

1 万焦耳电火花震源在大距离地层 CT 中的应用

卢 松, 于维刚, 陈俊栋

(中铁西南科学研究院有限公司工程地质研究所, 成都 611731)

摘要: 小能量电火花震源能量偏小的现状影响了其在地层弹性波 CT 的广泛应用。分析了便携、大功率、激发能量可控震源激发系统研制的必要性, 介绍了研制的 1 万焦耳大功率 ZDF-3 型电火花震源及其配合地震仪在跨孔弹性波 CT 探测中的应用, 列举了两个地基 CT 检测实例, 说明大跨孔 CT 检测其成本远低于传统小跨孔 CT 检测。显示了应用大功率电火花做震源的大跨距 CT 探测的良好应用前景。

关键词: ZDF-3 型电火花震源; 地基检测; 弹性波 CT

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-06-0452-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.06.002

Application of 10kJ ZDF-3 sparker on large distance layer CT

LU Song, YU Wei-gang, CHEN Jun-dong

(China Railway Southwest Research Institute Co. Ltd, Institute of Engineering Geology, Chengdu 611731, China)

Abstract: The limited power of small energy sparker has confined its wide application on the elastic wave CT in layered medium. This paper introduces the ZDF-3 type high-power sparker as well as its application in cross-hole elastic wave CT, aided by seismic instruments. Two examples of ground-based CT were demonstrated, showing that the cost of large-distance CT detection was lower than the traditional shot-distance CT detection. This study indicates that the application of high-energy sparker of the large cross-hole CT has a good prospect.

Key words: ZDF-3 type sparker; foundation detection; elastic wave computerized tomography

0 引言

近几十年来地球物理勘探技术广泛应用于构件质量、地基加固效果检测等领域。弹性波法利用介质间弹性波速度或波阻抗的差异, 观测弹性波在介质中传播的运动学和动力学特征, 了解测区内介质结构、物质组成及工程地质条件。由于其探测方法的多样性、探测深度的多层次性、探测结果的准确性等优点有着不可取代的优势。

弹性波探测主要包含三个步骤, 分别是震源激发、信号接收及信号处理。在弹性波探测中, 接收信号质量是确保弹性波探测效果的首要因素, 震源能量大小是保证探测距离长短的重要因素, 而除了城市地勘以外多数地勘属于野外作业。因此, 便携、大功率、能量可控的震源激发系统, 无疑成为弹性波探测技术发展的关键^[1]。

地震 CT 方法的研究开始于 70 年代中期, 与医学 CT 几乎同时发展起来。近年来由于工程的需

要, 高分辨率地震 CT 方法受到高度重视, 发展很快。以井间、巷道间及与地表之间联合观测的地震 CT 的实例愈来愈多^[2]。随着弹性波勘探技术的不断发展, 弹性波勘探仪器也有了日新月异的变化, 如大功率电火花震源, 24 位高精度采集单元, 高灵敏度检波器等, 给了高精度弹性波层析成像技术发展的空间, 使得基于射线理论的弹性波 CT, 从以前的几米孔间距勘探, 发展到现在的一百多米孔间距勘探。应用中铁西南科学研究院研制的能量突破 10kJ 大功率 ZDF-3 型电火花震源及配套采集单元和检波器, 选用无锡世界贸易中心世贸大厦建设场地 CT 勘探和某铁路路基病害 CT 检测两个工程实例, 对其应用效果进行分析评价, 应用效果展示了大跨距 CT 技术的高效、无损、高分辨率等特点。

1 ZDF-3 电火花震源简介

电火花震源(图 1)作为弹性波法探测中震源的一种, 具有无环境污染, 同时可在水下、小口径孔内等条件下使用的优点。调研国内外电火花震源现状, 如 SYC-2 体积较小, 但功率也较小; 同样国内用得较多的 HX-DHH-02H 能量达到了 2kJ, 但是体

收稿日期: 2012-08-01; 修回日期: 2012-11-28

作者简介: 卢松(1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为地球物理及地质工程。

通讯作者: 卢松, E-mail: stu2820213@gmail.com

积较大；LDZ200/10 型电火花作为一款比较老的产品，市场用得比较多，但功率不够大；Geo-Source 200 多电极电火花系统，通常在海洋上用得多，能量大，但体积也大，需要吊机才能搬得动。综上所述，电火花震源作为弹性波探测震源未能得到大范围推广应用的原因主要有：

