

# 特大型条形矿柱卸压开采技术研究

Study on De-stress Mining Technology of Super Large Strip Pillar

张少杰<sup>1,2</sup>, 张爱民<sup>1,2</sup>, 刘育明<sup>1,2</sup>, 杨志国<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:**某铁矿为超大规模超深井矿山, 矿体特别厚大, 在盘区之间布置了特大型条形矿柱, 本文采用数值模拟方法, 对特大型条形矿柱采取不同卸压开采方案后的应力特征和塑性区分布进行了对比研究, 揭示了不同卸压方案的卸压效果, 提出了“先进路法卸压、后中深孔或深孔充填法回采”的盘区矿柱回收方法, 研究结果可为类似开采条件下的卸压开采提供参考。

**关键词:**深井开采; 条形矿柱; 卸压开采; 数值模拟

中图分类号: TD853 文献标志码: A 文章编号: 1672-609X(2024)01-0007-08

**Abstract:** In a super-scale and deep mine, the ore body is extremely thick and large. Extra large strip ore pillars are arranged between the panels. In this paper, the numerical simulation method is used to conduct a comparative study on the stress characteristics and plastic zone distribution of different de-stress schemes applied on the strip pillar. The effect of different de-stress schemes was revealed. A recovery method of strip ore pillar is put forward, which is “the first step: drift de-stress stoping; the second step: medium-long hole or long hole stoping with backfilling”. Its results can provide reference for de-stress mining under similar mining conditions.

**Key words:** deep mining; strip pillar; de-stress mining; numerical simulation

## 1 前言

随着我国浅部矿产资源日益减少以及采掘设备的大型化, 矿产资源的开采逐渐向深部和大规模两个方向发展<sup>[1-3]</sup>。针对深井超大面积开采过程中可能出现的岩爆、大变形等问题, 通过卸压手段主动降低大型矿柱中赋存的高应力, 是比较有效且重要的对策措施<sup>[4]</sup>。杨清波<sup>[5]</sup>以冬瓜山铜矿盘区隔离矿柱回采为工程背景, 对受大规模采动影响后隔离矿柱的开采技术条件和采场合理结构尺寸参数进行了研究。冯福康<sup>[6]</sup>基于地下矿山卸压开采思想, 结合矿山实践经验, 对盘区隔离矿柱不同开挖顺序的力学行为特性进行了分析, 优化了盘区隔离矿柱回采顺序, 提出了地压控制策略与技术措施。刘洪强<sup>[7]</sup>以新桥疏铁矿为工程背景, 运用能量守恒原理和尖点突变理论, 建立了采场顶板-矿柱系统的力学模型, 分析了不同盘区矿柱布设方案下的地下采场的应力、位移情况, 提出了合理的盘区矿柱布设方案, 为采场安全、高效的回采提供了理论依据。许宏亮<sup>[8]</sup>以桓仁铅锌矿为工程背景, 对深部开采隔离矿柱多种留设方案进行对比分析, 确定了确保深部安

全开采的隔离矿柱的主要结构参数。本文在参考借鉴上述研究的基础上, 采用数值模拟方法, 对某深井硬岩矿山特大型条形矿柱的不同卸压方案进行分析对比研究, 这对矿山安全高效开采具有十分重要的意义, 同时可为类似开采技术条件下的深井矿山卸压开采提供参考借鉴。

## 2 工程概况

某铁矿属隐伏盲矿床, 矿体埋藏深度 404 ~ 1 934 m, 东西长 1 500 m, 南北平均宽度 960 m, 最大垂直深度 1 580 m, 矿体平均厚度 246.84 m, 倾角约 70°。矿体主要呈厚层状产出, 区内地质构造简单, 岩石较完整。

根据矿体的开采技术条件, 设计主要采用大直径深孔空场嗣后充填法开采。为了保持采矿区域的整体稳定性和考虑采矿工程布置的需要, 在盘区之间沿最大主应力方向布置了特大型条形矿柱, 盘区内布置采场, 采场尺寸 40 m × 40 m, 高度 60 m。

## 3 数值模拟

### 3.1 计算模型

根据矿山的工程地质条件和开采方案, 建立

[作者简介] 张少杰(1984—), 男, 博士后, 正高级工程师, 主要从事矿山工程咨询与设计研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFC2907201)“金属矿深部大盘区无矿柱连续化开采技术与装备”。

[引用格式] 张少杰, 张爱民, 刘育明, 等. 特大型条形矿柱卸压开采技术研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 7-14.

FLAC<sup>3D</sup>精准数值模型。模型 X 轴沿矿柱走向,长度为 4 800 m;模型 Y 轴垂直矿柱走向,长度为 4 800 m;模型高为 1 620 m(标高从 -1 620 m 至 0 m),具体如图 1 所示。图 2 所示为数值模型的核心部分,主要为矿体的三维模型,尺寸为 1 600 m × 1 600 m × 1 620 m。-960 m 中段中特大型条形矿柱与盘区的布置,具体如图 3 所示。特大型条形矿柱宽 60 m,盘区宽 200 m。

