

某矿山铜金矿体二步采场待采矿体累积损伤研究

陈志强, 张玉健, 赵一博

(北京金诚信矿山技术研究院有限公司, 北京 101500)

摘要: 针对某矿山在采用分段空场嗣后充填法二步骤回采铜金矿体过程中存在的矿体累积损伤情况, 采用声波检测技术对采场爆破前以及爆破回采过程中的矿体进行声波数据采集, 并利用矿体完整性系数结合FLAC3D软件对采场回采过程进行数值模拟分析。结果表明: 采场爆破回采前, 矿体完整性属于Ⅲ级, 经过3~4次爆破回采后, 距离爆源4排(8.8 m)范围内的采场矿体累积损伤程度较大, 完整性由Ⅲ级变为Ⅴ级; 采场前区和采场后区的应力安全系数均大于1.5, 表明顶板和充填体整体稳定; 采场后区回采后, 空区顶底板及两端围岩和侧帮充填体塑性变形区域显著扩大, 建议回采后及时充填, 以降低围岩和充填体垮落的风险。

关键词: 铜金矿; 分段空场嗣后充填法; 声波检测; FLAC3D; 数值模拟; 矿体累积损伤; 安全系数

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0042-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.02.01

某地下多金属矿山资源丰富, 主要富含铜、铅、锌、银、金, 同时还含有丰富的硫。该矿山有铅锌矿区和铜金矿区。铜金矿区的矿体以厚大矿体为主, 采用分段空场嗣后充填法开采, 采场布置分两种情况: 当矿体厚度大于20 m时, 采场垂直于走向布置, 分两步骤开采, 一步骤采场宽12 m, 二步骤采场宽18 m, 采场长度一般为矿体厚度; 当矿体厚度为6~20 m时, 沿走向布置, 长度50~60 m。在-428 m分段, 两种采场布置方式的回采高度均为20 m。

当采场回采时, 在频繁的爆破作用下, 采场内后方待爆矿体会出现不同程度的累积损伤, 使矿岩稳定性降低, 给后续出矿、装药等工序作业人员和设备安全带来威胁。目前, 针对岩体累积损伤的研究较多, 通过采用理论分析、室内试验、数值模拟、现场试验等手段, 研究了多次爆破作用下隧道围岩累积损伤特征规律^[1-5]; 通过采用数值模拟方法, 研究了竖井掘进循环爆破过程中围岩损伤演化规律^[6]; 通过理论分析、数值模拟方法, 研究了地下硐室爆破振动与围岩累积损伤之间的规律^[7-9]; 通过现场爆破实验、振动监测、数值模拟等手段, 研究了多次爆破作用下巷道围岩累积损伤演化与破裂特征^[10-14]。

前人对围岩累积损伤的研究多集中在隧道、巷道、竖井及硐室开挖方面, 对采场回采过程中的矿体累积损伤研究较少。基于此, 笔者采用声波检测技术对矿山铜金矿体二步骤开采采场爆破前和频繁爆破回采过程中的矿体进行声波检测, 分析矿体波速及完整性变化情况, 并据此进行三维数值模拟分析, 评价采场稳定性。

1 矿体累积损伤检测

声波检测技术利用声波在物体中的传播特性(如波速、振幅、频率等参数)来检测分析物体内部结构和性能是否存在缺陷^[15]。声波检测技术因其具有操作简单、灵敏便捷、可无损探测等优点, 被广泛应用于建筑桥梁、电气管道、钢铁冶金等工程领域。本研究通过检测到的声波来反映矿体的累积损伤程度。

1.1 采场开采技术条件

选取N3/7-3采场进行声波检测试验, 该采场为垂直于矿体走向布置的二步骤采场, 矿体主要产于3#英安斑岩体接触带及其外侧的千枚岩中, 层理较为发育, 矿岩工程地质条件整体属于中等类型。N3/7-3采场-428 m分段回采高度20 m, 采场采幅12.0 m(宽)×25.2 m(长)。

收稿日期: 2025-02-05

第一作者简介: 陈志强(1989—), 男, 河南焦作人, 硕士, 工程师, 主要从事金属矿开采工艺及岩石力学研究。

采场切割槽爆破设计排间距为 1.5 m,孔底距为 1.0~1.3 m,切割排为 9 排,分 3 次爆破,首先以切割井为自由面爆破 C1、C2 排,第二次爆破 C3、C4 排,第 3 次爆破 C5~C9 排。采场正排落矿爆破排间距为 2.2 m,单孔最大孔深为 20.1 m、最小孔深为 2.9 m,孔底距为 1.8~2.5 m;采场正排为 9 排,每次爆破不超过 3 排,第一次爆破以

