

基于改进 AHP-TOPSIS 评价模型的缓倾斜中厚磷矿 采矿方法优选^①

武尚荣, 陈帮洪, 费志文

(昆明有色冶金设计研究院股份公司, 云南 昆明 650202)

摘要: 为了解决传统层次分析法(AHP)在采矿方法优选过程中的模糊性、随机性和不确定性等问题,引入模糊理论、优化判断标度和构建最优传递矩阵,以减少主观偏差、增强对不确定性信息的处理能力、克服传统 AHP 的局限。将改进层次分析法与逼近理想解排序法(TOPSIS)相结合,构建了多层次、多因素、多目标、多指标综合评价模型,并应用于某缓倾斜中厚磷矿采矿方法优选。经分析,方案1、方案2、方案3的相对贴近度依次为0.1779、0.8225、0.6483,初步选择方案2(回采联道水平布置的分段空场嗣后充填法)为该矿山的适宜采矿方案。并对方案2进行数值模拟,结果表明,在矿体阶段回采充填后,该方案地表最大沉降量约为72.94 mm,表明阶段开采对矿区地表工业区域影响较小。

关键词: 缓倾斜矿体; 中厚矿体; 采矿方法优选; 层次分析法; TOPSIS; 分段空场嗣后充填法; 地表沉降

中图分类号: TD853

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.009

文章编号: 0253-6099(2025)04-0052-06

Optimization of Mining Methods for Gently Inclined Phosphate Ore Body Based on Improved AHP-TOPSIS Model

WU Shangrong, CHEN Banghong, FEI Zhiwen

(Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Kunming 650202, Yunnan, China)

Abstract: In order to solve the problems of fuzziness, randomness and uncertainty in optimization of mining method by traditional analytic hierarchy process (AHP), some measures, including introducing fuzzy theory, optimizing judgment scale and constructing optimal transfer matrix, were introduced to reduce subjective deviation and enhance the processing ability of uncertain information. Then, based on the combination of improved analytic hierarchy process (AHP) with the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS), a comprehensive evaluation system with multi-level, multi-factor, multi-objective and multi-index characteristics was constructed and applied to the optimization of mining methods for a gently-inclined medium-thick phosphate ore body. The analysis shows that the relative closeness coefficients of those three mining schemes are 0.1779, 0.8225 and 0.6483, respectively. Scheme 2, namely sublevel open stopping with subsequent backfill, is primarily determined as the suitable mining method for the mine. The numerical simulation of Scheme 2 also shows that the maximum surface subsidence in this scheme can be controlled within 72.94 mm, indicating that the mining operation at this stage brings little impact to the surface industrial zone on the mining site.

Key words: gently inclined ore body; medium-thick ore body; mining method optimization; analytic hierarchy process (AHP); TOPSIS; sublevel open stopping with subsequent backfill; surface subsidence

近年来,数学模型、物理模型、系统工程方法、数值模拟和深度神经网络等技术广泛应用于采矿方法优化和评估中,取得了良好的应用效果^[1-3]。

在开采过程中,埋深较大的缓倾斜薄至中厚矿体

会面临地压释放困难、采场作业条件恶劣等显著挑战,针对该类矿体,选择适宜的采矿方法具有重要的现实意义。采矿方法选择是一个涉及技术、经济、施工、安全等多因素、多目标的复杂决策过程。传统的基于经

