崩落法转充填法隔离矿柱留设厚度研究*

唐维洲[1],刘扬[1],韦峰[1],杨杰星[1],袁学浩[2],王堃[2]

(1.广西华锡矿业有限公司铜坑矿业分公司, 广西 河池市 547205;
2.矿冶科技集团有限公司, 北京 101600)

摘要:以铜坑矿由崩落法转充填法开采区域为研究对象,运用Bieniawski矿柱强度公式和K.B.鲁佩涅依特理论,计算得到垂直隔离矿柱和水平隔离矿柱厚度应分别不小于9.00 m和9.36 m。基于FLAC3D构建三维精细化矿体开采模型,分析在不同隔离矿柱厚度下回采全过程对采场稳定性的影响。数值模拟结果表明,垂直隔离矿柱厚度为10 m时,采场竖向位移小于0.1 m,最大主应力为50 MPa,最小主应力为7.5 MPa,安全系数大于8.0;垂直隔离矿柱厚度为8 m时,采场周边位移明显增加,塑性破坏区范围明显增大,安全系数略有下降。因此,推荐铜坑矿崩落法转充填法开采区域的垂直隔离矿柱厚度为10 m。

关键词:崩落法转充填法开采;隔离矿柱厚度;安全系数;数值模拟

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0060-09

Study on the Reserved Thickness of Isolated Pillar for Transition from Caving Method to Filling Method

TANG Weizhou[1], *LIU Yang*[1], *WEI Feng*[1], *YANG Jiexing*[1], *YUAN Xuehao*[2], *WANG Kun*[2]

(1.Tongkeng Mining Branch, Guangxi Huaxi Mining Co., Ltd., Hechi, Guangxi 547205, China;
2.BGRIMM Technology Group, Beijing 101600, China)

Abstract: Taking the mining area of Tongkeng Mine transition from caving method to filling method as the research object, the thickness of vertical isolation pillar and horizontal isolation pillar calculated by Bieniawski pillar strength formula and K. B. Rupeneyt theory should be less than 9.0 m and 9.36 m, respectively. A three-dimensional fine ore body mining model was established based on FLAC3D, and the influence of the entire mining process on stope stability under different thicknesses of isolation pillar was analyzed. The numerical simulation results show that, when the thickness of vertical isolation pillar is 10 m, the vertical displacement of the stope is less than 0.1 m, the maximum principal stress is 50 MPa, the minimum principal stress is 7.5 MPa, and the safety factor is greater than 8.0. When the thickness of vertical isolation pillar is 8 m, the displacement around the stope increases obviously, the plastic failure zone scope increases obviously, and the safety factor decreases slightly. Therefore, it is recommended that the thickness of the vertical isolated pillar in the mining area of the caving method to the filling method in Tongkeng Mine is 10 m.

Key words: Transition from caving method to filling method, Thickness of isolated pillar, Safety factor, Numerical simulation

0 引言

地下矿山崩落法转充填法开采是矿山行业的发展趋势[1],为保障地下矿山由崩落法向充填法开采的平稳过渡,需要在上部崩落法回采形成的崩落散体与下部充填法开采区域之间预留一定厚度的矿体作为隔离矿柱[2-4],将崩落法开采区和充填法开采区进行隔离。隔离矿柱作为矿山浅部向深部延伸的衔接部分,其合理的厚度对于实现矿山安全高效回采具有重要意义[5-6]。隔离矿柱厚度过大,会造成矿产资源损失,增大矿山开采的损失率;隔离矿柱厚度过小,开采过程中则存在安全隐患,进而影响矿山正常生产。隔离矿柱稳定性受上覆松散矿岩荷载、下部采区回采扰动、下部采场结构、赋存环境、地应力大

* **收稿日期**:2025-02-24
基金项目:国家科技重大专项项目(2024ZD1003702);矿冶科技集团有限公司科研基金资助项目(04-2362)
作者简介:唐维洲(1988—),男,瑶族,广西南丹人,工程师,主要从事金属矿地下开采与通风热害防治研究。E-mail:547915313@qq.com
通信作者:刘扬(1988—),男,广西钟山人,助理工程师,主要从事金属矿地下开采工作。E-mail:mineliu2025@163.com

小等因素影响[7-8]，常用的隔离矿柱稳定性分析方法有理论分析法和数值分析方法。目前，国内外学者已提出了多种理论分析方法与经验公式，如K.B.鲁别涅伊特公式、B.H.波哥留波夫公式、厚跨比法、荷载传递交汇线法、平板梁理论法、普氏理论法等[9-13]。这些方法为矿山隔离矿柱的留设提供了理论支撑，但多数方法基于一些简化和假设，其侧重点也存在一定的差异，无法准确反映隔离矿柱在复杂地质条件和开采过程中的实际受力状态[14-15]。结合现有的矿山岩石力学理论，数值模拟方法可以有效地模拟复杂岩体结构和力学条件下的应力变化规律和岩体破坏情况，已成为岩土工程和采矿领域稳定性分析的重要工具[16-17]。吕冠颖等[18]运用Midas GTS与FLAC3D数值模拟软件对不同厚度水平隔离矿柱的位移、应力变化、塑性破坏状况进行分析，确定了水平隔离矿柱厚度应不小于20 m。刘洋等[19]运用PFC2D建立了深部矿体的数值模型，分析了深部矿体采用充填法开采对隔离矿柱以及塌陷区回填体稳定性的影响。

本文以铜坑矿崩落法转充填法开采为研究背景，对隔离矿柱的安全厚度进行理论计算，确定了合理的隔离矿柱安全厚度范围，在此基础上，运用FLAC3D数值模拟软件对不同隔离矿柱厚度下的采场稳定性进行分析，确定了最优的隔离矿柱尺寸。研究可为深部矿产资源的安全开采提供科学依据。

