

# 深井超大面积开采不同卸压方案对比研究

Comparative study on different de-stress schemes for a deep-shaft and ultra-large mine

张爱民, 刘育明, 张少杰(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:**某铁矿为超大规模超深井矿山, 矿体特别厚大, 因而开采面积大, 为保证开采安全, 拟在盘区之间布置大型条形矿柱, 本文采用数值模拟的方法, 对在盘区矿柱的上部、中部和下部卸压、以及在盘区矿柱上部卸压长度分别为 60 m、120 m、180 m 和全长等方案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, 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:** TD323      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0021-05

**Abstract:** An iron mine is a ultra-large scale and ultra-deep one. Its ore body is particularly thick, thus the mining area is large. In order to ensure the safety of mining, it is planned that large strip pillars will be arranged between the panels. In this paper, the numerical simulation method is used for a comparative study on the stress characteristics and plastic zone distribution of different schemes, with de-stress schemes taken at the upper, middle and lower parts of panel pillars, and in de-stress schemes lengths respectively of 60 m, 120 m, 180 m and whole length at the upper part of the panel pillars. The study mainly reveals the load-bearing effects of the different de-stress schemes. Its results can provide reference for de-stress schemes mining under similar mining conditions.

**Key words:** deep-shaft mining; strip pillars; pressure relief 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>[1-4]</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>[5-8]</sup>。本文采用数值模拟方法, 对某深井硬岩矿山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, 同时可为类似开采条件下的深井矿山卸压开采提供借鉴参考。

## 2 工程背景

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, 总体形态似一个巨大的“金元宝”, 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 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, 即矿体的三维模型, 尺寸为 1 600 m × 1 600 m × 1 620 m。-960 m 中段盘区与矿柱的布置, 具体如图 3 所示。1 号矿柱宽 60 m, 2 号矿柱宽 100 m, 3 号矿柱宽 60 m。为了准确获取矿柱中的应力状态, 在矿柱中布置了应力监测点 (A1、B1 和 C1 等)。

### 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

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

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

[作者简介] 张爱民(1984-), 男, 湖北武穴人, 高级工程师, 从事矿山开采咨询与设计工作。

[引用格式] 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.

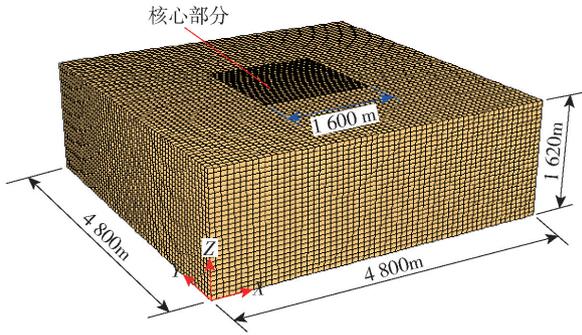


图1 三维数值模型

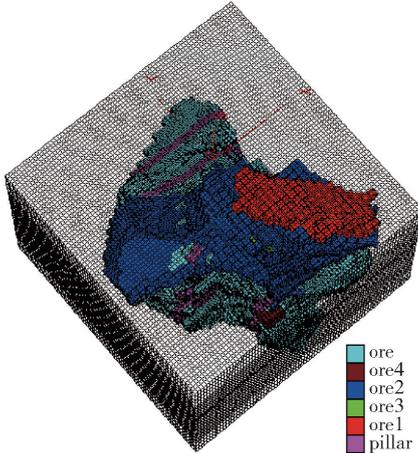


图2 三维模型核心部分

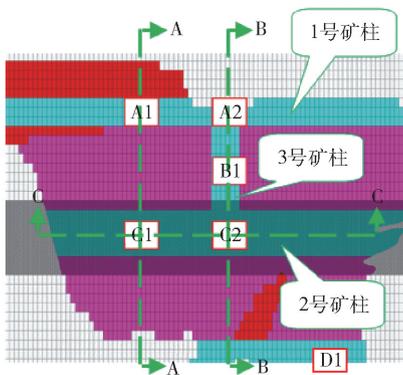


图3 -960 m中段盘区与矿柱的布置平面图

式中: $\sigma_{h,max}$ ——最大水平主应力,为压应力,与矿体走向近似平行,MPa;

