基于组合赋权-区间逼近法的露天矿爆破安全评价模型及应用研究*

刘彦宾[1,2]，葛菊花[3]，费汉强[3]

（1.河南省地质局地质灾害防治中心， 河南 郑州 450012；
2.河南省矿物加工及生物选矿工程技术研究中心， 河南 郑州 450012；
3.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对露天矿爆破安全定性评价指标量化计算困难的问题，为提高评估结果的准确性，建立了基于组合赋权及区间逼近的露天矿爆破安全评价模型。首先，结合爆破工程实际，选取了15个影响因素，构建了露天矿爆破安全评估指标体系；其次，根据组合赋权思想，将序关系分析法（G1法）和改进指标相关性的权重确定法（改进CRITIC法）计算得到的主、客观权重进行耦合，以获取均衡、合理的指标综合权重；然后，基于区间数理论，确定指标评估区间数，并通过计算单指标偏离距离和综合偏离距离，综合判定爆破安全等级；最后，以湖南省5座露天矿爆破实例为研究对象，应用组合赋权-区间逼近法进行综合分析。结果表明，5座矿山爆破安全等级均为“较安全”等级，评估结果符合实际，验证了该模型在露天矿爆破安全评估方面的适用性。在后续研究过程中，还要不断丰富和完善评估体系，进一步提升模型的实用性。

关键词：露天矿；爆破安全评价；区间逼近法；组合赋权法；G1法；改进CRITIC法
中图分类号：TD854 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)08-0107-09

Research on the Blasting Safety Evaluation Model and its Application in Open-Pit Mine Based on Combination Weighting and Interval Approximation Method

LIU Yanbin[1,2], *GE Juhua*[3], *FEI Hanqiang*[3]

(1.The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450012, China;
2.Henan Engineering Research Center of Mineral Processing and Microbe Mineral Processing, Zhengzhou, Henan 450012, China;
3.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of quantitative calculation of qualitative evaluation index of blasting safety in open-pit mine, a blasting safety evaluation model of open-pit mine based on combination weighting and interval approximation method was proposed to improve the accuracy of the evaluation results. Firstly, combined with the actual blasting engineering, 15 influencing factors were selected to construct a safety evaluation indicator system of open-pit mine blasting. Secondly, based on the idea of combination weighting, the subjective and objective weights calculated by the order relation analysis method (G1 method) and the improved indicator correlation weight determination method (improved CRITIC method) were coupled to obtain the comprehensive weight of the indicators. Then, based on the principle of interval approximation, the number of evaluation intervals of the indicators was determined, and the blasting safety level was comprehensively judged by calculating the deviation distance of a single indicator and the comprehensive deviation distance. Finally, taking 5 open-pit mine blasting cases in Hunan Province as the research object, the combination weighting and interval approximation method model was applied for comprehensive analysis. The results indicate that the blasting safety level of all five mines are “relatively safe”, and the evaluation results are in line with the actual situation, verifying the applicability of the model in the blasting safety evaluation of open-pit mines.

Key words: Open-pit mine, Blasting safety evaluation, Interval approximation method, Combination weighting method, G1 method, Improved CRITIC method

0 引言

工程爆破是当前回采矿产资源必不可少的工序。虽然爆破技术不断创新，爆破器材安全性不断提升，但是由于矿山爆破环境的复杂性和不确定性，露天矿爆破仍存在较多的安全隐患[1-2]。因此，科学

* **收稿日期**：2025-06-27
作者简介：刘彦宾(1982—)，男，河南开封人，硕士，工程师，主要从事金属非金属矿山安全技术与管理、矿山设备安全检测检验等方面的研究。E-mail:147640829@qq.com

合理地开展露天矿爆破安全评估,提前做好预防措施,对保障露天矿山安全、持续开采具有重要意义。

在露天矿爆破安全理论研究方面,朱必勇[3]考虑了爆破安全评价的模糊性特点,引入盲数理论改进传统定性指标赋值方式,建立了基于博弈论-云模型的露天矿爆破安全评价模型;柯丽华等[4]应用社会网络分析法研究了爆破安全影响因素之间的关系,并识别出安全意识淡薄、违规操作是影响爆破安全的关键因素;杨航远[5]利用 Python 编程,搭建了基于深度神经网络 PG-YOLOv3 的露天矿爆破现场智能实时危险预警平台,为提升爆破安全管理精细化水平提供了智能化手段;梁亚男等[6]以拒爆、爆破飞石等爆破事故为背景,基于事故树分析法,研究了爆破事故的直接原因与内在原因,为爆破安全事故预防提供了理论指导;张华等[7]针对露天煤矿爆破安全评估的不确定性,利用集值统计法计算指标权重,建立了露天煤矿爆破安全评价模糊综合模型,并结合评估结果提出了相应的改进建议;董文明等[8]为提高布孔设计的准确性,基于 DIMINE 平台开发了爆破设计软件,通过矿山应用实例验证了智能化软件在布孔设计方面具有较高的精准度,为复杂孔网参数条件下的布孔设计提供了便捷高效的新方法。

露天矿爆破安全评估的影响因素较多,且各因素之间存在复杂的关联性,属于典型的多属性定性评估过程[9]。另外,露天矿爆破安全易受爆破现场环境等不确定因素的影响,具有一定的动态波动性。研究发现,目前尚未形成合理可靠的露天矿爆破安全评估理论体系,在定性指标赋值方面,主要采用点估计法确定指标的评估值,无法全面客观反映爆破工程实际。

区间逼近法以区间数形式量化指标评估数据,能够客观反映待评对象的特点和指标数据波动性特征,避免了定性评估过程中指标数据信息失真或扭曲,提高了评估结果的可靠性[10-11]。廖俊文等[12]将区间逼近法引入到装配式建筑施工风险评估中,通过实例证实了该方法的科学性;彭勃波[13]建立了煤矿智能化建设需求分级区间决策模型,决策结果可以进一步降低智能化建设成本;王昌衡等[14]引入区间数理论,开展了高速公路不同路段安全性整体评估。区间逼近法在定性分析与评估方面具有突出优势,并取得了比较满意的应用效果,解决了传统定性指标评估数据量化困难的问题。

