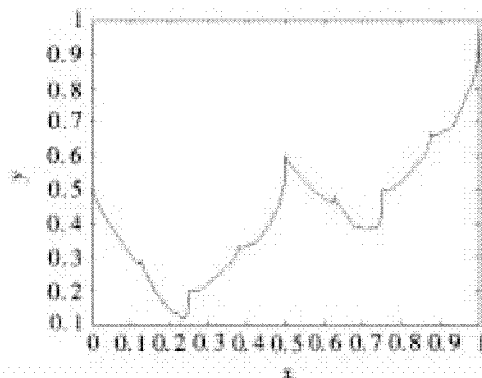


图2 FIF的图像

2 FIF 关于参数的连续依赖性

设 $C(I)$ 是由区间 I 上的全体连续函数 $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ 构成的空间, $\forall g \in C(I)$, 它的 ∞ -范数为 $\|g\|_{\infty} = \max\{|g(x)| : x \in I\}$ 。设 $C_0(I) = \{g \in C(I) \mid g(x_0) = y_0, g(x_N) = y_N\}$, 则 $(C_0(I), \|\cdot\|_{\infty})$ 是一个完备的度量空间。定义映射 $T: C_0(I) \rightarrow C_0(I)$, 使得

$$(Tg)(x) = s_i g_i(g(L_i^{-1}(x))) + \varphi_i(L_i^{-1}(x)), \forall x \in I_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

当式(7)成立时, $\forall g, h \in C_0(I)$, 可得

$$\begin{aligned} |(Tg)(x) - (Th)(x)| &= \max_{1 \leq i \leq N} |s_i g_i(g(L_i^{-1}(x))) + \varphi_i(L_i^{-1}(x)) - s_i g_i(h(L_i^{-1}(x))) - \varphi_i(L_i^{-1}(x))| \\ &\leq \max_{1 \leq i \leq N} |s_i r_i \|g(L_i^{-1}(x)) - h(L_i^{-1}(x))\|| \leq A \|g - h\|_{\infty} \end{aligned}$$

即映射 T 在 $C_0(I)$ 上是压缩的, 从而存在唯一的不动点 $f \in C_0(I)$, 使得 $Tf = f$ 。此不动点 f 就是由式(6)所确定的 FIF。于是, f 满足下列不动点方程, 对 $i = 1, 2, \dots, N$, 有

$$f(x) = s_i g_i(f(L_i^{-1}(x))) + \varphi_i(L_i^{-1}(x)), \forall x \in I_i \quad (9)$$

显然, 映射 T 及函数 f 除了依赖于数据集 Δ 外, 还依赖于参数组 $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ 的选择。为明确起见, 对于给定的 Δ , 分别用 T_s 和 f_s 表示对应于

参数组 s 的映射和 FIF, 并且在式 (5) 中, 将函数 $\varphi_i(x)$ 表示成 $\varphi_i(x, s_i)$ 。

引理 1 令 $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ 和 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_N)$ 是满足式 (7) 的两个参数组。设存在常数 $\beta > 0$, 使得 $\forall x \in I$, 有 $\left| \frac{\partial \varphi_i(x, s_i)}{\partial s_i} \right| \leq \beta$ 。则对任意的 $g \in C_0(D)$, 有 $\|T_s g - T_{s'} g\|_\infty \leq M \|s - s'\|$, 其中 $\|s - s'\| = \max\{|s_i - s'_i| : i = 1, 2, \dots, N\}$, M 是某个正常数。

证 明 从式 (8) 可得, $\forall x \in I, i = 1, 2, \dots, N$ 。

$$|(T_s g)(x) - (T_{s'} g)(x)| = |g_i(g(L_i^{-1}(x)))|$$

$$(s_i - s'_i) + \varphi_i(L_i^{-1}(x), s_i) - \varphi_i(L_i^{-1}(x), s'_i)| \quad (10)$$

根据假设, 有

$$|\varphi_i(L_i^{-1}(x), s_i) - \varphi_i(L_i^{-1}(x), s'_i)| \leq \beta |s_i - s'_i| \quad (11)$$

因此从式 (10) 和式 (11) 可得 $\|T_s g - T_{s'} g\|_\infty \leq M \|s - s'\|$, 其中 $M = B + \beta, B = \max\{\|g_i\|_\infty : i = 1, 2, \dots, N\}$ 。引理 1 证毕。

