

# 破碎矿体回采顺序的应力隔离效应研究

蔡小迪<sup>1</sup>, 史秀志<sup>1\*</sup>, 王衍海<sup>2</sup>, 黄仁东<sup>1</sup>, 欧阳剑<sup>1</sup>, 王文洋<sup>2</sup>

1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;  
2. 深圳市中金岭南有色金属股份有限公司凡口铅锌矿, 广东 韶关 512325



**摘要:**在破碎矿体回采过程中, 构建应力隔离措施是保证回采安全性的重要手段。为探究某矿山破碎矿体回采过程中充填体应力隔离效应的演化规律, 采用FLAC<sup>3D</sup>三维数值模拟软件构建数值模型并分别对3种采场布置方式进行模拟研究。对4种回采方案分别进行模拟, 得到方案c(中间向两侧连续回采方式)产生的累计塑性区体积最小(51 782.8 m<sup>3</sup>), 具有最好的顶板位移控制优势(最大位移为5.91 cm), 且应力分布状态最佳, 最终推荐该方案作为该矿山破碎矿体小型深孔爆破空场嗣后充填采矿法的最佳回采顺序。分别对垂直和水平两排采场的回采进行模拟, 发现充填体顶板垂直位移均值比矿石顶板减少了0.86 cm, 充填体边帮最大水平位移和最大拉应力比矿石边帮分别减少了5.14 cm和0.66 MPa, 对比分析得出按照方案c进行矿体回采时, 在采场充填完成后会形成应力隔离效应, 可降低后续采场开采的安全性风险。研究成果可为同类型矿山提供借鉴。

**关键词:**应力隔离效应; 回采顺序; FLAC<sup>3D</sup>; 数值模拟; 破碎矿体; 充填采矿法

中图分类号: TD851 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)04-0764-11 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.039

引用格式: 蔡小迪, 史秀志, 王衍海, 等. 破碎矿体回采顺序的应力隔离效应研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(4): 764-774. CAI Xiaodi, SHI Xiuzhi, WANG Yanhai, et al. Study on Stress Isolation Effect of Mining Sequence in Broken Orebody[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 764-774.

在破碎矿体的开采过程中, 普遍存在矿岩强度低、节理裂隙发育和矿物遇水膨胀等问题(王庆刚等, 2024), 极易发生冒顶和片帮等安全风险事故(李冬萍等, 2021; 秦旭忠等, 2024), 对作业人员生命安全造成极大的威胁, 导致矿石资源损失与贫化(张虎, 2024), 进而直接影响到矿山的生产成本和经济效益。为保证破碎矿体回采的安全性和采场的稳定性, 国内外学者开展了诸多研究, 分别针对不同工程背景给出不同的安全措施(刘东锐, 2021; 张宏伟等, 2021; 刘鹏鹏等, 2023; Yu et al, 2024)。目前, 主要通过优化采场结构参数(董金奎等, 2013; 韩斌等, 2015; 刘冬等, 2019; 李胜辉等, 2021; Zhang

et al, 2022)、支护方式或参数(夏功泽等, 2021; 姜明伟等, 2022; 彭文庆等, 2023)、采矿方法(杜树浩等, 2021)和矿体回采顺序(邓红卫等, 2017; 胡建华等, 2017; 黄聪等, 2023), 改变破碎矿体采场或巷道周围的应力分布状态, 从而保证其稳定性和安全性, 并在现场实践中取得了良好的效果。然而, 这些控制措施均未考虑充填体在矿体回采中发挥的积极作用。

充填体是地层的一种介质, 与地层形成共同体, 具有应力吸收与转移、应力隔离以及系统共同作用3种效果(于学馥等, 1996), 通过选用合理的矿体回采顺序, 能够充分利用充填体的应力隔离效

收稿日期: 2025-01-05; 修订日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“爆破荷载下含分层结构面充填体损伤演化与分部揭露渐变失稳机制”(编号: 52374152)资助

作者简介: 蔡小迪(2000—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 从事采矿技术研究工作。E-mail: cxd18538881325@csu.edu.cn

\*通信作者: 史秀志(1966—), 男, 河北邢台人, 教授, 博士生导师, 从事爆破工程与技术安全研究工作。E-mail: baopo@csu.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

应,以隔离地应力在水平和垂直方向对采场的影响,是一项保证后续采场开采安全性的重要措施。孟福杰等(2023)研究发现采场开采充填完成后围岩的水平应力和垂直应力明显高于充填体,并趋于稳定。由此可知,在研究破碎矿体回采安全性等问题时,应充分考虑充填体的应力隔离效应。然而,目前关于应力隔离效应的演化规律及充填体隔离原岩应力的机理尚不明确,因此利用充填体构建应力隔离的措施在地下金属矿山中缺乏应用经验。

鉴于此,本文以某地下金属矿山破碎矿体小型深孔爆破空场嗣后充填采矿法采场作为工程背景,利用FLAC<sup>3D</sup>软件建立三维数值模型进行模拟计算,通过分析各个方案的塑性区分布范围以及体积、应力和位移分布规律,确定该矿体的最优回采顺序,探究其回采过程中应力隔离效应的演化规律,为矿山的安全高效开采提供理论基础和技术指导。

## 1 现场工程概况

南美某矿山矿床位于 Maimón 组南缘,紧靠 Peralvillo 组逆冲断层接触(150 m)下方,位于广泛关联的 Ozama 剪切带,由赋存于地表以下 400~1 000 m 处的块状一半块状硫化物组成,矿床在宿主岩变质火山岩中作为一个明显的层位出现,矿床和寄主岩表现出变化的剪切变形。根据该矿山矿岩 Q'值和 RMR 值分类统计结果及评价等级,上下盘围岩及块状、半块状矿体的岩体质量差,浸染状矿体相对较好,矿岩整体破碎,稳固性较差,具体见表 1。

该矿山矿体倾角变化较大,靠近矿床顶部为亚垂直,但随着深度的增加,倾角减小至 55°~65°。矿

表 1 南美某矿山矿岩 Q'值和 RMR 值岩体分类统计  
Table 1 Rock mass classification statistics of Q' value and RMR value for ore-rock in a south American mine

岩体	Q'加权平均值	Q'岩体分级	RMR 加权平均值	RMR 岩体分级
上盘围岩	2.79	差	47.18	一般
下盘围岩	3.46	差	47.24	一般
块状矿体	2.16	差	41.94	一般
半块状矿体	3.32	差	49.85	一般
浸染状矿体	4.39	一般	51.07	一般

