

文章编号: 1000-582X(2013)06-065-05

# 脉冲水射流割缝后石门揭煤突出预测指标优选

卢义玉, 尤 祎, 刘 勇, 夏彬伟

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;  
b. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 为得到脉冲水射流割缝后石门揭煤最佳突出预测指标, 根据脉冲水射流割缝作用下煤体裂隙场的动态演化过程, 分析了煤样坚固性系数测值和煤体瓦斯放散初速度对综合指标  $D$ 、 $K$  的影响, 由此排除综合指标  $D$ 、 $K$ 。利用灰关联分析法, 对现场采集的重庆、四川、河南地区 7 个煤矿应用脉冲水射流割缝后石门揭煤突出预测指标  $K_1$ 、 $S$ 、 $P$  建立灰关联分析模型, 计算各突出预测指标与突出危险程度的关联度。结果表明: 钻屑瓦斯解吸指标  $K_1$  能够更准确地反映脉冲水射流割缝后石门揭煤煤与瓦斯突出危险程度, 应作为最佳预测指标。

**关键词:** 脉冲水射流; 割缝; 石门揭煤; 突出; 预测指标; 灰关联分析

**中图分类号:** TD713.2

**文献标志码:** A

## Indexes optimization of outburst forecast while a rock cross-cut coal is uncovered by pulsed water jet

LU Yiyu, YOU Yi, LIU Yong, XIA Binwei

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control;  
b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To obtain the best outburst prediction index of rock cross-cut coal uncovering slotted by pulsed water jet, the effects of the rigidity coefficient's measured value and the initial velocity of gas diffusion to the integrative indexes  $D$  and  $K$  are analyzed based on the dynamic evolution of coal crack field under water jet. Thus the integrative indexes  $D$  and  $K$  are excluded. A grey relation model of outburst prediction indexes ( $K_1$ ,  $S$  and  $P$ ) from 7 coal mine's rock cross-cut coal uncovering in Chongqing, Sichuan and Henan is set up. And the grey relation degrees of the 3 prediction indexes to outburst hazard are calculated by using grey relational analysis method. The results show that the outburst hazard can be more accurately reflected by the cuttings desorption index  $K_1$  when a cross-cut coal uncovering slotted by pulsed water jet, and it should be considered as the best outburst prediction index.

**Key words:** pulsed water jet; slotting; cross-cut; outburst; prediction index; grey relational analysis

石门揭煤危险性大、难度高, 严重制约着煤矿的采掘部署<sup>[1]</sup>。随着技术的发展, 现已形成水力冲孔、密集钻孔等石门揭煤技术, 但这些技术都较复杂且

揭煤时间长, 严重制约着煤矿采掘正常接替工作<sup>[2]</sup>。李晓红<sup>[3]</sup>、卢义玉<sup>[4]</sup>等提出了在石门揭煤过程中利用脉冲水射流割缝技术来增加低透气性煤层透气

收稿日期: 2012-12-02

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05065)

作者简介: 卢义玉 (1972-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (Tel) 023-65112372; (E-mail) luyiyu@cqu.edu.cn。

性,提升瓦斯抽放效果,缩短石门揭煤用时的快速石门揭煤方法。目前该技术已广泛应用于西南矿区。但在石门揭煤时采用脉冲水射流割缝技术后,煤体内含水量、孔隙、裂隙均发生变化,从而对石门揭煤工作面突出危险性预测指标产生较大影响。

Lv Run-sheng 等<sup>[5]</sup>通过测定各石门揭煤突出预测指标的综合不确定度优选了传统石门揭煤突出预测指标,但该方法存在一定的主观性,计算较复杂且不能直观反映各指标与突出危险性之间的关系。张飞燕<sup>[6]</sup>采用灰关联分析法优选了石门揭煤突出预测指标,伍爱友<sup>[7]</sup>、李念友<sup>[8]</sup>利用灰关联模型研究了煤与瓦斯突出的关键因素,但均未分析石门揭煤技术对石门揭煤突出预测指标的影响。因此,在采用脉冲水射流割缝后,选择何种石门揭煤突出预测指标作为最佳指标还有待研究。

