

基于博弈论赋权的矿岩可爆性 GT-TOPSIS 评价

蒋云莱¹, 张义平^{1,2*}, 赵坤³, 方成成¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州一和科技有限公司, 贵州 贵阳 550025;
3. 中国铝业股份有限公司 贵州分公司, 贵州 贵阳 550014)

摘要: 准确评判矿岩可爆性有助于保障采矿生产安全及在爆破中取得良好的爆破效果。为合理确定矿岩可爆性等级, 建立基于博弈论和逼近理想解排序法(TOPSIS 法)的综合评价模型。选取影响矿岩可爆性的 6 个主要因素作为评价指标, 利用博弈论对层次分析法和改进熵权法求得的各指标权重进行组合优化赋值, 结合 TOPSIS 法得出评价分级, 并将该模型应用于贵州猫场铝矿巷道矿岩。结果表明: 猫场铝矿中土状铝土矿、致密状铝土矿、顶板白云岩、底板白云岩的可爆性预测结果等级分别为 II, II, IV, V, 与实际情况一致, 表明该模型在工程实际中具有一定的参考价值。

关键词: 可爆性分级; 博弈论; 逼近理想解排序法; 综合评价

中图分类号: TD235 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2023)03-0017-07

GT-TOPSIS Evaluation of Blastability of Ore-bearing Rock Mass Based on Game Theory Weighting

JIANG Yunlai¹, ZHANG Yiping^{1,2}, ZHAO Kun³, FANG Chengcheng¹

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Yihe Science and Technology Co., Ltd., Guiyang 550025, China;
3. Guizhou Branch, Aluminum Corporation of China, Guiyang 550014, China)

Abstract: Accurately evaluating the blastability of ore and rock is helpful to ensure the safety of mining production and obtain a good blasting effect in blasting. In order to reasonably determine the blastability grade of ore and rock, a comprehensive evaluation model based on game theory and TOPSIS method is established. Six main factors affecting the blastability of ore and rock are selected as evaluation indexes, and the weights of each index obtained by AHP and improved entropy weight method are combined and optimized by game theory. Combined with TOPSIS method, the number of evaluation grades is obtained, and the model is applied to the ore and rock of Maochang Aluminum Mine roadway in Guizhou. Results show that the prediction results of the blastability of soil bauxite, compact bauxite, roof dolomite and floor dolomite in Maochang Aluminum Mine are grade II, II, IV and V respectively, which are consistent with the actual situation, indicating that the model has certain reference value in engineering practice.

Keywords: blastability classification; game theory; technique for order preference by similarity to ideal solution; comprehensive assessment

爆破作为一种高效破岩方法在矿山开采中受到广泛应用, 爆破后矿岩的破碎程度直接影响矿山效益。由于岩体物理力学性质较复杂且不易表征和量化, 因此, 可借助矿岩可爆性等级间接反映矿岩破碎的难易程度, 进而根据可爆性等级评价结果合理优化爆破参数, 为爆破设计提供依据。

目前, 众多学者为了能够科学准确地评价矿岩可爆性等级, 从不同方面、不同角度采用多指标构建分

级评价模型对岩体可爆性进行研究. 璩世杰等^[1]采用加权聚类分析方法分析了岩石的可爆性; 张德明等^[2]运用模糊综合评判法对新桥硫铁矿进行可爆性分级; 周健等^[3]将综合未确知测度与信息熵理论应用到岩石可爆性分级研究中; 李夕兵等^[4]建立主成分分析法与径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络模型对岩体可爆性进行了研究; 戴兵等^[5]将未确知测度理论应用到岩石可爆性分级问题中, 利用置信度识别准则对岩石进行判定分级, 实现了对矿岩较为准确的预测分级; 杨凯等^[6]通过费歇尔判别法判别岩石可爆性分级, 回判效率和准确率较高; 彭亚雄等^[7]利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和逼近理想解排序法(TOPSIS)建立综合评价模型对利比亚邦铁矿矿岩可爆性进行分析, 针对不同爆破难易程度的矿区设计不同的爆破参数进行爆破, 降低了矿石大块率; 白玉奇等^[8]将CRITIC-Vague模型应用于矿岩可爆性评价, 并对爆破参数做了优化, 降低了矿石大块率; 王文军等^[9]利用爆破作用指数对黑沟矿区Ⅱ期采场典型岩性进行了可爆性分级. 综上所述, 前人对矿岩的可爆性分级评价已取得一定成果, 但由于岩体本身的物理力学性质差异较大, 以及爆破技术的不断迭代发展, 对于分级标准和方法需进一步细化完善, 建立具有针对性的矿岩可爆性分级评价可为现场提供基础数据支撑.

