

龙口矿区地下开采覆岩移动和地表变形研究

贾彦州¹, 周森林², 李天宏¹, 刘伟明¹, 辛明禹¹

(1. 山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司, 山东 烟台市 265147;

2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要:对于地表有大量建筑物、农田和各种生活设施的矿区,地下开采引发地表变形会导致地表设施损伤。采用现场调研和数值模拟的研究方法与技术手段,预测矿区地下充填开采过程中岩移的演化特征。选择具有代表性、典型性的剖面,通过 MIDAS GTS NX 数值模拟技术,开展岩层移动研究,揭示井下充填开采对上覆岩层移动和地表变形的影响。研究表明,充填采矿可以有效降低围岩体的变形,随着矿体开采深度的增加,覆岩移动沿上盘矿岩接触带倾斜于地表水平线向上发展;开采活动引起的地表变形较小,地表建筑物损伤等级为 I 级。

关键词:数值模拟;充填开采;岩移演化特征;覆岩移动;地表变形

0 引言

矿体地下开采破坏了原始应力平衡状态,引起应力重新分布,产生围岩次生应力场,当达到临界变形以后,就会发生围岩破坏和移动。开采引起的覆岩移动涉及地表变形、开裂,甚至影响地表地质环境、人民生命和财产安全。

贾林刚等^[1]探讨了充填开采步距对覆岩移动及地表建筑物变形的影响,建立了充填步距与地表建筑物破坏变形之间的相互关系;张海洋等^[2]研究了大倾角煤层开采的地表沉陷及岩层运移特征;张吉雄等^[3]通过对矸石充填作业的细致分析,对覆岩关键层移动状况做了判断,并对充填作业当中关键层移动导致的顶板变形做了描述;郝宝生^[4]从实地测设出发,对矸石充填作业面受外力状况作了观察,研究成果对探讨顶板下沉规律有明显的的作用;杨宝贵^[5]等利用数值模拟方法研究了充填开采上覆岩层的运移规律;CAO 等^[6]提出了力学模型的边界条件,得到了覆盖层运动和表面沉降规律;邹开华等^[7]模拟不同开采深度覆岩移动时空演变,确定地表移动范围。

现阶段,我国分析浅部井下采动对地表沉降影响主要采用经验公式法、工程类比法以及现场监测法等。但随着地下金属矿床开采深度的增加,应用上述方法分析地表沉降常导致岩层移动愈发严重,

地表变形范围过大,致使矿山不得不扩大地表变形保护范围,扩大征地面积。对深部采动影响地表沉降预测过小,则无法保证地表建筑物的安全,同时造成地表环境严重破坏。

为有效分析井下充填开采诱发的岩移和地表沉降变形,需要系统研究开采过程中采场以及围岩的稳定性。本文根据矿区资源开采现状,结合矿山地质资料建立开采-岩移模型,通过模型分析覆岩移动过程,揭示上覆岩层移动规律和地表变形引起建筑物损伤程度,最终实现地下矿体开采对覆岩移动和地表安全性影响的准确分析。

1 工程背景

以山东省龙口矿区为工程背景,该矿山生产能力为 90 000 t/a,主要采用房柱采矿法(嗣后充填)开采。矿区位于丘陵地带,环境地质条件稳定,基岩出露较好,岩石完整、坚硬。L1、L2 为主要矿体,赋矿岩性主要为构造角砾状、碎裂状黄铁矿化二长花岗岩,矿体中绢英岩化、硅化、钾化较强。矿体多沿走向断续展布,分枝复合、尖灭再现、膨胀狭缩等现象明显。

L1 矿体赋存标高为 -84.59~+91.23 m,向深部未封闭,平均倾角为 33°,控制走向长 120 m,宽 190 m,矿体厚 0.90~4.06 m,平均厚度为 2.44 m。L2 矿体赋存标高 -87.99~+70 m,总体走向 180°,

倾向 90° , 倾角为 $14^\circ \sim 30^\circ$, 控制走向长 280 m, 宽 320 m, 矿体厚 0.90 ~ 24.42 m, 平均厚度为 17.60 m。

