

# 露天转地下开采护顶矿柱尺寸优化研究

Optimization of the Size of Protective Roof Pillar in Open-pit to Underground Mining

张建立<sup>1</sup>, 陈小伟<sup>2,3</sup>, 班军<sup>1</sup>, 任鹏召<sup>2</sup>, 许译心<sup>1</sup>, 张少杰<sup>2</sup>, 王晓宇<sup>1</sup>

(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:**对于露天转地下的开采工程,护顶矿柱是矿山地下开采浅部转深部的关键衔接部分,护顶矿柱的厚度不仅关系着地下开采的安全性,同时也影响矿山的经济效益,其尺寸的合理性对工程稳定性及深部开采安全极其重要。某铁矿为大型深凹露天矿,露天开采结束后将转入地下开采,本文采用FLAC<sup>3D</sup>软件,结合铁矿工程地质条件、开采工艺方案等建立三维数值模型,对不同厚度时护顶矿柱的稳定性进行模拟分析。结果表明,护顶矿柱的设置确实能够有效控制围岩变形和空区破坏,保证空区下矿体回采的安全进行,确定了最佳护顶矿柱厚度。对类似矿山资源回收及安全生产具有一定的参考和借鉴意义。

**关键词:**露天转地下开采;护顶矿柱;稳定性;数值模拟

中图分类号:TD854

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2023)05-0022-07

**Abstract:** For open-pit to underground mining projects, the protective pillar is a key connecting part of the shallow to deep underground mining. The thickness of the protective pillar not only affects the safety of underground mining, but also affects the economic benefits of the mine. The rationality of its size is extremely important for the stability of the project and the safety of deep mining. An iron mine is a large deep open pit mine, and after the completion of surface mine mining, it will be transferred to underground mining. In this paper, FLAC<sup>3D</sup> software is used to establish a three-dimensional numerical model in combination with the engineering geological conditions of the iron mine, mining process plan, etc., to simulate and analyze the stability of roof pillars with different thicknesses. The results indicate that the setting of isolation pillars can effectively control the deformation of surrounding rock and the destruction of the goaf, ensure the safe mining of the ore body under the goaf, and determine the optimal thickness of artificial isolation pillars. It has certain reference and reference significance for recycling and safety production of similar mines.

**Key words:** open-pit mining to underground mining; protective roof pillar; stability; numerical simulation

## 1 前言

我国的经济正处于快速发展时期,对能源与原料的需求量日益增加,达到一个很高的水平。一般资源开采首先采用露天开采,因为露天采矿具有成本低、速度快、安全性好、生产能力大等优点,但随着开采深度的不断增加,继续采用露天采矿方式会产生很多的问题,如剥采比增加、运距大幅增加、效益指标恶化、排土场容积不足等。因此矿床上部先采用露天开采,下部转用地下开采的露天转地下开采方式成为一种非常合理恰当的选择<sup>[1-4]</sup>。

露天转地下开采过程须在露天境界内保留一定厚度的矿柱,也称为露天转地下开采护顶矿柱,它是地下开采时的直接顶板,其稳定性至关重要。理论

上来讲,护顶矿柱是一个长方形的厚板,该板与周围的岩体接触连接,受到的荷载有自身的重力、坡体的重力和设备的重量,护顶矿柱厚度的确定,是一个非常重要和复杂的科研课题。

国内外有关护顶矿柱安全厚度的研究方法有很多,主要有平板梁理论、松散系数理论、工程计算法、经验类比法等。黄慎<sup>[5]</sup>等以突变理论的研究方法对简化顶板-矿柱的力学模型进行了研究,推导出跨度、弹性模量和软化特性等矿柱内部性质为该系统发生突变失稳的充要条件;赵延林等<sup>[6]</sup>以突变理论作为基础对高峰矿区105#矿体建立了多层复杂采空区重叠顶板的稳定性强度折减法,该研究指出了重叠顶板失稳的判据;李江腾等<sup>[7]</sup>以断裂力学和突变理论为基础,探讨了矿柱裂纹的形成扩展机制,并导出其破坏崩塌时所受到的临界应力值,并发现矿柱岩层分裂后的节理分布会对岩层的屈曲断裂造成影响,进而导致矿柱发生失稳破坏;闫苓鹏等基于尖点突变理论分析了矿柱失稳的原理及过程,通过

[作者简介] 张建立(1980—),男,工程师,主要从事露天矿山生产、设备技术和管理方面的工作。

[引用格式] 张建立,陈小伟,班军,等. 露天转地下开采护顶矿柱尺寸优化研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(5):22-28.