① 收稿日期: 2025-01-24

作者简介: 武尚荣(1984—),男,云南保山人,高级工程师,主要从事采矿及岩石力学方面的研究工作。E-mail: 243971842@qq.com

通信作者: 陈帮洪(1998—),男,四川乐山人,硕士研究生,主要从事地下开采方面的研究工作。E-mail: 1274576865@qq.com

验与类比的方法往往存在较大的模糊性、随机性和不确定性^[4]。为应对这一挑战,学者们致力于建立更科学的决策体系;文献[5]基于模糊理论和决策多交互方法,构建了涵盖技术可行性、安全状况、经济效益和管理复杂性等维度的采矿方法选择指标体系;文献[6]应用 AHP-Fuzzy 综合优选方法,系统考量了采矿成本、地压管理难度、矿石贫化率、千吨采切比、施工难易程度、采场生产能力、矿石损失率、方法灵活适应性及通风条件等 9 项关键指标。由于传统层次分析法(AHP)中决策方法不一致性,建立的判断矩阵一致性检验计算繁琐,且一致性检验无法通过。基于此,在前人采矿方法优选研究的基础上,本文提出通过转移矩阵构建一致性判断矩阵,将改进的 AHP 与逼近理想解排序法(TOPSIS)相结合,采用改进 AHP-TOPSIS 评价模型获得权重向量值,以获得不用通过一致性检验的指标权重值,并应用于某缓倾斜中厚磷矿充填采矿方法优选过程,结合数值模拟验证充填回采效果,为缓倾斜中厚矿体的安全高效开采提供参考。

1 矿山概况

某缓倾斜中厚磷矿为大型磷块岩矿床,矿层总体上呈面状分布,呈南-北向分布,长 2.3 km,宽 1.5 km,分布面积约 3.2 km²。矿区内矿层露头仅在南侧有少量出露,海拔标高为 1 870 m;矿区矿层分布最高标高 1 985 m,最低标高 1 000 m,相对高差约 985 m;矿层最小埋深 0 m,最大埋深 1 407 m。矿体倾角 15.2°~25.3°,平均倾角 21°,厚度 5.39~24.6 m,平均厚 14.67 m, P₂O₅ 平均品位为 21.22%。矿体顶板为白云岩,岩石坚固性系数为 5.96;矿体为磷块岩,岩石坚固性系数为 7.15;矿体底板为泥质白云岩,岩石坚固性系数为 8.10。矿区是以岩溶含水层充水为主、顶底板直接充水、水文地质条件中等的矿床。围岩与矿体底板的接触关系明显,但与顶板的逐渐变质蚀变关系不明显。随着开采强度增加,矿石资源继续向下移动,矿体倾角变缓,矿石搬运困难。

2 采矿方法优选模型构建

2.1 基于改进的 AHP 确定权重向量

AHP 是一种结合了定性和定量方法的多标准、多目标、多方案的决策分析方法。在实际采矿方法选择过程中,由于专家在决策中的主观性,尤其是在因素指标较多的情况下,难以一次性构建满足一致性要求的判断矩阵。改进的 AHP 可以在不调整专家初始数据的情况下重构判断矩阵并计算权重向量。它不仅可以

避免多次专家调查所造成的支出浪费,而且还可以减少通过调整判断矩阵所造成的重复计算。采用改进的 AHP 求解权重向量的过程如图 1 所示。

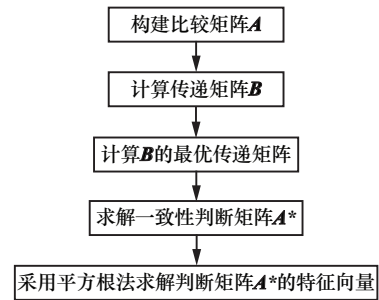


图 1 改进的 AHP 求解权重向量步骤

Fig.1 Steps for solving weight vector with improved AHP

2.1.1 构建比较矩阵

比较矩阵 A 如式(1)所示,矩阵 A 中元素 a_{ij} 是评价指标中元素 x_i 对元素 x_j 的相对重要性。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_1}{x_1} & \frac{x_1}{x_2} & \cdots & \frac{x_1}{x_n} \\ \frac{x_2}{x_1} & \frac{x_2}{x_2} & \cdots & \frac{x_2}{x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_n}{x_1} & \frac{x_n}{x_2} & \cdots & \frac{x_n}{x_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.1.2 构建一致性判断矩阵

