

深井超大面积开采盘区矿柱承载作用研究

Study on the load-bearing function of pillars in super large mining panels of deep shafts

张少杰, 刘育明, 张爱民(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, 采用数值模拟的方法对盘区矿柱的应力特征进行了对比研究, 揭示了盘区矿柱的承载作用, 研究结果可为类似开采条件下的矿柱留设提供参考。

关键词:超大规模; 深井开采; 条形矿柱; 承载作用

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0007-04

Abstract: An iron mine is an 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, the numerical simulation method is used for a comparative study on the stress characteristics of the pillars, which mainly reveals the load-bearing function of the pillars in the panel. The results of the study can provide a reference for reserving and arranging pillars under similar mining conditions.

Key words: ultra-large scale; deep-shaft mining; strip pillars; load-bearing function

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^[1-3]。在超大规模深井开采条件下, 常采用留设矿柱的方法来确保矿山生产的安全^[4-6]。本文采用数值模拟方法, 对某深井硬岩矿山盘区矿柱的承载作用进行分析研究, 这对矿山安全高效开采具有十分重要的意义, 同时可为类似深井矿山开采条件下的矿柱留设提供借鉴参考^[7-8]。

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^{3D} 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), 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。-1 020 m 中段盘区与矿柱的布置, 如图 3 所示。盘区宽 200 m, 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。矿柱中应力监测点的布置平面图如图 3 所示。矿柱中应力监测点的布置立面图如图 4 所示, 其中, A1 监测点表示 -1 020 m 中段矿柱中的应力, A1t 监测点表示 -960 m 中段矿柱中的应力, 其他监测点同样表示, 以作区分。

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性回归方程为

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

[引用格式] 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+15.