2 岩移数值模拟设计

2.1 剖面选择

由于矿区地表变化较大, 将地表的形貌进行统一化处理显然不合理。模拟计算地表变形值时需考虑地表形态随开采深度变化呈现的差异性。选择地质剖面时, 主要遵循以下原则:

(1) 剖面应穿越地表主要建筑物, 直面建筑物安全问题, 使得研究具有代表性和说服力。

(2) 所选剖面应尽可能包含所有主要矿体, 用以分析不同矿体在复杂开采条件下的岩移和地表变形。

综合以上因素, 选取 8[#]、12[#]、16[#] 剖面作为典型的地质剖面进行模拟分析。

2.2 采矿方法选择

结合矿山开采初步设计、矿体物理力学性质、充填体性质等资料, 构建矿区地表、地层和矿体的数值计算模型, 分析龙口矿区地下采场稳定性及地表安全。揭示井下空场嗣后充填开采上覆岩层的移动规律, 分析地表下沉量、倾斜、曲率、水平变形等地表主要变形参数, 揭示地表变形的演化过程。

采用房柱采矿法(嗣后充填)开采, 不考虑生产调度问题, 整个矿山中段自上而下回采, 每个中段高 30 m, +70 m 为首采中段, 矿房划分为宽 8 m, 矿柱宽为 3 m, 矿房内自下而上回采, 所有矿房回采完后回采矿柱。采空区计划用废石嗣后充填。

由于废石大小不一, 导致不能密实充填, 按照 95% 的充填率, 与顶板之间留有高度为矿体厚度 5% 的间隙, 这为顶板的冒落提供了空间条件。因此, 模拟充填时采用不接顶充填。模拟监测地点主要选择矿体上盘、地表以及顶底板等位置, 模拟开采过程中诱发的围岩移动和地表变形等。

3 覆岩移动和地表变形分析

3.1 岩移演变

根据位移数值模拟, 得到不同开采水平矿体充填完毕后对应的总位移图。由于各开采水平的矿体形态、倾角和厚度各不相同, 充填结束后位移也差异明显。以 12[#] 剖面矿体开采为例, 选取 +70 m、+40 m、+10 m、-110 m 4 个不同开采水平充填完毕时的围岩总位移云图(见图 1)。8[#] 和 16[#] 剖面充填完毕总位移云图如图 2 所示。

以 12[#] 剖面 -110 m 水平为例(见图 1(d)), 充填结束后, 地表最大水平位移为 9×10^{-3} m, 地表最大沉降量为 2.16 cm, 顶板总位移为 3.11 cm, 底板

