

# 基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价<sup>①</sup>

任家苇<sup>1</sup>, 左宇军<sup>1</sup>, 林健云<sup>1,2</sup>, 陈庆港<sup>1</sup>, 金开玥<sup>1</sup>

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为了准确评价含软弱夹层巷道围岩稳定性, 以改进层次分析法和客观赋权法 (CRITIC 方法) 计算综合权重, 应用未确知测度理论 (UM) 计算未确知测度向量, 同时引入集对分析理论 (SPA) 优化置信度评价过程, 建立 UM-SPA 耦合分析模型, 并运用该模型对某金矿含软弱夹层巷道围岩稳定性进行评价。结果表明, 地应力、软弱夹层抗拉强度和软弱夹层厚度是影响该类巷道稳定性的主要因素; 断面 D4、D5、D6、D7、D9 的集对势为微反势, 有向不安全状态偏向趋势; 巷道稳定性从大到小排序为: 290# 水平 > 150# 水平 > 90# 水平。实践验证表明, 模型评价结果与实际吻合。

**关键词:** 软弱夹层巷道; 巷道围岩; 稳定性评价; 未确知测度; 集对势; 改进层次分析法; CRITIC 法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.008

文章编号: 0253-6099(2023)04-0039-05

## Stability Evaluation for Surrounding Rock of Roadway with Weak Intercalation Based on Improved Unascertained Measure Theory

REN Jiawei<sup>1</sup>, ZUO Yujun<sup>1</sup>, LIN Jianyun<sup>1,2</sup>, CHEN Qinggang<sup>1</sup>, JIN Kaiyue<sup>1</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** In order to accurately evaluate stability of surrounding rock of roadway with weak intercalation, an improved analytic hierarchy process and criteria importance through inter-criteria correlation (CRITIC) method, were adopted to determine comprehensive weight, and unascertained measure theory (UM) was used to determine unascertained measurement vector. Furthermore, the set pair analysis theory (SPA) was introduced to optimize confidence evaluation process, and then a UM-SPA coupling analysis model was established and used to evaluate the stability of surrounding rock of the roadway with weak intercalation in some gold mine. The results show that in-situ stress, tensile strength and thickness of weak intercalation are the main factors influencing the stability of such kind of roadway. The set pair potentials of sections D4, D5, D6, D7, and D9 belong to micro-reversal potential and tend to be unsafe. The stability of roadway at different levels is in the following descending order; 290# level > 150# level > 90# level. The practical verification has proven that this model has an evaluation result consistent with the actual situation.

**Key words:** roadway with weak intercalation; surrounding rock of roadway; stability evaluation; unascertained measure theory; set pair potential; improved analytic hierarchy process; CRITIC method

含软弱夹层岩体是隧道、边坡、矿山等工程建设或开采过程中经常会遇到的一种特殊岩体, 软弱夹层与其他岩层相比具有强度低的特点, 会显著影响地下深部巷道的稳定性<sup>[1-2]</sup>, 导致失稳事故<sup>[3]</sup>。对含软弱夹层巷道围岩稳定性进行安全性评价具有十分重要的现

实意义。

目前巷道围岩稳定性分析方法主要有数值模拟、物理试验、数学分析等<sup>[4-8]</sup>。这些方法的提出与运用, 丰富了对巷道围岩稳定性的研究, 可用于大多数岩体的稳定性评价, 但由于含软弱夹层巷道围岩的复杂性

① 收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51964007, 51774101); 贵州省矿山动力灾害预警与控制技术科技创新人才团队项目 (黔科合平台人才 [2019] 5619); 贵州省科技支撑计划项目 (黔科合支撑 [2022] 一般 247, 黔科合支撑 [2021] 一般 516)

作者简介: 任家苇 (1997—), 男, 贵州都匀人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿山安全。

通信作者: 左宇军 (1965—), 男, 湖南湘乡人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为岩石力学和采矿工程。

