

基于 MatDEM 的上向水平分层进路充填采矿法 地表沉降对建筑物影响的研究

耿加波¹, 郑思莹¹, 巫 霖^{2*}, 杨 相²

(1. 江西理工大学应急管理与安全工程学院; 2. 赣州工业投资控股集团有限公司)

摘要:针对江西某矿区破碎带发育、围岩差异显著的特点及敏感目标保护需求,采用 MatDEM 离散元软件建立数值模型,通过模拟 4 个中段的开采与充填过程,研究上向水平分层进路充填采矿法开采过程中岩层变形及地表沉降规律,并监测居民区、农田及公路的地表沉降数据。结果表明:各中段开采后岩层最大位移随深度增加而增大,但胶结充填使位移增速降低;地表敏感区监测点倾斜、曲率及水平变形均低于 GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》I 级建(构)筑物允许值,验证了全尾砂胶结充填方案的有效性。

关键词:地表沉降;建筑物;充填采矿;数值模拟;MatDEM 离散元软件;开采沉降

中图分类号:TD76

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)07-0046-06

doi:10.11792/hj20250707

引 言

地下开采面临复杂地质构造和地表沉降等问题,给安全生产带来诸多挑战。其中,地表沉降对周边建筑物和基础设施的潜在威胁尤为显著^[1-5]。充填采矿法可有效控制地表变形^[6-9],谷中元等^[10]通过数值模拟研究表明,充填开采可使地表位移远低于规范限值,保障地表稳定;刘庆博等^[11]通过优化废石与尾砂协同充填配比,显著提升了充填体强度,有效控制了顶板下沉与地表沉降;朱宗俊等^[12]针对厚大矿体采用分层条带充填结合厢式工艺,使地表沉降最大值控制在 47 mm 内;刘浪等^[13]采用全固废镁渣基充填技术,通过四阶段回采工艺与改性胶凝材料,实现特厚煤层建筑物下的安全开采;刘伟明等^[14]结合理论计算与 Flac^{3D} 软件模拟验证了地表变形值与建筑物的安全性关系;高继拴等^[15]在吉家洼金矿采用充填采矿法后,不仅采矿回采率显著提高至 94%,而且降低了环境风险。针对复杂条件,高鹏等^[16]提出了多断层区域的短壁条带充填工艺,实现采出率 85% 以上并有效控制地表沉降;徐伟兰等^[17]基于 Flac^{3D} 软件模拟发现,充填率从 90% 提升至 100% 时,地表竖向位移最大减少 45%,验证了高充填率对沉降控制的重要性;徐阳等^[18]通过充填率与地表沉降的线性拟合,提出保障建筑物安全的最小充填率为 88%。值得注意的是,何

伟等^[19]采用房柱采矿法等非充填工艺导致地表塌陷深度超 1.7 m,反向印证充填必要性。然而,现有研究多集中于单一地质条件,针对破碎带发育、围岩力学性质差异显著的矿区研究仍显不足。

本文以江西某矿区为研究对象,选取 05 勘探线剖面,其为矿体最大连续开采区域,地质条件复杂,矿体上下盘围岩差异显著,发育全矿区规模最大的破碎带,具有典型工程意义。通过 MatDEM 离散元软件数值模拟验证充填方案对地表沉降的控制效果,结合规范限值评估敏感区域安全性。研究结果可为类似矿山安全生产提供技术参考。

1 数值模拟模型建立

1.1 工程背景

该矿区位于构造活动强烈的于山凹陷带,设计年开采规模 50 万 t。受北东向主干断裂(万田—白鹅断裂)控制,该断裂贯穿整个采区,宽 40~100 m,与区域地下水连通,导水性强。首采中段为 60~-60 m 标高矿体,表层覆盖厚 2~15 m 的第四系松散层,其下伏有厚 10~27 m 的英云闪长岩强风化带,形成软弱夹层。矿体围岩主要为变余英安质凝灰岩和中粗粒似斑状英云闪长岩,受多期构造岩浆活动影响,岩体普遍破碎,蚀变强烈,节理密集带发育,完整性中等偏差,历史坑道已见局部冒落现象。矿体赋存于硅化构

