

文章编号: 1673-3363-(2012)01-0072-06

红透山铜矿微震监测系统的建立及应用研究

刘建坡¹, 石长岩², 李元辉¹, 张凤鹏¹, 赵兴柱², 张国联¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国有色集团抚顺红透山矿业有限公司, 辽宁 抚顺 113321)

摘要 针对红透山铜矿岩爆等地压灾害频发现状, 建立深部地压微震监测系统, 对微震活动性与采矿活动之间的关系、微震事件的空间活动规律进行了分析, 并采用累积视体积和能量指数对大尺度岩体破裂进行了预测研究。采用人工定位爆破的定位结果表明: 微震监测系统的定位误差小于10 m, 能够满足矿山微震监测的需要。微震活动性主要分为2个平静期和3个活跃期。并呈现逐步下降趋势, 微震活动性呈现主震——余震型模式。大尺度岩体破裂前存在孕育期和预警期, 能量指数快速下降, 累积视体积持续增长, 可以看作岩爆和大尺度岩体破裂发生的前兆。通过能量指数和位移分布云图, 可以对岩体发生灾害的潜在危险区域进行判断, 指导矿山进行重点防护管理, 保证安全生产。

关键词 深井矿山; 地压; 微震监测; 能量指数; 视体积

中图分类号 TU 45 **文献标识码** A

Studies on Establishment and Application of Microseismic Monitoring System in Hongtoushan Copper Mine

LIU Jian-po¹, SHI Chang-yan², LI Yuan-hui¹, ZHANG Feng-peng¹,
ZHAO Xing-zhu², ZHANG Guo-lian¹

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Fushun Hongtoushan Mining Co. LTD, China Nonferrous Metal Group, Fushun, Liaoning 113321, China)

Abstract In this paper, in view of the serious conditions of ground pressure (rock burst, etc) appeared in Hongtoushan copper mine, we established a microseismic monitoring system in the mine, and analyzed the relationship between the microseismic activities and mining operation, and the spatial distribution of microseismic events, applied the energy index and apparent volume to forecast the occurrence of large scale rock fracturing. The location results using manual fixed-point blasting show that the location error of microseismic monitoring system is less than 10m, which suggests that the system can reach the requirement for ground pressure disaster monitoring in mine. Microseismic activities can be divided into two quiet periods and three active periods. There exists the incubation and early-warming periods before the large scale rock fracturing. The quick drop of energy index and the continuous increase of apparent volume can be used as the precursory characteristics of rock burst and large scale rock fracturing. Through the cloud charts of energy index and displacement, the potential danger areas of ground pressure disasters can be judged, which can be used to guide the safety management and ensure safety production in deep mine.

Key words deep mine; ground pressure; microseismic monitoring; energy index; apparent volume

收稿日期: 2011-05-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BAB34B02); 国家自然科学基金项目(50974031, 51109035); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N09031002, 90401006)

作者简介: 刘建坡(1982-), 男, 博士, 讲师, 从事岩石声发射技术与深部地压监测方面的研究。

E-mail: liujianpo@mail.neu.edu.cn

Tel: 13514265478

微震 (Microseism, MS) 监测技术是利用岩体受力变形和破坏过程中释放出的弹性波来监测工程岩体稳定性的技术方法。目前, 多通道微震监测技术在南非的深井金矿及美国、加拿大、澳大利亚、智利等采矿大国的金属矿山和波兰等国的煤炭矿山得到了普遍使用, 成为矿山动力地压灾害监测和安全生产管理的主要手段^[1]。近年来, 微震监测技术在国内也开始逐渐使用。2001年李庶林教授^[2]采用加拿大ESG公司技术在凡口铅锌矿建立了64通道全数字型微地震监测系统, 基本实现了对微震事件的三维空间定位、信号的实时在线监测分析和处理。2003年姜福兴教授^[3]与澳大利亚联邦科学院联合, 就煤矿灾害的预测及防治工作进行科技攻关, 研制了新型防爆微震监测系统。2005年罗周全^[4]在冬瓜山铜矿引进南非ISS微震监测系统, 对开采引起的岩体应力活动和变形规律进行了研究。另外, 国内其他矿山如柿竹园多金属矿^[5]、会泽铅锌矿^[6]、张马屯铁矿^[7]以及锦屏二级水电站^[8-9]等深埋长大隧洞工程都相继建立了微震监测系统。

