

某铜铁矿充填法不同回采高度稳定性 分析研究

Research on the Stability of Different Mining Heights in the Backfilling
Method of a Copper-iron Mine

尹东升¹, 熊国雄¹, 张少杰^{2,3}, 杨志国^{2,3}

(1. 大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿, 湖北 大冶 435100; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 3. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要:合理的采场结构参数对于矿山的安全经济回采具有重要意义。某铜铁矿采用分段空场嗣后充填采矿法开采, 本文采用数值模拟方法, 对不同分段高度(12 m 和 17.5 m)进行了对比研究, 揭示了不同分段高度时采场的应力、位移和塑性区分布的演化规律, 研究结果可为类似开采条件下的矿山提供参考。

关键词:结构参数; 分段高度; 分段空场; 数值模拟

中图分类号: TD862 文献标志码: A 文章编号: 1672-609X(2024)06-0006-07

Abstract: Reasonable stope structure parameters are of great significance to safe and economic extraction in mines. A copper iron ore was mined by sublevel open stoping followed by filling mining method. In this paper, the numerical simulation method was used to conduct a comparative study of different sublevel heights (12 m and 17.5 m), revealing the evolution laws of stress, displacement and plastic zone distribution of the stope under different sublevel heights. It can provide reference for mines under similar mining conditions.

Key words: structural parameter; sublevel height; sublevel open stoping; numerical simulation

1 前言

在地下矿山开采过程中, 选取合理的采场结构参数对于矿山安全、高效、经济回采具有重要意义。合理的一、二步采场分段高度有利于提高矿山的采矿效率, 对于矿山生产计划的实施也十分重要^[1]。许多学者对此进行了研究, 常用的方法有经验类比法、数值模拟分析法、理论分析法等。徐楠等^[2]以某矿山深部开采为研究目标, 设计9组正交试验, 运用FLAC3D数值模拟, 结合每分层可采矿量, 对比分析力学响应指标, 确定矿房宽度10 m、矿柱宽度8 m、分层高度5 m为适宜采场结果参数。李芹涛等^[3]对某岩金矿山采用有限差分软件FLAC3D对两步骤回采采场结构参数进行优化, 确定采场最优分段高度为15 m。丁文俊等^[4]通过现场工程地质调查和室内岩石力学试验, 结

合矿体形态及赋存条件, 建立数值模型, 对开挖后采场内形成的应力、位移和塑性区进行分析, 得出分段高度30 m时采场安全与失稳的临界值。刘龙琼^[5]等对下向凿岩平行中深孔落矿分段充填采矿法展开试验研究, 并采用模拟软件进行采场结构参数的优化, 得出分段高度为10 m时, 采场最为稳定的参数为: 矿柱15 m, 矿房35 m。柴红等^[6]以山东某地下矿井为例, 基于Mathews稳定图表法对采场地质参数和开采参数进行计算, 利用FLAC3D数值模拟软件, 对采场结构参数取值进行了进一步分析, 综合经济、技术因素确定了采场参数合理取值。

本文在参考借鉴上述研究的基础上, 采用数值模拟方法, 对某铜铁矿不同分段高度的应力场、位移场和塑性区分布进行对比分析研究, 为矿山分段高度的确定提供理论依据, 同时可为类似开采技术条件下的矿山开采提供参考借鉴。

2 工程概况

某铜铁矿已全面进入深部开采, 最深已开拓至

[作者简介] 尹东升(1990—), 男, 湖北红安人, 高级工程师, 主要从事金属矿资源开发技术与管理工。

[引用格式] 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.

-800 m 左右,整体回采深度已达 900 m 左右,已形成 10 多个中段,采用竖井开拓,中段运输,由箕斗井提升矿石。目前主要开采的矿体为Ⅲ号、Ⅳ号和Ⅺ号矿体,平均厚度为 30 m,倾角为 $60^\circ \sim 70^\circ$,走向长度为 1 000 m,矿体呈条带状,上盘围岩为含矽卡岩的大理岩,下盘围岩为长斑花岗岩,均属较为稳固的掩体,相比较起来,下盘围岩稳定性要优于上盘围岩。矿体矽卡岩化较为明显,整体稳定性较好,经现场调查发现,上盘围岩及矿体内部发育有大量的潜在结构面,受爆破振动等扰动时,易产生离层、脱落现象。

