

岩石力学和开采

复杂条件超大规模连续盘区多中段开采 应力扰动规律研究

Research on the Stress Perturbation Laws of Complex Super-large-scale Continuous Panel Multi-level Mining

吴昊燕^{1,2}, 刘育明^{1,2}, 马黎明^{1,2}, 孙学森^{1,2}, 胡世超³

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038;
3. 鞍钢集团矿业有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

摘要:以某超大规模开采铁矿为研究对象,模拟了矿区超大规模连续盘区多中段充填采矿过程,重点对回采过程中的围岩扰动应力演化规律进行了分析。结果显示多中段开采的扰动叠加效应对26 m矿柱稳定性影响显著。两中段之间存在卸压现象,深部采区-580 m水平以下应力集中明显。研究结果可供连续盘区超大规模开采、深井矿山卸压开采等借鉴参考。

关键词:深井矿山; 水平矿柱; 应力演化

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0001-06

Abstract: This research simulated the super-large-scale continuous panel multi-level mining and filling process of a super-large iron mine, and the stress perturbation law was focused on. Results show that the overlaying effect of multi-level mining has negative effects on the stability of the 26 m-wide pillar apparently. There are stress-releasing area between two levels and obvious stress concentration areas below Level -580 m. The result can be a good reference for continuous panel super-large-scale mining and stress-releasing mining in deep mine.

Key words: super-large-scale mining; multi-level mining; stress perturbation

1 前言

某铁矿是目前国内设计生产规模最大的地下铁矿山,生产规模达3 000万t/年,矿山地表环境复杂,矿区周边有河流、铁路、公路、文物遗址等重要设施,加之多条断裂构造叠加影响,其开采难度可想而知。开采技术条件复杂的超大规模矿山,对采矿方法结构参数、回采顺序等的工艺技术要求比普通矿山更高。

2 超大规模开采的时空特征

2.1 连续盘区同时开采

为提高生产效率,针对走向长度有限、矿体产状具备条件的矿体,通常采用盘区式开采,在每个盘区内布置多个能够同时回采的采场,相对生产规模一般的矿山,在单盘区、少盘区或间隔盘区式开采不能够

满足生产要求时,连续盘区同时开采模式,必然引起特殊的应力演变,对盘区内其他待采区域产生影响。

2.2 多中段同时开采

在单中段开采尚无法达到生产规模要求时,为进一步提高生产效率,弥补单中段生产规模的不足,针对有条件的矿体通常采用多中段同时开采模式。多中段联合开采是指沿矿体同一垂直面对上下两个或两个以上中段矿体布置多个采场同时进行开采。多中段同时开采往往会使扰动效应叠加放大,围岩稳定性变差,尤其对连续盘区开采、深部大规模开采会造成剧烈的地压活动。而当所有中段开采充填结束,各中段之间的水平隔离矿柱消失,各中段采空充填区贯通,大范围低于岩石强度的充填体叠加残余充填空区将增加大规模岩体移动的可能性,严重威

[作者简介] 吴昊燕(1990—),女,博士后,高级工程师,主要从事矿山岩石力学研究工作。

[基金项目] 十四五重点研发专项“金属矿深部大盘区无矿柱连续化开采技术与装备”(2023YFC2907201)。

[引用格式] 吴昊燕,刘育明,马黎明,等. 复杂条件超大规模连续盘区多中段开采应力扰动规律研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(1):1-6.

胁矿山安全高效生产。

国内学者针对多中段同时开采对应力叠加扰动、岩体移动、地表沉降等问题开展了丰富的研究。李兴权^[1]综合采用模型试验、数值计算、理论分析等研究方法,分析多中段联合开采模式下围岩扰动破坏规律、应力场和位移场的变化规律、采场稳定性、上覆岩层运移规律以及地表动态移动变形规律。孟庆彬等^[2]采用大型相似材料模型试验及采场围岩数字照相变形量测技术,揭示多中段联合开采采场围岩应力变化特征及上覆岩层移动规律。韩斌等^[3]根据金川二矿区多中段多盘区同时回采的实际情况,采用FLAC数值软件对7种回采顺序进行了数值模拟;吴昊燕等^[4]采用数值模拟方法对金川二矿区多中段回采开展研究。

