doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2020.11.017

基于 AHP-模糊评价的采空区稳定性研究

刘洋^{1,2}, 李克钢^{1,2}, 李明亮^{1,2}, 秦庆词^{1,2}, 马学斌^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093

2. 云南中-德蓝色矿山与特殊地下空间利用重点实验室, 昆明 650093)

摘要:针对采空区频繁出现大规模失稳问题,提出一种基于AHP-模糊评价的失稳预测模型。综合考虑采空区失稳的诱因,优选区域地质水文因素、岩石强度性能因素、采空区环境因素和采空区结构参数等4个一级指标及相对应的20个二级指标,建立采空区稳定性评价指标体系,运用层次分析法计算相应的权重向量,结合模糊综合评价理论,对采空区稳定性进行综合评价,将该模型运用到云南羊拉铜矿里农矿段采空区稳定性评价中。研究表明:该矿山的采空区稳定性评价等级为 V_4 ,失稳程度高,综合系统得分69.4515,所得结论与矿山实际情况较吻合,验证了该模型的可靠性。为后续采矿方案设计和执行提供理论依据,有效缓解矿山失稳所带来的灾害。

关键词:层次分析法;模糊综合评价;采空区稳定性;权重;安全评价

中图分类号:TD325.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1744(2020)11-0114-06

Study on the Stability of Mined-out Area Based on AHP-fuzzy Evaluation

LIU Yang^{1,2}, LI Kegang^{1,2}, LI Mingliang^{1,2}, QIN Qingci^{1,2}, MA Xuebin^{1,2}

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, China)

Abstract: Aiming at the frequent occurrence of large-scale instability in goafs, an instability prediction model based on AHP-fuzzy evaluation is proposed. Comprehensively considering the incentives for the instability of the mined-out area, four primary indicators, such as regional geological and hydrological factors, rock strength performance factors, environmental factors of the mined-out area, and structural parameters of the mined-out area, and the corresponding 20 secondary indicators are selected to establish the evaluation index system of the stability of the empty area, using the analytic hierarchy process to calculate the corresponding weight vector, combined with the fuzzy comprehensive evaluation theory, to comprehensively evaluate the stability of the goaf, and apply the model to the goaf in the agricultural section of the Yangla copper mine in Yunnan Zone stability evaluation. The research results show that the mine's gob stability evaluation level is V_4 , and the degree of instability is high. The comprehensive system score is 69.4515. The conclusions obtained are in good agreement with the actual situation of the mine, which verifies the reliability of the model. Provide a theoretical basis for the design and implementation of subsequent mining programs, and effectively alleviate the disasters caused by mine instability.

Key words: analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; stability of goaf; weight; security assessment

收稿日期:2020-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41672303)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(41672303)

作者简介:刘洋(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为岩石力学等。

通信作者:李克钢(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事岩石力学方面的研究与教学。

引用格式:刘洋,李克钢,李明亮,等.基于AHP-模糊评价的采空区稳定性研究[J].有色金属工程,2020,10(11):114-119.

LIU Yang, LI Kegang, LI Mingliang, et al. Study on the Stability of Mined-out Area Based on AHP-fuzzy Evaluation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(11): 114-119.

采空区稳定性是众多矿山不可逾越的问题,是矿山安全事故频发的主要诱因,随着采矿深度不断加深,工作面不断推进,暴露面积也随之增加,必须对其进行科学、合理、有效的评估。采空区稳定性评价已成为众多矿山亟待研究的重要问题,探索采空区失稳^[1-4]具有重要的现实意义。

岩石具有高存储应变能的特性,处于平衡原始状态的地下岩体在经历工程扰动后力学性质会发生变化,导致应力重新分布,覆岩裂隙岩体采后的应力恢复是一项复杂的空间问题,应力状态的改变和应力性质的增加是采空区失稳的关键要素^[5-6]。在地下开采过程中,影响采空区稳定性因素较多。

目前,众多学者对采空区稳定性评价方法做了大量研究。李东阳等^[7]为研究城市地下不规则采空区,利用三维相似模型法对其进行试验,同时辅助内窥镜实行局部扫描,并对其评估。胡高健等^[8]首先采用数字摄影测量技术获取岩体结构面参数,其次建立三维离散结构面网络模型,应用 Mathews 稳定图,全方位多层次获得了采空区稳定性分析结果。冯岩等^[9]为了更加精确合理评估采空区稳定性,利用神经网络和主成分分析法相结合建立采空区稳定性评价模型,大大降低了预测误差率。黄亮等^[10]