1　工程背景

1.1　矿山概况

丹池成矿带是我国乃至世界上著名的锡多金属成矿带，其中铜坑矿床是大厂镇锡多金属矿区的代表性矿床，由浅部的锡多金属矿体(大脉型、细脉带型、91#和92#似层状锡多金属矿体)和深部的锌铜矿体(94#、95#、96#和97#似层状锌铜矿体)组成。铜坑矿以浅部的锡多金属矿体为主要开采对象，在水平空间投影上，三个矿体部分重叠，垂直空间从上到下依次为细脉带、91#和92#矿体展布。铜坑矿生产总体采用从上到下的开采顺序，同时也存在局部上下不同区域同时开采的立体开采格局。目前，细脉带矿体与91#矿体已经开采完毕，正在开采92#矿体。

铜坑矿92#矿体由细小的北东向裂隙脉和硅质岩层间细矿脉组成，表现为网脉状矿化。矿体垂直方向上位于250～580 m标高范围内，埋藏深度为250～450 m；矿体东西走向长680 m，南北倾向长830 m，倾角为15°～25°。矿体厚度变化大，最小厚度为1 m，最大厚度为71 m，平均厚度为24 m，厚度变化系数为86.76%，总体上属于缓倾斜中厚至厚大矿体。92#矿体的采矿方法主要为分段空场嗣后充填法、上向水平分层充填法和无底柱分段崩落法；分盘区进行开采，共有7个盘区，盘区宽度为90～100 m，盘区内矿块划分为矿房和矿柱，采场沿矿体走向布置；矿房长70～80 m，宽15～25 m，高12～50 m。目前，矿体中心富矿段各盘区的矿房已经采完，只剩下部分矿柱和边部矿体未开采。

1.2　待采资源开采的技术难点

由于三个矿体在空间上重叠分布、回采顺序紊乱及采矿方法限制等原因，开采后形成了大量不规则的采空区。受地压活动以及垂直方向上多层重复采动的影响，隔离矿柱出现不同程度的垮塌，重叠区域采空区联通形成整体，甚至在采空区较密集的区域形成贯通地表的垮落带，最终在92#矿体上部形成了复杂的崩落散体覆盖层。同时，由于浅部细脉带的黄铁矿含硫量较高，且矿区浅部地层赋存有易燃的炭质页岩，黄铁矿与炭质页岩富集区域紧密接触，形成了小范围自然发火区域。燃烧形成的火烧灰颗粒细小，会跟随崩落矿石向矿区深部进一步扩散，并在采场内聚集大量高温有毒有害气体，恶化井下生产环境，影响工人的健康和生命安全。因此，92#矿体受上部火烧灰以及崩落散体覆盖层的影响，在采用崩落法开采的区域内，大量的压覆资源未得到开发利用。铜坑矿细脉带矿体、91#和92#矿体风险源相互关系如图1所示。

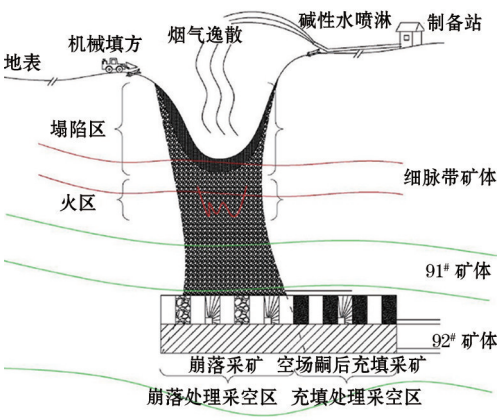


图1　铜坑矿不同矿体间风险源相互关系示意

Fig.1　Schematic of the relationship between risk sources in different ore bodies at Tongkeng Mine

待采资源主要位于386～326 m水平,矿量约为182.72万t。为安全可靠地回收矿产资源,根据其赋存特征和开采技术条件,提出分区回采的开采方案,即火烧灰存在范围外(B区)的资源采用无底柱分段崩落法回采,火烧灰存在范围内(A区)的资源采用分段空场嗣后充填法回采。为避免崩落散体内的火烧灰流入分段充填采场内,需要在分段充填开采区域与崩落散体之间留设一定厚度的隔离矿柱。

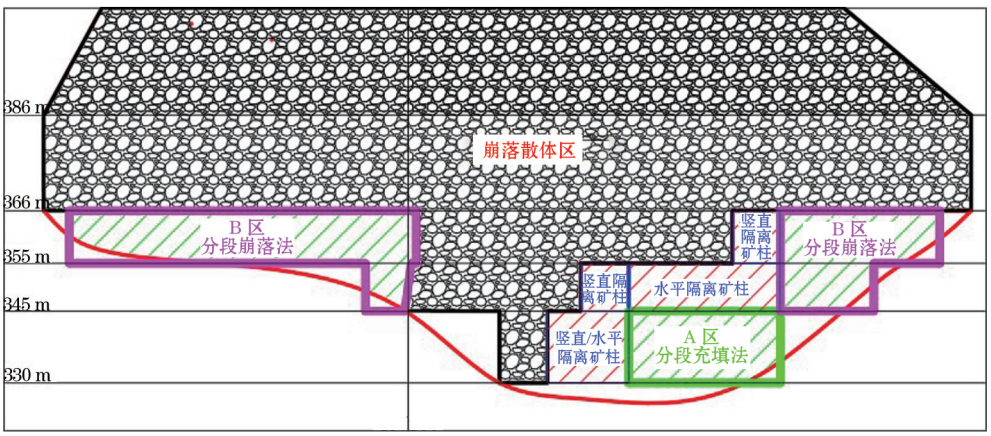


图2 待采资源分布

Fig.2 Distribution of resources to be mined

2 隔离矿柱厚度理论计算

2.1 垂直隔离矿柱

垂直隔离矿柱主要用于支撑采场顶板,其稳定性取决于矿柱上表面所承受的荷载是否超过矿柱的许用抗压强度。根据尺寸理论,矿柱强度与矿柱宽度呈正比,与矿柱高度呈反比。两者共同决定着矿柱的强度。运用Bieniawski矿柱强度公式对垂直隔离矿柱的抗压强度进行计算,见式(1)。

