

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.06.003

煤与瓦斯突出综合预测指标临界值的优化

齐庆杰,董子文,孙波,周新华,吴宪,洪林

(辽宁工程技术大学安全科学与工程学院,辽宁阜新 123000)

摘要:为了提高煤与瓦斯突出预测的准确性、保障采掘工作面的安全、高效推进和降低防突工程成本,根据“三率”(预测突出率、突出预测准确率、不突出预测准确率)各自具有的合理区间属性和权重,以张集煤矿采掘工作面为例,采用区间数关联决策方法,得出综合预测指标 F' 的最优化区间为 $[370, 380]$;根据加权灰靶决策方法,得出预测指标临界值排序为 400、390、380 等;取最优化区间和排序靠前的临界值的交集,得到煤与瓦斯突出综合预测指标 F' 的临界值为 380,并开展现场应用。结果表明,考虑评价指标的区间属性,并取预测指标区间与排序靠前的临界值的交集作为煤与瓦斯突出预测综合指标 F' 的最优临界值方法是合理的。

关键词:煤与瓦斯突出预测;属性;区间;排序;交集;临界值

中图分类号:TD713.2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)06-015-08

Optimization of the critical value of coal and gas outburst comprehensive prediction index

QING Qingjie, DONG Ziwen, SUN Bo, ZHOU Xinhua, WU Xian, HONG Lin

(College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technology University,
Fuxin 123000, Liaoning, P.R.China)

Abstract: In order to improve the accuracy of coal and gas outburst prediction, guarantee safe and efficient propulsion of mining face and reduce the cost of outburst prevention, by fully considering the interval attributes and weights of the three indicators (the prediction rate & accuracy rate of coal and gas outburst, and accuracy rate of no coal and gas outburst), we use the method of multilevel incidence decision of multi-attribute interval number to calculate the optimal interval of comprehensive prediction index F' of Zhangji coal mine, and its value is $[370, 380]$. According to the method of multi-weighted index gray target decision method, the top-ranking of F' is 400, 390, 380. The intersection of the optimized interval and the top-ranking of F' is 380. Case study results shows the method is reasonable.

Key words: coal and gas outburst prediction; property; interval; ranking; intersection; critical value

煤与瓦斯突出是一种极为复杂的煤矿瓦斯动力灾害,会造成大量人员伤亡和严重的财产损失,严重的会摧毁整个矿井。准确预测能够降低煤与瓦斯突出的危险及为合理防突提供依据^[1]。在煤与瓦斯突出预测方法上已有学者开展了大量的研究,多集中在使用灰色理论^[2-6]、模糊理论^[7-8]、数量化理论^[9]、神经网络^[10-12]、

收稿日期:2015-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51004062,51204087)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51004062,51204087).

作者简介:齐庆杰(1964-),男,辽宁工程技术大学教授,博士生导师,主要从事煤矿瓦斯灾害防治技术研究。

董子文(联系人),男,辽宁工程技术大学博士研究生,(E-mail)dzw2ywh@163.com。

混沌时间序列^[13],还有从瓦斯能量、含量、压力及变化过程和作用出发开展研究的^[14-15]。一般突出预测指标临界值的评价和筛选,采用突出预测率、突出预测准确率、不突出预测准确率 3 个评价指标,根据突出煤层开采实际及理论,以上 3 个评价指标具有“区间型”属性,在综合决策和评价过程中不能忽视该属性。以上提到的已有的研究,没有在评价过程中充分考虑该属性,虽然,总体预测效果能满足需要,但其预测突出率往往较高;同时,一般研究所确定的预测指标是一个区间,对于最终临界值的确定缺乏足够的理论依据。

笔者提出在充分引入评价指标“区间型”属性的基础上,建立取煤与瓦斯突出预测指标最优区间和最优临界指标值排序的交集作为综合预测指标临界值的灰色预测方法,实现了煤与瓦斯突出预测与突出煤层开采实际更好地结合,并使决策过程更加严谨,提高预突、防突的综合效果。

1 区间数关联决策及灰靶决策

1.1 多指标加权区间数关联决策^[16]

