

基于声波检测与数值模拟的银山矿地下开采稳定性研究

丁家铎¹,王道林^{2*},李红鹏¹,王海森²,陈秋松³

(1. 江西铜业集团银山矿业有限责任公司; 2. 中南大学资源与安全工程学院;
3. 北京科技大学资源与安全工程学院)

摘要:针对井下循环爆破扰动下巷道或采场累积损伤的工程问题,综合运用岩体声波测试技术与Flac^{3D}数值模拟对银山矿采场稳定性进行分析。通过剖析材料疲劳损伤机理和岩体声波检测原理,建立采场岩体完整性分级及累积损伤判别方法。基于多个采场现场声波测试结果,根据爆破前后岩体完整性及累积损伤情况对充填体稳定性进行表征。通过建立Flac^{3D}采场开挖模型,对采场稳定性进行进一步评价与分析。声波检测结果表明,爆破开采前岩体多数为Ⅲ级,爆破开采后邻近岩体完整性破坏严重,多降至Ⅳ级或Ⅴ级。数值模拟结果显示,模型应力随深度增加而增大,底部达最大值。在采场前区、中区、后区边角处压应力安全系数低,处于不稳定状态。采场前区回采后,充填体和岩石交界面压应力集中不稳定,后区回采后顶板和充填体以压胀破坏为主。研究成果为矿山优化爆破方案、加强支护措施提供了科学依据,对保障矿山安全生产、提高经济效益具有重要意义,也为其他类似矿山的爆破作业提供了参考和借鉴。

关键词:地下开采;爆破扰动;声波检测;数值模拟;现场试验;充填体;稳定性

中图分类号:TD853

文章编号:1001-1277(2025)07-0072-07

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250711

引言

在地下矿山开采中,爆破是关键环节,其效果直接关乎生产效率与安全。江西铜业集团银山矿业有限责任公司(下称“银山矿”)作为大型地下铜硫铅锌矿山^[1-3],矿区南北长约2.7 km,东西宽约2.5 km,分为北山铅锌区段、九龙上天铅锌区段、银山铅锌区段、九区铜金硫区段、西山铜金硫区段、银山西铜金硫区段6个区段。其中,九区和西山铜金硫区段地质资源量/储量为9 919万t^[4-5]。九区铜金硫区段主矿体厚度20~60 m,最大厚度92 m;西山铜金硫矿体厚度2~46 m,最大厚度83 m。设计采用分段空场嗣后充填采矿法回采。随着电子雷管的推广应用,银山矿于2022年7月全面启用电子雷管进行井下爆破作业。然而,初期因缺乏应用经验,出现了诸多问题。例如:掘进爆破作业频繁拒爆,循环进尺锐减;采场上向中深孔爆破作业悬顶事故多发,对安全生产构成严重威胁;采场片帮冒落及中深孔爆破对后排未爆中深孔和眉线的破坏情况仍普遍存在。这些问题严重影响了矿山的正常生产。高魁等^[6]研究了爆破扰动松软煤层的力学特征及爆破振动效应对巷道围岩稳定性的影响,揭示了井下爆破扰动构造带机理。邓飞等^[7]研究了深孔

爆破对巷道围岩稳定性的影响,以采场实测振动信号为依据,运用Flac^{3D}软件^[8-9]对爆破振动过程中巷道围岩的应力场、位移场、塑性区范围和质点振速随时间的变化特征进行数值模拟分析,结果表明,爆破振动对巷道顶板的稳定性有较大影响,在其作用下巷道的应力极值与集中区域均发生明显变化,顶、底板产生明显位移。

为解决这些问题,本研究采用现场检测、理论分析和数值模拟相结合的方法^[10-12],深入研究基于电子雷管应用的井下爆破技术,探究爆破开采对于巷道稳定性的影响,旨在通过优化爆破参数、改进起爆网络联接技术和装药技术等措施,提高爆破效果,降低爆破振动危害,确保采场和巷道的稳定性,从而实现矿山的安全高效生产。本次研究成果不仅为银山矿的生产提供技术支持,也为其他类似矿山的爆破作业提供参考和借鉴,具有较强实践参考意义。

