

# 近地表破碎矿体回采方案优化与 地表稳定性分析

Optimization of Mining Scheme and Surface Stability Analysis of Near-surface Broken Orebody

潘泽<sup>1</sup>, 赵亮<sup>2,3</sup>, 母玉雄<sup>1</sup>, 苏振楠<sup>1</sup>, 许辉<sup>1</sup>

(1. 新疆哈巴河阿舍勒铜业股份有限公司, 新疆 哈巴河县 836700; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;  
3. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

**摘要:**为对近地表破碎矿体进行科学的开采并保障地表构筑物安全,提出分段凿岩分段出矿嗣后充填法和上向进路充填法组合回采方案,并通过FLAC<sup>3D</sup>软件对两种方案不同采场结构参数下的开挖和充填全过程进行模拟计算,分析采场围岩及地表的稳定性。结果表明:分段凿岩分段出矿嗣后充填法采用6 m(宽)×10 m(高),上向进路充填法采用4 m(宽)×4 m(高)两种结构参数回采时,顶底板的下沉和底鼓现象不明显,矿柱的应力集中范围最小,矿围岩无大面积塑性区贯通,整体稳固性最好;矿体回采结束后,地表最大沉降位移4.27 mm,倾斜率最大值为0.101 mm/m,曲率最大为0.842 mm/m<sup>2</sup>,水平变形最大值为0.056 mm/m,各项指标分析结果表明,矿体按设计方案回采对地表建、构筑物的影响很小。研究可为类似矿体回采提供经验。

**关键词:**地下开采;近地表破碎矿体;采场结构参数优化;数值模拟;地表移动规律

**中图分类号:** TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0011-10

**Abstract:** In order to scientifically mine the near-surface broken orebody and ensure the safety of surface structures, the combination of rock drilling and filling method and upward approach filling method is proposed. FLAC3D software was used to simulate the whole process of excavation and filling under different quarry structural parameters of the two scenarios, and to analyze the stability of the quarry perimeter rock and the ground surface. The results show that: when mining with the two structural parameters of 6 m (width) × 10 m (height) for segmented rock drilling and segmented mine subsequent filling method and 4 m (width) × 4 m (height) for upward approach filling method, the phenomena of top and bottom sinking and bottom bulging are not obvious, the range of stress concentration of the ore column is the smallest, and there is no large area of plastic zone penetration in the mine peripheral rock, so the overall solidity is the best; After the end of mining, the maximum settlement displacement of the surface is 4.27 mm, the maximum value of inclination is 0.101 mm/m, the maximum value of curvature is 0.842 mm/m<sup>2</sup>, and the maximum value of horizontal deformation is 0.056 mm/m. The results of the analysis of various indexes show that the mining of the ore body in accordance with the design scheme has very little impact on the surface buildings and structures. The study may provide experience in mining back similar ore bodies.

**Key words:** underground mining; near-surface broken ore body; optimization of stope structure parameters; numerical simulation; law of surface movement

## 1 前言

采场结构参数的选择与矿山生产能力和矿山安全产密切相关,已经成为采矿工艺研究过程中一个核心的要素<sup>[1-2]</sup>。对于浅埋矿体开采而言,选择合

理的采矿方法和采场结构参数,控制地表移动范围,确保地下资源高效、安全的回采是我们一直追求的目标。经过几十年的发展,研究地下开采工程结构稳定性的方法和手段已经不断丰富起来。目前,国内外研究采场结构参数的方法主要有经验类比、理论计算、不确定性分析、相似模拟及数值模拟等<sup>[3-4]</sup>。

罗瑞等<sup>[5]</sup>结合 Mathews 稳定图法和数值计算法,确定了上向水平分层充填法矿房的稳定性和合

[作者简介] 潘泽(1993—),男,甘肃民勤人,工程师,主要从事金属矿山安全开采和管理工作。

[引用格式] 潘泽,赵亮,母玉雄,等.近地表破碎矿体回采方案优化与地表稳定性分析[J].中国矿山工程,2025,54(3):11-20.

理跨度;邵亚平等<sup>[6]</sup>基于多种理论分析方法和数值模拟,对中深孔空场嗣后充填采场结构参数进行了优化;郭进平等<sup>[7]</sup>应用 Mathews 图解法对采场结构参数进行初选,然后应用 FLAC<sup>3D</sup>进行采场结构的稳定性分析,综合确定最优采场结构参数;刘志义等<sup>[8]</sup>基于 FLAC<sup>3D</sup>软件对二步骤采场的结构参数进行了数值模拟研究;王炳文等<sup>[9]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup>软件对上向进路法的采场结构参数进行了优化,扩大了当前矿岩条件下的采场跨度,生产效率得到提高。马春德等<sup>[10]</sup>利用 ANSYS-FLAC<sup>3D</sup>相结合,模拟不同跨度的采场开挖方案,对深部采场的结构参数进行了优化。

本文以近地表破碎矿体为研究背景,提出分段凿岩分段出矿嗣后充填法和上向进路充填法组合回采方案,借助 FLAC<sup>3D</sup>软件,分析回采过程中围岩的稳定性,对两种方案进行采场结构参数优化,该方案在保障安全的同时极大提高了矿体回采效率;同时,

进一步研究回采过程中,地表变形随着时间的变化,分析地表变形规律,保障矿山开采过程地表构筑物安全,为类似矿体回采提供经验。

## 2 工程概况

矿体分布不连续,主要为三个较大矿体和其他零星小矿体,赋存标高 759 ~ 898 m,5<sup>#</sup> ~ 9<sup>#</sup>勘探线之间,主要位于 7<sup>#</sup>勘探线,倾角 64° ~ 71°,厚度 4 ~ 27 m,矿体赋存形态如图 1 所示。矿体围岩岩性简单,主要为凝灰岩层和玄武岩,凝灰岩整体节理极为发育,比较破碎,完整性较差,岩体质量分级为Ⅲ级和Ⅳ级,钻孔岩芯图片如图 2 所示。根据矿体赋存形态、岩体质量分级结果和现场地表构筑物情况,设计回采方案为:800 ~ 810 m 为首采分层,810 m 水平以下矿体采用分段凿岩分段出矿嗣后充填法,810 m 以上采用上向进路充填采矿法的组合回采方案,整体回采顺序为自下而上。

