

基于 Rhino-FLAC3D 的矿山多中段开采方案的可行性研究

Feasibility Study of Multi-stage Mining Scheme Based on Rhino-FLAC3D

王雄雄¹, 马冰洁², 张红伟¹

(1. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 安阳市文峰区应急管理局, 河南 安阳 455000)

摘要:本文借助 Rhino 建模软件对柿树底金矿区域三维地质建模, 利用 FLAC3D 对柿树底金矿拟开采矿体进行了多中段开采方案的可行性研究, 依据《河南中矿能源有限公司嵩县柿树底金矿地下开采扩建项目初步设计》中的生产规模, 设计了两个多中段开采方案进行开挖→充填模拟, 经数值模拟分析发现, 方案一、方案二开采充填过程对地表产生的沉降扰动非常微弱, 几乎不受影响; 两个中段同时开挖结束后, 充填体顶板围岩竖直方向产生的最大位移量为 -2.85×10^{-2} m; 三个中段同时开挖结束后, 充填体顶板围岩竖直方向产生的最大位移量为 -4.35×10^{-2} m。开挖→充填结束后, 应力重新达到新的平衡, 充填体顶板围岩的最大主应力主要受拉张应力, 其最大值未超过围岩的拉张屈服强度, 最小主应力以压应力为主, 作用于充填体, 致使其产生剪切塑性应变区域, 其余部位仅产生局部的剪切、拉张塑性应变区, 并未形成大面积且贯穿性的塑性应变区域, 故而在充填法开采的前提下, 充填体围岩基本稳定, 方案一、方案二所设计的开采方案基本可行, 但从位移角度来看, 方案一更有利于地表稳定和采场安全。

关键词: Rhino; 三维建模; 开挖; 充填法

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)04-0026-06

Abstract: In this paper, three-dimensional geological modeling was carried out in the Shizhu bottom gold mine area with the help of Rhino modeling software, and feasibility study of multi-section mining scheme was carried out in the Shizhu bottom gold mine with FLAC3D. Two multi-section mining schemes were designed for excavation → filling simulation according to the production scale in the Preliminary Design of Shizhu Bottom. The settlement disturbance caused by the mining and filling process of the first and second schemes is very weak and almost unaffected. After the excavation of two middle sections at the same time, the maximum displacement in the vertical direction of the backfill roof surrounding rock is -2.85×10^{-2} m. After the excavation of three middle sections at the same time, the maximum displacement in the vertical direction of the surrounding rock of the backfill roof is -4.35×10^{-2} m. After excavation → filling, the stress reaches a new balance again. The maximum principal stress of the surrounding rock of the backfill roof is mainly affected by the tensile stress, and its maximum value does not exceed the tensile yield strength of the surrounding rock. The minimum principal stress is mainly compressive stress, which acts on the backfill body, resulting in shear-plastic strain zone, while the remaining parts only produce local shear-plastic strain zone. No large and penetrating plastic strain area has been formed, so under the premise of filling mining, the surrounding rock of the filling body is basically stable, and the mining schemes designed in Scheme 1 and Scheme 2 are basically feasible. However, from the perspective of displacement, scheme I is more conducive to surface stability and slope safety.

Key words: rhino; three-dimensional modeling; excavation; filling method; numerical simulation

1 前言

地下矿产资源开发诱发地表移动、采场失稳的研究一直是我国岩土工程领域研究中的重点课

题^[1-3], 为满足矿山生产需求, 多中段开采已成为矿山的必要生产方式^[4], 研究矿山多中段开采方案的可行性、分析矿体围岩的稳定性尤为重要。依据国

[作者简介] 王雄雄(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山工程稳定性分析研究。

[引用格式] 王雄雄, 马冰洁, 张红伟. 基于 Rhino-FLAC3D 的矿山多中段开采方案的可行性研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(4): 26-31+82.

