大型钼铅锌多金属矿深部充填开采高度优化研究*

李山存

(长沙有色冶金设计研究院有限公司， 湖南 长沙 410011)

摘要:针对大兴安岭甘路口钼铅锌多金属矿在深部(750～1 000 m)、复杂构造与火山岩地质条件下面临的开采难题,开展了基于岩石力学与数值模拟的充填开采高度优化研究。首先,通过岩石力学试验获取了矿区主要岩体的力学参数,并综合运用3Dmine、ANSYS与Surfer软件,构建了精确反映矿区地质构造与地形特征的三维地质力学模型。然后,采用FLAC3D数值模拟,系统对比分析了60 m、90 m和120 m三种开采高度对采场及地表稳定性的影响。结果表明:60 m开采高度能有效抑制塑性区扩展,控制位移与应力集中,是实现安全与经济最优的开采方案;90 m开采高度虽能基本维持采场稳定,但存在局部塑性区贯通风险;120 m开采高度则导致地表水平变形、倾斜及曲率均远超安全限值。研究成果明确了该复杂深部矿体的安全开采高度阈值,揭示了开采高度增大导致塑性区贯通的内在机制,可为类似复杂地质条件下的深部充填采矿方案优化提供理论参考。

关键词:多金属矿;采场稳定性;开采高度;采矿方案优选;数值模拟

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0008-10

Study on Optimization of Deep Filling Mining Height in a Large Molybdenum-Lead-Zinc Polymetallic Mine

LI Shancun

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410011, China)

Abstract: In view of the mining problems faced by Chalukou molybdenum-lead-zinc polymetallic mine in the Greater Khingan Mountains under deep (750-1 000 m), complex structure and volcanic rock geological conditions, the optimization of filling mining height based on rock mechanics and numerical simulation was carried out. Firstly, the mechanical parameters of the main rock mass in the mining area were obtained by rock mechanics tests, and a three-dimensional geomechanical model that accurately reflects the geological structure and topographic characteristics of the mining area was constructed using 3Dmine, ANSYS and Surfer software. Then, FLAC3D numerical simulation was used to systematically compare and analyze the influence of three mining heights of 60 m, 90 m and 120 m on the stability of stope and surface. The results show that the mining height of 60 m can effectively inhibit the expansion of plastic zone and control the displacement and stress concentration, which is the safe and economical optimal mining scheme. Although the mining height of 90 m can basically maintain the stability of the stope, there is a risk of local plastic zone penetration. The mining height of 120 m leads to the horizontal deformation, inclination and curvature of the surface far exceeding the safety limit. The research results clarify the safe mining height threshold of the complex deep orebody, revealing the internal mechanism of the increase of mining height leading to the penetration of plastic zone, which provide a theoretical reference for the optimization of deep filling mining scheme under similar complex geological conditions.

Key words: Polymetallic mine, Stope stability, Mining height, Mining scheme optimization, Numerical simulation

0 引言

随着金属矿床开采深度的不断增加,岩体力学环境日益复杂,地压问题成为制约矿山安全高效开采的核心因素[1-2]。深部开采过程中,岩体所处的高应力环境不仅易引发巷道变形、顶板破坏,还可能诱发岩爆等动力灾害[3]。因此,系统开展岩石力学研究,准确掌握矿体及围岩的力学特征与应力场分布

* **收稿日期**:2025-09-29

基金项目:湖南省科技创新计划项目(2025CK1003)

作者简介:李山存(1981—),男,青海乐都人,硕士,高级工程师,主要从事金属非金属矿山采矿工程设计及矿山安全方面的研究。E-mail:shancun1981@163.com

规律,并通过数值模拟方法预测不同开采方案下的岩体稳定性,对保障矿山安全生产具有重要意义。

在探究矿山岩石力学特性及地压控制以确保矿山安全的研究中,众多学者已取得了颇为显著的研究成果。HOEK 等[4-5]提出的岩体强度准则、岩体质量分级方法,为岩体稳定性评价提供了理论基础。近年来,数值模拟技术飞速发展,基于 FLAC3D、UDEC 等软件的数值分析在矿山岩体稳定性研究中得到了广泛应用,能够较好地模拟复杂地质条件下的围岩应力分布与变形规律[6]。郭奇峰等[7]、江权等[8]基于数值模拟方法,构建了精细化地质模型,预测采场不同开采阶段的应力变化,为采场稳定性评估提供了理论依据。陈祉颖等[9]、彭定潇等[10]、李夕兵等[11]运用数值模拟技术,深入分析了深部开采过程中岩体的动力响应特性,揭示了岩爆等动力灾害的成因机制,为矿山安全生产提供了坚实的理论支撑。以上研究成果不仅丰富了矿山岩石力学的理论体系,更为实际工程中的地压控制提供了行之有效的技术手段。此外,潘立友等[12-14]在深部金属矿山的地压控制、充填开采技术以及岩爆预测等领域也积累了丰富的实践经验。然而,对于特定矿区,其独特的地质构造条件和岩石力学性质凸显了针对性研究的必要性[15]。

本文以大兴安岭岔路口钼铅锌多金属矿为研究对象,该钼铅锌多金属矿位于大兴安岭火山岩带,地质构造复杂,断裂及岩浆侵入现象频繁,岩体结构完整性差异较大。随着矿体向深部延伸开采,岩石力学环境显著变化,尤其在 750～1 000 m 深度范围内,原岩应力场以水平应力为主导,存在潜在岩爆风险,导致该矿区开采中地压管理问题日益突出,传统开采方法难以适应深部复杂地质条件,加剧了采场稳定性控制及整体开采难度。目前,针对该矿区的研究仍存在关键性难题,现有研究缺乏适用于火山岩类深部岩体的本地化力学参数获取体系,常规室内试验与通用数值模型难以精确反映现场实际情况,进而导致参数模型在现场适配性上存在明显不足。同时,未能将深部矿山灾害宏观力学规律转化为采场结构参数优化的量化依据,工程方案多依赖通用经验,难以实现开采安全性与经济性的平衡。因此,深入研究该矿区的岩石力学性质与应力场分布规律,并对不同采场阶段高度条件下的地表及采场稳定性进行系统分析,对于优化开采设计、保障地表建(构)筑物及井筒安全具有重要的工程意义。