笔者根据脉冲水射流割缝作用下煤体裂隙场的动态演化过程,分析了脉冲水射流割缝技术对石门揭煤突出预测指标的影响,最后采用灰关联法对脉冲水射流割缝后的石门揭煤突出预测指标进行了优选。

## 1 脉冲水射流割缝对石门揭煤突出预测指标的影响

### 1.1 水对煤样坚固性系数测值的影响

石必明<sup>[9]</sup>研究了水分对煤样坚固性系数测定结果的影响,得出硬煤和软煤的坚固性系数测值均随着煤样水分含量的增加而增大。石门揭煤时采用脉冲水射流割缝技术后,由于射流冲击波作用,被冲击区在强大应力波作用下处于绝对受压状态,当射流冲击煤体的压缩波传播到煤体的自由表面时,煤体所受应力从入射时的压缩应力变成全反射时的拉伸应力,当拉伸应力超过煤体原始软弱面的抗拉强度时,就促使这些软弱面发生破裂,然后当拉伸应力超过煤岩抗拉强度时,使煤岩体断裂损伤,促使煤体中产生新的宏观裂纹,同时在煤岩原始裂纹的基础上产生新的微裂纹;另外,由于受水体准静态作用,宏观裂纹在动态水压驱动下扩展,而微裂纹则在水射流所产生的准静态应力场的作用下扩展。各种裂纹的扩展造成煤体裂隙场的演化。煤体的吸水率的大小取决于煤体中裂隙的多少。因此,割缝后割缝钻孔内煤体含水量增大,进而在进行突出预测、测定所取煤样的坚固性系数时,使煤样的坚固性系数测值增大。

### 1.2 脉冲水射流割缝对瓦斯放散初速度的影响

煤体孔隙度的大小与瓦斯放散初速度的大小呈正相关<sup>[10]</sup>,即煤体瓦斯放散初速度随着煤体破坏程

度的升高而增加。石门揭煤时采用脉冲水射流割缝技术后,煤体裂隙场进一步扩展,当瓦斯解吸时,煤炭颗粒的表面张力和基质微孔隙表面自由能增加,煤基质就会收缩,其体积变小,进而扩大了孔隙、裂隙的尺寸,进一步增大煤体破坏程度,使煤体的瓦斯放散初速度大大增加。

石门揭煤突出预测综合指标  $D$ 、 $K$  的计算公式为<sup>[11]</sup>

$$\left. \begin{aligned} D &= \left( \frac{0.0075H}{f} - 3 \right) \times (P - 0.74) \\ K &= \frac{\Delta_P}{f} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中: $f$ 为煤样的坚固性系数测值; $\Delta_P$ 为软分层煤的瓦斯放散初速度; $H$ 为煤层埋藏深度,m; $P$ 为煤层瓦斯压力,取各测压钻孔实测瓦斯压力的最大值,MPa。

由1.1、1.2中理论分析,在石门揭煤过程中采用脉冲水射流割缝后,煤样的坚固性系数  $f$  的测值、煤体的瓦斯放散初速度  $\Delta_P$  会增大。代入式(1)计算,使  $D$  值变小, $K$  值则受煤样的坚固性系数测值  $f$  及软分层煤的瓦斯放散初速度  $\Delta_P$  同时影响。因此,揭煤前采用脉冲水射流割缝后,不适宜选用综合指标  $D$ 、 $K$  值进行突出预测。

### 1.3 煤体渗透率与煤层瓦斯压力的关系

瓦斯由煤体介质内部的孔隙向外的流动的过程应满足达西定律,而脉冲水射流割缝时直接对煤体产生破坏,使煤体孔隙体积增大。在对完成脉冲水射流割缝的钻孔封孔接抽时,由于煤基质收缩,导致煤体骨架体积缩小,煤体孔隙体积进一步增大,直接影响煤体孔隙度的变化。考虑煤体变形所产生的体积应变,则可得到煤体动态变化的孔隙度  $\varphi$  与煤体变形的体积应变的关系为<sup>[12]</sup>

$$\varphi = \frac{\varphi_0 + \varepsilon_V}{1 + \varepsilon_V} = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{1 + \varepsilon_V}, \quad (2)$$