为了避免初始比较矩阵的不一致性,引入改进的 AHP^[6],并利用最优传递矩阵的概念得到了一次指标权重值。其定义和存在的关系如下。

定义 1: 设矩阵 $A_{m \times n}$, 集合 $U = (1, 2, \dots, n)$ 。若 $a_{ij} = 1/a_{ji}$, 且 $a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$, $i, j, k \in U$, 则矩阵 A 是一致性判断矩阵。

定义 2: 设矩阵 $A_{m \times n}$, 矩阵 $B_{m \times n}$, $b_{ij} = \lg a_{ij}$, $i, j, k \in U$, $U = (1, 2, \dots, n)$ 。若矩阵 A 是一致性判断矩阵, 那么 $b_{ij} = -b_{ji}$, 且 $b_{ij} = b_{ik} + b_{kj}$, 则矩阵 B 被称为矩阵 A 的传递矩阵; 相反, 如果 B 是 A 的传递矩阵, 那么 A 就是一致性判断矩阵。

定义 3: 矩阵 $B_{m \times n}$ 、 $C_{m \times n}$, 若 $b_{ij} = -b_{ji}$, 则矩阵 B 的最优传递矩阵 C 满足 $c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk})$, $i, j, k \in U$, $U = (1, 2, \dots, n)$ 。

2.2 改进 AHP-TOPSIS 综合评价模型的构建

利用 TOPSIS 来定义正理想解和负理想解, 并根据方案与理想解的接近程度来评价该方案的优越性。一般优越方案是接近正理想解、远离负理想解。

2.2.1 建立初始判断矩阵

假设有 m 个备选方案 P_1, P_2, \dots, P_m , 所有方案的集合为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$; 每个方案的评价指标集合设为 $X, X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 每个方案对应的评价指标可表示为 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$, 则 x_{ij} 表示第 i 方案的第 j 个评价指标。初始判断矩阵 P 表达式^[7]为:

$$P = (X_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2.2 标准化决策矩阵的建立

由于评价对象具有复杂性, 且各评价指标存在不兼容性, 需对评价指标进行无量纲处理。其中, 成本型指标因“数值越小越优”, 先通过式(3)取倒数转化为“数值越大越优”的效益型指标, 再进行标准化处理^[8]。效益型指标因“数值越大越优”, 直接采用式(4)进行标准化处理; 经上述操作, 最终得到标准化决策矩阵 Q (见式(5))。

$$q_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \quad (3)$$

$$q_{ij}' = \frac{x_{ij}}{x_j^{\max}} \quad (4)$$

$$Q = (q_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: x_{ij} 是矩阵 P 的元素; x_j^{\max} 表示矩阵 P 中 j 列的最大值; q_{ij}, q_{ij}' 均为标准化决策矩阵 Q 的元素。

2.2.3 加权标准化决策矩阵的构建

将上述标准化决策矩阵 Q 与各指标对应的权重 w_i 相乘, 得到加权标准化矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} w_1 q_{11} & w_2 q_{12} & \cdots & w_n q_{1n} \\ w_1 q_{21} & w_2 q_{22} & \cdots & w_n q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 q_{m1} & w_2 q_{m2} & \cdots & w_n q_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.2.4 待选方案贴近度计算

加权标准化决策矩阵的理想解按式(7)^[9]计算。

$$\begin{cases} R^+ = \max_j (r_{ij}) \\ R^- = \min_j (r_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: R^+, R^- 分别为正、负理想解; $\max_j (r_{ij})$ 表示矩阵 R

中第 j 列的最大值; $\min_j (r_{ij})$ 表示矩阵 R 中第 j 列的最小值。评价对象与理想解之间的距离按式(8)^[10]计算:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: d_i^+ 和 d_i^- 分别为评价对象与正理想解和负理想解之间的距离; r_j^+ 和 r_j^- 分别为 R^+ 和 R^- 的元素。每个评价对象与正理想解之间的距离向量 E_i^+ 为:

$$E_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, E^+ \in [0, 1] \quad (9)$$

