急倾斜薄矿体近井筒采区回采方案优化与井筒稳定性分析*

朱青凌[1,2,3],王亚军[4,5],仵锋锋[1,2,3],张庆嵩[4,5]

(1.低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 上杭县 364204;
2.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭县 364204;
3.紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南 长沙 410017;
4.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
5.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:为实现急倾斜薄矿体近井筒区域的安全回采,以某急倾斜薄金矿为工程背景,结合矿山地质条件初步筛选出适用的采矿方法,并运用层次分析法与模糊决策理论对初选方案进行优选。采用FLAC3D数值模拟,分析了新增可采的近井筒区域回采过程中的井筒稳定性。结果表明:上向进路充填采矿法为井筒保安矿柱新圈定区域的最优回采方案;相较于上行式回采,下行式回采使采场最大不平衡力极值降低15%~20%,有效缓解了矿体的局部应力集中,有助于抑制地压活动和控制竖井位移;优化后的回采顺序通过逐步释放应力,为采场创造了良好的应力环境;充填体发挥了关键支撑作用,二者协同作用显著提升了采场的整体稳定性,并有效抑制了岩体破坏与扩展;竖井现场监测结果表明,采用下行式回采方案后,主竖井的最大压缩变形量为0.049 mm/m,盲竖井的最大拉伸变形量为0.151 mm/m,均满足安全规程要求(2.0 mm/m)。现场工业试验结果表明,上向进路充填采矿法兼具良好的安全性与经济效益,资源回采率提高至95%,实现了安全、效益与资源回收的协同优化。

关键词:保安矿柱;急倾斜薄矿体;井筒稳定性;回采方案优化;回采顺序;数值模拟

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0075-12

Optimization of Mining Scheme and Shaft Stability Analysis in Near-Shaft Mining Area of Steeply Inclined Thin Orebody

Zhu Qingling[1,2,3], *Wang Yajun*[4,5], *Wu Fengfeng*[1,2,3], *Zhang Qingsong*[4,5]

(1.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores, Shanghang, Fujian 364204, China;
2.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364204, China;
3.Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410017, China;
4.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
5.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To achieve safe mining in the near-shaft area of steeply inclined thin orebody, a steeply inclined thin gold mine was taken as the engineering background. Combined with the geological conditions of the mine, the applicable mining method was preliminarily selected, and the primary selection scheme was optimized by using the analytic hierarchy process and fuzzy decision theory. FLAC3D numerical simulation was used to analyze the shaft stability during the mining process in the newly added recoverable near-shaft area. The results show that the upward drift filling mining method is the optimal mining scheme for the newly delineated area of the shaft safety pillar. Compared with ascending mining, descending mining reduces the extreme value of the maximum unbalanced force in the stope by 15%-20%, effectively alleviates the local stress concentration in the ore body, and helps restrain ground pressure activities and control shaft displacement. The optimized mining sequence gradually releases stress and creates a favorable stress environment for the stope. The filling body plays a key supporting role, and their synergistic effect significantly enhances the overall stability of the stope and effectively inhibits rock mass failure and propagation. The on-site monitoring results of the shaft indicate that after adopting the descending mining scheme, the maximum compressive deformation of the main shaft is 0.049 mm/m, and the maximum tensile deformation of the blind shaft is 0.151 mm/m, both values meet the requirements specified in safety regulations (2.0 mm/m). The field industrial test results

* **收稿日期**:2025-09-01
基金项目:西藏自治区科技计划项目(XZ202502ZY0018-02);深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003804)
作者简介:朱青凌(1985—),男,湖南洪江人,硕士,高级工程师,主要从事矿山安全开采技术方面研究工作。Email:312426698@qq.com

show that the upward drift filling mining method has good safety and economic benefits, the resource recovery rate is increased to 95%, realizing the coordinated optimization of safety, economic benefit and resource recovery.

Key words: Safety pillar, Steeply inclined thin orebody, Shaft stability, Mining scheme optimization, Mining sequence, Numerical simulation

0 引言

在矿山开采过程中,井筒围岩的稳定性直接关系到矿山的安全生产与长期稳定运行。急倾斜薄矿体近井筒区域开采具有矿体赋存条件复杂、地压活动剧烈及井筒围岩稳定性敏感等特点,面临安全风险高与开采效率低的双重挑战[1]。若采矿方法选择不当,易诱发应力重分布失衡,导致井筒位移超限与岩体破坏扩展,严重威胁矿山安全生产[2-3]。

采矿方法的选择始终是矿山开采设计的核心环节,传统方法通常依赖技术经济指标进行定性对比分析。然而,随着多目标决策理论的发展,多种定量决策方法逐步被引入到采矿方案优化中,实现了采矿方法的科学系统选择[4-7]。梅林芳等[8]将采矿方案优化视为典型的模糊决策问题,结合模糊数学理论进行综合评价,优选出最佳采矿方案,并进一步通过数值模拟方法优化了采场结构参数。邓龙鑫等[9]基于博弈论原理,提出将主客观权重相结合,形成综合权重,构建了基于博弈论的主客观组合权重TOPSIS采矿方法优选模型,实现了姑山露天铁矿驻留矿体的采矿方法优化。张居正等[10]采用逼近理想解的排序法对不同采矿方法的指标进行量化,建立了通过矩阵计算得到的正理想解的欧氏距离,根据贴合度确定采矿方法的优劣排序,最后通过数值模拟验证了最优采矿方案。上述方法通过量化各决策目标的权重与优先级,实现了多目标的综合权衡,为采矿方法的科学选择提供了精准的决策支持。

在开采稳定性控制方面,众多学者通过数值模拟方法揭示了不同回采顺序对采场稳定性的影响规律。孟凡明等[11]采用ANSYS软件构建矿区三维模型,结合FLAC3D进行模拟分析,探讨了不同隔离层厚度条件下第四系底部围岩稳定性特征与地表沉陷规律,优化了矿块回采顺序,为马郡城铁矿矿区东南角的安全高效开采提供了重要的理论支撑。黄德镛等[12]通过回采方案与复杂采空区稳定性分析,提出了矿柱最优回采方案与回采顺序。朱建国等[13]通过数值模拟研究了采场长度、相邻采场开采时应控制的安全距离及回采顺序,为采矿工程实践提供了重要的参数参考。

本研究以某急倾斜薄矿体新增近井筒可采区域为研究对象,结合矿山地质条件与采矿方法适用性,构建层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与模糊决策理论融合的多目标评价模型;采用FLAC3D数值模拟揭示回采过程中的应力-位移演化规律,并通过下行式回采顺序优化与充填体协同支护效应分析,提出兼顾安全、效率与资源集约化的最优开采方案。研究结果可为同类型矿山井筒保安矿柱安全回采与围岩稳定性控制提供工程参考。