$\sigma_{h,min}$ ——最小水平主应力,为压应力,与矿体走向近似垂直,MPa;

$h$ ——垂直深度,m;

$R$ ——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,即

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

式中: $f_s$ ——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;

$\varphi$ ——摩擦角, $^\circ$ ;

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。

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 $c/\text{MPa}$	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

### 3.4 计算模拟过程

为了揭示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)在大型条形矿柱的不同位置进行全长卸压开采,分别为:上部卸压(在-896~-900 m形成卸压层)、中部卸压(在-956~-960 m形成卸压层)、下部卸压(在-1 016~-1 020 m形成卸压层)。

(4)在大型条形矿柱的上部进行卸压开采,卸压开采的长度分别为60 m、120 m、180 m和矿柱全长。

## 4 计算结果分析

### 4.1 -960 m中段开采后的模拟结果

-960 m中段开采后A-A剖面的最大主应力场如图4所示。从图4可以看出,-960 m中段开采后,2号矿柱两侧应力值相对较低,矿柱中部的应力为50~60 MPa,矿柱四个角部的应力集中程度较高,约为108 MPa,矿柱中的应力大体上呈“X”形分

布。-960 m 中段开采后 A-A 剖面的塑性区分布如图 5 所示。从图 5 可以看出, -960 m 中段开采后, A-A 剖面 2 号矿柱两侧较多单元在以前计算循环和当前计算循环均为剪切塑性状态。-960 m 中段开采后 C-C 剖面的最大主应力场和等值线如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出, -960 m 中段开采后, 应力转移至 2 号矿柱的东西两侧, 应力值为 65 ~ 70 MPa, 在 2 号矿柱和 3 号矿柱交叉位置的一定范围内应力值低于 50 MPa, 近似呈“U”形, 上宽 83 m, 深 49 m。

