

基于 AHP-TOPSIS 的急倾斜薄矿脉采矿方法及采场结构参数优选

王滔, 孙刚友, 杨江坤, 任赛

(中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要: 某铀矿山随着开采深度的不断增加, 矿体厚度变薄, 倾斜角度变大。以某铀矿山急倾斜薄矿脉为研究对象, 通过 AHP-TOPSIS 优选方法对比分析了不同采矿方法, 提出了适用于该矿山的薄矿脉高分段深孔连续高效协同采矿法。基于此采矿法, 利用 FLAC3D 数值分析手段, 分析了几种不同采场结构参数的方案及其开采过程中的应力场、位移场和塑性区分布特征, 获得了最优采场结构参数。研究表明: 方案 1~方案 4 中顶柱与间柱未出现拉应力, 方案 5 与方案 6 出现少量拉应力; 方案 1~方案 6 的塑性区占比为 22.52%~27.98%, 在方案 3 下采场表现出较优的稳定性。综合安全性和经济性, 确定最优采场结构参数为顶柱高度 5 m、间柱宽度 8 m(方案 3)。

关键词: 铀矿山; 急倾斜薄矿脉; AHP-TOPSIS 方法; 采场结构参数; 稳定性; FLAC3D

中图分类号: TL212.1; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)02-0038-14

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.01.05

随着易采铀矿床资源的逐渐消耗, 开采作业转向倾角陡峭、厚度较薄的深部矿体, 这一转变增加了开采难度和压力^[1]。优化采矿方法及采场结构参数, 对确保矿体开采安全和提高开采效率至关重要^[2]。

常采用层次分析法(AHP)和技术-排序加权评价法(TOPSIS)来解决多元、多层次问题, 得到优选的采矿方法^[3-5]。通过现场试验与 FLAC3D 软件模拟, 可有效评估岩体断裂稳定性。AHP 法适用于加权排序分析, 而 TOPSIS 法则擅长多方案排序分析, 综合运用 AHP 与 TOPSIS 法能够有效支持采矿方法的科学优选^[6-7]。

优选采场结构参数是提升采矿效率和安全性关键, 学者们常通过数值模拟和物理实验等手段进行采场结构参数优选研究^[8-10]。段泽锋等利用 FLAC3D 软件对某铅锌矿采场稳定性进行分析, 从 9 种方案中选出最佳参数配置^[11]。李加州等通过优化梁柱式开采工作面结构参数, 显著提高了采矿效果和回收率^[12]。邹雄刚等则结合

AHP-TOPSIS 模型, 从备选方案中确定了在实际矿山生产中表现优异的方案^[13]。

针对铀矿床急倾斜薄矿脉倾角陡、厚度薄、开采难度大的特点, 将 AHP-TOPSIS 多目标决策方法与 FLAC3D 数值模拟相结合, 优选开采方法并优化采场结构参数, 旨在为急倾斜薄矿脉的开采提供技术支撑。

1 采矿方法优选

1.1 开采技术条件

目前, 某铀矿山采用机械化干式上向水平分层充填法开采主矿体, 主要采掘设备为铲运机和凿岩台车, 开采中主要存在生产工序多、作业流程复杂、管理困难、生产效率低、安全管理难度大、安全性差等问题^[14]。人员需要长期在暴露的顶板下开展凿岩、装药、起爆网路连接、撬毛、出矿、充填等工作, 在采场内工作时间长, 劳动强度大^[15]。采场顶板暴露时间长, 易产生不安全风险。机械化和自动化程度低, 生产管理较为传统落后。近

收稿日期: 2025-01-26

第一作者简介: 王滔(1998—), 男, 河北承德人, 硕士, 助理工程师, 主要从事矿山采矿方法设计及数值分析。

通信作者简介: 杨江坤(1997—), 男, 河北邢台人, 硕士, 助理工程师, 主要从事矿山开采设计及数值分析。

几年虽然引进了部分机械化装备,但自动化程度较低,机械装备主要依靠人工在车操作^[16]。

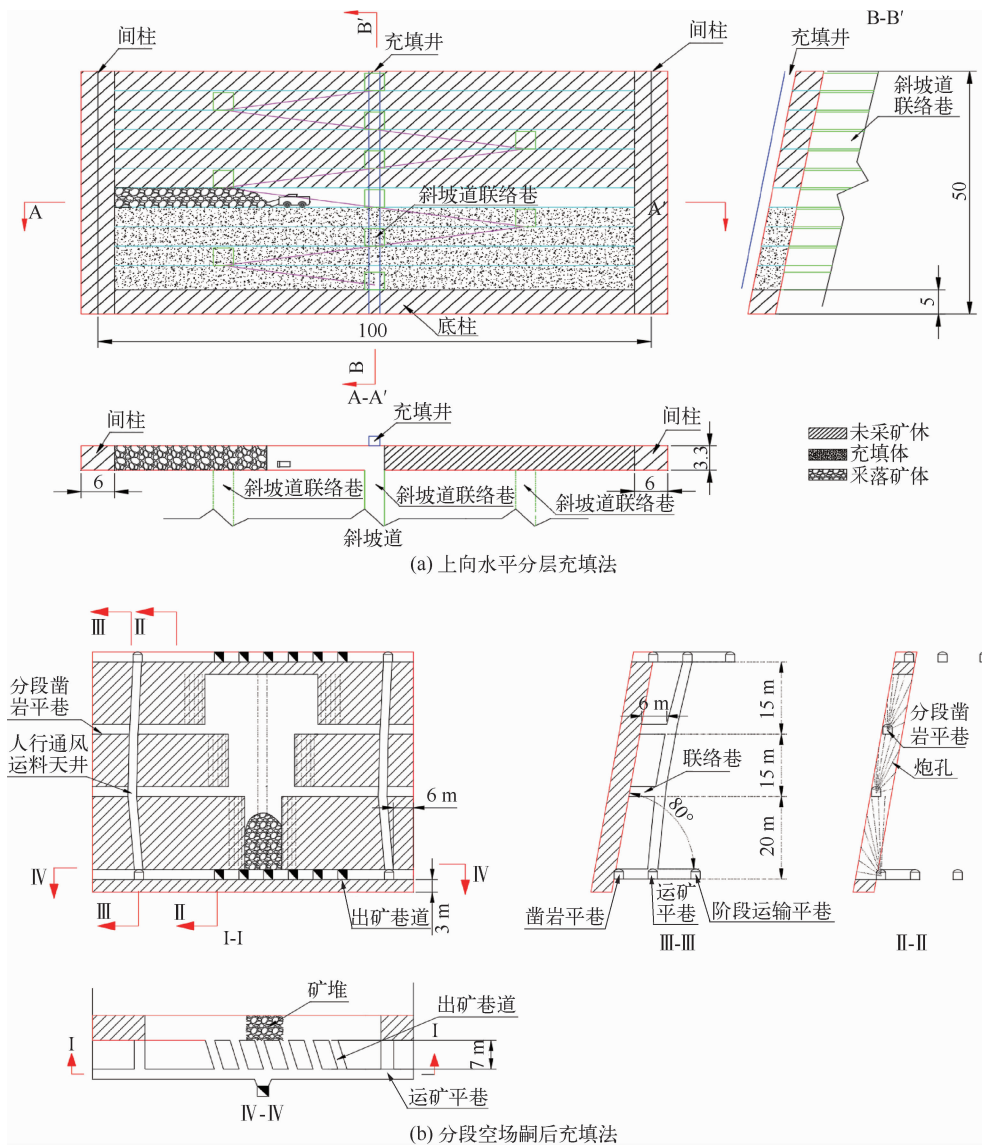
随着矿井开采深度的增加,主矿体规模变小、厚度变薄,同时深部地压带来的安全隐患日趋显现^[17]。采用无轨机械化上向干式充填采矿法对铀矿薄矿脉进行开采时,存在采场效率低、开采成本高、人员设备直接暴露在采场顶板下作业等问题^[18],难以满足矿井安全、经济、高效开采要求,严重制约了硬岩铀矿资源的开发。