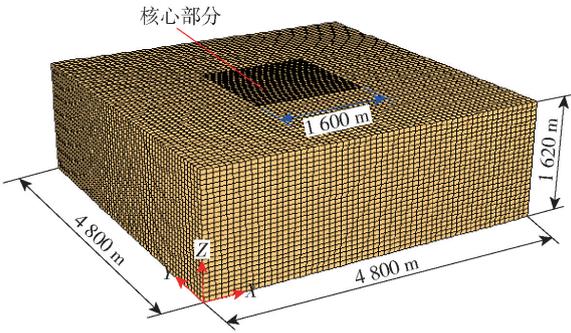


图1 三维数值模型

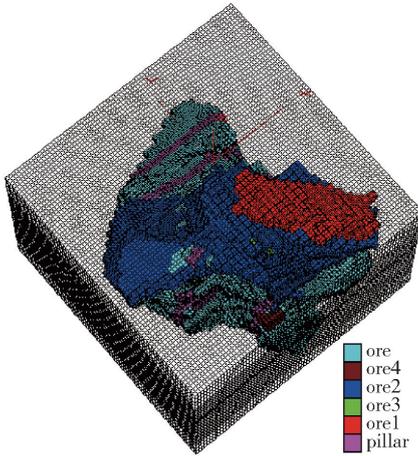


图2 三维模型核心部分

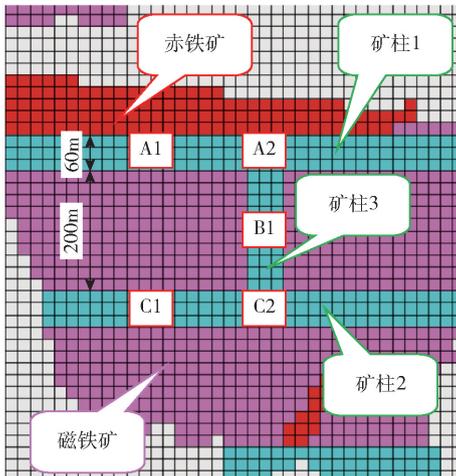


图3 矿柱中应力监测点的布置平面图

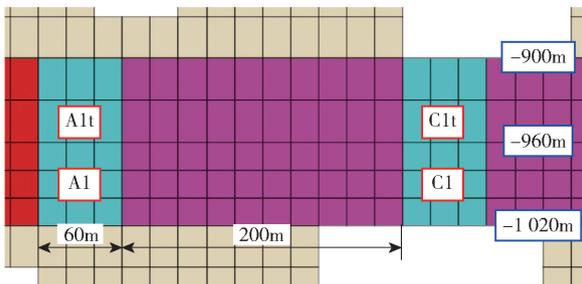


图4 矿柱中应力监测点的布置立面图

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

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

式中： $\sigma_{h,max}$ ——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；

σ_1, σ_3 ——最大和最小主应力，MPa；

c ——内聚力，MPa；

φ ——内摩擦角，MPa。

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 / GPa	泊松比 μ	内聚力 c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
围岩	2870	25	0.19	2.5	41.6
矿体	2990	32	0.16	2.3	45.3
充填体	1680	0.87	0.32	0.76	36.6

3.4 计算模拟过程

为了揭示在超大规模深井开采过程中盘区矿柱所发挥的承载作用，对比分析盘区矿柱是否留设两种工况下采场、矿柱和围岩的应力特征和演化过程，

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) 工况一:不留设矿柱 3。

① 模拟开采 -1 020 m 中段的矿体。

② 模拟开采 -960 m 中段的矿体。

(3) 工况二:留设矿柱 3(宽 60 m)。

① 模拟开采 -1 020 m 中段的矿体。

② 模拟开采 -960 m 中段的矿体。

4 计算结果分析

-1 020 m 中段开采后的最大主应力场(不留设矿柱 3)如图 5 所示。从图中可以看出, -1020 m 中段开采后,矿柱 2 中(监测点 C2)的应力值相对较高, 99 MPa;矿柱 1 中(监测点 A2)的应力值为 68 MPa;充填体中(监测点 B1)的应力值为 9 MPa。-1 020 m 中段开采后的最大主应力场(留设矿柱 3)如图 6 所示。从图中可以看出, -1 020 m 中段开采后,矿柱 2 与矿柱 3 交叉位置(监测点 C2)的应力值为 79 MPa,与不留设矿柱 3 相比,矿柱 2 与矿柱 3 交叉位置的应力降低了 20 MPa;矿柱 1 与矿柱 3 交叉位置(监测点 A2)的应力值为 53 MPa,与不留设矿柱 3 相比,矿柱 1 中(监测点 A2)的应力降低了 15 MPa。

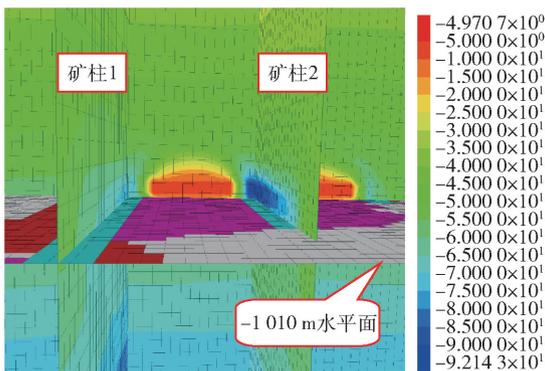


图 5 -1 020 m 中段开采后的最大主应力场
(不留设矿柱 3)

-960 m 中段开采后的最大主应力场(不留设矿柱 3)如图 7 所示。从图中可以看出, -960 m 中段开采后,矿柱 2 中积聚的应力发生了较为明显的转移演化,矿柱 2 中的应力明显降低,在矿柱 2 的西侧端部应力相对较高,形成了由下至上的应力壳,如图 7 中红色虚线箭头所示。-960 m 中段矿柱 2 中(监测点 C2t)的应力值为 72 MPa;矿柱 1 中(监测点 A2t)的应力值为 70 MPa。-960 m 中段开采后的最

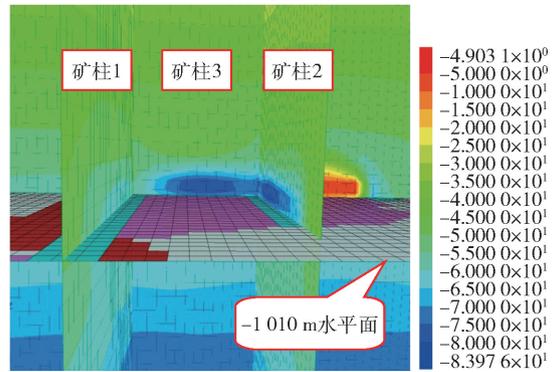


图 6 -1 020 m 中段开采后的最大主应力场(留设矿柱 3)

