

企业专栏

# 深井矿山下向水平分层充填开采与水平矿柱应力演化研究

Research on the downward horizontal layered cut-and-fill mining of deep mine and the stress evolution of horizontal pillar

吴昊燕<sup>1</sup>, 刘育明<sup>1</sup>, 寇永渊<sup>2</sup>, 王志远<sup>1</sup>, 张爱民<sup>1</sup>, 张少杰<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 金川集团二矿区, 甘肃 金昌 737100)

**摘要:**本文以金川二矿为研究对象,模拟了矿区大面积无间柱连续机械化下向水平分层充填采矿过程,重点对水平矿柱在回采过程中的应力演化规律进行了分析。结果表明,在多水平回采过程中,随着水平矿柱厚度的不断减小,矿柱应力大幅降低而非集中。采区周围存在卸压影响区和应力集中区。研究结果可供深井矿山卸压开采借鉴参考。

**关键词:**深井矿山; 水平矿柱; 应力演化

**中图分类号:** TD862      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0001-06

**Abstract:** This research simulated the large-scale pillarless continuous mechanized downward layered horizontal cut-and-fill mining process in Jinchuan Nickel 2# Mine and stress evolution analysis of the horizontal pillar during mining was focused. Results show that the stress is decreasing significantly as the horizontal pillar goes thinner in the multi-level mining process. There are both stress-releasing and stress concentration areas nearby the mining area. The result can be a good reference for the stress-releasing mining in deep mine.

**Key words:** deep mining; horizontal pillars; stress evolution

## 1 前言

随着人类对资源的不断需求,深井矿山的开采成为必然面对的挑战。然而深部矿产资源的开采难度不容小觑,其中,深井矿山“三高一扰动”的高地压问题一直是岩石力学专家聚焦的热点研究问题<sup>[1]</sup>。

## 2 卸压开采

高地压引发的岩爆、巷道大变形、采场垮塌等问题严重影响矿产开采的正常运行。针对此问题,众多专家学者<sup>[2-4]</sup>提出了不同的卸压方法,有限元数值计算方法也逐渐成为卸压模拟研究的重要手段<sup>[5-7]</sup>。所谓的卸压,即为保证矿山深部顺利开采或深部巷道掘进,通过应力转移原理,将局部高地应

力通过一定的卸压措施转移至四周或深部围岩,改善岩体应力分布状态,降低开挖区应力。较为常见的卸压方法有钻孔卸压、水力卸压、爆破卸压、卸压槽/巷道卸压等。冀国飞<sup>[8]</sup>用水力压裂切顶卸压技术对工作面顶板岩体进行预裂卸压,巷道围岩变形得到了有效的控制,保证了回采工作面的安全。于世波等<sup>[9]</sup>以会泽铅锌矿为背景,基于应力隔断帷幕的底柱采场卸荷,使应力集中远离目标开采区域,从而实现了目标开采区域的“卸荷”,应力隔断帷幕的实施大幅度降低了底柱的岩爆应力风险指标。于世波等<sup>[10]</sup>通过深部区域采矿时序的地压调控,即通过调整回采时序来实现开采作业区域附近岩体的效卸荷。

## 3 金川二矿区回采模拟研究

### 3.1 工程背景

金川镍矿是世界著名的多金属共生的大型硫化铜镍矿床之一,发现于1958年,集中分布在龙首山下长6.5 km、宽500 m的范围内,具体如图1所示,金川矿床以东西走向分别为IV、II、I、III矿区。其

[作者简介] 吴昊燕(1990-),女,博士后,工程师,主要从事矿山岩石力学研究工作。

[引用格式] 吴昊燕,刘育明,寇永渊,等. 深井矿山下向水平分层充填开采与水平矿柱应力演化研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(6): 1-6.

