

矿井开采

# 基于 Rhino + griddle 耦合 FLAC3D 的地下采矿工程对地表建(构)筑物安全影响的研究

Research on the Impact of Underground Mining Engineering on the Safety of Surface Structures Based on Rhino + Griddle Coupled FLAC3D

冉辉<sup>1</sup>, 李文君<sup>2</sup>, 王雄雄<sup>3</sup>, 马冰洁<sup>4</sup>, 于晓龙<sup>3</sup>, 张红伟<sup>3</sup>, 陈阳<sup>5</sup>

(1. 河南金泰矿业科技有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 河南博奥资源咨询有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 450000; 4. 安阳市文峰区应急管理局, 河南 安阳 455002; 5. 河南省冶金规划设计研究院有限责任公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:**为探究矿山地表建、构筑物与地下采矿工程之间的安全影响关系,解决地下开采与地表安全这一矛盾共同体,本文借助 GIS 地理信息软件、Rhino + griddle 建模软件对某金矿的现状地形、建、构筑物分布,地下矿体及改扩建工程进行了三维建模,并利用 FLAC3D 有限差分软件对地下矿体进行了开挖模拟。模拟方案分为不充填开采方案(最不利情况)和上向水平分层充填开采方案(最保守情况),其中,考虑到充填技术的局限性,上向水平分层充填开采方案分空顶 1 m 和空顶 0.5 m 两个工况模拟。经分析:两种开采方案产生的地表位移变形值均满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》要求,更有利于地表建、构筑物的稳定和安全。

**关键词:** Rhino + griddle; FLAC3D 数值模拟; 安全影响; 上向水平分层充填法; 位移变形

**中图分类号:** TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0001-10

**Abstract:** In order to explore the safety impact relationship between surface structures and underground mining projects, and solve the contradictory community of underground mining and surface safety, this paper uses GIS geographic information software and Rhino + griddle modeling software to conduct three-dimensional modeling of the current terrain, construction (structure) distribution, underground ore body and reconstruction and expansion project of a gold mine. In addition, FLAC3D finite difference software was used to simulate the excavation of underground ore body. The simulation scheme was divided into non-filling mining scheme (the most unfavorable case) and upward horizontal slicing and filling mining scheme (the most conservative case). Considering the limitations of filling technology, the upward horizontal slicing and filling mining scheme was divided into empty top 1 m and empty top 0.5 m simulation. The surface displacement and deformation values generated by the two mining schemes meet the requirements of the Regulations on Coal pillar maintenance and coal pressing in Buildings, water bodies, Railways and Main shafts and lanes. The upward horizontal filling mining greatly reduces the displacement and deformation value of the surface, which is more conducive to the stability and safety of structures.

**Key words:** Rhino + griddle; FLAC3D numerical simulation; security implications; upward horizontal cut and fill method; deformation displacement

## 1 前言

地下矿产资源开发诱发地表移动的研究一直

是我国岩土工程领域研究中的重点课题<sup>[1-3]</sup>,矿产资源的开发对矿区人民的生产生活产生了安全影响,其中,受地下采矿扰动的影响,地表建、构筑物存在安全隐患。目前,金属非金属矿山地下采矿工程所引起的地表稳定性及安全影响分析还是基于经典采煤理论,我国早期学者利用传统概率积分法对金属矿山、非金属矿山开采的稳定性进行了研究<sup>[4-5]</sup>。为更好地解决金属非金属矿山地下

[作者简介] 冉辉(1984—),男,工程师,主要从事矿山安全、矿山设计等工作。

[引用格式] 冉辉,李文君,王雄雄,等. 基于 Rhino + griddle 耦合 FLAC3D 的地下采矿工程对地表建(构)筑物安全影响的研究[J].

中国矿山工程,2025,54(3):1-10.

采矿工程与地表建、构筑物安全性这一矛盾,本文以华中地区某金矿为例,利用 GIS、Rhino + griddle 建立研究区三维地质模型,通过 FLAC3D 有限差分软件模拟矿山采掘过程,定量分析了地下开采对地表建、构筑物的安全影响,为相似矿山的表地的安全度研究提供参考。

## 2 矿山概况

### 2.1 矿山开采历史

矿山的开发生产历史大致可划分为三个阶段:1999~2016年、2016~2021年、2022年~至今,现将各阶段生产开采情况介绍如下:

第一生产阶段:1999~2016年,开拓系统为平硐+溜井系统。共形成 PD1083、PD1053、PD1023、PD997、PD976、PD946、PD918、PD890、PD860、PD850 中段。PD1083 中段为系统回风中段。各中段废石通过各中段运输平巷运至坑外或充填空区,各中段矿石通过溜井下放到 PD850 中段由电机车运至地表原矿仓。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。在回采过程中,中段之间支撑采用顶、底柱,矿柱宽 4~6 m×走向长度),矿块之间采用间柱(宽 4~8 m×倾向长度),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,PD890、PD946、PD976、PD997、PD1023、PD1053、PD1083 硐口等均已封闭。

第二生产阶段:2016~2021年,开拓系统为平硐+盲竖井系统,利用 PD860 内的盲竖井,盲竖井内设 +493 m、+563 m、+633 m、+668 m、+703 m、+738 m、共 6 个中段。此阶段 +668 m 标高以上 IX 号矿体已基本结束。PD850m、PD860m、PD918m 中段部分巷道继续作为系统的运输、回风巷道利用,将不利用部分进行封堵,并继续利用 PD918 作为系统(七采区)回风平硐口。各生产中段的矿、废石通过盲竖井提升至 PD860m 中段,然后,矿石通过溜井下放至 PD850m 中段,运往地表原矿仓;废石由电机车直接运往 PD860-2 平硐的废石堆场。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:2022年~至今,对 +633 m 标高以上 IX 号矿体和 X IX 号矿体进行回采,目前 +633 m 标高以上 IX 号矿体已回收结束, X IX 号矿体已接近结束。通风、提升、运输等系统不变。