1 工程背景

在某急倾斜薄金矿的13号与32号矿体开采中,采用主竖井与盲竖井两种井筒布置方式。主竖井布置于矿体上盘,盲竖井布置于矿体下盘。为保障主竖井安全,井口处依据岩石移动角65°设立了保安矿柱。根据现有的保安矿柱圈定范围,13号和32号矿体在此范围内的资源矿藏储量较大,但受到保安矿柱限制,大部分资源无法有效回采,进而影响矿山的生产持续与可持续发展。为避免资源浪费,矿山通过专项技术论证,将保安矿柱圈定的岩石移动角优化至75°,成功释放了大量可采矿量(见图1)。

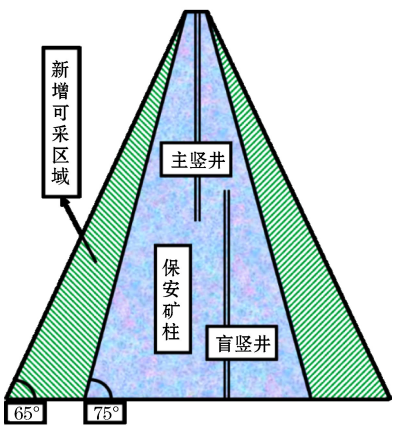


图1 优化保安矿柱后新增的可采区域

Fig.1 New recoverable area after optimizing the safety pillar

目前,矿山在采矿方法选择上,对于倾角大于50°的矿体采用浅孔留矿法;对于倾角小于50°的矿体采用留矿全面采矿法。然而,新增开采区域紧邻井筒,现有回采方案无法满足该区域的安全生产需求。因此,亟须对回采方案进行优化与井筒稳定性的评估研究,以保障矿山安全生产,并为井筒保安矿

柱的安全回采提供技术支持和理论依据。

2 井筒保安矿柱新圈定可采区域回采方案论证

2.1 采矿方法的初步选择

针对井筒保安矿柱新圈定可采区域薄矿脉形态及地表与井筒安全保护的严格要求,所选采矿方法需具备扰动强度低、安全可靠性高的特点,初步筛选出上向水平分层充填采矿法、上向进路充填采矿法及薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法 3 种方案进行综合比选。3 种方法均以充填采矿工艺为核心,能够有效控制采空区围岩变形,满足井筒稳定性保护的核心要求。同时,各方案在工艺成熟度、矿体适应性、生产能力与开采效率等方面各有侧重,构成了一套兼顾安全、适应性与效率的比选方案体系,为后续的综合量化评价提供了合理基础。

2.1.1 上向水平分层充填采矿法

该采矿方法是在中段高度基础上划分为多个分层,分层之间自下而上依次回采。作业面位于下分层的充填体之上,顶板为矿体原岩。采准工程包括天井联络道、人行天井、出矿穿脉、充填回风井(兼顺路溜井),无需切割工程。采准工程中仅人行天井全部布置在脉内,出矿穿脉部分位于脉内,其他工程均布置在脉外。上向水平分层充填采矿法采场沿矿体走向布置,采场长度 50 m,采场高度 40 m,底柱高度 3 m,不设顶柱与间柱。当矿体厚度>1.2 m 时,矿房宽度等于矿体水平厚度;当矿体厚度≤1.2 m 时,矿房宽度取 1.2 m,本次设计矿体厚度按 4 m 考虑。上向水平分层充填采矿法标准方案如图 2 所示。

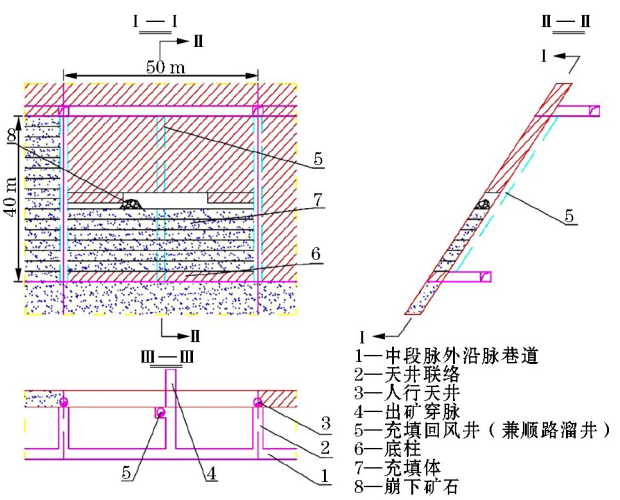


图 2 上向水平分层充填采矿法标准方案

Fig.2 Standard scheme of upward horizontal slicing and filling mining method

2.1.2 上向进路充填采矿法

该采矿方法同样在中段高度基础上划分多个分层,分层之间由下向上依次回采。作业面位于下分层充填体之上,进路顶板为矿体原岩。采准工程包括天井联络道、人行天井及充填回风井,不设切割工程。采准工程中仅人行天井全部布置在脉内,其余工程均布置在脉外。上向进路充填采矿法采场沿矿体走向布置,采场长度 50 m,采场高度 40 m,不设顶柱、底柱和间柱。一般当矿体厚度>1.2 m 时,矿房宽度为矿体水平厚度;当矿体厚度≤1.2 m 时,矿房宽度为 1.2 m,本次矿体厚度按 4 m 设计。分层高度为 3.5 m。上向进路充填采矿法标准方案如图 3 所示。

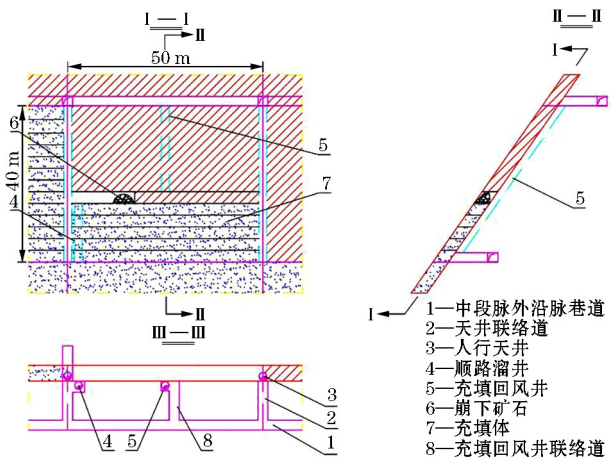


图 3 上向进路充填采矿法标准方案

Fig.3 Standard scheme of upward drift filling mining method

2.1.3 薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法

薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法采场沿矿体走向布置,采场长度 50 m,采场高度 40 m,采场宽度按 4 m 设计,留设 4 m 厚顶柱与 6 m 宽的采场间柱,分段高度 12 m。采准工程包括天井联络道、人行通风井、出矿进路及分段凿岩巷道,切割工程包括切割天井和切割横巷。从采场中段脉外沿脉巷道每隔 10 m 掘进出矿进路贯穿采场,在采场间柱位置布置人行通风井,并与各分段凿岩巷贯通,巷道工程应根据围岩稳固情况采取相应的支护措施,不稳固时采用喷锚支护,锚杆网度为 1.5 m×1.5 m,喷射混凝土厚度为 50 mm,局部破碎位置增设支木支柱或液压支柱支撑,遇破碎或构造贯穿区域,采用钢支架支护形式。薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法标准方案如图 4 所示。