矿山生产规模为 2 500 t/d。采矿方法有分段空场嗣后充填采矿法(占 60%)、上向水平分层充填法(占 30%)、上向进路充填法(占 10%)。矿体厚度较大时,采场垂直走向布置,中段高度为 60 m,采场长度为矿体厚度,宽度为 8~12 m,底柱高度 12 m,分段高度 12~13 m,回采由下向上进行,分矿房、矿柱两步骤回采。采场分层出矿后进行充填作业。矿房采用细砂胶结或尾砂胶结充填,矿柱采场采用非胶结或尾砂胶结充填。充填高度为分层爆破高度,保留 3 m 左右高度作为下分层爆破的补偿空间和设作业空间,待充填体达到强度后方可进行下一分层的回采作业。随着开采逐渐向深部迈进,受矿床开采条件、设备条件、充填质量等的影响,目前采用采矿方法存在的问题有:

(1) 矿体角度偏缓,分枝复合现象明显,采用 VCR 法易导致贫化损失率大。

(2) 采用分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法,由于充填体质量无法保证,在采用两步骤空场嗣后充填法回采矿柱时,贫化损失率大,矿石回采率无法保证。

(3) 配套的机械设备较少,采用上向水平分层充填采矿法,在进行敲帮问顶时,易发生安全事故。

3 数值模拟

3.1 计算模型

针对分段空场嗣后充填采矿法,对采场在不同分段高度(12 m 和 17.5 m)情况下的矿岩应力状态进行对比分析,为采场结构参数的优化提供支撑依据,进而提升某铜铁矿生产效率和资源回收率,确保深部矿体安全回采。

根据矿山的工程地质条件和开采方案,建立 FLAC^{3D}精准数值模型。模型 X 轴与矿体走向垂

直,长度为 710 m。模型 Y 轴与矿体走向平行,长度为 480 m。模型高为 700 m(标高从 -825 m 至 -125 m),具体如图 1 所示。图中 A 为拟分析剖面编号。

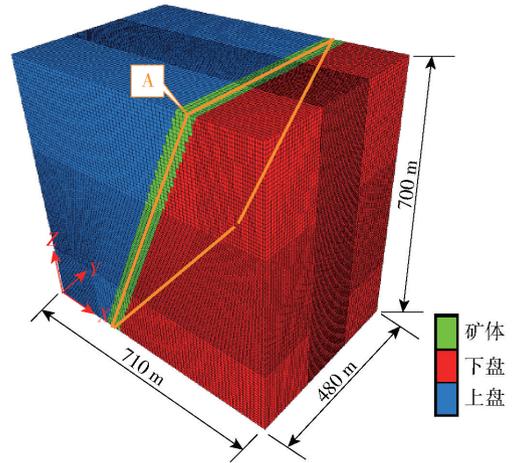


图 1 三维数值模型

依照工程实际,结合某铜铁矿现行分段空场嗣后充填法在数值模型中划分矿房与矿柱。中段高度 60 m,分段高为 12 m,每中段划分四个分段并保留 8 m 底柱;矿房与矿柱均为 10 m 宽,长度为矿体厚度。回采选择隔一采一,每分段最多有两个采场同时作业,采矿方法如图 2 所示。

3.2 地应力特征及边界条件

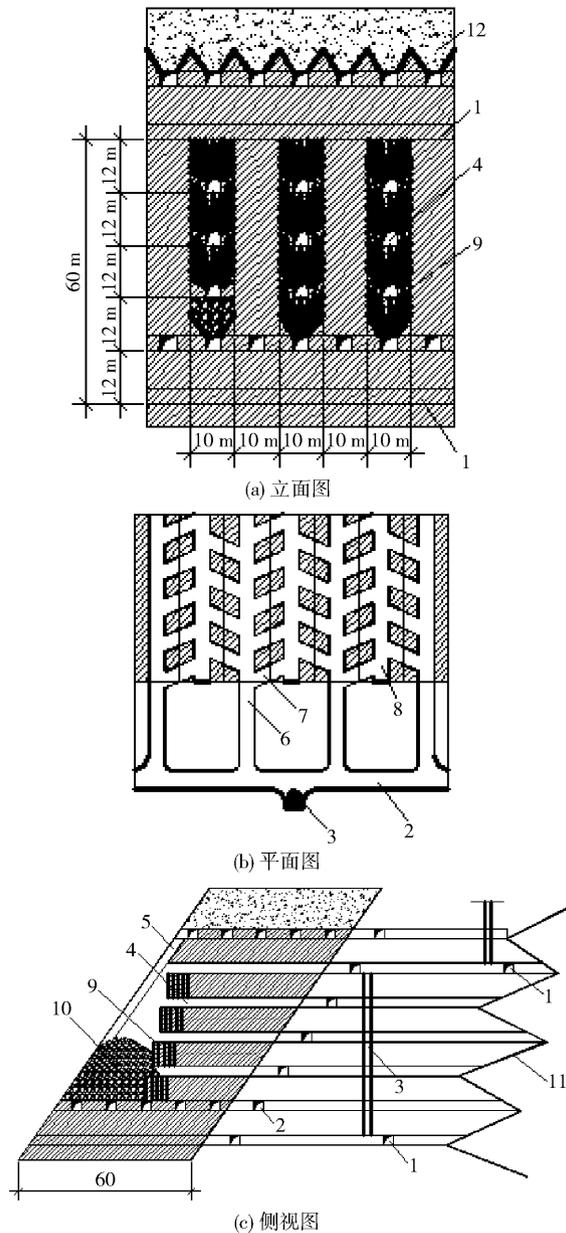
根据矿山地应力测量研究的数据显示:矿区原岩应力以自重应力为主。矿区最大构造应力方向与矿体走向垂直,即为北北西或北西西向。最小构造应力方向与矿体走向一致,即为北北东或北东东向。随着埋深增加,自重应力和水平方向的构造应力呈逐渐增大趋势,具体如图 3 所示。