体由多条平行矿脉组成,矿脉厚度在 3~30 m 之间,由不同厚度的废中矿隔开。在垂直矿体方向上,水平应力与垂直应力之比为 2.0,沿矿体走向方向,水平应力与垂直应力之比为 1.5,据此,假设 Z 方向垂直应力为  $\sigma_z$ ,则 X 方向初始水平应力为  $2\sigma_z$ ,Y 方向初始水平应力为  $1.5\sigma_z$ 。

根据工程地质条件及岩体质量分级评价结果,该矿山属于典型的破碎矿体开采,在回采过程中容易出现冒顶和片帮等情况,直接影响到采场的稳定性,开采技术和安全管理难度极大。因此,确定合理的回采顺序、探究应力隔离效应的演化规律,并在回采过程中构建应力隔离措施,对于矿体回采过程中采场的稳定性和回采安全性至关重要。

## 2 数值模型构建

### 2.1 模型构建及监测点布置

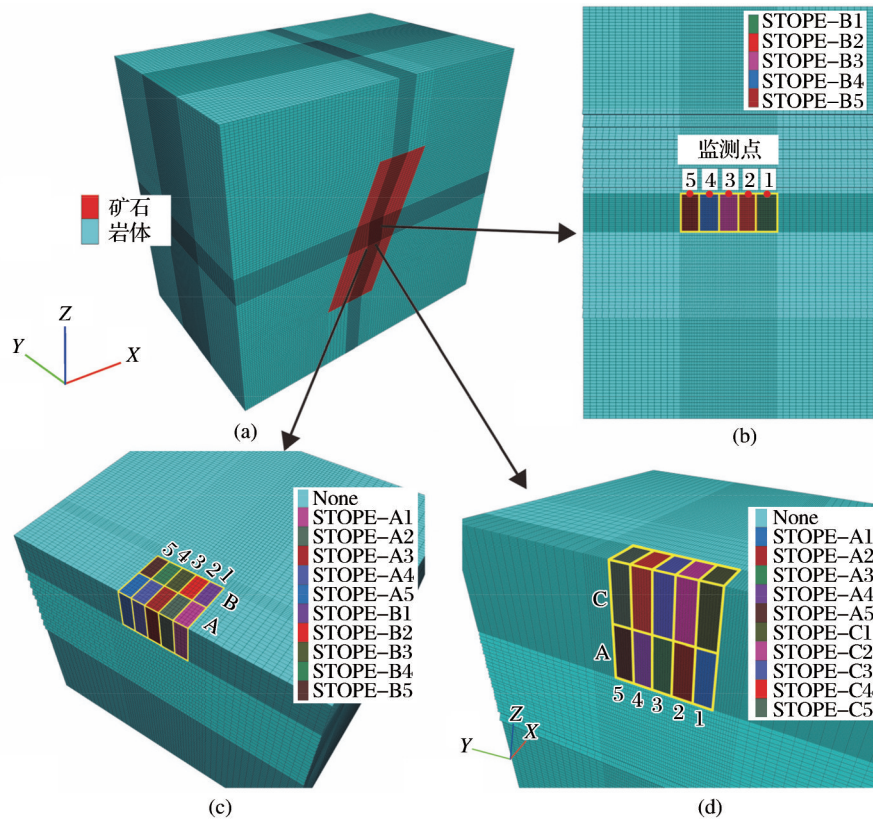
为了探究破碎矿体回采过程中应力隔离效应的演化规律,选取该矿山埋深为 490 m 的矿体建立三维数值模型,如图 1(a)所示。根据圣维南原理,围岩区域应取采空区范围的 3~5 倍来消除局部效应的影响(杜坤等,2011)。考虑到实际回采情况,分别对单排、水平两排和垂直两排采场布置情况进行模拟,分别分析竖直方向上矿石、充填体顶板以及水平方向上岩体、充填体边帮的应力、位移、塑性区相应特征。

单排采场分别以数字 1~5 命名,监测点布置在顶板中心点位置,如图 1(b)所示;水平两排采场分别命名为 A 和 B,以数字 1~5 命名列,在采场中部中点位置,围绕采场设置监测点,如图 1(c)所示;垂直两排采场分别命名为 A 和 C,以数字 1~5 命名列,监测点布置在采场顶板的中心点位置,如图 1(d)所示。通过监测数据来分析评价应力隔离效应对垂直应力和水平应力的隔离效果。

模型中采场均为垂直走向布置,单个采场设置为 15 m(长)×8 m(宽)×24 m(高),确定整个计算域尺寸为 390 m×392 m×504 m。本次计算模拟的矿岩和充填体均采用摩尔—库仑(Mohr-Coulomb)本构模型,由于 FLAC<sup>3D</sup>是有限差分软件,能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,但无法建立包含复杂结

构面或节理裂隙的模型(Li et al, 2013; Shnorhokian et al, 2015; Huang et al, 2021), 因此在进行建模时通过 Hook-Brown 准则, 通过引入相关折减系数, 将

室内试验获得的完整岩石试块的物理力学参数进行折减后, 得到破碎矿体的物理力学参数, 详见表2。



(a)-490 m 矿岩三维模型; (b) 单排采场布置模型; (c) 水平两排采场布置模型; (d) 垂直两排采场布置模型

图1 采场数值模型图

Fig. 1 Numerical model diagram of the stope

表2 主要岩体摩尔-库伦参数

Table 2 Mohr-Coulomb parameters of major rock masses

岩石类型	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	体积模量/ $\text{MPa}$	剪切模量/ $\text{MPa}$	$\mu$	$\gamma/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\sigma_t/\text{MPa}$
绿泥石片岩	23.2	3 640	2 893	1 412	0.29	2.76	4.94	43.90	4.20
硫化物	28.6	2 650	2 241	1 040	0.30	4.14	5.54	47.61	4.30
充填体	1.2	1 000	560	420	0.20	2.30	0.76	25.00	0.73

## 2.2 回采方案设计

应力隔离效应通常受回采顺序的影响(于学馥等, 1996), 因此需要分析不同回采顺序下破碎岩体的应力和位移响应情况。对于空场嗣后充填采场方法而言, 常用的回采顺序有中间向两侧开采和两侧向中间开采, 在此回采顺序下还可采用连续或间隔开采的方式(张富兴等, 2020)。考虑模型大小和计算时间, 间隔方式均设计为隔一采一。据此, 设

