

# 基于现场监测与数值模拟结合的采动 诱发围岩失稳与地表沉降研究

王雨萌, 关凯, 朱万成, 刘洪磊  
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 基于3Dmine与无人机倾斜摄影技术建立集成真实地表地貌、矿体及巷道的三维地质模型,结合Rhino6-FLAC<sup>3D</sup>建立矿体回采数值计算模型,对浅部岩层移动和地表变形的影响进行模拟分析,结合InSAR地表变形监测数据对模拟结果的有效性进行对比验证。结果表明:模拟结果与InSAR地表变形监测数据具有较好的一致性,表明基于多手段的数值建模计算与现场监测数据相结合的分析方法的有效性;对空场采矿法残留的采空区采用废石充填能够在有效控制空区围岩塑性区发展基础上维持充填体稳定性;矿区深部矿体的回采与充填可能对浅部已充填采场围岩的稳定性产生一定影响,浅部已充填采场受扰动严重程度与深部作业区域距离呈负相关;由InSAR监测数据和数值模拟结果可知,深部矿体回采扰动和浅部空区二次破坏对地表沉降影响较小。

**关键词:** 地表变形;采空区;数值模拟;充填体;InSAR监测

**中图分类号:** TD 853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2024)02-0234-10

## Mining-Induced Surrounding Rock Instability and Surface Subsidence Based on Combination of In-situ Monitoring and Numerical Modelling

WANG Yu-meng, GUAN Kai, ZHU Wan-cheng, LIU Hong-lei

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GUAN Kai, E-mail: guankai@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A three-dimensional geological model integrating real ground topography, ore bodies, and tunnels was established by 3Dmine and UAV. Combined with Rhino6-FLAC<sup>3D</sup>, a numerical calculation model for ore body extraction was developed. The impact of rock movement and surface deformation was simulated and analyzed. The effectiveness of simulation results was verified through InSAR monitoring. The results indicate that the simulation results are consistent with InSAR monitoring, indicating that the research method combining monitoring and simulation is effective. For the goaf left by open-pit mining, dry filling can limit the damage of surrounding rock and filling body. The stability of shallow filled mining areas might be affected by deep operations in the mining area, and there is a negative correlation between the severity of disturbance and the distance from deep work areas. According to InSAR monitoring and numerical simulation, the impact of goaf destruction and mining disturbance on the surface subsidence is weak.

**Key words:** surface deformation; goaf; numerical simulation; filling body; InSAR monitoring

我国金属地下矿山采空区总量大,分布范围广。据初步统计,到2016年底,全国金属、非金属地下矿山共有采空区12.8亿m<sup>3</sup>,预计到2030年,我国废弃矿井将达到15000处<sup>[1]</sup>。为了减少采空

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1906208, 52004053)。

作者简介: 王雨萌(1998-),男,辽宁大连人,东北大学硕士研究生;朱万成(1974-),男,新疆呼图壁人,东北大学教授,博士生导师。

区产生的地表沉降、冒顶、塌方等严重矿山灾害<sup>[2]</sup>,国内外学者采用现场监测、数值模拟等对采空区稳定性开展了大量分析,并取得了较好的应用成果<sup>[3-4]</sup>。星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)因其高精度、高分辨率、全天候等优点已迅速成为常用的大地变形监测技术之一,通过计算两次过境时SAR卫星影像的相位差来获取数字高程模型<sup>[5-6]</sup>。InSAR地表变形监测侧重于对地表沉陷数据的获取,可用于分析判断地表沉陷对地表建(构)筑物安全的影响<sup>[7-9]</sup>。在模拟方法上,Xu等<sup>[10]</sup>在InSAR与GNSS监测的基础上利用FLAC<sup>3D</sup>对某采空区顶板进行应力及变形计算,探究采空区稳定性。Liu等<sup>[11]</sup>使用InSAR地表变形监测与数值模拟,分析了三山岛金矿新立矿区的岩体移动特征,探究地表沉陷现象背后的物理机制。可知,InSAR地表变形监测与FLAC<sup>3D</sup>数值模拟方法相结合,可以对采空区稳定性及地表沉陷情况有较为准确的判断。在稳定性影响分析方面,应力应变、塑性区分布与地表变形是判定采空区稳定程度的常见标准,其研究对象主要针对首次回采的矿体、回采产生的采空区及地表沉降。Guo等<sup>[12]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>实现了煤层开采过程中顶板冒落、矸石堆积、矸石压缩的数值模拟,确定顶底板岩层应力演化规律。Zhang等<sup>[13]</sup>采用理论计算与数值模拟相结合的方法,利用两种有限元分析软件进行数值模拟,判断采空区是否存在活化失稳风险。

在回采扰动范围及地表沉降方面,Guo等<sup>[14]</sup>利用GPS监测与FLAC<sup>3D</sup>对狮子山矿区崩落法深部连续开采地表移动变形规律进行了研究,证明矿区地表沉陷处于活跃发展阶段。Wei等<sup>[15]</sup>基于有限差分法和岩石力学理论,研究了深部崩落法开采地表沉陷规律,系统分析了不同开挖阶段岩层移动规律和应力分布特征。He等<sup>[16]</sup>利用数值模拟方法对采空区形态演化进行分析,建立采空区形态演化及地表沉降预测模型,并结合现场监测验证了预测的准确性。Guo等<sup>[17]</sup>采用数值模拟的方法,分析了老顶岩层移动和载荷分布的一般规律,并构建了一个预测模型来预测高密度固体充填开采引起的地表沉陷。罗跃等<sup>[18]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>分析了镇北铁矿地表沉陷原因与规律,确定了影响地表沉陷的因素主要为采空区群及断层。