2.3 矿柱超长延时回采

为了保障生产安全,根据回采工艺需要,盘区内部、盘区之间,往往留设部分规则矿柱,维持盘区内围岩自稳状态,或者经过一定的岩体加固后,处于稳定状态。矿柱的处置一般存在三种情形,一是永久不回采;二是作为盘区回采工序的其中一个步骤,在盘区回采结束时,予以回采;三是在矿山末期予以回收。本项目属于第三种情形,在经过超过20年的长时间服役后,再予以回收。这种情形下,既要保证矿柱在服役期的安全稳定,又要保证矿柱在服役期结束时具备回收条件,对矿柱的留设尺寸、矿柱的回收顺序都提出了特殊的要求,同时与第一、第二中情形的矿柱,应力扰动在矿柱中的时空演化规律也可能存在较大的差异。

本文采用理论分析、数值模拟的方法对该铁矿复杂条件下连续盘区多中段超大规模开采矿岩扰动规律开展研究。

3 某铁矿大规模回采模拟研究

3.1 工程背景

某铁矿位于辽宁省鞍山市西南7km处,行政区划隶属于鞍山市东鞍山镇管辖西,周边环境如图1所示。矿体为层状,东部走向近东西、西部走向为315°。矿层倾向10°~45°,倾角上部15°~25°,下部40°~55°,局部可达60°。矿层延长4593m,向东与东鞍山矿层相连接,向西隐没于冲积平原之下,到48勘探线被F70切断。矿层一般倾斜延深为800m左右。矿层的厚度由上向下有加厚的趋势。断裂构造为影响开采的最主要地质因素。矿床的地质构造

复杂,断裂构造破坏了矿床的完整性。



图1 矿区周边环境现状示意图

综合考虑资源控制程度、资源量分布情况以及氧化矿分布比例,确定以-340m水平为界分为上部采区和下部采区,上部采区矿体分为-160m、-220m、-280m、-340m四个无轨开采中段,下部采区矿体分为-400m、-460m、-520m、-580m四个无轨开采中段。

上部和下部两个采区同时生产,各采区均按从下往上开采顺序进行开采。首采中段为-340m中段和-580m中段。

3.2 数值模型

根据设计开采方案,将矿体划分为盘区,以盘区为回采单元组织生产。盘区沿走向布置,长240m,宽为矿体厚度,中段高度60m。盘区内划分为矿房和矿柱采场进行两步骤间隔回采。采场沿矿体走向布置,长度为90m,宽度18m;盘区内留34m宽矿柱,盘区间留26m间柱。盘区内留设的间柱待浅部和深部矿体均开采完毕后再研究如何回收。矿柱回收按大直径深孔嗣后充填法考虑,浅部和深部矿柱同时回采,回采顺序均由下至上。间柱回采考虑由上盘开始后退式回采,每次回采长度约30m。采场结构水平剖面图如图2所示。

综合考虑矿区地质情况和采场结构参数,建立全矿区的三维地质模型。为方便采场结构参数的设置,取模型长边界X沿矿体走向,短边界Y垂直于矿体走向方向,竖直方向为Z方向。模型尺寸长×宽×高为9216m×4096m×1050m,模型示意如图3所示。

为了使数值模拟与设计方案更加一致,以便真实准确的反应实际开采工况,模型建立时还考虑了对开采影响较大的F16和F6断层,同时对矿体设计开采范围(高程-580~-100m之间、10#勘探线以西)内的矿体进行网格加密,最小单元尺寸为2m,