中国有色集团抚顺红透山铜矿是目前我国开采深度最大的金属矿山之一。随开采深度增加, 红透山铜矿深部采场发生岩爆、顶板冒落等地压灾害的频度和烈度均逐步加剧, 对作业人员的安全构成极大的威胁, 已严重干扰了矿山正常生产, 造成较大经济损失。因此, 采用微震技术对深部采场岩爆等地压灾害进行监测及预测研究, 是十分必要的。

1 微震监测系统的构建

目前, 红透山铜矿开拓深度1 357 m, 开采1 257 m, 主要采矿方法有: 充填法、分段空场法和浅孔留矿法。本文所采用的微震监测系统为南非ISS公司生产的设备, 包含3个数据采集模块 (GS), 18个通道, 共12个传感器 (三向传感器3个, 单向传感器9个), 鉴于微震监测系统通道数目和传感器数目的限制, 采取避轻就重、重点突出的原则, 选取地压活动频繁和有较强岩爆发生倾向性的代表性区域作为监测的重点 (见图1)。

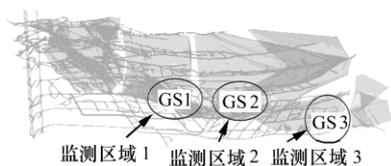


图 1 传感器布置位置示意图
Fig 1 Arrangement of sensors' position

监测区域选择依据如下。

监测区域1: -707中段27采 (红透山铜矿开采面积最大的采场), 可以长期研究采矿活动 (凿岩、爆破开挖、出矿等) 与微震活动的关系。

监测区域2: -767中段13采 (充填完毕采场), 主要研究其充填体和围岩的微震活动性, 可以为充填工艺及充填料的改进提供依据。

监测区域3: -827中段F8破碎带, 可以分析破碎带及其附近岩体随开采扰动的损伤规律, 保障未来F8破碎带上盘采矿生产活动的安全进行。

为了得到最好的微震信号, 传感器的安装采用注浆方式 (图2), 以达到微震信号良好传播和被接受的目的。传感器注浆安装过程: 将传感器与排气管进行捆绑, 将排气管伸入孔底, 采用木塞密封空口, 排气管、注浆管和电缆线从木塞的预制的孔中穿出。注浆时, 由注浆管进行注浆, 排气管进行排气, 当排气孔溢出浆液时注浆完成。

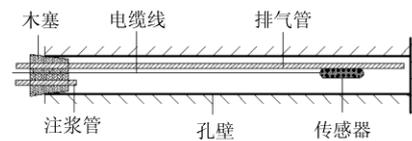


图 2 传感器安装图

Fig.2 Sensor installation diagram

红透山微震监测系统由检波器、信号电缆、数据采集模块 (GS), 通讯系统 (调制解调器、光电转换器电话线、光纤), 数据控制中心, 服务器等硬件和监测运行控制系统软件 (Rts), 数据处理软件 (Jmts), 数据可视化软件 (Jdi), 数据实时显示软件 (Ticker) 等软件组成。监测系统组成结构见图3。

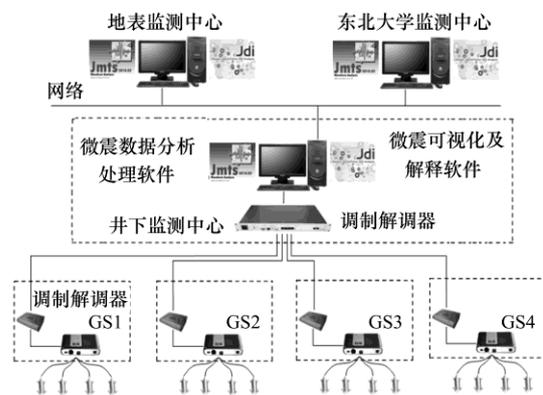


图 3 微震监测系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of microseism motoring system

