

近地表层矿体开采对覆岩与山坡危岩体稳定性影响规律研究^①

贾亮¹, 姜安民^{1,2}, 王飞飞^{3,4}, 郑昌辉³, 吴宽^{3,4}, 任青阳⁵

(1.湖南城建职业技术学院 管理工程系, 湖南 湘潭 411101; 2.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3.湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 4.湖南城市学院 绿色建筑与智能建造湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 益阳 413000; 5.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为探究近地表矿体开采对覆岩及山坡危岩体稳定性影响规律,以某磷矿为工程背景,采用现场调查方法明晰山坡危岩体现状稳定条件;运用FLAC^{3D}软件模拟不同开采方案下覆岩变形、应力及塑性区的演化规律。结果表明:采场顶板围岩层间结构面发育,易造成顶板块状或片状坍塌。地层岩性硬脆且裂隙发育,在高陡坡体卸荷作用下,危石块体易沿裂隙和岩层面出现组合剥离,形成危岩体;覆岩中最大应力的响应规律与数值计算的不平衡力变化规律相似。开采过程中产生的开采扰动较小,对岩层、邻近采场及地表稳定性产生的影响较弱;地表受到井下矿体开采影响程度较小,其变形值未超过规范允许的最大值。采用先开采Ph1#矿层后开采Ph2#矿层的开采顺序时,覆岩位移相对较小,塑性区在矿柱、采场、上覆岩层中均未产生贯通性分布。

关键词: 浅部资源; 近地表矿体; 上覆岩层; 危岩体; 地表塌陷; 岩层塌落; 岩层稳定性

中图分类号: TD73

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.005

文章编号: 0253-6099(2025)04-0028-05

Impact of Near-Surface Ore Body Mining on Stability of Overburden and Dangerous Rock Masses on Slopes

JIA Liang¹, JIANG Anmin^{1,2}, WANG Feifei^{3,4}, ZHENG Changhui³, WU Kuan^{3,4}, REN Qingyang⁵

(1. Department of Management Engineering, Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411101, Hunan, China; 2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 4. Key Laboratory of Green Building and Intelligent Construction in Higher Educational Institutions of Hunan Province, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 5. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To explore the impact of near-surface ore body mining on the stability of overburden and dangerous rock masses of slopes, a phosphate mine was taken as an engineering project in the study. The stability of the dangerous rock mass of the slopes was determined by on-site investigation, and the evolution of deformation, stress and plastic zone of overburden under different mining schemes were simulated with FLAC^{3D} software. The research results indicate that structural planes between layers of surrounding rock on the roof of stope are well-developed, probably causing falling debris in blocks or flakes. The strata are hard and brittle in lithology and have developed rock fractures. Under unloading effect of high and steep slopes, dangerous rocks are prone to be separated along the combination of fractures and strata plane, forming dangerous rock masses. The response law of the maximum stress in the overburden is similar to the law of the unbalanced force in numerical calculation. There is relatively small disturbance generated during mining process, which brings a little impact to the stability of adjacent stopes and surface. It is found that the ground surface is less

① 收稿日期: 2025-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20314); 湖南省自然科学基金(2024JJ6110, 2024JJ8049, 2025JJ70386); 益阳市科技创新计划(2024YR02)

作者简介: 贾亮(1987—), 女, 湖南汉寿人, 硕士, 讲师, 主要从事工程管理及岩土力学方向研究。E-mail: 2981403509@qq.com

通信作者: 王飞飞(1990—), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 工程师, 硕士研究生导师, 主要从事防灾减灾与防护工程研究。E-mail: wangfeifei@hnceu.edu.cn

affected by underground mining, with the deformation within the maximum limit value specified in the standard. If Ph2[#] ore body is mined after Ph1[#] ore body, the overburden can have relatively small displacement, and no connectivity in the plastic zones is occurred in the mining pillars, stopes and overlying strata.