本文基于矿区已有的地质勘查资料与岩石力学试验数据,以 Hoek-Brown 岩体强度准则等为关键依据,结合原岩应力测试结果,采用“试验-建模-模拟-分析”的系统性方法,借助 3Dmine 等专业软件构建完整的矿岩模型,并将其导入 FLAC3D 软件。针对 60 m、90 m、120 m 三种不同阶段高度工况进行数值模拟,从地表稳定性和采场稳定性等多个维度对数据进行深入分析。在此基础上,提出了适合该矿区的阶段高度、开采高度方案与监测建议,不仅填补了复杂地质条件下开采高度优化的研究空白,突破了通用理论与矿区实际模型适配的局限性,还明确了矿区深部岩体的力学参数与应力场特征,揭示了不同阶段高度对矿岩稳定性的影响规律。研究成果以期为该矿区安全开采提供科学依据,为同类型矿山的相关研究提供借鉴。

1 工程概况

该钼铅锌多金属矿位于大兴安岭北段火山岩带,区域地质构造复杂且经多期演化叠加[16-17]。地层由中生界侏罗纪、新生界第四系及部分上元古界-下寒武统岩系构成。矿区构造以断裂为主,北东向 F2 断裂保护矿床主体,构造格局影响岩体稳定性,是采矿设计关键因素。矿区岩石类型复杂、脉岩发育,围岩以流纹斑岩等为主,整体稳固,但局部稳定性较低。矿石含钼、铅、锌等金属,不同岩性物理力学参数差异显著(见表 1),岩体稳定性及非均质性明显。水压致裂测试结果表明,原岩应力场以水平应力为主,1 000 m 深度处主应力值较高,零高程条件下存在岩爆风险,对深部采矿构成威胁。为了确保地下矿山的安全开采,需对矿山进行充填处理,并通过岩石力学试验与数值模拟,揭示不同采场高度下岩体的稳定性规律,从而为开采方案的优化提供科学依据。

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of ore rocks

岩性	密度/(g/cm³)	含水率/%	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	岩石抗拉强度/MPa	泊松比
纹质凝灰熔岩	2.610	0.472	77.223	28.792	7.07	0.234
流纹斑岩	2.592	0.790	188.132	43.403	12.10	0.214
流纹质含砾熔结凝灰岩	2.607	0.902	101.876	28.528	9.50	0.268

2 不同阶段高度下地表变形规律分析

基于地质勘察报告及设计开采范围,在已构建的矿区三维数值模型基础上,选取 3 种不同阶段高度方案,结合既定回采顺序与采矿方法,对矿山开采活动引发的地表安全性影响开展模拟研究。数值模拟过程中,采场布置轴向垂直于矿体走向,采用"隔一采一"回采方式,遵循自下而上的回采顺序。开采工艺采用大直径深孔侧向崩矿-嗣后充填采矿法,主要技术参数:一步骤采场矿房宽度为 15 m、矿柱宽度为 18 m、采场长度为 100 m,阶段高度分别设定为 60 m、90 m 及 120 m。为确保模拟过程的单一变量控制,整体开采高度统一设定为 360 m,开采中段范围界定为-520～-160 m。为确保模型建立的合理性,本文在应力场设定中将最大主应力方向取为 NW 向,最大水平主应力、最小水平主应力和垂直应力分别由式(1)至式(3)计算。

$$\sigma_H = 0.025\ 3H + 15.860 \quad R^2 = 0.942\ 6 \tag{1}$$

$$\sigma_h = 0.018\ 8H + 8.555 \quad R^2 = 0.903\ 1$$

(限制域 400～1 000 m) (2)

$$S_v = 0.026\ 5H \tag{3}$$

式中:σ_H、σ_h、S_v 分别为最大水平主应力、最小水平主应力和垂直应力,MPa;H 为测量段深度,m;R^2 为相关系数。

为了减少其他因素对模拟结果的影响,在建模计算过程中提出以下假设:

(1) 忽略主要研究对象之外的小矿体及远距离结构面对结果的影响;

(2) 各类岩体和充填体均视为各向同性的连续介质,采空区充填完全接顶且充填体与围岩之间不存在间隙;

(3) 地应力条件依据矿区原岩应力测试结果施加,同时不考虑地震、爆炸冲击波及地下水等因素对矿体稳定性的影响。

2.1 模型建立及参数确定

为确保矿体开采的科学性与安全性,本研究采用 3Dmine、ANSYS、Surfer 软件构建了涵盖地表的完整矿岩模型,旨在全面分析不同阶段高度充填开采对地表的影响。依据设计确定的采矿方法和开采顺序,模拟了矿山实际开挖过程,分别建立了钼矿体、围岩、低品位矿体及地表的三维精细模型。为便于计算与分析,结合矿山实际情况,共构建了 3 个实体模型,各中段高度分别为 60 m、90 m 和 120 m,并对这些模型进行了适当的简化处理,整体模型如图 1 所示。

数值模型空间尺度设定为 x 方向 4 200 m、y 方向 3 600 m,z 方向自-900 m 标高延伸至地表,共划分 345 106 个节点,1 514 092 个计算单元。模型边界条件按矿区原岩应力场特征施加,底部约束 z 方向位移,四周分别限制 x、y 方向移动,地表设为自由边界。根据现场情况及充填体用料,得到矿岩及充填体的物理力学参数,见表 2。

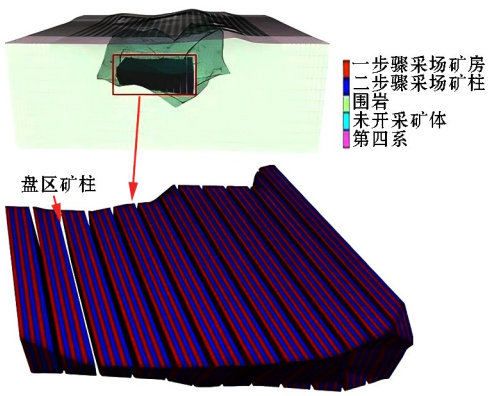


图 1 矿体、围岩及地表三维模型示意

Fig.1 Schematic of the three-dimensional model of ore body, surrounding rock and surface

表 2 矿岩及充填体的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of ore rock and filling body

