

露天转地下大规模开采盘区矿柱稳定性分析

Stability Analysis of Large-scale Mining Panel Pillars from Open Pit to Underground

孙健¹, 陈小伟^{2,3}, 宫长亮¹, 安晶^{2,3}, 任鹏召², 张磊¹, 张少杰²

(1. 鞍钢集团矿业有限公司大孤山分公司, 辽宁鞍山 114046; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
3. 北京科技大学, 北京 100083)

摘要:露天转地下开采时,盘区矿柱能够承受上覆岩层荷载,对开采区域围岩稳定性具有重要的影响。为保证地下开采生产安全,本文采用数值模拟方法,根据无人机航拍得到影像数据生成三维实景模型,建立三维矿山数值模型,在盘区之间布置不同宽度的条形矿柱,对宽度分别为20 m、30 m、40 m以及34 m与26 m交替布置四种盘区矿柱进行尺寸对比分析研究。通过对比盘区矿柱应力分布和塑性分布特征,发现随着矿柱宽度的增大,塑性破坏分布区域减少,最大主应力值降低,能够有效保护开采区域的稳定性。模拟结果表明,矿柱宽度为34 m与26 m交替的方案最优,研究结果可为类似开采条件下的矿柱设计提供参考。

关键词:露天转地下开采; 矿柱宽度; 尺寸设计; 稳定性分析; 数值模拟

中图分类号: TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)05-0011-06

Abstract: When transferring from open-pit to underground mining, the pillar in the panel area can withstand the load of the overlying rock layer, which has a significant impact on the stability of the rock mass in the mining area. To ensure the safety of underground mining production, this study uses numerical simulation methods to generate a three-dimensional real-scene model based on the image data obtained from drone aerial photography. A three-dimensional mine numerical model is established, and different width strip pillars are arranged between panels. Four types of panel pillars with widths of 20 m, 30 m, 40 m, 34 m, and 26 m are compared and analyzed for size. By comparing the stress distribution and plastic distribution characteristics of the pillar in the panel area, it was found that as the pillar width increases, the plastic failure distribution area decreases, and the maximum principal stress value decreases. This can effectively protect the stability of the mining area, and the optimal plan with a pillar width of 34 m and 26 m alternating is obtained. The research results can provide a reference for pillar design under similar mining conditions.

Key words: open-pit mining to underground mining; mine pillar width; size design; stability analysis; numerical simulation

1 前言

目前,我国浅部矿产资源逐渐减少,大部分露天矿山相继进入地下开采阶段^[1-2]。露天转地下开采引起地压活动规律改变,使开采盘区围岩力学条恶化,威胁矿山企业的生产安全^[3-5]。为有效控制盘区围岩稳定,设计中通常留设承载矿柱,相关研究主要涉及矿柱承载机理及厚度优化、矿柱尺寸设计、盘区采场跨度、隔离矿柱回采方案优化、矿柱承载与破坏特征等方面内容。王文军等^[6]研究了深部开采中隔离库矿柱的承载机理,采用理论分析和数值模拟的方法,确定原岩隔离矿柱为25 m时满足安全要求;赖祖豪等^[7]基于量纲分析理论,选取5因素水平

建立境界矿柱厚度计算模型,采用计算模型得到的境界矿柱厚度与实际值接近,该模型具有较强的实用性,可为露天转地下境界矿柱厚度的确定提供理论依据;卢萍^[8]等采用FLAC3D数值模拟方法,进行了不同厚度隔离矿柱的数值模拟,确定矿山隔离矿柱厚度20 m为最优值;范文涛等^[9]基根据不同矿柱长宽比模型计算,发现矿柱的长宽比值越大,承载能力降低,且脆性破坏特征明显;史秀志等^[10]建立了矿柱简化力学模型,利用能量突变分析法,导出盘区矿柱的失稳判据,据此得到盘区矿柱的安全宽度为31 m;张少杰等^[11]研究了深井超大面积开采盘区条形矿柱的应力和塑性区分布特征,揭示了盘区矿柱的承载作用;罗斌玉等^[12]建立了压剪荷载作用下矿柱力学模型,分析不同应力路径对矿柱稳定性的影响;隔离矿柱回采方案与采场结构参数优化^[13-14],主要根据盘区回采顺序和盘区隔离矿柱采场结构参数进行围岩变形和应力分布特征对比研

[作者简介] 孙健(1981—),男,高级工程师,主要从事设备管理和工程管理工作。

[引用格式] 孙健,陈小伟,宫长亮,等. 露天转地下大规模开采盘区矿柱稳定性分析[J]. 中国矿山工程,2023,52(5):11-16.

