

基于微震监测的自然崩落采矿法采场顶板崩落规律研究

杨佳楠^{1,2}, 张 君^{1,2}, 黄艳伟^{1,2}, 刘芳芳^{1,2}

(1. 长沙迪迈科技股份有限公司; 2. 长沙施玛特迈科技有限公司)

摘要:自然崩落采矿法开采过程中,顶板崩落情况直接影响矿山的安全生产。为了研究某矿山自然崩落采矿法开采过程中顶板的崩落规律,基于矿山微震监测数据,从微震事件的时空演化特征、能量指数与累积视体积关系曲线2方面进行分析。结果表明:在拉底爆破的影响下,受到扰动的范围主要为首采区中心拉底区域上层顶板;随着时间推移,拉底空间变大,岩体破裂在空间上逐渐向上发展,同时,岩体崩落高度逐渐降低;随着空间高度的增加,可能发生大尺度岩体破裂的时间逐渐推迟。研究结果可为后期顶板崩落预警工作提供理论基础。

关键词:自然崩落采矿法;微震监测;顶板崩落;爆破扰动;拉底爆破;岩体破裂

中图分类号:TD853.36+4

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)03-0040-04

doi:10.11792/hj20250307

引言

自然崩落采矿法因生产成本低、工艺简便在国内得到了广泛应用,但随着开采空区跨度的增大,巷道顶板发生崩落的几率也逐渐增大^[1]。在开采过程中,地质条件、巷道断面形状、采动等因素都会使矿体巷道顶板发生崩落,但崩落速度、崩落面积较难把控,崩落速度快、大面积崩落将严重威胁井下人员与设备的安全^[2-7]。因此,及时掌握巷道顶板崩落规律,结合出矿量控制顶板崩落情况对安全生产具有极其重要的意义。

近年来,微震监测技术因其大尺度、高精度、安装简便等优点在海内外矿山领域得到了广泛应用^[8-14]。1986年,北京门头沟煤矿率先将微震监测技术用于监测矿山顶板微破裂事件,这是多通道微震监测系统在内地地下矿山的首个应用案例^[15];1993年,CHEN等^[16]将微震监测技术用于自然崩落采矿法开采中的顶板崩落监测,并通过监测所得的岩爆数据证明了微震监测技术可用于自然崩落采矿法岩石力学演化机制的研究。也有很多学者对微震各参数展开了讨论,徐奴文等^[17]对岩质边坡破裂前后微震事件的 b 值特征进行了研究,尚仕科等^[18]通过分析微震事件的震级、能量等多个参数的变化,总结了岩爆的发生规律。这些研究不仅推动了微震监测技术的进一步发展,也为矿山安全监测和地压灾害预警提供了有力支持,但这些成果仍具有一定局限性,并不能完全适用于采用自然崩落采矿法开采的矿山。因此,本文从微震事件

的时空演化特征、能量指数与累积视体积关系曲线2方面进行分析,总结出某矿山自然崩落采矿法开采顶板崩落的发展规律,进而为后续矿山各区域顶板稳定性监测及有效预警奠定基础,也为同类型矿山指导安全生产提供理论依据。

1 矿山微震监测系统构建

某矿山矿产资源丰富,采用自然崩落采矿法开采,主要有4#、5#两大矿体,矿体在平面上呈巨大透镜状,沿倾斜方向呈似板状。目前,生产工程划分为530 m中段和410 m中段分期回采。当前530 m中段回采工作已接近尾声,矿山主要生产作业已逐步转为410 m中段,包括410 m运输水平、434 m出矿水平、447 m拉底水平及副层水平。

4#矿体天然地质条件较为复杂,存在多条断层横切矿体,岩体节理裂隙发育,导致矿床围岩完整性、稳固性差,同时,受到采矿工艺的影响,作业过程中巷道经常有片帮、冒顶等现象发生,严重影响生产作业安全。