(1) 小体积电火花震源功率低，难以满足大尺度探测要求；

(2) 大体积电火花震源功率足够大，但重量过大，不便于野外作业。

针对以上现状，中铁西南科学研究院有限公司工程地质研究所在充分调研的基础上，利用自身长期坚持弹性波仪器设备研发的优势，成功研发便携可控大功率震源——ZDF-3 电火花震源。

该震源主要特点有：

(1) ZDF-3 电火花震源集充电电源和升压、储能、数显、高压保护诸模块于一体，可持续工作时间大于 8h。解决了传统电火花震源需要自带发电机供电的模式，大大提高了野外的工作效率。

(2) 功率大。最大能量超过 10kJ，地层穿透能力在 100m 以上，突破了传统电火花能量不足的瓶颈。

(3) 激发能量可控。该能量实现智能调节，根据需要设定升压电压以达到能量可控的目的，实现了激发过程的可控性。同时储能、升压、控制系统采用独特集成线路技术，实现单件集成，减少了因接线柱连接繁琐引发的外置安全隐患，保证了操作人员的安全，操作可控性更强。

(4) 体积小，重量轻，更便携。ZDF-3 型电火花震源体积为 45×35×46cm，重量仅 45kg，与现有同功率电火花系统相比重量更轻，便于野外使用。

(5) 防水防潮，操作安全。

(6) 声学特性：发射的声脉冲频响特性如图 2 所示(在深水中测试，用全频段检波器接收)，脉冲响应时间短，在 20ms，中心频率如图 3 所示，主要



图 1 ZDF-3 型电火花源
Fig.1 ZDF-3 sparker

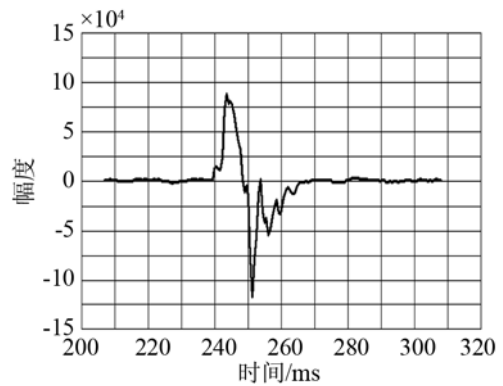


图 2 ZDF-3 震源时域波形图(2000V, 水中)
Fig.2 Time-domain ZDF-3 sparker waveform diagram (2000volt, in water)

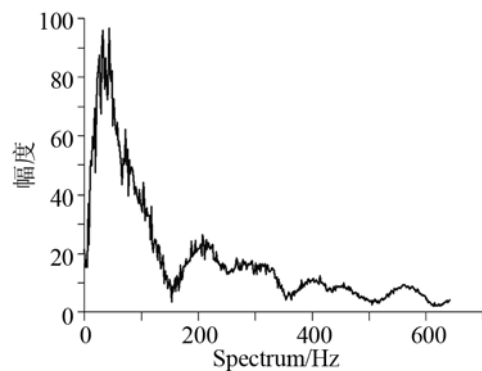


图 3 ZDF-3 震源频谱图(2000V, 水中)
Fig.3 ZDF-3 sparker spectrogram (2000volt, in water)

分布在 10~120Hz。

2 弹性波 CT 技术

根据反演物性参数，弹性波 CT 可分为波速 CT 和吸收系数 CT，本文采用的是波速 CT。波速 CT 中，确定射线路径矩阵是关键，快速计算每条射线通过每个单元的距离，追踪首波传播路径及所用时间是重点，常用的方法有最佳路径算法、射线追踪算法、“椭圆约束”快速射线追踪方法等^[3-6]。

最短路径算法是计算数学“图论”中的一个基本内容，其实质是若已知某些离散点及各点之间的路程权值，用最优计算方法及计算技术，求出从始点到终点的最短路程。显然如果各点之间的权值是所需要的通行时间，求出的结果是最小走时路径。

弹性波射线追踪法如图 4 所示，由费马原理可知，从激发点到接收点的首波是沿费时最少的路径传播，首波射线追踪是一个连续的最佳路径问题。因此，只要把连续的射线追踪问题转换为离散问题，应用最佳路径算法即可实现首波射线路径快速追踪。对于 CT 成像过程而言，成像剖面是由若干规则(正方形)网格组成，且假设每个网格中的介质

