

郭淑君, 侯延华, 李红立, 等. 地震 CT 技术在城市地质勘察中的应用研究[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(1): 81-90.  
Guo SJ, Hou YH, Li HL, et al. The application of seismic CT technology in urban geological survey[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(1): 81-90.

## 地震 CT 技术在城市地质勘察中的应用研究

郭淑君<sup>1</sup>, 侯延华<sup>2</sup>, 李红立<sup>3✉</sup>, 雷鸣<sup>1</sup>, 刘文增<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051
2. 中电投国际矿业投资有限公司, 北京 100025
3. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221000

**摘要:** 本文通过应用地震层析成像 (CT) 技术, 对跨孔成像法采集得到的初至波走时, 用基于最短路径法的弯曲射线追踪正演和基于 LSQR 算法的反演技术进行处理。与测井资料联合解释, 得到井间波速分布图, 对井控范围内的地层构造和地基注浆效果进行了研究, 最终得到断裂构造带和人防空洞的分布。认为地震 CT 在进行城市环境地质调查与评价、浅层工程地质勘察时, 能够解决地层岩性和构造的复杂性, 对目标环境进行准确预测, 在城市环境地质研究和基础设施建设中起重要作用, 对促进城市地球物理勘察技术的发展有重要意义。

**关键词:** 地震 CT; 城市物探; 人防工程; 构造断裂

**文章编号:** 1004-4140 (2014) 01-0081-10      **中图分类号:** P 315; P 631      **文献标志码:** A

在城市不断规划、建设、发展和运营时, 对高标准工程项目需要日益增多。因此, 需要解决的城市环境工程地质问题日益增多。例如, 开采地下水引起的地面沉降或地面塌陷, 地下工程开挖引起的地面沉陷, 原有建筑工程地基, 悠久文化古迹的考古, 质量检测与监测和老城区改造等。择优利用、适应和改造工程地质环境条件, 防治可能出现的环境地质问题, 减少地质灾害, 是前期物探勘察的基本任务。

地震层析成像 (Computerized Tomography, CT) 技术是在物体外部测量数据, 依据一定的物理和数学关系反演物体内部速度分布, 得到清晰的物体内部图像分布。根据地震波速度与地质体的对应关系, 可以获得层析图像和钻井资料对地质体进行分类和评价。由于 CT 技术只利用地震波走时信息进行成像, 该方法具有简单、通用、成本低廉、信息量大、精度高和形象直观等特点<sup>[1-11]</sup>。

随着高科技地震仪器研制和计算机技术的飞速发展, 近几十年来, 地震 CT 的理论不断发展, 方法不断改进, 分辨率不断提高, 应用地震 CT 技术反演地球内部三维结构的方法有了很大发展。该技术被广泛应用于内部地球物理和地球动力学、能源勘探开发、工程和灾害地质、金属矿勘探等领域<sup>[12]</sup>。在城市环境工程地质勘察中, 是实现工程安全、对地球内部认识的研究和保证资源可持续发展的重要途径<sup>[13]</sup>。

通过将跨孔地震 CT 技术应用到唐山市的环境工程地质勘察中, 并与钻井成果相结合, 有效探测了场地地下地质结构。通过这一技术, 能全面细致地了解探测区域异常体的大小、

形态及空间分布等。从而全面认知了地下地质结构,识别了有害地质因素,为城市环境地质调查提供了重要依据。

## 1 地震 CT 技术

地震 CT 技术一般可分为两大类:基于射线理论的走时成像方法(包括直射、弯曲射线);基于波动方程反演的 CT 方法。

地震波动理论 CT,可以利用全波形记录、包括走时、振幅、相位、周期等信息,获得更精确的成像,其前提是获得可靠精确的野外观测波形数据,常用方法有 Born 或 Rytov 变换近似方法。地震射线 CT,在地下介质的速度变化较大时,地震波实际传播路径与直线相差很大,必须进行弯曲射线追踪<sup>[14]</sup>。

CT 正演是将理论走时看成震源和接收点路径的积分,已知速度,求射线路径和走时,分模型参数化和射线追踪两步。模型参数化有很多方式:大都是离散化的,如分块、节点模型、不规则模型以及球谐函数展开法等。正演弯曲射线追踪是由积分方程以求解波场传播走时为主的射线追踪数值模拟,分初值射线追踪和边值射线追踪两种。射线追踪方法有以下几类:解析追踪法、打靶法、弯曲法、网格追踪法、有限差分追踪法等。