式中: $\varphi_0$ 为煤体初始孔隙度; $\varepsilon_V$ 为煤体变形所产生的体积应变。

假定煤体为各项同性体,若各主应力方向引起的应变相等,则煤体应力—应变的关系有<sup>[13]</sup>

$$\varepsilon_V = -\frac{1}{K_C}(\bar{\sigma} - \alpha P) + \varepsilon_s, \quad (3)$$

式中: $K_C$ 为煤体体积弹性模量, $K_C = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ ; $\bar{\sigma}$ 为

煤体所受的平均压应力, $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$ ; $\alpha$ 为Biot有效应力系数( $0 \leq \alpha \leq 1$ ); $\varepsilon_s$ 为由瓦斯解吸—吸附引起的应变。

瓦斯解吸—吸附引起的应变  $\epsilon_s$  满足 Langmuir 等温吸附模型,则可用 Langmuir 方程来计算  $\epsilon_s$ ,有

$$\epsilon_s = \epsilon_L \frac{P}{P_L + P}, \quad (4)$$

式中: $\epsilon_L$  为无限孔隙压力下的体积应变常数,代表理论最大应变量; $P_L$  为煤样达到最大应变量一半时( $\epsilon_v = 0.5\epsilon_L$ )的孔隙压力; $P$  为煤层瓦斯压力。

将式(4)代入式(3)可得

$$\epsilon_v = -\frac{1}{K_C}(\bar{\sigma} - \alpha P) + \epsilon_L \frac{P}{P_L + P}, \quad (5)$$

Schwerer<sup>[14]</sup> 等得到煤层孔隙度和渗透率的关系为

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3, \quad (6)$$

式中: $k$  为煤层的渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $k_0$  为煤层初始渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

联立式(2)、式(5)带入式(6)可得煤层渗透率与煤层瓦斯压力的关系有

$$k = k_0 \cdot \left\{ \frac{1}{\varphi_0} - \frac{\left(\frac{1}{\varphi_0}\right) - 1}{1 - \left(\frac{1}{K_C}\right)(\bar{\sigma} - \alpha P) + \epsilon_L \frac{P}{(P_L + P)}} \right\}^3, \quad (7)$$

又煤体内的瓦斯压力与抽放时间服从如下指数关系<sup>[15]</sup>

$$P = a \cdot \exp(-bt), \quad (8)$$

式中: $a$  为煤体内的原始瓦斯压力,为一常数; $b$  为与煤体性质有关的参数; $t$  为瓦斯抽放时间。

式(8)中,当  $t=0$  时,有  $P=a$ 。即开始抽放时刻,煤体内的瓦斯压力就等于原始瓦斯压力。式(8)可以描述基质块体内部的瓦斯压力随瓦斯抽放时间的衰减规律。

随着煤体瓦斯抽放,煤体骨架体积收缩,致使煤体变形的体积应变、孔隙度随瓦斯抽放时间变化,即煤体渗透率随时间变化,因此,联立式(7)、式(8),可得煤体渗透率与煤层瓦斯压力的动态变化模型为

$$k = k_0 \cdot \left\{ \frac{1}{\varphi_0} - \frac{\left(\frac{1}{\varphi_0}\right) - 1}{1 - \left(\frac{1}{K_C}\right)(\bar{\sigma} - \alpha P) + \epsilon_L \frac{P}{(P_L + P)}} \right\}^3, \quad (9)$$

$$P = a \cdot \exp(-bt)$$

## 2 灰关联法优选快速石门揭煤突出预测指标

### 2.1 快速石门揭煤突出预测指标的现场数据采集

石门揭煤突出预测主要有综合指标  $D$ 、 $K$ , 钻屑

瓦斯解吸指标  $K_1$ 、 $S$ 。经试验证实,瓦斯压力  $P$  也是较为有效的突出预测指标。由于石门揭煤采用脉冲水射流割缝技术后,不适宜选用综合指标  $D$ 、 $K$  值进行突出预测,故在此不考虑综合指标  $D$ 、 $K$ 。根据重庆、四川、河南地区 7 个煤矿在 16 次石门揭煤前应用脉冲水射流割缝后所测定的突出预测指标数据见表 1。

