

试论微震监测技术在地下工程中的应用*

李庶林

(厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 361005)

摘要:微震监测技术是一种高科技信息化的地下工程动力监测技术。随着设备硬件技术、信号处理技术和数字化技术的快速发展,微震监测技术的应用在国际上也越来越多,目前国内出现了对该技术的应用研究热。结合作者对该技术的研究体会,简要介绍了微震技术的特点及微震技术在地下工程安全监测中的作用。根据微震监测技术在国内外的应用,概括了该技术在地下工程安全监测和防灾减灾监测的若干方面的应用,最后介绍了该技术在国内的一个成功应用实例。

关键词: 地下工程; 微震技术; 震源定位; 安全监测

中图分类号: TU9

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2009)01-0122-07

Discussion on Microseismic Monitoring Technology and Its Applications to Underground Projects

LI Shu-lin

(Architectural and Civil Engineering School of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Microseismic monitoring technology is a high-tech and informationized dynamic monitoring technology for underground engineering. With the fast development of hardware, signal processing and digitizing technology, the applications of microseismic monitoring technology abroad become more and more. An applying research of this technology is coming up now in China. Combined with the research of the author in recent years, the characteristics of microseismic monitoring technology and its functions on application to underground projects are introduced briefly. Based on its applications abroad and at home, several applying aspects to safety monitoring of underground projects are summarized in this paper. An example of successful application of this technology in China is presented.

Key words: underground engineering; microseismic monitoring technology; source location; safety monitoring

1 前言

微地震监测技术在地下工程中的应用最早始于上世纪初的南非约翰内斯堡地区的金矿开采诱发的地震监测。南非对微地震的早期监测是采用常用的地震监测仪器,20多年后,60年代大规模的

矿山微震研究在南非各主要金矿山展开,并随之在1970~1980年代以来各采金矿山先后建立了矿山微震监测台站。到上世纪中叶,在波兰、美国、前苏联、加拿大等采矿大国都先后开展了矿山地震研究,且随着电子技术和信号处理技术的发展,多通道的微地震监测技术也开始得到应用,最突出的有

* 收稿日期:2007-09-21(修改稿)

作者简介:李庶林(1963-),男,江西永修人,教授,博士,从事岩石力学和岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: shulin.li@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(10572122)

以美国斯波坎的 Electrolab 公司为代表研制和生产多通道微震监测技术和设备,并在美国的金属矿山得到应用^[1,2]。微震监测技术在非矿山行业之外的核能、地下油气存储库、地下隧道工程等领域也得到应用,如加拿大原子能地下实验室就采用了微震监测系统^[3]。近年来,利用微震监测技术进行地下灾害救助等方面,也得到应用。在上个世纪 90 年代以前,微震监测设备大都是模拟信号型的;90 年代开始,全数字型微震监测技术和设备开始得到广泛的应用。由于全数字型微震监测技术的出现,使得在大规模的信号存储、计算机自动监测、数据的远传输送、监测定位的实时分析和信号分析处理的可视化成为可能。全数字技术的出现和发展,大大促进了微震监测技术理论和应用的发展,开创了微震监测技术理论和应用研究的新局面。

我国在上世纪的 80 年代中期开始微地震方面的研究工作。1986 年,由煤炭部和国家地震局等相关单位牵头在北京的门头沟煤矿开始了微震监测方面的研究,利用由波兰引进的一套模拟信号 8 通道微震监测系统(SYLOK),对采煤区的微地震进行监测研究,这也是我国首次开展矿山(地下)多通道微震监测技术研究^[2]。2000 年前后,澳大利亚联邦科学院探采所与山东煤田地调局等单位合作在兴隆庄煤矿开展了为期 2 年的矿震监测研究工作。2000 年汕头市液化气库建立了我国第一套 24 通道全数字型多通道微震监测系统,这也是我国在矿山行业之外的地下工程领域的第一套多通道微震监测系统^[4]。2003 年由本文作者领导的科研课题组成功地在凡口铅锌矿建立起了我国矿山地压监测的第一套全数字型 64 通道(目前开通 16 通道)微震监测系统,实现了对凡口铅锌矿深部采区范围的监测,该系统也是迄今为止国内矿山行业应用的通道数最多、性能最先进的微震监测系统^[4,5]。2005 年,铜陵冬瓜山铜矿也建立了一套微震监测系统,用于对该矿深部采区地压进行监测^[6]。微震监测技术作为一种先进的实时监测技术,在地下工程安全监测和防灾减灾监测方面有较好的应用价值和前景,文中论述了该技术的一般原理,应用领域和一个应用实例介绍。