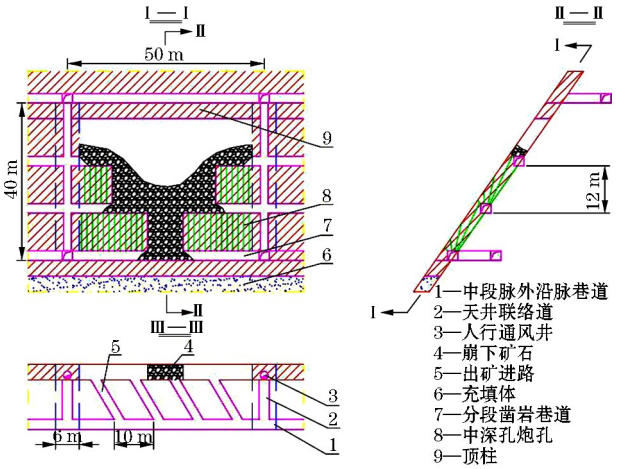


图 4 薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法标准方案

Fig.4 Standard scheme of sublevel rock drilling stage open stoping with subsequent filling mining method for thin veins

2.1.4 三种采矿方法的主要技术经济指标及优缺点对比

各采矿方案优缺点对比分析结果见表 1。由表 1 可知,方案Ⅰ采准系统简单、工程量较少、作业较为安全,但对矿体适用性较差,损失率波动较大,生产能力较小;方案Ⅱ对矿体适用性强、贫损指标优、各工序相互干扰少,但分层前期回采在独头巷道中进行,通风条件较差,生产能力较小;方案Ⅲ生产能力大、效率高、综合开采成本相对较低,但对矿体适用性较差、贫损指标高、采切工程量比高,且在薄矿脉开采中综合成本优势不明显。

表 1 各采矿方案优缺点对比分析

Table 1 Comparative analysis of the advantages and disadvantages of each mining schemes

方案	优点	缺点
方案Ⅰ:上向水平分层充填采矿法	1.作业安全; 2.采准系统简单,工程量相对较少; 3.各工序相互干扰少。	1.对矿体适应性较差,损失率波动较大; 2.生产能力较小; 3.施工组织管理难度较大。
方案Ⅱ:上向进路充填采矿法	1.作业安全; 2.对矿体适用性强,应变能力大; 3.损失、贫化率低; 4.采准系统简单,工程量相对较少; 5.各工序相互干扰少。	1.分层前期回采在独头巷道中进行,通风条件较差; 2.生产能力较小。
方案Ⅲ:薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法	1.生产能力大,生产效率高; 2.采矿成本相对较低; 3.回采工艺相对简单,安全可靠。	1.对矿体的适应性较差; 2.贫化率和损失率高; 3.采切比高; 4.在薄矿脉开采中综合成本优势不明显。

总体而言,针对井筒保安矿柱新圈定可采区域的特殊开采技术条件,上述 3 种采矿方法在安全性、适应性和效率方面各具优劣,技术经济指标也有所不同,仅凭单因素定性分析或简单指标对比难以科学优选最佳方案。为克服传统决策方法的局限性,本研究采用模糊综合评判与经济效益分析相结合的方法,将定性与定量指标统一纳入多因素综合量化评估体系,以期安全、高效地确定该区域矿体的最优开采工艺[14]。

2.2 采矿方法模糊综合评判

2.2.1 模糊综合评判法

采矿方法优选受多因素耦合作用影响,各因素的重要程度存在差异,且随矿山条件不同而动态变化,因此需结合工程实际确定各因素的权重。为降低专家评议法的主观偏差,本文采用层次分析法确定各评价指标权重。该方法首先构建层次结构模型,明确因素间的隶属关系,模型结构如图 5 所示。

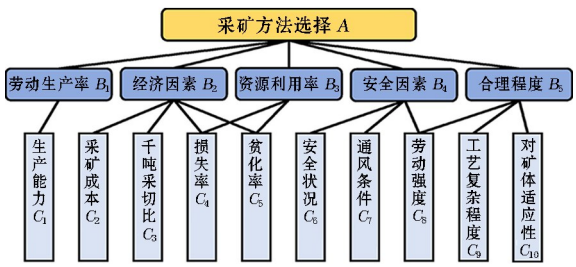


图 5 采矿方案选择层次结构模型

Fig.5 Hierarchical structure model of mining scheme selection

针对每一分层的各评价因素,采用 1～9 标度法进行两两比较,依据因素的相对重要性构建判断矩阵。判断矩阵的具体标度及其含义见表 2。

表 2 判断矩阵标度及其含义

Table 2 Judgment matrix scale and its meaning

标度	含义
1	两因素相比,具有同等重要性。
3	两因素相比,一因素比另一因素稍微重要。
5	两因素相比,一因素比另一因素明显重要。
7	两因素相比,一因素比另一因素强烈重要。
9	两因素相比,一因素比另一因素极端重要。
2,4,6,8	上述两相邻判断的中间值
倒数	因素 i 与因素 j 比为 C_{ij},因素 j 与因素 i 比为 $C_{ji}=1/C_{ij}$。

基于采矿方案优选层次结构模型,构建各层级判断矩阵如下。

(1) 判断矩阵 $\boldsymbol{A}$。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 & 1/7 & 3 \\ 5 & 1 & 3 & 1/5 & 6 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1/7 & 4 \\ 7 & 5 & 7 & 1 & 7 \\ 1/3 & 1/6 & 1/4 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

(2) 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_1$。

$$\boldsymbol{B}_1=[1] \tag{2}$$

(3) 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_2$。

$$\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}1 & 3 & 3 & 5\\ 1/3 & 1 & 1 & 3\\ 1/3 & 1 & 1 & 3\\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1\end{bmatrix} \tag{3}$$

(4) 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_3$。

$$\boldsymbol{B}_3=\begin{bmatrix}1 & 1/3\\ 1/3 & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

(5) 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_4$。

$$\boldsymbol{B}_4=\begin{bmatrix}1 & 5 & 7\\ 1/5 & 1 & 3\\ 1/7 & 1/3 & 1\end{bmatrix} \tag{5}$$

(6) 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_5$。

$$\boldsymbol{B}_5=\begin{bmatrix}1 & 3 & 1/3\\ 1/3 & 1 & 1/5\\ 3 & 5 & 1\end{bmatrix} \tag{6}$$

采用方根法计算每层中各因素的权重值,见式(7)。

$$w_i=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}(i,j=1,2,3,\cdots,n) \tag{7}$$