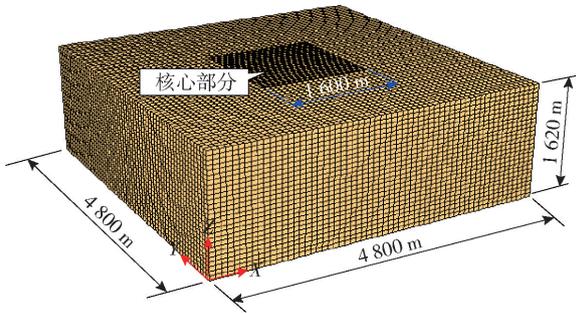


图 1 三维数值模型

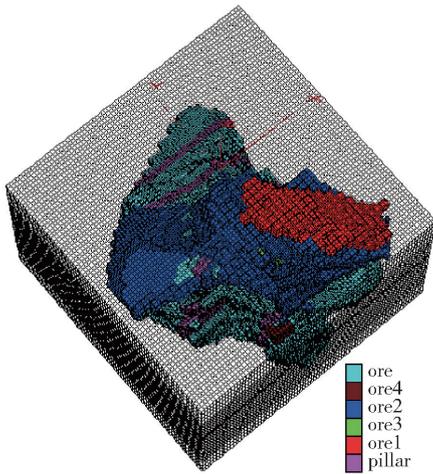


图 2 三维模型核心部分

### 3.2 地应力特征及边界条件

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,最大水平主应力与铅直主应力的比值均在 1.61 左右,最大主应力方向为近 NEE 向,平均方向为 67.83°。矿区测点的最大水平主应力和最小水平主应力随深度变化的综合线性回归方程为式(1)、式(2)。

$$\sigma_{h,\max} = 0.4619 + 0.0389h, R = 0.9632 \quad (1)$$

$$\sigma_{h,\min} = 0.5245 + 0.0283h, R = 0.9554 \quad (2)$$

式中, $\sigma_{h,\max}$ 为最大水平主应力,为压应力,与矿体走向近似平行,MPa; $\sigma_{h,\min}$ 为最小水平主应力,为压应力,与矿体走向近似垂直,MPa; $h$ 为垂直深度,m; $R$

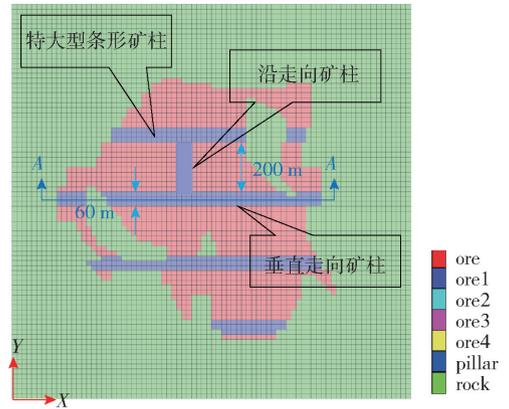


图 3 -960 m 中段矿柱与盘区的布置平面图

为回归系数。

研究区内的垂直应力随深度线性变化,根据矿体埋藏深度和平均岩体容重计算,模型上部施加垂直方向应力  $\sigma_z = 5.6$  MPa。考虑构造应力的影响,沿模型 X 轴和 Y 轴的水平应力分别根据式(1)和式(2)施加。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

根据现场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。根据材料力学特征,分别采用不同的力学模型:充填体采用理想弹塑性本构模型;围岩和矿体均采用复合摩尔库仑屈服准则。

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (3)$$

式中, $f_s$ 为材料发生破坏的临界值,MPa; $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 为最大和最小主应力,MPa; $c$ 为黏结力,MPa; $\varphi$ 为摩擦角。

表 1 岩体物理力学参数

岩性	密度 $\rho$ / kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\mu$	黏聚力 c/MPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
围岩	2 870	25	0.19	2.5	41.6
矿体	2 990	32	0.16	2.3	45.3
充填体	1 680	0.87	0.32	0.76	36.6

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。

### 3.4 计算模拟过程

为了揭示特大型条形矿柱采取不同卸压方案后

的卸压效果,本计算分以下步骤进行。

(1)计算模型在给定边界应力与位移条件下的初始状态。

(2)先模拟开采 -1 020 m 中段的矿体,再模拟开采 -960 m 中段的矿体。

(3)在 -960 m 中段特大型条形矿柱中进行卸压开采,卸压开采方案主要有以下 6 种:方案 1:采 5 m(充填)、留 5 m 矿柱,开采长度为 60 m。方案 2:采 5 m(不充填)、留 5 m 矿柱,开采长度为 60 m。方案 3:采 6 m(不充填)、留 4 m 矿柱,开采长度为矿体厚度。方案 4:采 7 m(不充填)、留 3 m 矿柱,开采长度为 60 m。方案 5:采 7 m(充填)、留 3 m 矿柱,开采长度为 60 m。方案 6:采 7 m(不充填)、留 3 m 矿柱,开采长度为矿体厚度。

### 4 计算结果分析

(1)方案 1:采 5 m(充填)、留 5 m 矿柱,开采长度为 60 m。

特大型条形矿柱采取卸压开采方案 1 后 A-A 剖面的最大主应力场,具体如图 4 所示。特大型条形矿柱采取卸压开采方案 1 后矿柱的应力变化曲线,具体如图 5 所示。从图中可以看出,5 m 矿柱中存在较高级别的应力集中,应力值高达 106 MPa。特大型条形矿柱采取卸压开采方案 1 后 A-A 剖面的塑性区分布,具体如图 6 所示。从图中可以看出,5 m 矿柱的两侧 2 次进入剪切塑性状态,矿柱的中间并未进入塑性状态。