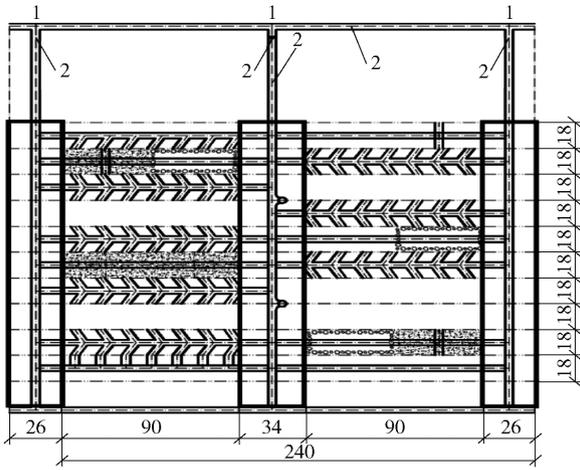


图 2 采场结构水平剖面图

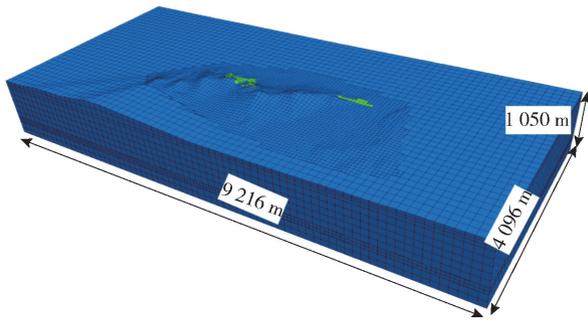


图 3 模型整体示意图

围岩区域网格渐进式放大,最大单元尺寸为 128 m。模型建立后,共生成 4 577 634 个网格单元,5 096 914 个网格节点,具体模型如图 4 所示。

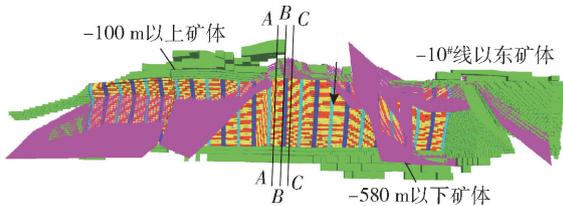


图 4 矿体、断层模型

前期开展了岩石力学特性与采场稳定性研究,在室内岩石力学试验的基础上,结合现场岩体质量调查,通过基于霍克布朗准则的参数折减,获得了符合某铁矿岩体工程实际的力学参数。详见表 1。

表 1 模型矿岩体力学参数表

试验体	密度/ g·cm ⁻³	黏聚 力/MPa	内摩 擦角/(°)	弹性 模量/GPa	泊松比
围岩	2 800	3.4	32	11.8	0.24
矿体	3 400	3.95	36	16.2	0.2
充填体	1 800	0.867	30	0.987	0.3

采用水压致裂法完成了三个孔的地应力测量工作,图 5 所示为 ZKB39 孔实测主应力随深度变化的曲线。

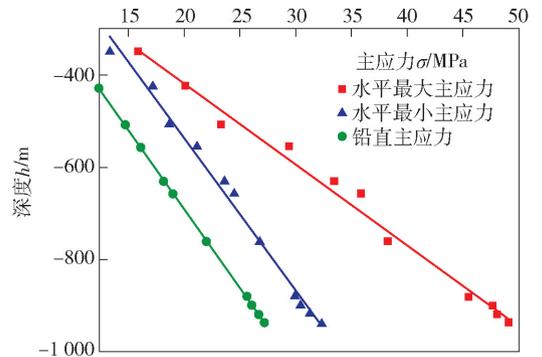


图 5 ZKB39 钻孔主应力值随深度变化

$$\sigma_H = -0.037 \times h - 2.302 \quad (1)$$

$$\sigma_v = -0.026 \times h - 0.0075 \quad (2)$$

$$\sigma_h = -0.028 \times h - 2.095 \quad (3)$$

式中: σ_H 为最大水平主应力,MPa; σ_h 为最小水平主应力,MPa; σ_v 为铅直主应力,MPa; h 为钻孔测深,m。

3.3 采充模拟顺序

设计以 -340 m 水平为界分为上部采区和下部采区,两个采区同时回采。上部采区矿体分为 -160 m、-220 m、-280 m、-340 m 四个无轨开采中段,下部采区矿体分为 -400 m、-460 m、-520 m、-580 m 四个无轨开采中段,每个中段高度 60 m。其中,每个盘区长度为 240 m,盘区之间矿柱宽 26 m,盘区中部矿柱宽 34 m,一个盘区分为左右两个半区,采场半区宽度为 90 m。每个半区内继续划分矿房、矿柱进行两步骤回采,一步骤回采矿房,二步骤回采矿柱。矿房矿柱宽度均为 18 m。模型水平剖面如图 6 所示。为方便查看结果,取盘区内 34 m 宽矿柱中心 A-A 剖面,采区中心 B-B 剖面,盘区间 26 m 宽矿柱中心 C-C 剖面。

