

某矿山地下开采对地表建(构)筑物的安全影响

刘伟明¹,刘瑞蒙²,李天宏¹,贾彦州¹,辛明禹¹

(1. 山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司; 2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院)

摘要:为科学预测矿山地下开采对村庄、民房等建(构)筑物的安全影响,防止开采活动造成建(构)筑物的破坏,根据矿山地质和设计资料,利用地表岩移变形理论对主要矿体的地表最大下沉值、影响半径、地表最大倾斜率、地表最大曲率和地表最大水平变形值进行计算,确定理论上的保护等级;采用 Flac^{3D} 数值模拟软件对矿山的开采过程进行模拟,分析和总结了地表沉降值及地表变形的变化规律。通过理论公式计算,得出了矿区地表最大倾斜率、曲率和水平变形值分别为 0.063 mm/m、 $1.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 、3.7 mm/m,小于地表建(构)筑物保护等级对应的允许变形值,且地表变形值与所设置地表监测点的位移数据相符。研究结果表明,在按照设计要求进行开采的基础上,矿山开采引起的地表变形不会对地表建(构)筑物安全造成威胁,为矿山建设和安全生产提供了理论依据。

关键词:数值模拟;地表变形;构筑物保护;房柱采矿法;嗣后充填

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)03-0015-05

doi:10.11792/hj20240304

引言

地表沉降是矿山开采过程中普遍存在的地质问题。虽不像构造型岩体破坏那样猛烈,但对地下矿山的巷道、硐室、地表建(构)筑物等造成严重破坏,威胁人类的的生活和工作环境。秉持着国家大力倡导的可持续发展理念,国内矿山开采逐渐抛弃“先开采、后治理”的模式^[1]。

随着数学方法逐渐普及和数值模拟软件的大力开发,越来越多的数学模拟方法被应用到地下开采对地表建(构)筑物稳定性影响的研究中,取得了较好的应用效果。赵海军等^[2-5]采用 Flac^{3D} 数值模拟软件对急倾斜矿体在自重应力与构造应力工况下的岩体特征、变形机理进行分析,结果表明在构造应力条件下地表呈现双沉降中心,自重应力条件下地表呈现单沉降中心;李文秀等^[6-8]对矿山地下回采过程引发的地表变形及岩层移动变形进行模拟,结果表明回采过程中的岩层移动是连续变化的过程,通过分析结果成功预测了地表移动带的范围;袁仁茂等^[9]在数值模拟的基础上,采用理论力学的计算方法对急倾斜厚大矿体地下开采过程进行模拟,结合地表监测点的数据统计,可知矿体厚度对回采过程中的地表岩移显现具有明显的影响。

工程地质、水文地质、采矿方法等是影响矿区地表建(构)筑物稳定性的主要因素,其中包括矿床的开采深度、阶段高度、矿体倾角、地质构造、矿体及围

岩特性等^[10]。为探究地下矿山开采的影响范围,评估地表建(构)筑物的安全程度,指导矿山安全生产,本文采用 Flac^{3D} 数值模拟软件模拟某矿山开采后地表岩移变形情况,并通过数据处理,确认地下开采活动造成的影响是否在地表建(构)筑物的保护等级允许范围内。

1 矿山现状

该矿山设计生产能力为 15 万 t/a,目前主要生产中段为 -10 m、-70 m、-130 m、-190 m、-220 m、-250 m、-280 m、-340 m 中段。采用竖井开拓方式和机械抽出对角式通风,主竖井担任提升和进风。矿区主要为缓倾斜薄和中厚矿体,矿体连续性和规律性差,产状变化频繁,主要采用房柱采矿法(嗣后充填)开采,整个开采中段自上而下阶段回采,中段内自回风井向提升井后退式回采,矿房内自下而上分层回采。为提高开采强度,可保持 3 个矿房同时作业,一般是切割、拉底回采和挑顶回采。为了有效控制地压,各工作面间保持距离 10~15 m。