基于此, 本文运用博弈论思想将层次分析法与改进熵权法结合, 在矿岩可爆性等级判据的基础上, 建立基于博弈论(Game Theory, GT)和逼近理想解排序法的矿岩可爆性分级综合评价体系, 并通过工程实例验证该模型评价结果的科学性与可行性.

1 矿岩可爆性 GT-TOPSIS 模型

1.1 指标前处理

假设待选方案有 m 个, 每个方案有评价指标 n 个, 则待选方案集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, 指标集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. 设 a_{ij} 为第 i 个方案中第 j 个指标的原始数据, 则决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$).

综合评价时因量纲不一致或各评价指标类别差异将导致原始数据不便于比较, 需对原始数据 a_{ij} 做无量纲化处理, 常用的处理方法有极值法、归一化法、标准化法等^[10]. 由于极值法具有平移无关性、差异比不变性、区间稳定性等优点^[11], 因此本文采用极值法做数据前处理构建标准化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$, b_{ij} 与 a_{ij} 的关系为

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - \min(a_j)}{\max(a_j) - \min(a_j)} & (\text{越大越优型指标}); \\ \frac{\max(a_j) - a_{ij}}{\max(a_j) - \min(a_j)} & (\text{越小越优型指标}). \end{cases} \quad (1)$$

1.2 博弈论集化权重模型

1.2.1 AHP 确定主观权重

层次分析法(AHP)是一种将多目标、多准则、多因素、多层次复杂问题作为整体并对目标分解, 再通过定性和定量结合起来综合分析和评价的多准则系统分析方法, 旨在判断基本事件的重要程度. 具体步骤可参考文献[11-13], 此处不再赘述.

1.2.2 改进熵权法确定客观权重

改进熵权法(Improved Entropy Value Method, IEVM)^[14]是一种根据指标变异性大小来确定权重的客观赋权法. 熵值越小, 权重越大; 反之, 权重越小. 步骤如下:

1) 将标准化决策矩阵 B 进行归一化处理得到标准矩阵 P , 若标准矩阵 P 中出现某元素 $p_{ij} \leq 0$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), 则需按式(2)进行修正.

$$p'_{ij} = \frac{0.1 + p_{ij}}{\sum_{i=1}^m (0.1 + p_{ij})}. \quad (2)$$

2) 计算第 j 个指标的信息熵值 H_j , 如式(3)所示.

$$H_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}. \quad (3)$$

3) 计算第 j 个指标的权重值 W_j , 如式(4)所示, 权重值 W_j 构成的权重向量用 \mathbf{W} 表示.

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)}. \quad (4)$$

1.2.3 博弈论确定最优权重

单一采用主观赋权或客观赋权会导致评价结果存在差异与缺陷^[15], 现有文献一般运用线性加权法^[16-18]来综合考虑主客观权重对结果的影响, 采用线性加权进行数据融合具有计算量小、速度快的优点^[19]. 因此本文通过博弈论(GT)综合赋权将专家打分得到的主观静态权重与简单关联函数得到的客观动态权重进行线性加权, 得到岩体可爆性分级指标的综合权重.

假设采用 N 种求权重方法计算 n 个指标的权重向量, 则可以得到权重向量 \mathbf{u}_k :

$$\mathbf{u}_k = (\mathbf{u}_{k1}, \mathbf{u}_{k2}, \dots, \mathbf{u}_{kn}), (k=1, 2, \dots, N). \quad (5)$$

本文中 N 取 2, 即 AHP 法所确定的指标权重向量记为 \mathbf{u}_1 , 改进熵权法所确定的指标权重向量记为 \mathbf{u}_2 . 将这 N 个权重向量进行任意的线性组合得

$$\mathbf{u} = \sum_{k=1}^N \alpha_k \mathbf{u}_k^T, (\alpha_k > 0, k=1, 2, \dots, N). \quad (6)$$

式中: \mathbf{u} 为权重向量的线性组合; α_k 为线性组合系数.

