

突变级数法在邹庄煤矿突出危险性 评价中的应用

肖丰丰¹, 罗文柯^{1*}, 张大伟², 周加庆², 唐建华^{1,3}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 安徽神源煤化工有限公司 邹庄煤矿, 安徽 淮北 235123; 3. 湖南理工职业技术学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:为提高煤矿煤与瓦斯突出(以下简称突出)危险程度评价的准确性,提出一种以突变级数法与组合赋权法相结合的突出危险性评价方法.在基于地应力、煤层瓦斯压力和煤体结构物理性质综合影响因素分析基础上,建立邹庄矿井主采的 3_2 、 7_2 和 8_2 煤层的突出危险性评价指标体系,相继对各煤层的突出危险性进行评价.其评价结果表明: 3_2 煤层属于中度危险煤层, 7_2 和 8_2 煤层属于重度危险煤层,其评价结果与矿井各煤层突出危险性鉴定结果相一致,证实利用该方法评价煤矿矿井突出危险性是合理可行的.

关键词:组合赋权;突变级数法;煤与瓦斯突出;危险性评价

中图分类号:TD821

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)02-0043-07

On the Application of Mutation Level Method in the Evaluation of Outburst Risk of Zouzhuang Coal Mine

XIAO Fengfeng¹, LUO Wenke¹, ZHANG Dawei², ZHOU Jiaqing², TANG Jianhua^{1,3}

(1. College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Zouzhuang Coal Mine, Anhui Shenyuan Coal Chemical Co., Ltd., Huabei 235123, China;

3. Hunan Polytechnic Institute of Technology, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of evaluating the risk degree of coal and gas outburst (hereinafter referred to as "outburst") in coal mines, an outburst risk evaluation method that combines the mutation series method with the combined weighting method is proposed. Based on the analysis of the comprehensive influencing factors of coal structure and physical properties, the outburst risk evaluation index system of the main mining 3_2 , 7_2 and 8_2 coal seams in Zouzhuang Mine is established, and the outburst risk of each coal seam is evaluated successively, 3_2 coal seams are moderately dangerous coal seams, and 7_2 and 8_2 coal seams are severely dangerous coal seams. The evaluation results are consistent with the identification results of the outburst risk of each coal seam in the mine, confirming that it is reasonable and feasible to use this method to evaluate the coal mine outburst risk.

Keywords: combination weighting; catastrophe series method; coal and gas outburst; risk assessment

随着我国经济的持续发展和对煤炭资源需求的进一步增加,煤矿开采深度以每年 20~50 m 的速度向矿井深部延伸^[1],煤层原始瓦斯压力与瓦斯含量也随开采深度增加而增加,加之复杂的地应力场、采动应力场和裂隙场等多场耦合作用,煤层的突出危险性也随之增大,原鉴定为无突出危险性的部分煤层也开始

出现动力现象,引发的突出灾害事故愈发严重,突出灾害已成为现阶段威胁矿井安全生产最为严重的动力灾害之一^[2].

由于突出作用机理尚处综合假设阶段,常规突出危险性评价方法难以准确获取煤层真实突出危险性,为此,国内外学者对此提出许多突出危险性评价数学模型^[3-4],目前运用最广泛的单一评价方法有层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)^[5]、粗糙集理论法^[6]、模糊综合评价法^[7]、模糊层次分析法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)^[8]、神经网络法^[9]、灰色理论、遗传算法等,这为煤层突出危险性的评价提供了一个有效的技术手段.考虑到煤矿井下煤层突出危险性评价涉及的影响因素的模糊性和随机性,有学者尝试采用几种方法相结合的综合评价方法对井下突出危险性进行评价.如郭德勇等^[10]将层次分析法和模糊综合评判方法相结合应用于突出危险性评价研究中,在煤矿典型工作面对突出危险性进行定量评价,同时划分突出危险性等级,并验证其可行性;蔡俊杰等^[11]结合熵权法和属性数学理论构建突出危险等级综合评判模型,模型预测结果与现场瓦斯动力现象相符合;谢雄刚等^[12]基于熵权物元可拓理论建立煤层突出危险性评价模型,对贵州宏宇煤矿 5#,6#煤层进行突出危险性评价,证实熵权物元可拓评价模型的有效性;陈刘瑜等^[13]建立基于层次分析法和优劣距离法的冲击型突出倾向性等级评判模型,并在实际工程案例中验证模型的合理性;冯占文等^[14]运用 AHP 法与模糊数学综合评价方法对突出危险性进行评价,其突出危险性与实况高度吻合,证实该方法的实用性和可靠性;金洪伟等^[15]利用灰色关联分析确定影响因素关联比,并提出基于中性参考对象的 AHP 对煤矿突出危险性进行实时评价,其样本危险性评价结果准确率高达 95.7%.