应力随深度变化的线性回归方程为

$$\left. \begin{aligned} \delta_v &= 0.0413D - 6.6371, R^2 = 98.84\% \\ \delta_H &= 0.0362D - 5.2796, R^2 = 97.08\% \\ \delta_h &= 0.0245D - 6.4854, R^2 = 90.66\% \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, δ_H 为最大水平主应力,为压应力,与矿体走向近似垂直,MPa; δ_h 为最小水平主应力,为压应力,与矿体走向近似平行,MPa; D 为埋深,m; R 为回归系数。

根据矿体埋藏深度和平均岩体容重计算,模型上部施加垂直方向应力 $\sigma_z = 5$ MPa。考虑构造应力的影响,沿模型 X 轴和 Y 轴的水平应力根据式(1)施加。模型侧面限制水平移动,模型底部限制垂直移动。



1—运输平巷; 2—分段平巷; 3—溜井; 4—分段凿岩巷道; 5—回风充填天井; 6—出矿联络道; 7—出矿进路; 8—受矿竖沟; 9—炮孔; 10—矿堆; 11—采准斜坡道; 12—胶结充填体

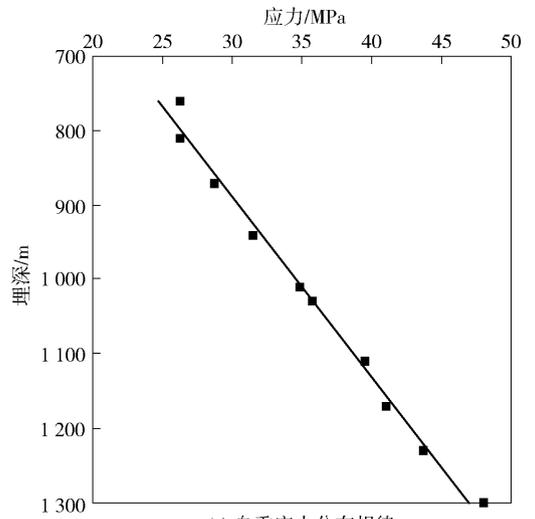
图2 采矿方法图

3.3 力学参数

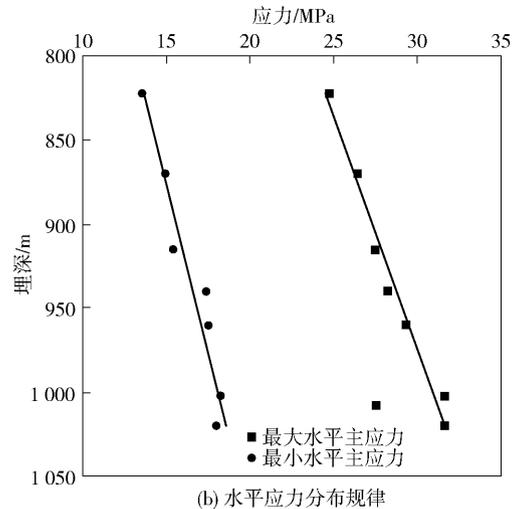
根据现场地质调查和相关研究提供的岩石力学试验结果,考虑到岩体的尺度效应,模拟计算采用的岩体力学参数见表1。根据材料力学特征,围岩和矿体均采用复合摩尔库仑屈服准则,即

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (2)$$

式中, f_s 为材料发生破坏的临界值, MPa; σ_1 、 σ_3 为最大和最小主应力, MPa; c 为黏结力, MPa; ϕ 为摩擦角, ($^\circ$)。