CT 反演,实质上是寻求一个物理模型来拟合观测值,通常是求解一个病态的大型稀疏线性代数方程组。算法有:滤波反投影法、傅里叶重建法、代数重建法、截断 SVD 法、LSQR 法、共轭梯度法等。目的都是无论介质有多复杂,完全描述点源激发的地震波在介质中的传播。

地震射线追踪的方法很多,应根据不同方法的适应条件和计算效率,合理选择算法。本研究将基于 Huygens 原理的弯曲射线追踪法和 LSQR 算法作为正反演计算的射线追踪算法。弯曲射线追踪法的折射角有时不随入射角连续变化,在速度不变的网格内,射线路程也可能出现弯曲,为减少这种误差,需增加激发方向的射线数,还需增加网格节点数以提高精度,但其适用于复杂介质、速度变化大、计算效率高<sup>[13]</sup>;而 LSQR 算法比较实用,能取得理想效果,计算量少,收敛速度快<sup>[13]</sup>,因此,选用这两种方法作为本研究的主要方法。

## 2 井间地震 CT 观测与处理解译

将地震与测井技术相结合,构成跨孔(井间)地震 CT 技术。其主要特点是在井中激发,井中或地面接收,观测方式有单井成像、跨孔成像、透视法等。主要采集设备由震源控制器、接收控制器、井中水下多分量传感器、传输电缆等组成。浅层工程地质勘察中应用的井间地震 CT 技术,在测得井斜参数的前提下,利用交互拾取得到的初至波走时,处理后得到井间的速度分布、井间构造图像等。

井间地震 CT 可以应用或兼容于常规的地震仪,其震源的激发方式较多,接收方式采用不受水位影响的高阻尼检波器。观测系统可以采用 GEOTOMCG 二维/三维软件,数据处理可以使用 ReflexW (Sandmeier 软件)软件或自发研制的地震波 CT 处理软件。

该技术资料处理、解释基本流程如下:①用激发点、接收点坐标、初至时等,形成观测系统文件和初始数据文件;②进行原始数据核查剔除异常值、数据平滑处理;③在网格化分单元中用最短路径法射线追踪计算射线路径,得到射线密度图和射线正交性图,以确定图上的可靠区域;④输入反演参数,用合适的迭代算法进行反演计算;⑤结合迭代误差

的结果,反复迭代计算;⑥最终选取合适的迭代次数得到的反演数据进行波速成像。

由于地震波速度与地层岩性间有较稳定相关性,且地震走时具有信噪比高,各种波走时规律相同等优点。通过层析波速图得到的地下岩层波速分布,可以推知地下岩层的孔隙率、饱和度、渗透率或其他地质异常分布等信息,从而有效地探测裂隙、断层破碎带、采空区、溶洞、人防工程及其他地质体。

### 3 应用实例 1

#### 3.1 工程概况

工区位于唐山市路北区(属中心城区),地势总体呈北高南低,高程为 14~32 m。已有地层资料表明,唐山市为第四系地层覆盖。市区地处燕山山前冲积平原的滦河中早期冲洪积扇的中部,其间零星散布一些剥蚀残丘。市区北部为低山丘陵区,南部为滨海平原区。

主要的工作目的是利用井间地震 CT 方法,对场地井控范围内的地层速度、岩性分布、构造分布进行预测研究。工作任务重点是查明和了解场地井控范围内是否存在第四系断裂带等。

剖面 1 由 D23 井到 D24 井,钻孔距为 13 m,孔深为 100 m;剖面 2 由 D1 井到 D11 井,两井孔距为 20 m,孔深为 100 m。另外,两个剖面的成像深度均为 0~96 m。

#### 3.2 测试方法

研究工区内,岩性一般为填土、砾石土、砂、粘土等,被水和上覆的风化破碎泥岩、或砾石土充填,呈现低速异常特征,速度在 800~1 500 m/s;稳定砂和粘土互层,呈现中高速特征,速度在 1 000~2 500 m/s;低速异常区周围完整的岩体一般呈现高速特征,速度在 2 500~4 200 m/s。波速特征明显,据此判断,该工区适合用井间地震 CT 技术进行评价。