中Ⅱ矿区最大的主产矿山,二矿区中1号(富矿为主)、2号(贫矿为主)矿体占储量的99.31%。1号矿体为矿区最大矿体,占镍金属量全矿区总资源储量的56.8%,分布于Ⅰ矿区4行至Ⅱ矿区29行间的岩体深部,全长1844m。矿体形态较规则,呈“似层状”产出,产状与下部岩体基本一致,倾向南西,倾角 $25^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。1号矿体长约1600m,厚10~200m,以富矿为主。2号矿体长约1300m,平均厚度118m,以贫矿为主。

金川矿区由于地质历史时期受过多次构造运动影响,断裂、节理、裂隙十分发育,加之本区现今仍处

于构造活动期,这就为地面和地下工程的稳定带来极为不利的影 响。金川镍矿的岩石力学问题突出,几十年来一直受到国内外学者专家的关注。尤其进入深部开采后,随着深部地应力的增加,矿山地质条件复杂化进一步加剧,构造发育,矿岩破碎,巷道围岩碎胀蠕变明显,岩体整体性、稳定性极差,深部巷道和采场失稳问题愈加严重,巷道变形如图2所示。通过长达近10年的采矿方法探索与试验研究,二矿区最终选择了大面积无间柱连续机械化下向水平分层充填采矿方法。当前开拓系统最深至650m水平,最大采深826m水平。

