

直接推进钻探技术在污染场地调查中的应用进展

赵 龙^{1,2,3}, 韩占涛^{1,2}, 孔祥科^{1,2}, 黄爽兵^{1,2}, 李玉梅^{1,3}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 50061; 2. 河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 石家庄 050061; 3. 石家庄经济学院, 石家庄 050031)

摘要: 在污染场地调查中, 快速、准确地确定污染物的分布特征是调查工作的重点。作为新兴的污染场地调查技术, 直接推进钻探技术可以用来进行包气带和含水层土壤样品采集、地层渗透系数探测, 以及直接测定地层中污染物组成, 具有快速、准确、不引起交叉污染的优点。该文对直接推进钻探当前研究进展进行介绍, 并对技术改进方向进行叙述。

关键词: 直接推进钻探; 土壤及地下水; 污染调查; 薄膜界面探测; 激光诱导荧光; 渗透系数

中图分类号: X508; P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0107-04

Application of Direct Push Technology in the Investigation of Contaminated Site

ZHAO Long^{1,2,3}, HAN Zhantao^{1,2}, KONG Xiangke^{1,2}, HUANG Shuangbing^{1,2}, LI Yumei^{1,3}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, China;

2. Hebei Key Laboratory of Groundwater Remediation, Shijiazhuang 050061, China;

3. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Accurate and rapid determination of the distribution of contaminants is the main task for the investigation work of a contaminated site. As a new surveying tool for contaminated sites, direct push technology can be used for soil sample collection in the vadoze zone and aquifer, detection of aquifer parameters, and determination of pollutants. It has the advantages of fast, accurate, and free of cross contamination. In this paper, the development and research progress of direct push technology was introduced, and the technology innovation was discussed.

Key words: direct push; soil and groundwater; contamination investigation; membrane interface probe; laser induced fluorescence; hydraulic conductivity

1 研究背景

进入 21 世纪以来, 随着我国城市化进程的加快, 许多城市工业区外迁, 原有的工业区土地利用类型发生变更, 转变为居民用地或商业用地^[1]。工业生产造成各种土壤和地下水污染物可通过多种途径对周围的居民和动植物产生危害, 因此必须对此类污染场地进行调查和修复。

直接推进钻探技术(Direct Push Technology, DPT)作为一种新兴的场地调查技术, 以其快速、精确及节约资金等优点在发达国家污染场地调查中得到了广泛应用, 美国环保署(EPA)在 2005 年总结发布了直接推进技术应用指南, 详细介绍了利用直接推进技术进行土壤、土壤气体及地下水样品采集和监测的方法^[2], 以指导其在污染场地调查中的应用。

DPT 是通过贯入、推进和振动将内附取样的小直径的空心钢管直接压入地层, 实现对代表性的土壤、土壤气体及地下水样品的采集, 或携带特定探头对地下物理、化学情况进行探测的系列工具^[3]。

2 直接推进技术功能及应用现状

DPT 具有土层连续取样、土层渗透系数探测、半定量探测及识别场地污染物类型和污染层位、建立永久性或临时性监测井等功能。在过去 20 多年间^[4], 针对复杂的第四纪沉积地层, 人们基于直接推进平台开发了多种适合于不同场地的探测、取样钻头。例如, 对于砂相沉积地层, 可使用淤沙驱动头克服砂体流动, 降低探测、取样难度; 通过装备超级膨胀黏土驱动头及内杆驱动头, 可以解决黏土沉积层取样的困

收稿日期: 2013-06-22 修回日期: 2014-02-21 网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113102700)

作者简介: 赵 龙(1990), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生, 主要从事地下水污染修复研究。E-mail: zshaolong0123@yeah.net

通讯作者: 韩占涛(1977), 男, 河北晋州人, 副研究员, 博士, 主要从事地下水污染修复研究。E-mail: hanzhantao1997@163.com

难。在实际操作中可借鉴 EPA 的相关报告指南或 Geoprobe 及 AMS 公司的使用说明。

2.1 土层连续取样

土层连续取样是直接推进技术的主要功能(图 1)该取样方法取出的样品虽然在推进过程中受到了压缩,但是深度定位准确,并且由于不使用泥浆和水,避免了土样受到污染,这对于污染场地调查至关重要。因此,直接推进技术在我国污染场地调查中逐渐得到广泛应用。