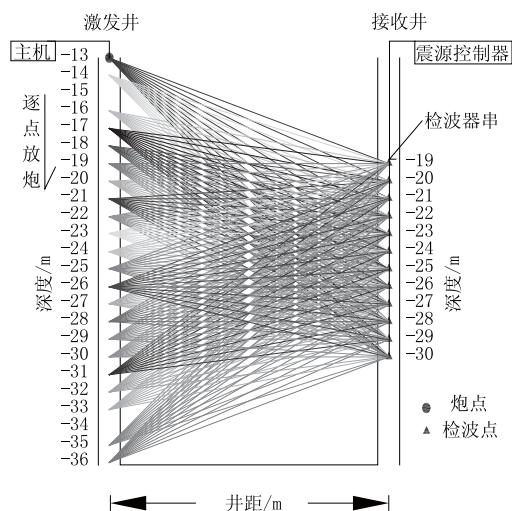


图 1 观测系统布置示意图

Fig.1 Diagram of observing system

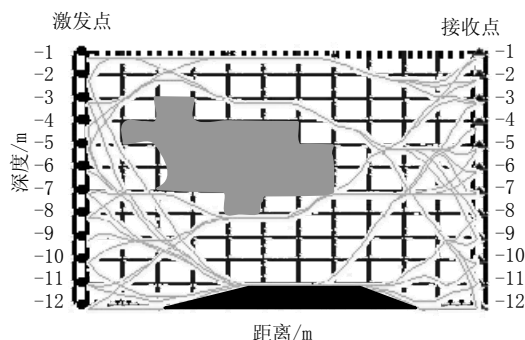


图 2 地震 CT 几何图形及射线分布

Fig.2 Seismic CT geometry and ray distribution

本次研究设计采用一井激发,另一井接收的井间成像方法。施工时,先将检波器串放入成像区最深处,按一定间距移动炮点放炮,再按一定间距提升检波器串,直至施工结束(图 1)。所采用的地震仪器为 SWS-5 多功能地震仪,震源为湘潭无线电厂生产的 XW5512A 型大功率单次击振的电火花振源;检波器为 CH3-R2 型 12 道加速度型水听检波器串;处理和解释软件为中国矿业大学研制的地震 CT 处理软件和成都理工大学研制的井间地震波 CT 软件等。

地震 CT 技术及软件有其自身的一些特点,例如,在某观测系统,建立地震 CT 模型,计算得到射线分布,如图 2 所示。存在“无射线覆盖区”,若在模型内部,视为目标体等(灰色区),若在模型上下边界,视为边界效应,不利于解释(黑色区)。因此在现场采集数据时,试验或布置观测系统时,必须努力克服经济顾虑,完善观测系统,减少边界上的“无射线覆盖区”,才能增加解释的有效性,增强方法的实用意义。

### 3.3 结果分析

通过对剖面 1 的采集、处理和解释,获得如图 3 所示的速度分布和地质剖面。由图可知,浅于 -10 m 的地表覆盖有人工填土,波速值比较低。填土以下大部分层段的波速值相对稳定地呈水平条带状渐变,认为第四系覆盖层厚度大,井探范围内基本为砂和粘土互层,未见基岩。在 -60~-96 m 的下井段,发现 1 处狭长的相对低速异常带,异常波速范围 800 m/s~1 500 m/s,具有低速断裂特征。预测上断点位于 -60 m,下断点可能向深部未探测区域延伸。在 -15~-55 m 井段范围内,其岩性为砂和粘土互层, -40~-44 m 段,是厚 4.1 m 的粗砂层。这一互层特征得到 D23 井 -6~-54.95 m 井段的测井资料验证,如图 3(a) 中所

