深部特大型矿山超大面积开采地表岩移演化规律与井筒稳定性系统分析①

石磊[1]，于振建[1]，王玉丁[2,3]，龚永超[2,3]，林卫星[2,3]，徐敏[1]，陆锦涛[2,3]，栗伟[1]，张庆嵩[2,3]，周雨馨[2,3]
（1.安徽开发矿业有限公司，安徽 合肥 230001；2.长沙矿山研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012；3.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心，湖南 长沙 410012）

摘　要：以国内某特大型铁矿为工程背景，利用 FLAC^{3D}计算和分析了井下超大面积采-充作业诱发的岩移规律，并结合相关规范对地表及井筒的变形程度进行了评价。结果表明：开采扰动区上、下盘矿岩属于岩移集中区域，沉降、隆起峰值位移分别约为 9、6 cm，并呈拱形往地表方向或下盘岩层深处逐步递减，同时深部开采活动易加剧浅部中段岩体变形；地表倾斜、曲率以及水平变形最大绝对值分别为 0.22 mm/m、0.002×10^{-3}/m、0.12 mm/m，均小于相关规范最大允许变形值，表明深部开采不易造成地表建（构）筑物发生倾斜变形破坏，但南、北措施井位于移动带范围之内。进一步的井筒稳定性分析表明，南、北措施井尽管受到开采扰动影响，但井壁倾斜、曲率以及水平变形指标峰值依次为 0.52 mm/m、0.09×10^{-3}/m、0.18 mm/m，变形指标同样未超过相关规范允许值范围；地表主、副井各监测点历年沉降累计最大位移低于 4.6 mm，表明井下超大面积开采对主、副井及其他建（构）筑物的稳定性影响较小。

关键词：采空区；充填采矿；深部开采；特大型矿山；地表岩移；矿山安全；井筒稳定性；沉降监测
中图分类号：TD853　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.008
文章编号：0253-6099（2026）04-0060-07

Evolution Law of Surface Rock Movement and Systematic Analysis of Shaft Stability for Mining of Super-Large Area in Deep Super-Large Mine

SHI Lei[1], YU Zhenjian[1], WANG Yuding[2,3], GONG Yongchao[2,3], LIN Weixing[2,3], XU Min[1], LU Jintao[2,3], LI Wei[1], ZHANG Qingsong[2,3], ZHOU Yuxin[2,3]
(1.*Anhui Development Mining Co., Ltd., Hefei* 230001, *Anhui*, *China*; 2.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 3.*National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: With a domestic super-large iron mine taken as research background, FLAC^{3D} was adopted to calculate and analyze the rock movement law by mining and backfilling operations of underground super-large area, and the deformation degrees of the ground surface and shafts were also evaluated according to relevant standards. It is found that the hanging wall and foot wall in the mining disturbed zone are concentrated within rock movement zones. The peak displacements of subsidence and uplift are approximately 9 cm and 6 cm respectively, which decrease gradually in an arch-shaped pattern toward the ground surface or deep footwall strata. Meanwhile, deep mining activities tend to aggravate the deformation of rock masses in middle sections. The maximum absolute values of surface inclination, curvature and horizontal deformation are 0.22 mm/m, 0.002×10^{-3}/m and 0.12 mm/m, respectively, all less than the maximum allowable deformation values specified in relevant standards. It indicates that deep mining is unlikely to induce tilting deformation of surface buildings (structures), whereas the southern and northern service shafts are located within the movement zones. Further shaft stability analysis reveals that the southern and northern service shafts are subjected to mining disturbances, and the peak values of inclination, curvature and horizontal deformation of shaft wall are 0.52 mm/m, 0.09×10^{-3}/m and 0.18 mm/m respectively, which are also within the permissible limits according to

① **收稿日期**：2026-03-07
基金项目：国家科技重大专项（2025ZD1010701）；中国五矿科技专项计划项目（2023ZXB01，2026ZXB01）
作者简介：石磊（1986—），男，甘肃庆阳人，高级工程师，主要从事金属矿山采矿方法及工艺研究工作。E-mail：460742400@qq.com
通信作者：王玉丁（1993—），男，湖南隆回人，硕士，工程师，主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail：diwangyuding@163.com

relevant standards. The maximum cumulative subsidence over time at each monitoring point of the main and auxiliary shafts to the surface is less than 4.6 mm, which indicates that the underground mining of super-large area exerts slight influences on the stability of the main and auxiliary shafts, as well as other buildings (structures).

