

# 下向进路充填采矿法深部矿岩破坏机理数值模拟研究

邢超<sup>1</sup>,高铭阳<sup>2</sup>,邱洋洋<sup>1</sup>,余乐魁<sup>3</sup>,张亚鹏<sup>1</sup>,薛超<sup>1</sup>,彭康<sup>3</sup>

(1. 嵩县山金矿业有限公司; 2. 山东黄金矿业(鑫汇)有限公司; 3. 中南大学资源与安全工程学院)

**摘要:**针对嵩县山金深部矿体采用下向进路充填采矿法开采矿岩破坏机理及地压显现技术问题,采用 Rhino + Griddle + Flac<sup>3D</sup>快速建模技术,对矿区下向进路开采1~8 a矿岩应力及位移变化规律进行研究。模拟结果表明:最小主应力随深度的增加而增加,靠近底部较大;未开采采场起到了临时矿柱的作用,应力集中现象较明显,同时在采场附近的充填体中也形成应力卸压区;各中段的位移随开采时间的增加而不断增大,采场顶板的最大位移主要出现在顶板中间,在矿山不断向深部推进的过程中,最大位移值呈上升趋势。

**关键词:**深部开采;下向进路;充填采矿法;矿岩破坏机理;地压显现;数值模拟

中图分类号:TD853.34

文章编号:1001-1277(2024)08-0058-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240808

## 引言

近年来,国内大多数矿山都进入了深部开采阶段,由于高应力的开采环境,井下矿岩出现岩爆、变形、坍塌等破坏现象<sup>[1-3]</sup>。下向进路充填采矿法由于采矿损失贫化低、安全性能高等优势而被广泛应用于深部矿山开采<sup>[4-7]</sup>。随着数值模拟软件的研究发展,数值模拟方法被广泛应用于矿业工程中<sup>[8-11]</sup>。因此,许多学者采用数值模拟方法对矿岩破坏机理及下向进路充填采矿法开采进行研究。孙飞<sup>[12]</sup>开展了矿岩稳定性对地下金矿开采的影响研究,研究表明,地下金矿安全开采的主要因素为矿区围岩的稳定性,为保障安全开采,在设计开采前需考虑围岩的稳定性;肖月亮等<sup>[13]</sup>使用 Flac<sup>3D</sup>软件对金川龙首矿区下向进路采矿进行了数值模拟研究,结果较好地证明了采用六边形进路巷道的可行性;段应明等<sup>[14]</sup>依据 ANSYS 数值模拟软件对井下充填体及围岩的稳定性进行模拟,结果表明,井下矿体回采对周边充填体及围岩稳定性都会造成一定程度的影响。

本文采用 Rhino + Griddle + Flac<sup>3D</sup>软件对嵩县山金矿业有限公司(下称“嵩县山金”)采用下向进路充填采矿法回采深部矿体进行数值模拟,研究回采过程中矿岩应力及位移变化规律,以期对深部矿体安全高效开采提供技术支撑。

## 1 工程概况

嵩县山金矿区山体标高为705 m,井口标高583 m,以井下300 m标高为第一中段进行开采,中段高度为

40 m,矿区开采十多年来,井下220 m中段以上的矿体基本已采完,现阶段主要开采220 m及以下中段矿体。矿区开采初期使用分段空场中深孔落矿法进行开采,导致开采过程中采矿损失贫化较高,且留下大量采空区隐患<sup>[15]</sup>;随着矿山引进下向进路充填采矿法并对掘进爆破方法进行革新<sup>[16]</sup>,有效降低了矿体开采过程中的采矿损失贫化,解决了采空区隐患。现阶段矿区采用较多的回采方法为下向进路充填采矿法,随着矿区进入深部开采,地应力增加和地压显现导致下向开采过程中矿岩冒顶、片帮及围岩变形破坏等灾害问题频发<sup>[17]</sup>,且矿区深部矿岩较为破碎而使得矿体开采难度加大<sup>[18]</sup>。基于此,研究矿区下向进路充填采矿法开采过程中的矿岩破坏机理对矿区井下安全高效开采具有重大意义。

## 2 数值模拟分析研究

### 2.1 模型建立

根据矿山所提供的矿区地质剖面图,本次矿体主要建模区域在-20 m中段至220 m中段,矿区220 m中段之上矿体已开采完成,建模区域采空区包括民采采空区等均按照充填体进行建模。