$$S_p = S_1\left[0.64+0.36\frac{a}{M}\right]^{\alpha} \tag{1}$$

式中:S_p为矿柱抗压强度,MPa;S_1为岩体抗压强度,MPa;a为矿柱宽度,m;M为矿柱高度,m;α为常数,当矿柱的宽高比大于5时,$\alpha=1.4$;当矿柱的宽高比小于5时,$\alpha=1.0$。

根据矿柱的承载机理,矿柱承受的荷载即为上覆岩体质量。单一矿柱承载力可用面积承载理论进行计算,其承载的面积为矿柱自身的面积和矿柱分摊的开采面积之和,其平衡方程如式(2)所示。

$$\sigma_p = \frac{(a+b)LP_z}{aL} \tag{2}$$

式中:σ_p为矿柱承受的荷载,MPa;b为采场宽度,m;L为矿房长度,m;P_z为上覆岩层垂直应力,计算公式为$P_z=\sum\gamma_i h_i$,MPa;γ_i、h_i分别为第i层上覆岩层的密度和厚度。

355 m水平待采资源的矿体距地表的距离为345 m,矿体上部为硅质岩散体,密度为1.91 t/m^3,顶板矿体密度为2.8 t/m^3;采场高度为15 m,矿房长度为50 m,垂直隔离矿柱与相邻采场的宽度合计为24 m,则垂直隔离矿柱的上覆岩层垂直应力为6.47 MPa。根据Hoek-Brown强度准则对岩石抗压强度进行折减,折减后矿柱的岩体抗压强度为28.71 MPa。不同矿柱宽度下矿柱安全系数计算结果见表1。为保证矿柱的稳定性,矿柱安全系数取值为1.5,因此垂直隔离矿柱的宽度不低于9.00 m。

表1 不同矿柱宽度下矿柱安全系数计算结果

Table 1 The calculation results of safety factors of pillars with different widths

矿柱宽度/m	采场宽度/m	矿柱高度/m	矿柱抗压强度/MPa	承受荷载/MPa	安全系数
8	14	15	23.89	17.80	1.34
9	13	15	24.58	15.82	1.55
10	12	15	25.26	14.24	1.77
11	11	15	25.95	12.94	2.01
12	10	15	26.64	11.87	2.25

2.2 水平隔离矿柱

分段充填采矿区域(A区)以水平隔离矿柱作为直接顶板,通常以抗拉强度为主要破坏指标,选用K.B.鲁佩涅依特理论估算法计算水平隔离矿柱的厚度。以普氏理论为基础,K.B.鲁别涅依特综合考虑了采空区跨度、顶板岩层特性和上覆岩体作用对水

平隔离矿柱的影响，根据力的独立作用原则和叠加原理，计算水平隔离矿柱因自重和上覆岩体作用所产生的应力，见式(3)。

$$H=K\left(0.25b\frac{\gamma b+\sqrt{\gamma^2b^2+800\sigma_BP_z}}{98\sigma_B}\right) \quad (3)$$

式中：H 为安全顶板厚度，m；K 为安全系数；σ_B 为顶板极限强度，$\sigma_B=\sigma_{n3}/K_0K_3$，MPa；$K_0$ 为结构削弱系数，一般取 $K_0=2\sim3$；K_3 为强度安全系数，一般取 $K_3=7\sim10$；$\sigma_{n3}=(0.07\sim0.1)\sigma_c$，MPa。

