

某铀矿上向水平分层开采高度优化研究

杨江坤, 孙刚友, 任 赛

(中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要: 以某铀矿床采场为研究对象, 基于矿体特征及工程经验, 选定该区域采用上向水平分层充填采矿法开采。利用 FLAC3D 建立了不同采场结构参数的开采方案模型, 对采场开采-回充过程进行数值模拟, 分析了采场的应力场、位移场和塑性区的时空演化特征, 研究了采场的稳定性。结果表明, 当矿体的水平分层高度为 2 m 时, 安全稳定性较好, 在开采前期对顶板位移量的控制效果更好; 在开采作业时, 采场的应力集中区域逐渐扩大, 采区顶部和底部有明显的应力贯通区; 在回充时, 充填体内的压应力分布较均匀, 压应力较小, 且后期的应力变化幅度不大; 巷道与采场交接处位移量最大, 在开采回充作业前期位移量增长速率较快, 并出现近垂直式跳跃增长; 巷道中段及采场中段顶板处的位移量呈阶段性变化, 总体位移量较小。

关键词: 铀矿床; 上向水平分层充填采矿法; 采场结构参数; 数值模拟; 稳定性分析; FLAC3D

中图分类号: TL212.1; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0033-11

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.20

在地下矿产资源的开发利用过程中, 采场结构参数对采场的稳定性影响较大^[1-3]。为实现高效率、低贫化、低损失、低成本、低事故的生产目标, 采场结构参数的确定至关重要。

目前对采场结构参数的相关研究较多^[4-6]。通过构建室内相似模型试验平台, 可研究在不同结构参数下采矿时采场的稳定性^[7], 充填采场的稳定性及结构参数^[8], 并优化采场结构参数^[9-10]。但以上研究主要通过试验手段确定采场结构参数, 其成本较高。随着计算机的发展, 可通过数值分析手段对采场的结构参数进行优化。采取 FLAC3D 软件进行数值模拟, 可确定最优的采场结构参数^[11], 最优的采场跨度^[12], 优化采场的长度及预留顶柱厚度^[13], 采场的尺寸范围^[14]。通过 COMSOL 数值分析软件, 也可优化采场的结构参数^[15]。

某硬岩铀矿通过工程经验及实际开采条件确定采场结构参数并进行地下开采; 但通过该方法确定的结构参数取值偏保守, 难以提高开采效率。因此, 笔者以该铀矿为研究对象, 选取适用于工程实际的采矿方法, 通过设定不同的采场结构参数

方案, 利用 FLAC3D 数值分析手段对采场结构参数进行优化, 并分析开采作业过程中采场的时空力学演化特征。

1 工程背景

1.1 矿体地质及开采技术条件

某铀矿矿体呈脉状, 产状 $249 \sim 270^\circ \angle 72 \sim 90^\circ$, 矿体走向长 600 m, 赋存标高 200 ~ -326 m; 矿体平均厚度为 2.94 m, 厚度变化范围为 0.43 ~ 10.09 m, 厚度变化系数为 68.8%, 属均匀变化。以埋深标高 -150 m 的矿体为研究对象, 开采中段高度为 50 m, 矿床岩体主要为花岗岩, 可根据岩体蚀变程度将区内岩体分类成围岩(蚀变作用不明显)、蚀变岩(蚀变作用显著)和矿体(蚀变作用伴随成矿过程)。

1.2 采矿方法比选

目前应用较多的采矿方法是机械化上向水平分层充填法和分段空场嗣后充填法^[16-17]。根据某铀矿体赋存特征及开采技术条件, 对矿体厚度大于 3.0 m、连续性较好、品位较高的矿体, 推荐采用机械化上向水平分层充填法。对于该采矿方

收稿日期: 2024-04-30

第一作者简介: 杨江坤(1997—), 男, 河北邢台人, 硕士, 助理工程师, 主要从事矿山开采设计及数值分析。

通信作者简介: 孙刚友(1986—), 男, 黑龙江鹤岗人, 学士, 正高级工程师, 主要从事铀矿开采技术科研与咨询设计工作。

法,拟定 2 种采场结构参数的开采方案,2 种方案的开采跨度均为 50 m,分层高度分别为 2 m(方案 1)和 4 m(方案 2)。

2 采场模型构建及验证

2.1 三维数值模型

一般模型尺寸为研究区域的 3~5 倍时,可满足分析计算的要求^[18-20]。本研究所建立的数值模型尺寸为 320 m×450 m×350 m,采场埋置深部标高为-150 m,中段高度为 50 m,3 个采场跨度均为 50 m,开采过程中 3 个采场作业流程见图 1(a)。根据地质资料,本中段矿体取其平均厚度(3.4 m)进行数值建模,矿体倾角取 70°。设定垂

直矿体走向为 x 轴,沿矿体走向为 y 轴,垂直 xoy 平面为 z 轴。

通过三维建模软件 Rhino 6.0 建立三维模型,利用 griddle 进行网格划分,并生成 .f3grid 文件;将生成的文件导入 FLAC3D 6.00 进行数值分析。连接矿体的巷道、矿体下盘的无轨设备通道等的暴露面积比采场暴露面积小,对采场回采过程中围岩的稳定性影响较弱。因此,本研究所建立的采场模型仅考虑底部尺寸较大的设备巷道,对连接矿体的巷道、矿体之间的位置关系进行适当简化调整,以方便建立数值模型;同时选取较危险的情况,用以分析实际开采回采过程中主要巷道的稳定状态,并对巷道区域网格进行加密划分处理(图 1)。

