

基于Flac^{3D}的囡囡图矿采场稳定性分析

卢铀嘉¹,姜永恒²,刘 博²

(1. 内蒙古包头鑫达黄金矿业有限公司; 2. 长春黄金研究院有限公司)

摘要:囡囡图矿采用双进路分段空场采矿法进行回采,为保证矿山安全开采,运用Flac^{3D}软件建立了采场三维数值模型,综合考虑各分段采场的最大主应力、 z 方向位移和塑性区的变化等,对回采过程中采场稳定性进行了分析。结果表明:随着回采的进行,采场顶板最大主应力、 z 方向位移及塑性区均逐渐增大,可在最上2个分段回采结束后用废石充填或崩落顶板围岩的方式及时对采空区进行处理,以防止因上部采空区大面积垮塌而形成冲击地压。

关键词:采场稳定性;废石充填;数值分析;最大主应力;塑性区;Flac^{3D}软件

中图分类号:TD325

文章编号:1001-1277(2025)04-0030-04

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250406

引言

近年来,中国国民经济快速发展,对资源的需求也日益增加,其中矿产资源在中国的发展中具有重要地位。随着对矿产资源开采力度的加大,开采过程中需面临的问题逐渐显现,如地应力增大、采空区处理和采场稳定性等。采场稳定性直接关系到矿山的正常生产,因此,对采场稳定性进行分析尤为重要。陈庆坤^[1]利用Flac^{3D}软件对下向进路充填采矿法的采场稳定性进行了分析,并优化了采场结构参数。王冠男等^[2-3]对深部大跨度采场顶板稳定性进行了分析。张金等^[4]对矿房回采充填前后的采场稳定性进行了分析。罗黎明^[5]运用Flac^{3D}软件对采场极限暴露面积进行了数值分析,所得结果可保证采场安全。李胜辉等^[6]通过分析破碎地质条件下的矿房顶板和侧帮的稳定性,提出了改进回采方案。姜永恒等^[7]对缓倾斜中厚矿体回采方案进行研究,确定最终回采方案。齐发富等^[8]对2种不同采矿方法下的采场稳定性进行对比分析,确定了较为合理的采矿方法,效果良好。徐伟兰等^[9-10]通过对采场稳定性进行分析,验证了开采期间的安全。张文德^[11]对方解石采空区稳定性进行了分析并优化了采场结构参数,提高了矿山资源利用效率。囡囡图矿1号矿体采用双进路分段空场采矿法进行回采,通过Flac^{3D}软件对采场稳定性进行研究,对矿山正常运营和后续建设具有重要意义。

1 工程背景

囡囡图矿位于内蒙古自治区包头市,该矿山以开

采黄金为主。矿石资源储量101.46万t,金金属量2 502.60 kg,平均金品位2.47 g/t。其中,1号矿体赋存于900 m中段,厚度为10 m,平均倾角为25°,围岩较稳定,采用双进路分段空场采矿法进行回采。

2 三维数值模型建立

2.1 三维数值模型

本次数值分析中,采场数值模型简化为均匀分布,采幅10 m,矿体倾角25°,采场长度50 m,分段高度30 m,矿体模型的三维坐标分别表示: x 方向为垂直矿体走向, y 方向为平行矿体走向, z 方向为铅垂方向,并根据矿岩实际赋存标高进行近似赋值。以矿体区域为中心向外延伸形成围岩部分,根据圣维南原理,整个计算区域 x 轴跨度为160 m, y 轴跨度为50 m, z 轴跨度为100 m。采用Flac^{3D}软件建立的三维网格模型如图1所示,网格模型有120 876个节点,704 573个单元。

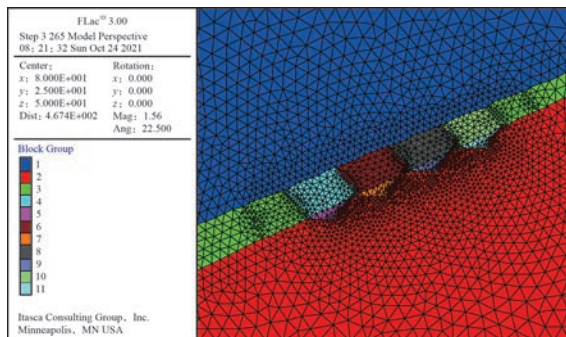


图1 采用Flac^{3D}软件建立的三维网格模型

Fig. 1 3D grid model established using Flac^{3D} software

收稿日期:2024-08-30; 修回日期:2024-10-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2905003,2022YFC2905004)