计4种回采方案, 详见表3。

表3 回采方案设计

Table 3 Mining schemes design

方案编号	回采顺序	开采方式
a	两侧向中间	连续开采
b	两侧向中间	间隔开采
c	中间向两侧	连续开采
d	中间向两侧	间隔开采

### 3 回采顺序结果分析

图2所示为根据4种方案模拟得到的平衡后的塑性区云图。在开采过程中,当间柱采场或充填体两侧同时出现空区时,存在间柱采场或充填体因受剪切作用而被塑性区贯穿的情况。在4种回采方案开采并充填完成后,采场周围围岩中均存在塑性

区。其中,方案a的中间间柱采场在被塑性区贯穿后仍进行了开挖并在最后充填,所以在所有步骤完成并模拟平衡后,中间充填体没有出现被塑性区贯穿的情况,而方案b、方案c和方案d有充填体被塑性区贯穿的情况。因此,在实际开采过程中应尽可能避免在间柱采场或充填体两侧同时开采的情况。

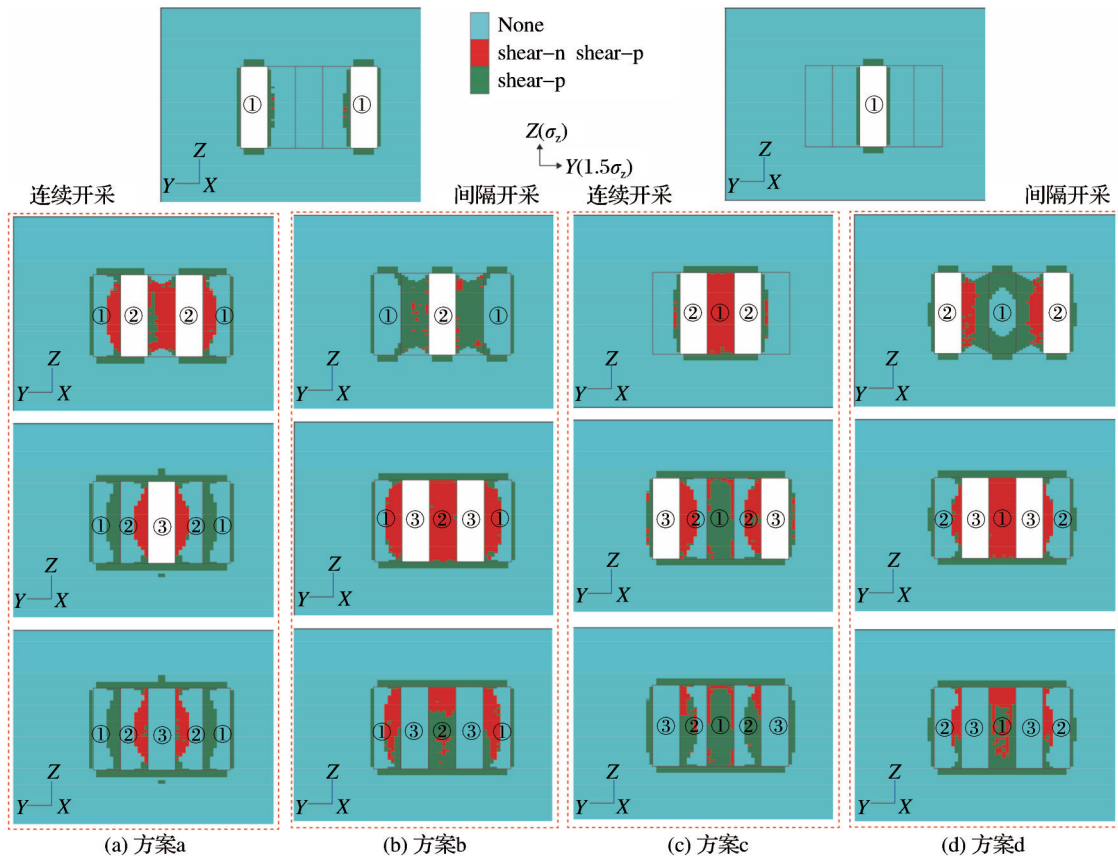


图2 4种开采方案塑性区云图  
Fig. 2 Plastic zone nephogram of four mining schemes

对4种回采方案的累计塑性区体积进行统计,并监测不同回采顺序下采场顶板中心的位移变化情况,结果如图3所示。由图3(a)可知,在4种方案中,方案c在开采过程中产生的累计塑性区体积最小(51 782.8 m<sup>3</sup>)。分析图3(b)和图3(c)发现,方案c中各监测点累计垂直位移具有最小的方差(0.1144)和均值(5.504 cm),方案a和方案c中顶板最大位移曲线呈先急后缓的上升趋势,而方案b和方案d则相反,呈先缓后急的上升趋势。最终位移量表明,方案c产生的顶板最大位移量最小,说明方案c具

有最好的顶板位移控制优势。图3(d)所示为4种方案模拟平衡后采场顶板各监测点垂直应力统计结果。通过计算各监测点垂直应力方差和均值发现,当开采顺序相同时,连续开采能够使顶板的垂直应力分布更均匀,但是应力释放效果较弱,而间隔采场开采能够更好地释放顶板应力,但是顶板应力可能会产生更多离散和局部集中。