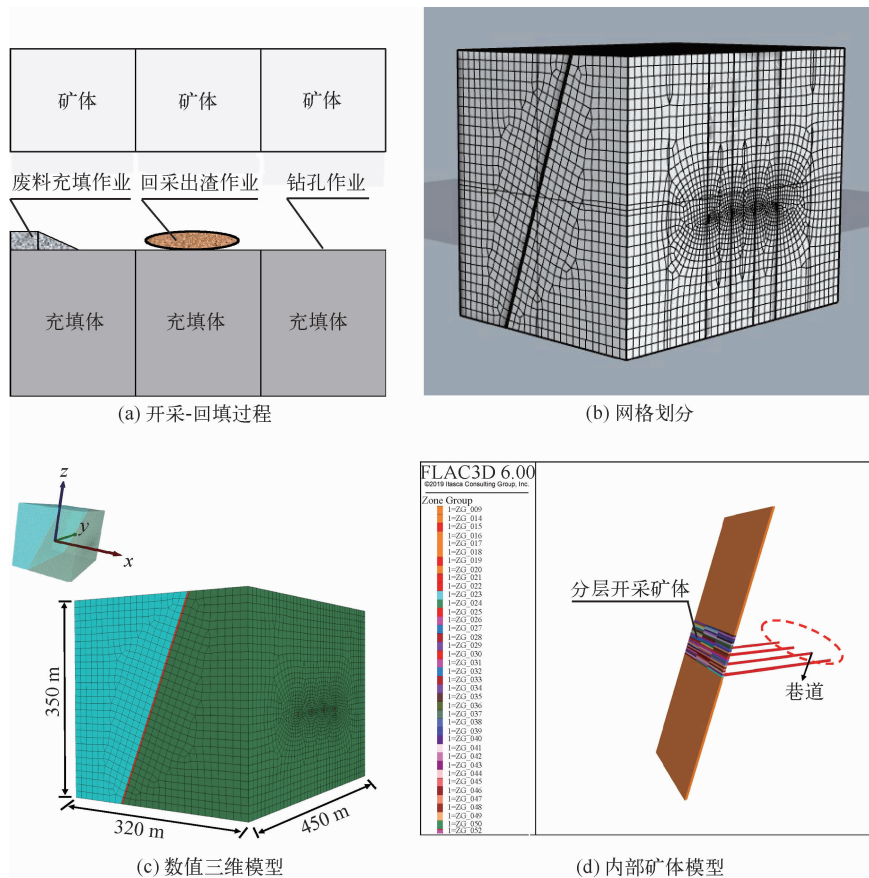


图 1 机械化上向水平分层充填三维数值模型

Fig. 1 Three-dimensional numerical model of mechanized upward horizontal slicing and filling

2.2 边界条件

2.2.1 应力荷载

对模型底部的 xoy 方向平面进行全方向的

位移约束,对周围侧的 xoz 平面方向采用 y 方向的约束, yoz 平面方向采用 x 方向的约束。模型顶部施加均布荷载,其大小为上覆岩体的自重。

自重应力可采用现场地应力测量法或采用公式计算法,其大小与矿体埋深呈线性关系,即 $q = \gamma gh$, 其中 q 为均布荷载, γ 为岩石容重, g 为重力加速度, h 为上覆岩层厚度。

根据矿床原岩应力测试报告中的数值,对该铀矿 3 个测点进行了地应力原岩应力测试,并进行数据拟合,得到地应力随埋深的变化函数,见图 2(a)。通过拟合函数计算出数值模型埋深所需的

垂直地应力以及侧向地应力,带入线性拟合公式,计算得到 x 、 y 、 z 方向的初始地应力值分别为 26.63、11.53、16.33 MPa。通过 FLAC3D 6.00 数值命令进行荷载梯度变化的施加,荷载施加见图 2(b)。

2.2.2 数值模型力学参数

根据实际岩体取样进行室内试验的力学参数结果,最终选取的数值模型力学参数见表 1。

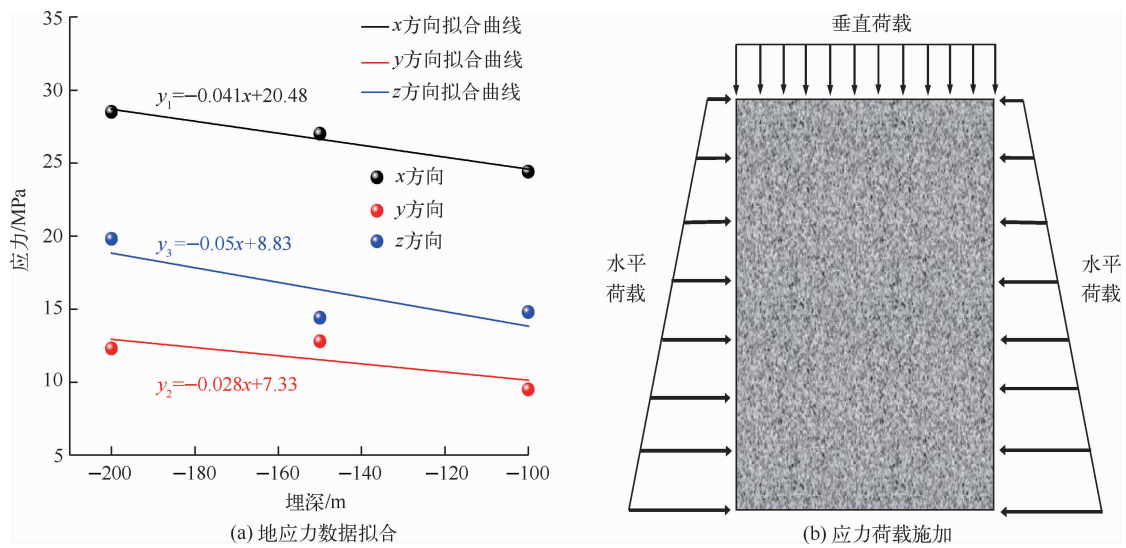


图 2 应力边界施加

Fig. 2 Stress boundary application

表 1 模型岩石力学参数

Table 1 Model rock mechanics parameters

| 矿岩 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 内聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 抗拉强度/MPa | 密度/(kg/m ³) |
|-----|----------|------|---------|----------|----------|-------------------------|
| 上盘 | 23.73 | 0.27 | 1.50 | 50 | 2.38 | 2 702 |
| 下盘 | 19.17 | 0.21 | 1.35 | 50 | 1.80 | 2 609 |
| 矿体 | 18.78 | 0.25 | 1.50 | 45 | 2.00 | 2 560 |
| 充填体 | 0.10 | 0.40 | 0.50 | 32 | 0.30 | 2 564 |

2.2.3 数值模型验证

根据所建立的采场数值模型,得到初始地应力场,见图 3。位移场和应力场分布沿高度 z 方向分层变化,在模型底部的 z 方向的地应力值为 16.39 MPa,与输入的 16.33 MPa 基本一致,两者

的误差为软件自身地应力平衡计算所产生。因此,认为构建的数值模型是有效的。其中, x 方向为垂直于矿体方向, y 方向为沿矿体走向方向, z 方向为垂直 xoy 平面方向。