式中:w_i 为第 i 个评价因子的权重值;a_{ij} 为第 i 个评价因子相对于第 j 个评价因子的重要度;n 为判断矩阵的阶数。

经式(7)计算得到各层级因子相对权重,并将得出矩阵权重值经归一化处理,得到 $w_{\boldsymbol{A}}=(0.062,0.226,0.113,0.562,0.037)$、$w_{\boldsymbol{B}_1}=(1.0)$、$w_{\boldsymbol{B}_2}=(0.520,0.201,0.201,0.078)$、$w_{\boldsymbol{B}_3}=(0.750,0.250)$、$w_{\boldsymbol{B}_4}=(0.731,0.188,0.081)$、$w_{\boldsymbol{B}_5}=(0.258,0.105,0.637)$。则 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6、C_7、C_8、C_9、C_{10} 各因素对目标层的总排序权重值为:$w=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=(0.062,0.118,0.045,0.130,0.046,0.411,0.106,0.055,0.004,0.023)$。

2.2.2 采矿方法方案模糊决策法优选

根据模糊综合评判步骤和原理,结合表 3 的参数统计结果,可确定井筒保安矿柱新圈定可采区域矿体适宜采矿方案的各因素指标评定值。

表 3 采矿方案主要因素指标

Table 3 Main factor indexes of mining scheme

方案	采场生产能力/(t/d)	采切、回采、充填直接成本/(元/t)	采切比/(m/kt)	损失率/%	贫化率/%	安全状况	通风条件	劳动强度	工艺复杂程度	对矿体适应性
方案Ⅰ	59.8	118.5	5.01	9	8	较好	较好	中	中	中
方案Ⅱ	75.7	118.1	5.01	3	8	很好	中	中	较好	很好
方案Ⅲ	143.1	117.2	12.55	22	12	中	较好	较好	较好	较差

基于各采矿方案的主要因素指标,得出采矿方案模糊决策优选矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.1 & 0.27 & 1\\ 0.1 & 0.38 & 1\\ 1 & 1 & 0.1\\ 0.72 & 1 & 0.1\\ 1 & 1 & 0.1\\ 0.6 & 0.8 & 0.5\\ 0.6 & 0.5 & 0.6\\ 0.5 & 0.5 & 0.6\\ 0.5 & 0.6 & 0.6\\ 0.5 & 0.8 & 0.4\end{bmatrix} \tag{8}$$

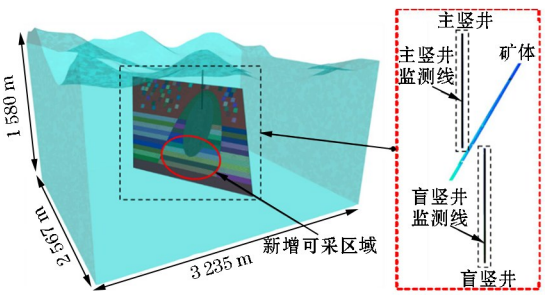
采用加权平均模型对 3 个采矿方案进行综合评价,计算得到 $\boldsymbol{A}=w_{\boldsymbol{A}}\times\boldsymbol{R}=(0.300,0.391,0.309)$。根据最大隶属原则,确定 3 种方案的优劣顺序为:方案Ⅱ>方案Ⅲ>方案Ⅰ。因此,在开采井筒保安矿柱新圈定可采区域矿体时,推荐采用方案Ⅱ,即上向进路充填采矿法进行回采。

3 井筒保安矿柱新圈定可采范围回采过程井筒稳定性分析

3.1 数值模型建立

基于矿区现有的地质勘察数据,构建了涵盖矿体与围岩的三维地质模型(见图 6(a)),整体模型尺寸为 3 235 m×2 567 m×1 580 m(长×宽×高),建模的重点区域为矿体及保安矿柱范围,因此对该部分网格进行加密处理,模型共包含 2 846 025 个网格单元,483 861 个节点。同时,为全面监测回采过程中的井筒安全,在主竖井及盲竖井的关键标高位置布设了位移监测线(见图 6(b))。通过提取监测数

据,计算了各监测点的倾斜变形、水平位移及曲率变形值,综合评估井筒变形特征及稳定性[15-16]。结合矿山工程地质调查结果及相关地质资料数据,对参数进行折减后,最终选定了岩体和充填体的各项力学参数,具体取值见表 4。



(a) 三维地质模型 (b) 监测线布置

图 6 数值模拟模型建立及关键标高位置监测线布置

Fig.6 Numerical simulation model establishment and key elevation position monitoring line layout

表 4 矿体和充填体物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of ore body and filling body

名称	密度/(kg/m³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
片麻岩	2 780	0.282	7.03	0.27	8.52	44.25
含金矿体	2 720	0.237	8.90	0.24	6.67	44.57
充填体	1 800	0.070	0.20	0.32	0.08	20.00

3.2 模拟方案

结合井筒保安矿柱新圈定可采范围的工程实际,本研究将数值模拟计算过程划分为 3 个主要阶段。第 1 阶段为初始平衡计算阶段,以获得符合矿山实际的地应力分布。第 2 阶段为矿山开采现状的模拟阶段,该矿山属开采历史较长的老矿山,采用自上而下的中段回采顺序,矿山浅部区域围岩结构相对稳定,采空区仅采取封闭措施而未进行充填;随着开采深度增加,地压显现效应逐渐加剧,因此在深部区域全部采用充填处理。第 3 阶段为新圈定的可采区域的回采过程模拟阶段,考虑到其与井筒的空间位置关系更为接近,为确保开采过程中的井筒稳定性,该区域将采用充填法进行处理。为优化开采方案,本研究对回采顺序进行了模拟,以制定科学合理的开采方案,确保矿山安全生产。具体研究方案详见表 5。

表 5 数值计算方案

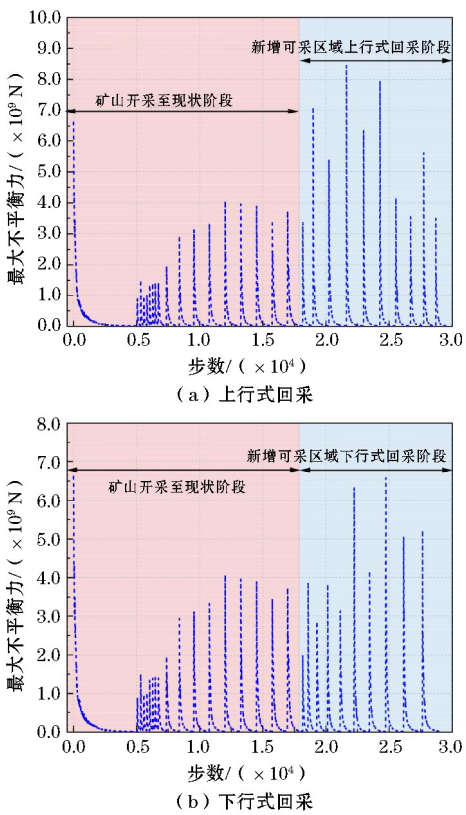
Table 5 Numerical calculation scheme

开挖阶段	阶段目的	回采范围
第 1 阶段	初始平衡计算	对模型进行自重地应力平衡
第 2 阶段	矿山开采现状的模拟	自上而下,浅部采场封闭处理,深部采场充填处理。
第 3 阶段	新圈定的可采区域上行式回采	新圈定的可采区域从下往上逐中段回采,采矿方法为上向进路充填采矿法。