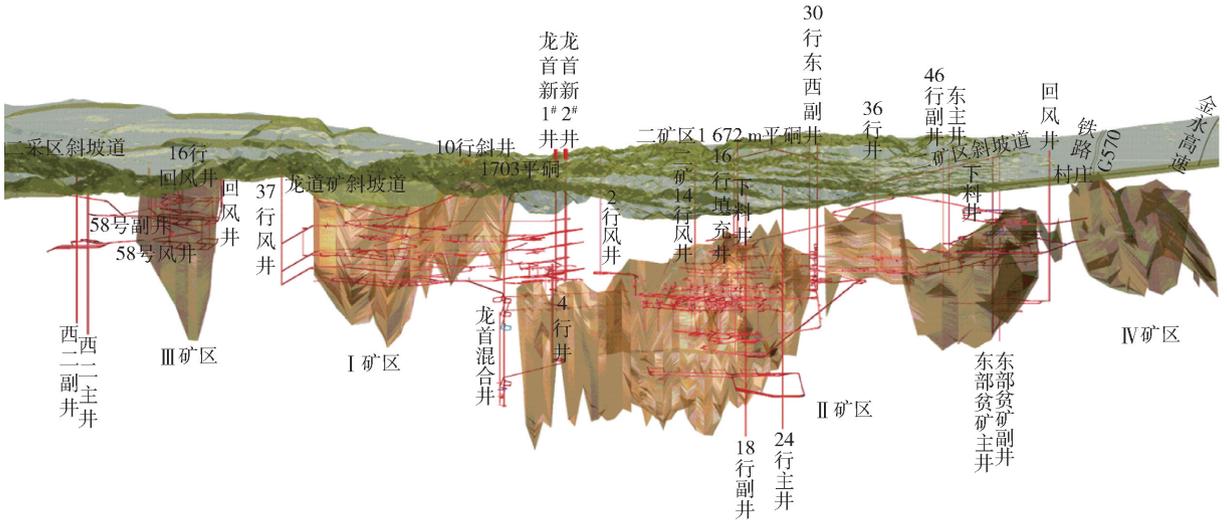


图1 金川各矿区划分



图2 金川二矿区巷道变形实例

m,垂直方向z轴2000m,共生成约160万个网格单元。模型情况如图3所示。其中,绿色表示围岩,黄色表示超基性岩,蓝色表示贫矿,粉红色表示富矿。

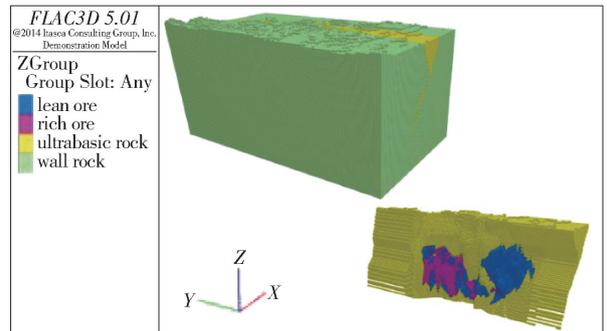


图3 金川二矿区数值模型

### 3.2 金川二矿数值模型

将二矿区地质模型导入FLAC<sup>3D</sup>,并划分上盘围岩、下盘围岩、超基性岩、贫矿、富矿分组。模型尺寸为矿体倾向方向x轴2000m,沿矿体走向y轴3600

综合现有研究报告,富矿、贫矿、围岩、充填体岩石力学参数取值见表1。

根据金川矿区最近研究成果,二矿区最大主应力为水平构造应力,最大主应力方向为北北东向,与

表1 模型矿岩体力学参数表

岩石	密度/ g·cm <sup>-3</sup>	单轴抗拉 强度/MPa	内聚力/ MPa	摩擦角/ (°)	弹性模 量/GPa	泊松 比
富矿	3.05	0.5	4.6	41	8.6	0.31
贫矿	3.02	0.5	5.2	42	8.8	0.22
围岩	2.86	1.4	6.5	35	11.9	0.32
超基岩	2.93	0.8	6.8	38	9.17	0.30
充填体	1.72	0.8	0.95	38	0.9	0.32

矿体走向垂直。模型内部施加阶梯地应力,地应力水平随着埋深增加而增大,矿区地应力计算公式为

$$\sigma_1 = 3 + 0.045H \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 3 + 0.027H \quad (2)$$

$$\sigma_3 = 0.077 + 0.024H \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ ——最大主应力,与矿体走向垂直,MPa;

$\sigma_2$ ——最小水平主应力,与矿体走向一致,MPa;

$\sigma_3$ ——竖直方向主应力,MPa;