表 1 煤与瓦斯突出原始指标 mmHg

石门编号	$K_1$	$S$	$P$	煤与瓦斯突出危险性
+5N4# 石门 $K_1$ 煤层	0.320	6	0.265	无突出危险
+5N4# 石门 $K_2$ 煤层	0.330	6	0.241	无突出危险
+5N5# 石门 $K_1$ 煤层	0.306	7	0.337	无突出危险
+5N5# 石门 $K_2$ 煤层	0.294	8	0.364	无突出危险
+80N4# 石门 $K_1$ 煤层	0.324	8	0.140	无突出危险
+80N4# 石门 $K_2$ 煤层	0.287	8	0.060	无突出危险
+80N5# 石门 $K_1$ 煤层	0.268	8	0.140	无突出危险
+80N5# 石门 $K_2$ 煤层	0.226	6	0.060	无突出危险
3113 回风石门	0.280	5	0.124	无突出危险
合掌坡回风斜井揭 7# 煤层	0.290	6	0.398	无突出危险
合掌坡回风斜井揭 8# 煤层	0.253	5	0.147	无突出危险
已 15 专回风通路石门揭已 16 煤层	0.189	5	0.232	无突出危险
已 15 专回风通路石门揭已 15 煤层	0.286	5	0.259	无突出危险
二井明斜井揭已 15 煤层	0.334	6	0.179	无突出危险
二井明斜井揭已 16—17 煤层	0.220	5	0.205	无突出危险
主斜井反上山揭已 16—17 煤层	0.277	5	0.064	无突出危险

### 2.2 灰关联分析简介

为从表 1 中优选出判别采用脉冲水射流割缝后石门揭煤与瓦斯突出危险性的最佳指标,就必须进行系统分析。常用的系统分析方法有回归分析、方差分析、主成分分析,但这些方法都具有数据量大、数据要求严苛、计算量大、易出现量化结果与定性结果不符等缺点。

灰关联分析根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。该方法弥补了回归分析等

系统分析方法的不足。它对样本量的多少和样本有无规律都同样适用,且不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况<sup>[16]</sup>。因此,采用灰关联法对以上快速石门揭煤指标进行优选比较合适。

### 2.3 灰关联模型的建立

设煤的突出危险程度为母因素( $X_0$ ,参考序列),其观测值为

$$X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k), \dots, x_0(8)\} \\ (k = 1 \sim 8)。 \quad (10)$$

各突出预测指标为子因素( $X_i$ ,比较序列),其观测值为

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(8)\} \\ (i = 1 \sim 3)。 \quad (11)$$

则对母因素与子因素的观测值分别进行无量纲化处理,可得

$$Y_0 = \{y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(k), \dots, y_0(8)\} \\ (k = 1 \sim 8), \quad (12)$$

$$Y_i = \{y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(k), \dots, y_i(8)\} \\ (i = 1 \sim 3), \quad (13)$$

式中:  $y_0(k) = \frac{x_0(k)}{\sum_{k=1}^8 x_0(k)}$ ;  $y_i(k) = \frac{x_i(k)}{\sum_{k=1}^8 x_i(k)}$  ( $i = 1 \sim 3$ )。

则  $y_0$  与  $y_i$  的在第  $k$  点的关联系数为

$$\varepsilon_{oi}(k) = [\min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)| + \\ \rho \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|] / \\ [ |y_0(k) - y_i(k)| + \\ \rho \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)| ], \\ (i = 1 \sim 3, k = 1 \sim 8), \quad (14)$$