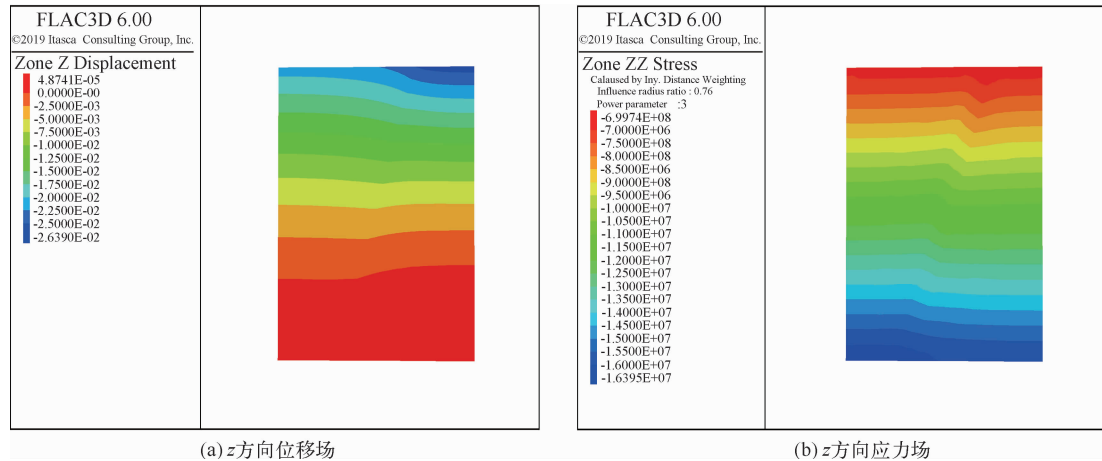


图 3 初始地应力平衡

Fig. 3 Initial geostress equilibrium

在自重应力场和-150 m埋深处上部及水平围岩应力场的共同作用下,矿体顶部最大位移量在26 cm左右,且位移场的分布连续性较好,随着高度的变化而渐进变化。

3 结果及分析

3.1 采场位移演化

3.1.1 运输巷道开掘过程的位移

对底部连接采场的运输巷道进行开掘,巷道的断面尺寸为3 m×3 m,底部巷道开掘位移场分布见图4。可以看出,随着底部巷道的开掘,巷道断面的周边围岩的位移逐渐加大;但总体上位移量较小,可保证巷道工程的稳定性。

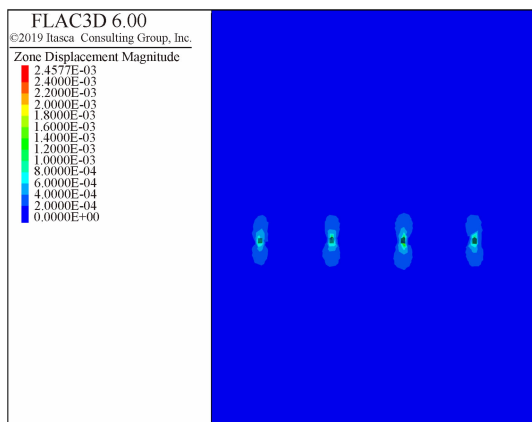


图 4 底部巷道开掘位移场分布

Fig. 4 Distribution of displacement field in excavation of bottom roadway

3.1.2 开采-回充过程的位移

在分层高度为2 m和4 m时,开采-回充过程中采场的位移变化云见图5~图6。可以看出,不同层高下的位移变化趋势大致相同,受开采-回充的影响,位移变化主要集中在采场矿岩的顶板和底板上,两侧的位移变化幅度相对较小。随着开采-回充的不断进行,充填体的位移分布范围逐渐加大,但因矿岩材料属性的不同,位移场的分布存在不连续性。采空区的暴露对周围矿岩的位移量影响保持在相对较小的量级,可保证采场的稳定性。

从不同分层高度的数值可看出,随着分层高度的增大,周围围岩的位移量逐渐增大,在初步开采时,周围位移场的影响范围和位移量相对较大。

3.1.3 模型监测点设置

在数值模型中,分别在矿体下盘的无轨设备通道与采场交接点附近、矿体下盘的无轨设备通道中段顶部,以及矿体采场中段顶部等设置监测点,记录回采过程的位移变化,对危险点处的位移进行量化。沿y轴方向巷道编号依次为1~4,见图7。其中巷道3与采场交接处的监测点因设置至矿体上,在矿体分层开采过程中失去监测,仅监测到开采前期一部分,结果见图8~图10。可以发现,随着分层开采-回充的不断进行,所有监测点处的位移量不断增大,且巷道与采区交接处附近的位移量最大,采场中段顶部位移量次之,矿体下盘的无轨设备通道中部的位移量最小。