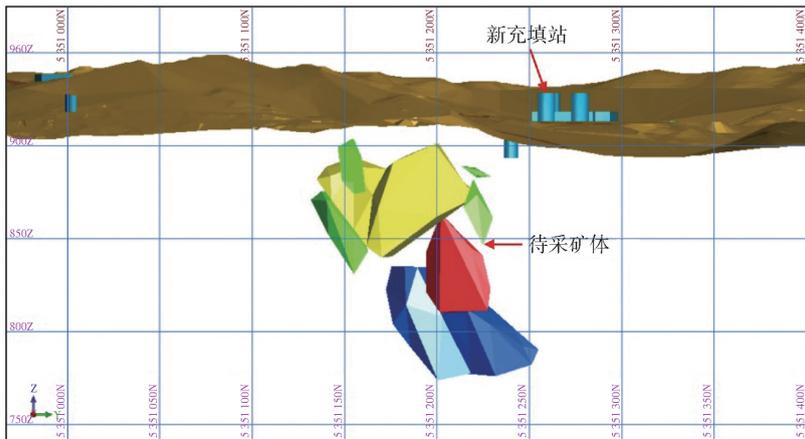


图1 矿体赋存形态示意图

## 3 计算模型及模拟方案

### 3.1 计算模型的建立

根据弹塑性力学理论,开挖后应力变化的影响范围为所开挖范围的 3 ~ 5 倍。按照开采范围,确定本次模型平面尺寸为 200 m × 250 m,模型的高程范围为 74 ~ 950 m。矿体开采以及周边受开采影响区域的网格尺寸为 1 m,围岩网格尺寸为 5 m。矿体和围岩的计算模型如图 3 所示,模型的最终网格单元和节点的数量分别为 614 413 和 469 795。

国内外矿山开采工程经验和力学研究表明,在同等围岩和力学载荷条件下,进路法采场的稳



图2 钻孔岩芯图片

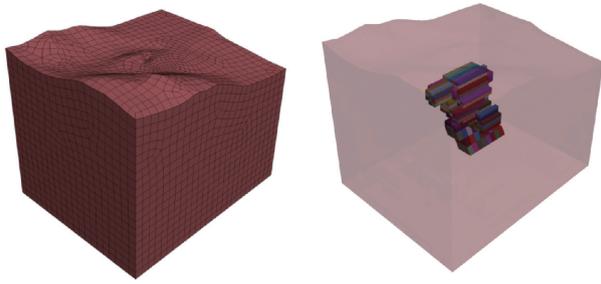


图3 三维数值模型

定性主要由采场宽度(跨度)决定,此次数值模拟主要对不同宽度的采场进行稳定性分析,择其稳定性较好的采场尺寸作为推荐结构参数。从目前国内外矿山开采的实践经验来看,6 m宽也可作为进路法开采的主流选择。充分考虑矿山开采稳定

性要求和岩体质量分级结果,结合矿山设备设施,此次上向进路充填法选择4 m(宽)×4 m(高)进路和5 m(宽)×4 m(高)进路两种方案进行对比分析;分段凿岩分段出矿空场嗣后充填方案采用6 m(宽)×10 m(高)和8 m(宽)×10 m(高)两种参数。由于矿体形态变化较大,上向进路充填法分析时选取矿体较为厚大的810~814 m分层,分段凿岩分段出矿嗣后充填法选择800~810 m为首采分层。具体模拟方案见表1。

### 3.2 岩体力学参数与力学模型

本次计算采用Mohr-Coulomb本构模型。根据矿山工程地质条件及模拟方案,模拟考虑三种力学介质:凝灰岩、矿岩和充填体,详细参数见表2。

表1 数值模拟方案

方法	方案	采场尺寸/m	分析分层	备注
上向进路充填法	方案一	4×4	810~814 m 分层	采场长度为矿体走向长度
	方案二	5×4		
分段凿岩分段出矿嗣后充填法	方案一	6×10	800~810 m 分层	采场长度为矿体厚度
	方案二	8×10		

表2 岩体物理力学参数

岩组	重力密度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹模/GPa	泊松比 $\mu$	抗拉强度/MPa	黏结力 $c/\text{MPa}$	摩擦角 $\phi/(\text{°})$
凝灰岩	27.19	5.15	0.18	0.26	2.85	32.14
矿岩	26.53	7.91	0.14	0.35	3.93	35.29
充填体	9.21	1.00	0.10	0.005	0.35	19.32

## 4 模拟结果分析

### 4.1 位移分析

开采扰动必然导致采场周边围岩发生移动,通常以垂直位移为主,按前述章节开采顺序整体自下而上进行模拟开采,主要分析采场开采过程中拟定方案的垂直位移的大小,分析一、二步骤开采过程中位移的变化。

图4所示为分段凿岩分段出矿嗣后充填法的两种不同跨度的垂直位移分布云图,通过对比分析得到:采场顶板有不同的沉降位移产生,底板表现出底鼓现象;跨度为6 m时最大沉降位移量为3.28 mm,8 m跨度最大沉降位移量为3.32 mm;开采二步骤采场时顶板沉降位移有一定的上升,6 m采场沉降位移增加至8.35 mm,8 m采场沉降位移增加至

8.5 mm。

图5所示上向进路充填法不同跨度和不同分层的垂直位移变化云图,通过对比分析得出:采场开挖后,顶板均有不同程度的沉降位移产生,810~814 m分层部分进路采场底板为充填体其正上方沉降位移较大,而底板为原岩时沉降位移则较小;跨度为4 m的最大沉降位移为9.07 mm,跨度为5 m的沉降位移增加至9.25 mm;二步骤回采时,沉降位移有所增加,4 m跨度增加至9.91 mm,5 m跨度最大位移增加至11.2 mm,整体趋势表现为跨度越大沉降位移量越大。