2 微震监测技术的原理

2.1 微震监测技术的原理^[2,7,8]

微震是指在受外力作用以及温度等的影响下,岩体等材料中的一个或多个局域源以顺态弹性波

的形式迅速释放其能量的过程,微震起源于材料中的裂纹(断层)、岩层中界面的破坏、基体或夹杂物的断裂。采用微震监测仪器来采集、记录和分析微震信号,并据此来推断和分析震源特征的技术称为微震监测技术。微震监测技术是在地震监测技术的基础上发展起来的,它在原理上与地震监测、声发射监测技术相同,是基于岩体受力破坏过程中破裂的声、能原理。从频率范围可以看出地震、微震与声发射之间的关系,见下图 1 所示。

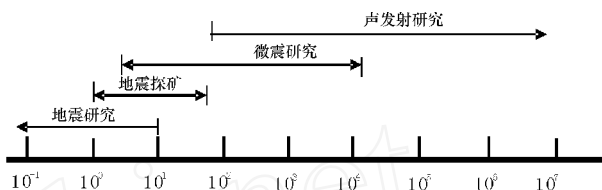


图 1 地震、微震与声发射技术研究的频率关系

Fig. 1 Frequency relationship among earthquake, microseismicity and acoustic emission

本文所指的微震监测是被动监测,它是指在无需人为激励的情况下,通过接收传感器直接监测岩体结构在外荷载(力和温度等)作用下产生破裂(微破裂)过程时所释放的弹性波。也就是说,微震监测系统只需要接收传感器(或拾震器)和数据采集仪,不需要发射传感器或人工产生震源。它是以监测地下岩体和混凝土结构破裂过程为对象,采集破裂释放的微地震波信号,再通过对震源信号的处理分析来评价地下结构的稳定性和安全状况。

2.2 微震监测技术的作用^[4,8,9]

微震监测技术在地下工程中的作用是多方面的,概括起来包括监测岩爆和矿震,应力集中与重分配,岩体大冒落,边坡破坏,为地下结构设计提供参数和优化地下工程设计与施工,灾害定位监测、预报和灾害预警,地下灾害安全救助,检测工程(如大体积混凝土、地下注浆等)施工质量,监测岩体和混凝土结构的损伤和老化过程等诸多方面。由此可见,微震监测技术既可以用于地下工程施工过程中的各种安全监测,也可以用于建成工程的使用过程的安全监测。

3 微震监测技术的特点^[4,5]

3.1 实时监测

多通道微震监测系统一般都是把传感器以阵列的形式固定安装在监测区内,它可实现对微震事件的全天候实时监测,这是该技术的一个重要特点。全数字型微震监测仪器的出现,实现了与计算

机之间的数据实时传输,克服了模拟信号监测设备在实时监测和数据存储方面的不足,使得对监测信号的实时监测、存储更加方便。

3.2 全范围立体监测

采用多通道微震监测系统对地下工程稳定性和安全性进行监测,突破了传统监测方法力(应力)、位移(应变)中的“点”或“线”的意义上的监测模式,它是对于开挖影响范围内的岩体破坏(裂)过程的空间概念上的时间过程的监测。该方法易于实现对于常规方法中不可达到地点的监测。