$H$ ——埋深,为从地表至某一点的高程差,m。

初始应力模拟如图4、5、6所示。对比金川矿区历史上三次地应力测量结果,数值模拟结果较为准确。

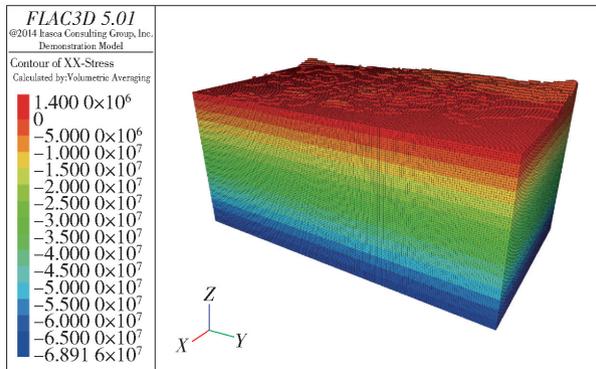


图4 初始应力 x

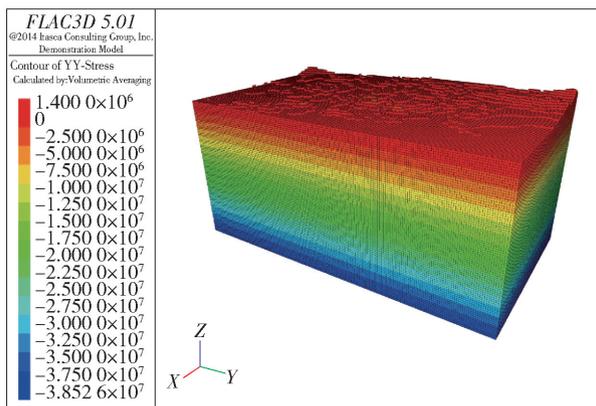


图5 初始应力 y

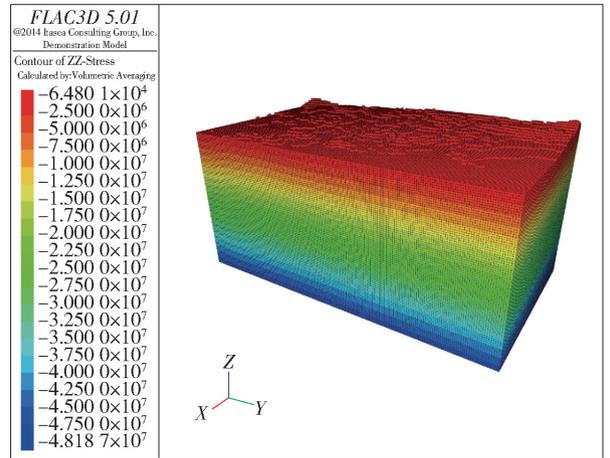


图6 初始应力 z

### 3.3 金川二矿区采充顺序

本次研究的主要目的是探讨850 m中段以下开采水平矿柱的应力演化和稳定性分析。根据矿区的开采实际,将850 m中段以上简化采充模拟,每50 m一回采并充填。850 m中段以下细化模拟,每10 m一开采充填。为模拟不同厚度水平矿柱的稳定性和应力演化,仅对富矿体考虑开挖和充填。具体采充模拟顺序设计见表2。

表2 金川二矿区采充模拟顺序表

步骤	开采	充填
0	初始平衡	
1	1 350 ~ 1 300 m 水平	
2	1 300 ~ 1 250 m 水平	1 350 ~ 1 300 m 水平
3	1 250 ~ 1 200 m / 1 150 ~ 1 100 m 水平	1 300 ~ 1 250 m 水平
4	1 200 ~ 1 150 m / 1 100 ~ 1 050 m / 1 000 ~ 950 m 水平	1 250 ~ 1 200 m / 1 150 ~ 1 100 m 水平
5	1 050 ~ 1 000 m / 950 ~ 900 m 水平	1 200 ~ 1 150 m / 1 100 ~ 1 050 m / 1 000 ~ 950 m 水平
6	900 ~ 850 m 水平	1 050 ~ 1 000 m / 950 ~ 900 m 水平
7	850 ~ 840 m / 790 ~ 780 m 水平	900 ~ 850 m 水平
8	840 ~ 830 m / 780 ~ 770 m 水平	850 ~ 840 m / 790 ~ 780 m 水平
9	830 ~ 820 m / 770 ~ 760 m 水平	840 ~ 830 m / 780 ~ 770 m 水平
10	820 ~ 810 m / 700 ~ 690 m 水平	830 ~ 820 m / 770 ~ 760 m 水平
11	810 ~ 800 m / 690 ~ 680 m 水平	820 ~ 810 m / 700 ~ 690 m 水平

## 4 模拟结果分析

### 4.1 不同厚度水平矿柱的最大主应力演化

如图7所示,当采充至850 m水平时,最大主应力云图显示850 m水平以下出现较大范围的应力集

中区,该应力集中区分布于814 m水平运输巷道周围,模拟结果与现场814 m水平巷道破坏变形严重较为吻合。在未采取任何卸压措施的情况下,对850~840 m水平和790~780 m水平的矿体同时进行开采。结果如图8所示,此时矿柱厚50 m,模型整体应力进行重新分布调整。814 m水平运输系统附近应力得到大范围减小,中间矿柱部分形成贯通的应力降区域,存在个别应力集中较大的区域。

