

文章编号: 1671-8585(2009)02-0096-05

# 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望

程建远<sup>1</sup>, 李浙龙<sup>2</sup>, 张广忠<sup>1</sup>, 杨 辉<sup>1</sup>

(1. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西西安 710054; 2. 西安科技大学地质与环境工程系, 陕西西安 710054)

**摘要:** 地面地震是一项成熟的技术手段, 如何将地面地震技术成功地移植到煤矿井下, 仍是世界各国一直探索和研究的课题。为此, 回顾了国内外煤矿井下应用槽波探测工作面内部构造、利用瑞雷波进行独头巷道超前探测、利用声发射技术预报煤与瓦斯突出危险区和利用微震观测确定“三带”发育高度等技术的应用现状, 指出了煤矿井下地震勘探技术存在的理论问题和工程应用难题, 展望了煤矿井下地震勘探技术今后的发展前景。

**关键词:** 煤矿井下; 地震勘探; 技术现状; 发展前景

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

目前, 基于水平、层状、均匀介质假设前提下的地面地震勘探技术, 从地震弹性波传播理论、地震数据处理软件和工程实际应用等方面都已经发展成熟, 成为地下地质构造探测的首选技术手段, 在油气田勘探开发、煤炭资源地质勘探和工程病害探测等多个领域, 均已得到广泛的应用。尽管如此, 地面地震勘探技术也开始面临着诸多挑战。近年来, 基于传统的水平、层状、均匀介质等假设前提下的地震勘探技术, 在解决地下复杂地质问题时表现出明显的局限性, 各向异性的研究已经成为国内外学者的研究热点。以往的地震叠后时间偏移技术, 在地下速度横向变化剧烈、地层倾角较陡的情况下, 难以实现准确成像。另一方面, 对于煤田地震勘探而言, 随着深部煤炭资源勘探深度的加大, 地面地震的分辨率明显降低, 难以满足高效安全开采的地质需求; 在多煤层地区, 随着浅部上组煤的开采和地表出现沉陷, 地面不再具备地震勘探条件, 如何开展下组煤的探测成为一个迫切需要解决的问题; 对于部分煤层急倾斜矿区来说, 地面地震手段目前还难以胜任; 对于威胁我国华北地区大多数煤矿安全开采的奥陶纪灰岩来说, 地面地震成像困难。这些技术难题的现实存在, 使得人们又把目光投向煤矿井下地震勘探技术的研究和试验中。

目前, 国内外在煤矿井下开展较多的地震勘探方法主要有: 工作面内部小构造探测的槽波地震勘探技术、独头巷道超前探测的瑞雷波勘探技术、预报煤与瓦斯突出危险区的声发射技术和确定“三带”发育高度的微震观测技术等, 而煤矿井下二维、三维地震、TSP 技术等, 仍处在发展和成熟阶段。

本文综述了国内外煤矿井下槽波地震、瑞雷波勘探、声发射技术、微震观测、TSP 技术、陆地声纳

以及二维地震等技术的研究和应用现状, 指出了煤矿井下地震勘探技术存在的理论问题和工程应用难题, 最后, 展望了煤矿井下地震勘探技术今后的发展前景。

## 1 煤矿井下地震勘探技术发展现状

### 1.1 槽波地震勘探

煤层相对于其顶底板而言具有低速度、低密度的特点, 与其上、下围岩之间存在着较大的波阻抗差异, 因而可以形成一个良好的反射界面, 反射系数有时甚至能够高达 0.5 左右。由于煤层顶底界面的多次全反射, 以至于在煤层中激发的地震波能量被禁锢在煤层中而不向围岩辐射, 只在煤层中相互叠加、相长干涉, 形成了一个强的干涉扰动, 沿煤层的“中心面”向前传播, 我们形象地将这一沿煤层低速“槽”或低速“波导层”传播的地震波, 称为“槽波”。