究,选出最优方案;朱万成等^[15]认为矿柱的承载及失稳破坏与采空区稳定性紧密相关,归纳总结单矿柱稳定性研究方法和多矿柱载荷传递行为及失稳破坏机制。采区通常为多矿柱布置,矿柱除承受上覆岩层荷载外,多矿柱之间也存在传递荷载,荷载形式极为复杂,相关研究相对较少,导致工程实践中矿柱尺寸设计缺少科学依据。

本文对某铁矿露天转地下开采盘区矿柱进行了数值模拟分析,在保证地下矿体开采量最大化的基础上,研究不同矿柱宽度对围岩稳定性的影响,研究成果可为露天转地下大规模开采条件下的矿柱设计提供依据。

2 工程概况

2.1 工程地质

矿区断裂构造对铁矿床的影响最大,断裂基本沿铁矿带近于平行展布,走向 $280^{\circ} \sim 310^{\circ}$,由数条平行或相互交汇复合的断层组成,总体构造性质为南盘向东走滑的以走滑为主的断裂构造。岩石风化程度一般,发育深度 $30 \sim 80$ m,钻孔揭露风化裂隙发育最大深度为 62.37 m。矿区内断裂构造较为发育,个别位置受断裂构造、层间裂隙或岩脉侵入、穿插致使岩性频繁变化的影响,使岩石质量和岩体完整性受到一定的破坏,破碎位置多位于绿泥石英片岩和石英岩中,使其岩石质量及岩体完整性均较差。露天采场断层多与边帮呈大角度相交,断层倾角较陡,或与边帮坡面反倾,边帮岩体受断层及次生结构面的影响较大。

矿体及围岩完整性多为中等-完整,岩体质量中等-极好,局部构造带及岩脉侵入接触带附近岩体较破碎,完整性和质量较差。矿区工程地质条件复杂类型为中等类型。

2.2 开采现状

某铁矿经过多年露天开采后,现形成东西长 1700 m、南北宽 1520 m、垂直深达 400 m椭圆形露天坑,其地形地貌景观是整个矿坑呈倒金字塔形。现露天采场最低标高为 -354 m,露天采场上口地面标高约 $70 \sim 110$ m;矿体长约 1200 m,走向 $310^{\circ} \sim 315^{\circ}$,倾角 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$,平均厚度 128 m,设计坑底标高 -414 m。根据矿山产量安排,露天开采预计2024年结束,后续需对矿山转入地下开采进行规划、建设。

根据矿体的开采技术条件,采矿方法主要采用大直径深孔空场嗣后充填法和分段空场嗣后充填

法。将矿体划分为盘区,以盘区为回采单元组织生产。采场分为矿房和矿柱,进行两步骤回采,矿房、矿柱宽度均定为 18 m,采场长为 90 m,中段高度 60 m,采用隔三采一的方式开采,一步矿房回采结束后,再对二步矿柱进行回采。

3 数值模拟

3.1 航拍模型

采用测绘专业级设备无人机(经纬M300-RTK)在矿区进行了三维实景复制,航测范围周长约 15 km,面积约 16 km²,精细测量的重点区域主要有:矿坑、排岩场和尾矿库。

无人机倾斜摄影技术的工作流程分为像控点布设、测线规划、数据采集、数据处理、成果表达等流程。经过无人机航拍得到的影像数据,通过影像数据中的角点、边缘等灰度值差异较大的点等一系列特征点进行匹配,匹配完成后对数据进行矫正,以保证得到数据的精度。对拥有同一特征点的三张及以上照片进行三角运算,获得特征点的空间数据,并对空间数据进行误差运算,矫正照片的位置信息和姿态信息。矫正完成后对照片进行逐像素匹配运算,进而生成稠密点云,将点云中的三个点连接生成三角网,形成初步模型,然后对模型进行平滑处理得到最终模型,将模型对应的照片的纹理信息映射到模型上,生成三维实景模型,具体如图1所示。