### 2.2 矿山现状及生产方式

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,故而可认为矿体围岩结构、应力已达到新的平衡。本文依据该矿《2023 年初步设计》“+633 m 以下的 IX、X IX 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。”

矿区内的主要建、构筑物为村庄民宅,沿沟谷一侧分布,现有民房 24 间,建筑面积 1 460 m<sup>2</sup>,实际居住人数 30 人。

## 3 构建模型

### 3.1 模型尺寸参数

建立长(WE 方向)1 000 m、宽(NS 方向)850 m、纵深为 +1 064.9~+200 m 模型,共计单元(zone)2 173 880 个,节点数(gridpoints)391 156 个,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

参考金矿地形地质及工程布置图,将 CAD 地形文件(等高线数据)导入到 GIS 和 Rhino 中完成地表建模;参考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,建立巷道模型、盲竖井模型和不规则矿体模型;参考金矿区 F<sub>985</sub> 矿脉第 0#~17# 勘探线剖面图和区域地层接触资料划分地层结构;模型概化完成后将实体模型导入 FLAC3D,综合分析地表沉降扰动规律<sup>[6-7]</sup>,具体如图 1、图 2 所示。

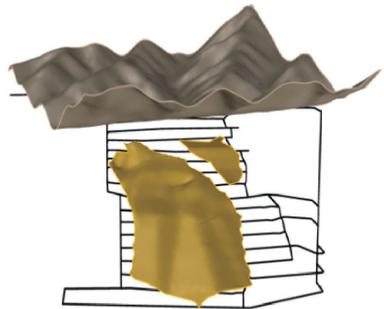


图 1 三维实体模型

### 3.3 建模方法的优点

(1)还原性强,充分利用矿区地形实测数据、建

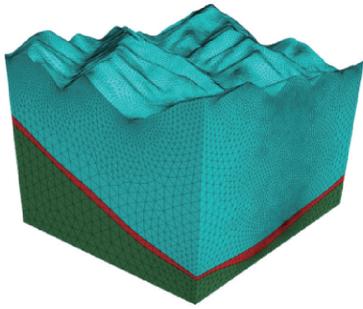


图2 三维数值模型

(构)筑物地理信息资料、地下采矿工程设计及现状资料,1:1还原三者之间的空间位置关系、规模及地层接触关系,保障了后期数值论证结果的可靠性和准确性。

(2)可操作性强,Rhino + griddle 建模不仅弥补了FLAC3D建模的短板,而且结合GIS实现复杂地形建模,强大的建模优势保证了地下工程设计三维化的精度。

### 3.4 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<sup>[8]</sup>。

(2)边界条件:通过命令代码控制节点(Gridpoint)速度的方式固定边界。

(3)参数赋值:参数来源于“该金矿资源的禀赋特征与工程岩石力学调查研究报告”力学试验成果,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<sup>[9-10]</sup>,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,单位GPa; $G$ 为剪切模量,单位GPa; $E$ 为弹性模量,单位GPa; $\mu$ 为泊松比。

表1 岩石力学参数表

岩层	密度/ kg·m <sup>-3</sup>	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
围岩上盘	2 895	16.20	10.67	4.53	35.25	45.00	0.23
围岩下盘	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:充填体为灰砂比1:8的全尾砂,试验结果为28 d龄期。

### 3.5 模型合理性及可靠性分析

#### 1) 合理性分析

金矿在未受地下采矿扰动(构)筑物的情况下,还原地层应力场,分析垂直方向的应力分布。

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),具体如图3所示;最大应力为 $2.2786 \times 10^7$  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。

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

根据公式计算得:

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

$$\sigma = \rho gh = 2817.31 \text{ kg/m}^3 \times 9.80 \text{ N/m}^3 \times 707.12 \text{ m} =$$

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

计算结果介于 $1.80 \times 10^7 \text{ Pa}$ 与 $2.00 \times 10^7 \text{ Pa}$ 之

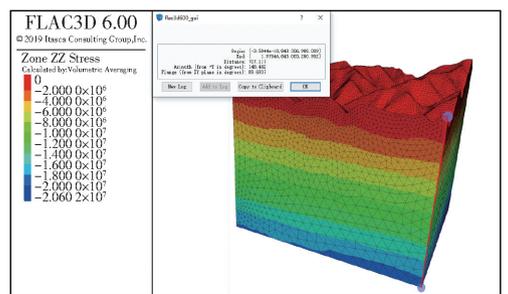


图3 初始应力分布图

间,验证了模型的合理性。

#### 2) 可靠性分析

为验证模型的可靠性,根据矿区地测部门提供的地表位移监测数据,对相应时期的开采中段进行开挖模拟,对比历史监测数据可知:竖直位移量最大相对残差为6.24%,水平位移量最大相对残差为5.31%,相对残差越小,表示预测值越接近实测值,本模型预测的综合相对残差值小于10%,模型的预测结果可靠。

表2 模拟数据与历史数据对比表

组数	竖直位移量/m		相对残差/%	水平位移量/m		相对残差/%
	实测值	预测值		实测值	预测值	
1	0.072 4	0.075 4	4.14	0.019 3	0.02	3.63
2	0.083 3	0.079 2	-4.92	0.018 1	0.017 5	-3.31
3	0.074 5	0.072 4	-2.82	0.032 2	0.031 4	-2.48
4	0.089 3	0.085 3	-4.48	0.022 6	0.021 4	-5.31
5	0.099 6	0.103 6	4.02	0.026 3	0.027 0	2.66
6	0.079 8	0.081 7	2.38	0.019 4	0.018 8	-3.09
7	0.121 3	0.124 3	2.47	0.027 7	0.027 4	-1.08
8	0.089 8	0.092 4	2.90	0.025 5	0.024 8	-2.75
9	0.126 6	0.134 5	6.24	0.026 5	0.027 1	2.26