切割槽为自由面爆破 Z1~Z3 排,第二次爆破 Z4~Z6 排,第三次爆破 Z7~Z9 排。中深孔装药采用国产装药台车装填混装乳化炸药,电子雷管微差起爆,切割排爆破孔间微差 6 ms,排间微差 22 ms;正排爆破孔间微差 12 ms,排间微差 42 ms。-428 m 分段 N3/7-3 采场开采单体设计见图 1。

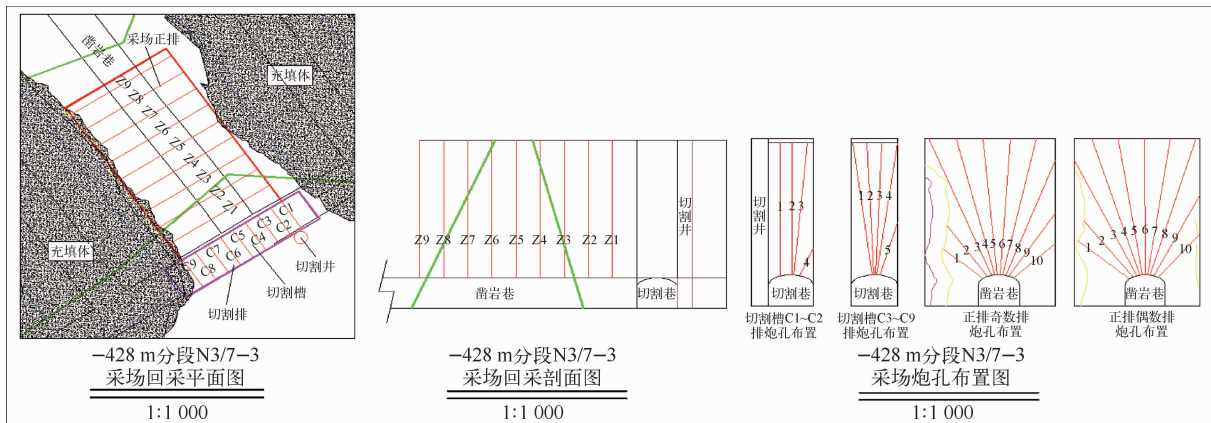


图 1 -428 m 分段 N3/7-3 采场单体设计

Fig. 1 -428 m sublevel N3/7-3 stope monomer design

1.2 采场矿体稳定性分级

在采场不同回采阶段深孔中不同位置,测得矿体纵波平均波速和矿体岩块纵波平均波速,据此计算不同回采阶段采场矿体完整性系数^[16]。

$$K = V_n^2 / V_0^2, \quad (1)$$

式中: K 为完整性系数; V_n 为矿体纵波平均波速, m/s; V_0 为矿体岩块纵波平均波速, m/s。

根据该矿山井下现场堵孔情况、孔内水环境、装药难易程度等,提出 K 与采场完整性分级的对应关系^[17],见表 1。

表 1 采场矿体完整性分级

Table 1 Integrity classification of stope ore body

采场矿体完整性分级	岩体完整程度	K 值范围	矿体完整性描述
I 级	完整	≥ 0.75	无堵渣或堵孔,孔内干燥,装药容易
II 级	较完整	$0.55 \sim < 0.75$	略有堵渣,孔壁潮湿,装药较容易
III 级	中等完整	$0.40 \sim < 0.55$	部分堵渣或堵孔,孔壁渗水,装药适中
IV 级	较破碎	$0.25 \sim < 0.40$	堵渣或堵孔较多,孔内滴水,装药较难
V 级	破碎	< 0.25	堵渣或堵孔多,孔内流水,装药难

1.3 采场声波检测

采用 TGM-G303 型岩石声波测试仪及一发双收干孔测井换能器进行采场内中深孔矿体声波波速检测。考虑检测的方便性和数据的代表性,尽量选择位于凿岩巷道顶板中部的中深孔进行声

波数据采集,声波测试仪器基本性能参数见表 2。

现场中深孔检测步骤:1)打开电源,将换能器置入待测位置,待测孔直径在 60~80 mm 为宜。2)为换能器注水。点击注水系统“注水”键,注水系统开始为探头耦合胶囊注水,此时注水系统液

晶屏上“实时压力”数值增大,当数值达到注水压力设定值时,注水自动停止。3)测试。按“启动”按钮开始测试,一个点测试完成后,点击“回水”键进行回水;回水时,液晶屏显示“实时压力”数值减小,当压力数值达到“回水压力”设定值时,回水自动停止;可以移动换能器探头至下一位置测试。重复上述操作。