和不确定性,使用这些方法评价其稳定性时均有各自的局限性,数学模型的构建和指标体系的选择还有待进一步完善。本文采用改进层次分析法和客观赋权法(CRITIC方法)计算综合权重,消除指标的差异性;同时,引入未确知测度(UM)和集对分析理论(SPA),建立基于UM-SPA的巷道安全评价模型,对含软弱夹层巷道围岩稳定性进行研究,为巷道围岩稳定性安全评价提供借鉴。

## 1 UM-SPA耦合分析模型的建立

应用未确知测度理论研究含软弱夹层巷道稳定性的优点是充分考虑了评价因素的模糊性和随机性,但在评价等级属性的确定过程中,并没有体现出客观特征,集对分析理论的引入能很好地弥补未确知测度理论的不足。

### 1.1 未确知测度理论

#### 1.1.1 单指标未确知测度的构造

定义被评价的围岩段(面)为 $D_i(i=1,2,\dots,n)$ ,共有 $F_j(j=1,2,3,\dots,m)$ 个评价因子。则评价因子的测量值 $X_{ij}(1\leq i\leq n,1\leq j\leq m)$ 代表围岩段 $D_i$ 的第 $j$ 个评价指标的测量值。假设评价等级由 $C_k(k=1,2,\dots,p)$ 表示,第 $k$ 级的围岩稳定性强于第 $k+1$ 级,记作 $C_k > C_{k+1}$ <sup>[9]</sup>,则单指标测度评价矩阵可表示为:

$$(\theta_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \theta_{i11} & \theta_{i12} & \cdots & \theta_{i1p} \\ \theta_{i21} & \theta_{i22} & \cdots & \theta_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{im1} & \theta_{im2} & \cdots & \theta_{imp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\theta_{ijk}$ 表示 $X_{ij}$ 属于第 $k$ 级 $C_k$ 的未确知测度。此外, $\theta$ 需满足 $0 \leq \theta(X_{ij} \in C_k) \leq 1$ ,且同时满足可加性和归一性准则。

#### 1.1.2 评价指标的组合赋权

主观赋权法能够最大化地将专家的专业知识利用起来,但易受个人偏好的影响。客观赋权法(CRITIC)是通过评价指标数据的差异来计算权重,避免了人为因素造成的偏差,但对评价指标数据要求较高,忽略了评价指标在实际情况中的重要程度<sup>[10]</sup>。鉴于此,本文采用改进层次分析法和CRITIC方法计算综合权重,消除指标的差异性,为科学合理地评价含软弱夹层巷道围岩稳定性奠定基础。

各项评价指标的最终权重 $W_j$ 由客观权重 $\lambda_j$ 和主观权重 $z_j$ 组合赋权计算,即:

$$W_j = \frac{\lambda_j z_j}{\sum_{j=1}^n (\lambda_j z_j)} \quad (2)$$

#### 1.1.3 多指标未确知测度的构造

将单指标未确知测度矩阵与评价因子的权向量相结合,可得到多指标未确知测度的评价向量:

$$\theta_{ik} = \sum_{j=1}^m (\theta_{ijk} W_j) \quad (3)$$

### 1.2 集对分析理论

未确知测度理论往往采用置信度准则判定评价等级,但置信度取值的主观性太强,往往导致最终评价结果不太准确。这里引入集对分析理论来优化这一过程。

在评价对象中构造两对相关集,作为集对。然后通过计算评价对象某一特征的同一度、差异度和相对度,得到集对的相对程度。本研究利用评价因子和巷道围岩稳定性等级构建集对,即 $Y=(F,C)$ 。在一定条件下,联系度是集对 $Y$ “同异反”特性的一种表达,用 $\mu(F,C)$ 表示:

$$\mu(F,C) = a + bi + cj \quad (4)$$

式中 $a, b, c$ 分别表示同一度、差异度和对立度,且 $a+b+c=1$ 。

当有 $k(k>3)$ 个评价等级时,可把 $bi$ 展开:

$$bi = b_1 i_1 + b_2 i_2 + \cdots + b_{k-2} i_{k-2}$$

得到 $k$ 元联系度:

$$\mu(F,C) = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \cdots + b_{k-2} i_{k-2} + cj \quad (5)$$