## 4 开挖—沉降响应数值模拟

### 4.1 模拟内容及方案

本次数值模拟主要模拟 +598 m 中段、+563 m 中段、+528 m 中段、+493 m 中段、+458 m 中段、+423 m 中段、+388 m 中段、+353 m 中段、+318 m 中段、+283 m 中段、+248 m 中段、+213 m 中段矿体开挖,对地表建、构筑物的沉降影响。

本次数值模拟分两种方案进行:方案一:不充填情况下,地表的位移情况以及民房建筑物区域的沉降变形情况;方案二:充填法开采情况下,地表的位移情况以及民房建筑物区域的沉降变形情况。

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。

### 4.2 建筑物位移监测线布设

参考《建筑变形测量规范》中位移监测点的布设要求“10~15 m 布设一个监测点”,监测点布设方式为:沿矿体走向方向在民房建筑物区域布设 1 条位移监测线,共计布设 16 个监测点,监测点间隔为 10 m,对应到模型的监测点位置 id 分别为  $id_1$ : 31 946、 $id_2$ : 31 994、 $id_3$ : 31 987、 $id_4$ : 31 957、 $id_5$ : 31 755、 $id_6$ : 31 823、 $id_7$ : 31 712、 $id_8$ : 31 704、 $id_9$ : 31 442、 $id_{10}$ : 31 635、 $id_{11}$ : 32 114、 $id_{12}$ : 32 151、 $id_{13}$ : 31 797、 $id_{14}$ : 31 504、 $id_{15}$ : 31 646、 $id_{16}$ : 31 645,具体如图 4 所示。

### 4.3 地表及建、筑物区域位移变化分析

#### 4.3.1 方案一

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 绘制开采完毕后的竖直位移量等值线图以及水平位移量等值

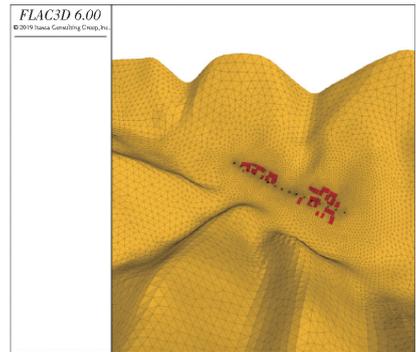


图4 FLAC3D 监测点 id 分布图

线图。

#### 1) 地表位移分布

不充填情况下,采区最大沉降量为 -22 cm 左右(图 5,图中单位:cm,下同),分布在采区顶板(上盘)中心位置,民房建筑物区域沉降量大致为 -11 cm 左右;由地表沉降量等值线图(图 6)可知,地表沉降量大致分布在 -0.80 ~ -12.80 cm;地表水平位移量(X)等值线图(图 7)可知,X 方向水平位移产生两个波峰,左侧波峰最大位移量为 3.60 cm 左右,右侧波峰最大位移量为 -6.40 cm 左右,其中正负表示方向,正表示与 X 轴正方向一致,负表示与 X 轴正方向相反(下同);Y 方向水平位移也产生了两个波峰(图 8),上侧波峰最大位移量为 -1.20 cm 左右,下侧波峰最大位移量为 2.40 cm 左右。

综上,不充填情况下,+633 m 以下矿体开采结束后,地表沉降量大致分布在 -0.80 ~ -12.80 cm,地表 X 方向产生的水平位移量大致分布在 -6.40 ~ 3.60 cm,地表 Y 方向产生的水平位移量大

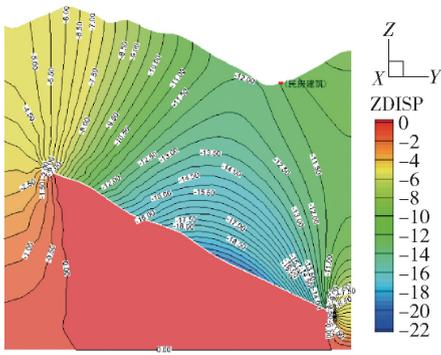


图5 不充填情况采区最大沉降量分布图

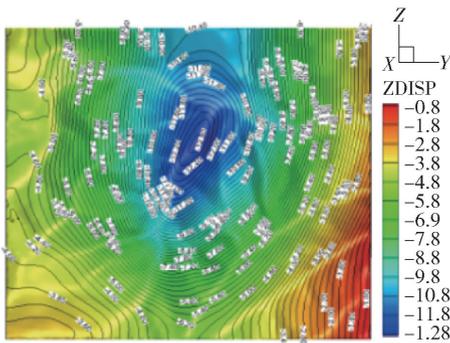


图6 地表沉降量(Z)等值线图

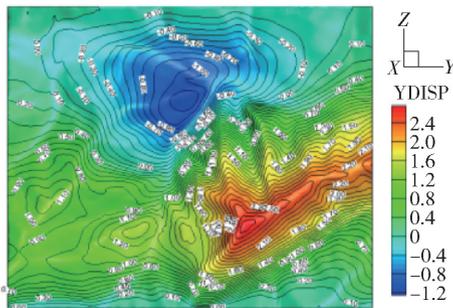


图7 地表水平位移量(X)等值线图

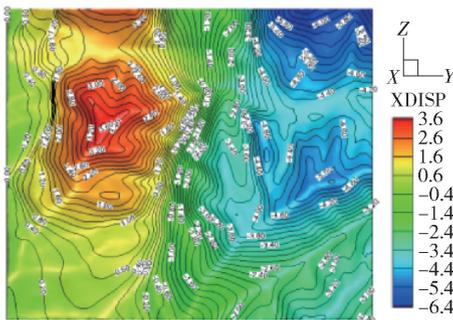


图8 地表水平位移量(Y)等值线图

致分布在  $-1.20 \sim 2.40$  cm。

## 2) 建、构筑物区域位移分布

矿体中段向下开拓过程中地表监测点的沉降量逐渐增大(图9),沉降量随监测点位置的变化呈现

“3号监测点区域的地表沉降量最大,最大沉降量为  $-11.60$  cm左右,1号、2号、4号和5号监测点最大沉降量为  $-11.50$  cm左右,6~16号监测点区域的沉降量逐渐减小”,即西边的民房建筑沉降响应显著,东边的民房建筑沉降响应较差;矿体中段向下开拓过程中地表监测点X方向的水平位移量逐渐增大,具体如图10、图11所示。位移量随监测点位置的变化呈现“16号监测点区域的水平位移量最大,最大位移量为  $-4.08$  cm左右,1~15号监测点区域的水平位移量逐渐增大”;Y方向的最大水平位移量为  $-1.39$  cm左右。