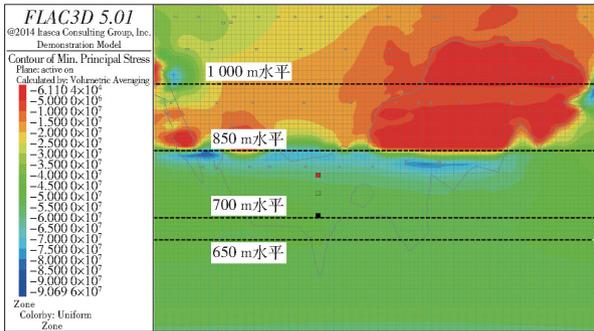


图7 采充至850 m水平最大主应力

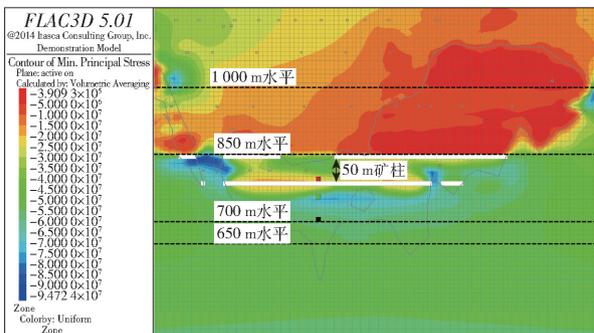


图8 矿柱50 m厚最大主应力

对840~830 m水平和780~770 m水平矿体进行开采,卸压范围进一步增大。如图9所示,此时水平矿柱厚40 m,矿柱卸压贯通区面积增大。如图10所示,对830~820 m水平和770~760 m水平矿体进行开采,30 m厚的矿柱附近卸压区几乎完全贯通。如图11所示,继续开采820~810 m水平和700~690 m水平矿体,此时上部水平矿柱厚20 m,卸压较为全面。下部760~700 m水平之间矿柱厚60 m,且出现新的卸压区贯通。如图12所示,继续开采810~800 m水平和690~680 m水平矿体,上部水平矿柱厚10 m,已形成完全卸压状态。下部矿柱50 m厚,700 m中段以上卸压贯通范围增大,应力集中区域减小。应力集中最为严重的区域处于开采不连续区,如左侧50 m宽区域。此应力集中问题在实际开采过程中可以通过合理规划纳入开采范围从而形成连续卸压开采解决。