波速为常数，以射线理论为基础的成像方法归结为求解方程，如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1M} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ l_{N1} & l_{N2} & \cdots & l_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \cdots \\ S_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \cdots \\ t_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： l_{ij} 是第*i*条射线在第*j*个单元内的路径长度； $S_j=1/V_j$ 是第*j*个单元的慢度值； t_i 是第*i*条射线的走时值， N 为剖面内共测试射线数， M 为剖面分成的网格数。

具体首波射线追踪算法如下：

(1) 首选把单元边界离散成许多点 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ ，如图 4 所示。点的多少视精度要求而定，一般来说点越密集，计算精度越高，但计算时间也随之增加。

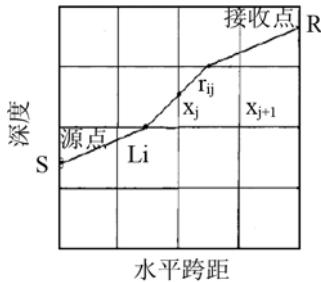


图 4 射线路径示意图
Fig.4 Schematic diagram of ray path

(2) 计算 $S, P_1, P_2, \dots, P_n, R$ 中任意两点间弹性波走时，计算规则是：①若两点间连线在均匀介质中，射线走时是两点间距离除以介质波速；②若两点间的连线在分界面上，界面两侧最大波速为 V_m ，则射线走时为两点间距离除以最大波速；③若两点连线通过不同单元，不在均匀介质中，可以用直线路径近似计算射线走时。

(3) 把 S 点作为起始点，用最佳路径算法计算其它各点(P_1, P_2, \dots, P_n, R)到 S 点的最佳路径和走时，然后从中分离出 R 点到 S 点的最佳路径及走时，即可得到计算结果。

结合最佳路径算法计算理论，进行正反演模拟计算，选用两个 9*9 的棋盘测试模型，如图 5 所示，其中模型 1 中(5,5)坐标位置纵波速度为 $4000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其他位置纵波速度为 $1000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；模型 2 中(5,5)、(3,3)坐标位置纵波速度为 $4000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其他位置纵波速度为 $1000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对测试模型进行正演，得到各射线对的走时数据，在走时数据加上 3% 噪声，再进行反演，获得反演纵波速度剖面如图 6 所示。从图中可以看出，加噪声后，仍能反演出网格上的异常，异常节点上纵波速度为 3851.2、3892.4、3642.7

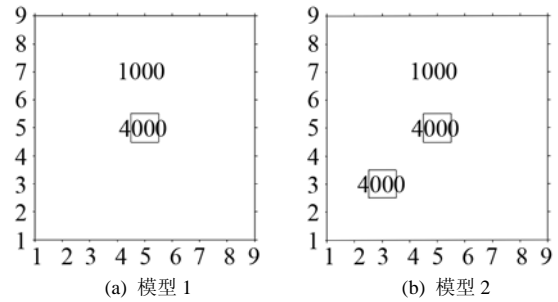


图 5 正演模型
Fig.5 Forward model

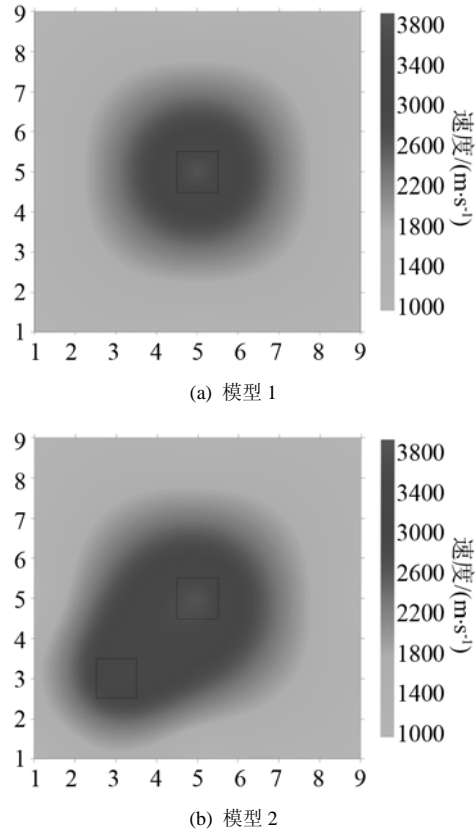


图 6 模型反演结果
Fig.6 Model inversion results

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，误差为：3.72%、2.7%、8.93%，误差都在 10% 以下，可见分辨率较好。