1) 决策方案集与评价指标集的确。

方案集 S 对评价指标集 A 区间决策矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} [X_{11}^L, X_{11}^U] & [X_{12}^L, X_{12}^U] & \cdots & [X_{1m}^L, X_{1m}^U] \\ [X_{21}^L, X_{21}^U] & [X_{22}^L, X_{22}^U] & \cdots & [X_{2m}^L, X_{2m}^U] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [X_{n1}^L, X_{n1}^U] & [X_{n2}^L, X_{n2}^U] & \cdots & [X_{nm}^L, X_{nm}^U] \end{bmatrix}。$$

2) 决策矩阵 X 的规范化处理。

A_j 为效益型指标,则

$$r_{ij}^L = \frac{X_{ij}^L}{\sum_{i=1}^n X_{ij}^U}, \quad r_{ij}^U = \frac{X_{ij}^U}{\sum_{i=1}^n X_{ij}^L}; \quad (1)$$

A_j 为成本型指标,则

$$r_{ij}^L = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_{ij}^U}}, \quad r_{ij}^U = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_{ij}^L}}。 \quad (2)$$

规范化方法对决策矩阵 X 进行规范化变换后得到规范化决策矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} [r_{11}^L, r_{11}^U] & [r_{12}^L, r_{12}^U] & \cdots & [r_{1m}^L, r_{1m}^U] \\ [r_{21}^L, r_{21}^U] & [r_{22}^L, r_{22}^U] & \cdots & [r_{2m}^L, r_{2m}^U] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [r_{n1}^L, r_{n1}^U] & [r_{n2}^L, r_{n2}^U] & \cdots & [r_{nm}^L, r_{nm}^U] \end{bmatrix} = (r_1, r_2, \dots, r_n)^T$$

式中: $r_i = ([r_{i1}^L, r_{i1}^U], [r_{i2}^L, r_{i2}^U], \dots, [r_{im}^L, r_{im}^U])$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为方案 i 的区间数效果向量。

3) 理想最优方程的构造。

对于多指标决策问题,取

$$r_{ioj} = \max \left\{ \frac{r_{ij}^L + r_{ij}^U}{2} \mid 1 \leq i \leq n \right\}, j = 1, 2, \dots, m。 \quad (3)$$

所对应的决策记为 $[r_{i0j}^L, r_{i0j}^U]$, 经过上述处理,则最优方案为

$$S^+ = \{ [r_{i01}^L, r_{i01}^U], [r_{i02}^L, r_{i02}^U], \dots, [r_{i0m}^L, r_{i0m}^U] \}。 \quad (4)$$

4) S_i 与 S^+ 关于 A_j 的区间数关联系数确定。

$L_{i0}(k)$ 为区间 $A = [x_{0L}(k), x_{0U}(k)]$ 到区间 $B = [x_{iL}(k), x_{iU}(k)]$ 的距离,

$$L_{oi}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}^P} [(X_{0L}(k) - X_{iL}(k))^P + (X_{0U}(k) - X_{iU}(k))^P]^{\frac{1}{P}}。 \quad (5)$$

当 $P=1$ 时为汉明距离, $P=2$ 为欧几里得距离。 S_i 与 S^+ 关于 A_j 的区间数关联系数为

$$\xi_{i_0j}(k) = \frac{\min_j \{L_{i_0j}(k)\} + \max_j \{L_{i_0j}(k)\}}{\max_j \{L_{i_0j}(k)\} + \rho \min_j \{L_{i_0j}(k)\}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

5) S_i 与 S^+ 的区间数关联度为

$$\varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{i_0j}(k), \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

6) 方案择优。

按关联度 $\varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 越大越好的原则选择出最优方案。

1.2 多指标加权灰靶决策

1) 构造样本矩阵。

根据改进的多指标加权灰靶决策模型, 设多指标问题有 n 个被评估的对象组成方案集 $S, S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$; m 个评价指标或属性组成指标集 $A, A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$; 方案 S_i 对指标 A_i 的效果样本值为 $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 则方案集 S 对指标集 A 的效果样本矩阵为