为方便快速建模,同时保证模型精度,每个中段矿体厚度根据地质剖面线0勘探线—9勘探线所得到的矿体厚度求出平均值,同时走向长度按照嵩县山金2018年二季度末储量估算纵投影图得出,具体数值如表1、表2所示。

基于圣维南原理,认为开挖矿体引起的矿岩应力变化控制在开挖范围的3~5倍,整体模型框架的边

表1 矿体厚度

Table 1 Thickness of the ore body

中段标高/m	-20	20	60	100	140	180	220
矿体平均厚度/m	7.04	9.14	10.65	9.79	7.66	6.88	4.60

表2 矿体走向长度

Table 2 Length along the trending of the ore body

中段标高/m	-20	20	60	100	140	180	220
走向长度/m	134	136	217	264	296	321	292

界范围据此而定。根据矿区地质剖面图,地表为实际剖面线,底面延伸到-60 m,满足数值计算对边界条件的要求。Rhino划分网格模型如图1所示,矿体模型如图2所示。

## 2.2 参数计算

依据嵩县山金矿区地质调查结果及室内多种岩石力学试验结果,确定本次数值模拟所需的主要岩体工程力学参数,结果如表3所示。

由于矿区现场构造应力的作用<sup>[19]</sup>,使得原岩水平应力在不同方向上大小不同。根据矿区现场加工试样室内地应力测量结果,矿区井下-20~140 m标高的侧压力系数为1.43~1.68,该测量结果符合国内大陆区域地压的侧压力系数分布规律。通过分析矿区地应力室内测量试验数据可知,最大水平主

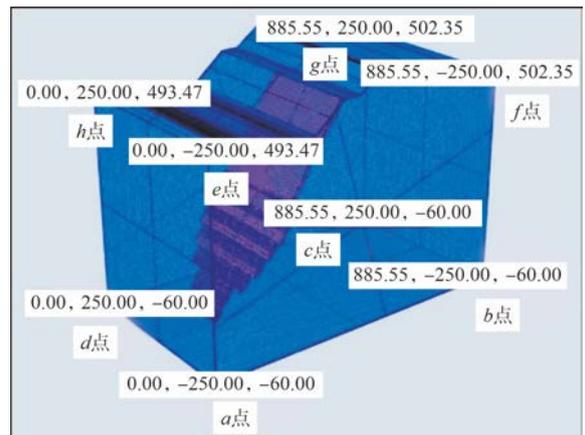


图1 Rhino划分网格模型

Fig. 1 Rhino model for grid division

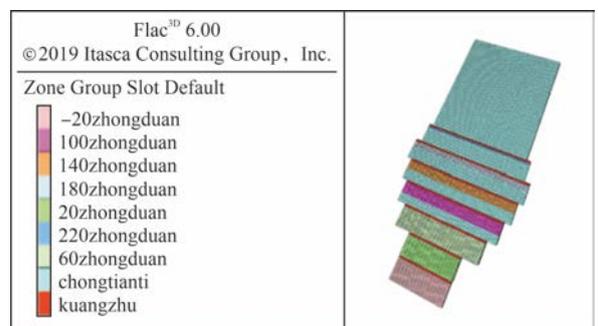


图2 矿体模型

Fig. 2 Ore body model

表3 不同岩性岩石力学参数

Table 3 Mechanical parameters of rocks with different lithology

岩石名称	块体密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪参数		变形参数	
				内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
围岩	2.65	59.43	10.58	9.94	66.14	25.25	0.22
矿石	2.63	79.19	11.13	12.82	67.71	76.97	0.26
充填体	1.80	4.0	0.9	0.3	18	0.11	0.14

应力与最小水平主应力数值相差较大,故矿区井下-20~140 m标高剪应力较大。在本次数值模拟研究过程中,结合已知数据及相应方法计算,不同埋深的 $K$ 值(平均标高应力与垂直应力比值)不同,具体取值结果如表4所示。

表4 不同标高的 $K$ 值Table 4  $K$  value of different elevations

标高/m	-20~0	0~100	100~200	200~300	300~400	400~583
$K$ 值	1.55	1.40	1.25	1.15	1.05	0.99

