

BMS 微震监测系统在深部岩体稳定性监测中的应用

何玉龙,王栋毅,李海龙

(山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿)

摘要:随着矿山开采逐渐往深部延伸,出现了轻微岩爆现象,生产区域内存在由岩爆诱发的矿柱失稳和顶板冒落的危险。根据三山岛金矿深部矿体地质条件和围岩实际地质情况,研制了新一代的 BMS 微震监测系统,构建了矿山预警系统。该系统能有效监测到采场矿柱失稳和顶板冒落的微弱振动信号,分析微震波形,监测岩爆的发生,为深部矿体安全开采提供依据。

关键词:深部开采;岩体稳定性;岩爆;微震监测;波形分析

中图分类号:TD32

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)04-0005-04

doi:10.11792/hj20240402

引言

随着对深部矿体的进一步开采,岩爆逐渐成为不可忽视的井下危险因素,由此带来的矿柱失稳和顶板冒落也严重威胁到井下安全。岩爆是指对高应力区地下工程进行作业时,在开挖活动的扰动下,岩体原有应力被打破,导致其内部储存的应变能突然释放^[1-3],产生破坏。岩爆的发生常伴随着岩体振动^[4]。

采矿活动引起围岩内应力的转移和积聚,岩体在应力作用下发生破裂、产生振动并向四周传播。检波器监测到振动信号,并进行相关处理和分析,这就是微震监测系统的基本原理^[5-7]。

岩体裂隙产生、发育和贯通等过程中始终伴随着微震活动的产生,有效微震信号包含了大量可以表达岩体状态变化的信息^[8-11]。因此,通过监测岩体的微震信号,可以实现深部矿(岩)体区域稳定性的监测预警。

1 工程背景

山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿(下称“三山岛金矿”)是山东黄金集团有限公司的主体矿山之一,下设三山岛金矿直属矿区和新立矿区,是国内唯一海下开采的黄金矿山。新立矿区采用竖井加平巷开拓的点柱式上向分层充填采矿法进行开采,设计生产能力 1 500 t/d,为适应市场经济发展需要,三山岛金矿对新立矿区实行强化开采,将生产能力从原来的 1 500 t/d 扩大至 6 000 t/d。

在高强度开采条件下,对矿体上盘岩体的扰动增

加,矿区存在涌水、突水甚至海水溃入的潜在危险。此外,三山岛金矿直属矿区已经进入深部开采(采掘工程深度超过 600 m),目前已经出现轻微岩爆现象,生产区域存在由岩爆诱发的矿柱失稳和顶板冒落的危险。而且,三山岛金矿次级断裂 F_3 的活动及由此诱发的地面和井下危害日趋严重。因此,研制新一代微震监测系统保障海下采矿活动的安全已经成为矿山迫切需要解决的首要问题。

2 BMS 微震监测系统

微震监测系统的结构总体分为集中式与分布式 2 种。分布式监测系统主要用于监测矿震,定位精度较低,适合采区尺度;集中式监测系统常用于监测矿震和岩层破裂,定位精度较高,适合采掘工程尺度。

由于海下金矿床开采需要高精度和大面积监测,因此,三山岛金矿采取分布式监测系统与集中式监测系统相结合的方式,即区域间分布式、区内集中式的测区监测系统布置方式,定位精度可达 10 m 左右,满足海下金矿床开采岩体破裂的监测预警要求。在此基础上,研制了新一代 BMS 微震监测系统。

2.1 工作原理

BMS 微震监测系统可以监测振动能力超过 100 J、频率为 1~1 500 Hz 及低于 110 dB 的振动事件,属于高精度微震监测系统。

安置在测区内的检波器接收振动信息,传送至井下微震监测子站,将电讯号转变为光讯号,经光缆传送到微震监测主站,经由内部交换机再将光讯号传送到地面工控机,在数据存储及数据处理计算机完成微