突变理论致力于研究系统从一种稳定态瞬时跳跃到另一种稳定态的变化过程,且过程的变化是不连续的.矿井突出也同样具有独特的突变性,突出发生与否及发生的时间都较难预知,将突变级数法引入突出危险性评价中,能更好地凸显突变级数法处理突变问题的优势,运用突变级数法进行综合评价时,虽避免了评价指标的人为赋权,但仍需对评价指标进行重要性排序,这给评价结果带来一定的主观影响.对此,引入模糊层次分析法 (Fuzzy analytic hierarchy process, FAHP) 与熵权法相结合的方法对其进行改进,通过组合赋权方法对评价指标体系中各评价指标进行赋权,通过权值的大小比较各指标的相对重要度,进而确定指标重要性排序,可有效降低指标重要性排序过程中的人为主观性影响,使评价结果准确率更高.

1 模型评价构建

1.1 突变级数法

突变级数法是衍生于突变理论的一种评价系统状态的综合分析方法,结合模糊数学理论和突变理论,其核心思想是将一个系统目标分解成多个目标,通过归一公式逐层计算各层指标的突变模糊隶属函数值,最终得到评价结果.突变级数法相比于其他综合评价方法,其计算过程简便准确,可以科学客观评价系统状态,突变级数法计算步骤如下:

1) 多层次结构指标体系建立

根据评价目标特点建立合理的多层次评价指标体系,在评价指标体系的基础上,对各层次评价指标进行重要性排序,同时收集最底层指标的原始数据.

2) 各层指标突变系统类型确定

常见的突变系统模型分别为尖点突变型、燕尾突变型与蝴蝶突变型,其相对应的势函数公式和归一公式如表 1 所示.

表 1 常见突变模型

突变类型	控制变量	状态变量	势函数	归一公式
尖点型	a, b	x	$v = x^4 + ax^2 + bx$	$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}$
燕尾型	a, b, c	x	$v = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}$
蝴蝶型	a, b, c, d	x	$v = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$	$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}, x_d = d^{1/5}$

3) 数据标准化

由于底层评价指标的量纲不统一, 收集到的原始数据代表的意义和性质也各不相同, 需要对底层原始数据进行标准化处理.

4) 综合评价

首先, 通过所列的归一公式计算底层指标的突变隶属函数值. 其次, 通过“互补”和“非互补”原则判定同一层次指标间的相互关系, 即遵循“平均值”原则和“大中取小”原则, 逐层计算各指标的突变隶属函数值, 最终得到总突变隶属函数值.

1.2 FAHP 法主观赋权

FAHP 法隶属主观赋权法, 是将决策目标逐层分解为多个目标, 通过对指标的模糊化计算求解指标权重值的方法, 它是一种定性与定量相结合、系统化、层次化的分析方法, 其基本步骤如下:

1) 建立递阶层次分析模型, 构建判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 采用 0.1~0.9 标度法确定因素间两两比较的数值, 0.1~0.9 标度定义如表 2 所示.