需要注意的是,最开始进行检测时,需提前注水,以排净管内及胶囊内的空气,减小试验误差。

表 2 声波测试仪基本性能参数
Table 2 Basic performance parameters of
acoustic wave tester

指标	参数
声道数	2 声道
采样率	20 MHz
采样字节	0.5、1、2、4、8、16、32 kb
放大器衰减倍数	1、2、5、10、20、50、100、200 衰减
硬件滤波带宽	低频率:1 Hz、0.1 kHz、1 kHz、10 kHz、100 kHz
	高频率:1 kHz、10 kHz、100 kHz、1 000 kHz、10 MHz、
软件滤波带宽	低频率:0.1、1、10、20、30、40、50、60、80、100、200 kHz
	高频率:0.1、1、10、20、30、40、50、60、80、100、200 kHz
探头直径	50 mm,适用 60~80 mm 的孔径
探头长度	940 mm

1.3.1 矿体岩块声波检测试验

采用 TGM-G303 型岩石声波测试仪和压电平面换能器进行矿体岩块声波检测,现场检测时在 N3/7-3 采场凿岩巷内选取爆破后完整性好、表观规整、无裂隙的矿体岩块进行声波测试,现场矿体岩块声波数据见表 3。

表 3 采场矿体岩块声波检测结果
Table 3 Results of acoustic wave detection
of ore body rock in stope

序号	工程位置	岩块厚度/mm	波速/(m/s)
1	—428 m 分段 N3/7-3 采场	53	4 995
2		68	5 055
3		58	5 043
矿体岩块平均波速(V_0)			5 031

1.3.2 采场矿体声波检测

1)采场回采前矿体声波检测

—428 m 分段 N3/7-3 采场设计长为 25.2 m,切割槽宽约为 4 m,采场正排爆破回采约为 21.2 m;设计采场正排为 9 排,将切割槽和正排 Z1~Z4 排划分为采场前区,正排 Z5~Z9 排划分为采场后区。为保证试验人员采集数据过程中的安全,采场前区声波检测选择 Z4 排 7 号中深孔,采场后区声波检测选择 Z7 排 7 号中深孔。正排各排 7 号中深孔长度在 16.8 m 左右,鉴于采场内矿体下方已施工了凿岩巷道,其周边矿体已受到开挖影响,采场下部区域矿体完整性相对于采场上部区域矿体完整性要差些;为保守起见,选取采场下部矿体进行声波检测及完整性分级,结合仪器注水系统的压力,单个中深孔分别采集距孔口 0.2、1.6、3.0 m 处的声波波速。采场回采前声波检测结果及完整性分级见表 4。

表 4 采场回采前声波检测结果及完整性分级
Table 4 Acoustic wave detection results and integrity
classification before stope mining

检测炮孔 编号	检测点距 孔口距离/m	爆破前波 速/(m/s)	波速平均 值/(m/s)	K 值	完整性 级别
Z4 排 7 号孔	0.2	3 104	3 349	0.44	Ⅲ
	1.6	3 417			
	3.0	3 526			
Z7 排 7 号孔	0.2	3 212	3 424	0.46	Ⅲ
	1.6	3 497			
	3.0	3 563			

2)采场回采过程中矿体声波检测

采场回采过程中,对上述中深孔按前述方法继续进行声波检测,其第 3 次爆破(爆破切割槽 C5~C9 排)以及第 4 次爆破(爆破正排 Z1~Z3 排)后的声波检测数据及分析结果见表 5。

结合采场爆破参数,由表 5 可看出,爆破前采场矿体平均完整性系数为 0.45,属Ⅲ级中等完整。采场第 3 次爆破后,Z4 排 7 号检测孔(距离爆源 8.8 m)平均波速由爆破前的 3 349 m/s 降为 1 948 m/s,降低 41.8%,降幅较大,K 值由 0.44(Ⅲ级)降为 0.15(V 级);Z7 排 7 号检测孔(距离爆源 15.4 m)平均波速由爆破前的 3 424 m/s 降为 3 148 m/s,降低 8.1%,降幅较小,K 值由 0.46(Ⅲ级)降为 0.39(Ⅳ级)。采场第 4 次爆破后,Z4 排 7 号孔检测孔(距离爆源 2.2 m)平均波速由第

3 次爆破后的 1 948 m/s 降为 1 704 m/s,较爆破前平均波速降低 49.1%, K 值由 0.15(V 级)进一步降为 0.11(V 级);Z7 排 7 号检测孔(距离爆源 8.8 m)平均波速由第 3 次爆破后的 3 148 m/s 降

为 2 457 m/s,较爆破前平均波速降低 28.2%, K 值由 0.39(IV 级)进一步降为 0.24(V 级)。上述变化情况表明,距离爆源 4 排(8.8 m)范围内的矿体累积损伤程度较大,完整性为 V 级。