由上述分析可知,两种方法的不同开采跨度位移总体变化量均未超过20 mm,结合最大容许位移量经验值的参考指标,在确保岩体完整性且岩体仍具有承载能力的条件下,不同跨度采场均具有良好

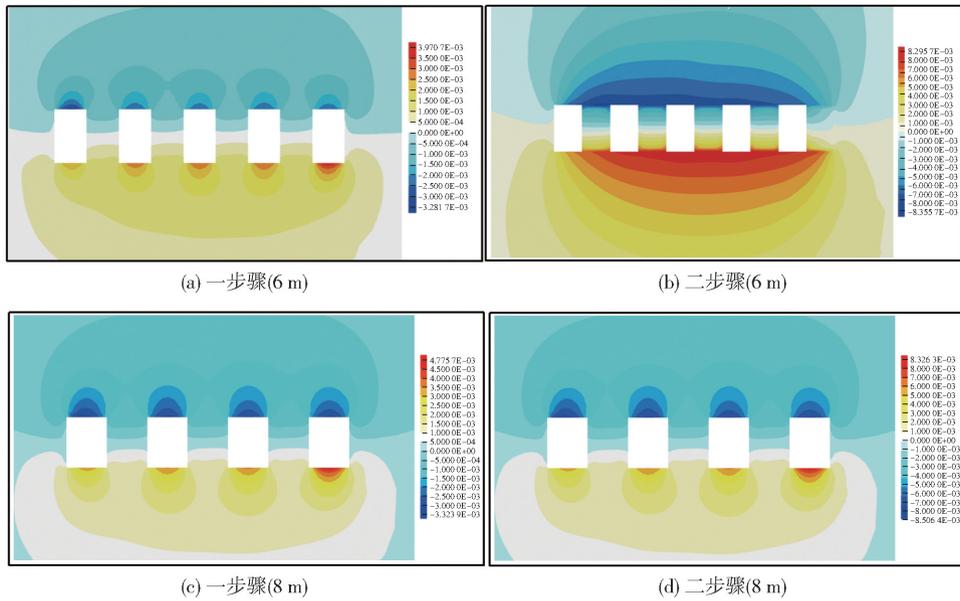


图4 800~810 m 分层不同跨度位移云图

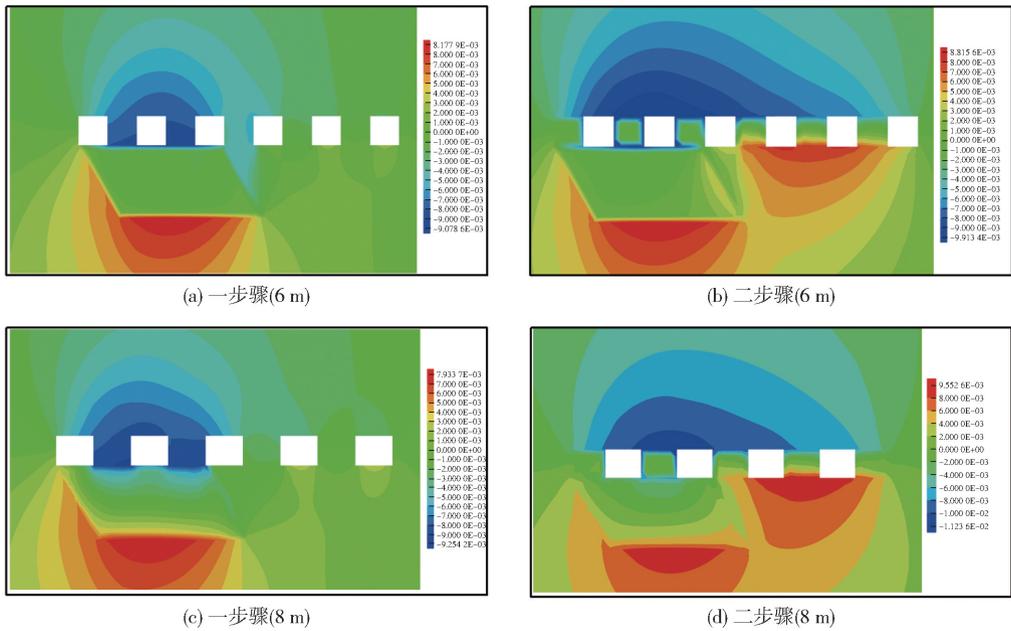


图5 810~814 m 分层不同跨度位移云图

的自稳能力。

### 4.2 应力分析

采场开挖同样会引起围岩应力变化,FLAC<sup>3D</sup>中用来评价应力变化的参数有多个,其中与岩体强度关系最密切的为最大主应力和最小主应力两个评价指标,尤其是最大主应力,反映了岩体中拉应力的变化情况。国内外学者研究认为,岩体是抗压材料,其抵抗压力的能力远远超过其抗拉能力。相对来说,承受压力不易破坏,但受拉易发生变形破坏,故受拉