3.3 空间定位

多通道微震监测技术一般采用多通道带多传感器监测,可以根据工程的实际需要,实现对微震事件的高精度定位。微震技术的这种空间定位功能是它的又一与实时监测同样重要的特点,这一特点大大提高了微震监测技术的应用价值。由于与终端监控计算机实现了数据的实时传输,可以通过编制对实时监测数据进行空间定位分析的三维软件,籍助于可视化编程技术,可以实现对实时监测数据的可视化三维显示。

3.4 全数字化数据采集、存储和处理

全数字化技术克服了模拟信号系统的缺点,使得计算机监控成为可能,对数据的采集、处理和存储更加方便。由于多通道监测系统采集数据量大,处理时需要计算机进行实时处理,并将数据进行保存,而大容量的硬盘存储设备、光盘等介质对记录数据的存储、长期保存和读取提供了保证。微震监测系统的高速采样以及P波和S波的全波形显示,使得对微震信号的频谱分析和处理更加方便。

3.5 远程监测和信息的远传输送

微震监测技术可以避免监测人员直接接触危险监测区,改善了监测人员的监测环境,同时也使得监测的劳动强度大大降低。

数字技术的出现和光纤通讯技术的发展,使得数据的快速远传输送成为可能。数字光纤技术不仅使信号传送衰减减小,而且其它电信号对光信号没有干扰,可确保在地下复杂环境中把监测信号高质量远传输送。另外,可利用Internet技术和GPS技术,把微震监测数据实时传送到全球,实现数据的远程共享。

3.6 多用户计算机可视化监控与分析

监测过程和结果的三维显示以及在监测信号远传输送的前提下,利用网络技术(局域网)实现多用户可视化监测,即可以把监测终端设置在各级安

全监管部门的办公室和专家办公室,可为多专家实时分析与评价创造条件。

4 微震监测技术在地下工程中的应用领域

微震监测技术在地下工程灾害和安全监测方面的应用涉及公路铁路交通、水电工程、能源储备、矿山资源开发、核设施安全监测等多领域,可以说微震监测技术在岩土工程和地下工程中的应用是多方面的^[4]。以下概要介绍该技术在这些方面的应用。

4.1 隧道围岩稳定性监测

4.1.1 隧道工程施工安全监测

对于高地应力作用或深埋的长大隧道,在工程施工阶段往往会产生岩爆等动力地压灾害,以及工程施工爆破诱发的诸如大冒落等灾害,这些灾害会严重威胁施工人员和设备的安全,影响工程施工进度。微震监测技术可以对岩爆、大冒落等地压灾害实现有效的监测,确保施工过程的安全生产。隧道工程安全监测可以采用便携式微震监测设备,进行流动的抽样监测;也可以对长大隧道进行固定式多通道微震监测,监测系统可以沿用到隧道使用阶段的安全监测。

4.1.2 隧道使用安全监测

公路和铁路隧道有很高的安全要求,地下隧道在建成使用期间,随着隧道周边工程地质环境的变化、支护结构的老化、地震作用的影响等,起承载作用的围岩体、支护结构体等的受力状况会产生变化,可能在它们内部产生不同程度的损伤或破裂,这种损伤的积累甚至诱发灾变。因此,对一些重大的隧道工程如超长大隧道、过江跨海隧道等在使用期间,对围岩体和支护结构进行实时监测,监测岩体随时间弱化和混凝土老化,掌握结构内的微破裂前兆、损伤程度等,及时采区措施,防范灾害的发生,确保使用期间隧道的营运安全等有重要的意义。

4.2 边坡稳定性监测

4.2.1 水电工程高陡边坡监测

一些大型水电工程大都建立在深山峡谷中,在水电大坝的两侧端,都有数十米到数百米的高陡边坡,如我国的锦屏电站永久边坡的开挖高度超过540m,二滩水电站大坝的边坡开挖高达780m。这些高陡边坡都是人工开挖、加固的大型岩体结构,其稳定性问题是百年大计。对于这些边坡进行大