震事件的定位方向解析与多方向显示。BMS 微震监测系统结构及工作原理如图 1 所示。

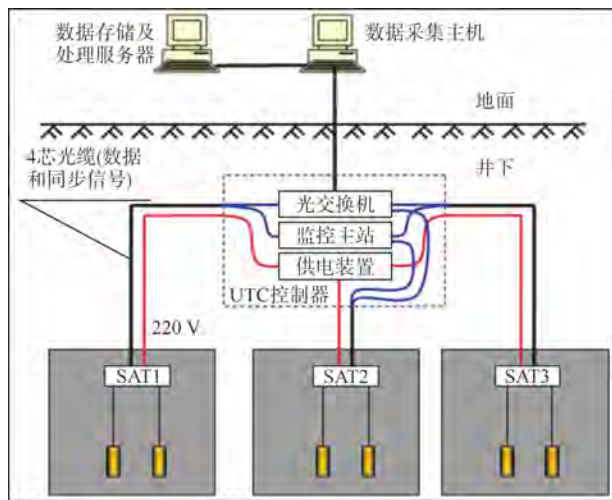


图 1 BMS 微震监测系统结构及工作原理

Fig. 1 Structure and mechanism of BMS microseismic monitoring system

2.2 BMS 微震监测系统功能

BMS 微震监测系统配备 HOSMON 和 TEROTREAT 软件,能够监测井下微震事件并提供以下功能:

- 1) 实时、连续、自动采集微震信号,记录并进行各种滤波处理。
- 2) 微震事件的自动备份。
- 3) 自动定位微震事件。
- 4) 自动进行震源定位并在图上显示震源位置。
- 5) 自动保存微震事件波形图。
- 6) 微震监测系统参数设置和修改。
- 7) 地面操作微震监测子站,包括启动、重启、停止等。

2.3 BMS 微震监测系统优点

与国外同类系统相比,BMS 微震监测系统具有以下优点:

1) 系统采用区间分布式、区内集中式的监测方案,不仅可以监测工作面顶、底板的岩层破裂(高频、小能量破裂),还可以监测矿井范围的矿震、冲击地压、岩体破裂、断层滑移等事件(中、低频,大能量破裂)。因此,BMS 微震监测系统的使用范围广。

2) BMS 微震监测系统标准配置 2 台微震监测子站,共 24 通道,可以布置 24 个测点,是国外同类设备通道数的 2 倍;最大可以接 10 台微震监测子站,共 120 通道。

3) BMS 微震监测系统数字信号传输全部采用光缆网络传输,以太网传输模式,信号传输安全、可靠、稳定,足以满足大型矿井信号传输要求。信号光缆成本较低,可以重复利用,且可以利用现有的井下工业

环网系统,井筒内不用另铺线缆,与国外的电缆传输相比,成本仅是其的 20%~25%,且使用简单可靠。

4) BMS 微震监测系统能够实现远程监测监控,通过并入山东黄金集团有限公司的集中化监控网络,实现多点远程监测监控;通过连入 Internet 网络,能够实现基于浏览器的 web 显示和查询,最大限度利用现有网络,节约通讯网络的建设费用。

5) BMS 微震监测系统精度高,在水平和垂直方向的平均定位精度能够达到 10 m,远大于国外同类设备。采用外置式安装和深孔安装检波器的方法,使检波器的布置真正达到空间立体布置,从而保证了定位的高精度。

3 微震波形的分析

通过微震监测系统监测到的有效微震事件,可以发现其中大部分为爆破产生的岩体破裂,个别存在点柱压力过大导致点柱断裂。对其他岩体破裂异常事件,考虑是否为岩爆事件。

3.1 微震事件区分

当微震事件记录后,除了区分是否为有效微震事件,还要进行有效微震事件的判断:是岩体破裂事件还是爆破事件。因为岩体破裂事件和爆破事件波形具有不同特征,所以这两类事件可以从频谱、延续时间、事件时间间隔、振动次数、振幅能量和频率等方面进行对比分辨。