表 5 采场回采过程中声波检测结果

Table 5 Acoustic wave detection results in the process of stope mining

检测炮孔 编号	检测点距 孔口距离/m	爆破前波速 /(m/s)	第 3 次爆破后(切割槽 C5~C9 排)		第 4 次爆破后(正排 Z1~Z3 排)	
			波速/(m/s)	较爆破前波速变化率/%	波速/(m/s)	较爆破前波速变化率/%
Z4 排 7 号孔	0.2	3 104	950	-69.4	1 842	-40.7
	1.6	3 417	2 474	-27.6	1 574	-53.9
	3.0	3 526	2 421	-31.3	1 697	-51.9
	平均	3 349	1 948	-41.8	1 704	-49.1
	对应 K 值	0.44	0.15		0.11	
Z7 排 7 号孔	0.2	3 212	3 250	-1.2	2 440	-24.0
	1.6	3 497	3 109	-11.1	2 475	-29.2
	3.0	3 563	3 085	-13.4	2 456	-31.1
	平均	3 424	3 148	-8.1	2 457	-28.2
	对应 K 值	0.46	0.39		0.24	

2 采场回采数值模拟分析

2.1 几何模型建立

N3/7-3 采场为分段空场嗣后法二步骤回采采场,根据一 428 m 分段开采尺寸,建立数值模拟计算模型。模型尺寸为 73 m×42 m×50 m(长×宽×高),单元网格尺寸为 1 m×1 m×1 m(长×宽×高),模型共包含 153 300 个单元网格、162 282 个网格节点。计算时将模型划分为 8 个模块,A0 为充填体,A1~A8 为矿体,其中 A4、A5 分别表示采场前区和采场后区,各模块编号见图 2。模型主切面图用垂直于 y 轴的切面得

到,切面通过建模坐标点(21,5,25);模型侧切面图用垂直于 x 轴的切面得到,切面也通过建模坐标点(21,5,25);模型俯切面图用垂直于 z 轴的切面得到,俯切面也通过建模坐标点(21,5,25)。

2.2 边界条件和基本假设

数值计算时,将模型视为弹塑性体,破坏准则选择摩尔-库伦本构模型^[18],不考虑其软化硬化现象。模型位移边界条件为设定模型前后左右 4 个面位移为零,下表面为固定面,上表面不做约束,在其上施加相当于上部覆岩的垂直应力^[19]。应力条件为模型计算仅考虑重力应力场,其应力大小为^[20]

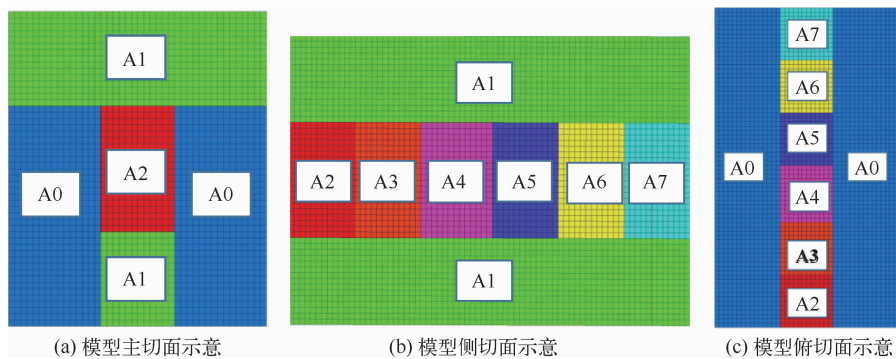


图 2 模型模块划分及编号

Fig. 2 Model module division and numbering

$$\sigma_z = \gamma H, \quad (2)$$

$$\sigma_h = \mu \gamma H / (1 - \mu), \quad (3)$$

式中: σ_z 为垂直应力, MPa; σ_h 为水平应力, MPa; μ 为上部覆岩层泊松比; γ 为上部覆岩层容重, kN/m^3 ; H 为埋藏深度, m。

—428 m 分段 N3/7-3 采场埋藏深度 520 m, 取上部覆岩容重为 27.93 kN/m^3 , 泊松比 0.3, 则根据式(2)~式(3)可得, 对模型施加的垂直方向应力为 14.52 MPa, 水平应力为 6.22 MPa。

2.3 模型介质物理力学参数

N3/7-3 采场周边上下为矿体, 左右两侧为充

填体, 在数值模拟过程中, 以现场岩体声波检测结果获得的完整性系数为基础进行折减计算。采场回采前采场前区完整性系数(K 值)为 0.44, 采场后区完整性系数(K 值)为 0.46; 采场前区回采后, 后区完整性系数降为 0.24。在模型计算中, 参数的选取按照以下原则进行计算: 密度、泊松比不作折减, 其余参数按计算所得的完整性系数进行折减^[21], 内摩擦角按 0.85 折减^[22], 铜金矿体岩石力学参数及模型各模块所用物理力学参数见表 6。

表 6 铜金矿岩石及模型计算所用物理力学参数

Table 6 Physical and mechanical parameters used in the calculation of copper-gold mine rocks and models