破坏是岩体的主要破坏形式之一。根据这一基本认识,在以下的应力分析过程中,将最大主应力的分布情况和变化作为分析重点。

采场开挖后,应力重新分布,应力场发生了较大的改变。不同结构参数的最大主应力云图如图6至图7所示。

图6所示为分段凿岩分段出矿嗣后充填法两种结构参数的最大主应力分布情况,通过对比分析得出:采场开挖后,周围围岩应力重新分布,最大主应

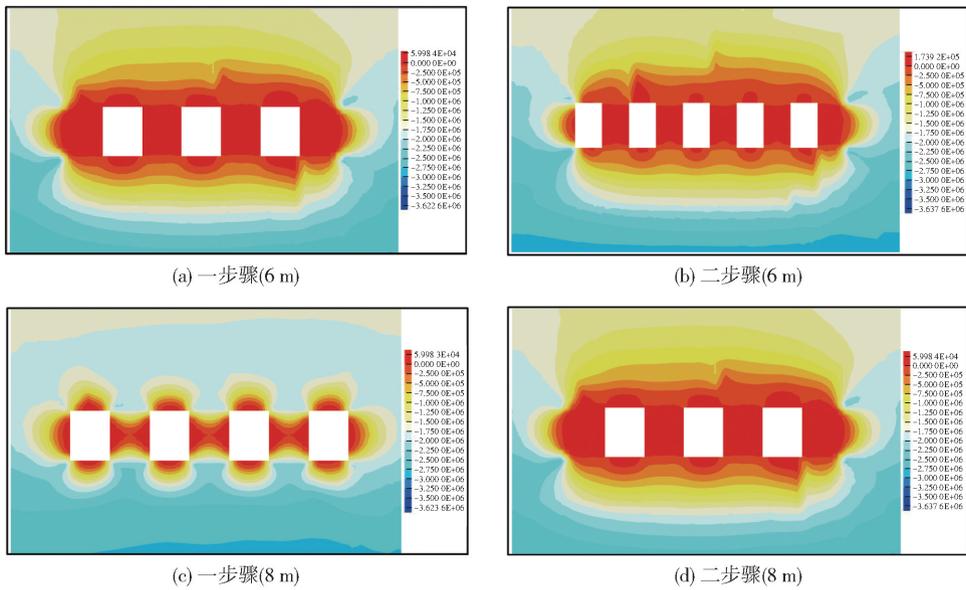


图6 800 ~ 810 m 分层不同跨度最大主应力分布云图

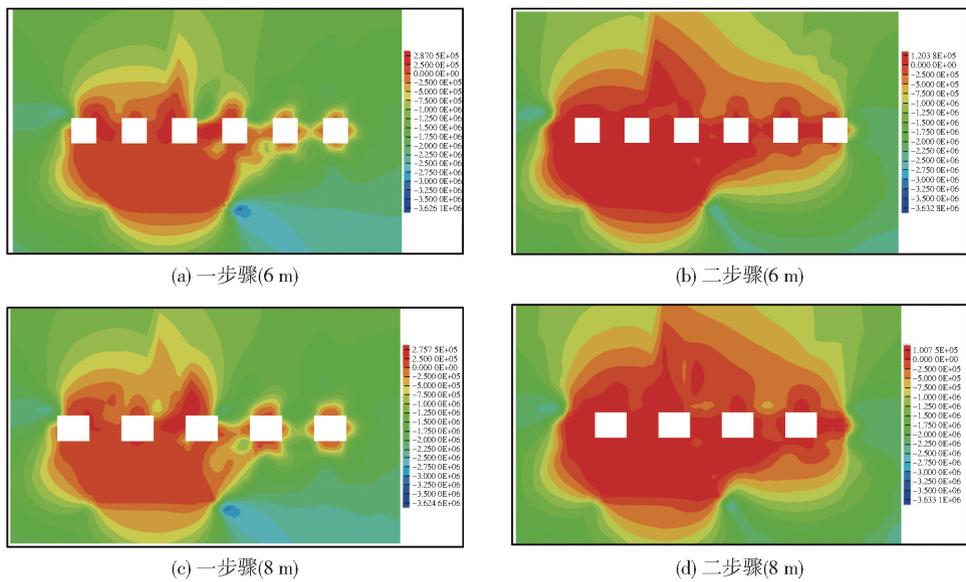


图7 810 ~ 814 m 分层不同跨度最大主应力分布云图

力出现在采空区顶底板和矿柱范围内,且存在应力集中现象;此时该分层刚回采第一步骤,开采扰动对岩体的应力转移作用影响有限,6 m 和 8 m 跨度采场最大主应力值约为 0.06 MPa,呈现为拉应力状态,顶底板应力集中范围较小,6 m 矿柱内部应力集中大于 8 m 矿柱;二步骤采场的应力集中范围有所扩大,采场四周均出现拉应力,6 m 采场的矿柱拉应力数值约为 0.17 MPa,8 m 采场矿柱数值较小为 0.059 MPa。

随着开采不断推进,采动范围不断扩大,最大应力变化更加剧烈。图 7 所示为上向进路充填法两种

结构参数的最大主应力云图分布情况:810 ~ 814 m 分层一步骤开采时 4 m 跨度最大主应力值为 0.29 MPa,5 m 采场最大拉应力为 0.28 MPa,二步骤回采时 4 m 跨度和 5 m 跨度最大主应力值分别为 0.12 MPa 和 0.1 MPa。