1 矿山工程概况

银山矿采矿方法为分段空场嗣后充填采矿法^[13-14],凿岩设备采用进口电动液压Simba1254型中深孔凿岩台车,钻孔直径76 mm,炮孔上向扇形布置。

采场布置分2种情况。当矿体厚度约50 m时,采

收稿日期:2025-03-10; 修回日期:2025-04-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52274151)

作者简介:丁家铎(1993—),男,工程师,从事金属矿山采矿技术研究工作;E-mail:738615783@qq.com

场沿走向布置,长度为矿体厚度50 m,矿房、矿柱两步骤开采,一步骤回采矿房,充填后二步骤回采矿柱。矿房宽12 m,矿柱宽18 m,中段高度50 m,分3个分段,最上一个分段高度20 m,其他2个分段均为15 m。矿体厚度为20~50 m时,矿块垂直走向布置,采场长度一般为矿体厚度(现阶段采场长度一般不超过30 m)。矿体厚度为6~20 m时,矿块沿走向布置,长度50~60 m(现阶段采场长度一般不超过30 m)。

研究试验区域为N3矿体,位于九区铜金硫区段的北侧,顶、底板围岩主要为千枚岩,其次为火山碎屑岩、熔岩和次火山岩,结构较紧密,根据岩石物理力学测试结果,其平均抗压强度27.54~71.45 MPa。矿岩物理力学性能参数:铜矿石密度为2.88 t/m³,废石密度2.6 t/m³,松散系数均为1.6,铜矿石和铅锌矿石的松散密度均为1.83 t/m³,废石的松散密度为1.7 t/m³。

随着银山矿矿石采出,采场形成采空区,有些采场

长时间持续出现垮塌,甚至与相邻采场连通,有些凿岩巷形成时相对稳固,支护后在采场频繁中深孔爆破作业的影响下,受到不同程度的破坏。一方面,影响凿岩巷装药爆破和出矿作业的安全性;另一方面,邻近眉线的前排中深孔受到破坏,导致装药困难。

采场发生采空区塌落、冒顶、片帮的因素很多,如采场结构参数、矿岩的基本性质、岩体的结构和构造、邻近采场作业造成的地质扰动等,但开采作业中的频繁爆破振动对采场造成的冲击破坏影响巨大。因此,本次研究中重点关注分步骤开采中频繁爆破振动对于巷道稳定性的影响。