对于地下金属矿山,由于其复杂多变的矿体形态、岩性以及易受地质构造(例如节理裂隙、

断层等)影响,难以采用诸如监测、理论、模拟等单一方法进行采动影响和地压控制分析。将现场监测与数值模拟相结合,进行地下金属矿山空区灾害致灾过程的分析,探寻其中蕴含的致灾条件,是实现空区及其关联灾害预测预警的重要手段。本文以内蒙古阿尔哈达铅锌矿为例,基于3Dmine, Rhino6等多建模软件建立反映实际工程地质条件的数值计算模型,基于FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件探究深部矿体回采充填对浅部岩层移动和地表沉降的潜在影响,结合InSAR地表变形监测技术验证数值模拟的准确性,并利用该模型预测浅部残矿回收对地表建筑物稳定性的影响。

## 1 矿区概况

阿尔哈达铅锌矿为浅成-超浅成侵入岩与碳酸岩接触交待形成的铅锌银多金属矽卡岩型矿床。区内主要工业矿体8条,矿体形态复杂多变,呈脉状、复杂脉状、多层网状及透镜状产出,矿带走向长度约2 100 m,平均厚度1~10 m,矿体平均倾角60°,矿带东、西部各存在一组大型断裂构造。

矿区地层划分较为简单,出露地层为上古生界泥盆系上统安格尔音乌拉组、中生界侏罗系上统查干诺尔组和布拉根哈达组、新生界第三系上新统及第四系全新统。区内大部分地区为第四系所覆盖。其中泥盆系上统安格尔音乌拉组占出露基岩总面积的80%以上,主要岩性为粉砂质板岩、砂板岩、泥硅质板岩、泥质板岩、凝灰岩。侏罗系上统查干诺尔组岩性为安山岩。侏罗系上统布拉根哈达组岩石类型主要为复成分砾岩、含砾流纹质凝灰岩、流纹岩等。第三系上新统岩性为砖红色泥岩。第四系全新统广泛分布于沟谷洼地中,主要为冲积、洪积形成的砂砾层,湖积淤泥及风积形成的砂质土、粉细砂。

阿尔哈达矿区标定地表高程为1 000 m,按高程由浅入深划分+928~+278 m共计16个回采中段。2014年以前未形成充填系统,采用空场法回采+928~+808 m中段(采空区结构参数为长50 m,段高40 m),导致采空区发生大面积冒落,地表产生明显塌陷坑。2014年以后,充填系统逐渐成型,对地表塌陷坑以及+928~+808 m中段冒顶空区采用废石充填,对于+768~+278 m中段采场采用尾砂胶结充填,空区得到及时处理,同时矿山计划对东部矿区进行残矿回收。随着深部采矿活动的

不断增加,虽然深部矿体回采对地表变形量影响较小,但在其浅部已充填的情况下,深部回采会对浅部空区造成扰动,可能使得浅部空区再次失稳导致地表建(构)筑物安全受到威胁.因此,深部回采扰动对浅部空区稳定性及地表建(构)筑物安全影响的探究十分必要.

阿尔哈达铅锌矿浅部、深部矿体存在明显的回采先后顺序(先浅后深),因此可以准确地研究不同回采阶段对地表及浅部围岩稳定性的影响.再者,空场采矿法与充填采矿法皆为国内矿山主要开采方式且均在阿尔哈达铅锌矿使用.空场采矿法回采导致的地表塌陷与浅部空区冒落是较为典型的矿山灾害,因此阿尔哈达铅锌矿具有一定代表性.研究深部矿体回采对浅部空区二次破坏及地表沉降的影响,对于相似矿山的研究与灾害预防具有一定指导意义.

## 2 数值模拟模型建立

为分析深部矿体回采扰动对浅部空区和地表变形的影响,需对深部矿体回采过程进行数值模拟.本研究基于无人机摄影-3Dmine-Rhino-FLAC<sup>3D</sup>等多手段建立阿尔哈达铅锌矿三维地质模型,并结合地质勘察资料再现实际矿体、围岩及断层的相对位置.图1所示为基于3Dmine矿业工程软件建立的矿体三维地质模型.

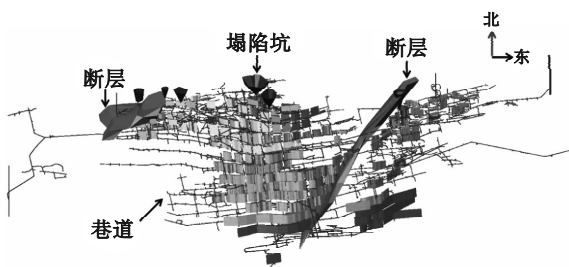


图1 基于3Dmine的矿体三维地质模型  
Fig. 1 3D geological model of ore body based on 3Dmine

为进行后续地表沉降与岩层移动的数值模拟,获取准确的地表变形计算结果,基于无人机摄影技术获取真实地表地貌,结合图1所示3Dmine模型,建立集成真实地形地貌、矿体及断层等的三维地质模型.利用Rhino软件对3Dmine模型进行适度简化重构并重新绘制规整模型和划分网格,导出网格模型至FLAC<sup>3D</sup>,最终建立的矿体回采数值计算模型如图2所示.

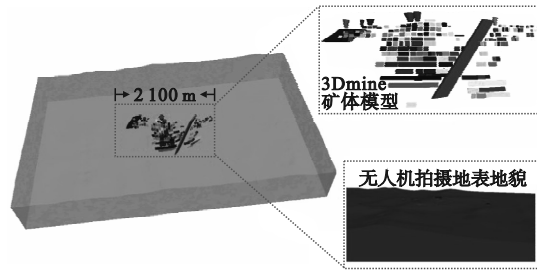


图2 基于无人机摄影-3Dmine-Rhino-FLAC<sup>3D</sup>多手段建立的数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model based on multi means of UAV-3Dmine-Rhino-FLAC<sup>3D</sup>

## 3 模拟方案及浅部矿体回采过程数值分析

阿尔哈达铅锌矿自2009年对+928~+808 m中段采用空场采矿法回采.浅部矿体回采结束后,深部矿体改为充填采矿法回采并对西部浅部空区(+928~+808 m中段)采用废石充填.东部浅部空区位于破碎带下盘,围岩较为稳定.