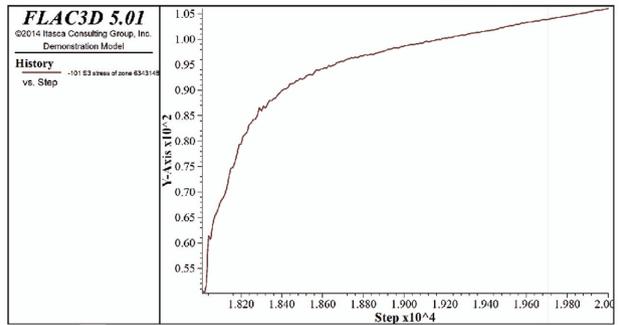


图 5 方案 1 的矿柱应力变化曲线

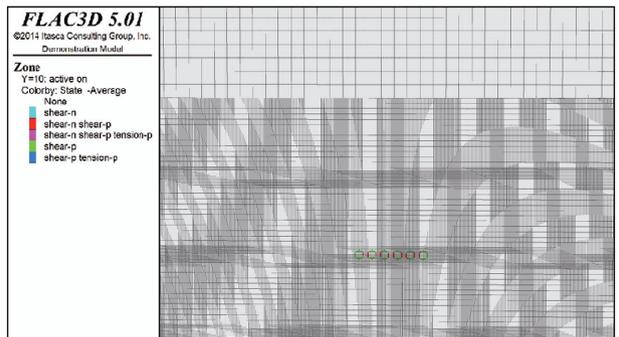


图 6 方案 1 的最大主应力场

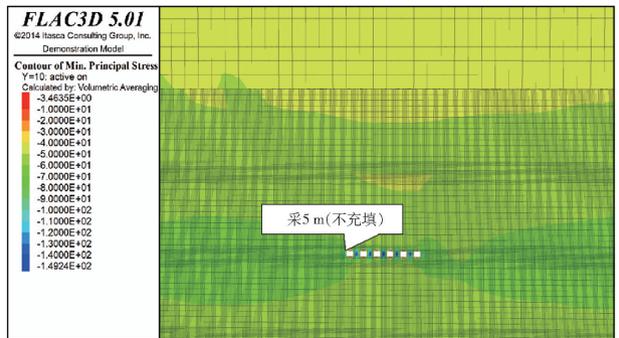


图 7 方案 2 的最大主应力场

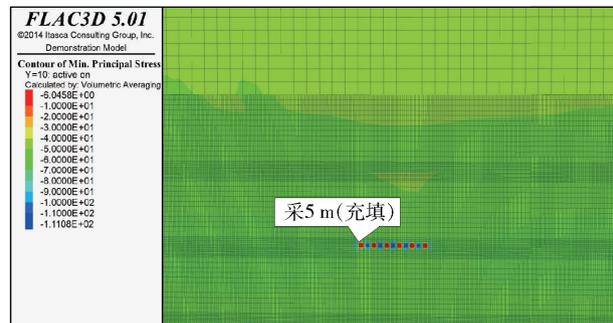


图 4 方案 1 的最大主应力场

(2)方案 2:采 5 m(不充填)、留 5 m 矿柱,开采长度为 60 m。

特大型条形矿柱采取卸压开采方案 2 后 A-A 剖面的最大主应力场,具体如图 7 所示。特大型条形矿柱采取卸压开采方案 2 后矿柱的应力变化曲线,具体如图 8 所示。从图中可以看出,即使采空区不充填时,5 m 矿柱中也存在较高级别的应力集中,