3.3 井筒稳定性分析

3.3.1 最大不平衡力分析

在数值模拟研究中,地压活动的剧烈程度可通过最大不平衡力极值这一关键指标进行定量表征,其反映了模型迭代过程中系统内力与外力的差值,可直观体现矿山开采活动对岩体应力场的扰动程度。图 7 为新增可采区域不同回采方式下的最大不平衡力演化曲线。



(a) 上行式回采

(b) 下行式回采

图 7 不同回采方式的最大不平衡力曲线

Fig.7 The maximum unbalanced force curves of different mining methods

由图 7 可知,各阶段矿房回采过程中,最大不平衡力极值均维持在 10^9 N 量级范围内,且上行式与下行式回采阶段的地压活动均无显著波动,这表明研究区域的地压活动整体平稳,发生大规模地压灾害的风险较低。值得注意的是,在新增可采区域的

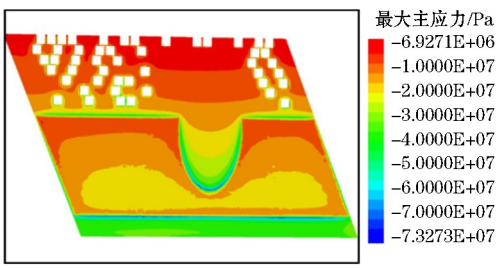
回采阶段，下行式回采方式的最大不平衡力极值较上行式回采降低了 15%～20%，表明在新增可采区域的矿体回采过程中，下行式回采方式适应性更优，其稳定性显著优于上行式回采。产生该差异的主要原因是：下行式回采可有效缓解矿体局部应力集中，通过循序回采降低岩体整体的应力变化幅度，减小了岩体内部的能量积聚，使得地压活动得以控制在相对平稳的状态。

3.3.2　应力场分析

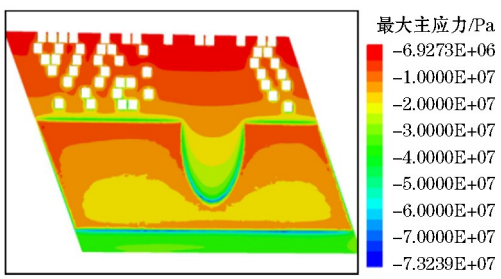
（1）最大主应力场分析结果。

不同回采方式下矿体与竖井最大主应力分布特征如图 8 所示。在整个回采过程中，研究区域未出现明显的应力集中现象；最大压应力主要分布在充填体底部与顶部区域，其上行式与下行式回采的压应力极值分别为 73.273 MPa 和 73.239 MPa，两者差异较小。表明新增可采区域采用上向进路充填采矿法后，充填体有效实现了应力转移，充分发挥了其应力调节与分布功能，显著提升了采场整体安全系数。不同的回采顺序对采场应力场的整体分布格局影响较小。

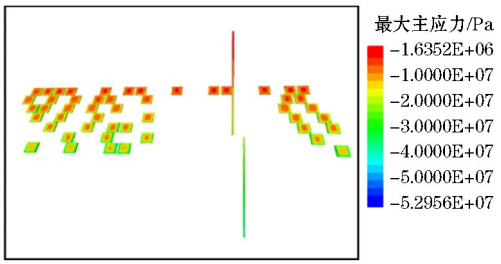
对比主竖井与盲竖井的最大主应力分布云图可知，主竖井承受的最大压应力显著低于盲竖井。这主要归因于两个因素：一是盲竖井的埋深较主竖井更大，承受的原岩应力更高；二是盲竖井与新增可采区域的回采采场空间距离更近，受到采动应力的影响显著。值得注意的是，无论是上行式还是下行式回采方式，均未对竖井的最大压应力值产生明显影响，这表明回采顺序对竖井围岩应力状态的调控作用有限。



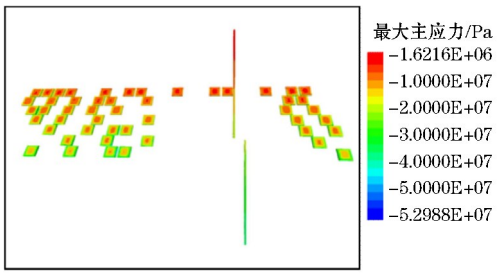
（a）上行式回采矿体整体



（b）下行式回采矿体整体



（c）上行式回采竖井



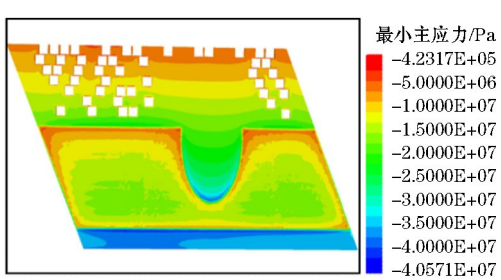
（d）下行式回采竖井

图 8　不同回采方式下矿体与竖井最大主应力云图

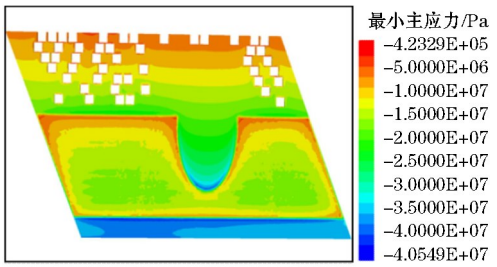
Fig.8　The maximum principal stress cloud diagrams of ore body and shaft under different mining methods

（2）最小主应力场分析结果。

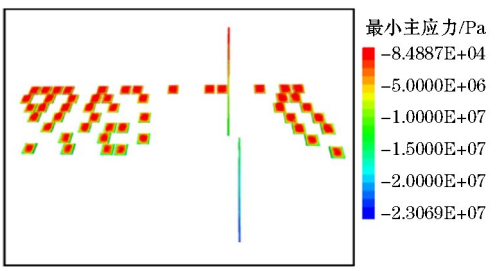
不同回采方式下矿体与竖井的最小主应力分布特征如图 9 所示，在整个回采过程中研究区域均未出现拉应力区。可从 3 个主要方面进行解释：首先，充填体在固化后形成的支撑体系发挥了关键作用，其不仅可有效传递和重新分布应力，还可缓解应力集中，抑制拉应力的产生[17]；其次，回采过程中矿体主要受压应力和局部支撑作用，该应力状态更易引发压应力集中，根据岩石力学理论，拉应力通常产生于岩体扩容或破裂的情况下[18]，而本研究中的岩体在破坏和变形时更倾向于在应力集中区域产生压应力，未出现拉应力；最后，优化后的回采顺序遵循了“逐步释放、及时支撑”的原则，渐进式回采方式有利于应力均匀释放，避免了应力重分布过程中的局部应力积聚[19]。值得注意的是，主竖井和盲竖井的最小主应力均未出现拉应力，表明竖井周围的矿体应力变化稳定，未发生大范围的拉伸变形或裂纹扩展。