### 3.1 模拟方案、屈服准则及岩体力学参数

为了探究深部矿体回采工作对浅部空区稳定的影响,初始模型包括已被废石充填的地表塌陷坑和尚未开采的矿体.具体模拟方案(图3)如下:

- 1) 对+928~+808中段进行一次性回采;
- 2) 对西部浅部空区(+928~+808中段)采用废石充填;
- 3) 对深部矿体(+768~+278中段)以中段为单位进行一次性开采-充填作业;
- 4) 对东部浅部空区(+928~+808中段)采用尾砂胶结充填;
- 5) 对东部浅部空区(+928~+808中段)进行残矿回收.

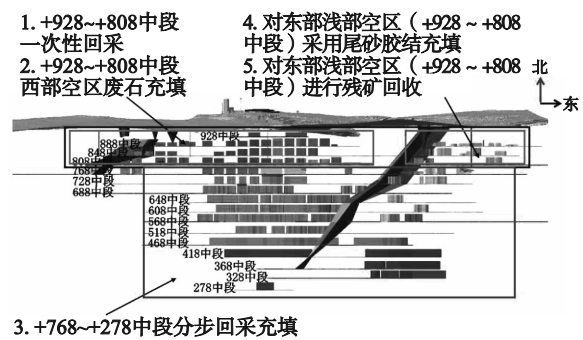


图3 模拟方案  
Fig. 3 Simulation scheme

建立的数值计算模型(图4)长5780 m,宽3516 m,矿体沿走向长2100 m,宽672 m.共划分

1 879 703 个网格,327 246 个节点.

阿尔哈达铅锌矿未进行地应力原位测试,由于采空区距地表较浅,地应力考虑自重应力为主.因此,本文模拟设置初始应力场为:模型顶端自由,四周及底部边界施加法向位移约束,施加自重载荷.

由于数值模拟研究涉及矿体破碎,具有明显的弹塑性变形特征,故计算采用 Mohr-Coulomb

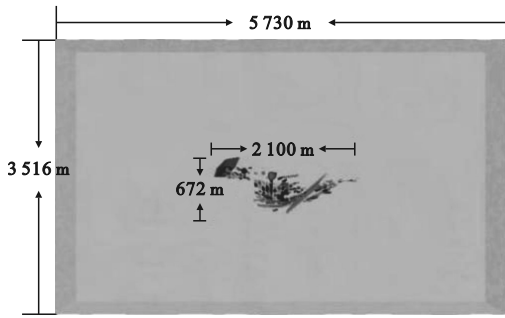


图 4 模型俯视图  
Fig. 4 Top view of model

屈服准则判断岩体的破坏<sup>[19-22]</sup>,具体表达式如下:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_3$  分别是最大和最小主应力; $C, \varphi$  分别是内聚力和内摩擦角.当 $f_s > 0$ 时,材料将发生剪切破坏.在通常应力状态下,岩体的抗拉强度很低.因此,可根据抗拉强度准则( $\sigma_3 > \sigma_1$ )判断岩体是否产生张拉破坏.值得注意的是,本文以拉应力为正,压应力为负.

结合点荷载实验、结构面调查以及阿尔哈达矿区地质勘探报告,得到 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟参数如表 1 所示.浅部围岩(+928 ~ +808 中段)由沙土、泥岩等不稳定物质组成,深部围岩(+768 ~ +278 中段)以泥质板岩为主.依据现场回采情况,对浅部空区(+928 ~ +808 中段)采用废石充填,对深部空区(+768 ~ +278 中段)采用尾砂胶结充填.破碎带参数结合阿尔哈达地质勘察报告及相关文献<sup>[23-24]</sup>选取.

表 1 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟参数  
Table 1 FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation parameters

名称	块体密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	变形模量×10 <sup>-4</sup> /MPa	抗拉强度/MPa	内聚力 C/MPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比
矿体	3.875	2.09	4.84	8.37	42.86	0.21
浅部围岩	2.72	0.10	0.1	0.26	35.06	0.26
深部围岩	2.72	5.20	5	13.00	35.06	0.26
破碎带	2.72	0.05	0.14	0.40	31	0.26
废石充填	2.72	2.11	2.4	6.25	35.06	0.26
胶结充填	2.02	0.12	0.4	0.93	40	0.28

### 3.2 浅部矿体回采过程数值分析

#### 3.2.1 模型弹性计算及浅部矿体回采

在进行浅部矿体回采前,需对自重条件下的力学模型进行初始弹性计算,为后续开采数值模

拟提供初始应力条件.得到包含初始应力条件的模型后,根据空场采矿法对+928 至+808 中段矿体进行一次性回采,得到多空区围岩的最大主应力及塑性区云图如图 5 所示.

