

# 基于渗流力学的掘进工作面瓦斯涌出量预测

张慧杰<sup>1,2</sup> 张浪<sup>1,2</sup> 刘永茜<sup>1,2</sup> 孙景来<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院 北京 100013;  
2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究院) 北京 100013)

**摘要:**为了实现煤巷掘进工作面瓦斯涌出的动态预测,基于渗流力学方法,采用瓦斯的连续性方程、运动方程、状态方程和瓦斯含量方程,建立了煤壁瓦斯渗流模型,并对渗流速度进行积分,推导得到掘进工作面的瓦斯涌出量预测公式,探讨了现场掘进过程中瓦斯涌出量预测值的准确性,在所建立的煤壁瓦斯渗流模型基础上,利用控制变量法研究了煤体渗透率和原始煤层瓦斯压力2种关键因素对瓦斯渗流速度的影响。研究结果表明:利用预测公式得到的掘进工作面瓦斯涌出量预测值与现场实际基本一致,瓦斯渗流速度随煤体渗透率、原始煤层瓦斯压力均呈负指数关系变化,煤体渗透率越高、原始煤层瓦斯压力越大,煤壁暴露时瓦斯渗流速度指数衰减越明显,随着时间增加,瓦斯渗流速度无限趋近于0。

**关键词:** 渗流力学;掘进工作面;渗透率;瓦斯压力;瓦斯涌出

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)08-0082-05

## Prediction of gas emission volume from driving face based on seepage mechanics

Zhang Huijie<sup>1,2</sup> Zhang Lang<sup>1,2</sup> Liu Yongqian<sup>1,2</sup> Sun Jinglai<sup>1,2</sup>

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute Co. Ltd. Beijing 100013, China;

2. National Key Lab of Coal Resources High Efficient Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to realize dynamic prediction of gas emission from seam gateway driving face, based on the seepage mechanics method, gas continuity equation, movement equation, state equation and gas content equation were applied to establish a gas seepage model of the coal wall. Integration was conducted on the seepage velocity, the prediction formula of gas emission from the driving face was deduced and obtained and the predicted value accuracy of gas emission value in the site driving process was discussed. Based on the establishment on the gas seepage model of coal wall, a controlled variate method was applied to study the two key factors on the permeability of coal and in-situ seam gas pressure affected to the gas seepage velocity. The study results showed that the predicted value of gas emission volume from the driving face obtained with the predicted formula was basic same with the site actual value, and with the seam permeability and in-situ seam gas pressure varied, the gas seepage velocity would be varied in a negative index relationship. The higher seam permeability was, the higher in-situ seam gas pressure would be. When the coal wall exposed, the gas seepage velocity index would be decayed more obviously. With time increased, the gas seepage velocity would be close to zero unlimitedly.

**Key words:** seepage mechanics; driving face; permeability; gas pressure; gas emission

## 0 引言

掘进工作面作业地点位于原始煤层,瓦斯涌出

量大且不能利用全风压通风,易造成瓦斯涌出异常事故,因而,开展掘进工作面瓦斯涌出量预测研究很有必要。另外,瓦斯涌出量的动态预测技术能为瓦

收稿日期: 2015-03-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.enki.est.2015.08.016

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05063-009); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201206)

作者简介: 张慧杰(1987—),男,山东滨州人,硕士。Tel: 010-84263387 E-mail: zhjwell@126.com

引用格式: 张慧杰,张浪,刘永茜等.基于渗流力学的掘进工作面瓦斯涌出量预测[J].煤炭科学技术,2015,43(8):82-86.

Zhang Huijie, Zhang Lang, Liu Yongqian, et al. Prediction of gas emission volume from driving face based on seepage mechanics [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 82-86.