鉴于此,本文将区间逼近法应用于露天矿爆破安全评估中,结合爆破工程实际和爆破事故安全分析,建立了露天矿爆破安全评价指标体系,基于 G1-改进 CRITIC 法和组合赋权思想,获取指标综合权重,结合区间逼近法原理,通过计算综合偏离距离,对安全等级进行综合判定,以期为露天矿爆破安全评估工作提供可靠的新思路。

1 评价体系

露天矿爆破安全评估的影响因素较多,首先,参考爆破安全相关规程,分析各类爆破安全事故的主要致因,并在中国知网检索“露天矿爆破安全评价”等关键词,收集和分析已有研究成果中评价指标的体系建设情况[3,15-16],分类汇总形成露天矿爆破安全评价初始指标体系;然后,基于专家访谈方式,征求对初始评价指标体系建立情况的意见建议,对评估体系进一步补充完善;最后,结合爆破工程实际,建立露天矿爆破安全评价指标体系,如图 1 所示。将露天矿爆破安全等级划分为Ⅰ级(安全)、Ⅱ级(较安全)、Ⅲ级(一般安全)、Ⅳ级(较危险)和Ⅴ级(危险)共 5 个等级,指标分级标准分别为[90,100)、[80,90)、[70,80)、[60,70)和[0,60)。

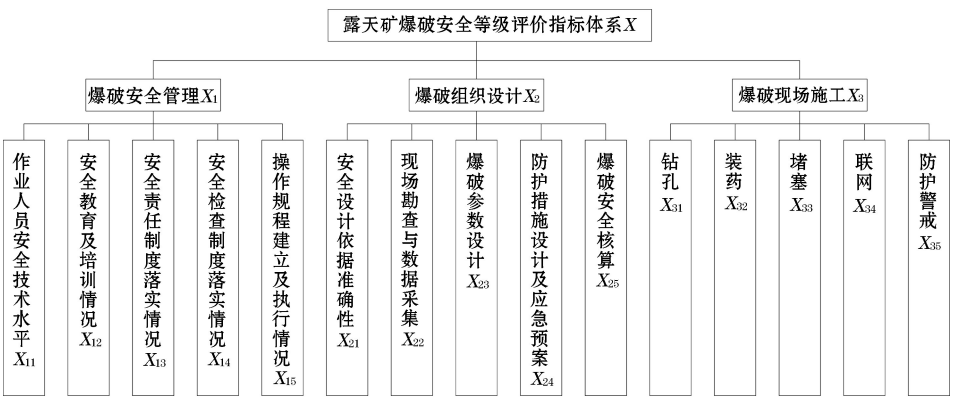


图 1 爆破安全评价指标体系

Fig.1 Blasting safety evaluation index system

2 理论基础

2.1 赋权原理

2.1.1 G1 法计算指标主观权重

传统 AHP 赋权法要求决策者结合自身主观经验以固定点值确定指标因素相对重要性,通过构建判断矩阵和一系列矩阵运算,得出指标主观权重,计算过程相对较繁琐,且指标权重结果往往具有较强的主观性和倾向性。G1 法是传统 AHP 法的改进模型,该方法仅需要决策者依据指标因素的相对重要性,对评估指标进行排序并建立序列集合,然后给定相对重要性比值 r_i,用于反映两两相邻指标因素之间的相对重要性程度,通过简便的乘积运算就可以获取符合需求的指标权重值 α_i,免去了一致性检验和重复构建判断矩阵的过程,具有计算简便、高效和结果可靠的优势。具体计算过程见文献[17]。

2.1.2 改进 CRITIC 法计算指标客观权重

改进 CRITIC 法是一种常规的客观赋权法,该方法依据指标因素的相关性和冲突性来分配权重大小,兼顾了指标因素的本质属性和关联性,权重计算结果比较科学。具体计算过程如下[18]。

(1) 建立初始决策矩阵。假设利用所选取的 n 个评估指标对 m 个待评对象进行综合分析,根据待评对象的指标数据,建立初始决策矩阵 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}$。其中,$x_{ij}$ 表示第 i 个待评对象的第 j 个评估指标取值。

(2) 初始决策矩阵归一化处理。基于 Z-score 法,对初始决策矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行归一化处理,得到归一化决策矩阵 $\boldsymbol{X}^*$。第 i 个对象的第 j 个指标的归一化值 x_{ij}^* 计算公式为:

$$x_{ij}^*=\frac{x_{ij}-\overline{x}_j}{s_j} \tag{1}$$

式中:$\overline{x}_j$ 为第 j 个指标评估数据均值;s_j 表示第 j 个指标评估数据标准差。

(3) 确定变异系数。变异系数计算公式如下:

$$v_j=\frac{s_j}{\overline{x}_j} \tag{2}$$

式中,v_j 表示第 j 个指标的变异系数。

(4) 计算独立性系数。基于皮尔逊系数法,按照式(3),计算归一化决策矩阵 $\boldsymbol{X}^*$ 的关联系数 ρ_{qm};再按照式(4),计算指标独立性系数 P_m。

$$\rho_{qm}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{iq}^*-\overline{x_q^*})(x_{im}^*-\overline{x_m^*})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{iq}^*-\overline{x_q^*})^2\sum_{i=1}^{n}(x_{im}^*-\overline{x_m^*})^2}} \tag{3}$$

$$P_m=\sum_{q=1}^{n}(1-\rho_{qm}) \tag{4}$$

(5) 确定指标因素的客观权重。将变异系数与独立性系数相乘,得到指标综合系数 h_j,综合系数 h_j 决定着权重值大小。最后,通过对综合系数 h_j 归一化处理,得到指标因素的客观权重 β_i。

2.1.3 计算指标综合权重

根据指标主观权重 α_i 和客观权重 β_i,基于最小熵原理,利用拉格朗日算法,获取指标组合权重 w_i。

$$w_i=\frac{\sqrt{\alpha_i\times\beta_i}}{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\alpha_i\times\beta_i}} \tag{5}$$