以三山岛金矿 2022 年 12 月 18 日 4:19:52 典型的点柱型岩体破裂事件为例,16#测点的事件波形图中有 4 次明显的振动波形,对这 4 次振动波形进行频谱分析可知,4 段波形频谱峰值分别为 134 Hz、134 Hz、34 Hz 和 134 Hz。2022 年 12 月 18 日 4:19:52 岩体破裂事件波形图如图 2 所示。

从振动频率来分析,一般爆破的频率为 80~140 Hz,在此频率下的振动对采场的稳定性基本没有影响。而在 2022 年 12 月 18 日 4:19:52 的岩体破裂事件中有的振动频率仅 34 Hz,低频振动的危害性远大于高频振动对采场结构稳定性的影响,庆幸的是低频振幅能量小(1 076 mV),持续时间较短,破坏性较小,未造成采场以外岩体的破裂,经过及时排除险情,采场的安全性得到了保障。

从振动波形时间间隔来看,岩体破裂事件间隔在很大的区间范围内变动,如图 3 所示,震动波时间间隔分别为 1.8 s、1.4 s 和 2.4 s,没有明显的规律。三段爆破时间间隔基本在 0.5 s 内(如图 4 所示),与矿内使用半秒延迟爆破雷管相一致。

在振动次数方面,爆破与岩体破裂的微震特征也有明显的区别,由图 3 和图 4 可知:在 3 s 内爆破事件

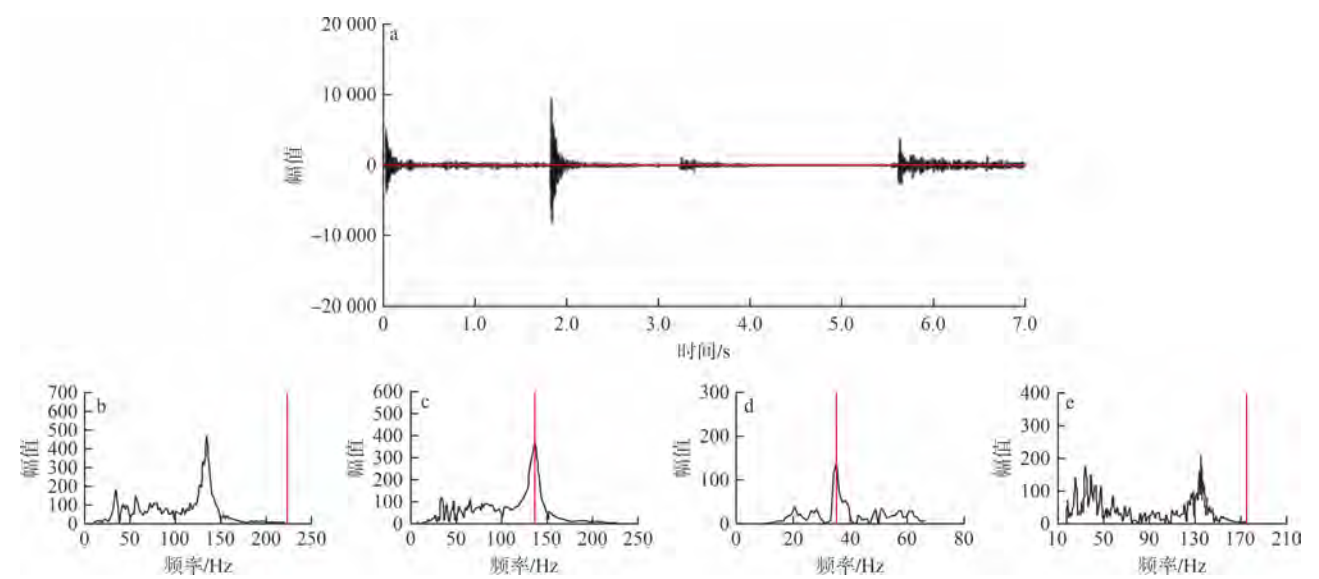


图 2 2022 年 12 月 18 日 4:19:52 岩体破裂事件波形图

Fig. 2 Waveform of rockburst incident at 4:19:52 on December 18th,2022

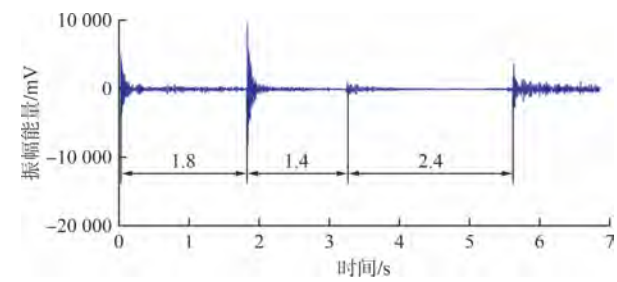


图 3 岩体破裂的微震信号

Fig. 3 Microseismic signal of rock mass fracture

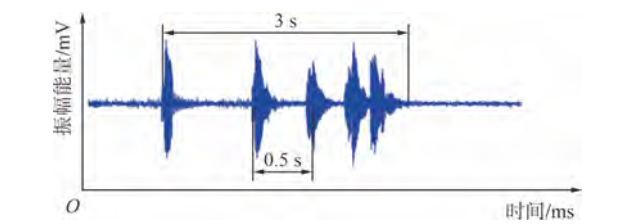


图 4 爆破产生的微震信号

Fig. 4 Microseismic signal generated by blasting