3 大跨度孔间弹性波 CT 探测实例

作为一种物探方法，孔间弹性波 CT 技术经常用作高精度孔间地层层析成像探测^[7-11]，在第一个孔内发射器发射弹性波到达第二个孔内后被检波器接收，如图 7 显示孔间 CT 射线网络示意图；数据传输到地震仪中保存以做后处理分析，把弹性波传播路径叠加后成像，这种方法类似于医学 CT 方法。可成功用于岩石(或砾石、沙层)土层(包括软土)等各种地层，同时在地下水位以上或以下都有效；因为震源和接收器都埋置在土体内部，不受干扰和

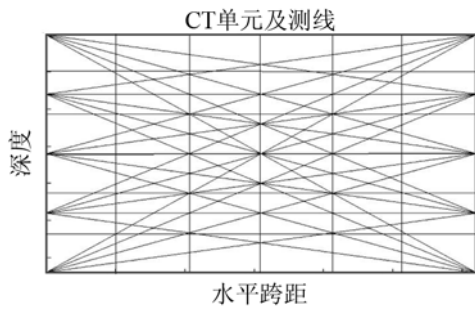


图 7 跨孔 CT 射线网络示意图
Fig.7 The network schematic diagram of cross-hole CT ray

限制。

3.1 无锡世界贸易中心世贸大厦建设

无锡世界贸易中心世贸大厦建设场地面积约 $66\text{m} \times 66\text{m}$ ，原设计 60 个补勘孔(采用 5 个同心圆的布置方式，即以场地中心为圆心，半径分别为 35、28、21、14、7 m，每个圆上等弧分布孔数分别为 20、16、12、8、3，加上圆心位置 1 个孔，共 60 个补勘孔)，通过采用跨孔地震波 CT 层析成像勘探，将补勘孔减少为 16 个，节约勘探孔约 70%。钻孔孔间 CT 层析成像探测，查明了补勘孔间地下-70m 至补勘钻孔终孔深度范围内的地层分布、岩土体的均匀性、波速分布及岩土体内孔洞分布。

ZDF-3 电火花为激发震源。图 8 是 16 个补勘钻孔及跨孔 CT 层析成像勘探剖面布置，图 9 是 BJ1-BJ5 跨孔震波 CT 层析成像成果图。

所选剖面测试深度为 70.0~100.0 m，剖面宽度 22.03m。

由图 9 可知，剖面内测点间平均纵波速度 $V_{pa}=2411\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最小波速 $V_{\min}=1630\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大波速 $V_{\max}=3242\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。剖面总体波速上部小于下部，分界面位

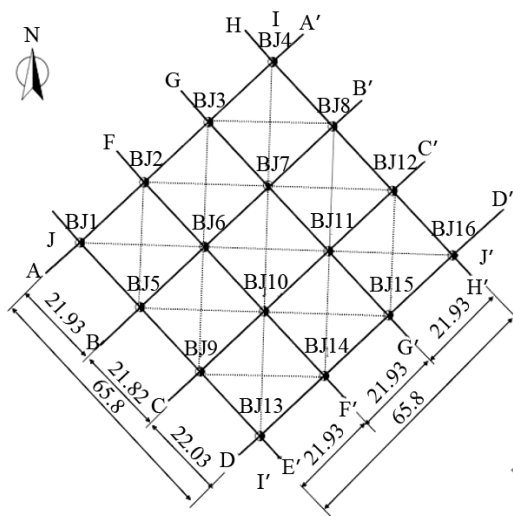


图 8 测孔布置及 CT 测线示意图
Fig.8 The diagram of measured hole layout and the CT survey line

