

# 物探方法在断裂破碎带富水性判别中的应用

张宝匀<sup>1</sup>, 么红超<sup>2</sup>, 汪洋<sup>3</sup>, 张威<sup>2</sup>, 贾常秀<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 3. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 隧道穿越大型断裂地段, 断层的富水性对隧道工程建设的安全性有较大影响。应用物探方法对大型断裂富水性进行勘探, 将有效预防施工过程中出现突水等安全事故。以山西的古城井田隧道建设前期勘探为例, 采用可控震源浅层地震勘探技术对断层的结构进行了分析、解释, 准确掌握了隧道穿越地堑区域的地质构造、岩性; 利用频率域电磁测深法调查了工作区内断层的充水、导水情况及二叠系砂岩水、奥陶系灰岩水的赋存情况、岩溶裂隙程度等; 最后综合两种物探方法, 分析得出断层的充水来源和导水性质。

**关键词:** 可控震源浅层地震勘探; 频率域电磁测深法; 富水性; 大型断裂带

**中图分类号:** P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0941-05

## Application of geophysical prospecting techniques in identification of water rich conditions of fault fracture zone

ZHANG Bao yun<sup>1</sup>, YAO Hong zhao<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, JIA Chang xiu<sup>3</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The tunnel passes through the large fault, and the water rich conditions of the fault can have great impacts on the safety of tunnel construction. In order to prevent the occurrence of water inrush during the construction, the water rich conditions of large fault are investigated using the geophysical prospecting method. In this paper, the preliminary exploration of tunnel construction in the Gucheng mine of Shanxi Province was taken as an example. The fault structure was analyzed by the controlled source shallow seismic technique, which can provide the geological structure and lithology of the area where the tunnel passes. The frequency domain electromagnetic sounding method was used to investigate the water rich conditions and hydraulic conductivity of the fault, the storage conditions of Permian sandstone water and Ordovician limestone water, and karst fracture conditions. The source for water rich conditions and hydraulic properties of the fault were analyzed by the above two geophysical techniques.

**Key words:** controlled source shallow seismic method; frequency domain electromagnetic sounding method; water rich condition; large fault zone

隧道建设勘察中主要的工程地质危害是岩溶和断层问题<sup>[1]</sup>, 特别是需要重点防范大型断层破碎带突涌水<sup>[2-3]</sup>。当受到顶板松散层水、风化裂隙水及地表水体的威胁时, 必须研究裂隙水的来源和去向, 并重点加以防治<sup>[4]</sup>。物探方法是查明穿越工程区范围内的断层构造及其导富水性的一种有效手段, 然而单一的物探方法局限性明显, 此时需要将地震勘探和电法勘探两种方法相结合。

20世纪80年代中期至90年代初, 我国隧道地质勘查工

作采用的是地质调查钻探和静力触探、室内外测试相结合的手段; 90年代以后, 则引进了更多先进的物探技术<sup>[5]</sup>。现在, 在隧道勘察工作中应用比较成功的是可控震源大地电磁法与高密度电阻率成像法, 用于划分地层、寻找隐伏构造, 解决隧道建设的地质问题<sup>[6]</sup>。

在我国, 可控震源浅层地震勘探技术主要应用于煤炭资源勘查、水文地质勘察, 提供构造、地层、岩性对比、含水层富水性等方面的资料<sup>[7-9]</sup>; 频率域电磁测深法主要用于成矿规

收稿日期: 2014-11-07 修回日期: 2015-08-17 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20150924.2107.030.html>

作者简介: 张宝匀(1991-), 女, 河北深州人, 主要从事水文地质和环境地质方面研究。Email: zhangbaoyun0105@163.com

通讯作者: 么红超(1983-), 男, 河北保定人, 助理研究员, 主要从事矿山水文地质及矿山环境方面研究。Email: yaohongchao@qq.com

律研究和找矿预测<sup>[10]</sup>,也有人将其用于深埋岩溶水研究<sup>[11]</sup>。本文将可控震源浅层地震勘探和频率域电磁测深法相结合,拟进行大型断裂富水性判别研究。