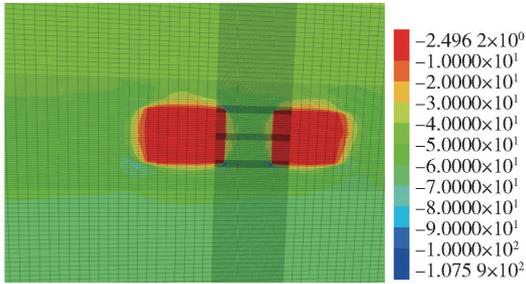


图 4 -960 m 中段开采后 A-A 剖面的最大主应力场

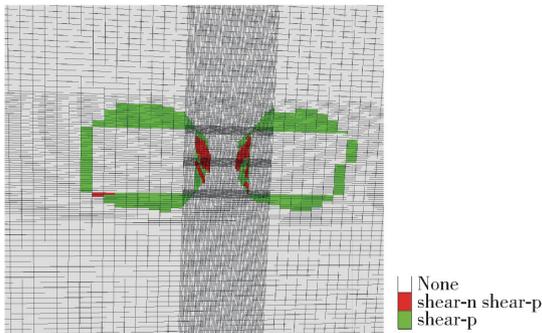


图 5 -960 m 中段开采后 A-A 剖面的塑性区分布

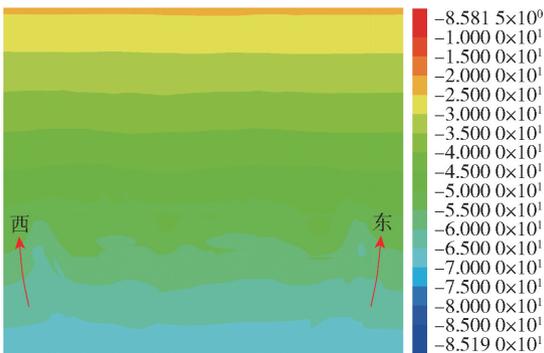


图 6 -960 m 中段开采后 C-C 剖面的最大主应力场

#### 4.2 上部卸压开采后的模拟结果

上部卸压开采后 A-A 剖面的最大主应力场如图 8 所示。从图 8 可以看出, 上部卸压开采后, 2 号矿柱上半部分的应力值有所降低, 降低值最大约为 6 MPa。-960 m 中段开采后 A-A 剖面的塑性区分布如图 9 所示。对比图 9 和图 5 可以看出, 上部卸

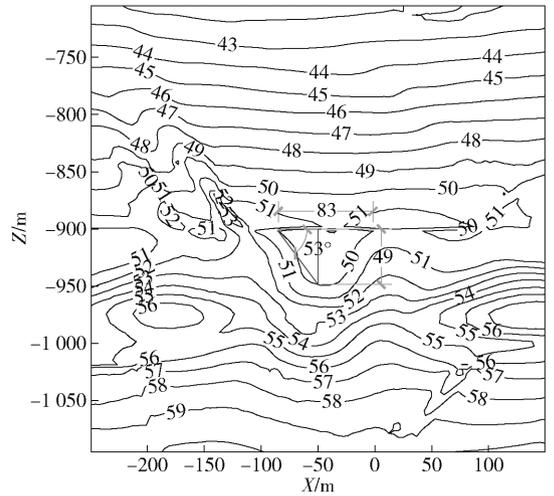


图 7 -960 m 中段开采后 C-C 剖面的应力等值线  
压开采后, A-A 剖面 2 号矿柱两侧在以前计算循环和当前计算循环均为剪切塑性状态的单元数量有所减少。

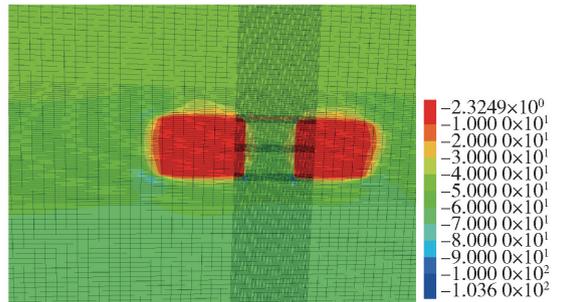


图 8 上部卸压开采后 A-A 剖面的最大主应力场

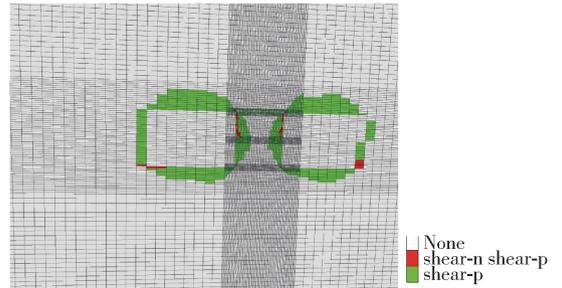


图 9 上部卸压开采后 A-A 剖面的塑性区分布

#### 4.3 中部卸压开采后的模拟结果

中部卸压开采后 A-A 剖面的最大主应力场如图 10 所示。从图 10 可以看出, 中部卸压开采后, 2 号矿柱上半部分和下半部分的应力值均有所降低, 降低值最大约为 6 MPa。中部卸压开采后 A-A 剖面的塑性区分布如图 11 所示。对比图 11 和图 5 可以看出, 中部卸压开采后, A-A 剖面 2 号矿柱两侧在以前计算循环和当前计算循环均为剪切塑性状态的单元数量有所减少。