项目	回采情况	赋值 区域	密度/ (g/cm^3)	泊松 比(μ)	抗压 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩 擦角/ ($^\circ$)	弹性 模量/ GPa	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa
岩块	—	—	2.88	0.3	50	6	7	35	25	20.8	9.6
岩体	回采前	A1、A2、A3、A6、A7	2.88	0.3	22.5	2.70	3.15	29.8	11.25	9.36	4.32
		A0	2.10	0.2	3.0	0.30	0.50	25.0	0.55	0.31	0.23
		A4	2.88	0.3	22.0	2.64	3.08	29.8	11.00	9.15	4.22
		A5	2.88	0.3	23.0	2.76	3.22	29.8	11.50	9.57	4.42
	采场前区 回采后	A1、A2、A6、A7	2.88	0.3	22.5	2.70	3.15	29.8	11.25	9.36	4.32
		A0	2.10	0.2	3.0	0.30	0.50	25.0	0.55	0.31	0.23
		A3、A5	2.88	0.3	12.0	1.44	1.68	29.8	6.00	4.99	2.30
	采场后区 回采后	A1、A2、A7	2.88	0.3	22.5	2.70	3.15	29.8	11.25	9.36	4.32
		A0	2.10	0.2	3.0	0.30	0.50	25.0	0.55	0.31	0.23
		A3、A6	2.88	0.3	12.0	1.44	1.68	29.8	6.00	4.99	2.30

2.4 结果分析

2.4.1 应力分析

考虑到岩体和充填体的强度特性, 即岩体和充填体抗压强度远大于其抗拉强度; 因此在数值结果分析中, 主要分析采场在回采过程中周边围岩和充填体受拉应力情况。采用安全系数对围岩和充填体受力情况进行稳定性评判, 安全系数 = 极限荷载/工作荷载, 安全系数 ≥ 1.5 时视为稳定。

图 3 为采场前区回采后长度和宽度方向最大主应力云图。分析表明, 采场前区回采后, 顶板和充填体在采场宽度方向上承受的拉应力略高于采

场长度方向上承受的拉应力, 最大拉应力均为 0.019 MPa; 计算得出顶板和充填体的拉应力安全系数分别为 142.1 和 15.8, 远高于 1.5, 说明采场前区回采后顶板和充填体仍能够保持较高的稳定性。

图 4 为采场后区回采后长度和宽度方向最大主应力云图。结果显示, 采场后区回采后, 顶板和充填体所受的拉应力显著增加, 最大拉应力分别为 1.02 MPa 和 0.15 MPa; 计算得出顶板和充填体的拉应力安全系数分别为 2.7 和 2.0, 表明采场后区回采后顶板和充填体整体虽仍处于稳定状态, 但稳定性相对较低。

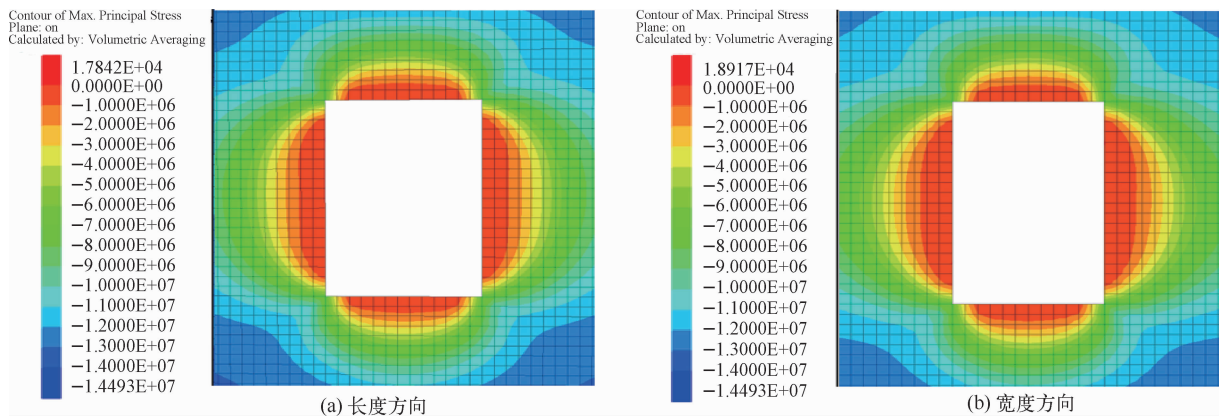


图3 采场前区回采后最大主应力云图

Fig. 3 Maximum post-mining principal stress in the fore stope area after stope mining