2.2 区间逼近法

露天矿爆破安全评估属于定性分析,各指标数据需要决策者结合工程实际进行量化。传统的定性评估一般采用点估计值法,即以一个固定数作为指标分值参与计算,确定安全等级。事实上,露天矿爆破安全评估具有模糊性、随机性和动态可变性,受限于决策者认知水平和工程经验,往往无法准确判定指标数据分值,导致最终评估结果失效。区间逼近法是以区间估计法为基础,利用区间数形式对指标因素进行赋值打分,通过计算评估对象与不同安全等级的偏离距离,综合确定最终安全等级。区间逼近法进一步降低了对专家主观经验的要求,减少了专家指标赋值的盲目性和任意性。具体计算过程包括如下 4 个步骤[19]。

2.2.1 建立指标分级标准集合

根据露天矿爆破安全等级划分情况,利用指标分级标准的上、下边界值,组成区间数,建立标准集合 U。

$$U=\begin{bmatrix}[u_{11}^L,u_{11}^R] & [u_{12}^L,u_{12}^R] & \cdots & [u_{1n}^L,u_{1n}^R]\\ [u_{21}^L,u_{21}^R] & [u_{22}^L,u_{22}^R] & \cdots & [u_{2n}^L,u_{2n}^R]\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ [u_{s1}^L,u_{s1}^R] & [u_{s2}^L,u_{s2}^R] & \cdots & [u_{sn}^L,u_{sn}^R]\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:U 为指标分级标准集合;u_{sn}^L、u_{sn}^R 分别表示第 n 个评价指标第 s 个等级的指标分级下限值、上限值。

2.2.2 构建区间数评价矩阵

假设对 k 个露天矿爆破作业工序的安全性进行评估,由决策者结合指标分级标准和爆破工程实际,确定指标评估区间数,由此建立区间数评估矩阵 $\boldsymbol{A}$,表示为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}[a_{11}^L,a_{11}^R] & [a_{12}^L,a_{12}^R] & \cdots & [a_{1n}^L,a_{1n}^R]\\ [a_{21}^L,a_{21}^R] & [a_{22}^L,a_{22}^R] & \cdots & [a_{2n}^L,a_{2n}^R]\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ [a_{k1}^L,a_{k1}^R] & [a_{k2}^L,a_{k2}^R] & \cdots & [a_{kn}^L,a_{kn}^R]\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中,a_{kn}^L、a_{kn}^R 分别表示第 k 个待评对象第 n 个指标

的评估数区间下限和上限。

将待评对象的区间数矩阵$\boldsymbol{A}$与指标分级标准集合进行耦合,构建区间数评价矩阵$\boldsymbol{D}$。

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}[a_{k1}^{L},a_{k1}^{R}] & [a_{k2}^{L},a_{k2}^{R}] & \cdots & [a_{kn}^{L},a_{kn}^{R}]\\ [u_{11}^{L},u_{11}^{R}] & [u_{12}^{L},u_{12}^{R}] & \cdots & [u_{1n}^{L},u_{1n}^{R}]\\ [u_{21}^{L},u_{21}^{R}] & [u_{22}^{L},u_{22}^{R}] & \cdots & [u_{2n}^{L},u_{2n}^{R}]\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ [u_{s1}^{L},u_{s1}^{R}] & [u_{s2}^{L},u_{s2}^{R}] & \cdots & [u_{sn}^{L},u_{sn}^{R}]\end{bmatrix} \tag{8}$$

2.2.3 评价矩阵同向化、归一化处理

按照区间逼近法的一般过程,需要对区间数评价矩阵按照指标属性进行同向化处理。结合露天矿爆破安全指标分级情况,评价指标均为效益型指标,可以按照式(9),实现评估数据趋势统一。

$$\begin{cases}b_{pq}^{L}=a_{pq}^{L}\\ b_{pq}^{R}=a_{pq}^{R}\end{cases} \tag{9}$$

式中:a_{pq}^{L}、a_{pq}^{R}分别表示第p个待评对象第q个指标的评估数区间下限和上限;b_{pq}^{L}、b_{pq}^{R}分别表示经过同一化处理后的第p个待评对象第q个指标的评估数区间下限和上限。

按照式(10),对待评对象的指标评估区间上限、下限进行归一化处理。得到标准化区间评估矩阵$\boldsymbol{X}^{**}$。

$$\begin{cases}x_{pq}^{L}=\dfrac{b_{pq}^{L}-\min\limits_{q}\{b_{pq}^{L}\}}{\max\limits_{q}\{b_{pq}^{R}\}-\min\limits_{q}\{b_{pq}^{L}\}}\\ x_{pq}^{R}=\dfrac{b_{pq}^{R}-\min\limits_{q}\{b_{pq}^{L}\}}{\max\limits_{q}\{b_{pq}^{R}\}-\min\limits_{q}\{b_{pq}^{L}\}}\end{cases} \tag{10}$$

式中,x_{pq}^{L}、x_{pq}^{R}分别表示第p个待评对象第q个指标区间数归一化下限与上限。

2.2.4 安全等级评价

将标准化区间评价矩阵$\boldsymbol{X}^{**}$与指标综合权重值相乘,构建加权标准化区间评价矩阵$\boldsymbol{Z}$,并计算各单指标因素在不同安全等级下的偏离距离。

$$\boldsymbol{Z}=[x_{ij}^{L},x_{ij}^{R}]\times w_{j}=\begin{bmatrix}[z_{i1}^{L},z_{i1}^{R}] & [z_{i2}^{L},z_{i2}^{R}] & \cdots & [z_{in}^{L},z_{in}^{R}]\\ [z_{11}^{L},z_{11}^{R}] & [z_{12}^{L},z_{12}^{R}] & \cdots & [z_{1n}^{L},z_{1n}^{R}]\\ [z_{21}^{L},z_{21}^{R}] & [z_{22}^{L},z_{22}^{R}] & \cdots & [z_{2n}^{L},z_{2n}^{R}]\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ [z_{r1}^{L},z_{r1}^{R}] & [z_{r2}^{L},z_{r2}^{R}] & \cdots & [z_{rn}^{L},z_{rn}^{R}]\end{bmatrix}$$

$$(j=1,2,\cdots,n) \tag{11}$$

$$d_{rp}=\max(|z_{ip}^{L}-z_{rp}^{L}|,|z_{ip}^{R}-z_{rp}^{R}|) \tag{12}$$

式中:d_{rp}表示等级偏离距离;z_{iq}^{L}、z_{iq}^{R}表示第i个评价对象第q个指标加权标准化区间评估数下限与上限;z_{rq}^{L}、z_{rq}^{R}表示第r个等级第q个指标加权标准化分级区间评估数下限与上限。

