露天转地下开采隔离矿柱厚度优化及稳定性分析*

张冰洁,陈晓青,杨宇江,王薪荣,赵江东

(辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051)

摘要:针对露天转地下开采过程中隔离矿柱安全厚度留设及稳定性问题,以国内某露天转地下开采金属矿山为工程背景,基于双剪统一强度理论的质点安全系数计算方法与数值模拟,对不同隔离矿柱厚度、不同回采步骤条件下的采场进行动态模拟和对比分析。结果表明:(1)矿房宽度为20 m时,采场隔离矿柱最优安全厚度为39.37 m,此时隔离矿柱底面质点安全系数最小值为1,满足工程安全需求,结合工程实际考虑隔离矿柱厚度为40 m;(2)隔离矿柱底面质点安全系数随厚度增加呈非线性增长趋势,空间分布特征相近:上盘围岩接触区域安全系数低于下盘,顶板宽度方向上底边中心处安全性低于两端,顶板长度方向自西向东呈递增趋势;(3)开采扰动导致隔离矿柱稳定性劣化,随着采空区暴露面积的增加,危险范围随之扩大,越靠近采空区质点安全系数越小,危险区域随回采推进由底面中心迁移至长边中点。研究提出的基于临界安全厚度阈值与动态风险演化的隔离矿柱厚度优化方法,可为露天转地下开采矿山隔离矿柱安全厚度留设问题提供参考。

关键词:露天转地下开采;隔离矿柱厚度;双剪统一强度理论;质点安全系数;开采扰动

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0069-10

Optimization of Isolated Pillar Thickness and Stability Analysis for Open-Pit to Underground Mining

ZHANG Bingjie, CHEN Xiaoqing, YANG Yujiang, WANG Xinrong, ZHAO Jiangdong

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: To address the problems of the determination of the safe thickness and stability of isolated pillars during open-pit to underground mining, taking a domestic metal mine with open-pit to underground mining as the engineering background, dynamic simulation and comparative analysis were carried out on the stopes under the conditions of different isolated pillar thicknesses and different stoping sequences based on the particle safety factor calculation method derived from the twin-shear unified strength theory and numerical simulation. The results are shown as follows. Firstly, when the mining room width is 20 m, the optimal safe thickness of the isolated pillar in the mining room is 39.37 m. At this time, the minimum value of the particle safety factor at the bottom surface of the isolated pillar is 1, which meets the engineering safety requirements. Considering the actual engineering conditions, the isolated pillar thickness is determined to be 40 m. Secondly, the particle safety factor at the bottom surface of the isolated pillar shows a nonlinear growth trend with the increase of thickness, with similar spatial distribution characteristics: the safety factor in the contact area with the hanging wall surrounding rock is lower than that of the footwall, the safety factor at the center of the bottom edge in the width direction of the roof is lower than that at both ends, and the safety factor shows an increasing trend from west to east in the length direction of the roof. Thirdly, mining disturbance leads to the deterioration of the stability of isolated pillars. As the exposed area of the goaf increases, the dangerous range expands accordingly. The closer the particles are to the goaf, the smaller their particle safety factor will be, and the dangerous area migrates from the center of the bottom surface to the midpoint of the long side with the advance of stoping. The proposed thickness optimization method for isolated pillars based on the critical safe thickness threshold and dynamic risk evolution can provide a reference for the problem of determining the safe thickness of isolated pillars in open-pit to underground mining mines.

Key words: Open-pit to underground mining, Isolated pillar thickness, Twin-shear unified strength theory, Particle safety factor, Mining disturbance

---

* **收稿日期**:2025-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52304087);辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212410146006)

作者简介:张冰洁(1998—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要从事采矿技术及安全方面的研究。E-mail:2453117287@qq.com

通信作者:杨宇江(1974—),男,辽宁丹东人,博士,副教授,主要从事岩石力学和边坡工程研究。E-mail:yyj_yangyujiang@163.com

0 引言

当前,我国大量露天铁矿正逐步或已经进入深凹开采。随着开采深度的增加,矿山采剥比上升且经济效益持续下降,因此露天开采必须向地下开采转变。我国的凤凰山铁矿、冶山铁矿和眼前山铁矿等,国外加拿大的 Kidd Greek 铜矿和瑞典的 Kirunawala 矿等均已成功转入地下开采[1],另有相当数目的矿山正在计划转入地下开采,如司家营铁矿和大孤山铁矿等。露天矿开采至最终境界时,其几何要素难以改变,且边坡及采场周边的岩体由于长期的累积损伤而持续劣化。设置隔离矿柱是传统露天转地下开采过渡模式中常用的技术手段,该技术可以有效减小地下开采对边坡的扰动,确保作业安全。因此,隔离矿柱的合理厚度确定及其稳定性评价是露天转地下矿山面临的关键问题。

隔离矿柱厚度是关乎矿山安全及经济效益的重要参数,常见的隔离矿柱厚度理论计算方法有 K.B.鲁别涅依特法、极限平衡分析法、平板梁模型等。已有学者针对隔离矿柱力学模型进行优化,以求得与实际更为相符的理论计算结果[2-4]。然而理论计算方法存在诸多假设条件,考虑的影响因素各不相同,应力及边界条件也过于简化,致使各方法之间所得结果难以统一。目前在隔离矿柱厚度研究中常运用不同理论分析方法进行对比研究,使用数值模拟软件对留设不同厚度隔离矿柱的采场围岩响应特征进行分析,最终确定隔离矿柱合理厚度[5-6]。然而,现有研究多从宏观上分析采场的应力与位移分布特征,以评价隔离矿柱的整体稳定性,而对其局部破坏及定量评价的研究较为少见[7-8]。