## 2.3 数值模拟方案

数值模拟主要分析矿体开挖、充填过程中围岩应力、位移的变化情况。一方面,通过观测变形云图来

模拟开挖充填过程中的应力、位移变化过程,以判断其是否满足安全生产需求;另一方面,通过监测并记录部分节点的应力、位移值,分析其变化规律及是否能够满足控制地表沉陷的要求。为确定分级尾砂充填效果,将充填开采与崩落采矿法开采后的地表沉陷情况进行对比,确定模拟方案。即对比分析充填前后地表移动变形情况,主要分析下沉、水平移动这2种地表移动变形曲线,并对比分析充填开采的模拟地表下沉值与实测地表下沉值,以验证模型的准确性。本次模拟将矿区220 m中段以下矿体开采充填完成后的状态作为模拟的初始状态,从该水平开始,按每分层4 m向下进行回采,回采后立即进行充填。各回采年份所模拟的回采矿体范围如表5所示。

表5 各回采年份所模拟的回采矿体范围

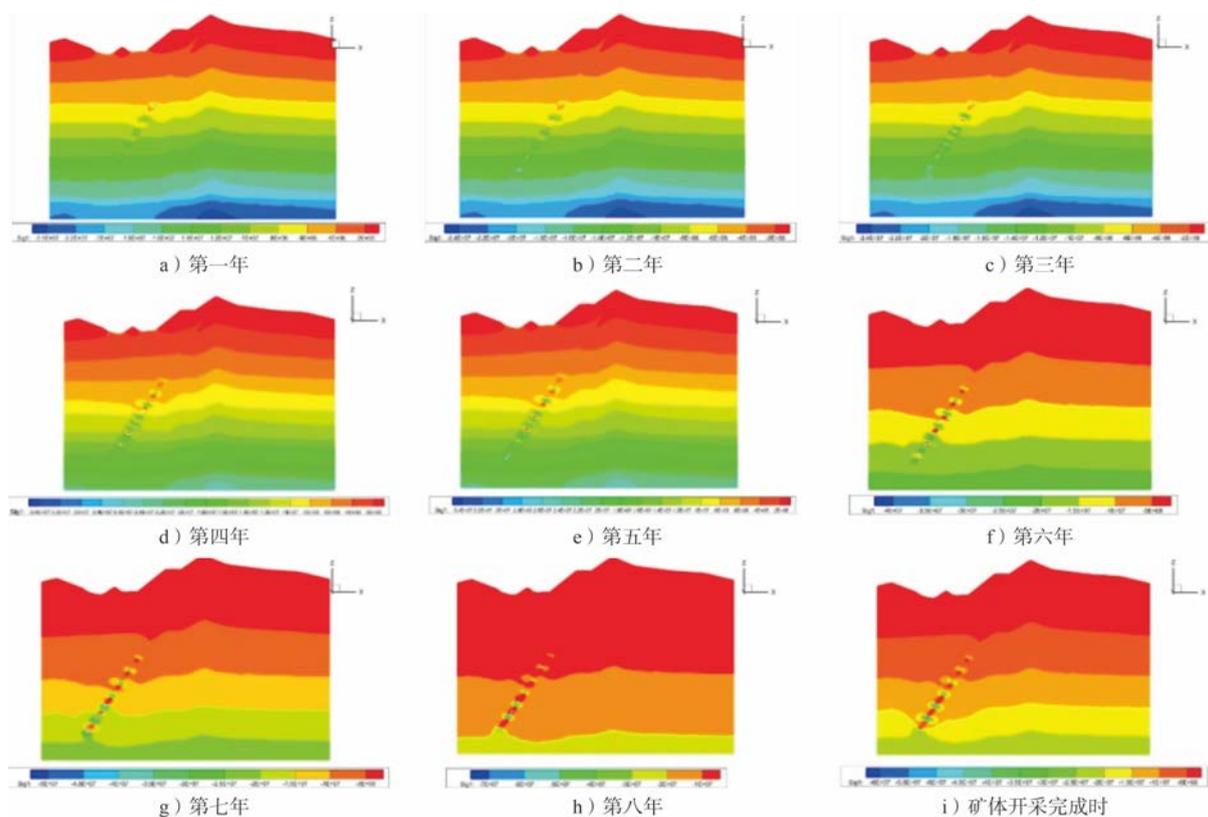
Table 5 Range of ore body recovery simulated by each year of recovery