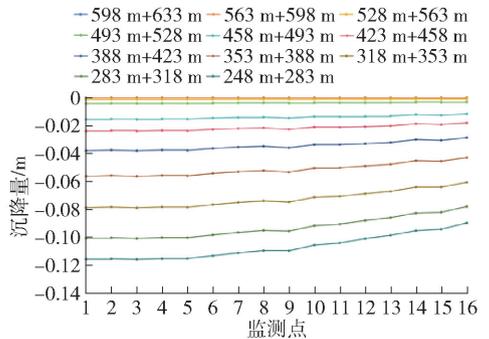


图9 监测点沉降量变化图

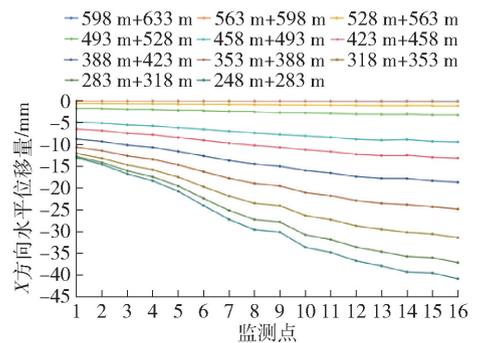


图10 监测点X方向水平位移量变化图

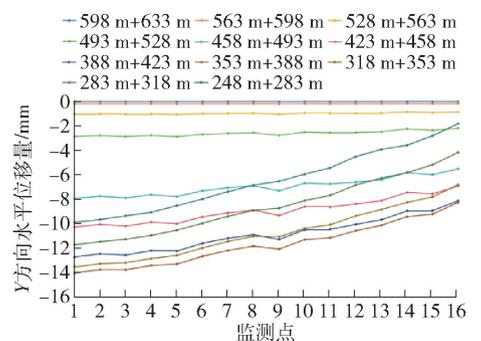


图11 监测点Y方向水平位移量变化图

综上,不充填情况下,民房建筑物区域的最大沉降量为  $-11.60$  cm,最大水平位移量  $-4.08$  cm。

### 4.3.2 方案二

考虑到充填技术的局限性,本次模拟分两种工况进行模拟,工况一:空顶 1 m;工况二:空顶 0.5 m。

#### 1) 地表位移情况

①工况一:空顶 1 m 情况,采区最大沉降量为 -18.07 cm 左右(图 12),由地表沉降量等值线图可知(图 13),地表沉降量大致分布在 -0.40 ~ -5.20 cm;地表水平位移(X)等值线图可知(图 14),X 方向水平位移产生两个波峰,左侧波峰最大位移量为 1.70 cm 左右,右侧波峰最大位移量为 -2.30 cm 左右;Y 方向水平位移也产生了两个波峰(图 15),上侧波峰最大位移量为 -0.60 cm 左右,下侧波峰最大位移量为 1.20 cm 左右。

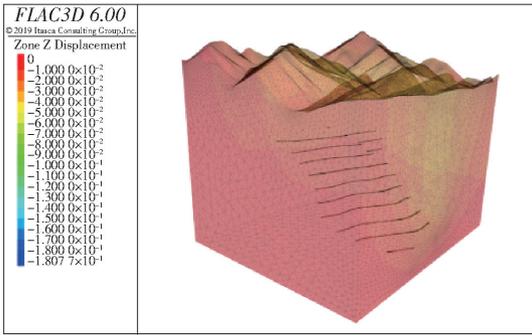


图 12 采区最大位移及空顶图(空顶 1 m)

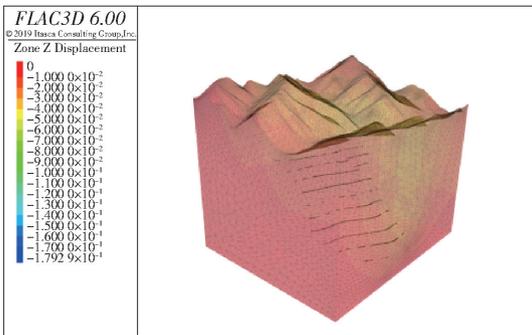


图 13 采区最大位移及空顶图(空顶 0.5 m)

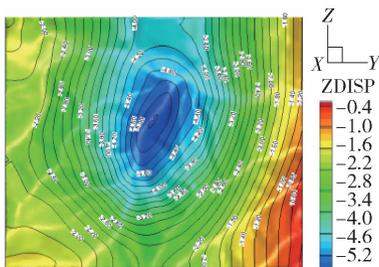


图 14 沉降量(Z)等值线图(空顶 1 m)

②工况二:空顶 0.5 m 情况,采区最大沉降量为

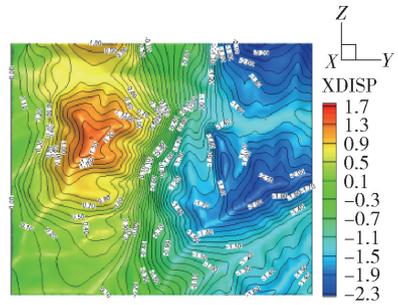


图 15 水平位移量(X)等值线图(空顶 1 m)

-17.93 cm 左右(图 13)地表沉降量大致分布在 -0.38 ~ -5.18 cm;地表水平位移(X)等值线图可知,X 方向水平位移产生两个波峰,左侧波峰最大位移量为 1.40 cm 左右,右侧波峰最大位移量为 -2.20 cm 左右;Y 方向水平位移也产生了两个波峰,上侧波峰最大位移量为 -0.50 cm 左右,下侧波峰最大位移量为 1.15 cm 左右,具体如图 16 至图 18 所示。