目前,Mohr-Coulomb(M-C)屈服准则应用较为普遍,但该准则未考虑中间主应力的影响,且对岩体抗拉强度的估算偏高。既有研究表明,中间主应力对材料的强度具有提升作用[9]。GAO 等[10]对比了不同强度准则下的巷道围岩弹塑性分析理论计算值与现场实测结果,发现基于统一强度理论的围岩弹塑性分析更符合工程实际。双剪统一强度理论考虑双剪单元体上全部应力分量的影响,能合理反映材料中间主应力效应,尤其适用于抗压强度显著高于抗拉强度的岩石材料[11-12]。该理论能较好地分析预测隔离矿柱的屈服破坏状态,且所需参数简便易求,工程实践中可操作性强、应用价值高[13-14]。因此,本文采用双剪统一强度理论作为隔离矿柱的破坏准则。

本文以国内某露天转地下开采金属矿山为研究背景,通过 AutoCAD-FLAC3D 耦合建模方式构建矿山三维地质模型,依据矿山拟定的采矿方案,对不同厚度的隔离矿柱进行模拟分析。采用基于双剪统一强度理论的质点安全系数计算与数值模拟相结合的方法,在计算隔离矿柱最优厚度的基础上,通过隔离矿柱底面安全系数分布图,定量评价不同区域的隔离矿柱安全状态,进而揭示隔离矿柱的安全系数分布规律,以期实现对隔离矿柱稳定性的动态分析。

1 工程概况

1.1 矿体地质条件

河北某铁矿属于典型的“鞍山式”沉积变质型铁矿,矿区出露地层以前震旦系、震旦系以及第四系为主。矿区含矿岩系总体呈单斜构造,沿走向呈现北东高翘、南西低伏的倾伏态势。矿体呈层状和块状产出,完整性较好,开采范围内矿体倾角为 45°～57°,平均约为 51°;矿层厚度为 46.36～54.64 m,平均约为 50.5 m,厚度变化较稳定;矿层埋深范围为 70～810 m,属于埋深变化显著的层状倾斜矿体。矿区地表水系较为发育,矿区内含水层主要由第四系孔隙水含水层与基岩裂隙含水层组成,矿床水文地质条件较为复杂。

1.2 矿体开采方案

该铁矿周边人口分布密集,综合考虑矿体自然赋存状态、充填体长期稳固性要求,选定暂留盘区间柱的阶段空场嗣后充填采矿方法进行开采。沿矿体走向布置盘区,盘区尺寸为 120 m×120 m,矿房阶段高度为 60 m,每分段包含矿房和矿柱。垂直矿体走向布置回采矿块,矿块尺寸为 20 m×50 m×60 m(长×宽×高),盘区内矿块按“隔一采一”进行回采,首采一步骤矿块,嗣后胶结充填后采二步骤矿块,然后进行尾砂充填。

2 隔离矿柱数值模拟研究

隔离矿柱内应力分布及材料破坏准则选取对隔离矿柱安全厚度的确定至关重要。传统理论计算方法在确定隔离矿柱临界厚度时,忽略了隔离矿柱厚度变化所引起的水平应力和应变变化,致使计算结果失真,因此多用于定性分析。采用数值模拟的方法在保证模型可靠、参数准确的前提下,可较真实地

模拟岩土体受力情况,且模型内部数据提取方便。YU 等[13-14]提出的双剪统一强度理论具有应力考虑全面、形式简单等显著优势,实用价值较高,因此本研究将其作为隔离矿柱的破坏准则。

2.1 隔离矿柱力学模型

隔离矿柱四周的围岩整体质量较好,且矿山采用空场嗣后充填法进行开采,隔离矿柱长度和宽度尺寸相近,可将该矿山隔离矿柱简化为板模型进行分析。程纬华[2]提出了一种基于厚板理论的多应力场联合作用下的隔离矿柱力学模型,将隔离矿柱简化为四边简支条件的强厚度板,该模型可有效避免隔离矿柱厚跨比对计算结果的影响,同时考虑了水平应力场的作用,能更加科学地反映隔离矿柱的应力分布规律。图 1 为局部隔离矿柱四边简支强厚度板模型,隔离矿柱长为 L,宽为 W,厚度为 H,坐标沿弹性主轴设定;P_0、P_a、Q_0、Q_a代表隔离矿柱所受不同方向的水平应力。

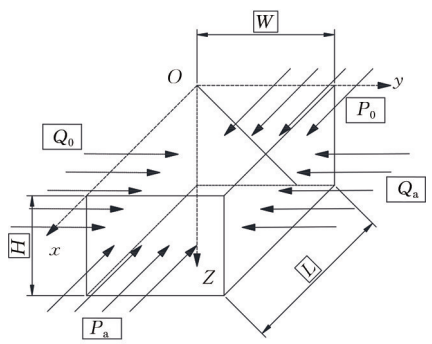


图 1 隔离矿柱力学模型

Fig.1 Mechanical model of isolated pillar

2.2 基于双剪统一强度理论的质点安全系数

双剪统一强度理论考虑了中间主应力的作用,对隔离矿柱的屈服和破坏预测具有较好的适用性。其主应力形式的数学表达式为:

$$\begin{cases} F=\sigma_1-\dfrac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2+\sigma_3)=\sigma_t,\sigma_2\leqslant\dfrac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F'=\dfrac{1}{1+b}(\sigma_1+b\sigma_2)-\alpha\sigma_3=\sigma_t,\sigma_2>\dfrac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{cases} \tag{1}$$

式中:α 为抗压强度比,$\alpha=\sigma_t/\sigma_c$,σ_t、σ_c 分别为材料的抗拉强度、拉压强度,MPa;σ_1、σ_2、σ_3 分别为最大主应力、中间主应力、最小主应力,MPa;b 为中间主剪应力(τ_{12}或 τ_{23})以及相应的正应力(σ_{12}或 σ_{23})作用系数;F、F'为不同的屈服函数,可根据中间主应力状态选择使用。

在隔离矿柱稳定性研究中,质点安全系数定义为在任意点处应力与其材料强度的相对比值。设安全系数为 K,选取统一强度理论框架下的双剪强度理论($b=1$)作为判断隔离矿柱是否发生破坏的依据。安全系数 K 的表达式可转化为:依据岩石材料单轴抗拉强度与双剪强度准则换算得到的等效拉应力数值之间的比值,具体的表达式如下:

$$K=\begin{cases} \dfrac{\sigma_t}{\sigma_1-\alpha(\sigma_2+\sigma_3)/2},\sigma_2\leqslant\dfrac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ \dfrac{\sigma_t}{(\sigma_1+\sigma_2)/2-\alpha\sigma_3},\sigma_2>\dfrac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{cases} \tag{2}$$