家矿山安全监察局关于印发《关于加强非煤矿山安全生产工作的指导意见》的通知矿安〔2022〕4号文件“金属非金属矿山必须采用充填法开采以及回采中段不得超过三个等”^[5],在此前提下,本文借助有限差分软件 FLAC3D 对柿树底金矿 +633 m 以下中段矿体进行开挖、充填数值模拟分析,设计多中段开采方案,论证多中段开采的安全性与可行性,为柿树底金矿以及相似矿山的高效、安全生产提供参考依据。

2 矿山概况

柿树底金矿位于嵩县县城 280° 方向,直距 28 km,运距约 50 km,行政区划属嵩县大章镇万村管辖,范围东起柿树底,西到范家坪,南自棋盘沟,北至龙潭沟,面积 19.883 km²。

矿山开采大致可分为三个阶段进行:1999 ~ 2016 年、2016 ~ 2021 年、2016 年 ~ 至今,现将各阶段生产开采情况介绍如下。

第一生产阶段:依据“1999 年设计”和“2007 年设计”,按照设计根据矿体赋存特点合理选择采矿方法:厚度大于 7 m 的矿体采用中深孔房柱采矿法;厚度小于 3 m 的矿体采用留不规则矿柱的全面采矿法;厚度 3 ~ 7 m 矿体采用浅孔房柱采矿法。采场之间采用点柱(一般是 4 m × 4 m),并根据矿体顶板破碎程度,局部追加了预留矿柱。+850 m 标高以上主矿体已开采结束。第二生产阶段:依据“2016 年设计”和“2016 年安全设施设计”,此阶段 +668 m 标高以上 IX 号矿体已基本结束。按照设计根据矿体赋存特点合理选择采矿方法:垂直厚度大于 4 m 的采用浅孔房柱采矿法,垂直厚度小于等于 4 m 的采用留矿全面采矿法。第三生产阶段:依据“2016 年设计”和“2016 年安全设施设计”。对 +633 m 标高以上 IX 号矿体和 XIX 号矿体进行回采,目前 +633 m 标高以上 IX、XIX 号矿体已回收结束,

依据《采空区核查报告》成果可知,+633 m 标高以上采空区基本已采掘完毕,且进行了废石、全尾砂充填,故而可以认为矿体围岩结构、应力已达到新的平衡。本文依据《河南中矿能源有限公司嵩县柿树底金矿地下开采扩建项目初步设计》(2023 年),+633 m 以下的 IX、XIX 矿体主要采用上向水平分层充填法进行开采,矿体倾角取 35°,矿块尺寸 60 m × 60 m,高 35 m,分层充填开采中一次采高 3 m,然后进行充填,共计 12 次开采 →

充填。

3 构建模型

3.1 研究范围

本次数值模拟范围的划定原则为:以地下生产系统的地面水平投影为本次建模的范围,数值模拟范围(国家 2000 大地坐标): $X_1 = 37\ 569\ 367.34$, $X_2 = 37\ 570\ 367.08$; $Y_1 = 3\ 780\ 417.14$, $Y_2 = 3\ 781\ 267.33$ 。

模型尺寸参数:长(WE 方向)1 000 m、宽(NS 方向)850 m、纵深为 +1 064.9 m ~ +200 m。模型共计运算单元(zone)2 173 880 个,节点数(gridpoints)391 156 个,模型运算单元为四面体和六面体,规定地理方位的 WE 方向、NS 方向以及垂直方向分别为模型的 X 轴、Y 轴和 Z 轴。

3.2 模型概化

参考柿树底矿区地形地质及工程布置图,将 CAD 地形文件(等高线数据)导入到 Rhino(专业建模软件)中进行地表建模,具体模型如图 1 所示。



图 1 地表概化模型

依据柿树底金矿开拓系统平面图、开拓系统纵投影图、巷道参数设计图等,利用 Rhino 建立巷道模型、盲竖井模型和不规则矿体模型。考虑到最不利情况,矿体厚度取矿体的极限最大厚度 2.81 m,地下模型如图 2 所示。