Key words: goaf; backfill mining; deep mining; super-large mine; surface rock movement; mine safety; shaft stability; subsidence monitoring

随着浅部金属资源逐渐枯竭,矿产资源开发不断向深部发展,特大型地下矿山大面积开采活动日益增多[1-2]。该类开采活动在地下形成大范围采空区,导致上覆岩层应力重分布,进而诱发岩层移动与地表变形,严重时可危及地表建筑物、道路及井筒等关键设施的稳定与安全[3-4]。充填法作为控制地压和抑制岩移的有效手段,被广泛应用于大型矿山采空区,可在一定程度上减缓围岩变形与地表沉降。然而,即便采用充填处理,大面积充填仍存在一定的岩移隐患,如充填体与围岩协同变形机制复杂、深部开采对浅部岩体的扰动叠加效应显著,以及长期作用下充填体收缩和蠕变可能引发的渐进式地表沉降等问题[5]。

近年来,学者们围绕金属矿充填开采岩移机制开展了大量研究[6-11],其研究方法主要是基于 FLAC^{3D}、有限差分程序和 ANSYS 等数值模拟技术,结合概率积分法与三维地质建模,系统分析充填开采过程中围岩应力分布、变形特征及地表沉降演化规律。现有研究不仅揭示了空场嗣后充填法等工艺对控制围岩变形与地表下沉的有效性,还评估了采动影响下地表河流、道路等设施的稳定性,并为采空区地表变形预测与稳定性评价提供了多项数值方法与理论支持[12-14]。然而,既有成果多针对常规规模采场,对特大型矿山在大面积采-充耦合作用下的岩移响应行为,以及井筒等关键结构物的变形机理与长期稳定性,仍缺乏系统性分析,亟待进一步深入研究。

本文以国内某特大型铁矿为工程背景,聚焦其超大面积开采与充填,结合 FLAC^{3D} 数值模拟与规范评价,系统分析井下采-充作业诱发的岩层移动规律及地表变形特征,重点评价地表建(构)筑物及井筒的稳定性,以期为类似开采条件下的灾害防控与安全评估提供参考。

1　工程背景

国内某特大型铁矿属于隐伏急倾斜厚大盲矿床,矿带长达 4.2 km,平均厚度 50 m。矿床水文地质条件为裂隙水-简单型,工程地质条件为中等偏复杂,环境地质条件为第一类,属于以工程地质问题为主的中等类型矿床。依据矿体开采技术条件,矿山采用竖井+斜坡道联合开拓,开拓系统布置如图 1 所示,设计生产能力 700 万 t/a,采用高阶段空场嗣后充填法进行浅部 -300 m 中段和-400 m 中段矿体回采,采场垂直矿体走向布置,一、二步骤采场跨度均为 20 m,分段高度 25 m,中段高度 100 m。矿山仅在矿体中心区域间隔 200~300 m 留设 4 个矿房作为暂留区域间柱,其余矿体均采用充填法开采,属于超大面积开采。随着浅部中段开采进入后期,为维持矿山供矿稳定,深部-625 m 和 -525 m 中段即将实施大规模开采。此类超大面积开采活动易引起覆岩应力剧烈重分布,诱发充填体与围岩系统发生协同变形。尽管井筒(如措施井、主副井)通常布置于矿体下盘相对稳定岩层中,与矿体保持一定距离,但在深部高强度开采扰动下,岩移影响范围可能扩展至远场,导致井筒围岩发生附加变形,严重影响其竖向承载与运行安全。尤其南、北措施井已处于地表移动监测范围内,需重点关注其长期稳定性。为有效控制岩移并保障井筒安全,矿山采用不同配比的充填体充填采空区,其中,灰砂比1∶4时,充填体 60 d 抗压强度为 4.20 MPa,灰砂比 1∶6 时抗压强度为 2.07 MPa,灰砂比 1∶8时抗压强度为 1.35 MPa。

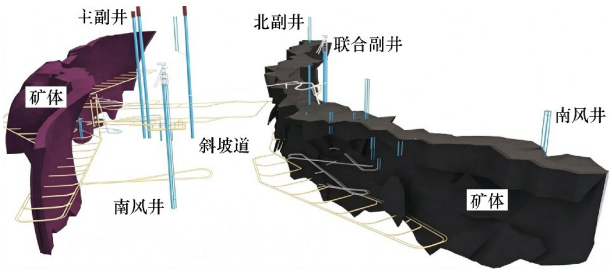


图 1　开拓系统布置图

Fig. 1　Layout of development system

2　数值计算模型构建

2.1　三维计算模型

矿体上盘围岩主要是白云石大理岩、辉绿岩、黑云斜长片麻岩,下盘围岩主要是白云石大理岩、绿泥石片岩和云母片岩,上、下盘围岩综合普氏系数分别为 8.1、3.7。采用类比法,参考类似矿山的岩移资料,综合分析得出开采岩石移动角中第四系覆土的移动角为 45°,上、下盘以及走向岩层移动角均为 75°。依据上

述移动角,按开采至-525 m 水平圈定地表移动范围。地表影响区域内的主要对象包括 24 线南措施井和 24 线北措施井,如图 2 所示。

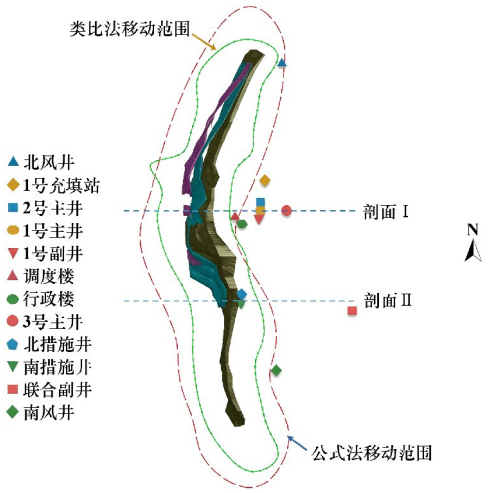


图 2 地表稳定性分析研究范围

Fig. 2 Scope for surface stability analysis

结合研究矿区开采地质条件与现场工程实际工况,借助 midas GTS NX 软件完成三维地质数值模型搭建,建模区域完整覆盖矿区主矿脉与全部采场分区,如图 3 所示。模型 X 轴方向为垂直矿体走向方向,长度 2 300 m;模型 Y 轴方向为平行矿体走向方向,长度 7 000 m,模型高为 856 m(标高-800~+56 m)。内部矿体与南、北措施井分布情况见图 4。