1.2 采矿方法初选

针对矿井目前开采技术条件,选择适宜的薄矿脉深孔采矿方法^[19]。新的采矿方法需满足以

下要求:1)采矿方法选择、采场结构参数合理,可实现稳固围岩下的极倾斜薄矿脉的安全开采;2)凿岩、爆破和出矿作用应在暴露面积不大的水平巷道内进行,出矿和回填全部或部分利用自重;3)生产效率高,采场生产能力大^[20]。

基于以上考虑,参考国内外采矿技术新进展,初步选出技术可行的 2 种采矿方法(上向水平分层充填采矿法、分段空场嗣后充填法);同时提出 2 种新型采矿方法(高分段深孔连续高效协同采矿法、上下向深孔连续高效协同采矿法),见图 1。



未采矿体
充填体
采落矿体

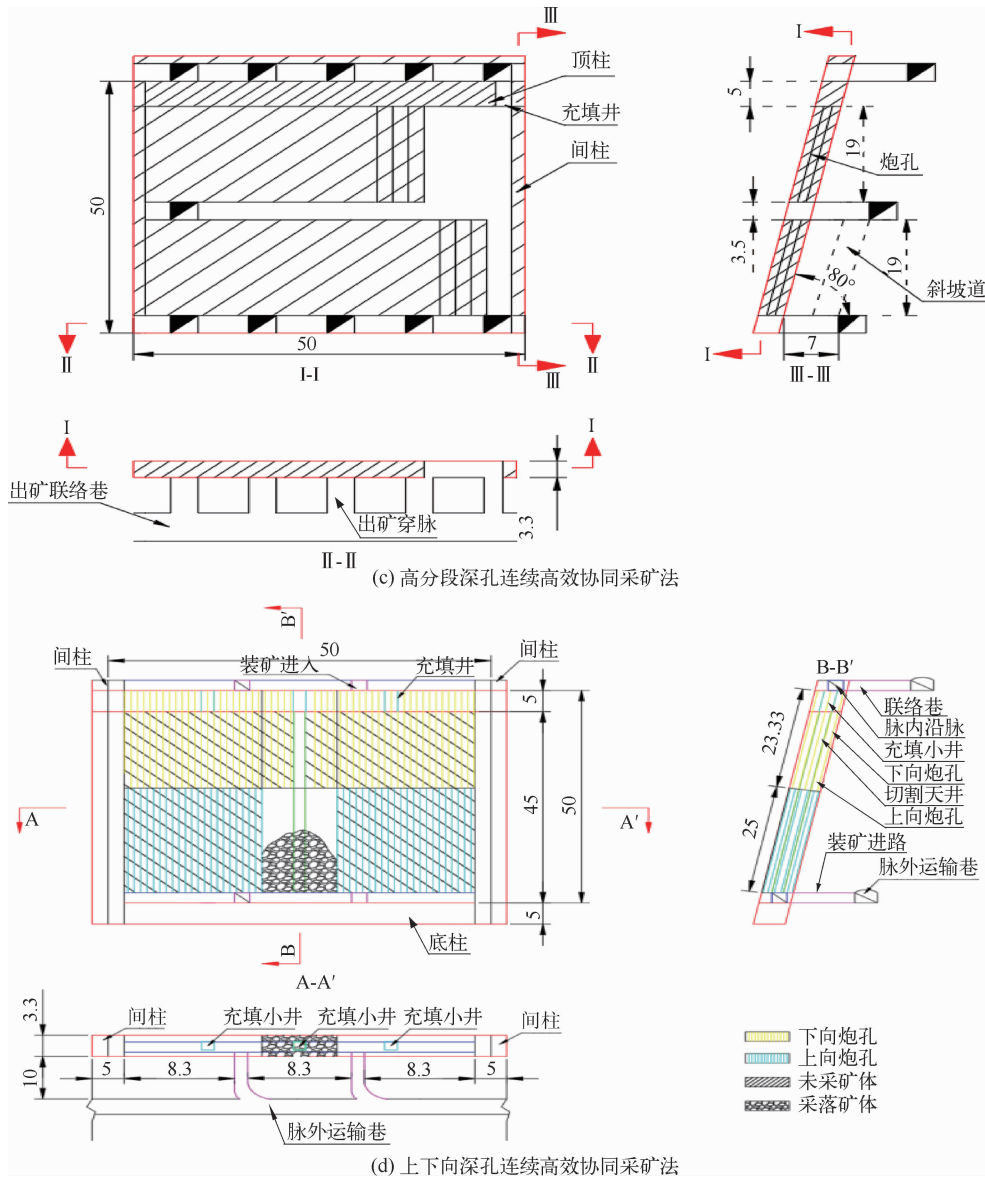


图 1 四种采矿方法设计图

Fig. 1 Design diagrams of four mining methods

1.3 AHP-TOPSIS 综合评价采矿方法

1.3.1 构建决策阶层结构

以拟选采矿方法的采切比、回采率、吨矿成本、每米崩矿量为指标,构建采矿方法优选层次结构(图 2)。

1.3.2 确立评价指标权重

1) 指标参数计算

以分段空场嗣后充填法(方法 B)为例,展示采切比、吨矿成本等指标的计算相关数据和结果(表 1),根据式(1)计算得该采矿方法采切比

($K_{采切}$)为 117.319 m^3/kt 。该采矿方法的吨矿成本约 106.927 元/吨,矿块回采率为 82.72%(表 2)。类似可得到其他方法的指标参数,4 种方法的指标参数见表 3。

$$K_{采切} = \frac{\sum V_{采切}}{T_{采切}} \times 1000(m^3/kt)。 \quad (1)$$

2) 计算相应权重

按照图 2 表示的层次结构模型,结合各采矿方法的指标参数(表 3),邀请 8 名相关领域专家,对拟优选采矿方法的 4 个指标进行两两比对打分

并赋分;建立上下层次之间的隶属关系,构造判断矩阵(表 4),并用“和积法”计算相应的权重,进行

一致性检验。最终获得矩阵 W(表 5),为第 3)部分 TOPSIS 排序中矩阵的计算提供数据。

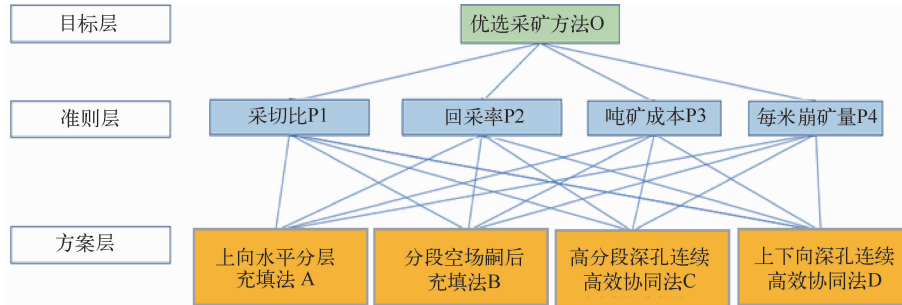


图 2 采矿方法优选层次结构

Fig. 2 Hierarchical structure for mining method optimization

表 1 方法 B 采切比、吨矿成本计算

Table 1 Cutting ratio and cost calculation for ton ore of method B

巷道	数量/条	宽/m	高/m	长/m	工程量	总计
人行通风运料天井	1	2.0	47	2.0	188.00 m ³	
切割天井	1	3.3	47	2.2	341.22 m ³	
凿岩巷	3	2.8	2.8	44	1 034.9 m ³	2 001.6 m ³
装矿进路	6	2.8	2.8	7.3	343.39 m ³	
联络巷	2	2.8	2.8	6.0	94.080 m ³	
可采矿石	1	3.3	47	44	17 061 t	17 061 t
采切比						117.319 m ³ /kt
吨矿成本						106.927 元/吨