作者简介:卢铀嘉(1988—),男,工程师,从事矿山基础建设、采矿及安全生产管理等工作;E-mail:841870801@qq.com

2.2 模型基本假设及边界条件

矿山地质情况的复杂性直接影响采空区稳定性因素的多样性。根据矿体开采的工程背景,在模型建立和计算过程中采用以下简化和假设:

1)阶段运输巷道、分段凿岩巷道、溜井等对模拟结果有一定影响,但这些工程在宏观上对采空区稳定性的影响很小。因此,本次研究不考虑这些工程布置对采空区稳定性的影响。

2)假设模型中的围岩和矿体为各向同性的连续介质,忽略计算范围内岩体的节理、裂隙和断层等不

良结构面^[12]。

3)对边界条件的约束, x 、 y 轴边界采取限制位移, z 轴底部边界采取限制垂直方向的位移。

2.3 破坏准则和力学参数

对于圈图矿来说,由于研究范围涉及的矿体和围岩均属弹塑性材料,故适用于莫尔-库仑准则。测定力学参数时,对矿区采场的岩体进行取样并加工成标准试样,再通过室内力学试验得到相关岩石力学参数,对获得的岩石力学参数进行折减,以此获得相关岩体力学参数。最终确定的采场岩体力学参数如表1所示。

表 1 采场岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass in the stope

岩体	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	内聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
上盘	27	109.96	7.8	75	50	67	0.18
下盘	27	79.96	2.85	67	48	59	0.2
矿体	27.2	74.95	4.33	55	42	55	0.24

由于尚无矿区原岩应力场资料,本次模拟仅考虑自重应力,对其施加铅垂方向的自重应力,模型在自重应力的作用下,产生水平方向的挤压应力(水平自重应力),在弹性和塑性分步计算平衡后,得到模型的初始应力场,如图2所示。

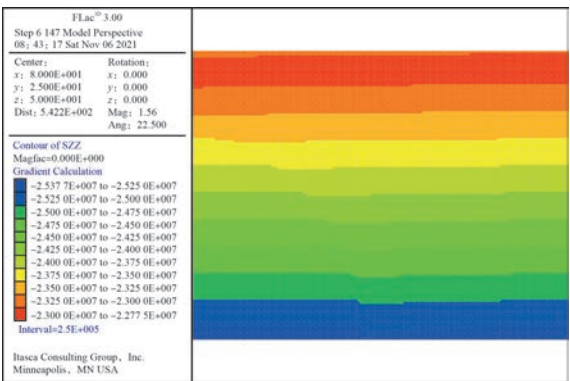


图 2 三维模型初始应力场

Fig. 2 Initial stress field of the 3D model

2.4 回采过程稳定性分析

采场共分为4个分段,自上而下依次进行回采,第四分段回采结束后,依次向下开采第三、二、一分段。采场开挖导致采场的应力重新分布,采场开挖后上下盘围岩达到了新的应力平衡。

2.4.1 最大主应力和 z 方向位移分析

各分段回采最大主应力和 z 方向位移云图如图3所示。由图3可知:

1)采场第四分段回采后,采场最大主应力约80 MPa,主要集中在采场的上下角位置,此区域应力集中较明显;围岩 z 方向最大位移约16.5 mm,位于采场上盘围岩的中上部区域。