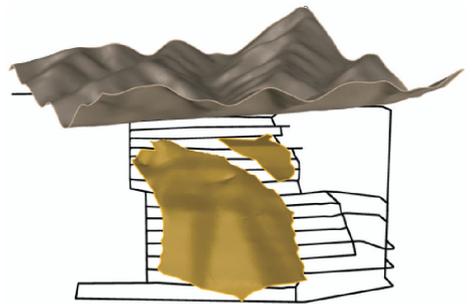


图 2 地下概化模型

参考柿树底金矿区 F₉₈₅ 矿脉第 0# ~ 17# 勘探线剖面图和柿树底区域地层接触资料:“矿体顶、底板围岩岩性基本一致,矿体上覆岩层的力学参数差异

极小,不存在数量级的差异,第四系沉积覆盖层在本区域内呈斑点状分布且厚度极薄,仅有20~30 cm”。为简化模型利于后期计算,故而矿体上覆岩土层将不再进行地层划分,地层划分模型如图3所示。

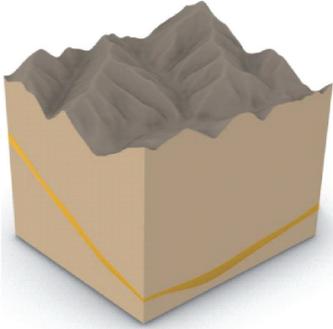


图3 地层划分模型

模型概化完成后将实体模型导入FLAC3D,综合分析采空区的应力、位移、塑性区的分布规律^[6-7],数值模型如图4所示。

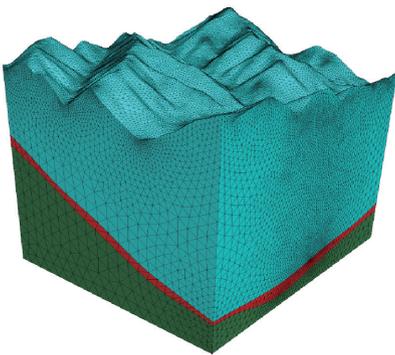


图4 数值模型

本方法建模的优点是:①充分利用矿区地形实测数据搭建模型,与实际地形地貌契合度高;②在建模过程中,可以通过点距有效控制地形面的建模精度。

3.3 模型初始条件及参数赋值

(1)本构关系:本文采用摩尔库伦(Mohr-Coulomb),它能够准确反映材料抗拉强度与抗剪强度之间的关系^[8]。

(2)边界条件:通过命令代码固定模型边界的节点速度。

(3)参数赋值:本次数值模拟计算所用到的岩土力学参数来源:《河南中矿柿树底金矿资源的禀赋特征与工程岩石力学调查研究报告》第三章工程力学试验成果、《河南中矿能源有限公司嵩县柿树底金矿资源储量合并核实报告》第四章中岩(矿)石物理学性质成果、《河南中矿能源有限公司嵩县柿树底金矿全尾砂充填系统工程初步设计》等,根据试验取样层位以及代表岩性对以上力学参数成果进行代表性评述、参数校正,并通过公式(1)~(2)计算得到其他参数^[9-10],详见表1。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

式中: K 为体积模量, GPa; G 为剪切模量, GPa; E 为弹性模量, GPa; μ 为泊松比。

表1 岩石力学参数表

岩层	密度/kg·m ⁻³	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	摩擦角/(°)	泊松比
围岩下盘	2 895	16.20	10.67	4.53	35.25	45.00	0.23
围岩上盘	2 890	14.80	11.21	4.27	30.18	43.00	0.22
金矿体	2 810	20.39	11.48	7.72	20.15	39.95	0.26
充填体(28 d)	2 100	0.12	0.10	0.17	0.17	38.70	0.19

注:1. 充填体为灰砂比1:8的全尾砂,试验结果为28 d龄;2. 围岩上下盘均以安山岩为主。

4 多中段开采数值模拟

4.1 多中段开采方案

为简化模型节省运算成本以及考虑最不利情况,本次数值模型在模拟过程中不考虑顶、底、间柱。

依据《柿树底金矿地下开采改扩建项目初步设计》的生产规模12万t/a,本次多中段开采将模拟+633 m标高以下的+598 m中段、+563 m中段、

+528 m中段充填法开采时采场的稳定性,具体方案见表2。

方案一:模拟两个中段两个矿块同时开采时的采场稳定性;