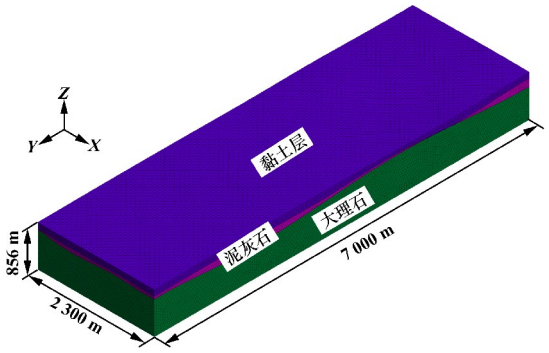


图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

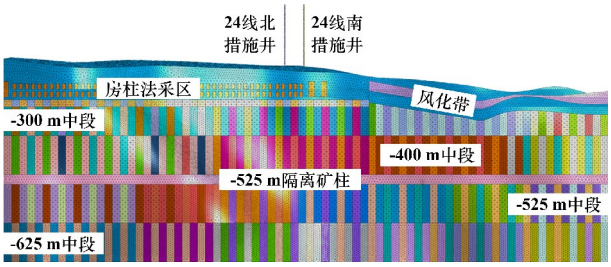


图 4 部分矿体与井筒模型

Fig. 4 Model of partial ore body and shaft

2.2 边界条件及初始应力

模型 4 个侧面限制水平方向移动,底面限制垂直方向移动,顶面为自由面。矿区原岩应力测试获取的最大主应力 σ_1、中间主应力 σ_2 与最小主应力 σ_3 随埋深变化的回归曲线见图 5,其中,垂直方向应力与第二主应力相近,由模型自重应力生成即可,模型 X 轴、Y 轴方向应力分别根据最大主应力 σ_1、最小主应力 σ_3 回归方程施加。

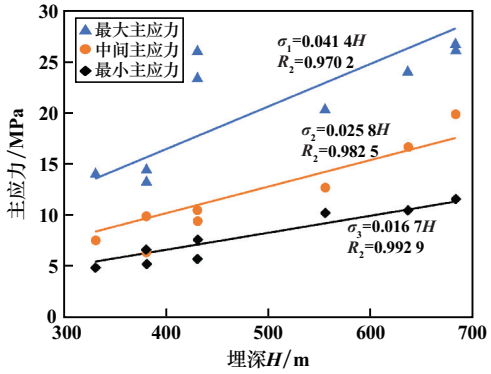


图 5 矿区主应力随埋深的回归曲线

Fig. 5 Regression curves of principal stress vs. burial depth in mining area

2.3 矿岩物理力学参数

采用莫尔-库仑屈服准则构建数值计算模型。依据矿区提供的矿岩物理力学试验和岩体质量分级结果,采用 Hoek-Brown 准则对试验力学参数进行折减,GSI 值采用换算法、Q 法以及图表法进行综合确定,限于篇幅,详细折减过程不予阐述。最终得到可用于数值模拟计算的岩体力学参数,见表 1。

2.4 数值计算过程

为揭示矿山超大面积开采条件下地表稳定性规律,结合矿山储量年报及开采规划,本次模拟的各中段采场回采顺序均从中间向两侧依次推进,整体采用二步骤回采工艺,实行“隔一采一”。一步矿房回采结束后及时实施充填,待充填体达到设计强度后,再回采二步矿柱。受采场数量限制,本次仅展示各中段的整体回采顺序。计算步骤如下:① 计算模型在给定力学本构模型、应力及边界条件下的初始应力状态;② 模拟开采-400 m 中段采场;③ 模拟开采-300 m 中段采场;④ 模拟开采-625 m 中段采场;⑤ 模拟开采-525 m 中段采场。

为了便于分析矿岩位移分布规律,同时结合地表重要建(构)筑物分布情况,布置了Ⅰ、Ⅱ号重要分析剖面,剖面位置见图 2。

表 1　岩体力学参数

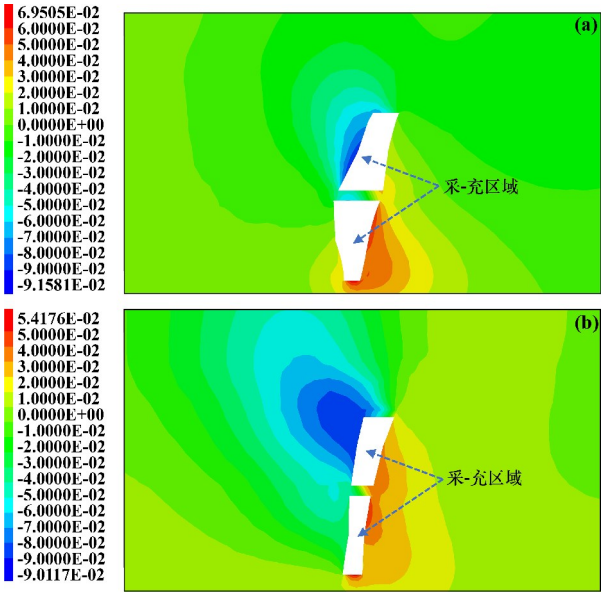
Table 1　Mechanical parameters of rock mass