最后,考虑露天矿爆破安全评估是多个因素综合作用的结果,需要计算综合偏离距离d_{r},并根据综合偏离距离大小,确定露天矿爆破安全等级。

$$d_{r}=d(H_{0},H_{r})=\sqrt{\sum_{p=1}^{n}(d_{rp})^{2}} \tag{13}$$

2.3 实现过程

综上所述,在构建露天矿爆破安全综合评估指标体系基础上,综合运用G1法、改进CRITIC法和组合赋权思想,获取各评估指标的权重信息,最后,引入区间逼近理论,建立区间数评价矩阵,通过一系列矩阵运算,计算综合偏离距离,确定最终爆破安全等级。基于组合赋权及区间逼近的露天矿爆破安全评估具体实现过程见图2。

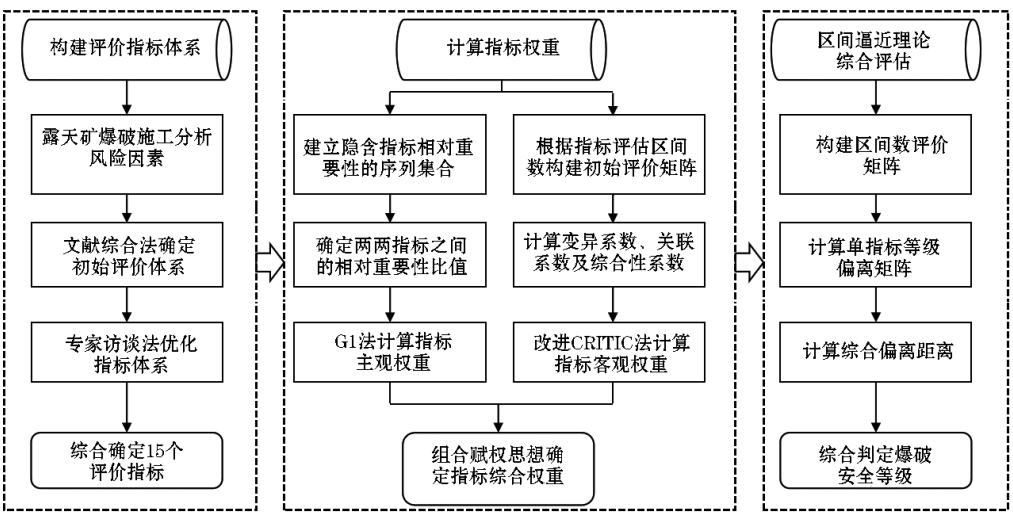


图2 评价模型实现过程

Fig.2 Implementation process of the evaluation model

3 工程应用

以湖南省内5座露天矿为研究对象,应用所建立的组合赋权-区间逼近模型,通过计算综合偏离距离,综合确定爆破安全等级。5座露天矿台阶高度为12～15 m,孔深为15～25 m。组织了5位长期从事露天矿爆破安全设计与安全评价的专家组成评价小组,基于矿山爆破工程实际,结合现场调研情况,讨论确定爆破安全指标评估区间数,具体情况见表1。

表1 5座露天矿爆破安全指标区间数

Table 1 Interval numbers of blasting safety index for 5 open-pit mines

指标	矿山 K_1	矿山 K_2	矿山 K_3	矿山 K_4	矿山 K_5
X_{11}	(73～84)	(77～82)	(81～84)	(87～93)	(78～87)
X_{12}	(81～86)	(82～93)	(72～81)	(71～83)	(88～94)
X_{13}	(83～92)	(81～92)	(74～83)	(76～85)	(79～87)
X_{14}	(81～85)	(78～81)	(85～87)	(78～83)	(78～86)
X_{15}	(78～82)	(75～82)	(82～93)	(80～85)	(79～85)
X_{21}	(80～87)	(88～91)	(81～88)	(83～91)	(83～91)
X_{22}	(72～81)	(83～94)	(78～82)	(85～92)	(84～93)
X_{23}	(76～83)	(85～92)	(81～85)	(78～83)	(81～93)
X_{24}	(75～81)	(87～91)	(83～92)	(82～87)	(81～92)
X_{25}	(78～84)	(83～95)	(81～92)	(73～84)	(83～88)
X_{31}	(81～85)	(86～89)	(76～83)	(84～87)	(79～86)
X_{32}	(82～91)	(87～92)	(81～88)	(82～89)	(82～91)
X_{33}	(76～83)	(84～95)	(72～81)	(80～86)	(79～85)
X_{34}	(81～84)	(81～93)	(83～91)	(83～92)	(82～93)
X_{35}	(73～82)	(74～80)	(78～82)	(84～95)	(84～91)

由表1可知,各矿山露天矿爆破安全指标评估数据基本上呈现出跨区间分布状态,指标区间赋值一定程度上可以减少专家赋值的主观盲目性,评估结果更加严谨。

3.1 计算指标综合权重

3.1.1 指标主观权重

以一级指标为例,根据文献[17],由专家组成员讨论建立蕴含指标相对重要性的指标序列集合,并确定两两指标因素之间的相对重要性比值 r_i。其中,一级指标相对重要性排序为:爆破组织设计(X_2)>爆破现场施工(X_3)>爆破安全管理(X_1),相应的 r_i 分别为 $r_1=1.5$、$r_2=1.3$,据此可以确定3个一级指标初始权重分别为:$w_1=0.458\ 8$、$w_2=0.305\ 9$、$w_3=0.235\ 3$。整理后3个一级指标主观权重依次为0.235 3,0.458 8,0.305 9。按照相同的操作步骤,计算各二级指标的局部主观权重。最后,计算指标全局主观权重。具体计算结果见表2。