当 $K>1$ 时,表明材料所具备的强度特性超过其承受的应力,此时不会出现破坏现象;K 值越大,材料强度相较于应力的优势越显著,材料所处状态越安全。当 $K\leqslant1$ 时,材料所承受应力超过其自身所具备的强度值,材料存在发生破坏的风险;K 值越小,应力相较于材料强度的超出程度愈大,危险性也随之增大。

隔离矿柱上下表面的安全系数分布呈现明显的离散特征。总体来看,在重力方向上安全系数 K 自上而下呈现逐步递减的分布特征。隔离矿柱整体的稳定性与破坏质点($K\leqslant1$)的数量、分布以及离散情况联系紧密。当 $K\leqslant1$ 的质点数量增多时,隔离矿柱失稳破坏的可能性随之增加。隔离矿柱底面整体的安全系数水平最低,是最危险的区域。因此,对隔离矿柱底面质点的安全系数分布进行重点分析,可有效判断隔离矿柱稳定性。

2.3 三维地质模型建立

基于露天开采现状建立露天坑模型,依据勘探线剖面、平面图建立矿体模型,并通过 AutoCAD-FLAC3D 耦合建模方式构建矿山三维地质模型,主要包括矿体、围岩、回采进路、充填体等。为提高计算效率,建模时忽略了对数值模拟结果影响小的断层及孤立小矿体。根据矿床赋存条件、开采扰动对隔离矿柱的影响范围以及考虑减小边界条件对模拟结果的影响,确定模型尺寸范围:沿矿体倾向(x 方向)为 0～1 100 m,沿矿体走向(y 方向)为 0～1 000 m,沿重力方向(z 方向)为－780 m 水平以上区域。模型共包含 2 948 307 个单元及 10 319 042 个节点,数值模型如图 2 所示。对矿岩材料的力学特性进行分析与建模时,将其视作理想弹塑性材料,岩土材料的本构关系选择 M-C 屈服准则。模型四周采用速度约束,顶部及坡面为自由面,模型初始应力场为岩体自重应力[15]。

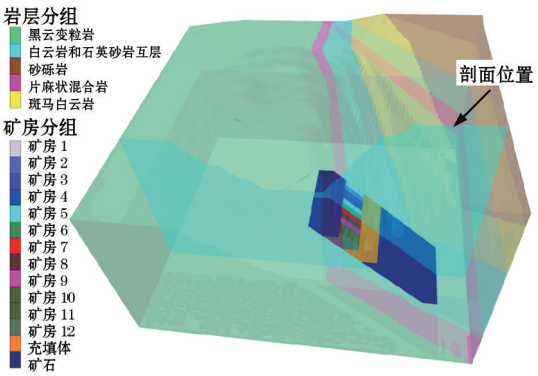


图 2 三维数值模型

Fig.2 3D numerical model

2.4 岩体力学参数确定

在试验数据的基础上,结合岩石类型、岩体分级 RMR 值、岩体结构面发育程度 GSI 值[4],依据 Hoek-Brown 准则对主要岩石力学强度参数进行折减,用于数值模拟计算。矿岩物理力学参数见表 1。

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of mineral rocks

材料	体密度/(kN/m³)	泊松比	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
磁铁矿	40.35	0.25	0.75	10.00	0.90	41.40
砂砾岩	27.66	0.28	0.35	2.00	0.40	34.00
斑马白云石	28.43	0.30	0.38	2.00	0.55	35.00
白云岩和石英砂岩互层	31.23	0.30	0.40	3.00	0.65	37.00
片麻状混合岩	32.48	0.25	0.56	5.00	0.82	39.00
黑云变粒岩	35.71	0.20	0.80	10.00	0.96	43.00
充填体	18.51	0.19	0.25	0.55	0.29	37.00
尾砂	25.86	0.21	0.19	0.34	0.28	30.00

2.5 数值模拟方案

为了使数值模拟结果符合工程实际情况,采用与工程现场完全一致的开采工艺,盘区开采模型如图 3 所示。自南向北分步回采模拟计算,采用间隔开采方式,一步骤矿块首采 1、3、5 号矿房,开采后充填;继续开采 7、9、11 号矿房并充填;二步骤矿块按相同工艺,先采 2、4、6 号矿房,继续开采 8、10、12 号矿房。分析不同厚度隔离矿柱条件下各开采阶段的应力分布特征,并基于双剪统一强度理论计算隔离矿柱底面质点安全系数[16-17],若计算所得的最小安全系数 $K_{min}<1$,则表明隔离矿柱稳定性未达到安全要求。继续增大隔离矿柱的厚度并重新计算底面质点安全系数,直到 $K_{min}=1$。考虑计算效率问题,可依据预设精度要求确定一个合理的容差范围,在此容差范围内可近似认为 $K_{min}=1$。此时隔离矿柱底面所有质点的安全系数均不小于 1,基于统计学原理,此时质点安全系数的中位值必然大于 1。因此,将 $K_{min}=1$ 时所确定的隔离矿柱厚度认定为当前工况条件下的最优安全厚度。