岩体种类	密度/(g·cm^{-3})	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	变形试验		抗剪试验	
				弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
黏土层	1.90	3.75	0.10	5.55	0.35	3.90	22.00
泥灰岩	2.50	16.32	1.30	2.10	0.33	2.32	37.00
片麻岩	2.69	13.49	0.30	4.49	0.27	3.54	34.69
大理岩	2.70	14.12	0.28	10.12	0.24	4.06	30.21
镜铁矿	3.26	43.37	1.86	31.62	0.20	8.20	35.37
高强度充填体	1.77	3.33	0.33	0.84	0.31	0.30	37.00
低强度充填体	1.78	0.93	0.12	0.61	0.33	0.17	38.00

3　数值计算结果分析

3.1　岩移规律分析

对各中段采场进行采-充数值计算,全部采-充活动结束后,Ⅰ号和Ⅱ号剖面沉降位移见图 6。



(a) Ⅰ号剖面;(b) Ⅱ号剖面

图 6　各中段采-充结束后Ⅰ号和Ⅱ号剖面沉降位移(单位:m)

Fig. 6　Subsidence at profiles Ⅰ and Ⅱ after completion of mining-filling in each middle section

开采扰动区上、下盘围岩发生明显变形,属于岩移集中区域,并呈拱形往地表方向或下盘岩层深处逐步递减。其中,上盘岩体的变形特征为下沉,Ⅰ号和Ⅱ号剖面上盘最大沉降位移量均为 9 cm 左右;下盘岩体的变形特征为隆起,Ⅰ号和Ⅱ号剖面下盘最大隆起位移量均为6 cm左右。同时,浅部-300 m 和-400 m 中段上盘沉降变形程度明显高于深部-525 m 和-625 m 中段,表明浅部中段易受深部开采活动影响,导致岩体变形进一步加剧,故在实际生产中需严格控制浅部中段充填体强度和质量,避免因充填体失稳而导致上盘岩体变形再次增长,从而威胁地表建(构)筑物稳定。

3.2　地表岩移影响分析

地下开采引发的地表沉降与移动范围是评估矿区建(构)筑物安全性的核心依据。目前金属矿山地表移动带的界定主要依托两类经典工程方法:一类是基于同类型矿山实测数据的工程类比法,另一类是通过岩体移动角经验取值计算的经验公式法。两类方法均依托长期工程经验取值,计算结果通常留有较高的安全余量。为系统评估地表扰动特征,此次同步采用工程类比法与数值模拟方法开展测算。

3.2.1　地表沉降位移

各中段采-充结束后,地表竖向位移如图 7 所示。

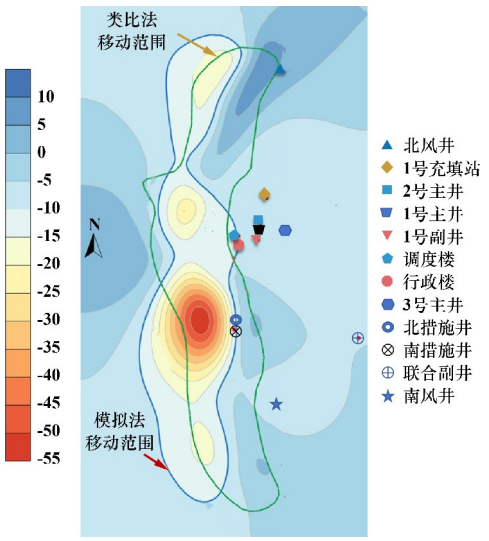


图 7　地表竖向位移图(单位:mm)

Fig. 7　Vertical displacement map of ground surface

由图 7 可知,地表发生明显沉降位移和水平位移,其中,地表最大沉降位移量为 5.5 cm,位于南、北措施井西侧农田附近。依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)[15],将地表下沉量大于 1 cm 的区域圈定为地表下沉移动带。数值模拟圈定的地表移动带范

围小于工程类比法圈定的地表移动带范围。同时,受深部超大面积开采影响,办公区处于圈定的移动带边缘,但实际沉降远低于地面建筑沉降安全限值,结构风险可控;矿区勘探线 24 线附近的南、北措施井位于移动带范围内,井筒对地表倾斜、不均匀变形的敏感度远高于地面建筑,微小变形就可能影响井筒运行,因此需对措施井的稳定性做进一步分析。