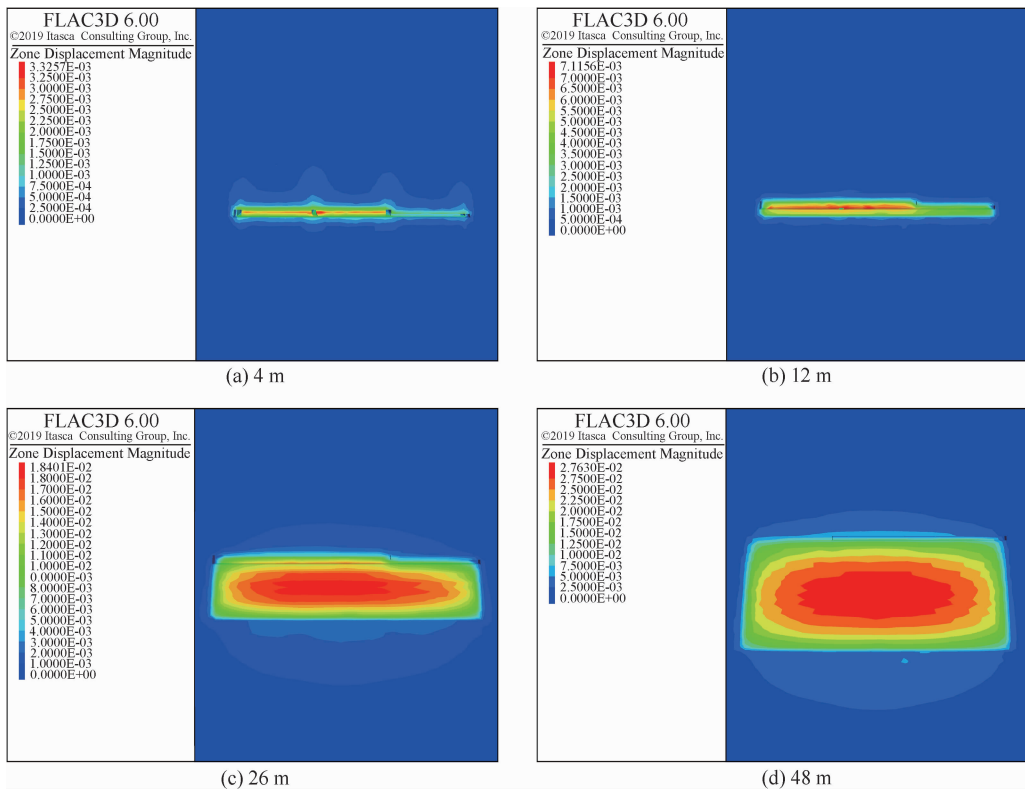


图 5 分层高度为 2 m 采场位移场分布

Fig. 5 Displacement field distribution of stope with a stratified height of 2 m

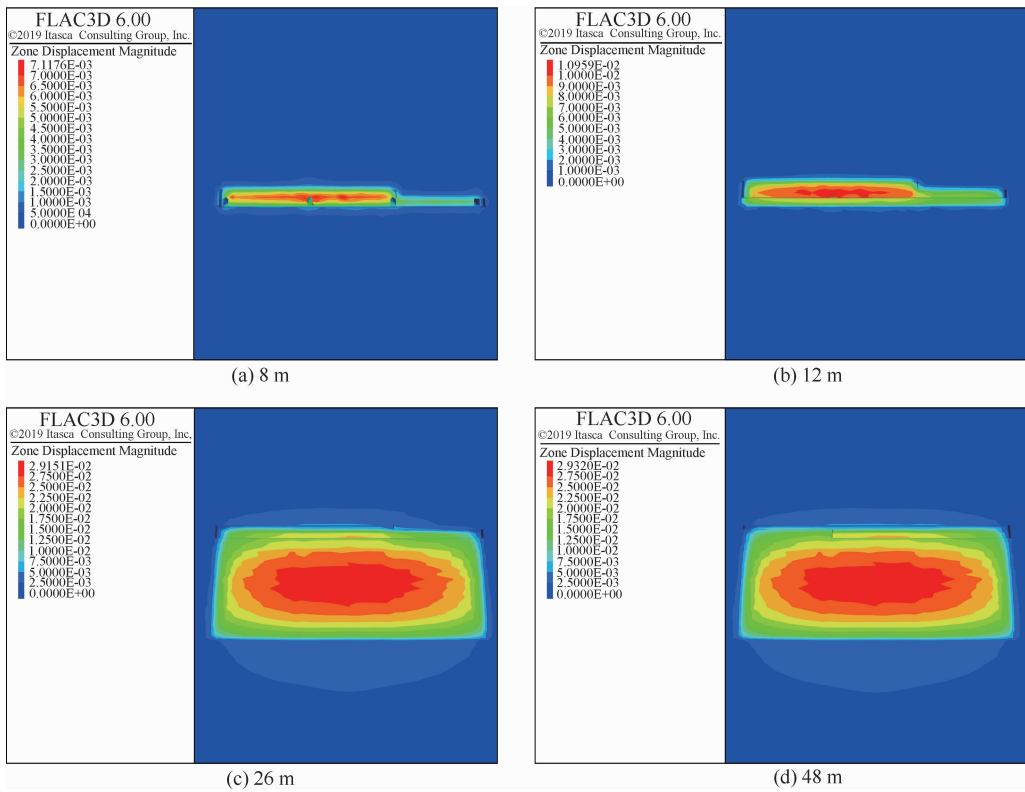


图 6 分层高度为 4 m 采场位移场分布

Fig. 6 Displacement field distribution of stope with a stratified height of 4 m

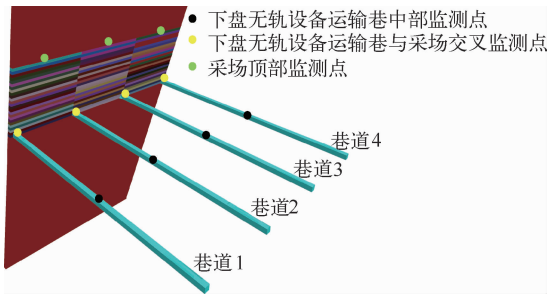


图 7 监测点布置

Fig. 7 Monitoring point arrangement

在 2 m 分层高度下,巷道与采区交接处附近的最大位移量为 21.3 mm,巷道中段处最大位移量为 4.16 mm,采场中段顶部处的最大位移量为 4.85 mm。在 4 m 分层高度下,巷道与采区交接处附近的最大位移量为 22.1 mm,巷道中段处最大位移量为 4.31 mm,采场中段顶部处的最大位移量为 4.55 mm。可以发现,随着采场分层高度的加大,监测点处的位移量随之增加,但幅值不大,从位移以及顶底板处的变化情况来看,采场结构较为稳定。