矿区处于丘陵地貌单元,地形有利于排水,地貌条件简单;开采范围内地质构造简单,岩溶不发育;区内矿体及围岩以块状结构及层状结构为主,岩性较单一,顶底板岩石力学强度高,稳固性较好。根据矿体延伸及回采现状,矿区周围环绕着“流淌线”乡村公路,有多个村落聚集,其中北部的土堆村南部位于 463 勘探线—472 勘探线的地表移动带内。

2 地表岩移变形理论分析

矿区资源整合后,位于 460 勘探线—492 勘探线的主要矿体为 S2 - 4、S2 - 14、S2 - 15、T - 98、S2 - 1a、T3 - 2、T3 - 12、S2 - 16 矿体。

根据矿山开采沉陷理论,对于地表变形,可通过计算地表水平变形值、地表最大倾斜率和地表曲率来判断,若这 3 个数值全部在安全允许范围内,则认为地表安全。地表建(构)筑物保护等级见表 1。

表 1 地表建(构)筑物保护等级

Table 1 Surface buildings (structures) protection level			
建(构)筑物 保护等级	地表最大倾斜率 $i/$ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	地表曲率 $K/$ ($10^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$)	地表水平变形值 $\varepsilon/$ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)
I	± 3	± 0.2	± 2
II	± 6	± 0.4	± 4
III	± 10	± 0.6	± 6
IV	± 10	± 0.6	± 6

表 2 主要矿体回采对地表的影响

Table 2 Impact of main ore body mining on the surface									
矿体 编号	矿体埋深/ m	矿体倾角/ ($^{\circ}$)	矿体平均厚度/ m	地表最大下沉值/ mm	影响半径/ m	地表最大倾斜率/ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	地表最大曲率/ ($10^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$)	地表最大水平变形值/ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	满足保 护等级
S2 - 4	-307.12 ~ -109.59	30	1.50	129.90	241.33	± 0.538	$\pm 0.002\ 2$	± 0.244	I
S2 - 14	-49.14 ~ 32.22	22	1.54	142.79	123.15	± 1.16	$\pm 0.009\ 4$	± 0.526	I
S2 - 15	-195.51 ~ 9.65	29	1.84	160.93	141.96	± 1.13	± 0.008	± 0.51	I
T - 98	-835 ~ -1 002	27	2.65	236.12	845.83	± 0.279	$\pm 0.000\ 3$	± 0.127	I
S2 - 1a	-28 ~ -217	18	2.14	203.53	173.33	± 1.17	$\pm 0.006\ 8$	± 0.53	I
T3 - 2	-250 ~ -340	8.5	2.86	282.86	358.33	± 0.789	$\pm 0.002\ 2$	± 0.358	I
T3 - 12	16 ~ 185	30	2.12	183.60	33.30	± 5.5	± 0.17	± 2.5	II
S2 - 16	-4.79 ~ 37	20	2.18	204.85	119.17	± 1.72	$\pm 0.014\ 4$	± 0.78	I

3 地表变形特征数值模拟分析

根据矿区矿床地形地质图及 460 勘探线—492 勘探线地质剖面图,通过 Rhinoceros 和 griddle 建立矿区三维模型,采用 Flac^{3D} 数值模拟软件模拟矿山的回采、充填过程。

表 3 折减后的矿(岩)体物理力学参数

Table 3 Reduced physical and mechanical parameters of ore (rock) body									
岩体	密度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强度/ MPa	单轴抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa
上盘	2.77	8	88	21 700	0.22	5.02	38	12.9	8.77
矿体	2.72	7	60	28 500	0.28	4.17	36	21.59	11.13
下盘	2.7	8.5	85	38 800	0.21	6.71	36	22.3	16.03
充填体	2.2	0.5				0.84	38	7.3	2.3

1)地表最大下沉值 W_0 为:

$$W_0 = Mq\cos \alpha \tag{1}$$

式中: M 为矿体厚度(m); q 为下沉系数, $q = 0.5 \times (0.9 + p)$,金属矿山地表沉陷的下沉系数显著减小,考虑该矿区充填率达到 50 % 以上,按经验值, q 一般取 0.1; α 为矿体倾角($^{\circ}$)。