## 1 工区位置及区域地质条件

古城矿井地处山西省屯留县、长子县境内,其首采区位于古城井田中部,该井田交通方便,东距太(原)焦(作)铁路 10 km, 207 国道从井田东部边缘通过。太长高速路从井田东南边界通过,长子-屯留公路从井田西部穿过。勘探区东边接东李高村,西达西李高村,北至李高乡,南临王史村。工区内,水泥、沥青、乡间土路纵横交错,密如蛛网,交通非常方便,车载可控震源地震勘探的开展条件便利。

井田位于太行山中段西侧的上党盆地中南部。地貌形态以盆地为主,地形标高一般在 901~1 065 m 之间。山西古城矿属华北地层区山西地层分区长治小区。地层出露由东向西、由老到新为:上元古界震旦系,古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二迭系,中生界三迭系,新生界第三系、第四系。仅西南端及西部沟谷内零星出露二迭系上统上石盒子组、石千峰组地层,其余大部分均为新生界黄土所覆盖。含水层为太原组石灰岩含水层组,以及下伏奥灰岩溶裂隙含水层。构造相对简单,主要以宽缓褶皱为主,主体部分为新生代叠加的长治新裂陷。

井田内有岚水河,位于井田的西南角,东西向流过井田,北边有降河河流流量受大气降水影响,随季节变化较大。位于辛安泉域南部长治盆地水文地质单元内。泉域边界:东为太行山西麓隔水层隆起带,是泉域隔水边界;南为高平北部纬向地下分水岭;西为沾尚武乡-阳城北北东向凹褶带;北为武乡一带的地下分水岭。

区域东部出露一套碳酸盐岩地层,呈长条状南北方向展布,含岩溶裂隙水,向西地逐渐降低。区域中、西部属长治盆地,由黄土丘和低山组成,海拔 800~1 200 m,该盆地为新生界早期形成的断陷盆地,堆积物较厚约 300 m,并含有若干孔隙含水层。区内尚有少量中生、古生界的碎屑岩出露,含一系裂含水层,富水性弱,盆地范围内奥陶系、寒武系地层埋藏较深。

井田内松散含水层主要直接受大气降水补给,并接受基岩风化带水及泉水的补给。松散含水层下的基岩风化带含水层一般接受其上覆含水层的补给,在局部地段,不同时间内与松散含水层可互为补给含水层。山西组、太原组含水层接受大气降水的补给条件较差,与上覆含水层及下伏含水层均有一定厚度的隔水层相隔。地下水运动一般以层间径流为主,仅在断层等构造部位才可能与其它含水层直接发生水力联系。

## 2 物探方法介绍

### 2.1 可控震源浅层地震勘探

地震勘探包括反射波法、折射波法等<sup>[12-13]</sup>。本研究区采用纵波反射波法,即以可控震源激发的弹性纵波作为震源信号,利用预先布设的采集系统拾取经历反射和折射等过程后传回地表的 seismic 波信号,处理和分析其中的反射波和首波信号特征<sup>[14]</sup>。

地震勘探对断层的控制利用了地震反射界面与地质物性差异界面存在的对应关系。地震反射界面形态在空间上的变化反映了地下物性界面的空间形态变化以及地下介质的空间分布特征。地震反射界面形态的变化区域与地质构造的分布区域密切相关。地震勘探野外数据采集工作包括噪声试验和正式采集两个步骤<sup>[15]</sup>。

研究区野外数据采集采用纵波反射波法和多次覆盖技术,可控震源单端激发、单端接收、共炮点记录。激发震源采用美国 IVI 公司的 Minivib 车载可控震源(T-15000),具有抗干扰能力强,性能稳定等优点,可充分适应野外环境地震勘探的需要。通过速度分析、叠加偏移处理、地表一致性处理、噪声压制、速度分析、叠加偏移处理、地震数据处理,对野外采集的原始记录进行编辑、滤波、校正、叠加和修饰等一系列过程,达到压制干扰信号、突出有效地层信号的目的<sup>[9]</sup>,最终输出地震成果剖面。