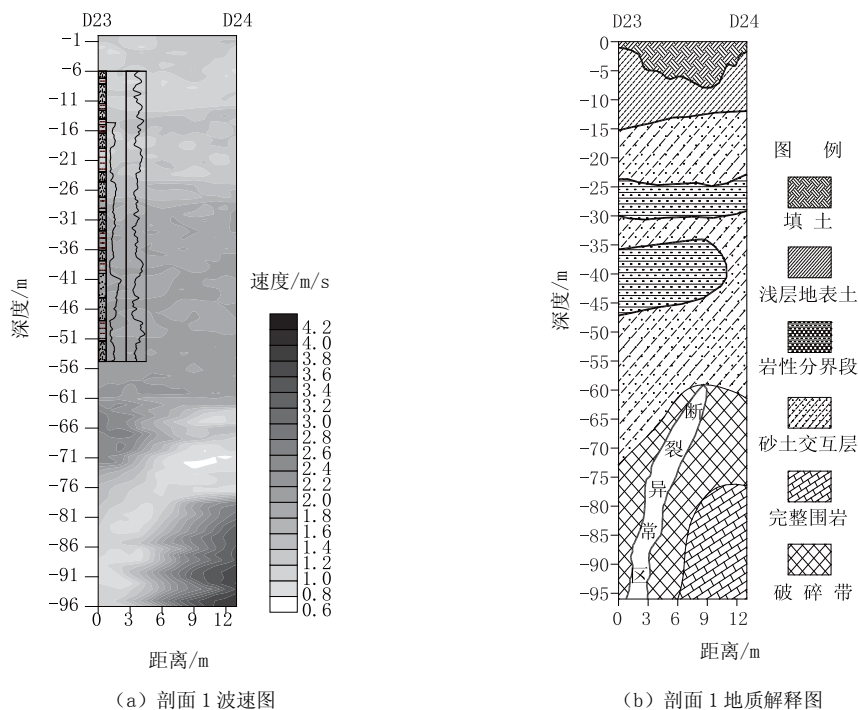


图 3 剖面 1 速度分布与地质解释

Fig.3 Velocity distribution and geological interpretation of section 1

示,其中包括测井解释岩性剖面、视电阻率(左、0~200  $\Omega\text{m}$ )和自然伽马(右、0~200 CPS)曲线。

通过对剖面 2 的采集、处理 and 解释,获得如图 4 所示的速度分布和地质剖面。由图可知,浅于-21 m 的地层表现为低速,结合地质学得出的岩性分析,划定为粉质粘土及细砂段。该地层以下大部分层段的波速值呈现相对稳定状态。几个较高波速值区域,与地质编录结果基本吻合,判断为稳定砂卵石层。从整个剖面上看地层速度渐变,探测区域的地层结构稳定。