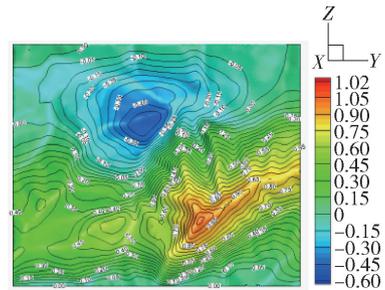


图 16 水平位移量(Y)等值线图(空顶 1 m)

表 3 方案二两种充填工况地表沉降位移分布表

(单位:cm)

方案	沉降量分布		水平位移分布	
	Z 方向	X 方向	X 方向	Y 方向
空顶 0.5 m	-0.38 ~ -5.18	-2.20 ~ 1.40	-0.50 ~ 1.15	
空顶 1.0 m	-0.40 ~ -5.20	-2.30 ~ 1.70	-0.60 ~ 1.20	

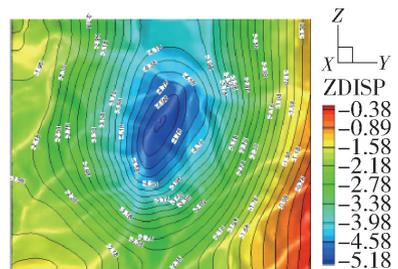


图 17 沉降量(Z)等值线图(空顶 0.5 m)

2) 建(构)筑物区域位移分布情况

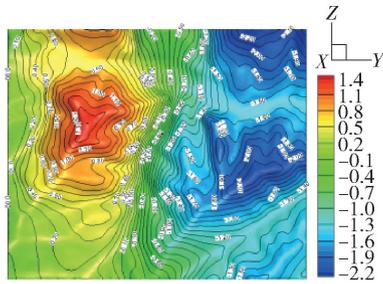


图 18 水平位移量(X)等值线图(空顶 0.5 m)

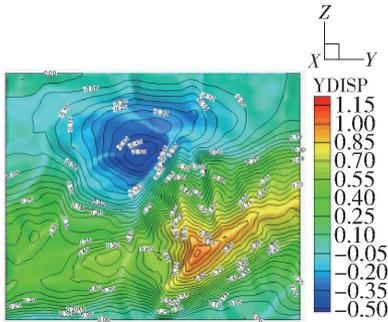


图 19 地表水平位移量(Y)等值线图(空顶 0.5 m)

①工况一:空顶 1 m 情况,矿体中段向下开拓过程中地表监测点的沉降量逐渐增大(图 19),沉降量随监测点位置的变化呈现“1 号和 3 号监测点区域的地表沉降量最大,最大沉降量为 -4.55 cm,2、4~16 号监测点区域的沉降量逐渐减小”,即西边的民房建筑沉降响应显著,东边的民房建筑沉降响应较差;矿体中段向下开拓过程中地表监测点 X 方向的水平位移量逐渐增大,位移量随监测点位置的变化呈现“16 号监测点区域的水平位移量最大,最大水平位移量为 -1.50 cm,1~15 号监测点区域的水平位移量逐渐增大”;Y 方向的最大水平位移量为 -0.60 cm,具体如图 20、图 21 所示。

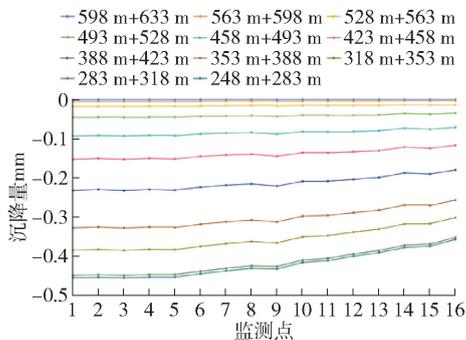


图 20 监测点沉降量变化图(空顶 1 m)

②工况二:空顶 0.5 m 情况,最大沉降量为 -4.54 cm,与空顶 1.0 m 产生的扰动影响相差不

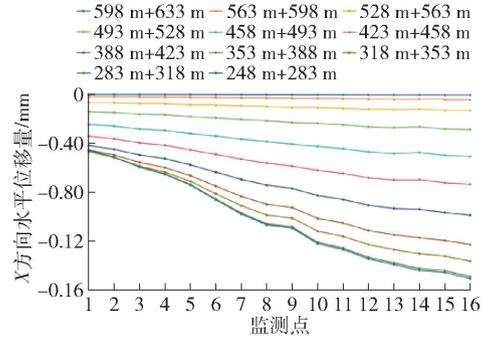


图 21 监测点 X 方向水平位移图(空顶 1 m)

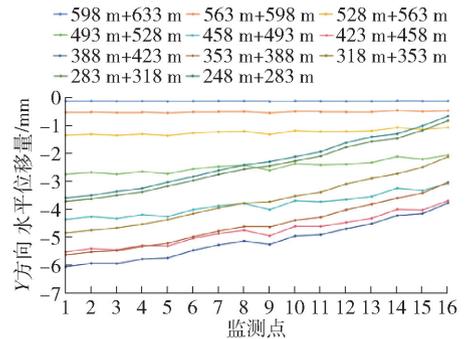


图 22 监测点 Y 方向水平位移图(空顶 1 m)

大,这表明:岩层刚性且结构稳定的情况下,地下较小的空区变化对地表的扰动影响很小,详如图 22 至图 24 所示。

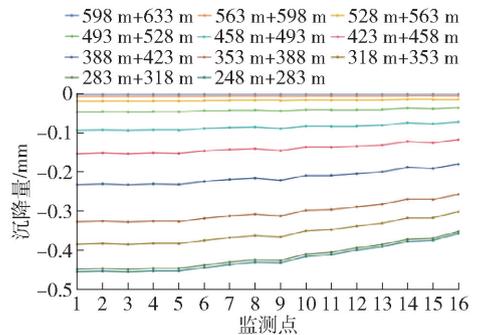


图 23 监测点沉降量变化图(空顶 0.5 m)