(a) 自重应力分布规律



(b) 水平应力分布规律

图3 地应力随埋深的分布规律

当 $f_s > 0$ 时,材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下,岩体的抗拉强度很低,因此可根据抗拉强度准则 ($\sigma_3 \geq \sigma_t$ (抗拉强度, MPa)) 判断岩体是否产生拉破坏。

表1 岩体物理力学参数

岩性	重力密度 γ / kN·m ⁻³	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 C/MPa	摩擦角 ϕ ($^\circ$)
围岩	24.8	24	0.23	2.5	36
矿体	35.0	32	0.21	3.0	38
充填体	24.0	0.6	0.32	0.28	21

3.4 计算模拟过程

采矿工程的力学特点是岩体力学行为与开采历史和开采过程有关。为了模拟分析采场在不同分段高度(12 m 和 17.5 m)情况下的矿岩应力状态,本计算分以下步骤进行:

(1) 计算在给定边界力学与位移条件下模型的初始状态。

(2) 分别对采场在不同分段高度下的矿岩应力状态进行模拟。

4 计算结果分析

1) 最大主应力场

不同分段高度时第一分段矿房开采后的最大主应力场,具体如图4所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,第一分段矿房开采后,充填体为低应力状态,约1.5 MPa,矿柱中的应力最大值约为39 MPa;分段高度为17.5 m时,第一分段矿房开采后,充填体为低应力状态,约1.6 MPa,矿柱中的应力约为20 MPa,采场周边的应力最大值约为40 MPa。

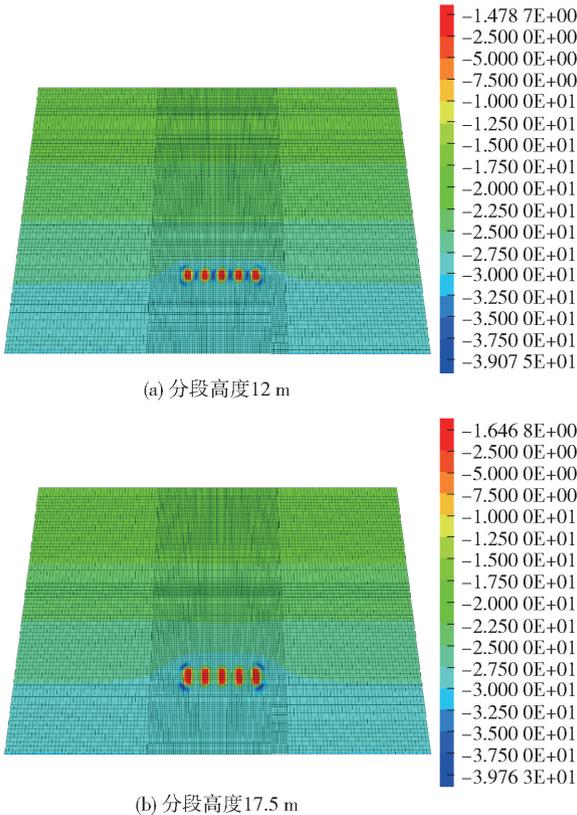


图4 不同分段高度时第一分段矿房开采后的最大主应力场(A剖面)

不同分段高度时最上分段矿房开采后的最大主应力场,具体如图5所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,最上分段矿房开采后,充填体为低应力状态,约1.2 MPa,矿柱中的应力约为15 MPa,采场周边的应力最大值约为44 MPa;分段高度为17.5 m时,最上分段矿房开采后,充填体为低应力