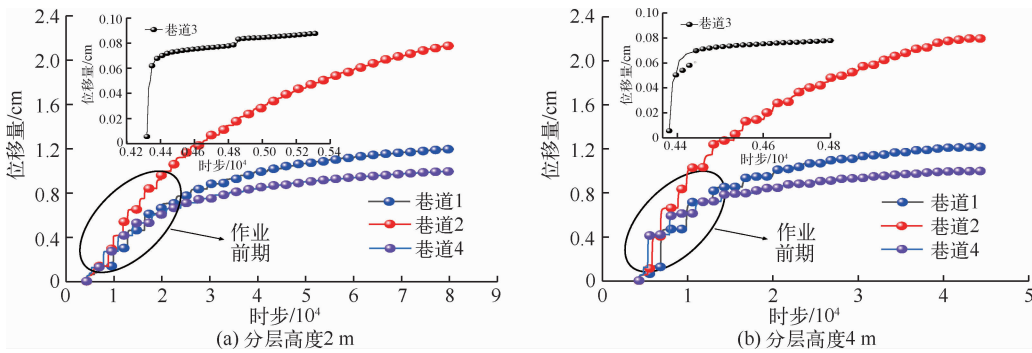


图 8 巷道与采区交接附近顶部的位移

Fig. 8 Displacement of the top near the intersection of roadway and mining area

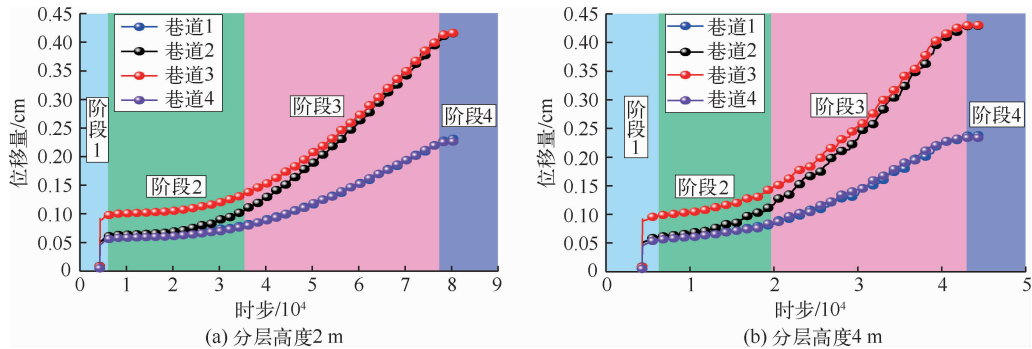


图 9 巷道中段顶部的位移

Fig. 9 Displacement of the middrift head

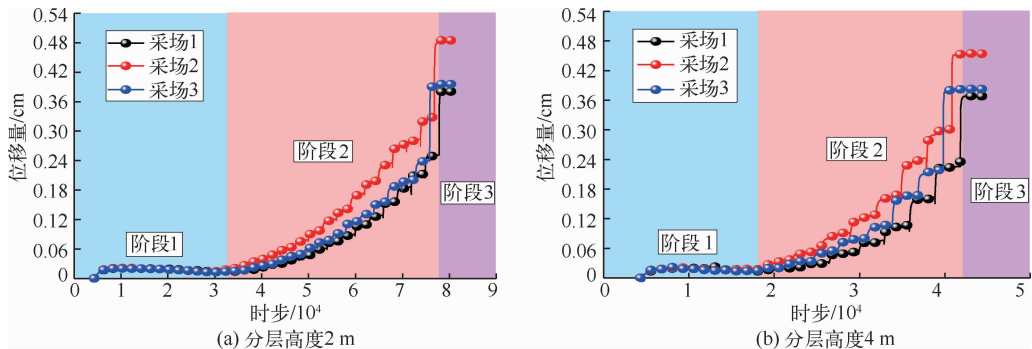


图 10 采场中段顶部的位移

Fig. 10 Displacement of the top of the middle section

在开采回填的作业前期,巷道与采场交接处的位移量出现陡增,且 4 m 分层高度的斜率明显高于 2 m 分层高度的斜率,矿体稳定性下降。巷道中段的位移演化过程可大致定性为阶段 1~4,其中阶段 1 和阶段 3 增长幅度较大,阶段 2 和阶段 4 增长幅度趋于平缓。采场中段的顶部位移演化过程可分为阶段 1~3,其中阶段 1 增长较为平缓,随之依次递增,这是因为随着开采-回填作业的进行,矿体开采距采场顶部越来越近,扰动作用逐步增强。

3.2 采场应力演化

3.2.1 最大主应力场分布

当开采充填至分层高度不同处时,采场的最大主应力场的分布情况见图 11~图 12。可以看出,随着分层高度的变化,矿岩应力场发生变化,最大主应力随之不断变化,主要集中在开采矿体的边缘地带。随着矿体的开采,每个分层的采空区顶板受到上覆矿岩自重的作用,导致该处呈现拉应力状态,同时在应力云图上显示底部有向上鼓起的趋势。随着开采回填作业的进行,充填体越来越多,采空区充填废料后主要表现为较小的拉应力区且回填后分布较为均匀。

在分层高度为 2 m 和 4 m 状态下,采场的最大主应力场的分布相差不大;但在初期开挖时,4 m 分层高度的暴露层高相对较大,在矿体周围出现的应力场变化范围相对较大,矿岩所受的拉应力场范围相对较大,岩石受到的拉应力较大。

3.2.2 最小主应力场分布

在 2 m 和 4 m 分层高度下最小主应力场的演化过程见图 13~图 14。可以发现,对于 2 m 分层高度,初始开采时,采区周边仅在个别区域出现应力集中,最大压应力约为 30.06 MPa,随着开采-回填的进行,应力集中区域逐渐扩大,采区顶部和底部有明显的应力贯通区;随着回填的进行,充填体内部压应力分布较为均匀,表现出较小的压应力,且在后期应力变化幅值不大。对于 4 m 分层高度,初始开采时,采区周边应力集中范围较大(尤其是采区顶部);随着开采-回填的进行,应力集中现象逐渐弱化,这与 2 m 分层高度的应力变化趋势相反;随着回填的进行,充填体内部压应力分布较为均匀,与开采初期相比,后期充填体内部的压应力较小,且应力变化幅值不大,应力状态趋于稳定。