3.2.2 地表倾斜和曲率变形

提取数值模拟计算的地表竖向位移数据,导入 Surfer 软件中进行一阶、二阶求导处理,获得地表倾斜和曲率变形图,分别见图 8、图 9。

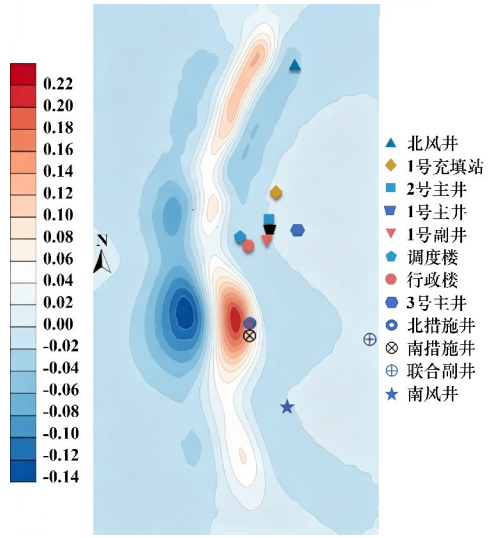


图 8 地表倾斜变形图(单位:mm/m)

Fig. 8 Surface tilt deformation

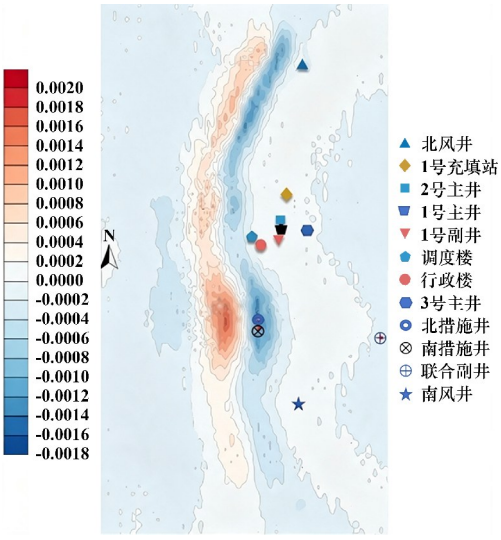


图 9 地表曲率变形图(单位:10^{-3}/m)

Fig. 9 Surface curvature deformation

由图 8、图 9 可知,地表倾斜变形为 -0.14 ~ 0.22 mm/m,地表曲率变形为(-0.001 8 ~ 0.002 0)× 10^{-3}/m,地表倾斜和曲率变形最大值均分布在矿区农田区域,且靠近 24 线南、北措施井。依据《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)[16],最高等级建(构)筑物的最大允许倾斜、曲率变形值分别为 ±3 mm/m、±0.2×10^{-3}/m,地表建(构)筑物的倾斜和曲率变形值均未超过规范允许值,表明井下大规模开采不易造成地表建(构)筑物发生倾斜和曲率变形破坏。

3.2.3 地表水平变形

通过处理数值模拟计算的地表 X 和 Y 方向位移数据,得到地表水平变形图,如图 10 所示。地表水平变形为-0.12~0.08 mm/m,最大值分布在矿体上盘正上方的农田区域。依据《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)[16],最高等级建(构)筑物的最大允许水平变形值为±2 mm/m,故从水平变形来看,地表建(构)筑物的水平变形值未超过规范允许值,表明井下大规模开采不易造成地表建(构)筑物发生水平变形破坏。

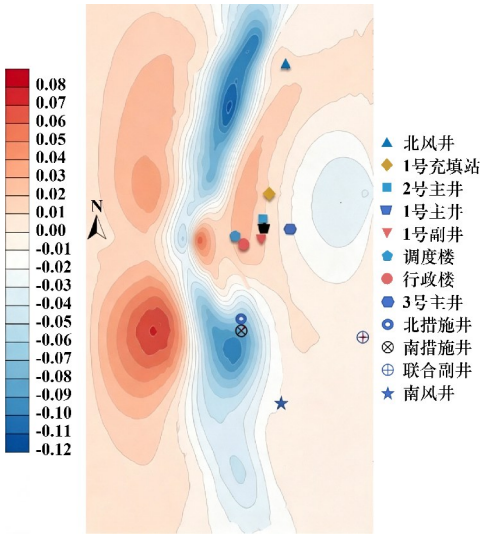


图 10 地表水平变形图(单位:mm/m)

Fig. 10 Surface horizontal deformation

3.3 措施井稳定性分析

因措施井位于地表移动监测范围之内,需进一步分析措施井的稳定性情况。竖井井筒主要变形破坏形式包括轴向的拉伸或挤压破坏、井筒中心线的偏转和弯曲、井壁错动和径向水平挤压引起的井壁破坏,井筒稳定性分析主要分析地下开采过程中井筒的竖向拉伸和压缩破坏变形情况[17-19]。为便于分析和计算措施井井壁的倾斜、曲率和竖向变形值,从井口开始沿着井壁同一垂向上每间隔 10 m 布置 1 个监测点,南、北措施井各布置了 30 个监测点。各中段采场采-充结束后,通过 fish 命令获取监测点的位移数据,数据处理后