方案二:模拟三个中段三个矿块同时开采时的采场稳定性。

如图5~图6所示,矿块尺寸为60m×60m,矿体倾角35°,一次采高3m,共分12层进行充填开

表 2 方案及工况分布表

方案	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	
方案一	开挖中段	+598 m		+598 m +563 m		
	矿块编号	1	2	3	4	5
方案二	开挖中段	+598 m	+598 m +563 m		+598 m +563 m +528 m	
	矿块编号	1	2	3	4	5

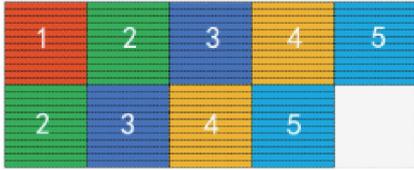


图 5 方案一矿块开采顺序图

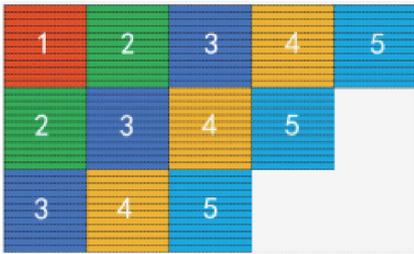


图 6 方案二矿块开采顺序图

采,即每采高 3 m,充填 1 次,共计开采、充填 12 次,开采顺序为 1→2→3→4→5。

4.2 初始应力场模拟

柿树底金矿在未受地下采矿扰动的情况下,还原地层应力场,分析垂直方向的应力分布^[10-11]。

由图 7 可知:ZZ 方向(垂直方向)应力分布呈现随深度增加而增大的规律(受矿区地形起伏的影响,应力随深度的递增非水平均匀分布);最大应力为 2.2786×10^7 Pa,分布在模型底部,最小应力为 0,分布在模型顶部,这个计算结果符合实际应力分布规律。

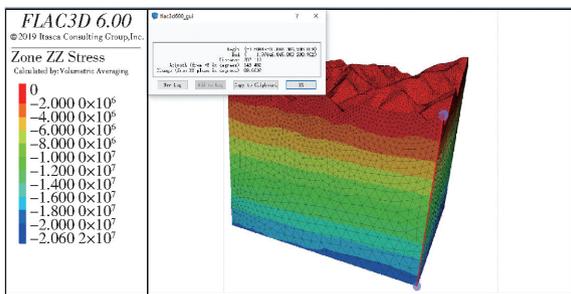


图 7 初始应力垂直方向分布图

如图 7 中对话框所显示,模型顶部一点到模型底部一点的距离为 707.12 m, ρ 为岩层的平均密度, v 为单元体积分, g 取 9.80 N/m^3 。

根据公式计算得:

$$\rho = (\rho_1 \times v_1\% + \rho_2 \times v_2\% + \rho_3 \times v_3\%) / 3$$

$$\sigma = \rho gh =$$

$$2\,817.31 \text{ kg/m}^3 \times 9.80 \text{ N/m}^3 \times 707.12 \text{ m} =$$

$$1.95 \times 10^7 \text{ Pa}$$

计算结果介于 $1.80 \times 10^7 \sim 2.00 \times 10^7$ Pa,验证了模型的合理性。

4.3 开挖分析

1) 位移分布

利用 FISH 语言编写 FLAC3D TO Tecplot 接口程序,将网格节点信息导出到 Tecplot 绘制位移量等值线图。

由图 8 可知,工况一单个矿块开挖后,地表垂直方向最大位移量(沉降量)为 -6.09×10^{-4} m,地表位移分布呈现“同心圆向外扩散递减的态势”。采场垂直方向最大位移量为 -1.56×10^{-2} m,最大位移量分布在充填体顶板围岩的中心位置(上盘),具体如图 9 所示。由此可知单个矿块充填法开采产生的位移量非常小。