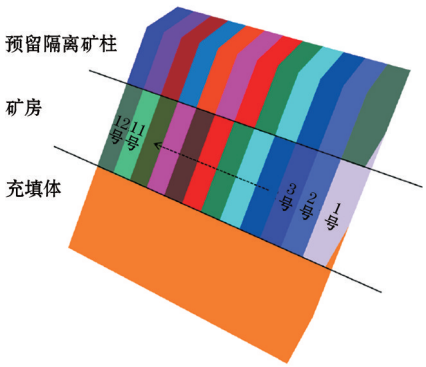


图 3 矿体模型

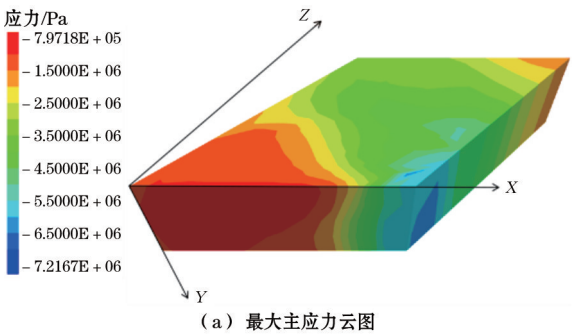
Fig.3 Model of ore body

3 数值模拟计算结果分析

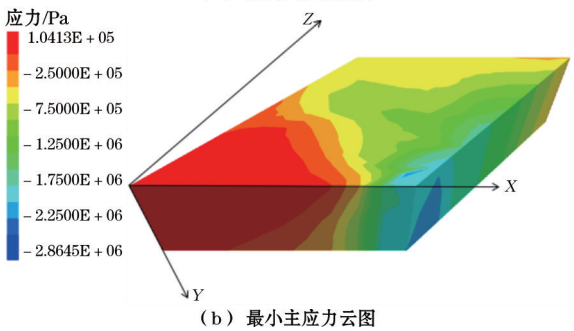
3.1 隔离矿柱临界厚度的确定

3.1.1 隔离矿柱厚度模拟计算

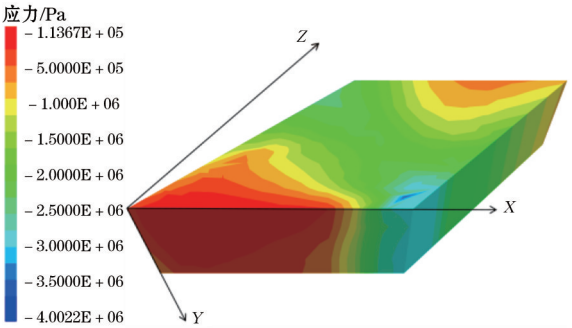
通过数值模型按实际开挖步骤进行模拟计算,得到隔离矿柱底面的最大主应力、最小主应力及中间主应力数据,如图 4 所示。可以看出,隔离矿柱底面所受应力自左向右逐渐增大,左侧有大面积受拉区域,隔离矿柱右下角处产生应力集中现象,可以推测隔离矿柱底面左侧及右侧端部为危险区域。



(a) 最大主应力云图



(b) 最小主应力云图



（c）中间主应力云图

图 4　隔离矿柱应力分布云图

Fig.4　Cloud maps of stress distribution of isolated pillars

基于数值计算得到的隔离矿柱应力数据，采用双剪统一强度理论计算隔离矿柱底面质点安全系数。不同厚度隔离矿柱下底面质点安全系数统计见表 2。

表 2　不同厚度隔离矿柱底面安全系数

Table 2　Safety factors at the bottom of isolated mining pillars with different thicknesses

隔离矿柱厚度/m	安全系数		
	最小值	平均值	中位值
20	0.33	5.07	2.63
25	0.32	5.24	2.07
30	0.48	6.09	3.04
35	0.69	7.65	3.77
40	1.06	8.09	3.79
45	1.21	8.40	3.76

由表 2 可知，随着隔离矿柱厚度的增加，底面安全系数最小值、平均值不断增加，安全系数中位值整体上呈上升趋势，表明随着隔离矿柱厚度的增加，隔离矿柱整体的安全性不断增强。在隔离矿柱厚度为 40 m 时，底面最小安全系数为 1.06，非常趋近于 1，此时隔离矿柱处于濒临发生破坏的状态。隔离矿柱底面质点安全系数随厚度的变化规律影响见图 5。

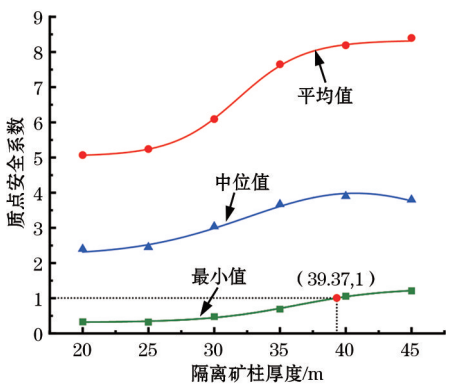


图 5　隔离矿柱底面安全系数随厚度的变化规律

Fig.5　Variation law of safety factor at the bottom of isolated pillars with different thicknesses

由图 5 可以看出，随着隔离矿柱厚度增加，底面质点安全系数平均值、中位值及最小值整体呈增长态势，并在 30～35 m 厚度区间增速最快，且该区间内平均值增速大于中位值和最小值增速。由于隔离矿柱内部分质点 K 值极大，各厚度工况下的质点安全系数平均值普遍大于中位值，且随着厚度的增加，高安全系数区域占比逐渐提高。当隔离矿柱厚度为 39.37 m 时，底面质点安全系数最小值为 1，据此确定矿房宽度为 20 m 时的隔离矿柱最优安全厚度为 39.37 m。在 20～25 m 和 35～45 m 厚度区间内，安全系数平均值提升主要由中位数右侧（即安全系数较高的质点）数据增量贡献，该区间内隔离矿柱底面安全性呈区域性增加；在 25～35 m 变化区间内，安全系数平均值增长源于全体质点安全系数同步提高，即在该区间内隔离矿柱底面安全性表现为全局提升趋势。

隔离矿柱的厚度为 40 m 时，取典型剖面（剖面位置如图 2 所示）对矿山开挖稳定性进行分析，结果如图 6 所示。

由图 6(a)可以看出，采场充填体左下区域及矿房右上角出现压应力集中现象，最大的压应力位于左下区域，最大值为 23.83 MPa；矿房右上角处压应力为 7.5～15 MPa。矿房左上角及左右两侧均出现了为 0～0.06 MPa 的拉应力，隔离矿柱呈现上压下拉的应力分布特征，底面所承受的拉应力波动区间为 0～0.06 MPa。通过对最大主应力分析可以发现，采空区顶板及左右两侧所受压应力小于岩体抗压强度，隔离矿柱处于稳定状态。