1955 年 Evison 在新西兰首次激发并记录到槽波, 1963 年德国的 Krey 从理论上计算了槽波的频散关系, 奠定了槽波地震勘探(又称同层地震勘探, In-Seam-Seismics, 缩写为 ISS)的基础, 随后英国国家煤炭局(NCB)、美国科罗拉多矿业学院、前苏联、匈牙利等国也先后成立了专门的研究机构,

收稿日期: 2008-11-04; 改回日期: 2009-02-17。

**第一作者简介:** 程建远(1966—), 男, 博导、研究员, 1987 年毕业于中国矿业大学, 主要从事煤矿采区地震勘探的科研工作, 发表论文 50 余篇、出版专著 3 部。

**基金项目:** 国家 973 计划项目 2006CB202208、科技部科研院所技术开发研究专项 NCSTE-2007-JK-ZX-190 与煤层气开发科技重大专项 2008ZX05040-003 课题资助。

开展了理论研究、井下试验和仪器研制等,到 20 世纪 70 年代后期槽波地震勘探已经获得成功应用。我国从 1978 年开始了槽波地震勘探技术的研究,1985 年从原西德引进了一套 48 道的 SEAMAX85 槽波地震仪,在国内多个煤矿工作面开展了方法试验与初步推广<sup>[1~4]</sup>。1999 年 David Carpenter 等<sup>[5]</sup>在英国应用槽波地震与地面地震进行综合勘探的研究,发现槽波勘探能够发现地面地震无法解释的小断层,它可以探明落差小于煤层厚度一半的断层,且具有较高的空间定位精度。Maochen Ge 等<sup>[6]</sup>在美国 Pennsylvania 的 Harmony 煤矿中应用槽波对煤矿采空区进行勘探,结果显示槽波的频率比常规地面高得多,对采空区边界解释的误差范围为±4.6 m。

迄今为止,槽波地震勘探技术经过几十年的发展,具有扎实的理论基础,在方法研究上也从槽波透射发展到槽波反射,解决的地质问题除了小断层外,并在陷落柱、冲刷带等地质异常体的探测上也取得了一些进展。但是,槽波地震勘探技术发展的速度相对较慢、应用的范围偏小,适于煤矿井下实用的多道、遥测、全数字和三分量地震便携采集系统急待研发。

## 1.2 井下瑞雷波勘探

瑞雷波勘探也称为弹性波频率测深,它主要是根据瑞雷波的频散特性,通过对原始数据的分析,来获得浅层、超浅层的地质结构及介质物理参数。按照激振方式的不同,瑞雷波勘探分为稳态法和瞬态法两种。瑞雷波勘探可以探测并识别地质异常体,如断层、老窑、岩溶、陷落柱和构造破碎带等。这主要是因为致密的弹性介质中,人工激发的和以柱面波波前方式传播的瑞雷波在遇到弹性分界面时,将迅速衰减、分解和转化,出现频散现象,利用频散曲线上的这些突变点绘制出分层曲线,再结合现场地质情况就可对这些地质异常做出解释<sup>[7,8]</sup>。

20 世纪 60 年代初,美国密西西比陆军工程队水陆试验所开始研究瑞雷波勘探方法,但由于当时技术条件的限制,未能取得成功。20 世纪 70 年代初,美国 F. K. Chang 等提出了利用瞬态冲击产生瑞雷波来研究浅层地质问题的方法和技术,引起了许多地球物理学者的注意。20 世纪 80 年代初,日本 VIC 公司成功研制出基于稳态瑞雷波法的 GR-810 佐藤式全自动地下勘探机,并在工程地质勘测上获得成功应用。20 世纪 80 年代后期,国内一些科研单位相继开展稳态和瞬态瑞雷波方法和仪器

的研究,煤炭科学研究总院西安研究院自行研制出的 MRD-II 型瑞雷波探测系统,在一些矿区的井下独头巷道超前探测中取得了成功的经验,如 1996 年开滦荆各庄煤矿和石炭井三矿应用该系统在煤厚、构造、薄煤带探测等方面取得了较好的效果<sup>[9,10]</sup>。

