

# 非开挖 HDD 在垃圾填埋场渗滤液导流 治理中的应用研究

刘伟胜<sup>1,2</sup>, 孙平贺<sup>1,2,3</sup>, 曹 函<sup>1,2,3</sup>, 张可能<sup>1,2</sup>, 张绍和<sup>1,2</sup>

(1.有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,湖南长沙 410083; 2.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙 410083; 3.美国亚利桑那州立大学,坦佩 85282)

**摘要:**非开挖 HDD 技术具有对环境干扰小、施工效率高等优点,被广泛应用于给排水、电力、通信、油气等领域的新管道敷设和既有管线修复中。本文结合英国某垃圾填埋场的渗滤液导流治理工程,分别从技术原理、工程背景、工艺过程、应用效果和改进措施等方面展开了论述。工程实践表明,HDD 技术可应用于垃圾填埋场渗滤液水平排放孔的施工中,并应根据现场地层条件和工艺参数对施工过程加以优化。由于填埋堆体含有大量金属废弃物,采用有线导向系统替换了无线电磁导向,可极大提高导向钻孔轨迹的定位精度。采用正向扩孔和管道敷设技术有助于降低阻力,提高敷设效果。对比运行结果显示,相对于传统的渗滤液竖井抽排模式,水平钻孔排放效率更高,成本投入也相对较低,但在设计施工中应充分考虑堆体非均质对施工过程的影响,降低施工风险。

**关键词:**水平定向钻进;非开挖;渗滤液;填埋场;环境治理

**中图分类号:**P634.7;X703 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0132-05

**Field Study on Horizontal Directional Drilling Technology in Diversion Governance of Landfill Leachate/LIU Wei-sheng<sup>1,2</sup>, SUN Ping-he<sup>1,2,3</sup>, CAO Han<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ke-neng<sup>1,2</sup>, ZHANG Shao-he<sup>1,2</sup>** (1.Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2.School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3.Arizona State University, Tempe 85282, USA)

**Abstract:** As one method of Trenchless, HDD technology is widely used in new pipeline laying and existing pipeline repair in the fields of water supply and drainage, electric power, communication, oil and gas associated with its advantages of low environmental interference and high construction efficiency. This paper presents the leachate diversion governance project of a landfill in the UK by HDD. Based on the technical principle, engineering background, process, application effect and improvement measures, some practices were achieved by the authors. Field practice indicates that HDD technology can be applied to the construction of horizontal discharge holes of landfill leachate, and the construction process should be optimized according to the site conditions and process parameters. Since the landfill contains a large amount of metal waste, the wireless electromagnetic guidance is replaced by a wired guiding system, which can greatly improve the positioning accuracy of the guiding drilling trajectory. The use of forward and over-reaming and pipe laying techniques helps to reduce drag and improve laying. The comparison operation results indicate that compared with the traditional leachate shaft drainage mode, the horizontal drilling efficiency is higher and the cost input is relatively lower. However, the impact of the heterogeneity of the pile on the construction process should be fully considered in the design and construction to reduce construction risks.

**Key words:** horizontal directional drilling; trenchless; leachate; landfill; environmental governance

## 0 引言

垃圾填埋具有成本低、处置简单、分类要求低、二次污染小等优点,被包括中国在内的世界各国普遍采用。然而,随着时间和环境变化,填埋体内部会

收稿日期:2018-07-25

**基金项目:**国家自然科学基金项目“细观和宏观下离子稳定剂对煤层气钻孔的化学与力学护壁机理研究”(编号:41602372);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放基金项目“煤层气储层保护离子固结钻井液技术研究”(编号:DET201612);“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室(西南石油大学)资助项目“湘中页岩气孔内原位探测及钻井液关键技术研究”(编号:PLN201609);国家留学基金访问学者项目“智能钻进与非开挖水平定向钻进关键系统集成”(编号:201706375018)

**作者简介:**刘伟胜,男,汉族,1996年生,硕士研究生在读,地质工程专业,weishengliu@163.com。

**通信作者:**孙平贺,男,汉族,1982年生,副教授、硕士生导师,地质工程专业,博士,主要从事深部岩土钻掘及非开挖工程学的教学与科研工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学校本部地学楼100室,pinghesun@csu.edu.cn。