定理 2 设 f_s 和 $f_{s'}$ 分别表示相应于参数组 s 和 s' 的两个 FIF, 则在引理 1 的条件下有

$$\|f_s - f_{s'}\|_\infty \leq \frac{M'}{1-A} \|s - s'\|$$

其中 $A = \max\{|s_i r_i| : i = 1, 2, \dots, N\} < 1, M'$ 是某个正常数。

证 明 根据 FIF 的不动点性质, T_s 的压缩性以及引理 1, 可得

$$\begin{aligned} |f_s(x) - f_{s'}(x)| &= |(T_s f_s)(x) - (T_{s'} f_{s'})(x)| \leq \\ &|(T_s f_s)(x) - (T_{s'} f_s)(x)| + |(T_{s'} f_s)(x) - (T_{s'} f_{s'})(x)| \leq \\ &A \|f_s - f_{s'}\|_\infty + M' \|s - s'\| \end{aligned}$$

所以有

$$\|f_s - f_{s'}\|_\infty \leq \frac{M'}{1-A} \|s - s'\|$$

定理 2 证毕。

由定理 2 可知, FIF 关于参数组 s 具有 Lipschitz 连续性。这表明, 在曲线拟合和图像逼近过程中可以通过调节参数组 s 的值来连续控制 FIF 的形态。

3 FIF 的扰动误差

下面考虑式 (6) 中的扰动情况。设纵向尺度因子 s_i 和函数 $\varphi_i(x)$ 同时发生扰动, 而插值点不变, 在

迭代函数系式 (6) 的基础上, 定义其扰动 IFS 如下:

$$\begin{cases} L_i(x) = a_i x + x_{i-1} \\ R_i(x, y) = (s_i + \varepsilon_i) g_i(y) + \varphi_i(x) + \eta_i \lambda_i(x) \end{cases} \quad (12)$$

其中 $a_i = x_i - x_{i-1} > 0, 0 < |s_i + \varepsilon_i| < 1, 0 < |\eta_i| < 1, \varepsilon_i$ 和 η_i 分别为扰动参量, $\lambda_i(x)$ 是连续函数, 满足 $\lambda_i(0) = \lambda_i(1) = 0, i = 1, 2, \dots, N$ 。另外还假设在式 (12) 中 $g_i(y)$ 满足 $g_i(y_0) = g_i(y_N) = 0$ 。这样由式 (12) 产生了一个新的 IFS:

$$\{K; u_i(x, y) = (L_i(x), R_i(x, y)), i = 1, 2, \dots, N\} \quad (13)$$

容易验证, 在条件 $\max\{|(s_i + \varepsilon_i) r_i| : i = 1, 2, \dots, N\} < 1$ 之下, 式 (13) 满足分形插值的条件, 因而确定了一个 FIF, 记为 $f_{\varepsilon, \eta}(x)$ 。则 $f_{\varepsilon, \eta}(x)$ 满足下列不动点方程:

$$\begin{aligned} f_{\varepsilon, \eta}(x) &= (s_i + \varepsilon_i) g_i(f_{\varepsilon, \eta}(L_i^{-1}(x))) + \\ &\varphi_i(L_i(x)) + \eta_i \lambda_i(L_i^{-1}(x)), \forall x \in I_i \end{aligned} \quad (14)$$

下面给出 $f_{\varepsilon, \eta}(x)$ 与由式 (6) 所确定的 FIF $f(x)$ 之间的误差关系。

定理 3 设 $f(x)$ 和 $f_{\varepsilon, \eta}(x)$ 分别是由式 (6) 和式 (13) 确定的两个 FIF。令 $\varepsilon = \max\{|\varepsilon_i| : i = 1, 2, \dots, N\}, \eta = \max\{|\eta_i| : i = 1, 2, \dots, N\}, B = \max\{\|g_i\|_\infty : i = 1, 2, \dots, N\}, C = \max\{\|\lambda_i\|_\infty : i = 1, 2, \dots, N\}$, 则

$$\|f_{\varepsilon, \eta} - f\|_\infty \leq \frac{B}{1-A} \varepsilon + \frac{C}{1-A} \eta \quad (15)$$