状态,约1.3 MPa,矿柱中的应力约为15 MPa,采场周边的应力最大值约为45 MPa。

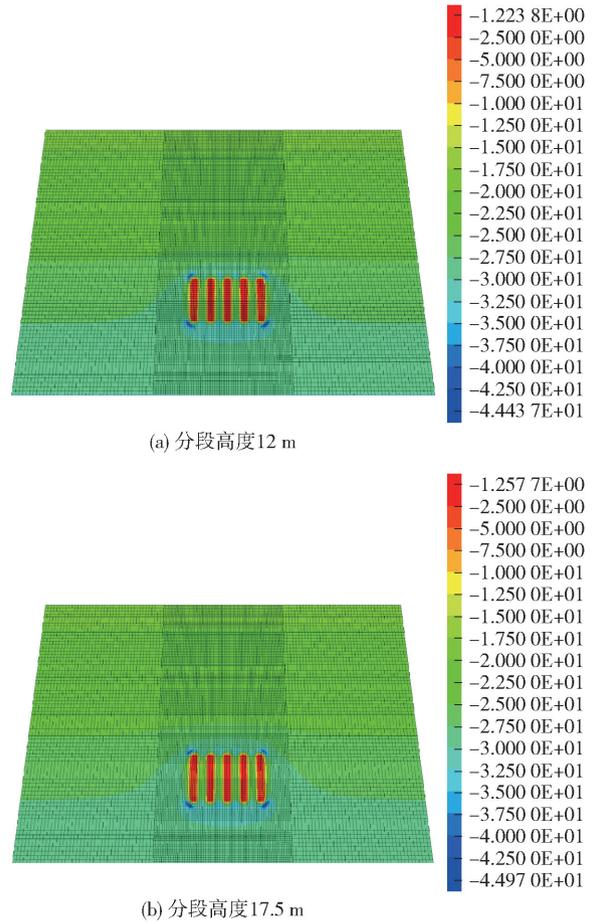


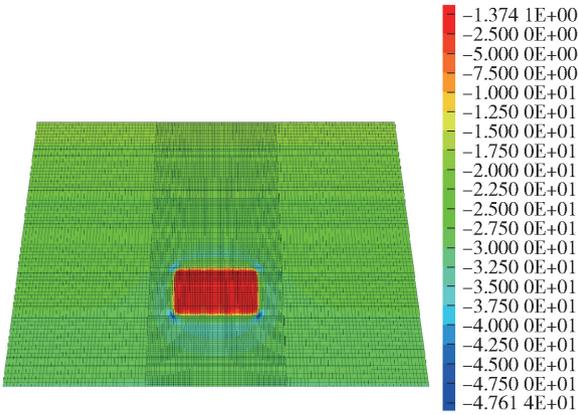
图5 不同分段高度时最上分段矿房开采后的最大主应力场(A剖面)

不同分段高度时最上分段矿柱开采后的最大主应力场,具体如图6所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,最上分段矿柱开采后,充填体为低应力状态,约1.4 MPa,采场周边的应力最大值约为47.6 MPa;分段高度为17.5 m时,最上分段矿柱开采后,充填体为低应力状态,约1.4 MPa,采场周边的应力约为48.0 MPa。

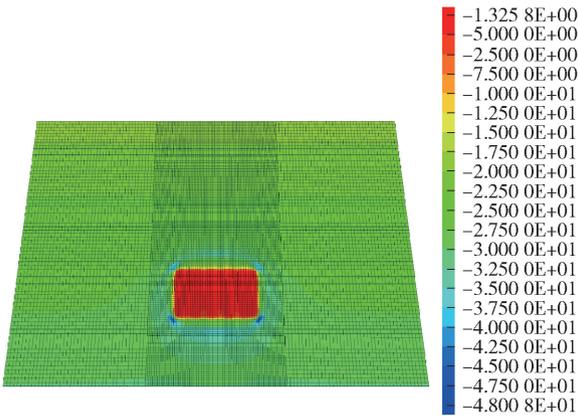
2) 垂直位移场

不同分段高度时第一分段矿房开采后的垂直位移场,具体如图7所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,第一分段矿房开采后,矿房顶部的垂直位移为89.87 mm,矿房底部的垂直位移为90.25 mm;分段高度为17.5 m时,第一分段矿房开采后,矿房顶部的垂直位移为115.53 mm,矿房底部的垂直位移为116.41 mm。

不同分段高度时最上分段矿房开采后的垂直位移场,具体如图8所示。从图中可以看出,分段高度



(a) 分段高度12 m



(b) 分段高度17.5 m

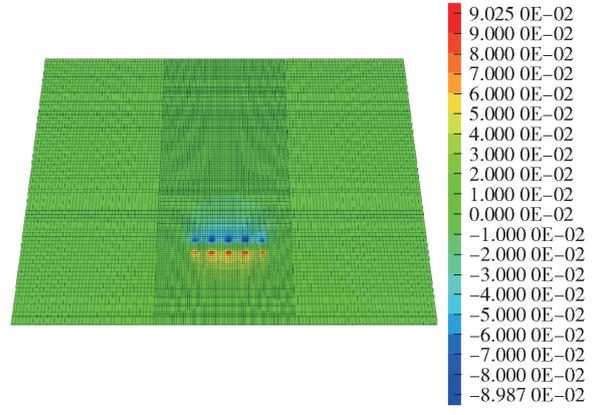
图6 不同分段高度时最上分段矿柱开采后的最大主应力场(A剖面)

为12 m时,最上分段矿房开采后,矿房顶部的垂直位移为131.28 mm,矿房底部的垂直位移为135.54 mm;分段高度为17.5 m时,最上分段矿房开采后,矿房顶部的垂直位移为131.21 mm,矿房底部的垂直位移为135.72 mm。

