

地表沉降

矿山老采空区及开采扰动共同作用下 地表建(构)筑物稳定性研究

Study on the Stability of Surface Buildings (Structures) under the Combined Action
of Old Mined-Out area And Mining Disturbance in the Mine

史 铭¹, 粟登峰², 谭宝会², 胡颖鹏², 王 刚¹, 李 坤²

(1. 金川集团工程建设有限公司矿山工程分公司, 甘肃 金昌 737102;

2. 西南科技大学, 环境与资源学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:为研究某地表建(构)筑物在矿山老采空区及二期开采工程扰动影响下的稳定性,本文首先采用3Dmine-犀牛-Griddle-FLAC3D耦合建模技术建立了含老采空区的矿山三维数值计算模型,随后根据矿山二期开采工程设计按“矿体中段内由上向下,中段内由下向上逐层开采”的顺序模拟了矿山生产过程,最后分析了矿山老采空区和开采扰动作用下地表建(构)筑物的稳定性。研究表明:矿体回采、充填完毕后,矿山2#竖井、3#竖井和1#盲风井边壁围岩最大水平位移为4 mm,且井壁围岩最大水平变形为 3.8223×10^{-2} mm/m,地表建(构)筑物最大倾斜值为 -6.0958×10^{-2} mm/m,最大曲率为 -9.6682×10^{-7} /m,最大水平变形为 1.8821×10^{-2} mm/m,均满足I级建(构)筑物保护要求,即现有老空区条件和二期开采扰动下邻近竖井井筒及地表建(构)筑物能保持稳定状态,满足安全生产要求。研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词:老采空区;竖井井筒;地表建(构)筑物

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2025)05-0001-06

Abstract:In order to study the stability of a surface building (structure) under the influence of the old mined-out area and the disturbance of the second-stage mining project, this paper firstly uses the 3Dmine-rhinoceros-Griddle-FLAC3D coupling modelling technology to establish a three-dimensional numerical calculation model of the mine. Then, according to the design of the second-stage mining project of the mine, the mine production process is simulated according to the order of mining from top to bottom in the middle section of the ore body and mining from bottom to top in the middle section. Finally, the stability of the surface building (structure) under the old goaf and mining disturbance is analysed. The results show that after the mining and filling of the ore body is completed, the maximum horizontal displacement of the surrounding rock of the 2# shaft, 3# shaft and 1# blind air shaft of the mine is 4 mm, and the maximum horizontal deformation of the surrounding rock of the shaft wall is 3.8223×10^{-2} mm/m, the maximum tilt value of the surface building (structure) is -6.0958×10^{-2} mm/m, the maximum curvature is -9.6682×10^{-7} /m, and the maximum horizontal deformation is 1.8821×10^{-2} mm/m, which all meet the protection requirements of the first-class building (structure). That is to say, the existing old goaf conditions and the adjacent shaft and surface buildings (structures) under the second-stage mining disturbance can maintain a stable state and meet the requirements of safe production. The research results can provide reference for similar projects.

Key words: old mined-out area; mine shaft; mine surface buildings (structure)

1 前言

地下矿山的运营离不开竖井井筒及其地表设施的支撑,它们在整个矿山生命周期内扮演着不可或缺的角色,是连接各项生产活动的纽带^[1]。井筒的稳固性对于矿石提升、人员设备运输、通风换气及排水等作业至关重要^[2]。但在进行深部矿产开采时,井筒可能会因矿体开采而受损变形,给矿山企业造成严重的经济损失和潜在的人员安全风险^[3]。因

[作者简介] 史铭(1990—),男,高级工程师,主要从事采矿工程和矿山工程技术研究和管理工作。

[基金项目] 四川省自然科学基金(编号:2022NSFSC1089)“高地应力下裂隙岩体爆破损伤及定向致裂机理”

[引用格式] 史铭,粟登峰,谭宝会,等. 矿山老采空区及开采扰动共同作用下地表建(构)筑物稳定性研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(5):1-6+23.