材料	容重/(kg/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
矿体	2 700	18.00	0.23	43	1.50	2.30
围岩	2 650	20.00	0.25	45	2.10	1.80
第四系	1 700	0.08	0.32	22	0.02	0.03
一步充填体	1 820	0.57	0.24	29	0.43	0.67
二步充填体	1 790	0.06	0.26	19	0.09	0.11

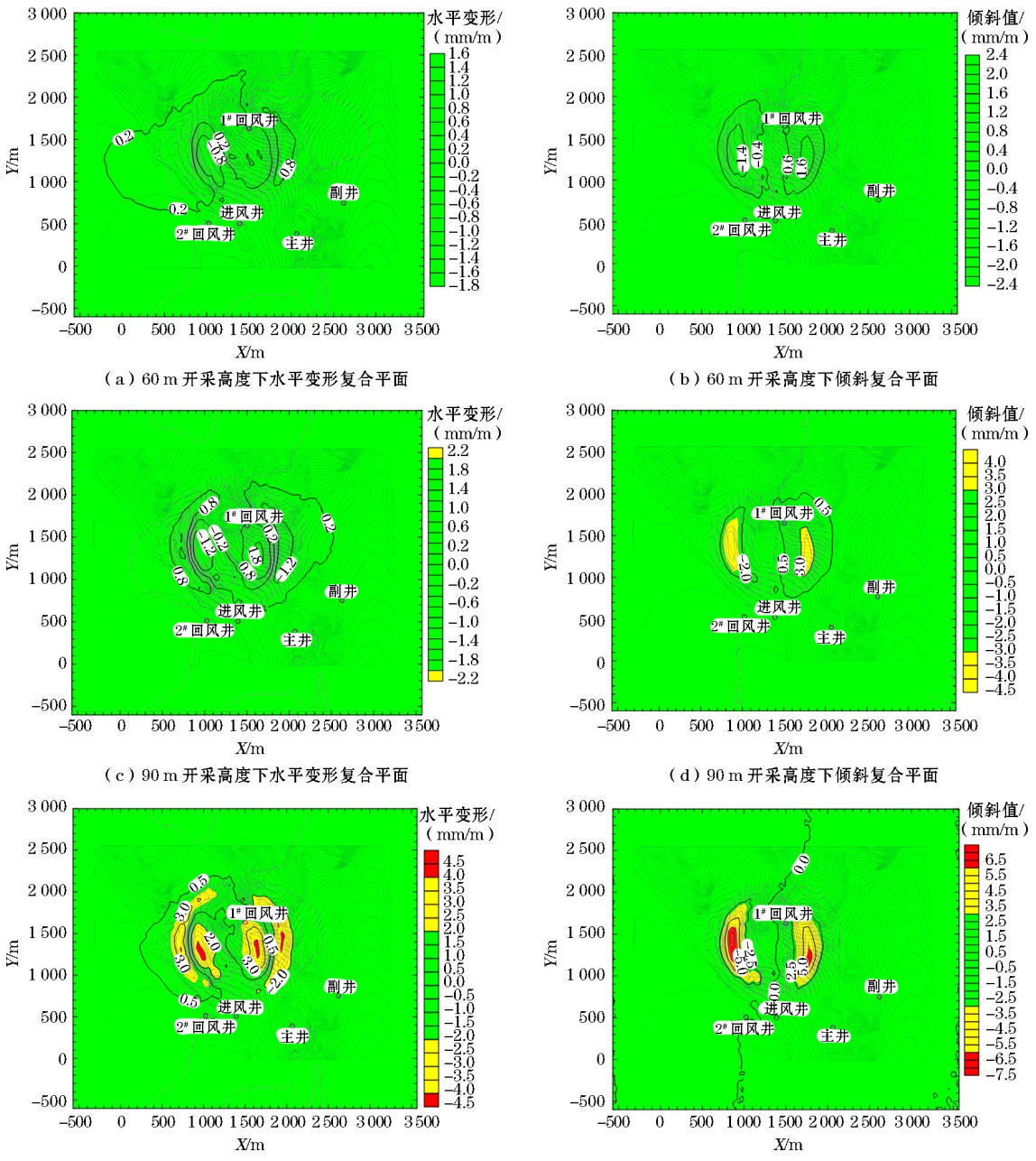
2.2 结果及分析

基于既定回采顺序与采矿方法,对各回采阶段开展数值模拟计算,获取了 3 种地下矿体开采充填方案实施后的地表沉降量值及空间分布特征。在此基础上,进一步求解得到地表水平变形、倾斜度及曲率变化规律,结合竖直位移监测数据,完成了地表稳定性的综合评价。

2.2.1 不同阶段高度下地表稳定性分析

为评估地下开采对地表建(构)筑物的影响,利

用 FLAC 软件内置 fish 语言模块,提取了地表监测节点的水平变形、倾斜及曲率数据,系统对比分析了不同开采高度与充填阶段的地表稳定性差异。通过数据耦合技术将变形参数与地表坐标系统一,构建了地表变形复合平面图,如图 2 所示。为直观区分不同保护等级建(构)筑物的位移变形控制区域,采用专业数据可视化软件进行分级渲染。Ⅰ级保护区域允许值−2～+2 mm/m 标注为绿色,Ⅱ级保护区域允许值−2～−4 mm/m、+2～+4 mm/m 标注为黄色,Ⅲ级保护区域允许值−4～−6 mm/m、+4～+6 mm/m 标注为红色(颜色标识见电子版)。



(a) 60 m 开采高度下水平变形复合平面　(b) 60 m 开采高度下倾斜复合平面

(c) 90 m 开采高度下水平变形复合平面　(d) 90 m 开采高度下倾斜复合平面

(e) 120 m 开采高度下水平变形复合平面　(f) 120 m 开采高度下倾斜复合平面

图 2　不同开采高度下充填开采引起地表水平变形和倾斜复合平面

Fig.2　Composite plane of surface horizontal deformation and inclination caused by filling mining under different mining height

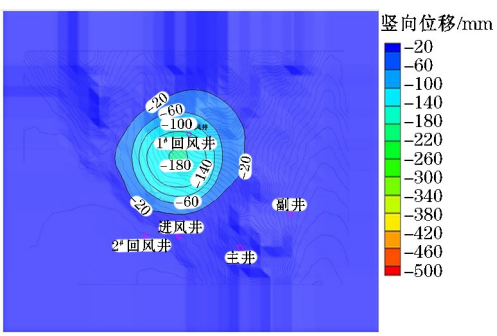
由图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)可以看出,60 m 开采高度下地表最大水平变形值为 1.76 mm/m,90 m 开采高度下地表最大水平变形值为 1.88 mm/m,二者均未超过Ⅰ级建(构)筑物 2 mm/m 的限值标准。当开采高度增至 120 m 时,地表最大水平变形值达 4.33 mm/m,超出Ⅱ级建(构)筑物允许值,其中 1#