回采年份	开挖矿体范围					是否充填
第一年	60-9	100-6	140-5	180-4	220-2	是
第二年	20-8	60-7	100-4	140-3	180-2	是
第三年	20-9	60-8	100-5	140-4	180-3	是
第四年	-20-9	20-7	60-6	100-3	140-2	是
第五年	-20-3	-20-5	-20-7	20-4	60-4	是
第六年	-20-6	-20-8	20-6	60-5	100-2	是
第七年	-20-2	-20-4	20-2	60-1	60-3	是
第八年	-20-1	20-1	20-3	20-5	60-2	是

## 2.4 应力分析

### 2.4.1 最大主应力

不同回采年份矿区矿体开采后最大主应力整体分布如图3所示。从图3可以看出:在各个开采年份内,周围未开采的采场起到了临时矿柱的作用<sup>[20]</sup>,应力集中现象较明显,部分应力转移至采场上下盘,同时在采场附近的充填体中也形成应力卸压区。采场周围的顶底板附近形成卸压区,由于底板附近均为充填体,因此,底板的卸压区范围较大,同时临时矿柱中的部分应力也转移到充填体中。各开采年份充填体中主应力小于围岩应力水平,应力较大的地方是各阶段的矿柱,说明矿体开采过程中矿柱对整体开采起到了保护作用。

图3 最大主应力分布图( $y=0$ )Fig. 3 Distribution of maximum main stress ( $y=0$ )

### 2.4.2 最小主应力

不同开采年份矿区矿体开采后最小主应力整体分布如图4所示。从图4可以看出:整个模型的最小主应力随开采深度的增加而增加,靠近底部较大,约为15 MPa。最小主应力的最小值为1~15 MPa,且随开采年份的增加而增大。同时,最小值出现在充填体内,这与最大主应力分布相同,但与最大主应力不同的是,其最大值没有出现在矿柱内。

## 2.5 位移分析

### 2.5.1 总位移

不同开采年份矿区矿体开采后总位移分布如图5所示。从图5可以看出:采场顶板的最大位移主要出现在顶板中间,因此对采场顶板中间位置进行位移监测可以判断顶板潜在失稳的可能<sup>[21]</sup>。同时,位移变化规律与应力变化规律基本相似,随着矿体开采的进行,位移区域由原本的局部区域开始形成一个大的区域。位移较大的区域发生在充填内,这对充填体的强度提出较高要求,一方面,充填体的强度本就低于矿(岩)体;另一方面,开采扰动造成应力重新分布,会在充填体内形成应力集中现象。