范围、全天候实时安全监测,可以实现监测过程的自动化和远程监控,可以克服常规应力、位移等监测技术的不足。同时,在建立以微震监测技术的基础上,以该技术为核心建立高陡边坡安全预警系统,对于确保在复杂条件下的边坡安全和预防滑坡灾害的发生有极其重要的作用。

4.2.2 大型露天矿边坡监测

与水电工程等相比,大型露天矿边坡并非是永久性的工程,其使用寿命相对较短,因而其加固措施和目的也不同。一般来说,由于对其的加固属于相对的短期加固,因此露天矿山边坡的安全性要比水电工程、公路工程边坡的安全性差,它是矿山重大危险源。因此,对露天边坡的稳定性和安全性监测就具有重大的实际意义。

在国外,智利的 Chuquicamata 铜矿是世界最大的露天开采铜矿,该铜矿形成了巨大的凹陷矿坑和高陡边坡。为了监测边坡的稳定性,该矿近年建立了全数字型多通道微震监测系统。澳大利亚的 Fimiston 露天金矿也建立了多通道微震监测系统^[10]。

我国的一些煤炭露天矿山和金属露天矿山均是高陡露天边坡,如海州露天矿边坡高达 320m,哦口铁矿设计边坡高度为 720m,水厂铁矿为 670m,还有永平铜矿深凹露天边坡等。这些高陡边坡均有条件采用微震监测系统来监测边坡的稳定性,以提高矿山安全管理水平。

另外,对于一些交通、铁道和民用工程建设中的一些重要的高陡人工开挖边坡等,只要有安全上的需要都可以采用微震监测技术进行边坡稳定性监测。

需要指出的是,在我国对高陡边坡的多通道微震监测应用研究方面,至今还是一个技术上的空白。因此,在国内开展这方面的技术研究,对于促进我国在高陡边坡安全监测和管理的技术进步有重要的意义。

4.3 大型地下油气库的安全监测

地下油气库的安全监测其目的是监测围岩体及其支护结构的稳定性,防泄漏。世界上第一个地下油气存储库建成于上世纪初,二战后世界石油需求量大增,为防需求的波动和战略储备的需要,促进了地下油气库的建设,一些发达的高耗能国家如美国、日本等先后建立了大量的地下油气存储库。到 2001 年为止,全球已建成 70 多座地下油气库。韩国、日本是亚洲较早建地下油气库的国家,在这

两个国家的一些地下油气库的建设和使用中都用过和建立了多通道微震监测系统。到目前为止,我国已建成并投入使用的汕头液化气库成功建立了一套 24 通道的全数字型微震监测系统,对两个 10 万 m³ 的地下气库进行全天候实时监测,每个气库各安装了 2 个三轴传感器和 6 个单轴传感器。据报道,我国第二座液化气库也正在宁波建成。

中国规划未来 20 年中将投入 1000 亿美元进行石油战略储备,在北至辽宁、南到广西的海岸线上的地质构造稳定、可建造深水码头的沿海地区,将出现更多这样的地下油气库。也由此可见,微震监测在我国的地下油气库安全监测方面有广阔的前景^[4]。

4.4 地下注浆工程监测

注浆技术是一种广泛应用于地下隧道、城市地下铁、水利水电工程、矿山防治水工程等众多领域的技术,注浆技术的目的是一是加固岩、土体,提高其强度,二是堵水防渗,减小岩土体的渗透性。微震监测技术的作用一是确定浆体注入的范围,确保注浆效果;二是防止跑浆,降低成本。对于一些大型的注浆工程,采用微震监测技术来监测注浆效果是非常有技术和经济价值的。日本等国家在地下注浆工程方面有工程应用方面的研究^[8]。