安全系数取值为 1.5，采场宽度为 12 m 时，按照式(3)计算水平隔离矿柱的安全厚度为 9.36 m。

3　隔离矿柱厚度数值模拟分析

3.1　数值模型构建

(1) 基本假定。为使数值模拟结果接近实际情况，需要对岩体介质性质及计算模型作必要的假设和简化。

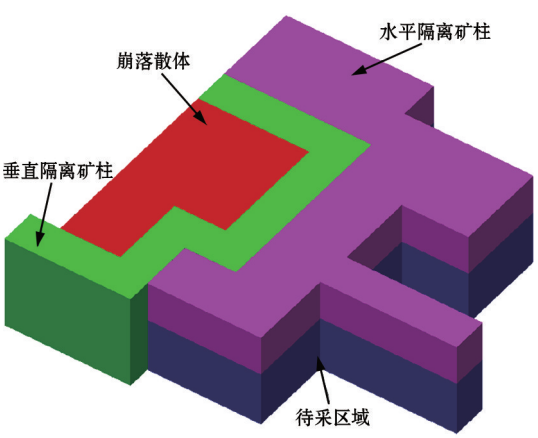
1) 将岩体视为理想的弹塑性材料，选用摩尔-库仑模型；

2) 忽略断层、节理裂隙等不连续面对采场稳定性的影响；

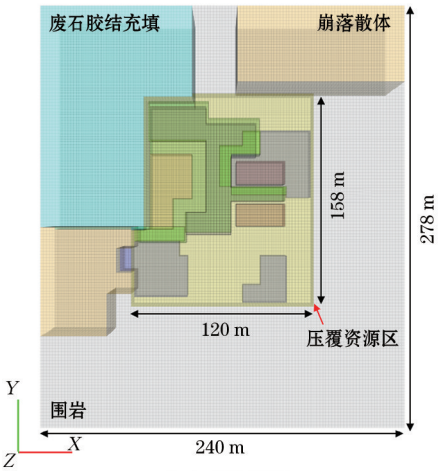
3) 只考虑自重应力的作用，忽略其他因素对采场稳定性的影响；

4) 忽略其他地下工程对采场围岩应力分布的影响。

(2) 数值模型构建。运用 FLAC3D 建立地质体的数值模型，模型中央部分为重点关注的待采资源区域，如图 3 所示。为消除模型的边界效应，在待采资源待采区域四周留设宽度为 60 m 的边界网格。模型尺寸为 278 m×240 m×66 m(长×宽×高)，网格精度为 1 m，网格总数大于 200 万个。



(a) 待采矿体模型



(b) 整体模型

图 3　矿体数值模型

Fig.3　Numerical models of ore body

在整体模型的底部平面施加 X、Y、Z 方向位移约束(全固定)，在模型侧面仅施加法向位移约束，按最不利方式施加地应力，在 Y 方向施加最大水平主应力，X 方向施加最小水平主应力，Z 方向按照垂直应力施加。

(3) 岩体物理力学参数。岩体物理力学参数是数值模拟的基本参数，一般通过对矿岩样品开展室内岩石力学试验获得。同时，综合考虑矿岩的工程地质结构参数和尺寸效应，对岩块的力学参数进行适当的折减。本研究各类型岩石的物理力学参数见表 2。

表 2　铜坑矿岩体物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of rocks in Tongkeng Mine

材料类型	密度/(g/cm³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	4.00	20.00	0.25	8.0	90.0	25.00	37
顶底板围岩	2.80	6.00	0.25	6.0	80.0	15.00	35
崩落散体	1.91	0.10	0.20	0	0.5	0	30
废石胶结充填体	2.00	0.60	0.28	0.3	3.0	0.50	34
胶结充填体	2.26	0.88	0.28	0.3	3.0	0.62	34

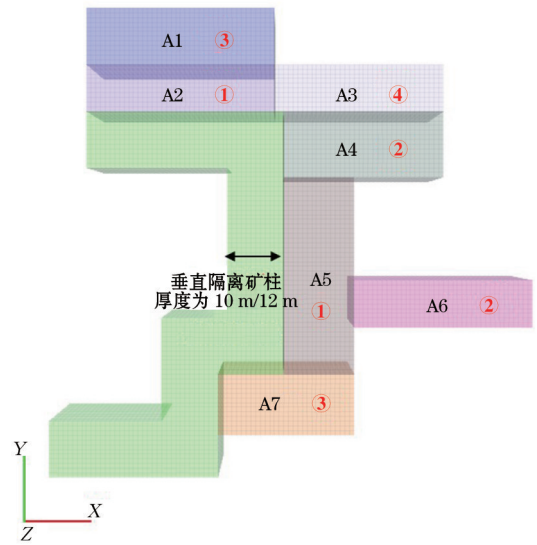
(4) 初始地应力平衡。初始地应力直接影响开挖过程中的岩石力学响应，根据已有研究报告可知，405 m 水平初始地应力为：$\sigma_1=25.4$ MPa，水平方向；$\sigma_2=17.1$ MPa，水平方向；$\sigma_3=7.3$ MPa，垂直方向。

3.2　回采方案设计

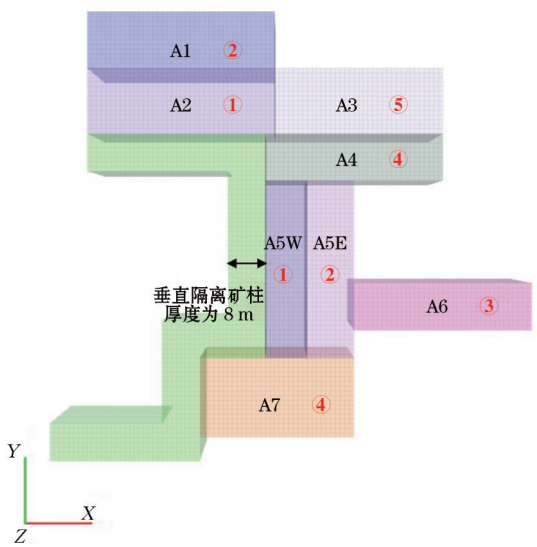
本研究将水平隔离矿柱的厚度固定为 10 m，分析垂直隔离矿柱为 8 m、10 m、12 m 三种不同厚度时，回采过程中矿岩的稳定性。待采区域范围为固

定值,因此垂直隔离矿柱厚度决定了采场宽度。模拟中,将待采区域划分为 7 个采场,总体回采原则为自垂直隔离矿柱向外逐步开采。

不同垂直隔离矿柱留设方案下,采场的回采顺序存在一定差异。当垂直隔离矿柱厚度为 10 m 或 12 m 时,采场回采顺序为:第一步回采 A2、A5,第二步回采 A4、A6,第三步回采 A1、A7,第四步回采 A3,具体回采方案如图 4(a)所示。当垂直隔离矿柱厚度为 8 m 时,A5 分为 A5W(西 9 m)、A5E(东 10 m)两个采场,采场回采顺序为:第一步回采 A2、A5W,第二步回采 A1、A5E,第三步回采 A6,第四步回采 A4、A7,第五步回采 A3,具体回采方案如图 4(b)所示。