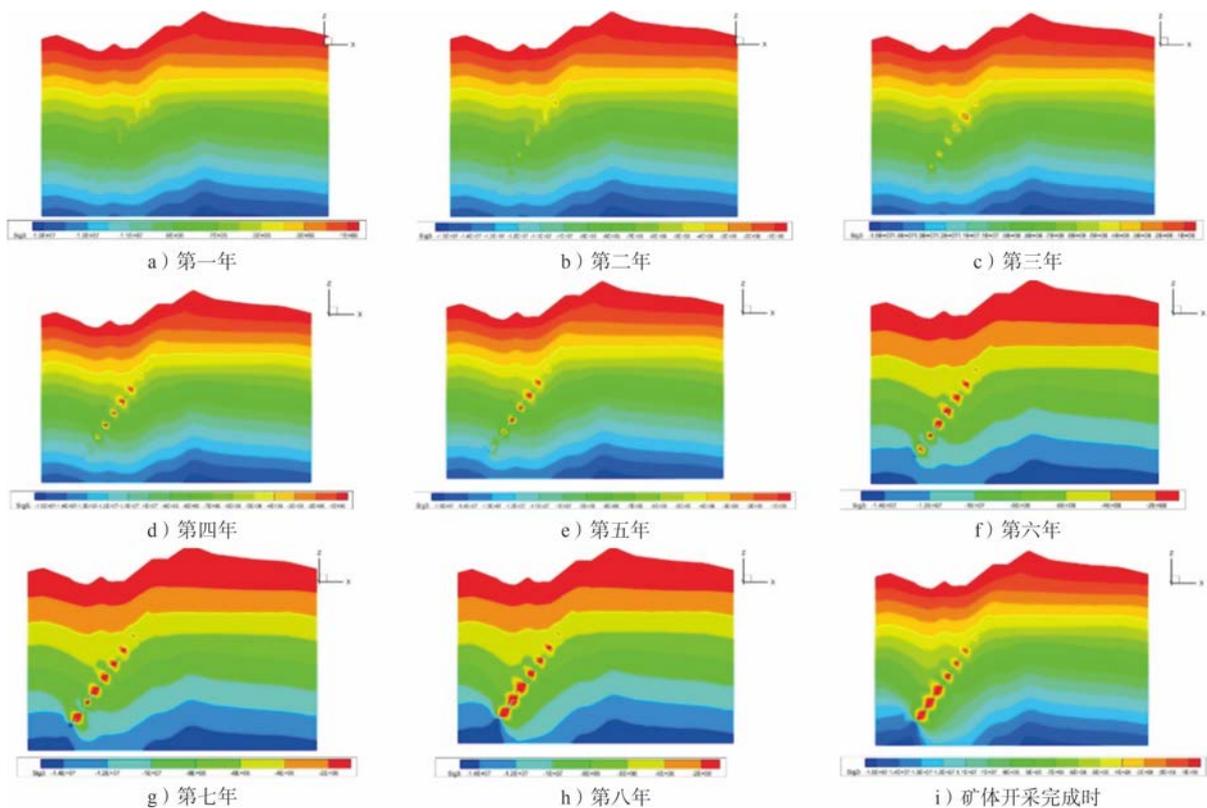


图 4 最小主应力分布图( $y=0$ )

Fig. 4 Distribution of minimum main stress ( $y=0$ )

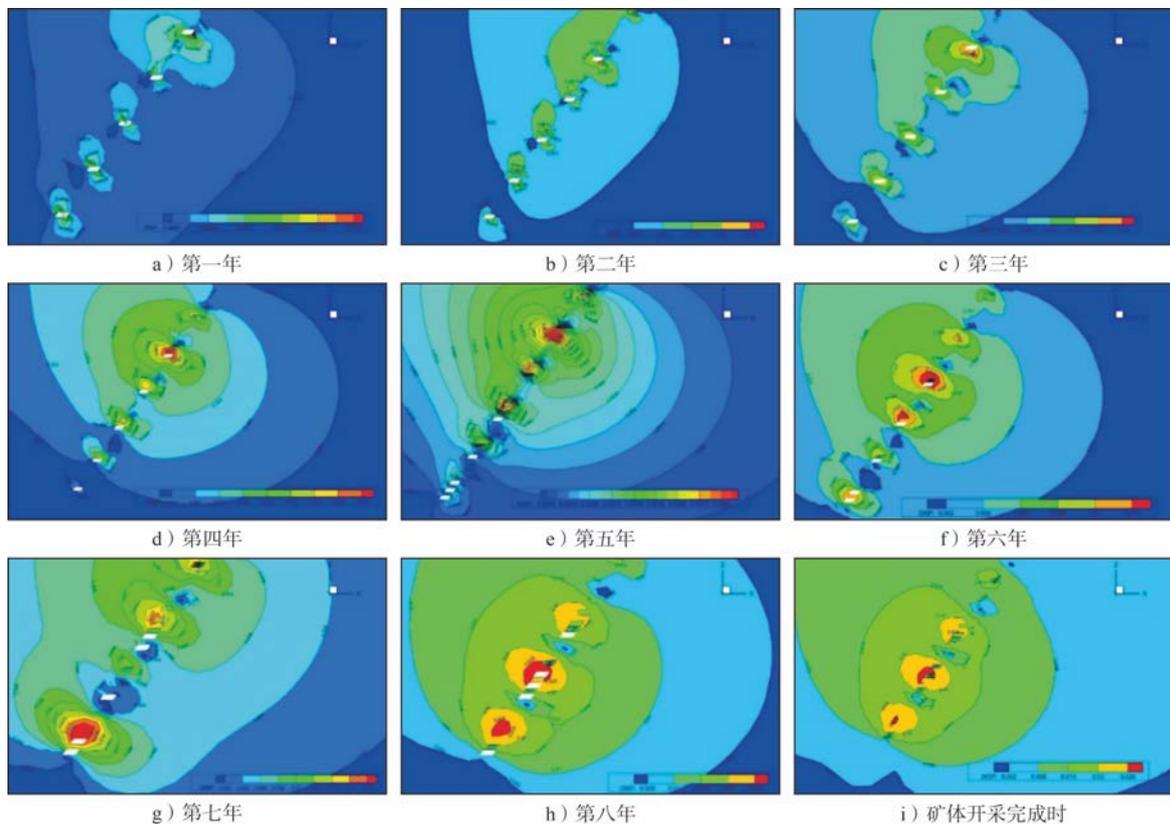


图 5  $z$  方向总位移图( $y=0$ )