产生大量渗滤液,其 pH 值一般为 4~9, COD 为 2000~60000 mg/L, 重金属浓度与市政污水含有的重金属浓度基本相当,且化学需氧量极高,是一种化学成分复杂、高浓度、有毒的有机废水<sup>[1-2]</sup>。目前常用的物理、化学、生物、土地等方法均需要将渗滤液通过预先埋设的分层管网从填埋体中导流后处理。在实际运行过程中,导流管网常出现结垢现象,垢体在没有及时处置后会逐渐累积,导致管网发生堵塞,影响渗滤液正常导流排放,如图 1 所示。



图 1 国内某垃圾填埋体及结垢物

导流管网出现堵塞后,一般可采用各种物理、化学、机械方法进行管道清洗,对于清洗无效的管道,可通过非开挖重新布管或修复的方式实现渗滤液的有效排放。非开挖水平定向钻进技术(Horizontal Directional Drilling, HDD)是一种被广泛应用于给排水、电力、通信、油气等领域的新管道敷设和既有管线修复中的技术<sup>[3-5]</sup>。目前我国主要应用于市政和油气管道建设中,在垃圾填埋场渗滤液导流治理中未见报道。本文根据 HDD 技术在英国雷纳姆垃圾填埋场的工程实践,结合技术原理、工程背景、工艺过程、应用效果和改进措施等内容展开论述,希望对国内类似工程的环境治理提供参考。

## 1 技术原理

HDD 技术通过导向钻机、孔内导向钻头和地表

监测设备实现设计轨迹的钻进成孔,然后利用扩孔钻头实现分级扩孔至设计直径,最后实施管道回拉敷设。导向阶段主要利用导向钻机在入口处开始导向钻进,通过监测和控制手段使钻孔按设计轨迹钻进,并从另一端钻出地表,完成导向孔的施工(如图 2 所示)。导向钻进法钻孔轨迹监测一般采用地面步行式导航仪,信号采用无线方式进行传递。扩孔方法主要包括回拉回转扩孔、正向回转扩孔和反拉切割扩孔 3 种基本工艺方法,常用的扩孔方法是回拉回转扩孔法(如图 3 所示)。一般根据管道的材质、直径、铺管长度以及扩孔状况和设备情况可以采用不同的铺管方法,如回拉法、顶入法和拉顶结合法 3 种<sup>[6]</sup>。

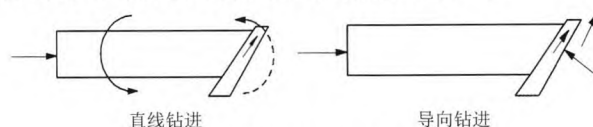


图 2 导向钻进成孔原理

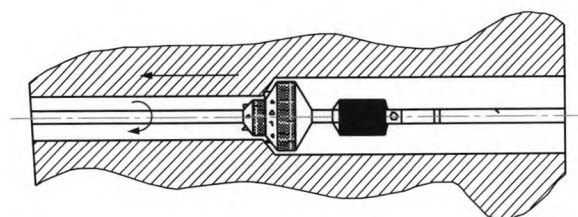


图 3 回拉扩孔过程

## 2 工程背景

雷纳姆垃圾填埋场位于英格兰埃塞克斯泰晤士河北岸,面积约为 150 公顷(1 公顷=10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,下同)的垃圾填埋场大部分直接建立在河岸边的沼泽地上(如图 4 所示)。该垃圾填埋场建于 19 世纪中期,20 世纪 40 年代至 70 年代初期,大量现在被归类为有害固体和液体的工业废弃物同生活垃圾共同进行填埋处理。而近 40 年来,随着环保标准的提高与实施,该填埋场主要处理城市生活固体废弃物和无害工业废弃物。雷纳姆垃圾填埋场的底部为冲积粘土层、淤泥质土层和砂砾层,其中粘土层平均厚度达到 10 m,为填埋场提供了良好的天然垫层,具有较高的隔水性能<sup>[7-8]</sup>。该填埋场渗滤液主要通过竖井进行抽采(如图 5 所示),以达到管理部门对渗滤液在堆体内高度的控制要求<sup>[9]</sup>。但随着运行时间的延长,堆体的渗透率变小,使竖井的抽排能力受到限制,因此,需要考虑其它技术方法进行抽排,布设水平钻孔便是方案之一。