为取得最优权重系数 α_k^* , 先将 \mathbf{u} 和 \mathbf{u}_k 做离差极小化, 即

$$\min \left\| \sum_{k=1}^N \alpha_k \mathbf{u}_k^T - \mathbf{u}_k \right\|_2, (k=1, 2, \dots, N). \quad (7)$$

再根据矩阵的微分性质有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2^T & \cdots & \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_N^T \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{u}_N \mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_N \mathbf{u}_2^T & \cdots & \mathbf{u}_N \mathbf{u}_N^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{u}_N \mathbf{u}_N^T \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将式(8)计算得到的 α_k 做归一化处理, 得最优权重系数 $\alpha_k^* = |\alpha_k| / \sum_{k=1}^N |\alpha_k|$, 则最优综合权重向量

$$\mathbf{U}^* = \sum_{k=1}^N \alpha_k^* \mathbf{u}_k^T (k=1, 2, \dots, N), \mathbf{U}^* \text{ 中的元素用 } z_j \text{ 表示, 即 } \mathbf{U}^* = (z_1, z_2, \dots, z_n).$$

1.3 GT-TOPSIS 法

TOPSIS 法是借助已有的指标数据, 假定各指标的最优值(正理想解)或最差值(负理想解), 并根据评价对象的各指标(即预测值)到正、负理想解的距离来判断评价对象的优劣程度, 当距正理想解近且离负理想解远时, 则为最优, 反之则不为最优. GT-TOPSIS 法是将博弈论与 TOPSIS 法结合对目标进行综合评价的方法, 具体步骤如下:

1) 构建标准化加权决策矩阵 $\mathbf{C} = (c_{ij})_{m \times n}$, 其中: c_{ij} 为预测值, $c_{ij} = z_j b_{ij}$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 即:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} z_1 b_{11} & z_2 b_{12} & \cdots & z_n b_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1 b_{m1} & z_2 b_{m2} & \cdots & z_n b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2) 确定矩阵 \mathbf{C} 的正理想解 c_j^+ 和负理想解 c_j^- .

$$c_j^+ = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} (c_{ij}) & (\text{越大越优型指标}); \\ \min_{1 \leq i \leq m} (c_{ij}) & (\text{越小越优型指标}). \end{cases} \quad (10)$$

$$c_j^- = \begin{cases} \min_{1 \leq i \leq m} (c_{ij}) & (\text{越大越优型指标}); \\ \max_{1 \leq i \leq m} (c_{ij}) & (\text{越小越优型指标}). \end{cases} \quad (11)$$

3) 计算各预测值和正、负理想解的欧氏距离 D_i^+, D_i^- , 且所有 D_i^+ 构成向量 \mathbf{D}^+ , 所有 D_i^- 构成向量 \mathbf{D}^- .

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2}; \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2}. \end{cases} \quad (12)$$

式中: D_i^+ 为预测值与正理想解的距离; D_i^- 为预测值与负理想解的距离.

4) 计算各预测值的贴近度 E_i^* , 其中所有 E_i^* 构成向量 E^* .

$$E_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}. \quad (13)$$

贴近度 $E_i^* \in [0, 1]$, 若 E_i^* 趋于 1, 则预测值与正理想解较近; 若 E_i^* 趋于 0, 则预测值与负理想解较近.

2 矿岩可爆性评价分级

2.1 矿岩可爆性影响因素

影响矿岩可爆性的因素众多, 如矿岩的地质赋存条件和物理力学性质以及炸药单耗等. 在保证对岩体可爆性描述有效性的前提下, 应尽量减少岩体可爆性指标的个数, 同时还应减少所选各指标间的相关性, 以便在工程爆破实践中更好地应用^[20]. 在爆破岩石分类和改进后的哈氏爆破性分级方法^[21]基础上, 参考文献[9]和文献[22-25], 选取矿岩容重(γ)、波阻抗(K)、普氏系数(f)、抗拉强度(σ_t)、岩体完整性系数(η)、炸药单耗(q)等6个主要影响因素作为矿岩可爆性的评价指标进行综合评价, 将矿岩可爆性分为7个等级: I~VII, 具体见表1.