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

2) $[-1, 1]$ 线性变换算子得到决策矩阵。

一般的数据序列生成方法是将数据线性生成 $[0, 1]$ 区间, 这种方法忽略了奖优罚劣的思想, 所以根据奖优罚劣的原则和 Vague 思想, 可以将数据序列生成 $[-1, 1]$ 型序列。根据数据生成序列的方法, “区间型”指标是要求指标值落在 $[a, b]$ 内最好。其 $[-1, 1]$ 区间数据序列生成方法为

$$r_i(k) = \begin{cases} 1 - \frac{2(a - x_i(k))}{a - \min\{x_i(K)\}}, & x_i(k) < a, \\ 1 - \frac{2(x_i(k) - b)}{a - \min\{x_i(K)\} - b}, & x_i(k) > b, \\ 1, & x_i(k) \in [a, b]. \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

据公式(8)将数据序列进行线性变换算子对效果样本矩阵 $\mathbf{X}(t) = (x_{ij})$ 进行变换, 得到决策矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (r_1, r_2, \dots, r_n)^T$$

3) 最优效果向量的产生。

$$r_j^0 = \max\{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

则称 $r = (r_1^0, r_2^0, \dots, r_m^0)$ 为最优效果变量。

4) 靶心距的计算。

靶心距 ε_i 的大小反映了效果向量的优劣, 效果向量的靶心距 ε_i 越小, 决策方案越优越, 反之, 靶心距 ε_i 越大, 决策方案越差。靶心距的计算为

$$\varepsilon_i = |r_i - r| = \sqrt{\omega_1 (r_{i1} - r_1^0)^2 + \omega_2 (r_{i2} - r_2^0)^2 + \cdots + \omega_m (r_{im} - r_m^0)^2}. \quad (10)$$

区间数关联决策模型, 能够提供一个较为合理的取值区间; 灰靶决策模型可以将选择的临界值进行排序; 为了得到一个较为严格的临界值, 可以取区间与排序较为靠前的临界值的交集, 以此作为预测指标的临界值。

2 F' 临界值区间研究

根据张集煤矿煤与瓦斯突出预测实际, 沈阳煤炭科学院孙波等^[17]认为: 单独预测指标不能满足现场的

需要,提出建立一种新的综合指标作为煤矿井下采掘工作面的煤与瓦斯突出预测评价指标,用 F' 表示,

$$F' = (\Delta h_2 - 100)(q - 2), \tag{11}$$

式中: Δh_2 为钻孔瓦斯解吸指标,Pa; q 为钻孔瓦斯涌出初速度, $L \cdot \text{min}^{-1}$ 。

文献[17]提出 F' 的构造形式并在现场应用中进行了验证,证明了其可靠性,但是仅使用曲线法简单地 对 F' 的临界值进行了描述和确定,缺乏必要的、严谨的理论推导和证明。

张集煤矿现场测试结果,如表 1 所示,当 $F' \geq 400$ 时,不突出预测准确率较低,漏报较为严重; $F' \leq 200$ 时突出预测率较高,预测准确率过低不适宜采用。因此,在进一步的研究中将总体方案集 S_i 确定在 $F' = [200, 400]$ 范围内,为了保证降低计算量并能控制准确率将方案集 S_i 依据不同的 F' 值在不同区间的取值区域划分为 50 为步长的 4 个等间距的封闭的连续区间,分别为 $S_1[200, 250]$, $S_2[250, 300]$, $S_3[300, 350]$, $S_4[350, 400]$,根据表 1 中 F' 在不同区间的“三率”分布,构造了如表 2 的总体决策矩阵。

