

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1062

综合集成高精度智能微震监测技术 及其在深部岩石工程中的应用

陈炳瑞^{1,2}, 冯夏庭^{1,3}, 符启卿⁴, 王 搏⁴, 朱新豪^{1,2},
李 涛^{1,2}, 陆菜平⁴, 夏 欢⁴

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 4. 湖北海震科创技术有限公司, 湖北 武汉 430072;
5. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 通过微震技术获取更多的岩石工程灾害演化过程微震信息, 自动识别岩石破裂微震信息, 自动精准定位岩石破裂的位置, 为灾害分析、预警与防控提供理论与技术支持, 一直是科学家和工程师研究的热点与难点。针对这些难点, 研发了传感-采集-传输一体化集成技术、32 位 A/D 与元器件联合降噪采集技术、微震信号递归 STA/LTA-BP 神经网络综合识别方法以及基于 PTP 高精度时间同步策略的速度模型数据库速配微震源定位算法, 并对这些技术进行了综合集成, 提出了综合集成高精度智能微震监测技术。目前该技术已在国内外多个深部岩石工程进行了应用。应用结果表明, 该技术既可应用于岩爆、冲击地压等动力型灾害监测, 又可应用于岩石工程开挖(开采)围岩稳定性监测, 还可推广应用于矿产资源防盗采监测, 一定程度上提升了岩石工程灾害演化过程微震信号的捕获能力、岩石破裂微震信号的识别能力和微破裂源的定位精度, 推动微震监测技术朝着岩石工程灾害自动监测、分析与智能预警方向快速发展。

关 键 词: 微震; 识别算法; 定位算法; 岩爆; 滤波; 岩石工程

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 07-2422-10

Integration and high precision intelligence microseismic monitoring technology and its application in deep rock engineering

CHEN Bing-rui^{1,2}, FENG Xia-ting^{1,3}, FU Qi-qing⁴, WANG Bo⁴, ZHU Xin-hao^{1,2},
LI Tao^{1,2}, LU Cai-ping⁴, XIA Huan⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 4. Hubei Seaqueake Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430072, China; 5. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining (Ministry of Education), China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: It has been popular and difficult for scientists and engineers to acquire more microseismic information, automatically identify microseismic data of rock rupture, locate the location of rock rupture automatically and accurately, and provide theoretical and technical support for disaster analysis, early warning, and prevention and control. In view of these difficulties, an integrated and high precision intelligence microseismic monitoring technology was developed. In the microseismic monitoring technology, several innovation techniques are developed, which include that a sensing-acquisition-transmission technology was integrated; the acquisition technology with noise reduction of 32 bits A/D coupled with electric components was established; integrated identification method of microseismic signal including recursive STA/LTA method and BP neural network method was proposed; the microseismic source location algorithm based on the technique of PTP high-precision time synchronization and the algorithm of velocity model fast matching in database was developed. At present, this technique has been applied in many deep rock engineering at home and abroad. The application results show that the developed technique can be applied not only to monitoring dynamic disasters such as rock burst, but also to monitoring the stability of surrounding rockmass in excavation (mining) of rock engineering, and also to monitoring

收稿日期: 2019-06-17

修回日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51539002, No. 51479192); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目 (No. 2017G006-B)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51539002, 51479192) and China Railway Corporation Science and Technology Research and Development Project (2017G006-B).

第一作者简介: 陈炳瑞, 男, 1976 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石工程灾害孕育过程微震监测与分析技术、预警理论与方法、灾害孕育机制及防护研究工作。E-mail: brchen@whrsm.ac.cn

anti-theft mining of mineral resources. From these application cases, it has been show that the capacity of acquiring microseismic signals, identifying microseismic signals of rock rupture automatically, and locating the location of rock rupture accurately was improved during rock engineering disaster evolution using the developed microseismic technique. The developed technique can promote the rapid development of microseismic monitoring technology towards automatic monitoring, analysis and intelligent early warning of rock engineering disasters.

Keywords: microseismic; recognition algorithm; location algorithm; rockburst; de-noising method; rock engineering

1 引 言

最早用于矿山监测的是 1908 年德国的科学家 Mintrop, 他在德国的 Ruhr 煤矿建立了第 1 个用于矿山观测的微震台站; 20 世纪 20 年代, 波兰在西里西亚煤矿建立了微震监测系统; 20 世纪 40 年代, 在南非金矿建立了微震监测系统, 美国矿业局同一时间段也用微震监测技术进行矿井灾害监测^[1-3]。20 世纪 60 年代, 中国科学院地球物理所在门头沟矿利用改装哈林地震仪研制的 581 微震仪进行矿山灾害监测, 这个时期的微震仪主要有两个特点, 一是由地震仪改装而成, 费用昂贵, 监测的微震信号频率段以接近微地震的频率段为主; 二是定性监测和评估微震源的位置、发生时间及尺寸^[4-5]。

能监测更高频率段, 且能比较精确、定量、实时地评估地震发生震级、位置及时间的数字型微震监测技术, 是随着计算机技术及通讯技术的发展而出现的, 如今已取得了巨大的进步, 已在矿山、边坡、采空区、隧洞、活断层、水库、地下核废料存储、石油、地热、天然地震试验场等多个领域得到广泛应用。现代化的微震监测技术在国外起步较早, 许多国家已有相对较先进成熟的微震监测系统。如南非 ISS 高精度微震监测系统^[6]、加拿大 ESG 微震监测系统^[7]、波兰矿山研究总院的 SOS 微震监测系统^[8], 澳大利亚、俄罗斯、美国、英国等国家也对现代化微震监测技术进行了大量研究与应用^[9]。我国现代化微震监测技术起步较晚, 前期主要集中在矿山领域, 2004 年在凡口铅锌矿建成首套使用于金属矿山的全数字型微地震监测系统, 之后微震监测技术如雨后春笋般在矿山得到迅速发展^[7]; 其在水利水电行业的发展与应用则开始于 2009 年。为了监测和防治施工过程中的灾害及风险, 锦屏一级和二水电站、白鹤滩水电站、猴子岩水电站等一大批水电站先后引入和应用了微震监测技术, 该技术对工程灾害的预警和防治发挥了重大作用^[10-13]。现代化微震监测技术引入与应用的同时, 也涌现了一批现代化微震监测技术研发团队, 如山东科技大学与澳大利亚联邦科学院联合研发团队^[14]、北矿院的 BMMS 矿用微震监测研发团队^[15]、辽宁工程技术大