Fig. 5 Total displacement along  $z$  direction ( $y=0$ )

2.5.2 垂直位移

不同开采年份矿区矿体开采后垂直位移分布如

图 6 所示。从图 6 可以看出:随着矿体开采年份的增加,各中段的垂直位移不断增大,垂直位移为  $-0.016 \sim$

0.012 m,可能出现顶板垮落的位置主要在矿体上盘,矿体下盘则可能出现底鼓现象。为更好地说明矿体内部位移变化,选择部分具有代表性的位置切片进行

说明(如图7所示)。从图7可以看出,矿体上下盘垂直位移方向在充填体附近发生改变,上盘最大值为-0.012 m,下盘最大值为0.008 m。

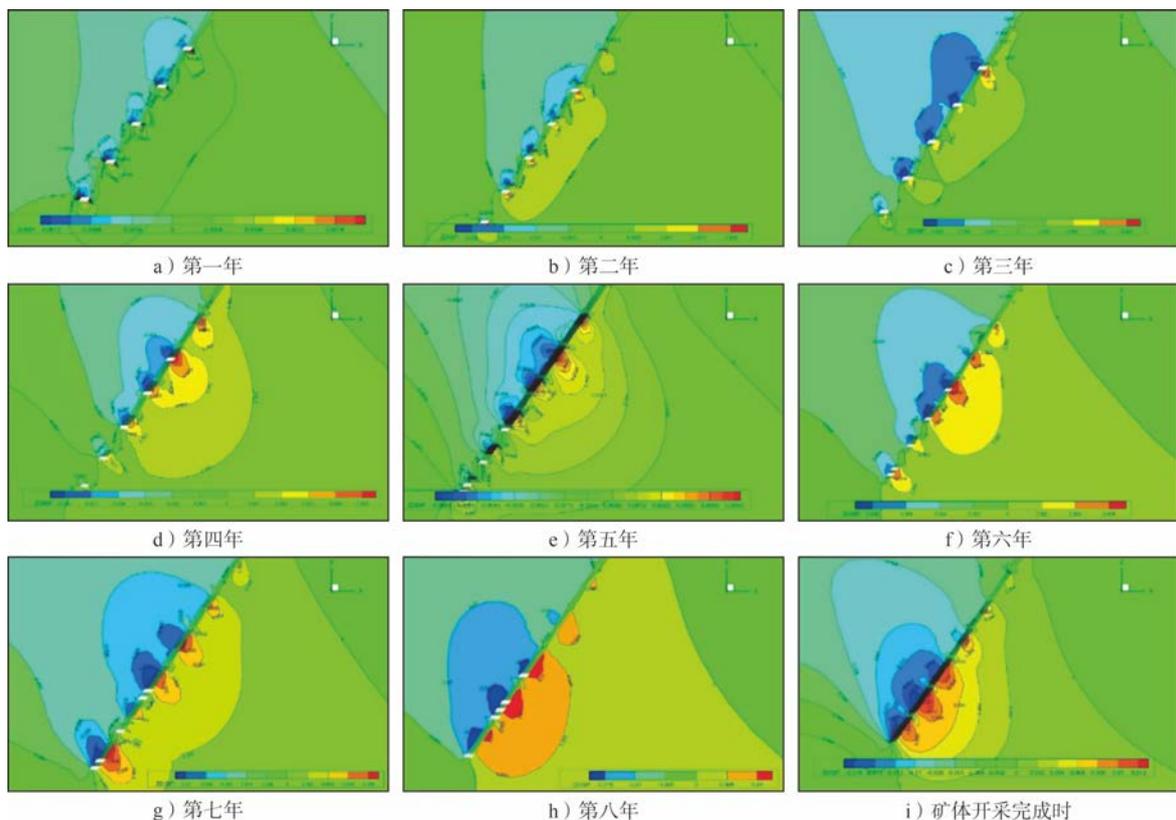


图6  $z$ 方向垂直位移图( $y=0$ )