井筒水平变形值为 2.5 mm/m,已突破Ⅰ级建(构)筑物限值,表明井筒存在变形破坏风险。

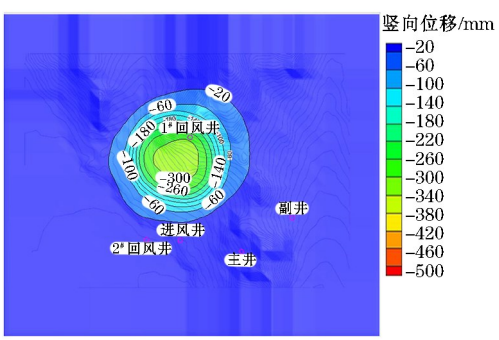
由图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)可知,60 m 开采高度下地表最大倾斜值为 2.21 mm/m,符合Ⅰ级建(构)筑物要求(3 mm/m);90 m 开采高度下最大倾斜值为 4.37 mm/m,部分区域超出Ⅰ级倾斜限值;120 m 开采高度下最大倾斜值达 7.14 mm/m,局部区域已超过Ⅱ级建(构)筑物 6 mm/m 的允许值。此外,60 m 开采高度下地表最大曲率值为 0.15×10^{-3} m^{-1},满足Ⅰ级建(构)筑物曲率要求(0.2×10^{-3} m^{-1});90 m 开采高度下最大曲率值为 0.26×10^{-3} m^{-1},部分区域超出Ⅰ级曲率限值;120 m 开采高度下最大曲率值达 0.55×10^{-3} m^{-1},多数区域曲率值已突破Ⅰ级与Ⅱ级建(构)筑物的联合限值标准。

2.2.2 不同阶段高度下地表沉降范围分析

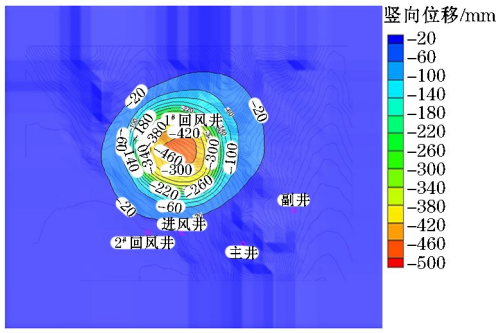
通过模拟计算不同阶段高度开采充填下地表位移变化情况,得到了地表竖直方向位移云图,如图 3 所示。从图 3 可以看出,3 种开采高度下 1# 回风井均位于矿体移动带内,因此,在生产期间对 1# 回风井井筒进行位移监测是非常必要的。60 m 开采高度下地表最大竖向位移为 185.2 mm,90 m 开采高度下地表最大竖向位移为 328.3 mm,120 m 开采高度下地表最大竖向位移为 487.6 mm。



(a) 60 m 开采高度



(b) 90 m 开采高度



(c) 120 m 开采高度

图 3 不同开采高度下地表竖直方向位移云图

Fig.3 Vertical displacement cloud diagrams of the surface under different mining heights

对比 3 种开采高度下地表水平变形、倾斜、曲率和竖向位移可以得出,采用 60 m 开采高度可以保护 1# 回风井筒的安全,90 m 开采高度下 1# 回风井筒基本也是安全的,但当开采高度为 120 m 时,地表及 1# 回风井筒的位移较大,井筒的水平变形超出了Ⅰ级建(构)筑物保护等级。因此,考虑矿山实际工程施工情况、马头门留存情况、岩石的各向异性及可能存在的节理裂隙等复杂情况,开采高度取 60 m 是较为安全的。

3 不同开采高度下采场稳定性分析

地表稳定性研究表明,在 60 m 与 90 m 开采高度条件下,地表井筒及建(构)筑物的安全可得到有效保障。基于该结论,在采场围岩稳定的前提下,适当提高中段开采高度具有显著的工程应用价值。从成本控制角度,可减少采切工程总量以降低成本;从效率提升维度,能提高采矿作业效率并优化生产组织流程。因此,为验证 90 m 中段开采高度方案的可行性、实现中段开采高度的科学优化,采用 FLAC3D 软件,对比分析 60 m 与 90 m 开采高度下采场应力分布、位移特征及稳定性状态,为工程决策提供量化依据。基于设计方案,对该高品位矿体进行划分,依据矿体模型重新划分矿房与矿柱,开采−400 m 中段水平矿体并分析其稳定性。采场设计参数为:一步骤采场矿房宽 15 m,二步骤采场矿柱宽 18 m,采场长度均为 100 m,盘区间留 15 m 间柱,采场高度分别为 60 m 和 90 m,垂直矿体走向布置,采用“隔一采一”的回采顺序。

3.1 数值模型和参数确定

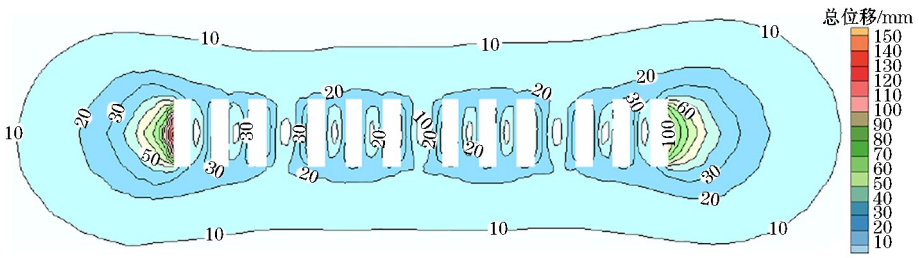
对原有的开采中段采场模型进行网格精细划分,建立两种开采高度数值模型。模型 x 方向长度为 4 200 m,y 方向长度为 3 600 m,z 方向由−900

m 标高延伸至地表,其中,60 m 开采高度模型共划分为 1 012 934 个节点和 5 348 808 个单元,90 m 开采高度模型共划分为 904 414 个节点和 4 805 683 个单元。模型按矿区原岩应力施加应力边界,在模型底部施加 z 方向约束,在模型四周分别施加 x、y 方向约束,地表为自由面。