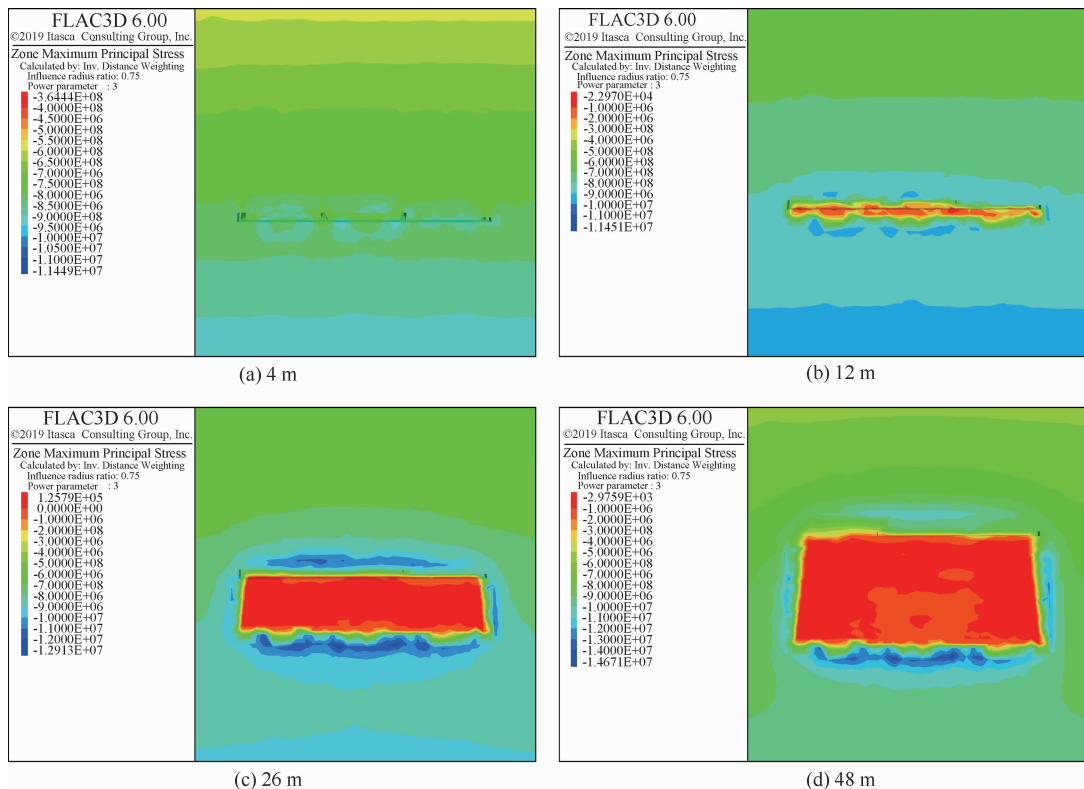


图 11 分层高度为 2 m 时的最大主应力场

Fig. 11 Maximum main stress field with a stratification height of 2 m

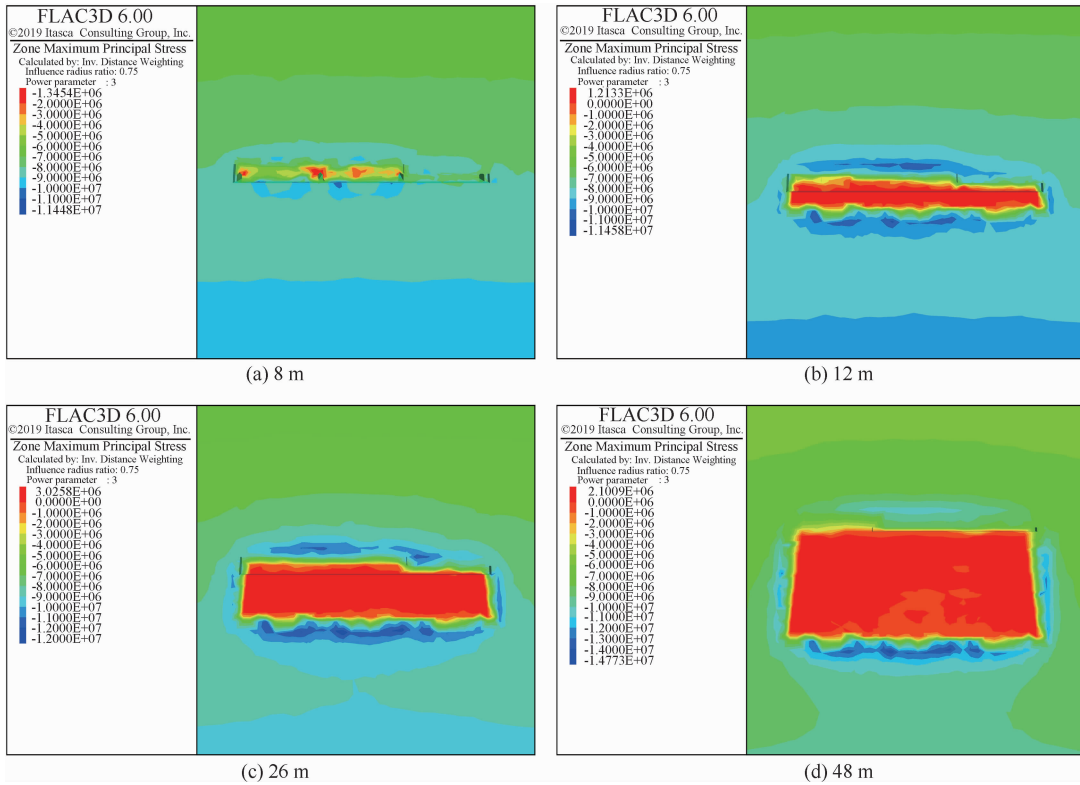


图 12 分层高度为 4 m 时最大主应力场

Fig. 12 Maximum main stress field with a stratification height of 4 m

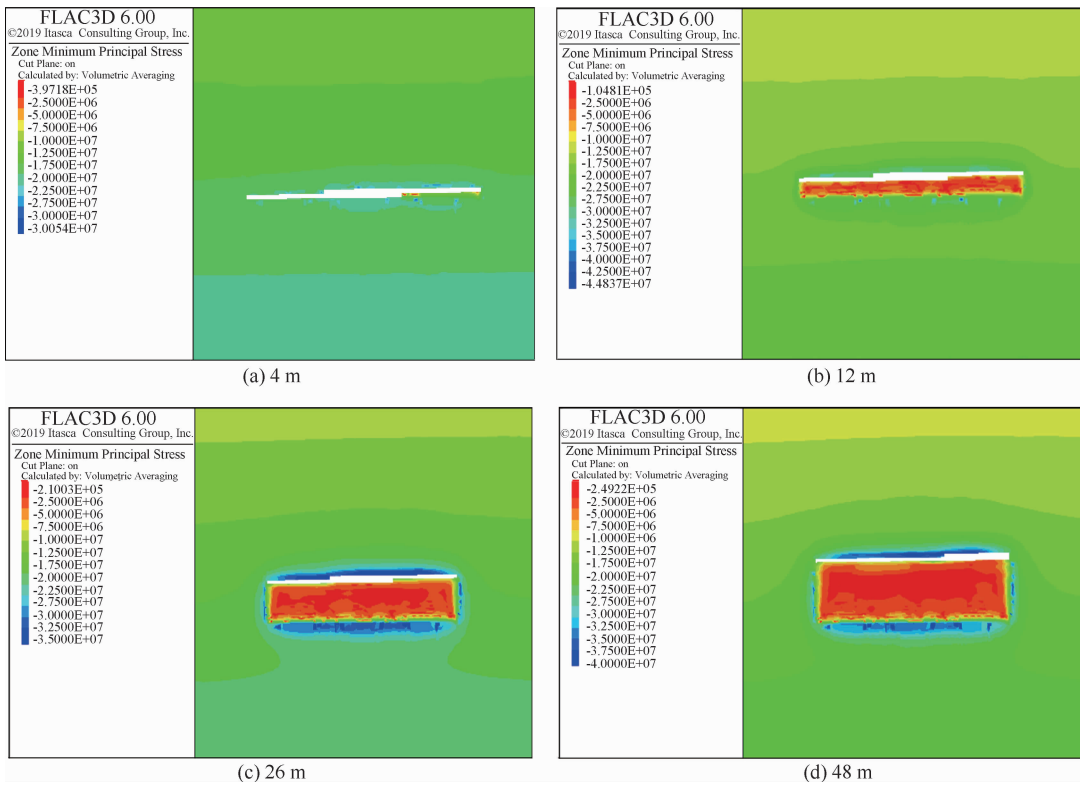


图 13 分层高度为 2 m 时最小主应力场分布

Fig. 13 Minimum principal stress field distribution with a stratification height of 2 m