笔者在沧州某污染场地应用 DPT 进行场地调查过程中,针对不同地层开发了不同的钻进和取样方法。该场地表层 0~3 m 为杂填土形成的不均匀堆积地层,下部主要为粉质黏土与粉土互层,并伴有粉砂、黏土夹层的自然沉积地层。在进行 DPT 钻进过程中,发现钻头可将大块的砖块,煤渣切成小块,顺利钻进取样;对于含有粉质黏土或黏土的地层,通过提高液压锤震荡频率,并采取内杆驱动头定深取样,可避免由于土体阻力造成的采样管崩裂问题,提高取芯率;对于粉砂、粉细砂地层中由于砂体流动导致提芯率不高(<40%)的问题,可通过添加提芯帽的方法提高提芯率。

以上是针对第四纪松散沉积地层采取的技术改进,而对于含有大块砾石的松散地层或岩层,目前的 DPT 技术还难以应用^[5]。

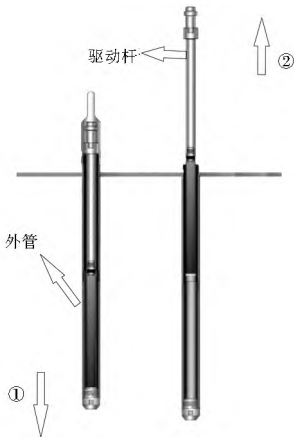


图 1 连续取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous sampling

2.2 渗透系数探测

渗透系数(K)的空间分布对于理解和预测地下水系统的溶质迁移转化具有重要作用^[6]。DPT 平台可以通过装配探测器实现对地层渗透系数测定。目前利用 DPT 对地层渗透系数进行原位探测包括两种方法,分为注水法和静力触探试验法(Cone Penetration Test, CPT)。

2.2.1 注入法

相比于传统抽水试验方法,注入法不用建井,对地层干扰小,定性得出高分辨率的垂向渗透系数。该方法是通过地表或驱动杆携带的传感器记录注水速率和注水诱导压力,使用相关公式估算出 K 值^[7]。但是,DPIL 仅能定性描述 K 值,而在同一土层进行 DPP 注水测试则可以将定性 DPIL K 值结果进行定量转化^[8]。

稳定注水条件下 K 值计算公式:

$$K_{DPIL} = \frac{Q\pi r^4}{P_{inj}\pi r^4 - 8QL\eta} \quad (1)$$

式中: P_{inj} 为传感器测量的压力与水柱高度压力之和; r 为套管的半径; L 为压力传感器与筛管之间的距离; Q 为流量; η 为注入液体的动态黏滞度。

$$\text{非稳定流: } K_{DPIL} = \frac{Q}{P_{inj} - mQ^2 - Qb} \quad (2)$$

式中: m 、 b 为参数,可通过不同的流量与压力值得测。

Lessoff 等^[9]和 Vienken 等^[10]在德国 Lauswiesen 试验场,使用注水法获得了高度非均质地层的渗透系数。Liu 等^[11]在美国密西西比州哥伦比亚空军基地的 MADE(Macrodispersion Experiment) 试验场使用此技术也获得了高分辨率的垂向渗透系数。但对于这些高度非均质地层,注入法 k 值探测限度仅为 10 m/d^[9],其一方面原因是注入引起的摩擦损失,通过压降测试方法对数据进行矫正,矫正后的渗透系数可提高 6 倍之多^[12-13]。笔者认为注入探测时需向井内注入大量水,这可能会导致监测井内水样受到污染。目前,科学家们正在研究通过瞬时改变钻孔内气压,然后监测气压的恢复来测定地层渗透率的技术。需要指出的是,通过气压法获得的渗透率需要转换为水的渗透系数,加大了计算的难度。但可预计该方法,可显著提高 K 值探测限度。

2.2.2 静力触探法

应用于原位探测的静力触探法,可结合其它地球物理探测技术,以更精确的方式计算地层渗透系数,其计算公式为^[14-15]:

$$k = \frac{K_D U \alpha \gamma_w}{4\sigma_{v0}} \quad K_D = \frac{1}{B_q Q_t}$$

式中: k 为渗透系数; γ_w 为水的容重; σ_{v0} 为初始垂向有效应力; U 为圆锥贯入率; a 为圆锥仪半径; K_D 为水力传导指数; B_q 为孔隙水压力比; Q_t 为顶尖阻力。