此,深入探究深部矿体开采对井筒稳定性产生的潜在影响,对保障矿山安全生产环境具有重要意义。

随着数值建模技术的不断发展许多研究人员对于复杂条件下矿山三维模型建立与分析积累了丰富的经验和数据,为矿山全生命周期开采下地表与地下工程的安全性稳定性分析提供可靠的帮助。例如马宏伟等^[4]通过使用3DMine-FLAC3D数值分析及建模软件分析了矿体位移规律和深部开采对地表的影响,建立了阜山整合矿区的三维数值计算模型;马凤山等^[5]采用数值模拟的手段对望儿山矿区浅部复采引起的岩体移动变形及其对竖井井筒的稳定性进行了研究,得到了望儿山矿区复采过程中岩体应力场和位移场的变化规律,对矿山维护竖井的稳定起到了很大的作用;张飞等^[6]利用PFC-FLAC3D软件对鑫达金矿13号脉65°岩移角圈定竖井保安矿柱保安矿柱进行优化,有效解决了按移动角圈定保安矿柱时压矿严重的问题;王胜开等人^[7]采用FLAC3D数值模拟技术,确定了在高应力深部条件下盲竖井井筒的支护方案及其具体参数,为复杂岩体在深部高应力环境下的开采活动提供了理论支撑;胡盼庆^[8]通过关键层理论,运用Midas软件进行数值模拟,研究了不同结构类型的关键层地表位移的相关规律;付俊^[9]基于数值模拟与现场调查结果进行综合分析,验证了沉降量大的隐患位置,并对充填前后的效果进行了对比。

基于上述研究者们对于矿山三维建模分析技术的研究的基础上,为探究老采空区及二期开采工程扰动联合作用下矿山竖井井筒及地表建(构)筑物的稳定性,本文采用3DMine-犀牛-Griddle-FLAC3D耦合建模软件,建立了矿区三维数值计算模型,根据矿房的划分、空区充填情况、井筒矿柱留设尺寸,通过模拟底部矿体开挖及充填,研究了地表及竖井不同剖面上的围岩的位移发展规律,并分析了矿山开采对地面构筑物稳定性的影响。研究结果可为类似矿山开采地表及井筒安全性稳定性分析提供有益的参考。

2 工程背景

某金矿生产规模为金矿石6万t/a,服务年限10a。采用上向水平分层尾砂充填采矿法。采用竖井开拓,其中3#竖井作为提升竖井及进风井,利用2#竖井、1#竖井分别作为北翼、南翼回风井,与3#竖井构成两翼对角式通风系统。现已开拓中段有+47m、+6m、-33m、-63m、-93m、-123m、-163m

和-203m中段,-63m以下中段工程主要在主井东北侧。矿山目前开采对象为I-1、II-1、II-2、III-1号矿体。其中I-1、II-1、II-2号矿体大部采空,III-1号矿体已回采至+6m水平;目前在+6~-123m中段进行采矿作业。根据矿山生产资料,矿区采空区主要分为三部分,编号分别为CKQ-1、CKQ-2、CKQ-3,采空区信息见表1,采空区地表投影位置如图1所示。

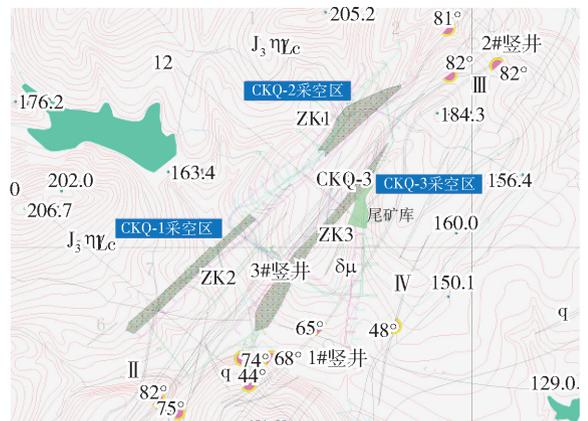


图1 矿山采空区分布位置投影平面图

表1 矿山采空区信息

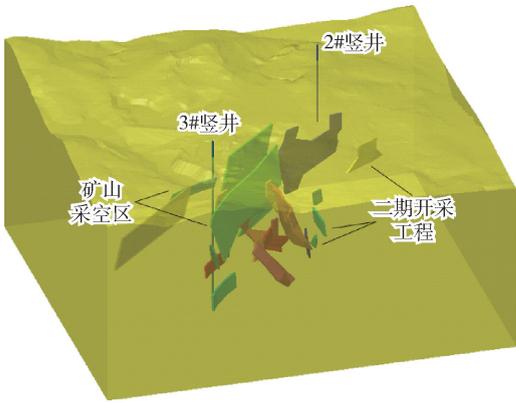
编号	结构尺寸	埋深	水平投影面积
CKQ-1	长约288m,宽1.00~2.80m	95~136m	5 128 m ²
CKQ-2	长约190m,宽0.80~1.40m	118~159m	5 046 m ²
CKQ-3	长约400m,宽0.80~1.50m	122~222m	8 040 m ²