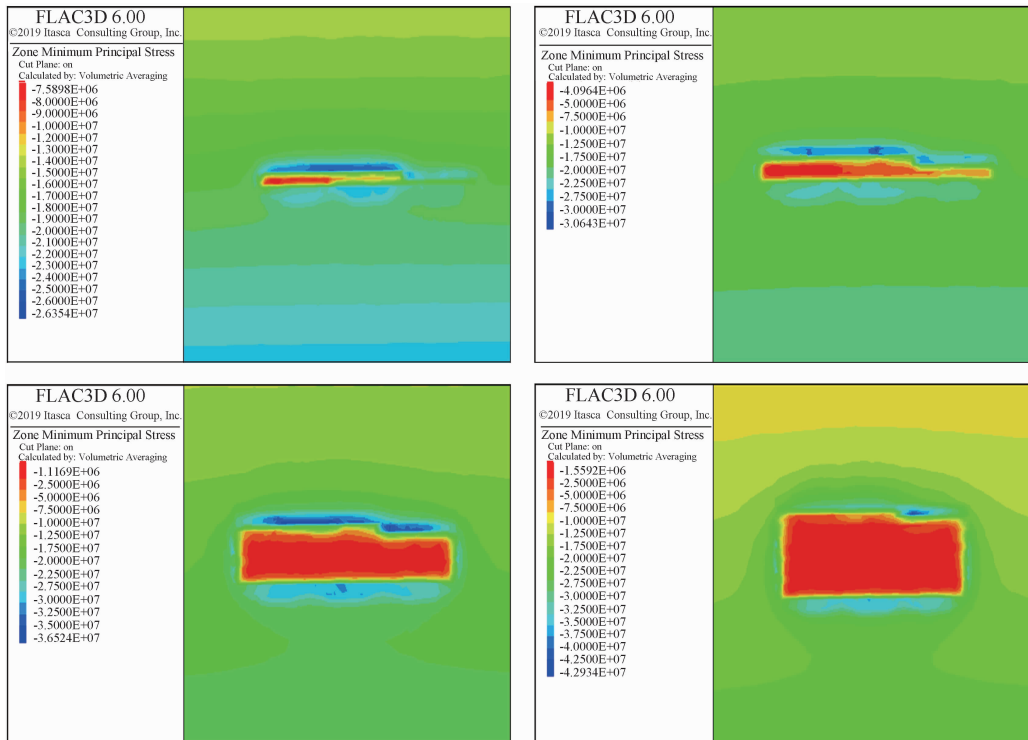


图 14 分层高度为 4 m 时最小主应力场分布

Fig. 14 Minimum principal stress field distribution with a stratification height of 4 m