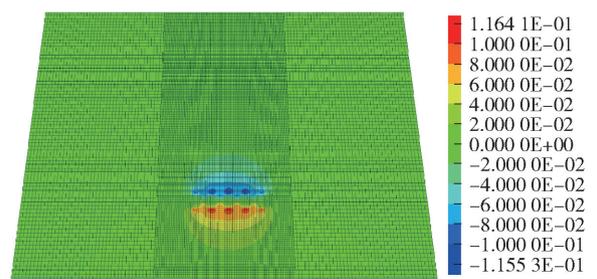
不同分段高度时最上分段矿柱开采后的垂直位移场,具体如图9所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,最上分段矿柱开采后,采场顶部的垂直位移为310.95 mm,采场底部的垂直位移为283.93 mm;分段高度为17.5 m时,最上分段矿房开采后,采场顶部的垂直位移为315.36 mm,采场底部的垂直位移为287.84 mm。

3) 塑性区分布

不同分段高度时第一段矿房开采后的塑性区分布,具体如图10所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,第一段矿房开采后,矿房周边主要为剪切塑性状态,矿柱两次进入剪切塑性状态;分段高度为17.5 m时,第一段矿房开采后,矿房周边主要为剪切塑性状态,矿柱两次进入剪切塑性状态;

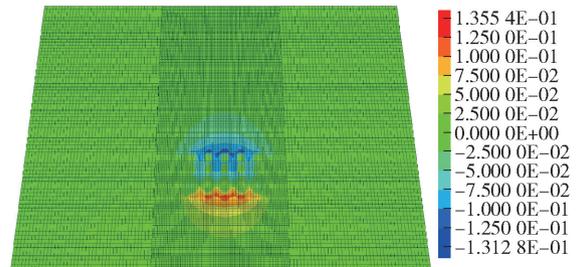


(a) 分段高度12 m

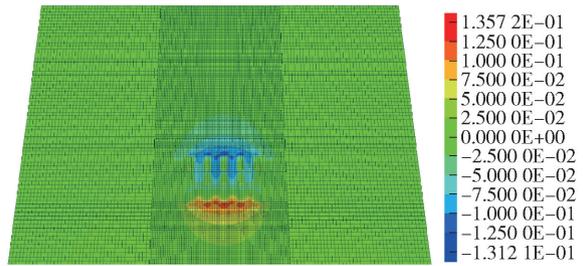


(b) 分段高度17.5 m

图7 不同分段高度时第一段矿房开采后的垂直位移场(A剖面)



(a) 分段高度12 m



(b) 分段高度17.5 m

图8 不同分段高度时最上分段矿房开采后的垂直位移场(A剖面)

与分段高度12 m相比,分段高度17.5 m时矿柱中剪切塑性区单元占比有所提高。

不同分段高度时最上分段矿房开采后的塑性区分布,具体如图11所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,最上分段矿房开采后,矿房周边主要为剪切塑性状态,矿柱两次进入剪切塑性状

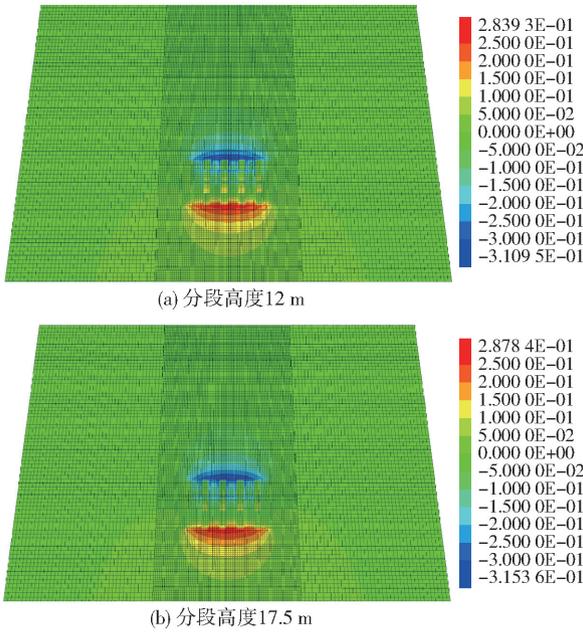


图9 不同分段高度时最上分段矿柱开采后的垂直位移场(A剖面)