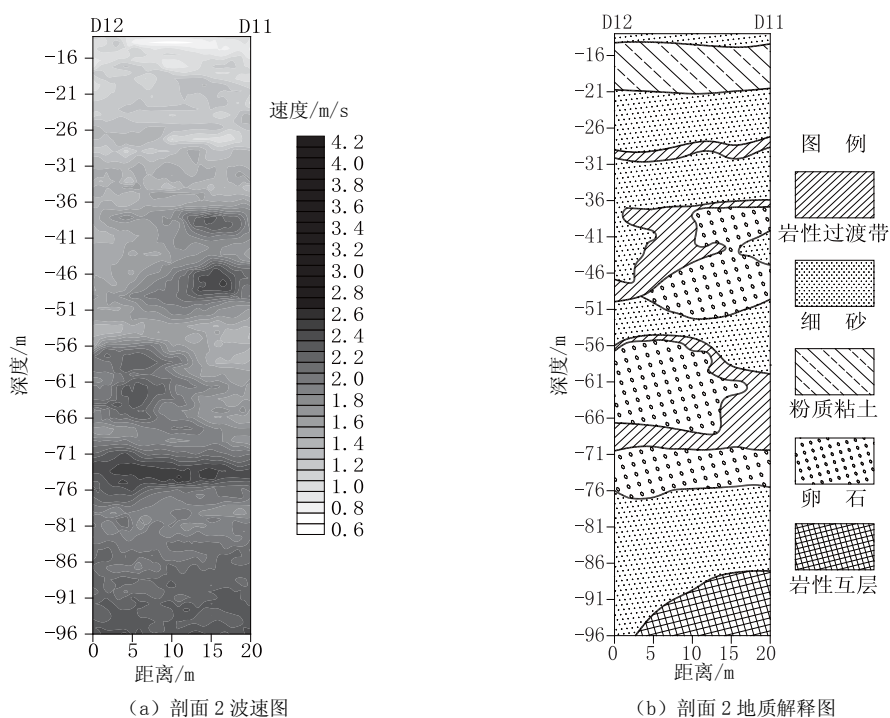


图 4 剖面 2 速度分布与地质解释

Fig.4 Velocity distribution and geological interpretation of section 2

## 4 应用实例 2

### 4.1 工程概况

工区位于唐山市某大厦拟建场地,为老采空区,也有以前的人防工程,区域地质构造资料显示,拟建场地缺失中生界地层。新生代以来,南部下沉,上新统-第四系向北地层超覆,伴随断裂活动,形成凹陷或突起构造。钻出的地质结构分层是上覆粘土,夹粉砂层,第四系覆盖层厚度变化总体趋势是北薄南厚,下覆基岩为紫红色到暗紫色粘土岩及粉砂岩,中间夹灰绿到紫色中粗粒

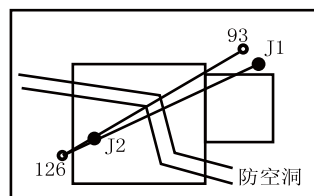


图 5 示例剖面井位示意图

Fig.5 Schematic diagram of well locations

砂岩。目的是查明场地井控范围内注浆前冒落带、破碎带等的分布范围及埋深范围，待注浆以后检测地基注浆效果与地层情况，为最终评估拟建场地对工程建筑的适宜性，为工程建筑的设计施工提交必备的基础地质资料。

采用三角形法布钻孔、注浆，检测时采用井间地震 CT 法与钻孔抽芯检测、压水试验点和面结合的模式，全面检测基础注浆效果。注浆施工前先利用已有钻孔在每栋楼及楼间进行 CT 检测，以取得注浆前的岩体波速影像图，待注浆完成后，再在原 CT 剖面的测试钻孔旁施工抽芯钻孔，分别进行压水试验和注浆后的 CT 测试。在注浆后的 CT 测试时至少要有 一条与原 CT 剖面大部分重合，以保证前后检测结果对比的有效性。注浆前为 24 个钻孔，注浆后则有 24 个孔，孔距范围 16~59 m，井深范围 60~75 m。

示例剖面 3 由注浆前的井 126 和井 93，剖面 3' 由注浆后的井 J2 和井 J1 构成，其相对位置见工作布置图 5，井参数和成像参数见表 1。

表 1 示例剖面井参数和成像参数  
Table 1 Sample wells' parameters and imaging parameters

剖面号	激发孔		接收孔		孔间距	成像范围	
	孔号	井深/m	孔号	井深/m		水平/m	纵向/m
3	126	70	93	70	38	0~38	13~70
3'	J2	77	J1	77	33	0~33	13~75

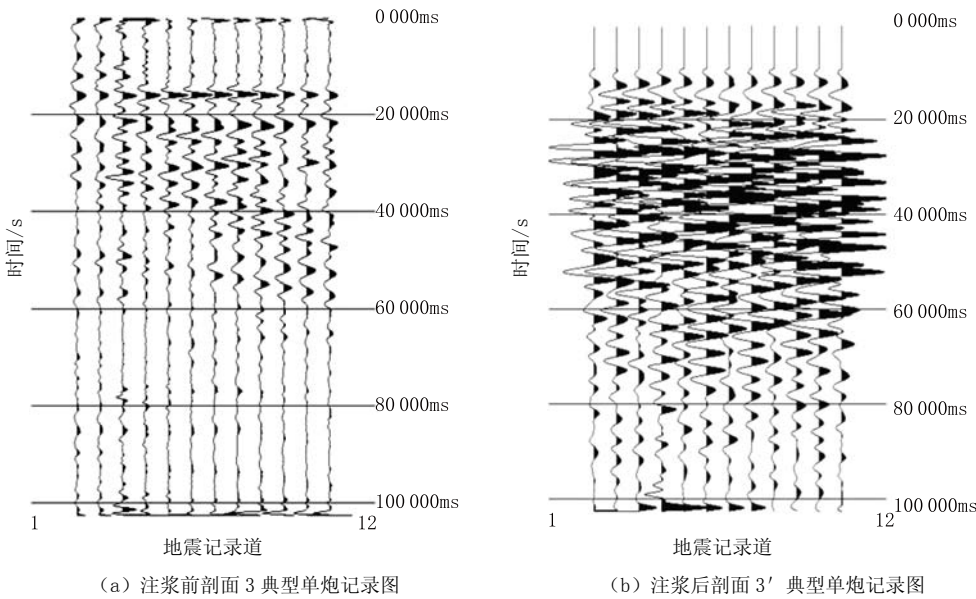


图 6 注浆前后典型单炮记录对比图  
Fig.6 Typical single shot record comparison between section 3 and section 3'