Key words: shallow resource; near-surface ore body; overlying stratum; dangerous rock mass; surface subsidence; stratum collapse; stratum stability

近些年,矿产资源需求量增加导致矿山开采加速^[1]。一些矿山考虑到开采对地表生态环境的影响^[2],且受前期技术条件、开采条件等制约,在近地表区域预留了矿体。随着矿产资源的枯竭,预留的矿体成为矿山持续开采的延续资源。因此,研究近地表区域矿体开采对地表的影响,即控制上覆岩层稳定性尤为重要。

对地下开采引起的地表塌陷、岩层垮塌、山体滑坡等灾害,学者们开展了大量的相关研究工作^[3-10]。研究主要聚焦于埋藏较深的矿体开采对地表、上覆岩层的影响,对近地表矿体开采的研究较少,尤其是近地表多层矿体开采顺序对上覆岩层稳定性的影响机制不够明晰。

本文针对某磷矿,采用现场调查方法明确近地表矿体开采对地表的影响情况,并建立三维力学分析模型,模拟近地表多层矿体开采对上覆岩层稳定性的影响,分析近地表矿体开采对上覆岩层稳定性的影响机制。

1 矿区概况

1.1 矿区地质条件

某磷矿区内山脉、水系呈北东向展布,区内山高谷深,地形陡峻。海拔标高 805.4~1 539.0 m,相对高差一般为 400~500 m,属中山地貌类型。地表主要为山体斜坡,斜坡角度为 42°~61°。

磷矿层赋存标高 824.00~1 110.50 m,埋藏于当地最低侵蚀基准面(标高 805 m)以上,矿床地下水主要补给来源为大气降水,地形有利于自然排水。

工业磷矿层直接顶板亦为半坚硬-坚硬碳酸盐类地层,底板则为半坚硬碎屑岩类地层。矿区北东向及近东西向的 F29 断层延伸长度 350~2 150 m,导致矿层出现 5~44 m 的垂直落差,从而破坏了磷矿层的连续性。依据 GB/T 12719—2021,矿区工程地质类型为碳酸盐岩为主、工程地质勘探复杂程度为中等的可溶盐岩类矿床。

在井下典型区域选取灰质白云岩(顶板)、Ph1[#]矿层、灰质白云岩(夹层)及页岩(底板)等块状岩石加工制作成标准试件。试件的含水状态为天然状态,折减后井下矿岩体力学参数见表 1。

表 1 矿岩体力学参数

Table 1 Mechanical properties of rock mass

岩性材料	天然重度/ (kN·m ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	凝聚力 C/MPa	内摩擦角 φ/(°)
灰质白云岩 (顶板)	27.01	10.52	0.24	8.23	35.37
Ph1 [#] 矿层	28.74	6.87	0.31	4.36	31.12
灰质白云岩 (夹层)	26.94	10.61	0.24	8.65	35.81
Ph2 [#] 矿层	28.85	7.23	0.30	4.02	30.61
页岩(底板)	26.43	8.47	0.18	5.65	32.13
充填体	18.10	8.01	0.21	2.81	37.60
断层散体	23.21	3.12	0.35	1.23	22.31

1.2 井下开采现状

通过井下现场调查可知,磷矿层直接顶板围岩为浅灰色薄-中厚层状泥粉晶白云岩夹灰黄色薄层状云质泥岩,岩石硬度中等。岩石质量指标(RQD)值平均 72%,岩体完整性属中等。直接顶板围岩层间结构面发育,白云岩所夹的薄层状云质泥岩在水和负压作用下极易出现顶板块状或片状坍塌。局部巷道顶板岩层水平向易引起顶板呈片状垮塌。现场调查发现,局部区段有顶板坍塌现象。间接顶板为夹泥质白云岩,属硬质岩石类,岩石 RQD 值平均 71%,岩体完整性总体为中等,巷道揭露后,除在构造裂隙发育地段出现局部冒顶外,一般情况下,出现严重岩石坍塌现象的可能性较小。磷矿层顶板围岩稳定性属差-中等。

1.3 地表现状

区内共发育 19 处危岩体,发育地层均为灯影组白云岩,分布高程多在 1 000~1 200 m。19 处危岩体所处地貌多为陡崖或陡坡,自然坡度近直立,于临空面处产生卸荷裂缝,形成松弛变形破坏,为崩塌的形成和发展提供了有利的地形条件。

区内构造活动强烈,多条断层及褶皱发育,导致岩体结构完整性差,结构破碎,节理裂隙发育,为崩塌坠石的形成提供了有利条件。区内山高坡陡,临空面高,岩体裂隙发育,在高陡坡体的卸荷作用下,岩体裂隙不断加深加宽,导致坡体的裂隙演化为拉张裂缝,危石块体从基岩上逐渐被剥离,在裂隙和岩层面的组合下形成危岩体。