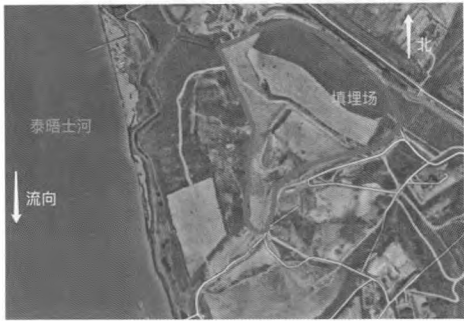


图 4 工程位置图

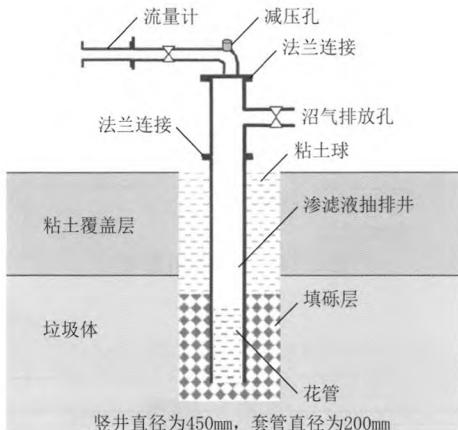


图 5 竖井结构示意图

现场勘察资料表明, 填埋场堆体的 25%~75% 由粘土、粉状物质和大颗粒废弃物的分解残余组成, 且废弃物填埋的年代越久远, 可确定的材料比例就越低。通过对现场开展 15 m 深的槽探, 确定场地具有大量水平层理、低渗透性的覆盖层, 覆盖层可有效降低垂直方向的渗透率, 但对水平方向的渗透率影响不大。废弃物的含水量变化很大, 同深度的关联性不大。一般而言, 如果压力随深度增加并且废弃物基本饱和, 则废弃物孔隙度和含水量可能随着深度而降低。然而, 毛细、蒸发的综合影响可以改变这一趋势。理论上渗滤液的不饱和区和饱和区之间没有明确的界限, 但勘察结果显示, 相对干燥的废弃物位于底层, 而相对湿润的废弃物则位于堆体的上部。堆体密度  $\rho$  的变化很大 ( $0.42 \sim 1.52 \text{ t/m}^3$ ), 主要是由于废弃物自身的非均匀性造成的。对密度  $\rho$  与深度  $z$  进行了拟合, 拟合结果显示, 二者的相关度较低, 相关性系数仅为 0.33。由于堆体内的人工设施较为清晰, 且废弃物中无较大体积障碍物, 因此采用 HDD 技术作为水平成孔方式具有可行性。

3 工艺过程

3.1 试验孔施工

为了保证水平钻孔的顺利实施, 技术人员首先在 10 m 的位置施工了直径为 150 mm 的水平试验孔, 相关设备和工艺参数如表 1 所示。施工中, 首先从深度为 10.3 m 位置开孔, 并以  $26^\circ$  的倾角向下钻进 4 m, 然后以较小的弧度向上偏移 2.5 m 后转向水平, 水平部分的长度应为 40 m, 全程采用地表导向仪进行跟踪定位。导向孔施工至 50 m 处遇到了坚硬障碍物, 为了避开障碍, 调整钻头角度使其向上偏转, 此后在 80~90 m 之间再次遇到了障碍物, 钻头成功绕开后正常钻进。导向孔施工耗费 4 h 后顺利完钻, 在轨迹校验中发现, 局部位置深度偏差  $\pm 0.25 \text{ m}$ , 说明废弃物中的金属物质对导向仪电磁信号的影响较大, 考虑在正式施工时采用有线导向的方式。

表 1 试验钻孔工艺参数

| 参 数     | 指 标                             |
|---------|---------------------------------|
| 钻机最大回拖力 | 120 kN                          |
| 钻机最大扭矩  | $4.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ |
| 钻孔目标长度  | 100 m                           |
| 最大的钻孔深度 | 10 m                            |
| 钻孔方法    | 回拉扩孔                            |
| 导向钻头    | 75 mm 的斜掌面                      |
| 钻杆直径    | 55 mm                           |
| 扩孔钻头    | 250 mm 板式                       |
| 钻井液     | 可降解的聚合物                         |
| 管道材料    | 低碳钢                             |
| 管道外径    | 150 mm                          |
| 管道长度    | 105 m                           |
| 扩孔级配    | 1.50%                           |