由上述分析可知,不同方案的最大主应力数值上相近,但 5 m 和 6 m 跨度的采场应力集中范围明显大于 4 m 和 8 m 跨度采场。

### 4.3 塑性区分析

塑性区的分布直观的反映了岩体稳定性,模型单元的塑性情况在已有应力作用下直接呈现出

剪切或者拉伸破坏状态,采矿工程中通过分析围岩塑性区分布情况可以更直接评价围岩完整性,因此各方案围岩所处应力、应变条件下塑性区分

布、破坏单元的数目可作为其稳定性评价的有力依据。图8至图9所示为不同方案采场开采后的塑性区分布。

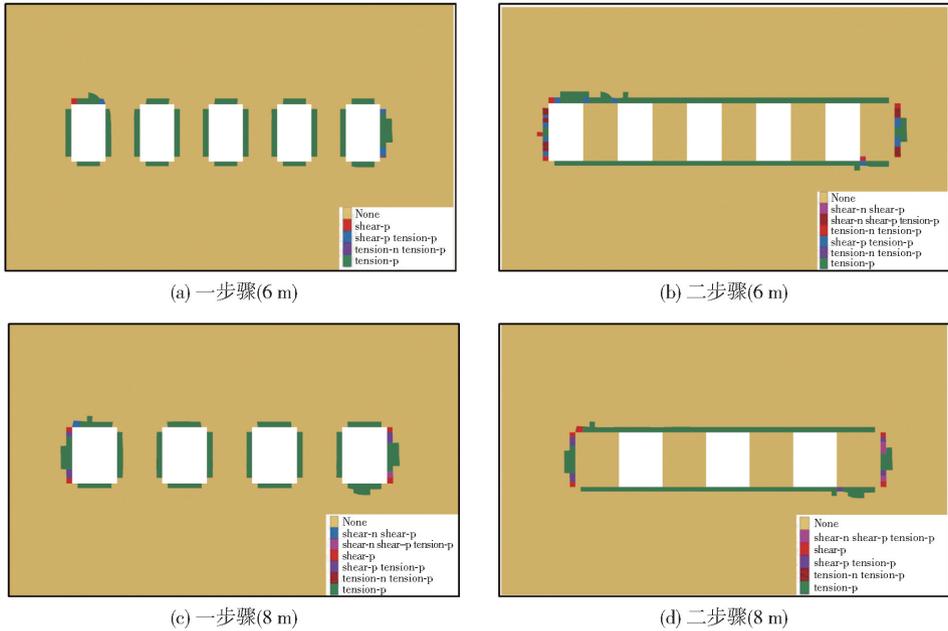


图8 800~810 m 分层不同跨度塑性区分布图

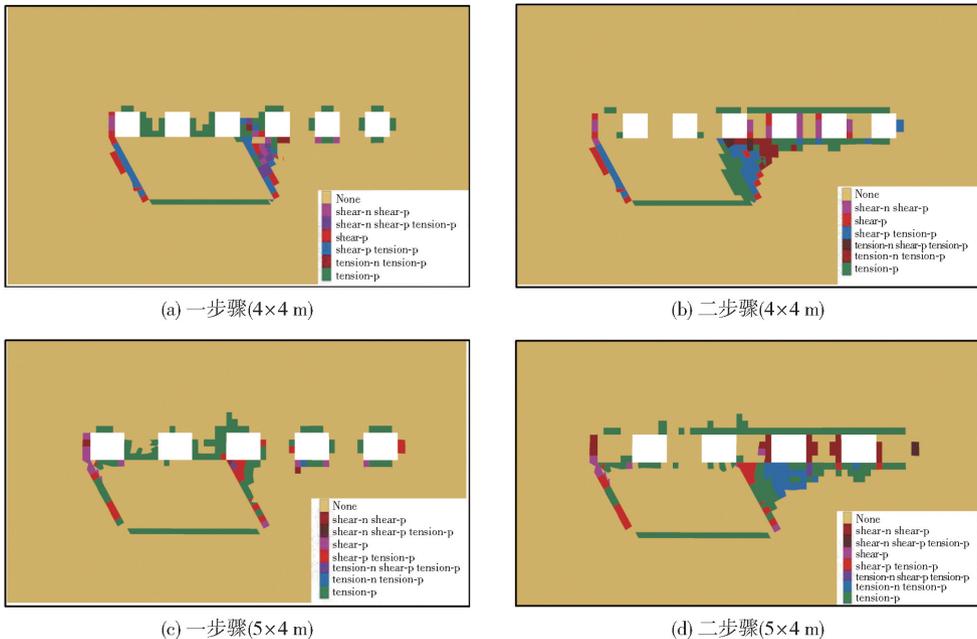


图9 810~814 m 分层不同跨度塑性区分布图

图8所示为分段凿岩分段出矿嗣后充填法两种方案塑性区分布图,通过对比分析得出:采场开挖后四周均出现不同程度的塑性区,侧帮并没有随着跨度增加而出现变化,但顶板塑性区范围有所扩大,应重点关注顶板的破坏情况;6 m 和 8 m 跨度顶板及侧帮塑性区的围岩均表现为 tension-p,表明顶板和

侧帮存在一定的失稳风险;在矿岩与围岩的相接处,采场侧帮有多种形式的塑性区出现,开采两侧采场时应关注其侧帮的稳定性;二步骤开采时塑性区主要集中于顶板大面积分布,应关注顶板的稳定性,提高充填接顶率,避免形成大面积采空区连通,导致顶板垮塌。

图9所示为上向进路充填法不同方案塑性区分布图,通过对比分析显示:810~814 m 分层开采时,顶板出现小范围的塑性区,随跨度增加顶板塑性区有所扩大,表现为 tension-p,跨度为5 m 时顶板存在失稳风险;受800~810 m 分层开采影响,在底板为充填体的情况下采场侧帮出现塑性区贯穿的情况。

由上述分析可知,5 m 和6 m 的采场跨度塑性区范围略大于4 m 和8 m 跨度,回采时采用4 m 和6 m 跨度的采场更为稳妥。此外,锌矿体的形态变化大,夹石多。根据塑性区分布来看,矿体与围岩的相接处塑性区分布较多,尤其是800~810 m 分层采时,上盘围岩的塑性区集中分布,所以开采过程中应注意交界带的顶板稳定性,防止顶板突然冒落。

#### 4.4 综合分析

依照数值模拟结果对位移、应力和塑性区的变化详细分析:从位移角度分析可知不同跨度的采场顶板位移量均不大,采场较大面积失稳的可能性较小;从应力的角度分析,不同跨度的采场应力数值上相差不大,但从应力集中范围来看,分段凿岩分段出矿法6 m 跨度优于8 m,上向进路充填法4 m 跨度优于5 m;从塑性区角度分析,分段凿岩分段出矿嗣后充填法8 m 跨度的顶板塑性区面积较大,存在潜在失稳可能。上向进路充填法5 m 跨度和4 m 跨度塑性区面积相差不大。

考虑到矿山生产能力的要求,采场结构参数大,生产能力相对也会更大,但根据室内岩石力学试验和RQD 估值结果可知,矿围岩的强度较低、完整性较差,大结构采场参数失稳可能性偏高。因此,综合分析810 m 以上分段凿岩分段出矿法选择方案一(6 m 跨度)为最佳结构参数,后期矿岩揭露后,可根据围岩情况在二步骤回采过程中增加采场跨度至8 m。810 m 以下上向进路充填法开采选方案一(4 m 跨度)为最佳结构参数,从岩体质量的三维可视化结果可知,近地表处岩体质量逐渐变差,同时为了地表建构物安全,开采近地表处南翼岩体质量为V 级的矿体应考虑减小采场跨度。