3 矿山三维数值模型

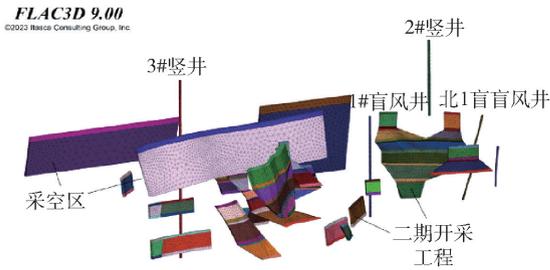
3.1 模型构建

运用3DMine三维数字化矿山软件对矿山所提供的地表地形图、矿体平面图与剖面图,以及当前矿山生产实际状况加以处理,在具备真实坐标信息的虚拟三维空间里构建地表模型、矿体模型(图2所示)、竖井模型以及已开采采场的空间形态模型,进而综合搭建精细的矿区三维地质模型;接着借助犀牛-Griddle-FLAC3D耦合建模方式,把三维地质模型转化成可用于FLAC3D程序计算的三维有限元网格计算模型。

数值模型计算尺寸为:东西方向长1 000m,南北方向长900m,模型底面取海拔-300m,模型最大高度为220m,共有3 354 582个单元,581 528个节点。计算过程采用Mohr-Coulomb本构模型,边界约束条件为,模型四周约束水平位移,模型底部约束垂直位移,上部地表为自由表面。



(a) 矿山三维数值模型



(b) 采场及竖井井筒模型

图2 某金矿三维数值模型

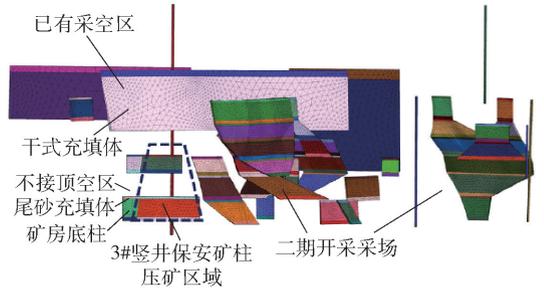


图3 矿区FLAC3D分步回采矿房结构图

3.2 岩体物理力学参数

矿区岩体岩性主要为二长花岗岩(围岩)、钾化碎裂状花岗岩(矿体上下盘)及绢英岩化碎裂状花岗岩(矿层),其物理力学参数需按岩石力学性能测试结果表选取。在此基础上,结合矿山生产实际情况,确定了矿山地下工程岩体 GSI 值。随后,将矿山地下工程岩石力学参数与 GSI 值输入 RocLab 软件,通过 GSI 指标结合 Hoek-Brown 准则开展岩体力学参数折减计算,同时,根据类似文献充填体物理力学参数研究结果^[11-12],最终得到矿山地下工程岩体物理力学参数,详见表 2。

表2 矿山地下工程岩体物理力学参数

岩性名称	容重/ kN·m ⁻³	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
二长花岗岩	26.46	0.219	11.364	2.449	2.970	52.97	0.20
闪长玢岩	24.58	0.086	2.897	0.849	1.490	39.68	0.28
钾化碎裂状花岗岩	26.07	0.071	4.342	1.097	2.106	47.29	0.26
绢英岩化碎裂状花岗岩	26.07	0.050	3.027	0.915	1.844	44.51	0.26
尾砂充填体	19.21	0.028	0.700	0.030	0.200	20.00	0.35
废石充填体	14.25	0.040	0.038	0.001	0.040	20.00	0.45

3.3 模拟工况

当前矿区主要开采对象为 I - 1、II - 1 及 III - 1 矿体。已完成开拓的中段包括 +47 m、+6 m、-33 m、-63 m、-93 m、-123 m、-163 m 和 -203 m,其中 -63 m 以下中段工程主要集中于主井东北侧区域。目前 I - 1、II - 1、II - 2 号矿体大部分已形成采空区,III - 1 号矿体开采已延伸至 +6 m 水平,其余矿体尚未启动开采作业。现阶段采矿活动主要在 +6 m 至 -123 m 中段范围内开展。针对矿山已开采完毕的区域,已实施干式充填处理,空区充填率达 90%,但采空区顶部存在未接顶的空区现象。