为了分析不同开采顺序对应力集中效应的影响,绘制方案a和方案c的应力集中状态随采场开采的变化情况(图4)。在方案a中,随着两侧的回

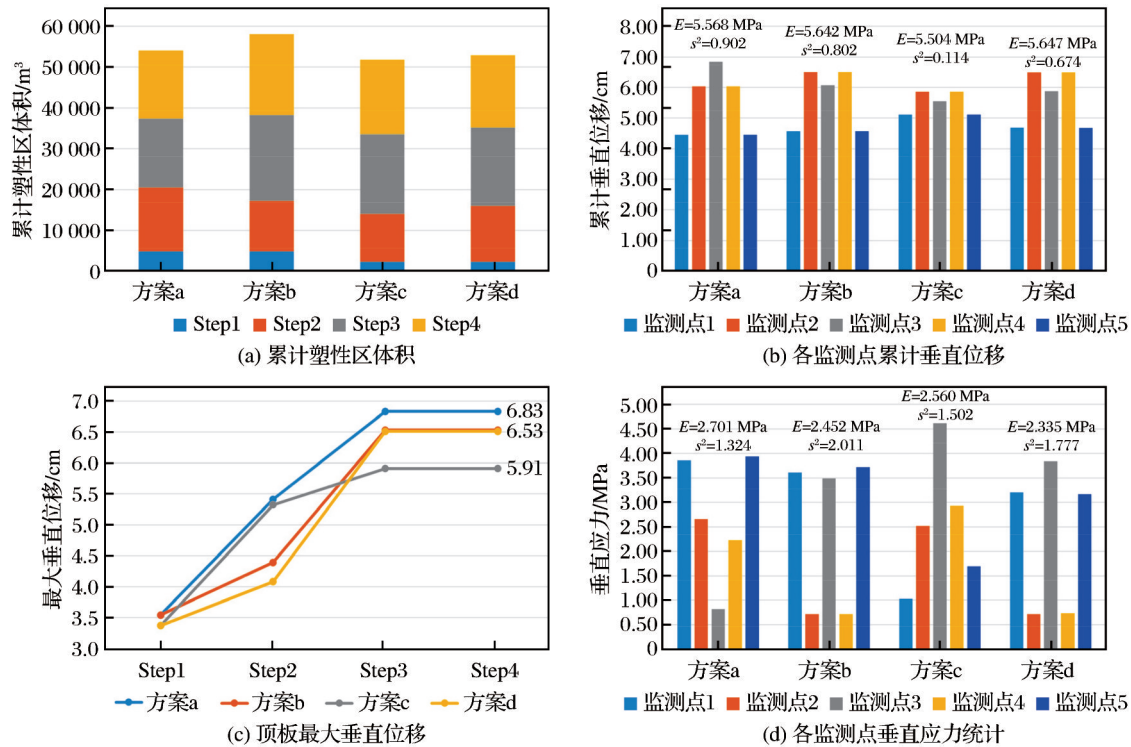


图3 4种开采方案塑性区体积及位移、应力统计

Fig. 3 Statistics of cumulative plastic zone volume, displacement and stress for four mining schemes

采逐渐向中间逼近,应力在中间采场的集中程度越明显,开采时越容易发生破坏现象。方案c的应力集中部位只出现在外侧,外侧采场只会受一侧的高应力作用,开采时将具有相对更好的稳定性。

通过分析4种开采方案的塑性区、位移和应力分布特征可知,方案c在开采过程中产生的塑性区体积最小,且具有更好的位移控制效果和应力分布状态,采场稳定性最好。同时,伴随开采过程中应力和位移的释放,完成充填后,充填体中的应力明显降低,出现应力隔离效应。

#### 4 应力隔离效应分析

在模拟单排采场开采过程中发现,当采场开采结束并被充填后,充填体内部受到的应力明显减小,远小于该地区的初始地应力,在围岩中也产生了一定区域范围的卸压场,从而形成了应力隔离效应。为了探究该效应对垂直应力和水平应力的隔离作用,对2种采场布置情况分别进行模拟分析。

##### 4.1 垂直方向

为了研究应力隔离效应对垂直应力的隔离作

用,以中间往两侧连续开采的回采方案对垂直方向两排采场进行数值模拟,得到垂直两排采场开挖后截面的位移云图和应力云图(图5)。从图5(a)可以看出,在开挖下部采场的过程中,上部采场的顶板所受垂直地应力高达3~9 MPa,同时下部采场以充填体为顶板所受垂直应力均小于3 MPa,充填体中的应力值普遍较小,在上部采场顶角产生的应力集中作用可达到18~24 MPa,而下部采场顶角的应力集中仅为3~6 MPa,充分说明上部充填体对垂直应力具有应力隔离作用。

从图5(b)中可以看出,上部采场在开挖并充填以后顶板仍具有较大的垂直位移量,相比较而言,下部采场在开采过程中顶板垂直位移量较小。图6所示为2种顶板条件下A3和C3采场顶板监测点的位移情况,可以看出同样的开采顺序下,岩石顶板位移量逐渐增大,充填体顶板位移量逐渐减小。对2种方式下采场顶板中点的位移量统计均值,矿石顶板下的位移量均值为4.36 cm,充填体顶板下的位移量均值为3.5 cm,说明上部采场充填体有效隔离了原岩应力造成的垂直方向的大位移,印证了上