2 井下围岩声波检测分析

2.1 声波检测位置

试验检测区域为N1/4勘探线沿2采场、N3/10-3采场和N3/7-3采场,详细位置见图1。

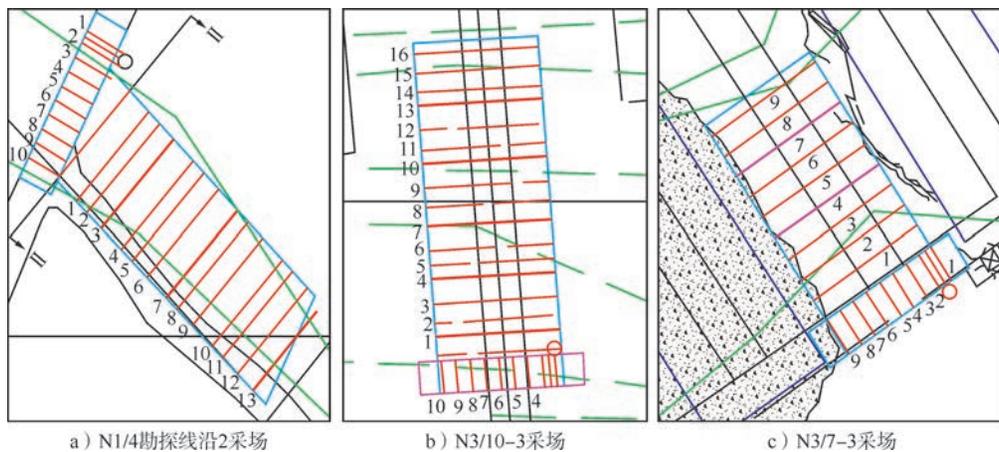


图1 声波检测位置平面图

Fig. 1 Plan view of acoustic emission detection locations

为了更清楚地体现同一分段和上下分段声波检测孔相对位置关系,绘制了声波检测孔相对位置三维图,见图2。

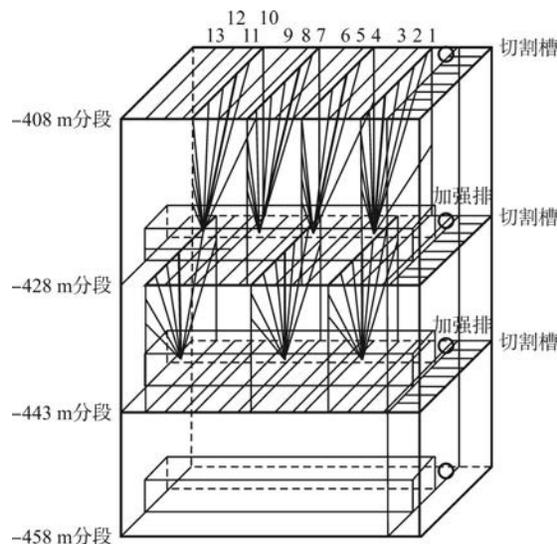


图2 采场声波检测孔布置三维示意图

Fig. 2 3D schematic of borehole layout for stope acoustic emission detection

2.2 岩体声波检测原理

本次研究井下声波检测所用仪器为TGM-G303型岩石声波测试仪^[15],其检测原理基于地质勘探井原理中的折射法,利用声波在不同介质中的传播特性差异进行工作。钻孔中,换能器发出的声波遇到岩体结构面(如节理、裂隙等)时,传播路径和速度会改变。完整岩体中声波传播相对稳定,速度较快;存在裂隙等缺陷的岩体,声波会发生折射、反射和散射,传播速度减慢且能量衰减。通过测量声波从发射到接收的时间差,结合钻孔尺寸和换能器间距等参数,可计算声波在岩体不同深度的传播速度,进而依据速度变化推断岩体完整性和内部结构变化。在银山矿未爆破前检测可获取原始岩体声波速度基准数据,爆破后再次检测,对比分析速度变化,判断爆破对岩体造成的损伤程度和范围。对于充填体检测,在相邻采场凿岩巷道向充填体钻凿声波检测孔,同样依据声波传播原理,监测充填体在爆破影响下的声波速度改变,分析频繁爆破振动对充填体强度和稳定性的影响,为采场稳定性评价提供关键数据支持,从而指导矿山安全生产和采矿工艺优化。

2.3 材料疲劳损伤机理

本次研究基于材料疲劳损伤机理和岩体声波检测原理,巷道开采过程中每次爆破产生的应力波相当于一次循环荷载,对岩体造成一定程度的损伤。随着爆破次数的增加,岩体中的损伤逐渐累积,符合线性疲劳累积损伤理论(Palmgren-Miner理论)^[16],在不同应力幅的循环荷载作用下,材料的疲劳损伤可以线性累加,详见式(1)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{损伤定义: } D_i = \frac{1}{N_i} \\ \text{损伤累积: } D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \\ \text{临界损伤值: } D_{CR} = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: D_i 为某应力水平 S_i 下的疲劳损伤; N_i 为应力水平 S_i 下的疲劳寿命; n_i 为应力水平 S_i 下的相应循环次数。

通常称 n_i/N_i 值为循环比。该研究中爆破产生的振动频率和爆破次数共同构成了对岩体的加载频率,前次爆破造成的损伤会降低岩体抵抗后续爆破破坏的能力,成为后续爆破破坏效应的加载历史。