实践表明:稳态瑞雷波探测法由于设备沉重、价格昂贵,从而限制了它的推广;瞬态法以其设备轻便、施工简便灵活、快速、经济、分辨率高、占用场地小和应用范围广等优点,在地面与井下勘探中均得到了较好的应用。目前,如何提高煤矿井下瞬态瑞雷波的探测距离、实现瑞雷波多次锤击信号的一致性叠加和自动解释判译,是今后进一步发展的方向。

## 1.3 声发射技术

声发射(Acoustic Emission,简称 AE)是指当某材料受到外力或内力的作用时,会造成局部应力集中,发生诸如塑性变形、断裂、相变等,导致材料以弹性应力波的形式瞬间快速释放能量的现象,也称为应力波发射(Stress Wave Emission)<sup>[11]</sup>。煤岩体是一种非均质体,其中存在微裂隙、孔隙等。煤岩体在受外力作用时,这些缺陷部位会产生局部应力集中,发生突发性破裂,使积聚在煤岩体中的能量得以释放,且以弹性波的形式向外传播,产生声发射现象。通过对煤岩体声发射信号的研究,可以推断煤岩体内部的结构变化,反演岩石的破坏机制。

我国从 20 世纪 70 年代开始研究声发射技术,1981—1984 年李典文、杜增林等人分别在北京门头沟矿和开滦唐山矿利用波兰研制的 SAK-3 和 SYLOK 声发射监测系统对冲击地压进行研究,并多次成功预报了冲击地压的来临。20 世纪 80 年代后,国内许多科研单位相继对声发射仪进行了研制或改进,并对煤矿、非煤矿山的声发射现象进行了监测,获取了在三维应力状态下岩石快速加卸围压时对声发射的影响,建立了声发射数和岩石微元强度统计分布之间的定量关系,推导出了单轴应力状态下的凯塞效应表达式<sup>[12~14]</sup>,石显鑫等<sup>[15]</sup>还应用声发射技术对煤与瓦斯突出开展了预测预报,取得了很好的应用效果。

在声发射技术的应用中,今后还有许多研究工作需要开展,如研究局部冒落产生 AE 全过程的特性;探索事件、概率与时间的全过程关系;探索 AE 过程中主频及其他参量的变化规律,如振幅、振频;开展声源定位技术研究;研究适合于煤岩体的噪声

剔除技术等。

#### 1.4 微震观测

微震监测技术<sup>[16,17]</sup>是 20 世纪 90 年代国际上发展起来的一种新物探技术。

当地下岩石由于人为或自然因素发生破裂、位移时,会产生一种微弱的地震波向周围传播,在空间上不同方位设置微震传感器,可以记录这些微地震波的到达时间、传播方向等信息,然后利用各种计算方法确定岩石的破裂点,即震源的空间位置,监测其对生产活动的影响。与常规的地面地震勘探相反,微地震监测中震源的位置、发震时刻、震源强度都是未知的,确定这些因素恰恰是微地震监测的首要任务。国内外微地震监测技术可以分为 3 大类:第 1 类以监测大范围矿区岩层振动为主的系统,监测振动频率在 100 Hz 以内,重点是监测地震,定位精度一般在 100~500 m;第 2 类以监测工作面周围岩层振动为主的系统,监测振动频率在 20~300 Hz,重点是监测岩层破裂,定位精度一般在 5~10 m;第 3 类以监测小范围(如巷道周围)岩层破裂为主的系统,监测振动频率在 300 Hz 以上,通常被称为地音系统。地音系统监测的范围较小。澳大利亚、美国、英国、南非都进行了微地震监测技术的研究<sup>[18~20]</sup>。澳大利亚主要利用地面微地震监测来探测潜在的“三带”发育高度和了解采煤过程中煤层顶板和底板地层应力分布情况,并于 1998 年和山东煤田地质局联合在兖州矿业集团兴隆庄煤矿首次进行“两带”监测的试验研究,为该矿确定防水或防砂煤柱的最佳高度提供依据,也填补了我国煤矿微地震监测技术的空白<sup>[21]</sup>。此后,国内的姜福兴、刘杰等<sup>[22,23]</sup>在山东华丰煤矿开展冲击地压、工作面顶板煤岩层破坏情况的监测,获取了包括采矿过程中煤层顶底板的破裂范围、断层活化距离以及超前支撑压力分布范围等数据。