破碎的岩体结构和良好的临空条件是危石形成和变形的内因,而卸荷和雨水作用则是促使危石变形的因素。在内外因素的共同作用下,危石容易从母岩脱落并发生变形破坏。针对矿段的危岩体,主要采用人工清理、静态爆破以及设置被动防护网等措施进行防治。

2 数值模型与研究方案

2.1 精细化建模过程

采用 MIDAS-GTS/NX 软件建立磷矿区的地表模型。该模型长 1 200 m,宽 877 m,高 349~690 m。中磷层采用预控顶房柱采矿法,采场矿柱尺寸 4 m×4 m,沿走向和倾向间隔 8 m 布置。采区尺寸依据实际情况建立,比例 1:1。

该模型包括了地表地形地貌、矿体、各种岩体、采场矿柱、F29 断层等结构,共建立了 1 237 个实体。矿岩体包含了灰质白云岩(顶板)、Ph1[#]矿层、灰质白云岩(夹层)、Ph2[#]矿层、页岩(底板)矿体等 5 种。由于地表土体较薄,对本次研究影响很小,没有单独划分一层模型。

采区充填体、矿柱和条柱的网格密度为 4 m,且每 1 m 划分为一个计算节点;夹层的网格密度为 8 m,围岩网格密度为 20 m。最终完成网格划分后,模型中共有 432 183 个节点和 254 962 个单元。模型建立后导入 FLAC^{3D} 中,生成包含矿体、岩层等要素的矿区整体分析模型,如图 1 所示。

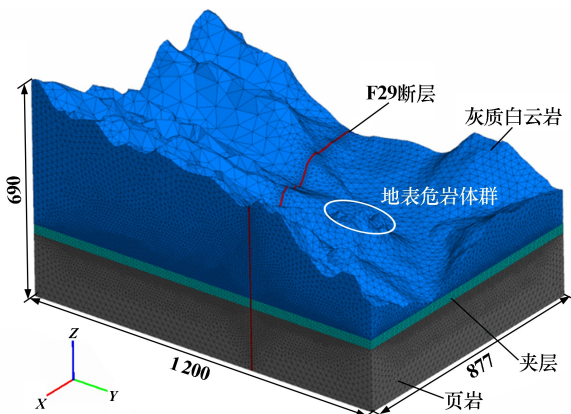


图 1 FLAC^{3D} 计算模型(单位:m)

Fig.1 FLAC^{3D} computational model

X 平面上所有节点在 X 方向固定,即滑动铰支座。Y 平面上所有节点在 Y 方向固定,即滑动铰支座。Z 方向最低平面上所有节点在 X、Y、Z 三个方向上固定,即固定铰支座。矿区开采最大深度距地表 200 m 左右,且该区域地质构造简单,所以初始地应力场的计算

只考虑重力的影响。

采用有限元数值模拟,研究假设如下:矿体与围岩体为各向同性材料;矿体与围岩体中的细微裂隙暂不考虑,将细微裂隙对岩石的影响体现在岩体力学中;因地下水影响较小,暂不考虑水力方面的作用;采空区形态各异,在数值模拟中难以准确建立形态十分复杂的采空区,本次模拟对采空区进行简化处理。

2.2 模拟开采方案

矿区 Ph1[#]矿层开拓系统等已按设计建设完成,具备矿石回采条件,而 Ph2[#]矿层开拓系统暂未建成,且 Ph1[#]矿层磷矿石品位高于 Ph2[#]矿层。Ph1[#]矿层赋存于 Ph2[#]矿层上部,Ph1[#]矿层与 Ph2[#]矿层间距 0~13 m,平均间距 8 m。为了探究近地表矿体开采对上覆岩层稳定性影响机制,设计了 6 种模拟开采方案,见表 2。