Fig. 6 Displacement perpendicular to  $z$  direction( $y=0$ )

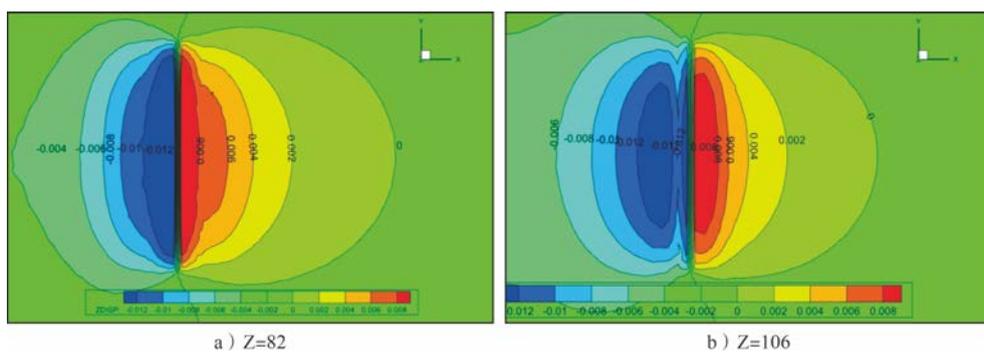


图7 部分充填体内垂直位移图(第8年)

Fig. 7 Vertical displacement inside some filling bodies(the 8th year)

### 2.5.3 最大位移变化曲线分析

不同开采年份矿区矿体开采后最大位移变化曲线如图8所示。从图8可以看出:在矿山矿体开采不断向深部推进的过程中,最大位移呈上升趋势,在第5年发生变化,可能的原因是受到矿体资源的限制,前4年的开采方案,已无法满足要求,在第5年开采的分层位置不再是每个分段一层,而是同一个分段内可能同时开采不同的分层,之后几年的变化规律同前几年相同,说明模拟开采的方案很好地模拟了现场实

际情况。

## 3 结论

1) 开采区周围未开采的采场起到了临时矿柱的作用,应力集中现象较明显,部分应力转移至采场上下盘,同时在采场附近的充填体中也形成应力卸压区。整个模型的最小主应力随开采深度的增加而增加,靠近底部较大,约为15 MPa。最小主应力的最小值为1~15 MPa,且随回采时间的增加而增大。

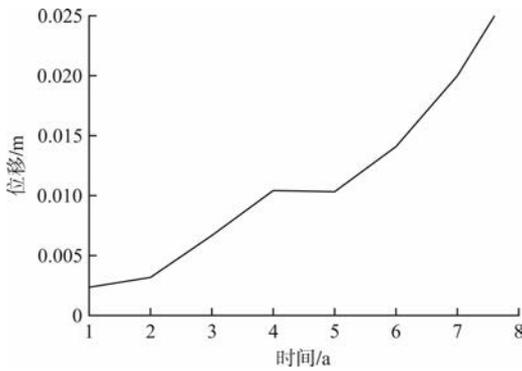


图8 最大位移变化曲线

Fig. 8 Curve of the maximum displacement variation

2) 采场顶板的最大位移主要出现在顶板中间, 因此对采场顶板中间位置进行位移监测可以判断其潜在失稳的可能, 位移较大的区域发生在充填内, 这对充填的强度提出较高要求。

3) 随着矿体开采年份的递增, 各中段的垂直位移在不断增大, 垂直位移为  $-0.016 \sim 0.012$  m, 矿体上盘位置可能出现顶板垮落现象, 下盘位置则可能出现底鼓现象。

#### [参考文献]

- [1] 李夕兵, 周健, 黄麟淇, 等. 中国黄金矿山开采技术回顾与展望[J]. 黄金, 2020, 41(9): 41-50.
- [2] 李夕兵, 黄麟淇, 周健, 等. 硬岩矿山开采技术回顾与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1 828-1 847.
- [3] 盛新利. 黄金矿山地下采矿技术现状与发展探究[J]. 世界有色金属, 2019(9): 49, 51.
- [4] 周述峰, 公培森, 宋恩祥, 等. 下向进路充填采矿法在嵩县山金的应用[J]. 黄金, 2020, 41(5): 36-39.
- [5] 于曙华, 马章印, 张亚鹏. 机械化盘区下向进路充填采矿法在嵩县山金的应用[J]. 黄金, 2021, 42(10): 43-48.
- [6] 吴杨, 刘再涛, 王栋毅, 等. 西山分矿下向构筑工艺研究与应用[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 14-17.