有 5 次振动,而岩体破裂事件在近 6 s 内振动了 4 次;在振幅能量和频率等方面,爆破振幅能量一般为 10 ~ 2 000 mV,振动事件频率分布于 85 ~ 110 Hz,而岩体破裂则在近处的测点能收到大于 5 000 mV 的振幅能量,近处测点收到破裂的频率为 130 ~ 140 Hz,且带有低频信号。爆破及岩体破裂微震特征对比如表 1 所示。

对照以上特征可以便捷地将爆破和岩体破裂的微震事件进行区分,发现井下异常事件,指导矿山做好安全开采工作。

3.2 动压微震波形分析

动压微震事件波形与爆破、人为干扰、电干扰等波形有明显的区别,从波形图中可以看到明显的振动

表 1 爆破及岩体破裂微震特征对比
Table 1 Comparison of microseismic characteristics of blasting and rock mass fracture

指标	爆破	岩体破裂
延续时间/s	<3	>6
事件时间间隔/ms	100 ~ 500	1 000 ~ 5 000
振动次数	3 s 内 4 ~ 5 次	6 s 内 1 ~ 4 次
振幅能量/mV	10 ~ 2 000	近处破裂时大于 5 000
频率/Hz	85 ~ 110	近处破裂时 130 ~ 140,且带有低频信号

波形,其次,波形图中记录下的振动波形之间时间间隔极短,振动波形未完全衰减,下次振动又至,振动波形和波形之间不易区分;一般情况下波形图中记录的振幅能量值不大,在 100 mV 左右。典型动压微震事件波形图如图 5 所示。

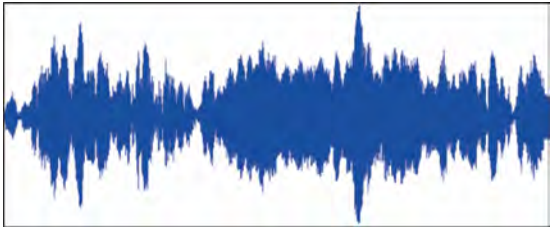


图 5 典型动压微震事件波形图

Fig. 5 Waveform of typical dynamic pressure microseismic incidents

对于连续的岩体破裂事件,一般没有明显的波形分界面,振幅能量值一般较小(多数在 100 mV 左右),岩体破裂至一定程度会有大能量事件发生,前期的小能量振动事件危害性较小,但当地应力增加至一定程度,必然产生大能量事件,此时对采场稳定性危害也较大。动压大能量微震事件波形图与连续岩