表1 矿岩可爆性判据分级^[9,21-25]

可爆性等级	分级指标						难易程度
	矿岩容重 $\gamma / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	波阻抗 $K / (10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	普氏系数 f	抗拉强度 σ_t / MPa	完整性系数 η	炸药单耗 $q / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	
I	≤ 2.50	≤ 3	≤ 8	≤ 7	≤ 0.20	≤ 1.0	最易
II	≥ 2.60	≥ 6	≥ 10	≥ 10	≥ 0.35	≥ 1.1	易
III	≥ 2.75	≥ 9	≥ 12	≥ 13	≥ 0.45	≥ 1.2	较易
IV	≥ 2.90	≥ 12	≥ 14	≥ 17	≥ 0.55	≥ 1.4	中等
V	≥ 3.16	≥ 15	≥ 16	≥ 20	≥ 0.65	≥ 1.6	较难
VI	≥ 3.30	≥ 18	≥ 18	≥ 23	≥ 0.75	≥ 1.8	难
VII	≥ 3.50	≥ 20	≥ 20	≥ 26	≥ 0.90	≥ 2.0	最难

2.2 计算综合贴近度

1) AHP 确定主观权重: 根据专家对各评价指标的打分构建判断矩阵, 计算各指标的权重并进行一致性检验, 其中: CI 为一致性指标; RI 为随机一致性指标; CR 为一致性比率.

判断矩阵及一致性检验结果如表2所示.

表2 判断矩阵及一致性检验

A	γ	K	f	σ_t	η	q	权重
γ	1	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	0.080 8
K	2	1	1/2	1	1/3	1/2	0.113 1
f	2	2	1	2	1/2	1	0.192 2
σ_t	2	1	1/2	1	1/2	1/2	0.120 7
η	3	3	2	2	1	1	0.278 1
q	2	2	1	2	1	1	0.215 0

$\lambda_{\max} = 6.114 9$ CI=0.023 0 RI=1.264 0 CR=0.018 2<0.1

2) 改进熵权确定客观权重: 根据表1中数据及式(2)~式(4)可得评价指标信息熵理论权重向

量 $W=(0.162\ 8,0.185\ 3,0.167\ 7,0.173\ 9,0.152\ 3,0.158\ 0)$.

3) 博弈论确定综合权重:对2组权重值进行优化,根据式(8),利用 Python 对组合权重系数求解,得 $\alpha_1 = 0.894\ 6, \alpha_2 = 0.125\ 2$,将权重系数归一化处理得 $\alpha_1^* = 0.877\ 0, \alpha_2^* = 0.123\ 0$,从而得到最优组合权重向量 $U^*=(0.090\ 9,0.122\ 0,0.189\ 2,0.127\ 2,0.262\ 7,0.208\ 0)$.

4) 根据爆破理论和岩体性质可知,所选分级指标值均为越小越优,则各指标加权标准矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 0.090\ 9 & 0.122\ 0 & 0.189\ 2 & 0.127\ 2 & 0.262\ 7 & 0.208\ 0 \\ 0.081\ 8 & 0.100\ 5 & 0.157\ 7 & 0.107\ 1 & 0.206\ 4 & 0.187\ 2 \\ 0.068\ 2 & 0.078\ 9 & 0.126\ 1 & 0.087\ 0 & 0.168\ 9 & 0.166\ 4 \\ 0.054\ 5 & 0.057\ 4 & 0.094\ 6 & 0.060\ 3 & 0.131\ 4 & 0.124\ 8 \\ 0.030\ 9 & 0.035\ 9 & 0.063\ 1 & 0.040\ 2 & 0.093\ 8 & 0.083\ 2 \\ 0.018\ 2 & 0.014\ 4 & 0.031\ 5 & 0.020\ 1 & 0.056\ 3 & 0.041\ 6 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}.$$

由式(12)可得预测值与正、负理想解的欧式距离分别为

$$D^+ = (0.432\ 9,0.361\ 6,0.301\ 0,0.227\ 3,0.153\ 5,0.0827,0);$$

$$D^- = (0,0.074\ 5,0.136\ 0,0.207\ 6,0.280\ 3,0.351\ 4,0.432\ 9).$$

由式(13)可得矿岩可爆性等级与正理想解的贴近度,即矿岩可爆性分级参考结果:

$$E^* = (0,0.170\ 8,0.311\ 2,0.477\ 3,0.646\ 2,0.809\ 6,1).$$

3 实例应用

3.1 工程概况

猫场铝土矿区位于贵州中部,矿区北起曹家大坡、高翁、倒流水一带,南至小威岭、马场一线,西以岩脚寨高坡一线为界,东至猫场土地关.矿区内矿体产于石炭系大塘组(C1d)上段含铝岩系(C1d2)的下部,属缓倾斜薄及中厚矿体,按矿石类型分为土状铝土矿、碎屑状铝土矿和致密状铝土矿,矿体直接顶的岩石类型有3种:黏土岩、白云岩、高硫铝土矿.