为了有效控制顶板稳定、保障生产安全,矿山根据自身地质条件建立了一套微震监测系统。该系统通过在岩体中布置传感器,再采用算法对捕捉到的微震信号进行反演推算,既能得出产生微破裂的位置、时间等信息,亦可根据微震事件的聚集区域等信息宏观判断岩体的破裂状态^[19],进而及时发现顶板冒落前兆,防止发生进一步地压灾害。

微震监测系统建立于矿山主要生产区域410 m

收稿日期:2024-07-25; 修回日期:2024-09-01

基金项目:湖南省基金项目——2020年度安全生产预防及应急专项资金项目(2020YJ001)

作者简介:杨佳楠(1996—),男,工程师,从事矿山安全开采、地压监测等相关技术研究工作;E-mail:1519585692@qq.com

中段至530 m中段。其中,447 m拉底水平以上120 m范围主要用于监测顶板的崩落情况,即崩落区。该设计方案采用了更灵敏的加速度型传感器,于4[#]矿体447 m拉底水平以上120 m范围共布置10个传感器。其中,464 m水平布置4个,494 m水平布置2个,530 m水平布置4个。矿山4[#]矿体464 m水平、494 m水平、530 m水平微震监测台网布置如图1所示。

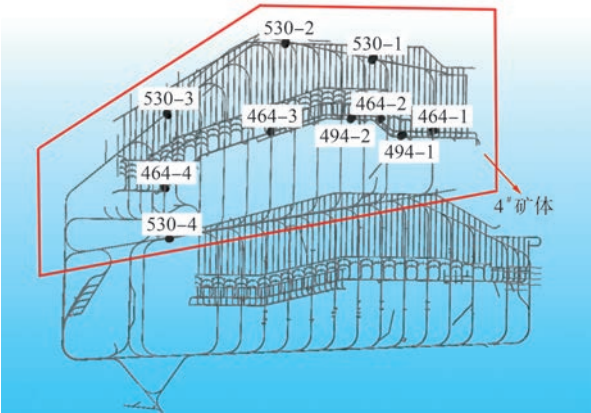


图1 微震监测台网布置

Fig. 1 Layout of the microseismic monitoring network

2 基于微震事件时空演化特征的顶板崩落规律研究

微震监测系统能够实时监测顶板在裂隙发育过程中产生的微震事件,并通过一定算法准确定位出微震事件发生的位置^[20]。因此,通过分析微震事件的时空演化,能够了解顶板破裂演变过程,进而为矿山各区域顶板稳定性监测及有效预警奠定基础。

2023年7—11月4[#]矿体崩落区微震事件投影于447 m拉底水平的俯视图如图2所示(图2中球体即为微震事件,发生时间远近由绿色—红色来表示)。由图2可知:水平方向上,随着时间的推移,微震事件空间聚集区域由15岩—21岩向19岩—27岩推进,其他区域微震事件分布较为零散。经查阅矿山拉底记录,微震事件聚集区域符合矿山实际拉底进展情况,表明除首采区中心的拉底区域上层顶板受到扰动外,其他区域相对稳定,也说明了采用微震监测技术来监测顶板崩落情况是可行的。