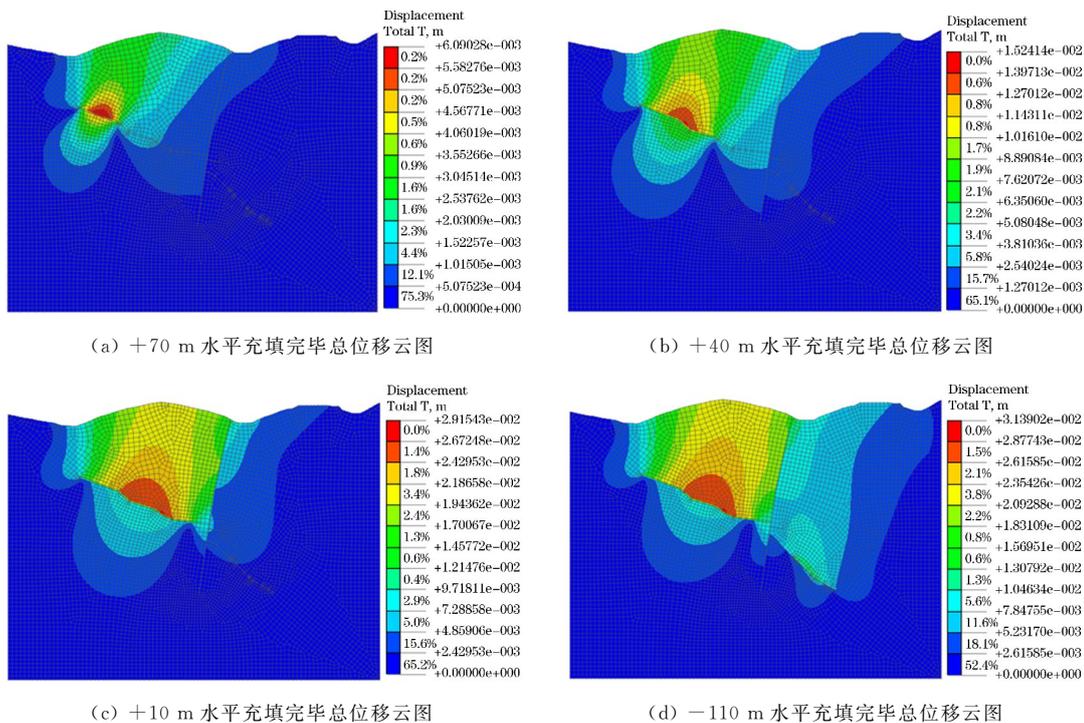


图 1 12[#] 剖面矿体充填完毕总位移云图

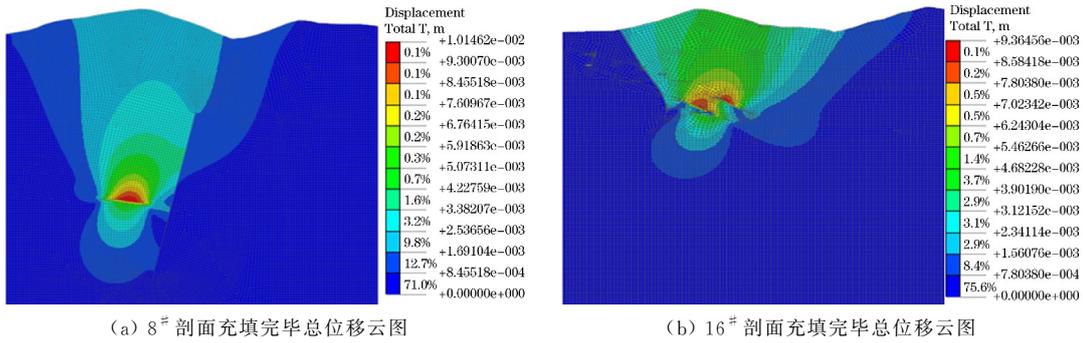


图2 8#、16#剖面矿体充填完毕总位移云图

总位移为 0.91 cm。从初始回采到全部水平充填完毕的过程中,位移区域不断增加且集中于上下盘矿岩接触带,这是因为充填体占据采场空区的比例愈加增高,但其各向物理力学参数都小于矿石及围岩,承担了较大的来自上下盘附加的二次分布应力,大幅度削弱了对承载围岩的支撑力度。

3.2 覆岩移动规律

由图 1 可知,矿体按照 95% 充填后形成了部分采空区,这给上覆岩层的移动创造了条件。距离开采区域越近,岩体的位移越大,上盘岩体位移量明显大于下盘岩体。随着开采工作的进行,因不接顶充填,采空区愈发增大,由于矿体并不是水平分布的,而是具有一定的倾角,在自重和采动应力的共同作用下,覆岩移动区域向深部发展,位移沿上盘矿岩接触带倾斜于地表向上增大。