2.4 检测方案与结果分析

在采场各分段未爆破前及每次爆破后,对声波检测孔进行检测。充填体检测是通过在相邻采场凿岩巷道内向充填体钻凿声波检测孔,检测充填体在二步骤回采过程中受频繁爆破扰动影响下的稳定性变化。检测岩体和充填体时将声波测试仪换能器置入充填体检测孔内,按岩体检测类似步骤进行注水、测试、回水操作,记录声波数据。检测装置工作原理见图3,声波检测点详细位置见表1。

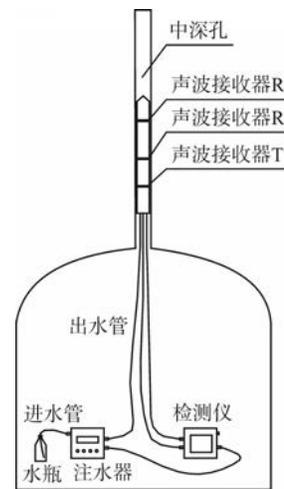


图3 检测装置工作原理示意图

Fig. 3 Working principle diagram of testing device

基于声波检测结果,采用岩体完整性系数 k 对银山矿采场岩体进行分级。采场岩体共分5级,对应的 k 值为:I级岩体完整性好, k 值大于0.75;II级岩体完

表1 N3/10-3采场各监测点位置布置

Table 1 Arrangement of the location of each monitoring point in Stope N3/10-3

地点	监测点编号	位置	坐标	监测内容
N1/4勘探线沿2采场	1	前区顶板中部	(25.5, 75, 40)	z方向位移
	2	中区顶板中部	(25.5, 37.5, 40)	z方向位移
	3	后区顶板中部	(25.5, 48.5, 40)	z方向位移
N3/10-3采场	4	前区顶板中部	(26, 28.5, 35)	z方向位移
	5	中区顶板中部	(26, 40.5, 35)	z方向位移
	6	后区顶板中部	(26, 54.5, 35)	z方向位移
N3/7-3采场	7	前区顶板中部	(21, 30.5, 35)	z方向位移
	8	后区顶板中部	(21, 43.5, 35)	z方向位移

完整性较好, k 值 0.55 ~ 0.75; III 级岩体中等完整, k 值 0.40 ~ 0.55; IV 级岩体较破碎, k 值 0.25 ~ 0.40; V 级岩体破碎, k 值小于 0.25。各个采场开采前后分级结果见表 2。

表 2 开采前后声波检测岩石完整性结果

Table 2 Rock integrity results from pre/post-mining acoustic emission detection

地点	检测炮孔编号	开采前 k 值	开采前完整性级别	开采后 k 值	开采后完整性级别
N1/4 勘探线沿 2 采场	01-05	0.51	III		
	04-07	0.46	III		
	07-07	0.37	IV	0.16	V
	10-07	0.51	III	0.15	V
	13-07	0.49	III	0.28	IV
N3/10-3 采场	01-05	0.48	III	0.26	IV
	04-05	0.51	III	0.33	IV
	07-05	0.50	III	0.44	III
	10-02	0.50	III	0.46	III
N3/7-3 采场	04-07	0.45	III	0.22	V
	07-07	0.48	III	0.22	V
	10-02	0.45	III	0.33	IV

由检测结果可知,多次开采产生的频繁爆破振动导致岩石的完整性等级下降,岩石完整性系数 k 值相较开采前明显减小。主要原因是爆破瞬间产生的强大应力波在岩体内高速传播,当应力波抵达岩体已有裂隙、节理等薄弱部位时,会引发应力集中现象,造成裂隙进一步扩展,同时频繁振动使得岩体损伤累积,导致岩体完整性系数下降,岩体等级下滑。

3 分步开采频繁爆破振动下采场稳定性数值模拟

3.1 采场模型建立

本次数值模拟主要计算采场顶板围岩在多次爆

破作用开采后的稳定情况,根据 N1/4 勘探线沿 2 采场、N3/10-3 采场和 N3/7-3 采场的开采尺寸,基于 Falc^{3D} 软件建立数值模拟计算模型^[17]。模型尺寸(长×宽×高)为 74 m×52 m×60 m,共包含 230 880 个单元,242 475 个节点。建模采用拉格朗日法将开采区域划分成四边形网格,在边界和巷道周围等不规则处也可用三角形网格拟合,将研究区域视为连续介质,重点研究开采过程中岩体的力学、位移、塑性区状态及其变化情况。采场数值模型三维图见图 4。