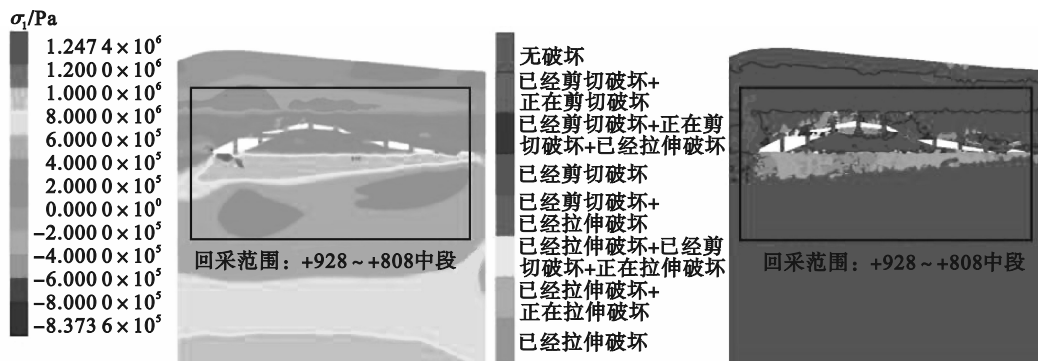


图 5 采用空场采矿法对浅部矿体(+928 ~ +808)回采后的力学响应

Fig. 5 Mechanical response after mining of shallow ore body (+928 ~ +808) by open stoping method  
(a)—最大主应力云图; (b)—塑性区云图.

由图 5 可知,基于空场采矿法对浅部矿体(+928 ~ +808 中段)进行回采后产生了相互紧邻

的空区群,造成空区底板产生了较大的拉应力(最大值为 1 MPa),其值超过了浅部围岩的抗拉

强度,使得空区发生严重破坏.空区群中,多处空区顶板因回采扰动产生压应力(最大值为 0.84 MPa),由于空区群间矿柱尺寸小,空区群的破坏造成大部分围岩压力向矿柱转移,矿柱应力集中显著,产生了大面积的塑性破坏区.此外,浅部空区的回采对邻近矿体及围岩的稳定性产生了一定影响,甚至造成附近矿体和围岩发生破坏.

采用空场采矿法对矿体进行一次性回采,几乎所有空区围岩都产生拉伸和剪切破坏.由于

浅部围岩为沙土或泥岩,强度较低,在破碎带及开采扰动的影响下也受到了不同程度的拉伸破坏.东区采空区处于破碎带下盘,岩体较为稳定,未产生明显破坏.综合以上分析可知,浅部空区具有较大的冒顶片帮风险,需要进行充填处理.

### 3.2.2 浅部空区充填及地表变形

在浅部矿体回采后,对形成的空区群进行干式充填(废石充填),分析充填后空区群(采场)的稳定性及地表沉降变形趋势,如图6所示.

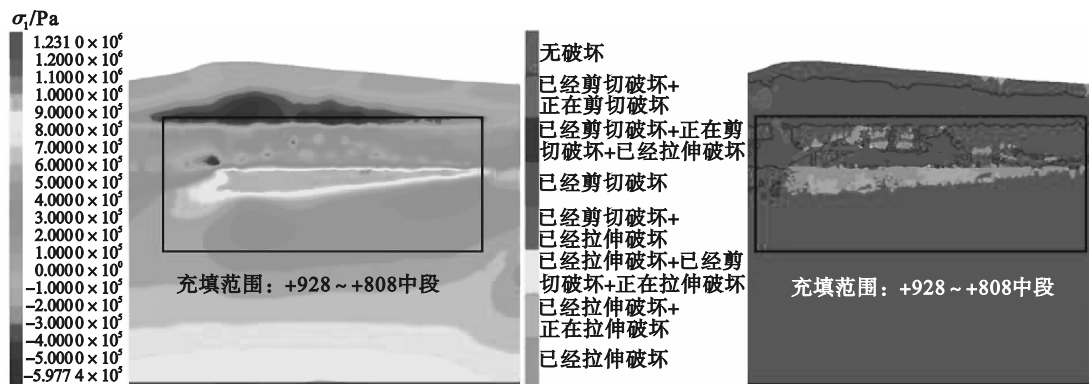


图6 对西部浅部空区(+928 ~ +808)采用废石充填后的力学响应

Fig. 6 Mechanical response after filling the western shallow goaf (+928 ~ +808) with waste rock

(a)—最大主应力云图; (b)—塑性区云图.

对浅部空区(+928 ~ +808 中段)采取干式充填(废石充填)后,矿柱应力集中现象有所改善.浅部空区围岩塑性区增长率很小(0.015%),这表明充填体较好地限制了围岩塑性区进一步发展,同时充填体自身未出现拉伸或剪切破坏.综合以上分析可知,浅部空区干式充填效果较好,空区群结构稳定,未发生大规模失稳.浅部空区充填前后采空区围岩塑性区体积如表2所示.

由于浅部矿体采用空场采矿法回采,空区分布较为密集,且围岩力学性质较弱,因此浅部矿体回采产生了较大的地表沉降.在数值模拟中于地表重要建(构)筑物处设置地表变形监测点,监测点位置分别为副井、办公生活区、岩芯库、选厂与主井区域、炸药库、变电所.矿体与地表建(构)筑物位置关系见图7.监测空场采矿法回采及废石充填后的地表沉降值,如表3所示.

表2 浅部空区充填前后塑性区体积

Table 2 Plastic area volume before and after filling of shallow goaf

浅部空区充填前塑性区体积 $\times 10^{-9}/\text{m}^3$	浅部空区充填后塑性区体积 $\times 10^{-9}/\text{m}^3$	增长率/%
1.6054	1.60564	0.015

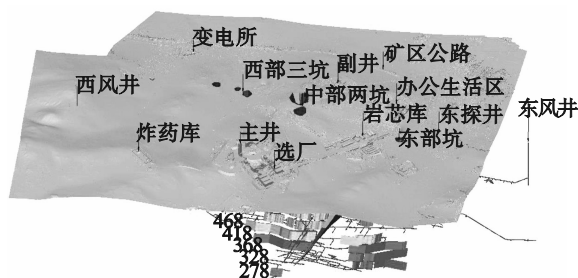


图7 矿体与地表建(构)筑物位置关系

Fig. 7 Location relationship between ore body and surface buildings (structures)

表3 各监测点地表沉降数值计算结果

Table 3 Numerical calculation results of surface subsidence at each monitoring point

建(构)筑物	地表沉降数值计算结果/mm
副井	-44.65
办公生活区	-17.32
岩芯库	-10.62
选厂、主井	-25.104
炸药库	-18.804
变电所	-36.01

注:正、负代表方向(下同).