#### 4.4 下部卸压开采后的模拟结果

下部卸压开采后 A-A 剖面的最大主应力场如

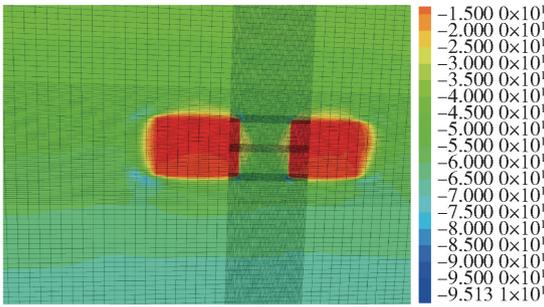


图 10 中部卸压开采后 A-A 剖面的最大主应力场

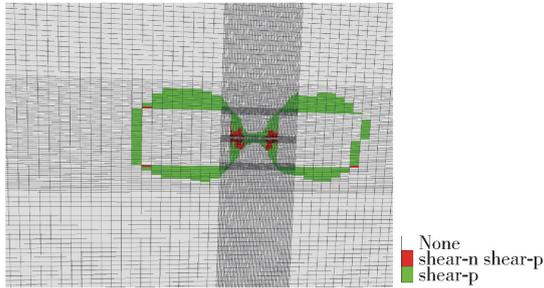


图 11 中部卸压开采后 A-A 剖面的塑性区分布

图 12 所示。从图 12 可以看出,下部卸压开采后,2号矿柱下半部分的应力值均有所降低,降低值最大约为 8 MPa。中部卸压开采后 A-A 剖面的塑性区分布如图 13 所示。对比图 13 和图 5 可以看出,下部卸压开采后,A-A 剖面 2 号矿柱两侧在以前计算循环和当前计算循环均为剪切塑性状态的单元数量有所减少。

将不同开采工况时 2 号矿柱中监测点 C1 在深度方向上 -1 080 ~ -840 m 的单元应力输出,并绘制成应力变化曲线,如图 14 所示。从图 14 可以看出,上部卸压开采主要可降低 -900 ~ -960 m 矿柱中的应力,中部卸压开采主要可降低 -900 ~ -1 020 m 矿柱中的应力,下部卸压开采主要可降低 -960 ~ -1 020 m 矿柱中的应力。从卸压开采的有效影响范围大小来看,中部切顶的卸压效果优于上部切顶和下部切顶的卸压效果。