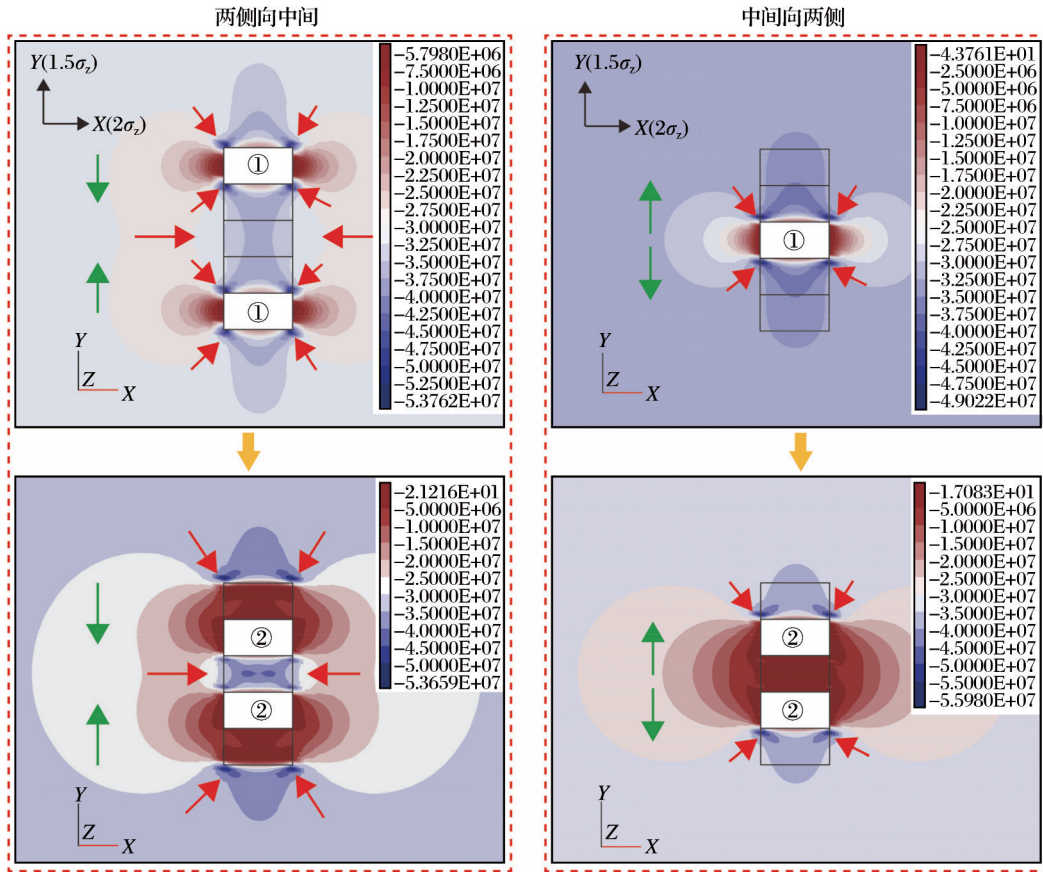


图4 方案a与方案c应力集中状态对比

Fig. 4 Comparison of stress concentration state between Scheme a and Scheme c

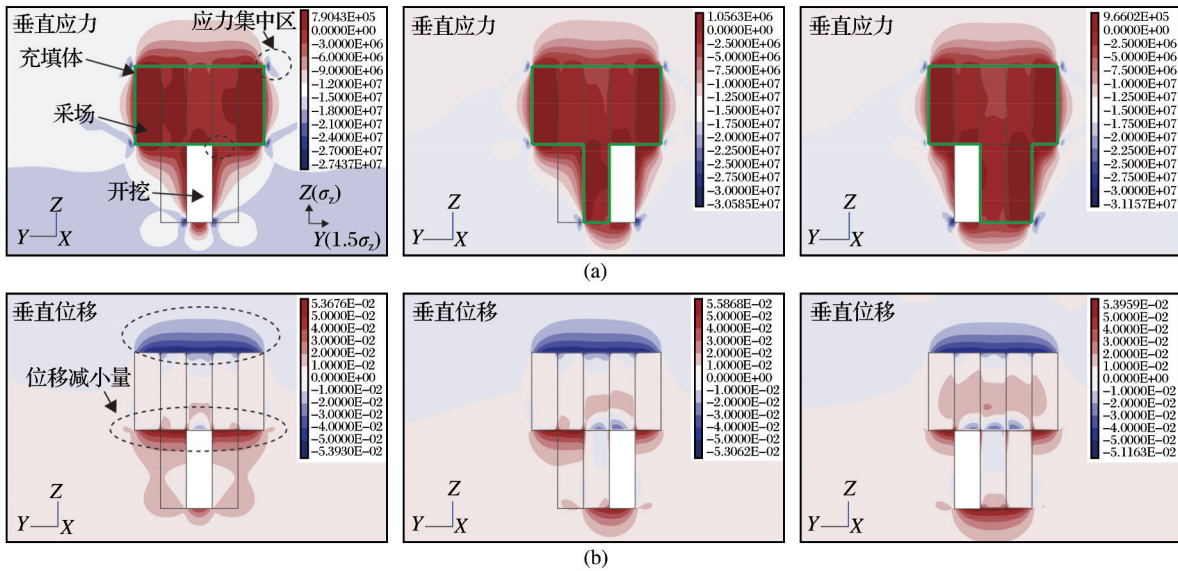


图5 竖直两排采场开采过程中垂直应力云图(a)和垂直位移云图(b)

Fig. 5 Vertical stress nephogram (a) and vertical displacement nephogram (b) during the mining process of two vertical mining stopes

部充填体对垂直应力的隔离作用,同时说明在足够强度的充填体下开挖时,采场稳定性更高。

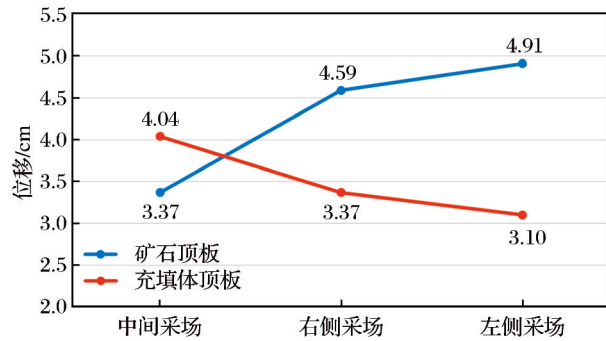


图6 采场开采时2种顶板中点垂直位移统计

Fig. 6 Statistics of vertical displacement of midpoint of two kinds of roof in stope mining

### 4.2 水平方向

为了研究应力隔离效应对水平应力的隔离作用,以B3→B2+B4→A3→B1+B5→A2+A4的开采顺序进行模拟计算,并在B3采场左右边帮的中心点设置监测点,获得边帮的位移和应力时程曲线,如图7所示。由图7(a)可知,B3采场开采后,左右两侧边帮受到的拉应力作用达到1.36 MPa。当B3采场完成充填后,A3采场开采时,B3采场右侧边帮受

到的地应力作用为4.0 MPa。A3采场右侧边帮所受力作用为拉应力,且拉应力仅为0.7 MPa。在模型计算平衡后,2个采场右侧边帮的压应力值均下降至8 MPa以下,且B3采场右侧边帮所受应力值比A3采场右侧大2.78 MPa。通过对比发现,充填体有效隔绝了水平原岩应力作用导致的应力传导和集中现象,有效降低了直接作用在A3采场右侧的应力,充分说明了充填体对水平应力的隔离作用。

由图7(b)可知,对比B3和A3采场的开挖情况,B3采场右侧边帮为原始岩体,开挖后X方向位移达到7.34 cm,位移方向向左;A3采场右侧边帮为充填体,开挖后X方向位移只有2.20 cm,位移方向向左。这是由于当B3采场开采并充填完成后,左侧边帮具有较大的向右位移,当A3采场开挖后,仅向左恢复了2.20 cm,远小于7.34 cm,这充分说明充填体有效隔绝了原岩应力作用导致的边帮大位移。

如图8所示,在Y方向上,相比于B3和B4采场开挖后上边帮产生的位移量(10.1 cm和10.29 cm),A3和A4采场开挖后边帮的位移量(12.67 cm和13.04 cm)更大,这是由于右侧水平应力被隔离,在Y方向的水平应力作用效果增大,从而产生更大的位移量,这也印证了右侧充填体对水平应力的隔离作用。

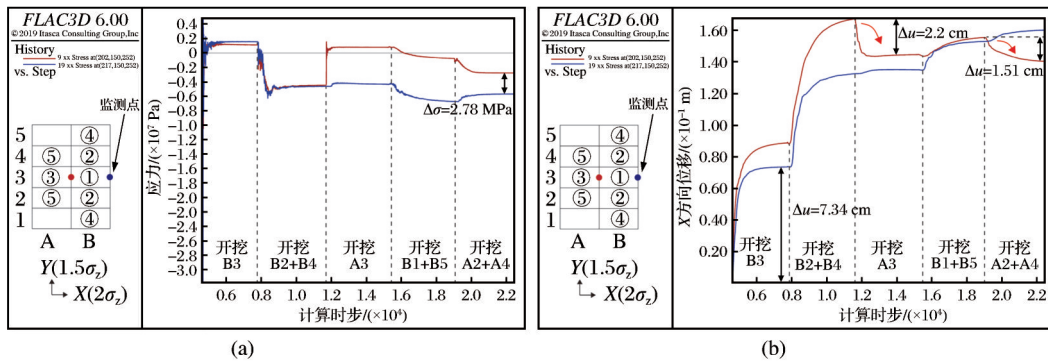


图7 B3采场左右边帮中点应力时程曲线图(a)和位移时程曲线图(b)