表 2 方法 B 回采率计算

Table 2 Recovery rate calculation of method B

位置	数量	宽/m	高/m	长/m	资源量/t
间柱	2	3.3	47	3	2 326.5
底柱	1	3.3	3	50	1 237.5
矿房	1	3.3	47	44	17 061
回采率					82.72%

表 3 各方法指标参数

Table 3 Indicator parameters of several methods

采矿方法	采切比/(m ³ /kt)	回采率/%	吨矿成本/(元/吨)
上向水平分层干式充填采矿法	118.135	84.60	207.254
分段空场嗣后充填法	117.319	82.72	106.927
高分段深孔连续高效协同采矿法	81.819	82.80	92.728
上下向深孔连续高效协同采矿法	58.415	81.00	83.366

表4 判断矩阵 A-P 数值

Table 4 Judgment matrix A-P Value

准则 A	P1	P2	P3	P4
P1	1	2	1/3	1/3
P2	1/2	1	1/2	1/3
P3	3	2	1	1/2
P4	3	3	2	1

对所得判断矩阵按式(2)做归一化处理^[21]:

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{ik}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

归一化后的判断矩阵每列按行相加得到矩阵 \bar{W}_i , 再将 \bar{W}_i 正规化得到矩阵 W :

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$W = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

根据所得到的矩阵 W , 可计算判断矩阵最大特征根 λ_{\max} , 即:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = 4.144. \quad (5)$$

为检验判断矩阵的一致性, 需计算一致性指标 CI, 定义

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0483, \quad (6)$$

将 CI 与平均随机一致性指标 RI(4 阶矩阵 RI = 0.90) 进行比较, 记为 CR(一致性比率),

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.054 < 0.10. \quad (7)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性。

表5 层测总排序结果

Table 5 Hierarchical overall ranking result

准则 A	P1	P2	P3	P4	W
P1	1	2	1/3	1/3	0.156
P2	1/2	1	1/2	1/3	0.119
P3	3	2	1	1/2	0.285
P4	3	3	2	1	0.440

注: P_i 分别代表采切比、回采率、吨矿成本、每米崩矿量准则层因素; W 代表权重向量, 它反映了各个因素在整体决策中的相对重要性。

3) TOPSIS 排序

邀请 8 名专家对拟优选的 4 种采矿方法进行总体打分。设待评价项目为 m 个, 记为 A_1, A_2, \dots, A_m ; 待评价指标为 l 个, 记为 I_1, I_2, \dots, I_l 。建立的初始判断矩阵 Q (表 6)为

$$Q = (Z_{ij})_{m \times l}; \quad (8)$$

对初始矩阵标准化处理, 建立规范化矩阵 Q' :

$$z_{ij}^* = \frac{z_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l z_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, l; \quad (9)$$

$$Q' = (z_{ij}^*)_{m \times l}. \quad (10)$$

表6 专家指标打分

Table 6 Expert indicator scoring

采矿方法	P1 得分	P2 得分	P3 得分	P4 得分
A	65	85	62	74
B	68	80	68	80
C	75	80	78	85
D	85	78	85	90

将上述利用 AHP 法确定的权重乘以 Q' , 构造加权标准化矩阵 Q'' (表 7):

$$Q'' = W \times Q'. \quad (11)$$

表7 专家指标加权打分

Table 7 Expert indicator weighted scoring

采矿方法	P1 加权分	P2 加权分	P3 加权分	P4 加权分
A	10.142	10.114	17.695	32.528
B	10.610	9.519	19.408	35.166
C	11.703	9.519	22.262	37.363
D	13.269	9.281	24.260	39.561

计算正负理想解与贴近度, 对优选采矿方法计算评价结果并排序(表 8)。

正负理想解计算:

$$V^+ = \{(\max P'_{ij} | j \in J^+), (\min P'_{ij} | j \in J^-) | i = 1, 2, \dots, m\} = (V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+), \quad (12)$$

$$V^- = \{(\max P'_{ij} | j \in J^-), (\min P'_{ij} | j \in J^+) | i = 1, 2, \dots, m\} = (V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-), \quad (13)$$

其中, J^+ 是效益型指标,如采切比、回采率; J^- 是成本型指标,如吨矿成本、每米崩矿量。

计算样本指标与理想解之间的欧式距离和相对贴近度:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P'_{ij} - V_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ j = 1, 2, \dots, l; \quad (14)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P'_{ij} - V_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ j = 1, 2, \dots, l; \quad (15)$$

$$E_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (16)$$

式中: D_i^+ 、 D_i^- 为样本指标与正、负理想解的距离; V_j^+ 、 V_j^- 为第 j 个评价指标的正、负理想解; E_i 为贴近度, $E_i \in (0, 1)$, 当 $E_i = 1$ 时评价对象为正理想解, 当 $E_i = 0$ 时评价对象是负理想解。

表8 评价结果对比

Table 8 Evaluation result comparison

采矿方法	AHP-TOPSIS 模型评价方法			
	D_i^+	D_i^-	E_i	排序
A	0.092	0.067	0.444	4
B	0.064	0.054	0.448	3
C	0.152	0.134	0.454	2
D	0.234	0.203	0.544	1

1.3.3 评价结果分析

从判断矩阵(表5)可见,采矿方法优选指标的权重从大到小依次为:每米崩矿量(0.440)、吨矿成本(0.285)、采切比(0.156)、回采率(0.119),表明专家更重视高效低成本的采矿方法。根据评价结果对比(表8),2种模型评价方法得到的排序一致:上下向深孔连续高效协同采矿法(D)排第一,高分段深孔连续高效协同采矿法(C)排第二,分段空场嗣后充填法(B)排第三,上向水平分层充填采矿法(A)排第四,体现了模型评价结果的高度一致性。

通过 AHP-TOPSIS 模型计算,上下向深孔连续高效协同采矿法(D)为最优采矿方法,但其技术尚不成熟。因此,最终选择排序第二的高分

段深孔连续高效协同采矿法(C)为优选方法。该方法采场效率高,开采成本低,且人员与设备作业环境更安全,可满足铀矿井安全、经济和高效的开采要求。

2 采场结构参数优化

2.1 采场结构方案设计

基于高分段深孔连续高效协同采矿法,对某铀矿-200~-250 m 中段未采矿房进行稳定性分析和结构参数优化设计。拟确定3种间柱宽度和2种顶柱厚度,采用正交试验法设计方案,基于 FLAC3D 数值模拟手段,反复多次进行仿真试验,并对几组结构参数下的结果进行对比分析,具体方案设计见表9。