斯涌出特征的突出预警<sup>[1]</sup>等动态预警系统以及反演瓦斯赋存规律<sup>[2]</sup>提供技术支持,在矿井瓦斯防治中有重要意义。目前,国内普遍使用的瓦斯涌出量预测方法是矿山统计法和分源预测法<sup>[3-4]</sup>,前者仅考虑开采深度单一因素对瓦斯涌出量的影响,后者对煤层瓦斯含量测定数据的准确性和测定点的分布、密度有较高的依赖,因而两者的适用范围均受一定限制,且两者均为静态预测方法。近年来部分专家学者将地质数学模型、神经网络、灰色系统等理论引入掘进工作面瓦斯涌出规律研究中,但这些理论基于大量的已知数据,且对掘进工作面瓦斯涌出量的动态预测有较大局限性。地质数学模型法<sup>[5-6]</sup>在矿山统计法基础上改进为考虑多因素影响,建立瓦斯涌出量预测的多变量数学模型,主成分回归分析法<sup>[7]</sup>在众多影响因素中分析出主成分,减少了需要考虑的变量数量,但这2种方法仍为静态预测。考虑到瓦斯涌出量预测的非线性动态特征,模糊分形神经网络<sup>[8]</sup>、BP神经网络预测模型<sup>[9]</sup>、改进的灰色马尔柯夫预测模型<sup>[10]</sup>、基于SVM的瓦斯涌出量非线性组合预测模型<sup>[11]</sup>、CIPSO-ENN神经网络预测模型<sup>[12]</sup>等不同预测模型先后被提出,但都需要利用已有瓦斯涌出的大量信息,作为系统的输入量,通过算法拟合瓦斯涌出量的动态非线性系统来预测近期工作面的绝对瓦斯涌出量。

笔者基于煤层瓦斯渗流控制方程<sup>[13-14]</sup>,采用对渗流速度进行积分的方法<sup>[15]</sup>,推导掘进工作面瓦斯涌出量预测公式,并进行了现场验证,在此基础上研究了煤体渗透率和煤层原始瓦斯压力2种因素对掘进工作面瓦斯涌出的影响,以期得到一种更便捷、准确的掘进工作面瓦斯涌出量动态预测方法。

## 1 煤壁瓦斯渗流模型

### 1.1 基本假设

煤体中瓦斯渗流是一个受多种因素影响、非常复杂的过程,在符合工程计算精度要求的条件下,为简化计算过程,对煤壁瓦斯渗流模型作如下假设:  
①煤体为各向同性均匀介质,煤的视密度、孔隙率、透气性系数等参数为常数;②原始煤体的瓦斯压力、含量分布均匀;③煤体中的瓦斯符合理想气体状态方程,且瓦斯渗流是等温过程;④煤体中的瓦斯渗流符合达西定律;⑤煤巷为单一煤层掘进,忽略邻近层瓦斯涌出影响;⑥煤壁暴露时瓦斯压力瞬间降至并

下大气压;⑦落煤瓦斯涌出视为与掘进方向垂直煤壁的瓦斯涌出。

### 1.2 基于渗流力学的煤壁瓦斯渗流模型

基于上述假设,可以得到煤壁瓦斯渗流模型,煤巷以掘进速度 $v_j$ 沿 $y$ 方向推进,在距离煤壁 $x$ 处煤体的瓦斯压力为 $p$ ,如图1所示。

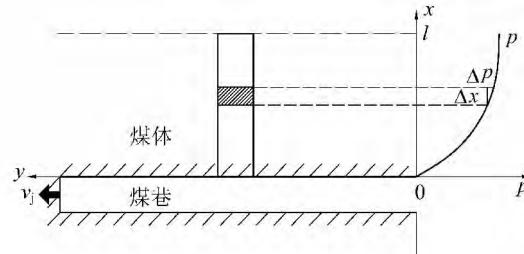


图1 煤壁瓦斯渗流模型

Fig. 1 Gas seepage model of coal wall

1) 连续性方程。封闭流体动力学系统内遵循质量守恒定律,即流体的连续性方程,可表述如下:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \quad (1)$$

式中:  $M$  为瓦斯含量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho$  为瓦斯的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为瓦斯渗流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ 。

2) 运动方程。瓦斯在煤层中压力梯度较小,流速很小,渗流过程符合达西定律,即:

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

式中:  $K$  为煤层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为瓦斯动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

3) 状态方程。在等温过程中,瓦斯的密度与压力成正比,瓦斯的状态方程可表述如下:

$$\rho = \frac{\rho_0}{p_0} p \quad (3)$$

式中:  $\rho_0$  为标准大气压下的瓦斯密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $p_0$  为标准大气压,  $\text{Pa}$ 。