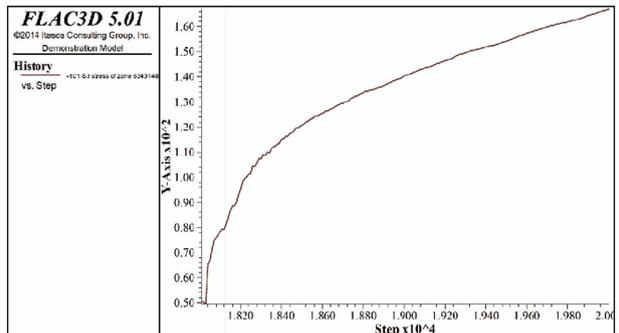


图 8 方案 2 的矿柱应力变化曲线

应力值高达 167 MPa;与采空区充填时对比发现,采空区不充填时,矿柱中的应力集中程度更高。特大型条形矿柱采取卸压开采方案 2 后 A-A 剖面的塑

性区分布,具体如图9所示。从图中可以看出,5 m矿柱的两侧2次进入剪切塑性状态,5 m矿柱的中间部分单元仅1次进入剪切塑性状态。

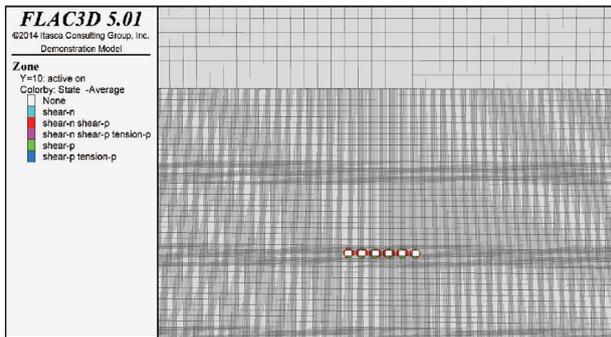


图9 方案2的塑性区分布

(3)方案3:采6 m(不充填)、留4 m矿柱,开采长度为矿体厚度。

特大型条形矿柱采取卸压开采方案3后 A-A剖面的最大主应力场,具体如图10所示。特大型条形矿柱采取卸压开采方案3后矿柱的应力变化曲线,具体如图11所示。从图中可以看出,4 m矿柱中存在较高程度的应力集中,应力值高达171 MPa。特大型条形矿柱采取卸压开采方案3后 A-A剖面的塑性区分布,具体如图12所示。从图中可以看出,4 m矿柱为剪切塑性状态;在沿走向矿柱和垂直走向矿柱交叉位置,塑性区相对较少。

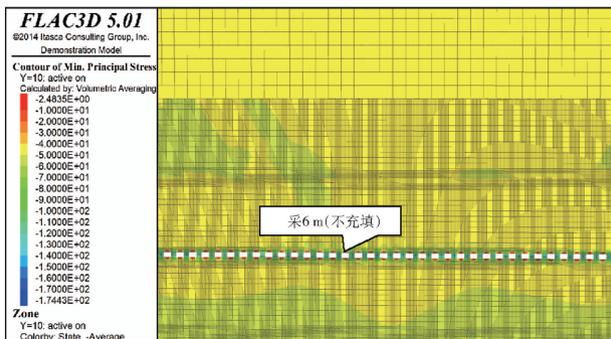


图10 方案3的最大主应力场

(4)方案4:采7 m(不充填)、留3 m矿柱,开采长度为60 m。

特大型条形矿柱采取卸压开采方案4后 A-A剖面的最大主应力场,具体如图13所示。特大型条形矿柱采取卸压开采方案4后矿柱的应力变化曲线,具体如图14所示。从图中可以看出,开采扰动应力转移至卸压区域(60 m范围)的两端,3 m矿柱中为低应力区;3 m矿柱中的应力先增大至95 MPa,后减小为63 MPa,表明3 m矿柱发生了屈服破坏。

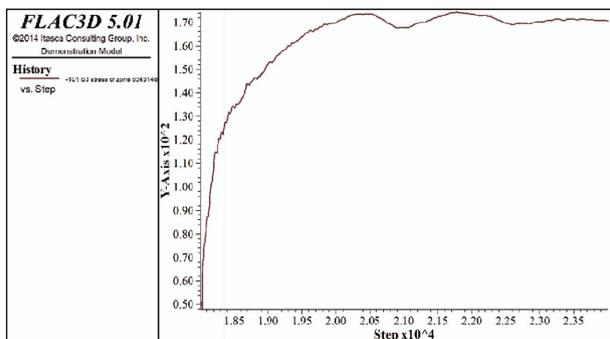


图11 方案3的最大主应力场

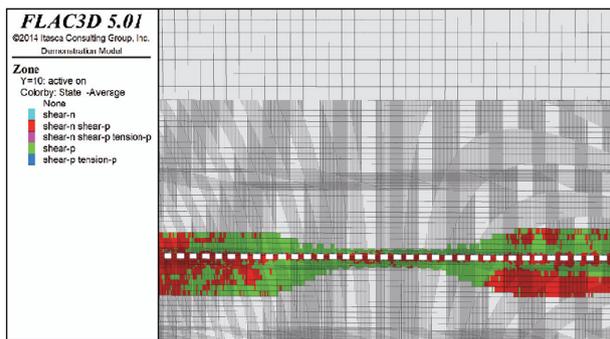


图12 方案3的最大主应力场

特大型条形矿柱采取卸压开采方案4后 A-A剖面的塑性区分布,具体如图15所示。从图中可以看出,3 m矿柱2次进入剪切塑性状态。

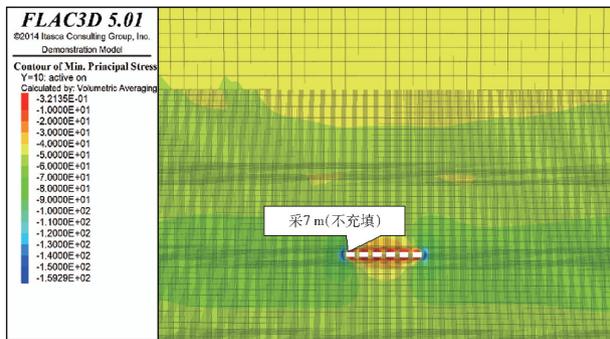


图13 方案4的最大主应力场

(5)方案5:采7 m(充填)、留3 m矿柱,开采长度为60 m。

特大型条形矿柱采取卸压开采方案5后 A-A剖面的最大主应力场,具体如图16所示。特大型条形矿柱采取卸压开采方案5后矿柱的应力变化曲线,具体如图17所示。从图中可以看出,矿柱中的应力集中程度较高;3 m矿柱中的应力高达185 MPa,说明在采空区充填体的作用下,3 m矿柱仍能发挥承载作用。特大型条形矿柱采取卸压开采方案5后 A-A剖面的塑性区分布,具体如图18所