图1 三维实景模型

3.2 FLAC^{3D}模型

1) FLAC^{3D}软件介绍

FLAC^{3D}是用于工程计算的大型三维显式拉格朗日有限差分程序,能够模拟计算岩体材料受力状态下的各种力学行为。本次研究过程中,根据材料力学特征,围岩和矿体均采用摩尔库仑屈服准则,即

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (1)$$

式中: f_s ——材料发生破坏的临界值,MPa;

σ_1, σ_3 ——最大和最小主应力,MPa;

c ——黏结力,MPa;

ϕ ——摩擦角,MPa。

当 $f_s > 0$ 时,材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下,岩体的抗拉强度很低,因此可根据抗拉强度准则($\sigma_3 \geq \sigma_t$ (抗拉强度,MPa))判断岩体是否产生拉破坏。

2) 模型建立

在矿区工程地质调查、无人机实景复制的基础上,综合矿区的主要地质构造和工程岩体分组,采用大型有限差分软件 FLAC3D,构建了该矿山的真三维数值模型,对露天转地下开采全过程进行模拟计算。模型尺寸为 3 800 m × 3 800 m × 900 m,具体如图 2 所示。

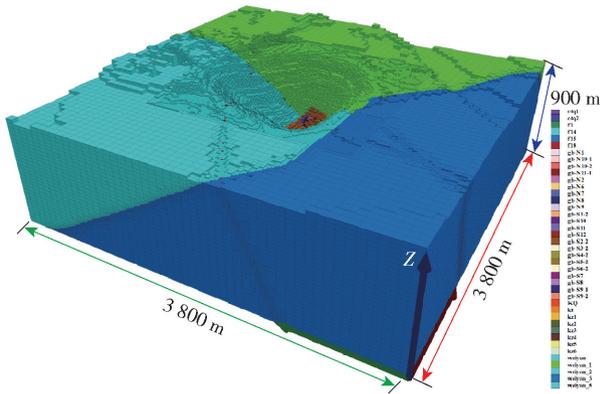


图 2 三维数值模型

数值模型中的应力边界条件按照地应力测量得到的地应力分布规律(式(2)~式(4))施加,模型侧面限制水平移动,底部限制垂直移动。模型中矿体与矿柱之间的位置关系如图 3 所示。

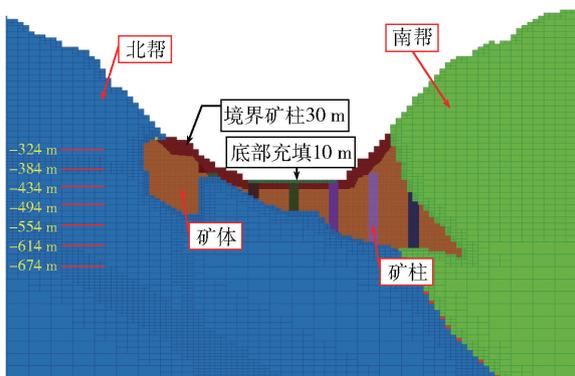


图 3 模型垂直 Y 轴切面示意图

根据矿山水压致裂地应力测量研究的数据显

示:矿区应力场以水平应力为主导,最大水平主应力与垂直应力的平均比值为 2.42,最小水平主应力与垂直应力的平均比值为 1.49。平均最大主应力方向为 N62.6°E。矿区测点的三个主应力随深度变化的线性回归方程为

$$S_H = 0.05122H + 5.15821 \quad (2)$$

$$S_h = 0.03104H + 3.34273 \quad (3)$$

$$S_V = 0.02819H \quad (4)$$

式中: S_H ——最大水平主应力,MPa;

S_h ——最小水平主应力,MPa;

S_V ——垂直应力,MPa

H ——垂直深度,m。

3.3 力学参数

本研究计算所需的参数是在室内岩石力学试验的基础上,并通过 Hoek-Brown 强度准则折减之后获得,能够真实反映现场岩体力学性质,具体参数取值见表 1。

表 1 岩体物理力学参数

岩性	容重 γ / kN·m ⁻³	弹性模量 E/GPa	泊松 比 μ	内聚力 C/MPa	摩擦角 ϕ (°)
磁铁石英岩(矿体)	30.7	20.04	0.21	0.54	33.5
太古代花岗岩	26.5	25.55	0.26	0.405	35.7
绿泥石英片岩	26.4	37.67	0.29	0.38	28
花岗斑岩	27.2	30.53	0.26	0.385	31.5