4) 瓦斯含量方程。煤层瓦斯含量包含吸附状态和游离状态2种,吸附状态瓦斯可由朗格缪尔方程求得,瓦斯含量方程表述如下:

$$M = \frac{abp}{1+bp} \frac{100-A_d-M_{ad}}{100} \frac{1}{1+0.31M_{ad}} + \frac{10kp}{r} \quad (4)$$

式中:  $a$  为煤对瓦斯的极限吸附量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $b$  为吸附常数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $A_d$  为煤的干基灰分, %;  $M_{ad}$  为煤的水分, %;  $k$  为煤的孔隙容积,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $r$  为煤的视密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ 。

令

$$c = \frac{100 - A_d - M_{ad}}{100} \frac{1}{1 + 0.31M_{ad}} \quad (5)$$

则

$$M = \frac{abc p}{1 + bp} + \frac{10kp}{r} \quad (6)$$

5) 渗流控制方程。将式(2)、式(3)、式(6)代入式(1),且  $P = P^2$  可得:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\rho_0 K p}{\mu p_0 \left[ \frac{10k}{r} + \frac{abc}{(a+bp)^2} \right]} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = f(p) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (7)$$

平行流场内的瓦斯流动控制方程为二阶变系数非线性偏微分方程,为了求出其解析解,需进行线性化处理,而将式中的变系数项  $f(p)$  代换为常系数  $f(\bar{p})$ ,其中  $\bar{p} = \frac{p_0 + p_1}{2}$ ,  $p_1$  为垂直煤壁方向瓦斯渗流最大影响距离处的瓦斯压力。在煤层透气性差,煤层瓦斯压力变化缓慢的条件下,这种简化是可行的。于是可得:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = f(\bar{p}) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (8)$$

定义边界条件和初始条件后,可得煤壁瓦斯渗流的定解问题<sup>[9-11]</sup>,表示如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} = f(\bar{p}) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} & (t > 0, 0 < x < l) \\ P = P_1 & (t = 0) \\ P = P_0 & (x = 0) \\ P = P_1 & (x = l) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $l$  为垂直煤壁方向瓦斯渗流最大影响距离, m。

偏微分方程(9)的解析解为

$$\frac{P - P_0}{P_1 - P_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} \sin \frac{i\pi x}{l} \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{i\pi}{l} \right)^2 t \right] \quad (10)$$

式中:  $i = 2n - 1$ ,  $n$  为自然数。

由式(2)、式(10)可得:

$$\begin{aligned} v &= -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{K}{2\mu p_0} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} = \\ &= -\frac{2K}{\mu p_0} \frac{P_0 - P_1}{l} \sum_{j=1}^{\infty} \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{j\pi}{l} \right)^2 t \right] \quad (11) \end{aligned}$$

上式中无穷级数收敛较快,取第一项即可满足工程计算精度要求,即:

$$v \approx -\frac{2K}{\mu p_0} \frac{P_1 - P_0}{l} \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 t \right] \quad (12)$$

## 2 掘进工作面瓦斯涌出量预测公式及现场验证

### 2.1 掘进工作面瓦斯涌出量预测公式

由质量守恒可知,掘进工作面瓦斯涌出由2个部分构成:一是掘进巷道煤壁瓦斯涌出,二是落煤瓦斯涌出,其中落煤瓦斯涌出可视为与掘进方向垂直煤壁的瓦斯涌出。掘进巷道煤壁瓦斯涌出和落煤瓦斯涌出都可由瓦斯渗流速度计算得到,推导过程如下。

巷道煤壁瓦斯涌出量  $Q_B$  为:

$$\begin{aligned} Q_B &= \int_0^L v U dy = \\ &= - \int_0^L \frac{2K}{\mu p_0} \frac{P_1 - P_0}{l} \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 t \right] U dy = \\ &= - \int_0^L \frac{2K}{\mu p_0} \frac{P_1 - P_0}{l} \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 t \right] U dy = \\ &= \frac{2K U v_j l^2}{\pi^2 \mu p_0 f(\bar{p})} \times \frac{P_1 - P_0}{l} \left\{ 1 - \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{L}{v_j} \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $L$  为掘进距离, m;  $U$  为巷道煤壁周长。

设

$$\frac{2K U v_j l^2}{\pi^2 \mu p_0 f(\bar{p})} \frac{P_1 - P_0}{l} = Q_0 \quad (14)$$