### 2.2 频率域电磁测深法

频率域电磁法是以地壳中岩石和矿石的导电性与导磁性差异为基础的电磁测深法。EH-4 电导率成像系统是部分可控源与天然场源相结合的一种音频大地电磁测深系统,观测的基本参数为与时间域正交的电场分量( $E_x$ 、 $E_y$ )和磁场分量( $H_x$ 、 $H_y$ )。该系统根据勘探深度选择不同的配置,通过改变频率可以达到测深的目的。其趋肤深度(探测深度) $\delta$ <sup>[17]</sup>为

$$\delta = 356 \sqrt{\rho / f} \quad (1)$$

式中: $f$ 为电磁波频率; $\rho$ 为视电阻率。 $\delta$ 随着频率的变小而增大,反之则减少,因此通过改变频率可以达到测深的目的。

由于地下水矿化度对含水岩层的电阻率影响较大,且不同颗粒的砂泥层间电阻率有明显差异,结合本次物探勘测的主要目的,选择岩层的视电阻率为主要观测参数。因此,频率域电磁测深法可用于查明构造裂隙岩溶发育情况及裂隙富水性。

频率域电磁测深法的优势为:(1)受场地限制较小,易于开展工作;(2)轻便的发射装置,便于多次移动,为保证发射信号质量进行多次移动提供了前提;(3)多次迭加采集数据,能有效地压制干扰;(4)时间域观测,频谱丰富,能提供更多的地质信息;(5)实时数据分析,确保观测质量;(6)现场给出连续剖面的拟二维反演结果,结果直观等<sup>[12]</sup>。研究区由第四系黄土所覆盖,勘探区域地势比较平坦,电极接地较好,不需要进行地形校正。区内地层岩性变化和构造特征具备了地球物理前提条件。

## 3 施工实例

### 3.1 可控震源浅层地震勘探

研究区第四系黄土覆盖全区,其厚度为 42.2~90.55 m(由附近 8 个钻孔资料得到),区内潜水位一般在 2~18 m 之间,潜水位以下为良好的激发层位,第四系直接盖在二叠地层上,使之形成强烈的反射界面。所以测区内浅层地震地质条件良好。研究区域地势比较平坦、地震地质条件良好、具有强烈的反射界面,满足了浅层地震纵波反射波法的前提条件<sup>[15]</sup>。由于核心部分被村庄压覆,传统的炸药震源不能使

用,但如绕过村庄,则可能会产生较大的误差。考虑到村庄内有井字状的公路相通,选用 Industrial Vehicles International 公司的 Minivib 车载可控震源(T-15000),可在村庄内公路上有效进行工作。Minivib 车载可控震源具有自相关能力,抗干扰能力强,扫描频率和频带范围可调,可激发高频率、宽频带的地震波信号,性能稳定,是替代炸药的较好震源<sup>[6]</sup>。速度是反射波法数据处理和解释的首要参数,它直接影响最终叠加地震剖面质量,速度分析是反射地震数据处理最为重要的环节之一<sup>[13]</sup>。速度参数一般通过速度扫描获得的。研究区中浅层构造相对较复杂,在采用常规的速度分析方法的基础上,针对野外实际观测的情况,选择合适的大道集进行精细的速度分析,以便正确地求取速度。同时,在纵横向速度变化较大的复杂构造部位,适当加密速度谱的点数和速度扫描的分析精度。在方法上可选择常规速度分析法并与 DMO 速度分析法结合使用。实际中,速度的准确求取往往与静、动校正和叠加串在一起循环迭代进行,以获得高质量的速度资料。处理得到速度谱分析结果见图 1。