普氏拱理论对开采过程进行了分析,最终得到矿柱的稳定性表达式;周子龙等采用 PFC<sup>2D</sup> 计算机数值模拟软件,把动态过程中的连锁屈曲崩塌矿柱群进行了模拟,分析了安全系数、岩体强度等参数条件对矿柱群崩塌的影响;张书坤等基于传递矩阵方法,对坚硬岩性矿柱的纵向拉伸破坏机理进行了研究,推导出了矿柱的极限载荷计算公式。这些方法将境界矿柱研究简化为二维平面问题进行分析,与实际境界矿柱属于三维实体不符,具有一定的弊端。

本文在参考借鉴上述研究的基础上,运用三维数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup>,对某铁矿护顶矿柱的尺寸进行了优化研究,对指导该类型矿山的安全高效生产具有积极意义。

## 2 工程概况

某铁矿自建矿以来,历经多年开采,从原来 260 m 高的山顶采至当前 -354 m 左右的大型深凹露天铁矿,现矿区内最高标高 128 m,已形成东西长 1 700 m、南北宽 1 520 m、垂直深达 400 m 椭圆形露天坑,具体如图 1 所示。



图 1 矿区露天坑现状图

矿区露天坑目前最高生产水平为 -330 m 水平,最低生产水平为 -366 m;固定公路延伸至 -330 m 水平,-318 m 以上已形成固定帮。主要出矿水平为 -330 m、-342 m、-354 m 和 -366 m 四个水平,露天最终境界坑底为 -414 m。

目前矿山正在进行露天生产,露天开采结束后将转入地下开采。为阻断露天坑与地下的水力通道,避免构成淹井风险,同时保持高陡边坡稳定,保护周边排岩场和尾矿库等设施,计划采用尾砂胶结固化回填露天坑,使之逐步恢复到露采前的原始地貌,为生态修复治理创造条件。

露天坑固化回填过程中,为保证地下生产安全,

采用钢筋网+高强度充填体进行整体封底,具体如图 2 所示,其中 -414 ~ -394 m 采用 28 d 强度不低于 4 MPa 的尾砂胶结充填料浆进行回填,为直接底板; -394 ~ -354 m 采用 28 d 强度不低于 1.5 MPa 的尾砂胶结充填料浆进行回填,为间接底板; -354 ~ -300 m 采用 28 d 强度不低于 1.0 MPa 的尾砂胶结充填料浆进行回填,为过渡层。-300 ~ -100 m 采用 28 d 强度不低于 0.5 MPa,浓度为 70% 的充填料浆进行回填; -100 ~ -98 m 采用 28 d 强度不低于 2 MPa,浓度为 70% 的充填料浆进行回填; -98 ~ +70 m 采用 28 d 强度不低于 0.5 MPa,浓度为 70% 的充填料浆进行回填。回填到 +70 m 后进行场地清表及平整碾压,然后进行客土覆盖,后续对土壤改良后,进行生态修复。

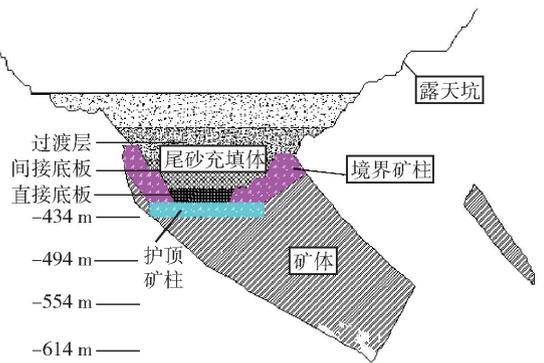


图 2 露天坑固化回填、矿柱留设示意图

地下开采主要是对 -324 ~ -674 m 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。地下开采将矿体划分为盘区,盘区沿走向布置,长度 120 m,中段高度 60 m。盘区间留设间柱,对于需要留设溜井的盘区间柱宽 34 m,不需要留设溜井的盘区矿柱宽 26 m。