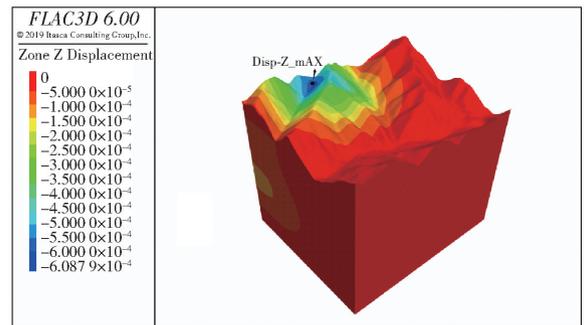


图 8 工况一单个矿块开挖地表位移分布图

同理,方案一 < 两中段同时开挖 > :地表垂直方向最大位移量为 -5.94×10^{-3} m,充填体顶板围岩垂直方向最大位移量为 -2.85×10^{-2} m,具体如图 10、图 11 所示;方案二 < 三个中段同时开挖 > :地表垂直方向最大位移量为 -8.30×10^{-3} m,充填体顶板围岩垂直方向最大位移量为 -4.35×10^{-2} m,具体如图 12、图 13 所示。

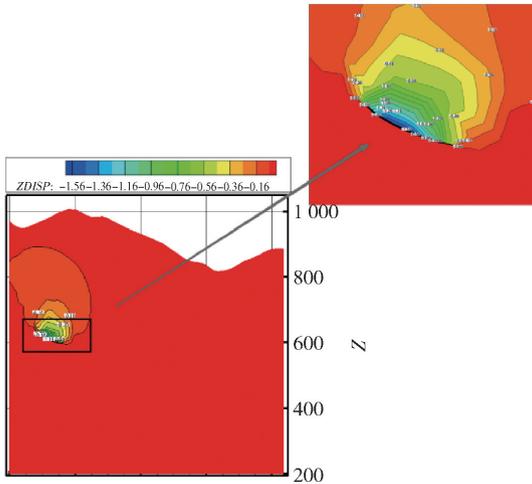


图9 工况一单个矿块开挖采场位移分布图

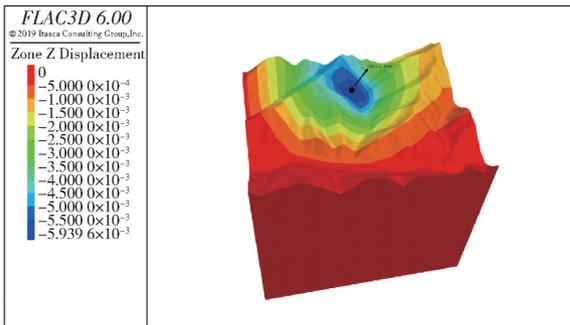


图10 方案一终采后地表位移分布图

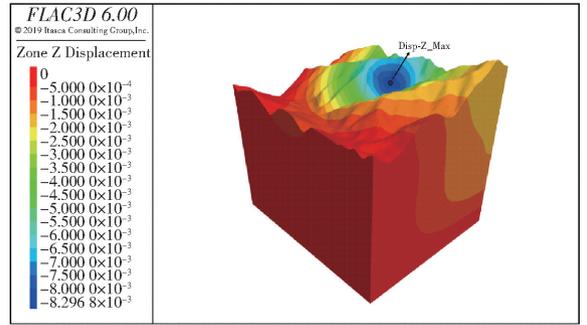


图12 方案二终采后地表位移分布图

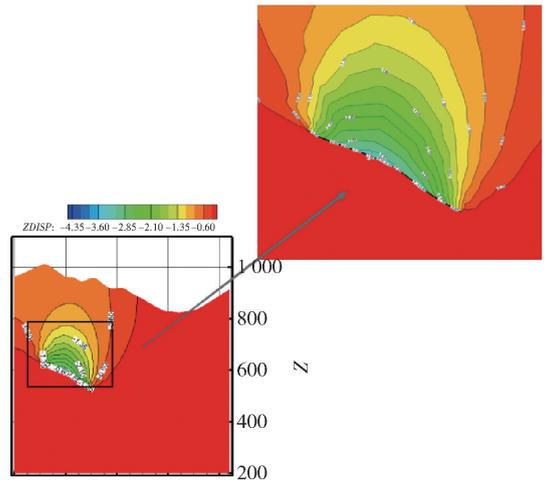


图13 方案二终采后采场位移分布图

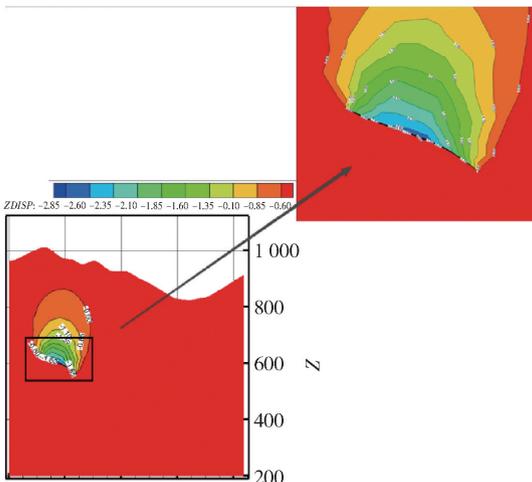


图11 方案一终采后采场位移分布图