式中:  $\min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)|$  为两级最小差,  $\max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|$  为两级最大差,  $\rho$  为分辨系数,一般取  $\rho=0.5$ 。

最后,不考虑各关联系数的权重,则可得  $Y_0$  与  $Y_i$  的关联度为

$$r_{oi} = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 \varepsilon_{oi}(k) (i = 1 \sim 3, k = 1 \sim 8)。 \quad (15)$$

### 2.4 灰关联分析结果

为便于灰关联分析,将无煤与瓦斯突出危险性的危险程度评分取为 1,则以突出危险程度为母因素的序列为

$$X_0 = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}。 \quad (16)$$

对母因素序列及子因素序列作无量纲化处理后见表 2。

表 2 无量纲化处理后的数据

突出预测指标	煤与瓦斯突出危险性	$K_1$	S	P
+5N4 # 石门揭 $K_1$ 煤层	0.062 5	0.071 4	0.060 6	0.082 4
+5N4 # 石门揭 $K_2$ 煤层	0.062 5	0.073 6	0.060 6	0.075 0
+5N5 # 石门揭 $K_1$ 煤层	0.062 5	0.068 2	0.070 7	0.104 8
+5N5 # 石门揭 $K_2$ 煤层	0.062 5	0.065 6	0.080 8	0.113 2
+80N4 # 石门揭 $K_1$ 煤层	0.062 5	0.072 3	0.080 8	0.043 5
+80N4 # 石门揭 $K_2$ 煤层	0.062 5	0.064 0	0.080 8	0.018 7
+80N5 # 石门揭 $K_1$ 煤层	0.062 5	0.059 8	0.080 8	0.043 5
+80N5 # 石门揭 $K_2$ 煤层	0.062 5	0.050 4	0.060 6	0.018 7
3113 回风石门	0.062 5	0.062 4	0.050 5	0.038 6
合掌坡回风斜井揭 7# 煤层	0.062 5	0.064 7	0.060 6	0.123 8
合掌坡回风斜井揭 8# 煤层	0.062 5	0.056 4	0.050 5	0.045 7
已 15 专回风通路石门揭已 16 煤层	0.062 5	0.042 2	0.050 5	0.072 2
已 15 专回风通路石门揭已 15 煤层	0.062 5	0.063 8	0.050 5	0.080 6
二井明斜井揭已 15 煤层	0.062 5	0.074 5	0.060 6	0.055 7
二井明斜井揭已 16-17 煤层	0.062 5	0.049 1	0.050 5	0.063 8
主斜井反上山揭已 16-17 煤层	0.062 5	0.061 8	0.050 5	0.019 9

最后根据关联系数及关联度的计算公式求得各突出预测指标与突出危险程度的关联度,见表 3。

表 3 突出预测指标与突出危险程度的关联度

突出预测指标	$K_1$	S	P
关联度	0.875 7	0.804 2	0.597 5

将表 3 中计算所得的关联度值按大小排序,可得石门揭煤采用脉冲水射流割缝后的各突出预测指标与突出危险性的准确程度排序:钻屑瓦斯解吸指标  $K_1 >$  钻屑量  $S >$  煤层瓦斯压力  $P$ 。由此可见,在石门揭煤过程中采用脉冲水射流割缝技术后,进行

突出预测时,钻屑瓦斯解吸指标  $K_1$  能够更准确地反映煤与瓦斯突出危险程度,应作为最佳预测指标。其次,钻屑量  $S$  也具有较高的关联度值,应在突出预测时一并考虑。

### 3 结论

1) 揭煤前采用脉冲水射流割缝后,煤样的坚固性系数  $f$  的测值、煤体的瓦斯放散初速度  $\Delta P$  会增大,使得突出危险性预测综合指标  $D$  值变小。 $K$  值则受  $f$  的测值和煤体瓦斯放散初速度  $\Delta P$  同时影响。固揭煤前采用脉冲水射流割缝后,不适宜选用综合指标  $D$ 、 $K$  进行突出预测。