学团队^[16]、中国科学院武汉岩土力学研究所与湖北海震科创技术有限公司组建的中科微震联合研发团队^[17]等。

经过 100 多年的发展, 微震监测技术取得了长足的进步, 已在水利水电、矿山、隧道等工程领域得到广泛应用。但如何通过微震技术获取更多的灾害演化过程中岩石破裂微震信息, 如何自动识别出这些岩石破裂微震信息, 如何根据监测获取的这些岩石破裂微震信息, 精确确定岩石破坏发生的位置, 一直以来都是科学家和工程师研究的热点与难点。

为解决上述难题, 研究人员在国家自然科学基金委基金项目和国家“十二五”科技支撑计划课题的资助下, 经过 10 多年的努力, 研发了传感-采集-传输一体化集成技术、32 位 A/D 与元器件联合降噪采集技术、微震信号递归 STA/LTA 与 BP 神经网络综合识别方法以及基于 PTP 高精度时间同步策略的速度模型数据库速配微震源定位算法。对这些技术进行综合集成, 提出了综合集成高精度智能微震监测技术, 即中科微震监测技术 (SinoSeiSm monitor technique, 简称 SSS 微震监测技术), 该技术在一定程度上提升了灾害演化过程中岩石破裂微震信息的捕获能力、识别能力和定位精度, 正使微震监测技术朝着岩石工程灾害自动监测、分析与智能预警方向快速发展。

2 综合集成高精度智能微震监测技术及其创新

2.1 提出传感-采集-传输一体化集成微震监测技术

深部岩石工程岩爆等灾害多发生在开挖 (开采) 面附近或其扰动范围内, 比如深埋隧洞岩爆灾害主要发生在掌子面后方 30 m 的范围内^[18], 该区域既是开挖、支护密集施工区, 又在爆破开挖碎石飞射的范围内, 传统的有线微震监测技术难以在该区域布置传感器, 传感器只能布置在爆破开挖 (开采) 碎石飞射的范围之外。因此, 掌子面前后岩爆孕育过程的岩石破裂微震信息, 尤其是小尺寸的微弱信息丢失严重, 将会对岩爆等灾害孕育规律认知与预警产生很大的影响。

为此,针对这一工程技术难题,创新了传感-采集-传输一体化集成微震监测技术,该技术首先,对传感器快速安装与回收装置进行了改进,将南非 ISS 公司的小螺纹单向刚性接触装置,改进为大螺纹三向刚性接触,如图 1 所示。这既提高了信号的接收质量、传感器安装与回收速度,又延长了安装与回收装置的生命周期;然后,将传感器、采集仪、无线发射装置进行综合集成,并设计成“圆筒状”,直接将其安装进钻孔内,降低了安装在掌子面后岩爆高风险区时被损坏的风险;为解决供电问题,采取了“三层”省电模式,即首先对传感器进行优选,选取不需供电的动圈式传感器,并对采集单元电器元件进行优选,全部采取超低功耗电器元件;最后,采取“触发唤醒式”供电方式给无线发射单元进行供电,较好地解决了传感器快速安装及小尺寸破坏产生的弱微震信号连续采集的问题,结构如图 2 所示。

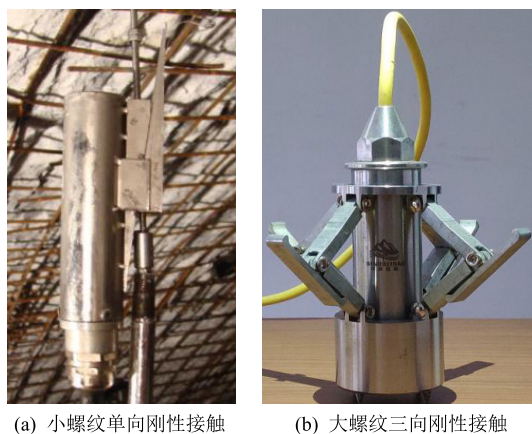


图 1 传感器快速安装与回收装置

Fig.1 Quick installation and recovery device of sensor

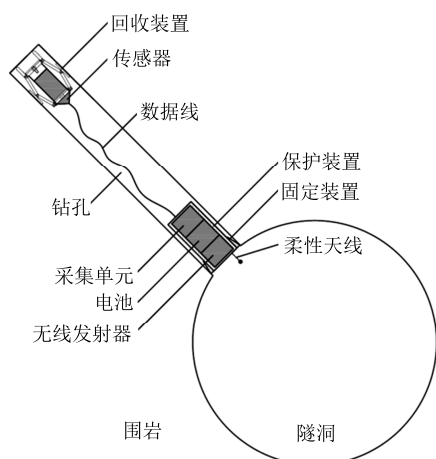


图 2 传感-采集-无线发射一体化微震监测系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of integrated microseismic monitoring system of sensor-acquisition-wireless transmission

2.2 设计了 32 位 A/D 与元器件联合降噪采集技术

现有微震系统 A/D 转换位数一般以 18 位或 24 位为主,这虽然可以满足一般工程监测的需要,但若获取更多的大尺寸、远距离低频弱信号,目前 A/D 模块还有待于进一步提升。更微弱、更精准的低频信号采集、破坏源机制分析,需要设计更高精度的 A/D 转换采集模块。A/D 转换位数越高、采样频率越大,采集模块的负荷就越大,对集成电路板、处理器及各电器元件之间的配置与优化要求越高,不合理的配置将会导致采集更多的背景噪音。