### 4 深部矿体分步回采

对浅部空区采用废石充填后,充填体及空区围岩较为稳定. 为探究深部矿体回采对浅部岩层及地表变形的扰动响应,对+768~+278中段矿体以中段为单位进行开采和充填,研究深部矿体在开采和充填后浅部采场围岩与充填体稳定性以及地表变形演化规律.

#### 4.1 应力及塑性区分析

+768中段进行回采后,空区顶板产生了较大的拉应力(最大为0.9 MPa),其值并未超过深部围岩抗拉强度,因此空区没有进一步破坏,回采结束后+768中段最大主应力云图如图8所示.

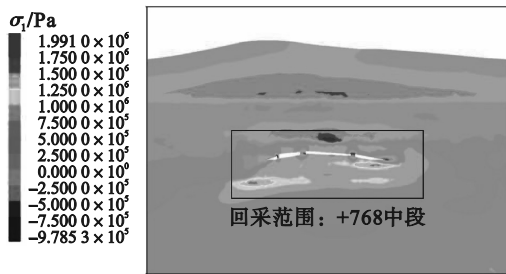


图8 +768中段回采结束后最大主应力云图

Fig. 8 Nephogram of maximum principal stress after stoping in the middle section of +768

由于空区分布密集,导致围岩压力向空区群转移,在空区边角处产生应力集中.+768中段周边围岩受前期浅部空区开采和+768中段开采扰动,产生大量拉伸破坏.采用尾砂胶结充填后,矿柱及空区围岩应力集中现象有所改善,+768中段回采与充填结束后塑性区云图如图9所示.+728中段回采后,空区力学响应与+768中段开采后的空区响应较为相似,围岩压力向矿柱转移,导致矿柱产生大面积拉伸破坏.采用尾砂胶结充填后,空区没有进一步破坏,充填体较为稳定.如图10所示,+768及+728中段矿体在回采充填后,充

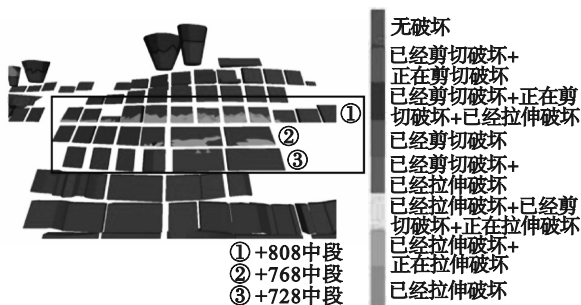


图9 +768中段开采充填后塑性区云图

Fig. 9 Nephogram of plastic zone after mining and filling in the middle section of +768

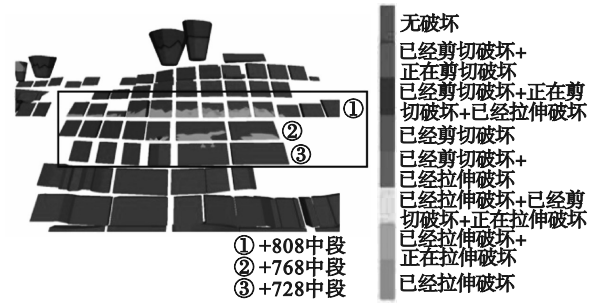


图10 +728中段开采充填后塑性区云图

Fig. 10 Nephogram of plastic zone after mining and filling in the middle section of +728

填体并未出现拉伸或剪切破坏,稳定性良好.

由图可知,相较于深部矿体(+768~+278中段)回采前,+808中段充填体在+768中段开采充填后出现了新的塑性破坏,说明+768中段的回采对浅部充填采场稳定性产生了一定影响.类似地,在+728中段开采充填过程结束后,邻近的+768中段充填体产生了少量塑性区,充填体存在失稳风险,同时+808中段充填体塑性区体积不断增大.

表4为+768~+278中段矿体回采及充填后+808中段充填体塑性区体积.由表可知,随着深部矿体的回采和充填,+808中段充填体塑性破坏体积不断增大,变化速率呈现先快后慢的趋势,与+808相邻的+768,+728,+688,+648四个中段回采充填对+808中段充填体影响最大,+608,+568,+518,+468四个中段距离+808中段较远,其回采对+808中段充填体稳定性影响较小.而对于距离更远的矿体回采,其几乎不会对+808中段充填采场的稳定性造成影响.

表4 +808中段随深部矿体开采的塑性区体积  
Table 4 Volume of plastic zone along with deep ore body mining in the middle section of +808

回采进程	+808中段塑性区体积/m <sup>3</sup>
浅部空区充填	0
+768中段回采—充填	12 438.1
+728中段回采—充填	17 522.6
+688中段回采—充填	19 726.8
+648中段回采—充填	20 005.1
+608中段回采—充填	20 349.7
+568中段回采—充填	20 691.5
+518中段回采—充填	20 814.6
+468中段回采—充填	20 880.8
+428中段回采—充填	20 880.8
+378中段回采—充填	20 880.8
+328中段回采—充填	20 880.8
+278中段回采—充填	20 880.8