表 2 模拟开采方案

Table 2 Mining simulation scheme

方案	采场参数	开采矿层
1	Ph2 [#] 矿层空场法,沿走向长 100 m,沿倾向长 100 m,矿块间留宽 4 m 间柱	开采 Ph2 [#]
2	Ph2 [#] 矿层充填法,沿走向长 100 m,沿倾向长 100 m,矿块间留宽 4 m 间柱	开采 Ph2 [#] → 充填 Ph2 [#]
3	Ph2 [#] 矿层充填法,沿走向长 100 m,沿倾向长 100 m,矿块间留宽 4 m 间柱。Ph1 [#] 矿层预控顶房柱采矿法,留 4 m×4 m 矿柱,沿走向和倾向间隔 8 m 布置	开采 Ph2 [#] → 充填 Ph2 [#] → 开采 Ph1 [#]
4	Ph1 [#] 矿层预控顶房柱采矿法,留 4 m×4 m 矿柱,沿走向和倾向间隔 8 m 布置	开采 Ph1 [#]
5	Ph1 [#] 矿层预控顶房柱采矿法,留 4 m×4 m 矿柱,沿走向和倾向间隔 8 m 布置。Ph2 [#] 矿层充填法,沿走向长 100 m,沿倾向长 100 m,矿块间留宽 4 m 的间柱	开采 Ph1 [#] → 开采 Ph2 [#] → 充填 Ph2 [#]

2.3 稳定性判定标准

根据 GB 50021—2009《岩土工程勘察规范》和 GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》,矿区地表稳定性受到井下开采影响的判据为变形 $\varepsilon = \pm 2$ mm/m,倾斜 $i = \pm 3$ mm/m,曲率 $k = \pm 0.2 \times 10^{-3}$ m⁻¹。

根据井下开采经验类比得出的岩层变形位移量判断标准如下:位移量小于 20 mm 时,基本不会对岩体稳定性造成影响;位移量 20~50 mm 时,岩体能够保持基本稳定;位移量 50~100 mm 时,岩体可能存在潜在的稳定性问题;位移量超过 100 mm 时,岩体将出现大变形,且存在破坏现象,甚至可能引发大规模破坏。除了以变形位移为判据外,还可辅助应力、塑性区分布进行综合判定^[11]。因此,本次数值模拟采用最大不平衡力、岩层应力、地表位移及塑性区分布等指标进行开采

稳定性判断。

3 数值模拟结果分析

3.1 岩层最大不平衡力演变规律

各方案岩层最大不平衡力如图2所示。由图2可知,除了方案4,其他方案的最大不平衡力均达到或超过了0.20 GPa。方案1、2、3优先开采Ph2[#]矿层,方案4、5、6优先开采Ph1[#]矿层。方案1、2、3的最大不平衡力大于方案4、5、6。主要是因为Ph2[#]矿层比Ph1[#]矿层埋藏深,矿体受到的地应力相对较大,在开采卸荷作用下,产生的采动响应相对较大。计算模型中产生的不平衡力较大,即在开采过程中产生的开采扰动较大,会对岩层、邻近采场及地表稳定性产生一定影响。方案4的不平衡力最小,即在开采过程中产生的开采扰动较小,对岩层、邻近采场及地表稳定性产生的影响较弱。从最大不平衡力的角度量化分析,推荐方案4为优先开采方案,即先开采Ph1[#]矿层。