同时, 在导向孔施工中, 入土端并未有钻井液反排, 说明钻井液在压力作用下已经完全渗入到堆体中, 进一步验证了堆体不均质的多孔结构体系。导向钻头在堆体中的切削作用也收到材料的韧性影响, 如塑料、织物和金属等, 入土端几乎没有钻屑反排, 说明钻孔基本是利用钻具的挤压作用形成的<sup>[10]</sup>。扩孔首先采用  $\varnothing 150 \text{ mm}$  扩孔钻头实施, 尽管未遇到较大障碍物, 但钻机的回拖力和扭矩值非常高, 说明挤压后的钻孔发生了缩径变形, 进而增大了钻具同孔壁之间的回拉阻力。 $\varnothing 250 \text{ mm}$  扩孔施工是在第二天进行的, 而后开始敷设管道。当回拉管道至 25 m 左右时, 钻机的回拖力便达到极限值 120 kN, 技术人员只能放弃施工, 并从出土端拉出

管道,管道外侧出现多处较深的划痕,说明堆体内的废弃物对管道的阻力远远超过钻机的极限拉力。

3.2 水平孔的正式施工

根据现场的钻遇地层特点和试验钻孔施工情况,技术人员拟采用正向扩孔工艺,从而减少钻孔缩径的范围,提高扩孔的效率(如图 6、图 7 所示)。导向钻孔施工过程如前所述,不同的是采用有线导向系统替换了无线电磁导向仪,提高轨迹的定位精度。成孔后,将导向钻具置于水平孔内,然后将超径铣头钻具通过导向钻杆推入孔内,并进行正向回转扩孔。由于正式敷设管道的直径仅为 114 mm,因此采用边扩孔便推进的方式进行管道敷设,工艺参数如表 2 所示。由于导向钻杆的引导作用,使超径铣头钻具能够沿着设计轨迹进行钻进,并有效保证了成孔直径,减少了管道的推进阻力。钻进至设计位置后,将导向钻具和超径铣头从钻孔中拉出,完成管道敷设过程。

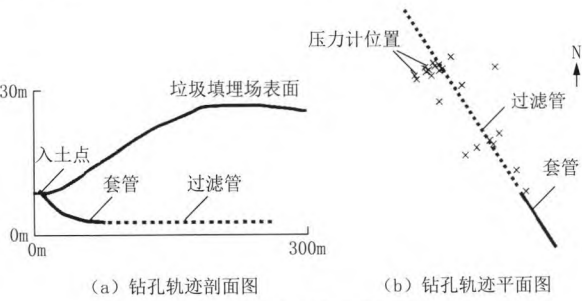


图 6 钻孔轨迹示意图

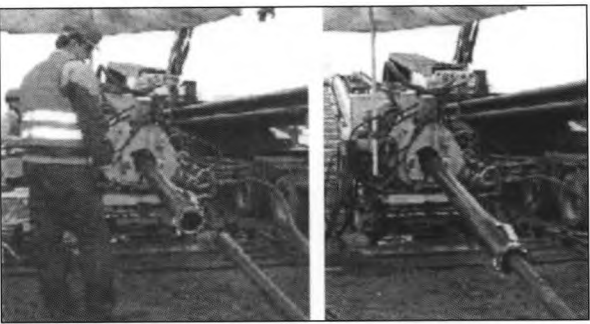


图 7 施工现场

技术人员采用该技术先后完成了 3 个渗滤液水平排放孔的施工,分别为 HW1、HW2 和 HW3(如图 8 所示),其中 HW1 位于填埋区域,HW2 和 HW3 位于封顶区域。钻进过程先后使用了聚合物钻井液和清水作为润滑和排出钻屑的流体介质,铣头安装了碳化钨切削齿作为主要的切削工具,提高了钻进效率。HW1 的施工周期为 6 天,而 HW2 和

表 2 正式钻进工艺参数

| 参 数     | 指 标       |
|---------|-----------|
| 钻机最大回拖力 | 1000 kN   |
| 钻机最大扭矩  | 45 kN·m   |
| 钻孔目标长度  | 250 m     |
| 最大的钻孔深度 | 30 m      |
| 钻孔方法    | 正向扩孔      |
| 导向方式    | 有线和跟踪导向系统 |
| 套管外径    | 150 mm    |
| 钻杆直径    | 55 mm     |
| 管道材料    | 不锈钢       |
| 管道外径    | 114 mm    |