本文以该矿区露天转地下开采过渡时期的开采技术为研究载体,采用数值模拟方法,对露天转地下开采过渡时期护顶矿柱安全厚度及其稳定性进行探讨。

## 3 数值模拟

### 3.1 计算模型

根据矿山的工程地质条件、露天坑回填方案和地下开采方案,建立了 FLAC<sup>3D</sup> 三维有限差分数值模

型。模型 X 轴垂直矿柱走向,长度为 3 800 m;模型 Y 轴沿矿柱走向,长度为 3 800 m;模型高为 900 m,具体如图 3 所示。

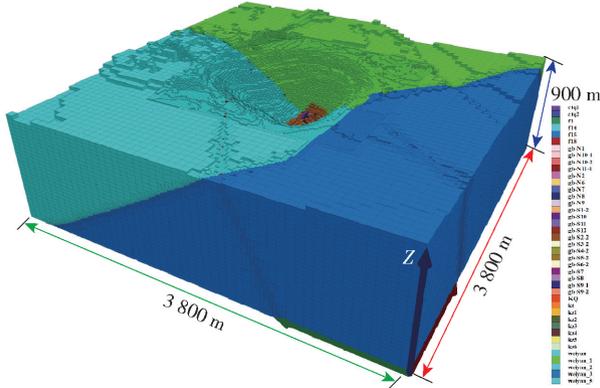


图 3 三维数值模型

### 3.2 模型应力及位移边界条件

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见式(1)~式(3)。

$$S_H = 0.05122H + 5.15821 \quad (1)$$

$$S_h = 0.03104H + 3.34273 \quad (2)$$

$$S_V = 0.02819H \quad (3)$$

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。

考虑构造应力的影响,沿模型 X 轴和 Y 轴的水平应力根据式(1)和式(2)施加,并在 Z 轴方向施加重力载荷;模型侧面限制水平移动,模型底部限制垂直移动。

### 3.3 力学参数

根据材料力学特征,围岩、矿体和回填体均采用摩尔-库仑屈服准则,具体见式(1)。

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (4)$$

式中: $f_s$ ——材料发生破坏的临界值,MPa;  
 $\sigma_1, \sigma_3$ ——最大和最小主应力,MPa;  
 $c$ ——内聚力,MPa;  
 $\phi$ ——内摩擦角,MPa。

根据现场工程地质调查和相关研究提供的岩石力学试验结果,考虑到岩体的尺度效应,模拟计算采用的岩体力学参数见表 1。

表 1 岩体物理力学参数

岩性	密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\mu$	内聚力 $c / \text{MPa}$	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$
磁铁矿石英岩	3 070	20.04	0.21	0.541	33.5
太古代花岗岩	2 650	25.55	0.26	0.405	35.7
绿泥石英片岩	2 640	37.67	0.29	0.381	28.0
花岗斑岩	2 720	30.53	0.26	0.385	31.5
回填体(4 MPa)	1 850	3.70	0.25	0.641	36.4
回填体(1.5 MPa)	1 950	2.70	0.24	0.452	34.1
回填体(1.0 MPa)	2 000	2.50	0.23	0.311	25.7
回填体(0.5 MPa)	2 100	2.10	0.21	0.252	23.5

普氏拱理论是由苏联科学家提出的建立在压力拱基础上的地压理论,其基本前提就是采空区上方岩石能形成自然压力拱以承受岩体自重及上部荷载,因此计算出拱高  $T$  后还需附加一定厚度的岩层才是最终的护顶矿柱厚度,此处取护顶矿柱的安全厚度为压力拱高度的 2 倍。综合护顶矿柱的相关性质,根据工程实际情况所提出的如下简化计算公式。

$$H = 2T = 2 \frac{0.5L + h \tan(45 - 0.5\phi)}{f} \quad (5)$$

式中: $H$ ——矿柱厚度,m;  
 $L$ ——矿柱跨度,m;  
 $T$ ——压力拱高度,m;  
 $h$ ——空场最大高度,m;  
 $\phi$ ——岩石内摩擦角;  
 $f$ ——岩石强度系数。

此处强度系数取值  $f = 4$ ,根据地采初步设计取空场最大高度  $h = 60 \text{ m}$ ,  $\phi = 33.5^\circ$ ,带入式中得到如下表的结果,带入式(5),得到计算结果见表 2。

表 2 基于普氏拱理论的境界矿柱安全厚度

采场跨度/m	50	60	70	80	90	100
安全厚度/m	11.8	14.3	16.8	19.3	21.8	24.3

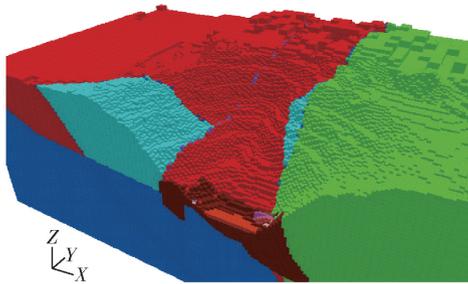
由于矿区在地下开采期间最大跨度为 90 m,由普氏拱理论得到护顶矿柱的尺寸为 21.8 m,因此数值计算时护顶矿柱的厚度取值为 15 m、20 m、25 m、30 m,进行护顶矿柱的稳定性计算。