尽管触探法探测出的 k 值范围有限,但通过此技术可以获得高分辨率的垂向渗透系数^[16]。目前 CPT 技术发展主要涉及到两个方面,一方面是对原有的 CPT 探头进行改进以克服钻进过程中由于机器的原因导致结果偏差,同时增强该技术的探测能力,如 CPTu(CPT with Pore Pressure Dissipation Test)可以解决由于压缩作用,人为的造成渗透系数偏低问题;SCPT(CPT with Geophone)通过携带地震检波器,可增强 CPT 对污染物及地层岩芯的探测能力^[17]。Bennett, P 等^[18]和 Gloaguen E 等^[19]先后使用了 CPT 及 CPTu 技术,在原位进行渗透系数表征,均获得高分辨率的渗透系数。另一方面是对经验公式的改进,最早的一些研究人员是以钻头尖端角度为 90° 作为假设条件进行经验公式推算的,因此 60° 或其他角度的钻头尖端角度不适合该经验公式。Wang 等^[20]提出了新的计算方法,该方法对任何钻头尖端角度均适用,可更精确的对土壤渗透系数进行计算。

2.3 有机污染物探测

DPT 技术可以通过在钻头上安装探测仪,半定量探测地层中污染物的浓度。原位污染探测技术包括:激光诱导荧光技术(Laser Induced Fluorescence, LIF)和薄膜界面探测技术(Membrane Interface Probe, MIP)。

2.3.1 激光诱导荧光

LIF 包括激发源、探测系统两部分。激发源发射的紫外激光经过光纤线到达光纤探头,探头顶端的分子被激活并发

出荧光;探测系统根据收集到的不同荧光强度来探测污染物^[21,22]。LIF 技术可以探测的污染物包括:石油、木馏油、五氯苯酚以及其它能发出荧光的苯酚类^[23]。

LIF 进行污染场地探测案例已有报道。Lee 等^[24]在实验室使用人工配置的砂、粉土/黏土土柱、多环芳香烃(包括菲和芘)模拟污染场地,并使用激光诱导荧光(LIF)和最小二乘回归分析法(PLS)研究 LIF 数据与土壤特征之间关系,发现 LIF 对多环芳香烃探测结果与高效液相色谱法的测定结果具有高度相关性,而且 LIF 数据与多环芳香烃的荧光波长有关。尽管 LIF 能较准确半定量地识别有机物,但是 LIF 还存在以下缺点:不能探测出非水相液体(NAPL)存在的状态(自由相或残留相);只能对可以发出荧光的物质进行探测;探测信号容易受土层岩心变化、土壤含水量影响,导致污染物探测结果发生偏差。因此,研发 LIF 可搭载的探测器(如红外光谱仪)以增强对地层中污染物的探测能力,同时设计更精确的 LIF 校正方法(去除土壤物质组成及水分含量影响)是未来研究工作的重点。

2.3.2 薄膜界面探测

在直推技术钻机配备 MIP 可以实时的半定量地获取场地污染分布特征及范围^[25]。其原理见图 2。

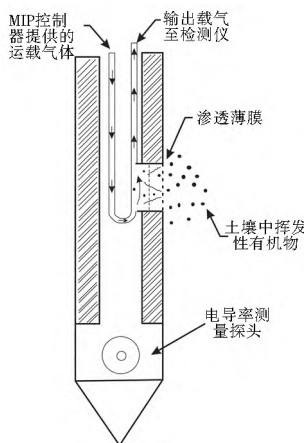


图 2 膜界面探测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of membrane interface probe

MIP 在国外应用已经比较广泛。例如,McAndrews 等^[26]在对怀俄明州空军基地、田纳西州机密安全生产场三氯乙烯污染羽的探测中使用了薄膜探测技术(MIP),发现相比于 DPT 取样技术,MIP 生成的数据可以更全面地了解地下情况,同时 MIP 可以减少土壤和地下水取样的数量。但是试验中发现 MIP 对于较低的污染物存在探测限制,需要进行辅助土壤及地下水室内样品分析。为了精确地了解 MIP 的探测限度及 MIP 系统的敏感性,Bronders 等^[27]使用携带不同配置探测器的 MIP 系统在场址及实验室进行试验性研究,结果表明 MIP 系统探测敏感性受污染物浓度及接触时间影响,对甲苯的探测限度分别为:FID 为 4 ppm、PID 为 10 ppm;对于脂肪族氯代烃(CAHs)的探测限度为:FID 为 10 ppm、PID 为 4~50 ppm。并提出了当配备 2 mL 取样环-毛细管柱和吹扫捕集系统-毛细管柱后可以提高检测精度。Jan Bumberger^[28]、Gerstner^[29]等进行原位实验时发现,MIP 探测信号有明显的重叠现象,Jan Bumberger 认为由