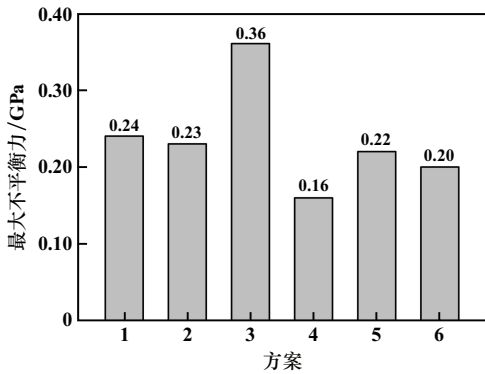


Fig. 2 Maximum unbalanced force in rock strata

3.2 岩层应力演变规律

各方案采空区上覆岩层最大应力如图3所示。由图3可知,方案4采空区上覆岩层应力值最小,方案3采空区上覆岩层应力值最大。采空区上覆岩层最大应

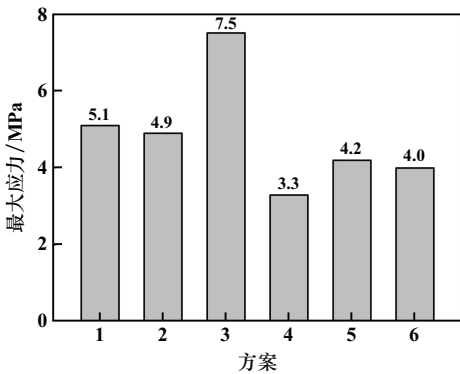


图3 各方案采空区上覆岩层最大应力
Fig. 3 Maximum stress in overlying strata in goaf

力的响应规律与计算模型中产生的不平衡力的规律相似。

3.3 地表与覆岩位移演变规律

各方案地表位移云图如图4所示。山坡危岩体集群处的地表位移为6~10 mm,井下矿体开采对危岩体南侧的山体地表影响相对较大,最大地表位移为16 mm。

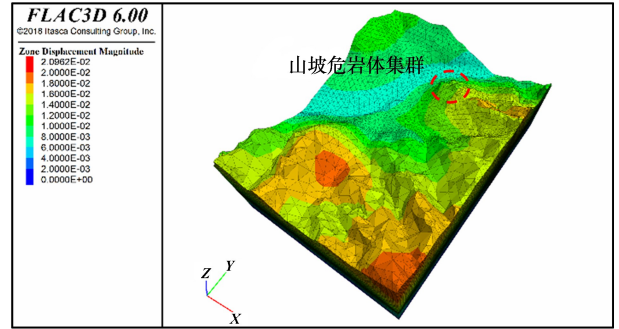


图4 地表位移云图(单位:m)

Fig. 4 Ground displacement map

为了更精准地判定井下开采扰动对山坡危岩体的影响程度,采用地表变形、倾斜及曲率三个指标对其进行量化。各方案地表变形、倾斜与曲率如图5所示。由图5可知,地表变形、倾斜与曲率均小于许用判定值,说明地表受到井下矿体的开采影响程度较小。方案3对地表产生的影响相对较大,先开采下部的Ph2[#]矿层会导致岩层下沉变形,但岩层变形就会自发形成压力拱,支撑上覆岩层的重力,防止进一步变形;后续开采Ph2[#]矿层上部的Ph1[#]矿层时,Ph2[#]矿层上覆岩层中形成的压力拱效应被破坏,导致上覆岩层继续下沉;然后形成新的压力拱,直至岩层基本稳定。综合矿山安全生产与经济效益,方案6先开采Ph1[#]矿层后开采Ph2[#]矿层可以满足安全要求。

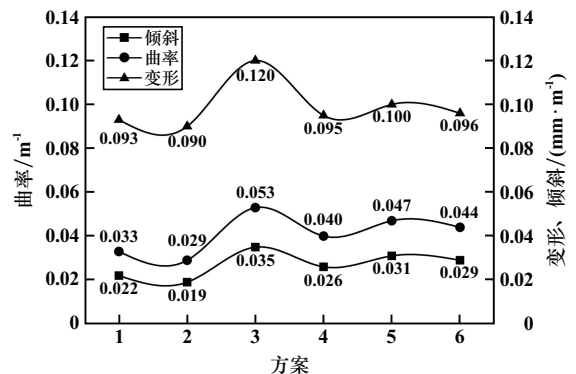


图5 各方案地表变形、倾斜与曲率
Fig. 5 Deformation, inclination and curvature of surface

井下矿体开采后,上覆岩层发生变形位移,通过监测上覆岩层位移量,得到每种方案的上覆岩层最大位

移,如图6所示。方案3上覆岩层位移最大,为17.5 mm,接近临界值(20 mm),因此可认为,先开采 Ph2[#]矿层后开采 Ph1[#]矿层,上覆岩层存在冒落垮塌的风险。

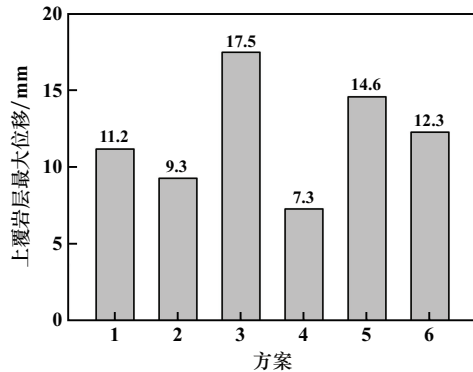


图6 最大岩层位移

Fig.6 Maximum displacement of overlying strata

3.4 岩层塑性区演变规律

各方案开采区域范围不同,产生的塑性区分布面积有很大差异,难以通过塑性区分布面积量化判定各方案优劣,仅通过塑性区在矿柱、采场、上覆岩层中的贯通性情况进行分析。根据模拟开采计算结果分析可知,Ph1[#]矿层开采留设的4 m×4 m矿柱与采场间矿柱尚未出现塑性区贯通现象。在Ph1[#]矿层均开采完毕后进行Ph2[#]矿层的开采,形成了过去式的塑性区分布,其破坏随着应力降低而暂停,尚未形成正在进行式的塑性区分布情况,可判定先开采Ph1[#]矿层后开采Ph2[#]矿层的开采顺序对上覆岩层的影响较小。在井下矿体开采过程中,应定期对地表及岩层进行变形观测并做好预防措施。