收稿日期:2025-03-20; 修回日期:2025-05-03

基金项目:国家自然科学基金(52364013);中国博士后科学基金面上项目(2022M722924)

作者简介:耿加波(1988—),男,副教授,研究方向为矿山安全;E-mail:gengjiabo@163.com

*通信作者:巫 霖(1988—),男,工程师,从事矿山安全方面的工作;E-mail:971228233@qq.com

造角砾岩带内,主矿体呈脉状分布,总体走向 40° ~ 60°,倾角 65° ~ 85°,赋存于 150 ~ -470 m 标高,控制长度 1 214 m,延伸 426 m,平均厚度 8.91 m,占资源总量的 81.2 %。矿体形态复杂,沿走向和倾向呈波状起伏。

该矿区地表移动范围内分布有农田、居民区及公路等敏感目标。为减少地下开采引起地表沉降对地表建筑物的影响,采用上向水平分层进路充填采矿法,

充填灰砂比 1:8,料浆浓度 58 %。研究采用 MatDEM 离散元软件数值模拟验证充填方案对地表沉降的控制效果,确保农田、居民区及公路安全。

1.2 矿岩及充填体力学参数

通过现场取样,共制备 48 个标准试验试件,并开展基本参数测试、单轴抗压试验、抗拉试验和抗剪试验,获得矿岩物理力学参数,如表 1 所示。

采用上向水平分层进路充填采矿法,尾砂胶结充

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of ore rocks

岩石种类	干燥密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦系数
凝灰岩	2.87	0.25	79.78	9.14	23.50	0.215	0.520
花岗岩	2.76	0.35	116.00	13.13	27.36	0.249	0.505
萤石矿	3.18	0.09	49.09	5.37	22.86	0.191	0.432
角砾岩	2.60	0.14	21.35	1.99	14.49	0.220	0.466

填体强度为 2.5 MPa,灰砂比 1:8,料浆浓度 58 %。根据 Hoek-Brown 经验方程,确定充填体力学参数,

如表 2 所示。

表 2 充填体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of backfill

名称	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦系数
充填材料	3	0.3 ~ 0.5	1.0 ~ 1.2	0.15 ~ 0.17	0.5 ~ 0.7

1.3 剖面绘制

使用大疆精灵 4RTK 测绘航拍器对研究区进行高精度地形测绘,将采集的照片信息导入 Agisoft Metashape Professional 2.0 软件生成 0.03 m 分辨率的矿区高质量 DEM 数据,得出地表海拔高度信息,如图 1 所示。矿区坐落于农田下方,地表较为平缓,两侧为山体,最大标高落差约 92 m,地势类似于“U”形。在较大规模采动影响下,两侧山体可能发生落石或滑坡灾害,危害周围居民安全。为确定开采区域上方的地表变形程度,在地表最高点至最底线连线处制作了 A—A' 剖面,如图 2 所示。

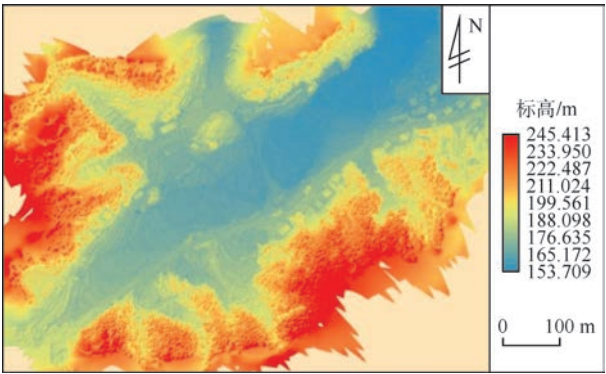


图 1 矿区地势

Fig. 1 Topography of the mining area

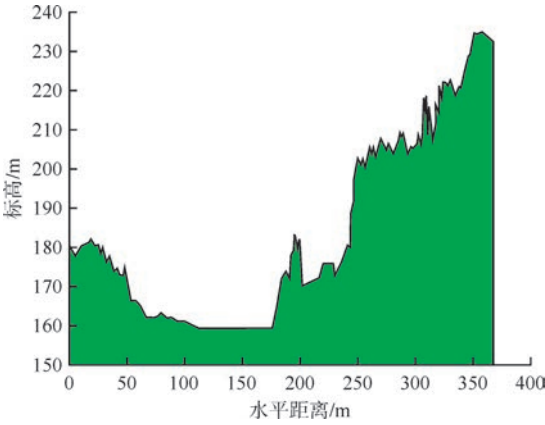


图 2 A—A' 剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of A—A' cross-section