(a) 垂直隔离矿柱厚度为 10 m 或 12 m



(b) 垂直隔离矿柱厚度为 8 m

图 4 待采资源区的不同回采方案设计

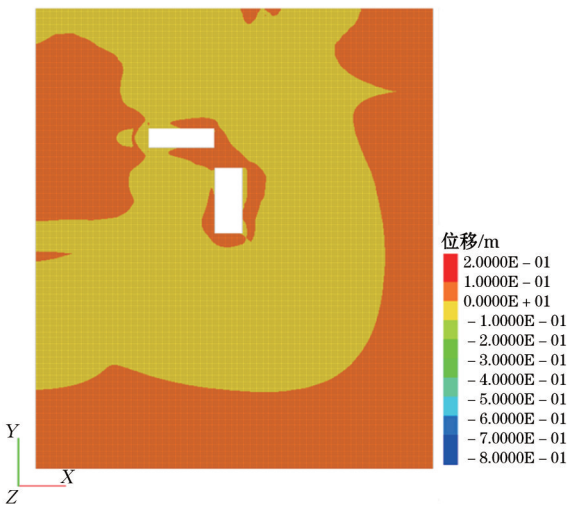
Fig.4 Different mining design schemes of resource area to be mined

3.3 数值模拟结果

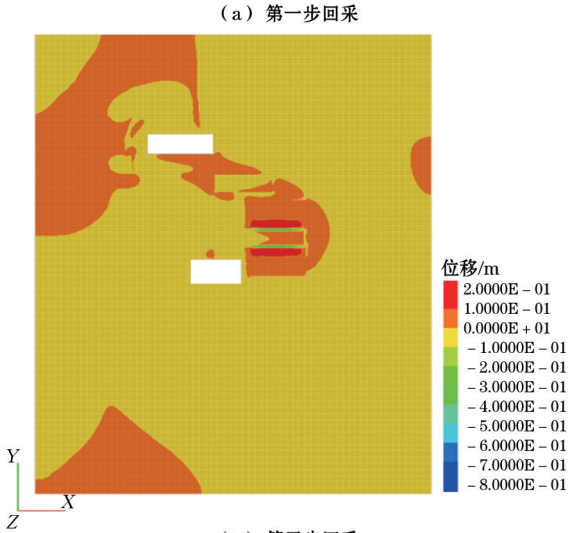
为量化垂直隔离矿柱厚度对采场稳定性的影响,以位移、应力、塑性破坏区、安全系数为关键指标进行分析。垂直隔离矿柱厚度为 10 m 和 12 m 时,主要对第一步和第三步的模拟结果进行分析;垂直隔离矿柱厚度为 8 m 时,主要对第一步和第二步的模拟结果进行分析。

3.3.1 位移分析

围岩的位移与变形是评价采场稳定性的重要指标之一。当变形范围较小时,可以认为采场处于稳定状态;当位移出现突变时,往往预示着采空区可能出现了严重的失稳问题。图 5 为垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时,采场位移分布情况。



(a) 第一步回采



(b) 第三步回采

图 5 垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时采场位移分布云图

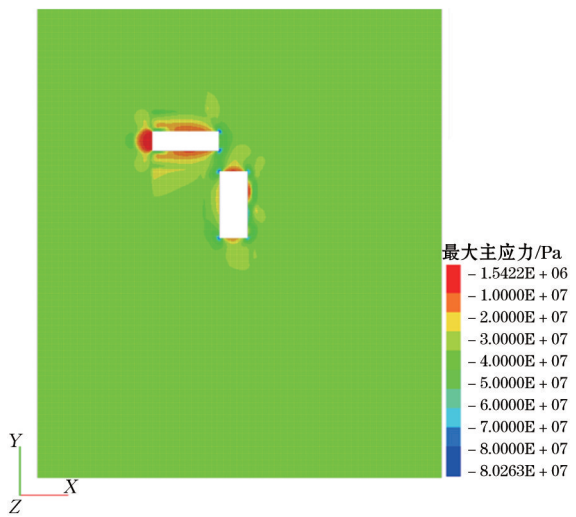
Fig.5 The displacement cloud maps in the mining area when the thickness of vertical isolated pillar is 10 m

模拟结果表明,垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时,采场周边的竖向位移较小,均小于 0.1 m,且在采场

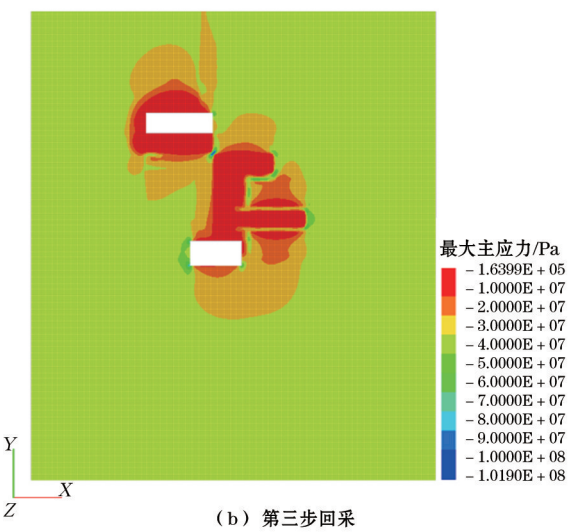
的开采与充填过程中未出现明显变化。垂直隔离矿柱厚度为 8 m 时，A2 采场宽度变大，采场端部的位移量明显增大。第一步回采时的最大位移量为 0.54 m；第二步回采时，采场位移变化范围显著增加，最大位移量为 0.58 m。由于 A5 采场分为了 A5W 与 A5E 两个采场分别进行回采，相应的采场尺寸也变小，采场周边的竖向位移略有减小。此外，由于充填体强度与刚度均低于围岩，随着采场的逐步开采与充填，已充填采场逐渐成为卸压区，进而发展为位移变化最为显著的区域。