## 4 计算结果分析

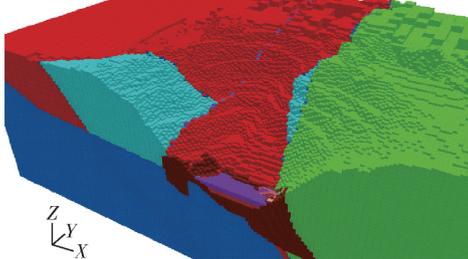
### 4.1 露天坑回填充填体应力分析

根据工程施工方案先对露天可能进行回填模拟,露天坑回填分为 4 步:(1)露天坑回填至 -394 m,胶结充填体强度为 4 MPa。(2)露天坑回填至 -354 m,胶结充填体强度为 1.5 MPa。(3)露天坑回

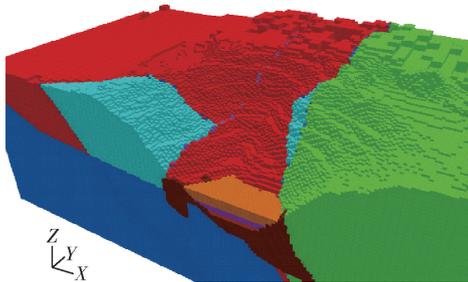
填至 -300 m,胶结充填体强度为 1 MPa。(4) 露天坑回填至 +70 m,胶结充填体强度为 0.5 MPa,回填过程如图 4 所示。



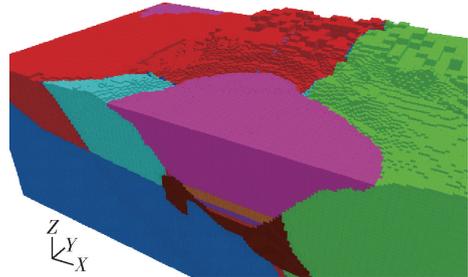
(a) 露天坑回填至-394 m



(b) 露天坑回填至-354 m



(c) 露天坑回填至-300 m

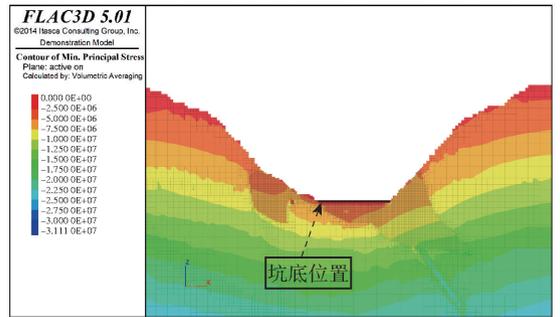


(d) 露天坑回填至+70 m

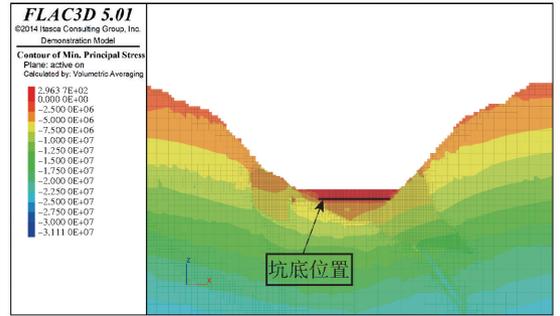
图 4 露天坑回填示意图

图 5 所示为不同回填高度的最大主应力,露天坑回填过程中最大主应力均为负值,且最大主应力与竖直方向应力等值云图基本一致,表明尾砂回填体处于受压应力状态。尾砂回填引起岩土层压力增长,表现为应力等值线的上移。随着回填高度的不断增加,露天坑边坡附近岩体的最大主应力值变化趋于平缓,有利于边坡整体的稳定性。