在+278中段矿体回采、充填后,浅部空区(+928~+808中段)塑性区云图如图11所示,除+808中段充填体受深部矿体回采扰动产生新的拉伸破坏之外,+928,+888,+848三个中段采场较为稳定,浅部空区没有发生大面积的二次破坏,说明深部矿体回采对+808以上中段浅部充填采场稳定性的影响有限。

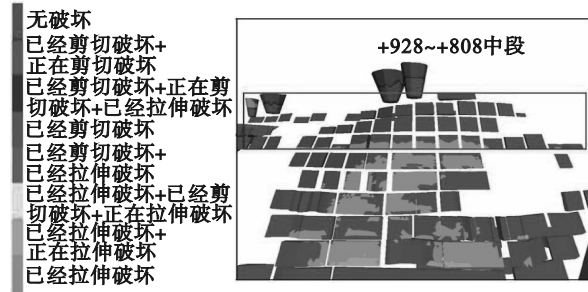


图 11 +278中段回采与充填后浅部空区塑性区云图  
Fig. 11 Nephogram of plastic zone of shallow goaf after mining and filling in the middle section +278

#### 4.2 浅部空区及地表变形分析

深部矿体(+768~+278中段)采用充填采矿法回采,中段回采后立即进行尾砂胶结充填.回采区域最小埋深约224 m,最大埋深722 m.深部矿体回采充填结束后,+768中段受+728~+278中段回采充填扰动,产生最大约19 mm沉降.+808中段充填体受回采扰动与+768中段变形影响,仅于底板处产生最大16 mm沉降,总体变形大多处于1~6 mm区间.受制于回采扰动影响范围与+808中段充填体的微小变形,+848,+888,+928中段充填体沉降较小,沉降值位于2~3 mm区间.可以得出,各中段充填体沉降值与采场距离呈负相关.各中段充填体沉降云图如图12所示.

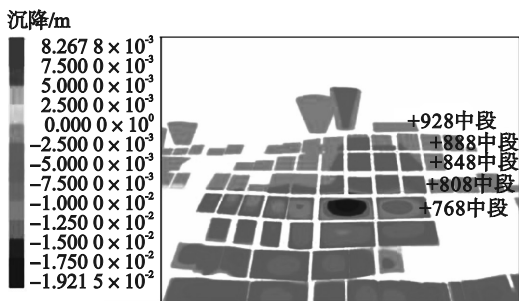


图 12 +928~+768中段充填体沉降云图  
Fig. 12 Nephogram of filling body settlement in the middle section +928~+768

表5为深部矿体回采与充填引起的地表不同建(构)筑物的沉降值.其中岩芯库、选厂主井区域位于浅部采空区上方,沉降值1.35,1.65 mm,小于+928中段充填体沉降值区间(2~3 mm),地

表变形与采场距离具有同样的相关关系.

由表5可知,深部矿体回采充填扰动与浅部空区二次破坏对地表变形影响很小,不会影响地表建(构)筑物的稳定性.

表 5 深部矿体回采充填导致的地表沉降值  
Table 5 Surface subsidence value caused by mining and filling of deep ore body

建(构)筑物	地表沉降值/mm
副井	-0.16
办公生活区	-0.23
岩芯库	-1.35
选厂、主井	-1.65
炸药库	-0.008
变电所	-0.03

#### 4.3 InSAR地表变形监测

为了验证数值模拟结果的有效性,本文采用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术对矿体回采后地表的沉降变形进行持续监测,地表重要建(构)筑物位置如图13所示.深部矿体回采充填持续至2020年5月,提取2020年5月之前InSAR地表沉降时间序列如图14所示.图15为深部矿

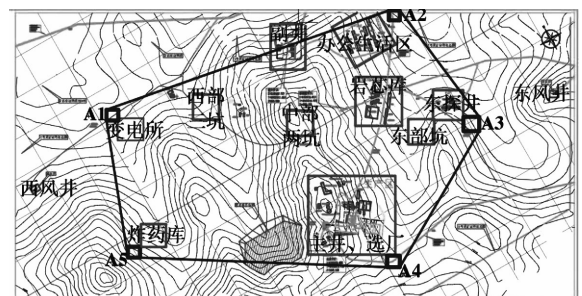


图 13 InSAR 监测点分布  
Fig. 13 Distribution of InSAR monitoring points

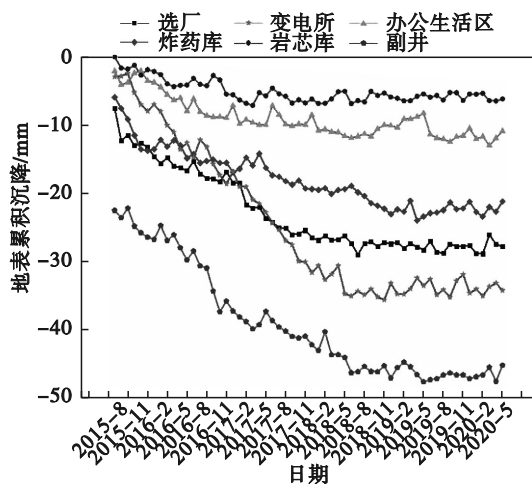


图 14 地表建筑物 InSAR 监测数据  
Fig. 14 InSAR monitoring data of surface buildings

体回采充填结束后基于 InSAR 获取的地表累积沉降云图。表 6 给出了基于 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟与 InSAR 监测的地表重要建(构)筑物累积沉降值。

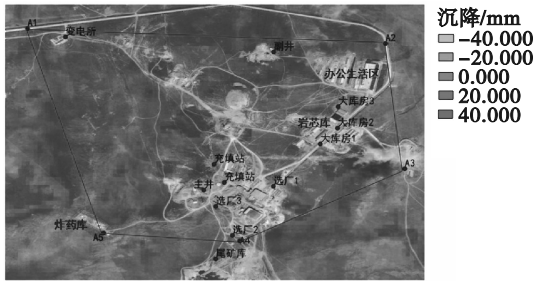


图 15 2020 年 5 月 InSAR 地表累积沉降值  
Fig. 15 Accumulated surface subsidence value of InSAR in May 2020