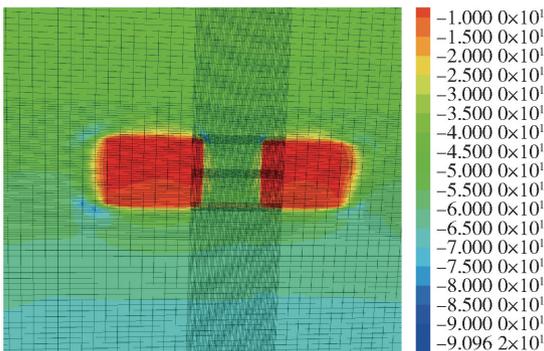


图 12 下部卸压开采后 A-A 剖面的最大主应力场

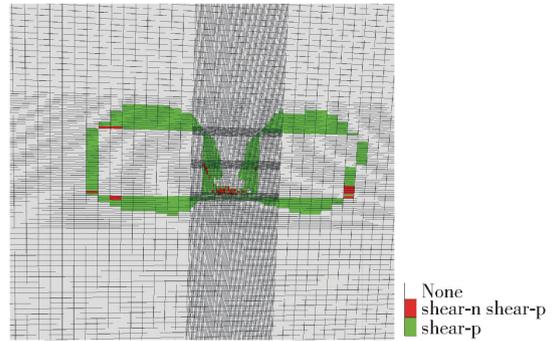


图 13 下部卸压开采后 A-A 剖面的塑性区分布

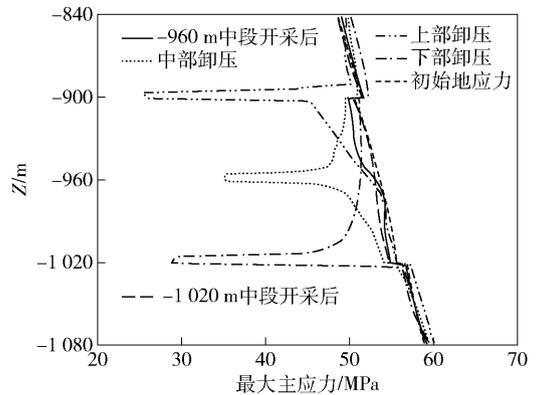


图 14 不同开采工况时矿柱中的应力变化曲线

### 4.5 不同卸压开采长度的模拟结果

上部卸压开采长 60 m 时 C-C 剖面的最大主应力等值线如图 15 所示。上部卸压开采长 120 m 时 C-C 剖面的最大主应力等值线如图 16 所示。上部卸压开采长 180 m 时 C-C 剖面的最大主应力等值线如图 17 所示。上部全长卸压开采时 C-C 剖面的最大主应力等值线如图 18 所示。可以看出,在卸压开采长度为 60 m、120 m 和 180 m 时,在卸压开采区域的两侧应力集中程度较高,应力值约为 105 ~ 108 MPa;卸压区主要位于卸压开采区域的底部。在 -900 m 水平,-960 m 中段开采后的 2 号矿柱中的最大主应力约为 50 MPa,因此,初步将卸压开采引起的 50 MPa 以下的范围定义为卸压区。上部卸压开采长 60 m 时,卸压区的深度为 19 m,卸压区的角度为 32°;上部卸压开采长 120 m 时,卸压区的深度为 63 m,卸压区的角度为 46°;上部卸压开采长 180 m 时,卸压区的深度为 65 m,卸压区的角度为 36°;上部全长卸压开采时,在 2 号矿柱和 3 号矿柱交叉位置处的卸压区的深度为 61 m,在其他位置的卸压区深度约为 44 m。