3.4 设计方案与模拟步骤

1) 开采顺序

设计对 -324 ~ -674 m 之间的矿体进行回采,以 -494 m 水平为界分为上部采区和下部采区,上部采区矿体分为 -380 m、-430 m、-490 m 三个无轨开采中段,下部采区矿体分为 -550 m、-610 m、-670 m 三个无轨开采中段。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 -490 m 中段和 -670 m 中段。

2) 模型方案

盘区沿走向布置,长度 120 m,中段高度 60 m,盘区内垂直走向划分采场,5 个采场组成一个盘区。为了得到最优的盘区矿柱设计尺寸,将盘区矿柱的宽度设计为 20 m、30 m、40 m 以及 34 m 与 26 m 交替布置的四种情况,分别进行模拟计算。在模型中布置垂直 Y 轴的剖面 A-A'和垂直 Z 轴的剖面 B-B',具体如图 4 所示。拟分析的 A-A'剖面布置在穿过深部矿体正中央的位置;拟分析的 B-B'剖面布置在 -494 m 水平。

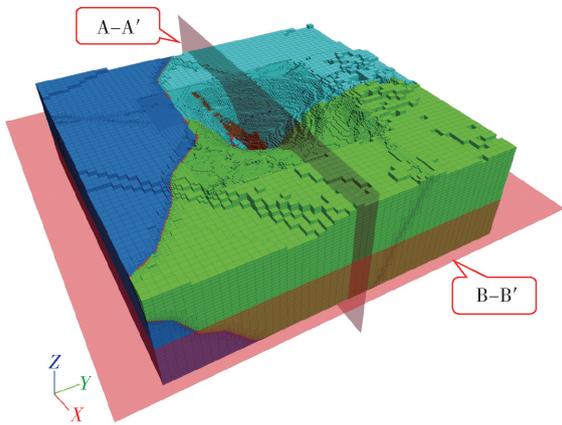


图4 模型剖面布置

3) 模拟步骤

采矿工程的力学特点是岩体力学行为与开采历史和开采过程有关,结合矿山地下开采规划方案,确定数值模拟的计算过程。

(1) 计算在给定边界力学与位移边界条件下模型的初始状态。

(2) 模拟露天坑的形成过程,模拟挂帮矿的开采过程。

(3) 在盘区矿柱分别为 20 m、30 m、40 m 以及 34 m 和 26 m 间隔布置四种方案下,模拟地下开采过程,分析研究地下开采过程中预留矿柱及周边岩体的稳定性特征。

4 矿柱稳定性分析

4.1 数值模拟结果

为研究盘区矿柱宽度对其稳定性的影响,根据数值模拟结果,得到三种不同盘区矿柱宽度(20 m、30 m 和 40 m)方案下地下开采后 Y 轴的剖面 A-A' 和水平剖面 B-B' 的塑性区分布及最大主应力分布情况,具体如图 5 至图 8 所示。

数值模拟结果显示,当盘区矿柱宽为 20 m 时,地下开采结束后,矿柱处于高应力状态,最大主应力值约为 23 MPa,处于塑性破坏状态;当盘区矿柱宽为 30 m 时,地下开采结束后,矿柱处于高应力状态,但未进入塑性状态,盘区矿柱的最大主应力值约为 19 MPa,矿柱较好的保护了开采区域的稳定性;当盘区矿柱宽为 40 m 时,地下开采结束后,矿柱处出现应力集中,但未进入塑性状态,盘区矿柱的最大主应力值约为 16 MPa,矿柱保护了开采区域的稳定性,但经济性相对较差。