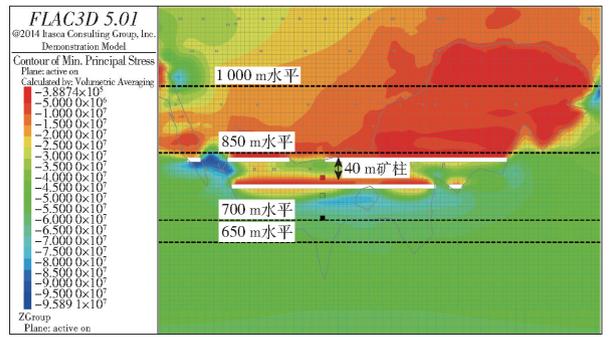


图9 矿柱40 m厚最大主应力

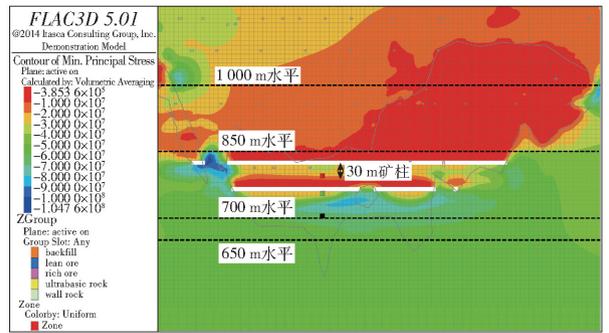


图10 矿柱30 m厚最大主应力

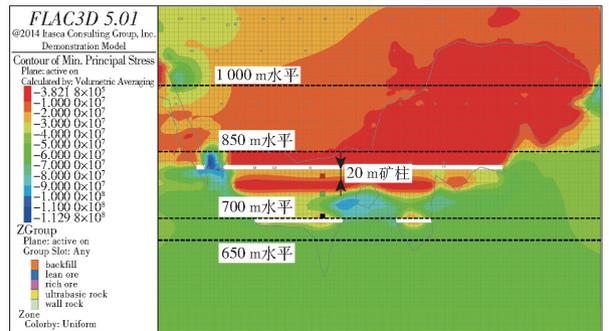


图11 矿柱20 m厚最大主应力

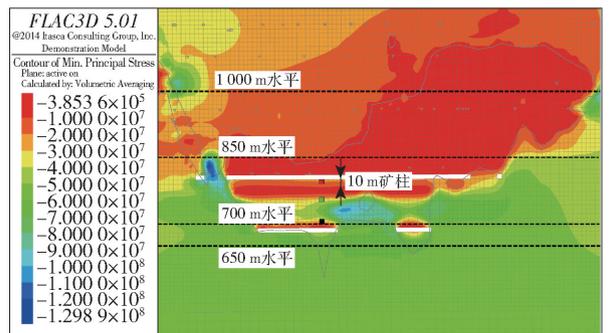


图12 矿柱10 m厚最大主应力

### 4.2 不同水平监测点最大主应力变化

分别在790 m水平、750 m水平和700 m水平设置三个应力监测区,如下图红色、绿色、黑色方块所示,相应最大主应力曲线如红色、绿色、黑色曲线。图中蓝色为贫矿,黄色为超基性岩,粉色为富矿,橙

色为充填体,淡绿色为围岩。

如图 13 所示,当采充至 850 m 水平时,应力得到重新分布和调整,三个应力监测点最大主应力均有所增加。其中红色曲线显示 790 m 水平监测点应力从最初 40.4 MPa 增加至约 58 MPa,绿色曲线显示 750 m 水平监测点应力从最初约 42 MPa 增加至约 52 MPa;黑色曲线显示 700 m 水平监测点应力从最初 44 MPa 增加至约 50 MPa。

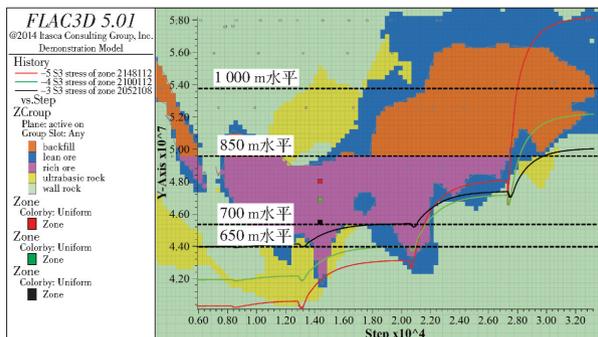


图 13 采充至 850 m 水平

如图 14 所示,对 850 ~ 840 m 水平和 790 ~ 780 m 水平矿体进行开采,其中红色曲线显示 790 m 水平监测点应力从最初 58 MPa 骤降至约 21 MPa,卸压效果极其显著。绿色曲线显示 750 m 水平监测点应力从 52 MPa 持续增加至约 75 MPa;黑色曲线显示 700 m 水平监测点应力从 50 MPa 增加至约 57 MPa。

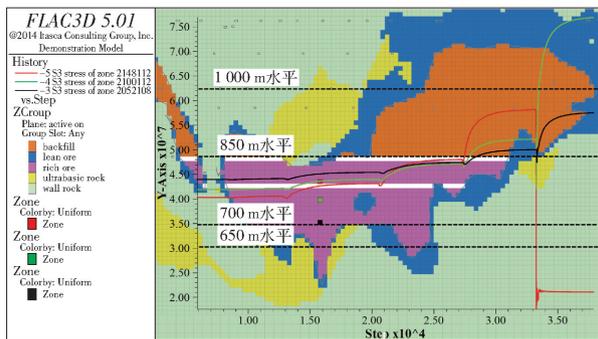


图 14 开采 850 ~ 840 m/790 ~ 780 m 水平

如图 15 所示,对 840 ~ 830 m 水平和 780 ~ 770 m 水平矿体进行开采,其中红色曲线显示 790 m 水平监测点应力从 21 MPa 略有增长至 22 MPa,绿色曲线显示 750 m 水平监测点应力从 75 MPa 降至约 40 MPa,稍小于最初应力状态;黑色曲线显示 700 m 水平监测点应力从 57 MPa 增加至约 61 MPa。