4.2 测试过程

在该工区内，存在地球物理特征差异，采空形成空洞或被水和上覆的风化破碎泥岩、或砾石土充填，弹性波速会有低速特征，完整的岩体一般呈现高速特征，符合地震 CT 方法



前提。测试方法与实例 1 类同。典型单炮记录如图 6 所示。反演过程的迭代误差曲线如图 7 所示。选取迭代误差在合适范围内的迭代次数对应的结果作为最终成像结果。

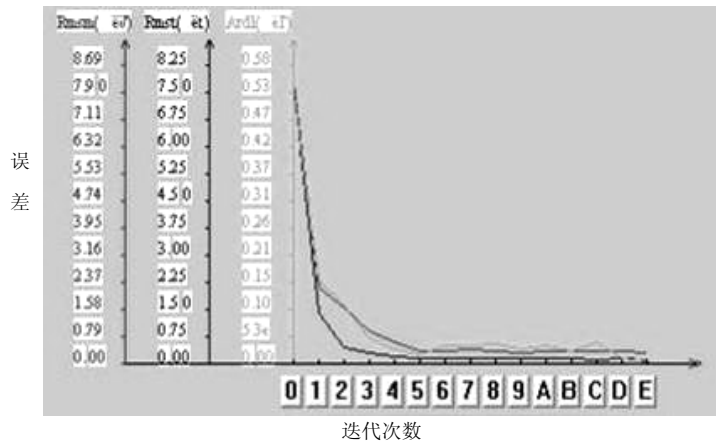


图 7 迭代误差与迭代次数关系图  
Fig.7 Relationship between errors and the number of iterations

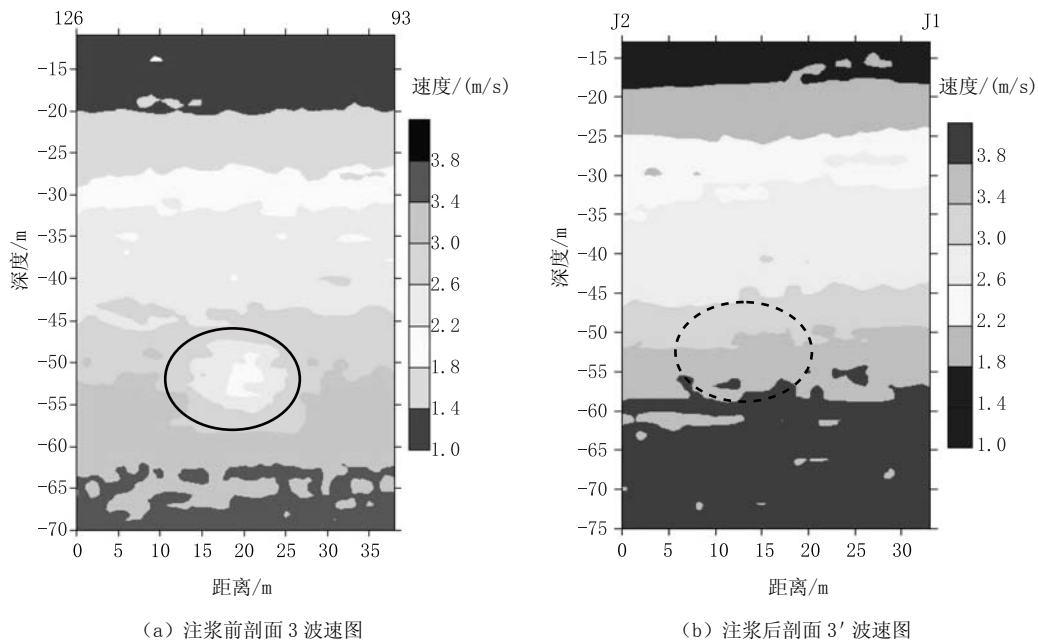


图 8 注浆前后剖面速度分布对比图  
Fig.8 Velocity comparison between section 3 and section 3'