1.4 数值模型

结合矿区岩层及矿体分布情况,在 MatDEM 离散元数值模拟软件中构建矿区地下开采与充填数值模拟模型(如图 3 所示)。该模型被划分为上盘、下盘、破碎带、矿体等区域,将实验室测得的岩石参数赋予区域岩层性质。从上至下依次划分为 60 m、20 m、-20 m、-60 m 中段,共计 4 个中段,每个中段高度为 40 m,各中段采用自上而下的回采顺序。回采工艺为由下而上逐层回采,以进路为单位回采与充填。

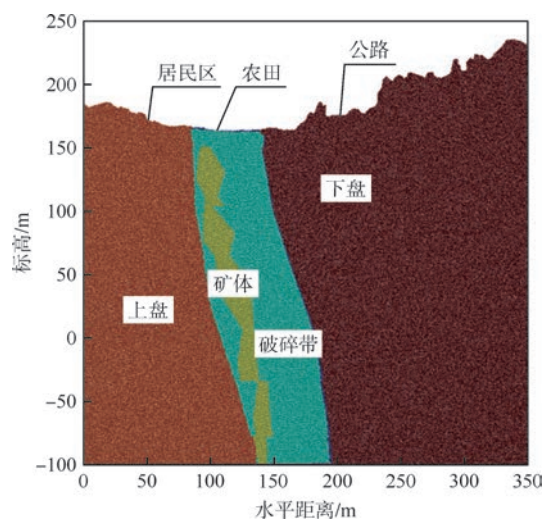


图 3 数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model

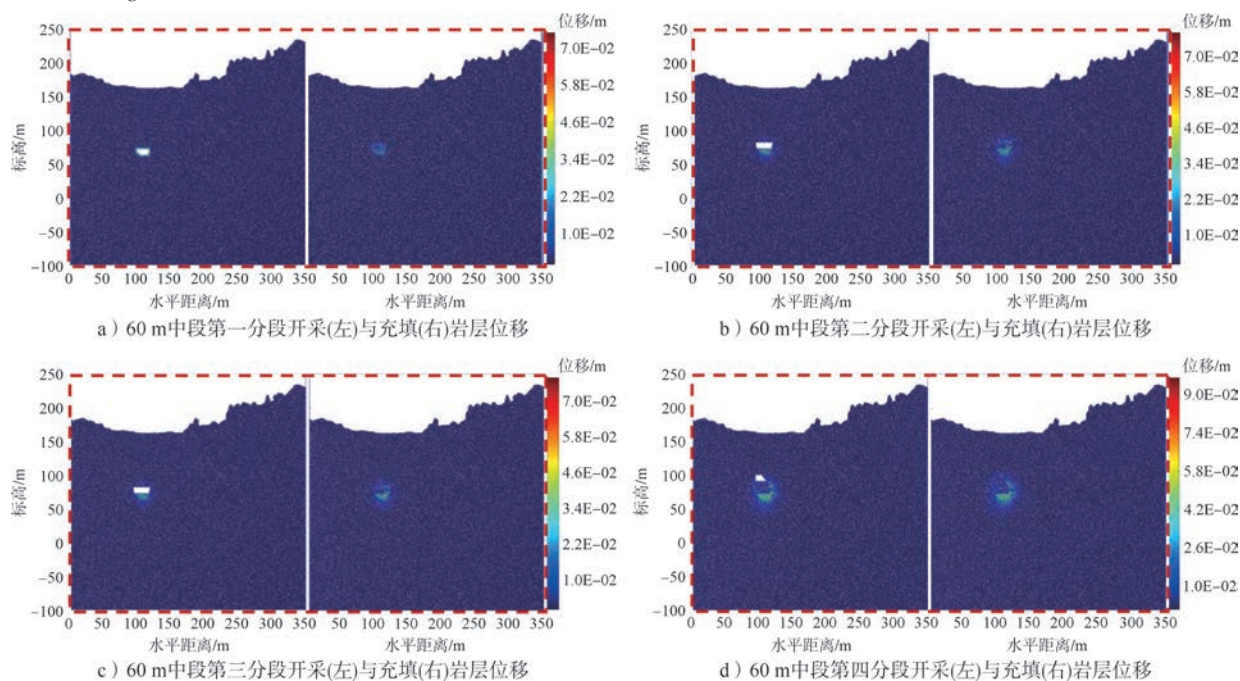


图 4 60 m 中段岩层位移

Fig. 4 Rock layer displacement at the 60 m level

60 m 中段,位移增速加快,但充填体仍有效控制了位移扩展速率,表明充填体在中深部仍具备适用性。

2.1.3 -20 m 中段

-20 m 中段位于矿区中深部,是矿体连续开采的关键区域。在 4 次开采与 4 次充填工程期间,通过数值模拟分析发现,岩层位移随开采深度增加而累积,但充填体的支撑作用有效减缓了位移增速。岩层位移量由 0.18 m 增至 0.25 m,如图 6 所示。

2.1.4 -60 m 中段