表2 指标主观权重

Table 2 Subjective weight of indicators

准则层指标	准则层主观权重	目标层指标	局部主观权重	全局主观权重	排序
X_1	0.235 3	X_{11}	0.329 1	0.077 4	5
		X_{12}	0.235 1	0.055 3	8
		X_{13}	0.139 1	0.032 7	13
		X_{14}	0.180 8	0.042 5	11
		X_{15}	0.115 9	0.027 3	15
X_2	0.458 8	X_{21}	0.153 5	0.070 4	6
		X_{22}	0.102 4	0.047 1	9
		X_{23}	0.379 2	0.174 1	1
		X_{24}	0.291 7	0.133 8	2
		X_{25}	0.073 2	0.033 6	14
X_3	0.305 9	X_{31}	0.140 3	0.042 9	10
		X_{32}	0.271 6	0.083 1	3
		X_{33}	0.246 9	0.075 5	4
		X_{34}	0.224 4	0.068 6	7
		X_{35}	0.116 8	0.035 7	12

3.1.2 指标客观权重

根据式(1)至式(4),取5座露天矿山爆破安全评价指标区间数均值,建立初始评价矩阵,经过归一化处理后,基于皮尔逊系数法,计算各评价指标数据的关联系数,具体计算结果见表3。

表3 指标关联系数计算结果

Table 3 Calculation results of index correlation coefficient

指标	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}
X_{11}	1.00	−0.53	−0.69	−0.17	0.36	0.16	0.48	−0.30	0.16	−0.58	0.09	−0.49	−0.06	0.57	0.85
X_{12}	−0.53	1.00	0.64	−0.43	−0.64	0.43	0.35	0.69	0.12	0.46	0.30	0.68	0.50	−0.02	−0.09
X_{13}	−0.69	0.64	1.00	−0.48	−0.90	0.14	−0.13	0.15	−0.42	0.10	0.53	0.77	0.50	−0.63	−0.54
X_{14}	−0.17	−0.43	−0.48	1.00	0.81	−0.80	−0.72	−0.36	−0.15	0.06	−0.96	−0.74	−0.92	−0.21	−0.20
X_{15}	0.36	−0.64	−0.90	0.81	1.00	−0.47	−0.26	−0.26	0.23	−0.01	−0.82	−0.86	−0.77	0.33	0.24
X_{21}	0.16	0.43	0.14	−0.80	−0.47	1.00	0.90	0.76	0.71	0.42	0.77	0.71	0.91	0.66	0.17
X_{22}	0.48	0.35	−0.13	−0.72	−0.26	0.90	1.00	0.62	0.66	0.17	0.60	0.40	0.71	0.81	0.58
X_{23}	−0.30	0.69	0.15	−0.36	−0.26	0.76	0.62	1.00	0.79	0.85	0.30	0.64	0.62	0.56	−0.10
X_{24}	0.16	0.12	−0.42	−0.15	0.23	0.71	0.66	0.79	1.00	0.71	0.13	0.23	0.40	0.88	0.11
X_{25}	−0.58	0.46	0.10	0.06	−0.01	0.42	0.17	0.85	0.71	1.00	−0.02	0.49	0.31	0.32	−0.50
X_{31}	0.09	0.30	0.53	−0.96	−0.82	0.77	0.60	0.30	0.13	−0.02	1.00	0.79	0.93	0.12	−0.01
X_{32}	−0.49	0.68	0.77	−0.74	−0.86	0.71	0.40	0.64	0.23	0.49	0.79	1.00	0.90	−0.03	−0.43
X_{33}	−0.06	0.50	0.50	−0.92	−0.77	0.91	0.71	0.62	0.40	0.31	0.93	0.90	1.00	0.29	−0.07
X_{34}	0.57	−0.02	−0.63	−0.21	0.33	0.66	0.81	0.56	0.88	0.32	0.12	−0.03	0.29	1.00	0.56
X_{35}	0.85	−0.09	−0.54	−0.20	0.24	0.17	0.58	−0.10	0.11	−0.50	−0.01	−0.43	−0.07	0.56	1.00

通过计算各指标变异系数、独立性系数和综合性系数,并对综合性系数归一化处理,获取指标客观权重,见表 4。

表 4 指标客观权重

Table 4 Objective weights of indicators

准则层指标	准则层客观权重	目标层指标	局部客观权重	全局客观权重	排序
X_1	0.435 7	X_{11}	0.211 6	0.092 2	3
		X_{12}	0.242 6	0.105 7	2
		X_{13}	0.189 4	0.082 5	5
		X_{14}	0.162 0	0.070 6	7
		X_{15}	0.194 4	0.084 7	4
X_2	0.275 7	X_{21}	0.101 2	0.027 9	15
		X_{22}	0.261 5	0.072 1	6
		X_{23}	0.184 6	0.050 9	11
		X_{24}	0.206 4	0.056 9	10
		X_{25}	0.246 3	0.067 9	9
X_3	0.288 6	X_{31}	0.170 1	0.049 1	12
		X_{32}	0.098 1	0.028 3	14
		X_{33}	0.238 0	0.068 7	8
		X_{34}	0.101 5	0.029 3	13
		X_{35}	0.392 2	0.113 2	1

3.1.3 指标综合权重

基于组合赋权思想,将指标主观权重与客观权重耦合,确定指标综合权重。其中,一级指标综合权重为 w=(0.342 4,0.359 8,0.297 8)。二级指标局部综合权重为:爆破安全管理 $w(X_{11}\sim X_{15})$=(0.267 5,0.242 1,0.164 4,0.173 5,0.152 5);爆破组织设计 $w(X_{21}\sim X_{25})$=(0.133 7,0.175 7,0.283 8,0.262 9,0.144 0);爆破现场施工 $w(X_{31}\sim X_{35})$=(0.167 2,0.176 6,0.262 3,0.163 2,0.230 7);指标全局综合权重为(0.091 6,0.082 9,0.056 3,0.059 4,0.052 2,0.048 1,0.063 2,0.102 1,0.094 6,0.051 8,0.049 8,0.052 6,0.078 1,0.048 6,0.068 7)。3 种赋权方法权重计算结果对比情况见图 3。

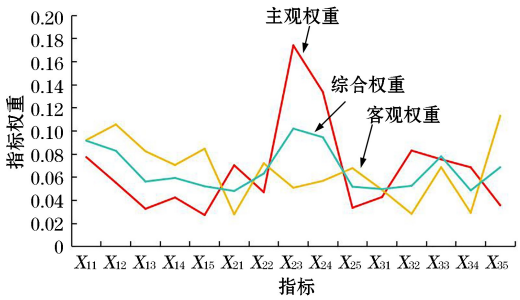


图 3 权重结果对比

Fig.3 Comparison of weight results

3.2 安全等级评价

3.2.1 指标区间数处理

通过分析露天矿爆破评价指标体系发现,评估指标均为效益型(越大越好型)指标,已经具备了同向性。因此,根据式(10),对专家组初始决策数据进行归一化处理,得到指标标准化区间评价数,具体计算结果见表 5。