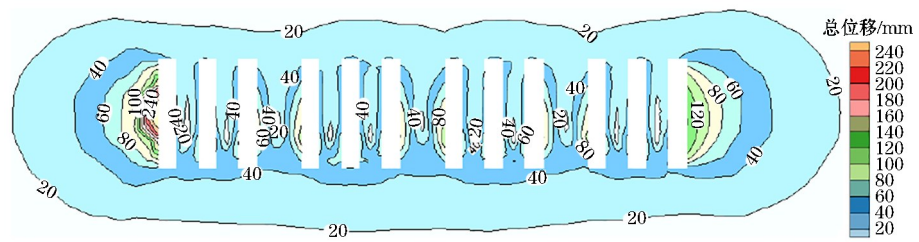
3.2 计算结果及分析

3.2.1 两种开采高度下采场变形分析

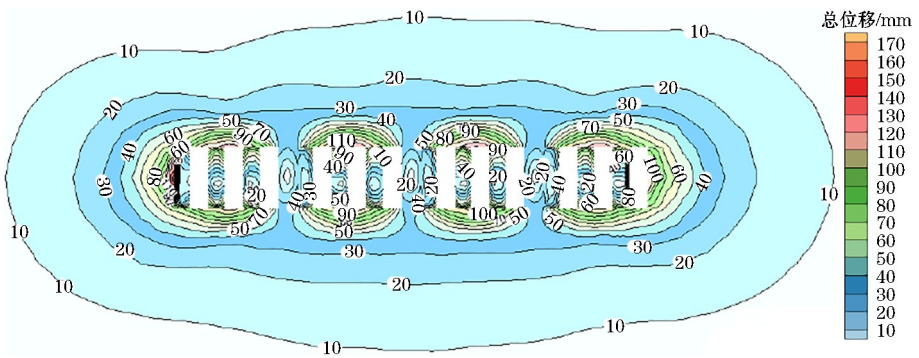
针对两种高度开采方案,选取典型剖面,截取矿体两步骤开挖充填下采场空区围岩总位移变化云图,如图 4 所示。从图 4 可以看出,一步骤采场开采时,60 m 开采高度采场围岩产生的最大总位移约为 151.3 mm,最大位移出现在采场围岩边帮,矿柱产生的最大位移为 42.3 mm;90 m 开采高度采场围岩产生的最大总位移约为 258.2 mm,最大位移同样位于采场边帮,矿柱产生的最大位移为 110.5 mm。受两种开采高度均偏大的影响,位移变形主要集中在采场围岩边帮,顶底板位置的位移幅度相对较小。



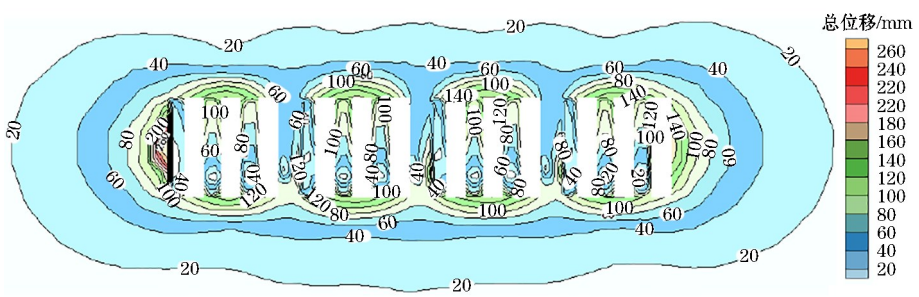
(a) 一步骤采场 60 m 开采高度



(b) 一步骤采场 90 m 开采高度



(c) 二步骤采场 60 m 开采高度



(d) 二步骤采场 90 m 开采高度

图 4 不同开采高度下一步骤和二步骤采场开采总位移云图

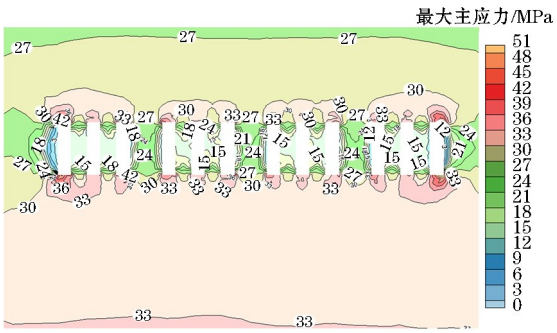
Fig.4 Total displacement cloud diagrams of one-step and two-step stope mining under different mining heights

二步骤采场矿柱开采时,一步骤采场矿房已充填。60 m 开采高度采场围岩产生的最大总位移为 163.4 mm,最大位移位于采场围岩边帮,顶底板处的位移总体较大,最大值为 126.8 mm,并从顶底板至充填体的中部依次减小。90 m 开采高度采场围岩产生的最大总位移为 273.3 mm,最大位移仍位于采场围岩边帮,顶底板处的位移总体较大,最大值为 162.7 mm,并从顶底板至充填体的中下部依次减小。

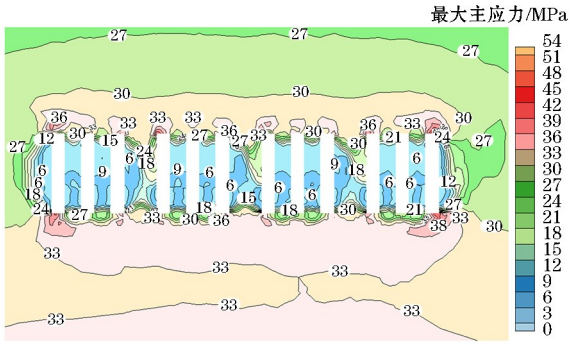
3.2.2　两种开采高度下采场应力分析

在应力计算过程中,矿岩体综合考虑了自重应力和构造应力的影响。得到不同开采高度下一步骤和二步骤采场开采最大主应力云图,如图 5 所示。由图 5 可知,在开采一步骤矿房时,60 m 开采高度下采场最大压应力主要集中于顶底板位置,最大压应力为 50.2 MPa,且压应力由采场中间向两侧逐渐减小。矿柱所受压应力相对较小,这是因为矿柱的位移变形有效释放了围岩中的压应力,使得压应力从采场边帮中部向上下两个方向依次增大,最终趋于稳定,达到一定深度后便不再受开挖扰动的影响。