-60 m 中段作为最深开采区域,岩层位移量达 0.35 m。开采扰动显著增强,最终位移量达 0.35 m,如图 7 所示。位移分布呈现“多中心”特征,与破碎带规模扩大有关,但充填体仍具备适用性。

2 数值模拟结果与分析

2.1 岩层变形分析

2.1.1 60 m 中段

60 m 中段作为首采区域,其岩层位移变化反映了充填工艺对浅部地层的控制效果。4 次开采与充填过程中,矿体周围岩层最大位移量由 0.001 2 m 增至 0.09 m,如图 4 所示。位移集中于采场底部,呈“碗状”分布,值得注意的是,每段充填后位移增速显著降低,验证了充填材料的力学性能满足浅部开采需求。

2.1.2 20 m 中段

20 m 中段开采后,矿体周围岩层最大位移量由 0.1 m 增至 0.22 m,如图 5 所示。位移分布范围向矿体两侧扩展,可能与下盘和上盘的力学差异有关。对比

2.2 矿区开采地表沉降分析

为了监测矿体在整个开采过程中沉降变化,在居民区、农田及公路设置了地面沉降监测点,如表 3 所示。每中段充填工程结束时的居民区、农田及公路最大沉降量如表 4 所示。随着开采深度从 60 m 向 -60 m 延伸,地表沉降呈现显著累积效应。其中,公路受采动影响最为突出,为同期居民区和农田沉降量的 2.5 倍与 2.4 倍。

通过 GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》^[20]计算变形参数,包括地表倾斜、地表曲率、水平变形。计算公式分别为:

$$i_{m-n} = \frac{w_m - w_n}{l_{m-n}} \quad (1)$$

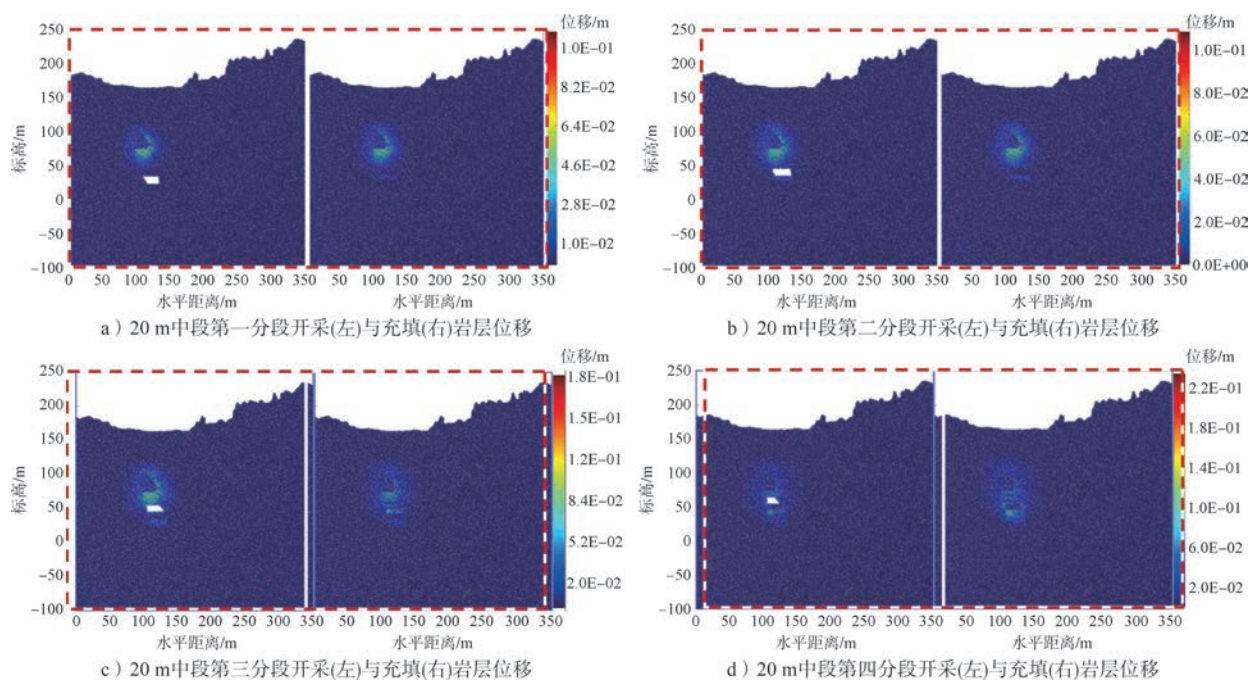


图5 20 m 中段岩层位移

Fig. 5 Rock layer displacement at the 20 m level

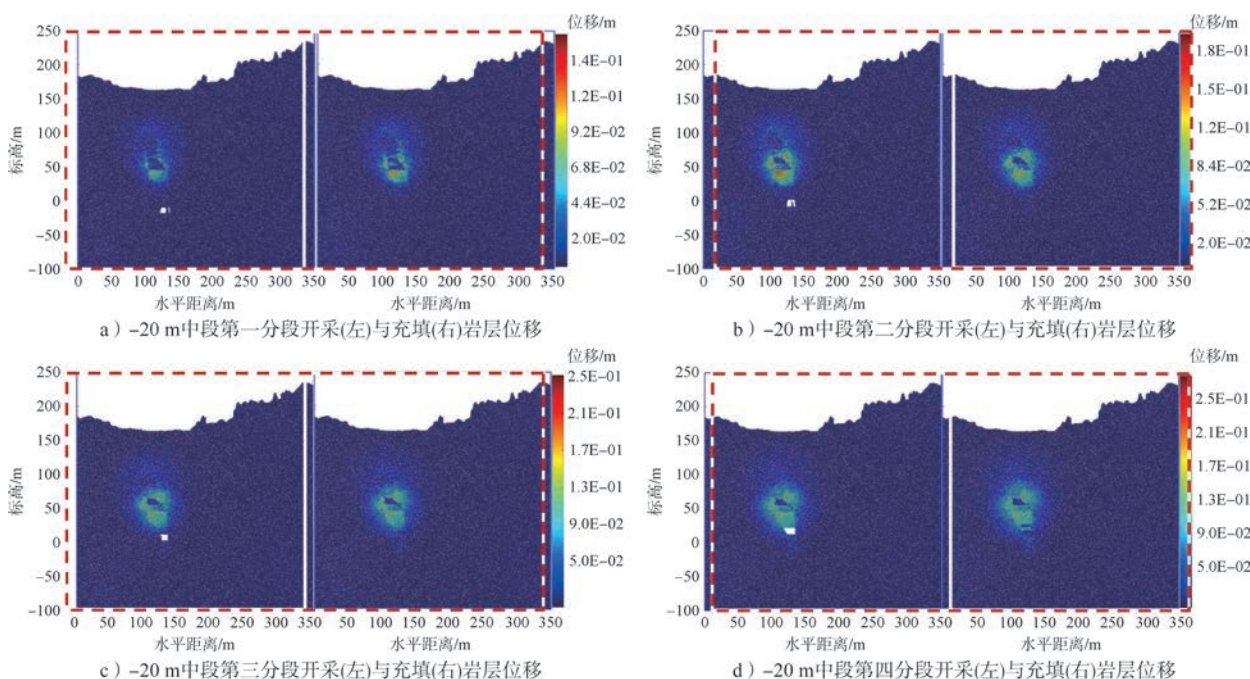


图6 -20 m 中段岩层位移

Fig. 6 Rock layer displacement at the -20 m level

$$K_{m-n-p} = \frac{i_{n-p} - i_{m-n}}{0.5(l_{m-n} + l_{n-p})} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{m-n} = \frac{u_n - u_m}{l_{n-m}} = \frac{\Delta u_{nm}}{l_{n-m}} \quad (3)$$

式中: i_{m-n} 为 m 、 n 两点的平均倾斜 (mm/m); l_{m-n} 为地表 m 、 n 点间的水平距离 (m); w_m 、 w_n 分别为地表 m 、 n 点的下沉值 (mm); K_{m-n-p} 为 mn 、 np 线段的平均曲率 (mm/m²); i_{n-p} 为 n 、 p 两点的平均倾斜 (mm/m); l_{n-p} 为地表 n 、 p 点间的水平距离 (m); ε_{m-n} 为 m 、 n 点的水平变形

(mm/m); u_n 、 u_m 分别为 n 、 m 点的水平位移 (mm)。

各区域倾斜、曲率及水平变形均低于 GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》I 级建(构)筑物允许值(如表 5、表 6 所示),表明胶结充填工艺可有效控制地表形变,但公路区域因地质承载特性差异需重点关注局部沉降防控。