为了解决采空区稳定性评价方法中赋权争议问题,通过偏序集理论提出偏序集评价模型,解决了样本量不足使模型无法应用的问题。

基于此,上述研究成果对采空区稳定性预测研究具有较好的理论指导意义,但是由于研究周期较长,存在一些检测成本过高等问题。本文基于层次分析法和模糊综合评价相结合的方法将非定量事件作定量分析,结合具体工程实例,对采空区稳定性进行评价。

1 采空区稳定性综合评价指标体系构建

采空区本身就是复杂的综合系统工程,在实际生产过程中,采空区稳定性受众多因素影响,由于各种因素之间的不可预见性和复杂性,增加了采空区稳定性研究的难度。根据云南羊拉铜矿大量实际调研结果,参考相关文献,利用层次结构法的基本原理建立梯阶层次的结构模型,以采空区稳定性评价为核心的指标体系分别建立区域地质水文因素、岩石强度性能因素、采空区环境因素、采空区结构参数等 4 个一级指标体系和 20 个二级指标体系。各级指标建立层次分析如表 1 所示。

表 1 采空区稳定性评价影响因素

Table 1 Influencing factors of stability evaluation of goaf

First-level indicators	Secondary-Level indicators
Regional geological and hydrological factors P ₁	Rock mass structure S ₁₁
	Geological structure S ₁₂
	Rock quality index S ₁₃
	Structural plane spacing S ₁₄
	Groundwater body factor S ₁₅
Rock strength performance factors P ₂	Rock compressive strength S ₂₁
	Rock tensile strength S ₂₂
	Rock shear strength S ₂₃
	Rock water resistance S ₂₄
Environmental factors in goaf P ₃	Mining method S ₃₁
	Impact of surrounding mining S ₃₂
	Adjacent empty space S ₃₃
Goaf structure parameters P ₄	Empty area exposure time S ₃₄
	Span S ₄₁
	Exposed area S ₄₂
	Height S ₄₃
	Pillars and releases S ₄₄
	Buried depth of empty area S ₄₅
	Span S ₄₆
	Project layout S ₄₇

2 层次分析法确定指标权重向量

在构造判断矩阵时,运用模糊数学理论,

将同一层指标每两个重要因素的相对优越程度进行定量描述^[11],重要性程度按表 2 进行赋值。

表 2 比较标准尺度
Table 2 Comparison standard scale

Standard degree	Meaning description
1	Factor Si is as important as factor Sj
3	The importance of the factor Si is slightly higher than the importance of Sj
5	The importance of the factor Si is significantly higher than the importance of Sj
7	The importance of the factor Si is stronger than the importance of Sj
9	The importance of the factor Si is extremely higher than the importance of Sj
2,4,6,8	The median value of two adjacent judgments
Reciprocal	Said that the factors Si and Sj are compared to obtain the judgment Sij, then Si and Sj are compared to obtain the judgment Sji=1 / Sij

根据层次结构模型对采空区稳定性评价因子进行分析,经各因素指标之间逐对比较,结合 1~9 标度(表 2),通过任意两个因素的重要性,可得到 5 个判断矩阵^[12-14]。

$$D_0 = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ P_1 & 1 & 6 & 8 & 1 \\ P_2 & 1/6 & 1 & 4 & 1/6 \\ P_3 & 1/8 & 1/4 & 1 & 1/8 \\ P_4 & 1 & 6 & 8 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} & S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{11} & 1 & 1/6 & 1/3 & 1/4 & 1/5 \\ S_{12} & 6 & 1 & 4 & 4 & 3 \\ S_{13} & 3 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/7 \\ S_{14} & 4 & 1/4 & 3 & 1 & 1 \\ S_{15} & 5 & 1/3 & 7 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} & S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{21} & 1 & 3 & 1 & 3 \\ S_{22} & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 \\ S_{23} & 1 & 3 & 1 & 3 \\ S_{24} & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} & S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{31} & 1 & 3 & 4 & 5 \\ S_{32} & 1/3 & 1 & 3 & 4 \\ S_{33} & 1/4 & 1/3 & 1 & 3 \\ S_{34} & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} & S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} & S_{17} \\ S_{11} & 1 & 3 & 3 & 9 & 5 & 7 & 9 \\ S_{12} & 1/3 & 1 & 1/3 & 5 & 3 & 5 & 7 \\ S_{13} & 1/3 & 3 & 1 & 7 & 5 & 7 & 7 \\ S_{14} & 1/9 & 1/5 & 1/7 & 1 & 1/5 & 1/3 & 3 \\ S_{15} & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 5 & 1 & 3 & 7 \\ S_{16} & 1/7 & 1/5 & 1/7 & 3 & 1/3 & 1 & 5 \\ S_{17} & 1/9 & 1/7 & 1/7 & 1/3 & 1/7 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