表9 采区参数优化方案

Table 9 Optimization plan for mining area parameters

方案	矿房顶柱/m	矿房间柱/m
方案1	5	4
方案2	5	6
方案3	5	8
方案4	7	4
方案5	7	6
方案6	7	8

2.2 模型构建及参数选择

2.2.1 模型构建

建立-200~-250 m 水平三维矿房模型,为便于分析计算,模型将岩体划分为围岩和矿岩两种岩性,矿体整体倾角约 80° 。模型尺寸(长×宽×高)为 $340 \text{ m} \times 175 \text{ m} \times 290 \text{ m}$,采场尺寸(长×宽×高)为 $50 \text{ m} \times 3.3 \text{ m} \times 50 \text{ m}$,巷道断面尺寸为 $3.3 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$,充填井直径为 2 m 。采区模型见图3。

2.2.2 边界条件

三维矿房模型全部采用实体单元模拟,假定岩土体材料破坏符合 Mohr-Coulomb 强度准则。计算模型采用的边界条件为:4个侧面限制水平移动,底面固定,模型上表面为自由边界,见图4。

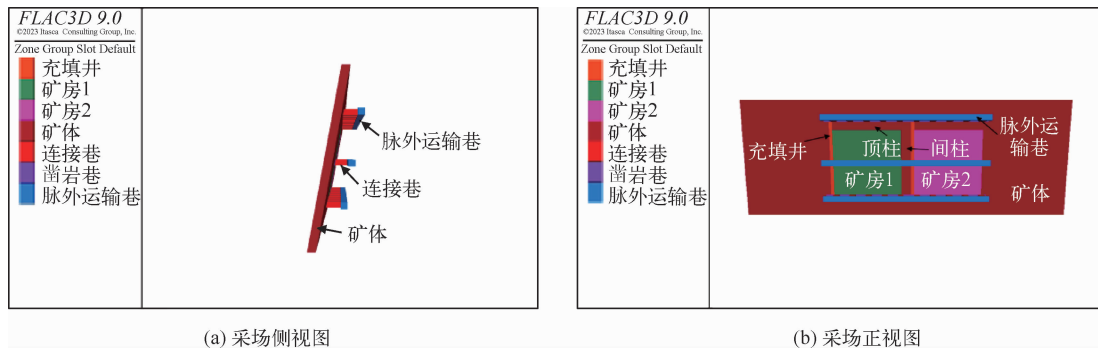


图 3 FLAC 采场模型示意图
Fig. 3 FLAC mining site model schematic

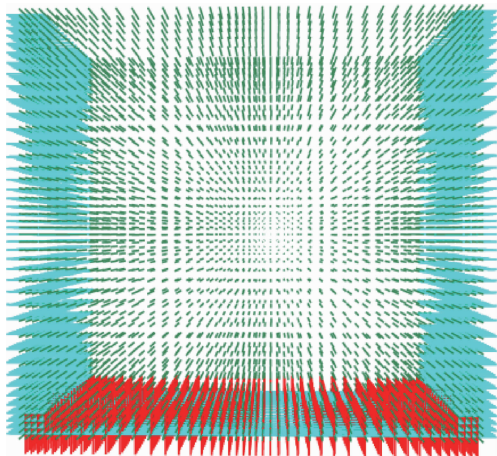


图 4 模型边界条件
Fig. 4 Model boundary conditions

2.2.3 模型物理力学参数

根据现场对岩体进行取样,并采用室内试验方法测量岩体的物理力学参数,利用 Hoek-Brown 折减公式计算得到各材料相关物理力学参数取值(表 10)。

表 10 数值模拟物理力学参数
Table 10 Numerical simulation physical and mechanical parameters

参数	岩体	
	矿岩	围岩
密度/(kg/m ³)	2 603	2 625
弹性模量/GPa	18.23	22.89
泊松比	0.226	0.233
抗拉强度/MPa	1.63	1.98
摩擦角/(°)	41	41
黏结力/MPa	0.9	1.0

2.2.4 监测点布置

随着开采工作的进行,需重点关注采区中关键部位(包括顶柱、间柱和脉外运输巷)的稳定性,应力过大、位移超限都会影响工作人员的安全。因此,在开采过程中必须对相关部位进行动态应力和位移监测。根据高分段深孔连续高效协同采矿法设计采场,分别在左右 2 个采场顶柱、中间间柱以及-250 m 水平脉外运输巷上方布置监测点(图 5),对其应力和位移变化规律进行分析。

根据测点布置情况,对每个测点进行命名。从矿房 1 上方顶柱开始布置 6 个顶柱测点,从左往右每隔 15 m 布置 1 个,测点编号 1#、2#、3#、4#、5#、6#;从间柱上方开始布置 3 个间柱测点,从上到下每隔 15 m 布置 1 个,测点编号 7#、8#、9#;在-250 m 水平脉外运输巷上方布置 6 个脉外运输巷测点,从矿房 1 开始从左到右每隔 15 m 布置 1 个,测点编号 10#、11#、12#、13#、14#、15#。

2.2.5 模拟工况设计

为模拟高分段深孔连续高效协同采矿法开采时的岩体风险性,优化采场结构参数,设计左右 2 个矿房,在分别开采矿房后,对矿房周围岩体的应力分布、位移变化及塑性区的分布情况进行分析。模拟采区主要构建有 2 个矿房,回采顺序为先开采矿房 1,待模型稳定后再开采矿房 2。

2.3 模型有效性验证

在进行矿房开采模拟之前,应进行初始地应力场平衡计算,并将位移、速度清零,模拟岩体自重引起的初始地应力(图 6)。z 向应力云图基本呈现均匀层状,z 向最大应力约为 21.8 MPa。竖向应力分布显示,模拟的初始地应力和理论值基本吻合。

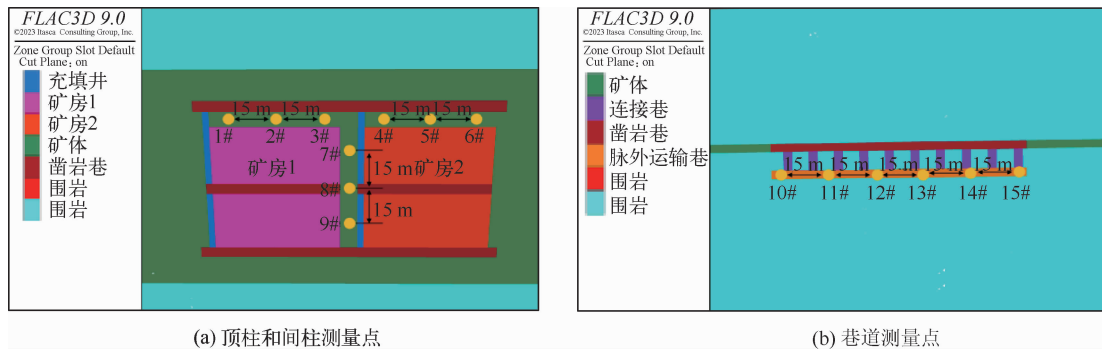


图 5 测量点布置示意图

Fig. 5 Measurement point arrangement

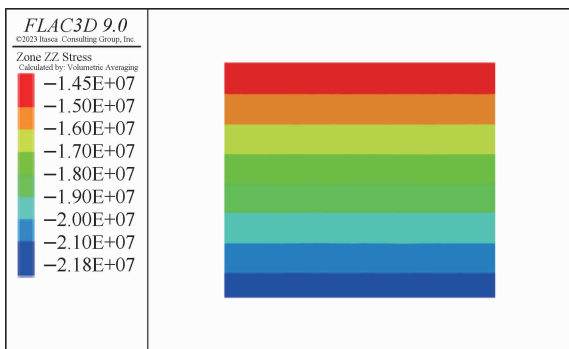


图 6 初始地应力场分布

Fig. 6 Initial in-situ stress field distribution

3 结果分析

3.1 不同方案模拟结果

在采场参数优化过程中,应在确保采场稳定的前提下最大化经济收益和矿产资源回收率。安全因素应涵盖影响采场稳定性的各类评估指标,如开采矿房顶柱最大拉应力和最大下沉、开采矿房上盘围岩最大竖向位移、间柱位移等指标。定量评估安全指标,以确定最佳采区参数。对表 8 中的 6 种方案进行模拟,从开挖后的数值模型中提取相关数据并汇总详细结果(表 11~表 14)。