体破裂小能量事件波形图如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知:大能量岩体破裂事件振动峰值波形明显,而小能量的岩体破裂事件窗口中的波形较分散,振幅能量值也较低。岩体在地应力的作用下,产生持续的破裂,破裂产生的振幅能量不大,传递到距离最近的检波器的振幅能量仅为 179 mV。能量不同的动压微震均具有振动时间长的特性。

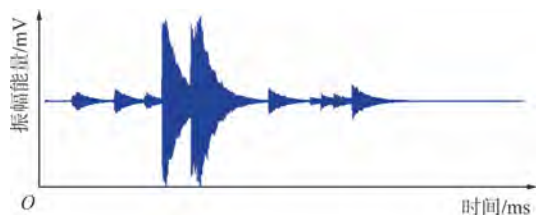


图 6 动压大能量微震事件波形图

Fig. 6 Waveform of dynamic pressure intense energy microseismic incidents



图 7 连续岩体破裂事件波形图

Fig. 7 Waveform of continuous rock mass fracture incidents

4 岩爆危险区域预警

BMS 微震监测系统可以准确有效地监测及定位采动造成的岩体破裂,并确定采场的三维应力分布规律和高地应力的分布区域,分析监测到的微震波形,预报岩爆可能发生区域。通过一段时间的监测,结合矿区岩体破裂状况,可能发生岩爆的情况有以下两类:

1) 裂隙发展导致的岩爆。微震事件发生时,如果顺着某一破裂带继续发展,可能会导致采场结构发生变化,造成应力积聚,发生岩爆。

2) 微震事件数量异常或大能量事件增多。在某一时间段内,如果突发大量的微震事件,产生能量显著增多,说明采场内岩石活动剧烈,可能导致岩爆发生。

三山岛金矿直属矿区井下生产实行 2 天内安排 3 个班组的生产组织方式,一个采场通常 1 天爆破 1~2 次。在微震监测系统的测点监测范围内(在 200 m 内监测效果较好),震源距测点的空间位置等爆破岩体振动信息均能监测到。三山岛金矿直属矿区采用微差光面爆破,能达到爆破时减小对上盘岩体及顶板稳定性影响的目的。从本次监测的岩体破裂位置方面看,岩体破裂的点基本都在采场内部(如图 8 所示)。因此,目前的生产方式对矿体围岩影响

较小。

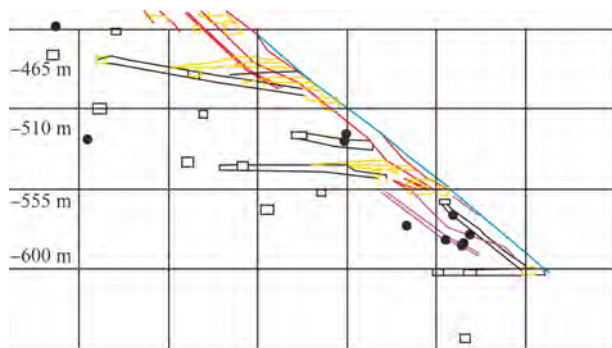


图 8 岩体破裂位置剖面图

Fig. 8 Section of rock mass fracture spots

5 结论

1) 研制了新一代适用于海下安全开采监测预警的 BMS 微震监测系统,采用“分布式与集中式”相结合的设计理念,实现了既能够监测小范围矿柱失稳和采场顶板的断裂,又能够监测上盘因开采导致的岩层移动的目标。