由图 14 和表 6 可以看出,基于数值模拟得到的浅部、深部矿体回采充填引起的建筑物地表沉降与 InSAR 监测数据具有较好的一致性,可以证明本文数值模拟的有效性。

### 5 东部矿区残矿回收

为提高资源利用率,东部矿区需要对矿柱进行残矿回收。在完成深部矿体回采后,对图 3 所示的浅部尚未充填东部空区(+928 ~ +808 中段)进行胶结充填,然后按照两种方案进行矿柱回收:①按照由西到东的顺序依次进行残矿回收;②按照由东到西的顺序依次进行残矿回收。

表 6 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟结果与 InSAR 地表变形监测结果  
Table 6 FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation results and InSAR surface deformation monitoring results

建(构)筑物	地表累积沉降值/mm	InSAR 地表沉降监测结果/mm	最大允许变形值/mm
副井	-44.978	-46	-450
办公生活区	-17.816	-11	-480
岩芯库	-13.382	-5	-200
选厂、主井	-28.969	-27	-270
炸药库	-18.814	-22	-252
变电所	-36.046	-34	-480

注:最大允许变形值根据《有色金属采矿设计规范》并结合建(构)筑尺寸计算确定。

#### 5.1 确定残矿回收的最佳开采方案

1) 最大主应力分析. 按照两种矿柱回收方案进行数值模拟,获得采场顶板最大主应力云图如表 7 所示。

两种矿柱回收方案产生的应力集中现象基本一致,且最大主应力均未超过围岩抗拉强度,说明两种回收方案均不会导致空区附近围岩发

生严重失稳。

2) 地表沉降值分析. 由于东区矿柱远离大部分地表建(构)筑物,因此矿柱回收工作对于地表沉降影响相对较小,见表 8。

表 7 两种矿柱回收方案最大主应力云图

Table 7 Maximum principal stress nephogram of two pillar recovery schemes

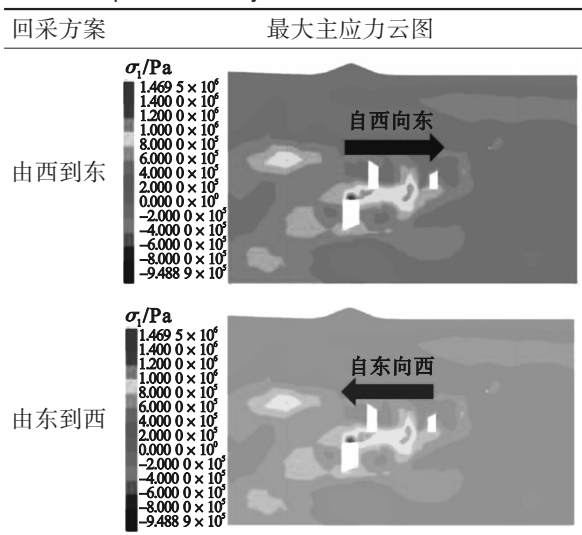


表 8 两种回采方案引起的地表沉降值

Table 8 Surface subsidence value caused by two mining schemes mm

建(构)筑物	自西向东	自东向西
副井	-0.172	-0.172
办公生活区	-0.278	-0.278
岩芯库	-1.433	-1.433
选厂、主井	-2.227	-2.227
炸药库	-0.0014	-0.0014
变电所	-0.0327	-0.0327

3) 塑性区体积分析. 两种回采方案塑性区体积计算见表 9. 可以看出,自西向东回采产生的塑性区体积更小,对采场围岩的扰动也 smaller。

因此,综合考虑东部残矿回收对围岩稳定性和地表建(构)筑物沉降变形的影响可知,自西向东的矿体回采为最优的残矿回采方案。

#### 5.2 残矿回收地表累积沉降预测

根据表 6 中浅部、深部矿体回采充填引起的

表 9 两种回采方案产生的围岩塑性区体积  
Table 9 Plastic zone volume of surrounding rock produced by two mining schemes  $m^3$

塑性破坏状态	自西向东	自东向西
正在拉伸破坏	7.362 7e6	7.926 71e6
正在剪切破坏	5.336 12e7	5.429 84e7
已拉伸破坏	2.863 08e8	2.863 08e8
已剪切破坏	1.326 28e9	1.326 28e9

地表累积沉降值与表 8 中预测残矿回收可能引起的地表沉降值计算残矿回收后地表累积沉降值,整理于表 10 中。

表 10 残矿回收后地表累积沉降值预测  
Table 10 Prediction of accumulated surface subsidence value after residual ore recovery

建(构)筑物	残矿回收后地表变形预测结果/mm	最大允许变形值/mm
副井	-45.15	-450
办公生活区	-18.094	-480
岩芯库	-14.815	-200
选厂、主井	-31.196	-270
炸药库	-18.815	-252
变电所	-36.079	-480

预计残矿回收后,建(构)筑物地表累积沉降值均远小于最大允许变形值。可以得出,浅部残矿回收不会对地表建筑物的稳定性造成影响。

## 6 结 论

1) 建(构)筑物地表累积沉降值均小于最大允许变形值,表明阿尔哈达铅锌矿浅部、深部矿体回采不会影响地表建(构)筑物稳定性。数值模拟沉降结果与 InSAR 监测数据具有较好的一致性,证明了本文数值模拟与现场监测结合的分析方法的有效性。