依据矿山开采设计调整的初步规划方案,下部未开采矿体将采用上向水平分层尾砂充填法。具体

回采顺序为:按中段由上向下逐段开采,每一中段内则由下向上逐层推进。矿房沿矿体走向布置,高度设定为 30 m 或 40 m。矿房留设底柱,不设置顶柱和间柱,底柱将在后期进行回采。采场采用尾砂充填,局部区域辅以胶结充填。矿区回采矿房结构如图 3 所示。

结合图 3 矿区回采矿房结构,鉴于实际开采的复杂性与充填效果的不确定性,同时为优化计算效率、简化流程,模拟回采计划遵循保守设计原则。第一阶段为常规开采期,各矿房保留 6 m 厚底柱暂不回采,其余矿体开采后实施尾砂充填,且刻意预留 3 m 高度空区模拟充填不接顶现象;第二阶段开展底柱回采作业,完成后再次进行尾砂充填,若上下矿房

连通,将重新布局不接顶空区,确保其处于贯通采空区的顶端。此外,3#竖井保安矿柱覆盖的矿体将不予开采。

4 矿山竖井井筒及地表构筑物稳定性分析

4.1 矿区地表整体稳定性分析

基于现有技术资料及研究工况条件下,当下方设计矿体回采、充填完毕后,地表位移及应力场分析如图4、图5所示。

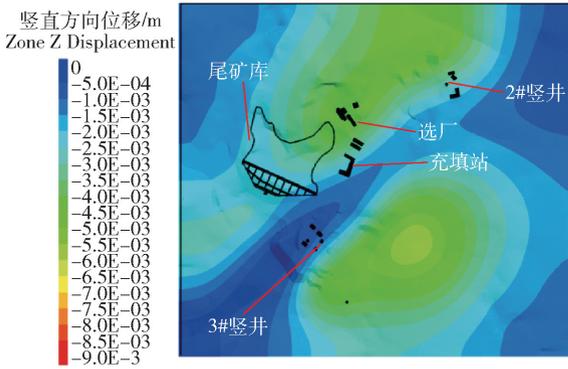


图4 矿区开采完毕后垂向位移云图

图4展示了设计矿体开采充填完毕后地表沉降情况,地表仍出现两个沉降中心,分别位于选厂附近和3#竖井东侧,最大沉降值约为6 mm。2#竖井附近出现沉降,最大沉降值为2.7 mm,3#竖井附近也出现沉降,最大沉降值约为1.5 mm。

图5展示了设计矿体开采充填完毕后地表水平变形情况,地表水平变形集中区域与沉降中心重叠,地表水平最大位移约为6 mm。2#竖井和3#竖井附近地表区域未出现明显水平变形。

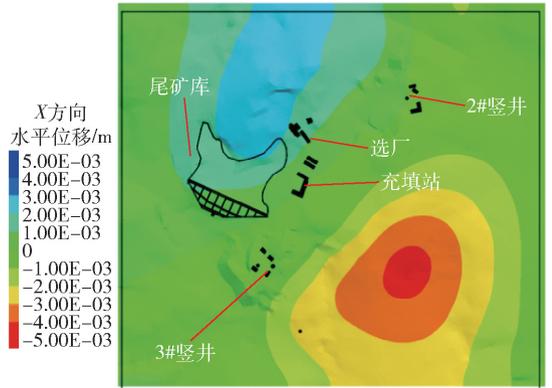
4.2 竖井井筒稳定性分析

矿山采空区及地下开采会导致围岩发生位移,并引导岩体产生变形^[13-14]。为保证竖井的稳定性,有必要研究设计矿体开采充填完毕后,2#竖井、3#竖井和1#盲风井井壁的变形情况。

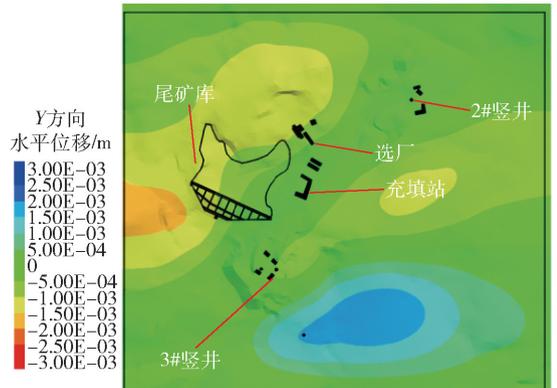
1) 3#竖井稳定性分析

图6(a)展示了穿过3#竖井中心线的东西走向剖面中围岩的水平位移云图。可见,设计矿体开采充填完毕后,围岩产生的X向水平位移主要集中于回采区域附近,3#竖井边壁无显著水平位移,最大水平位移仅为4 mm,出现在+6~-60 m水平,方向沿着正东。