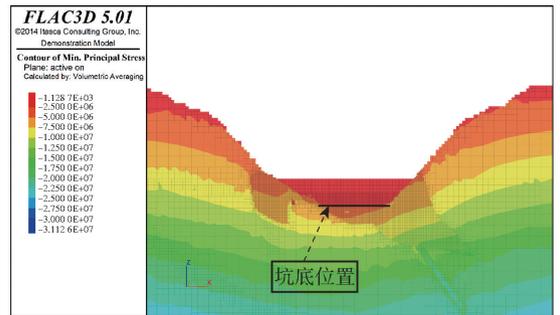
为了分析露天坑内充填体的应力分布规律,提



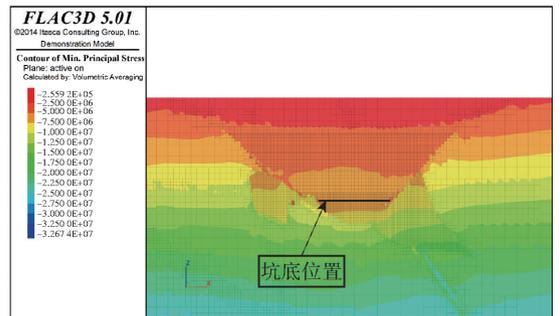
(a) 露天坑回填至-394 m最大主应力



(b) 露天坑回填至-354 m最大主应力



(c) 露天坑回填至-300 m最大主应力



(d) 露天坑回填至+70 m最大主应力

图 5 不同回填高度时最大主应力

取矿坑中轴(图 6 直线 AB)处单元的最大主应力数据,绘制曲线如图 7 所示。由图 7 可知,充填体的最大主应力随着充填深度的增加而增大,坑底附近的充填体最大主应力值最大约为 5 MPa。

### 4.2 护顶矿柱塑性区分析

矿区岩体被开挖之前处于平衡状态,开挖破坏了岩层的平衡状态,岩层向新的平衡调整,调整过程

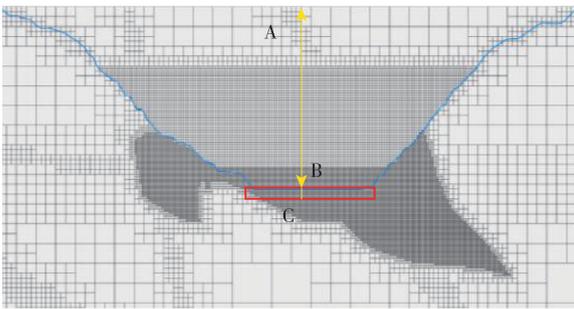


图6 监测点布置图

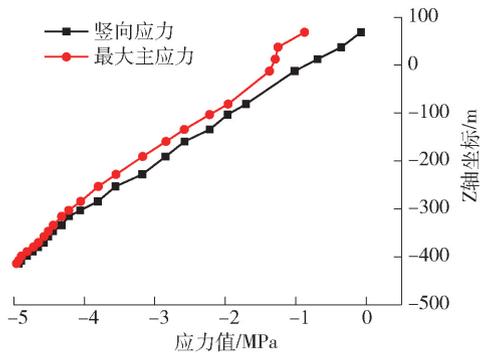


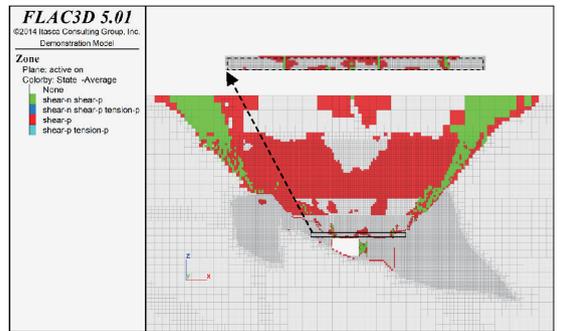
图7 充填体沿 AB 应力分布

中带来地应力的重新分布,引起开挖工程的变形与破坏。当地应力超过岩层的极限平衡状态,岩体就发生变形破坏,导致地下工程灾害的发生。

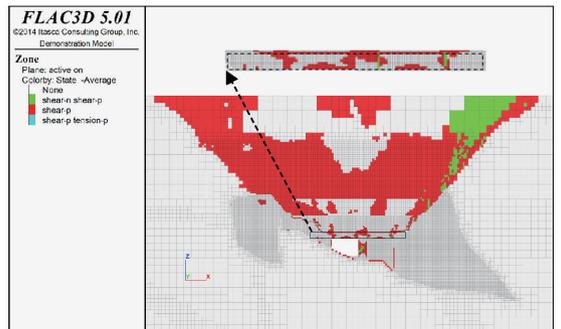
模拟计算时,护顶矿柱正下方的开采区域不进行充填直接进行运算,直至模型再次达到平衡。计算稳定后并分别对护顶矿柱的塑性区、最大主应力及竖向位移进行分析。

塑性区可以直接反应岩体的破坏情况,塑性区范围的大小可以反应出破坏范围的大小。地下开采后,护顶矿柱的塑性区主要分布在采空区的顶部,以及护顶矿柱和盘区间柱的相交隅角,具体如图8所示。当护顶矿柱厚度为15 m时,塑性区出现在采空区的两端及护顶矿柱的中部,此时整个矿柱出现大面积的塑性破坏,说明该矿柱不能支撑上部的回填料;当护顶矿柱厚度为20 m时,护顶矿柱中部并未发生塑性贯穿,但在矿柱两端塑性区仍较为发育,依旧存在失稳破坏风险;当护顶矿柱厚度为25 m时,塑性区矿柱中部并未发生贯穿,塑性区占比也逐渐降低,是可行的设计方案;当护顶矿柱厚度为30 m时,塑性区占比进一步降低,对整个护顶矿柱而言稳定性进一步增强。