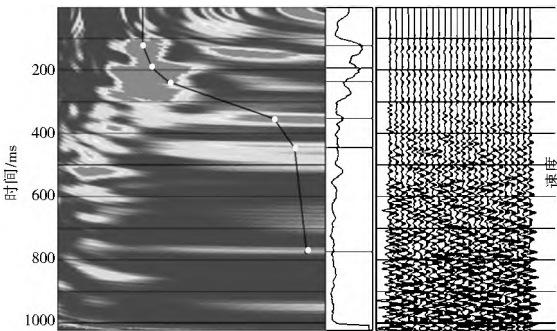


图 1 速度谱分析结果

Fig. 1 Velocity spectrum analysis results

在研究区共布设了 11 条浅层地震勘探剖面,测线总长度

13.865 km。测线部署尽量沿乡间柏油路和土路。地震测线从南至北依次编号为 01、02、03、04,从东至西依次编号为 05、0501、06、0601、07、08,其中为了更好的测量煤巷道的位置及其的导水性能,在 06 号测线与 07 号测线之间加做一条 09 号测线。测线总物理点数 476 炮,测线总长度 13.685 km。

统计 11 条地震勘探剖面数据,分析处理得到的所有的地震时间剖面。对比勘探深度范围,依据标准地震反射波组速度分析和深度计算结果,对比地层层序,可以把工作区地层由浅到深划分出 5 个标准地震反射波组。其标准反射层与地质层位的对应关系见表 1。

表 1 标准地震反射波组与地质层位对应关系

Tab. 1 Relationship between the standard seismic reflection wave group and geologic horizon

地震反射波组	地质层(底界)	地质标号
T <sub>1</sub>	第四系	Q
T <sub>2</sub>	二叠系石千峰组	P <sub>2sh</sub>
T <sub>3</sub>	二叠系上石盒子组上段	P <sub>2s</sub> <sup>3</sup>
T <sub>3</sub>	二叠系上石盒子组中段	P <sub>2s</sub> <sup>2</sup>
T <sub>3</sub>	二叠系上石盒子组下段	P <sub>2s</sub> <sup>1</sup>
T <sub>4</sub>	二叠系下石盒子组	P <sub>1x</sub>
T <sub>5</sub>	二叠系山西组	P <sub>1s</sub>
	石炭系	C

处理得到 11 个地震地质解释剖面,以图 2 为例可得出研究区断层有如下特点:断层的走向绝大部分为 NE 向,少部分为 NW 向,断层倾角在 80°左右;区内断裂构造延展长度一般较长;断层的平面形态多数较平直;断层大部分集中于勘探中北部;呈条带状分布;地层倾向大多与断层倾向一致。查明了研究区二叠系内部及其上部覆盖的第四系主要地震反射标准层和断裂构造格局。为查明断层导水性打下基础。