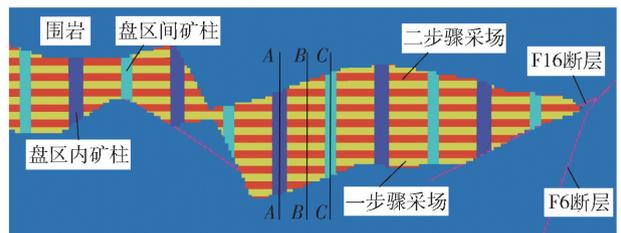


图 6 矿体模型水平剖面图

上部和下部两个采区同时生产,各采区均按从下往上开采顺序进行开采。每次回采都按照先采一步骤矿房采场,充填后再采二步骤矿柱采场,充填后

进入下一个开采步,共分8个开采步,具体顺序见表2。

表2 某铁矿开采模拟顺序表

步骤	开采范围
1	-580 ~ -520 m 一步骤回采, -340 ~ -280 m 一步骤回采
2	-580 ~ -520 m 二步骤回采, -340 ~ -280 m 二步骤回采
3	-520 ~ -460 m 一步骤回采, -280 ~ -220 m 一步骤回采
4	-520 ~ -460 m 二步骤回采, -280 ~ -220 m 二步骤回采
5	-460 ~ -400 m 一步骤回采, -220 ~ -160 m 一步骤回采
6	-460 ~ -400 m 二步骤回采, -220 ~ -160 m 二步骤回采
7	-400 ~ -340 m 一步骤回采, -160 ~ -100 m 一步骤回采
8	-400 ~ -340 m 二步骤回采, -160 ~ -100 m 二步骤回采

4 结果讨论

受篇幅所限,仅选取开采的第2、4、6、8步对34 m矿柱、26 m矿柱和采场的最大主应力、最小主应力和塑性区演化进行分析。

4.1 矿柱分析

垂直矿体走向 A-A 剖面盘区 34 m 矿柱最大主应力场如图7所示,在矿体的开采过程中,该剖面的矿柱应力集中不断转移。第2步开采完毕,最大主应力主要集中于-580 m水平附近,最大值约50.18 MPa,第4步开采完毕,最大主应力集中区向上扩展,最大值约为50.36 MPa,第6步开采完毕,最大主应力集中区进一步向上扩展,最大值约为50.50 MPa,第8步开采完毕,最大主应力集中区进一步向上扩展,最大值约为50.61 MPa, -340 ~ -580 m 之间下采区应力为35 ~ 50 MPa。

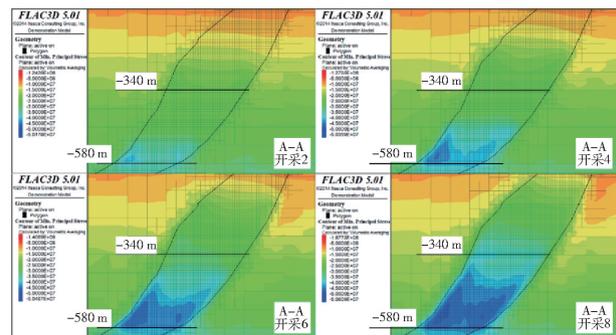


图7 A-A剖面最大主应力演化

垂直矿体走向 A-A 剖面盘区 34 m 矿柱最小主应力场如图8所示。矿体的开采对34 m间柱形成卸压影响,表现为对应开采水平的矿柱区域最小主应力大幅降低,并带动周边围岩形成卸压区。整个