得到南、北措施井井壁倾斜、竖向变形以及曲率变形情况,如图 11~13 所示。

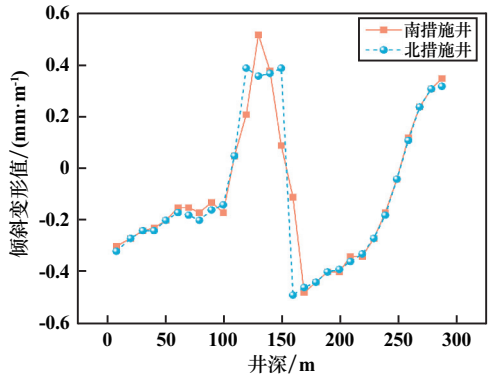


图 11　南、北措施井倾斜变形

Fig. 11　Tilt deformation of southern and northern service shafts

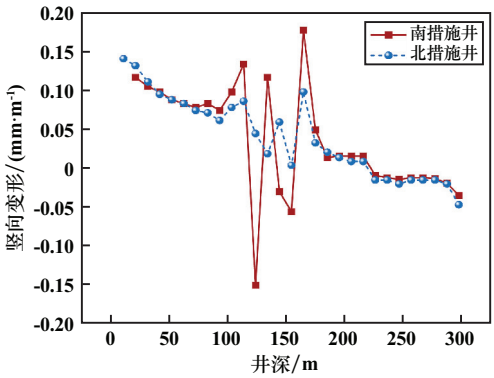


图 12　南、北措施井竖向变形

Fig. 12　Vertical deformation of southern and northern service shafts

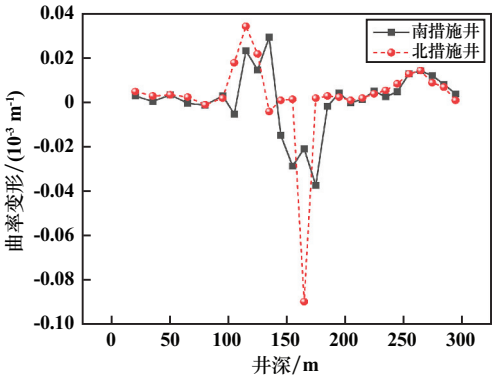


图 13　南、北措施井曲率变形

Fig. 13　Curvature deformation of southern and northern service shafts

南、北措施井因开采扰动影响产生了一定程度的变形,其中南措施井最大倾斜变形绝对值为 0.52 mm/m,最大竖向变形绝对值为 0.18 mm/m,最大曲率变形绝对值为 0.038×10^{-3}/m;北措施井最大倾斜变形绝对值为 0.50 mm/m,最大竖向变形绝对值为 0.14 mm/m,最大曲率变形绝对值为 0.09×10^{-3}/m,均未超过《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)[16] 规定的Ⅰ级保护建(构)筑物的变形允许值,表明井筒不易发生较为明显的变形破坏。此外,从井壁变形位置来看,整体上南、北措施井中间离开采扰动区最近位置的变形程度相对最大,实际生产中需要注意这部分区域矿体的单段最大药量和爆破振动控制。

4　地表沉降监测分析

矿山自 2016 年 8 月开始实施井塔监测,监测位置及对应序号如表 2 和图 14 所示。地表井塔 Z 轴方向位移监测曲线如图 15 所示。沉降监测结果表明:2021—2025 年期间,各监测点沉降累计位移为 0~4.6 mm。因深部-525 m 及-625 m 中段尚处开拓阶段,该监测数据仅代表-400 m 水平以上矿体开采所引发的地表岩移效应,但从模型开采-300 m 和-400 m 中段的矿体来看,主副井区域的沉降变形在 0~3 mm 范围内,与监测结果整体比较吻合,侧面反映了仿真模型比较符合现场实际情况,而深部-525 m 和-625 m 中段矿体开采之后,这部分区域的沉降位移在 5~8 mm 之间,说明主、副井受开采扰动影响较小,整体均处于稳定状态,侧面印证了数值模拟的准确性。

表 2　地表监测点及其序号

Table 2　Surface monitoring points and corresponding serial numbers

监测点序号	监测位置
①	1 号副井西南角
②	1 号副井东南角
③	1 号主井东南角
④	1 号主井西南角
⑤	1 号主井东北角
⑥	2 号主井西南角
⑦	2 号主井西北角
⑧	3 号主井东南角
⑨	3 号主井西南角
⑩	3 号主井东北角

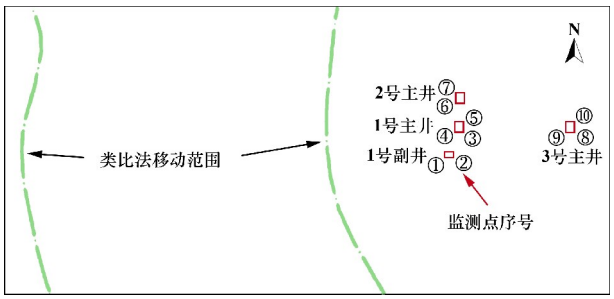


图 14　地表监测点位置

Fig. 14　Locations of surface monitoring points

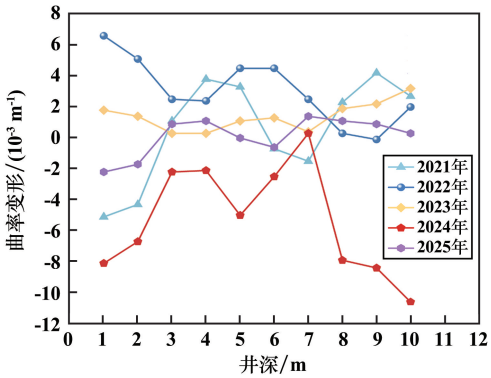


图 15 地表井塔 Z 轴方向位移监测曲线

Fig. 15 Z-axis displacement monitoring curves of surface shaft tower

5 结论

1）开采扰动区上、下盘矿岩属于岩移集中区域，呈拱形往地表方向或下盘岩层深处逐步递减；浅部中段受深部开采叠加影响变形加剧，需严格控制浅部充填体强度与质量，避免因充填体失稳而导致上盘岩体变形再次增长，从而威胁地表建(构)筑物稳定。