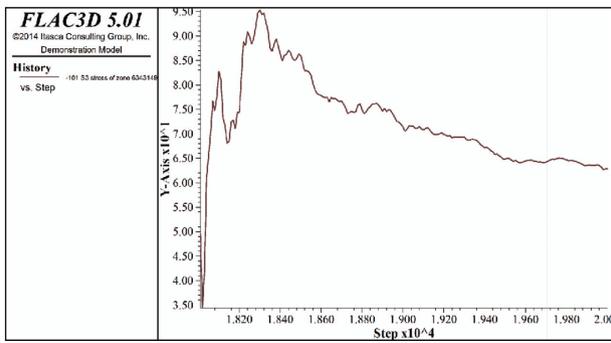


图 14 方案 4 的最大主应力场

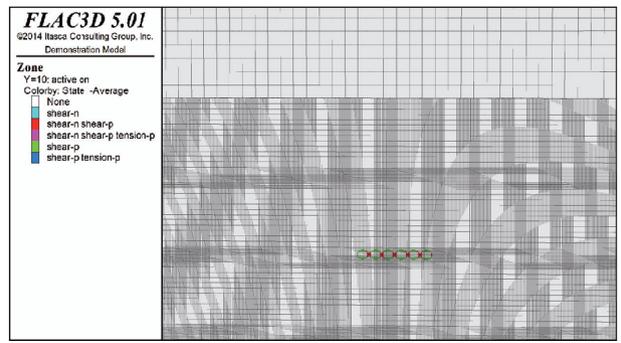


图 18 方案 5 的最大主应力场

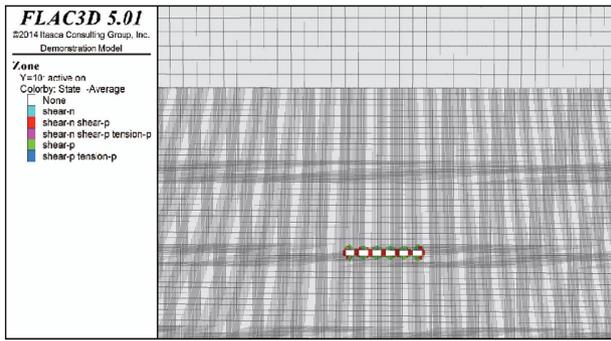


图 15 方案 4 的最大主应力场

示。从图中可以看出,3 m 矿柱的剪切塑性状态呈现出“X”形。

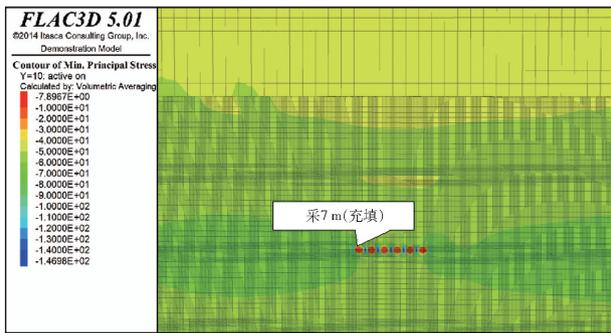


图 16 方案 5 的最大主应力场

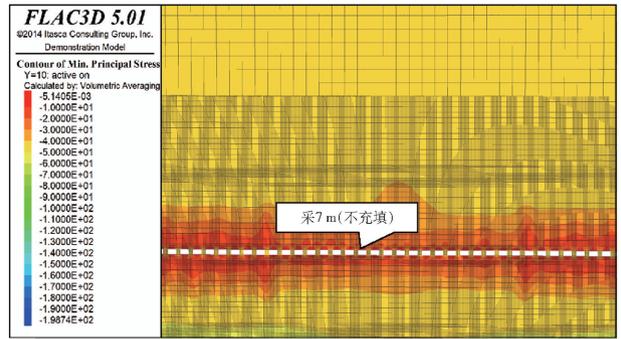


图 19 方案 6 的最大主应力场

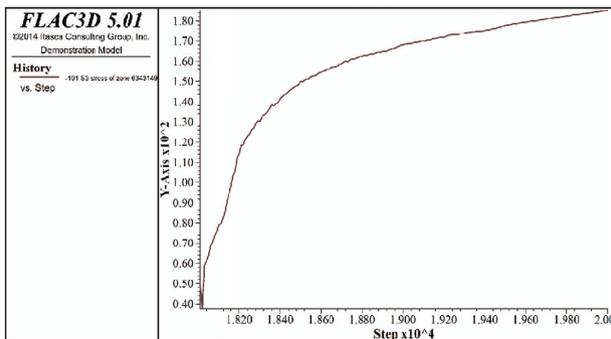


图 17 方案 5 的最大主应力场

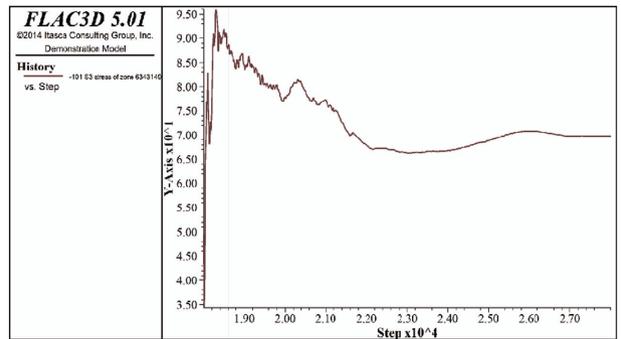


图 20 方案 6 的最大主应力场

(6)方案 6:采 7 m(不充填)、留 3 m 矿柱,开采长度为矿体厚度。

特大型条形矿柱采取卸压开采方案 6 后 A-A 剖面的最大主应力场,具体如图 19 所示。特大型条形矿柱采取卸压开采方案 6 后矿柱的应力变化曲线,具体如图 20 所示。从图中可以看出,3 m 矿柱中的应力先增大至 95 MPa,后减小为 70 MPa,表明 3 m 矿柱发生了屈服破坏。特大型条形矿柱采取卸压开采方案 6 后 A-A 剖面的塑性区分布,具体如图 21 示。从图中可以看出,3 m 矿柱 2 次进入剪切塑性状态;在沿走向矿柱和垂直走向矿柱交叉位置,塑性区相对较少。