由 E_i^+ 组成的矩阵 E 为综合评价矩阵。在相同的一级指标下, 接近 1 为优, 接近 0 为差, 可以通过进度值的递减排列来初步判断评价对象的优缺点。

3 实例应用

3.1 方案初选及综合评价指标体系建立

根据矿体产状和开采技术条件, 初步提出以下 3 种较为可行的充填采矿方案: 方案 1 为上向点柱式分层充填法; 方案 2 为回采联道水平布置的分段空场嗣后充填法; 方案 3 为回采联道倾斜布置的分段空场嗣后充填法。根据采矿方法初选分析, 方案 1 回收率、贫化率高, 但安全性和生产效率低, 方案 2 和方案 3 安全性高、成本低、生产效率低, 但贫化率高。相比于方案 2, 方案 3 回收率高, 但采切工程量大。因此需要进一步综合考虑技术、经济和安全性等条件, 优选出合适的采矿方法。

根据改进的 AHP 的基本原理, 参考前人对采矿方法评价指标体系的研究, 建立了缓倾斜中厚磷矿体采矿方法优选评价指标体系, 如图 2 所示。

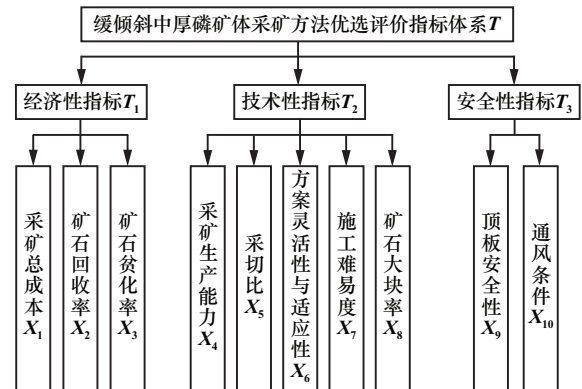


图2 缓倾斜中厚磷矿体采矿方法优选评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system for optimizing mining method of gently-inclined and medium-thick phosphate ore body

评价体系中 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_8$ 为定量指标,可根据标准的采矿方法图、参考类似矿山实例及所获得的相关专家意见进行综合估算^[7]。评价体系中的 X_6, X_7, X_9, X_{10} 为定性指标。评价等级分为非常好、好、一般、差、非常差 5 个等级,依次对应 10、8、6、4、2 打分值。最终得到 3 种充填采矿方法的评价指标值如表 1 所示。

表 1 3 种采矿方法评价指标值

Table 1 Evaluation indicators of three mining methods

评价指标体系		方案 1	方案 2	方案 3
准则层	指标层			
经济性指标 T_1	采矿总成本 $X_1/(元 \cdot t^{-1})$	51.19	41.42	43.52
	矿石回收率 $X_2/\%$	78.50	76.36	73.34
	矿石贫化率 $X_3/\%$	10.20	13.11	11.46
技术性指标 T_2	采场生产能力 $X_4/(t \cdot d^{-1})$	696.97	1 060.61	1 060.61
	采切比 $X_5/(m \cdot kt^{-1})$	5.20	4.66	6.50
	方案灵活性与适应性 X_6	4	6	8
	施工难易度 X_7	8	4	6
	矿石大块率 $X_8/\%$	6	8	8
安全性指标 T_3	顶板安全性 X_9	4	8	6
	通风条件 X_{10}	6	8	8

3.2 指标权重确定

总成本取决于采矿技术条件、充填开采方法、机械化水平、管理水平等。确定开采方法后,采矿总成本在短时间内变化不大,而矿石回收率和贫化率指数对矿山的经济效益影响较大^[11]。