于输出管中挥发性有机物残留所致,并通过对比试验提出使用双探测器及连接可移动质谱仪,可解决信号重叠现象,他还指出使用加热型输出管,可更彻底的解决有机物残留问题。

MIP 可结合连续取样技术对研究区进行污染羽精确刻画,同时通过结合直推成井技术可进行污染物自然衰减及地下水有机污染修复监测^[30,32]。Huang W Y 等^[33]对台湾氯乙烯污染场地调查时,采用 MIP 结合直推钻进连续取样室内分析,对污染源范围进行圈定。Cooper E 等^[34]使用 MIP 结合直推成井及高精度探测技术,对北卡罗来纳州某污染场地进行调查,他指出高精度污染范围的获得,可使修复剂注入量减少了 40%,同时减少了 35% 的修复费用。

3 结论

直接推进钻探技术是污染场地调查的重要手段,具有钻机轻便、推进迅速、灵活方便、对地层干扰小等优点,可在场地进行土层连续取样,探测地层渗透系数,还可以半定量探测地层中的有机污染物。然而 DPT 技术也存在一些固有的缺点,直接推进所需的驱动力比传统回转钻进要大,钻进过程中会产生土层压缩,探测结果受污染物质浓度、土层岩性、土壤含水量等影响。另外当钻探深度较大时,钻杆与孔壁产生的摩擦力会形成巨大的阻力,因此直接推进的钻探深度较小,这在很大程度上限制了它各项功能的应用。

我国东部的东北平原、华北平原、长江中下游平原和珠江三角洲是我国最发达的经济带,也是主要的污染场地分布区。由于这些平原第四系地层厚度大,一些重金属和/或 DNAPL 污染物在长期的污染历史中可能通过优势通道渗透到较深的地层,DPT 钻进技术将很难有效完成该深度的探测工作。因此,在这类场地的调查中,需要将 DPT 技术与传统回转钻进技术相结合,才能完全刻画污染物的分布。

随着我国污染场地的披露,调查过程中 DPT 结合其它高精度探测技术,可节约成本并能精确刻画污染羽范围,对后续修复技术方案选择,提供有效的数据。但目前使用的 DPT 钻机均为进口,价格昂贵。随着我国对该类钻机需求量的增加,需要加大自主研发力度,发展较大功率、钻探深度较大、口径较大的 DPT 钻机。

参考文献(References):

- [1] 王万茂.土地利用规划学[M].中国大地出版社,2008.(WANG Warr mao. Land U se Planning[M]. China Land Press, 2008. (in Chinese))
- [2] Waste S. Groundwater Sampling and Monitoring with Direct Push Technologies[J]. 2005.
- [3] McCall W. Groundwater Monitoring Gets a Direct Push[J]. Environmental Protection, 2002, 13(8): 49.
- [4] Dietrich P, Leven C. Direct Push Technologies[M]. Groundwater Geophysics. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 347-366.
- [5] Brown Jr, Edmund G., Matt Rodriquez, Deborah Raphael. Guidelines for Planning and Implementing Groundwater Characterization of Contaminated Sites, 2012.
- [6] Barker J. High Resolution, Two-Dimensional Groundwater Flow Models Based on Direct Push Electrical Conductivity and Hydraulic Profiling Tool Logs[Z]. 2012.