表 11 矿房开采时采区拉应力结果

Table 11 Results of tensile stress in mining areas during mine extraction

方案	不同位置的拉应力/MPa				
	顶柱	间柱	脉外运输巷	上盘围岩	下盘围岩
方案 1	0	0	0.657	0.715	0.706
方案 2	0	0	0.253	0.480	0.473
方案 3	0	0	0.356	0.530	0.516
方案 4	0	0	0.253	0.480	0.473
方案 5	0.112	0.123	0.240	0.520	0.513
方案 6	0.025 3	0.028 6	0.320	0.630	0.604

表 12 矿房开采时采区压应力结果

Table 12 Results of compressive stress in mining areas during mine extraction

方案	不同位置的压应力/MPa				
	顶柱	间柱	脉外运输巷	上盘围岩	下盘围岩
方案 1	40.2	41.7	31.2	13.1	14.1
方案 2	37.3	36.2	38.2	12.3	13.5
方案 3	38.4	37.2	36.3	11.2	11.7
方案 4	44.6	43.4	35.0	12.5	12.8
方案 5	38.4	37.6	34.7	11.7	12.1
方案 6	36.9	35.4	35.4	11.5	11.9

表 13 矿房开采时采区最大位移计算结果

Table 13 Calculation results of maximum displacement in mining areas during mine extraction

方案	不同位置的最大位移/cm				
	顶柱	间柱	脉外运输巷	上盘围岩	下盘围岩
方案 1	1.23	2.5	1.95	4.71	4.96
方案 2	1.26	3.3	1.91	4.74	4.75
方案 3	1.85	2.3	1.80	4.38	4.63
方案 4	1.90	2.4	1.89	4.04	4.13
方案 5	1.80	2.5	1.84	4.54	4.75
方案 6	1.84	2.7	1.78	4.37	4.55

表 14 矿房开采时采区塑性区计算结果

Table 14 Calculation results of plastic zone in mining areas during mine extraction

方案	塑性区占比/%	方案	塑性区占比/%
方案 1	25.53	方案 4	27.35
方案 2	27.97	方案 5	22.52
方案 3	24.69	方案 6	25.15

分析可知,方案 1 在脉外运输巷、上盘和下盘围岩处拉应力和位移较大,最大位移达 5 cm;方案 2 在脉外运输巷压应力较高(约 39 MPa),且塑性区范围最大(27.98%);方案 4 在矿房顶柱和间柱处压应力超过 45 MPa,塑性区占比达 27.35%,存在较大的安全风险。因此,方案 1、方案 2 和方案 4 的采场结构参数存在安全隐患,方案 3、方案 5 和方案 6 的采场结构参数较为安全。

综合考虑矿山经济效益和矿产资源回收率,对方案 3、方案 5 和方案 6 的矿块损失量进行计

算。方案 3、方案 5、方案 6 的矿块损失量分别为 1 887.6 m³、1 890.9 m³ 和 2 151.6 m³。因此,综合安全因素和经济因素,方案 3(顶柱为 5 m,间柱为 8 m)为最优采场结构参数。

3.2 方案 3 岩体稳定性模拟分析

以方案 3 为例,展示该采场结构参数下的稳定性模拟结果。设置矿房顶柱为 5 m,间柱为 8 m,开采左右 2 个矿房,分析矿房顶柱、上下盘围岩、间柱和脉外运输巷的位移、应力和塑性区分布情况,探究不同采场结构参数下岩体的稳定性。

3.2.1 应力分析

1) 主应力云图

由方案 3 最大主应力、最小主应力云图(图 7~图 8)可看出,当 2 个矿房开采后,压应力主要集中在间柱中部及顶柱中间位置,最大压应力为 38.4 MPa,顶柱和间柱没有出现拉应力。从横剖面图看,最大压应力集中在采场上方顶柱处,最大压应力为 36.3 MPa;拉应力出现在上下盘围岩处,最大拉应力为 0.53 MPa。

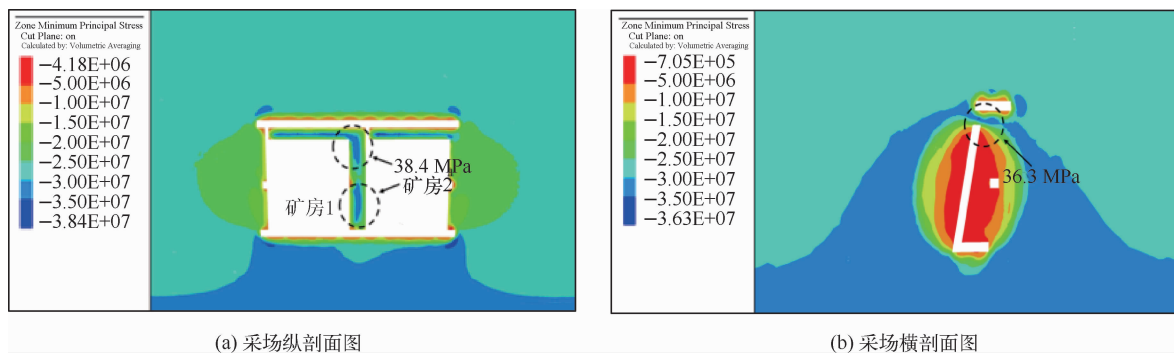


图 7 方案 3 最大主应力云图

Fig. 7 Scheme 3 minimum principal stress contour map

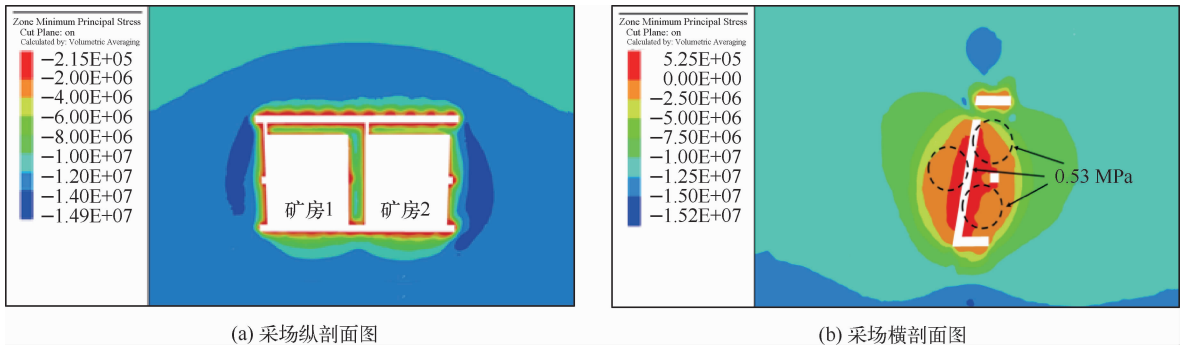


图 8 方案 3 最小主应力云图

Fig. 8 Scheme 3 maximum principal stress contour map

2) 顶柱应力

方案 3 顶柱应力监测见图 9。可以看出,在开挖矿房 1 和矿房 2 期间,顶柱没有出现拉应力;在开挖矿房 1 时,顶柱未出现拉应力,整体处于受压状态,最大压应力出现在顶柱左右两侧(1#和 3#监测点),范围为 33.0~35.8 MPa,整体压应力分布为 18.8~35.8 MPa;在开挖第 2 个矿房时,出现了短暂的应力减小现象,矿房 2 左侧(4#监测点)压应力显著增加,最大压应力位于矿房 1 和矿房 2 左侧(1#和 4#监测点),范围为 36.4~38.0 MPa;矿房稳定后,顶柱整体压应力稳定在 30.8~38.0 MPa。