3.3.2　应力分析

岩体的破坏形式包括拉伸破坏和剪切破坏，通过分析最大主应力或最小主应力可以确定采空区的初始破坏位置和破坏形式。图 6 和图 7 为垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时，采场最大主应力和最小主应力分布情况。



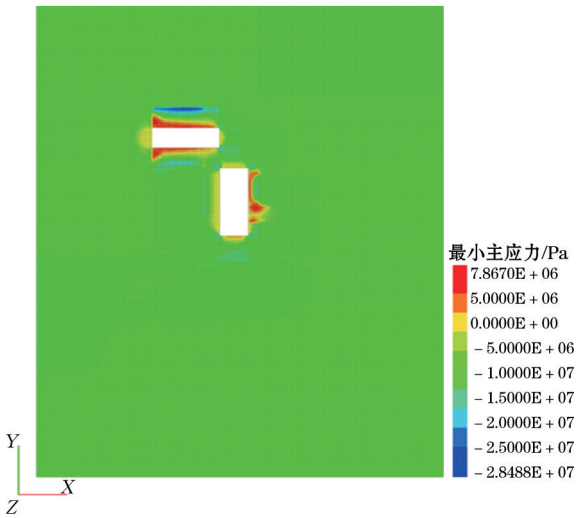
（a）第一步回采



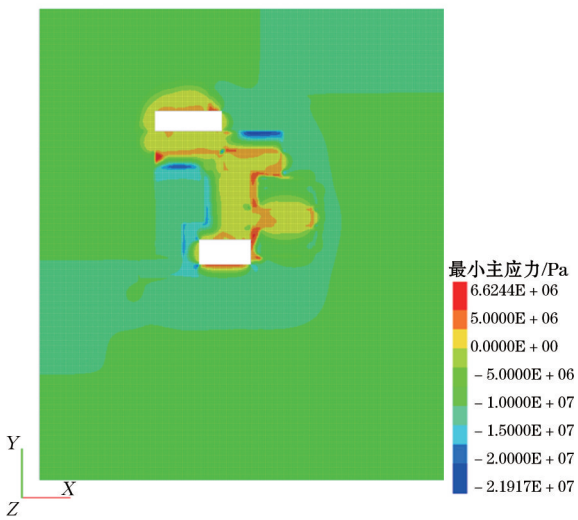
（b）第三步回采

图 6　垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时采场最大主应力云图

Fig.6　The maximum principal stress cloud maps in the mining area when the thickness of vertical isolated pillar is 10 m



（a）第一步回采



（b）第三步回采

图 7　垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时采场最小主应力云图

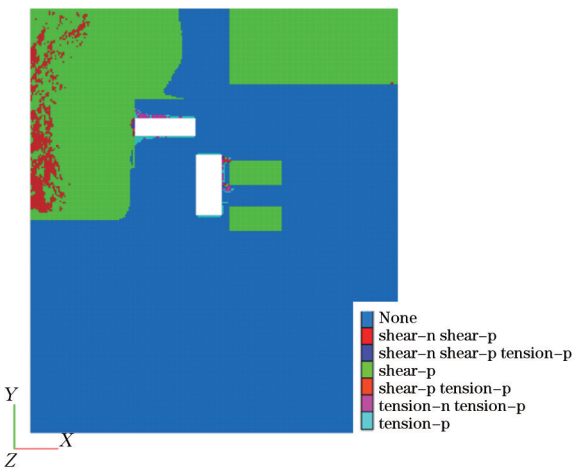
Fig.7　The minimum principal stress cloud maps in the mining area when the thickness of vertical isolated pillar is 10 m

模拟结果表明，采场两端出现应力集中，第一步回采时，采场最大主应力约为 50 MPa，隔离矿柱厚度对第一步回采时采场的最大主应力没有显著影响；第三步回采时，已充填完毕的采场出现了明显的应力释放现象（红色区域，颜色标识见电子版）。最小主应力出现在采场两帮，第一步回采时，采场最小主应力约为 7.5 MPa；第三步回采时，采场最小主应力值基本不变，但其范围明显增大。

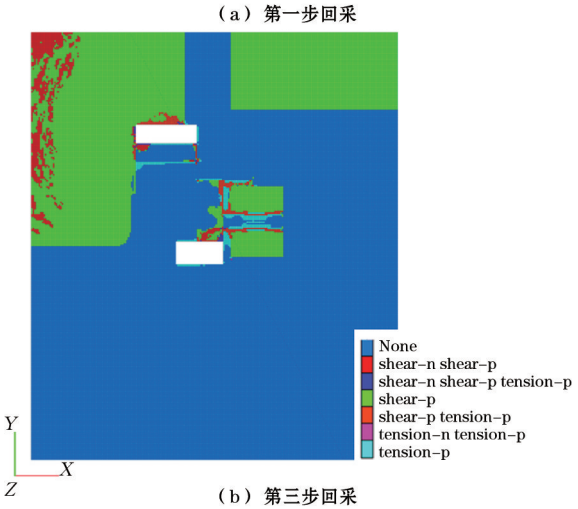
3.3.3　塑性破坏区分析

围岩塑性区分布可作为岩体破坏情况的主要判据，当塑性区未形成贯通时，可据此判断围岩整体处于稳定状态。图 8 为垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时，采场塑性区分布情况，模拟结果表明，隔离矿柱厚度