表 1 不同 F' 临界值下的“三率”分布

Table 1 “Three Rate” distribution under different F' thresholds

F'	A_1	A_2	A_3	F'	A_1	A_2	A_3
200	0.352 5	0.469 4	1.000 0	310	0.302 2	0.523 8	0.989 7
210	0.352 5	0.469 4	1.000 0	320	0.287 8	0.550 0	0.989 9
220	0.345 3	0.479 2	1.000 0	330	0.266 2	0.567 6	0.980 4
230	0.330 9	0.478 3	0.989 2	340	0.266 2	0.567 6	0.980 4
240	0.316 5	0.500 0	0.989 5	350	0.259 0	0.583 3	0.980 6
250	0.302 2	0.523 8	0.989 7	360	0.251 8	0.600 0	0.980 8
260	0.309 4	0.511 6	0.989 6	370	0.237 4	0.636 4	0.981 1
270	0.309 4	0.511 6	0.989 6	380	0.230 2	0.625 0	0.981 3
280	0.309 4	0.511 6	0.989 6	390	0.230 2	0.625 0	0.981 3
290	0.302 2	0.523 8	0.989 7	400	0.208 6	0.689 7	0.972 7
300	0.295 0	0.536 6	0.989 8				

表中, A_1 为预测突出率, A_2 为预测突出准确率, A_3 为预测不突出准确率。

1)决策方案集及评价指标集。

表 2 区间数决策矩阵

Table 2 Interval decision matrix

S_i	A_1	A_2	A_3
S_1	[30.22, 35.25]	[46.94, 52.38]	[98.97, 100.0]
S_2	[29.50, 30.22]	[52.38, 53.66]	[98.98, 98.97]
S_3	[25.90, 29.50]	[53.66, 58.33]	[98.06, 98.98]
S_4	[20.86, 25.90]	[58.33, 68.97]	[97.27, 98.06]

2)建立规范化区间数决策矩阵。

根据式(1)、式(2)规范化处理方法建立如表 3 的规范化决策矩阵。

3)最优方案的确定。

根据式(3)、式(4),理想最优方案为

$$S^+ = ([0.251\ 5, 0.357\ 9], [0.25, 0.326\ 4], [0.249\ 9, 0.254\ 3])。$$

4)各指标权重向量的确定。

在 SPSS 中计算得出 3 个评价指标的权重分别为: $\omega_1 = 0.334\ 5, \omega_2 = 0.332\ 2, \omega_3 = 0.333\ 3$ 。

5) S_i 与 S^+ 关于 A_j 的区间数关联系数及加权关联度计算。

由式(5),取 $P=2$ 计算区间距离,由式(6),取分辨率 $\rho=0.5$ 计算区间数关联系数,由式(7)计算区间数关联度,结果见表 4 所示。

表 3 规范化区间数据决策矩阵

Table 3 First level standardization interval decision matrix

S_i	A_1'	A_2'	A_3'
S_1	[0.184 8, 0.247 1]	[0.201 2, 0.247 9]	[0.249 9, 0.254 3]
S_2	[0.215 5, 0.253 2]	[0.224 5, 0.253 9]	[0.249 9, 0.251 7]
S_3	[0.220 8, 0.288 3]	[0.230 0, 0.276 1]	[0.247 6, 0.251 7]
S_4	[0.251 5, 0.357 9]	[0.250 0, 0.326 4]	[0.245 6, 0.249 3]

表 4 S_i 与 S^+ 关于 A_j 的区间数关联系数及关联度

Table 4 Interval correlation coefficient and interval correlation degree of S_i and S^+ about A_j

S_i	$\xi_{i01}(k)$	$\xi_{i02}(k)$	$\xi_{i03}(k)$	$\sum_{j=1}^3 \xi_{i0j}(k)$	ξ_i
S_1	0.333 5	0.411 7	1.000 0	1.745 2	0.581 7
S_2	0.368 8	0.457 2	0.961 1	1.787 2	0.595 7
S_3	0.459 8	0.544 3	0.949 4	1.953 5	0.651 2
S_4	0.999 9	1.000 0	0.908 5	2.908 4	0.969 5

6)方案择优。

按 $\epsilon_1 (i=1, 2, \dots, n)$ 取最大的原则, $\epsilon_4 = 0.969\ 5$ 是 $\epsilon_1 (i=1, 2, \dots, 4)$ 中最大的,所以,第 4 个方案为第一级优化的最优方案,及 F' 取值最优的区间应该是 $[350, 400]$ 。