Fig. 7 Stress time history curve (a) and displacement time history curve (b) of the midpoint of the left and right sides of the B3 mining area

### 4.3 应力隔离效应演化规律

由于最大水平主应力对地下采场稳定性的影响最为显著,因此以该矿山水平两排采场布置方式为例,绘制了采场开挖过程位移和应力变化示意图(图9),更直观地表述矿体回采过程中的应力分布变化过程,进一步分析应力隔离效应。由图9可以

看出,当B3采场开采完成以后,受初始地应力的作用,边帮发生位移现象并伴随着周围围岩中的应力释放过程,在B3采场充填以后周围会形成一定区域范围的应力降低区。在B2和B4采场开采完成并充填以后,应力释放区进一步增大并全部覆盖A3采场,充填体周围围岩中的X方向和Y方向水平

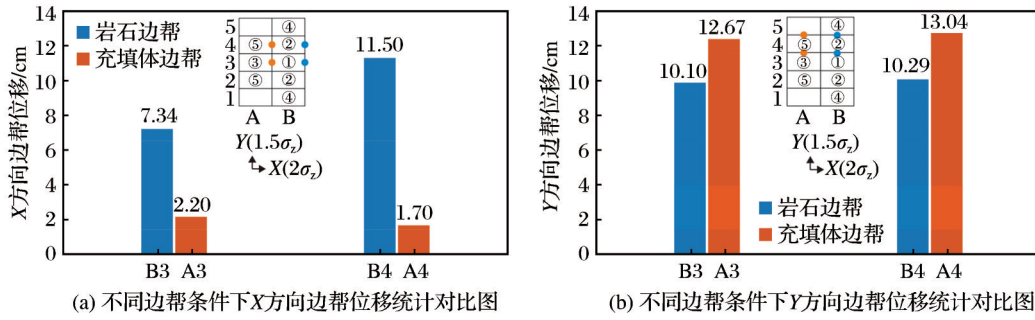


图8 右侧边帮性质不同条件下相同开挖位置边帮位移统计

Fig. 8 Displacement statistics of the side wall under different properties of the right side wall in the same excavation position

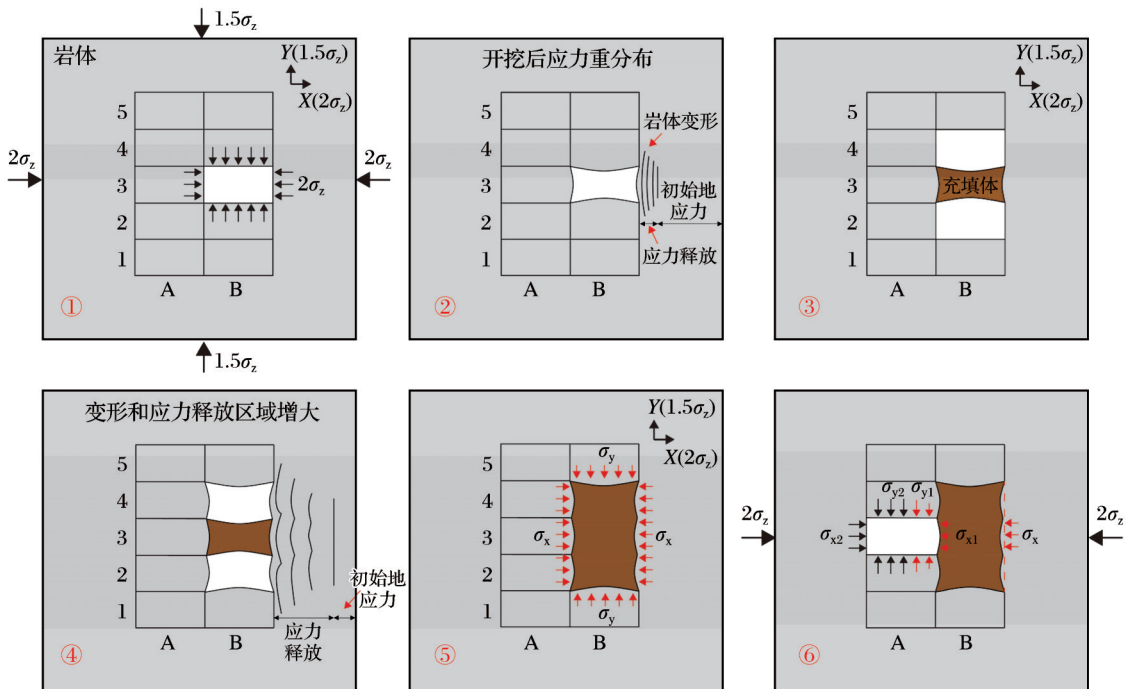


图9 水平两排采场开挖过程位移和应力变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of displacement and stress change during excavation of horizontal two-row stope

应力由原来的  $2\sigma_z$  和  $1.5\sigma_z$  分别衰减为  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ 。因此,当A3采场准备开挖时,靠近充填体一端受到的X方向和Y方向水平应力分别为  $\sigma_{x1}$  和  $\sigma_{y1}$ ,远离充填体一端受到的X方向和Y方向水平应力分别为  $\sigma_{x2}$  和  $\sigma_{y2}$ ,且这4个水平应力均小于初始原岩应力。此时,说明在B3、B2和B4采场开采完成并充填以后,采场一定区域范围内形成有效的应力隔离效应,之后A3采场在此应力场下开采能够有效减小边帮的位移量,减少由于地应力作用造成的破坏现象,大幅提高采场的稳定性和安全性。

参考以上方法,可以进一步在上盘位置也实施同样的方法,在矿体的上盘和下盘同时形成此类应力隔离,产生覆盖一个生产阶段的水平方向的应力阴影,以消除由于最大水平应力作用导致的中间采场上下盘边帮的破坏和不稳定。

## 5 结论

(1)通过观察4种回采方案的模拟过程发现,当间柱采场或充填体两侧同时出现空区时,均会发生被塑性区贯穿的情况,在实际生产过程中应避免

在间柱采场或充填体两侧同时开采情况。

(2)相比之下,方案c(由中间往两侧连续开采)在模拟过程中产生的累计塑性区体积( $51\ 782.8\ \text{m}^3$ )、各监测点垂直位移量均值( $E=5.504\ \text{cm}$ )和最大垂直位移量( $5.91\ \text{cm}$ )均为最小,且应力分布状态最佳,推荐该方案为矿山破碎矿体小型深孔爆破空场嗣后充填采矿法的最佳回采顺序。

(3)采用方案c回采破碎矿体时,充填体顶板及边帮所受应力作用和产生的最大位移量显著降低,表明在该方案下充填体产生了应力隔离效应,有效降低了采场边帮及顶板发生破坏的风险,提高了采场的稳定性和回采的安全性。

### 参考文献 (References):

Huang J, Meng F B, Wang G, et al, 2021. Simulation research for the influence of mining sequence on coal pillar stability under high wall mining method[J]. *Geofluids*, (1): 8864339.