开采过程中,34 m矿柱该剖面范围内未见拉应力区。

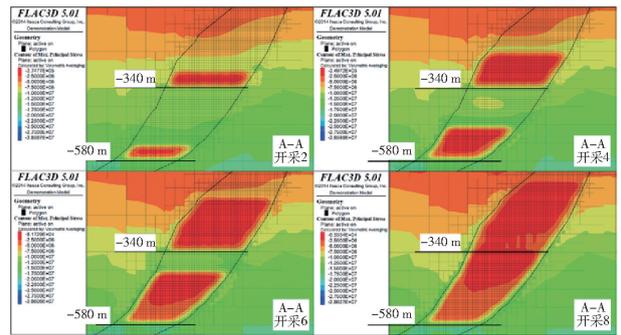


图8 A-A剖面最小主应力演化

垂直矿体走向 A-A 剖面盘区 34 m 矿柱塑性区如图9所示。第2步开采完毕,34 m矿柱该剖面内出现极少曾经发生剪切破坏的塑性区,第4步开采完毕,在-520 m水平左右出现曾经发生剪切破坏的塑性区。第6步开采完毕,塑性区面积较上一步增大。第8步开采完毕,塑性区面积较上一步增大。值得注意的是,该剖面塑性区均为曾经发生剪切破坏现已恢复弹性,且均分布在-340 m以下采区。

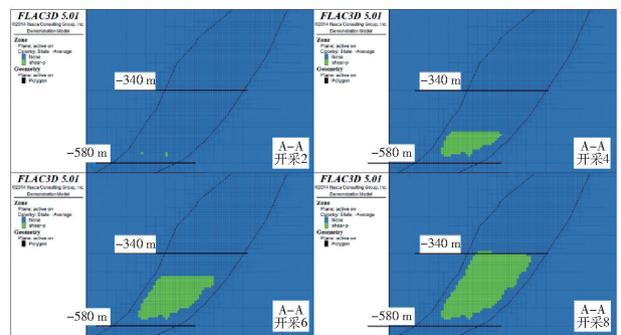


图9 A-A剖面塑性区演化

垂直矿体走向 C-C 剖面盘区 26 m 矿柱最大主应力场如图10所示。在矿体的开采过程中,该剖面的矿柱应力集中不断转移。第2步开采完毕,最大主应力主要集中于-580 m水平附近,最大值约50.19 MPa,第4步开采完毕,最大主应力集中区向上扩展,最大值约为50.39 MPa,第6步开采完毕,最大主应力集中区进一步向上扩展,最大值约为52.71 MPa,第8步开采完毕,最大主应力集中区进一步向上扩展,最大值约为54.96 MPa, -340 ~ -580 m 之间下采区应力为35 ~ 50 MPa,相较34 m矿柱,26 m矿柱应力集中区范围扩至-340 m水平以上。

垂直矿体走向 C-C 剖面盘区 26 m 矿柱最小主

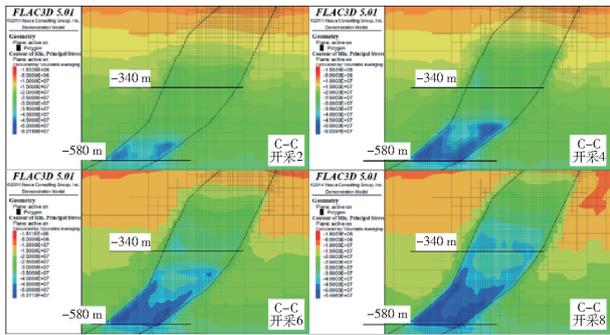


图 10 C-C 剖面最大主应力演化

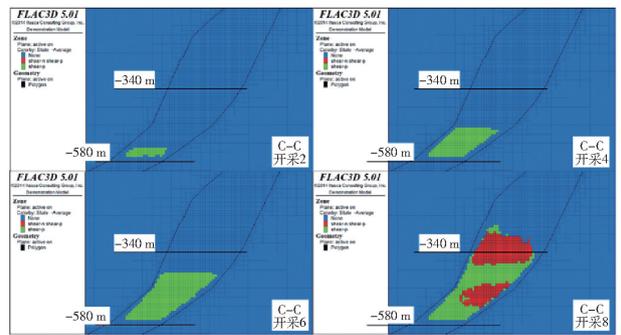


图 12 C-C 剖面塑性区演化

应力场如图 11 所示。矿体的开采对 26 m 盘区间柱形成卸压影响,表现为对应开采水平的围岩区域最小主应力大幅降低,并带动周边围岩形成卸压区。在开采 4 步、开采 6 步出现极小拉应力区,但最后一步开采时,矿柱该剖面范围内未见拉应力。