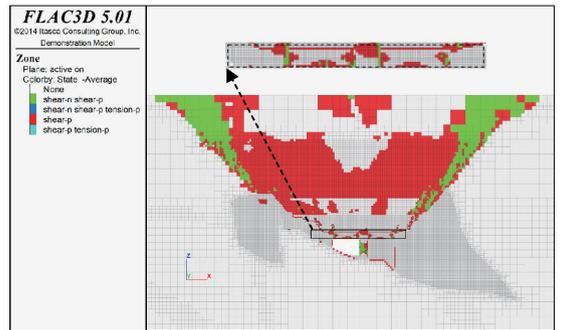
对不同厚度时护顶矿柱中塑性单元数量的统计分析并绘制曲线,具体如图9所示。当护顶矿柱厚度为15 m时,塑性区体积约占护顶矿柱总体积的40%;当护顶矿柱厚度为20 m时,塑性区体积约占



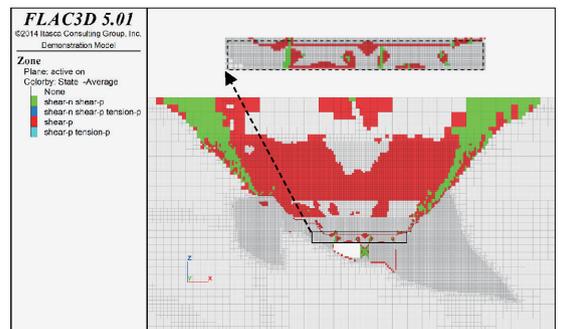
(a) 护顶矿柱15 m塑性区(垂直Y轴剖面)



(b) 护顶矿柱20 m塑性区(垂直Y轴剖面)



(c) 护顶矿柱25 m塑性区(垂直Y轴剖面)



(d) 护顶矿柱30 m塑性区(垂直Y轴剖面)

图8 不同厚度护顶矿柱的塑性区分布

护顶矿柱总体积的18%,占比明显下降;当护顶矿柱厚度为25 m时,塑性区占比约为15%,占比进一步下降;当护顶矿柱厚度为30 m时,塑性区占比约为13%。根据塑性区占比曲线的变化趋势可知,当护顶矿柱的尺寸大于25 m时,矿柱塑性区占比的减少趋势逐渐降低。

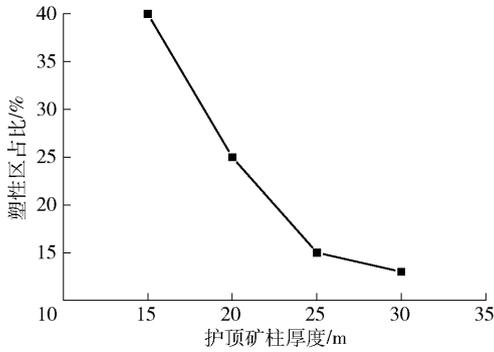


图9 不同厚度护顶矿柱的塑性区占比变化

### 4.3 护顶矿柱最大主应力分析

地下开采后,护顶矿柱最大主应力变化如图10所示。地下开采导致其周围应力重新分布达到新的平衡;开采完后,护顶矿柱类似于两端固定的简支梁,在其自重和上覆尾砂回填体的重力作用下,其下部将会产生拉应力;而在护顶矿柱上部出现较大压应力是因为受露天坑上部回填体的重力作用。

对护顶矿柱进行应力监测,监测点布置如图6中BC直线所示,统计模型中BC直线上单元的最大主应力值并绘制曲线如图11所示。护顶矿柱的最大主应力最大值出现在矿柱顶部,最大主应力值均约为6.5 MPa;由于矿柱底部单元处于塑性状态,该部分单元的最大主应力为拉应力,随着护顶矿柱厚度的增大,矿柱整体的变形量减小,底部单元的拉应