目前,煤矿开采过程中“三带”发育高度的微震观测技术,在国内外还处在研究阶段,但是,微地震技术具有连续动态监测、控制可靠、施工费用低和观测周期短等优点,存在着巨大的发展潜力。

#### 1.5 TSP 技术

TSP(Tunnel Seismic Prediction,简称 TSP)技术<sup>[24]</sup>是在 VSP 技术基础上发展起来的,其原理是地震波在岩石中以球面波形式传播过程中,当遭遇不良地质体时,一部分地震信号反射回来,一部分信号透射进入前方介质。通过三分量检波器可以记录到被反射回来的地震数据,这些回波信号的传播速度、延迟时间、波形、强度和方向等信息

经过处理后,可以获得不良地质体的性质和分布状况。

TSP 技术在瑞士、德国、法国、美国、日本、韩国等发达国家的隧道施工中得到了广泛应用,尤其成为 TBM 法施工决策中不可或缺的工序。A. M Baldi,冯永等<sup>[25~27]</sup>在公路、铁路的隧道掘进中,采用 TSP 技术对掌子面前方岩体的不连续性以及潜在的断层进行了超前预测,根据开挖结果可以看出:距掌子面 100 m 以内的预报结果比较可靠(误差小于 10 %);当预报距离大于 100 m 时,精度有所降低。在煤矿井下掘进迎头超前预报中,蔡英康等<sup>[28]</sup>应用 TSP 技术在铁法煤业集团晓南煤矿进行了超前预测,取得了一定的效果。

TSP 技术在隧道超前预测预报中,具有预测距离远、操作简单、成果丰富、对施工影响小等优点,但在煤矿井下小构造超前预测中的应用还很少,而且煤矿井下 TSP 技术的应用条件也有别于地面的隧道预报,因此如何将 TSP 技术移植到煤矿井下,还需要开展大量的基础研究与试验。

#### 1.6 陆地声纳技术

陆地声纳法实质上就是“陆上极小偏移距高频(宽频)弹性波反射连续剖面法”的形象说法,属于浅层地震反射法、地质雷达、声波法和水声法等方法变种<sup>[29,30]</sup>。为了避免直达波、地滚波、声波和折射波等干扰,地震反射法通常要选择足够大的偏移距,而地质雷达、水声法等通常采用极小偏移距的发射—接收系统,避开先于反射波到达的各种干扰波。陆地声纳法仿照这些方法,采用极小偏移距的激发—接收系统,炮检距的大小根据最小探查深度而定,以目的层的反射波不受先期而至的干扰波影响为原则。钟世航从 1990 年开始,开展了陆地声纳方法的研究工作,并进行了现场试验<sup>[31]</sup>,例如在古交、淮北、开滦等地的煤矿井下巷道中,进行下伏薄煤层的探查;孙宏志<sup>[32]</sup>将其用于煤层前方的小构造超前探测,取得了很好的效果。目前,该技术还被用于隧道超前地质预报、岩溶的探查、厚层混凝土厚度检测、第四系中薄层的探查、山地薄覆盖层以及岩体破碎带和地下潜水面的探查<sup>[33]</sup>等。