4.3 结果分析

对灌浆前后的波速成像剖面进行分析对比（图 8（a）和（b））。  
由图 8（a）可见，注浆前图像清晰，地层结构明确，局部异常和地层走向、弹性波速度变化符合人防工程案例。图中 48~56 m 深度段，距 126 井 15~25 m 处有一处低速异常，

通常低速异常存在局部破碎带、裂隙、空洞的反映。经与相关部门沟通核实,该处原来确曾有一防空洞,后在建设施工时填埋,防空洞路线及位置见图 5。预测异常位置在地面的投影处打井,设计井深 60 m,进行注浆等异常修复。

总体来说,根据井间地震 CT 弹性波走时计算的地层平均速度,注浆后明显比注浆前提高了 10%~25% (即 200~500 m/s),可见注浆以后地基岩体更加完整,整体波速提高,地层注浆后更加稳固,说明注浆效果显著,异常区地层基础波速结构也得到改善,基本消除了局部可能由人防工程造成的低速异常。

## 5 结论

本文在地震 CT 基本理论的指导下,简述了地震 CT 技术原理;在有着成熟、可靠算法的软件环境下,利用跨孔成像法,对城市工程和环境地质领域的两个实例进行了应用性研究,得出以下结论:

(1) 本研究选用弯曲射线追踪法和 LSQR 算法,增加了激发方向的射线数,改善了边界上的“无射线覆盖区”,正确而有效地探测到井控范围内的断裂破碎带和掩埋防空洞,证明地震 CT 方法能对地层构造、介质速度等作出准确预测,并结合测井资料给出合理解释。

(2) 除了方法选用方面的影响外,井间地震 CT 的应用效果还受走时数据质量、缺炮导致的观测系统不完善、拖缆未到位、拾取初至不严谨、解释手段单一等影响。

总之,地震 CT 技术在城市环境地质调查和工程地质勘察中得到了良好的应用。该方法凭借成本低、工期短、效果好的技术优势,重建井-井之间的结构图像,直观地勾画出检测区岩性的空间分布和地层构造形态、异常目标区分布、范围和属性等;能快速、准确地完成工作目的,在大比例尺地质调查评价中较流行采用,也是城市工程和环境领域地球物理勘察的重要手段之一。

地震 CT 技术在国内外应用中,范围已经拓展到了几千米深的地下,目前国内的相关科研单位都争相对正反演的算法剖解推敲,以提高技术精度,而三维成像技术也以其立体、直观之长倍受青睐,值得进行更广泛深入的应用研究。

## 参考文献

- [1] 王振东. 我国水文工程环境(灾害)物探 50 年回顾[J]. 工程物探, 2000, (3).  
Wang ZD. Fifty years' review of hydrological, engineering and environmental(disaster) geophysical prospecting[J]. Engineering Geophysical Prospecting, 2000, (3).
- [2] 赵永贵, 王超凡, 陈燕民, 等. 地震 CT 及其地质解释[J]. 地质科学, 1997, 32(1): 98-99.  
Zhao YG, Wang CF, Chen YM, et al. Mining application of seismic tomography and its geological interpretation[J]. Chinese Journal of Geology, 1997, 32(1): 98-99.
- [3] 赵永贵, 李勤, 郭鸿, 等. 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 1): 1-2.  
Zhao YG, Li Q, Guo H, et al. New technology of seismic CT and its application in engineering geolpgy[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(S1): 1-2.
- [4] 刘杰, 段炜. 孔间层析成像正反演研究[M]//曾宪强, 毋光荣, 郭玉松. 水利水电工程物探技术应用与研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2010, 9: 87-91.  
Liu J, Duan W. Cross-hole computerized tomography forward and inversion research[M]//Zeng XQ, Wu GR, Guo YS. Water conservancy and hydropower engineering geophysical technology