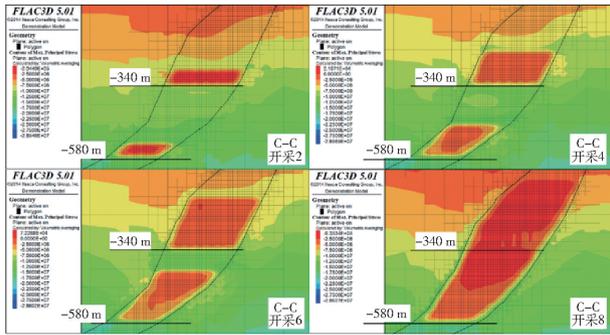


图 11 C-C 剖面最小主应力演化

力集中规律同第 2 步开采,最大值约为 50.38 MPa,第 6 步开采完毕,水平矿柱高 60 m,最大主应力集中规律同第 4 步开采,最大值约为 50.53 MPa,第 8 步开采完毕,最大主应力集中与 -580 m 水平与上下盘围岩交界处,最大值约为 50.64 MPa。卸压特征表现为上盘较下盘更为明显,上采区较下采区更为明显,两帮较顶底板更为明显。

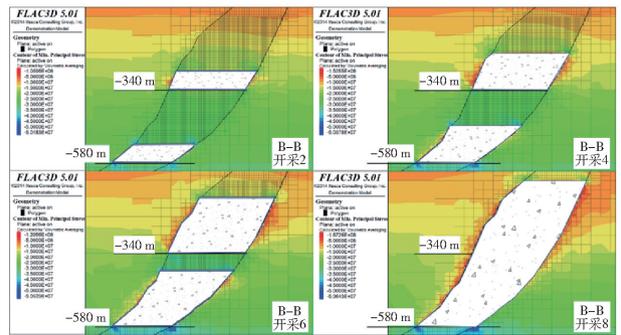


图 13 B-B 剖面最大主应力演化

垂直矿体走向 C-C 剖面盘区间 26 m 矿柱塑性区变化如图 12 所示。第 2 步开采完毕,26 m 矿柱该剖面内 -565 ~ -535 m 之间出现少量曾经发生剪切破坏的塑性区,较 34 m 矿柱内塑性区面积大;第 4 步开采完毕,塑性区面积较上一步增大,范围增至 -565 ~ -475 m。第 6 步开采完毕,塑性区面积较上一步增大,范围增至 -565 ~ -400 m。第 8 步开采完毕,塑性区面积较上一步增大,且 -340 m 水平附近出现剪切破坏塑性区,且 -490 m 水平靠近下盘附近也出现剪切破坏塑性区,但两处塑性区并未贯通。

4.2 采场分析

垂直矿体走向 B-B 剖面采区最大主应力场如图 13 所示。在矿体的开采过程中,该剖面的矿柱应力集中不断转移。第 2 步开采完毕,水平矿柱高 180 m,最大主应力主要集中于下采区采场顶底板与侧帮夹角附近,最大值约 50.18 MPa,两帮呈卸压状态,第 4 步开采完毕,水平矿柱高 120 m,最大主应

力集中规律同第 2 步开采,最大值约为 50.38 MPa,第 6 步开采完毕,水平矿柱高 60 m,最大主应力集中规律同第 4 步开采,最大值约为 50.53 MPa,第 8 步开采完毕,最大主应力集中与 -580 m 水平与上下盘围岩交界处,最大值约为 50.64 MPa。卸压特征表现为上盘较下盘更为明显,上采区较下采区更为明显,两帮较顶底板更为明显。