③空顶距离越小,由内、外地质作用引起的扰动影响越小,矿区采场的采场稳定性越好,地表建筑物的安全性越好。

## 5 安全影响分析

### 5.1 安全判定标准

依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(下文简称“《规范》”)要求,详见表 4,村庄民房属于矿区 III 级保护建筑物。

《规范》要求的 III 级建筑物地表允许移动变形

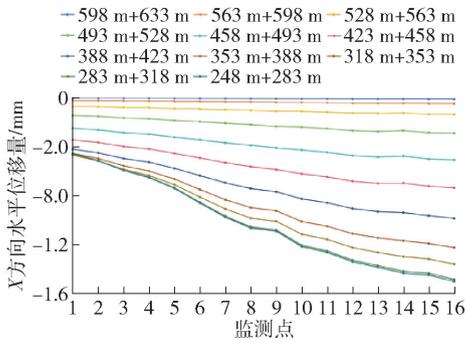


图 24 监测点 X 方向水平位移图(空顶 0.5 m)

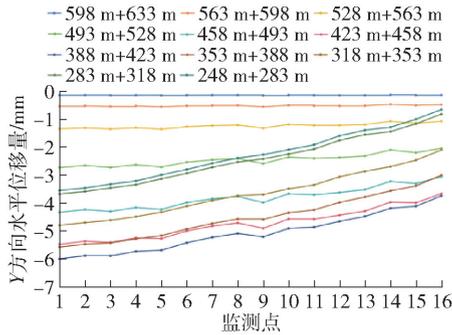


图 25 监测点 Y 方向水平位移图(空顶 0.5 m)

的临界值: 倾斜值( $i$ ) =  $\pm 10$  mm/m, 曲率( $K$ ) =

$\pm 0.6$  mm/m<sup>2</sup>, 水平变形值( $\varepsilon$ ) =  $\pm 6.0$  mm/m。

表 4 矿区建筑物保护等级表

保护等级	主要建筑物
特	国家珍贵文物建筑物、高度超过 100 m 的超高层建筑、核电站等特别重要的工业建筑物等
I	国家一般文物建筑物、在同一跨度内有两台重型桥式吊车的大型厂房及高层建筑 办公楼、医院、剧院、学校、长度大于 20 m 的二层楼房和二层以上多层住宅楼,钢筋混凝土框架结构的工业厂房、设有桥式吊车的工业厂房、总机修厂等较重要的大型工业建筑物,城镇建筑群或者居民区等
II	砖木、砖混结构平房或者变形缝区段小于 20 mm 的两层楼房,村庄民房等
III	村庄木结构承重房屋等

注:凡未列入表 1 的建筑物,可以依据其重要性,用途等类比其等级归属。对于不易确定者,可以组织专门论证审定。

### 5.2 移动变形情况

依据数值模拟结果,利用公式(3)、(4)、(5)计算方案一、方案二中建筑物区域的地表倾斜值、地表曲率以及地表变形值<sup>[11-14]</sup>,计算结果详见表 5。

表 5 方案一、二地表移动变形值结果统计表

倾斜值/mm·m <sup>-1</sup>			曲率/mm·m <sup>-2</sup>			水平变形值/mm·m <sup>-1</sup>		
方案一	方案二		方案一	方案二		方案一	方案二	
不充填	空顶 1 m	空顶 0.5 m	不充填	空顶 1 m	空顶 0.5 m	不充填	空顶 1 m	空顶 0.5 m
$2.67 \times 10^{-2}$	$1.33 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-2}$	$-6.63 \times 10^{-3}$	$-2.98 \times 10^{-3}$	$-2.97 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-1}$	$4.04 \times 10^{-2}$	$4.04 \times 10^{-2}$
$-3.96 \times 10^{-2}$	$-1.65 \times 10^{-2}$	$-1.64 \times 10^{-2}$	$8.93 \times 10^{-3}$	$3.80 \times 10^{-3}$	$3.78 \times 10^{-3}$	$1.69 \times 10^{-1}$	$6.08 \times 10^{-2}$	$6.07 \times 10^{-2}$
$4.97 \times 10^{-2}$	$2.14 \times 10^{-2}$	$2.13 \times 10^{-2}$	$-3.93 \times 10^{-3}$	$-1.96 \times 10^{-3}$	$-1.94 \times 10^{-3}$	$1.30 \times 10^{-1}$	$4.61 \times 10^{-2}$	$4.61 \times 10^{-2}$
$1.04 \times 10^{-2}$	$1.88 \times 10^{-3}$	$1.91 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-2}$	$7.85 \times 10^{-3}$	$7.82 \times 10^{-3}$	$1.95 \times 10^{-1}$	$7.12 \times 10^{-2}$	$7.10 \times 10^{-2}$
$1.98 \times 10^{-1}$	$8.04 \times 10^{-2}$	$8.01 \times 10^{-2}$	$1.82 \times 10^{-4}$	$-3.46 \times 10^{-4}$	$-3.38 \times 10^{-4}$	$2.91 \times 10^{-1}$	$1.06 \times 10^{-1}$	$1.05 \times 10^{-1}$
$2.00 \times 10^{-1}$	$7.69 \times 10^{-2}$	$7.68 \times 10^{-2}$	$-3.29 \times 10^{-3}$	$-1.43 \times 10^{-3}$	$-1.42 \times 10^{-3}$	$2.84 \times 10^{-1}$	$1.04 \times 10^{-1}$	$1.04 \times 10^{-1}$
$1.67 \times 10^{-1}$	$6.27 \times 10^{-2}$	$6.25 \times 10^{-2}$	$-1.82 \times 10^{-2}$	$-7.63 \times 10^{-3}$	$-7.60 \times 10^{-3}$	$2.19 \times 10^{-1}$	$8.16 \times 10^{-2}$	$8.15 \times 10^{-2}$
$-1.50 \times 10^{-2}$	$-1.37 \times 10^{-2}$	$-1.35 \times 10^{-2}$	$4.22 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-2}$	$1.72 \times 10^{-2}$	$4.81 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^{-2}$	$2.20 \times 10^{-2}$
$4.07 \times 10^{-1}$	$1.59 \times 10^{-1}$	$1.59 \times 10^{-1}$	$-2.59 \times 10^{-2}$	$-1.08 \times 10^{-2}$	$-1.07 \times 10^{-2}$	$3.28 \times 10^{-1}$	$1.21 \times 10^{-1}$	$1.21 \times 10^{-1}$
$1.48 \times 10^{-1}$	$5.12 \times 10^{-2}$	$5.11 \times 10^{-2}$	$1.64 \times 10^{-2}$	$6.21 \times 10^{-3}$	$6.20 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-1}$	$4.33 \times 10^{-2}$	$4.32 \times 10^{-2}$
$3.12 \times 10^{-1}$	$1.13 \times 10^{-1}$	$1.13 \times 10^{-1}$	$-7.65 \times 10^{-3}$	$-2.52 \times 10^{-3}$	$-2.52 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-1}$	$7.15 \times 10^{-2}$	$7.13 \times 10^{-2}$
$2.36 \times 10^{-1}$	$8.82 \times 10^{-2}$	$8.79 \times 10^{-2}$	$9.39 \times 10^{-3}$	$4.38 \times 10^{-3}$	$4.36 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-1}$	$4.37 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$
$3.29 \times 10^{-1}$	$1.32 \times 10^{-1}$	$1.32 \times 10^{-1}$	$-2.22 \times 10^{-2}$	$-1.01 \times 10^{-2}$	$-1.00 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-1}$	$4.58 \times 10^{-2}$	$4.57 \times 10^{-2}$
$1.07 \times 10^{-1}$	$3.13 \times 10^{-2}$	$3.14 \times 10^{-2}$	$3.45 \times 10^{-2}$	$1.41 \times 10^{-2}$	$1.40 \times 10^{-2}$	$1.61 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-2}$
$4.52 \times 10^{-1}$	$1.72 \times 10^{-1}$	$1.72 \times 10^{-1}$	—	—	—	$1.24 \times 10^{-1}$	$4.88 \times 10^{-2}$	$4.88 \times 10^{-2}$