式中 $b_1, b_2, \dots, b_{k-2}$ 为差异度分量, $i_1, i_2, \dots, i_{k-2}$ 为差异度分量系数; $j=-1$ ,称为对立系数<sup>[11]</sup>。

从评价向量的计算过程来看,显然,多指标未确知测度向量 $\theta_{ik}$ 适合作为集对分析需求的特征分析向量。则评价对象的 $k$ 维联系度可由下式计算得到:

$$\begin{aligned} \mu &= \theta_{ik} \cdot E \\ &= \theta_{ik} \cdot [1, b_1, b_2, \dots, b_{k-2}, j] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $E=[1, i_1, i_2, \dots, i_{k-2}, j]$ ,为联系度分量。根据均分原理,将联系度 $\mu$ 的取值范围 $[-1, 1]$ 进行 $k-1$ 等分得到联系度分量 $E$ 的值:

$$E = \left[ 1, \frac{k-3}{k-1}, \frac{k-5}{k-1}, \dots, \frac{5-2k}{k-1}, -1 \right] \quad (7)$$

为确定巷道围岩稳定性等级,将联系度 $\mu \in [-1, 1]$ 的取值区间划分为 $k$ 个等区间。不同的区间对应不同的等级。

最后,通过分析 $a, b, c$ 之间的同一性、差异性和对立程度,可以利用集对势 $SHI$ 预测巷道围岩稳定性的变化趋势:

$$SHI = \frac{a}{c} \quad (8)$$

集对势态势变化如图1所示<sup>[12]</sup>。UM-SPA分析模型计算流程如图2所示。

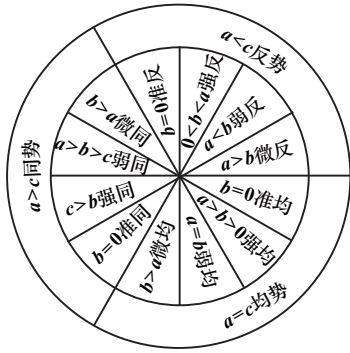


图1 集对势态变化图

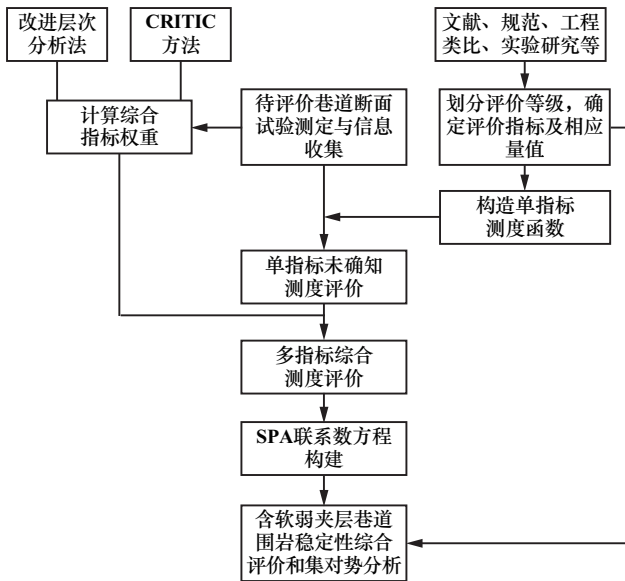


图2 UM-SPA分析模型计算流程

## 2 含软弱夹层巷道围岩指标评价体系

### 2.1 指标选取

综合分析含软弱夹层巷道变形破坏模式及其机理,选取软弱夹层厚度 ( $m, x_1$ )、软弱夹层与周围岩体相对强度 ( $x_2$ )、地应力 (MPa,  $x_3$ )、地下水状态 ( $x_4$ )、隙壁状态 ( $x_5$ )、软弱夹层的抗剪强度 (MPa,  $x_6$ )、软弱夹层的抗拉强度 (MPa,  $x_7$ )、软弱夹层的抗压强度 (MPa,  $x_8$ )、软弱夹层的泊松比 ( $x_9$ ) 共9个指标。