### 5 分层开采对地表稳定性的影响

地下工程开采必然引起岩层变形与移动,其变形速度、影响范围、发生与发展时间受采矿方法、矿体赋存条件(地质条件、岩体物理力学性质、矿层倾角)、开采的深度、厚度、宽度、采场结构尺寸、开采

速度和顺序等众多因素影响<sup>[11-15]</sup>。特别是开采方法和矿体赋存条件,是引起地表变形的主导因素。根据前文确定的开采方法和采场结构参数方案,利用数值模拟的手段对岩层及地表的变形移动进行分析。

通过计算发现,地下矿体的开采会对地表产生一定的影响,根据数值模拟计算结果确定了地表下沉盆地的位置和范围,如具体图10所示。矿体开采充填结束后地表最大沉降位移4.27 mm。

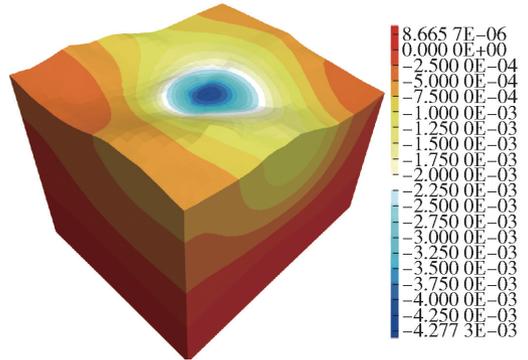


图10 矿体回采结束后地表下沉盆地示意图

为了更加确切的了解锌矿体开采对地表及上覆岩层的影响,对采场开采至不同标高时的地表沉降位移量进行了分析,选取三个典型剖面进行具体分析,三个剖面位置如图11所示。同时在每个剖面上每隔5 m 取一个点并提取其变形值进行分析。

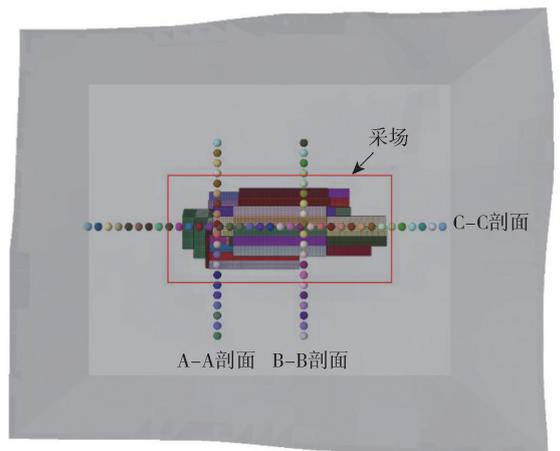


图11 分析剖面位置示意图

随着矿体不断的开采,地表的变形范围和大小也在逐渐变化。在开采结束后,通过对A-A、B-B 剖面和C-C 剖面各监测点数据进行统计处理即得到各项岩移指标(沉降量、倾斜、曲率以及水平变形),具体如图12至图14所示。