陆地声纳技术具有分辨率高、图像简单易辨、仪器设备轻便、施工场地较小等突出优点,但是存在抗干扰能力较差、覆盖次数偏低等明显不足。

#### 1.7 井下二维地震勘探技术

国外很早就开展了矿井高分辨率地震反射技术的研究,如 Gendzwil(1969)用 12 道地震仪器和

检波器在水平巷道顶板上进行折射地震勘测,探测巷道上方地质异常体的分布;Gendzwill等<sup>[34]</sup>介绍了在加拿大萨斯喀丘温深层钾盐矿的巷道内进行的高分辨率地震探测;在法国罗纳区的铜矿巷道<sup>[35]</sup>和南非 Thabazimbi 铁矿内<sup>[36]</sup>也进行了巷道内地震勘探工作,都获得了频率很高的原始资料,提高了勘探精度。国内在煤矿井下巷道内的高分辨率地震勘探还处于研究阶段,程建远在淮南八里塘煤矿开展了煤矿井下高分辨率地震勘探的试验<sup>[37]</sup>,并获得高陡倾角煤层井下二维地震勘探的良好成像效果,在西曲矿 22504 工作面巷道内开展的地震勘探工作<sup>[38]</sup>,圈定的下伏煤层的小窑位置获得了井下钻探验证。

煤矿井下巷道内的高分辨率勘探技术,不是地面地震勘探技术的简单移植或复制,必须根据巷道内的特殊地质条件,选择合适的激发点位置和接收点的排列位置,利用巷道“空腔”屏蔽来自上方的反射,避免全空间波场带来的不利影响。目前,与此相关的基础研究工作尚在进行中。

## 2 煤矿井下地震勘探技术的发展前景

迄今为止,经过国内外学者的不断探索和努力,煤矿井下地震方法已经发展了包括槽波、瑞雷波、声发射技术、微震观测、TSP 技术、陆地声纳以及二维地震等技术系列,其能够解决的地质问题也从当初的构造探测,发展到下组煤勘探、陷落柱、冲刷带探测、“三带”、煤与瓦斯突出监测和独头巷道超前探测等范畴,并已取得了不少成功的实例。但是,由于煤矿井下地震勘探条件的复杂性,在煤矿井下开展地震勘探的介质条件既不同于全空间勘探,也不同于地面的半空间勘探,因此还存在着许多不足之处,主要体现在:

1) 基础研究比较薄弱。煤矿井下的地震波场非常复杂,不能将地面成熟的方法技术不加任何改造而简单地直接“移植”到井下,而需要开展大量的数学、物理模型正演模拟和分析工作,为今后开展的煤矿井下地震勘探数据采集、处理与解释提供依据。

2) 煤矿井下地震信号的信噪比较低、波场复杂,现有的井下地震勘探中开展三分量地震信息采集的偏少,且检波器大多数还是采用地面动圈式模拟检波器,不利于压制干扰等,因此今后需要开发针对煤矿井下的地震采集系统和特殊处理软件,以便于井下地震数据采集、信噪分离和准确成像。

3) 煤矿井下地震勘探的仪器必须符合防爆要求,同时要尽可能轻便,国内外现有的井下防爆地震仪的实际带道能力偏小(以 6~12 道居多)。如果能够将地面地震仪器设备制造上多道遥测、数字检波器、三分量接收等一些成熟的新技术新工艺,用于煤矿井下地震仪器的生产,将会从硬件上保障煤矿井下地震勘探工作的开展。

4) 目前从事煤矿井下地震勘探技术研究的力量远远不足,也是影响该技术发展的深层次原因之一。

尽管如此,应该看到,在煤矿井下开展地震勘探工作,具有地面地震勘探所无法比拟的优势,主要体现在:

1) 地震勘探深度浅、验证快。随着国内近年来煤炭开采强度的不断加大,地面地震勘探的深度平均在 700~1 100 m 左右,而转入煤矿井下勘探时,震源与检波器直接或近距离安放在被探测的目标层附近,探测深度平均在 300 m 以内,尤其是对于奥陶系顶界面的探测更具有优势,且地震探测结果能够迅速得到开采验证。

2) 受地面不利因素干扰少。一是煤矿井下地震勘探不受地形、低降速带影响,二是不受天气、青赔等外围影响因素的困扰,便于取准、取全第一手的信息,且原始资料的主频、带宽高于地面地震资料数倍以上。