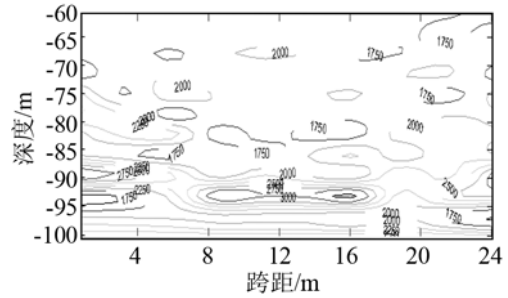


图 9 BJ1-BJ5 孔 CT 分析成果图
Fig.9 CT analysis results from hole BJ1 to BJ5

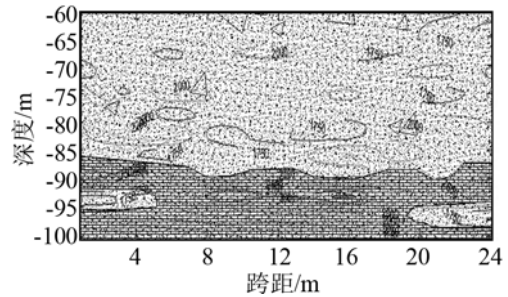


图 10 BJ1-BJ5 孔 CT 分析地质剖面图
Fig10 CT analysis geological profile of BJ1-BJ5

于约 88 m 处，结合钻孔资料，其上部为粘土层，分布较均匀，未见空洞；其下为风化灰岩，存在低速区，为粘土充填岩溶，具体地层剖面图见图 10。

3.2 铁路路基病害 CT 检测

该铁路需穿越横岭煤矿，受煤矿四号井片区和采空区影响，其产生的陷落带及大量的边缘裂隙，会影响保安煤柱的稳定和完整性，给新建铁路造成安全隐患。该煤矿停采已达 20 多年，上部塌陷情况不明显，但已发生大部分沉降，理论计算还有大约 0.8m 沉降未完成，须对采空区进行整治处理。具体地层情况为：表层 0~5m 左右的粉质粘土，3~10 m 左右全风化 W4 的砂泥岩，10~20 m 左右强风化 W3 的泥岩、泥质砂岩，平均深 20m 以下深部弱风化 W2 的泥质砂岩等组成。

铁路病害规模及位置前期检测设计的 CT 检测剖面如图 11 所示(部分剖面)，采用大功率 ZDF-3 型电火花为震源，24 位声波检测仪，其中 49-9 孔为 12m 跨距剖面，以 20° 角斜跨铁路两测；38-7 孔跨距 20m，49-14 孔跨距 21 m，分别垂直于铁路，发射与接收分布于铁路两侧孔内。

图 12 为 120m 跨孔 CT 波形曲线图，可以看出，电路同步触发信号(4 通道)清晰，接收信号(1、2、3 通道)首波起跳明显，信噪比较高，计算的首波走时数据误差小。图 13、14、15 分别为 49-9、38-7、49-14 CT 层析成像成果图。

由图 13 可知，49-9 剖面内测点间平均纵波速

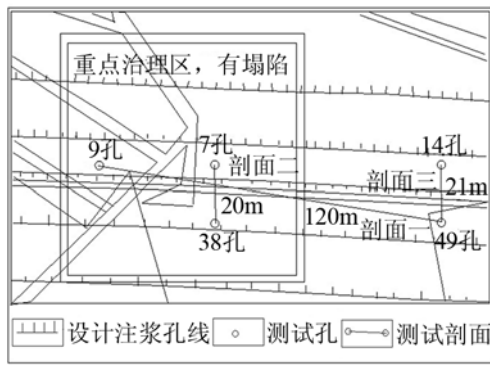


图 11 某铁路病害部份 CT 剖面位置示意图
Fig.11 CT section position schematic diagram of the railway disease part