2)影响半径 r 为:

$$r = h/\tan \beta \tag{2}$$

式中: h 为开采深度(m); β 为主要影响角($^{\circ}$)。

3)地表最大倾斜率 i_0 为:

$$i_0 = \pm W_0/r \tag{3}$$

4)地表最大曲率 K_0 为:

$$K_0 = \pm W_0/r^2 \tag{4}$$

5)地表最大水平变形值 ε_0 为:

$$\varepsilon_0 = \pm 1.512bW_0/r \tag{5}$$

式中: b 为水平移动系数。

根据上述公式,计算得出的结果见表 2。

3.1 岩体特性参数

依据研究范围内地质资料和现场调查情况,模拟中岩石本构模型采用莫尔 - 库仑塑性模型,对矿山已有的室内岩石试样试验结果参数进行折减,折减后得到的矿(岩)体物理力学参数见表 3。

3.2 采-充过程模拟计算方案

依据研究范围内采场布置情况对实体模型进行区域划分和定义,然后依据150~0 m中段回采和矿房矿柱回采顺序进行采-充过程模拟计算。实际生产过程中,采用废石充填采空区,废石大小不一等导致不能密实接顶,按照96%的充填率,留有高度为矿体厚度4%的间隙,为顶板冒落提供补偿空间,故模拟时采用不接顶充填。

3.3 垂直位移云图分析

矿体开挖后,未充填时围岩垂直位移云图见图1,充填后围岩垂直位移云图见图2。由图1、图2可知:矿体开挖后,围岩应力重新调整,采空区上、下盘围岩出现位移集中,位移以矿体中心为中心向四周位移逐渐减少。对比深部与浅部矿体开采影响,浅部影响较大,充填前后不改变位移分布规律,但数值上有明显降低。

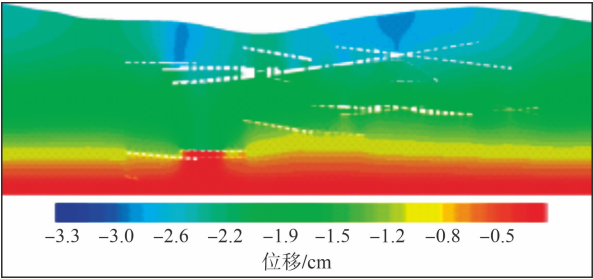


图1 开采后未充填垂直位移云图

Fig.1 Cloud chart of vertical displacement after mining without backfilling

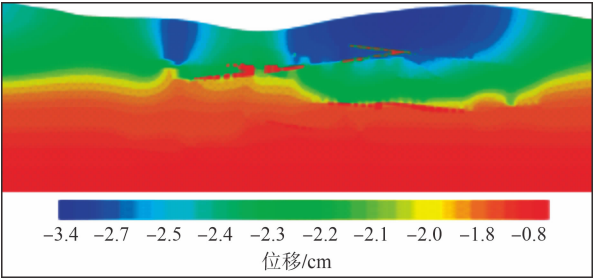


图2 开采后充填垂直位移云图

Fig.2 Cloud chart of vertical displacement after mining with backfilling

通过Flac^{3D}数值模拟软件中的history命令记录150~0 m中段下向矿房矿柱交替采-充过程中上下盘的垂直位移量,结果见表4。由表4可知:矿体在150 m、125 m、100 m、75 m、50 m、25 m、0 m中段以上矿房回采产生的上盘最大垂直位移为-4.7~-28.4 mm,下盘最大垂直位移为-2.7~-22.9 mm;充填后产生的上盘最大垂直位移为-4.2~-24.6 mm,下盘最大垂直位移为-2.5~-21.7 mm。

表4 充填前后上下盘位移

Table 4 Hanging and foot wall displacement before and after backfilling mm

项目		中段						
		150 m	125 m	100 m	75 m	50 m	25 m	0 m
充填前	上盘位移	-28.4	-19.2	-17.2	-20.1	-13.1	-11.2	-4.7
	下盘位移	-22.9	-16.5	-15.9	-18.1	-12	-8.6	-2.7
充填后	上盘位移	-24.6	-18.6	-16.5	-20	-12.7	-10	-4.2
	下盘位移	-21.7	-16.4	-15.8	-15.3	-11.9	-8	-2.5
充填体外围位移		-28.2	-18.8	-17.1	-14	-10	-10	-4.5
充填体核心位移		-6	-4.7	-4.6	-2	-2	-2	-1.8