权重的确定采用定性和定量相结合的方式,本研究课题采用根法,更加符合客观规律,对 D 矩阵每行元素依次相乘得出新的向量分别开 n 次方得到 W_i ,最后将向量归一化。

第一步:判断矩阵每行元素依次相乘,得到各行元素的乘积,如式(1)所示。

$$M_i = \prod_{j=1}^n W_{ij} \tag{1}$$

第二步:对 M_i 的 n 次方根进行计算,如式(2)所示。

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \tag{2}$$

第三步:对向量 $W = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3, \dots, \bar{W}_n)$ 归一化,如式(3)所示。

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \tag{3}$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$

1)判断矩阵的最大特征值如式(4)所示。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(DW)_i}{nW_i} \tag{4}$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$

2)判断矩阵的一致性指标如式(5)所示。

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{5}$$

3)判断矩阵的随机一致性比率如式(6)所示。

$$C_R = \frac{I_C}{R_I} \tag{6}$$

式中: R_I 为平均随机一致性指标,对于 1~9 阶矩阵 C_R 值如表 3 所示^[15]。

表 3 平均随机一致性指标取值
Table 3 Values of the average random consistency index

Judgment matrix order	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

当 $C_R < 0.1$, 认为判断矩阵 D 的一致性是通过

的,否则必须重新计算,调节判断矩阵,直到满足一致性检验为主。

基于上述 5 个判断矩阵与计算步骤相结合,得

出表 4 相关权重集与一致性比率,可以得出所有权重系数的一致性比率 $C_R < 0.1$,满足一致性检验要求,说明判断结果是令人满意的。

表 4 相关权重集与一致性检验

Table 4 Relevant weight set and consistency check

Related weight set	λ_{max}	I_C	R_I	C_R
$W_0 = (0.432\ 1, 0.094\ 8, 0.041\ 0, 0.432\ 1)$	4.153 3	0.051 1	0.89	0.057 4
$W_1 = (0.045\ 3, 0.0456\ 0, 0.075\ 5, 0.183\ 0, 0.240\ 2)$	5.404 2	0.101 0	1.12	0.090 2
$W_2 = (0.375\ 0, 0.125\ 0, 0.375\ 0, 0.125\ 0)$	4	0	0.89	0
$W_3 = (0.528\ 7, 0.268\ 7, 0.134\ 3, 0.068\ 3)$	4.180 7	0.060 2	0.89	0.067 7
$W_4 = (0.382\ 7, 0.160\ 6, 0.260\ 2, 0.031\ 4, 0.094\ 2, 0.051\ 5, 0.019\ 4)$	7.731 1	0.121 9	1.36	0.089 6

3 模糊综合评价理论

模糊综合评价是一种综合系统的重要技术分析方 法,因素众多具有不确定性。模糊数学理论安全评价结果,可以全面反映各影响因素对采空区稳定性影响。二级模糊评价较为客观,准确性要优于一级模糊评价,这里主要研究二级模糊评价。通过层次分析法已完成了评价指标体系的构建、各因素指

标权重集与一致性检验。还需要设定被评价对象的评语集,建立隶属度函数,确定模糊综合评价。

3.1 设定评价模型的评语集

评语集是对评价对象优劣程度所做出的客观判断,是对评价结果所做出的集合。采空区稳定性是一个多级的评语集,根据矿山实际情况可划分为 5 个等级,评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$,采空区稳定性评价集如表 5 所示。

表 5 采空区稳定性评价集

Table 5 Evaluation set of goaf stability

Degree of instability	Very low degree of instability	Low degree of instability	Average degree of instability	High degree of instability	Very high degree of instability
Evaluation level	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Percentile interval	100~90	90~80	80~70	70~60	<60
Median	95	85	75	65	30

3.2 建立隶属度函数

邀请矿山领域内相关专家,按照他们以往的工作经验和对采空区危险因素的认知,对各风险指标进行打分,建立指标集到评语集 V 的模糊映射,可得到模糊综合评价矩阵 R_i ,被评语子集的隶属度见式(7)。