力值也随之减小。

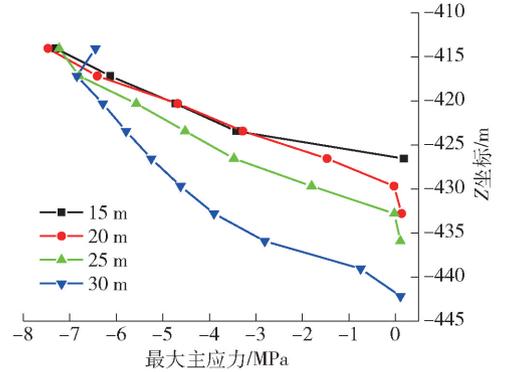
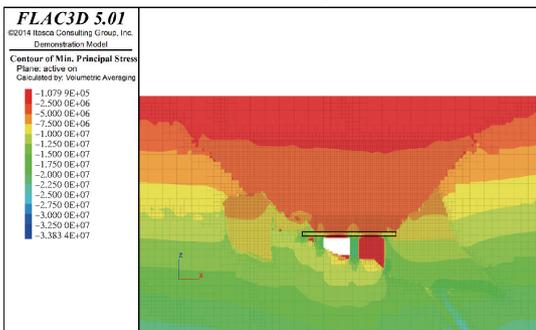


图11 不同厚度护顶矿柱中的最大主应力分布

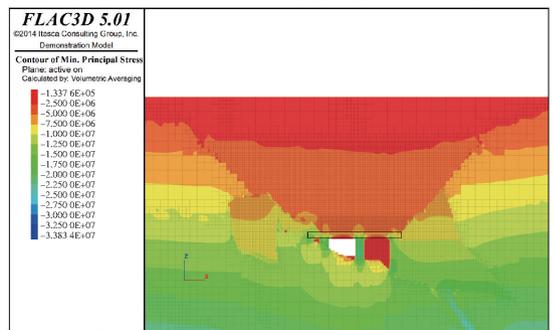
### 4.4 护顶矿柱竖向位移分析

地下开采完后,护顶矿柱在自重以及上覆尾砂胶结固化回填体的压力下发生沉降,且在矿柱下侧开采空区中间位置产生的竖向位移较矿柱其他部位要明显,竖向位移场如图12所示。

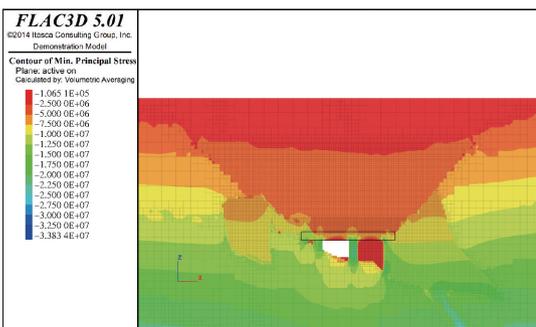
当护顶矿柱厚度从15 m增加到20 m时,沉降位移变化最大,曲线的斜率最大(绝对值),位移减小的幅度为0.34%;当护顶矿柱厚度从20 m增加到25 m时,沉降位移变化减小,曲线的斜率变小(绝对值),位移减小幅度为0.2%;当护顶矿柱厚度从25 m增加到30 m时,沉降位移变化减小,减小的幅度为0.06%。竖向位移变化曲线如图13所示。



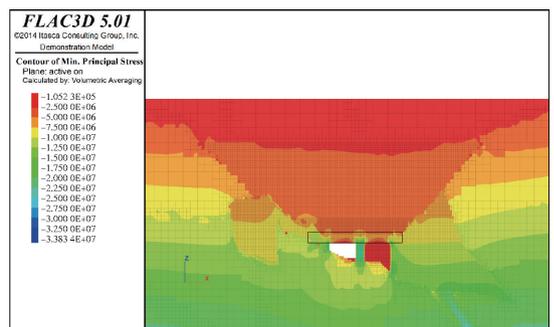
(a) 护顶矿柱15 m最大主应力(垂直Y轴剖面)



(b) 护顶矿柱20 m最大主应力(垂直Y轴剖面)

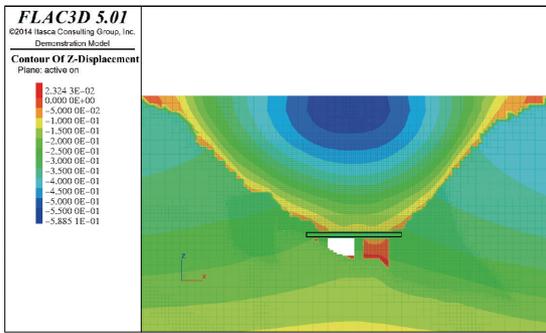


(c) 护顶矿柱25 m最大主应力(垂直Y轴剖面)

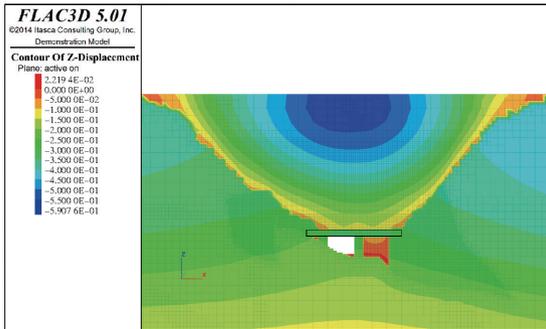


(d) 护顶矿柱30 m最大主应力(垂直Y轴剖面)