为了更好地观测崩落区内微震事件的发展情况,

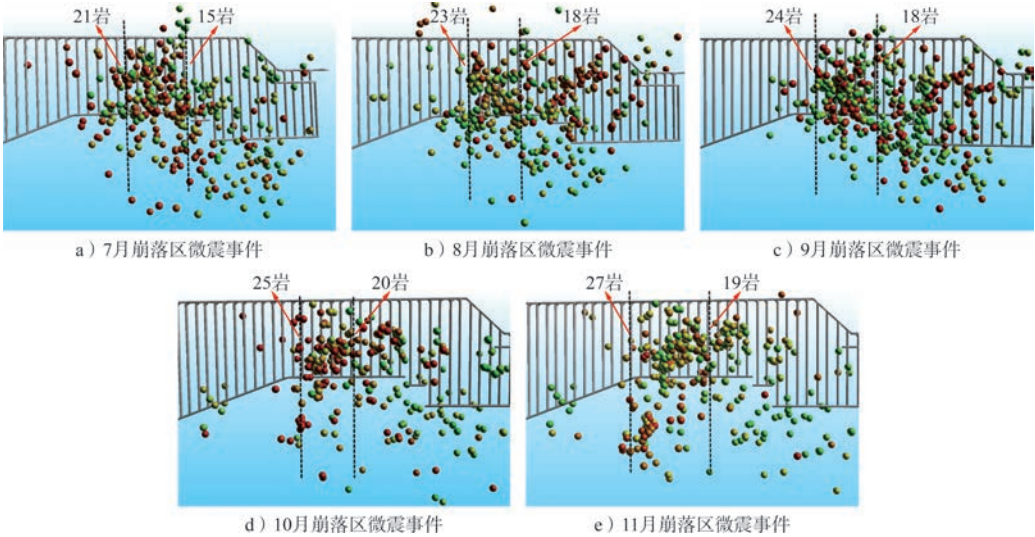


图2 2023年7—11月4[#]矿体崩落区微震事件俯视图

Fig. 2 Plan view of microseismic events in the caving zone of 4[#] orebody from July to November 2023

需要对崩落区进行空间边界约束,该空间边界约束覆盖矿体447 m拉底水平以上120 m范围,基于矿山464 m、494 m、530 m水平分别建立464~494 m、494~530 m、530~584 m 3个不同高度的块体模型,以便于对不同高度范围内微震事件的分布进行分析。具体约束情况如图3所示。

2023年7—11月4[#]矿体崩落区微震事件正视图如图4所示。由图4可知:竖直方向上,除10月份微震事件数量相对较少、规律不明显外,其他月份464~494 m高度微震事件量明显多于494~530 m、530~584 m高度,这说明在447 m水平拉底爆破的影

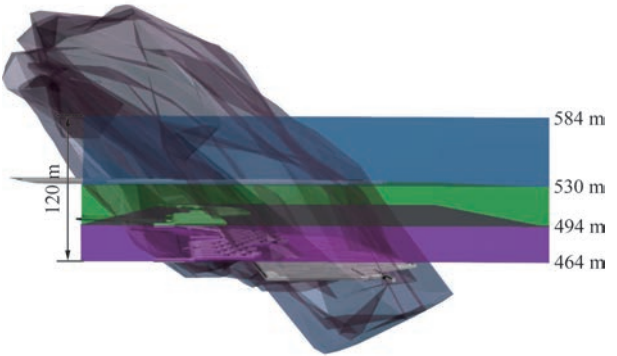


图3 崩落区空间约束示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spatial constraints in the caving zone

响下,较靠近拉底层的顶板区域受到的扰动较大。同时,根据不同微震事件发生的时间来看,464~494 m高度微震事件球体多为绿色,即发生时间较早,494~530 m高度绿色球体与红色球体数量则相对均衡,而