其中 A 由式 (7) 给出。

证 明 根据不动点方程式 (9) 和式 (14), $\forall x \in I_i$, 有 $|f_{\varepsilon, \eta}(x) - f(x)| \leq |s_i [g_i(f_{\varepsilon, \eta}(L_i^{-1}(x))) - g_i(f(L_i^{-1}(x)))]| + |\varepsilon_i g_i(f_{\varepsilon, \eta}(L_i^{-1}(x)))| + |\eta_i \lambda_i(L_i^{-1}(x))| \leq |s_i r_i| \cdot |f_{\varepsilon, \eta}(L_i^{-1}(x)) - f(L_i^{-1}(x))| + \varepsilon B + \eta C \leq A \|f_{\varepsilon, \eta} - f\|_\infty + \varepsilon B + \eta C$

由此便知式 (15) 成立。

定理 3 给出了 FIF 在发生扰动的情形下, 所产生的误差的一个上限估计。

4 结语

基于 Barnsley 的关于分形插值的一般理论, 本文使用 Lipschitz 函数构造了一类更广泛的分形插值迭代函数系, 该构造推广了许多已有的结果。证

明了这类迭代函数系吸引子的存在性与惟一性,并给出两个具体的算例,展现了此类分形插值函数的图像。研究了这类分形插值函数的连续依赖性,当此类迭代函数系的参数和构成函数发生微小扰动时,考虑扰动前后迭代函数系所生成的分形插值函数之间的变化关系,给出了扰动前后相应的分形插值函数之间的误差估计式。所得结果为这类迭代函数系及相应的分形插值函数的实际应用提供了理论基础。

参考文献:

- [1] BARNESLEY M F. Fractal functions and interpolation [J]. Constr. Approx., 1986 (2): 303 – 329.
- [2] FENG Z, XIE H. On stability of fractal interpolation [J]. Fractals, 1998, 6 (3): 269 – 273.
- [3] DALLA L. Bivariate fractal interpolation functions on grids [J]. Fractals, 2002, 10 (1): 53 – 58.
- [4] BOUBOULIS P, DALLA L. Fractal interpolation surfaces derived from fractal interpolation functions [J]. J. Math. Anal. Appl., 2007, 336: 919 – 936.
- [5] RUAN H – J, SU W – Y, YAO K. Box dimension and fractal integral of linear fractal interpolation function [J]. J. Approx. Theory, 2009, 161: 187 – 197.
- [6] WANG H – Y, LI X – J. Perturbation error analysis for fractal interpolation functions and their moments [J]. Appl. Math. Lett., 2008, 21 (5): 441 – 446.
- [7] 王宏勇,樊昭磊. 具有函数纵向尺度因子的分形插值函数的分析特性[J]. 数学学报, 2011, 54 (1): 147 – 158.
- [8] METZLER W, YUN C H. Construction of fractal interpolation surfaces on rectangular grids [J]. Int. J. Bifurcat. Chaos, 2010, 20 (12): 4 079 – 4 086.

(责任编辑:何学华)

有限增量符号应采用哪一个?

问 在不少科技期刊中,有限增量符号的使用不统一,用 Δ 、 \triangle 、 Δ 的都有。请问应采用哪一个?

答 GB 3102. 11—1993《物理科学和技术中使用的数学符号》的 11 – 6. 14 规定:“ Δx ”的“意义或读法”为“ x 的[有限]增量”。据此可知,正确的有限增量符号为正体大写希腊字母 Δ ,使用斜体大

写希腊字母 Δ 和表示三角形的符号 \triangle 都是错误的。产生错误的原因可能是: 1) 不了解国家标准的规定; 2) 校对不仔细,未把误排的“ Δ ”改正过来; 3) 对 Δ 和 \triangle 不熟悉,以为二者可以通用而不加辨别。

(同 任)

摘自《编辑学报》2013 年第 3 期

安徽理工大学学报(自然科学版)