大主应力场(留设矿柱 3)如图 8 所示。从图中可以看出, -960 m 中段开采后,矿柱 2 与矿柱 3 交叉位置(监测点 C2t)的应力值为 86 MPa,与不留设矿柱 3 相比,应力值增加了 14 MPa;矿柱 1 与矿柱 3 交叉位置(监测点 A2t)的应力值为 58 MPa,与不留设矿柱 3 相比,应力值降低了 12 MPa。

通过对监测点 C2 和 C2t、C1 和 C1t 的应力输出后对比发现,在监测点 C2 的应力由 99 MPa 降低为 70 MPa 的同期,监测点 C2t 的应力由 72 MPa 增加为 86 MPa,增加值为 14 MPa,说明在留设矿柱 3 工况下,对于矿柱 2 来讲, -1 020 m 中段的矿柱承载作用降低的情况下, -960 m 中段的矿柱仍能发挥承载作用。

通过对监测点 C2、B1、A2t 的应力输出后对比发现,不留设矿柱 3 时,在 -1 020 m 中段开采后,矿柱 2 中(监测点 C2)的应力高达 99 MPa;留设矿柱 3 时,在 -1 020 m 中段开采后,矿柱 2 中(监测点 C2)的应力为 79 MPa,矿柱 3 中(监测点 B1)的应力为 87 MPa,说明留设矿柱 3 能够减小矿柱 2 中的应力集中程度,使开采扰动压力的分布相比更为均衡。不留设矿柱 3 时,在 -960 m 中段开采后,矿柱 1 中(监测点 A2t)的应力由 57 MPa 增加至 70 MPa,增加值为 13 MPa;留设矿柱 3 时,在 -960 m 中段开采后,矿柱 1 中(监测点 A2t)的应力由 52 MPa 增加至 58 MPa,增加值为 6 MPa,说明留设矿柱 3 也能够减小矿柱 1 中的应力集中程度。

-1 020 m 中段开采后的塑性区分布(不留设矿柱 3)如图 9 所示。从图中可以看出, -1 020 m 中段开采后,矿柱 2 中部分单元进入剪切塑性状态;矿柱 1 中未见有单元进入剪切塑性状态。-1 020 m 中段开采后的塑性区分布(留设矿柱 3)如图 10 所示。通过图 9 和图 10 的对比可以看出,与不留设矿

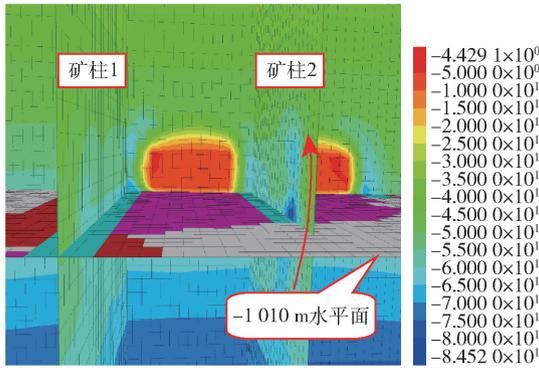


图7 -960 m中段开采后的最大主应力场(不留设矿柱3)

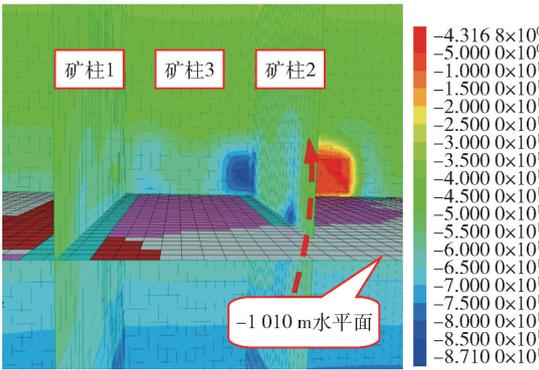


图8 -960 m中段开采后的最大主应力场(留设矿柱3)