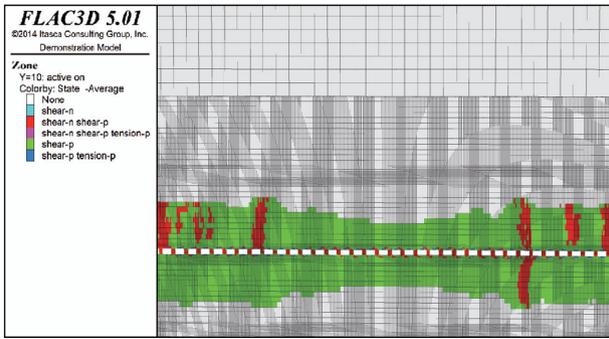


图 21 方案 6 的最大主应力场

### 5 特大型条形矿柱超前卸压工艺

针对特大型条形矿柱,基于模拟研究<sup>[9-12]</sup>发现:水平卸压的方式效果最好;在矿柱走向上,卸压面需要超过回采面 $\geq 120$  m。为了保障矿柱回采的连续性,提出了“先进路法卸压、后中深孔或深孔充填法回采”的盘区矿柱回收方法,卸压和回采工序的有效配合,达到矿柱的安全高效回采,具体如图 22 所示。

具体工序为以下几步。

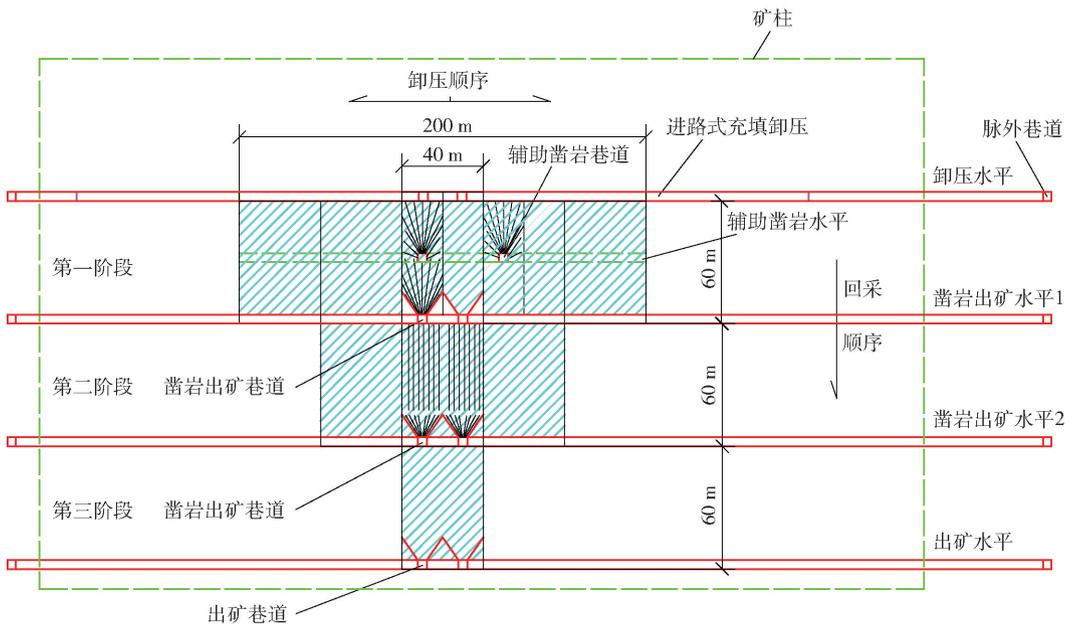


图 22 特大型条形矿柱卸压开采方案

#### 5.1 顶部卸压层形成

顶部卸压层存在两种形成工艺。

##### 1) 采用两侧后退式进路充填法进行卸压

以块为单元进行后退式进路回采,块尺寸为  $20\text{ m} \times 60\text{ m}$ ,每个矿块分三条进路,中间进路尺寸为  $4.5\text{ m} \times 60\text{ m}$ ,两侧进路尺寸为  $7.75\text{ m} \times 60\text{ m}$ ,中间进路在回采盘区矿体时已经形成了  $30\text{ m}$  长。

中间进路采用浅孔凿岩台车进行凿岩,两侧进路采用中深孔凿岩台车进行凿岩,采用 2 号岩石乳化炸药和非电导爆起爆系统。

出矿采用  $3\text{ m}^3$  铲运机进行后退式开采,两侧在盘区内布置出矿巷道,出矿巷道通过联络道与回采矿块连接。每隔  $40\text{ m}$  布置 1 条联络道。矿块可以隔一采一进行回收,可同时进行  $2 \sim 3$  个矿块回收。