3) 间柱应力

方案 3 间柱应力监测见图 10。可以看出,在开挖矿房 1、矿房 2 时,间柱没有拉应力;在开挖矿房 1 时,间柱底部(9#监测点)压应力最大,为 26.4 MPa,间柱上方(7#监测点)压应力最小,为 16.8 MPa,整体压应力为 16.8~26.4 MPa;在开挖矿房 2 时,间柱上侧(7#监测点)和下侧(9#监

测点)压应力先减小后增大,间柱上侧(7#监测点)压应力从 16.8 MPa 增加至 24.0 MPa,间柱下侧(9#监测点)从 26.4 MPa 增加至 33.1 MPa,中部(8#监测点)压应力减小,从 21.2 MPa 减小至 18.0 MPa。

4) 脉外运输巷应力

方案 3 脉外运输巷应力监测见图 11。脉外运输巷中部(13#监测点)和右侧(15#监测点),在开挖矿房 1 和矿房 2 期间都存在拉应力,最大拉应力为 0.3 MPa;在开挖矿房 2 时,最大拉应力增加至 0.65 MPa;在矿房 2 开挖稳定后最大拉应力位于右侧(14#监测点),为 0.3 MPa;在开挖矿房 1 时,巷道最大压应力为 1.4~4.4 MPa,在开挖矿房 2 时,压应力变小,稳定后压应力为 0.5~4.3 MPa。由应力监测点可以发现,顶柱上方压应力较大,不存在拉应力;间柱下侧在开挖矿房 2 后压应力增加较大,间柱不存在拉应力;脉外运输巷上方压应力较小,但需要注意矿房 2 的侧巷道顶柱存在拉应力。