3.3 采场塑性演化

分层高度为 2 m 和 4 m 情况下开采-回填过程中采场的塑性区分布见图 15~图 16。随着每一层的开采,采场四周出现一定程度的塑性区破

坏,但围岩的整体稳定性相对较好。随着开采-充填作业的不断进行,周边的塑性区范围及破坏程度大致呈增加的趋势。

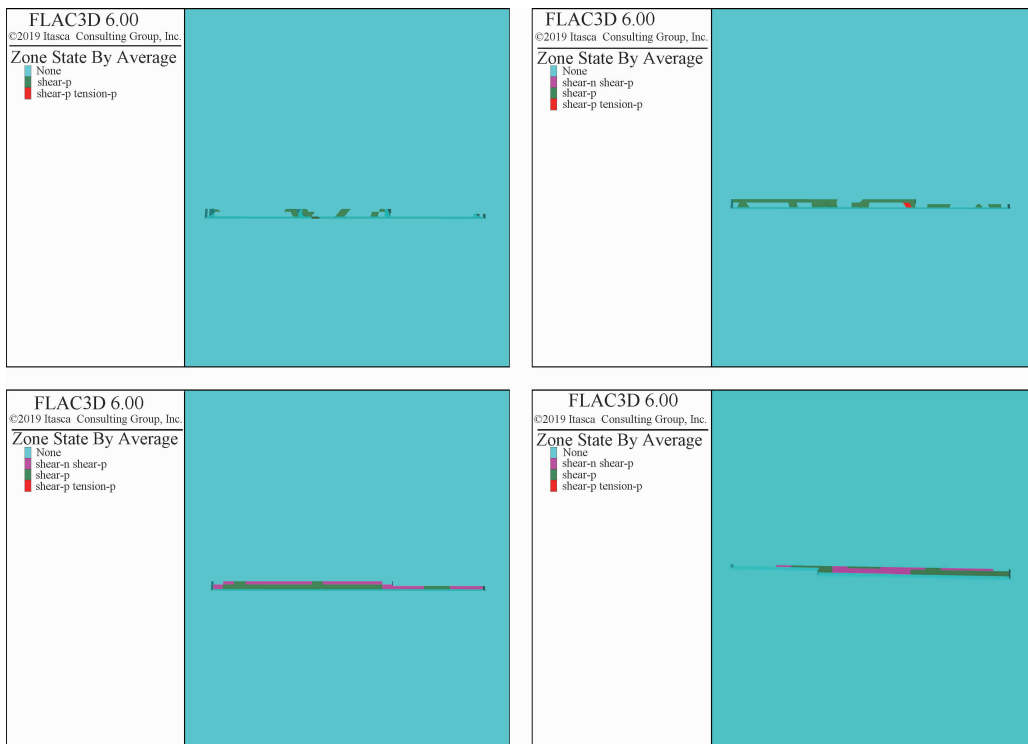


图 15 分层高度为 2 m 时采场塑性区分布

Fig. 15 Stope plastic zone distribution with a stratification height of 2 m

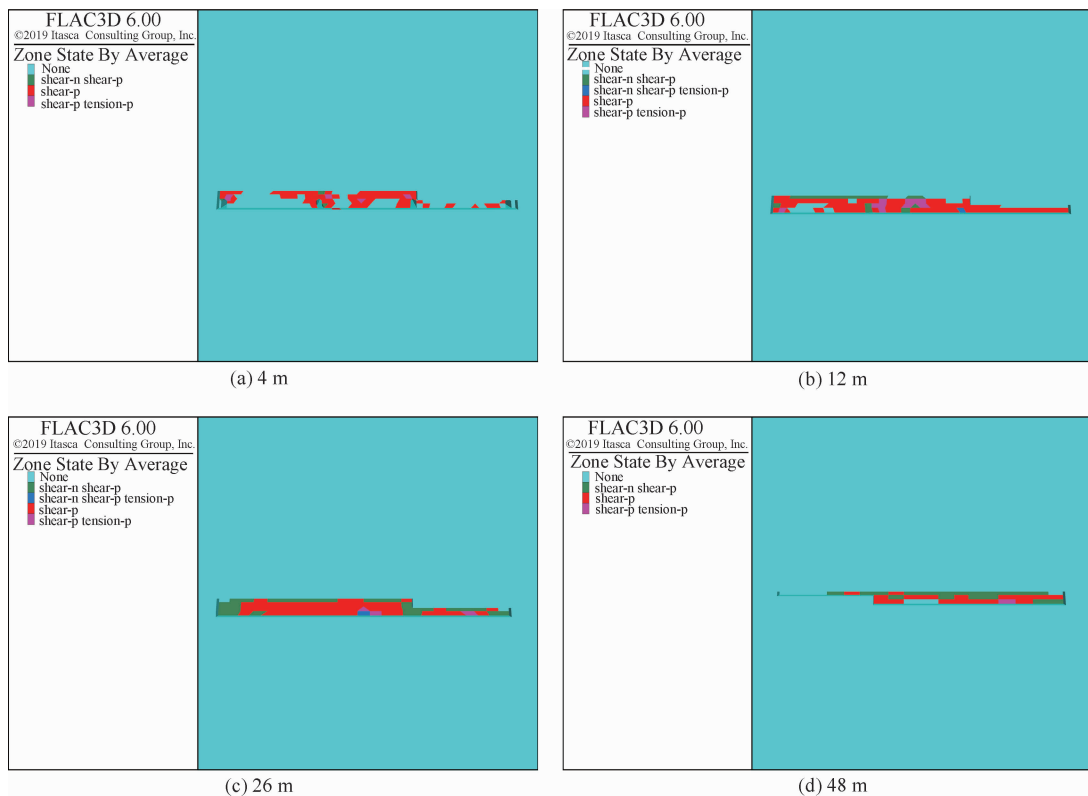


图 16 分层高度为 4 m 时采场塑性区分布

Fig. 16 Slope plastic zone distribution with a stratification height of 4 m

通过横向对比可以发现,当分层高度为 4 m 时,在初步开采时塑性区范围明显增大且在开采高度为 26 m 时,塑性区范围较大且相对贯通,局部受到剪应力作用,产生一定的剪切破坏,围岩的稳定性相对较差;而当分层高度为 2 m 时,在整个作业过程中,均为小范围的塑性区产生,并未导致整个采场的塑性破坏,采场结构较为稳定。

4 结论

利用 FLAC3D 数值分析手段建立了不同分层高度下的数值模型,对其开采-回填过程进行数值模拟,对采场结构参数进行优选,同时分析了矿体在开采过程中的时空演化特征及稳定性,主要结论如下:

1) 矿体在水平分层高度为 2 m 时较为安全稳定,尤其在开采前期对于顶板位移量的控制效果更好。

2) 随着开采-回填作业的进行,下盘无轨设备运输巷的开掘可保证稳定,同时采场塑性区逐渐增加,巷道位移及采场顶板位移逐渐增大。随着

开采作业进行,采场的应力集中区域逐渐扩大,采区顶部和底部有明显的应力贯通区;随着回填的进行,充填体内部压应力分布较为均匀,表现出较小的压应力,且在后期应力变化幅值不大。

3) 巷道与采场交接处位移量最大,且在开采-回填作业前期增长速率较快,分层高度为 4 m 时呈现近垂直陡增变化。巷道中段及采场中段顶板处的位移变化呈现阶段性变化,且位移量可控。

参考文献:

- [1] 卢泰宏,张楠楠,虞云林,等. 云锡高峰山矿段采场结构参数优化[J]. 采矿技术, 2022, 22(6): 180-184.
- [2] 苏华友,王永定,谭宝会,等. 大面积胶结充填体诱导冒落机理及其发展过程研究[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(5): 713-723.
- [3] 徐永文,吴炳书,李官兵,等. 缓倾斜极薄矿体采场结构参数优化研究[J]. 金属矿山, 2022(11): 52-57.
- [4] 卢萍. 深部采场结构参数及回采顺序优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [5] 朱明. 千家坪钒矿急倾斜厚大矿体采矿方法优化研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.

- [6] 郭金峰. 我国复杂难采矿床开采的问题与对策[J]. 金属矿山, 2005(12): 10-13.
- [7] 刘洋树, 李安平, 王刚, 等. VCR法采场结构参数优化的相似模型实验[J]. 有色矿冶, 2011, 27(2): 10-15.
- [8] 胡超. 急倾斜厚大矿体阶段充填采场稳定性分析及结构参数优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2024.
- [9] 龙跃. 银山矿深部高应力采场回采相似模型试验研究[J]. 采矿技术, 2022, 22(5): 69-73.
- [10] 郑志杰, 黄丹, 董凯程, 等. 采场结构参数与放矿方式的相似物理试验优化研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(9): 104-109.
- [11] 范文涛, 刘雷磊. 基于正交试验设计的采场结构参数优化及应用[J]. 黄金, 2021, 42(8): 36-41.
- [12] 吴振坤, 金爱兵, 陈帅军. 基于多指标综合评价的采场结构参数及回采顺序优选[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 1-7.
- [13] 朱晨迪, 朱胜利, 江科, 等. 某钼矿矿柱回采方案及采场结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(5): 1-8.
- [14] 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.
- [15] 陈峰宾, 李铭杨, 王贻明, 等. 基于COMSOL的杨林坳钨矿采场结构参数优化[J]. 现代矿业, 2023, 39(12): 81-86.
- [16] 尹升华, 吴爱祥. 缓倾斜中厚矿体采矿方法现状及发展趋势[J]. 金属矿山, 2007(12): 10-13.
- [17] 郭金峰. 我国地下矿山采矿方法的进展及发展趋势[J]. 金属矿山, 2000(2): 6-9+27.
- [18] 高博, 李佳建. 上向水平分层充填法采场结构参数优化的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 19-25.
- [19] 黄毅. 蜂子山铅锌矿采场结构参数优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [20] 甯瑜琳. 深部缓倾斜薄矿体采场结构参数优化及采动沉陷特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

Optimization for Mining Height of Upward Horizontal Slicing Mining in a Uranium Mine

YANG Jiangkun, SUN Gangyou, REN Sai

(China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Taking the stope of a uranium mine as the research object, based on the characteristics of the ore body and existing engineering experience, the upward horizontal slicing mining method is selected. The mining scheme model with different stope structural parameters is established by using the numerical method of FLAC3D. Through the numerical simulation of the stope mining and backfilling process, the temporal and spatial evolution characteristics of the stope stress field, displacement field and plastic zone are analyzed. The stability of stope is studied. The results show that the horizontal stratified height of 2 m is safer and more stable than 4 m, especially in the early mining period. With the development of mining operations, the stress concentration area of the stope gradually expands, and there are obvious stress areas through the top and bottom of the mining area. With the progress of backfill, the distribution of compressive stress inside the backfill body is more uniform, showing a small compressive stress, and the stress change amplitude is not large in the later period. The displacement at the intersection of roadway and stope is the largest, and in the early stage of mining backfill operation, the growth rate is fast and the near-vertical jump growth occurs. The displacement changes at the middle part of roadway and the top plate in the middle part of stope show phased changes, and the overall displacement is small.

Key words: uranium mine; upward horizontal slicing mining method; stope structure parameters; numerical simulation; stability analysis; FLAC3D