2 微震定位精度检测

2.1 P 波和 S 波到时拾取

在通常情况下,如果采集到有效信号的传感器的数量足够多时,依靠P波到时残差可以获得很好的定位精度。但是在很多情况下,由于干扰信号的存在,所获得的微震事件良好有效波形并不多,这时同时利用P波和S波的到时进行震源定位可以大大提高定位精度^[10]。根据地震学理论,从地震波的能量看,S波是主要能量载体;从传播速度方面看,P波波速大于S波波速。因此,可以从P波和S波的传播速度和能量差别方面寻找S波到时拾取的方法。可利用振幅平方根曲线窗口(如图4c所示)和能量曲线窗口(如图4d所示),将振幅和能量曲线突然增大的位置定为S波出现的时刻。

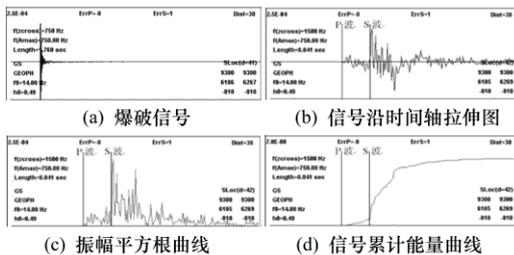


图 4 P 波和 S 波到时拾取
Fig.4 Judgment of P wave and S wave arrival time

值得注意的是,上述S波的判定方法只针对S波初动时间较为清晰的波形信号。有些信号即使采用上述方法也不能确定S波初动到时,这时就在定位计算中就将其剔除,只采用P波到时参与定位计算,以保证定位精度。

2.2 定位精度检测

红透山微震监测系统建成之后,于2010年7月1日在监测区域3范围内进行定时定位爆破,以检测微震监测系统的震源定位精度。图5是定位爆破4个传感器记录的P, S波到达时刻与距离的关系曲线。对于某个微震事件,被触发的各传感器与震源之间的距离与信号的传播时间呈线性关系。如代表某个波形的点偏离了直线,就调整相应波形的P, S波到时。如果无法将所有点都调整到直线上,则删除偏离直线很远的传感器,使其不参与事件的定位,但参与震源参数的计算。通过人工爆破的位置与微震事件结算结果对比分析,测定的定位误差小于10 m,见表1。这表明了微震监测系统的性能良好、传感器空间布置合理,能够满足矿山微震监测的需要。目前,红透山铜矿微震监测采用的波速场假定

为均匀的,监测区域内的岩体具有相同的P波和S波波速。随着开采活动的进行,采空区的规模及空间分布状态发生变化,可以采用人工爆破的方式,通过P波和S波的传播时间(或到达时间)以及传感器和震源间的距离来修正速度场。

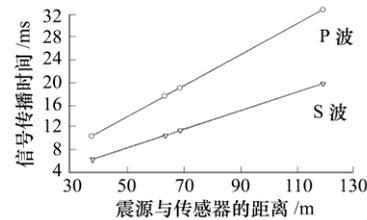


图 5 P 波和 S 波到达时刻与距离的关系曲线
Fig.5 Relation curve between P wave and S wave arrival time and distance

表 1 定位爆破定位结果分析
Table 1 Locate error of fixed-point blast

坐标方位	定点爆破坐标/m	微震系统计算坐标/m	误差/m	直线距离
E	9287	9279.3	7.7	
N	6263	6258.1	4.9	9.2
U	-800	-801.2	1.2	