2) 对采用空场采矿法回采后的浅部空区(+928~+808中段)采用干式充填(废石充填)后,浅部空区围岩塑性区并无发展趋势,充填效果较好;对深部矿体(+768~+278中段)进行回采并充填后,已稳定的+808中段充填体受该深部矿体回采扰动影响而产生明显二次破坏与沉降。

3) 浅部中段充填体受深部矿体回采扰动产生沉降,浅部空区受深部矿体回采扰动程度与采区距离呈负相关。地表变形同样遵循这一关系,由模拟结果分析,深部矿体回采扰动与浅部空区二次破坏对地表变形影响很小。

4) 基于应力应变、塑性区模拟结果,选取自西向东回采为最佳回采方案。预计残矿回收后地表累积沉降值远小于最大允许变形值,残矿回收不会对地表建筑物稳定性产生影响。

### 参考文献:

- [1] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.  
(Yuan Liang, Jiang Yao-dong, Wang Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J].*Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1):14-20.)
- [2] 关守安,李皓,金长宇,等.粗榆金矿地下开采覆岩运移规律数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(3):402-407.  
(Guan Shou-an, Li Hao, Jin Chang-yu, et al. Numerical simulation on overlying strata movement law in underground mining of Cuyu Gold Mine [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(3):402-407.)
- [3] Xu Z C, Xu W, Zhou P, et al. Research on coal mine goaf restoration based on stability of overlying rocks and numerical simulation analysis: a case study of Jingmen Garden Expo Park[J].*Sustainability*, 2023, 15(2):1464.
- [4] Pang L F, Liu W T, Zheng Q S, et al. Evaluation and analysis of metal mine filling based on numerical simulation and actual measurement[J].*Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(16):505-529.
- [5] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1986, 91(B5):4993-4999.
- [6] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1989, 94(B7):9183-9191.
- [7] Pawluszek-Filipiak K, Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using Sentinel-1 data: the case study of Rydutowy Mine in Poland[J].*Remote Sensing*, 2020, 12(2):242.
- [8] Wang Z Y, Zhang J X, Huang G M. Precise monitoring and analysis of the land subsidence in Jining coal mining area based on InSAR technique [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(1):169-174.
- [9] Wempen J M, McCarter M K. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(1):159-163.
- [10] Xu Z C, Xu W, Zhu Z H, et al. Research on monitoring and stability evaluation of ground subsidence in gypsum mine goaf [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10:1097874.
- [11] Liu J, Ma F S, Guo J, et al. A preliminary analysis of the mining-induced rock movement characteristics in the Xinli deposit of the Sanshandao gold mine [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10:1101807.
- [12] Guo J S, Ma L Q, Liu Z G, et al. Numerical simulation of longwall face mining stress evolution based on the nonlinear compression characteristics of goaf gangue [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(8):04023120.

- [13] Zhang X D, Li W L, Li T Y, et al. Stability analysis and numerical simulation of foundation in old goaf under building load [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1063684.
- [14] Guo Y H, Luo L, Ma R, et al. Study on surface deformation and movement caused by deep continuous mining of steeply inclined ore bodies [J]. *Sustainability*, 2023, 15(15): 11815.
- [15] Wei X S, Wang Y Y, Jin Y C, et al. Study on the ground settlement regularity caused by deep caving method [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 670/671: 907-911.
- [16] He L, Wu D, Ma L F. Numerical simulation and verification of goaf morphology evolution and surface subsidence in a mine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 144: 106918.
- [17] Guo Q B, Guo G L, Lv X, et al. Strata movement and surface subsidence prediction model of dense solid backfilling mining [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(21): 1426.
- [18] 罗跃, 罗斌, 周琦忠, 等. 基于 Flac<sup>3D</sup> 软件对徐州市镇北铁矿地表沉降原因及规律研究 [J]. *能源技术与管理*, 2022, 47(2): 159-161.  
(Luo Yue, Luo Bin, Zhou Qi-zhong, et al. Research on the causes and patterns of surface subsidence in Zhenbei Iron Mine, Xuzhou City based on Flac<sup>3D</sup> software [J]. *Energy Technology and Management*, 2022, 47(2): 159-161.)
- [19] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 258-264, 326.  
(Xu Zhong-hua, Wang Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 258-264, 326.)
- [20] Wei Z X, Dong J H, Zhao M, et al. Transient electromagnetic detection and numerical simulation analysis of the deformation characteristics of an old goaf in an alpine coal mine area [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1220142.
- [21] Li Y, Ren Y Q, Lei X H, et al. Numerical modeling and onsite detection analysis of upward mining feasibility of residual coal from multi-gobs in close-multiple coal seams [J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2023, 40(4): 1153-1169.
- [22] 赵迎贵, 游勋, 岳国均, 等. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的矿柱回收稳定性分析 [J]. *金属矿山*, 2014(8): 19-23.  
(Zhao Ying-gui, You Xun, Yue Guo-jun, et al. Stability analysis of ore pillar recovery based on FLAC<sup>3D</sup> [J]. *Metal Mine*, 2014(8): 19-23.)
- [23] 李超. 大采高工作面过断层数值模拟与围岩控制技术 [J]. *能源技术与管理*, 2019, 44(6): 80-82, 161.  
(Li Chao. Numerical simulation and surrounding rock control technology for large mining height working face passing through faults [J]. *Energy Technology and Management*, 2019, 44(6): 80-82, 161.)
- [24] 雷大星, 张耀平, 邹雄刚. 上覆岩层对巷道围岩影响规律的数值模拟分析 [J]. *有色金属(矿山部分)*, 2016, 68(6): 70-74, 89.  
(Lei Da-xing, Zhang Yao-ping, Zou Xiong-gang. Numerical simulation on the influence between overlying rock and roadway wall rock [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2016, 68(6): 70-74, 89.)