表 2 0.1~0.9 标度

模糊数	说明
0.5	a_i 与 a_j 比较, 同等重要
0.6	a_i 与 a_j 比较, 前者比后者稍微重要
0.7	a_i 与 a_j 比较, 前者比后者明显重要
0.8	a_i 与 a_j 比较, 前者比后者非常重要
0.9	a_i 与 a_j 比较, 前者比后者绝对重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较, 若元素 a_i 与元素 a_j 相比较得到重要度 a_{ij} , 则元素 a_j 与元素 a_i 相比较得到重要度为 $(1-a_{ij})$

可以得出采用 0.1~0.9 标度构成的判断矩阵是模糊互补矩阵.

2) 建立模糊一致矩阵 R , 对矩阵 A 按式(1)~式(3)进行运算, 即可得到模糊一致性矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$.

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; \tag{1}$$

$$r_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, j = 1, 2, \dots, n; \tag{2}$$

$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2(n - 1)} + 0.5. \tag{3}$$

3) 确定指标权重 w_i , 运用模糊一致矩阵计算层次间的权重值^[16], 其计算公式为

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2m} + \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^n r_{ij}. \tag{4}$$

式中: n 为矩阵的阶数; $m = \frac{n - 1}{2}$.

1.3 熵权法客观赋权

熵权法隶属客观赋权法的一种, 其根据各评价指标的变异程度确定权重值, 评价过程再现性强.

1) 无量纲处理. 对原始样本数据进行无量纲、归一化处理.

对于效益性指标

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \tag{5}$$

对于成本性指标

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \tag{6}$$

式中: x_{ij} 为第 i 个评价目标的第 j 个指标评价值; $\min(x_j)$ 为评价目标第 j 项评价指标中的最小指标值;

$\max(x_j)$ 为评价目标第 j 项评价指标中的最大指标值; y_{ij} 为归一化后的指标值.

2) 计算各指标的信息熵

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}; \tag{7}$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}. \tag{8}$$

式中: p_{ij} 为第 i 个评价目标下第 j 个评价指标的特征比重; e_j 为第 j 项指标的熵值; $\frac{1}{\ln n}$ 为信熵系数.

3) 计算各指标的熵权 u_j

$$u_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{i=1}^n e_j}. \tag{9}$$

式中: $\sum_{j=1}^n u_j = 1$.

由上述可知 FAHP 和熵权法的指标赋权值, 通过加权平均法计算各评价指标组合权重大小(如式(10)), 据所得权重值大小对评价指标的重要度进行排序.

$$\lambda = \frac{w_i + u_j}{2}. \tag{10}$$

2 邹庄矿井主采煤层突出危险性评价

2.1 突出危险性评价指标体系建立

突出是众多影响因素综合作用的结果, 导致突出的原因及因素较为复杂. 根据相关研究^[17], 地应力、煤层瓦斯压力和煤体结构物理性质对突出起主导作用. 本文依据突出的综合假说, 选取 9 个指标作为突出影响因素, 其中地应力指标包含地质构造的复杂程度、煤层埋深和钻屑量, 煤层瓦斯压力指标为瓦斯压力、瓦斯含量、瓦斯放散初速度, 煤体结构物理性质的指标包含煤的坚固性系数、煤的破坏类型与煤层厚度. 邹庄煤矿突出的评价指标体系如图 1 所示.

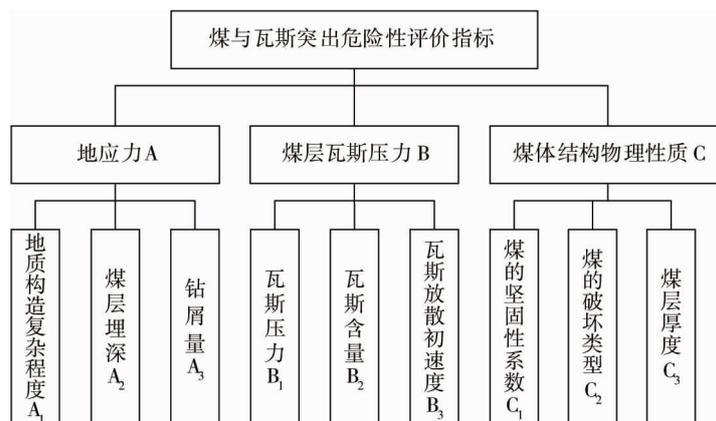


图 1 突出危险性评价指标体系

2.2 危险性评价等级赋值与计算

淮北邹庄煤矿矿井于 2009 年 10 月开始破土兴建, 2014 年 12 月投产, 设计年产量为 240 万 t, 矿井内主要可采煤层分为 3_2 , 7_2 及 8_2 煤层, 其突出危险性指标的原始数据如表 3 所示.