3.4 地表建(构)筑物安全等级确定

根据GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》,矿区地表建(构)筑物中民房保护等级为Ⅱ级,则采用以下公式确定该安全等级下各参数的值。

1)地表倾斜率计算公式为:

$$i_n = \frac{W_n - W_{n+1}}{L_{n-(n+1)}} \tag{6}$$

式中: i_n 为 n 点处的倾斜率(mm/m); W_n 为 n 点处的下沉值(mm); $L_{n-(n+1)}$ 为地表 n 点与 $n+1$ 点的水平距离(m)。

2)曲率计算公式为:

$$K_n = \frac{i_{n-1} - i_n}{0.5(L_{(n-1)-n} + L_{n-(n+1)})} \tag{7}$$

式中: K_n 为地表 n 点的曲率(m^{-1})。

3)水平变形值计算公式为:

$$\varepsilon_n = \frac{H_n - H_{n+1}}{L_{n-(n+1)}} \tag{8}$$

式中: ε_n 为地表 n 点的水平变形值(mm/m); H_n 为地表 n 点的水平移动值(mm)。

根据上述要求,选取460勘探线、463勘探线、464勘探线、468勘探线、480勘探线、484勘探线、488勘探线、492勘探线剖面,并在其中布置了30个地表监测点,分别记录其在采用房柱采矿法(嗣后充填)回采及不进行充填情况下的垂直位移、水平位移等相关数据。勘探线位置、地表监测点、地表构筑物位置关系见图3。采空区及时充填后监测点的垂直位移变化见图4,采空区未及时充填时监测点的垂直位移变化见图5。

通过数值模拟得到了矿山开采后地表垂直位移、水平位移,进一步对地表变形值进行计算和分析,在位移云图上沿勘探线提取地表位移数据。根据地表位移数据,代入式(6)、式(7)和式(8)进行计算,结果见表5、表6。由表5、表6可知:充填开采后,各勘探线上的地表最大倾斜率为0.063 mm/m,最大曲率为 $1.6 \times 10^{-6} m^{-1}$,地表最大水平变形值为3.7 mm/m,

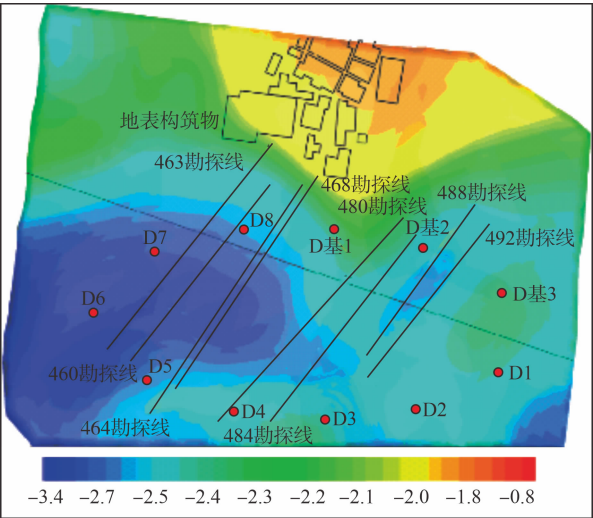


图3 勘探线、地表监测点、地表构筑物位置关系示意图
Fig. 3 Diagram of spatial relationships between exploration lines , surface monitoring points and surface structures

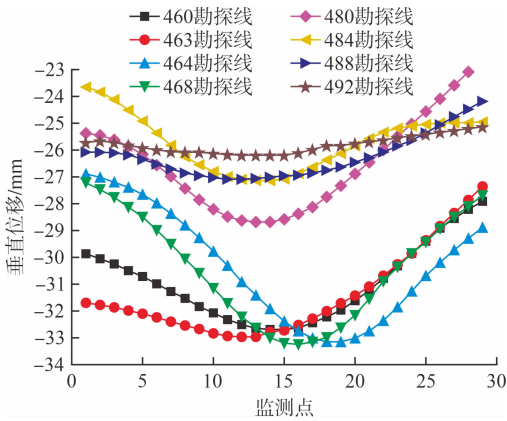


图4 地表监测点垂直位移(采空区充填)
Fig. 4 Vertical displacement of surface monitoring points (backfilled goaf area)