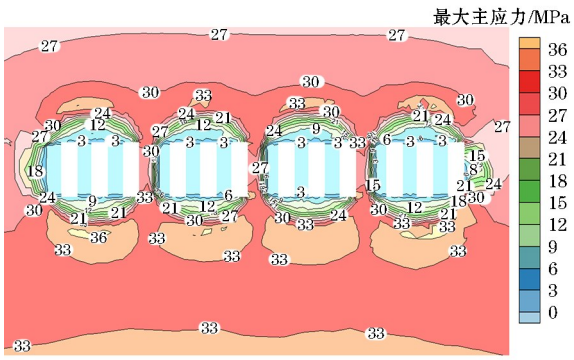
对于 90 m 开采高度的采场,其最大主应力分布规律与 60 m 开采高度方案相似,最大压应力为 53.4 MPa。在开采二步骤采场矿柱时,最大压应力主要集中在盘区间柱中,最大主应力为 35.3 MPa,此时压应力同样由采场中间向两侧逐渐减小,间柱内的压应力分布亦呈现由中间向上下及外部依次减小的趋势,总体上未出现显著的压应力集中现象。这是因为采场充填体有效释放了围岩内部的应力,避免了采场周围压应力集中,且充填体内部的应力水平较低。尽管 90 m 开采高度采场中的最大主应力分布规律与 60 m 开采高度方案基本一致,但在盘区间柱的拱脚和底角位置处却出现了较为明显的压应力集中,最大压应力达到 41.4 MPa,这表明此时充填体未能提供足够的支撑以有效释放围岩间柱内的应力。



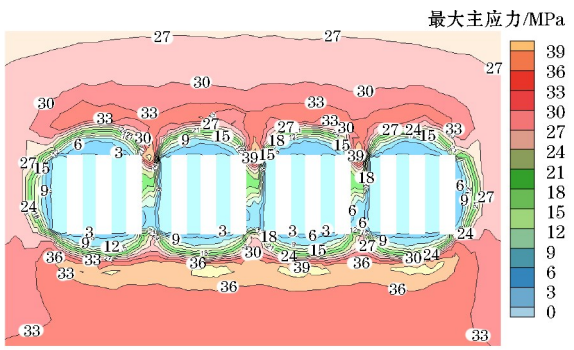
(a) 一步骤采场 60 m 开采高度



(b) 一步骤采场 90 m 开采高度



(c) 二步骤采场 60 m 开采高度



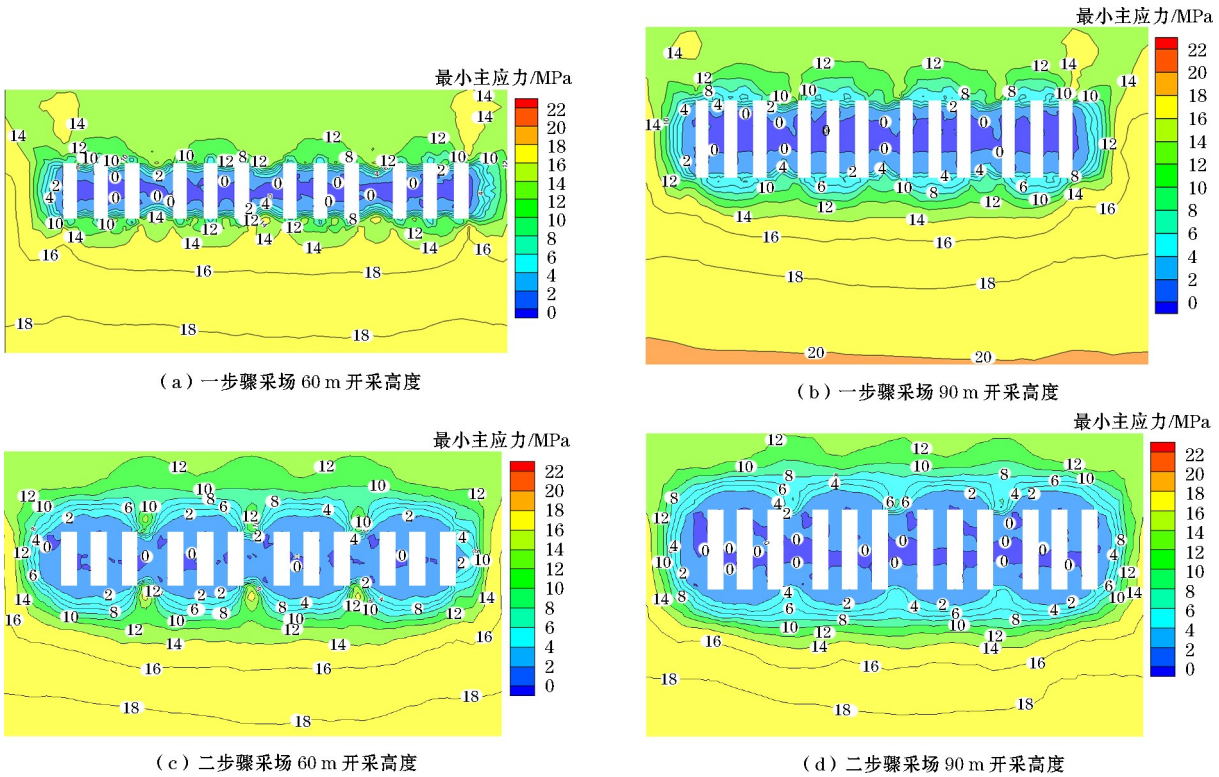
(d) 二步骤采场 90 m 开采高度

图 5　不同开采高度下一步骤和二步骤采场矿房开采最大主应力云图

Fig.5　Maximum principal stress cloud diagrams of one-step and two-step stope mining under different mining hieghts

不同开采高度下一步骤和二步骤采场矿房开采最小主应力云图如图 6 所示。从图 6 可以看出,在开采一步骤采场矿房时,拉应力主要集中在矿柱中间部位。具体而言,60 m 开采高度下采场最大拉应力为 1.15 MPa,低于矿柱的抗拉强度 2.3 MPa,而 90 m 开采高度下采场最大拉应力为 2.53 MPa,部分区域所受拉应力超过了矿柱的抗拉强度。在开采二步骤采场矿柱时,拉应力则主要集中在一步骤采场矿房的充填体内,其中,60 m 开采高度下采场充