3) 实现三维空间立体勘探。煤矿井下地震勘探,能够测量介质的各向异性和吸收特性,还可以为地面地震资料处理、CT 成像技术提供信息,如果与地面地震勘探相互配合,则可以获取最完整的数据。

4) 弥补地面地震的空白。地面地震勘探一般要求目的层的倾角较小,对于陡倾角地层,地面地震成像困难,而在煤矿井下开展地震工作,陡倾角问题轻而易举地转换为缓倾角勘探问题,对于上组煤开采沉陷区域的下组煤探测,井下地震可以填补地面地震的空白。

## 3 结束语

与常规的、成熟的地面地震勘探技术相比,煤矿井下地震勘探技术具有探测深度浅、分辨率高、适于陡倾角勘探等独特优势,同时也涉及到很多更为复杂的问题,如煤矿井下地震波传播的条件既不是半空间也不是全空间、煤矿井下作业的地震仪器既要符合防爆要求还要尽量轻便等,这些都给我们

从理论上和实践中提出了不少新的挑战。

总之,煤矿井下地震勘探技术具有一些地面地震无法比拟的技术优势,蕴藏着巨大的发展潜力,是煤矿高效安全开采急需发展的技术方向。如果今后将地面地震成熟的仪器装备加以防爆或改制,并进一步加强理论研究和方法试验,可以预见:煤矿井下地震勘探技术在深部煤层勘探方面,能够解决地面地震勘探无法解决的地质问题,达到很高的分辨率,具有巨大的发展潜力。