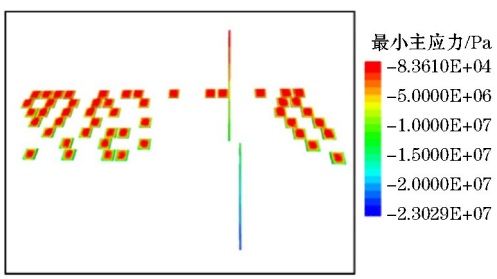
（a）上行式回采矿体整体



(b) 下行式回采矿体整体



(c) 上行式回采竖井



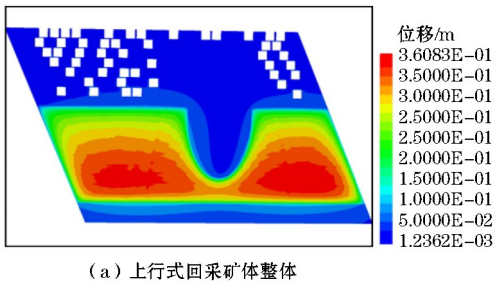
(d) 下行式回采竖井

图 9 不同回采方式下矿体与竖井最小主应力云图

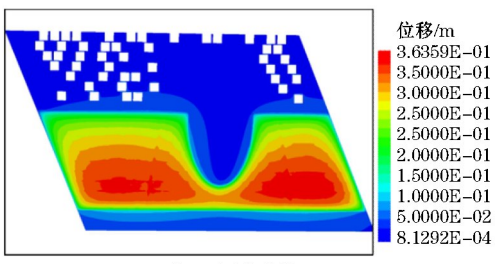
Fig.9 The minimum principal stress cloud diagrams of ore body and shaft under different mining methods

3.3.3 位移场分析

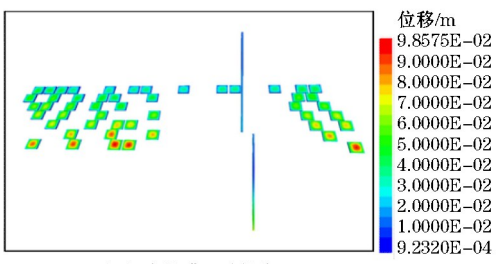
不同回采方式下矿体与竖井的总位移分布云图如图 10 所示。从图 10 中可以看出,总位移的最大值均出现在充填体内部,且深部中段矿房的位移特征更为显著。其主要原因是随着开采深度的增加,地应力逐渐增大,深部矿体与充填体承受的应力集中效应更强,因此引发的位移量更大[20]。从竖井位移分布云图来看,随着开采深度增加,竖井的总位移逐渐增大,盲竖井末端的最大总位移值达到 61.19 mm,进一步验证了深部高应力场对位移分布的影响。通过对比两种回采方式下的竖井总位移值可以发现,下行式回采的竖井总位移值略小于上行式回采,表明下行式回采在新增可采区域回采过程能够更好地控制地应力的释放,缓解应力集中效应,进而在一定程度上减小竖井位移。从位移控制的角度而言,下行式回采方式更具优势。



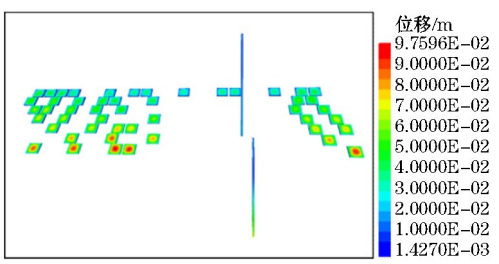
(a) 上行式回采矿体整体



(b) 下行式回采矿体整体



(c) 上行式回采竖井



(d) 下行式回采竖井

图 10 不同回采方式下矿体与竖井总位移分布云图

Fig.10 The distribution cloud diagrams of total displacement of ore body and shaft under different mining methods

3.3.4 塑性区分析

图 11 为不同回采方式下矿体与竖井塑性区分布云图。从图 11 中可以看出,两种回采方式下,塑性破坏区域均集中在充填采场内部,原采空区的底部也存在零星分布的塑性破坏区域。通过对整体塑性破坏区云图的进一步分析可知,上行式回采的剪切破坏集中区域较下行式回采更靠近保安矿柱,不利于保安矿柱的长期稳定。但从竖井周边的塑性破坏云图来看,两种回采方式均未导致竖井出现明显的塑性破坏。统计对比不同回采方式下塑性区体积可知(见图 12),下行式回采的塑性区总体积小于上行式回采,拉伸破坏(tension_now)的体积变化表现

更加明显。综上，下行式回采在保护竖井井筒的稳定性方面表现更具优势。

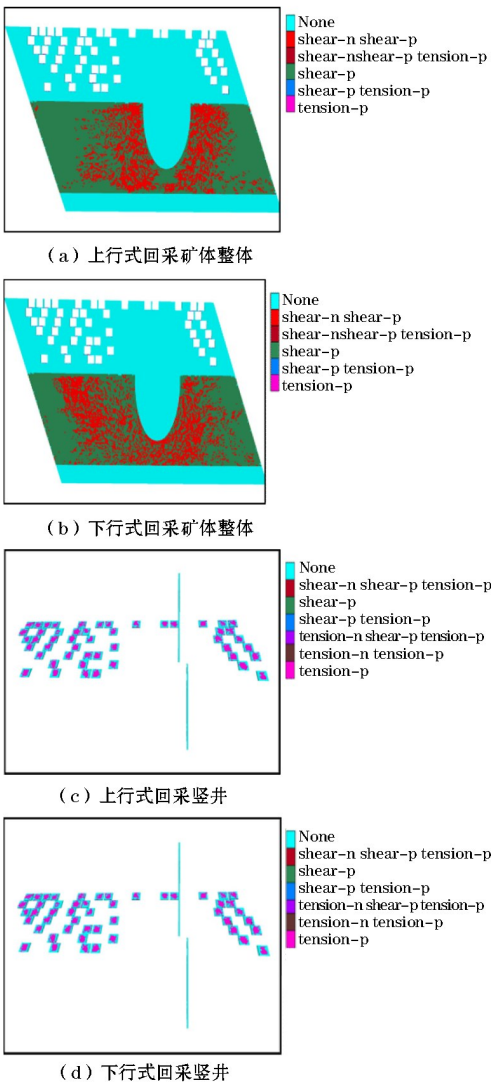


图 11　不同回采方式矿体与竖井塑性区分布云图

Fig.11　Platic zone distribution cloud diagrams of ore body and shaft under different mining methods