4.5 石油工程中的监测应用

微震监测技术一个重要的应用就是在石油工程领域的应用。对于抽采石油的采区,为了提高石油的采出率,往往要向采区注入高压水破岩。石油开采一般都在大深度的地层下进行,浅则几百米,深则上千米。因此,注水要技术上可行和经济上合理。微震监测技术对于这种大深度的井下注水工程有较好的监测效果,它可以强有力地确定岩体破裂和裂纹扩展方向、裂纹扩展长度和宽度等;确定注水钻孔的合理位置,控制注水量以达到节约用水;优化压裂设计,如注水压力、注水时间等。加拿大的 ESG 公司就在美国的一些石油开采区使用了微震监测技术,并取得较好的经济效益。

4.6 地下矿山地压监测

微震监测技术在地下工程方面的应用最早就是从采矿业开始的。由于大规模和大深度开采,导致采矿行业成为地下工程中最危险的行业,也正是如此,促进了微震监测技术在该行业中的最早应用。随着技术的发展,微震监测技术在矿山安全监测方面的作用也在不断的扩展,不仅其监测效果在提高,而且其监测所解决的问题也越来越多。以下

就其在矿山中几个常用的方面作简要的介绍。

4.6.1 矿震与岩爆监测

大规模和大深度矿山开采会诱发矿震,矿震监测是微震技术最早的应用领域。对于一些大矿区或大深井矿山,由于开采面积和深度过大,就会在采区周围诱发一定规模的地震。在南非的约翰内斯堡附近的金矿开采过程中,就是因为大规模的地下采矿导致该地区的地震频发,微震监测技术在该地区的矿震监测方面也得到了很好的应用。

微震监测技术的另一个重要用途就是对地下工程中的岩爆灾害实施监测,这也是人们比较了解的一种用途。岩爆是典型的岩石的动力破坏形式,是高应力地下工程如铁路隧道工程和水电地下工程、矿产资源开发中遇到的严重的人为地质灾害。在国外,微震监测技术在南非、加拿大、美国、波兰、澳大利亚、前苏联、日本等国家的地下采矿工程都有广泛的应用,有大量报道这方面研究和应用的文章^[2]。

4.6.2 岩移监测

对于地下采矿来说,采区上覆岩层的稳定性、岩移规律及其对地表的影响一直是矿山所关注的重要内容,也是科学技术研究的一个重要方面、难点和热点。在以往的研究中一般采用常规的岩移监测、钻孔勘探、解析分析、数值模拟分析等,这些方法各有其弊端,例如岩移监测难度大、“以点代面”,钻探虽然比较可靠,但成本高、不能实时跟踪,理论模型和模拟分析误差大等。微震监测技术则有其独特的优势,它是三维空间监测且范围大,监测过程连续,监测结果处理、分析及时,直观,监测劳动强度小,数据能远传输送等。微震监测与钻探相结合来监测上覆岩层的移动,往往可以弥补各自单独使用的不足。澳大利亚的 Gordonstone 煤矿和我国的兴隆庄煤矿等都采用过微震监测技术来监测长壁式开采的采区上覆岩层的岩移状况,取得了较好的效果。

4.6.3 崩落范围监测

在地下采矿中,对于一些采用崩落采矿方法的开采方式,了解和掌握开采的崩落范围和采区的岩移规律是一项非常重要的地压和安全管理内容。由于微震监测技术对岩体的破裂源有较高的定位精度,采用该技术对崩落区内岩体的崩落破裂进行监测,并通过监测确定崩落范围是一种非常好的技术手段。在常规的方法中,大多采用钻孔的方式确定崩落范围,尽管该方法实用可靠,但成本高、费

时,只能定期进行有限量的钻探,因而不能随采矿的动态特点进行实时动态跟踪探测。微震监测则可以弥补钻探的不足,可以进行实时动态跟踪监测,监测范围大,完全可以包围崩落区域。在微震监测的前提下,辅助少量的钻孔探测,则监测效果更好。澳大利亚的 Northparkes mines 矿是一个采用自然崩落法开采的矿山,该矿就采用微震监测技术来监测矿岩的崩落过程和崩落范围。