2）该深井矿山井下大规模开采对地表影响整体可控，地表最大沉降 5.5 cm，地表倾斜、曲率、水平变形最大绝对值分别为 0.22 mm/m、0.002 × 10^{-3}/m、0.12 mm/m，均远低于Ⅰ级建构筑物规范允许值，地表建筑整体安全可控。以 1 cm 沉降阈值圈定的数值模拟移动带范围显著小于传统类比法圈定的范围，24 线南、北措施井位于移动带内，需重点关注。

3）南、北措施井最大倾斜变形绝对值分别为 0.52、0.50 mm/m，最大竖向变形绝对值分别为 0.18、0.14 mm/m，最大曲率变形绝对值分别为 0.038×10^{-3}/m、0.09×10^{-3}/m，均满足规范Ⅰ级保护要求。地表井塔长期监测累计沉降为 0~4.6 mm，与浅部开采模拟结果契合度较好；深部-525、-625 m 中段矿体开采后，主、副井受扰动仍较小，整体均处于稳定状态。

参考文献(References)：

[1] 杨闯. 某特大型金属地下矿山阶段空场嗣后充填采矿法矿块布置形式优化与研究[J]. 矿业工程, 2025,23(3):20-23.
Yang Chuang. Optimization and research on layout of ore blocks of stage-wise open stoping mining method with subsequent backfill in a super-large metal underground mine[J]. Mining Engineering, 2025, 23(3):20-23.

[2] 王子介,崔宇,胡世超,等. 大型地下矿山采场开挖矿岩稳定性相似材料:数值模拟耦合分析方法[J]. 金属矿山, 2025(2):81-85.
Wang Zijie, Cui Yu, Hu Shichao, et al. Analytical study on the stability of ore rock in the disk area during large-scale underground mining based on similar material test[J]. Metal Mine, 2025(2):81-85.

[3] 周科平,曹立雄,李杰林,等. 复杂采空区群稳定性数值分析及安全分级评价[J]. 黄金科学技术, 2022,30(3):324-332.
Zhou Keping, Cao Lixiong, Li Jielin, et al. Stability numerical analysis and safety classification evaluation of complex goaf group[J]. Gold Science and Technology, 2022,30(3):324-332.

[4] 刘建博,付建新,王灵,等. 充填法开采矿体三维模型构建及井筒稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):18-21.
Liu Jianbo, Fu Jianxin, Wang Ling, et al. Three-dimensional model construction and shaft stability analysis for filling mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):18-21.

[5] 苏华友,王永定,谭宝会,等. 大面积胶结充填体诱导冒落机理及其发展过程研究[J]. 黄金科学技术, 2022,30(5):713-723.
Su Huayou, Wang Yongding, Tan Baohui, et al. Study on induced caving mechanism and development process of large area cemented backfill[J]. Gold Science and Technology, 2022,30(5):713-723.

[6] 廖文斌,段雁飞,段佳乐. 金属非金属地下矿山采空区治理措施研究[J]. 四川水力发电, 2023,42(增刊2):91-93.
Liao Wenbin, Duan Yanfei, Duan Jiale. Study on treatment measures for the goaf areas in metal and non-metal underground mines[J]. Sichuan Water Power, 2023,42(S2):91-93.

[7] Ashraf T, Yin F, Liu L, et al. Land subsidence detection using SBAS- and stacking-InSAR with zonal statistics and topographic correlations in Lakhra coal mines, Pakistan[J]. Remote Sensing, 2024, 16(20):3815.

[8] Jeon B, Jeong H, Choi S, et al. Assessment of subsidence hazard in abandoned mine area using strength reduction method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022,26(10):4338-4358.

[9] Tripolitsiotis A, Steiakakis C, Papadaki E, et al. Complementing geotechnical slope stability and land movement analysis using satellite DInSAR[J]. Open Geosciences, 2014,6(1):56-66.

[10] 郭晓强,王刚,黄敏,等. 相邻矿体临界开采范围的确定方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):26-31.
Guo Xiaoqiang, Wang Gang, Huang Min, et al. Determination of critical mining scope of adjacent orebody[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):26-31.

[11] 谷雷. 基于 InSAR 的矿区地表沉陷监测与趋势预测研究[D]. 廊坊:华北科技学院, 2023:13-20.
Gu Lei. Research on surface subsidence monitoring and trend prediction in mining area based on InSAR[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2023:13-20.

[12] 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.
Gu Zhongyuan, Cao Miaocong, Qin Hongyu, et al. Numerical analysis of surface subsidence induced by backfill mining[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023,13(2):109-115.