2)采场第三分段回采结束后,采场的采空区增大,最大主应力约114.2 MPa,主要集中在采场的边角位

置,范围较小,此区域应力集中较明显;围岩 z 方向最大位移约38.24 mm,位于采场上盘围岩的中上部区域。

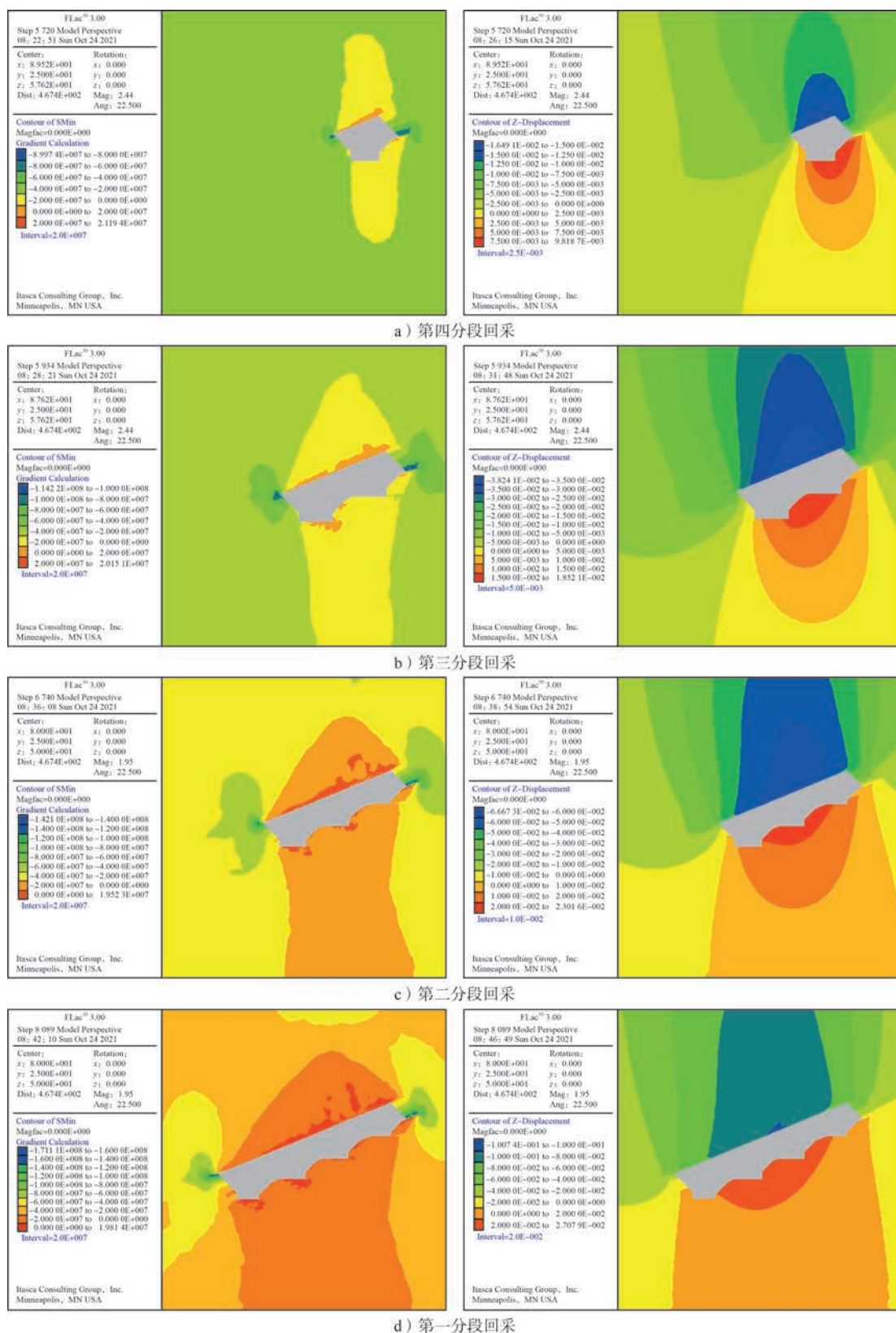
3)采场第二分段回采结束后,采场的采空区继续增大,最大主应力约142.1 MPa,主要集中在采场的边角位置,范围较小,此区域应力集中较明显;围岩 z 方向最大位移约66.67 mm,位于采场上盘围岩的中部区域即第三分段直接顶板位置。

4)采场第一分段回采结束后,整个采场回采完毕,形成最终采空区,采场最大主应力约171.1 MPa,主要集中在采场的边角位置,范围较小,此区域应力集中较明显;围岩 z 方向最大位移约100.7 mm,位于采场上盘围岩的中部区域,范围较小,上盘围岩 z 方向位移大部分为80~100 mm。