为此,设计了 32 位 A/D 与元器件联合降噪采集技术^[17],该技术主要思想是:首先,对元器件进行评比,择优选取;接着,优化设计外部供电电路,尽可能的消除外界不稳定电压影响与纹波干扰,确保能为整个采集系统提供清洁电源;然后,在 A/D 模块前设置前置电路,并对前置电路进行优化设计,前置电路内设置前置滤波元器件,进一步消除混入的残余噪音;再通过 32 位 A/D 模块对信号进行模数转换;最后,通过基于硬件的 BP 神经网络滤波模块,进一步降低采集设备自身的本底噪音,获取低噪音清洁信号。

图 3 为本文技术与 24 位 A/D 采集仪的试验对比结果,可以看出在实验室条件下 32 位 A/D 采集仪采集能力达 1.0×10^{-7} m/s 量级,而 24 位 A/D 采集仪采集能力仅达 4.0×10^{-7} m/s 量级,将微震监测系

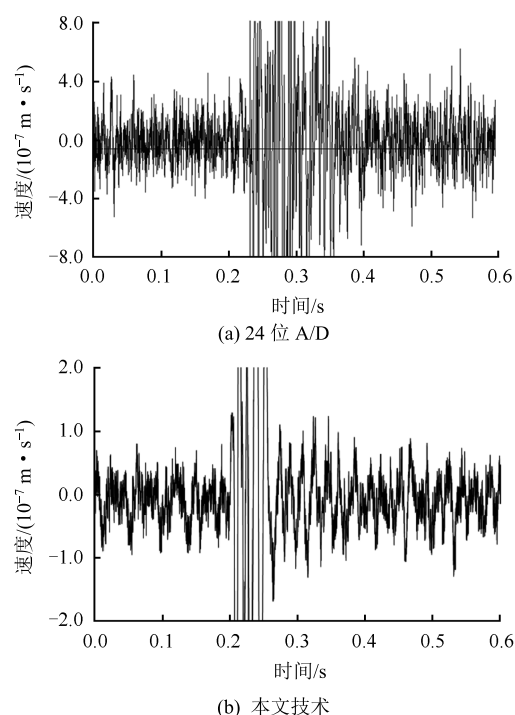


图 3 本文技术与 24 位 A/D 采集仪灵敏度对比

Fig.3 Comparison of acquisition instrument sensitivity between 32-bit A/D unit in this study and 24-bit A/D unit

统捕捉岩石工程灾害孕育过程大尺寸远距离弱岩石破裂信号的能力提升近 4 倍。

2.3 微震信号递归 STA/LTA-BP 神经网络综合识别方法

关于信号识别算法前人已做了大量研究^[19-24], 不同类型信号识别算法侧重点不同, 有的善于识别强岩石破裂信号, 有的对弱岩石破裂信号有更好的识别效果, 但很难做到一种微震信号识别算法各种条件下都通用。充分利用不同算法的优点, 进行有机融合, 对微震信号进行综合识别是未来发展的一条重要途径。

STA/LTA 算法作为一种信号拾取算法, 以其计算量小、简单稳定、便于实时处理的特点, 在微震监测中得到广泛应用^[24-28], 但该算法的研究热点主要在 P 波初至拾取和提高信噪比方面, 用其进行信号自动识别的研究较少。研究发现, 在递归 STA/LTA 算法中各种电气干扰信号和岩石破裂信号的 STA/LTA (STA 为短时窗函数, LTA 为长时窗函数) 比值具有明显的差异性^[29]: 岩石破裂信号的 STA/LTA 比值大多数大于 2.2, 而电气干扰信号的 STA/LTA 比值大部分小于 2.2, 如图 4 所示。因此, 用递归 STA/LTA 方法进行复杂电气干扰条件下的岩石破裂信号识别具有较好的效果。

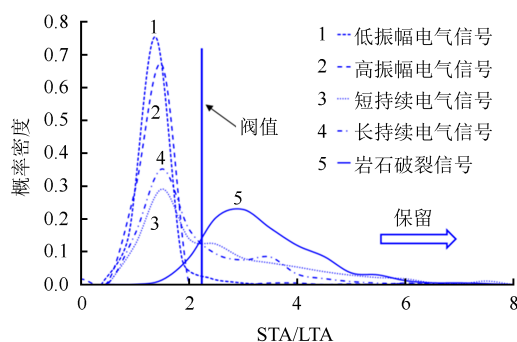


图 4 不同微震信号在第 2 040 采样点处 STA/LTA 比值概率密度分布^[29]

Fig.4 Distribution of STA/LTA ratio probability density of various waveform signals at the No. 2 040 sampling point^[29]

人工神经网络、深度学习等算法因其具有自适应学习功能在微震信号识别中有着广泛的应用, 当其特征值选取正确、提取准确的情况下, 微震信号识别有着较好的识别精度^[30]。但当外界环境复杂信号干扰严重时, 识别精度大打折扣, 因此, 有必要扬长避短, 与其他算法进行联合识别。

充分利用递归 STA/LTA 微震信号识别算法和 BP 神经网络信号识别算法的优点, 将二者进行联合, 建立了微震信号递归 STA/LTA-BP 神经网络综合识

别算法, 流程见图 5, 步骤如下:

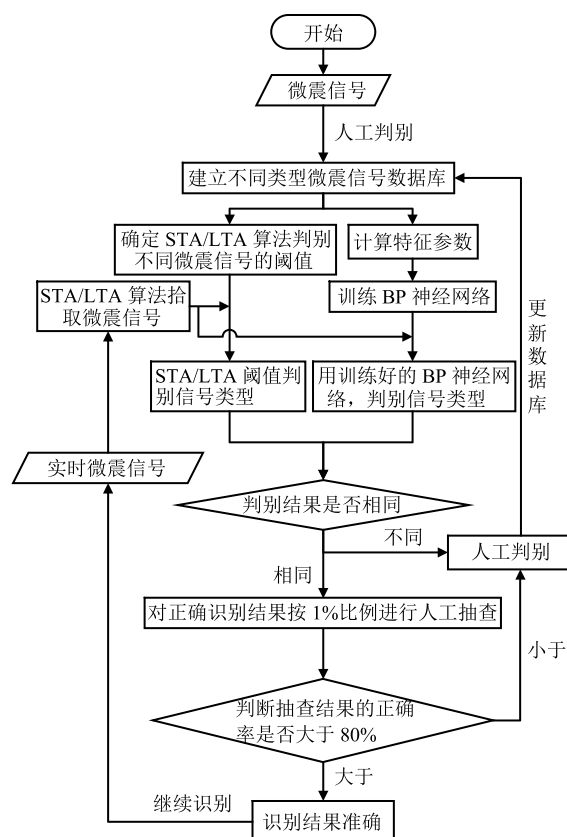


图 5 基于递归 STA/LTA 与 BP 神经网络的微震信号综合识别算法流程图

Fig.5 Flowchart of microseismic signals comprehensive recognition algorithm based on recursive STA/LTA and BP neural network

(1) 通过人工判别, 建立一定数量不同类型微震信号数据库;

(2) 根据已建立的微震信号数据库, 确定递归 STA/LTA 算法判别岩石破裂信号与其他微震信号的阈值;

(3) 根据已建立的微震信号数据库, 计算持续时间、上升时间、P-S 波到时差、最大振幅、主频、最大频谱值等特征参数, 并训练 BP 神经网络;

(4) 利用递归 STA/LTA 算法对实时采集数据进行微震信号拾取, 并判别信号类型; 同时计算神经网络所需要的上述特征参数, 并将其输入已经训练好的 BP 神经网络, 识别信号的类型;

(5) 若同一信号两种算法判断结果相同, 则认为识别正确, 进入第 7 步; 否则, 认为是问题信号, 进行人工识别, 进入步骤 (6);

(6) 根据人工识别的结果, 更新微震信号数据库, 并返回步骤 (2)。

(7) 对正确识别结果按 1% 比例进行人工抽查, 抽查结果的正确率大于 80%, 进行第 8 步; 否则,

返回步骤(1), 补充新的微震信号。

(8) 识别结果准确, 返回步骤(4), 继续信号识别。

采用微震信号递归 STA/LTA-BP 神经网络综合识别方法, 对文献[30]的微震数据进行识别, 结果如表 1 所示, 可以看出: 对于爆破信号、电气信号和钻机凿岩信号, 综合识别方法和基于 BP 神经网络算法, 都能获取较好的识别精度; 对于岩石破裂信号, 综合识别方法能获取更好的识别精度, 更为重要的是综合算法识别结果更为稳健。

表 1 BP 神经网络与递归 STA/LTA-BP 神经网络识别结果
Table 1 Seismic signals recognition results using BP neural network and recursive STA/LTA - BP neural network

类型	总数	BP 神经网络		STA/LTA-BP 神经网络	
		正确识别率 /%	错误识别类型	正确识别率 /%	错误识别类型
爆破	37	97.3	锚杆	94.6	锚杆
岩石破裂	27	74.1	电气	88.9	电气
电气	20	95.0	破裂	100.0	破裂
钻机凿岩	24	91.7	爆破	95.8	爆破

2.4 基于 PTP 高精度时间同步策略的速度模型数据库速配微震源定位算法

微震源定位是微震监测技术重要研究内容, 影响微震源定位精度的因素很多, 比如到时、速度模型、定位算法等, 对此已有许多学者对此进行了大量的研究^[25-41]。

学者们大多通过到时拾取算法提高到时准确性^[25-28], 但较少涉及到考虑不同采集仪时间同步精度的影响。

室内试验发现, 基于 NTP 协议时间同步技术, 无 GPS 信号的条件下, 在 WANs (wide area networks) 内的不同采集仪之间时间同步精度约在 10~100 ms, 在 LAN (local area network) 内不同采集仪之间的时间同步精度约在 0.5~2.0 ms, P 波在硬岩中传播的波速是 5 000 m/s 左右, 因此, 时间同步精度对微震源定位误差的影响无法忽略。

为此, 引入了基于 PTP 协议时间同步技术, 该技术的核心思想是既动态监测微震系统内不同采集仪之间的时钟误差, 又动态监测信号在通讯系统内不同线路传输的时间差。依据二者之和对采集仪时钟进行校正, 避免了线路及线路堵塞延迟带来得校时误差, 从而使采集仪具有较高的时间同步精度。图 6 为中国计量科学研究院测试的无 GPS 信号条件下两台采集仪之间的时间同步误差, 最大时间同步误差约为 0.15 μ s, 时间同步精度得到大幅提升, 从

而降低由于采集仪之间的时间同步误差而产生的微震源定位误差。

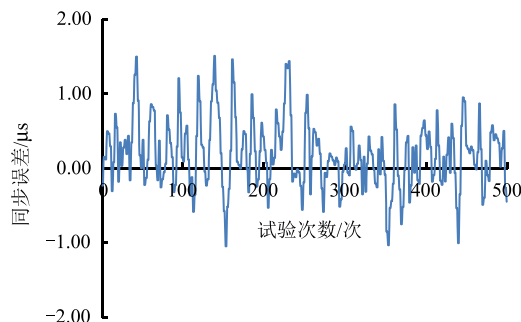


图 6 基于 PTP 技术两台采集仪之间的时间误差
Fig.6 Time error between two acquisition instrument units based on PTP technology

为提高微震源定位精度, 国内外学者对弹性波在地质介质中传播的速度模型进行了大量的研究, 针对不同的工程条件, 提出了各种不同的速度模型, 比如均匀速度模型、层状速度模型、区域速度模型、各向异性速度模型等^[33-36], 这些速度模型提升了特定条件下的微震源定位速度与精度, 但也存在各自的不足, 比如均匀速度模型要求地质材料的均匀性足够好, 层状速度模型要求地质材料是层状的, 区域速度模型要求局部区域内地质体的均一性较好, 各向异性速度模型是一种理想的速度模型, 实际工程中难以使用等。