通过统计分析3#竖井变形最剧烈一侧边壁,X方向(西-东方向)上水平变形特征如图6(b)所示,



(a) 开采完毕后X方向位移云图



(b) 开采完毕后Y方向位移云图

图5 矿区开采完毕后水平位移云图

当设计矿体开采及充填完毕后,3#竖井井壁围岩的水平变形在纵向上变化范围为 $-2.0 \times 10^{-2} \sim 3.8 \times 10^{-2}$ mm/m,其相对变形较小,均低于I级构筑物水平变形 ± 2 mm/m范围的要求,说明在现有条件下,地下矿体开采对3#竖井稳定性影响非常小。

2) 2#竖井稳定性分析

图7(a)展示了穿过2#竖井中心线的东西走向剖面中围岩的水平位移云图。可见,设计矿体开采并充填完毕后,2#竖井边壁围岩产生的X向水平位移主要集中于回采区域附近,最大水平位移为1.2 mm,方向向东。

通过统计分析2#竖井变形最剧烈一侧边壁,X方向(西-东方向)上水平变形特征如图8所示,当设计矿体开采及充填完毕后,2#竖井井壁围岩的水平变形在纵向上变化范围为 $-5 \times 10^{-3} \sim 2.1 \times 10^{-2}$ mm/m,相对变形较小,低于I级构筑物水平变形 ± 2 mm/m范围的要求,说明在现有资料和技术条件下,地下矿体的回采活动对2#竖井影响较小。