- [7] Dietrich, Peter, James J. Butler, and Klaus Fai. A Rapid Method for Hydraulic Profiling in Unconsolidated Formations[J]. *Ground Water*, 2008, 46(2): 323-328.
- [8] 王晓丽, 郑春苗, 刘改胜, 等. 利用直接推进技术测定渗透系数的最新进展[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(1): 8-12. (WANG Xiaoli, ZHENG Chunmiao, LIU Gaisheng, et al. A Review of Recent Developments in Using Direct Push Technologies for Rapid, High Resolution Hydraulic Conductivity Measurements[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 8-12. (in Chinese))
- [9] Lessoff, Steven C. Spatial Characterization of the Hydraulic Conductivity Using Direct Push Injection Logging[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12).
- [10] Vienken, Thomas, Carsten Leven, and Peter Dietrich. Use of CPT and other Direct Push Methods for (Hydro) Stratigraphic Aquifer Characterization: A Field Study[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(2): 197-206.
- [11] LIU Gaisheng. A New Method for High Resolution Characterization of Hydraulic Conductivity[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(8).
- [12] Bohling, G. Geostatistical Simulation of Centimeter-Scale Hydraulic Conductivity Estimates from Direct Push Logging at the MADE Site[C]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2009: 1038.
- [13] LIU Gaisheng. Hydraulic Conductivity Profiling with Direct Push Methods[J]. *Grundwasser*, 2012, 17(1): 19-29.
- [14] Elsworth, Derek, and Dae Sung Lee. Permeability Determination from on the Fly Piezocone Sounding[J]. *Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, 2005, (5): 643-653.
- [15] CHAI Jinchun. Coefficient of Consolidation from Non-Standard Piezocone Dissipation Curves[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, (41): 13-22.
- [16] CAI Guojun, LIU Songyu, Anand J. Puppala. Predictions of Coefficient of Consolidation from CPTU Dissipation Tests in Quaternary Clays[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, (2): 337-350.
- [17] Robertson P K. Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, (6): 842-853.
- [18] Bennett P. Quantitative Integration of Surface Electrical Resistivity Data and Direct Push Soil Conductivity Data for High Resolution Imaging of the Subsurface[C]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2011: 6.
- [19] Gloaguen, Erwan. Inference of the Two Dimensional GPR Velocity Field Using Collocated Cokriging of Direct Push Permittivity and Conductivity Logs and GPR Profiles[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, (78): 94-101.
- [20] WANG Jur Peng. An Approach to Evaluate Hydraulic Conductivity of Soil Based on CPTU Test[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2013, 31(3): 242-253.
- [21] Kurup P U. Novel Technologies for Sniffing Soil and Ground[J]. *Current Science*, 2009, 97(8).
- [22] LI Bo. Measurements of NO Concentration in NH₅-Doped CH₄+ Air Flames Using Saturated Laser-Induced Fluorescence and Probe Sampling[J]. *Combustion and Flame*, 2013, (1): 40-46.
- [23] US Environmental Protection Agency. Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations[R]. EPA 542-R-04-017. USEPA, Washington, DC, USA. USEPA, 2004.
- [24] Lee, C. K. Partial Least Square Regression Method for the Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Soil Environment Using Laser Induced Fluorescence Spectroscopy[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, (1): 261-275.
- [25] Geoprobe Systems, Membrane Interface Probe (MIP) [EB/OL]. [Http://Geoprobe.com/](http://Geoprobe.com/), 2013.
- [26] McAndrews, Beth, Kim Heinze, and William DiGuseppi. Defining TCE Plume Source Areas Using the Membrane Interface Probe (MIP) [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2003, 12(6): 799-813.
- [27] Bronders, Jan. Application of the Membrane Interphase Probe (MIP): An Evaluation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(1): 74-82.
- [28] Bumberger, Jan. Carry-Over Effects of the Membrane Interface Probe[J]. *Ground Water*, 2012, (4): 578-584.
- [29] Gerstner, D. , T. Scheytt, C. Faelker. Investigation of Subsurface Contamination: Chances and Limitations of Direct Push Technologies[J]. *Altlasten Spektrum* 2006, (6): 316-330.
- [30] Palaia, Tom, Brant Smith, Richard W. Lewis. ISCO Performance Monitoring. In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation[Z]. Springer New York, 2011: 48-510.
- [31] Bica, I. Public Briefing on Timbre Project' s Test Sites' Knowledge Status[Z]. 2013.
- [32] Gastone, Francesca, and Rajandrea Sethi. Injection of Guar Gum Micro-Sized Zero-Valent Direct Push Field Study[Z]. 2013: 191-196.
- [33] Huang W Y, Kao C M, Cho W C, et al. Using Triad Approach to Manage Uncertain Decisions for A Chlorinated Ethane Contaminated Site in Taiwan[Z]. Gung Cheng Environ Tech Protection Corp. Ltd, 2010.
- [34] Cooper E. Utilizing High Resolution Site Characterization to Maximize Remediation Value in Groundwater and Soil Remediation[C]. 2014 NGWA Groundwater Summit. Ngwa, 2014.