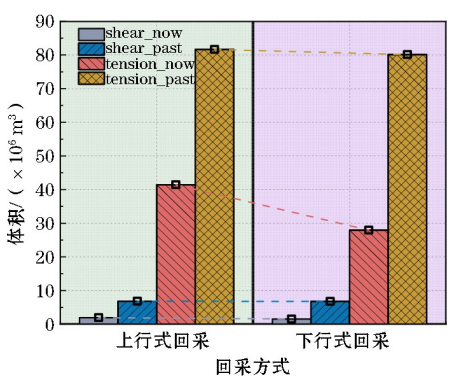


图 12　不同回采方式下塑性区体积对比

Fig.12　Comparison of plastic zone volume under different mining methods

3.3.5　井筒变形分析

地下开采对井筒的影响主要体现在井筒的竖向方向上。为量化评估开采扰动下井筒沿深度方向的轴向变形特征，定义不同埋深井筒下沉值的差值与竖向上阶段间距的比值为该阶段井筒的拉压变形值，即单位长度内的拉伸或压缩变形量[21]，计算公式见式(9)。

$$\varepsilon=\frac{\Delta W}{\Delta Z}=\frac{W_1-W_2}{Z_1-Z_2} \tag{9}$$

式中：ε 为井筒的拉压变形值，mm/m；W 为斜井井筒下沉值，mm；Z 为埋深，m。

基于下行式回采方案数值模拟结果中监测线数据的计算分析，通过式(9)计算得到不同埋深段井筒的拉压变形值，分布特征如图 13 所示。

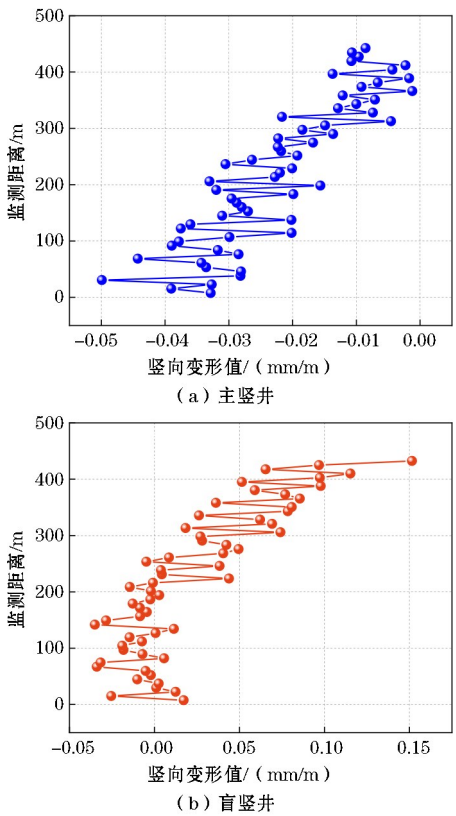


图 13　竖井拉压变形曲线

Fig.13　Tension and compression deformation curves of shaft

由图 13 可知，随着埋深增加，主竖井变形以压缩变形为主；盲竖井变形则随着埋深增加呈现出由压缩变形向拉伸变形的转变，整体以拉伸变形为主导。对比可知，盲竖井受采动扰动的影响程度明显大于主竖井。主竖井的最大压缩变形量为 0.049 mm/m，盲竖井的最大拉伸变形量为 0.151 mm/m。参考相关工程规范，钢筋混凝土丘宾筒井壁的允许压缩/拉伸变形临界值通常设定为 2.0 mm/m[22]。本次计算所得的最大变形量均远低于该临界值。可

以判定在当前开采条件下,井筒结构处于安全状态,不会出现结构性破坏,其结构完整性可得到保障。

4 现场工业试验

本次工业试验选取近井筒区域一段走向长 50 m、垂高 40 m、厚度约 3 m 的矿体作为试验采场,采用上向进路充填采矿法回采,未留设采场顶柱。结合现场监测与生产统计数据,试验采场回采损失率为 5%,贫化率为 3%。回采期间,井筒及周边主要巷道未出现明显变形,围岩内部位移监测数据结果表明,岩体最大位移量为 9.3 mm,对采场整体稳定性影响较小,说明回采过程未引发显著的围岩扰动。试验采场现场效果如图 14 所示。



(a) 进路施工



(b) 待充填进路

图 14 上向进路充填采矿法试验采场现场效果

Fig.14 The field effect of the test stope of the upward drift filling mining method

由图 14 可见,回采过程中采场顶板与两帮保持基本完整,未发生冒落、片帮等失稳现象,表明所选采矿方法对该矿区围岩条件适应性极强,可有效控制采场稳定性,满足安全生产要求。

5 结论

基于矿山地质条件分析,初步筛选了新增可采区域的适用采矿方法,结合层次分析法与模糊决策理论,优选了采矿方案,通过 FLAC3D 数值模拟分析了新圈定的井筒保安矿柱可采范围回采过程中的井筒稳定性,系统研究了不同回采方式下的应力分布、位移场变化、塑性区及竖井变形规律,为矿山安全开采及地压控制提供了重要理论支撑,得出以下主要结论。

(1) 基于矿山地质条件与采矿方法适用性,初步筛选出上向水平分层充填采矿法、上向进路充填采矿法及薄矿脉分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法 3 种方案。构建涵盖劳动生产率、经济因素、资源利用率、安全因素和合理程度的五因素综合评价体系,通过层次分析法-模糊综合评判模型进行量化分析,最终确定上向进路充填采矿法为最优开采方案。

(2) 新增可采区域回采过程中,下行式回采在地压控制与围岩变形抑制方面均优于上行式回采。具体表现为:下行式回采方式的最大不平衡力极值较上行式回采降低了 15%~20%,可有效缓解矿体局部应力集中,有利于控制竖井位移。同时,下行式回采方式下围岩塑性破坏区范围更小,对地压活动波动的抑制作用更强,有助于维持采场井筒长期稳定。

(3) 数值模拟结果表明,充填体能够为采空区提供有效支撑,抑制关键区域拉应力的产生,阻断岩体破坏的连锁扩展。采用优化后的下行式回采顺序,可实现采场应力的逐步、均匀释放,维持了采区应力场的动态平衡,进一步提升了采场的整体安全系数。

(4) 在新增回采区域采用下行式回采方案时,盲竖井承受的采动扰动程度显著高于主竖井。具体表现为:主竖井最大压缩变形量为 0.049 mm/m,而盲竖井最大拉伸变形量达 0.151 mm/m,二者变形量值均远低于钢筋混凝土丘宾筒井壁的允许变形临界值(2.0 mm/m)。现场工业试验结果表明,该方案兼具高水平的安全性与经济效益,资源回采率提升至 95%,实现了安全、效益与资源回收的协同优

化。该方案有效保障了井筒在实际应用中的安全性与结构稳定性。

参考文献(References):

[1] 严荣富.采动-断层双重影响下竖井变形破坏规律及机制研究[D].北京:北京科技大学,2023.
Yan Rongfu. Law and mechanism of shaft deformation and failure under the dual influence of mining and fault[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2023.