### 2.2 等级划分

通过查阅相关文献,将含软弱夹层巷道围岩稳定性划分为<sup>[8,13]</sup>:极稳定(I级)、稳定(II级)、一般稳定(III级)、不稳定(IV级)、极不稳定(V级)。联系数 $\mu$ 与稳定性等级的关系见表1。

## 3 工程验证

某金矿位于贵州省黔西南,地处喀斯特地区,地质条件复杂。矿体深部围岩主要由砂岩夹泥岩半坚硬~软弱

表1 围岩稳定性影响指标和评价等级

指标	稳定性等级				
	I级(C <sub>1</sub> ) [0.6,1]	II级(C <sub>2</sub> ) [0.2,0.6]	III级(C <sub>3</sub> ) [-0.2,0.2]	IV级(C <sub>4</sub> ) [-0.6,-0.2]	V级(C <sub>5</sub> ) [-1,-0.6]
$x_1$	>0.5	0.4~0.5	0.3~0.4	0.2~0.3	<0.2
$x_2$	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~1.0
$x_3$	<10	10~20	20~30	30~40	>40
$x_4$	无水 (5)	潮湿 (4)	裂隙水 (3)	中等压力水 (2)	严重地下水问题 (1)
$x_5$	闭合 (5)	微张填充 (4)	微张 (3)	张开填充 (2)	张开 (1)
$x_6$	>15.0	10.0~15.0	5.0~10.0	5.0~3.0	<3.0
$x_7$	>5.0	4.0~5.0	3.0~4.0	1.0~3.0	<1.0
$x_8$	>20.0	15.0~20.0	10.0~15.0	5.0~10.0	<5.0
$x_9$	0.4~0.5	0.3~0.4	0.2~0.3	0.1~0.2	<0.1

岩组组成,岩质软,强度低,遇水易软化,严重影响围岩稳定性。目前,该金矿井巷工程突破地下600m,部分巷道已出现严重失稳变形,为保证后续矿井的安全生产,对巷道进行稳定性评价显得尤为重要。本文选取290<sup>#</sup>、150<sup>#</sup>、90<sup>#</sup>三个水平的穿脉巷道为分析对象,在现场实测和实验室物理试验基础上,得到样本数据见表2。