3 微震活动性与矿山生产活动的关系

对于矿山来说,微震活动性与生产规模和生产进度有关。单位时间内开挖的岩体体积越大,岩体的损伤区域和损伤程度越大;反之亦然。

从微震事件的日分布图(图6)可以看出,微震活动性主要分为两个平静期和3个活跃期。2个平静期分别为:上午7~9时和晚上23~24时,这两个时间段为工人交接班时间,岩体几乎不受到开挖扰动,因而产生的微震事件极少。微震事件发生的3个活跃期分别为:上午9时~中午14时,下午16时~晚上21时和凌晨0~6时。结合现场生产实际,上午9时~中午14时为矿山主要的生产作业时间,会进行局部小规模爆破。爆破震动会动岩体造成扰动,进而引起岩体损伤。下午16时和凌晨0时为红透山铜矿采场大规模集中爆破落矿(开挖矿体)时段,所有井下工作人员撤离采场。从图6可看出,微震事件活跃期均发生在采场集中开挖时,说明大规模开挖矿体对采场围岩造成较强烈的扰动和损伤,导致岩体内部裂隙的产生和扩展。当集中落矿结束之后,微震活动性还会继续保持较高的水平,并呈现逐步下降趋势。这是由于矿体被开挖后,矿岩几何空间几何形态的变化造成原有应力场的平衡被破坏,应力重新分布直至达到新的平衡,这个过程中,

岩体内部微裂纹会继续扩展并逐渐减弱。从地震学和岩石声发射理论角度，这些微震事件可以看作主震之后的余震，微震活动性呈现主震—余震型模式。

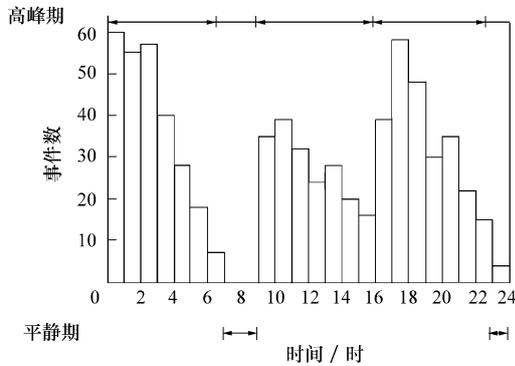


图 6 微震活动日分布图

Fig.6 Day distribution of microseism activities

图7为2010年9月1~10日的每日微震事件数和监测范围内所采场炸药使用量的关系。从图上可看出每天的微震事件数量曲线和当日炸药使用量曲线走势近乎一致。炸药使用越多，岩体所受的损伤范围和损伤程度越大，微震活动性频繁。同时，这也说明目前红透山深部采场围岩的整体损伤程度较小，微震事件的产生绝大部分是由于矿体开挖扰动引起的。

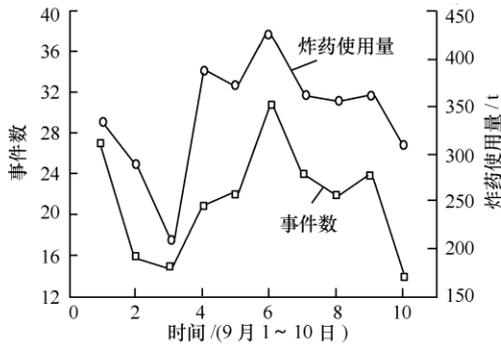


图 7 微震事件数与炸药使用量的关系

Fig.7 Relationship between MS number and explosive amount

4 累积视体积和能量指数变化规律

地震学上，广泛采用统计学理论对一定时间和空间内的事件进行分析，从而得到微震事件伴随时间和空间的演化规律。微震活动性的常用统计学参数包括视体积、视应力、能量指数^[1,11-12]。