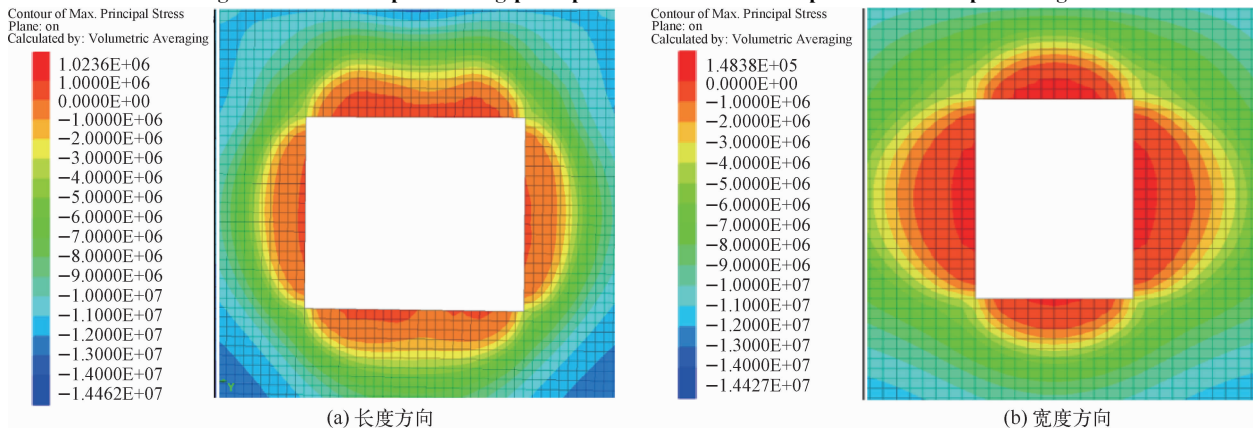


图4 采场后区回采后最大主应力云图

Fig. 4 Maximum post-mining principal stress in the back stope area after stope mining

2.4.2 塑性区分析

图5为采场前区回采后长度和宽度方向塑性区图。分析表明,采场前区回采后,空区顶底板及两端围岩和侧帮充填体主要表现为剪切变形。空区顶底板及两端围岩和侧帮充填体塑性变形区域较小,随着采场后区回采后,空区顶底板及两端围岩和侧帮充填体塑性变形区域显著增大,在爆破振动等扰动作用影响下存在垮落风险。建议二步骤

采场回采时,实行“快采快充”,减小围岩和充填体垮落的风险。

图6为采场后区回采后长度和宽度方向塑性区图。可以看出,当采场后区回采后,空区顶底板及侧帮充填体中既有剪切变形又有拉伸变形,但以剪切变形为主,拉伸变形主要位于紧邻空区的四周岩石和充填体中,更深部则为剪切变形区域。此外,沿采场长度方向,空区两端围岩主要表现为剪切变形。