第 33 卷第 3 期(总第 128 期)2013 年 9 月

目 次

| | |
|---|-------------------|
| 基于最小 Wilcoxon 学习方法的 Hammerstein 模型辨识..... | 张翠梅(1) |
| 紫外光-纳米 TiO ₂ 催化絮凝净化高浓度有机废水 | 陈明功,倪源满,颜凌燕,等(7) |
| 高压水射流剥蚀橡胶材料的数值模拟 | 张东速,刘 辉(11) |
| 煤层工作面无线电波透视探查效果分析 | 徐 翀,肖玉林,李洪明(15) |
| 基于 Excel 的钻孔单位涌水量换算 | 孙尚云,王大设,陈从磊(20) |
| 采动煤岩体能量区划及动力灾害防治分析 | 张向阳(24) |
| 氮化改性的 SAPO-34 分子筛的 MTO 性能研究 | 薛茹君,陈春阳,周 敏,等(30) |
| 新型的门禁系统结构的设计 | 王 宾(34) |
| 复杂条件下综采工作面安全高效开采技术研究 | 张宏忠(39) |
| 采动岩体应变-渗流耦合效应与致灾机理分析 | 牛多龙,杨 科,华心祝,等(45) |
| 反应磁控溅射方法制备 BCN 薄膜的高温抗氧化性 | 陈向阳,张 瑾,胡海霞,等(52) |
| 不同初始条件下预混气体爆轰波传播研究 | 曲忠伟,林谋金(58) |
| 综采工作面过断层超前深孔注浆技术应用研究 | 张 永(63) |
| 时间序列和神经网络对迷你型洗衣机销量预测 | 石 磊(69) |
| 排风热回收换热器性能的数值研究 | 张 峥,庞建勇,周恒良,等(74) |
| 一类分形插值迭代函数系及其性质 | 王丽丽,王宏勇(78) |
| 欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿 | (44) |
| 注意正确使用“百分点” | (51) |
| 推荐性国家标准的编号可以写为“GB × × × × - × ×”吗? | (57) |
| 有限增量符号应采用哪一个? | (82) |

期刊基本参数:CN34-1220/N*1981*q*A4*82*zh*P*¥5.00*1000*16*2013-09

Contents

| | |
|---|---|
| Identification of Hammerstein Model based on Least Wilcoxon Learning Method | ZHANG Cui – mei (1) |
| Treatment of High Concentration Organic Wastewater by Flocculation under Catalysis with Ultraviolet and Nano – Titanium Dioxide | CHEN Ming – gong, NI Yuan – man, YAN Ling – yan, et al (7) |
| Numerical simulation of high – pressure water jet breaking rubber material | ZHANG Dong – su, LIU Hui (11) |
| Analysis of Exploration Effect of Radio Wave Penetration Technique in Working Face in Mines | XU Chong, XIAO Yu – lin, LI Hong – ming (15) |
| Excel – based Conversion of Specific Inflow in Borehole | SUN Shang – yun, WANG Da – she, CHEN Cong – lei (20) |
| Analysis of Energy Regionalization in Coal and Rock Body Influenced by Mining and Dynamic Disasters Prevention | ZHANG Xiang – Yang (24) |
| Study on Modification and Methanol – to – Olefins Performance of SAPO – 34 Molecular Sieve | XUE Ru – jun, CHEN Chun – yang, ZHOU Min, et al (30) |
| Design of A New Type of Access Control System Structure | WANG Bin (34) |
| Research on Safe and Efficient Mining Technology of Fully Mechanized Longwall under Complicated Conditions | ZHANG Hong – zhong (39) |
| Analysis of Strain – Seepage Coupling Effect of Rock Mass Affected by Mining and Disaster – Causing Mechanism | NIU Duo – long, YANG Ke, HUA Xin – zhu, et al (45) |
| Oxidation Resistance Behavior of BCN Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering | CHEN Xiang – yang, ZHANG Jin, HU Hai – xia, et al (52) |
| Study on Premixed Gas Detonation Wave Propagation under Different Initial Conditions | QU Zhong – wei, LIN Mou – jin (58) |
| Application of Reinforcement by Pre – grouting in Long Borehole for Mechanized Longwall Passing through Faults | ZHANG Yong (63) |
| Mini Washing Machine Sales Prediction Based on Time Series and Neural Networks | SHI Lei (69) |
| Numerical Investigation of Heat Recovery Exchanger Performance from Exhaust Air | ZHANG zheng , PANG Jian – yong , ZHOU HEN – liang, et al (74) |
| A Class of Iterated Function Systems of Fractal Interpolation and Their Properties | WANG Li – li, WANG Hong – yong (78) |