- application and research. Zheng Zhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2010, 9: 87-91.
- [5] 李学军. 我国城市物探的应用与发展[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2222-2225.  
Li XJ. Applications and development of city geophysical prospecting in China[J]. Process in Geophysics, 2011, 26(6): 2222-2225.
- [6] 杨文采. 地球物理反演和地震层析成像[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-20.  
Yang WC. Geophysical inversion and seismic computerized tomography[M]. Beijing: Beijing Geological Press, 1989: 1-20.
- [7] 李天祺, 彭涛, 郭印. 井间地震层析成像技术在岩溶勘察中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, (6): 127-129.  
Li TQ, Peng T, Guo Y. Application of cross-hole seismic computerized tomography technology to karst caves survey[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, (6): 127-129.
- [8] 曹云勇. 地震 CT 技术在龙排冲隧道煤窑采空区勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(增刊 1): 161-162.  
Cao YY. The application of seismic CT technology in the exploration of coalfield mined-out area of Long-Pai-Chong tunnel[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(S1): 161-162.
- [9] 李红立, 潘东明, 徐红利. 井地地震 CT 技术及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(3): 71-72.  
Li HL, Pan DM, Xu HL. Well-Ground seismic CT technology and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(3): 71-72.
- [10] 中华人民共和国行业标准. CJJ7-2007, 城市工程地球物理探测规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 51-64.  
Industry standard of the People's Republic of China. CJJ7-2007, City engineering geophysical exploration specifications[S]. Beijing: China Building Bookshop, 2007: 51-64.
- [11] 中国地质调查局. DD2008-03 城市环境地质调查评价规范[S]. 北京: 中国地质调查局, 2008: 9-10.  
China geological survey. DD2008-03 City environmental geological survey evaluation specification[S]. Beijing: China Geological Survey, 2008: 9-10.
- [12] 杨文采, 李幼铭. 应用地震层析成像[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 3-9, 223-230.  
Yang WC, Li YM. Applied seismic tomography[M]. Beijing: Geological Press, 1993: 3-9, 223-230.
- [13] 丘斌煌. 基于射线理论的井间地震初至波旅行时层析成像研究[D]. 西安: 长安大学, 2007: 3, 20, 42.  
Qiu BH. The research of cross-hole seismic computerized tomography of primary wave traveling time based on the ray theory(in Chinese)[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007: 3, 20, 42.
- [14] 朱介寿. 地球物理层析成像技术在工程地质中的应用[R]. 成都理工大学, 1996: 5-8.  
Zhu JS. Application of geophysical tomography technology in engineering geology[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1996: 5-8.

## The Application of Seismic CT Technology in Urban Geological Survey

GUO Shu-jun<sup>1</sup>, HOU Yan-hua<sup>2</sup>, LI Hong-li<sup>3</sup>✉, LEI Ming<sup>1</sup>, LIU Wen-zeng<sup>1</sup>

1.Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, China;

2.China Power Investment International Mineral & Investment Co., Ltd., Beijing 100025, China;

3.China University of Mining and Technology, XuZhou 221000, China.

**Abstract:** In order to successfully apply seismic computerized tomography (CT), at first, the author used cross-hole imaging method to get the first break travel time data. Then, on the processing basis of curved ray-tracing forward modeling based on shortest path method and inversion technique based on LSQR algorithm, combined with well logging data interpretation, the author got the cross-hole wave velocity distribution maps. Thus, within the scope of well control, the stratum structure and the foundation grouting effect were studied. Also, the locations and distributions of fracture tectonic belt and people shelter were gotten. This result shows that when seismic CT is used in urban environmental geological survey and evaluation and shallow engineering geological investigation, it can solve the complexity of formation lithology and structure and accurately predict the target environment. Seismic CT plays an important role in urban environmental geology research and in the construction of infrastructure and has important significance to promote the development of urban geophysical prospecting technique.

**Key words:** cross-hole seismic CT; urban geophysical exploration; civil air defense projects; tectonic fracture



**作者简介:** 郭淑君 (1984—), 女, 硕士研究生, 毕业于长安大学, 现在中国地质调查局水文地质环境地质调查中心应用技术研究所工作, 主要从事水、工、环地球物理勘探方法应用及研究, TEL: 15720158203, Email: 279464376@qq.com; 李红立✉ (1979—), 男, 博士研究生, 毕业于中国矿业大学, 主要从事地球物理方法研究应用及软硬件开发, TEL: 13805216922, Email: 22723071@qq.com。