530~584 m高度红色球体数量明显多于绿色球体,即发生时间普遍较晚。随着时间的推迟、拉底空间的变大,岩体破裂呈现逐渐向上发展的趋势。

根据不同时间段内矿体上部覆岩内微震事件推

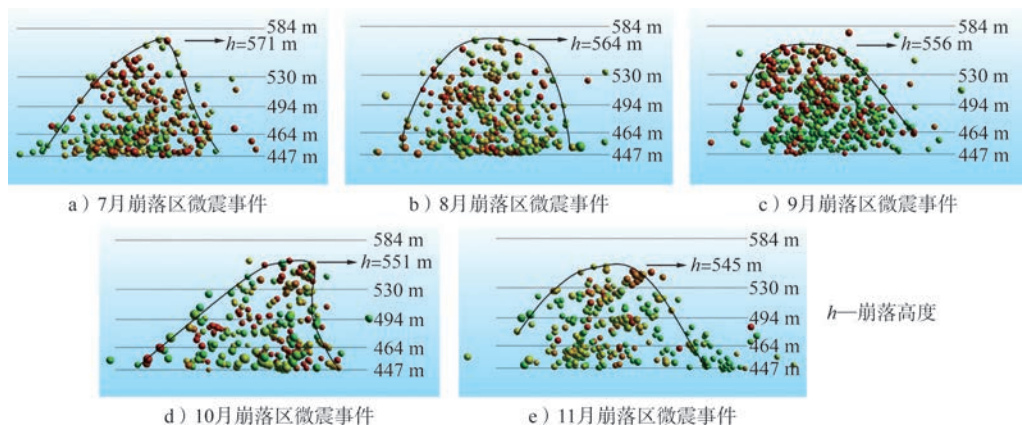


图4 2023年7—11月4#矿体崩落区微震事件正视图

Fig. 4 Front view of microseismic events in the caving zone of 4# orebody from July to November 2023

测出了岩体崩落高度(如图4所示)。由图4可知,7—11月,崩落高度由571 m降至545 m,呈现随时间推移逐渐降低的趋势。

3 基于能量指数与累积视体积关系曲线的顶板垮塌风险研究

能量指数与累积视体积关系曲线常用来表征矿体围岩应力与应变之间的演化关系。能量指数的上升、下降体现了围岩应力的变化,如果能量指数下降,意味着能量进行了释放;反之,上升则说明能量处于积蓄的过程。累积视体积的上升、下降体现了围岩应

变的变化,如果累积视体积突然上升,意味着围岩内发生了较大的变形,发生地压灾害的概率就会增大。故能量指数下降,同时累积视体积突然上升,可以作为判断岩体是否会发生大尺度破裂的依据。

以2023年7—11月的微震数据为基础,对464~494 m、494~530 m、530~584 m块体内微震事件的能量指数与累积视体积关系曲线进行分析,进而得出顶板崩落的演化规律。各块体内微震事件生成的能量指数与累积视体积关系曲线如图5所示。