根据 AHP 基本原理和文献[8],结合当地政策和矿山企业生产经营情况,与相关专家学者讨论,确定标准层指标 T 、经济性指标 T_1 、技术性指标 T_2 、安全性指标 T_3 的初始比较矩阵为:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{pmatrix}, T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1 & 4/5 \\ 1/5 & 5/4 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} 1 & 8/3 & 1/2 & 3/4 & 3/2 \\ 3/8 & 1 & 4/3 & 2 & 4 \\ 2 & 3/4 & 1 & 3/2 & 3 \\ 4/3 & 1/2 & 3/2 & 1 & 2 \\ 3/2 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, T_3 = \begin{pmatrix} 1 & 8/7 \\ 7/8 & 1 \end{pmatrix}$$

由改进的 AHP^[9]得到的权重向量值如表 2 所示。通过表 2 的准则层权重及指标层权重即可得到各指标的加权重,以便后续对指标进行综合评价。

3.3 各因素和指标的综合评价

根据式(2)构造初始判断矩阵 P 。在各方案的综合评价指标体系中, X_1, X_3, X_5, X_7, X_8 属于成本指标, $X_2, X_4, X_6, X_9, X_{10}$ 属于效益指标,通过式(3)~(5)得到

表 2 改进的 AHP 确定的权重向量值

Table 2 Weight vector value determined by improved AHP

评价指标准则层	准则层权重	评价指标	指标层权重	指标加权重
经济性指标 T_1	0.625 0	X_1	0.690 8	0.431 8
		X_2	0.148 8	0.093 0
		X_3	0.160 3	0.100 2
		X_4	0.201 8	0.027 6
技术性指标 T_2	0.136 5	X_5	0.245 6	0.033 5
		X_6	0.231 9	0.031 6
		X_7	0.213 8	0.029 2
		X_8	0.106 9	0.014 6
安全性指标 T_3	0.238 5	X_9	0.533 3	0.127 2
		X_{10}	0.466 7	0.111 3

标准化矩阵 Q ,利用式(6)加权表 2 中指标权重,得到标准化加权判断矩阵 R 。

$$P = \begin{pmatrix} 51.19 & 78.50 & 10.20 & 696.97 & 5.20 & 4 & 8 & 6 & 4 & 6 \\ 41.42 & 76.36 & 13.11 & 1 060.61 & 4.66 & 6 & 4 & 8 & 8 & 8 \\ 43.52 & 73.24 & 11.46 & 1 060.11 & 6.50 & 8 & 6 & 8 & 6 & 8 \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.349 4 & 0.093 0 & 0.100 2 & 0.018 1 & 0.030 0 & 0.015 8 & 0.014 6 & 0.014 6 & 0.063 6 & 0.083 5 \\ 0.431 8 & 0.090 5 & 0.078 0 & 0.027 6 & 0.035 5 & 0.023 7 & 0.029 2 & 0.011 0 & 0.127 2 & 0.011 3 \\ 0.411 0 & 0.086 9 & 0.089 2 & 0.027 6 & 0.024 0 & 0.031 6 & 0.019 5 & 0.011 0 & 0.095 4 & 0.011 3 \end{pmatrix}$$

根据式(7)计算加权归一化矩阵的理想解,得到加权标准化矩阵的正理想解和负理想解。

$$\begin{cases} R^+ = (0.431 8, 0.093 0, 0.100 2, 0.027 6, 0.035 5, 0.031 6, 0.022, 0.014 6, 0.127 2, 0.111 3) \\ R^- = (0.349 4, 0.086 9, 0.078 0, 0.018 1, 0.024 0, 0.015 8, 0.014 6, 0.010 0, 0.063 6, 0.083 5) \end{cases}$$

根据式(8)、(9)分别计算每个待优选采矿方法到正、负理想解的距离 d_i^+, d_i^- 和相对贴近度 E_i^+ ,计算结果如表 3 所示。

表 3 距离和相对贴近度计算结果

Table 3 Calculation result of distance and relative closeness coefficient

待选采矿方法	d_i^+	d_i^-	E_i^+
方案 1	0.110 4	0.023 9	0.177 9
方案 2	0.023 7	0.110 0	0.822 5
方案 3	0.042 3	0.078 0	0.648 3