综合考虑三种盘区矿柱宽度方案下的模拟结果,认为盘区矿柱宽度为 30 m 的方案优于盘区矿柱

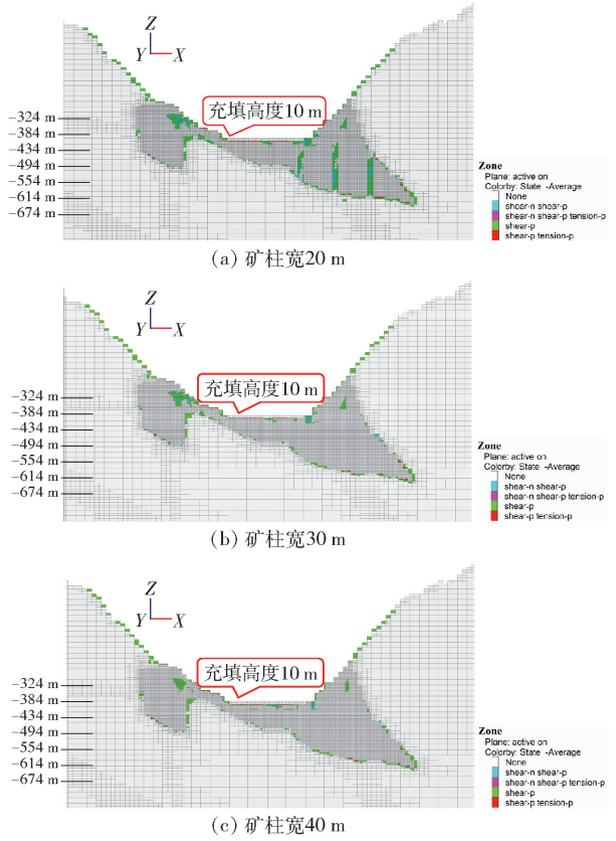


图5 地下开采后 A-A' 剖面的塑性区分布宽度为 20 m 和 40 m 的方案。

4.2 优化设计

为了最优化盘区矿柱的尺寸,盘区矿柱宽度设置为 34 m 与 26 m 交替变化方案下地下开采后的塑性区分布及最大主应力分布情况如图 9 至图 12 所示。

当盘区矿柱宽为 34 m 与 26 m 交替变化时,地下开采结束后,矿柱处于高应力状态,但未进入塑性状态,盘区矿柱的最大主应力值约为 18 MPa,矿柱较好的保护了开采区域的稳定性。相较于盘区矿柱均设置为 30 m,矿柱的最大主应力值基本不变。

综合考虑上述几种盘区矿柱宽度方案下的模拟结果,认为盘区矿柱宽度为 34 m 与 26 m 交替的方案最优。

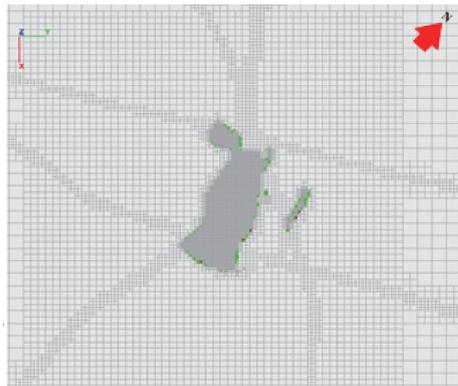
5 结论

本文采用数值模拟方法对某露天矿山盘区矿柱的塑性分布和应力场特征进行了分析,得出以下结论。

(1) 地下开采盘区矿柱具有良好的承载作用,采用数值模拟方法,能够反映多矿柱开采工况时上覆岩层及矿柱自身的稳定情况,是地下开采矿柱设计的有利工具。



(a) 矿柱宽20 m



(b) 矿柱宽30 m



(c) 矿柱宽40 m

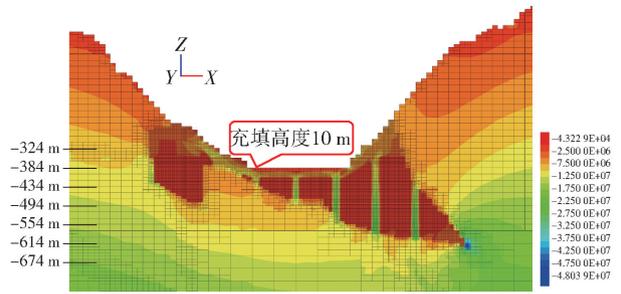
图6 地下开采后B-B'剖面的塑性区分布

(2) 盘区矿柱宽较小时, 矿柱处于相对较高应力和塑性破坏状态, 随着矿柱宽度的增大, 塑性破坏分布区域减少, 最大主应力值降低, 矿柱较好的保护了开采区域的稳定性; 从经济性方面考虑, 认为盘区矿柱宽度为 30 m 的方案优于盘区矿柱宽度为 20 m 和 40 m 的方案。