2) 应力分布

考虑到最大满足条件,以下着重分析了三个中段同时开挖→充填后的应力分布情况,充填开采结束后,充填体顶板围岩的最大主应力主要表现为拉张应力,其最大值为 1.85 MPa,对比围岩抗拉强度不难发现(表 1),顶板围岩产生的拉张应力小于围

岩的拉张屈服强度,故而顶板围岩不会产生拉张变形。特别地,矿体上、下段(顶、间柱的位置)产生局部压应力集中,最大压应力为 -5.50 MPa,这意味着矿体上、下端可能存在压应力应变塑性应变区,如图 14、图 15 所示;由图 16、图 17 可知,充填体顶板围岩的最小主应力主要表现为压应力,其最大值为 -4.31 MPa,其主要集中在充填体顶板围岩的中心位置,矿体上、下段产生局部压应力集中,最大压应力为 -36.2 × MPa,这意味着充填体可能受到顶板围岩的压应力而存在剪切塑性应变区,矿体上、下端同样也可能存在剪切塑性应变区。

3) 塑性区分布

由图 18 可知,充填体因受到上部围岩的压应力而产生剪切塑性区,塑性区大面积且连贯分布,故而整个充填体在开挖充填结束后持续受到上部的压应力而产生大面积塑性应变区域;充填体顶、底板围岩存在零星拉张塑性应变区,但塑性区没有成片状且贯穿分布,塑性应变区域高度较低,所以充填体顶、底板围岩在充填体的作用下围岩结构相对稳定。