视体积：表示震源非弹性变形区岩体的体积，是一个较为稳定的参数，可表示为

$$V_A = \frac{\mu P^2}{E} \quad (1)$$

式中： V_A 为视体积； μ 为岩石剪切模量； E 为辐射微震能； P 为微震体变势。其中微震体变势 P 可以从波形记录可靠算得。

视应力：表示震源单位非弹性应变区岩体的辐射微震能，定义为辐射微震能 E 与微震体变势 P 之比

$$\sigma_A = \frac{E}{P} \quad (2)$$

式中： σ_A 为视应力。

在地震学中，视体积和视应力是描述地震孕育过程的两个重要参数，经常用来描述地震发生前岩体的变化规律。由岩石力学理论可知，岩石在接近破坏时，变形增长加快而应力增长减少；在峰值后区，应力随变形的增长而下降。根据岩石的失稳理论，岩石破坏后岩石发生应变软化，应力下降越快，岩石失稳破坏越严重。同理也可通过视体积与视应力的变化获取岩体灾害发生前的信息与规律。

能量指数：一个微震事件的能量指数是该事件的实测辐射微震能 E 与区域内所有事件的平均微震能 $\bar{E}(P)$ 之比。平均能量可由该区域的实测平均能量和微震体变势 P 关系 $\log \bar{E}(P) = d \log P + c$ 求得

$$EI = \frac{E}{\bar{E}(P)} = \frac{E}{10^{d \log P + c}} = 10^{-c} \frac{E}{P^d} \quad (3)$$

当 $d=1.0$ 时，表示能量指数与视应力成比例关系，能量指数越大表示事件发生时震源的驱动应力越大。因此，可通过视体积与能量指数的变化获取岩体灾害发生前的信息与规律。

图8为2010年9月8~20日累积视体积与能量指数随时间的演化规律。由于能量指数与微震事件发生时震源的驱动应力成比例关系。所以该图可以看作由微震事件计算所得的岩体应力应变曲线。

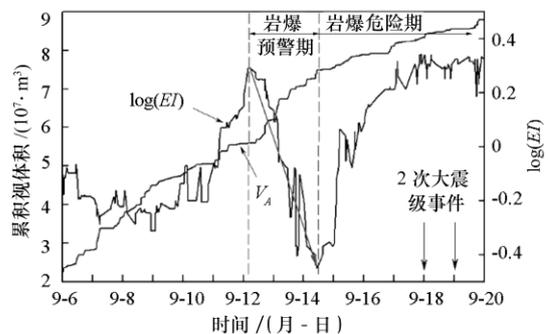


图 8 累积视体积与能量指数随时间的演化规律

Fig.8 Change of accumulative apparent Volume and energy index with time

从图9可以看出9月18~19日各有一个震级较大微震事件，分别为-0.1级和-0.2级，能量释放显著升高，远高于其他日期的能量释放水平。根据现场调查，未发现宏观的破坏现象，推断可能是岩体内部或充填体出现了较大尺度的破裂。

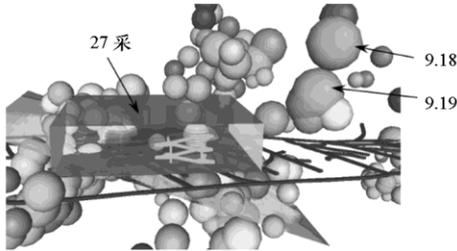


图 9 2 次大震级微震事件位置图
Fig.9 Position of the two large Magnitude MS Events

在这两个能级较大事件发生前，累积视体积与能量指数随时间的演化规律曲线可以划分为预警期和发生危险期。在9月12日之前，能量指数对数 $\lg(EI)$ 和视体积 V_A 呈逐步增加的趋势，这个时期的围岩主要出于峰值强度前的压密和弹性变形阶段；当围岩体积内的能量超过围岩体的储能能力之后，岩体内部开始发生破坏，能量指数开始下降，视体积进一步增加，反映了在该时间段内所监测范围内的岩体出现局部的应变软化现象。根据地球物理学和岩石力学原理，这是岩爆和大尺度岩体破裂发生前的显著特征，为岩爆或大尺度岩体破裂的预警期（9月12~15日），应该及时对岩爆或者大尺度的岩体破裂做出预警。随着时间的推移，视体积进一步增加，能量指数开始重新增加，进入岩爆和大尺度岩体破裂发生的危险期。最终在进入岩爆危险期后第3 d（9月18日）和第4 d（9月19日）产生较大尺度的岩体破裂事件。