则

$$Q_B = Q_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -f(\bar{p}) \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{L}{v_j} \right] \right\} \quad (15)$$

落煤瓦斯涌出量  $Q_L$  为

$$Q_L = |v_0 S| = \frac{2KS}{\mu p_0} \frac{P_1 - P_0}{l} \quad (16)$$

式中:  $S$  为掘进工作面媒体断面积,  $m^2$ ;  $v_0$  为初始时刻煤壁瓦斯渗流速度,  $m/s$ 。

则掘进工作面瓦斯涌出量  $Q$  为

$$Q = Q_B + Q_L \quad (17)$$

### 2.2 现场验证

以某矿一煤巷掘进工作面为例,预测该工作面掘进不同长度时的瓦斯涌出量。瓦斯涌出相关参数见表1,基于瓦斯渗流模型计算掘进过程中的瓦斯涌出量,计算结果与矿井实际较为一致,随掘进长度的增加,煤巷瓦斯涌出量不断增大,如图2所示。对比掘进巷道煤壁和落煤瓦斯涌出量,可得结果如图3所示。

表 1 某矿煤巷掘进工作面瓦斯涌出相关参数  
Table 1 Gas emission related parameters of heading face in a certain mine

$p_0/\text{MPa}$	$p_1/\text{MPa}$	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$K/\text{m}^2$	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$k/(\text{m}^3/\text{t}^{-1})$	$r/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$a/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	$b/\text{MPa}^{-1}$	$A_d/\%$	$M_{ad}/\%$
0.1	0.6	0.77	$1 \times 10^{-17}$	$1.084 \times 10^{-8}$	0.0217	1.35	30.738	0.860	15.85	0.95

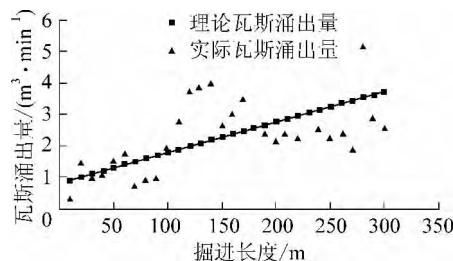


图 2 瓦斯渗流模型现场验证  
Fig. 2 Site validation of gas seepage model

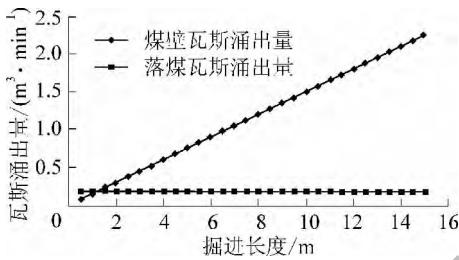


图 3 掘进巷道煤壁与落煤瓦斯涌出量对比  
Fig. 3 Comparison of gas emission between coal wall and fallen coal in excavation roadway

由图 3 可知, 落煤瓦斯涌出量为不随掘进长度变化的定值, 而煤壁瓦斯涌出量随掘进长度增加不断增加。在巷道掘进初始阶段, 落煤瓦斯涌出量占较大比例; 随掘进长度增加, 煤壁瓦斯涌出量所占比例不断增加, 掘进超过一定长度后落煤瓦斯涌出量即可忽略。

### 3 掘进工作面瓦斯涌出影响因素分析

在现场验证参数的基础上, 结合所研究的掘进工作面瓦斯涌出规律, 对影响掘进工作面瓦斯涌出的煤体渗透率、煤层原始瓦斯压力 2 个关键因素进行分析。

#### 3.1 煤体渗透率

煤体渗透率为表征煤体渗流特性的物理量, 该物理量通过影响煤壁瓦斯渗流速度对掘进工作面瓦斯涌出量产生影响。煤壁瓦斯渗流速度随暴露时间的增加呈指数减小, 但在渗透率不同条件下, 渗流速度变化有较大差别, 现场数据分析结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 渗透率高的新鲜暴露煤壁瓦斯渗流速度较大, 衰减速度也较快。对比渗透率分别为  $1.00 \times 10^{-15}$ 、 $1.50 \times 10^{-15}$ 、 $2.00 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  的煤体在不