根据《防治煤与瓦斯突出细则》、专家、技术人员的经验以及文献[18], 本文将突出危险性分为无危险、轻度危险、中度危险、重度危险与极度危险这 5 个等级, 其分级标准见表 4.

表 3 淮北邹庄煤矿突出参数测定结果

煤层	地质构造复杂程度	煤层埋深/m	钻屑量/(kg/m)	瓦斯压力/MPa	瓦斯含量/(m ³ /t)	瓦斯放散初速度/(mL/s)	煤的坚固性系数	煤的破坏类型	煤层厚度/m
3 ₂	有少量断层和褶曲	527.8	4.1	0.56	10.50	5.162	0.60	II	2.49
7 ₂	有少量断层和褶曲	654.0	6.8	1.84	12.30	13.850	0.54	III	4.86
8 ₂	较简单	701.0	9.4	1.52	17.85	13.000	0.44	IV	2.37

表 4 各指标突出危险性分级

煤层	地质构造复杂程度	煤层埋深/m	钻屑量/(kg/m)	瓦斯压力/MPa	瓦斯含量/(m ³ /t)	瓦斯放散初速度/(mL/s)	煤的坚固性系数	煤的破坏类型	煤层厚度/m
无危险	地质构造极其简单(0.2)	<200	0~2	<0.4	<5	<5	1.5~2.0	I类(0.2)	<0.5
轻度危险	地质构造简单(0.4)	200~400	2~4	0.4~0.6	5~10	5~10	1.0~1.5	II类(0.4)	0.5~1.3
中度危险	有少量小断层和褶曲(0.6)	400~600	4~6	0.6~0.74	10~15	10~15	0.5~1.0	III类(0.6)	1.3~2.0
重度危险	断层和褶曲发育(0.8)	600~800	6~8	0.74~1.5	15~20	15~20	0.3~0.5	IV类(0.8)	2.0~2.7
极度危险	含大量瓦斯的地质构造(1.0)	>800	8~10	1.5~2.0	20~25	20~25	<0.3	V类(1.0)	>2.7
备注	—	>800 时取 800	>10 时取 10	>2.0 时取 2.0	>25 时取 25	>25 时取 25	>2.0 时取 2.0	—	大于 3 时取 3

根据煤矿的突出危险性评价指标体系,通过改进后的突变级数法对邹庄煤矿突出危险性进行评价。

FAHP 法的主观评价,依据突出危险性评价指标体系,对同一层次指标进行两两比较,通过咨询专家及其从业人员,分别构建准则层与指标层的模糊判断矩阵。

准则层模糊判断矩阵为

$$X = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{pmatrix}.$$

指标层模糊判断矩阵分别为

$$X_A = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 \end{pmatrix};$$

$$X_B = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{pmatrix};$$

$$X_C = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}.$$

由模糊一致矩阵的性质可知,模糊互补矩阵是模糊一致矩阵的充要条件是任意两行对应因素之差为同一常数^[19].经检验,上述模糊判断矩阵满足一致性。

根据上述模糊判断矩阵,通过式(1)和式(3)转化为模糊一致矩阵,利用式(4)计算各层次指标权重,目标层权重 w_X 、地应力指标层权重 w_A 、煤层瓦斯指标层权重 w_B 和煤体结构物理性质指标层权重 w_C 计算结果为

$$w_X = (0.367, 0.367, 0.266);$$

$$w_A = (0.383, 0.333, 0.284);$$

$$w_B = (0.400, 0.350, 0.250);$$

$$w_C = (0.366, 0.317, 0.317).$$

从而各影响因素指标主观权重为

$$w = (0.140\ 6, 0.122\ 2, 0.104\ 2, 0.146\ 8, 0.128\ 5, 0.091\ 8, 0.097\ 4, 0.084\ 3, 0.084\ 3).$$