由图 6(b)可以看出，采场充填体左下区域观测到 7.52 MPa 的压应力集中现象；采空区右上角同样出现压应力集中区域，变化范围为 2.51～3.53 MPa。在露天边帮及坑底出现大面积受拉区，最大拉应力为 0.64 MPa。矿房两侧及底部区域拉应力幅值在 0～0.64 MPa 区间内波动，隔离矿柱所受最大拉应力值为 0.5 MPa。基于最小主应力场分析，采空区顶板及间柱中部拉应力值均未超过岩体的极限抗拉强度，各采空区顶板和各间柱没有发生拉伸破坏。

由图 6(c)可以看出，采场位移最大区域位于矿房底部的中央位置，表现为上向位移。位移量降值从中心的最大值 17.21 cm 向西侧递减，至边缘处降至 2.50 cm。隔离矿柱最大沉降发生在底面左侧与上盘围岩交界处，沉降量峰值达 9.22 cm。沉降量从左向右由 9.22 cm 逐渐降低至 0 cm。位移分布结果表明，左侧采空区顶板是隔离矿柱发生潜在破坏的关键区域。

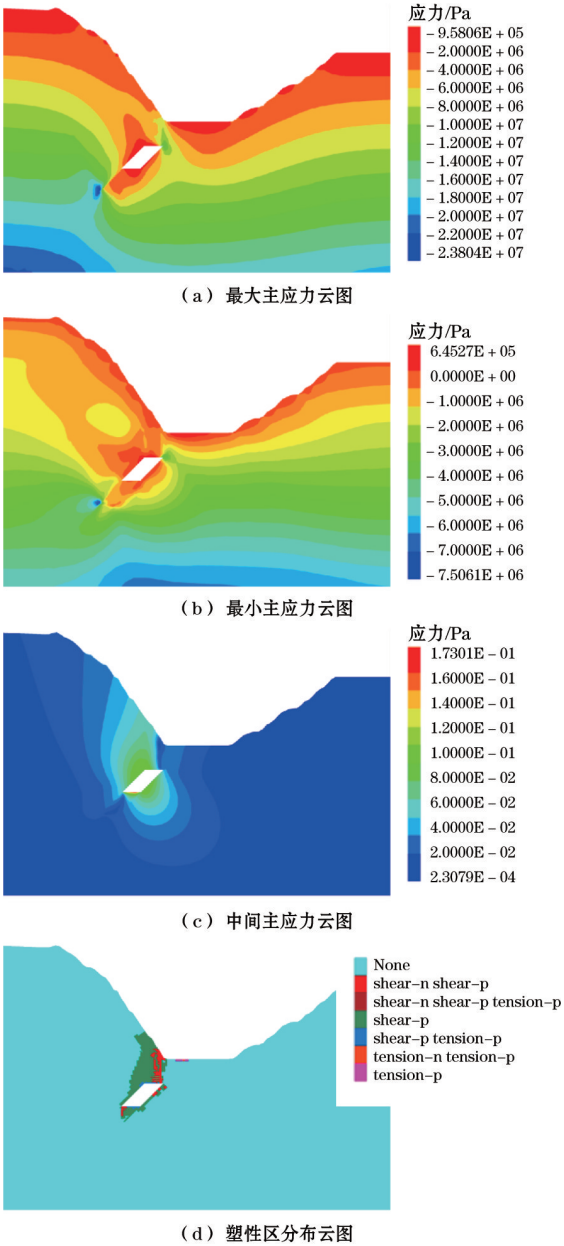


图 6　隔离矿柱厚度为 40 m 时开挖稳定性分析

Fig.6　Stability analysis of excavation when the thickness of the isolated pillar is 40 m

由图 6(d)可以看出，采场主要塑性破坏区域出现在西帮边坡的坡脚及坡脚与隔离矿柱右下角连线处，矿房左下角与右上角有些许塑性区分布。隔离矿柱上塑性区分布范围较小，当前状态下隔离矿柱具有较好的稳定性，不会发生坍塌破坏。

3.1.2　隔离矿柱厚度理论计算

隔离矿柱厚度理论计算方法众多，依据矿山实际情况，可采用 K.B.鲁别涅伊特理论与极限平衡法理论对隔离矿柱留设厚度进行分析。具体计算时，设定水压为 10 m，围岩强度系数取 0.4，结合表 1 中相关参数，最终得出隔离矿柱厚度理论计算结果见表 3。

表 3　隔离矿柱厚度理论计算结果

Table 3　Theoretical calculation results of thickness of isolation pillars

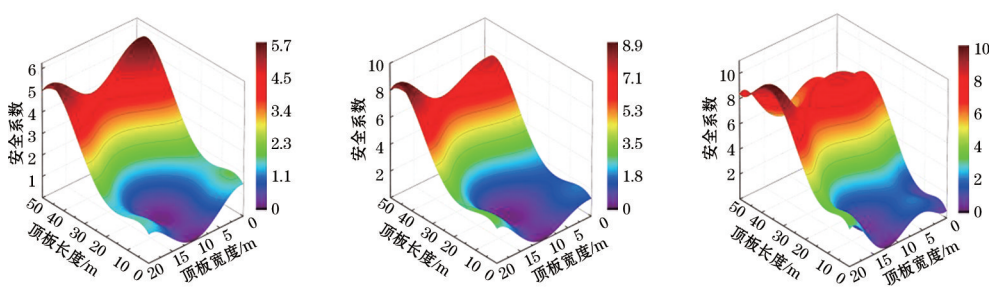
计算方法	隔离矿柱厚度/m
K.B.鲁别涅伊特公式	17.25
极限平衡法	30.86