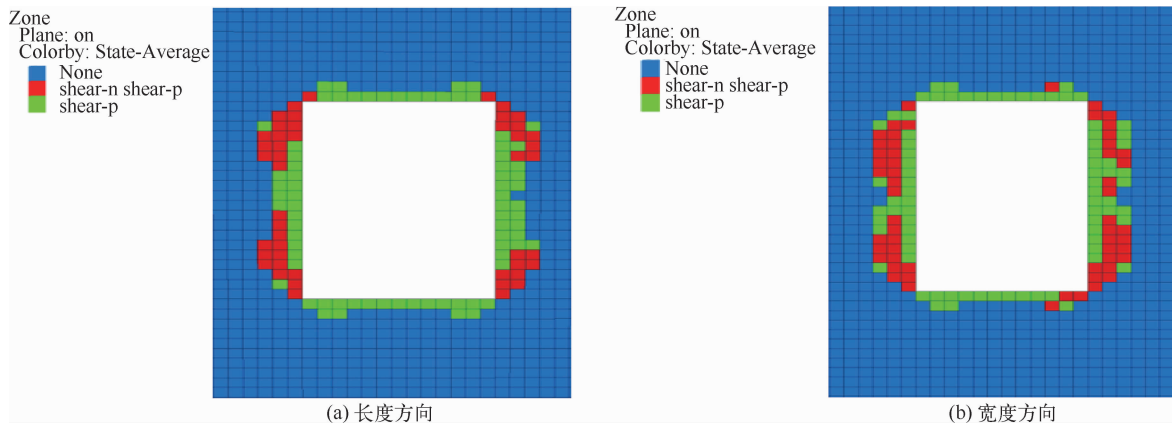


图5 采场前区回采后塑性区图

Fig. 5 Plastic zone in the fore stope area after stope mining

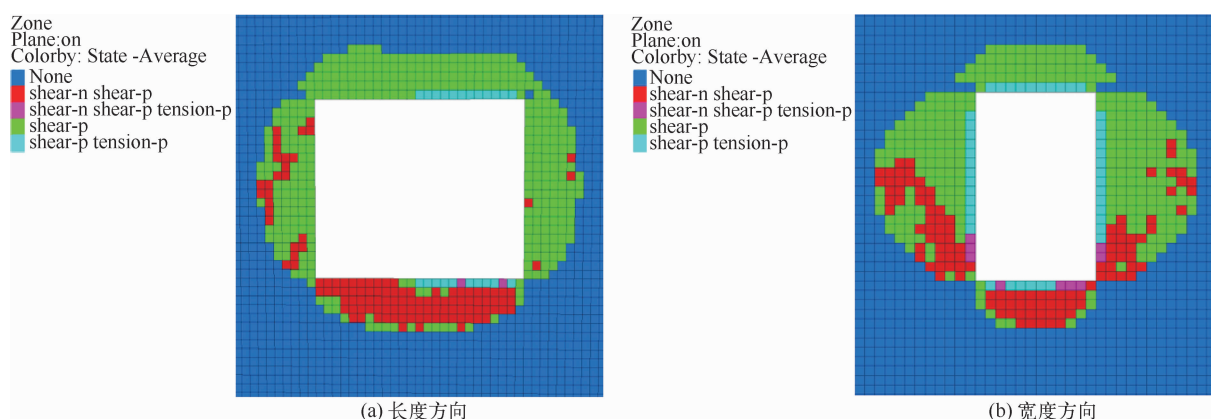


图6 采场后区回采后塑性区图

Fig. 6 Plastic zone in the back stope area after stope mining

3 结论

采用声波检测技术及FLAC3D数值模拟软件研究了分段空场嗣后充填法二步骤采场回采过程中岩体累积损伤情况,主要结论如下:

1) 采场爆破回采前岩体完整性属于Ⅲ级,经过3~4次爆破回采后,距离爆源4排(8.8 m)范围内的采场岩体累积损伤程度较大,完整性由Ⅲ级变为Ⅴ级。

2) 采场前区回采后,顶板和充填体所受的最大拉应力为0.019 MPa,拉应力安全系数分别为142.1和15.8;采场后区回采后,顶板和充填体所受的最大拉应力分别增大到1.02 MPa和0.15 MPa,拉应力安全系数为2.7和2.0。两回采阶段安全系数均大于1.5,二步骤采场回采过程中顶板和充填体整体处于稳定状态。

3) 采场前区回采后,空区顶底板及两端围岩和侧帮充填体塑性变形区域较小;采场后区回采后,空区顶底板及两端围岩和侧帮充填体塑性变形区域显著增大。建议二步骤采场回采时,实行“快采快充”,减小围岩和充填体垮落的风险。

参考文献:

- [1] 李国庆. 大断面砂岩隧道循环爆破作用下围岩累积损伤特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024: 14-19.
- [2] 宋肖龙, 高文学, 季金铭, 等. 爆破振动对隧道围岩累积损伤效应的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 54-62.
SONG Xiaolong, GAO Wenxue, JI Jinming, et al. Influence of blasting vibration on cumulative damage of surrounding rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 54-62(in Chinese).
- [3] 郑淞午. 单孔累进爆破引发的围岩累积损伤规律研

究[J]. 广东水利水电, 2025(1): 47-51.

ZHENG Songwu. Research on the cumulative damage law of surrounding rock caused by single hole progressive blasting[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2025(1): 47-51(in Chinese).

- [4] 于远祥, 沈鹏, 张永亮, 等. 动静组合荷载下隧道锚固围岩累积损伤效应与支护优化[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(6): 1095-1106.
YU Yuanxiang, SHEN Peng, ZHANG Yongliang, et al. Cumulative damage effect and support optimization of tunnel anchored surrounding rock under coupled dynamic-static loads[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(6): 1095-1106(in Chinese).
- [5] 徐钟, 邓辉, 卢平, 等. 钻爆施工隧道围岩爆破损伤累积效应研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 70-76.
XU Zhong, DENG Hui, LU Ping, et al. Study on cumulative blasting damage effect on surrounding rock of tunnel excavated with drilling-blasting method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 70-76(in Chinese).
- [6] 杨小林, 张光然, 褚怀保, 等. 超深竖井爆破掘进围岩损伤规律数值模拟研究[J]. 爆破, 2024, 41(2): 8-14.
YANG Xiaolin, ZHANG Guangran, CHU Huaibao, et al. Numerical simulation study on damage law of surrounding rock in blasting excavation of ultra-deep shaft[J]. Blasting, 2024, 41(2): 8-14(in Chinese).
- [7] 刘蒙. 循环爆破开挖下洞室围岩损伤累积及松动圈扩展规律研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023: 47-59.
- [8] 吴志超, 龚敏, 仇安兵, 等. 硬岩地下洞室工程爆破振动与围岩损伤范围相关性研究[J]. 爆破, 2023, 40(1): 160-169.
WU Zhichao, GONG Min, QIU Anbing, et al. Correlation study between blasting vibration and surrounding rock damage range of hard rock under-