表2 样本数据

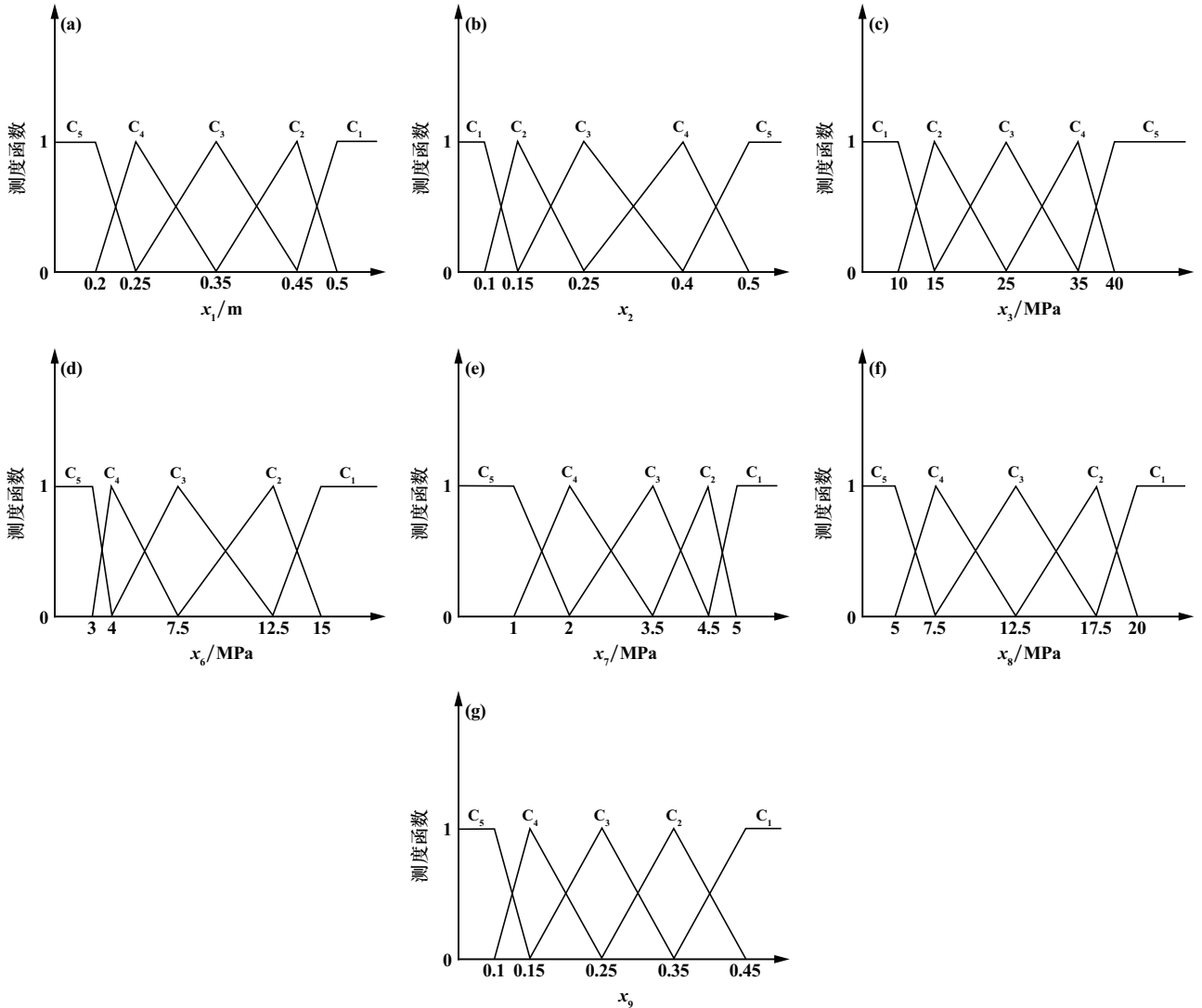
指标	290 <sup>#</sup>			150 <sup>#</sup>			90 <sup>#</sup>		
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
$x_1$	0.33	0.22	0.28	0.09	0.21	0.18	0.25	0.41	0.32
$x_2$	0.41	0.31	0.56	0.51	0.39	0.53	0.37	0.51	0.34
$x_3$	8.9	10.6	11.3	14.3	17.6	15.4	21.2	20.5	21.6
$x_4$	3	4	5	5	4	4	4	5	4
$x_5$	1	3	2	2	2	3	1	5	1
$x_6$	9.89	14.02	11.28	13.27	11.38	15.76	13.32	10.99	13.01
$x_7$	0.63	0.96	2.56	2.38	0.98	1.11	1.05	3.02	1.13
$x_8$	12.51	17.89	27.55	26.32	19.58	23.18	18.26	30.33	16.96
$x_9$	0.24	0.19	0.26	0.23	0.22	0.26	0.15	0.24	0.19

### 3.1 构建单指标测度函数

结合单指标测度函数的定义和表1,可以得到各评价指标的线性未确知测度函数曲线,见图3。

以D1为例,结合图3与表2,得到断面D1单指标评价矩阵 $\theta_1$ 为:

$$(\theta_1)_{9 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.478 & 0.522 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.002 & 0.998 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$



(a) 软弱夹层厚度; (b) 软弱夹层与周围岩体相对强度; (c) 地应力; (d) 软弱夹层抗剪强度; (e) 软弱夹层抗拉强度; (f) 软弱夹层抗压强度; (g) 软弱夹层泊松比

图3 单指标测度函数图

### 3.2 多指标综合测度评价向量

由式(2)确定各项指标的权重,结果见表3。

表3 各项评价指标的权重

评价指标 $x_i$	$z_j$	$\lambda_j$	$W_j$
$x_1$	0.12	0.09	0.116
$x_2$	0.12	0.07	0.091
$x_3$	0.28	0.10	0.302
$x_4$	0.12	0.06	0.078
$x_5$	0.12	0.06	0.078
$x_6$	0.12	0.08	0.103
$x_7$	0.04	0.43	0.184
$x_8$	0.04	0.05	0.022
$x_9$	0.04	0.06	0.026