表 5 评价数据归一化处理结果

Table 5 Normalization results of evaluation data

指标	矿山 K_1	矿山 K_2	矿山 K_3	矿山 K_4	矿山 K_5
X_{11}	(0.73～0.84)	(0.77～0.82)	(0.81～0.84)	(0.87～0.93)	(0.78～0.87)
X_{12}	(0.81～0.86)	(0.82～0.93)	(0.72～0.81)	(0.71～0.83)	(0.88～0.94)
X_{13}	(0.83～0.92)	(0.81～0.92)	(0.74～0.83)	(0.76～0.85)	(0.79～0.87)
X_{14}	(0.81～0.85)	(0.78～0.81)	(0.85～0.87)	(0.78～0.83)	(0.78～0.86)
X_{15}	(0.78～0.82)	(0.75～0.82)	(0.82～0.93)	(0.80～0.85)	(0.79～0.85)
X_{21}	(0.80～0.87)	(0.88～0.91)	(0.81～0.88)	(0.83～0.91)	(0.83～0.91)
X_{22}	(0.72～0.81)	(0.83～0.94)	(0.78～0.82)	(0.85～0.92)	(0.84～0.93)
X_{23}	(0.76～0.83)	(0.85～0.92)	(0.81～0.85)	(0.78～0.83)	(0.81～0.93)
X_{24}	(0.75～0.81)	(0.87～0.91)	(0.83～0.92)	(0.82～0.87)	(0.81～0.92)
X_{25}	(0.78～0.84)	(0.83～0.95)	(0.81～0.92)	(0.73～0.84)	(0.83～0.88)
X_{31}	(0.81～0.85)	(0.86～0.89)	(0.76～0.83)	(0.84～0.87)	(0.79～0.86)
X_{32}	(0.82～0.91)	(0.87～0.92)	(0.81～0.88)	(0.82～0.89)	(0.82～0.91)
X_{33}	(0.76～0.83)	(0.84～0.95)	(0.72～0.81)	(0.80～0.86)	(0.79～0.85)
X_{34}	(0.81～0.84)	(0.81～0.93)	(0.83～0.91)	(0.83～0.92)	(0.82～0.93)
X_{35}	(0.73～0.82)	(0.74～0.80)	(0.78～0.82)	(0.84～0.95)	(0.84～0.91)

3.2.2 构建加权指标区间数矩阵

以矿山 K_1 为例,通过指标标准化区间数与指标分级标准集合耦合,建立区间数评估矩阵,并与指标权重值相乘,确定加权区间数评估矩阵,具体计算结果见表 6。

表 6 矿山 K_1 加权区间评估数

Table 6 Weighted interval evaluation numbers for K_1 Mine

指标	加权区间数评价数					
X_{11}	(0.066 9～0.076 9)	(0～0.055 0)	(0.055 0～0.064 1)	(0.064 1～0.073 3)	(0.073 3～0.082 4)	(0.082 4～0.091 6)
X_{12}	(0.067 1～0.071 3)	(0～0.0497)	(0.049 7～0.058 0)	(0.058 0～0.066 3)	(0.066 3～0.074 6)	(0.074 6～0.082 9)
X_{13}	(0.046 7～0.051 8)	(0～0.033 8)	(0.033 8～0.039 4)	(0.039 4～0.045 0)	(0.045 0～0.050 7)	(0.050 7～0.056 3)
X_{14}	(0.048 1～0.050 5)	(0～0.035 6)	(0.035 6～0.041 6)	(0.041 6～0.047 5)	(0.047 5～0.053 5)	(0.053 5～0.059 4)
X_{15}	(0.040 7～0.042 8)	(0～0.031 3)	(0.031 3～0.036 5)	(0.036 5～0.041 8)	(0.041 8～0.047 0)	(0.047 0～0.052 2)
X_{21}	(0.038 5～0.041 8)	(0～0.028 9)	(0.028 9～0.033 7)	(0.033 7～0.038 5)	(0.038 5～0.043 3)	(0.043 3～0.048 1)
X_{22}	(0.045 5～0.051 2)	(0～0.037 9)	(0.037 9～0.044 2)	(0.044 2～0.050 6)	(0.050 6～0.056 9)	(0.056 9～0.063 2)
X_{23}	(0.077 6～0.084 7)	(0～0.061 3)	(0.061 3～0.071 5)	(0.071 5～0.081 7)	(0.081 7～0.091 9)	(0.091 9～0.102 1)
X_{24}	(0.071 0～0.076 6)	(0～0.056 8)	(0.056 8～0.066 2)	(0.066 2～0.075 7)	(0.075 7～0.085 1)	(0.085 1～0.094 6)
X_{25}	(0.040 4～0.043 5)	(0～0.031 1)	(0.031 1～0.036 3)	(0.036 3～0.041 4)	(0.041 4～0.046 6)	(0.046 6～0.051 8)
X_{31}	(0.040 3～0.042 3)	(0～0.029 9)	(0.029 9～0.034 9)	(0.034 9～0.039 8)	(0.039 8～0.044 8)	(0.044 8～0.049 8)
X_{32}	(0.043 1～0.047 9)	(0～0.031 6)	(0.031 6～0.036 8)	(0.036 8～0.042 1)	(0.042 1～0.047 3)	(0.047 3～0.052 6)
X_{33}	(0.059 4～0.064 8)	(0～0.046 9)	(0.046 9～0.054 7)	(0.054 7～0.062 5)	(0.062 5～0.070 3)	(0.070 3～0.078 1)
X_{34}	(0.039 4～0.040 8)	(0～0.029 2)	(0.029 2～0.034 0)	(0.034 0～0.038 9)	(0.038 9～0.043 7)	(0.043 7～0.048 6)
X_{35}	(0.050 2～0.056 3)	(0～0.041 2)	(0.041 2～0.048 1)	(0.048 1～0.055 0)	(0.055 0～0.061 8)	(0.061 8～0.068 7)