根据表 3 结果,方案 2 到正理想解的距离最小,到负理想解的距离最大,相对贴近度最大,说明方案 2 切割工程量小、回收率高、安全性高。因此,选择方案 2 作为本文缓倾斜中厚磷矿适宜的采矿方案。

3.4 工业试验

方案 2 采矿示意图如图 3 所示,矿块沿走向布置,矿块长 50~100 m,矿块宽度为矿体厚度。分段高度 20 m,矿块间沿走向和倾向留隔离矿柱,矿柱宽度 4~6 m。采用凿岩台车凿岩,4 m³ 柴油铲运机出矿。采场回采结束后,采用废石及尾砂对采空区进行充填,废石采用

汽车运输,运输至充填平巷从充填井充入采空区。

该方法已在矿山中进行了试验。根据首采区域现场试验数据统计,方案2主要技术经济指标为:采场生产能力1100 t/d,回收率85.7%,矿石贫化率12.34%,采切比4.5 m/kt,回采和充填总成本42元/t,达到预期效果。

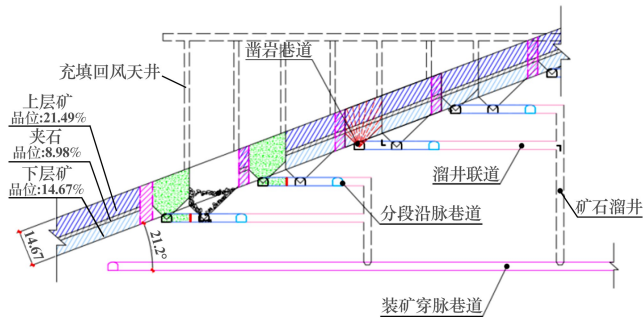


图3 方案2采矿示意图

Fig.3 Schematic diagram of mining by Scheme 2

4 优选采矿方法数值模拟

深部矿体开采采矿方法选择还需考虑地压管理及地表沉降控制。根据方案2,基于矿区地形地质条件及岩体力学参数建立三维数值模型,对阶段矿体回采及采空区充填开展数值模拟,按照1790~1930 m(阶段1)、1590~1770 m(阶段2)、1390~1570 m(阶段3)、1190~1370 m(阶段4)、1030~1170 m(阶段5)的开采顺序进行回采充填数值模拟计算,截取阶段1回采充填后矿体倾向剖面最大主应力分布,如图4所示,不同阶段回采充填后的沉降指标如表4所示。

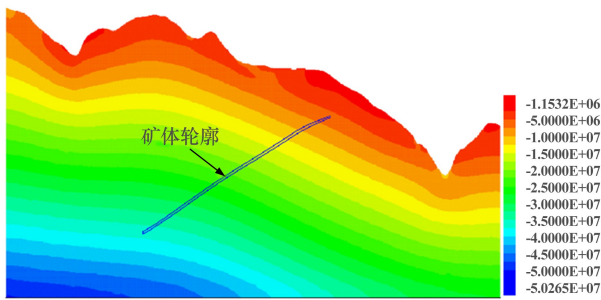


图4 矿体倾向剖面最大主应力分布

Fig.4 Distribution of maximum principal stress in the dip direction on section of ore body

根据图4和表4可以看出,分段矿体赋存区域最大主应力值约为22.5 MPa,矿山地表沉降总体呈现前期和后期变化较小、中期变化较大的规律。但总体而言,矿山围岩条件相对较好,矿区回采充填后地表沉降相对较小。矿区矿体回采过程中地表最大沉降量约为