Li X B, Li D Y, Liu Z X, et al, 2013. Determination of the minimum thickness of crown pillar for safe exploitation of a sub-sea gold mine based on numerical modelling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 57: 42-56.

Shnorhokian S, Mitri H S, Moreau-Verlaan L, 2015. Stability assessment of stope sequence scenarios in a diminishing ore pillar[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74: 103-118.

Yu K P, Lin P, Chitombo G, et al, 2024. Study on the optimization of blasting parameters and blastholes charging structure for broken orebody [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 152: 105948.

Zhang D J, Liu S X, Wang J D, 2022. Study on optimization of stope structure parameters for steeply inclined medium-thick broken ore bodies [J]. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 39(3): 1099-1112.

董金奎,冯夏庭,张希巍,等,2013.地下采场破碎岩体稳定性评价与参数优化[J].*东北大学学报(自然科学版)*, 34(9): 1322-1326.

Dong Jinkui, Feng Xiating, Zhang Xiwei, et al, 2013. Stability evaluation and parameter optimization on the fractured rock mass around underground stope [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 34(9): 1322-1326.

邓红卫,杨懿全,邓峻仁,等,2017.采空区下方高应力环境下深部矿体回采时序研究[J].*黄金科学技术*, 25(2):

62-69. Deng Hongwei, Yang Yiquan, Deng Junren, et al, 2017. Study on mining sequence of deep orebody under high stress environment below goaf [J]. *Gold Science and Technology*, 25(2): 62-69.

杜坤,李夕兵,刘科伟,等,2011.采空区危险性评价的综合方法及工程应用[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 42(9): 2802-2811.

Du Kun, Li Xibing, Liu Kewei, et al, 2011. Comprehensive evaluation of underground goaf risk and engineering application [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 42(9): 2802-2811.

杜树浩,王革,2021.柴胡栏子金矿急倾斜破碎薄矿体采矿方法选择与应用[J].*黄金*, 42(9): 52-56.

Du Shuhao, Wang Ping, 2021. Selection and application of mining methods for steeply inclined broken and thin ore bodies in Chaihulanzi gold mine [J]. *Gold*, 42(9): 52-56.

韩斌,于少峰,吴爱祥,等,2015.基于化学注浆预加固的破碎矿体采场结构优化数值模拟[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 46(10): 3758-3766.

Han Bin, Yu Shaofeng, Wu Aixiang, et al, 2015. Numerical simulation of stope structure parameters based on chemical grouting technology in broken deposit [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(10): 3758-3766.

胡建华,习智琴,罗先伟,等,2017.基于岩体时变力学参数的深部矿段回采顺序优化[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 48(10): 2759-2764.

Hu Jianhua, Xi Zhiqin, Luo Xianwei, et al, 2017. Optimization of mining sequence based on rock mass time-varying mechanics parameters [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 48(10): 2759-2764.

黄聪,魏超城,丘永富,2023.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC<sup>3D</sup>的阿舍勒铜矿深部回采方案优化研究[J].*中国矿业*, 32(11): 168-177.

Huang Cong, Wei Chaocheng, Qiu Yongfu, 2023. Optimization of deep stoping scheme in Ashele copper mine based on modified Mathews stability graph method and FLAC<sup>3D</sup> [J]. *China Mining Magazine*, 32(11): 168-177.

姜明伟,刘焕新,王玺,等,2022.基于 Sirovision 节理岩体调查及岩体质量分级与支护研究[J].*有色金属工程*, 12(1): 115-121.

Jiang Mingwei, Liu Huanxin, Wang Xi, et al, 2022. Joint rock mass survey and rock mass quality classification and support research based on Sirovision [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 12(1): 115-121.

李冬萍,张浩强,2021.金矿破碎矿体高分段嗣后充填采矿技术优化研究[J].*金属矿山*, 50(12): 102-105.