图8展示了设计矿体开采充填完毕后,2#竖井围岩的强度/应力云图,该指标数值越大,说明岩体稳定性安全储备越大,若数值小于1,则说明岩体处

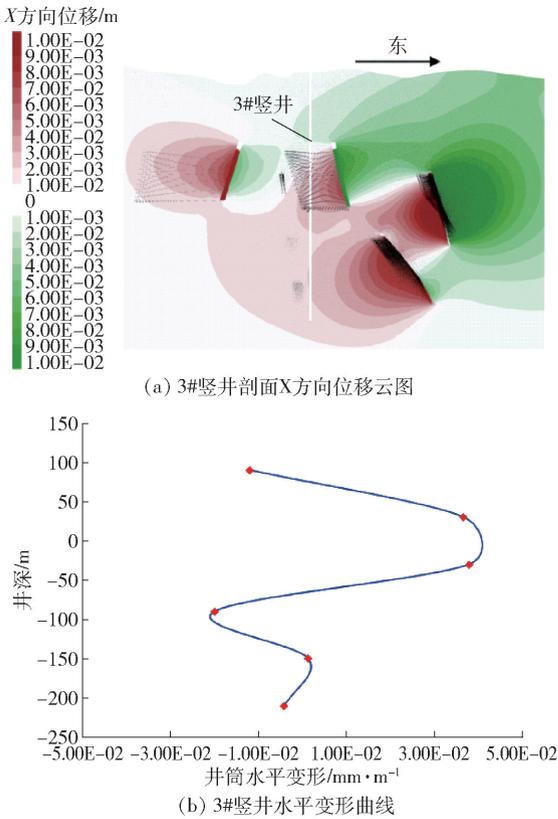


图6 3#竖井剖面 X 方向变形

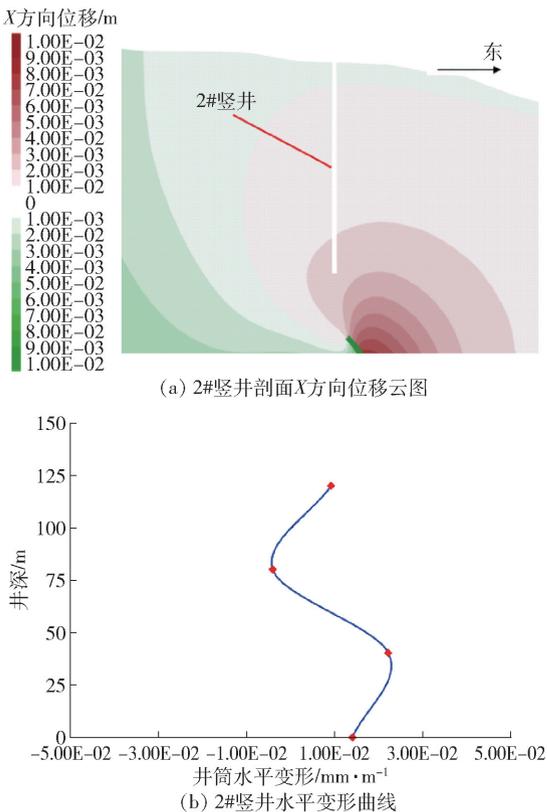


图7 2#竖井剖面 X 方向变形

于破坏状态。由图可见,2#竖井下方存在开采区域,蓝色区域为充填开采导致岩体稳定性安全储备较小的区域,2#竖井井底距离下方危险区域约 50 m,中间岩体的强度/应力大于 5,可见下方开采区域由于隔离顶柱的作用,对上方 2#竖井稳定性影响较小。但是 2#竖井东侧, -33 m 水平以上的充填采场位于竖井侧下方,可能造成竖井围岩向侧下方产生滑移,因此对于该区域采场的回采情况应予注意。

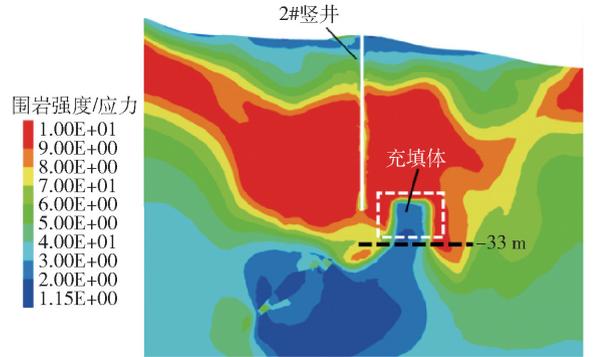


图8 2#竖井强度-应力比云图

3) 1#盲风井稳定性分析

图 9(a) 展示了穿过 1#盲风井中心线的东西走向剖面中围岩的水平位移云图。可见,设计矿体开采充填完毕后,1#盲风井边壁围岩产生的 X 向水平

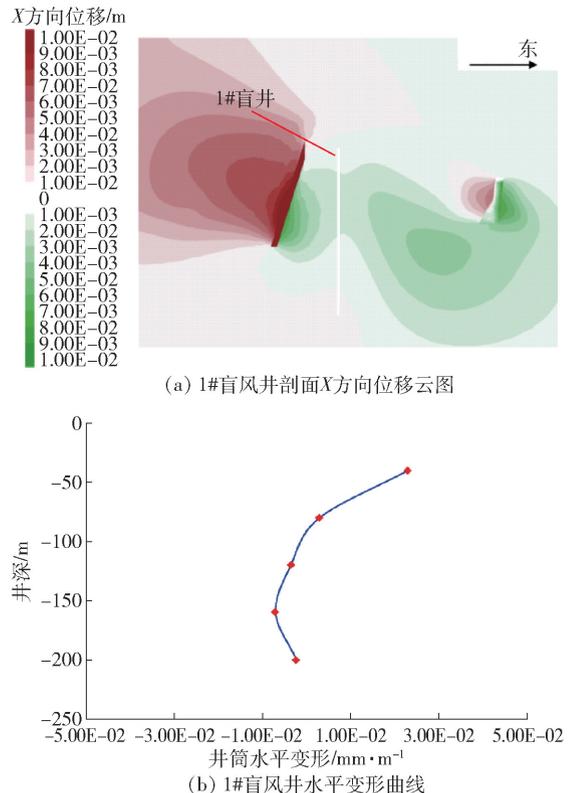


图9 1#盲风井剖面 X 方向变形

位移主要集中于回采区域附近,最大水平位移为 2.5 mm,方向向西。通过统计分析 1#盲风井变形最剧烈一侧边壁,X 方向(西-东方向)上水平变形特征如图 9(b)所示,当设计矿体开采及充填完毕后,1#盲风井井壁围岩的水平变形在纵向上变化范围为 $-7 \times 10^{-3} \sim 2.3 \times 10^{-2}$ mm/m,相对变形较小,均低于 I 级建构筑物水平变形 ± 2 mm/m 范围的要求,说明在现有资料和技术条件下,地下矿体的回采活动对 1#盲风井影响很小。