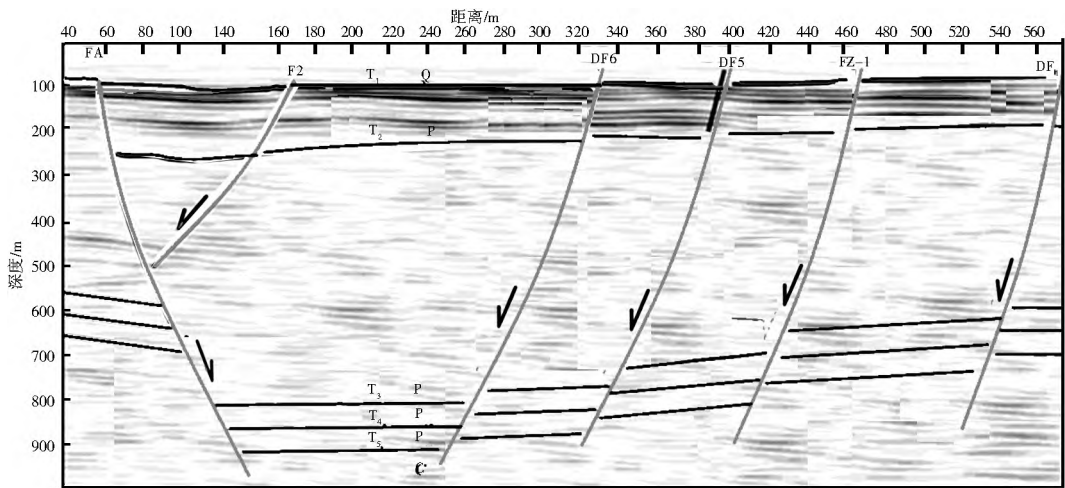


图 2 地震地质解释剖面 01 线

Fig. 2 Line 01 of seismic and geological interpretation section

### 3.2 频率域电磁测深法

电阻率是能较好表征地下岩矿石富水性特征的一个参数,当地下地层构造富水性较好时,测量的电阻率数值一般比较低,当测量到完整的不富水岩石时,电阻率数值会比较高<sup>[20]</sup>。该工作区地层岩性变化和构造特征具备了地球物理前提条件。

EH4 系统采用高频测量装置,频率范围 10 Hz~100 kHz, TM 测量方式<sup>[21]</sup>,电偶极距 30 m(连续剖面)。为探测清所有断层的富水性,本次勘查工作部署 16 条测线,分别为北西向 4 条、南北向 4 条、东西向 4 条、北东向 4 条,测线总长度 11.36 km。

由于篇幅限制,本文仅以 3 号勘探测线的成果为例详细

论述。图 3 为西北向测线,从 3 线勘查成果图上可看出,测线构造反映明显,剖面后段还有一处小的构造。第四系深度在 60~100 m 内,测线上部电阻率较低,下部电阻率逐渐增大,即第四系地层电阻率相对较低,电阻率数值小于  $200 \Omega \cdot \text{m}$ ,下面二叠系地层岩性电阻率逐渐增大,电阻率数值基本上大于  $200 \Omega \cdot \text{m}$ 。F 断层位置富水性较差,但是剖面后段有一处小的构造存在,该断层具有一定的导水能力、富水性较好,使得上部各个含水层之间有水力联系,可能在地堑内部富集一定量的水。

总体分析 16 勘探条测线结果可知,第四系地层小于 100 m,该地层电阻率相比二叠系地层电阻率数值较小,横向上第四系多呈水平层状。二叠系地层内有安昌断层、中华 1 断层、中华断层三个大的构造,还有很多较小的构造断层存在,这些断层是研究区内含水层间水力联系的主要通道,但是断层两盘间的富水情况有所差异,在断层的上盘一般富水性较好,下盘富水性较差。安昌断层、中华 1 断层、中华断层是深层和浅层含水层联系的主要通道,浅层的小断层对隧道建设影响较小。在富水区方面,工作区内整体上富水性较差,安昌断层、中华 1 断层、中华断层附近以及安昌断层和中华断层所造成的地堑区域内具有一定的富水性,两大断层具有一定的弱导水性,引起一些含水层之间的相互连通。除了局部一些小的断层导水外,安昌断层以北和中华断层以南大部分区域隔水层较好,不利于水力的上下联系。勘探区域总体来说富水性较差。

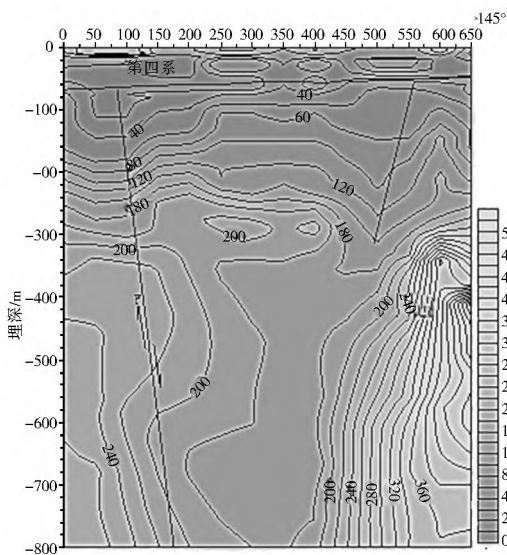


图 3 3 线 EH-4 勘测结果

Fig. 3 EH-4 survey results for line 3

## 4 结论

采用地震勘探和电法勘探分析断层导水性的影响因素,判断断层在施工路段的导水性,可为大型断裂隧道穿越时的安全施工提供有效建议。通过可控震源地震勘探进行数据采集、室内资料处理、资料地震地质解释、结合当地地质资料及钻孔资料,共发现断层 11 条,其中验证区内断层 9 条,新发现断层 2 条。频率域电磁测深法勘探出二叠系安昌断层、中华 1 断层、中华断层三个大的构造及很多小的构造断层,构成工作区内含水层间水力联系的主要通道。安昌断层和