3.2 边界条件假设及模型参数

在采矿过程中,矿房本身是一个复杂的力学平衡模型,包含许多不确定因素。数值模拟结果既要能反

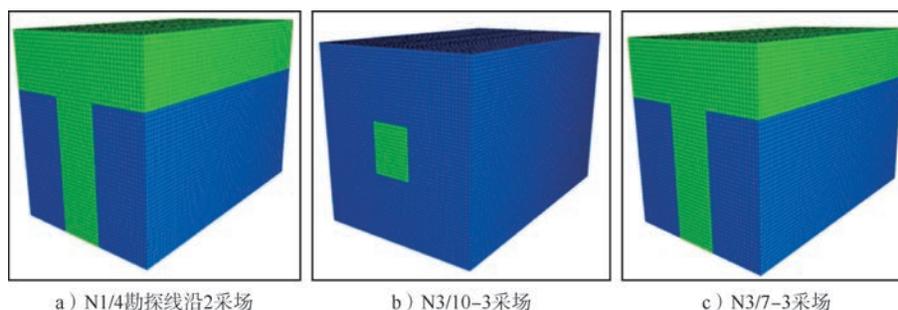


图 4 采场数值模型三维图

Fig. 4 3D diagram of numerical model of stope

映岩体的基本力学特性及矿山开采基本过程,比较接近实际情况,又不能使建立的力学模型过于复杂。因此,有必要对岩体介质性质、计算模型、矿山地质条件、受力条件、采矿工艺及采矿方法等进行合理假设^[18-19]。

1) 矿岩性质假设。假设矿岩为各向同性、均质且符合莫尔-库仑弹塑性模型的介质。其自重应力场如下:

$$\sigma_v = \gamma h \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} \gamma h \quad (3)$$

式中： σ_v 为自重应力(MPa)； γ 为岩体的容重(kN/m³)； h 为距离地表的深度(m)； σ_h 为水平应力(MPa)； ν 为上覆岩层泊松比。

综合现场实测认为,由于模拟开采区域的构造应力现象不明显,因此只考虑自重应力场的影响。

2)模型边界条件假设。模型边界条件包括位移边界条件和应力边界条件。其中,位移边界条件为:对模型前后左右4个面设置为位移边界条件;模型前后2个面,设置 y 方向的位移为0;模型左右2个面,设置 x 方向的位移为0;模型底部设置为固定边界条件,即底部位移设置为 $x=0,y=0,z=0$,模型上表面施加相当

于上部覆岩的垂直应力。

3)模拟对象性质假设。将模拟对象视为连续介质,不考虑其软化硬化现象,主要考虑自重应力的影响,即对模型施加自重应力。银山矿矿石混合井井口标高为112 m,数值计算模型顶部标高设定为-408 m,则计算模型埋深为520 m。矿石密度2.88 g/cm³,废石密度2.82 g/cm³。数值模型上部岩石自重应力取矿岩密度平均值进行计算,即2.85 g/cm³,泊松比0.32。

根据式(2)、式(3)计算,对模型施加竖直方向的应力为14.52 MPa,水平应力为6.22 MPa。模型参数参考见表3。

表3 矿体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the orebody

密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
2.88	0.32	50	6	7	35	25	23.15	9.5