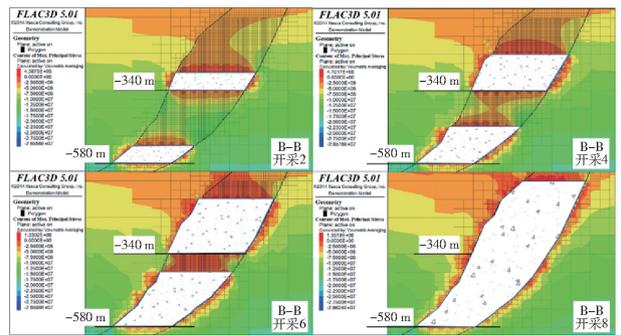


图 14 B-B 剖面最小主应力演化

垂直矿体走向 B-B 剖面采场塑性区变化如图 15 所示。其中,白色区域为充填区。第 2 步开采完毕,水平矿柱高 180 m,采场周边围岩以曾经剪切破坏塑性区为主,伴随极少曾经拉伸破坏塑性区,且下部采区塑性区面积大于上部采区。第 4 步开采完毕,水平矿柱高 120 m,塑性区分布与第 2 步存在相似规律。第 6 步开采完毕,水平矿柱高 60 m,拉伸破坏塑性区占比增加,且在下采区上盘围岩附近出现少量正在发生剪切破坏的塑性区。第 8 步开采完毕,水平矿柱高 30 m,塑性区分布规律与第 6 步存在相似规律。

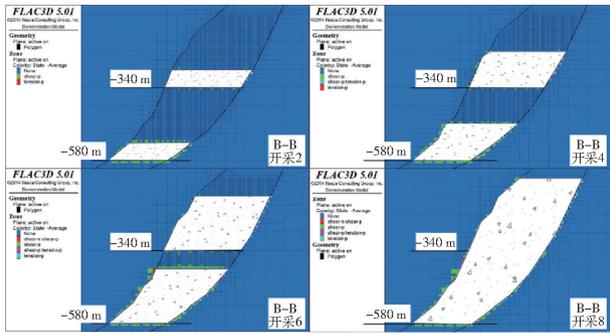


图 15 B-B 剖面塑性区演化

纵观图 7 ~ 图 15,根据塑性区贯通及应力集中情况显示,盘区内部 34 m 矿柱稳定性明显高于盘区间 26 m 矿柱稳定性。矿柱和盘区的应力集中随着开采的进行不断变化,在最终开采步,26 m 矿柱应力集中情况最为严重,最大主应力值最大,其次是采场最大主应力值,34 m 矿柱最大主应力值最小。上采区(-340 m 以上)塑性区破坏及应力集中情况明显小于下采区(-580 m 以上)。采场 -580 m 水平附近应力集中最为明显,且贯穿整个回采阶段,因此该水平应做重点监测并采取对应措施降低失稳风险^[5-6]。

5 结论

(1) 本文初步模拟研究表明,某铁矿采用大直径空场嗣后充填采矿法进行开采可以保证多中段采

场的稳定性。

(2) 模拟结果显示,超大规模连续盘区多中段开采模拟,多中段开采的扰动叠加效应对 26 m 矿柱作用明显,表现为塑性区范围较 34 m 矿柱和采场最广、最大主应力值最大。矿柱的回收应根据后期开采推进和地质情况揭露开展岩石力学专题研究。

(3) 多中段开采实为一种卸压开采,具体表现为通过最小应力云图可发现两中段之间的水平矿柱存在明显的卸压区。

值得注意的是,岩石力学研究应该是服务于矿山开采全生命周期并依托于矿山开采全生命周期。在探建结合、探采结合的原则下,不断更新岩石力学相关参数,修正模拟计算,为采场结构参数和回采顺序优化提供更加科学的指导。此外,数值模拟存在理想化假定的局限,实际生产施工情况非常复杂,比如充填体的接顶、强度控制等均与数值模拟计算存在较大差异。矿山开采过程中应加强监测手段,结合理论计算与数值模拟结果为矿山安全高效回采提供充分的科学指导。

[参考文献]

- [1] 李兴权. 白象山铁矿多中段联合开采围岩扰动效应研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [2] 孟庆彬,王锐,韩立军,等. 多中段联合开采围岩扰动效应及采矿进路支护技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3):930-943.
- [3] 韩斌,吴爱祥,刘同有,等. 金川二矿区多中段机械化盘区回采顺序的数值模拟优化研究[J]. 矿冶工程, 2004, 24(2):4-7.
- [4] 吴昊燕,刘育明,寇永渊,等. 深井矿山下向水平分层充填开采与水平矿柱应力演化研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(6):1-6.
- [5] 吴昊燕,张爱民,王志远. 深井大规模进路充填开采扰动效应影响分析[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3):33-37.
- [6] 赵毅鑫,赵良辰,杨东辉,等. 基于改进组合弹簧模型的矿井地应力场计算方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1):103-116.