中华断层两个断层所造成的地堑区域内具有一定的富水性,两大断层具有一定的弱导水性,其他大部分区域隔水层较好,不利于水力的上下联系。通过这两种物探方法的运用,推断出研究区的断层分布情况及导富水性,为隧道开挖过程中防治水提供有效依据,对保证隧道在大型断层地段设计施工的经济和安全有着重要的意义。

## 参考文献(References):

- [1] 邓洪亮,谢向文,陈玲. CSAMT 法探测深长埋隧洞中隐伏断层的技术应用[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2): 12-15. (DENG Hong liang, XIE Xiang wen, CHEN Ling. Technology study of detect fault in the deeply buried tunnel by CSAMT [J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2007, 5(2): 12-15. (in Chinese))
- [2] 汪易森. 关于深埋长隧洞开挖中高压涌水问题的讨论[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(5): 4-7. (WANG Yi sen. Discussion for high Pressure blow of deeply buried Long Tunnels [J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2006, 4(5): 4-7. (in Chinese))
- [3] 蒲小平,王全胜. 厦深铁路大南山隧道 F2-1 断层突泥涌水处理技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 466-469. (PU Xiaoping, WANG Qian sheng. Treatment technology of mud and water gushing in F2-1 fault of Dananshan tunnel on Xiamen Shenzhen railway [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 466-469. (in Chinese))
- [4] 姚伟,洪政,刘蒙蒙,等. 兰州轨道交通建设中的工程地质问题与对策探讨[J]. 铁道工程学报, 2013, 180(9): 1-6. (YAO Wei, HONG Zheng, LIU Meng meng, et al. Countermeasures for engineering geological problems faced in construction of Lanzhou rail transit [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 180(9): 1-6 (in Chinese))
- [5] 赵会会. 物探方法在公路深埋长隧道地质勘查中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005. (ZHAO Hu hui. Application of geophysical prospecting techniques for buried long tunnels of road construction [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005. (in Chinese))
- [6] 赵虎. 物探技术在川内高速公路深埋隧道勘查中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. (ZHAO Hu. Application research of geophysical technology for deep tunnel of highway in Sichuan province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [7] 倪宇东. 可控震源地震勘探新方法研究与应用[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012. (NI Yu dong. Study and application of new vibroseis seismic prospecting methods [D]. Wuhan: China University of Geosciences Wuhan, 2012. (in Chinese))
- [8] 马丽,孙黄利,贺正东,等. 可控震源在山区地震勘探中的应用[J]. 山西煤炭, 2007(5): 50-52. (MA Li, SUN Huang li, HE Zheng dong, et al. Application of vibrator in seismic exploration of coal Mine in the mountains [J]. Shanxi Coal, 2007(5): 50-52. (in Chinese))
- [9] 孟宪玮,朱庆俊,彭成,等. 综合物探在罗布泊地下水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(4): 344-348. (MENG Xian wei, ZHU Qing jun, PENG Cheng, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting techniques for ground-