由图5-a)可知:7月初、9月初、10月初、11月初均出现了能量指数下降,同时累积视体积上升的现象,

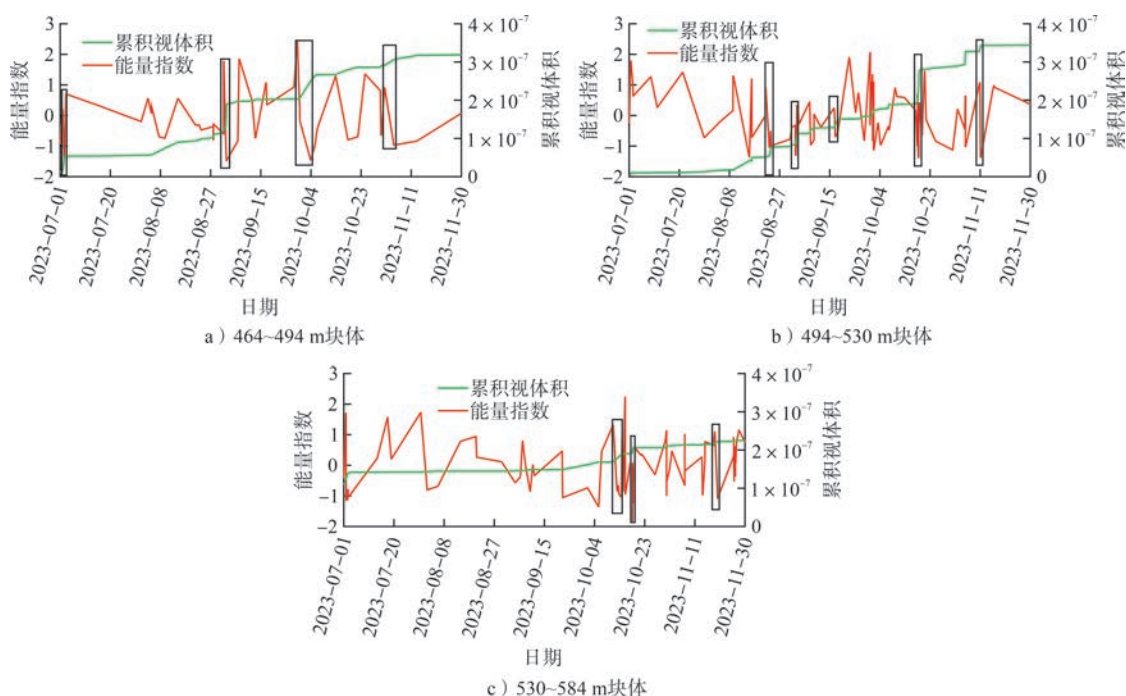


图5 2023年7—11月4#矿体各块体能量指数与累积视体积关系曲线

Fig. 5 Curve of the relation between each block energy index and cumulative apparent volume of 4# orebody from July to November 2023

这说明在这些时间段,464~494 m块体可能会发生大尺度岩体破裂,而现场477 m高度底盘沿脉联络巷在10月中旬产生了开裂。同理,由图5-b)可知:在8月底、9月初、9月中旬、10月下旬、11月中旬出现了能量指数下降,同时累积视体积上升的现象,这说明494~530 m块体在这些时间段可能会发生大尺度破裂。而530~584 m块体则在10月中旬、10月下旬、11月下旬可能会发生大尺度破裂(如图5-c)所示)。经现场巡查,554 m高度406穿东侧顶盘在12月初裂缝发展较为明显,现场情况如图6所示。由此可以看出,随着空间高度的增加,可能发生大尺度岩体破裂的时间也逐渐推迟,显示出了很好的时空相关性。

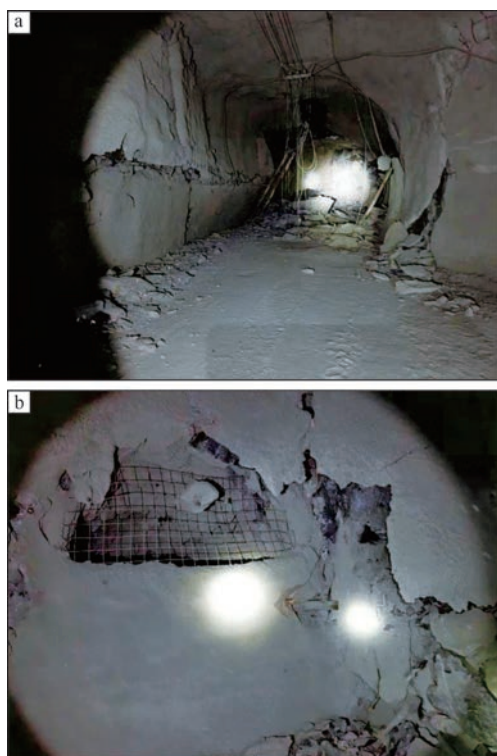


图6 554 m高度406穿东侧顶盘现场情况

Fig. 6 On-site conditions of 554 m height 406 passing through the top panel on the east side

4 结 论

本文通过对微震事件的时空演化特征、能量指数与累积视体积关系曲线等进行分析,验证了采用微震监测技术进行自然崩落采矿法顶板崩落监测的可行性、准确性和先进性,并得出了以下结论:

1)在拉底爆破的影响下,受到扰动的范围主要为首采区中心的拉底区域上层顶板,其他区域相对稳定。

2)随着时间的推移、拉底空间的变大,岩体破裂在空间上逐渐向上发展;同时,岩体崩落高度7—11月

由571 m下降至545 m,呈现随时间推移而逐渐降低的趋势。

3)随空间高度的增加,可能发生大尺度岩体破裂的时间逐渐推迟,该现象体现了很好的时空相关性,现场具体显现情况(554 m高度406穿东侧顶盘在12月初裂缝发展较为明显)也与该规律相契合。