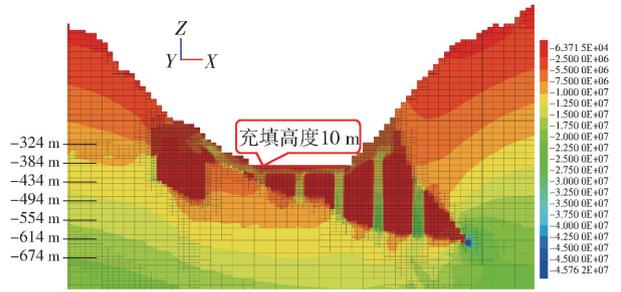
(3) 采用盘区矿柱宽度 34 m 与 26 m 交替变化方案, 矿柱处于高应力状态, 但未进入塑性状态, 矿柱能够较好保护开采区域的稳定性, 为最优方案。

【参考文献】

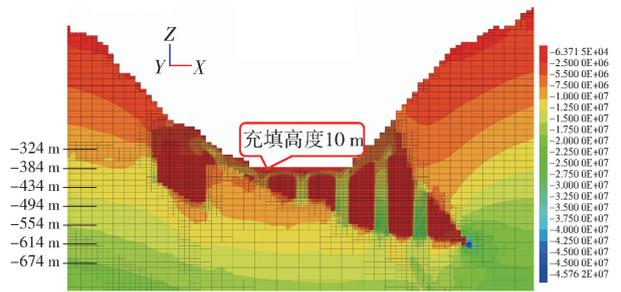
[1] 刘育明. 超大规模深井开采若干技术解决方案探讨[J]. 中国矿山工程, 2016, 45(6): 64 - 69.



(a) 矿柱宽20 m



(b) 矿柱宽30 m



(c) 矿柱宽40 m

图7 地下开采后A-A'剖面最大主应力分布

[2] 裴文田, 吴志波. 露天转地下安全开采研究[J]. 中国矿山工程, 2016, 45(2): 61 - 63, 67.

[3] 李小双, 王运敏, 赵奎, 等. 金属矿山露天转地下开采的关键问题研究进展[J]. 金属矿山, 2019(12): 12 - 20.

[4] 路增祥, 孟凡明, 蔡美峰. 露天转地下开采矿山的安全风险特征与防范[J]. 矿业工程, 2013, 11(2): 17 - 19.

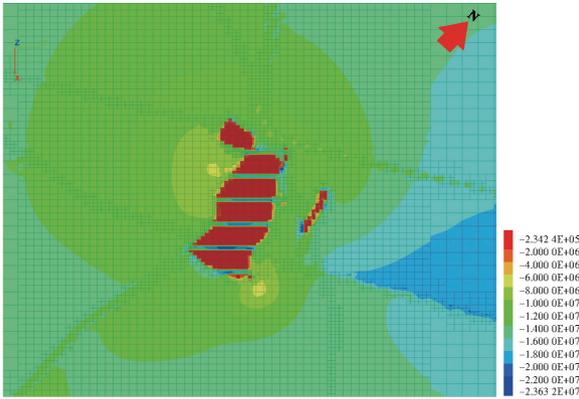
[5] 路增祥, 孟凡明, 蔡美峰. 露天转地下开采的平稳过渡方案与技术措施[J]. 中国矿业, 2012, 21(11): 91 - 94.

[6] 王文军, 李家树, 徐帅, 等. 深部开采过程中隔离矿柱承载机理及厚度优化[J]. 金属矿山, 2020(8): 38 - 43.