如图 16 所示,对 830 ~ 820 m 水平和 770 ~ 760 m 水平矿体进行开采,其中红色曲线显示 790 m 水平监测点应力从 22 MPa 略有增长至 23 MPa,绿色

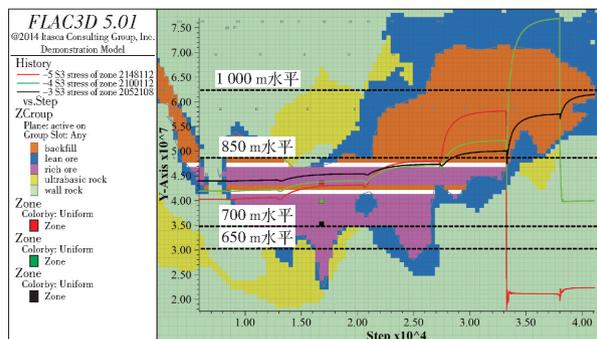


图 15 开采 840 ~ 830 m/780 ~ 770 m 水平

曲线显示 750 m 水平监测点应力从 40 MPa 继续降至约 23 MPa,远小于最初应力状态;黑色曲线显示 700 m 水平监测点应力从 61 MPa 增加至约 67 MPa。

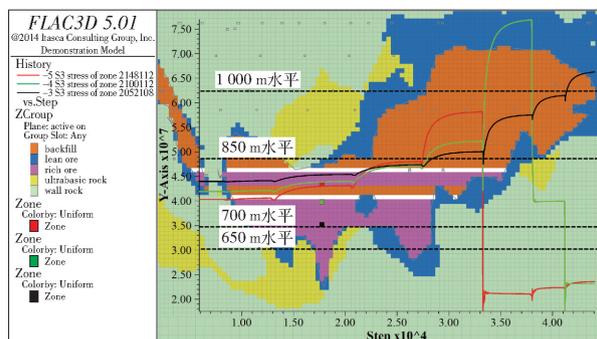


图 16 开采 830 ~ 820 m/770 ~ 760 m 水平

如图 17 所示,对 820 ~ 810 m 水平和 690 ~ 680 m 水平矿体进行开采,其中红色曲线显示 790 m 水平监测点应力从 23 MPa 升至约 30 MPa,绿色曲线显示 750 m 水平监测点应力从 23 MPa 升至约 35 MPa;黑色曲线显示 700 m 水平监测点应力从 67 MPa 骤降至约 26 MPa。如图 18 所示,对 810 ~ 800 m 水平和 680 ~ 670 m 水平矿体进行开采,其中红色曲线显示 790 m 水平监测点应力从 30 MPa 降至约 25 MPa,绿色曲线显示 750 m 水平监测点应力略有升高;黑色曲线显示 700 m 水平监测点应力略有升高。