熵权法的客观赋权,根据表3中煤矿的原始数据,由式(4)~式(9)计算各指标的客观权重,得各指标熵权权重为

$$u = (0.051\ 7, 0.022\ 0, 0.157\ 2, 0.309\ 1, 0.081\ 4, 0.239\ 8, 0.118\ 7, 0.003\ 3, 0.016\ 8).$$

根据式(10)得到组合权重的计算结果如表5所示.

表5 组合赋权权重

一级指标	二级指标	综合指标
地应力 A	地质构造复杂程度 A ₁	0.096 1
	煤层埋深 A ₂	0.072 1
	钻屑量 A ₃	0.130 7
煤层瓦斯压力 B	瓦斯压力 B ₁	0.227 9
	瓦斯含量 B ₂	0.104 9
	瓦斯放散初速度 B ₃	0.165 8
煤体结构物理性质 C	煤的坚固性系数 C ₁	0.108 1
	煤的破坏类型 C ₂	0.043 8
	煤层厚度 C ₃	0.050 6

对于表3中评价指标体系中不在0~1的数据,对其进行无量纲转换,将其转变为0~1的数值,再进行突变级数法的计算,其无量纲规范化后的数据如表6所示.

表6 无量纲规范化后的煤与瓦斯危险性评价指标

预测煤层	地质构造复杂程度 A ₁	煤层埋深 A ₂	钻屑量 A ₃	瓦斯压力 B ₁	瓦斯含量 B ₂	瓦斯放散初速度 B ₃	煤的坚固性系数 C ₁	煤的破坏类型 C ₂	煤层厚度 C ₃
3 ₂	0.600	0.659	0.410	0.420	0.280	0.206	0.700	0.400	0.830
7 ₂	0.600	0.817	0.680	0.492	0.920	0.554	0.730	0.600	1.000
8 ₂	0.400	0.876	0.940	0.714	0.760	0.520	0.780	0.800	0.790

以3₂煤层为例进行突变级数法的计算.由图1可知,在地应力条件下,控制变量的个数为3个,A₁,A₂,A₃指标构成燕尾突变模型.由组合赋权计算权重值可知,A₁,A₂,A₃的重要度排序为A₃>A₁>A₂,采用燕尾突变归一公式可得

$$x_{A_3} = a^{1/2} = 0.410^{1/2} = 0.640;$$

$$x_{A_1} = b^{1/3} = 0.600^{1/3} = 0.843;$$

$$x_{A_2} = c^{1/4} = 0.659^{1/4} = 0.900.$$

由于A₁,A₂,A₃这3个指标存在明显的互补关系,依据“互补”原则,求其平均值.

$$A_{32} = \frac{x_{A_1} + x_{A_2} + x_{A_3}}{3} = 0.794.$$

同理可计算出3₂煤的煤层瓦斯压力和煤体结构物理性质的隶属突变级数值,通过计算为B₃₂=0.655;C₃₂=0.856.

对于准则层指标,由于地应力、煤层瓦斯压力和煤体结构物理性质构成燕尾突变模型,指标重要度排序为B>A>C,且各因素在煤层采掘、瓦斯赋存等过程中存在必然的相互关系,即“互补”的关系,根据“互补”原则,3₂煤层突出评价的总隶属度为x₃₂=0.898.