3.3 模拟结果分析

N1/4勘探线沿2采场模型、N3/10-3采场模型与在N3/7-3采场模型初始条件下计算平衡后,得到其最大主应力和最小主应力三维分布云图,结果见图5。

由图5可知:3个采场模型所受最大主应力和最小主应力总体上均随深度的增加而增大,均在模型底部出现最大值,符合地应力分布的一般规律。

模拟得出的N1/4勘探线沿2采场模型、N3/10-3

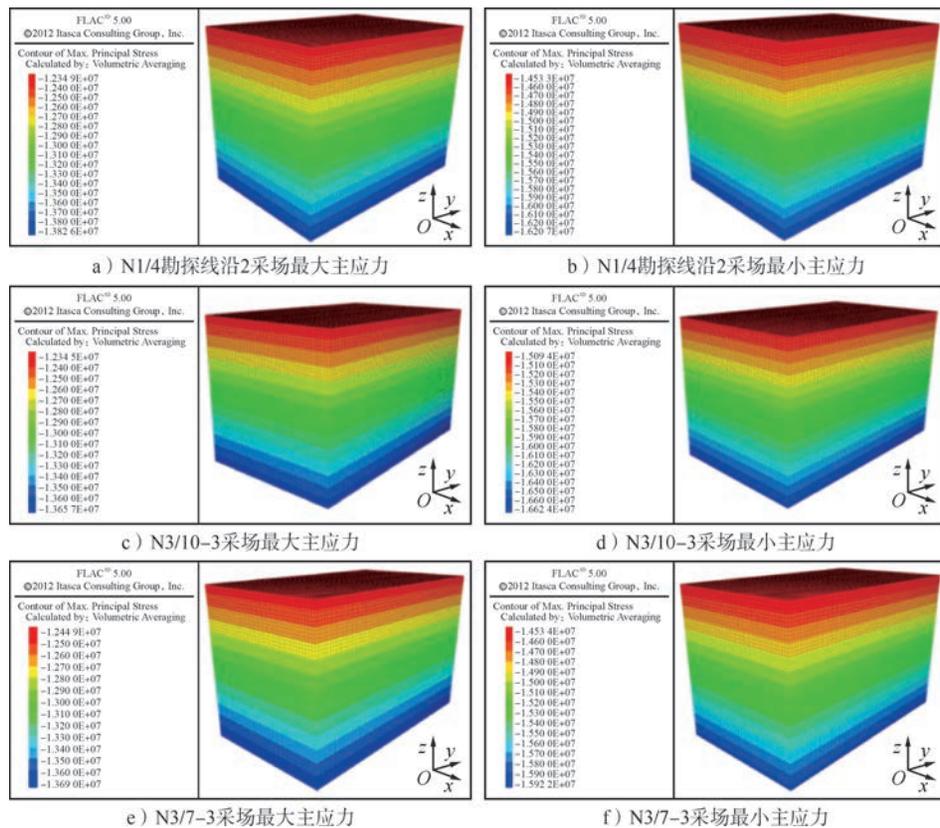


图5 各采场模型初始条件下计算平衡后的最大主应力和最小主应力云图

Fig. 5 Maximum and minimum principal stress contour diagram balanced by calculation under initial conditions for each stoppe model

采场模型与在N3/7-3采场模型不同区域回采后的应力分布云图见图6。由图6可知:N1/4勘探线沿2采场和N3/10-3采场回采过程中,采场前区、中区、后区

边角处压应力安全系数较小,处于不稳定状态。当采场中区及后区回采后,顶板受到拉应力,拉应力安全系数均大于1.5,表明顶板处于稳定状态。随采场开

采规模的增大,沿采场宽度方向围岩塑性变形范围显著高于沿采场长度方向围岩塑性变形范围,表明随着采场的不断回采,采空区侧帮在回采过程中更容易发生垮落。N3/7-3采场前区回采后,顶板和充填体所受的拉应力安全系数均大于1.5,顶板和充填体不会发生拉断破坏,以压胀破坏为主。前区回采后,最大压应力区域主要分布于采场边角处,最大压应力为24.79 MPa,该区域范围为充填体和岩石的交界面,该处岩石和充填体均受较大压应力集中,处于不稳定状态。