采用视体积和能量指数作为参数的变化规律可以对岩爆和大尺度岩体破裂事件做出预警，当能量指数显著下降而累积视体积显著增加的时候，可以作为岩爆和大尺度岩体破裂的前兆特征。能量指数下降速度越快，累积视体积增加越快，岩爆的发生规模或岩体产生破裂的尺度越大。

5 微震活动的空间分布规律

图 10 为 2010 年 9 月 1 日至 10 月 8 日的微震事件空间分布图。微震事件的空间分布主要集中在监测范围 1（-707 中段 27 采）附近。作为目前红透山铜矿开采面积（暴露面积）最大的一个采场，其开挖扰动势必会引起围岩的逐步损伤和劣化。

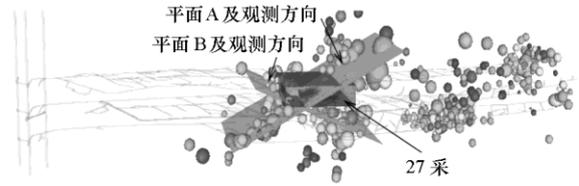


图 10 微震事件空间分布图
Fig.10 Spatial distribution of MS events

为了更深入的了解 27 采由于开挖扰动所引起的岩体损伤程度和变形大小，考虑微震事件的空间分布形态，借助 Jdi 可视化软件，针对该两个剖面上微震事件进行分析（图 10），得到 A 剖面 and B 剖面位移和能量指数对数分布图（图 11）。

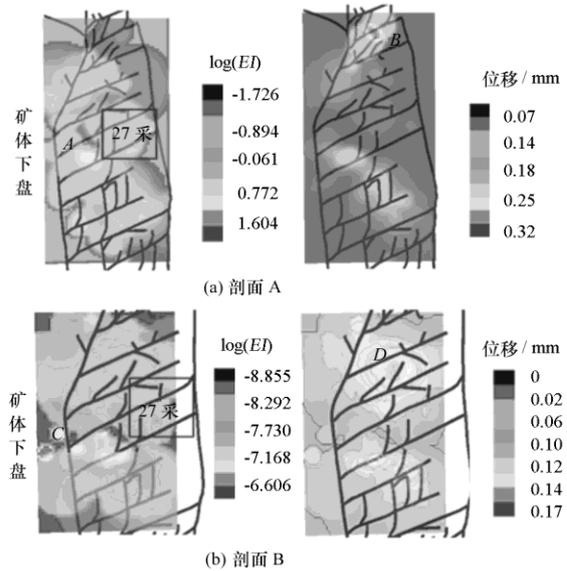


图 11 剖面 A, B 能量指数和位移云图
Fig.11 Displacement and $\log(EI)$ distribution of profile A and B

从图 11 可以看出，靠近 27 采矿体下盘运输巷道附近岩体中能量释放较高，而 27 采上下两侧出现较大程度的位移错动，在立体图中为采场顶板和边墙交汇处。因此提醒矿山有关部门，在实际的生产过程中，应注意观察该区域岩体的破碎情况，及时用撬棍将危险破碎岩石清理掉，以免发生危险，保障矿山的安全有效生产。

值得注意的是，位移变化较大区域和能量释放较高区域并不一致。微震波形记录给出了震源的应力和应变的变化，一个从软弱地质构造或岩体破坏中产生的微震事件的震源产生过程较慢，具有较小的应力差，每单位非弹性微震变形释放的能量也较少。反之，相同震源对高应力下的硬质岩体中可释放较大的能量^[1]。由于微震监测得到的应力应变是相互独立的，因此微震应变和微震应力（能量释放）