3.3 地表移动变形

以 12# 剖面为例,在矿体上方地表每间隔 50 m 的水平距离设置一个监测点,主要观测地表的移动,共设置 8 个。地表观测点布置如图 3 所示。

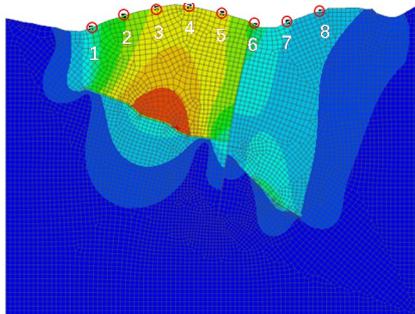


图3 12#剖面地表观测点布置

记录各个中段矿体开采完成后,采空区充填结束时监测点的 X 轴位移和 Z 轴位移,绘制成位移变化曲线如图 4 和图 5 所示,可以看到各开采水平 X

轴和 Z 轴位移均呈近似“U”形,但因矿体有倾角且各水平开采时部分监测点距离开采区域水平距离较远,所以位移量小,各水平开采后的位移“U”形曲线存在差异。

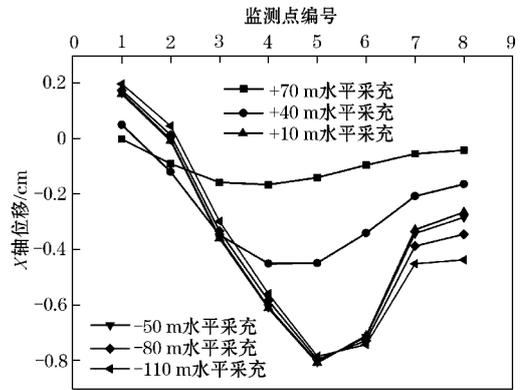


图4 12#剖面各监测点 X 轴位移变化曲线

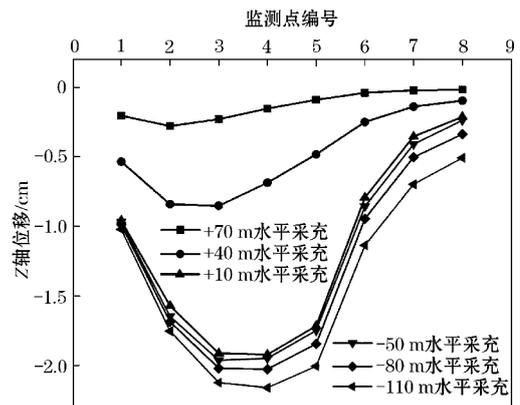


图5 12#剖面各监测点 Z 轴位移变化曲线

从各监测点 X 轴和 Z 轴观测数据可以看出,回采刚开始时,地表岩移量均增加。+70 m 水平开采属于平稳阶段,矿体厚度较小,充填后采空区较小,水平和垂直位移变化很小。+40 m 水平开采后,因采用 95% 充填,采空区增大,水平位移和下沉值增加较为缓慢。+10~ -110 m 水平开采后,采空区达到较大体积,同时,无法用废石使充填密实,水平

位移和地表下沉值显著增大。各剖面地表最大位移统计结果见表 1。

表 1 典型剖面地表最大位移

典型剖面	采矿方法	沉降值/mm	水平位移/mm
8 [#]	房柱采矿法	2.24	1.13
12 [#]	房柱采矿法	21.60	9.00
16 [#]	房柱采矿法	6.10	2.10

由表 1 可以看出,选取的各个典型地质剖面地下矿体充填开采后的沉降值和水平位移均较小,说明在采空区得到有效充填的条件下,地下开采对地表稳定性产生影响较小。

当采空区尺寸达到该地质采矿条件下的临界尺寸时,地表下沉值达到该地质采矿条件下的最大下沉值。根据概率积分法的基本原理,地表最大倾斜变形 ϵ_{\max} 、曲率 i_{\max} 和最大水平变形 k_{\max} 的极限值与地表最大下沉值 W_{\max} 、安全开采深度 H 及主要的影响角正切 $\text{tg} \beta$ 之间存在如下关系:

$$\epsilon_{\max} = \pm 1.52b \frac{W_{\max}}{H} \text{tg} \beta \quad (1)$$

$$i_{\max} = \pm \frac{W_{\max}}{H} \text{tg} \beta \quad (2)$$

$$k_{\max} = \pm 1.52b \frac{W_{\max}}{H^2} \text{tg}^2 \beta \quad (3)$$

式中, b 为水平移动系数,与岩性有关。

由表 2 可知,选取的典型剖面地下矿体开采引起的地表变形均较小,经过计算,开采诱发地表水平变形范围为 $5.95 \times 10^{-3} \sim 116.3 \times 10^{-3}$ mm/m,倾斜变形范围为 $13.1 \times 10^{-3} \sim 255.1 \times 10^{-3}$ mm/m,曲率范围为 $3.47 \times 10^{-5} \sim 463 \times 10^{-5}$ ($10^{-3}/\text{m}$)。根据《金属非金属矿山安全规定》(GB 16423—2020),砖混结构损坏等级见表 3。