充填根据岩石揭露情况,可以按照进路为单元进行充填,若岩石条件稳固可以采用以矿块为单元

进行充填。充填体强度不低于  $2\text{ MPa}$ 。具体布置如图 23 所示。

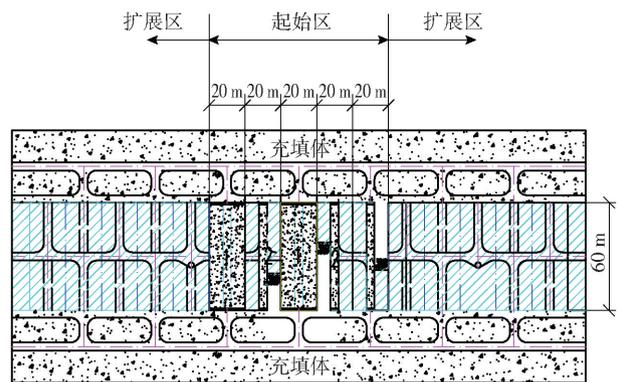


图 23 进路充填法形成卸压层布置

##### 2) 采用进路式房柱法屈服卸压

在矿柱顶部以条形进路式房柱法回采,进路式矿房或进路式矿柱尺寸  $5\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ 。进路式矿房

先采用超前炮孔卸压,炮孔沿进路四周布置,炮孔深度为8 m,孔底0.5 m长度采用炸药起爆,在卸压爆破完成后再采用浅孔凿岩台车进行凿岩,采用2号岩石乳化炸药和非电导爆起爆系统。采用3 m<sup>3</sup>铲运机进行出矿,矿柱外布置出矿联络道和出矿进路巷道。每隔40 m布置1条联络道。进路矿房可以隔一采一布置,同时进行2~3个进路式矿房回采。进路式矿柱作为屈服矿柱不采,进路式矿房不充填。具体布置如图24所示。

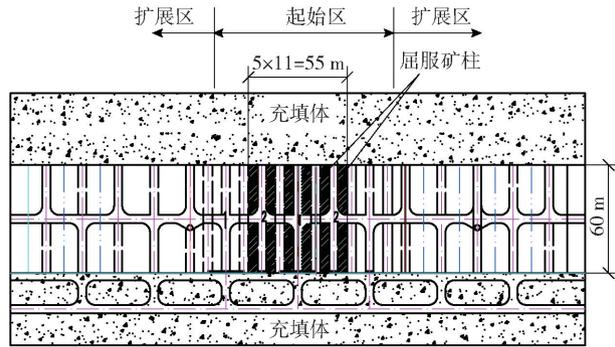


图24 进路式房柱法屈服卸压层布置

### 5.2 第一阶段矿柱回采工艺

由于卸压层形成后,无下向深孔凿岩作业空间,为了对第一阶段进行凿岩,针对第一阶段60 m高的矿柱,在中段之间增加辅助凿岩中段,在辅助凿岩中

段和底部凿岩巷道内布置成上向扇形孔,采用分段中深孔扇形布置的高分段空场嗣后充填法进行回采,回采结束后进行及时全胶结充填。

底部出矿结构布置方案一:在出矿层采用侧向出矿,优先利用原穿脉巷道出矿,利用原溜井进行卸矿,脉外充填体内布置联络道,具体如图25所示。

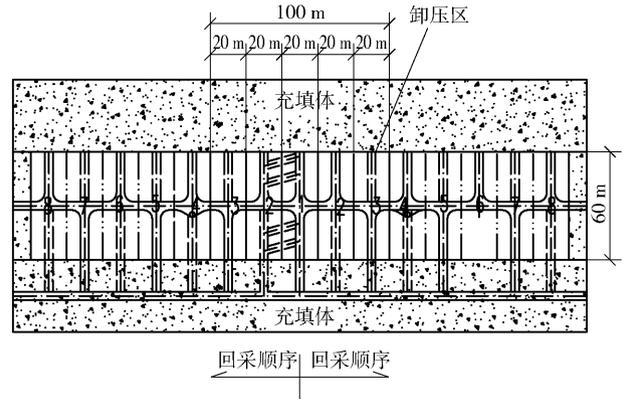


图25 底部出矿结构布置方案一

底部出矿结构布置方案二:充分利用穿脉溜井,以180 m为一组,组内按照回采顺序分为一步采场、二步采场和三步采场,按照顺序先采一步采场,后采二步采场,最后回采三步采场,将有溜井的地方留设20 m矿柱,溜井矿柱待回采结束后,向盘区矿房侧后退式回收,具体如图26和图27所示。