柱3相比,矿柱1和矿柱2中的塑性区并无明显区别。

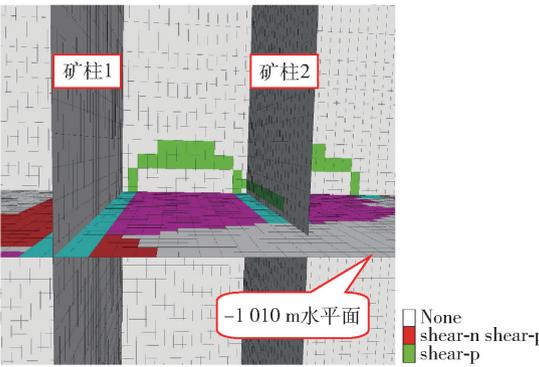


图9 -1020 m中段开采后的塑性区分布(不留设矿柱3)

-960 m中段开采后的塑性区分布(不留设矿柱3)如图11所示。从图中可以看出,-960 m中段开采后,矿柱2中部分单元两次进入剪切塑性状态;矿柱1中个别单元进入剪切塑性状态。-960 m中段开采后的塑性区分布(留设矿柱3)如图12所示。通过图11和图12的对比可以看出,与留不设矿柱3相比,矿柱2中两次进入剪切塑性区状态的单元数有所减小。

综上所述,通过对不留设矿柱3和留设矿柱3两种工况开采效应的对比可知,不留设矿柱3工况

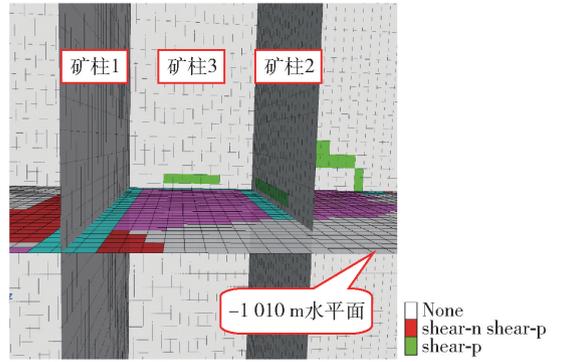


图10 -1020 m中段开采后的塑性区分布(留设矿柱3) 下矿柱的应力集中程度相对较高,应力变化幅度也相对较大,而留设矿柱3工况下,矿柱中的应力集中程度相对较低,开采扰动压力的分布相对更为均衡。

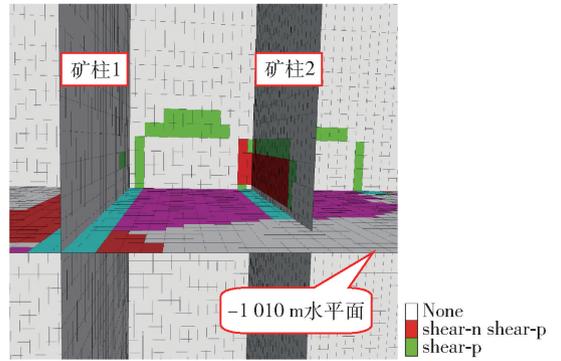


图11 -960 m中段开采后的塑性区分布(不留设矿柱3)

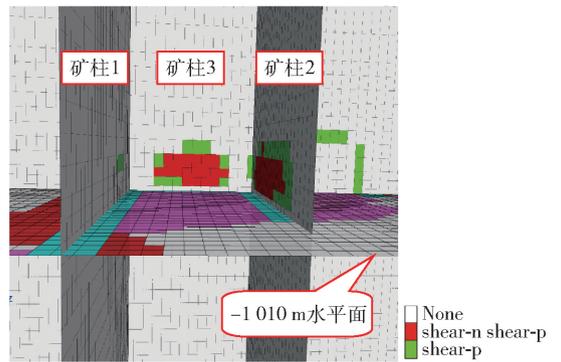


图12 -960 m中段开采后的塑性区分布(留设矿柱3)

5 结论

本文采用数值模拟方法对某超大规模深井硬岩矿山盘区矿柱的承载作用进行分析研究,得出以下结论:

- (1)不留设矿柱3工况下,-1020 m中段开采后,矿柱2中的应力值高达99 MPa;留设矿柱3工况下,-1020 m中段开采后,矿柱2与矿柱3交叉位置的应力值为79 MPa,相比降低了20 MPa。

(下转第15页)