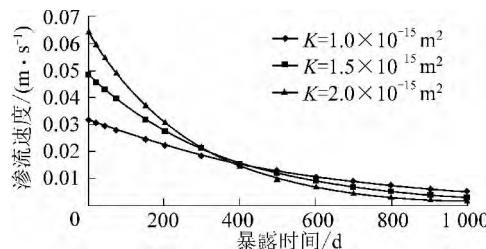


图 4 不同渗透率下煤壁瓦斯渗流速度变化规律  
Fig. 4 Variation law of gas seepage velocity from coal wall with different permeability

同暴露时间下的瓦斯渗流速度, 暴露时间在 400 d 以内时, 渗透率高的煤体瓦斯渗流速度大且衰减快, 说明煤壁瓦斯得到较大放散, 渗透率低的瓦斯渗流速度较小且衰减较慢, 说明煤壁残存瓦斯较大; 暴露时间在 400 d 后, 渗透率高的煤体瓦斯渗流速度逐渐趋近于 0 且衰减较慢, 渗透率低的煤体瓦斯渗流速度也不断减小但高于前者。

煤壁瓦斯涌出量与掘进长度呈指数关系, 若煤层渗透率低, 则煤壁瓦斯涌出量衰减较慢, 指数关系不明显, 如图 2 所示的近似线性关系, 若煤层渗透率高, 则煤壁瓦斯涌出量衰减较快, 指数关系明显, 且落煤瓦斯涌出所占掘进工作面瓦斯涌出的比例会有一定程度的增加。

#### 3.2 煤层原始瓦斯压力

煤层原始瓦斯压力从 2 个方面影响煤巷掘进工作面瓦斯涌出: 一是瓦斯压力梯度控制瓦斯渗流速度, 在煤体物理特性参数一定时, 煤层原始瓦斯压力与井下大气压力的平方差决定了煤壁瓦斯涌出量; 二是煤层原始瓦斯压力间接决定了煤层瓦斯含量, 进而影响瓦斯涌出。

原始煤层瓦斯压力一定时, 煤壁瓦斯渗流速度随暴露时间增加呈指数关系减小, 但在瓦斯压力不同条件下, 渗流速度变化有较大差别, 现场数据分析结果如图 5 所示。煤层原始瓦斯压力高的新鲜暴露煤壁瓦斯渗流速度较大, 衰减速度也较快。对比煤层原始瓦斯压力分别为 0.6、0.8、1.0 MPa 在不同暴露时间下的瓦斯渗流速度, 煤层原始瓦斯压力越高, 则煤壁瓦斯渗流速度越大, 且瓦斯渗流速度衰减越快。若暴露时间足够长, 随瓦斯压力梯度的降低, 瓦

斯渗流速度逐渐趋近于0。

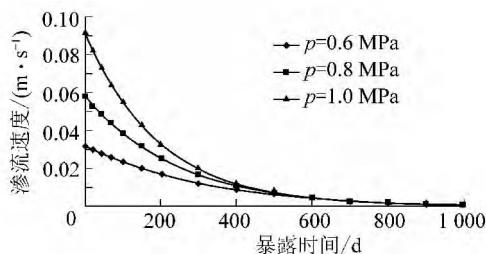


图5 不同煤层原始瓦斯压力下煤壁瓦斯渗流速度变化规律

Fig. 5 Variation law of gas seepage velocity from different coal wall with original gas pressure

## 4 结 论

- 1) 现场实际表明,煤巷掘进工作面瓦斯涌出呈指数增长规律,落煤瓦斯涌出量为不随时间变化的定值,且掘进超过一定长度后可忽略,与基于渗流模型的瓦斯涌出量预测值较为一致。
- 2) 煤体渗透率通过影响瓦斯渗流速度对煤巷掘进工作面瓦斯涌出产生影响,高渗透率煤体暴露后瓦斯渗流速度大且以明显负指数形式衰减,低渗透率煤体瓦斯渗流速度近似线性衰减。
- 3) 原始煤层瓦斯压力越大,煤壁瓦斯渗流速度越大,且瓦斯渗流速度衰减越快,煤体暴露时间足够长时,瓦斯渗流速度逐渐趋近于0。