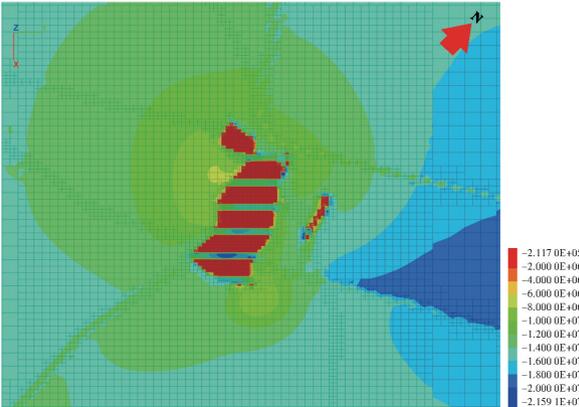
[7] 赖祖豪, 邓飞, 穆光慈, 等. 基于量纲分析的露天转地下境界矿柱厚度研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(9): 19 - 23, 27.

[8] 卢萍, 张金梁, 杨泽, 等. 某铜矿露天转地下隔离矿柱的确定研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(6): 11 - 14, 19.

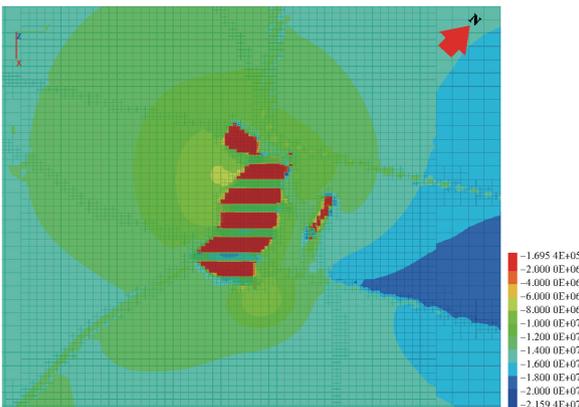
[9] 范文涛, 纪永刚, 于文杰, 等. 矿柱尺寸设计及稳定性的数值模拟分析[J]. 现代矿业, 2021, 37(5): 77 - 80.



(a) 矿柱宽20 m



(b) 矿柱宽30 m



(c) 矿柱宽40 m

图8 地下开采后 B-B'剖面最大主应力分布



图10 地下开采后 B-B'剖面的塑性区分布

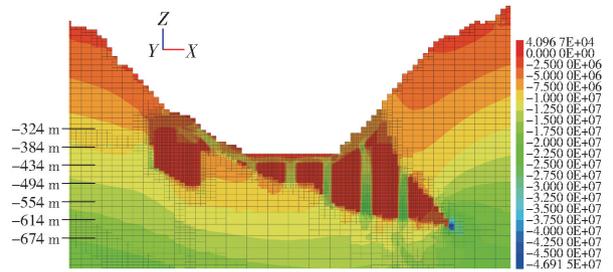


图11 地下开采后 A-A'剖面最大主应力分布

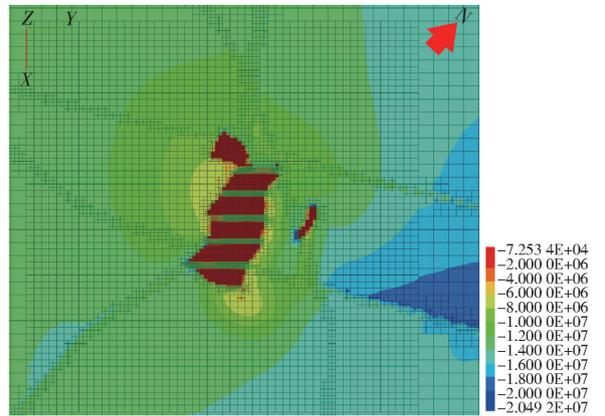


图12 地下开采后 B-B'剖面最大主应力分布

柱承载作用研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(6): 7-10, 15.

[12] 罗斌玉,叶义成,胡南燕,等. 压剪复合受载下矿柱应力状态的 Mohr 圆分析与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 63-73.

[13] 曾凌方,张帅帅,李华华. 某矿梭形隔离矿柱的回采方案优化[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(8): 5-9.

[14] 罗周全,管佳林,冯富康,等. 盘区隔离矿柱采场结构参数数值优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 261-264.

[15] 朱万成,董航宇,刘溪鹤,等. 金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 5-31.

图9 地下开采后 A-A'剖面的塑性区分布

[10] 史秀志,齐学飞,郭霆. 深部大跨度采场盘区矿柱的失稳研究[J]. 有色金属工程, 2019, 9(1): 77-82.

[11] 张少杰,刘育明,张爱民. 深井超大面积开采盘区矿