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$r_{ij} = \frac{h_{ij}}{Q} \quad (7)$$

式中: r_{ij} —表示对被评对象指标对评语集 V 的模糊子集隶属度; h_{ij} —表示评语频数; Q —表示参加评判的总人数。

根据上述求出的各级指标权重集 W 与模糊关系矩阵 R 合成得到模糊综合评价结果矢量 $B, B = W \times R$,运用加权平均型合成算子 $(\cdot, \oplus)$ 进行计算,更加符合客观实际情况^[16]。最后根据系统的综合

评分,确定最终的评判结果。

4 工程应用

云南羊拉铜矿里农矿段以侵蚀高山地貌为特征,地形上多陡坎、陡崖。截止 2018 年共统计各中段 219 个采空区,体积为 2 793 128.36 m^3 ,采空区分布特征与矿体分布特征具有一致性,总体特征呈现层状产出,但纵横交错,采空区的大小与矿体大小基本一致,顶板暴露面积 2 000~3 000 m^2 的采空区均布在各中段。因此,矿山采空区稳定性评价显得尤为重要。

根据矿山实际调查情况,结合相关领域内 10 位权威专家,对矿山的指标集进行评分,计算一级模糊转换矩阵,进行一级模糊综合评价。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = W_1 \times R_1 = (0.031\ 6, 0.137\ 3, 0.359\ 1, 0.345\ 6, 0.126\ 4)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = W_2 \times R_2 = (0.075, 0.237\ 5, 0.25, 0.375, 0.062\ 5)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = W_3 \times R_3 = (0.033\ 9, 0.252\ 9, 0.240\ 3, 0.405\ 7, 0.067\ 2)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_4 = W_4 \times R_4 = (0.140\ 6, 0.182\ 8, 0.248\ 5, 0.282\ 4, 0.145\ 7)$$

根据一级模糊评价计算结果可得出二级模糊评价矩阵,利用模糊转换得出模糊综合评价模型。

$$R = \begin{bmatrix} 0.031\ 6 & 0.137\ 3 & 0.359\ 1 & 0.345\ 6 & 0.126\ 4 \\ 0.075 & 0.237\ 5 & 0.25 & 0.375 & 0.062\ 5 \\ 0.033\ 9 & 0.252\ 9 & 0.240\ 3 & 0.405\ 7 & 0.067\ 2 \\ 0.140\ 6 & 0.182\ 8 & 0.248\ 5 & 0.282\ 4 & 0.145\ 7 \end{bmatrix}$$

$$B = W_0 \times R_0 = (0.0829, 0.1712, 0.2961, 0.3235, 0.1263)$$

结合以上数据,二级评价模型与评分中间值,对羊拉铜矿里农矿段采空区稳定性系统运算。

$$F = [0.082\ 9 \quad 0.171\ 2 \quad 0.296\ 1 \quad 0.323\ 5 \quad 0.126\ 3] \begin{bmatrix} 9 \\ 85 \\ 75 \\ 65 \\ 30 \end{bmatrix} =$$

69.451 5

通过上述计算可知,计算结果位于[60,70],该矿山采空区稳定性评价等级 V_4 ,采空区失稳具有一定的风险性,评价结果与矿山实际情况较吻合,说明该方法具有较好的适用性。

5 结论

1)通过层次分析法的基本原理,优选采空区稳定性的评价指标体系将非定量事项逐渐趋于量化,经矩阵内部运算,得出相对应权重向量,并通过一致性检验,为后续模糊评价奠定了理论基础。

2)引入模糊综合评价理论,将一级模糊评价转化为二级模糊评价具有较大的实用性价值,将难以量化的模糊性概念,逐渐趋于明朗化,能够比较全面真实的反映采空区稳定性现状。模糊评价的结果最终以向量的方式出现,较为客观准确地诠释了采空区稳定性问题。

3)模糊数学理论发展渗透到矿山领域,最终评价结果为采空区失稳程度高,与羊拉铜矿实际调查结果高度吻合,采空区失稳具有随机性和突变性,在回采期间应加强区域化治理。模糊数学理论与其他理论相比成本效益低,可以将各影响因素考虑在内,通过最后综合评分的大小值可以便捷的找出采空区失稳的主要诱因。

参考文献:

- [1] 任红岗,汪旭光,谭卓英,等.采空区群蠕变突变三维力学模型构建及稳定性精确预测[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(12):3114-3126.
REN Honggang, WANG Xuguang, TAN Zhuoying, et al. Construction of three-dimensional mechanical model for creep and catastrophe of goaf group and accurate prediction of its stability [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019,50(12):3114-3126.
- [2] 李东阳,王杰,杨韶珺,等.城市地下不规则采空区的超载破坏模型试验[J].煤炭学报,2019,44(7):2143-2150.
LI Dongyang, WANG Jie, YANG Shaojun, et al. Overburden destruction model test of irregularly shaped gob in city underground [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(7):2143-2150.
- [3] 吉学文,唐绍辉,潘懿.云南昭通市铅锌矿古采空区塌陷地质灾害治理[J].有色金属工程,2015,5(3):86-90.
JI Xuewen, TANG Shaohui, PAN Yi. Geological disaster treatment of ancient mined-out area of lead-zinc mine in Zhaotong city, Yunnan [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015,5(3):86-90.
- [4] 付华,陈从新,夏开宗,等.金属矿山地下开采引起岩体变形规律浅析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):

- 1859-1868.
- FU Hua, CHEN Congxin, XIA Kaizong, et al. Analysis of rock deformation caused by underground mining of metal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2015, 34(9):1859-1868.
- [5] XIE L T, YAN P, LU W B, et al. Comparison of seismic effects during deep tunnel excavation with different methods [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(3):659-675.
- [6] 李明亮, 李克钢, 秦庆词, 等. 基于改进组合赋权-TOPSIS 法的岩爆倾向性评判模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3):74-80.
- LI Mingliang, LI Kegang, QIN Qingci, et al. Judgment model of rock burst tendency based on improved combination weighting-TOPSIS method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3):74-80.
- [7] 李东阳, 王波, 刘波, 等. 城市浅部双层不规则老采空区岩层稳定性试验[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1):84-92.
- LI Dongyang, WANG Bo, LIU Bo, et al. Stratum stability test of double-layer irregular old goaf in shallow part of city[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1):84-92.
- [8] 胡高建, 杨天鸿, 胡忠强, 等. 基于 Mathews 稳定图等方法的多角度采空区群稳定性分析评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2):348-354.
- HU Gaojian, YANG Tianhong, HU Zhongqiang, et al. Multi-angle goaf stability analysis and evaluation based on Mathews stability graph and other methods [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(2):348-354.
- [9] 冯岩, 王新民, 程爱宝, 等. 采空区危险性评价方法优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7):2881-2888.
- FENG Yan, WANG Xinmin, CHENG Aibao, et al. Method optimization of underground goaf risk evaluation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7):2881-2888.
- [10] 黄亮, 王会敏, 岳立柱, 等. 基于偏序集的采空区塌陷危险性评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4):134-140.
- HUANG Liang, WANG Huimin, YUE Lizhu, et al. Study on risk assessment of goaf collapse based on partial order set [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(4):134-140.
- [11] 程爱宝, 古德生, 刘洪强. 基于 AHP 与粗糙集理论的采空区稳定性影响因素权重分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(9):50-55.
- CHENG Aibao, GU Desheng, LIU Hongqiang. Weights analysis of factors affecting the stability of mined-out areas based on analytic hierarchy process and rough sets theory [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(9):50-55.
- [12] 张海波, 刘芳芳. 基于模糊综合评判的采空区稳定性分析[J]. 化工矿物与加工, 2013, 42(10):40-43.
- ZHANG Haibo, LIU Fangfang. Analysis on stability of mined-out area by fuzzy comprehensive evaluation [J]. Chemical Minerals and Processing, 2013, 42(10):40-43.
- [13] 江春明. 羊拉铜矿里农矿段采空区稳定性分析[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.
- JIANG Chunming. Stability analysis of mined-out area in Linnong section of Yangla copper mine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [14] 黄武胜. 阿勒泰某金矿采空区稳定性评价与采矿方法优化研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016.
- HUANG Wusheng. Research on mined-out areas stability assessment and mining method optimization of a gold mine in the altai city [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [15] 陆凯. 基于 AHP-GIS 模型的垃圾处理产业园区选址研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- LU Kai. The location research of the garbage disposal industrial park based on the AHP-GIS model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [16] 周科平, 王嫄. 铜坑矿缓倾斜厚矿体采矿方案的模糊层次优化与设计[J]. 有色金属工程, 2012, 2(5):52-55.
- ZHOU Keping, WANG Qiang. Fuzzy level optimization and design of mining scheme for gently inclined thick ore body in Tongkeng Mine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2012, 2(5):52-55.