将所得区间 $S_4 = [350, 400]$, 划分为 5 个等间距区间, $S_1^2 [350 \sim 360]$, $S_2^2 [360 \sim 370]$, $S_3^2 [370 \sim 380]$, $S_4^2 [380 \sim 390]$, $S_5^2 [390 \sim 400]$ 建立新区间数决策矩阵。采用上述方法, $\epsilon_3 = 0.719\ 2$ 是此次评价过程中 $\epsilon_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 最大的,所以, S_3^2 为最优方案,即 F' 取值最优的区间是 $[370, 380]$ 。

3 F' 临界值排序

实际生产过程中有突出危险的煤层约占开采煤层的 10%~20%,突出预测率应该在 $[0.1, 0.2]$ 范围内是最优的;突出预测准确率要求不能低于 60%,其区间是 $[0.6, 1]$;为了减少漏报要求预测不突出准确率不应当低于 95%,即在区间 $[0.95, 1]$ 内;评价指标的区间属性决定着简单的把评价指标视为“成本型”或是“效益型”更加严谨和合理。

1)决策方案样本的建立。

取 F' 不同临界值时对应的“三率”,建立样本矩阵,根据公式(8)进行线性算子转换后建立决策矩阵,如表 5 所示。

表 5 决策矩阵

Table 5 Decision matrices

F'	A_1'	A_2'	A_3'	F'	A_1'	A_2'	A_3'
200	-0.999 760	-1.000 000	1	310	-0.339 620	-0.166 780	1
210	-1.000 000	-1.000 000	1	320	-0.150 940	0.234 303	1
220	-0.905 660	-0.850 430	1	330	0.132 076	0.503 332	1
230	-0.716 980	-0.864 310	1	340	0.132 076	0.503 332	1
240	-0.528 300	-0.531 390	1	350	0.226 321	0.744 257	1
250	-0.340 170	-0.166 920	1	360	0.320 736	1.000 000	1
260	-0.433 960	-0.353 320	1	370	0.509 566	1.000 000	1
270	-0.433 960	-0.353 320	1	380	0.603 981	1.000 000	1
280	-0.433 960	-0.353 320	1	390	0.603 981	1.000 000	1
290	-0.339 620	-0.166 780	1	400	0.887 226	1.000 000	1
300	-0.245 750	0.029 096	1				

2) 效果向量。

根据决策向量的建立方法即式(9), 依据决策矩阵形成效果向量为: $r = (0.887\ 226, 1, 1)$ 。

3) 权重向量的形成。

在 SPSS 中依据算子转换之后的数据开展因子分析, 可以得到评价指标的权重向量为 $\omega (0.333, 0.333, 0.333)$ 。

4) 决策方案与效果向量的靶心距。

依据加权靶心距的计算方法即公式(10), 计算得出如表 6 的 21 个不同临界值对应的靶心距。

表 6 不同临界值对应的靶心距

Table 6 Target distances corresponding to different critical values

F'	ϵ	F'	ϵ	F'	ϵ
200	1.633 377	270	1.139 344	340	0.579 553
210	1.633 550	280	1.139 344	350	0.473 297
220	1.534 199	290	1.026 854	360	0.395 679
230	1.463 743	300	0.913 341	370	0.288 148
240	1.249 885	310	1.026 854	380	0.234 887
250	1.027 147	320	0.799 913	390	0.234 887
260	1.139 344	330	0.579 553	400	0.081 657

5) 排序。

依据靶心距越小决策方案与效果向量的距离越近的原则, 作出 F' 取 21 各不同值时的排序, 排序第一的是 400, 并列第二的是 380 和 390, 即 F' 的最优取值是 400, 其次是 380 和 390。

4 F' 临界值确定及现场应用效果考察

根据灰色区间数关联决策得到 F' 的最优取值区间时 $[370, 380]$, 依据多指标加权灰靶决策所得 F' 最优的是 400, 其次是并列第二的 380 和 390, 二者存在一个交集, 即 $F' = 380$, 所以, 确定采用 $F' = 380$ 作为最优临界值。