[13] 马相松. 基于 FALC^{3D}的某铜矿地下开采对地表稳定性的影响分析[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2022(1):15-20.
Ma Xiangsong. Influence underground mining on surface stability of based on FALC^{3D} in a copper mine[J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2022(1):15-20.

(下转第 73 页)

[9] Song J F, Lu C P, Zhang X F, et al. Damage mechanism and wave attenuation induced by blasting in jointed rock[J]. Geofluids, 2022, 2022:6950335.

[10] 张召冉,陈华义,矫伟刚,等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. 煤炭学报, 2020,45(增刊 2):791-800.
Zhang Zhaoran, Chen Huayi, Jiao Weigang, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(S2):791-800.

[11] 蒋克文,王海亮,郭建,等. 大空孔直眼掏槽有效应力分布规律模拟研究[J]. 煤炭技术, 2023,42(7):30-34.
Jiang Kewen, Wang Hailiang, Guo Jian, et al. Numerical simulation of effective stress distribution law of large hollow hole straight hole cutting[J]. Coal Technology, 2023,42(7):30-34.

[12] 赵艳伟,邰成群,孙进辉,等. 大直径空孔对掏槽爆破效果的影响机理研究[J]. 有色金属工程, 2024,14(8):164-173.
Zhao Yanwei, Tai Chengqun, Sun Jinhui, et al. Study on the influence mechanism of large diameter empty hole on cutting blasting effect[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024,14(8):164-173.

[13] 杨仁树,张召冉,安晨,等. 煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2020,48(1):10-23.
Yang Renshu, Zhang Zhaoran, An Chen, et al. Discussion on ultra-deep depth problem of slot hole in blasting excavation of rock roadway in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020,48(1):10-23.

[14] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社, 2013.
Dai Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

[15] 王明洋,钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995,17(2):42-46.
Wang Mingyang, Qian Qihu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995,17(2):42-46.

[16] 潘博,汪旭光,徐振洋,等. 节理角度对岩石材料的动态响应影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(3):566-575.
Pan Bo, Wang Xuguang, Xu Zhenyang, et al. Research on the effect of joint angle on dynamic responses of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(3):566-575.

[17] 谷亚州,史秀志,刘文华,等. 上向中深孔掏槽爆破炮孔布置方式优化研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):24-28.
Gu Yazhou, Shi Xiuzhi, Liu Wenhua, et al. Optimization of blast-hole layout in upward cutting blasting with medium hole length[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):24-28.

[18] 王志东. 基于爆破漏斗试验在马坑铁矿 VCR 成井爆破技术中的应用[J]. 现代矿业, 2023,39(1):76-80.
Wang Zhidong. Application of VCR blasting technology in Makeng iron mine based on blasting funnel test[J]. Modern Mining, 2023, 39(1):76-80.

[19] Wang H, Liu C, Zhang X, et al. Influence of wave impedance of backfill medium on explosive stress wave propagation and rock mass damage evolution[J]. Scientific Reports, 2025,15(1):35362.

引用本文:罗佳,张豪,高鹏飞. 基于中心孔超深的破碎围岩直眼掏槽爆破技术研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):67-73.
Luo Jia, Zhang Hao, Gao Pengfei. Burn cut design with ultra-deep central hole for fractured surrounding rock[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):67-73.

(上接第 66 页)

[14] 陈凯,陈清通,孙庆先,等. 基于 FLAC^{3D} 和概率积分法的公路下伏采空区变形影响分析与评价[J]. 能源与环保, 2024,46(2):262-268.
Chen Kai, Chen Qingtong, Sun Qingxian, et al. Analysis and evaluation of deformation influence of underlying goaf on highway based on FLAC^{3D} and probability integral method[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024,46(2):262-268.

[15] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
GB 50021—2001 Code for geotechnical engineering investigation[S].

[16] GB 50771—2012 有色金属采矿设计规范[S].
GB 50771—2012 Code for design of non-ferrous metal mining[S].

[17] 严荣富. 采动-断层双重影响下竖井变形破坏规律及机制研究[D]. 北京:北京科技大学,2023:3-6.
Yan Rongfu. Study on the law and mechanism of shaft deformation and failure under the dual influence of mining and fault[D]. University of Science and Technology Beijing,2023:3-6.

[18] 高亚林,和乾元,李翠平,等. 金川矿区龙首矿西二副井 1240~1120 m 段井筒破坏机理分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23):9814-9822.
Gao Yalin, He Qianyuan, Li Cuiping, et al. Analysis of shaft failure mechanism in the 1240~1120 m section of Xi'er auxiliary shaft in Longshou mine of Jinchuan deposit[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(23):9814-9822.

[19] 王利,高谦,肖卫国. 金川Ⅲ矿区主井工程变形分析与稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2007,27(4):1-5.
Wang Li, Gao Qian, Xiao Weiguo. Deformation analysis and stability assessment of main shaft of minefield Ⅲ, Jinchuan Corp[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2007,27(4):1-5.

引用本文:石磊,于振建,王玉丁,等. 深部特大型矿山超大面积开采地表岩移演化规律与井筒稳定性系统分析[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):60-66.
Shi Lei, Yu Zhenjian, Wang Yuding, et al. Evolution law of surface rock movement and systematic analysis of shaft stability for mining of super-large area in deep super-large mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):60-66.