填体内产生的最大拉应力为 0.21 MPa,小于充填体的抗拉强度 0.67 MPa,而 90 m 开采高度下采场充填体内产生的最大拉应力为 0.68 MPa,超过了充填体的抗拉强度。



(a) 一步骤采场 60 m 开采高度　(b) 一步骤采场 90 m 开采高度

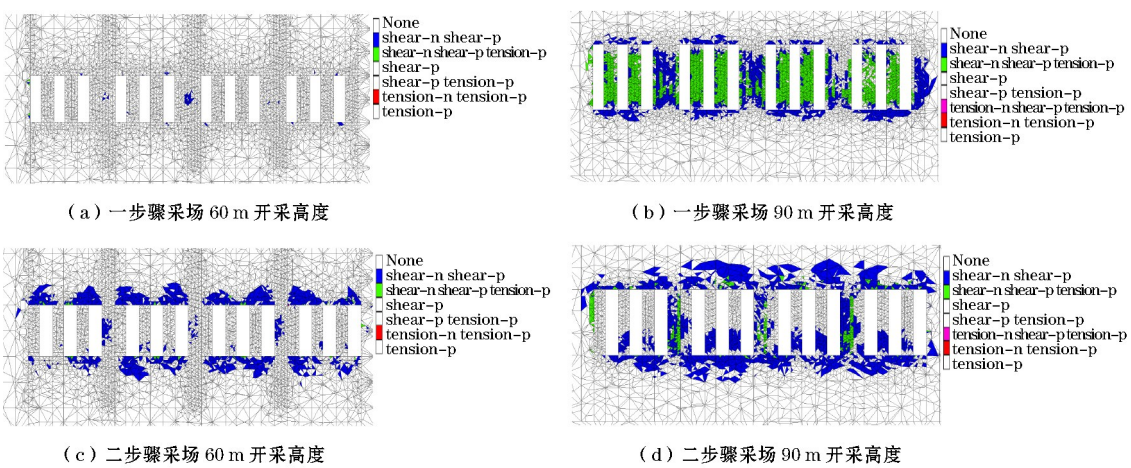
(c) 二步骤采场 60 m 开采高度　(d) 二步骤采场 90 m 开采高度

图 6　不同开采高度下一步骤和二步骤采场矿房开采最小主应力云图

Fig.6　Minimum principal stress cloud diagrams of one-step and two-step stope mining under different mining hieghts

3.2.3　两种开采高度下采场塑性区分析

塑性区是衡量岩石力学状态的综合性评价指标。当某一区域的应力恰好位于屈服面上,或正处于破坏状态时,用 shear-n 或 tension-n 标识,若某一区域在计算过程中曾进入屈服状态,但目前已退出,则用 shear-p 或 tension-p 标识。通过模拟计算,得到典型剖面采场塑性区云图,如图 7 所示。shear-p 或 tension-p 表示该区域在计算过程中曾进入屈服状态但已退出,因此,未将之前进入屈服状态的塑性区域纳入其中。



(a) 一步骤采场 60 m 开采高度　(b) 一步骤采场 90 m 开采高度

(c) 二步骤采场 60 m 开采高度　(d) 二步骤采场 90 m 开采高度

图 7　不同开采高度下一步骤和二步骤采场开采塑性区云图

Fig.7　Plastic zone cloud diagrams of one-step and two-step stope mining under different mining hieghts

从图 7 可以看出,在开采一步骤采场矿房时,60 m 开采高度下采场附近围岩基本未产生塑性区破

坏,仅少部分间柱和顶底板位置出现小面积剪切破坏。90 m 开采高度下采场顶底板位置出现剪切破坏区域,且矿柱内产生大面积拉剪混合破坏区域,出现塑性区贯通现象,这对采场的稳定性极为不利。在开采二步骤采场矿柱时,60 m 开采高度下采场顶底板位置产生剪切破坏区域,塑性区破坏深度为 20～30 m,充填体内有小面积剪切破坏,但未出现塑性区贯通。90 m 开采高度下采场顶底板位置出现大量剪切破坏区域,塑性区破坏深度达 40～50 m,充填体内出现剪切破坏和拉剪混合破坏区域,且塑性区已贯通,这对充填体的稳定性极为不利。

通过分析不同开采高度下采场的位移、应力及塑性区分布可知,在一步骤采场开采阶段,采场围岩的最大位移出现在边帮处。相较于 60 m 开采高度,90 m 开采高度下采场最大总位移增加了 70～100 mm。应力分析表明,60 m 开采高度下采场无明显压应力集中,最大拉应力未超过矿体和充填体的抗拉强度,矿柱与充填体的塑性区未贯通,而 90 m 开采高度下采场存在较大压应力集中,最大拉应力超过抗拉强度,导致矿柱与充填体的塑性区贯通。在二步骤采场开采阶段,由于充填体的支撑作用弱于矿柱,顶底板围岩的位移增大,相比 60 m 开采高度,90 m 开采高度下采场最大总位移增加了 40～110 mm。60 m 开采高度下采场依然无明显压应力集中,最大拉应力未超过抗拉强度,矿柱和充填体的塑性区未贯通,而 90 m 开采高度下采场则出现了较大压应力集中,最大拉应力超过抗拉强度,矿柱和充填体的塑性区贯通破坏。

综合位移场、应力场及塑性区分布特征的多维度分析可知,60 m 开采高度在抑制塑性区扩展与保障采场长期稳定性方面表现出显著优势。而 90 m 开采高度存在诱发采场片帮与冒顶的安全风险,且其力学响应特征已超出工程安全阈值。因此,在充填体强度参数一致的条件下,基于工程安全性与经济合理性,选用 60 m 开采高度作为采场开采设计参数具备技术可行性、经济最优性及安全保障性。

4 结论

(1) 围绕该钼铅锌多金属矿深部开采过程中的岩石力学特征与稳定性问题,系统开展了试验研究与数值模拟分析。通过测试主要岩性的物理力学参数,以及分析原岩应力场分布规律,明确了矿区深部应力环境以水平应力为主,且在一定深度范围内存在潜在的岩爆风险。在此基础上,结合 FLAC3D 数值模拟,系统评价了不同开采高度条件下地表及采场的稳定性。