3 结 论

1) 研究基于 MatDEM 离散元软件,对江西某矿区

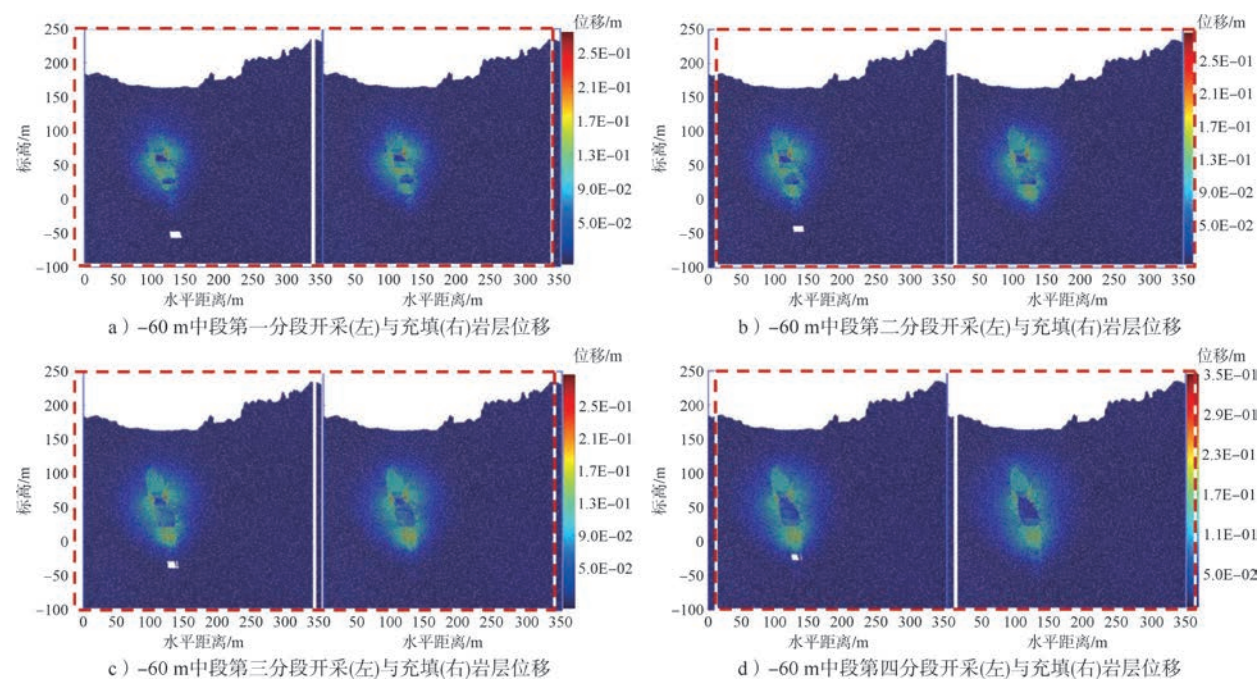


图 7 -60 m 中段岩层位移

Fig. 7 Rock layer displacement at the -60 m level

表 3 地面沉降监测点

Table 3 Surface subsidence monitoring points

监测区域	地理坐标	监测点	间距/m	功能定位
Z2(居民区)	115°41′35.5052″E, 25°55′29.1903″N	A4 ~ A6	16/9	住宅建筑安全监测
N2(农田)	115°41′40.1402″E, 25°55′29.0018″N	B4 ~ B6	10/5	农田地基稳定性评估
G2(公路)	115°41′41.8287″E, 25°55′27.1802″N	C4 ~ C6	6/4	交通基础设施变形监测

表 4 最大沉降量

Table 4 Maximum subsidence values

指标	60 m 中段	20 m 中段	-20 m 中段	-60 m 中段
居民区最大沉降量/m	0.000 085	0.000 12	0.000 18	0.000 22
农田最大沉降量/m	0.000 058	0.000 12	0.000 19	0.000 23
公路最大沉降量/m	0.000 049	0.000 081	0.000 41	0.000 56

表 5 开采地表监测点最大垂直形变量与水平形变量

Table 5 Maximum vertical and horizontal deformation at surface monitoring points during mining

监测区域	监测点	最大垂直形变量/mm	最大水平形变量/mm
Z2(居民区)	A4	0.15	0.076
	A5	0.11	0.045
	A6	0.10	0.035
N2(农田)	B4	0.18	0.089
	B5	0.12	0.056
	B6	0.11	0.041
G2(公路)	C4	0.43	0.097
	C5	0.35	0.061
	C6	0.31	0.055

表 6 开采地表监测点变形参数值

Table 6 Deformation parameters at surface monitoring points during mining

监测点	倾斜/(mm·m ⁻¹)	曲率/(mm·m ⁻²)	水平变形/(mm·m ⁻¹)
Z2(居民区)	0.002 5	0.000 11	0.001 9
N2(农田)	0.006 0	0.000 53	0.003 3
G2(公路)	0.013 3	0.000 66	0.000 6

上向水平分层进路充填采矿法的地表沉降规律进行了数值模拟分析。

2)结果表明,全尾砂胶结充填方案可有效控制岩层形变与地表沉降。地表居民区、农田及公路监测点倾斜、曲率及水平变形均小于 GB 50771—2012 《有

色金属采矿设计规范》I级建(构)筑物允许值,即开采过程中地表沉降量均在安全合理的范围内,验证了充填方案对农田和居民区保护的有效性。但是,公路区域因地质承载特性差异,需针对其局部地质条件加强沉降防控。