由于各铝土矿体的围岩力学性质差异易导致爆破时炸药单耗过高及巷道超欠挖问题,结合现场实际情况,本文选取矿体为土状铝土矿、致密状铝土矿,顶底板为白云岩,研究所选矿体可爆性难易程度.

3.2 岩石试验

对矿体和上下盘围岩进行取样,并进行岩石标准试件制作,每种试件不少于3组,试验结果取平均值以减小误差.加工后的土状铝土矿、致密状铝土矿、顶板白云岩、底板白云岩的试样规格及编号:抗压试样, $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,编号依次为 $K_1Y-1 \sim K_1Y-5, K_2Y-1 \sim K_2Y-4, TY-1 \sim TY-7, DY-1 \sim DY-8$;抗拉试样, $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,编号依次为 $K_1L-1 \sim K_1L-4, K_2L-1 \sim K_2L-5, TL-1 \sim TL-6, DL-1 \sim DL-7$.试验标准试样如图1所示.对标准试样开展室内岩石力学试验,包括单轴压缩、劈裂拉伸和声速检测等试验,采用多物理场耦合岩石力学试验机、SRU-PST 岩土声波测试仪等检测设备对岩样进行检测,实验设备如图2和图3所示,具体参数如表3所示.



图1 标准试件



图2 多物理场耦合岩石力学试验机



图3 SRU-PST 岩土声波测试仪

表3 矿岩可爆性参数

矿岩岩性	$\gamma/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$K/(10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	f	σ_t/MPa	η	$q/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
土状铝土矿	2.626	6.392 2	4	2.84	0.32	0.81
致密状铝土矿	2.782	11.147 7	7	3.51	0.39	1.20
顶板白云岩	2.761	16.806 6	15	8.55	0.44	1.88
底板白云岩	2.822	18.243 7	22	8.36	0.48	2.51

3.3 实例分析

运用博弈论对各指标进行组合赋权,根据 GT-TOSIS 评价模型计算 4 种矿岩的综合贴近度 $E^* = (0.116\ 4, 0.204\ 8, 0.472\ 0, 0.588\ 1)$. 即土状铝土矿的可爆性评价结果为 0.116 4, 属于 II (易); 致密状铝土矿的评价结果为 0.204 8, 属于 II (易); 顶板白云岩的评价结果为 0.472 0, 属于 IV (中等); 底板白云岩的评价结果为 0.588 1, 属于 V (较难).

对某一岩体进行爆破性评价时,各可爆性指标不一定完全在一个级别体系,采用 GT-TOSIS 模型可根据各指标所占权重大小进行综合评价,以达到评定等级的精细划分. 针对处于同一评判等级的不同岩体可以进一步排序比较,如土状铝土矿和致密状铝土矿可爆性等级同属于 II (易),但后者综合贴近度大于前者,即可爆性难度后者大于前者,因此可根据综合贴近度的大小设计合理的爆破参数,以增加矿山效益.

优化前,该矿区由于部分区域爆破参数选择不够合理,巷道轮廓成型较差,爆破块度不均匀. 选取普氏系数 f 为 4~6 的灰白色、深灰色土状铝土矿进行试验,结合评价结果所得的可爆性难易程度,在原矿区所采用的爆破孔网参数的基础上优化了周边孔以及辅助孔的装药量,优化后使得欠挖、块度问题有所改善,表明该模型对工程实践具有一定的指导意义. 优化前后的爆破效果分别如图 4 和图 5 所示.



图4 优化前爆破效果



图5 优化后爆破效果

4 结论

1) 运用博弈论思想对影响矿岩可爆性的 6 个指标矿岩容重、波阻抗、普氏系数、抗拉强度、岩体完整性系数和炸药单耗进行综合集成,较大程度地减少了单独使用主观赋权(AHP法)和客观赋权(IEVM法)带来的局限,使权重值的确立更具科学性.