4.3 地表建(构)筑物稳定性分析

根据《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012),矿山地表建(构)筑物位移与变形的允许值为倾斜 $i = \pm 3$ mm/m,曲率 $k = \pm 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$,水

平变形 $\varepsilon = \pm 2$ mm/m。根据数值模拟结果,通过对矿山生产过程中监测点沉降数据进行分析处理,得到地表建(构)筑物最大倾斜 i ,最大曲率 k 和最大水平变形值 ε ,详见表 3。

对表 3 进行分析可以看出,矿区监测区域内地表建(构)筑物最大倾斜值 i 为 -6.0958×10^{-2} mm/m,最大曲率 k 为 $-9.6682 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$,最大水平变形 ε 为 1.8821×10^{-2} mm/m,均小于允许值(倾斜 $i = \pm 3$ mm/m,曲率 $k = \pm 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$,水平变形 $\varepsilon = \pm 2$ mm/m)。由此可见,矿区地表建(构)筑物变形参数最大值均小于允许值,表明矿区老采空区及地下开采扰动引起的地表变形符合安全规范要求。

表 3 矿区地表建(构)筑物地表变形数值模拟监测结果

监测区域	区内建(构)筑物	测线方向	最大倾斜 $i /$ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	最大曲率 $k /$ m^{-1}	最大水平变形 $\varepsilon /$ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$
A 区	3#竖井	西-东	-2.2587×10^{-2}	-3.4152×10^{-7}	7.7518×10^{-3}
		北-南	-1.9293×10^{-2}	-3.5392×10^{-7}	6.0141×10^{-3}
B 区	办公宿舍区	西-东	1.46928×10^{-2}	4.6741×10^{-7}	1.4912×10^{-2}
		北-南	2.7699×10^{-2}	-2.7874×10^{-7}	1.8821×10^{-2}
C 区	选厂	西-东	-1.0451×10^{-2}	3.0982×10^{-7}	1.5623×10^{-2}
		北-南	7.6251×10^{-3}	2.3291×10^{-7}	1.3731×10^{-2}
D 区	2#竖井	西-东	1.1742×10^{-2}	8.7269×10^{-7}	6.5416×10^{-3}
		北-南	0.019 186 3	-1.6172×10^{-7}	9.3123×10^{-3}
E 区	尾矿坝	西北-东南	-6.0958×10^{-2}	-9.6682×10^{-7}	1.1411×10^{-2}
		东北-西南	5.5516×10^{-3}	-1.5541×10^{-7}	1.2412×10^{-2}

5 结论

本文采用 3Dmine-犀牛-Griddle-FLAC3D 软件研究了采空区及二期开采工程扰动共同作用下矿山竖井井筒及邻近地表建(构)筑物的稳定性,得到如下结论:

(1) 矿区地表监测区域最大倾斜值为 -6.0958×10^{-2} mm/m,最大曲率为 $-9.6682 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$,最大水平变形为 1.8821×10^{-2} mm/m,均远小于地表建(构)筑物位移变形允许值(倾斜为 ± 3 mm/m、曲率为 $\pm 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 、水平变形为 ± 2 mm/m),表明矿区地下开采改建工程(二期工程)引起的地表变形符合安全规范要求。

(2) 2#竖井、3#竖井和 1#盲风井边壁围岩最大水平位移为 4 mm,且其井边壁围岩水平变形在纵向上变化范围均远低于 I 级建构筑物水平变形 ± 2

mm/m 范围的要求,说明在现有资料和技术条件下,地下矿体的回采活动对 2#竖井、3#竖井和 1#盲风井的影响很小。

(3) 2#竖井下方和底部东侧存在充填采场,导致该区域岩体稳定性安全储备较小,但竖井距离下部安全储备较小区域约为 50 m,且顶柱岩体安全储备较大,下部采区对 2#竖井稳定性影响较小;但是当 2#竖井底部-33 m 中段矿房开采完毕后,其与 2#竖井底部的垂直距离最小仅为 9 m、水平距离最小为 30 m,在极端工况条件下,可能出现贯穿 2#竖井和充填采场的滑移破坏,因此在该区域进行回采作业时应予以重视。

[参考文献]

- [1] 刘雨. 矿山竖井水文地质勘察的实例分析研究[J]. 世界有色金属, 2022, (19): 118-120.