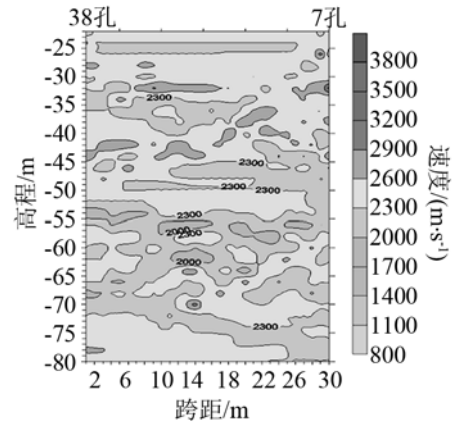


图 14 38-7 孔 CT 分析成果图
Fig.14 CT analysis results of hole 38 to hole 7

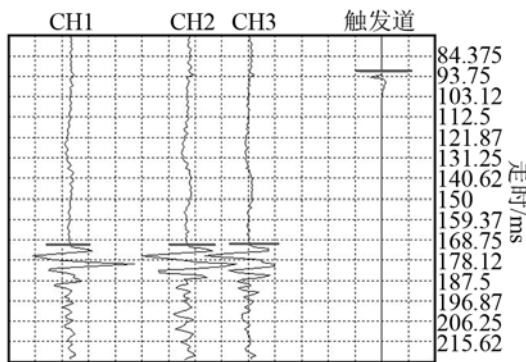


图 12 49-9 孔波形曲线示意图
Fig.12 Waveform curve diagram of hole 49-9

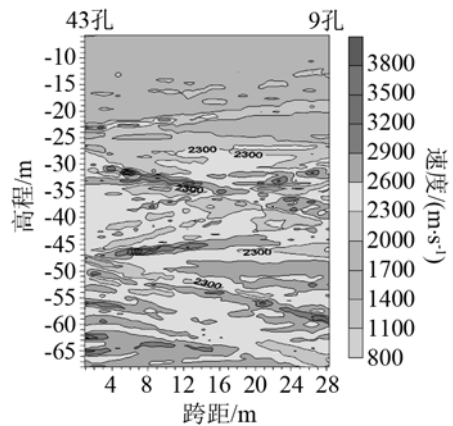


图 15 14-49 孔 CT 分析成果图
Fig.15 CT analysis results of hole 14 to hole 49

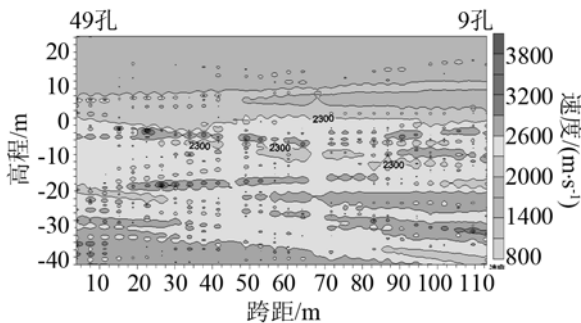


图 13 49-9 孔 CT 分析成果图
Fig.13 CT analysis results of hole 49 to hole 9

度 $V_{pa}=2312 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小波速 $V_{min}=1385 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大波速 $V_{max}=4242 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。剖面总体波速上部小于下部, 基岩面位于海拔 $-28\sim -22 \text{ m}$ 处, 其上部为第四系粉质粘土和全风化砂泥岩, 分布较均匀, 未见松散空洞; 其下为弱风化泥质砂岩, 局部存在低速区, 为煤矿塌陷影响区。

由图 14 可知, 38-7 剖面内测点间平均纵波速度 $V_{pa}=2332 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小波速 $V_{min}=1698 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大波速 $V_{max}=3294 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该剖面基岩面不明显, 受煤矿塌陷影响较严重, 低速松散区分布较广, 为重点病害处理段。

由图 15 可知, 49-14 剖面内测点间平均纵波速

度 $V_{pa}=2426 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小波速 $V_{min}=1365 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大波速 $V_{max}=4103 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。剖面总体波速上部小于下部, 基岩面位于约海拔 -25 m 处, 其上部为第四系粉质粘土和全风化砂泥岩, 分布较均匀, 未见松散空洞; 其下为弱风化泥质砂岩, 未存在低速异常区, 可作为非重点段处理。

4 结 论

(1) ZDF-3 型电火花震源具有 10 kJ 的激发能量, 具有直流充电、功率大、体积小、重量轻、便携等特点, 具有重要的推广应用价值。

(2) ZDF-3 型电火花震源配合 24 位高性能地震仪, 可进行地层剖面高精度勘探, 应用效果较好。同时, 可开展大跨度孔间弹性波 CT 地基探测, 应用效果良好。