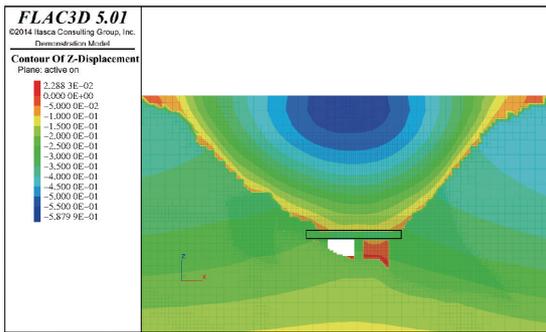
图10 不同厚度护顶矿柱的最大主应力场



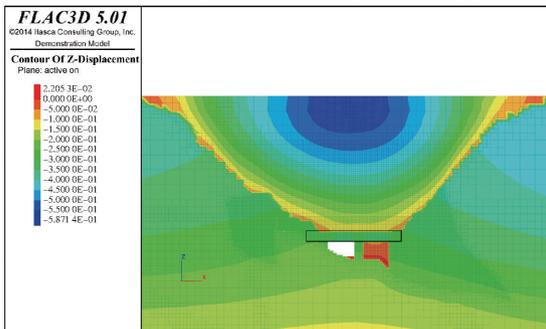
(a) 护顶矿柱15 m竖向位移(垂直Y轴剖面)



(b) 护顶矿柱20 m竖向位移(垂直Y轴剖面)



(c) 护顶矿柱25 m竖向位移(垂直Y轴剖面)



(d) 护顶矿柱30 m竖向位移(垂直Y轴剖面)

图 12 不同厚度护顶矿柱的竖向位移场

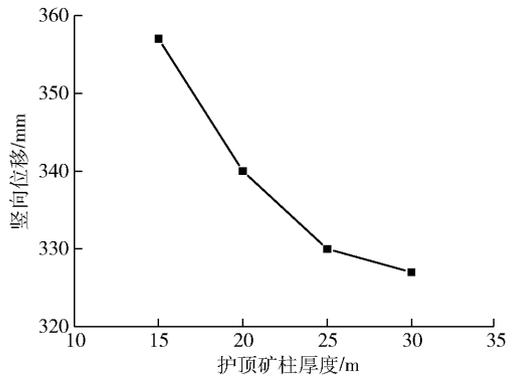


图 13 护顶矿柱底部竖向位移变化曲线

得到以下结论。

(1)随着露天坑固化回填体高度的不断增加,护顶矿柱中的应力有一定程度的增加,为露天坑固化回填的加载作用引起,坑底附近的充填体最大主应力值最大约为 5 MPa,在固化回填结束后,护顶矿柱处于稳定状态。

(2)利用普氏拱理论计算得到不同跨度采场护顶矿柱的厚度尺寸,结合 FLAC<sup>3D</sup>模拟,当厚度由 25 m 增加至 30 m 时,塑性区占比及护顶矿柱的最大位移值的变化率均急剧降低,而护顶矿柱过于厚大,会降低开采的经济效益,因此护顶矿柱的最优厚度应为 25 m。

(3)本文针对露天转地下开采矿山,露天坑固化回填后地下开采护顶矿柱留设参数问题,运用理论方法结合数值分析,确定了护顶矿柱的最佳厚度,可为类似矿山资源回收及安全生产提供参考。

[参考文献]

[1] 路增祥,蔡美峰.金属矿山露天转地下开采关键技术[M].北京:冶金工业出版社,2019.

[2] 任凤玉,李海英.金属矿床露天转地下协同开采技术[M].北京:冶金工业出版社,2018.

[3] 南世卿,杨天鸿.露天转地下开采围岩稳定与安全防灾[M].北京:冶金工业出版社,2013.

[4] 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.

[5] 黄慎,黄茂钧,周平.矿柱的突变失稳研究[J].有色金属(矿山部分),2018,70(2):15-17,22.

[6] 赵延林,吴启红,王卫军,等.基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(7):1424-1434.

[7] 李江腾,曹平.硬岩矿柱纵向劈裂失稳突变理论分析[J].中南大学学报(自然科学版),2006(2):371-375.

5 结论

本文根据矿山的工程地质条件、露天坑回填方案和地下开采方案,构建了 FLAC<sup>3D</sup>三维数值模型,对某大型深凹露天坑固化回填与地下开采的共同作用下,露天坑底护顶矿柱尺寸优化进行了分析研究,