- water prospecting[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 344-348. (in Chinese)
- [10] 徐新学. 大地电磁测深法在深部矿产资源调查中的应用[J]. 物探与化探, 2011, 25(1): 17-23(XU Xin Xue. The application of mangle to telluric sounding to the investigation of ore resources at depth[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 25(1): 17-23. (in Chinese))
- [11] 武毅, 郭建强, 朱庆俊. 宁南深埋岩溶水勘查的物探新技术[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(2): 45-48(WU Yi, GUO Jian qiang, ZHU Qing jun, et al. New techniques application in the exploration of Ningnan deep seated karst waters [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, 28(2): 45-48. (in Chinese))
- [12] 吴有信, 韩东亚, 王琦. 煤矿深部开采地质保障中的综合物探技术应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(1): 57-62. (WU You xin, HAN Dong ya, WANG Qi. Application of integrative geophysical exploration in deep Coal mining for mine geological assurance system[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(1): 57-62. (in Chinese))
- [13] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2011. (LU Ji yong, WANG Yong gang. The principle of seismic exploration[M]. China University of Petroleum Press, Beijing, 2011. (in Chinese))
- [14] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1988. (WANG Zhen dong. Shallow seismic exploration and application of technology[M]. Geological Publishing House, Beijing, 1988. (in Chinese))
- [15] 刘祖珉, 雷宛, 鲁红英, 等. 浅层地震反射波法在某重大工程预选厂址中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(4): 345-348. (LIU Zu min, LEI Wan, LU Hong ying, et al. The application of shallow seismic reflection in preselecting the location of a major engineering project [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2006, 33(4): 345-348. (in Chinese))
- [16] 任政委, 武毅, 孙党生, 等. 高干扰环境下西安市地裂缝勘查新方法[J]. 物探与化探, 2011, 35(1): 75-79. (REN Zheng wei, WU Yi, SUN Dang sheng, et al. A new method for ground fissure exploration in the high interference environment of Xi'an city [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(1): 75-79. (in Chinese))
- [17] 吴璐苹, 石昆法, 李荫槐, 等. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712-717. (WU Lu ping, SHI Kun fa, LI Yin huai, et al. Application of CSAMT to the search for groundwater [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(5): 712-717. (in Chinese))
- [18] 刘保金, 朱金芳, 等. 城市活断层探测的高分辨率浅层地震数据采集技术[J]. 地震地质, 2002, 24(4): 524-532. (LIU Bao jin, ZHU Jin fang, et al. Acquisition technique of high resolution shallow seismic data for surveying of urban active faults [J]. Seismology and Geology, 2002, 24(4): 524-532. (in Chinese))
- [19] 王辉, 丁志峰. 浅层地震勘探资料处理中的速度分析参数选取[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 597-603. (WANG Hui, DING Zhi feng. Parameters selection for velocity analysis in shallow seismic data processing [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(4): 597-603. (in Chinese))
- [20] 施龙青, 翟培合, 魏久传, 等. 三维高密度电法工作面探水技术的应用[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2008, 27(6): 1-4. (SHI Long qing, ZHAI Pei he, WEI Jiu chuan, et al. Application of 3D high density electrical technique in detecting the water enrichment of strata [J]. Journal of Shandong University of Science: Technology Natural Science, 2008, 27(6): 1-4. (in Chinese))
- [21] 赵光荣. 基于EH4电磁成像系统的煤矿采空区探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(11): 110-112(ZHAO Guang rong. Mine goal survey technology based on EH4 electromagnetic image system [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(11): 110-112. (in Chinese))

(上接第934页)

- [12] 赵修龙, 张健, 俞晓东. 基于有限体积法的有压管道水锤计算[J]. 水电能源科学, 2014, 32(2): 164-166. (ZHAO Xiu long, ZHANG Jian, YU Xiao dong. A finite volume method for water hammer calculation in pressure pipes [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(2): 164-166. (in Chinese))
- [13] GUINOT V. Riemann solvers for water hammer simulation by Godunov method [J]. Int J numer Meth Eng, 2009, 49: 851.
- [14] TORO E F. Shock-Capturing Methods for Free Surface Shallow Flows [M]. John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [15] MING Z. MOHAMED S G. Godunov type solutions for water hammer flows [J]. J Hydr Eng, 2004, 4: 341.
- [16] 刘韩生, 樊书刚, 张丹, 等. TVD 格式在水击数值模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 107-112. (LIU Han sheng, FAN Shu gang, ZHANG Dan, et al. Numerical simulation of water hammer with TVD scheme [J]. Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 107-112. (in Chinese))