4.6.4 高应力区与应力重分布监测

地下工程开挖会在开挖区周边所扰动的围岩体内产生应力重分布,形成高应力区。由于地下工程开挖施工的多步性和复杂性,以及地下工程地质环境的复杂性,采用常规的压力(应力)、位移(应变)监测来了解高应力区和应力重分布规律,有其致命的缺点:首先,这些常规的监测是点或线的监测,只能以点或线代替面和体;

其次,对于大范围的监测,常规监测在监测工程施工与监测仪器设备安装方面存在很大的困难;再次,对于需要长期监测的地下工程,由于地下环境的影响对常规监测设备的使用寿命和维护方面存在极大的困难;还有,常规监测不是连续、实时监测,难以掌握瞬间的应力变化特征;最后,常规监测的现场监测环境一般较恶劣,监测工作强度大、量大,安全性差。

然而,由于微震监测技术的特点和优越的性能,则可以克服上述常规监测的弊端。岩体在高应力作用下会微破裂,通过微震监测这些微破裂并对其进行高精度定位,就可以判断扰动区内哪些部位产生高应力集中。由于微震监测技术的实时监测和高精度定位,它可以连续地记录每一个开挖步所引起的每一次的应力重分布所导致的应力集中和应力转移特征。因此,采用微震监测技术可以直接、正确、及时有效、无误、直观和形象地展现高应力区和应力重分布特征。

4.6.5 爆破及其余震监测

大多数地下工程建设都是爆破开挖,爆破是开挖的手段,但对于非开挖区来说爆破是有害的,爆破导致开挖区周边岩体的直接破坏,诱发周边环境产生余震等。因此,在地下工程施工管理中,掌握爆破对非开挖区围岩的影响程度,减小其破坏程度,不仅是开挖工程建设自身的需要,也是施工安全的需要。

爆破会在围岩体中产生瞬间应力波,这种应力波传递到临界状态的临空面或结构面时会产生反

射拉伸应力波,易使岩体受拉而发生脆性破坏;或应力波作为一种动荷,直接作用于处于高应力平衡状态的岩体上,使这些岩体的平衡破坏被打破而超过强度极限,诱致冒顶、片帮和岩爆的发生。国外微震监测研究表明,爆破与微震之间也存在一定的关系,如南非深部金矿开采微震监测研究表明在爆破后的 2 小时之内,微震事件发生频繁,这之后则迅速减少。由此可见,通过对大爆破及其余震的监测,可以达到对爆破后的工作面的围岩稳定性和安全性评价的目的。我国的凡口铅锌矿对深部采区回采的大爆破后的余震进行了监测研究,并得出了初步的结论^[11]。

4.6.6 安全救助与预警

微震监测技术有较高的对震源的定位功能。因此,对于大型地下工程和地下矿产资源开发出现严重冒落或塌方、岩爆等灾害后,采用微震监测定位技术可以对地下围困人员实施有明确目标的救助,缩短救助时间,从而大大提高地下被困人员的生存机会;同时,对于救助方来说,可以减少或避免因盲目救助带来的安全威胁。上世纪 70 年代,美国矿山局就开始了针对矿山灾害被困人员的微震定位技术的研究工作。近年来,以微震监测定位技术为主体的定位救助系统研究得到了长足的发展,如法国科研人员采用微震监测技术针对煤矿开采安全救助问题研究,从原理和方法上进行了有益的探索,并进行了现场试验研究^[12]。

迄今为止,我国矿山行业还没有开展应用该项技术进行井下安全救助研究的先例。因此,在国内的大型地下矿山开展这项技术的应用研究,并且推广应用该项技术,提高矿山灾后应急救援技术水平,将有很好的应用前景。