Li Dongping, Zhang Haoqiang, 2021. Study on optimization of

- high sublevel backfill mining technology for broken orebody in a gold mine[J].Metal Mine, 50(12): 102-105.
- 李胜辉,王立杰,刘志义,等,2021.复杂破碎矿体试验采场稳定性分析及结构参数优化[J].金属矿山,50(8):41-45.Li Shenghui, Wang Lijie, Liu Zhiyi, et al, 2021. Stability analysis and structural parameter optimization of test stope for complex broken ore deposit[J].Metal Mine, 50(8):41-45.
- 刘东锐,2021.软弱破碎矿体采场支护技术研究[J].有色金属(矿山部分),73(2):64-68.Liu Dongrui, 2021. Research on stope support technology of weak and broken orebody[J].Nonferrous Metals(Mining Section), 73(2): 64-68.
- 刘冬,邵安林,金长宇,等,2019.地下破碎矿体数值计算模型的构建及采场结构参数优化[J].中南大学学报(自然科学版), 50(2): 437-444. Liu Dong, Shao Anlin, Jin Changyu, et al, 2019. Numerical model building for broken ore body and optimization of stope structural parameters[J].Journal of Central South University(Science and Technology), 50(2):437-444.
- 刘鹏鹏,王贻明,周科礼,等,2023.深部破碎矿体分段空场嗣后充填法采场结构参数优化[J].金属矿山,52(8):181-188. Liu Pengpeng, Wang Yiming, Zhou Keli, et al, 2023. Optimization of stope structure parameters of sublevel open stope with delayed filling method for deep broken orebody[J].Metal Mine, 52(8):181-188.
- 孟福杰,彭敬伟,2023.金川二矿区充填体变形特性及应力分布规律研究[J].采矿技术,23(5):183-188.Meng Fujie, Peng Jingwei, 2023. Study on deformation characteristics and stress distribution law of filling body in Jinchuan No.2 mining area[J].Mining Technology, 23(5): 183-188.
- 彭文庆,朱豪,汪琦,2023.破碎岩体巷道围岩承载结构应力分布规律[J].中南大学学报(自然科学版), 54(6): 2447-2458. Peng Wenqing, Zhu Hao, Wang Qi, 2023. Stress distribution law of surrounding rock bearing structure of broken surrounding rock roadway[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 54(6):2447-2458.
- 秦旭忠,孙刚友,侯志永,等,2024.棉花坑矿井破碎矿体回采方案研究[J].铀矿冶,43(3):25-34. Qin Xuzhong, Sun Gangyou, Hou Zhiyong, et al, 2024. Research on stoping scheme of broken orebody in Mianhuakeng mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 43(3):25-34.
- 王庆刚,王社光,连欢超,等,2024.复杂破碎矿体采矿方法研究及提产优化实践[J].河北冶金,(8):41-46,54. Wang Qinggang, Wang Sheguang, Lian Huanchao, et al, 2024. Research on mining method of complex broken ore body and practice of yield optimization[J].Hebei Metallurgy, (8):41-46,54.
- 夏功泽,许子刚,李永新,等,2021.基于岩体分级的内蒙古黑牛王矿山支护设计理论研究[J].有色矿冶,37(1):13-16. Xia Gongze, Xu Zigang, Li Yongxin, et al, 2021. Theoretical research on support design of Heiniuwang mine in Neimenggu based on rock mass classification[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 37(1):13-16.
- 于学馥,刘同有,1996.金川的充填机理与采矿理论[C]//面向21世纪的岩石力学与工程:中国岩石力学与工程学会第四次学术大会论文集.北京:北京科技大学. Yu Xuefu, Liu Tongyou, 1996. Jinchuan's filling mechanism and mining theory[C]//Rock Mechanics and Engineering for the 21st Century: Proceedings of the Fourth Academic Conference of CSRME. Beijing: University of Science and Technology Beijing.
- 张富兴,张宏伟,虞松涛,等,2020.基于CRITIC赋权的回采顺序优化模拟研究[J].矿业研究与开发,40(4):1-7. Zhang Fuxing, Zhang Hongwei, Yu Songtao, et al, 2020. Simulation research on mining sequence optimization based on CRITIC empowerment[J].Mining Research and Development, 40(4):1-7.
- 张宏伟,张富兴,孙胜,等,2021.缓倾斜破碎矿体高效进路充填采矿方法研究与应用[J].黄金科学技术,29(6):899-907. Zhang Hongwei, Zhang Fuxing, Sun Sheng, et al, 2021. Research and application of high-efficiency drift backfill mining method in gently inclined broken orebody[J].Gold Science and Technology, 29(6):899-907.
- 张虎,2024.复杂多变破碎矿体岩体质量分级及岩体支护参数研究[J].山西冶金,47(6):113-114. Zhang Hu, 2024. Study on the quality classification and rock support parameters of complex and variable fractured ore bodies[J]. Shanxi Metallurgy, 47(6):113-114.

## Study on Stress Isolation Effect of Mining Sequence in Broken Orebody

CAI Xiaodi<sup>1</sup>, SHI Xiuzhi<sup>1</sup>, WANG Yanhai<sup>2</sup>, HUANG Rendong<sup>1</sup>, OUYANG Jian<sup>1</sup>, WANG Wenyang<sup>2</sup>

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Fankou Lead-Zinc Mine, Shenzhen Zhongjin Lingnan Non-ferrous Metal Co., Ltd., Shaoguan 512325, Guangdong, China

**Abstract:** In the context of extracting a broken orebody, the implementation of artificially constructed stress isolation measures is a critical approach to maintaining the stability of the mining site and ensuring operational safety. The effectiveness of stress isolation is often influenced by the sequence in which the orebody is mined. Utilizing the mining of a broken orebody in an underground mine as the engineering context, this study aims to investigate the evolution of stress isolation effects and to determine the optimal stoping sequence for Transverse Longhole Open Stopping. A numerical model with dimensions of 15 m(length)×8 m(width)×24 m(height) was developed using FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software to facilitate this investigation. Four mining schemes were designed for analysis, namely (a) continuous mining from both sides towards the center, (b) spaced mining from both sides towards the center, (c) continuous mining from the center towards both sides, and (d) spaced mining from the center towards both sides. Numerical simulations for these four distinct mining schemes were conducted using FLAC<sup>3D</sup> software. The results indicated that Scheme (c) demonstrated the most advantageous performance in production mining. Specifically, it achieved the smallest cumulative plastic zone volume (51 782.8 m<sup>3</sup>), the least roof displacement (with a maximum displacement of 5.91 cm), and the most uniform stress distribution, thereby signifying optimal operational conditions. Consequently, Scheme (c) is recommended as the optimal mining sequence for Transverse Longhole Open Stopping of a broken orebody in a particular mine, which entails continuous mining from the center towards both sides. To investigate the stress isolation effect produced during orebody mining according to this sequence, particularly concerning the isolation effect of horizontal and vertical stresses, separate simulations of the mining processes at vertical and horizontal two-row mining sites were conducted. The displacement and stress distribution patterns during these processes were thoroughly analyzed. The findings indicated that in the vertical two row mining site configuration, the vertical stress exerted on the roof of the lower stope during extraction was substantially lower than the in-situ stress at that location, when compared to the upper stope mining scenario. This configuration exhibited weaker stress concentration at the stope roof corners (3 MPa to 6 MPa) and resulted in smaller roof displacements. The average vertical displacement of the backfill roof was 0.86 cm less than that of the ore roof. In the horizontally aligned double-row stope layout, stopes with backfill sidewalls, as opposed to those with original rock sidewalls, consistently remained within stress-reduction zones throughout the mining process. After excavation, these stopes demonstrated reduced stress concentration at roof corners, with maximum horizontal displacement and tensile stress in backfill sidewalls decreased by 5.14 cm and 0.66 MPa, respectively, compared to ore sidewalls, culminating in a final sidewall displacement of only 2.2 cm. The study concluded that implementing a continuous mining sequence from the center toward both sides during fragmented ore body extraction could establish a stress isolation effect following stope backfilling, effectively enhancing stope stability and ensuring safe mining operations. These findings provide valuable references for similar mining operations. The research results can provide reference for similar mines.

**Key words:** stress isolation effect; mining sequence; FLAC<sup>3D</sup>; numerical simulation; broken orebody; mining with backfilling