根据式(3),结合断面D1的指标权重与单指标测

度矩阵,可求得该断面多指标测度评价向量:  $\{0.302, 0.0493, 0.2699, 0.1077, 0.2711\}$ 。同理,可求得其余断面的指标测度评价向量,结果见表4。

### 3.3 SPA综合评价

将5元联系数  $\mu$  在区间  $[-1, 1]$  划分为  $[-1.0, -0.6]$ ,  $[-0.6, -0.2]$ ,  $[-0.2, 0.2]$ ,  $[0.2, 0.6]$  和  $[0.6, 1.0]$  5个区间,依次对应含软弱夹层巷道的5个稳定性等级,对应关系如表1所示。由式(7)可以得到5元联系数分量  $E = [1.0, 0.5, 0, -0.5, -1.0]^T$ 。以断面D1为例,由式(8)可得:  $\mu = 0.302 + 0.0493p_1 + 0.2699p_2 + 0.1077p_3 + 0.2711q = 0.0017$ 。

依据表1可得,断面D1稳定性落在  $[-0.2, 0.2]$  区间,属于III级;同理,能够计算得到其他断面样本的稳定性等级,结果见表4。

表4 含软弱夹层巷道围岩稳定性评价结果

水平	断面	围岩稳定性等级					本文评价	实际情况
		I级(C <sub>1</sub> )	II级(C <sub>2</sub> )	III级(C <sub>3</sub> )	IV级(C <sub>4</sub> )	V级(C <sub>5</sub> )		
290 <sup>#</sup>	D1	0.311 1	0.131 2	0.269 9	0.025 8	0.262	III级(微同)	III级
	D2	0.331 8	0.170 2	0.146	0.098 4	0.253 6	III级(微同)	III级
	D3	0.323 5	0.133 8	0.177 1	0.274 6	0.091	III级(微同)	III级
150 <sup>#</sup>	D4	0.179 2	0.331	0.067 4	0.215 4	0.207	III级(微反)	III级
	D5	0.018 3	0.385 1	0.125 9	0.193 9	0.276 8	III级(微反)	III级
	D6	0.125	0.370 5	0.113 5	0.020 2	0.370 8	III级(微反)	III级
90 <sup>#</sup>	D7	0.006 9	0.207 9	0.205 4	0.287 9	0.291 9	IV级(微反)	IV级
	D8	0.178	0.236 6	0.432 9	0.061 5	0.091	III级(微同)	III级
	D9	0.021	0.179 6	0.432 4	0.128 9	0.238 1	IV级(微反)	IV级

分析表4结果可知,巷道稳定性从小到大排序为:90<sup>#</sup>水平<150<sup>#</sup>水平<290<sup>#</sup>水平;通过现场考察,发现90<sup>#</sup>水平巷道两帮变形比较严重,290<sup>#</sup>水平巷道较为稳定,与实际情况相符。进一步证明了评价模型的有效性。

依据集对势排序表,断面D4、D5、D6、D7、D9的集对势处于微反势,虽然趋势较弱,但其预测结果有朝着向稳定性更差的等级发展的趋势,尤其需要注意90<sup>#</sup>水平D7、D9断面的情况,需要对巷道围岩进行加固,采取巷道监测措施。

### 3.4 评价方法比较

为证明评价结果的有效性,在同一评价指标体系下,利用熵权-模糊集对分析法、变权物元可拓法,对上述9个巷道断面进行稳定性评价,并将各评价方法的评价结果与UM-SPA耦合分析模型的评价结果进行比较<sup>[14-15]</sup>,结果见表5。

表5 含软弱夹层巷道围岩稳定性评价方法对比

水平	断面	UM-SPA 耦合分析模型	熵权-模糊集对分析法	变权物元可拓法
290 <sup>#</sup>	D1	III级(微同)	IV级	III级
	D2	III级(微同)	II级	III级
	D3	III级(微同)	III级	II级
150 <sup>#</sup>	D4	III级(微反)	IV级	IV级
	D5	III级(微反)	IV级	III级
	D6	III级(微反)	IV级	III级
90 <sup>#</sup>	D7	IV级(微反)	V级	IV级
	D8	III级(微同)	III级	II级
	D9	IV级(微反)	V级	IV级