由于微震监测技术具有可提供大量的微震信息,可进行多参数分析,实时监测、高精度定位特点,可以通过监测掌握地下灾害的发灾机制,发灾的前兆信息。因此,从管理、技术上建立以微震监测技术为核心的地下灾害预警系统是完全可能的。

5 应用实例

凡口铅锌矿微震监测系统是本文作者领导的科研课题组承担的国家十五科技攻关项目专题研究建立起来的国内矿山第一套多通道微震监测系统。本套系统为 64 通道全数字型微震监测系统,已开通 16 个通道,携带 16 个单轴传感器,也可以根据需要扩充到 64 个通道。本系统由地表监测

站、井下数据交换中心和传感器三个部分组成,见图 2 所示。16 个传感器分别布置在 - 500m、- 550m、- 600m、- 650m 中段采区,每个中段各 4 个。微震信号由传感器采集并进行信号的前置放大,经由信号电缆传至井下数据交换中心,经 A/D 转换后的数字信号再经由光缆传至地表监测站内的地震数据采集仪,然后由与地震数据采集仪相连接的计算机进行实时监控显示,并进行各种分析。

该套系统成功实现了对深部采区微震事件的实时监测,建立了三维可旋转可视化模型,实现了对微震事件的实时空间定位。图 3 是该系统监测得到的微震事件的实时空间定位图。现场人工放炮实测表明,对这个区域内的由传感器阵列所包围的中部厚大矿体中的微震事件的定位误差在 5m 以内,定位精度高^[4,5]。

该系统投入使用之后,开展了对深部开采中的大爆破的余震监测研究,以便掌握大爆破后采场围岩的稳定性。通过监测得到在当前开采条件下,大爆破后的余震主要集中在数分钟之内,30 分钟之后没有余震发生。这说明在 30 分钟后发生大的冒落的可能性小,参见文献^[11]。利用该系统还对深部动态开采时的应力重分布等,进行了研究。

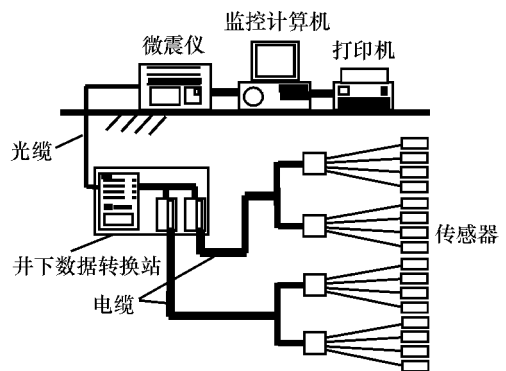


图 2 微震监测系统组成图

Fig.2 Diagram of microseismic monitoring system

6 结语

微震监测技术是一种高技术、信息化的地下工程动力监测技术。本文介绍了微震监测技术的主要特点、微震监测技术的作用,微震监测技术在地下工程的几个方面的应用,并且较为全面地分析了该技术在矿山微地震、岩爆、地应力分布、冒顶与岩移、爆破及其余震、安全救助和预警等方面可能的应用。微震监测技术在应用方面,还不止本文所述的几个方面,在国外还有在地下核实验室、核废料存储库等其它方面的应用,这里没有赘述。就目

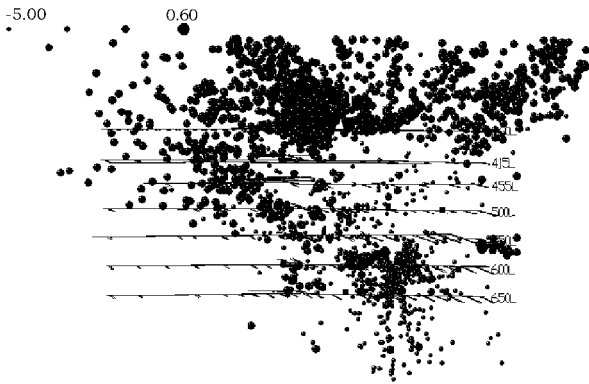


图3 微震事件空间定位图

Fig. 3 3D location of microseismic events

而言,该技术在应用领域还有许多待解决的应用理论和技术问题,这方面在本文中并没有进行评述。虽然微震技术还存在一些亟待解决的理论和技術难题,但这并不妨碍该项技术的应用,理论和技術是在应用中得到完善和发展的。