### 参 考 文 献

- 1 王文德,刘玉忠. 钻孔槽波地震勘探的研究[J]. 煤田地质与勘探,1997,25(5):20~23
- 2 孙瑞霞,张雯霁. 煤田地震勘探的新方法——槽波地震勘探[J]. 河北建筑科技学院学报,1998,15(3):59~62
- 3 冯宏,李天元,杨元海,等. 印度冈瓦纳系煤层槽波探测技术的适应性[J]. 煤田地质与勘探,1999,27(3):67~69
- 4 Carpenter D,Robson C. Integrated seismic exploration for mine planning and profitability[J]. First Break, 2001,18(8):343~349
- 5 王连元,苗富林,苗日民. 槽波勘探技术在鸡西杏花煤矿的应用[J]. 黑龙江矿业学院学报,1997,7(2):1~4
- 6 Ge M C, Zou D H S. Detection of abandoned underground mine voids using in-seam seismic waves [A]. In: Wang C Q, Guo W J, Cheng J L, et al. Mine Hazards Prevention and Control Technology[C]. 北京:科学出版社,2007. 635~643
- 7 李锦飞,李人厚. 瑞利波勘探技术的发展与应用[J]. 煤炭学报,1997,22(2):122~126
- 8 祁生文,孙进忠,何华. 瑞雷波勘探的研究现状及展望[J]. 地球物理学进展,2002,17(4):630~635
- 9 洗伟东. 瑞利波勘探技术在开滦荆各庄矿的应用[J]. 煤田地质与勘探,1997,25(5):24~27
- 10 于明科,刘杰. 瑞利波探测在石炭井三矿的应用[J]. 煤田地质与勘探,1997,25(5):28~32
- 11 李俊平,夏伟. 声发射技术在采矿工程中的应用[J]. 工业安全与防尘,2000(1):32~35
- 12 尹贤刚,李庶林. 声发射技术在岩土工程中的应用[J]. 采矿技术,2002,2(4):39~42
- 13 曹树刚,刘延保,张立强. 突出煤体变性破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):2794~2799
- 14 余利先. 声发射技术在岩体冒落预测预报中的应用[J]. 采矿技术,2004,4(3):29~32
- 15 石显鑫,蔡栓荣,冯宏,等. 利用声发射技术预测预报煤与瓦斯突出[J]. 煤田地质与勘探,1998,26(3):60~65
- 16 于克君,骆循,张兴民. 煤层顶板“两带”高度的微地震监测技术[J]. 煤田地质与勘探,2002,30(1):47~51
- 17 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2):2609~2612
- 18 Luo X, Hatherly P, Duncan F M, et al. Microseismic monitoring of roof reaction to high-wall mining [A]. In: Aziz N, Indraratna B. Proceedings International Conference On Geo-mechanics /Ground Control In Mining and Underground Congstruction[C]. Australia:CSRIO,1998. 1059~1065
- 19 Phillips W S, Rutledge J T, House L S, et al. Induce micro-earthquake patterns in hydrocarbon and geothermal reservoirs: six case studies[J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159 (1~3): 345~369
- 20 Trifu C, Urbancic T, Young R P. Source parameters of mining-induced seismic events: an evaluation of homogeneous and inhomogeneous faulting models for assessing damage potential[J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145(1): 3~27
- 21 张兴民,于克君,席京德,等. 微地震技术在煤矿“两带”监测领域的研究与应用[J]. 煤炭学报,2000,25(6):566~570
- 22 姜福兴,王存文,杨淑华,等. 冲击地压及煤与瓦斯突出和透水的微震监测技术[J]. 煤炭科学技术,2007,35(1):26~28
- 23 刘杰. 特厚煤层综放工作面围岩运动的微地震监测[J]. 矿业安全与环保,2008,35(1):44~46
- 24 赵永贵,刘浩,孙宇,等. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展,2003,18(3):460~464
- 25 Baldi A M, Bianchi F, Boerio V, et al. New layout of A1 Florence-Bologna highway: Integrated seismic reflection survey and tomography inversion to perform structural geological modeling along the main tunnel route[A]. In: Patron. Atti Congresso ITA 2001 World Tunnel Congress: Progress in Tunneling after 2000 [C]. Bologna:[s. n.],2001. 157~167
- 26 冯永,李永鸿,杜文哲. TSP 在隧道超前地质预报的应用研究[J]. 西北地震学报,2006,28(4):348~351
- 27 徐文杰. TSP 超前地质预报在海底隧道施工中的应用[J]. 工程地球物理学报,2007,4(1):31~36
- 28 蔡英康,刘秀峰,宋恩强. TSP 地质超前预报系统在煤矿生产中的运用[J]. 西部探矿工程,2005,17(4):86~87
- 29 钟世航,孙宏志,王荣,等. 陆地声纳法在探查单个溶洞方面的优势[J]. 物探与化探,2007,31(B10):111~115
- 30 钟世航,孙宏志,王荣. 陆地声纳法在隧道施工时预报断层、溶洞的效果[J]. 隧道建设,2007(Z2):474~477
- 31 钟世航. 陆地声纳法及其应用效果[J]. 物探与化探,1997,21(3):172~179
- 32 孙宏志. 陆地声纳浅层地震勘探技术[J]. 煤炭科学技术,1999,27(12):17~19
- 33 钟世航. 浅层高分辨率勘查中的陆地声纳法[J]. 工程地球物理学报,2004,1(1):31~37

(上接第 100 页)

- 34 Gendzwill D J, Randy B. High resolution seismic reflections in a potash mine [J]. *Geophysics*, 1993, 58 (5): 741~748
- 35 Frappa M, Molinier C. Shallow seismic reflection in a mine gallery [J]. *Engineering Geology*, 1993, 33 (3): 201~208
- 36 Wright C, Walls E J, de Carneiro D J. Seismic velocity distribution in the vicinity of a mine tunnel at Thabazimbi, South Africa [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 44 (4): 369~382
- 37 程建远. 煤矿井下高分辨率地震探测技术[J]. *煤田地质与勘探*, 1997, 25(5): 14~16
- 38 杨辉, 程建远, 蔡文芮. 煤矿井下超浅层高分辨率地震勘探探测下组煤小窑采空区[A]. 见: 董书宁, 张群编. 安全高效煤矿地质保障技术及应用——中国地质学会、中国煤炭学会煤田地质专业委员会、中国煤炭工业劳动保护科学技术学会水害防治专业委员会学术年会文集[C]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007. 473~476

(编辑: 任 鹏)