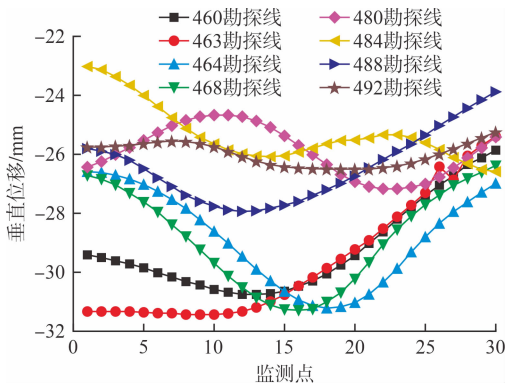


图5 地表监测点垂直位移(采空区未充填)
Fig. 5 Vertical displacement of surface monitoring points (unbackfilled goaf area)

满足Ⅱ级建(构)筑物变形允许值要求。采空区未充填时,各勘探线上的地表最大倾斜率为0.174 mm/m,最大曲率为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$,地表最大水平变形值为6.5 mm/m,满足保护等级Ⅲ级建(构)筑物变形允许

值要求。计算结果表明,矿山采用充填开采后引起的地表变形对地表建(构)筑物影响轻微,并且有效地降低了地表水平变形值,提高了保护等级。

表5 采用房柱采矿法(嗣后充填)开采后地表变形统计结果

Table 5 Statistics of surface deformation after mining using room-and-pillar mining method (subsequent backfilling)				
剖面 编号	最大水平变形值/ (mm·m ⁻¹)	最大倾斜率/ (mm·m ⁻¹)	最大曲率/ (10 ⁻³ ·m ⁻¹)	满足保 护等级
460 勘探线	±3.2	±51×10 ⁻³	±160×10 ⁻⁵	Ⅱ
463 勘探线	±3.7	±53×10 ⁻³	±90×10 ⁻⁵	Ⅱ
464 勘探线	±2.4	±58×10 ⁻³	±140×10 ⁻⁵	Ⅱ
468 勘探线	±2.2	±63×10 ⁻³	±150×10 ⁻⁵	Ⅱ
480 勘探线	±2.8	±50×10 ⁻³	±130×10 ⁻⁵	Ⅱ
484 勘探线	±2.0	±45×10 ⁻³	±120×10 ⁻⁵	Ⅰ
488 勘探线	±2.9	±30×10 ⁻³	±60×10 ⁻⁵	Ⅱ
492 勘探线	±2.9	±14×10 ⁻³	±140×10 ⁻⁵	Ⅱ

表6 采用房柱采矿法(未充填)开采后地表变形统计结果

Table 6 Statistics of surface deformation after mining using room-and-pillar mining method (unbackfilled)				
剖面 编号	最大水平变形值/ (mm·m ⁻¹)	最大倾斜率/ (mm·m ⁻¹)	最大曲率/ (10 ⁻³ ·m ⁻¹)	满足保 护等级
460 勘探线	±5.3	±82×10 ⁻³	±140×10 ⁻⁵	Ⅲ
463 勘探线	±6.5	±174×10 ⁻³	±2 600×10 ⁻⁵	Ⅲ
464 勘探线	±5.0	±108×10 ⁻³	±260×10 ⁻⁵	Ⅲ
468 勘探线	±4.7	±118×10 ⁻³	±280×10 ⁻⁵	Ⅲ
480 勘探线	±5.2	±70×10 ⁻³	±180×10 ⁻⁵	Ⅲ
484 勘探线	±4.5	±74×10 ⁻³	±240×10 ⁻⁵	Ⅲ
488 勘探线	±6.1	±64×10 ⁻³	±160×10 ⁻⁵	Ⅲ
492 勘探线	±6.5	±42×10 ⁻³	±100×10 ⁻⁵	Ⅲ