【参 考 文 献】

- [1] 江文武,杨作林,李国建,等.构造应力型矿山顶板覆岩移动冒落响应特征研究[J].矿业研究与开发,2015,35(7):58-62.
- [2] 王平,冯兴隆,蔡永顺,等.微震监测自然崩落法开采过程中顶板冒落规律应用研究[J].有色金属(矿山部分),2018,70(4):12-15.
- [3] 曹辉,杨小聪,王贺,等.自然崩落法可崩性研究现状及发展趋势[J].中国矿业,2015,24(10):113-117.
- [4] 彭张,袁本胜,冯兴隆,等.基于TDR监测技术的自然崩落法顶板崩落高度测量[J].现代矿业,2018,34(8):86-88,112.
- [5] 胡娟新.地下金属矿山采场顶板冒落危险性研究[J].世界有色金属,2021(16):76-77.
- [6] 刘明成.崩落采矿转型安全隔离层厚度的确定[J].黄金,2021,42(11):49-52.
- [7] 冷述智.崩落回采技术在富家矿低品位边翼矿体中的应用[J].黄金,2021,42(12):46-48,52.
- [8] 张君,张达,张晓朴,等.微震监测技术在矿山民采定位中的应用[J].有色金属(矿山部分),2014,66(4):83-86.
- [9] 王玺,王剑波,赵杰,等.某矿山典型断层区域微震事件活动特征研究[J].黄金,2021,42(2):30-35,47.
- [10] 姜福兴.微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J].岩土工程学报,2002,24(2):147-149.
- [11] 李庶林.试论微震监测技术在地下工程中的应用[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):122-128.
- [12] 姜海涛,刘明淳,蒋加森,等.基于声发射指标的常规卸压机理分析与预测信度应用[J].黄金,2023,44(8):10-14.
- [13] 于汝超,李萍.基于微震监测系统的矿山微震活动规律研究[J].煤,2023,32(2):71-76.
- [14] 张翼凤.声发射法地应力测量在大柳行金矿的应用[J].黄金,2020,41(8):53-56.
- [15] 鲁振华,张连城.门头沟矿微震的近场监测效能评估[J].地震,1989(5):32-39.
- [16] CHEN R, STIMPSON B. Interpretation of indirect tensile strength tests when moduli of deformation in compression and in tension are different[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(2): 183-189.
- [17] 徐奴文,戴峰,周钟,等.岩质边坡微震事件b值特征研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3368-3374.
- [18] 尚仕科,张苏闯,王平,等.微震事件的多参数信息监测岩爆技术研究[J].有色金属(矿山部分),2014,66(6):1-3.
- [19] 张银平.岩体声发射与微震监测定位技术及其应用[J].工程爆破,2002,8(1):58-61.
- [20] 王利岗.基于多尺度监测的普朗铜矿自然崩落发展时空演化规律[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.

(下转第49页)

- [6] 余绍山,王薇,李姚伟奇.周边眼偏位空孔爆破设计优化研究与应用[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1 509-1 520.
- [7] 田兴朝,陶铁军,娄乾星,等.白竹山隧道爆破超挖原因分析与控制研究[J].工程爆破,2022,28(5):60-66.
- [8] 辛鹏飞,关福晨,郝春晖,等.装药结构与孔内延期对露天深孔爆破振动影响研究[J/OL].黄金,1-5[2024-10-30].http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1110.TF.20241018.1737.002.html.
- [9] 张宪堂,陈长青,刘小康,等.双孔切缝爆破裂纹扩展机理及损伤特性研究[J].爆破,2024,41(4):45-53.
- [10] 甘会莲,蒋新闻,陈志伟,等.一体化聚能水压爆破技术在软弱围岩隧道的应用[J].黄金科学技术,2023,31(6):944-952.
- [11] 方安明,方应飞,夏治园.低爆速粉状乳化炸药在光面爆破中的应用[J].火工品,2023(5):69-73.
- [12] 黄治成.采场外廓控制爆破技术研究及应用[D].长沙:中南大学,2011.
- [13] 朱兆文,徐敏,黄治成,等.采场轮廓预裂爆破成缝数值模拟及应用[J].矿冶工程,2012,32(4):20-23.
- [14] 黄小彬.紫金山金铜矿深部采场控制爆破技术研究[D].福州:福州大学,2018.
- [15] 赵兴东,宋景仪,周鑫.矿房回采爆破时中深孔拉槽爆破的参数优化研究[J].爆破器材,2023,52(5):50-56,64.
- [16] 李延龙,张小瑞,朱欣月,等.谦比希铜矿东南矿体上向扇形中深孔爆破技术试验及应用[J].黄金,2022,43(2):51-56.
- [17] 汪虎福.无切井扇形中深孔爆破拉槽技术在五龙沟金矿的应用[J].黄金,2021,42(8):53-55,60.
- [18] 张小瑞,贾志伟,安龙.深部急倾斜薄矿体中深孔爆破夹制力量化分析[J].黄金,2024,45(8):52-57.
- [19] 刘颖刚,李明,韩党卫.驻波法测量空气绝热指数的研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2003,31(增刊1):75-77.
- [20] 戴俊.岩石动力学特性与爆破理论[M].北京:冶金工业出版社,2013.