4 结论

1) 山坡岩体因岩性硬脆、岩体裂隙发育,在高陡坡体的卸荷作用下,危石块体从基岩上逐渐剥离,在裂隙和岩层面的组合下形成危岩体。

2) 上覆岩层中最大应力与不平衡力的演化规律相似,方案1、2、3的最大不平衡力与应力均大于方案4、5、6,且方案4的最大不平衡力与应力最小。

3) 地表变形、倾斜及曲率三个指标量化结果显示,开采Ph1[#]矿层后开采Ph2[#]矿层可以满足安全要求。塑性区在矿柱、采场、上覆岩层中均未产生贯通性分布。

参考文献(References):

[1] 唐金荣,张宇轩,徐利,等. 全球关键矿产稳定供应研究新趋势、新

热点与未来展望[J]. 中国地质, 2025,52(2):462-481.

TANG Jinrong, ZHANG Yuxuan, XU Li, et al. Stability of global critical mineral supplies: Trends, hot topics, and further outlook[J]. *Geology in China*, 2025,52(2):462-481.

[2] 汤珂,苏雅丽,李宏卫,等. 自然保护区矿产资源开发的生态环境影响综合评价体系研究与应用[J]. 安全与环境工程, 2024,31(5):239-248.

TANG Ke, SU Yali, LI Hongwei, et al. Research and application of comprehensive evaluation system of ecological environmental impact of mineral resource development in nature reserves[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024,31(5):239-248.

[3] 魏媛,王飞飞,任青阳,等. 地下采矿引起地表塌陷离散元 PFC^{2D}数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):30-34.

WEI Yuan, WANG Feifei, REN Qingyang, et al. Numerical simulation of surface subsidence caused by underground mining using discrete element software PFC^{2D} [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023,43(2):30-34.

[4] 王飞飞,田春艳,任青阳,等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):22-25.

WANG Feifei, TIAN Chunyan, REN Qingyang, et al. Numerical simulation of progressive development process of surface subsidence caused by underground complex goaf [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020,40(6):22-25.

[5] 姜安民,董彦辰,江学良,等. 露天转地下开采引起露天采场边坡垮塌数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):14-17.

JIANG Anmin, DONG Yanchen, JIANG Xueliang, et al. Numerical simulation of open pit slope collapse caused by transition from open pit to underground mining [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022,42(3):14-17.

[6] 亓文斌,刘会林,王飞飞,等. 地下采矿引起山体滑坡发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):29-32.

QI Wenbin, LIU Huilin, WANG Feifei, et al. Numerical simulation of landslide development process caused by underground mining [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021,41(4):29-32.

[7] WANG X M, XIAO Y J, SHI W B, et al. Forensic analysis and numerical simulation of a catastrophic landslide of dissolved and fractured rock slope subject to underground mining [J]. *Landslides*, 2022,19(5):1045-1067.

[8] 李延超,王飞飞,姜安民,等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):150-154.

LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(4):150-154.

[9] 杨忠平,张益铭,蒋源文,等. 采动作用下含深大岩溶结构面坡体裂隙扩展及变形破坏规律[J]. 岩土工程学报, 2022,44(8):1397-1405.

YANG Zhongping, ZHANG Yiming, JIANG Yuanwen, et al. Propagation of fissures and deformation and failure laws of karst slopes with deep and large structural plane mining action [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022,44(8):1397-1405.