3)研究为相似复杂地质条件矿山提供了理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 于洋,陈炳乾,花奋奋,等.矿山地质环境灾变与保护修复研究现状与展望[J].金属矿山,2024(3):1-18.
- [2] 梁宏伟.地下开采煤矿区新增补充耕地与煤矿开采相互影响分析:以龙岩市某地下开采煤矿为例[J].中国矿业,2023,32(12):65-72.
- [3] 徐钊.某矿山地下开采对地表河流安全性影响的研究[J].黄金,2023,44(3):20-25.
- [4] 王海昶,潘健,尹裕,等.某矿山地下开采对地表公路的影响分析[J].黄金,2024,45(2):24-28.
- [5] 侯金波.煤矿开采区地表建筑物破坏原因分析与探讨[J].中国矿业,2024,33(增刊2):111-116.
- [6] 肖欢,李绍斌,刘银,等.某采场上向水平分层进路充填采矿法结构参数研究[J].云南冶金,2024,53(1):42-50.
- [7] 廖九波,曾令义,王宇.机械化上向水平分层充填采矿法在缓倾斜薄矿体中的应用[J].矿业研究与开发,2025,45(1):24-31.
- [8] 巩瑞杰,叶会师,张杰,等.充填接顶率对空场嗣后充填法开采围岩变形规律的影响[J/OL].金属矿山,1-11[2025-04-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250213.0915.002.html>.
- [9] 魏帅,贾建伟,梁大海.宽煤柱窄条带点柱式充填开采技术与实践[J].中国矿业,2024,33(7):208-215.
- [10] 谷中元,曹妙聪,秦宏宇,等.充填法开采诱发矿山地表沉降数值分析研究[J].有色金属工程,2023,13(2):109-115.
- [11] 刘庆博,万小军,胡世利,等.基于地表沉降控制的废石与尾砂料浆协同嗣后充填研究[J/OL].金属矿山,1-13[2025-04-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.td.20250430.1733.006.html>.
- [12] 朱宗俊,杨友才,刘建,等.厚大矿体充填条带开采岩层损伤与地表沉降联合监测研究[J].科技创新与应用,2025,15(5):112-116.
- [13] 刘浪,罗屹骁,朱梦博,等.建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J].煤炭科学技术,2024,52(4):83-92.
- [14] 刘伟明,刘瑞蒙,李天宏,等.某矿山地下开采对地表建(构)筑物的安全影响[J].黄金,2024,45(3):15-19.
- [15] 高继拴,王树新,高峰辉,等.充填采矿法在洛宁吉家洼金矿中的应用[J].有色金属(矿山部分),2024,76(1):33-39.
- [16] 高鹏,杜超杰,石腾,等.多断层复杂地质条件下条带充填开采工艺研究[J].煤炭工程,2024,56(2):10-16.
- [17] 徐伟兰,刘毓,王朝隆,等.基于数值模拟的充填采矿地表移动规律研究[J].有色金属工程,2024,14(6):144-151.
- [18] 徐阳,徐良骥,刘潇鹏,等.充填开采对地表建筑物稳定性影响研究[J].煤炭技术,2023,42(4):38-42.
- [19] 何伟,王星,李同鹏.某石膏矿地下开采诱发的地表沉降分析[J].金属矿山,2021(6):210-215.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.有色金属采矿设计规范:GB 50771—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.

Study on the impact of surface subsidence on buildings caused by upward horizontal slicing and filling based on MatDEM

Geng Jiabo¹, Zheng Siying¹, Wu Lin², Yang Xiang²

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, Jiangxi University of Science and Technology;
2. Ganzhou Industrial Investment Holding Group Co., Ltd.)

Abstract: To address the characteristics of a mining area in Jiangxi Province, such as a well-developed fractured ore zone, significant variations in surrounding rock properties, and the need to protect sensitive surface structures, a numerical model was established using the discrete element software MatDEM. The model simulates the mining and filling process across 4 levels to study the rules of rock mass deformation and surface subsidence during upward horizontal slicing and filling. Surface subsidence data were monitored in residential areas, farmland, and along roadways. The results indicate that the maximum displacement of the rock mass increases with mining depth across the levels, while cemented backfills effectively reduce the rate of displacement growth. The values of tilt, curvature, and horizontal deformation at monitoring points in sensitive surface areas are all below the allowable value for Class I buildings (structures) specified in GB 50771—2012 *Code for Design of Nonferrous Metal Mining*. This verifies the effectiveness of the ungraded tailings cemented filling scheme.

Keywords: surface subsidence; buildings; filling mining; numerical simulation; MatDEM discrete element software; mining-induced subsidence