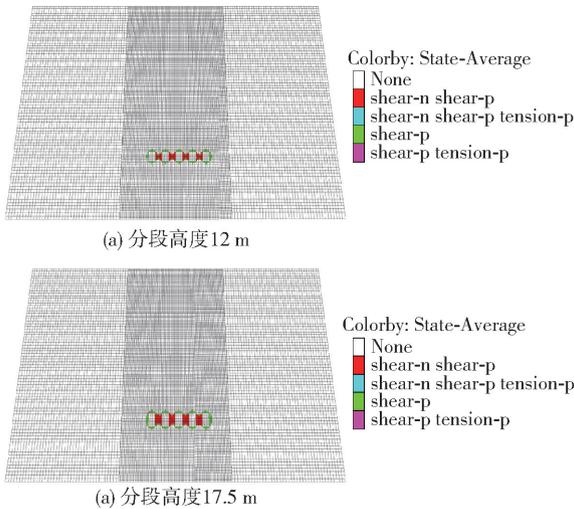


图10 不同分段高度时第一分段矿房开采后的塑性区分布(A剖面)

态;分段高度为17.5 m时,最上分段矿房开采后,矿房周边主要为剪切塑性状态,矿柱两次进入剪切塑性状态。

不同分段高度时最上分段矿柱开采后的塑性区分布,具体如图12所示。从图中可以看出,分段高度为12 m时,最上分段矿柱开采后,矿房充填体未进入塑性区状态,矿柱充填体主要为剪切塑性状态,采场顶部和底部两次进入剪切塑性区状态;分段高度为17.5 m时,最上分段矿柱开采后,矿房充填体未进入塑性区状态,矿柱充填体主要为剪切塑性状态,采场顶部和底部两次进入剪切塑性区状态。

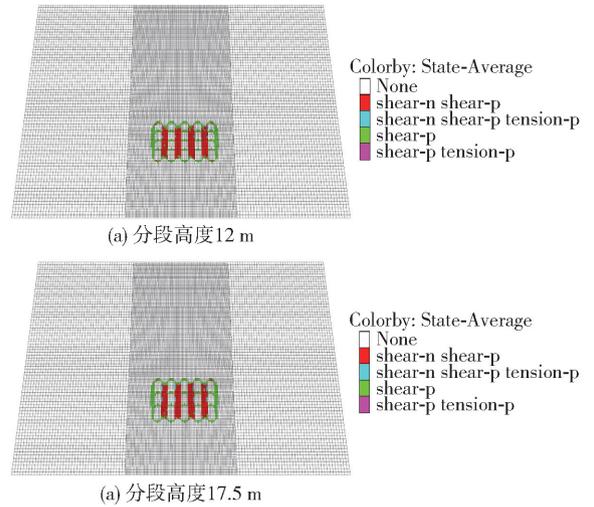


图11 不同分段高度时最上分段矿房开采后的塑性区分布(A剖面)

综上所述,分段空场嗣后充填法12 m分段高矿体开采方案与分段空场嗣后充填法17.5 m分段高矿体开采方案相比,开采后形成的空区应力集中很相似,以最大主应力来比较它们在数值差异并不明显;分段高为17.5 m的不同分段矿体开采后空区最大下沉量与分段高为12 m的不同分段矿体开采后空区最大下沉量相比,在数值差异上也不明显。某铜铁矿岩所具有的力学性质与岩体质量在绝大多数正常情况下可以满足此以上结构参数的采场结构下采矿时的采场稳定。

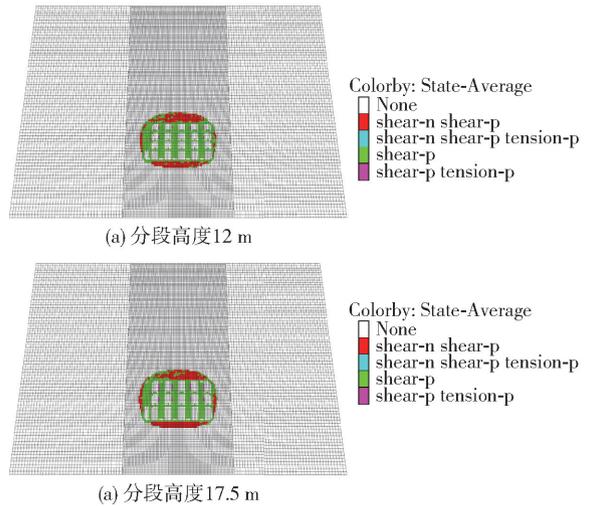


图12 不同分段高度时最上分段矿柱开采后的塑性区分布(A剖面)

5 结论

本文采用数值模拟方法对某铜铁矿深部开采不同的回采高度进行了对比研究,得到以下结论:

- (1) 分段高度为12 m时,第一分段矿房开采

后,矿柱中的应力最大值约为 39 MPa;分段高度为 17.5 m 时,第一分段矿房开采后,矿柱中的应力最大值约为 20 MPa。

(2)分段高度为 12 m 时,第一分段矿房开采后,矿房顶部的垂直位移为 89.87 mm,矿房底部的垂直位移为 90.25 mm;分段高度为 17.5 m 时,第一分段矿房开采后,矿房顶部的垂直位移为 115.53 mm,矿房底部的垂直位移为 116.41 mm。

(3)分段高度为 12 m 时,第一分段矿房开采后,矿房周边主要为剪切塑性状态,矿柱两次进入剪切塑性状态;分段高度为 17.5 m 时,第一分段矿房开采后,矿房周边主要为剪切塑性状态,矿柱两次进入剪切塑性状态。

(4)分段空场嗣后充填法 12 m 分段高矿体开采方案与分段空场嗣后充填法 17.5 m 分段高矿体开采方案相比,开采后形成的空区应力集中很相似,以最大主应力来比较它们在数值差异并不明显;分段高为 17.5 m 的不同分段矿体开采后空区最大下沉量与分段高为 12 m 的不同分段矿体开采后空区

最大下沉量相比,在数值差异上也不明显。某铜铁矿岩所具有的力学性质与岩体质量在绝大多数正常情况下可以满足此以上结构参数的采场结构下采矿时的采场稳定。

[参考文献]

- [1] 周科礼,尹东升,熊国雄.高分段嗣后充填采矿法在铜绿山矿的实践和应用[J].中国有色金属,2018(S1):352-354.
 - [2] 徐楠,梅志恒,余仁兵,等.铜绿山矿深部矿床上向分层开采采场结构参数优化[J].金属矿山,2017(11):29-32.
 - [3] 李芹涛,盛佳,褚洪涛.两步骤分段空场胶结充填采场结构参数优化[J].黄金,2017,38(11):38-42.
 - [4] 丁文俊,周宗红,侯廷凯,等.某铁矿分段矿房法不同分段高度稳定性分析研究[J].有色金属工程,2021,11(8):113-121.
 - [5] 刘龙琼,周乐,温耸.急倾斜中厚破碎矿体采场结构参数的优化及应用[J].黄金,2020,41(10):40-45.
 - [6] 柴红,郭俊超,杨淑慧,等.缓倾斜厚大矿体采场结构参数优化研究与应用[J].金属矿山,2023(11):142-147.
-
- (上接第5页)
- [2] 赵兴宽,张金钟,郭蕊.地下矿山现代化大型维修硐室设计的流程及方法[J].中国金属通报,2017(12):79-82.
 - [3] 韦四江,勾攀峰,于春生.大断面破碎硐室围岩蠕变模拟及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):489-494.
 - [4] Adhikari G R, Babu A Rajan, Balachander R, et al. On the application of rock mass quality for blasting in large underground chambers[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(3):367-375.
 - [5] 赵明祥.金诚信公司大型硐室施工成套新技术综述[J].建井技术,2017,38(6):1-6.
 - [6] Zenghui Zhao, Canlin Li, Shaojie Chen, et al. Theoretical analysis of the surrounding rock stress field and energy field in shallow rectangular chambers during excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165:105937.
 - [7] 黄康鑫,袁平顺,徐富刚,等.大型地下硐室群施工工期围岩应力变形及稳定分析[J].水利水运工程学报,2016,30(2):89-96.
 - [8] 石广斌,肖清,魏娟盆,等.某大型地下硐室不良地质体变形及控制措施研究[J].金属矿山,2022,51(4):84-89.
 - [9] Wu J, Zhang X Y, Yu LY, et al. Rockburst mechanism of rock mass with structural planes in underground chamber excavation[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139:106501.
 - [10] 梁权宇,陈顺满,王贻明.深井大断面硐室围岩稳定性控制模拟分析[J].铜业工程,2017,148(2):53-57.
 - [11] 朱光丽,王树立,张开智,等.深部大型硐室壳体均撑支护控制技术[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):525-531.
 - [12] Luo Jiwei, Zhang Dingli, Sun Zhenyu, et al. Numerical modelling and field monitoring study on large-span tunnelling using pretensioned bolt-cable combined support system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 132:104911.
 - [13] 杨鹏,张东红,王贻明,等.谦比希铜矿大型维修硐室支护方案[J].铜业工程,2018,149(1):24-29.
 - [14] 胡国斌,王贻明.深部大型硐室壳体均撑支护控制技术[J].采矿技术,2020,20(2):9-13.
 - [15] 张亚勤,孔维秋,栗剑,等.基于FLAC3D的大型地下洞室群分步开挖稳定性数值模拟研究[J].土木工程,2020,9(9):913-932.