2.4.2 采场塑性区分析

各分段回采后采场塑性区云图如图4所示。由图4可知:第四分段回采结束后仅在采空区边角区域出现较少的塑性变形。随着第三分段回采结束,塑性变形区域有所增大,主要在第四分段采空区顶板区域及边角位置。第二分段回采结束后,塑性变形区域继续增大,主要在第三、四分段采空区顶板区域及边角位置。由于采空区不断增大,采场上盘围岩的变形量持续增加,因此塑性区也不断增大,此时为保证采场作业安全,需对采空区进行放顶处理,可将第三、四分段的顶板进行崩落,防止大面积垮塌而形成的冲击地压,对作业人员及设备存在安全隐患。第一分段回采结束后,塑性变形区域继续增大,主要在第三、四分段采空区顶板区域及采场边角位置。因采空区不断增大,采场上盘围岩的变形量持续增加,塑性区不断增大,并向顶板深部延伸。

通过对采场回采过程进行数值分析,对最大主应力、 z 方向位移等的分析,可得对比汇总,结果如表2所示。

图3 各分段回采最大主应力和 z 方向位移云图Fig. 3 Cloud chart of maximum principal stress and z -direction displacement during mining at each sublevel

3 结论

应用Flac^{3D}软件对简化后的采场分段回采过程进行了模拟分析,采场自上向下的回采过程中,影响采场稳定性的顶板最大主应力逐渐增大, z 方向位移也

逐渐增加,采场塑性变形区域逐渐增大,在最后一分段回采结束前,前三分段的最大主应力及 z 方向位移数值变化相对较小,最后一个分段回采结束后,顶板 z 方向位移骤增,达到100.7 mm,此时在外界扰动的情況下极易出现变形破坏。因此,考虑在最上2个分段