3.2.3 确定安全等级

根据式(11)至式(13),计算不同指标的加权区间数与各等级分级标准上、下边界值的偏离距离,并计算综合偏离距离,确定露天矿爆破安全等级。以矿山 K_1 为例,经过多层次计算后得出,到Ⅴ级的综合偏离距离为 0.206 0,到Ⅳ级的综合偏离距离为 0.046 6,到Ⅲ级的综合偏离距离为 0.020 9,到Ⅱ级的综合偏离距离为 0.011 0,到Ⅰ级的综合偏离距离为 0.043 7,根据综合偏离距离值,可知该矿山爆破安全等级为Ⅱ级,即“较安全”等级。

重复以上步骤,可得其他 4 座露天矿爆破安全等级综合偏离距离和爆破安全等级。为进一步验证模型的有效性,与云模型和未确知测度理论结果进行综合比较,具体计算结果见表 7。

表 7 评估结果与对比情况

Table 7 Evaluation results and comparison

矿山名称	与Ⅴ级的综合偏离距离	与Ⅳ级的综合偏离距离	与Ⅲ级的综合偏离距离	与Ⅱ级的综合偏离距离	与Ⅰ级的综合偏离距离	评估结果		
						本文	云模型[19]	未确知测度[20]
K_1	0.206 0	0.046 6	0.020 9	0.018 0	0.043 7	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅲ级
K_2	0.220 0	0.061 5	0.035 6	0.017 1	0.032 0	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
K_3	0.211 7	0.052 4	0.026 8	0.016 4	0.040 1	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
K_4	0.215 1	0.056 3	0.030 6	0.015 6	0.036 4	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
K_5	0.217 6	0.058 8	0.032 5	0.011 0	0.029 1	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级

由表 7 可知,5 座露天矿山爆破安全等级评价结果均为Ⅱ级,与专家现场调研结果完全一致,5 座矿山露天矿暂未发生爆破安全事故,爆破效果相对理想。通过对比发现,基于组合赋权法的区间逼近模型与云模型评估结果完全一致,与未确知测度理论评估结果相比仅有矿山 K_1 存在一定差异。云模型理论通过正向云发生器,实现定性评估的量化计算,该模型需要基于 MATLAB 软件编写程序,生成单指标云图和综合云图,并依据综合云图与等级云图的相对位置确定最终安全等级[19]。而区间逼近法可以依托 EXCEL 软件简便计算获取可靠的评估结果,与云模型理论相比,评估过程更加直观高效。未确知测度理论是通过构建单指标隶属度函数,计算不同指标评估数据在各等级下的隶属度值,然后基于置信度识别原则,通过人为设定参数,综合判断爆破安全等级,具有一定主观性,并且在待评对象差异度较小的情况下,可能导致最终评估结果失效[20]。区间逼近法不需要人为设置置信度,评估结果更加精准、客观。分析指标评估数据发现,矿山 K_1 的 9 个指标数据位于“较安全”等级,指标权重累加之和为 0.501 7,特别是在安全教育培训、安全制度落实与现场检查和装药等方面表现相对较好,因此,综合判定为“较安全”等级更符合工程实际。

3.3 对策措施

由表 7 可知,矿山 K_1 的爆破安全等级为“较安全”,但有向“一般安全”等级的发展趋势,在后续爆破工程中,要重点加强工程周边地质环境的详尽勘察,更加全面地了解岩性、特殊地质条件与结构面分布状态等,同时还应提升露天矿爆破设计智能化水平,将爆破设计软件与爆破效果数值模拟相结合,提前预判爆破安全风险。矿山 K_2 的爆破安全等级为“较安全”,起爆前要结合安全施工要求,合理设置警戒线,做好人员梳理,采取有效措施积极应对飞石飞散问题,以进一步促进爆破安全向“安全”等级发展。矿山 K_3 的爆破安全等级为“较安全”,同样有向“一般安全”等级变化的趋势,要重点加大爆破安全管理力度,制定安全管理培训制度,常态化开展安全警示教育,提升现场作业人员的安全施工意识,明确安全管理职责,做好安全隐患排查与治理工作。矿山 K_4 的爆破安全等级为“较安全”,需要重点加强施工人员的业务技能培训,提升其安全操作水平;并要定期开展施工人员安全教育培训,从思想上提升安全作业意识。矿山 K_5 的爆破安全等级为“较安全”,有向“安全”等级发展的趋势,在炮孔堵塞方面,在做好经验法计算堵塞长度的同时,可采用细沙或钻屑等材料,提升堵塞密实性,进一步提高爆破能量利用率。

4 结论

(1) 在建立露天矿爆破安全评价指标体系基础上,根据组合赋权思想,将 G1 法和改进 CRITIC 法计算的主、客观权重耦合,获取均衡、合理的指标综合权重;基于区间数理论,确定指标评估区间数;建立组合赋权-区间逼近模型并进行工程应用。

(2) 针对露天矿爆破安全评估的模糊性、未确知性特点,以 5 座露天矿爆破实例为研究对象,应用所建立的组合赋权-区间逼近模型,通过计算综合偏离距离,综合确定爆破安全等级。结果表明,5 座露天矿山爆破安全等级评价结果均为 II 级(较安全),与专家现场调研结果完全一致,验证了所建立的综合评估模型在露天矿爆破安全评价方面的适应性,评估结果科学、合理。

(3) 针对 5 座露天矿山爆破安全等级评价结果分别提出对策措施:矿山 K_1 需加强地质勘察与智能化设计以防控风险;矿山 K_2 需优化警戒设置及飞石防范措施;矿山 K_3 需强化安全培训与隐患排查;矿山 K_4 需重点提升施工人员的技能与安全意识;矿山 K_5 需通过改进炮孔堵塞材料,以提高爆破效率。

参考文献(References):

[1] 代树红,张战军,柳凯,等.基于 PEMD-MPE 算法的露天矿爆破振动信号降噪方法[J].黄金科学技术,2024,32(1):82-90.
DAI Shuhong, ZHANG Zhanjun, LIU Kai, et al. Noise reduction method of open-pit blasting vibration signal based on PEMD-MPE algorithm[J].Gold Science and Technology, 2024,32(1):82-90.