同理,通过计算可得其余两煤层的突变级数值: $x_{7_2} = 0.947$; $x_{8_2} = 0.955$ 。

利用突变级数法计算出单指标的突出危险性的标准阈值,得到突变级数法的危险性评价等级指标如表 7 所示。

表 7 突出危险性分级

危险等级	无危险	一般危险	中度危险	重度危险	极度危险
突变级数	[0.000,0.818)	[0.818,0.888)	[0.888,0.931)	[0.931,0.973)	[0.973~1.000]

由各煤层的突变级数值计算结果可知: 3_2 煤层属于中度危险煤层, 7_2 煤层和 8_2 煤层属于重度危险煤层,在煤矿开采中应重点防护.据邹庄煤矿的实际生产状况, 3_2 煤层属于非突出危险性煤层, 7_2 煤层和 8_2 煤层属于突出危险性煤层,与突变级数法计算的单指标突出危险性阈值相对应,本文评价结果与邹庄煤矿生产实际相符合。

3 评价结论

1)用 FAHP 和熵权法相结合的主客观赋权方法确定各指标权重,弥补了指标重要度排序的主观性,使评价结果准确性更高,更具科学性和客观性。

2)煤与瓦斯突出状态的变化是非连续的突变现象,而突变级数法研究对象也是非连续性问题,其突变性和多准则性特征适用于煤与瓦斯突出的不确定性及突变性的特点,同时,运用突变级数法进行评估时,可避免指标权重值影响,计算简便准确,建立的模型稳定性好,具有一定的实际运用价值。

3)本文构建的突出危险性模型的评价结果和邹庄煤矿生产实际相符合,依据突变级数值判断煤与瓦斯突出危险性大小,可为矿井煤层开采的安全措施和决策制定提供参考与指导。

参考文献:

- [1] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.
- [2] 李化敏,付凯.煤矿深部开采面临的主要技术问题及对策[J].采矿与安全工程学报,2006(4):468-471.
- [3] 梁冰,秦冰,孙维吉,等.智能加权灰靶决策模型在突出危险评价中的应用[J].煤炭学报,2013,38(9):1611-1615.
- [4] 张友谊,崔金雷,焦向东.突出多指标耦合预测模型研究及应用[J].工程科学学报,2018,40(11):1309-1316.
- [5] 张天军,苏琳,乔宝明,等.改进的层次分析法在煤与瓦斯突出危险等级预测中的应用[J].西安科技大学学报,2010,30(5):536-542.
- [6] 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(7):1156-1160.
- [7] 李凤琴,田坤云.基于模糊综合评价的瓦斯突出危险性分析[J].河南工程学院学报(自然科学版),2015,27(1):16-19.
- [8] 孙鑫,徐杨,林柏泉,等.煤与瓦斯突出影响因素评价分析的模糊层次分析方法[J].中国安全科学学报,2009,19(10):145-149.
- [9] 田云丽,周利华.基于 BP 神经网络的煤与瓦斯突出预测方法的研究[J].系统工程理论与实践,2005(12):102-106.
- [10] 郭德勇,范金志,马世志,等.突出预测层次分析-模糊综合评判方法[J].北京科技大学学报,2007(7):660-664.
- [11] 蔡俊杰,李希建,代芳瑞,等.基于熵权-属性数学的突出危险性预测[J].矿业研究与开发,2021,41(9):103-107.
- [12] 谢雄刚,王璐欧,陈刘瑜,等.基于熵权物元可拓的煤层突出危险性评价[J].安全与环境学报,2019,19(6):1869-1875.
- [13] 陈刘瑜,李希建,毕娟,等.基于 AHP-TOPSIS 的冲击型煤与瓦斯突出倾向性预测[J].中国安全科学学报,2020,30(4):47-52.
- [14] 冯占文,刘贞堂,李忠辉,等.应用层次分析-模糊综合评判法对突出危险性的预测[J].中国安全科学学报,2009,19(3):149-154.
- [15] 金洪伟,杨卓亚,徐刚.基于改进 AHP-GRA 评价模型的煤与瓦斯突出危险性评价[J].矿业安全与环保,2020,47(5):113-118.
- [16] 宋光兴,杨德礼.模糊判断矩阵的一致性检验及一致性改进方法[J].系统工程,2003(1):110-116.
- [17] 李祥林.新义矿瓦斯地质规律及突出分级治理研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [18] 尹永明,张兴凯,姜福兴,等.冲击型煤与瓦斯突出力学机制及危险性评价技术研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):801-809.
- [19] 吕跃进.基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J].模糊系统与数学,2002(2):79-85.