72.94 mm,在矿体回采过程中对矿区地表工业场地影响较小,留设保安矿柱能够保证地表工业场地的安全。

表4 不同阶段回采充填后的沉降指标

Table 4 Settlement indicators after mining and filling at different stages

阶段	最大沉降量/m	倾斜值 $i/$ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	曲率 $k/$ (10^{-3}m^{-1})	$\varepsilon/$ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	0.008 81	0.020	0.012	0.014
2	0.034 82	0.028	0.018	0.017
3	0.057 05	0.030	0.021	0.020
4	0.071 45	0.037	0.029	0.030
5	0.072 94	0.042	0.034	0.037

5 结论

1) 提出通过最优传递矩阵构建一致性判断矩阵,减少主观偏差,增强对不确定性信息的处理能力,以克服传统AHP确定权重的局限,在实际采矿方法优选的应用中取得了较好效果。

2) 以某缓倾斜中厚磷矿为例,建立了采矿方法优选的AHP-TOPSIS综合决策模型。方案1、方案2、方案3的相对贴近度分别为0.177 9、0.822 5、0.648 3,方案2(回采联道水平布置的分段空场嗣后充填法)的相对贴近度最大,选择方案2作为该矿体适宜的采矿方案。

3) 通过数值模拟得到,方案2在矿体阶段回采充填后,地表最大沉降量约为72.94 mm,表明阶段开采对矿区地表工业区域的影响较小。设置合理的保安矿柱能够有效保障地表工业场地的安全稳定。

参考文献(References):

[1] 陈建宏,邹哲,任聪亚. 基于AHP-VIKOR法的采矿方法优选研究[J]. 黄金科学技术, 2015,23(3):50-54.
CHEN Jianhong, ZOU Zhe, REN Congya. Research on optimization of mining method based on the AHP-VIKOR method[J]. Gold Science and Technology, 2015,23(3):50-54.

[2] 甘德清,孟岐,刘志义,等. 缓倾斜极厚矿体高阶段采场开采顺序优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):28-34.
GAN Deqing, MENG Qi, LIU Zhiyi, et al. Optimization of mining sequence for high-level stope with gently-dipping and extra-thick orebody[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):28-34.

[3] 罗来和,夏国进,王沉,等. 基于FLAC^{3D}的采矿方法优选及采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):129-133.
LUO Laihe, XIA Guojin, WANG Chen, et al. Optimization of mining method and stope structure parameters based on FLAC^{3D}[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):129-133.

[4] YAVUZ M. The application of the analytic hierarchy process (AHP) and

- Yager's method in underground mining method selection problem[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2015, 29(6):453-475.
- [5] LIANG W Z, ZHAO G Y, WU H, et al. Optimization of mining method in subsea deep gold mines; A case study[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10):2160-2169.
- [6] 王心义,姚孟杰,张建国,等. 基于改进 AHP 法与模糊可变集理论的煤层底板突水危险性评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3):558-565.
- WANG Xinyi, YAO Mengjie, ZHANG Jianguo, et al. Evaluation of water bursting in coal seam floor based on improved AHP and fuzzy variable set theory[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3):558-565.
- [7] 王新民,秦健春,张钦礼,等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的姑山驻留矿采矿方法优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3):1131-1137.
- WANG Xinmin, QIN Jianchun, ZHANG Qinli, et al. Mining method optimization of Gu Mountain stay ore based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3):1131-1137.
- [8] 张钦礼,赵宇飞,荣帅,等. 基于变权重理论和 TOPSIS 的缓倾斜薄矿脉采矿方法优选[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(6):844-850.
- ZHANG Qinli, ZHAO Yufei, RONG Shuai, et al. Optimization of gently inclined thin vein mining method based on variable weight theory and TOPSIS[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(6):844-850.
- [9] 夏仲锐,祝文化,罗振源. 地下复杂陡倾采空区稳定性评价的改进 AHP-TOPSIS 法[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(5):184-192.
- XIA Zhongrui, ZHU Wenhua, LUO Zhenyuan. Study on improved AHP-TOPSIS method for stability evaluation of underground complex steeply inclined goaf[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(5):184-192.
- [10] 马少维. 基于改进型 AHP-TOPSIS 评判模型的采矿方法优选[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(10):1-4.
- MA Shaowei. Optimization of mining method based on improved AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(10):1-4.
- [11] 刘志祥,刘强,肖思友,等. 基于熵权-理想点的采矿方法优选及采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3):1-5.
- LIU Zhixiang, LIU Qiang, XIAO Siyou, et al. Mining method choice based on entropy weight-ideal point and stope stability analysis[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(3):1-5.
- 引用本文:武尚荣,陈帮洪,费志文. 基于改进 AHP-TOPSIS 评价模型的缓倾斜中厚磷矿采矿方法优选[J]. 矿冶工程, 2025, 45(4):52-57.
- WU Shangrong, CHEN Banghong, FEI Zhiwen. Optimization of mining methods for gently inclined phosphate ore body based on improved AHP-TOPSIS model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4):52-57.