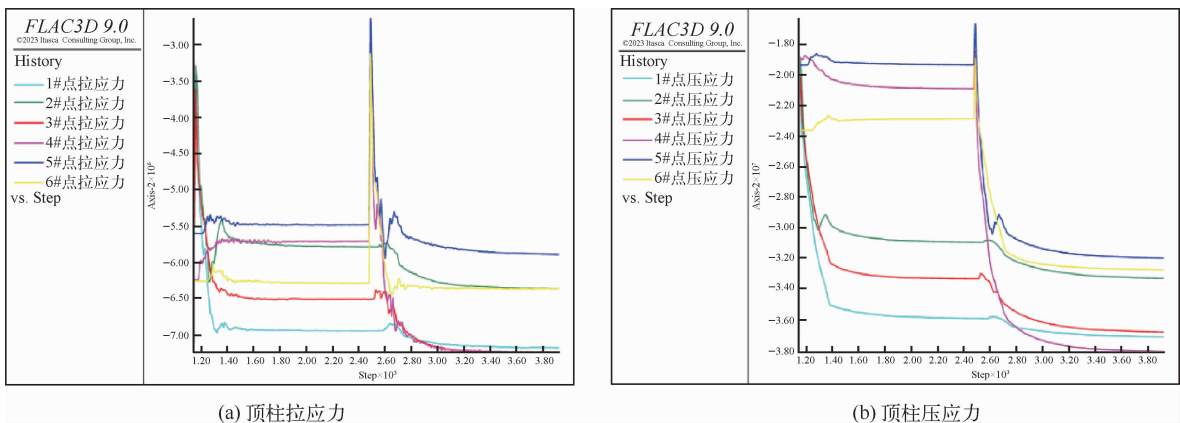


图 9 方案 3 顶柱应力监测

Fig. 9 Scheme 3 top column stress monitoring

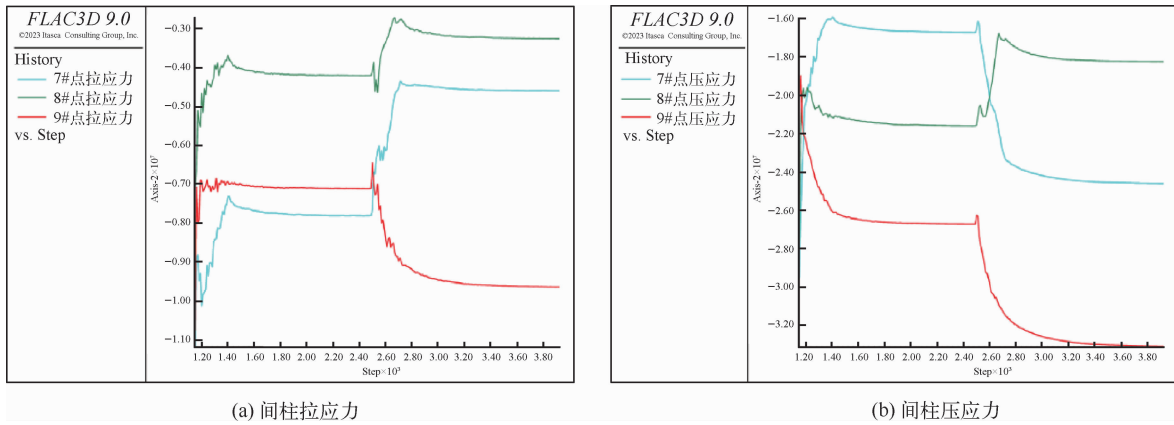


图 10 方案 3 间柱应力监测

Fig. 10 Monitoring of Inter-column Stress in Scheme 3

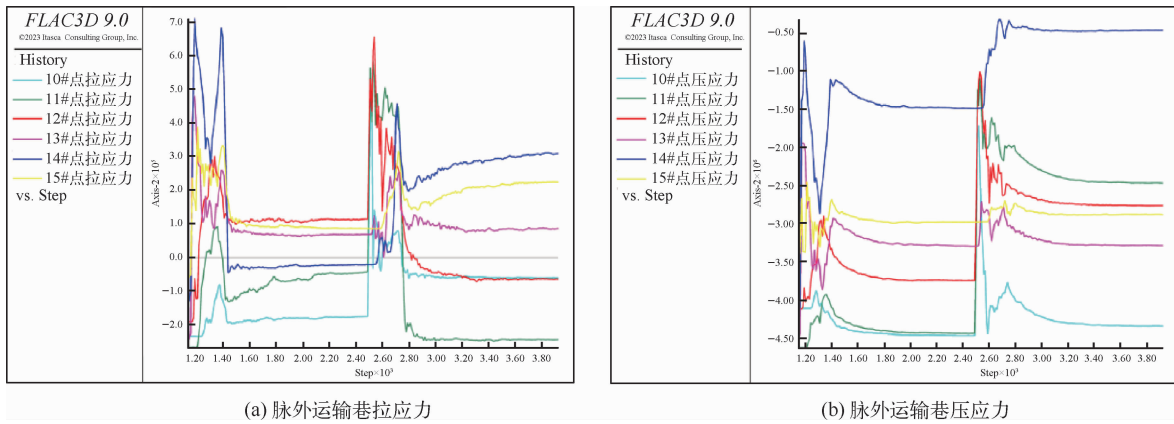


图 11 方案 3 脉外运输巷应力监测

Fig. 11 Scheme 3 stress monitoring of the outward transportation drift

3.2.2 塑性区分析

方案 3 采区塑性区情况见图 12。可以看出，矿房开挖过程中在矿房周围会出现剪切塑性破坏区，顶板中间出现剪切-拉伸复合塑性破坏区，间

柱中间存在未被破坏的区域，顶柱主要出现剪切塑性破坏区；从横剖面图看，塑性区影响范围在 22 m 以内，计算得到开采矿房塑性区占比为 24.69%。

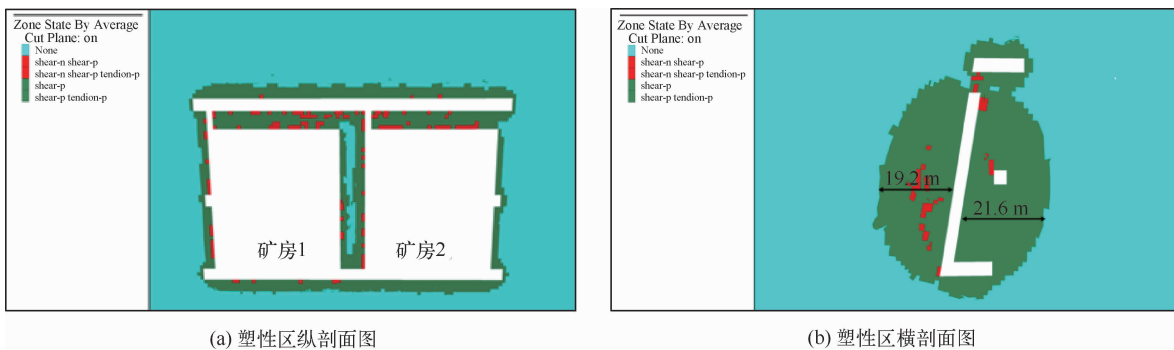


图 12 方案 3 采区塑性区情况

Fig. 12 Situation of the plastic zone in scheme 3 mining area

3.2.3 位移分析

方案3采区位移情况见图13。可以看出,开挖2个矿房后顶柱最大位移为1 cm,底板最大鼓起为2.03 cm,上方凿岩巷顶柱最大位移为1.85 cm,间柱最大位移为2 cm,矿房1左边位移

为3.41 cm,矿房2右边位移为2.96 cm,连接巷处位移为1.80 cm,上盘围岩位移为4.38 cm,下盘围岩位移为4.63 cm。由此可得,在开挖矿房时监测点整体位移较小,不存在大变形,满足正常生产要求。

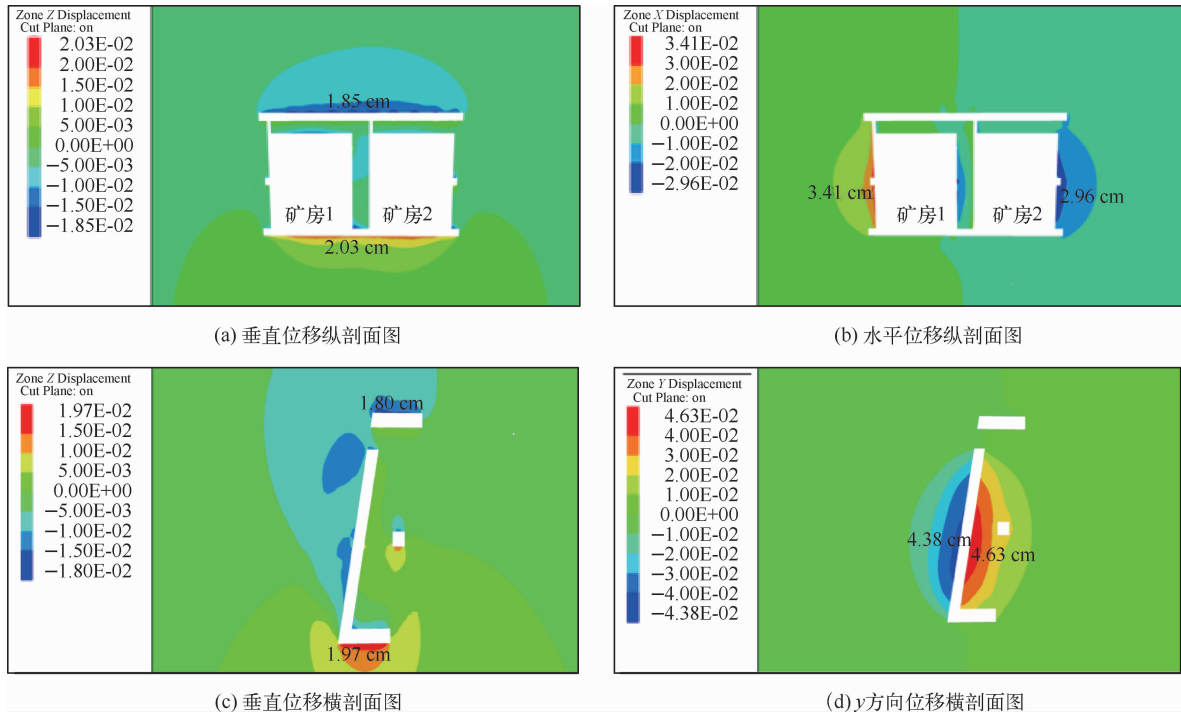


图13 方案3采区位移情况

Fig. 13 Scheme 3 displacement situation of the mining area

4 结论

1) 针对某铀矿山赋存条件及矿山生产需求。基于 AHP-TOPSIS 模型对采矿方法进行综合评估,从技术成熟度、经济性和安全性等维度进行对比分析,最终确定高分段深孔连续高效协同采矿法为优选方法。

2) 采用 FLAC3D 数值模拟,设计多组采场结构参数优化方案,通过对比分析各方案的应力场、位移场及塑性区分布,结合安全性和经济性指标,确定高分段深孔连续高效协同采矿法的最优采场结构参数为:顶柱厚度 5 m,间柱厚度 8 m。

3) 在优选采矿方法及采场结构参数下,矿房开采后压应力主要集中于间柱中部及顶柱中部,最大压应力为 38.4 MPa;拉应力分布于上下

盘围岩,最大拉应力为 0.53 MPa。监测点整体位移较小,未出现大变形,满足正常生产要求,开采矿房塑性区占比为 24.69%。经济性分析显示,方案3的矿块损失量为 1 887.6 m³。

参考文献:

- [1] 秦旭忠,孙刚友,侯志永,等.棉花坑矿井破碎矿体回采方案研究[J].铀矿冶,2024,43(3):25-34.
QIN Xuzhong, SUN Gangyou, HOU Zhiyong, et al. Research on stoping scheme of broken orebody in mianhuakeng mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3): 25-34 (in Chinese).
- [2] 臧传伟,席俊辉,周立超,等.卧虎山铁矿开采方法选择及采场结构参数优化[J].金属矿山,2016(1): 51-55.
ZANG Chuanwei, XI Junhui, ZHOU Lichao, et al.