熵权-模糊集对分析法单独采用熵权法计算指标权重,是根据最大隶属度识别准则进行评判,运用该方法计算得到的稳定性等级III级和IV级的最大隶属度无显著差别,导致评价结果可信度低;变权物元可拓法考虑了指标变化对权重的影响,计算得到的指标权重与本文结果相差不大,评价结果也基本一样;UM-SPA模型得到的指标权重客观、合理,考虑了评价指标的不确

定性和评价等级之间的联系,评价结果符合工程实际,除此之外,还可以看出含软弱夹层巷道围岩稳定性的变化态势。

## 4 结 论

1) 选取软弱夹层厚度、抗压强度、地应力等9个评价指标,以改进层次分析法和CRITIC方法计算综合权重,消除指标差异性,为科学评价含软弱夹层巷道围岩稳定性奠定基础。

2) 通过建立集对关系的联系度,克服了传统方法只表现定性的缺点,定量描述了各项评价指标与评价等级之间的不确定性关系。

3) 通过对模型的实践验证,并与熵权-模糊集对分析法和变权物元可拓法比较,结果表明,UM-SPA耦合分析模型评价结果较为准确,符合工程实际,能够在实际工程中起到指导作用。

### 参考文献:

- [1] MAN Jianhong, HUANG Hongwei, AI Zhiyong, et al. Analytical model for tunnel face stability in longitudinally inclined layered rock masses with weak interlayer[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 143:104608.
- [2] 李 迁. 富水软弱夹层隧道涌水塌方风险识别及预防治理研究[D]. 北京交通大学土木与建筑工程学院, 2021.
- [3] 杨 军, 闵铁军, 刘斌慧, 等. 深部开采灾害及防治研究进展[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(36):14767-14776.
- [4] 张 涇. 含软弱夹层隧道围岩稳定性研究及支护效应分析[D]. 武汉:武汉理工大学交通学院, 2018.
- [5] 方庆红, 胡 斌, 盛建龙, 等. 含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶面角协同优化研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5):5-9.
- [6] ZHANG Minglei, ZHANG Yidong. Stability Evaluation Method for Gateways in Closely Spaced Coal Seams and Surrounding Rock Control Technology[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10):5469-5485.
- [7] Mohammad Babcian, Mohammad Ataei. A new framework for evaluation of rock fragmentation in open pit mines[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(2):325-336.

(下转第47页)

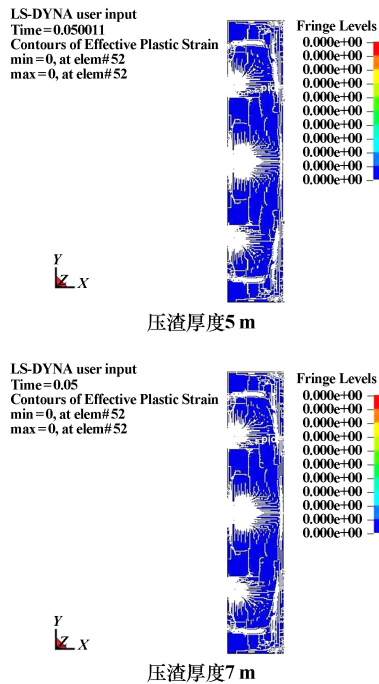


图3 不同压渣厚度模型塑性应变图

炮孔超深 2 m, 填塞长度 4.5~5.0 m。采用连续装药结构, 炮孔全长均装乳化炸药, 采用逐孔起爆方式起爆, 根据模拟推荐压渣厚度为 5 m。在爆破现场北侧安全区内观察, 台阶起爆之后较快落下, 爆破过程中后排存在冲孔现象, 灰尘较大, 炸药的能量利用率高。爆破后现场查看, 发现爆堆表面较为破碎; 爆堆较其他生产爆堆高; 后排存在拉裂现象, 前排零星分布少量大块, 最终统计平均大块率为 6.9%。证实爆破参数合理。