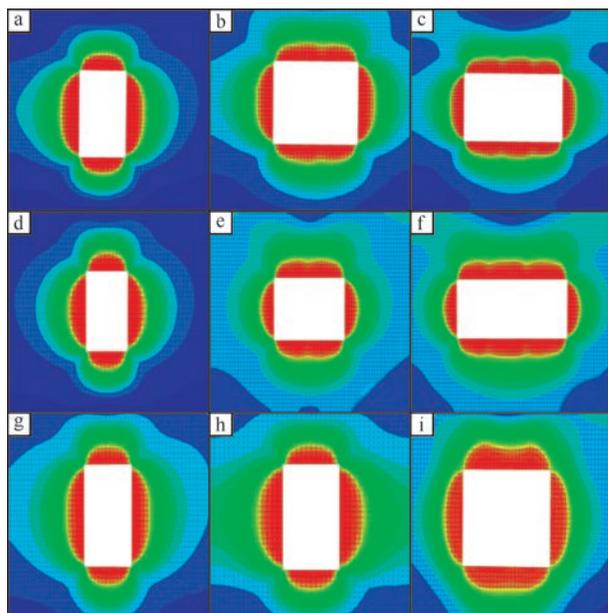


图6 各采场不同区域回采后的应力分布云图

Fig. 6 Post-extraction stress contour diagram in different zones of each stope

与声波检测结果进行对比,检测结果显示,N1/4勘探线沿2采场和N3/10-3采场回采过程中周围岩体完整性进一步下降,节理裂隙进一步扩展,岩体完整性系数 k 值受开采影响最大变化从0.51下降至0.15,最小变化从0.50下降至0.46,80%围岩受开采影响完整性级别下降。这与图6-c、f、g中的应力集中导致周围岩体变形加大相契合,共同表明该区域稳定性较差,需要进一步优化矿山爆破与开采方案。

4 结论

1)通过对N1/4勘探线沿2采场、N3/10-3采场、N3/7-3采场3个采场爆破前后进行声波检测发现,爆破前采场岩体完整性系数 k 值主要为0.45~0.51,属

Ⅲ级岩体,局部 k 值为0.37,达到Ⅳ级岩体,裂隙较发育,受频繁爆破振动影响较大。爆破破坏影响范围主要在邻近装药孔的4排炮孔内,破坏效应为导致岩体结构完整性破坏,降至Ⅳ级或Ⅴ级。说明频繁爆破振动对岩体结构完整性影响显著,尤其是在装药孔附近区域。

2)利用Flac^{3D}软件对采场进行数值模拟,结果显示各采场在开采过程中应力和塑性区变化规律明显。例如:N1/4勘探线沿2采场和N3/10-3采场,前区、中区、后区边角处压应力安全系数小,不稳定;中区及后区回采后顶板受拉应力,但安全系数大于1.5,稳定;采空区侧帮在开采中易垮落。N3/7-3采场前区回采后,充填体和岩石交界面压应力,集中不稳定,后区回采后顶板和充填体以压胀破坏为主。因此,受频繁爆破振动的影响,巷道稳定性有一定下降。

3)本研究成果为银山矿及类似矿山提供了全面的采场稳定性评价方法,声波检测与数值模拟相结合能准确掌握巷道稳定性状态,为优化爆破方案、采取有效支护措施提供依据,对保障矿山安全生产、提高经济效益具有重要意义,也为矿山开采技术发展提供了理论和实践参考。

[参考文献]