(3) 大跨孔 CT 技术的实现, 实现了 CT 技术向无损检测道路的迈进, 使得经济成本降低。

(4) 在地基注浆前、后期中, 跨孔 CT 技术为地基加固注浆提供很好的依据, 实现高效注浆。

(5) 在强风化岩层中, CT 跨距 120 m 能收到,

保守推测其在弱风化或新鲜岩层中跨距可达 180m。

参 考 文 献

- [1] 赵鸿儒, 郭铁栓. 工程多波地震勘探[M]. 成都: 地震出版社, 1996.
ZHAO Hongru, Guo Tieshuan. Engineering multi-wave seismic exploration[M]. Chengdu: Seismological Press, 1996.
- [2] 赵永贵, 李勤. 地震 CT 的新技术及在工程地质中的应用[J]. 工程地质学报, 2000(8, 增刊): 482-486.
ZHAO Yonggui, LI Qin. The new seismic CT technology and applications in engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, (8, Supplement), 482-486.
- [3] 刘超. 超声层析成像的理论及实现[D]. 浙江大学生物医学工程学院(博士学位论文), 2003, 1-145.
LIU Chao. With the implementation of the theory of ultrasonic tomography[D]. Zhejiang University School of Biomedical Engineering (Ph.D. Thesis), 2003, 1-145
- [4] 王运生. 最佳路径算法在计算波路中的应用[J]. 物探化探计算技术, 1992, 14(1): 32-36.
WANG Yunsheng. Optimal path algorithm in the computing technology application[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 14(1): 32-36.
- [5] 王运生. 弯曲射线地震波透射层析成像的一种实现方法[J]. 河海大学学报, 1993(4): 21-28.
WANG Yunsheng. A method to realize transmission tomography crooked seismic rays[J]. Journal of Hohai University, 1993, (4), 21-28.
- [6] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
WANG Jiaying. Geophysical inverse theory[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.
- [7] 陈成宗, 何发亮. 隧道工程地质与声波探测技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
CHEN Chengzong, HE Faliang. Engineering geology and acoustic detection technology of tunnel[M]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University Press, 2005.
- [8] 李志辉, 张立. CT 技术在铁路路基病害勘探中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(2): 137-142.
LI Zhihui, ZHANG Li. Application of CT technology in exploration of railway subgrade disease[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(2): 137-142.
- [9] 朱昌平, 殷冬梅. 大坝 CT 技术研究进展[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 646-650.
ZHU Changping, YIN Dongmei. Research on CT technique of dam[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 646-650.
- [10] 陈国金. 井间观测系统的讨论[J]. 石油物探, 1996, 35(3): 93-100.
CHEN Guojin. A cross-well observation system to discuss[J]. Oil Geophysical Exploration, 1996, 35(3): 93-100.
- [11] 章成广, 张碧星. 声波水泥胶结测井中岩性对地层波影响研究及资料应用[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1140-1144.
ZHANG Chengguang, ZHANG Bixing. Lithology acoustic cement bond log on formation wave research and application of data[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1140-1144.

• 简 讯 •

香港声学学会成立 20 周年庆学术报告会成功召开 盈普声学(惠州)有限公司声学实验室基地竣工使用

2013 年 12 月 6 日香港声学学会成立 20 周年庆学术报告会在香港铜锣湾富豪酒店国际会议厅召开。美国声学学会、上海声学学会及台湾声学学会均发了祝贺函。中国声学学会王晓平博士专程到港致词, 上海中国科学院声学研究所东海研究站副站长许伟杰研究员和中国船舶重工集团公司第 726 研究所王艳研究员代表上海声学学会到会祝贺。香港声学学会现任理事长郑建汇博士主持了 20 周年庆学术报告会。上海声学学会名誉理事、华东建筑设计院章奎生声学设计研究所的章奎生教授和宋拥民博士专程应邀赴会参加学术报告会, 并在会上合作了“近 20 年来我国新建歌剧院与音乐厅的声学检测和综合音质评价研究”的专题报告。一天的会议上还有前理事长杨国良工程师、何德建前理事长、林健栋教授、刘兆杰博士和黄永豪博士分别作了学术报告, 受到全体与会代表的欢迎。

香港声学会成立 20 周年庆第二天 12 月 7 日, 正逢盈普声学(惠州)公司的新建声学实验室基地竣工开业, 香港声学学会安排代表们前往现场参观, 并由前理事长姚景光先生作现场讲解, 同济大学声学所王季卿教授, 上海环境科学研究院环评所周裕德、祝文英等一行 5 人及上海章奎生声学设计研究所章奎生所长和宋拥民博士, 香港工程师学会前会长陈兆根博士及香港声学学会会长郑建汇博士等共约近百人到现场参观。该声学实验基地系由香港 NAP 声学(远东)有限公司的集团在内地投资建设, 可向国内外声学工程提供技术服务, 并进行相关声学研究和声发展。基地共建有多个混响实验室, 最大混响室容积达 307m³, 可进行材料吸声、声源声功率级及样板门窗隔声等多种测量工作。特别是建有超 50m 长的风管消声器试验台装置, 能适用于大风量、长消声器的性能测试, 受到众多参观嘉宾的好评和赞许。

上海章奎生声学设计研究所 章奎生
香港声学学会前理事长 姚景光