为了尽可能的提供一种能准确反映波在地质材料中传播速度的可靠的速度模型, 提出了一种基于数据库动态速配速度模型, 该模型的基本思想是“使速度模型尽可能地反映波在地质材料中传播速度的差异性”, 实现流程如下: 首先对监测对象, 依据监测目的和地质条件进行区域划分; 接着, 将传感器进行分组, 每组传感器个数至少 4 个, 假设该工程有 n 个传感器, 那么传感器组合有 $C_n^4 + C_n^5 + \dots + C_n^n$ 种; 然后, 依据爆破等已知震源点, 通过反分析方法确定每组传感器的最佳速度模型, 并将其存入数据库, 数据库速度模型依据不同区域已知震源点动态反演的速度模型择优动态更新; 最后, 微震源定位时, 依据参与定位的传感器组合, 与数据库已有速度模型进行动态匹配, 从而达到快速准确确定最佳速度模型的目的。图 7 是某工程爆破事件, 在到时、定位算法、传感器阵列等影响微震源定位精度的因素完全相同的条件下, 采用均匀速度模型和数据库动态速配速度模型的定位结果, 可以看出采用数据库动态速配速度模型具有更好的定位精度。

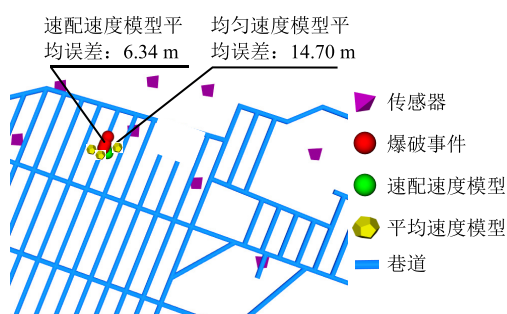


图 7 基于均匀速度模型和数据库动态速配速度模型爆破事件定位结果对比图

Fig.7 Comparison of blasting event location results based on uniform velocity model and database dynamic fast matching velocity model

关于微震源定位算法国内外学者已进行了大量研究,提出了许多定位方法,可分为两大类^[31-32, 34-41],一类是依赖系数矩阵的传统定位算法^[31-32, 38-41],该类方法当传感器为良性阵列时,能快速求得最佳微震源位置;反之,难以保证微震源的定位精度,且定位算法易发散,代表性算法有最小二乘法、单纯形法、鲍威尔法、牛顿法等;另一类是不形成系数矩阵的群智能定位算法^[35-37],该类方法的优点是当传感器为非良性阵列时,也能搜索到最佳微震源位置,缺点是传感器为良性阵列时微震源定位速度较传统定位算法慢,代表性算法有遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、粒子群算法等。

综上所述,引入基于 PTP 协议时间同步技术,并融合基于数据库动态速配速度模型,当传感器为良性阵列时,采用改进的牛顿算法进行定位计算^[38];当传感器为非良性阵列时,采用粒子群算法进行定位计算^[36],该方法对传感器阵列具有更好地适用性,提高了微震源定位的精度和稳定性,具有较好的应用价值。

3 在深部岩石工程中的应用

3.1 在岩爆监测预警中的应用

巴基斯坦某水电工程,通过深埋引水隧洞引水发电,引水隧洞双洞段采用 TBM 施工,穿越区域地质条件复杂(砂岩、粉砂岩和泥岩岩层变化快且厚薄不一)、埋深大、地应力高,开工以来岩爆灾害频发,给工程安全施工带来极大危害^[42]。为此,引入了综合集成高精度智能微震监测技术,本次监测使用 1 台高精度微震采集仪、6 个速度型传感器。速度传感器中有 1 个是三向速度传感器,5 个是单向速度传感器,分两排布置,每排 3 个速度型传感器。第 1 排距离掌子面 10~30 m,第 2 排距离掌子面 50~70 m(具体距离视 TBM 安装条件而定)。

图 8 为代表性监测结果,可以看出发生岩爆和应力型塌方的区域,微震事件空间聚集规律明显,提出的微震监测技术可以较好地获取了岩爆孕育过程微震信息,较好地确定了岩爆孕育过程中岩石破裂源的空间位置,尤其是掌子面附近岩石破裂源(传感器阵列外)空间位置。监测以来,岩爆灾害预警准确,施工支护更有针对性,岩爆灾害发生的频次明显降低,TBM 掘进速率明显加快,有效降低了支护成本,未出现重大人员伤亡和机械设备损失,最大限度地降低了一线人员对岩爆的恐慌情绪,为岩爆预警与防治提供重要技术支撑。

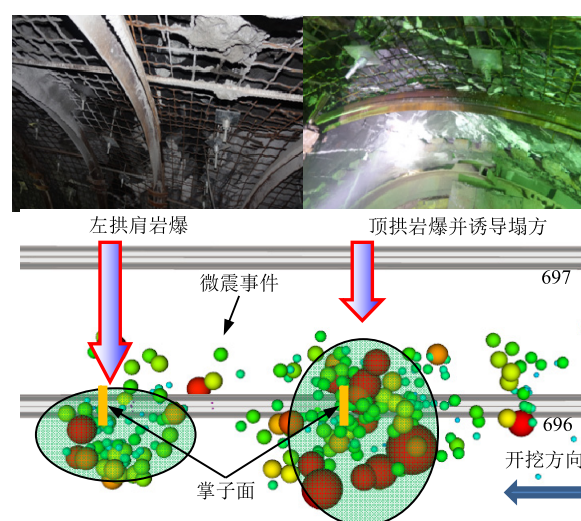


图 8 2016 年 9 月份 2 次典型岩爆孕育过程岩石破裂微震事件空间分布

Fig.8 Spatial distribution of rock rupture microseismic events during the development of two typical rockbursts in September 2016