## 参考文献:

- [1] 史华荣,张吉林,弓美疆,等.矿井瓦斯涌出特征预警技术及应用[J].煤炭科学技术,2013,41(3):70-73.  
Shi Huarong, Zhang Jilin, Gong Meijiang, et al. Early warning technology of gas emission features and application [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 70-73.
- [2] 刘明举,王洁,赵发军.瓦斯涌出异常的低瓦斯矿井瓦斯赋存规律分析[J].煤炭科学技术,2012,40(3):41-45.  
Liu Mingju, Wang Jie, Zhao Fajun. Analysis on gas deposit law in low gassy mine with irregular gas emission [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(3): 41-45.
- [3] AQ 1018—2006.矿井瓦斯涌出量预测方法[S].
- [4] 姜文忠,霍中刚,秦玉金.矿井瓦斯涌出量预测技术[J].煤炭科学技术,2008,36(6):1-4.  
Jiang Wenzhong, Huo Zhonggang, Qin Yujin. Predicted technology of mine gas emission [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6): 1-4.
- [5] 张子戌,袁崇孚.瓦斯地质数学模型法预测矿井瓦斯涌出量研究[J].煤炭学报,1999,24(4):368-372.  
Zhang Zixu, Yuan Chongfu. Study on mathematical model of coal-bed gas geology used to prediction of mine gas emission [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 368-372.
- [6] 张许良,单菊萍,彭苏萍.瓦斯含量及涌出量预测的数学地质技术与方法[J].煤炭学报,2009,34(3):350-354.  
Zhang Xuliang, Shan Juping, Peng Suping. Mathematical geology technique and method for prediction of gas content and emission [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 350-354.
- [7] 吕伏梁,冰孙维吉,等.基于主成分回归分析法的回采工作面瓦斯涌出量预测[J].煤炭学报,2012,37(1):113-116.  
Lyu Fu Liang, Bing Sun Weiji, et al. Gas emission quantity prediction of working face based on principal component regression analysis method [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 27(1): 113-116.
- [8] 曾勇,吴财芳.矿井瓦斯涌出量预测的模糊分形神经网络研究[J].煤炭科学技术,2004,32(2):62-65.  
Zeng Yong, Wu Caifang. Research on fuzzy fractal neural network for prediction of mine gas emission [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(3): 62-65.
- [9] 朱红青,常文杰,张彬.回采工作面瓦斯涌出BP神经网络分源预测模型及应用[J].煤炭学报,2007,32(5):504-508.  
Zhu Hongqing, Chang Wenjie, Zhang Bin. Different source gas emission prediction model of working face based on BP artificial neural network and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 504-508.
- [10] 陶云奇,许江,李树春.改进的灰色马尔柯夫模型预测采煤工作面瓦斯涌出量[J].煤炭学报,2007,32(4):391-395.  
Tao Yunqi, Xu Jiang, Li Shuchun. Predict gas emitting quantity of mining coal face with improved grey markov model [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 391-395.
- [11] 黄为勇,童敏明,任子晖.基于SVM的瓦斯涌出量非线性组合预测方法[J].中国矿业大学学报,2009,38(2):234-239.  
Huang Weiyong, Tong Minming, Ren Zihui. Nonlinear combination forecast of gas emission amount based on SVM [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(2): 234-239.
- [12] 付华,姜伟,单欣欣.基于耦合算法的煤矿瓦斯涌出量预测模型研究[J].煤炭学报,2012,37(4):654-658.  
Fu Hua, Jiang Wei, Shan Xinxin. Study on coupling algorithm on coal mine gas emission forecast model [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 654-658.
- [13] 余楚新,鲜学福,谭学术.煤层瓦斯流动理论及渗流控制方程的研究[J].重庆大学学报,1989,12(5):1-10.  
Yu Chuxin, Xian Xuefu, Tan Xueshu. Study about flow theory and governing equation of gas seepage flow in coal beds [J]. Journal of Chongqing University, 1989, 12(5): 1-10.
- [14] 郭晓华,蔡卫,马尚权,等.基于稳态渗流的煤巷掘进瓦斯涌出连续性预测[J].煤炭学报,2010,35(6):932-936.  
Guo Xiaohua, Cai Wei, Ma Shangquan, et al. Continuity prediction of gas emission during drivage in coal seam based on stable percolation [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 932-936.
- [15] 何学秋.煤巷瓦斯涌出规律及其连续性积分模型[J].煤炭工程师,1994(1):23-27.  
He Xueqiu. Gas Emission Law and continuity integral model of coal roadway [J]. Coal Engineer, 1994(1): 23-27.