(上接第 51 页)

- [5] 葛云峰,钟鹏,唐辉明,等. 基于钻孔图像的岩体结构面几何信息智能测量[J]. 岩土力学, 2019, 40(11):4467-4476.
- GE Yunfeng, ZHONG Peng, TANG Huiming, et al. Intelligent measurement on geometric information of rock discontinuities based on borehole image[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11):4467-4476.
- [6] 王川婴,邹先坚,韩增强,等. 基于特征函数的钻孔图像结构面识别方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(10):3062-3066.
- WANG Chuanying, ZOU Xianjian, HAN Zengqiang, et al. Recognition of structural planes in borehole image based on characteristic function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10):3062-3066.
- [7] 宋琨,孙驰,安冬,等. 数字钻孔全景影像中结构面特征智能识别方法[J]. 地质科技通报, 2020, 39(5):17-22.
- SONG Kun, SUN Chi, AN Dong, et al. Intelligent identification method for rock discontinuities properties by digital borehole panoramic images[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(5):17-22.
- [8] 吴天雨,许英朝,晁鹏飞. 一种提高目标图像识别准确率的数据增强技术[J]. 激光杂志, 2020, 41(5):96-100.
- WU Tianyu, XU Yingchao, CHAO Pengfei. Data augmentation technology for improving target image recognition[J]. Laser Journal, 2020, 41(5):96-100.
- [9] 李永盛,何佳洲,刘义海,等. 基于图像检测识别的数据增强技术[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(1):66-70.
- LI Yongsheng, HE Jiazhou, LIU Yihai, et al. Data enhancement technology based on image detection and recognition[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(1):66-70.
- [10] 白茹鑫,栾尚敏. 图像处理中应用图像降噪算法的研究综述[J]. 现代信息技术, 2024, 8(10):21-25.
- BAI Ruxin, LUAN Shangmin. Research review of the application of image denoising algorithms in image processing[J]. Modern Information Technology, 2024, 8(10):21-25.
- [11] 郭昕刚,许连杰,霍金花,等. 基于非局部自相似性的图像去噪算法研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9):364-369.
- GUO Xingang, XU Lianjie, HUO Jinhua, et al. Research on image denoising algorithm based on non-local self-similarity[J]. Computer Simulation, 2022, 39(9):364-369.
- [12] 张蕊,孟晓曼,曾志远,等. 图卷积神经网络在点云语义分割中的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(24):29-46.
- ZHANG Rui, MENG Xiaoman, ZENG Zhiyuan, et al. Review of graph convolutional neural networks in point cloud semantic segmentation[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(24):29-46.
- 引用本文:宋纹瑶,张梅,郭连军,等. 基于改进 U-Net 模型的露天矿钻孔裂隙识别研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(4):47-51.
- SONG Wenyao, ZHANG Mei, GUO Lianjun, et al. Recognition of rock fracture in open-pit Mines by borehole imaging based on improved U-Net model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4):47-51.