的等值线图定量上可能有所不同,这反映了岩体力学性质的不同。27 采矿体下盘运输巷道附近岩体中能量释放较高(图 11a 中 A 区域,图 11b 中 C 区域),而出现较大程度的位移错动为 11a 中 B 区域,图 11b 中 D 区域。这说明 A 区域和 C 区域的岩体坚硬程度较 B 区域和 D 区域更高。这与实际情况一致, A 区域和 C 区域的演示主要为黑云母片麻岩和角闪片麻岩,而 B 区域和 D 区域中矿石所占的比重较大,前者的强度大于后者。

6 结 论

1) 微震监测系统的定位误差小于 10 m,表明微震监测系统的性能良好、传感器空间布置合理,能够满足矿山微震监测的需要。

2) 微震活动性与采场矿体开挖体积和速度密切相关,微震活动性主要分为两个平静期和 3 个活跃期。微震事件活跃期均发生在采场集中开挖后。当集中落矿结束之后,微震活动性还会继续保持较高的水平,并呈现逐步下降趋势。微震活动性呈现主震—余震型模式。

3) 采用累积视体积和能量释放指数作为岩爆预测指标,发现岩爆和大尺度岩体破裂前存在孕育期和预警期,能量指数快速下降,累积视体积持续增长,可以看作岩爆和大尺度岩体破裂发生的前兆。

4) 27 采靠近下盘运输巷附近岩体能量释放较高,而采场顶板和边墙交汇处出现较大的位移错动。微震应变和微震应力(能量释放)的等值线图定量上可能有所不同,这反映了岩体力学性质的差异。通过微震能量指数和位移云图划分灾害发生潜在危险区域,指导矿山进行重点防护管理,可以及时消除安全隐患,确保矿山安全高效生产。

参考文献:

- [1] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [2] 李庶林,尹贤刚,郑文达,等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2048-2053.
LI Shu-lin, YIN Xian-gang, ZHENG Wen-da, et al. Research of multi-channel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2048-2053.
- [3] 姜福兴,叶根喜,王存文,等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932-1937.
JIANG Fu-xing, YE Gen-xi, WANG Cun-wen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932-1937.
- [4] 杨承祥,罗周全,唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 818-824.
YANG Cheng-xiang, LUO Zhou-quan, TANG Li-zhong. Study on rule of geostatic activity based on microseismic monitoring technique in deep mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 818-824.
- [5] 袁节平,胡静云,周爱民,等. 柿竹园多通道微震监测系统的建立及应用研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(6): 12-14.
YUAN Jie-ping, HU Jing-yun, ZHOU Ai-min, et al. Implementation and application of multi-channel microseismic monitoring system in Shizhuyuan mine [J]. Mining Research and Develop, 2010, 30(6): 12-14.
- [6] 刘晓辉,吴爱祥,王春来,等. 云南会泽铅锌矿微震监测系统应用研究[J]. 金属矿山, 2010(1): 151-154.
LIU Xiao-hui, WU Ai-xiang, WANG Chun-lai, et al. Research on application of the microseismic monitoring system in Yunnan Huize lead-zinc mine [J]. Metal Mine, 2010(1): 151-154.
- [7] 张省军. 高渗压注浆堵水帷幕稳定性及监测方法研究[D]. 沈阳: 东北大学资源与土木工程学院, 2008.
- [8] 陈炳瑞,冯夏庭,曾雄辉,等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 276-283.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in seep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 276-283.
- [9] 徐奴文,唐春安,沙椿,等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 915-924.
XU Nu-wen, TANG Chun-an, SHA Chun, et al. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of Jinpin I hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 915-924.
- [10] 杨志国,于润仓,郭然. 深井矿山微震事件波形研究[J]. 中国工程科学, 2008, 10(8): 69-72.
YANG Zhi-guo, YU Run-cang, GUO Ran. Research of seismic events waveform in deep copper mine [J]. China Engineering Sciences, 2008, 10(8): 69-72.
- [11] 唐礼忠. 深井矿地震活动与岩爆监测及预测研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全学院, 2008.
- [12] MENDECKI A J. Real-time quantitative seismology in mines[C]/YOUNG R O. Proceedings of the 3thd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: AA Balkema, 1993: 261-266.