III级建筑物地表允许移动变形的临界值

$\pm 10$

$\pm 0.6$

$\pm 6.0$

根据计算结果可知:方案一、方案二地表移动变形值均小于《规范》要求的 III 级建筑物地表允许移动变形的临界值。

$$i_{AB} = \frac{W_B - W_A}{l_{AB}^0} = \frac{w_{BA}}{l_{AB}^0} \quad (3)$$

$$K_B = \frac{i_{BC} - i_{AB}}{0.5(BC + AB)} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu_A - \mu_B}{AB} = \frac{\Delta\mu}{i_{AB}^0} \quad (5)$$

式中,  $i_{AB}$  为地表下沉沿某一方向的坡度值, 其平均值以两点间的沉降值  $w_{BA}$  除以两点间的水平距离  $l_{AB}^0$ ;  $K_B$  为地剖面线的弯曲度, 其平均值以相邻两线段倾斜差除以两线段地表水平长度的平均值, 上凸为正, 下凹为负;  $\varepsilon$  为一线段的水平移动差与此线段长度之比。

### 5.3 方案分析

(1) 方案一中的不充填开采导致地表产生的位移量较大, 方案二中的两种充填开采方式均有效降低了沉降量和水平位移量, 具体如图 25 至图 27 所示。

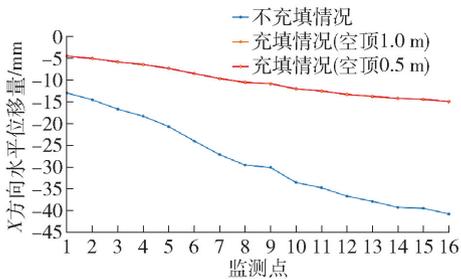


图 26 X 方向水平位移量对比图

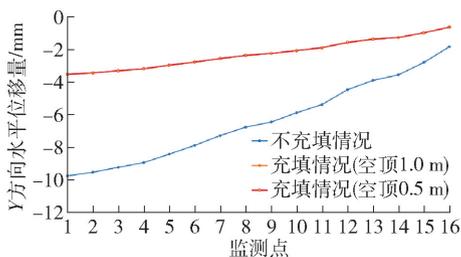


图 27 Y 方向水平位移量对比图

(2) 方案一中的不充填开采导致地表产生的变形量较大, 方案二中的两种充填开采方式均有效减小了地表的变形情况, 体现在地表倾斜值、地表曲率以及地表水平变形值均减小, 具体如图 28 至图 30 所示。