- [1] 李红鹏,陈秋松.银山矿千枚岩破坏特征及地压分布规律分析[J].黄金,2021,42(9):47-51.
- [2] 丁家铎,李红鹏,宋子安,等.银山矿超细全尾砂精细絮凝沉降实验研究[J].矿产保护与利用,2024,44(6):71-79.
- [3] 杨斌彭,杨牧,林德松,等.江西银山铜铅锌矿床热液对流与蚀变矿化分带机制[J].桂林工学院学报,2004,24(4):395-401.
- [4] 张杰,李承栋,史俊波,等.江西银山多金属矿床中黄铁矿黄铜矿化学特征[J].四川地质学报,2017,37(1):40-43.
- [5] 张明记,李晓峰,韦星林,等.江西德兴银山矿床辉绿岩锆石LA-ICP-MSU-Pb定年及其地质意义[J].矿物学报,2016,36(1):25-33.
- [6] 高魁,刘泽功,刘健,等.爆破扰动松软煤层对巷道围岩稳定性的影响[J].振动与冲击,2018,37(15):136-142.
- [7] 邓飞,肖伟,程秋亭,等.基于BP神经网络的爆破参数优化[J].矿业研究与开发,2016,36(4):19-21.
- [8] 蒋中明,熊小虎,曾铃.基于FLAC^{3D}平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J].岩土力学,2014,35(3):855-861.
- [9] 王义海,李强,袁路成,等.小东沟金矿巷道全断面锚网支护参数优化研究与应用[J].黄金,2024,45(12):43-46.
- [10] 徐钦明,王杰春,王猛.陷落柱预破碎爆破数值模拟研究[J].煤矿爆破,2024,42(4):19-22.
- [11] 杨仁树,丁晨曦,杨立云,等.岩石爆破基础理论研究进展[J].工程爆破,2024,30(5):11-19.
- [12] 周传波,吕国鹏,蒋楠.爆破振动效应研究若干进展[J].工程爆破,2024,30(5):61-74.

- [13] 王正奇,李广涛,廉柏栋.拉拉铜矿堑沟式分段空场嗣后充填采矿法及胶结矿柱结构参数研究[J].采矿技术,2023,23(3):34-37.
- [14] 曹文钢.铜绿山矿分段空场嗣后充填采矿法工业试验研究[J].现代矿业,2023,39(12):90-93.
- [15] 杨红霞.地震折射波法在浅覆盖区地质填图中的方法研究[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(21):138-140.
- [16] 冯胜程,赵亚丽,程靳.线性疲劳损伤累积理论的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(5):608-610.
- [17] 雷顺林,李丽匣,付坤,等.基于矿石真实破裂数值模拟的层压粉碎适宜料层厚度研究[J].矿产保护与利用,2023,43(3):120-126.
- [18] 王道林,田明华,朱德彬,等.基于多维云模型的深井岩爆倾向综合评价[J].黄金,2024,45(2):1-7.
- [19] 朱欣荣,吕力行.预应力锚杆布置参数与边坡安全系数相关解算[J].矿产保护与利用,2015,35(2):18-21.

Study on the stability of underground mining in the Yinshan Mine based on acoustic emission detection and numerical simulation

Ding Jiaduo¹, Wang Daolin², Li Hongpeng¹, Wang Haisen², Chen Qiusong³

(1. *Yinshan Mining Co., Ltd., Jiangxi Copper Corporation Limited;*

2. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University;*

3. *School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing*)

Abstract: In response to the engineering problem of accumulated damage to roadways or stopes under underground cyclic blasting disturbances, this paper comprehensively applies rock mass acoustic emission testing technology and Flac^{3D} numerical simulation to analyze the stability of the Yinshan Mine stopes. By analyzing the fatigue damage mechanism of materials and the principle of rock mass acoustic emission detection, a classification method for the integrity of rock mass in the stopes and a method for distinguishing cumulative damage are established. Then, based on the acoustic emission test results from multiple stopes on-site, the stability of the backfill is characterized according to the integrity and cumulative damage of the rock mass before and after blasting. By establishing a Flac^{3D} stope excavation model, the stability of the stopes is further evaluated and analyzed. The acoustic emission detection results show that before blasting, the rock mass is mostly at Level III, and after blasting, the integrity of the adjacent rock mass is severely damaged, mostly reduced to Level IV or V. The numerical simulation results show that the stress in the model increases with depth, reaching the maximum at the bottom. The stress safety factor at the corner areas of the front, middle, and rear zones of the stopes is low, indicating instability. After the mining in the front area of the stopes, the pressure stress concentration at the interface between the backfill and the rock is unstable, and after the mining in the rear area, the roof and backfill are mainly subject to compressive swelling failure. The research results provide a scientific basis for optimizing the blasting plan and strengthening support measures in the mine, which is of great significance for ensuring the safety and production of the mine and improving economic benefits. It also provides references for blasting operations in similar mines.

Keywords: underground mining; blasting disturbance; acoustic emission detection; numerical simulation; field test; backfill; stability