2) 微震监测结果表明,三山岛金矿目前的海下开采是安全的,海下采场的设计参数是合理的,不会出现海水溃入的危险。

3) BMS 微震监测系统的应用,可以更好地监测岩体的微震事件,分析微震波形,定位微震发生位置,指导矿山开采,预防岩爆的发生。

[参考文献]

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 803-2 813.
- [2] 刘卫东,李角群,李磊. 岩爆研究现状综述[J]. 黄金,2010,31(1):26-28.
- [3] 欧阳林,张如九,刘耀儒,等. 深埋隧洞岩爆防控技术及典型工程应用现状综述[J]. 长江科学院院报,2022,39(12):161-170.
- [4] 郭然,潘长良,于润沧. 有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
- [5] 何皎云. 矿山采动灾害监测及控制技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.
- [6] 马天辉,唐春安,唐烈先,等. 基于微震监测技术的岩爆预测机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(3):470-483.
- [7] 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.
- [8] 石峰,王平,蔡永顺,等. 矿山深部开采岩体稳定性监测技术研究[J]. 有色金属工程,2020,10(8):113-118.
- [9] 王之东,黎立云,陈滔,等. 矿柱岩爆模型试验中能量释放研究[J]. 岩土力学,2018,39(增刊2):177-185,208.
- [10] 范鹏贤,王明洋,岳松林,等. 应变型岩爆的孕育规律和预报防治方法[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(4):96-101.
- [11] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学,2014,35(1):1-6.

(下转第 17 页)

[6] 苗磊刚,牛园园,潘洪波. 某矿尾砂胶结充填体强度演化特征及力学效应研究[J]. 金属矿山,2023(3):52-58.

及料浆配比优化[J]. 金属矿山,2023(2):38-42.

[7] 杨志强,王立杰,王社光,等. 基于能量匹配的充填体强度设计

[8] 邓雪杰,刘浩,王家臣,等. 煤矿采空区充实率控制导向的胶结充填体强度需求[J]. 煤炭学报,2022,47(12):4 250-4 264.

Research on the reasonable filling body strength for the recovery of security ore pillars in Sanxin Gold Copper Mine

Liu Xiaochun¹, Zhang Xiaorui², Liu Bo²

(1. China National Gold Group Co., Ltd.; 2. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: In order to safely recover the security ore pillars in Sanxin Gold Copper Mine and ensure the stability of filled stope, theoretical calculations were conducted on the reasonable filling body strength in the stope. Numerical simulations were performed on the stope stability under different filling body strengths (cement-sand ratio) to determine the reasonable range of filling body strength. The results indicate that the required strength of the filling body in the stope is mainly related to the length of the stope and the height of the filling body. For security ore pillar stopes with lengths ranging from 20 m to 60 m and a height of 40 m, the filling body strength needs to be above 3. 5 MPa. The surrounding rock displacement should not exceed 2 mm, which falls within the allowable range specified by design standards, ensuring safety.

Keywords: security ore pillar; filling mining method; reasonable filling body strength; numerical simulation; stability

(上接第 8 页)

Application of BMS microseismic monitoring system in deep rock mass stability monitoring

He Yulong, Wang Dongyi, Li Hailong

(Sanshandao Gold Mine, Shandong Gold Industry (Laizhou) Co., Ltd.)

Abstract: With the gradual extension of mining operations into deeper levels, minor rockburst phenomena have emerged, posing risks of instability in mining pillars and roof caving induced by rockbursts within the production area. Based on the actual geological conditions of deep ore bodies and surrounding rocks in Sanshandao Gold Mine, a new generation of microseismic monitoring system has been developed, in order to establish a mine early warning system. This system can effectively monitor faint seismic signals associated with the instability of mining pillars and roof caving in the mining area, analyze microseismic waveforms, and detect occurrences of rockburst events, providing basis for the safe mining of deep rock mass.

Keywords: deep mining; rock mass stability; rockburst; microseismic monitoring; waveform analysis