3.2 在矿山开采围岩稳定性监测中的应用

辽宁省抚顺红透山铜矿是我国典型的深部金属矿山之一,开采深度超过 1 000 m 后,多次发生岩爆、应力型塌方等动力型破坏,已经严重影响矿山的安全生产,-707 中段 47 采场尤为严重^[43]。为此,在 47 采场利用综合集成高精度智能微震监测技术开展了微震监测,重点监测采场顶底板、出矿口附近围岩和采场周围围岩的稳定性,本次监测共使用 2 台高精度微震采集仪、12 个速度型传感器。速度型传感器中有 2 个三向传感器。传感器主要布置在 47 采场的顶底板,如图 9 所示。

2016 年 6 月 8 日大型爆破后,47 采场顶板、出矿口、-707 中段靠近 47 采场的主巷道附近及 47 采场内 4 个区域围岩岩石破裂源微震事件较多,且空间位置集中,现场巡视发现 47 采场顶板 3502 川、47 采场出矿口及-707 中段靠近 47 采场的主巷道附

近围岩都发生不同程度的破坏,如图9所示,采场内岩石破裂微震事件聚集区因无法巡视未见其破坏现场。47 采场顶板 3502 川破坏严重,多处发生板状剥落,剥落块体大小厚薄不一,破坏面新鲜,无明显充填,位置主要发生在 3502 川的顶板及右拱肩,破坏明显为开采后应力调整所致;47 采场出矿口附近围岩以碎裂破坏为主,掉落岩体以碎块为主,破坏面既有新鲜破坏面,又有老旧破坏面,主要是由前期出矿和大爆破扰动所致;靠近 47 采场的主巷

道破坏主要以沿岩结构面的块状掉落为主,破坏面多有铁锰质充填兼有少许新鲜破裂,主要为大爆破扰动所致。

微震监测定位破坏位置与现场围岩实际破坏位置具有较好的一致性。依据微震监测结果,矿山对 47 采场 3502 川进行了封堵,出矿口附近进行了围岩加固,并制定了大爆破后依据微震监测结果加强巡视的计划,为矿山灾害风险防控与管理提供了有力的技术支撑。

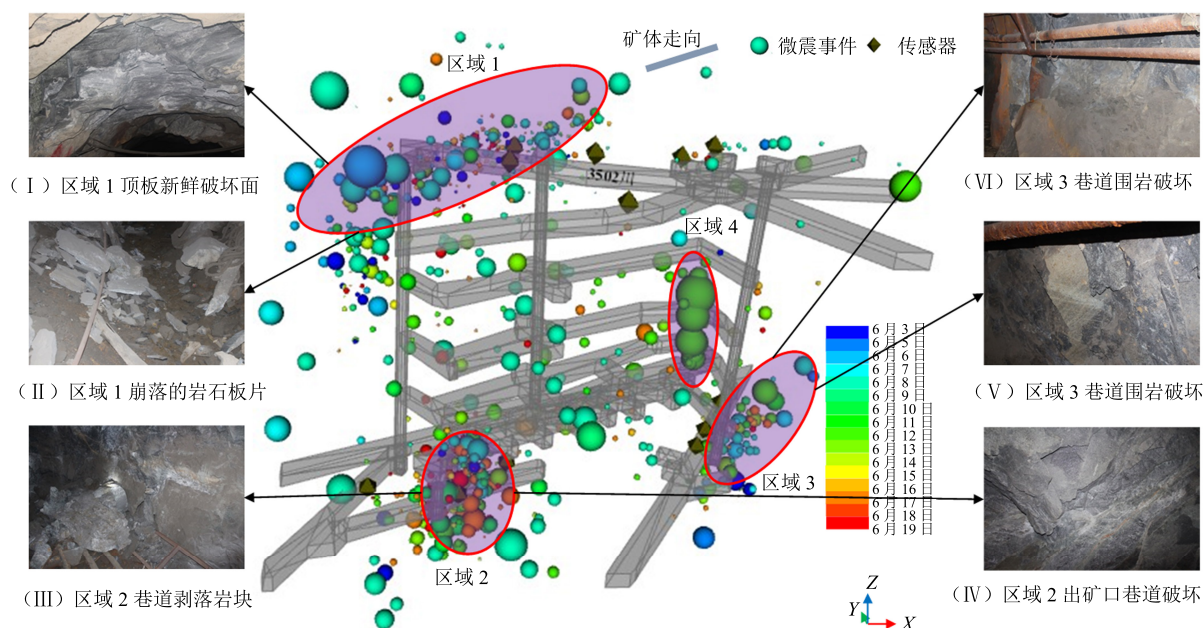


图9 大爆破后 47 采场岩石破裂微震事件空间分布及围岩破坏^[43]

Fig.9 Spatial distribution of rock rupture microseismic events and surrounding rockmass failure in No. 47 stope after large blasting^[43]

3.3 在矿产资源防盗采中的应用

某工程矿区周边小矿点众多,超层越界开采情况严重,导致严重的经济损失并引发一系列的安全隐患。为此,引入了综合集成高精度智能微震监测技术,重点监测矿区北侧和东北侧盗采情况监测,共使用 2 台高精度微震采集仪、12 个速度型传感器,速度型传感器含 2 个三向传感器,传感器均布置在 -230 水平,靠近上盘运输巷的一侧,如图 10 所示。

2018 年 9 月 23 日到 10 月 31 日,共监测到 1 415 个微震事件,矿山的反馈 189 次异常爆破均被微震监测系统监测到,除去正常开采及矿山其他微震事件外,异常爆破空间分布如图 10 所示,异常爆破被分为 3 个区域,疑似区 1~3 分别位于矿区 -185 水平,7 采场 9~11 回收巷、13 联巷 6-1 溜井附近和 2 号采场 7~9 进路。依据监测结果,矿方进行现场巡视与侦查,在疑似区 1 和疑似区 2 东南侧发现盗采竖井,疑似区 1 和疑似区 2 为经竖井进入的实际