2) 基于脉冲水射流割缝后瓦斯抽放过程中煤体孔隙度与体积应变的关系,推导出煤体渗透率与煤层瓦斯压力的动态变化模型。

3) 通过对重庆、四川、河南地区7个煤矿采用脉冲水射流割缝后采集的突出预测指标进行灰关联分析,优选出脉冲水射流割缝后的最佳石门揭煤突出预测指标  $K_1$ 。

#### 参考文献:

- [1] 蒋承林. 石门揭煤条件下动力现象的三分类预测研究[J]. 煤炭学报,1997,22(4):406-409.  
JIANG Chenglin. Prediction study of three dynamic force phenomena under the condition of uncovering coal seam in cross cut[J]. Journal of China Coal Society, 1997,22(4):406-409.
- [2] 王继达,刘代泽,周声才,等. 重庆地区煤与瓦斯突出防治技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
- [3] 李晓红,卢义玉,赵瑜,等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1386-1390.  
LI Xiaohong, LU Yiyu, ZHAO Yu, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(12):1386-1390.
- [4] 卢义玉,刘勇,夏彬伟,等. 石门揭煤钻孔布置优化分析及应用[J]. 煤炭学报,2011,36(2):283-287.  
LU Yiyu, LIU Yong, XIA Binwei, et al. The novel technology of drilling arrangement of rock cross-cut coal uncovering basing on theoretical analysis [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):1386-1390.
- [5] Lv R S, Ni X M. Forecast indexes optimization of outburst in cross-out exposing coal-bed based on measurement uncertainty analysis[C]// Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce, August 8-10, 2011, Deng Leng, China, Piscataway: IEEE Press,2011:374-377.
- [6] 张飞燕,韩颖. 灰关联方法在石门揭煤突出预测指标优选中的应用[J]. 煤炭学报,2007,32(10):1023-1025.  
ZHANG Feiyan, HAN Ying. Application of grey relevancy analysis method in index optimization of outburst forecast when a cross-cut is uncovered [J]. Journal of China Coal Society,2007,32(10):1023-1025.
- [7] 伍爱友,姚建,肖红飞. 基于灰色关联分析的煤与瓦斯突出预测指标优选[J]. 煤炭科学技术,2005,33(4):55-58.  
WU Aiyu, YAO Jian, XIAO Hongfei. Optimization for prediction index of coal and gas outburst base on gray associated analysis[J]. Coal Science and Technology, 2005,33(4):55-58.
- [8] 李念友,郭德勇,范满长. 灰关联分析方法在煤与瓦斯突出控制因素分析中的应用[J]. 煤炭科学技术,2004,32(2):69-71.  
LI Nianyou, GUO Deyong, FAN Manchang. Ash related analysis method applied to analysis of coal and gas outburst controlled factors[J]. Coal Science and Technology,2004,32(2):69-71.
- [9] 石必明. 煤的坚固性系数测定的实验研究[J]. 东北煤炭技术,1997(2):29-32.  
SHI Biming. Experiment and research on coal protodyakonov coefficient [J]. Coal Technology of Northeast China,1997(2):29-32.
- [10] Jiang J Y, Cheng Y P, Wang L, et al. Petrographic and geochemical effects of sill intrusions on coal and their implications for gas outbursts in the Wolonghu Mine, Huaibei Coalfield, China [J]. International Journal of Coal Geology,2011,88(1):55-66.
- [11] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定[DB/OL]. [2011-11-21]. <http://wenku.baidu.com/view/cb77db4cc850ad02de8041d8.html>.
- [12] 胡国忠,许家林,王宏图,等. 低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):1-6.  
HU Guozhong, XU Jialin, WANG Hongtu, et al. Research on a dynamically coupled deformation and gas flow model applied to low-permeability coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2011,40(1):1-6.
- [13] Zhang H, Liu J, Elsworth D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2008,45(8):1226-1236.
- [14] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model[J]. Society of Petroleum Engineers,1998,1(6):539-544.
- [15] 周世宁,林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [16] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.