(3) 方案二中的空顶 1 m 和空顶 0.5 m 产生的

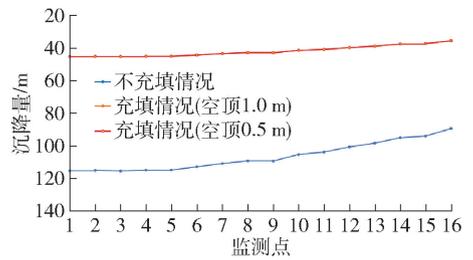


图 28 沉降量对比图

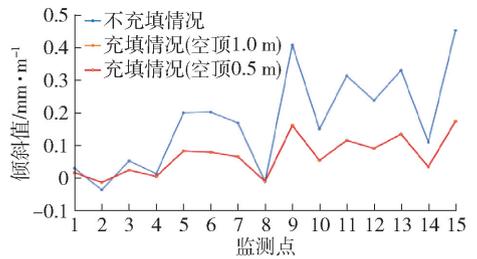


图 29 倾斜值对比图

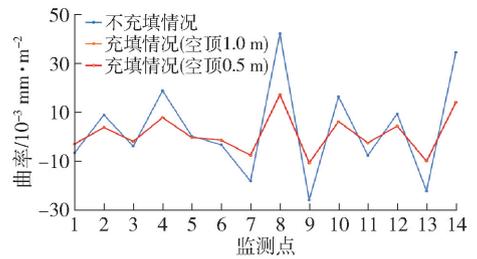


图 30 曲率对比图

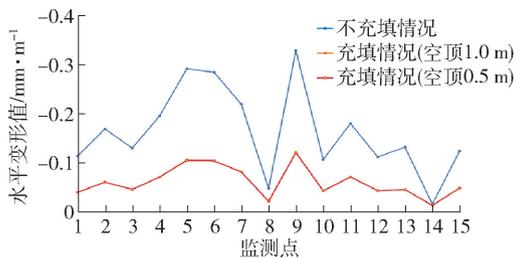


图 31 水平变形值对比图

移动变形值很接近, 相对差值很小, 空顶 1 m 和空顶 0.5 m 的变化曲线出现“似重合”现象。

(4) 从总体来看, 两种方案的地表移动变形均相对较小, 且移动变形值均小于 III 级建筑物的临界变形值, 经分析, 其主要原因如下:

① 围岩体主要为安山岩石, 岩石刚性较好, 根据“该金矿资源的禀赋特征与工程岩石力学调查研究报告”成果可知:“顶板岩体基本质量等级为 II ~ III 级, 岩体稳定性评价为较稳定, 底板岩体基本质量等级为 I ~ II 级, 岩体稳定性评价为稳定, 矿体岩体基本质量等级为 I 级, 岩体稳定性评价为稳定”。

②矿体开采厚度较小,埋深较大。

③全尾砂充填体在一定程度上改变了断层周边的应力状态,提高了围岩的整体稳定性。

考虑到除采矿扰动以外的其它内、外动力地质因素可能会提高采空区的活化性和覆岩的风化程度,诱发沉降加剧或地表岩石松动位移,威胁矿区居民安全,故而上向水平分层充填采矿对地表建(构)筑物的影响最小,更有利于矿区健康生产和居民安全生活。

## 6 结论

(1)方案一:不充填情况下,研究区内的民房建筑物出现较大的均匀沉降,沉降量大致分布在 $-8.96 \sim -11.60$  cm,水平位移量大致分布在 $-0.19 \sim -4.08$  cm;地表倾斜值大致分布在 $-3.96 \times 10^{-2} \sim 4.52 \times 10^{-1}$  mm/m、地表曲率大致分布在 $-2.59 \times 10^{-2} \sim 4.22 \times 10^{-2}$  mm/m<sup>2</sup>、地表水平变形值大致分布在 $1.61 \times 10^{-2} \sim 3.28 \times 10^{-1}$  mm/m。

(2)方案二:充填情况下,研究区内的建(构)筑物沉降量大致分布在 $-3.57 \sim -4.55$  cm,水平位移量大致分布在 $-0.07$  cm $\sim -1.50$  cm;地表倾斜值大致分布在 $-1.65 \times 10^{-2} \sim 1.72 \times 10^{-1}$  mm/m、地表曲率大致分布在 $-1.08 \times 10^{-2} \sim 1.73 \times 10^{-2}$  mm/m<sup>2</sup>、地表水平变形值大致分布在 $1.37 \times 10^{-2} \sim 1.21 \times 10^{-1}$  mm/m。

(3)根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中建、构筑物位移变形的允许值可知:方案一、方案二产生的地表沉降变形值均小于建、构筑物Ⅲ级保护等级的允许变形值。

(4)对比方案一、方案二的地表位移变形值可知,向上水平充填开采极大程度的降低了地表的位移变形值,更有利于地表建、构筑物的安全。

### [参考文献]

[1] 孙世国,赵雪芳,王群,等.急倾斜矿体不同开采时序

对上覆岩体变形的影响[J].煤矿安全,2015,46(2):190-192.

[2] 黄平路,陈从新,肖国峰,等.复杂地质条件下矿地下开采地表变形规律的研究[J].岩土力学,2009,30(10):3020-3024.

[3] 杨宝贵,彭杨皓,李杨,等.充填开采地表移动变形规律数值模拟分析[J].金属矿山,2014(12):169-174.

[4] 范孝富.用沙坝矿多中段开采矿区稳定性研究[J].中国化工贸易,2017,9(26):235.

[5] 魏诚,冀炳信,时跃宁.最新监管政策对金矿地下开采的影响及对策分析[J].黄金,2022,43(8):1-4.

[6] 周科平,杜相会.基于3DMINE-MidAS-FLAC3D耦合的残回采稳定性研究[J].中国安全科学学报,2011,21(5):17-22.

[7] 赵付万,徐世光,黄建国,等.数值模拟在采空区对地表稳定性影响分析中的应用[J].矿产与地质,2017,31(4):820-825.

[8] 李江,张润达,朱晨迪.两步骤上向水平分层充填法采场宽度优化研究[J].矿业研究与开发,2021,41(4):11-17.

[9] 杨海彬,李文超,秦秀合,等.某金矿深部采场结构参数与回采顺序优化研究[J].矿业研究与开发,2020,40(12):18-22.

[10] 解联库,杨小聪,刘庆林,等.基于霍克-布朗破坏准则的采场空区稳定性分析[J].有色金属,2008(3):109-111.

[11] 李林,王智能,杨磊,等.浅部地下矿山开采引发地表露天矿山变形规律研究[J].采矿技术,2024,24(5):63-68.

[12] 马荣,秦云虎,张雷,等.老采空区地表残余变形分析与地基稳定性评价——以徐州市庞庄煤矿为例[J].中国煤炭地质,2024,36(8):57-61.

[13] 刘辉,陈斯涤,朱晓峻,等.基于D-InSAR技术的煤矿工业广场动态沉降特征研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(5):99-112.

[14] 胡振琪,袁冬竹.黄河下游平原煤矿区采煤塌陷地治理的若干基本问题研究[J].煤炭学报,2021,46(5):1392-1403.