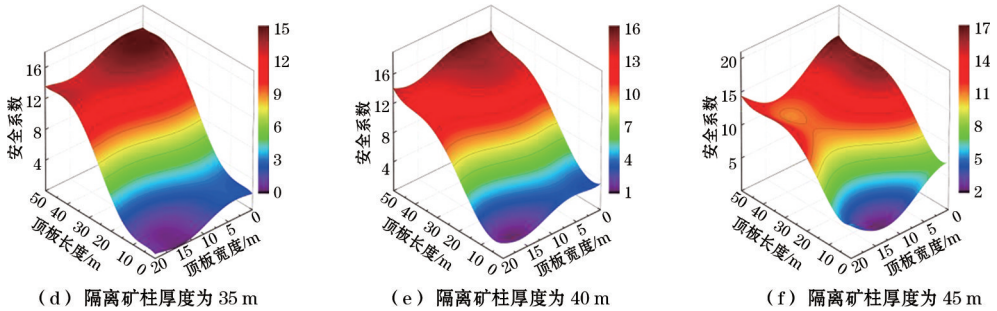
由表 3 可知，隔离矿柱理论计算厚度最大值为 30.86 m，可认为隔离矿柱厚度大于 31 m 时，即可满足矿山的安全生产需求。数值模拟计算得出隔离矿柱最小安全厚度为 40 m，该结果符合理论计算结果要求。

3.2　不同厚度隔离矿柱底面安全系数分布规律

为探究隔离矿柱厚度与其安全性之间的关系，针对 6 种不同厚度隔离矿柱条件下的采场构建相应模型并展开模拟分析。计算各模型中隔离矿柱底面的最小安全系数，并应用数值分析软件对底面安全系数分布进行拟合。不同厚度隔离矿柱底面安全系数分布如图 7 所示。

图 7 中安全系数分布规律显示，隔离矿柱底面安全系数最大值位于下盘围岩侧且该区域安全系数普遍较高；最小值位于上盘围岩侧，且该区域安全系数普遍较低。总体而言，上隔离矿柱安全系数沿 x 方向(顶板长度方向)呈递增趋势，底面短边中心处安全性低于两端。该现象表明，一旦隔离矿柱发生破坏，破坏起始点倾向于发生在矿柱下表面西侧边界，并逐步向东侧扩展。





(d) 隔离矿柱厚度为 35 m (e) 隔离矿柱厚度为 40 m (f) 隔离矿柱厚度为 45 m

图 7 不同厚度隔离矿柱底面安全系数分布

Fig.7 Distribution of safety factors at the bottom of isolated mining pillars with different thicknesses

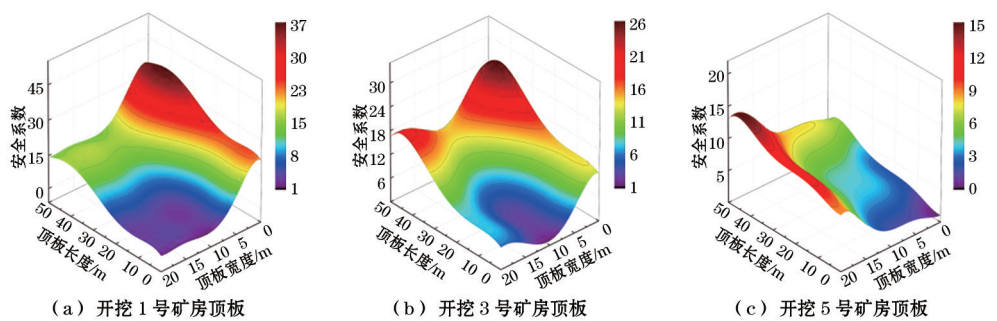
隔离矿柱厚度为 20 m 时,底面安全系数小于 1 的点最多,并集中分布在 $x \leqslant 20$ m 的区域(即靠近上盘围岩的位置),表明该厚度下隔离矿柱存在上盘侧破坏引发采场失稳的安全隐患。随着隔离矿柱厚度增加,底面安全系数小于 1 的点逐渐减少,其安全性也逐渐提高。隔离矿柱厚度达到 40 m 时,其底面安全系数全域大于 1,此时隔离矿柱处于稳定状态。隔离矿柱厚度增加至 45 m 时,其底面安全系数普遍高于 40 m 工况。依据本文中安全系数计算公式可知,安全系数 K 越大表明强度储备越充足,材料越安全,因此随着隔离矿柱厚度的增加其安全性也得到了提升。

3.3 不同采空区暴露面积下隔离矿柱安全系数分布规律

不同采空区暴露面积会对隔离矿柱的安全性产生影响。为便于分析,采用"三采两充"的方式进行模拟开挖,绘制不同开挖步骤下隔离矿柱下表面安全系数分布,分析 40 m 厚隔离矿柱下采空区暴露面积与隔离矿柱安全系数分布规律的关系。不同开挖步骤下矿房顶板下表面安全系数分布如图 8 至图 11 所示。其中采空区长度为 50 m。

图 8 至图 11 展示了在不同开挖步骤下,隔离矿柱下表面安全系数的分布规律。可以看出,隔离矿柱安全系数受两侧采空区扰动影响较大,第一步开挖 1、3、5 号矿房时,邻近效应导致 1、5 号矿房顶板安全系数在 3 号矿房侧出现明显低值区,而 3 号矿房顶板安全系数关于 $y=10$(顶板宽度方向)呈对称分布的特征。第二步开挖 7、9、11 号矿房时,1、3、5 号矿房危险区域均偏向南侧,尤其是 5 号矿房,危险区偏转方向与第一步相反。由此可知,越靠近采空区顶板越危险,安全系数随与采空区距离增大呈增大趋势。第三步开挖完成后,1~6 号矿房开采充结束,采空区顶板安全系数呈南北两端高值区、东西两侧低值区的分布格局。受开采扰动影响,南端安全系数高于北端,西侧受拉应力作用形成大面积安全系数低值区,东侧因应力集中效应存在潜在破坏风险。以 $x=30$(顶板长度方向)为界,西侧易发生破坏的区域面积大于东侧区域,表明在实际工程中应对隔离矿柱西侧给予重点关注。

第四步开挖完成后,所有矿房均开采完毕,此时顶板安全系数分布规律与第三步开挖时 1~6 号矿房的顶板安全系数分布规律基本一致,但其在东西两侧的危险区域有加长趋势,即随着采空区宽度加大,隔离矿柱在 y 方向上的安全性明显降低,而在 x 方向上变化较小。