表 2 典型剖面地表变形

典型剖面	采矿方法	水平变形 $k_{\max}/(\text{mm}/\text{m})$	倾斜变形 $\epsilon_{\max}/(\text{mm}/\text{m})$	曲率 $i_{\max}/(\times 10^{-3}/\text{m})$
8 [#]	房柱法	5.950×10^{-3}	13.10×10^{-3}	3.470×10^{-5}
12 [#]	房柱法	116.3×10^{-3}	255.1×10^{-3}	137.4×10^{-5}
16 [#]	房柱法	114.0×10^{-3}	249.0×10^{-3}	463.0×10^{-5}

对比表 2 和表 3 可知,矿区地下开采引起的地表砖混结构建筑物损坏等级均在 I 级以内,充填开采安全性较高,对地表影响较小。

表 3 砖混结构建筑物损坏等级

损坏等级	水平变形 $k_{\max}/(\text{mm}/\text{m})$	倾斜变形 $\epsilon_{\max}/(\text{mm}/\text{m})$	曲率 $i_{\max}/(\times 10^{-3}/\text{m})$
I	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 0.2
II	≤ 4.0	≤ 6.0	≤ 0.4
III	≤ 6.0	≤ 10.0	≤ 0.6
IV	> 6.0	> 10.0	> 0.6

4 结论

本文通过理论分析和数值模拟的方法对地下矿体充填开采过程中的覆岩移动和地表变形进行分析,取得以下结论:

(1) 通过模拟矿体开采活动中引起的经常性覆岩移动,可以较为准确地得到各开采水平相对应的岩移云图,选择剖面典型,建模细致,可为后续开采活动引起覆岩移动和地表变形分析提供依据。

(2) 开采过程中,上覆岩层移动沿矿体上盘矿岩接触带倾斜于地表水平线向上增大;地表位移量先是处于平稳阶段,增量不明显;随着开采深度的增加,位移缓慢增加;当开采至一定深度时,采空区体积较大,水平位移和沉降显著增加。

(3) 经过计算,矿体开采诱发地表水平变形范围为 $5.95 \times 10^{-3} \sim 116.3 \times 10^{-3}$ mm/m,倾斜变形范围为 $13.1 \times 10^{-3} \sim 255.1 \times 10^{-3}$ mm/m,曲率范围为 $3.47 \times 10^{-5} \sim 463 \times 10^{-5}$ ($10^{-3}/\text{m}$),充填开采对地表稳定影响较小,地表建筑物损坏等级为 I 级。

参考文献:

- [1] 贾林刚,张华兴,刘鹏亮. 充填步距对地表移动变形特征的控制影响[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4): 642-650.
- [2] 张海洋,李小萌,孙利辉. 大倾角煤层开采地表沉降规律研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(6): 108-112.
- [3] 张吉雄,屠世浩,曹亦俊,等. 煤矿井下煤研智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 417-430.
- [4] 郝宝生. 综采充填工作面顶板活动规律探讨[J]. 中国煤炭, 2010, 36(7): 62-65.
- [5] 杨宝贵,杨捷,王玉凯,等. 充填开采上覆岩层移动变形研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(6): 732-737.
- [6] CAO Z Z, DU F, XU P, et al. Control mechanism of surface subsidence and overburden movement in backfilling mining based on laminated plate theory[J]. CMC—Computers Materials & Continua, 2017, 53(3): 175-186.
- [7] 邹开华,任凤玉,丁航行,等. 北洛河铁矿开采深度与地表岩移时空演变规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 60-65.

(收稿日期: 2022-12-28)

作者简介: 贾彦州(1988—),男,甘肃天水人,工程师,研究方向为采矿技术、安全管理, E-mail: 915383541@qq.com.