为 10 m 时,第一步回采时采场塑性破坏区域较小,只产生了零散的剪切破坏单元;第三步回采时塑性破坏区已充填采场周围,破坏程度略增大,但隔离矿柱未产生明显破坏。隔离矿柱厚度为 8 m 时,破裂区在 A2 采场周边较发育;第二步回采时已充填采场和正在开采的采场周围出现小规模的条状连续的塑性变形区域,以剪切破坏为主,拉伸破坏区域较小。



(a) 第一步回采



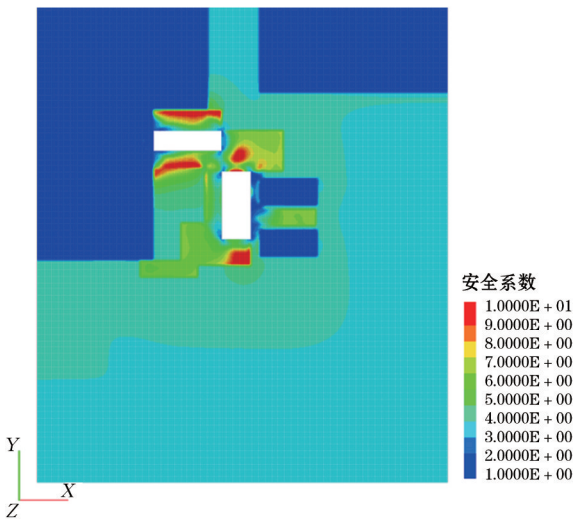
(b) 第三步回采

图 8 垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时采场塑性区分布情况

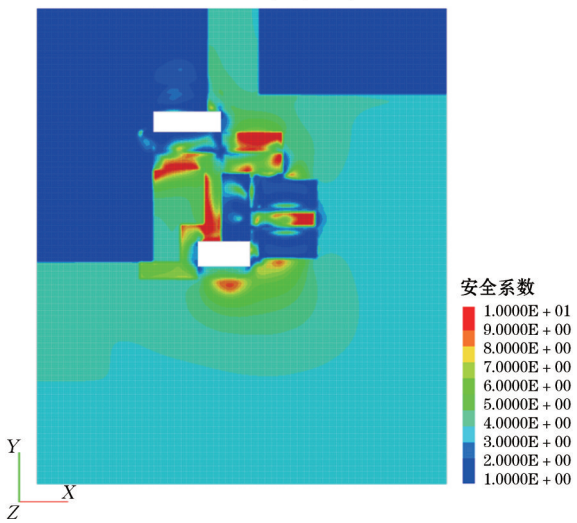
Fig.8 The distribution of plastic zone in the mining area when the thickness of vertical isolated pillar is 10 m

3.3.4 安全系数分析

矿柱的安全系数为矿柱强度与其所受平均应力的比值,由于矿柱整体的稳定性由其最薄弱部位决定,因此,进行矿柱稳定性分析时应重点关注其最小安全系数。图 9 为垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时,采场安全系数分布情况。模拟结果表明,安全系数较低的区域集中于已回采充填区域;垂直隔离矿柱厚度为 10 m 和 12 m 时,矿柱最小安全系数大于 8.0;垂直隔离矿柱厚度为 8 m 时,矿柱安全系数出现了不同程度的下降,矿柱最小安全系数为 7.0。



(a) 第一步回采



(b) 第三步回采

图 9 垂直隔离矿柱厚度为 10 m 时采场安全系数分布情况

Fig.9 The distribution of safety factor in the mining area when the thickness of vertical isolated pillar is 10 m

综合数值模拟结果可知,垂直隔离矿柱厚度为 10 m 和 12 m 时,采场位移、最大主应力、最小主应力、塑性破坏区和安全系数等指标无明显区别;垂直隔离矿柱厚度为 8 m 时,采场周边位移明显增加,塑性破坏区范围明显增大,安全系数也略有下降。因此,综合考虑安全性和经济性,建议垂直隔离矿柱厚度为 10 m。

4 结论

本文以铜坑矿由崩落法转充填法开采区域为研究对象,通过理论计算初步确定了隔离矿柱的厚度,并运用 FLAC3D 数值模拟对不同垂直隔离矿柱厚

度下采场的稳定性进行了分析，得到以下主要结论。

(1) 通过 Bieniawski 矿柱强度公式和 K.B.鲁佩涅依特理论，计算得到垂直隔离矿柱厚度应不小于 9.00 m，水平隔离矿柱厚度应不小于 9.36 m。

(2) 运用 FLAC3D 模拟分析了垂直隔离矿柱厚度为 8 m、10 m、12 m 时采场的稳定性。模拟结果表明，垂直隔离矿柱厚度为 10 m 和 12 m 时，采场位移、最大主应力、最小主应力、塑性破坏区和安全系数等指标无明显区别；垂直隔离矿柱厚度为 8 m 时，采场周边位移明显增加，塑性破坏区范围明显增大，安全系数略有下降。因此，推荐铜坑矿崩落法转充填法开采区域的垂直隔离矿柱厚度为 10 m。

参考文献(References)：

[1] 何环莎，王旭，刘畅，等.崩落法转充填法开采安全隔离层厚度研究[J].中国矿业，2024，33(8)：176-183.
HE Huansha，WANG Xu，LIU Chang，et al. Study on thickness of safety isolation layer in caving-to-backfilling mining[J]. China Mining Magazine，2024，33(8)：176-183.

[2] 钟敏.龙首矿西二采区充填－崩落协同开采关键技术研究[D].北京：北京科技大学，2022.
ZHONG Min. Research on key technologies of collaborative mining of filling and caving mining at No.2 west mining area of Longshou Mine[D]. Beijing：University of Science and Technology Beijing，2022.