(下转第40页)

均含水率6%条件下最优的进路间距为15 m,与数值模拟结果一致。因此,最终确定进路间距15 m为金山店铁矿东区采场平均含水率6%条件下的最优参数。

5 结论

1) 散体流动性试验结果表明,含水率对矿石散体流动性和放出体形态发育影响显著。含水率4%~8%,矿石散体自然安息角随着含水率增大而增大,且增量呈递增趋势;含水率0~8%,放出体宽度随着含水率增大而减小;放出体形态呈“倒水滴”特征。

2) 放矿数值模拟结果表明,含水率4%~8%范围内,含水率增加,2种矿体回收率减少、贫化率增加;2种矿体回收率均随着进路间距增加呈现先增大后减小的趋势,贫化率则相反。

3) 基于改进CRITIC-TOPSIS方法从安全、技术和经济角度对合理进路间距进行了优选,得到金山店铁矿东区采场平均含水率6%条件下最优进路间距为15 m。

参考文献(References):

- [1] 吴宇轩,陶干强,张淦. 改流体放矿技术实验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):141-144.
WU Yuxuan, TAO Ganqiang, ZHANG Gan. Experimental study on inserts drawing technique[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):141-144.
- [2] 金爱兵,孙浩,孟新秋,等. 无底柱分段崩落法不同放矿方式下崩矿步距研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017,48(11):3037-3043.
JIN Aibing, SUN Hao, MENG Xinqiu, et al. Study of best caving steps under different ore methods of sublevel caving[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017,48(11):3037-3043.
- [3] 谭宝会,龙卫国,龚臻,等. 限制性空间内无底柱分段崩落法组合式放矿方案及实验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):10-15.

TAN Baohui, LONG Weiguo, GONG Zhen, et al. Experimental research of combined ore-drawing scheme for orebody in confined space during sublevel caving without sill pillar[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):10-15.

- [4] 杨官印,陈玉明,王小勇. 马鞍山2#矿体无底柱分段崩落法结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2017,37(2):24-27.
YANG Gongyin, CHEN Yuming, WANG Xiaoyong. Structure parameters optimization for non-pillar sublevel caving in Maanshan 2# ore body[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(2):24-27.
- [5] 李涛,吴爱祥,王洪江,等. 含水率对放矿松动物体形态的细观影响[J]. 工程科学学报, 2018,40(6):665-672.
LI Tao, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Influence of moisture content on the shape of isolated movement zone in mesoscale[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018,40(6):665-672.
- [6] 时磊,汪龙,黄滚,等. 某铁矿矿岩中含水量对放出体形态影响的试验研究[J]. 金属矿山, 2019,48(5):32-36.
SHI Lei, WANG Long, HUANG Gun, et al. Experimental study on the effect of water content in ore-rock on the shape of drawn-out orebody in an iron ore[J]. Metal Mine, 2019,48(5):32-36.
- [7] 刘欢,任凤玉,何荣兴,等. 模拟矿岩散体的PFC细观参数标定方法[J]. 金属矿山, 2018,47(1):37-41.
LIU Huan, REN Fengyu, HE Rongxing, et al. Calibration methods of the PFC microscopic parameters for simulating the loose ore rock[J]. Metal Mine, 2018,47(1):37-41.
- [8] FAN W L, HU P, LIU Z G. Multi-attribute node importance evaluation method based on Gini-coefficient in complex power grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016,10(9):2027-2034.
- [9] DAS S, MEHER P K, PRADHAN U K, et al. Inferring gene regulatory networks using Kendall's Tau correlation coefficient and identification of salinity stress responsive genes in rice[J]. Current Science, 2017,112:1257-1262.

引用本文:武忠英,梅林芳,曾云川,等. 考虑含水率对放出体影响的金山店铁矿东区采场合理进路间距研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):33-40.

WU Zhongying, MEI Linfang, ZENG Yunchuan, et al. Reasonable drift spacing for eastern stopes of Jinshandian iron mine considering influence of moisture content on drawn ore blocks [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):33-40.

(上接第32页)

- [10] 刘璨,姜安民,董彦辰,等. 下伏复杂空区山体斜坡滑塌形成机理与数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):35-38.
LIU Can, JIANG Anmin, DONG Yanchen, et al. Mechanism analysis and numerical simulation for landslide of mountain slope with underground complex goaf[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):35-38.
- [11] 崔铁军,李莎莎. 长期渗水所致水位升高对露天矿边坡岩体状态的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2023,23(6):1817-1824.
CUI Tiejun, LI Shasha. Influence of water level rise caused by long-

term seepage on rock mass state of open pit slope[J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(6):1817-1824.

引用本文:贾亮,姜安民,王飞飞,等. 近地表层矿体开采对覆岩与山坡危岩体稳定性影响规律研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):28-32.

JIA Liang, JIANG Anmin, WANG Feifei, et al. Impact of near-surface ore body mining on stability of overburden and dangerous rock masses on slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):28-32.