[2] 刘海林,李鹏程,王雨波.硬岩矿床组合型井筒保安矿柱圈定与压覆资源回采技术[J].金属矿山,2023(7):168-175.
Liu Hailin, Li Pengcheng, Wang Yubo. Delineation of safety pillars and overlying resource recovery technique in combined type shafts of hard rock deposits[J]. Metal Mine, 2023(7):168-175.

[3] 汪小平,寇永渊,郭赟林,等.金川二矿区1#矿体上盘贫矿开采对14行回风井的稳定性影响研究[J].金属矿山,2021(6):165-171.
Wang Xiaoping, Kou Yongyuan, Guo Yunlin, et al. Study on the stability of 14 row return air shaft in No.1 ore body hanging wall lean ore of Jinchuan No.2 mining area[J]. Metal Mine,2021(6):165-171.

[4] 柯丽华,孟欢欢,姚团,等.基于区间灰数白化变权关联算法的采矿方法决策模型及应用[J].金属矿山,2021(12):96-101.
Ke Lihua, Meng Huanhuan, Yao Nan, et al. Decision model of mining method based on interval grey number whitening variable weigh correlation algorithm and its application[J]. Metal Mine,2021(12):96-101.

[5] 李俊平,李宇聪,王海泉,等.基于数值模拟和变形监测的副井稳定性评价[J].安全与环境学报,2024,24(4):1412-1421.
Li Junping, Li Yucong, Wang Haiquan, et al. Stability evaluation of auxiliary shaft based on numerical simulation and deformation monitoring[J]. Journal of Safety and Environment,2024,24(4):1412-1421.

[6] 韩冲冲,谭玉叶,陈迪云,等.高海拔地区采矿方法多属性决策优选与实践[J].金属矿山,2022(9):9-17.
Han Chongchong, Tan Yuye, Chen Diyun, et al. Multi-attribute decision optimization and practice of mining method in high altitude area based on variable weight theory [J]. Metal Mine,2022(9):9-17.

[7] 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.

[8] 梅林芳,邓朋,何志义,等.某铁矿床充填采矿方案优选及采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,2025,45(2):25-32.
Mei Linfang, Deng Peng, He Zhiyi, et al. Selection of filling mining scheme and optimization of stope structure parameters of an iron deposit[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):25-32.

[9] 邓龙鑫,陈建宏.基于博弈论的主客观组合权重TOPSIS采矿方法优选[J].黄金科学技术,2022,30(2):282-290.
Deng Longxin, Chen Jianhong. Optimization of mining method with subjective and objective combination weight TOPSIS based on game theory[J]. Gold Science and Technology,2022,30(2):282-290.

[10] 张居正,王沉,朱获天,等.基于Fuzzy-TOPSIS的金矿床采矿方法优选[J].有色金属工程,2023,13(1):114-120.
Zhang Juzheng, Wang Chen, Zhu Huotian, et al. Mining method optimization of gold deposit based on Fuzzy-TOPSIS [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(1):114-120.

[11] 孟凡明,匡鑫,王祯,等.马郡城铁矿"三下"开采隔离层厚度及回采顺序研究[J].金属矿山,2022(8):20-26.
Meng Fanming, Kuang Xin, Wang Zhen, et al. Study on the thickness of isolation layer and mining sequence in three-underground mining of Majuncheng Iron Mine[J]. Metal Mine,2022(8):20-26.

[12] 黄德镛,高聪,贾子月,等.多中段空区稳定性分析及间柱回采顺序优选[J].有色金属工程,2023,13(6):105-114.
Huang Deyong, Gao Cong, Jia Ziyue, et al. Stability analysis of multiple mid-section goaf areas of a mine and optimization of the order of inter-column recovery[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(6):105-114.

[13] 朱建国,雷显权,刘福春,等.急倾斜极薄矿脉小型机械化留矿法开采采场稳定性分析[J].有色金属工程,2024,14(8):138-148+206.
Zhu Jianguo, Lei Xianquan, Liu Fuchun, et al. Stability analysis of stope by small-scale mechanized shrinkage mining for steeply inclined and extremely thin veins[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(8):138-148+206.

[14] 陈春生.基于层次分析和模糊数学的采矿方法优选[J].采矿技术,2020,20(5):5-9.
Chen Chunsheng. Mining method optimization based on analytic hierarchy process and fuzzy mathematics[J]. Mining Technology,2020,20(5):5-9.

[15] 徐伟兰,刘毓,王朝隆,等.基于数值模拟的充填采矿地表移动规律研究[J].有色金属工程,2024,14(6):144-151.
Xu Weilan, Liu Yu, Wang Chaolong, et al. Study on surface movement law of filling mining based on numerical simulation[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(6):144-151.

[16] 巫红华,张庆嵩.老矿区采空区稳定性分析与深部资源安全回采协同优化[J].采矿技术,2025,25(3):199-203.
Wu Honghua, Zhang Qingsong. Stability analysis of goaf in old mining area and collaborative optimization of safe mining of deep resources[J]. Mining Technology, 2025, 25(3):199-203.

[17] 陈启渐.乌兰木伦煤矿浅埋煤层连采连充围岩稳定性控制研究[D].赣州:江西理工大学,2024.
Chen Qijian. Study on stability control of surrounding rock in continuous mining of shallow seam in Wulanmulun coal mine[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2024.

[18] 刘树新,庄宇,戴谦君,等.盲天井中深孔掏槽爆破布孔优化及围岩损伤数值分析[J].金属矿山,2024(12):44-51.
Liu Shuxin, Zhuang Yu, Dai Qianjun, et al. Borehole layout optimization and numerical analysis of surrounding rock damage of medium-deep hole cutting blasting in blind shaft [J]. Metal Mine,2024(12): 44-51.

[19] 曾宇,白瑶,李鹏辉,等.采空区下近距离煤层回采巷道应力分布规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):88-94.
Zeng Yu, Bai Yao, Li Penghui, et al. Study on stress distribution law of stoping roadway in close-distance coal seam below goaf[J]. Mining Research and Development, 2023,43(2):88-94.

[20] 秦秀山,陈何,刘建坡,等.深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术[J].中国有色金属学报,2022,32(12):3871-3882.
Qin Xiushan, Chen He, Liu Jianpo, et al. Mining environment monitoring and dynamic control technology of ground pressure in deep large ore sections[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(12):3871-3882.

[21] 卢江丰,张新国,孙昱,等.工业广场压煤膏体充填开采不同充实率斜井井筒变形规律研究[J].中国矿业,2025,34(3):183-193.
Lu Jiangfeng, Zhang Xinguo, Sun Yu, et al. Study on deformation laws of inclined shaft with different filling rates during coal paste filling mining in industrial square[J]. China Mining Magazine,2025,34(3):183-193.

[22] 姜岳.地下开采引起的井筒变形预测与控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
Jiang Yue. Research on prediction and control of shaft deformation caused by underground mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2022.