## 5 结 论

1) 根据数值模拟结果, 在与当前矿岩条件相似的情况下, 推荐深孔台阶爆破参数为: 孔间距 5 m、抵抗线 4 m。

2) 通过理论计算结合数值分析, 确定压渣厚度 5 m

较为理想, 可达到良好的爆破效果。

3) 现场工业试验结果表明, 采用本文推荐的相关参数, 矿石块度均匀, 平均大块率为 6.9%。

4) 受岩性及爆破振动等因素的影响, 在后续生产过程中需不断调整优化爆破参数, 以确保较佳的爆破效果。

## 参考文献:

- [1] 杨超. 露天矿山台阶深孔爆破大块成因及解决措施[J]. 工程爆破, 2019, 25(6): 32-37.
- [2] 张世琛, 苟瑞君, 马震宇, 等. 露天深孔台阶爆破参数优化设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 166-171.
- [3] 戴林, 李思维. 黑山露天矿爆破参数优化数值模拟研究[J]. 爆破, 2021, 38(4): 101-107.
- [4] 常建平, 张鹏飞, 段军, 等. 高台阶孔内微差爆破参数的确定与爆破效果分析[J]. 金属矿山, 2020(12): 81-87.
- [5] 杨懿全, 许永权, 郭其林, 等. 刚果(金)某铜钴矿露天台阶爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(4): 69-72.
- [6] 保天才, 罗非非, 朱根华. 大孔径高台阶爆破技术在高海拔露天矿山的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(5): 70-73.
- [7] 黄尘, 李江腾, 赵远, 等. 基于 PFC<sup>2D</sup> 的冬瓜山铜矿爆破参数优化[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 1-4.
- [8] 罗红. 中深孔高台阶爆破在某露天铁矿开采中的应用[J]. 采矿技术, 2018, 18(3): 1-3.
- [9] 陈清运, 余少平, 彭静波, 等. 金鼎钨钼矿露天台阶深孔爆破参数优化[J]. 爆破, 2018, 35(1): 75-79.
- [10] 贾晓敏. 爆破振动作用下台阶边坡的动力响应及稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 35-39.
- [11] 文兴, 赵亮, 郭晓强. 爆破振动在充填体中的传播规律研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 32-35.
- [12] 汪高龙, 王潇, 李跟, 等. 复杂环境爆破参数优化及控制技术[J]. 工程爆破, 2020, 26(4): 48-52.
- [13] 张袁娟, 孔德增. 不同岩性对爆破振动效应影响研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(5): 6-8.

引用本文: 崔年生, 楼晓明. 露天矿山深孔台阶压渣爆破参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 44-47.

(上接第 43 页)

- [8] 李桂臣, 张农, 曹鹏, 等. 含软弱夹层顶板巷道安全状况可拓评价模型[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 24-30.
- [9] 丁文智, 史秀志, 石勇. 基于改进未确知测度的充填管道磨损风险性评价模型[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 10-14.
- [10] WANG Sheng, LI Liping, CHENG Shuai, et al. Risk assessment of water inrush in tunnels based on attribute interval recognition theory[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(1): 517-530.
- [11] 石勇, 史秀志. 基于未确知测度的岩体稳定性多元联系度评价模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 125-130.
- [12] 柯丽华, 黄畅畅, 李全明, 等. 尾矿库安全态势分析及其敏感因素研究[J]. 金属矿山, 2021(11): 165-172.

- [13] 严雅静, 顾水杰, 于祥, 等. 基于未确知测度理论的巷道围岩稳定性研究[J]. 金属矿山, 2019(11): 20-26.
- [14] YANG Shan, XU Zitong, SU Kaijun. Variable Weight Matter-Element Extension Model for the Stability Classification of Slope Rock Mass[J]. Mathematics, 2021, 9(21): 2807.
- [15] 陈雪锋, 苗永春, 陈文涛, 等. 基于模糊集对分析法的底板突水危险性评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 218-223.

引用本文: 任家苇, 左宇军, 林健云, 等. 基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 39-43.