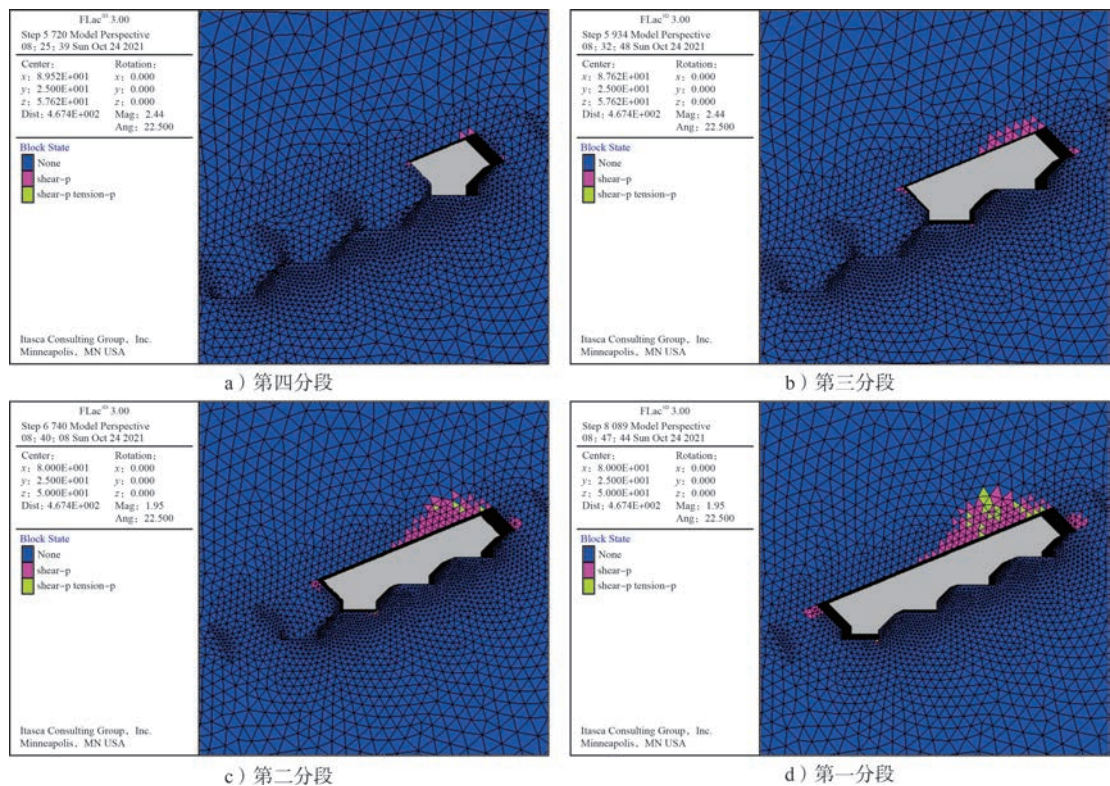


图 4 各分段回采后采场塑性区云图

Fig. 4 Cloud chart of plastic zones in stopes after mining at each sublevel

表 2 各分段回采结束后最大主应力和 z 方向位移结果
Table 2 Results of maximum principal stress and z-direction displacement after mining at each sublevel

回采过程	最大主应力/ MPa	最小主应力/ MPa	z 方向 位移/mm	x 方向 位移/mm
第四分段	80	15 ~ 22	16.5	8.36
第三分段	114.2	25 ~ 29.9	38.24	13.5 ~ 14.7
第二分段	142.1	30 ~ 36.7	66.67	19.8 ~ 22.2
整个采场	171.1	40 ~ 46.2	100.7	24.8 ~ 29.9

回采结束后及时对采空区进行处理,可采用废石充填或崩落顶板围岩的方式,以防止因上部采空区大面积垮塌形成冲击地压。

【参 考 文 献】

[1] 陈庆坤. 佩吉铜金矿采场结构参数优化及稳定性分析[J]. 采矿技术, 2022, 22(3): 1-5, 11.
[2] 王冠男, 童大志, 汪杰. 考虑结构特征的采场胶结充填体稳定性

分析[J]. 黄金, 2023, 44(9): 21-30.
[3] 李怀宾, 代碧波, 赵一凡, 等. 红透山铜矿深部大跨度采场顶板稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2 468-2 473.
[4] 张金, 巨有, 金爱兵. 山东某铁矿矿柱回采及稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(9): 17-24.
[5] 罗黎明. FLAC^{3D}在地下矿山采场稳定性分析中的应用[J]. 铜业工程, 2021(4): 33-36.
[6] 李胜辉, 王立杰, 刘志义, 等. 复杂破碎矿体试验采场稳定性分析及结构参数优化[J]. 金属矿山, 2021(8): 41-45.
[7] 姜永恒, 刘博. 黄金矿山缓倾斜中厚矿体双进路分段空场采矿法及其应用[J]. 黄金, 2023, 44(9): 41-45.
[8] 齐发富, 李学锋, 宋子贺, 等. 大洞金矿采矿工艺与采场稳定性分析研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(7): 19-24.
[9] 徐伟兰, 孙飞, 何维剑. 大直径深孔阶段空场嗣后充填采场稳定性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(4): 38-42, 53.
[10] 陈卫东, 石勇, 史秀志. 凡口铅锌矿大结构参数采场围岩稳定性分析[J]. 黄金, 2023, 44(4): 5-9.
[11] 张文德. 某方解石矿采空区稳定性分析和采场参数优化[J]. 现代矿业, 2020, 36(10): 80-83.
[12] 周亚博. 基于 Flac^{3D}数值模拟的深部采场结构参数优化及应用[J]. 黄金, 2022, 43(5): 51-55

Stope stability analysis of the Huluntu Mine based on Flac^{3D}

Lu Youjia¹, Jiang Yongheng², Liu Bo²

(1. Inner Mongolia Baotou Xinda Gold Mining Co., Ltd.; 2. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: To ensure safe mining operations at the Huluntu Mine, which employs a double-approach sublevel open stoping method, this study established a 3D numerical stope model using Flac^{3D} software. The stability of the stope during mining was analyzed by evaluating variations in maximum principal stress, z-direction displacement, and plastic zones across different sublevels. Results indicate that the maximum principal stress, z-direction displacement, and plastic zones in the stope roof progressively increase as mining advances. To prevent rockbursts caused by large-scale collapse of upper goafs, it is recommended to implement waste rock filling or induced roof caving immediately for goaf treatment after completing mining in the top 2 sublevels.

Keywords: stope stability; waste rock filling; numerical analysis; maximum principal stress; plastic zone; Flac^{3D} software