由表5、表6可知:充填开采后,矿区460勘探线—492勘探线剖面所包含的矿体最大水平变形值为2.0~3.7 mm/m,最大倾斜率为 $14 \times 10^{-3} \sim 63 \times 10^{-3} \text{ mm/m}$,最大曲率为 $60 \times 10^{-8} \sim 160 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ 。对矿区进行连续3年的监测,在3年监测期内,矿区地表测点的沉降量较小(<10 mm),属于毫米级变化,并且实测值与模拟值相符。

这表明矿区地下矿床开采对地表沉降变形影响较小,采空区充填治理效果良好,对地表及后期生产不会造成安全隐患。矿体地下开采并充填后,地表变形不影响周围建(构)筑物的安全,所有建(构)筑物变形都处于其保护等级允许范围内。

4 结 论

本次研究综合采用了理论分析和数值模拟2种方法,得到以下结论:

1)根据矿山开采沉陷理论,通过计算得到了矿

体开采引起的地表最大倾斜率、最大曲率、最大水平变形值,按照 GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》,均小于要求允许值,满足Ⅱ级保护等级要求。

2)综合该矿山实际矿体分布和地表建(构)筑物分布情况,选取了8个剖面作为分析研究对象。数值模拟分析结果表明,地下矿体开采后,会引起覆岩及地表的变形,但并未造成上覆岩层的大范围破坏,故从理论计算角度分析井下开采作业对地表几乎没有影响。

[参 考 文 献]

[1] 何国清. 开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994:228 – 232.

[2] 赵海军,马凤山,丁德明,等. 急倾斜矿体开采岩体移动规律与变形机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1 423 – 1 429.

[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] 张海波,宋卫东. 基于 Flac^{3D} 数值模拟的采空区稳定性分析[J]. 黄金,2013,34(3):31 – 34.

[5] 王伟. 基于 Flac3D 的复杂采空区稳定性分析[J]. 黄金,2021,42(6):41 – 46.

[6] 李文秀,闻磊,刘晓敏,等. 矿区区域性水平移动及其对竖井的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(32):3 926 – 3 931.

[7] 刘彦超,黄武胜,蔡嗣经,等. 托库孜巴依金矿地表沉降与控制数值模拟研究[J]. 黄金,2015,36(5):39 – 42.

[8] 祝泽辉,郭佳宁,陈国涛. 基于 Midas – GTS 的矿山开采对地表村庄沉降分析[J]. 黄金,2017,38(12):35 – 38.

[9] 袁仁茂,马凤山,邓清海,等. 急倾斜厚大金属矿地下开挖岩移发生机理[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):62 – 67.

[10] 张银洲,王鹏飞,杨喆. 采空区地表变形与采深采厚比关系探讨[J]. 陕西煤炭,2011,30(4):19 – 21.

Safety impact of underground mining on surface buildings (structures) in a mine

Liu Weiming¹, Liu Ruimeng², Li Tianhong¹, Jia Yanzhou¹, Xin Mingyu¹

(1. Shandong Yantai Xintai Gold Mining Co., Ltd.;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology – Beijing)

Abstract: To scientifically predict the safety impact of underground mining in mines on buildings (structures) such as villages and residential buildings, and to prevent mining activities from causing damage to buildings (structures), this study utilized the theory of surface rock movement and deformation to calculate the maximum surface subsidence, impact radius, maximum surface inclination rate, maximum surface curvature, and maximum surface horizontal deformation values of the main ore body based on mine geological and design data. The theoretical protection level was determined. Flac^{3D} numerical simulation software was used to simulate the mining process in the mine, analyze and summarize the variation patterns of surface subsidence and deformation. Through theoretical formula calculations, the maximum surface inclination rate, curvature, and horizontal deformation values on the mine area were found to be 0.063 mm/m, $1.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, and 3.7 mm/m, respectively, which are less than the allowable deformation values corresponding to the protection level of surface buildings (structures). The surface deformation values were consistent with the displacement data of the surface monitoring points set up. The research results indicate that, based on mining according to design requirements, the surface deformation caused by mining activities will not pose a threat to the safety of surface buildings (structures), providing a theoretical basis for mine construction and safety production.

Keywords: numerical simulation; surface deformation; buildings (structures) protection; room-and-pillar mining method; subsequent backfilling