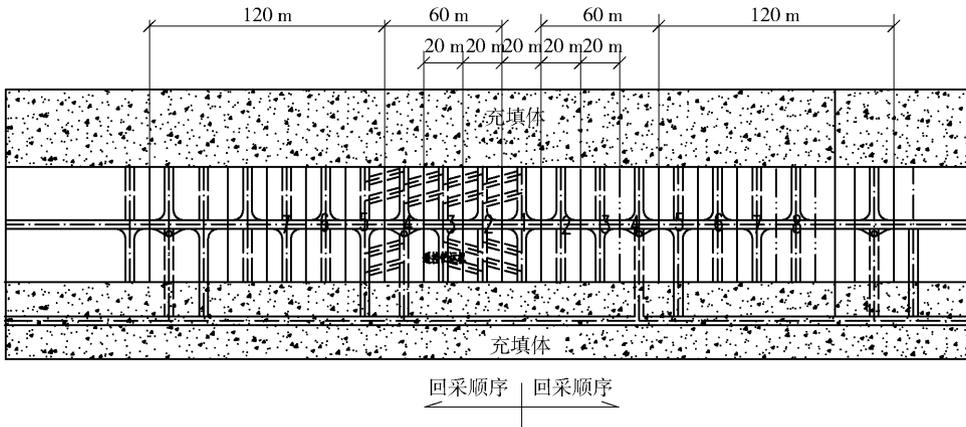


图26 底部出矿结构布置方案二

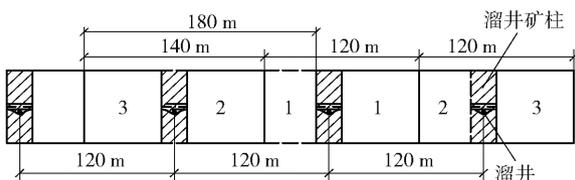


图27 底部出矿结构布置方案二(局部放大)

### 5.3 第二、第三阶段矿柱回采工艺

针对第二或第三阶段60 m高的矿柱,采用大直径深孔阶段空场嗣后充填法进行回采。在上水平出矿巷道、出矿穿脉、出矿进路内布置下向深孔,采用潜孔钻机凿下向平行炮孔,孔径165 mm,孔深44~55 m。采用乳化油炸药和非电导爆起爆系统,由下

而上梯段式分段侧向崩矿。

爆下的矿石用 $4\text{ m}^3$ 铲运机集中在凿岩出矿水平进行出矿,采场回采结束后进行及时全胶结充填。

#### 5.4 矿柱的整体回采顺序

沿矿柱走向由中间向两端进行切顶卸压,垂直方向上由上自下进行矿柱的回收,卸压和回采有效配合,“切顶卸压-第一阶段-第二阶段-第三阶段”依次循环推进。

空间上形成“倒三角”形沿矿柱走向逐步推进,矿柱的回收需要滞后卸压层作业面。

## 6 结论

本文采用数值模拟方法对某深井硬岩矿山特大型条形矿柱的不同卸压方案进行了对比研究,得到以下结论。

(1)采 $5\text{ m}$ (充填)、留 $5\text{ m}$ 矿柱,按 $60\text{ m}$ 长时, $5\text{ m}$ 矿柱中存在较高度度的应力集中,应力值高达 $106\text{ MPa}$ 。与采空区充填时对比发现,采空区不充填时,矿柱中的应力集中程度更高。

(2)采 $6\text{ m}$ (不充填)、留 $4\text{ m}$ 矿柱,按全长时, $4\text{ m}$ 矿柱中存在较高度度的应力集中,应力值高达 $171\text{ MPa}$ 。采 $7\text{ m}$ (不充填)、留 $3\text{ m}$ 矿柱,按 $60\text{ m}$ 长时,开采扰动应力转移至卸压区域( $60\text{ m}$ 范围)的两端, $3\text{ m}$ 矿柱中为低应力状态; $3\text{ m}$ 矿柱中的应力先增大至 $95\text{ MPa}$ ,后减小为 $63\text{ MPa}$ ,表明 $3\text{ m}$ 矿柱发生了屈服破坏。

(3)采 $7\text{ m}$ (充填)、留 $3\text{ m}$ 矿柱,按 $60\text{ m}$ 长时,矿柱中的应力集中程度较高; $3\text{ m}$ 矿柱中的应力高达 $185\text{ MPa}$ ,说明在采空区充填体的作用下, $3\text{ m}$ 矿柱仍能发挥承载作用。

(4)针对特大型条形矿柱,提出了“先进路法卸

压、后中深孔或深孔充填法回采”的盘区矿柱回收方法。

#### [参考文献]

- [1] 于润沧. 现代矿山工程设计理念诠释——献给中国有色工程设计研究总院建院65周年[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(4): 1-3.
- [2] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 北京科技大学学报, 2019, 041(4): 417-426.
- [3] 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.
- [4] 李向东, 周益龙. 深井卸荷开采技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2006(S1): 19-22.
- [5] 杨清波. 深井矿山盘区隔离矿柱回采方案及数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [6] 冯福康. 盘区隔离矿柱开采方案数值模拟优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [7] 刘洪强. 大面积充填体下采场盘区矿柱留设方案优化及地压监测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [8] 许宏亮. 桓仁铅锌矿深部开采隔离矿柱留设方案研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [9] 张爱民, 刘育明, 张少杰. 深井超大面积开采不同卸压方案对比研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(6): 21-25.
- [10] 张少杰, 刘育明, 张爱民. 深井超大面积开采盘区矿柱承载作用研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(6): 7-10.
- [11] 王志凯, 宋文龙. 基于FLAC3D对开采引起地表沉降规律研究[J]. 有色设备, 2022, 36(01): 65-69.
- [12] 朱万成, 董航宇, 刘溪鸽等. 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(04): 5-31.