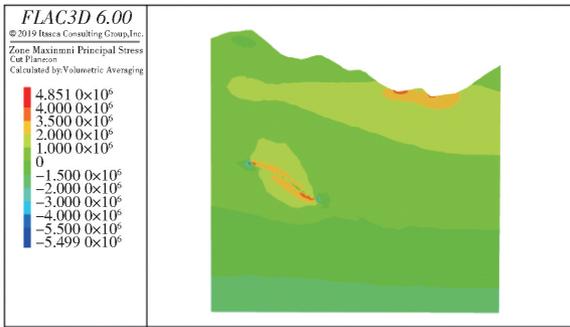


图 14 竖直方向顶板围岩最大主应力分布图

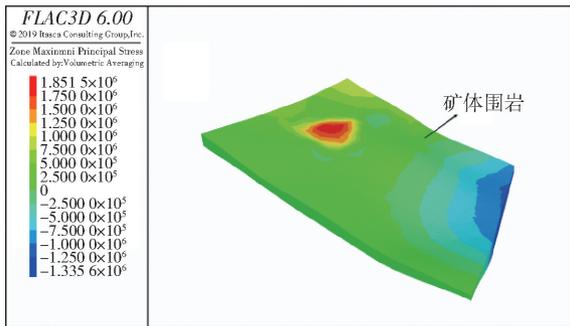


图 15 水平方向顶板围岩最大主应力分布图

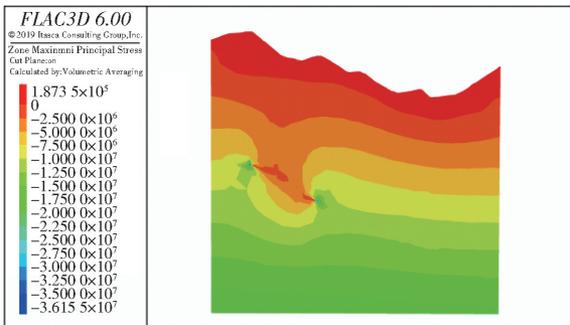


图 16 竖直方向顶板围岩最小主应力分布图

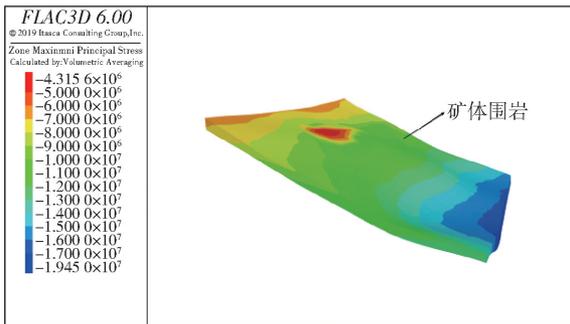


图 17 水平方向顶板围岩最小主应力分布图

上段充填体主要以 shear-p 为主,而下端充填体不仅存在 shear-p,而且大面积分布 shear-n,这说明下端充填体稳定性较差,还存在塑性应变的可能,这说明三个中段同时开挖→充填时,下部中段充填体

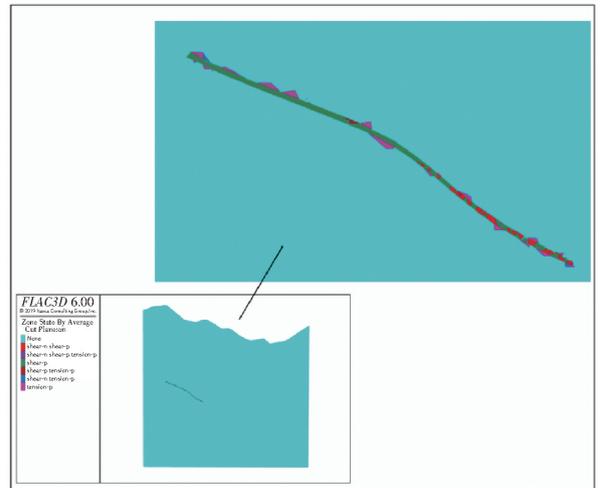


图 18 塑性区分布图

的稳定性有滞后效应,建议实际应用多中段充填法开采时应该设计填充物凝固的缓冲时间。

5 结论

(1) Rhino 建模软件在矿山数值模拟领域的应用,弥补了矿山建模的短板,拓展了 FLAC3D 数值模拟建模板块的新思路。

(2) 通过模拟多中段开挖→充填过程得到如下结论:

- ① 方案一 < 两个中段同时开挖→充填 > 结束后,地表竖直方向产生的最大位移量为 -5.94×10^{-3} m, 充填体顶板围岩产生的最大位移量为 -2.85×10^{-2} m; 方案二 < 三个中段同时开挖→充填 > 结束后,地表竖直方向最大位移量为 -8.30×10^{-3} m, 充填体顶板围岩竖直方向最大位移量为 -4.35×10^{-2} m, 方案一、方案二充填体顶板围岩沉降量较小;

② 从应力分布情况来看,充填体顶底板围岩的最大主应力主要以拉张应力为主,但其最大应力值小于围岩的拉张屈服强度,最小主应力主要以压应力为主,压应力集中在充填体顶部围岩,作用于充填体,两者形成抗力而使其结构处于稳定状态;

③ 从塑性区分布情况来看,没有形成大面积贯穿性的塑性区域,故而顶底板围岩不会出现失稳现象。

从充填体顶底板围岩的位移、应力以及塑性区分析可得:方案一、方案二的多中段开采方案基本可行,但从位移角度来看,方案一更有利于地表稳定和采场安全,故而方案一(两中段同时开采)比方案二(三中段同时开采)更符合矿山安全生产的要求。