在张集矿西三采区推广应用, 由于 F' 作为综合预测指标的临界值的研究处于初期阶段加上预突防突

工作的紧急,为了安全起见,使用综合指标 $F'=300$ 作为指标进行了预测,对比不使用 F' (使用常规单项指标法)和使用 F' 后预突与防突安全性及施工量和推进速度等,见表 7 所示。

表 7 突出预测综合指标 $F'=300$ 应用前后效果对比

Table 7 Contrast of application effect before and after the application of Comprehensive index $F'=300$

项目	应用前	应用后
预测总次数	139 次	90 次
超限次数	54 次	2 次
防突措施孔	每次进行预测及效果检验时均打	2 次施工防突措施孔
防突措施孔数量	每次措施钻孔平均 25 个	2 次共 10 个钻孔
采煤进度	严重影响采煤进度	几乎不影响

根据表 1, $F'=300$ 时 $A_1=0.2950$ 、 $A_2=0.5366$ 、 $A_3=0.9898$, $F'=380$ 时 $A_1=0.2302$ 、 $A_2=0.6250$ 、 $A_3=0.9813$, 对比显示, $F'=380$ 时突出预测率降低, 突出预测准确率升高, 不突出预测准确率基本没有太大变化, 突出预测准确率由 0.5366 提高到 0.6250, 提高程度较大, 预测效果更好, 说明 $F'=380$ 具有更优越的现场使用理由和优势。

5 结 论

在张集煤矿煤与瓦斯突出预测的基础上, 依据灰色理论相关模型和方法, 开展了采掘工作面煤与瓦斯突出综合预测指标的临界值研究, 并开展了现场应用与考察, 得出以下主要结论:

1) 综合预测指标 F' 的临界最优区间为 $[370, 380]$, F' 的排序 400、390 和 380 等, 二者交集为 $F'=380$, 因此, 确定 F' 临界值为 380。

2) 现场应用并考察临界值的效果, 显示 $F'=380$ 能更大程度地提高预测的准确性、降低防突成本、提高采掘工程进度, 保障突出危险煤层采掘工作的安全、高效推进。

3) 采用多级多指标加权灰色区间关联数决策方法筛选出最优区间, 使用多指标加权灰靶决策方法给出指标排序, 取二者的交集作为综合指标 F' 的最优临界值的煤与瓦斯突出综合预测指标临界值确定方法是合理的, 对煤与瓦斯突出预测具有参考价值。

参考文献:

- [1] 于不凡, 王佑安. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
YU Bufan, Wang Youan. Coal mine gas disaster prevention and the use of technical manuals[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 齐庆杰, 刘媛爽, 孙波, 等. 煤与瓦斯突出敏感指标及临界值研究[J]. 微计算机信息, 2011, 27(7): 25-28.
QING Qingjie, LIU Yuanshuang, SUN Bo, et al. Analysis on the sensitive index and critical value of the coal and gas outburst[J]. Microcomputer Information, 2011, 27(7): 25-28. (in Chinese)
- [3] 董春游, 曹志国, 商宇航, 等. 基于 G-K 评价与粗糙集的煤与瓦斯突出分类分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1974-1978.
DONG Chunyou, CAO Zhiguo, SHANG Yuhang, et al. Coal and gas outburst classification analysis based on G-K evaluation and rough set[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1974-1978. (in Chinese)
- [4] 梁冰, 秦冰, 孙维吉. 基于灰靶决策模型的煤与瓦斯突出可能性评价[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1156-1160.
LIANG Bing, QIN Bing, SUN Weiji. Possibility assessment of coal-gas outburst based on grey target model[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1156-1160. (in Chinese)
- [5] 梁冰, 秦冰, 孙维吉, 等. 智能加权灰靶决策模型在煤与瓦斯突出危险评价中的应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1611-1615.
LIANG Bing, QIN Bing, SUN Weiji, et al. The application of intelligent weighting grey target decision model in the assessment of coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1611-1615. (in Chinese)