## 5 结论

本文采用数值模拟方法对某深井硬岩矿山大型条形矿柱的不同卸压方案进行了对比研究,得出以

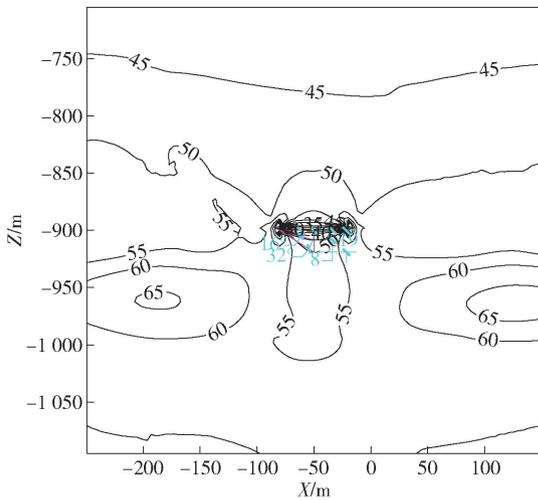


图 15 上部卸压开采长 60 m 时的应力等值线

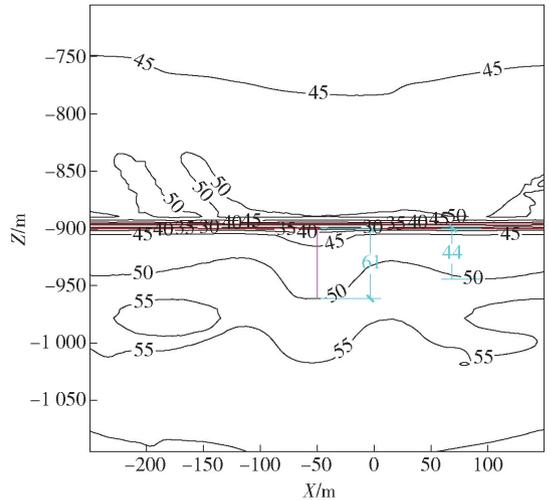


图 18 上部全长卸压开采时的应力等值线

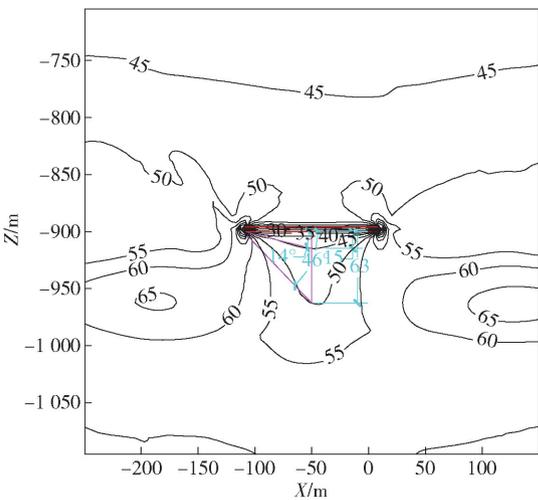


图 16 上部卸压开采长 120 m 时的应力等值线

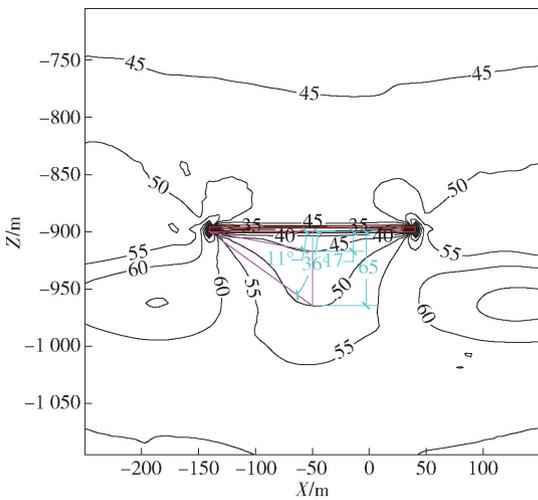


图 17 上部卸压开采长 180 m 时的应力等值线

下结论:

(1) -960 m 中段开采后,2 号矿柱中的应力大体上呈“X”形分布;应力转移至 2 号矿柱的东西两

侧;2 号矿柱和 3 号矿柱交叉位置的一定范围内应力值低于 50 MPa,近似呈“U”形。

(2) 上部卸压开采主要可降低 -900 ~ -960 m 矿柱中的应力,中部卸压开采主要可降低 -900 ~ -1 020 m 矿柱中的应力,下部卸压开采主要可降低 -960 ~ -1 020 m 矿柱中的应力。从卸压开采的有效影响范围大小来看,中部卸压的卸压效果优于上部卸压和下部卸压的卸压效果。

(3) 上部卸压开采长 60 m 时,卸压区的深度为 19 m,卸压区的角度为 32°;上部卸压开采长 120 m 时,卸压区的深度为 63 m,卸压区的角度为 46°;上部卸压开采长 180 m 时,卸压区的深度为 65 m,卸压区的角度为 36°;上部全长卸压开采时,2 号矿柱和 3 号矿柱交叉位置处的卸压区的深度为 61 m,在其他位置的卸压区深度约为 44 m。

[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, 41(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] 刘育明, 马俊生, 郭雷, 等. 国外深井充填法矿山开采技术综述[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(6): 1-6.

[5] 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.

[6] 李俊平, 王红星, 王晓光, 等. 卸压开采研究进展[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 350-358.

[7] 李学锋, 黄海斌, 谢柚生, 等. 深部金属矿山卸压开采研究[J]. 金属矿山, 2018(4): 47-52.

[8] 于世波, 杨小聪, 王志修, 等. 深部高应力矿柱应力隔断帷幕的卸荷效应研究[J]. 金属矿山, 2020(8): 8-12.