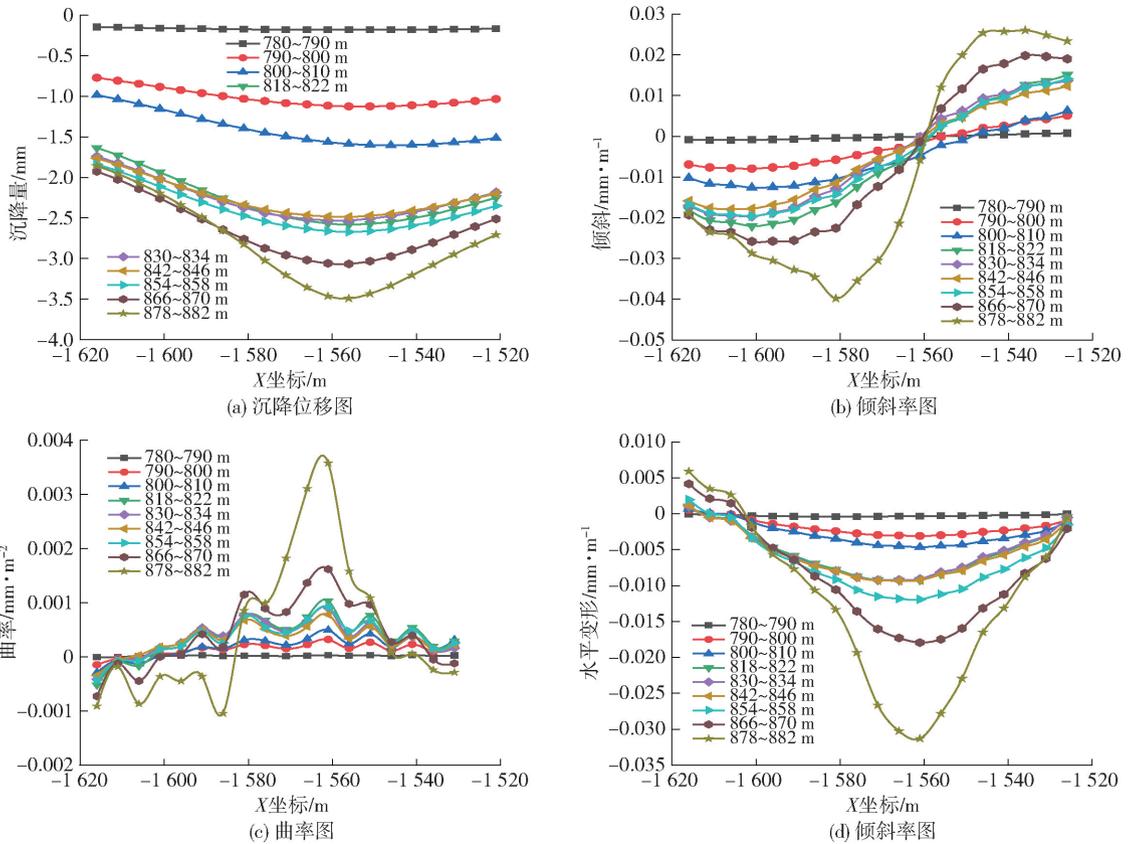


图 12 A-A 剖面各项岩移指标分析图

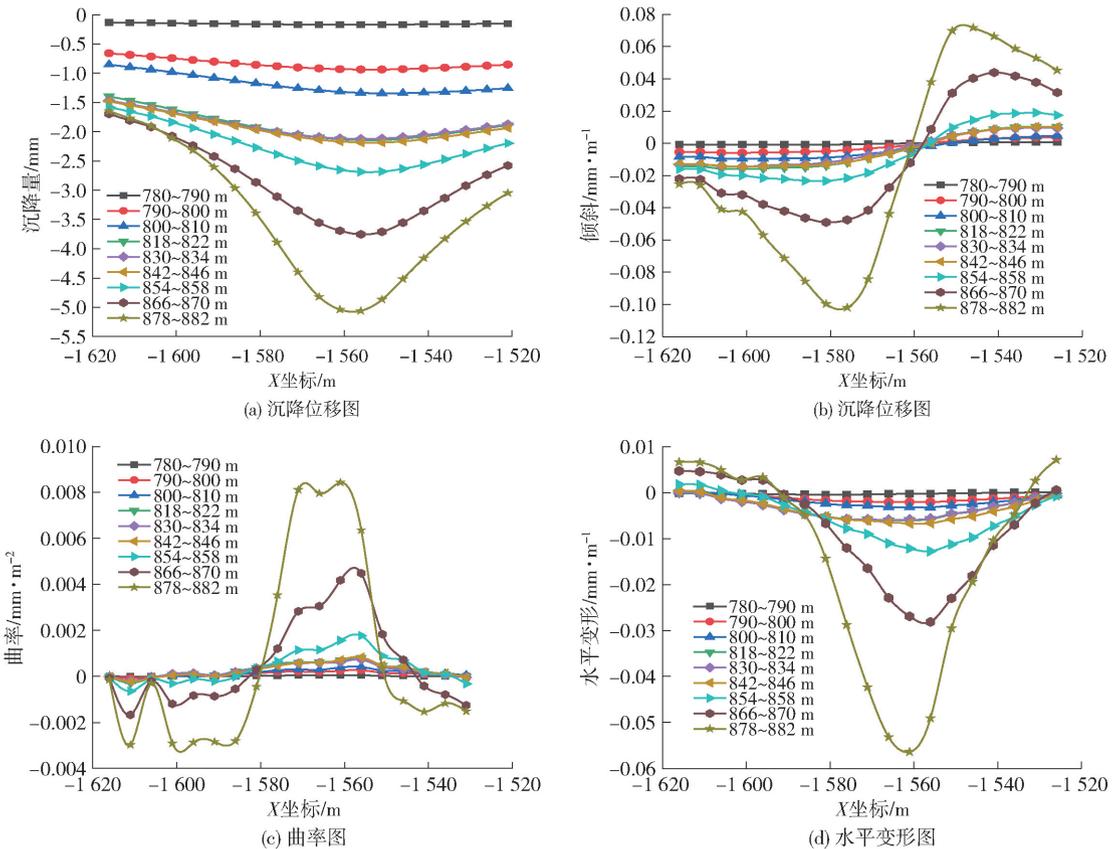


图 13 B-B 剖面各项岩移指标分析图

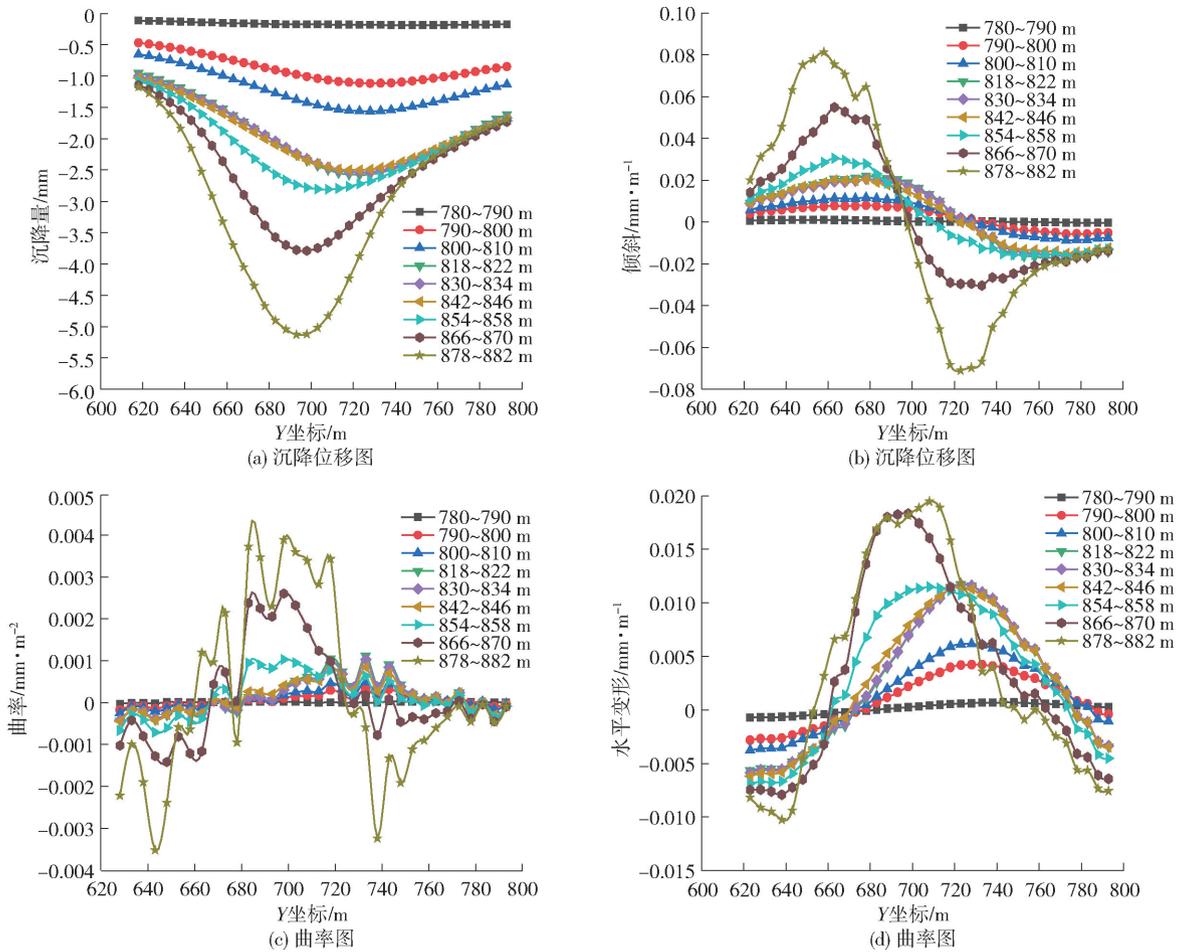


图 14 C-C 剖面各项岩移指标分析图

根据以上监测数据结果,从沉降图可以发现,随着矿体的不断开挖,地表各点的沉降数值逐渐增大,地表沉降量出现类似“漏斗形”变化趋势,从采区中央向外侧逐渐降低;开采初期对地表变形影响较小,从倾斜率来看 866 ~ 870 m 以上分层开采时,地表沉降增速加快。将地表各项最大岩移指标进行统计,具体见表 3。

表 3 各项岩移指标最大值统计

剖面	沉降量	倾斜率	曲率最	水平变形
	最大值/ mm	最大值/ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	大值/ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-2}$	最大值/ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$
A-A	3.49	0.040	0.003 6	0.030
B-B	5.06	0.101	0.084 2	0.056
C-C	5.13	0.081	0.003 8	0.019

根据《有色金属采矿设计规范》(GB 50771 - 2012)中对建构筑物下采矿建构筑物的变形影响指标进行了详细规定,对于一级保护的建筑物,其临界

变形值定为地表倾斜为 3.0 mm/m,地表曲率为 0.2 mm/m<sup>2</sup>,水平变形为 2.0 mm/m,从表中可以看出,地表的各项最大岩移指标均小于《有色金属采矿设计规范》规定的变形极限参考值。以上各项指标分析结果表明,锌矿体采用上向进路充填法和分段凿岩分段出矿空场嗣后充填采矿法进行开采,对地表建、构筑物的影响很小,符合一级保护建筑物的指标要求。且充填采矿法对围岩和地表移动变形有很好的控制作用。

## 6 结论

(1) 矿体分布不连续,倾角 64° ~ 71°,厚度 4 ~ 27 m,矿体围岩主要为凝灰岩层和玄武岩,凝灰岩整体节理极为发育,比较破碎,完整性较差,岩体质量分级为Ⅲ级和Ⅳ级,设计采用分段凿岩分段出矿嗣后充填法和上向进路充填法的组合回采方案。

(2) 根据确定的回采方案,采用 Rhino-Griddle

软件建立不同采场结构参数的数值模拟模型,通过FLAC<sup>3D</sup>进行不同方案模拟分析,比较采场开挖和充填全过程中围岩的位移、应力和塑性区相应和变化特征,最终确定上向进路充填法采用4 m(宽)×4 m(高),分段凿岩分段出矿空场嗣后充填法采用6 m(宽)×10 m(高)的采场结构参数。

(3) 矿体回采结束后,地表最大沉降位移4.27 mm,倾斜率最大值为0.101 mm/m,曲率最大为0.842 mm/m<sup>2</sup>,水平变形最大值为0.056 mm/m,各项指标分析结果表明,矿体按该方案回采对地表建、构筑物的影响很小。