与国外相比,我国在该技术的应用方面还较落后,无论从技术应用和理论研究方面还处于起步阶段。目前,国内还主要应用于矿产资源开发领域,在地下工程其它方面的应用不多。但可以肯定的是随着微震监测技术理论的发展、设备性能的完善、价格的大众化,以及人们对其认识的广泛和加深,跨行业的更多的技术人员对其的了解等,其必将成为地下工程安全监测的重要手段,应用前景会更加广阔。

致谢:本文的一些资料来源于作者与加拿大工程地震公司的 C. Trifu 先生之间的学术和邮件交流,在此向他给予的支持表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Blake W. Microseismic applications for mining—a practical guide[R]. Bureau of Mines, U. S. Department of the Interior. 1982.
- [2] Gbrowicz S J, Kijko A (修济刚等译). 矿地震学引论[M]. 北京:地震出版社,1998 (Gbrowicz S J, Kijko A. An Introduction to Mining Seismology[M]. San Diego:Academic Press, Inc., 1994. (in Chinese))
- [3] Young R P, Collins D S. Seismic studies of rock fracture at the underground research laboratory, Canada[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.. 2001, 38 (4): 787 - 799.
- [4] 国家十五科技攻关专题“深井地压定位、预报与防治技术研究”报告[R]. 长沙:长沙矿山研究院,2004. (Report of Ground Pressure, Prediction and Prevention Research for National Tenth Five - year Plan of Science and Technology [R]. Changsha Institute of Mining Research, Changsha, 2004. (in Chinese))
- [5] 李庶林,尹贤刚,郑文达, C. Trifu. 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 Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, 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, 2004, 24 (12): 2048 - 2053. (in Chinese))
- [6] 唐礼忠,杨承祥,潘长良. 大规模深井开采微震监测系统站网布置优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (10): 2036 - 2042. (TANG Lizhong, YANG Chengxiang, PAN Changliang. Optimization of microseismic monitoring network for large - scale deep well mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 25 (10): 2036 - 2042. (in Chinese))
- [7] 傅承义,陈运泰,祁贵仲. 地球物理学基础. 北京:科学出版社,1985 (FU Chengyi, CHEN Yuntai, QI Guizhong. Fundamentals of Geo Physics [M]. Beijing, Science Press, 1985. (in Chinese))
- [8] 腾山邦久 (冯夏庭译). 声发射 (AE) 技术的应用 (M). 北京:冶金工业出版社,1996. (K. Katsuyama. Application of AE Techniques [M]. Translated by FENG Xiating. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1996. (in Chinese))
- [9] Kaiser P K, McCreath D R, and Tannant D D. Canadian rockburst support handbook [R]. Geomechanics Research Centre. 1996.
- [10] Hudyma M R, Jiang J J, Reimnitz M. Seismic monitoring at the Fimiston open pit Kalgoorlie consolidated gold mines (KCGM) [J]. Proceedings of Fifth Large Open Pit Mining Conference, Kalgoorlie, WA, 2003: 235 - 246
- [11] 李庶林,尹贤刚,李爱兵. 多通道微震监测技术在大爆破余震监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (Supp1): 4711 - 4714. (LI Shulin, YIN Xiangang, LI Aibin. Application for monitoring large blast aftershock by multi - channel microseismic monitoring technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24 (Supp1): 4711 - 4714. (in Chinese))
- [12] Forney F, Amartin J P. Development of a seismic system for the detection of trapped miners [J]. Rockbursts and Seismicity in Mines. RaSim5, SAIMM, 2001, 35 - 41.