(2) 60 m 和 90 m 开采高度能够在一定程度上保障井筒及地表建(构)筑物的安全性,但 90 m 开采高度下采场局部区域出现较明显的应力集中与塑性区贯通,且在 90 m 开采高度下充填体中产生的拉应力要大于充填体抗拉强度,存在潜在的安全隐患。120 m 开采高度则导致地表水平变形、倾斜及曲率均超出允许范围,且井筒变形风险显著增大,难以满足安全开采要求。综合地表稳定性、采场围岩力学响应及充填体承载特性分析,60 m 开采高度条件在保证工程安全性的同时兼顾了经济合理性,是较为合理的开采方案。

(3) 数值模拟揭示了不同开采高度对地表沉降范围、采场应力分布及塑性区演化规律的影响,进一步证实了充填开采在缓解深部高应力条件下岩体变形与破坏方面的重要作用。研究成果为该钼铅锌多金属矿深部充填开采设计与方案优化提供了科学依据,也为类似地质条件下多金属矿床的安全高效开采提供了参考。

参考文献(References):

[1] 杨小聪,蒋合国.新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采:以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J].中国矿业,2024,33(5):9-21.
YANG Xiaocong, JIANG Heguo. New quality productive forces leads the safe and efficient mining of deep metal mines: taking deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 9-21.

[2] 王聪,张达,冀虎.地下金属矿山高精度微震监测系统的研发与应用[J].中国矿业,2020,29(增刊 1):126-130.
WANG Cong, ZHANG Da, JI Hu. Research and application of high-precision microseismie monitoring system for underground metal mines[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Suppl.1): 126-130.

[3] 陈璐,陈青,张梅,等.矿山深部开采顺序优化与岩爆灾害超前控制效果研究[J].中国矿业,2025,34(4):76-86.
CHEN Lu, CHEN Qing, ZHANG Mei, et al. Research on sequence optimization and advance control effect on rockburst of deep mining[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4): 76-86.

[4] HOEK E, MARTIN C. Fracture initiation and propagation in intact rock: a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 287-300.

[5] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock [M]. London:Institution of Mining and Metallurgy,1980.

[6] 王普,陈慧丹,魏泽笙,等.FLAC3D数值模拟技术在煤矿开采防灾减灾教学中的应用与探索[J].实验技术与管理,2025,42(7):156-162.
WANG Pu, CHEN Huidan, WEI Zesheng, et al. Application and exploration of FLAC3D numerical simulation technology in coal mining disaster prevention and mitigation teaching [J]. Experimental Technology and Management,2025,42(7):156-162.

[7] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向2035年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
GUO Qifeng, CAI Meifeng, WU Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035[J]. China Mining Magazine,2022,44(4):476-486.

[8] 江权,史应恩,蔡美峰,等.深部岩体大变形规律:金川二矿巷道变形与破坏现场综合观测研究[J].煤炭学报,2019,44(5):1337-1348.
JIANG Quan, SHI Ying'en, CAI Meifeng, et al. In-situ observation on large deformation and failure of deep tunnel: case study for the Jinchuan No.2 Mine[J]. Joural of China Coal Society,2019,44(5):1337-1348.

[9] 陈祉颖,刘志祥,李夕兵,等.残矿矿柱回采方案数值模拟与优化研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2150-2161.
CHEN Zhiying, LIU Zhixiang, LI Xibing, et al. Numerical simulation and optimization of recovery scheme for residual ore pillars[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(6):2150-2161.

[10] 彭定潇,李夕兵.基于PSO-SVM算法联合数值模拟的红岭铅锌矿地表移动带圈定[J].有色金属工程,2019,9(3):98-107.
PENG Dingxiao, LI Xibing. Delineation of surface displacement belt for hongling leadzine mine based on PSO-SVM algorithm combined with numerical simulation[J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(3):98-107.

[11] 李夕兵,宫凤强,王少锋,等.深部硬岩矿山岩爆的动静组合加载力学机制与动力判据[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):708-723.
LI Xibing, GONG Fengqiang, WANG Shaofeng, et al. Coupled static-dynamic loading mechanical mechanism and dynamiccriterion of rockburst in deep hard rock mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(4):708-723.

[12] 潘立友,史明伟,董文卓,等.基于复合弱化结构的上覆煤柱区冲击地压防控研究[J].矿业安全与环保,2023,50(5):99-104+110.
PAN Liyou, SHI Mingwei, DONG Wenzhuo, et al. Study on prevention and control of rock burst in alfected area of overlying coal pillar based on composite weak structure[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2023,50(5):99-104+110.

[13] 潘立友,唐鹏,周脉来,等.悬顶结构巷道冲击地压防控研究[J].煤炭科学技术,2022,50(4):42-48.
PAN Liyou, TANG Peng, ZHOU Mailai, et al. Research on prevention and control of rock burst in entry with suspended roof structure[J]. Coal Science and Technology,2022,50(4):42-48.

[14] 潘立友,牛衍凯,寇天司.深部复杂立体边界采场冲击地压防控技术研究[J].岩土工程学报,2022,44(6):1124-1132.
PAN Liyou, NIU Yankai, KOU Tiansi. Prevention and control technology of rock burst in deep stope with complex solid boundary [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(6):1124-1132.

[15] 汪渊文.矿山地质灾害防治与土地复垦[J].内蒙古煤炭经济,2021(21):188-190.
WANG Yuanwen. Prevention and control of geological hazards in mines and land reclamation[J]. Inner Mongolia Coal Economy,2021(21):188-190.

[16] 李广利.岔路口钼铅锌多金属矿选矿工艺的探讨[J].云南冶金,2018,47(2):34-38.
LI Guangli. The discussion on beneficiation process of polymetallic ore with molybdenum, lead and zinc in Chalukou[J]. Yunan Metallurgy,2018,47(2):34-38.

[17] 姚永亮.大兴安岭岔路口钼铅锌多金属矿区水源地水文地质特征及地下水资源评价[D].哈尔滨:黑龙江大学,2015.
YAO Yongliang. Hydrogeological characteristics and groundwater resource evaluation of the water source area of the molybdenum lead zinc polymetallic mining area at the fork of the Daxing'anling Mountains [D]. Harbin: Heilongjiang University,2015.