盗采区。矿方依据监测结果与现场实际踏勘结果报警,解决了越境盗采问题。

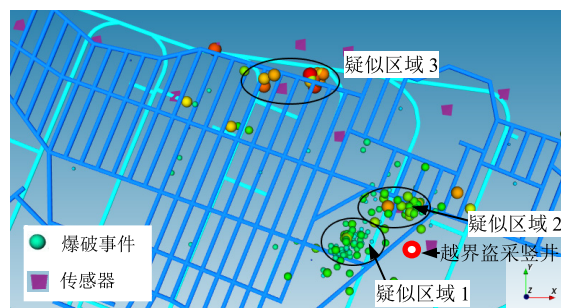


图 10 传感器及异常爆破事件空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of sensors and abnormal blasting events

4 结 论

研发的综合集成高精度智能微震监测技术,在微震信号的捕获技术、岩石破裂微震信号识别算法

和微震源定位算法上取得了一定进步, 提高了岩石工程灾害演化过程微震信号的捕获能力、岩石破裂微震信号的识别能力和微破裂源的定位精度, 具体如下:

(1) 微震信号传感-采集-传输一体化集成技术, 提升了微震监测技术捕获开挖(开采)面附近小尺寸破坏产生的弱微震信号的能力; 32位 A/D 与元器件联合降噪采集技术, 提升了微震监测技术捕捉岩石工程灾害孕育过程大尺寸远距离弱岩石破裂信号的能力。

(2) 微震信号递归 STA/LTA-BP 神经网络综合识别方法, 能更好、更稳健地识别不同类型微震信号, 尤其是对岩石破裂信号具有更好的识别精度。

(3) 基于 PTP 高精度时间同步策略的速度模型数据库速配微震源定位算法, 对传感器阵列具有更好地适用性, 提高了微震源定位的精度和稳定性。

虽然综合集成高精度智能微震监测技术正推动微震监测技术朝着岩石工程灾害自动监测、分析与智能预警方向发展, 但完全实现岩石工程灾害的自动监测、分析与预警仍有较长的路要走, 这也是基于微震技术灾害监测、分析与预警未来研究的难点与热点。

致谢: 感谢中国有色集团抚顺红透山矿业有限公司和五矿邯邢矿业有限公司北洺河铁矿在现场监测及资料获取时的支持与帮助!

参考文献

- [1] GIBWICZ S J. Seismicity induced by mining[J]. **Advance in Geophysics**, 1990, 32: 49-80.
- [2] 李世愚, 和雪松, 张少泉, 等. 矿山地震监测技术的进展及最新成果[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 853-859.
LI Shi-yu, HE Xue-song, ZHANG Shao-quan, et al. Progress and the latest achievements in mine earthquake monitoring technology[J]. **Progress in Geophysics**, 2004, 19(4): 853-859.
- [3] 张少泉, 张诚, 修济刚, 等. 矿山地震研究述评[J]. 地球物理学进展, 1993, 8(3): 69-85.
ZHANG Shao-quan, ZHANG Cheng, XIU Ji-gang, et al. Review of mines seismicity[J]. **Progress in Geophysics**, 1993, 8(3): 69-85.
- [4] 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.
LI Shu-lin. Discussion on microseismic monitoring technology and its applications to underground projects[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(1): 122-128.
- [5] 许绍燮. 581 型微震仪设计和试验结果[J]. 地球物理学报, 1959, 8(2): 109-122.
XU Shao-xie. Design and experimental results of 581 microseismic device[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1959, 8(2): 109-122.
- [6] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [7] 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 at Fankou Lead-zinc mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2048-2053.
- [8] 谢鹏飞, 明月. 基于 SOS 微震监测系统的综放工作面来压周期分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 986-991.
XIE Peng-fei, MING Yue. Fully-mechanized coalface weighting analysis based on SOS micro-seismic monitoring system[J]. **Engineering Geology**, 2012, 20(6): 986-991.
- [9] 赵向东, 陈波, 姜福兴. 微地震工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 2): 2609-2612.
ZHAO Xiang-dong, CHEN bo, JIANG Fu-xing. Study of micro-seismic engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Suppl. 2): 2609-2612.
- [10] 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): 915-925.
XU Nu-wen, TANG Chun-an, SHA Chun, et al. Microseismic monitoring system establishment and its engineering application to left bank slope of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 915-925.
- [11] 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): 275-283.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during tbm tunneling in deep-buried tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 275-283.
- [12] CHEN B R, LI Q P, FENG X T, et al. Microseismic monitoring of columnar jointed basalt fracture activity: a trial at the Baihetan hydropower station, China[J].