Controlled fan-shaped medium-long hole blasting technology for stope sidewalls and its application

Wen Chen^{1,2,3}, Huang Min^{1,2,3}, Qiu Xianyang⁴

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Resources;

2. Zijin Mining Group Co., Ltd.; 3. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd.;

4. School of Resources and Safety Engineering, Central South University)

Abstract: In underground mining activities with medium-long hole blasting, fan-shaped hole blasting is one of the important methods adopted for medium-thick orebody recovery due to its advantages of reduced development workload, simple structure, high recovery efficiency, and low cost. However, most fan-shaped hole blasting neglects sidewall control in stopes, leading to extremely uneven sidewalls after fan-shaped blasting in complex stope environments, which significantly impacts the safety and economic benefits. In the engineering background of a copper mine, this study integrates theoretical analysis and field tests to address the issue of stope sidewall blasting control. By modifying the stope structure and hole layout under the original mining method, a dual-controlled sidewall fan-shaped medium-long hole strip open-stope mining method with subsequent backfilling is proposed. This approach effectively optimizes explosive energy distribution along the stope sidewalls and within the stope and incorporates smooth blasting principles. Calculations determined a hole spacing of 0.8 m corresponding to a charge diameter of 36 mm. A hole-by-hole initiation network with outside-hole delays was designed, and key techniques were explained, enabling single-blast initiation of up to 7 rows while maintaining production efficiency. Industrial trials in Stope 1000-1-4 demonstrated smooth post-mining sidewalls, validating the method's effectiveness.

Keywords: fan-shaped medium-long hole; stope structure; controlled blasting; smooth blasting; hole-by-hole initiation; non-coupling charge; strip open-stope mining method with subsequent backfilling

(上接第43页)

Study on roof caving laws in block caving mining stopes based on microseismic monitoring

Yang Jianan^{1,2}, Zhang Jun^{1,2}, Huang Yanwei^{1,2}, Liu Fangfang^{1,2}

(1. Changsha DIMINE Technology Co., Ltd.; 2. Changsha Smartmine Technology Co., Ltd.)

Abstract: During block caving mining, roof caving directly impacts mine safety. To investigate the caving patterns of roofs in a mine employing block caving, this study analyzed microseismic monitoring data, focusing on 2 aspects namely the spatiotemporal evolution regularities, and correlation curve between energy indices and cumulative apparent volume of microseismic events. Results indicate that undercutting blasting primarily disturbed the upper roof above the initial mining area's central undercut zone. As the undercutting area expanded over time, rock mass fractures propagated upward spatially, while the height of rock mass caving gradually decreased. Additionally, the timing of potential large-scale rock mass fractures was progressively delayed with increasing spatial elevation. These findings provide a theoretical basis for early warning systems of future roof caving in similar mining operations.

Keywords: block caving mining method; microseismic monitoring; roof caving; blasting disturbance; undercutting blasting; rock mass fracture