(a) 开挖 1 号矿房顶板 (b) 开挖 3 号矿房顶板 (c) 开挖 5 号矿房顶板

图 8 第一步开挖时不同矿房顶板安全系数分布

Fig.8 Distribution of safety factors of roof of different mining rooms during excavation in the first step

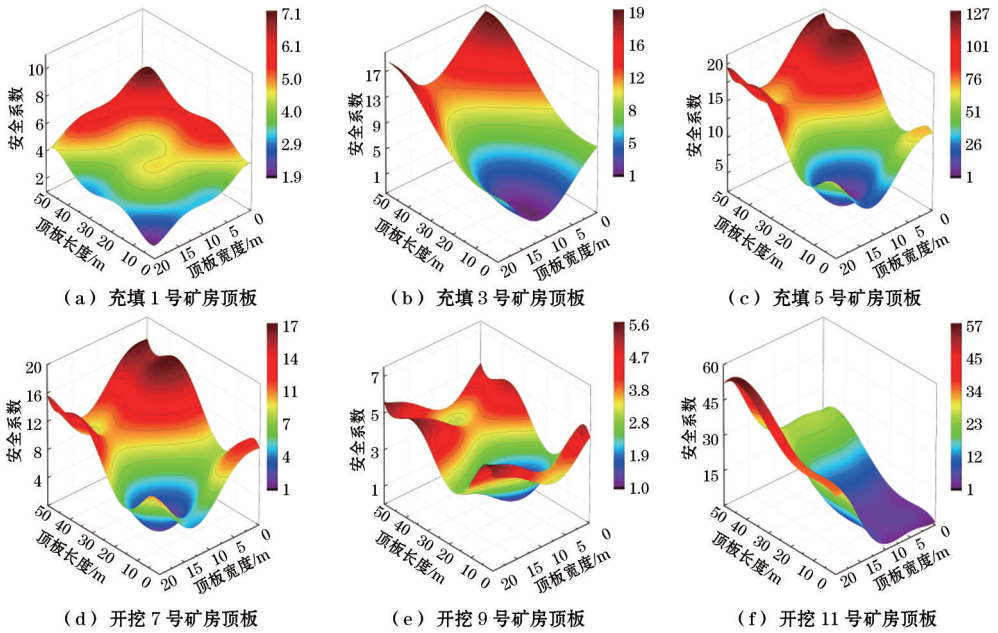


图 9 第二步开挖时不同矿房顶板安全系数分布

Fig.9 Distribution of safety factors of roof of different mining rooms during excavation in the second step

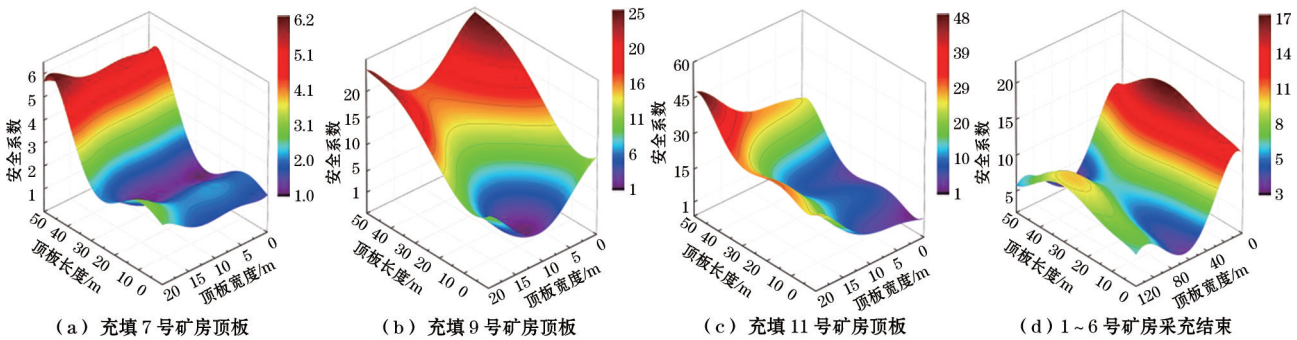


图 10 第三步开挖模拟不同矿房顶板安全系数分布

Fig.10 Distribution of safety factors of roof of different mining rooms during excavation in the third step

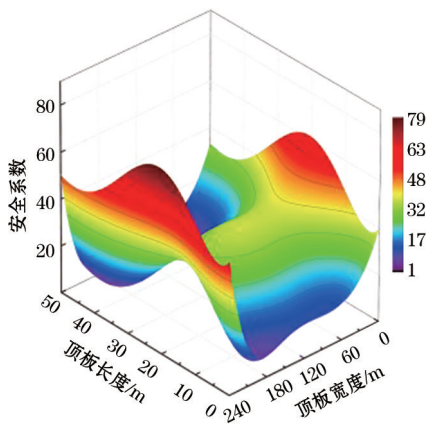


图 11 整体采空区顶板安全系数分布

Fig.11 Distribution of safety factors of roof in the whole goaf

4 结论

(1) 结合基于双剪统一强度理论的质点安全系数计算公式和 FLAC3D 数值模拟,计算了不同厚度隔离矿柱的底面质点安全系数。结果显示,在矿块尺寸为 50 m×20 m×60 m 条件下,隔离矿柱底面质点安全系数沿顶板长度方向呈递增趋势,短边中心处安全性低于两端,上盘围岩交界处是最危险区域,随着隔离矿柱厚度的增加,底面安全系数小于 1 的质点逐渐减少,危险范围逐渐缩小。当隔离矿柱厚度为 39.37 m 时,底面安全系数最小值为 1,结合实际工程考虑隔离矿柱最小安全厚度取值为 40 m。