- Journal of Seismology**, 2014, 18(4): 773-793.
- [13] 徐奴文, 戴峰, 李彪, 等. 猴子岩水电站地下厂房开挖过程微震特征与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3175-3186.
XU Nu-wen, DAI Feng, LI Biao, et al. Microseismic characteristics and stability evaluation of the underground powerhouse at Houziyan hydropower station subjected to excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl. 1): 3175-3186.
- [14] 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.
JIANG Fu-xing. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 147-149.
- [15] 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.
ZHANG Yin-ping. Rock-mass acoustic emission and micro-seismic monitoring and localizing technology and its application[J]. **Engineering Blasting**, 2002, 8(1): 58-61.
- [16] 潘一山, 赵扬峰, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1002-1011.
PAN Yi-shan, ZHAO Yang-feng, GUAN Fu-hai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application[J]. **Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 1002-1011.
- [17] 陈炳瑞, 冯夏庭, 符启卿, 等. 一种多功能综合集成高精度智能微震监测系统, 中国: ZL201410315874.6[P]. 2014-7-3.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, FU Qi-qing, et al. A multifunctional integrated high precision intelligent microseismic monitoring system. China: ZL201410315874.6[P]. 2014-7-3.
- [18] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing, et al. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [19] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 772-775.
LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WU Xing-rong, et al. Frequency spectrum analysis on microseismic monitoring and signal differentiation of rock material[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 772-775.
- [20] MALOVICHKO D. Discrimination of blasts in mine seismology[C]//Deep and High Stress Mining. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2012: 1-8.
- [21] VALLEJOS J A, MCKINNON S D. Logistic regression and neural network classification of seismic records[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 62(9): 86-95.
- [22] DONG L J, WESSELOO J, POTVIN Y, et al. Discriminant models of blasts and seismic events in mine seismology[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2016, 86: 282-291.
- [23] 朱权洁, 姜福兴, 尹永明, 等. 基于小波分形特征与模式识别的矿山微震波形识别研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2036-2042.
ZHU Quan-jie, JIANG Fu-xing, YIN Yong-ming, et al. Classification of mine microseismic events based on wavelet-fractal method and pattern recognition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(11): 2036-2042.
- [24] TSELENTIS G, MARTAKIS N, PARASKEVOPOULOS P, et al. A method for microseismic event detection and P-phase picking[C]//SEG Technical Program Expanded. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 1638-1642.
- [25] 李贤, 王文杰, 陈炳瑞. 工程尺度下微震信号及 P 波初至自动识别 AB 算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 681-689.
LI Xian, WANG Wen-jie, CHEN Bing-rui. AB algorithm for automatic recognition of microseismic signals and P-waves at engineering scale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(3): 681-689.
- [26] 贾瑞生, 谭云亮, 孙红梅, 等. 低信噪比微震 P 波震相初至自动拾取方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1845-1852.
JIA Rui-sheng, TAN Yun-liang, SUN Hong-mei, et al. Method of automatic detection on micro-seismic P-arrival time under low signal to noise ratio[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(8): 1845-1852.
- [27] 董超, 王恩元, 晋明月, 等. 分形计盒维数的微震波初至自动识别[J]. 煤矿安全, 2013, 44(6): 198-201.
DONG Chao, WANG En-yuan, JIN Ming-yue, et al. Automatic identification first arrival of microseismic waves by fractal box-counting dimension[J]. **Safety in Coal Mines**, 2013, 44(6): 198-201.
- [28] VALLEJOS J A, MCKINNON S D. Logistic regression

- and neural network classification of seismic records[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 62(9): 86-95.
- [29] 陈炳瑞, 吴昊, 池秀文, 等. 基于 STA/LTA 岩石破裂微震信号实时识别算法及工程应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3689-3696.
- CHEN Bing-rui, WU Hao, CHI Xiu-wen, et al. Real-time identification algorithm and engineering application based on STA/LTA rock fracture microseismic signal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3689-3696.
- [30] 伍梦蝶. 岩石破裂信号辨识及自动识别方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018: 62-63.
- WU Meng-die. Research on rock fracture signal identification and automatic identification method[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018: 62-63.
- [31] GE M, WANG H. Acoustic emission/microseismic source location analysis for a limestone mine exhibiting high horizontal stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(5): 720-728.
- [32] GE M C. Source location error analysis and optimization methods[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2012, 4(1): 1-10.
- [33] 郭贵安, 冯锐. 新丰江水库三维速度结构和震源参数的联合反演[J]. 地球物理学报, 1992, 35(3): 331-342.
- GUO Gui-an, FENG Rui. The joint inversion of 3D velocity structure and source parameters in Xinfengjiang reservoir[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1992, 35(3): 331-342.
- [34] 马宏生, 张国民, 周龙泉, 等. 川滇地区中小震重新定位与速度结构的联合反演研究[J]. 地震, 2008, 28(2): 29-38.
- MA Hong-sheng, ZHANG Guo-min, ZHOU Long-quan, et al. Simultaneous inversion of small earthquake relocation and velocity structure in Sichuan-Yunnan area[J]. **Earthquake**, 2008, 28(2): 29-38.
- [35] 李楠. 微震震源定位的关键因素作用机制及其可靠性的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 22-163.
- LI Nan. Study on the mechanism and reliability of the key factors of microseismic source location[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 22-163.
- [36] 陈炳瑞, 冯夏庭, 李庶林, 等. 基于粒子群算法的岩体微震源分层定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 740-749.
- CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, LI Shu-lin, et al. Microseism source location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 740-749.
- [37] 王泉栋, 李国和, 吴卫江, 等. 多种群遗传算法在微震震源定位中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1285-1288.
- WANG Quan-dong, LI Guo-he, WU Wei-jiang, et al. Application of multi-population genetic algorithm in microseismic source location[J]. **Computer Measurement and Control**, 2015, 23(4): 1285-1288.
- [38] 李清鹏. 深埋隧洞微震源定位方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- LI Qing-peng. Research on microseismic source location method of deep tunnel[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [39] WALDHAUSER F, ELLSWORTH W L, 白玲, 等. 双差地震定位算法: 方法和在加州北海沃德断层上的应用[J]. 世界地震译丛, 2003(4): 34-53.
- WALDHAUSER F, ELLSWORTH W L, BAI Ling, et al. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2003(4): 34-53.
- [40] LI X B, DONG L J. Comparison of two methods in acoustic emission source location using four sensors without measuring sonic speed[J]. **Sensor Letters**, 2011, 9(5): 2025-2029.
- [41] HUSEN S, KISSLING E, FLUEH E, et al. Accurate hypocentre determination in the seismogenic zone of the subducting Nazca plate in northern Chile using a combined on/offshore network[J]. **Geophysical Journal International**, 2018, 138(3): 687-701.
- [42] MA C S, CHEN W Z, TAN X J, et al. Novel rockburst criterion based on the TBM tunnel construction of the Neelum-Jhelum (NJ) hydroelectric project in Pakistan[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 81(11): 391-402.
- [43] 吴昊, 陈炳瑞, 池秀文, 等. 基于区域性微震活动的深部采场稳定性分析[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(3): 325-333.
- WU Hao, CHEN Bing-rui, CHI Xiu-wen, et al. Stability analysis of deep stope based on regional microseismic activity[J]. **Gold Science and Technology**, 2018, 26(3): 325-333.