- ground cavern engineering[J].Blasting,2023,40(1):160-169(in Chinese).
- [9] 杨江坤,孙刚友,任赛.某铀矿上向水平分层开采高度优化研究[J].铀矿冶,2024,43(4):33-43.
YANG Jiangkun, SUN Gangyou, REN Sai. Optimization for mining height of upward horizontal slicing mining in a uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4):33-43(in Chinese).
- [10] 左壮壮.露天矿爆破作用下邻近巷道围岩的振动控制及损伤规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023:11-13.
- [11] 胡世超,宫国慧,马东,等.弓长岭井下矿巷道围岩爆破损伤控制研究[J].中国矿山工程,2022,51(4):34-39.
HU Shichao, GONG Guohui, MA Dong, et al. Research on blasting damage control of the drift surrounding rock of Gongchangling underground mine [J]. China Mine Engineering, 2022, 51(4):34-39(in Chinese).
- [12] 栗盼平.阿舍勒深部巷道爆破围岩累积损伤规律研究[J].新疆有色金属,2024,47(3):14-16.
LI Panping. Study on the cumulative damage law of blasting surrounding rock in deep roadway[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2024, 47(3):14-16(in Chinese).
- [13] 黄江,陈士海,曾凡福,等.多次爆破作用下巷道围岩累积损伤演化与破裂特征[J].华侨大学学报(自然科学版),2023,44(1):29-37.
HUANG Jiang, CHEN Shihai, ZENG Fanfu, et al. Cumulative damage evolution and fracture characteristics of tunnel surrounding rock under multiple blasting action[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2023, 44(1):29-37(in Chinese).
- [14] 秦旭忠,孙刚友,侯志永,等.棉花坑矿井破碎矿体回采方案研究[J].铀矿冶,2024,43(3):25-34.
QIN Xuzhong, SUN Gangyou, HOU Zhiyong, et al. Research on stoping scheme of broken orebody in Mianhuakeng mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):25-34(in Chinese).
- [15] 赖祖豪.声波检测技术在石雷钨矿采空区稳定性分析中的应用研究[D].赣州:江西理工大学,2020:75-76.
- [16] 王睿,袁崇洋,党发宁,等.基于完整性系数的声波法国岩松动圈测试[J].公路交通科技,2018,35(6):74-79.
WANG Rui, YUAN Dongyang, DANG Fanning, et al. Testing loose circle of surrounding rock using a-coustic method based on integrity coefficient [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(6):74-79(in Chinese).
- [17] 宗绪,郭超,陈正林,等.一发双收钻孔声波检测技术在五老峰隧道的现场应用[J].采矿技术,2022,22(3):190-193.
ZONG Xu, GUO Chao, CHEN Zhenglin, et al. Field application of swave detection technology in Wu-laofeng tunnel [J]. Mining Technology, 2022, 22(3):190-193(in Chinese).
- [18] 沈玉众,郝志华,陈勇,等.基于抗剪强度折减系数法的某露天铀矿边坡角优化研究[J].铀矿冶,2021,40(2):102-107.
SHEN Yuzhong, HAO Zhihua, CHEN Yong, et al. Optimization of slope angle of an open-pit uranium mine based on strength reduction method[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(2):102-107(in Chinese).
- [19] 马元,宋锦虎,付浩.盾构施工对土体应力扰动过程的三维数值分析[J].铁道建筑,2012(11):57-60.
MA Yuan, SONG Jinhu, FU Hao. Three-dimensional numerical analysis on disturbance process of soil stress induced by shield-driving tunnel [J]. Railway Engineering, 2012(11):57-60(in Chinese).
- [20] 李俊平,连民杰.矿山岩石力学[M].北京:冶金工业出版社,2013:140-144.
- [21] 武文治,褚召伟,孙东.用基于岩体损伤的强度折减法进行采场稳定性评价[J].山东工业技术,2014(22):64-65.
WU Wenzhi, CHU Zhaowei, SUN Dong. Stope stability evaluation by strength subtraction based on rock mass damage [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2014(22):64-65(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国标准出版社,2013:21-23.

Cumulative Damage of the Waiting Mining Body in the Two-step Mining Area of a Copper-Gold Ore Body in a Mine

CHEN Zhiqiang, ZHANG Yujian, ZHAO Yibo

(Beijing JCHX Mine Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 101500, China)

Abstract: In response to the cumulative damage of rock mass during the two-step mining of copper-gold ore body using the sub-level stoping with delayed backfill method in a mine, acoustic wave detection technology was used to collect acoustic wave data of the ore body before blasting and during the blasting and mining process, and the ore body integrity coefficient results were combined with