(2) 对留设 40 m 厚隔离矿柱的矿山开挖稳定

性进行分析,结果表明,隔离矿柱上部受压,底面受拉,上盘接触带压应力高于下盘,下盘围岩交界处存在局部压应力集中现象,但均未达到岩体的极限强度;隔离矿柱内沉降最显著区域位于采空区顶板左侧与上盘围岩耦合处,最大沉降量为 9.22 cm;隔离矿柱内塑性区分布范围较小,整体稳定性较好。因此,隔离矿柱厚度为 40 m 时处于稳定状态,其左侧采空区顶板是隔离矿柱发生破坏的关键区域。

(3) 隔离矿柱安全性受采空区影响较大,越靠近采空区顶板安全系数越小。第二步回采时,采空区呈长条状,其短边安全系数最高,长边中心处安全性最低;顶板长度方向上安全系数呈"鞍形"分布,表现为中间高两端低的特点。采场开挖完成后,因围压强化作用,山体侧隔离矿柱抗破坏能力强于露天坑底中心侧,越靠近露天坑底中心,隔离矿柱底面质点安全系数越低。

参考文献(References):

[1] 鲁宇,金长宇,王湟,等.露天转地下开采覆盖层合理厚度优化研究[J].金属矿山,2021(2):23-28.
LU Yu, JIN Changyu, WANG Huang, et al. Study on the reasonable thickness of overburden in open-pit to underground[J]. Metal Mine,2021(2):23-28.

[2] 程纬华.基于厚板理论的露地联合开采隔离矿柱力学分析与安全厚度模型研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
CHENG Weihua. Mechanical analysis and safety thickness model research of isolated pillars in open-pit joint mining based on thick plate theory [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2023.

[3] 刘泽洲,熊鹏,雷明,等.某铁矿露天转地下开采的境界矿柱厚度确定及稳定性分析[J].矿业研究与开发,2024,44(7):1-6.
LIU Zezhou, XIONG Peng, LEI Ming, et al. Thickness determination and stability analysis of boundary pillar in transition from open-pit to underground mining of an iron mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):1-6.

[4] 王宇,胡天寿.基于数值模拟的露天-地下联合开采隔离层稳定性分析[J].矿业研究与开发,2019,39(5):24-29.
WANG Yu, HU Tianshou. Stability analysis on isolation layer in combined mining of open-pit and underground based on numerical simulation [J]. Mining Research and Development,2019,39(5):24-29.

[5] 徐帅,安龙,李元辉,等.基于多方法联合的露天转地下境界矿柱厚度优化[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1181-1186.
XU Shuai, AN Long, LI Yuanhui, et al. Multi-method based optimization of crown pillar thickness from open pit to underground [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2018,39(8):1181-1186.

[6] TAO Zhigang, LI Mengnan, ZHU Chun, et al. Analysis of the critical safety thickness for pretreatment of mined-out areas underlying the final slopes of open-pit mines and the effects of treatment[J]. Shock and Vibration,2018(1):1306535.

[7] 刘轩廷,陈从新,刘秀敏,等.充填开采下顶板-间柱支撑体系的突变失稳分析[J].岩土力学,2021,42(9):2461-2471.
LIU Xuanting, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Analysis of catastrophic instability of roof-rib pillar support system under backfill mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(9):2461-2471.

[8] TAKHANOV Daulet, MURATULY Berikbol, RASHID Zhuldyz, et al. Geomechanics substantiation of pillars development parameters in case of combined mining the contiguous steep ore bodies [J]. Dnipro University of Technology,2021,15(1):50-58.

[9] 杨继强,孙昕,崔向东.基于双剪统一强度理论的地基承载力计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(9):1923-1932.
YANG Jiqiang, SUN Xin, CUI Xiangdong. Research on calculation method of foundation bearing capacity based on double shear unified strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(9):1923-1932.

[10] GAO Feng, LI Shanqing. Elastic-plastic analysis of circular tunnel based on unified strength theory and considering multiple plastic zones [J]. Advances in Mechanical Engineering,2023,15(1):1-11.

[11] 张常光,周渭,徐灏,等.基于统一强度理论的扰损围岩巷道脆塑性解答[J].岩土力学,2024,45(5):1343-1355.
ZHANG Changguang, ZHOU Wei, XU Hao, et al. Brittle-plastic solutions of disturbance-damaged rock tunnels based on unified strength theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(5):1343-1355.

[12] 关少钰,白涌滔.基于双剪统一强度理论应变退化模型的隧道结构稳定性分析[J].工程力学,2018,35(增刊 1):205-211.
GUAN Shaoyu, BAI Yongtao. Stability analysis of tunnel structures based on the twin-shear unified strength theory with strain-softening effect [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(Suppl.1):205-211.

[13] YU Maohong, HE Li'nan, LIU Chunyang. Generalized twin shear stress yield criterion and its generalization[J]. Chinese Science Bulletin,1992,37(24):2085-2089.

[14] YU Maohong, LI Jianchun, ZHANG Yongqiang. Unified characteristics line theory of spacial axisymmetric plastic problem [J]. Science in China (Series E: Technological Sciences),2001,44(2):207-215.

[15] 闫佳钊,刘溪鸽,朱万成,等.露天削坡对地下采场地压显现影响的数值模拟[J].金属矿山,2023(6):213-219.
YAN Jiazhao, LIU Xige, ZHU Wancheng, et al. Numerical simulation on ground pressure appearance in underground stope caused by open-pit slope stripping[J]. Metal Mine, 2023(6):213-219.

[16] 叶海旺,龙贵川,王其洲,等.层状倾斜矿体矿柱稳定性特征及矿房参数优化[J].金属矿山,2021,50(5):25-35.
YE Haiwang, LONG Guichuan, WANG Qizhou, et al. Stability characteristics of the ore-pillars of layered inclined orebody and optimization of mine room parameters optimization of mine room parameters[J]. Metal Mine,2021,50(5):25-35.

[17] 曾庆隆, 雷秀文, 杨珏, 等. 某铁矿露天转地下开采隔离层安全厚度确定研究[J]. 矿业研究与开发,2025,45(6):50-58.
ZENG Qinglong, LEI Xiuwen, YANG Jue, et al. Determination of safety thickness of isolation layer in an iron mine from open-pit to underground mining[J]. Mining Research and Development,2025,45(6):50-58.