2) 基于 GT-TOPSIS 的矿岩可爆性评价模型应用于猫场铝矿岩石可爆性评价检验中,得到各岩体的评价结果与实际情况相符,说明该模型能够为实际工程中矿岩可爆性的评价提供合理、准确的判断,同时也为岩石可爆性难易程度评价方法的选择提供一种新的参考。

参考文献:

- [1] 璩世杰,毛市龙,吕文生,等.一种基于加权聚类分析的岩体可爆性分级方法[J].北京科技大学学报,2006(4):324-329.
- [2] 张德明,王新民,郑晶晶,等.基于模糊综合评判的矿岩体可爆性分级[J].爆破,2010,27(4):43-47.
- [3] ZHOU J, LI X B. Integrating unascertained measurement and information entropy theory to assess blastability of rock mass[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(7): 1953-1960.
- [4] 李夕兵,朱玮,刘伟军,等.基于主成分分析法与 RBF 神经网络的岩体可爆性研究[J].黄金科学技术,2016,23(6):58-63.
- [5] 戴兵,赵国彦,董陇军.岩体可爆性分级的未确知均值分级方法及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(6):2157-2161.
- [6] 杨凯,时磊,黄滚,等.费歇尔判别法在岩体可爆性分级中的应用[J].矿业研究与开发,2018,38(8):84-87.
- [7] 彭亚雄,程瑶,吴立,等.基于 AHP-TOPSIS 法的矿岩可爆性评价[J].爆破,2017,34(4):80-84.
- [8] 白玉奇,李振阳,李传增,等.基于 CRITIC-Vague 模型的岩体可爆性评价[J].金属矿山,2020(12):27-32.
- [9] 王文军,李润然,纪旭波,等.黑沟矿区露天开采矿岩可爆性分级研究[J].金属矿山,2021(4):64-69.
- [10] 李兴奇,高晓红.无量纲化方法的有效性评价[J].统计与决策,2021,37(15):24-28.
- [11] 汪科任,罗世辉,陈晓昊,等.基于 AHP 分析法的磁浮系统车轨耦合振动抑制方法[J].铁道学报,2020,42(11):29-35.
- [12] 周平,王泽胜,殷波,等.基于层次分析法的云服务可用性评价方法[J].北京邮电大学学报,2021,44(1):79-85.
- [13] 谢姿,张惠娟,刘琪,等.考虑蓄电池寿命的分布式电源容量优化配置[J].太阳能学报,2021,42(10):424-430.
- [14] 刘东,龚方华,付强,等.基于博弈论赋权的灌溉用水效率 GRA-TOPSIS 评价模型[J].农业机械学报,2017,48(5):218-226.
- [15] LAI C G, CHEN X H, CHEN X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1243-1259.
- [16] 全瑞刚,曹庆贵,宋洁,等.基于组合赋权-集对分析的煤矿煤尘爆炸危险性评价研究[J].中国矿业,2020,29(5):97-102.
- [17] 毕娟,李希建.组合赋权的 TOPSIS 在冲击地压危险性评价中的应用[J].矿业安全与环保,2020,47(2):114-119.
- [18] 徐琛,刘晓丽,王恩志,等.基于组合权重-理想点法的应变型岩爆五因素预测分级[J].岩土工程学报,2017,39(12):2245-2252.
- [19] 刘朋,刘韬,王思洪,等.基于信息融合与 FastICA 的轴承故障提取方法[J].振动与冲击,2020,39(3):250-259.
- [20] 璩世杰,辛明印,毛市龙,等.岩体可爆性指标的相关性分析[J].岩石力学与工程学报,2005(3):468-473.
- [21] 王玉杰.爆破工程[M].2版.武汉:武汉理工大学出版社,2018:135-137.
- [22] 周楠,王德胜,常建平,等.基于综合赋权聚类分析的岩石爆破性分区评价[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2817-2824.
- [23] 杨仁树,李炜煜,杨国梁,等.炸药类型对富铁矿爆破效果影响的试验研究[J].爆炸与冲击,2020,40(6):96-107.
- [24] 尚俊龙,胡建华,莫荣世,等.可爆性分级的博弈论物元可拓预测模型及其应用[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):86-92.
- [25] 潘勇.岩体可爆性数值分级研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.