[3] 陈阳.程潮铁矿崩落法和充填法协同开采方法及应用研究[D].武汉：武汉科技大学，2018.
CHEN Yang. The cooperative mining method and application research of Chengchao Iron Ore caving method and filling method[D]. Wuhan：Wuhan University of Science and Technology，2018.

[4] 李夕兵，彭定潇，冯帆，等.基于中厚板理论的深部崩落转充填隔离矿柱稳定性分析[J].中国矿业大学学报，2019，48(3)：484-494.
LI Xibing，PENG Dingxiao，FENG Fan，et al. Stability analysis of horizontal insulating pillar in deep mining from caving to filling method on the basis of refined plate theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2019，48(3)：484-494.

[5] 李伟.金山店铁矿崩落法转充填法采场隔离矿柱稳定性研究[D].贵阳：贵州大学，2016.
LI Wei. Study on stability of pillar in isolation layer during transition stope from filling succeed caving method in Jinshandian Iron Mine[D]. Guiyang：Guizhou University，2016.

[6] 赵兴东.谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J].岩石力学与工程学报，2010，29(增刊 1)：2616-2622.
ZHAO Xingdong. Stability analysis of insulating pillar of excavation of Chambishi Copper Mine in depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29(Suppl. 1)：2616-2622.

[7] 王文杰，任凤玉，周宗红，等.夏甸金矿采矿方法过渡期临时矿柱尺寸确定方法研究[J].中国矿业，2007，16(4)：61-63.
WANG Wenjie，REN Fengyu，ZHOU Zonghong，et al. The interim pillar size design method study of mining method transition in Xiadian Gold Mine[J]. China Mining Magazine，2007，16(4)：61-63.

[8] 李元辉，南世卿，赵兴东，等.露天转地下境界矿柱稳定性研究[J].岩石力学与工程学报，2005，24(2)：278-283.
LI Yuanhui，NAN Shiqing，ZHAO Xingdong，et al. Stability of boundary pillar for transition from open pit to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(2)：278-283.

[9] 钱鸣高，刘听成.矿山压力及其控制[M].北京：煤炭工业出版社，1992.
QIAN Minggao，LIU Tingcheng. Mine press and strata control[M]. Beijing：China Coal Industry Publishing House，1992.

[10] 汪勇.采空区上方安全顶柱厚度的确定方法[J].矿业快报，2002(1)：17-18.
WANG Yong. Determination of the thickness of the safety cap pillar above the mined area[J]. Express Information of Mining Industry，2002(1)：17-18.

[11] 张欢.深井矿山盘区隔离矿柱回采稳定性研究[D].长沙：中南大学，2023.
ZHANG Huan. Study on the stability of isolated pillar mining in deep mine[D]. Changsha：Central South University，2023.

[12] 童大志，王冠男，张驰.红岭铅锌矿崩落法转充填法隔离顶柱厚度研究[J].矿冶工程，2022，42(5)：5-9.
TONG Dazhi，WANG Guannan，ZHANG Chi. Thickness of crown pillars for Hongling Lead-Zinc Mine during transition from stope caving method to filling method[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2022，42(5)：5-9.

[13] 强浩.基于绿色理念的四方金矿崩落转充填开采及隔离层技术研究[D].西安：西安建筑科技大学，2021.
QIANG Hao. Research on caving to filling mining and isolation layer technology in Sifang Gold Mine based on green concept[D]. Xi'an：Xi'an University of Architecture and Technology，2021.

[14] 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.
WANG Wenjun，LI Jiashu，XU Shuai，et al. Working mechanism and thickness optimization of the original rock isolating pillars in deep mining[J]. Metal Mine，2020(8)：38-43.

[15] 李玉飞，叶义成，刘晓云，等.基于突变理论的崩落法转充填法隔离矿柱安全厚度计算[J].有色金属工程，2019，9(7)：84-91.
LI Yufei，YE Yicheng，LIU Xiaoyun，et al. Calculation of safety thickness of isolated pillars from caving method to filling method based on catastrophe theory[J]. Nonferrous Metals Engineering，2019，9(7)：84-91.

[16] 严振湘,张文东.基于 FLAC3D 数值模拟方法的杏山铁矿中段隔离矿柱稳定性分析[J].现代矿业,2021,37(2):206-209.
YAN Zhenxiang, ZHANG Wendong. Stability analysis of isolated pillar in the middle section of Xingshan Iron Mine based on FLAC3D numerical simulation method[J]. Modern Mining,2021,37(2):206-209.

[17] 李启月,陈亮,谭勇,等.基于 ANSYS 的二步采场分段开挖过程模拟及稳定性分析[J].科技导报,2013,31(22):44-49.
LI Qiyue, CHEN Liang, TAN Yong. Simulation of the second-pillar mining stope excavation and its stability analysis based on ANSYS[J]. Science & Technology Review,2013,31(22):44-49.

[18] 吕冠颖,王阡,王翔,等.某铁矿深部开采水平隔离矿柱厚度优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):13-18.
LYU Guanying, WANG Qian, WANG Xiang, et al. Study on thickness optimization of horizontal isolating pillar in deep mining of an iron mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(8):13-18.

[19] 刘洋,刘晓光,侯奎奎,等.深部矿体开采对隔离矿柱及回填体的稳定性影响研究[J].矿冶工程,2022,42(3):29-35.
LIU Yang, LIU Xiaoguang, HOU Kuikui, et al. Influence of deep ore-body mining on stability of barrier pillars and backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(3):29-35.