[2] 李爱陈,马建军,池恩安,等.基于改进 AHP 法的露天矿爆破效果影响因素分析[J].矿业研究与开发,2019,39(10):5-10.
LI Aichen, MA Jianjun, CHI Enan, et al. Influence factors of open-pit blasting effect based on improved AHP[J]. Mining Research and Development,2019,39(10):5-10.

[3] 朱必勇.基于盲数理论改进云模型的露天矿爆破安全评估研究[J].有色金属科学与工程,2024,15(4):543-552.
ZHU Biyong. Research on safety assessment of open pit blasting based on blind number theory and improved cloud model[J].Nonferrous Metals Science and Engineering,2024, 15(4):543-552.

[4] 柯丽华,陈魁香,胡南燕,等.基于 SNA 的露天矿爆破安全风险评估[J].中国安全科学学报,2022,32(10):48-56.
KE Lihua, CHEN Kuixiang, HU Nanyan, et al. Safety risk assessment of blasting in open-pit mine based on SNA[J]. China Safety Science Journal,2022,32(10):48-56.

[5] 杨航远.基于改进 YOLOv3 的露天矿爆破现场智能实时危险预警方法研究[D].沈阳:东北大学,2021.
YANG Hangyuan. Research on intelligent real-time risk early warning of open pit blasting site based on improved YOLOv3[D].Shenyang: Northeastern University,2021.

[6] 梁亚男,武文越,宿海芬.露天矿爆破安全事故树分析[J].现代矿业,2015,31(11):42-44.
LIANG Ya'nan, WU Wenyue, SU Haifen. Tree analysis of safety accidents in open-pit mine blasting[J]. Modern Mining,2015,31(11):42-44.

[7] 张华,鞠兴军,张津鹏,等.基于模糊综合-集值统计法的露天煤矿爆破安全风险评价[J].工业安全与环保,2024,50(4):50-54.
ZHANG Hua, JU Xingjun, ZHANG Jinpeng, et al. Safety risk assessment of open pit coal mine blasting based on fuzzy comprehensive evaluation and set value statistics[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2024, 50(4):50-54.

[8] 董文明,谭期仁.面向复杂孔网参数的露天矿爆破设计软件研发及应用[J].中国矿业,2022,31(11):71-76.
DONG Wenming, TAN Qiren. Development and application of open-pit blasting design software for complex blast-hole network parameters[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(11):71-76.

[9] KIANI M, HOSSEINI S H, TAJI M, et al. Risk assessment of blasting operations in open-pit mines using FAHP method[J]. Mining of Mineral Deposits,2019,13(3):76-86.

[10] 张众,夏磊,张浩,等.基于多指标区间逼近的机场水泥混凝土道面使用性能综合评价[J].中国民航飞行学院学报,2018,29(3):25-29.
ZHANG Zhong, XIA Lei, ZHANG Hao, et al. Based on multi-index interval number approximation of comprehensive evaluation of airport cement concrete pavement performance [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2018,29(3):25-29.

[11] 高玉祥,程建军.基于区间数模型的沙漠铁路站位方案优选方法[J].铁道学报,2024,46(11):190-200.
GAO Yuxiang, CHENG Jianjun. Optimization method for desert railway station location based on interval number model[J]. Journal of the China Railway Society,2024,46(11):190-200.

[12] 廖俊文,蒋贤勇,刘京铄.基于组合赋权及区间逼近的装配式建筑施工风险评价[J].铁道科学与工程学报,2024,21(10):4311-4320.
LIAO Junwen, JIANG Xianyong, LIU Jingshuo. Risk assessment of prefabricated buildings based on combination weighting and interval approximation construction[J].Journal of Railway Science and Engineering,2024, 21(10):4311-4320.

[13] 彭勃波.基于区间决策的地下煤矿智能化建设需求分级[J].煤炭科技,2023,44(4):23-27.
PENG Qingbo. Classification of intelligent construction demand for underground coal mines based on interval decision-making[J].Coal Science and Technology Magazine, 2023,44(4):23-27.

[14] 王昌衡,张贤育,戴群力.基于熵权-区间逼近的高速公路路段安全评价[J].公路工程,2017,42(2):217-222.
WANG Changheng, ZHANG Xianyu, DAI Qunli. Safety evaluation of expressway based on entropy weight-interval approximation method[J]. Highway Engineering, 2017, 42(2):217-222.

[15] 曾晟,何旺,刘其兵.露天矿爆破安全评价影响因素与预防研究[J].西部探矿工程,2021,33(12):169-172.
ZENG Sheng, HE Wang, LIU Qibing. Study on influencing factors and prevention of blasting safety evaluation in open-pit mine[J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(12):169-172.

[16] 解明聪.基于模糊层次分析法的露天矿爆破风险评价[J].中国金属通报,2021(6):139-140.
XIE Mingcong. Blasting risk assessment of open-pit mine based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. China Metal Bulletin,2021(6):139-140.

[17] 向辐.基于PPRR理论的岩爆应急管理能力评估模型研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):185-194.
XIANG Yun. Evaluation model of rockburst emergency management capability based on PPRR theory[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):185-194.

[18] 陈西江,毛晓萱,胡少华.电化学储能电站运行风险评价模型与应用研究[J].安全与环境学报,2025,25(4):1257-1266.
CHEN Xijiang, MAO Xiaoxuan, HU Shaohua. Research on operation risk assessment model and application of electrochemical energy storage power station[J]. Journal of Safety and Environment,2025,25(4):1257-1266.

[19] 柯丽华,陈魁香,张光权,等.基于DEMATEL-SEWM云模型的露天矿爆破效果评价方法及应用[J].爆破,2022,39(2):172-178.
KE Lihua, CHEN Kuixiang, ZHANG Guangquan, et al. Evaluation method and application of open-pit mine blasting effect based on DEMATEL-SEWM cloud model [J]. Blasting,2022,39(2):172-178.

[20] 温建敏,张西寨,丁剑锋,等.基于层次分析和未确知测度的冲击地压风险评价[J].矿业研究与开发,2021,41(7):98-103.
WEN Jianmin, ZHANG Xizhai, DING Jianfeng, et al. Risk assessment of coal mine rock burst based on analytic hierarchy process and uncertain measurement theory[J]. Mining Research and Development,2021,41(7):98-103.