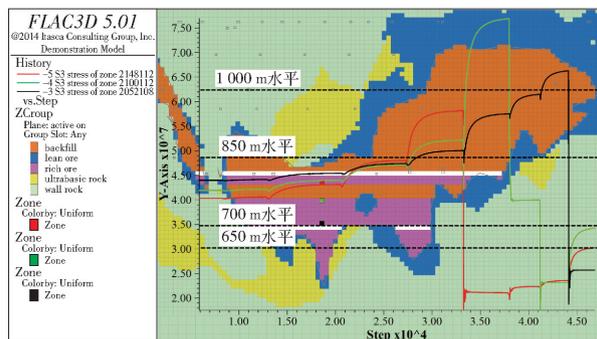


图 17 开采 820 ~ 810 m/690 ~ 680 m 水平

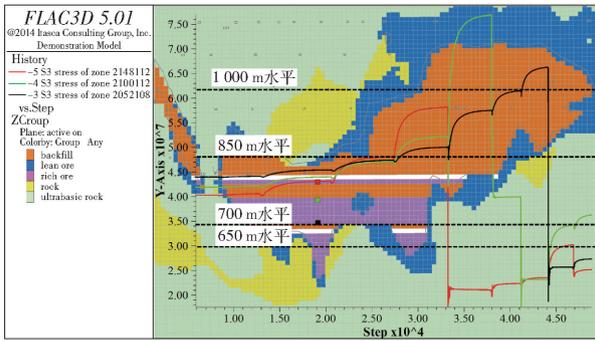


图 18 开采 810 ~ 800 m/680 ~ 670 m 水平

### 4.3 卸压影响范围讨论

纵观图 7 ~ 12, 采用下向充填开采时, 开采水平上下 1 ~ 2 倍采高范围内会形成局部卸压区, 卸压区下部形成应力集中区。多水平同时开采时, 两水平之间的应力集中区通过应力重分布成为卸压区, 水平矿柱随厚度的减小应力逐渐降低。

本次模拟矿体开采严格按照富矿几何形态边界开采, 因此存在大量同水平间断开采, 未采区易发生较大应力集中。因此开采设计时应尽可能保持同水平大范围连续开采。

纵观图 13 ~ 18, 采用下向充填开采时, 卸压范围下部应力会升高, 距离采场越近, 应力重分布影响越大, 应力升高越大。随着开采的进行, 卸压影响范围内的应力将骤降, 最高可降至初始应力的一半。但是多水平开采时随着应力重新分布的调整, 会出现应力集中区与卸压影响区叠加, 因此出现应力骤降后再升高。因此通过合理设计多水平同时开采, 可以避免应力集中区与卸压区的叠加, 保证采场和开拓系统尽可能处于卸压影响范围内。

## 5 结论

(1) 本文的初步模拟研究表明, 金川二矿区采用的大面积无间柱连续机械化下向水平分层充填采矿方法属于卸压开采设计。

(2) 模拟结果显示, 模拟 10 m 采高时, 开采水平上下 1 ~ 2 倍采高范围内 (即 10 ~ 20 m) 为卸压

区, 卸压区以下部为应力集中区, 距离开采水平越远, 应力集中的影响越小。

(3) 多中段开采时的水平矿柱应力随矿柱厚度减小而逐渐减小。开采水平不连续时在间断区易出现较大应力集中。

在实际生产过程中, 可以借助模拟研究结果, 结合开拓系统位置, 合理设计多水平同时开采, 力求将重要采场和巷道处于卸压影响范围内, 减少处于应力集中区的时间。为达到良好的卸压效果, 必要时应尽可能保证同水平连续开采, 避免出现较大应力集中。

### 【参考文献】

- [1] Pathegama, Ranjith G, Jian Zhao, et al. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review [J]. Engineering, 2017, 3(4): 546 - 551.
- [2] 王永才, 康红普. 金川矿山深井高应力开采潜在的问题与关键技术研究 [J]. 中国矿业, 2010, 19(12): 52 - 55.
- [3] 郭树林, 姚香, 严鹏, 等. 中国深井岩爆研究现状评述 [J]. 黄金, 2009, 30(1): 18 - 21.
- [4] 周东良, 刘玉桥, 李占奎, 等. 深部金属矿山卸压开采采室设计及模拟效果分析 [J]. 黄金, 2018, 39(4): 27 - 30, 47.
- [5] 田莉梅, 张英, 张景华. 深部开采高地应力区钻孔卸压数值模拟及应用 [J]. 金属矿山, 2017(4): 31 - 35.
- [6] 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.
- [7] 张兆民. 大直径钻孔卸压机理及其合理参数研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [8] 冀国飞. 坚硬顶板工作面水力压裂切顶卸压技术研究 [J]. 山西能源学院学报, 2021, 34(1): 14 - 15.
- [9] 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.
- [10] 于世波, 杨小聪, 原野, 等. 深部区域采矿时序的地质调控卸荷效应研究 [J]. 黄金科学技术, 2020, 28(3): 345 - 352.