- [7] 王泽伟, 彭康, 徐欣, 等. 胶结充填体下顶底柱进路开采参数优选[J]. 矿冶工程, 2014, 34(4): 11-15.
- [8] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 基于响应面法的海下框架式采场结构优化选择[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2 417-2 422.
- [9] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 海底下框架式分层充填法开采中矿岩稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(11): 3 452-3 458.
- [10] PENG K, LIU Z M, ZHANG Z M, et al. Determination of isolation layer thickness for undersea mine based on differential cubature solution to irregular Mindlin plate [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(3): 708-719.
- [11] PENG K, YIN X Y, YIN G Z, et al. Galerkin solution of Winkler foundation-based irregular Kirchhoff plate model and its application in crown pillar optimization[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1 253-1 263.
- [12] 孙飞. 矿岩稳固性对开采地下金矿影响的研究[J]. 世界有色金属, 2021(12): 45-46.
- [13] 肖云亮, 韩斌. 金川龙首矿下向进路充填采矿的进路稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 36-40.
- [14] 段应明, 陶子豪, 张希, 等. 大红山铜矿井下充填体及围岩稳定性数值模拟研究[J]. 云南冶金, 2019, 48(3): 7-13.
- [15] 周子龙, 黄英华, 苗胜军, 等. 采空区大规模坍塌灾害评估与分区分级防治关键技术[Z]. 长沙: 中南大学, 2021.
- [16] 马章印, 刘吉兴, 于曙华, 等. 硬岩大断面台车掘进控制爆破在嵩县山金的应用[J]. 黄金, 2022, 43(7): 27-30.
- [17] 郭子源, 赵国彦, 彭康. 深部高应力软岩巷道开挖与支护围岩变形的 Flac<sup>3D</sup> 模拟[J]. 矿冶工程, 2012, 32(2): 18-22, 29.
- [18] 尚雪义, 李夕兵, 彭康, 等. 基于安全系数和可靠度的极破碎矿体进路优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2 390-2 397.
- [19] 赵维生, 梁维, 许猛堂, 等. 构造作用下弱胶结泥岩巷道稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(6): 94-99.
- [20] 江文武, 徐国元. 复杂采矿条件下临时水平矿柱稳定性分析[J]. 金属矿山, 2010(3): 29-31, 65.
- [21] 李小贝, 戴兴国, 王新民, 等. 基于 CT-GRNN 模型的采场顶板位移预测[J]. 矿冶工程, 2015, 35(6): 30-34.

## Study of deep-mine ore rock failure mechanism using downward approach filling mining method by numerical simulation

Xing Chao<sup>1</sup>, Gao Mingyang<sup>2</sup>, Qiu Yangyang<sup>1</sup>, Yu Lekui<sup>3</sup>, Zhang Yapeng<sup>1</sup>, Xue Chao<sup>1</sup>, Peng Kang<sup>3</sup>

(1. Songxian Shanjin Mining Co., Ltd.; 2. Shandong Gold Mining (Xinhui) Co., Ltd.;

3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University)

**Abstract:** To study the deep-mine rock failure mechanism and the technical issue of ground pressure manifestation using the downward approach filling mining method in the deep ore bodies in the mining area of Songxian Shanjin, the research employs rapid modeling techniques using Rhino + Griddle + Flac<sup>3D</sup> to investigate the stress and displacement patterns of ore rock during 1-8 a of downward approach mining. The simulation results indicate that the minimum principal stress increases with depth, being greater near the bottom. The unmined stope acts as a temporary ore pillar, exhibiting significant stress concentration, and a stress relief zone forms in the filling body near the stope. The displacement in each level increases with mining time, with the maximum displacement at the stope roof appearing mainly in the middle of the roof. As the mine progresses deeper, the maximum displacement value shows an upward trend.

**Keywords:** deep mining; downward approach; filling mining method; ore rock failure mechanism; ground pressure manifestation; numerical simulation