### [参考文献]

- [1] 尹延天,刘焕新,刘震,等. 金属矿山采场稳定性评价方法进展与展望[J]. 中国矿业,2023,32(6):96-103.
- [2] 尹东升,熊国雄,张少杰,等. 某铜铁矿充填法不同回采高度稳定性分析研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(6):6-12.
- [3] Guo Qinqiang, Yu Haoxuan, Dan Zhenyu, et al. Mining method optimization of gently inclined and soft broken complex ore body based on AHP and TOPSIS: taking miao-ling gold mine of China as an example [J]. Sustainability,2021,13(22):12503.
- [4] 张宗国,史秀志,邱贤阳. 利用 Mathews 合成图与动静荷载数值模拟评价倾斜矿体采场稳定性[J]. 中国有色金属学报,2022,32(5):1504-1514.
- [5] 罗瑞,马锟辉. 上向水平分层充填法矿房跨度的确定及采场稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分),2019,71(3):63-66.
- [6] 邵亚平,崔松,陈寅,等. 下行中深孔空场嗣后充填采场结构参数优化研究[J]. 中国矿业,2020,29(S2):329-335.
- [7] 郭进平,晏承园,张雯,等. 分段矿房嗣后充填采矿采场结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(10):1-7.
- [8] 刘志义,张丽春,赵国彦,等. 基于FLAC<sup>3D</sup>的二步采场结构参数优化及工程应用[J]. 金属矿山,2015,44(10):6-10.
- [9] 王炳文,黎林,张书金,等. 基于FLAC<sup>3D</sup>模型的上向进路采场结构参数优化[J]. 中国矿业,2020,29(9):93-96.
- [10] 马春德,徐家庆,刘焕新,等. 基于ANSYS-FLAC<sup>3D</sup>的深部采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程,2021,41(1):20-23.
- [11] 赵康. 金属矿山覆岩移动机理及防治技术[M]. 北京:科学出版社,2019:12.
- [12] 齐栋梁,高重阳. 海南露天铁矿开采地表移动及其对环境的影响[J]. 矿冶工程,2024,44(2):27-30.
- [13] 李林,王智能,杨磊,等. 浅部地下矿山开采引发地表露天矿山变形规律研究[J]. 采矿技术,2024,24(5):63-68.
- [14] 崔轩,杨胜利. 地下开采诱发的地表岩移演化规律及稳定性分析[J]. 矿业研究与开发,2023,43(8):78-83.
- [15] 刘伟明,刘瑞蒙,李天宏,等. 某矿山地下开采对地表建(构)筑物的安全影响[J]. 黄金,2024,45(3):15-19.