- Selection of mining method and optimization of stope structure parameters in Wohushan iron ore [J]. *Metal Mine*, 2016(1):51-55(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 苗胜军,王子木,刘亚运,等.基于层次分析法的采矿方法模糊评价模型及应用[J].矿业研究与开发,2017,37(6):66-69.
MIAO Shengjun, WANG Zimu, LIU Yayun, et al. Fuzzy evaluation model of mining methods and its application based on AHP[J]. *Mining Research and Development*, 2017, 37(6):66-69 (in Chinese).
- [5] 郭进平,王小林,李明.四方金矿采矿方法的AHP-TOPSIS评判模型法优选[J].金属矿山,2017(1):51-55.
GUO Jinpin, WANG Xiaolin, LI Ming. Mining method optimization based on AHP-TOPSIS evaluation model in Sifang gold mine[J]. *Metal Mine*, 2017(1):51-55(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 李真,褚洪涛.基于模糊数学的柿竹园矿采矿方法优选[J].矿业研究与开发,2015,35(8):5-8.
LI Zhen, CHU Hongtao. Optimization of mining methods based on fuzzy mathematics in Shizhuyuan mine[J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(8):5-8(in Chinese).
- [8] 李成龙,王贻明,张纯锋,等.基于三维离散裂隙网络的采场结构参数优化[J].金属矿山,2024(11):20-27.
LI Chenglong, WANG Yiming, ZHANG Chunfeng, et al. Stope structure parameter optimization based on three-dimensional discrete fracture network [J]. *Metal Mine*, 2024(11):20-27 (in Chinese).
- [9] 黄世顶,刘尧,邓红卫,等.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):10-18.
HUANG Shiding, LIU Yao, DENG Hongwei, et al. Optimization of stope structure parameters based on modified Mathews stability diagram method and FLAC3D [J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(4):10-18 (in Chinese).
- [10] 陈霖,黄明清,唐绍辉,等.大直径深孔空场嗣后充填法采场结构参数优化及稳定性分析[J].金属矿山,2022(11):44-51.
CHEN Lin, HUANG Mingqing, TANG Shaohui, et al. Optimization and stability analysis of stope structure parameters of large-diameter deep hole open stoping with subsequent filling [J]. *Metal Mine*, 2022(11):44-51 (in Chinese).
- [11] 段泽锋,黄德镛,贾子月,等.某铅锌矿分段凿岩阶段矿房法采场稳定性研究[J].矿业研究与开发,2025,45(1):71-78.
DUAN Zefeng, HUANG Deyong, JIA Ziyue, et al. Study on stope stability in a lead-zinc mine mined by sublevel rock-cutting stage room method [J]. *Mining Research and Development*, 2025, 45(1):71-78 (in Chinese).
- [12] 李加州,马俊杰.基于AHP-TOPSIS模型的某矿采场结构参数优选[J].金属矿山,2023(8):189-195.
LI Jiazhou, MA Junjie. Optimization of stope structure parameters based on AHP-TOPSIS model of a mine [J]. *Metal Mine*, 2023(8):189-195 (in Chinese).
- [13] 邹雄刚,张耀平,熊伟,等.基于AHP-TOPSIS评判模型的采场结构参数优选研究[J].矿业研究与开发,2016,36(11):1-5.
ZOU Xionggang, ZHANG Yaoping, XIONG Wei, et al. Optimization research on structure parameters of stope based on AHP and TOPSIS evaluation model [J]. *Mining Research and Development*, 2016, 36(11):1-5(in Chinese).
- [14] 谢国森,罗春梧,宋丽霞,等.棉花坑矿床破碎矿体深孔连续采矿工艺研究[J].铀矿冶,2022,41(4):394-400.
XIE Guosen, LUO Chunwu, SONG Lixia, et al. Study on deep hole continuous mining technology of broken ore body in Mianhuakeng deposit [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2022, 41(4):394-400(in Chinese).
- [15] 聂兴信,甘泉,娄一博,等.基于协同开采理念的急倾斜薄矿脉群集群连续化回采工艺研究[J].金属矿山,2019(9):28-33.

- NIE Xingxin, GAN Quan, LOU Yibo, et al. Study of cluster continuous mining method with steeply inclined thin ore groups based on synergistic mining theory [J]. *Metal Mine*, 2019(9):28-33(in Chinese).
- [16] 杨建国,陈俊宇,周兴晖,等.断裂构造带内急倾斜薄矿脉安全高效充填采矿方法研究[J].*黄金*, 2023,44(11):5-11.
- YANG Jianguo, CHEN Junyu, ZHOU Xinghui, et al. Safe and efficient backfill mining method of steeply inclined thin ore veins in faulted structural zone[J]. *Gold*, 2023,44(11):5-11(in Chinese).
- [17] 王泽江,邵磊昌,李秦,等.地下铀矿开采方法的数值模拟技术研究[J].*铀矿冶*, 2017,36(2):73-80.
- WANG Zejiang, SHAO Leichang, LI Qin, et al. Study on numerical modeling technology for underground mining method [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2017,36(2):73-80(in Chinese).
- [18] 张文方,王文丽,王春.马子冲锰矿急倾斜极薄矿脉采矿方法研究[J].*金属矿山*, 2017(5):33-37.
- ZHANG Wenfang, WANG Wenli, WANG Chun. Study on the mining method of steeply inclined and extremely thin ore vein in Mazichong manganese mine[J]. *Metal Mine*, 2017(5):33-37(in Chinese).
- [19] 姚泽春,杨红军,刘盛,等.急倾斜薄矿脉机械化采矿方案优选及应用[J].*现代矿业*, 2023,39(6):129-132.
- YAO Zechun, YANG Hongjun, LIU Sheng, et al. Optimization and application of mechanized mining scheme for steeply inclined thin vein[J]. *Modern Mining*, 2023,39(6):129-132(in Chinese).
- [20] 安龙,徐帅,李元辉,等.急倾斜薄矿脉深孔落矿工艺参数优化[J].*东北大学学报(自然科学版)*, 2013,34(2):288-292.
- AN Long, XU Shuai, LI Yuanhui, et al. Deep hole blasting parameters optimization for steeply inclined thin vein [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2013,34(2):288-292(in Chinese).
- [21] 张毅,刘勇,江成玉,等.基于AHP-TOPSIS法综合评判的保护层开采选择[J].*中国安全生产科学技术*, 2021,17(6):65-71.
- ZHANG Yi, LIU Yong, JIANG Chengyu, et al. Selection of protective layer mining based on comprehensive evaluation of AHP-TOPSIS method [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021,17(6):65-71(in Chinese).

Mining Methods and Structural Parameter Optimization for Steeply Inclined Thin Ore Veins Based on AHP-TOPSIS

WANG Tao, SUN Gangyou, YANG Jiangkun, REN Sai

(China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: As the mining depth of a uranium mine continues to increase, the ore body shows a trend of decreasing thickness and increasing inclination angle. This paper focuses on the steeply inclined thin ore veins of the uranium mine, utilizing the AHP-TOPSIS method for comparative analysis of different mining methods, and proposes a high-segment continuous efficient collaborative mining method suitable for the thin ore veins in this mine. Based on this, the numerical analysis is conducted using FLAC3D to examine different structural parameter schemes of the stope, analyzing the stress field, displacement field, and distribution characteristics of the plastic zone during the mining process, ultimately acquiring the optimal stope structural parameters. The results indicate that: no tensile stress was observed in the top and intermediary pillars in scheme 1 to 4, while a small amount of tensile stress occurred in schemes 5 and 6; the proportion of the plastic zone varies from 22.52% to 27.98% across scheme 1 to 6, with scheme 3 demonstrating better stability. Considering both safety and economic factors, the optimal stope structural parameters are determined to be a top pillar height of 5 m and an intermediary pillar width of 8 m (scheme 3).

Key words: uranium mine; steeply inclined thin ore veins; AHP-TOPSIS method; mining face structural parameters; stability; FLAC3D