- [6] 景国勋,张强,周爱桃.基于灰色系统理论的煤与瓦斯突出预测[J].中国安全科学学报,2004,14(8):18-21.
Jing Guoxun,Zhang Qiang,Zhou Aitao.Prediction of coal and gas outburst based on grey system theory[J].China Safety Science Journal,2004,14(8):18-21.(in Chinese)
- [7] 李成武,何学秋.工作面煤与瓦斯突出危险程度预测技术研究[J].中国矿业大学学报,2005,34(1):71-76.
LI Chengwu,HE Xueqiu.Prediction method of coal and gas outburst dangerous level in coal road way face[J].Journal of China University of mining & Technology,2005,34(1):71-76.(in Chinese)
- [8] 冯占文,刘贞堂,李忠辉,等.应用层次分析—模糊综合评判法对煤与瓦斯突出危险性的预测[J].中国安全科学学报,2009,19(3):149-154.
FENG Zhanwen,LIU Zhentang,LI Zhonghui,et al.Risk prediction of coal and gas outburst based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method[J].China Safety Science Journal,2009,19(3):149-154.(in Chinese)
- [9] 石庆礼,杨胜强.数量化理论Ⅲ及其在煤与瓦斯突出危险性评估中的应用[J].中国安全生产科学技术,2013,9(6):69-74.
SHI Qingli,YANG Shengqing.Quantification theory III and its application in the evaluation of coal and gas outburst[J].Journal of Safety Science and Technology,2013,9(6):69-74.(in Chinese)
- [10] 肖红飞,何学秋,刘黎明.改进 BP 算法在煤与瓦斯突出预测中的应用[J].中国安全科学学报,2003,13(9):59-61.
Xiao Hongfei,He Xueqiu,Liu liming.Application of modified bp neural network in predicting coal and gas outburst[J].China Safety Science Journal,2003,13(9):59-61.(in Chinese)
- [11] 朱玉,张虹,苏成.基于免疫遗传算法的煤与瓦斯突出预测研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(1):125-130.
ZHU Yu,ZHANG Hong,SU Cheng.Coal and gas outburst forecasting based on immune genetic algorithm[J].Journal of China University of mining & Technology,2009,38(1):125-130.(in Chinese)
- [12] 罗新荣,杨飞,康与涛,等.延时煤与瓦斯突出的实时预警理论与应用研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(2):163-166.
LUO Xinrong,Yang Fei,KANG Yutao,et al.Research on real-time alarm theory of delayed coal and gas outburst[J].Journal of China University of mining & Technology,2008,37(2):163-166.(in Chinese)
- [13] 朱世松,汪云甲,魏连江.基于时间序列相似性度量的瓦斯报警信号辨识[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):474-480.
ZHU Shiming,WANG Yunjia,WEI Lianjiang.Gas monitoring warning signal identification based on time series similarity measure[J].Journal of China University of mining & Technology,2012,41(3):474-480.(in Chinese)
- [14] 王维忠,陶云奇,许江,等.不同瓦斯压力条件下的煤与瓦斯突出模拟实验[J].重庆大学学报,2010,33(3):82-86.
Wang Weizhong,Tao Yunqi,Xu Jiang,et al.Simulation of coal and gas outburst with different gas pressure[J].Journal of Chongqing University,2010,33(3):82-86.(in Chinese)
- [15] 付小平,薛新华,李洪涛.GRNN 模型在煤与瓦斯突出及瓦斯含量预测中的应用[J].中国安全科学学报,2012,22(1):24-28.
FU Xiaoping,XUE Xinhua,LI Hongtao.Application of GRNN model in predicting coal and gas outburst and gas content[J].China Safety Science Journal,2012,22(1):24-28.(in Chinese)
- [16] 党耀国,刘思峰,工正新,等.灰色预测与决策模型研究[M].北京:科学出版社,2009:99-155.
DANG Yaoguo,Liu Sifeng,Wang Zhengxin,et al.Study on grey predict and decision model [M].Beijing:Science Press,2009:99-155.(in Chinese)
- [17] 孙波,李爱民,谢耀社.煤与瓦斯突出预测综合指标 F 值的试验研究[J].煤炭科学技术,2006:34(6):64-66.
SUN Bo,LI Aimin,Xie Yaoshe.Test and research on comprehensive index F value for prediction of coal and gas outburst [J].Coal Science and Technology,2006:34(6):64-66.(in Chinese)