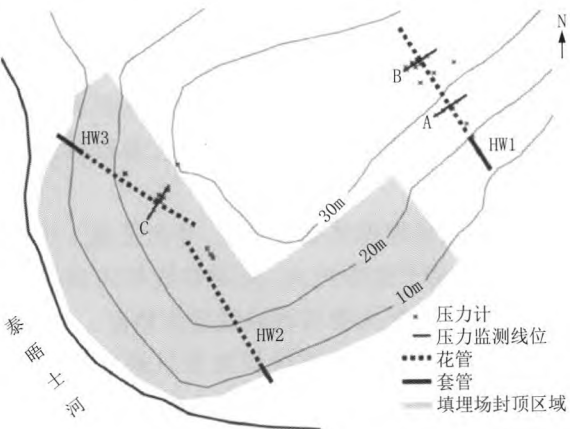


图 8 水平排放孔平面布置图

HW3 的周期仅为 3.5 天和 3 天,充分体现了 HDD 的技术优势。

4 对比应用效果

在 3 个水平排放孔竣工后,技术人员开展了为期 500~600 天的对比应用分析。对比结果表明,在填埋区域的垂直井群 1 中共有 6 口竖井,单井平均抽采渗滤液为 1.39 m<sup>3</sup>/d,此区域的 HW1 水平排放孔平均排放量为 7 m<sup>3</sup>/d,为竖井抽采量的 5 倍。在堆体的封顶区域,垂直井群 2 中共有 9 口竖井,单井平均抽采渗滤液为 0.49 m<sup>3</sup>/d,此区域的水平排放孔 HW2 和 HW3 平均排放量分别为 4.84 和 2.42 m<sup>3</sup>/d,同样远高于竖井的抽采量,说明水平排放孔能够很好降低堆体内的渗滤液,有效完成导流治理。周围布设的压力监测结果显示,水平排放孔周向 50~70 m 内均有明显的渗滤液压力降低,最大水头降低幅度为 8 m。结合敷设成本数据,不难发现,水平排放孔单位长度的成本为 335 欧元/m,折合人民币为 2700 元/m;而竖井的成本为 416 欧元/m,折合人民币为 3300 元/m,水平排放孔的成本投入更为

经济,这主要得益于 HDD 能够快速施工的技术优势(参见图 9)。

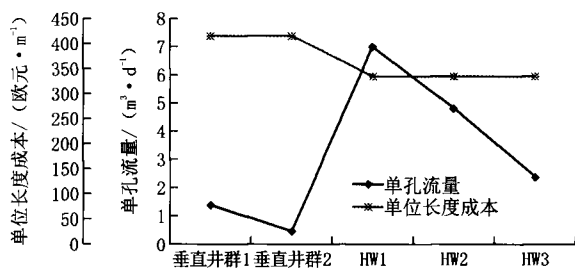


图9 应用效果对比

## 5 结论与展望

(1) HDD 技术具有环境干扰小、施工效率高等优点,可应用于垃圾填埋场渗滤液水平排放孔的施工中,并应根据现场地层条件和工艺参数对施工过程加以优化。

(2) 垃圾填埋堆体成分复杂,导向孔施工中的无线电磁信号受干扰程度大,采用有线导向系统替换了无线导向,可极大提高轨迹的定位精度。

(3) 正向扩孔和管道敷设技术可避免堆体钻孔缩径形成的“抱钻”现象,降低钻具和管道阻力,提高敷设效果。

(4) 相比于传统的渗滤液竖井抽排模式,水平钻孔排放效率更高,成本投入也相对较低,具有极大的推广意义。

(5) 由于 HDD 在垃圾填埋场渗滤液导流应用

实例较少,在设计施工中应充分考虑堆体非均质对施工过程的影响,降低施工风险。

## 参考文献:

- [1] 聂发辉,李文婷,刘占孟.垃圾渗滤液处理技术的研究进展[J]. 华东交通大学学报,2013,30(2):21-27.
- [2] 陈云敏,兰吉武,李育超,等.垃圾填埋场渗滤液水位壅高及工程控制[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):154-163.
- [3] 孙平贺,曹函,乌效鸣,等.水平定向钻进管道敷设地层响应实验分析[J].地质科技情报,2012,31(3):135-138.
- [4] 杨帆,邹玉亮,乌效鸣.基于力学计算的挤压式扩孔器钻进参数寻优[J].非开挖技术,2018,(2):9-13.
- [5] 胡远彪,王贵和,马孝春.非开挖施工技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] 孙平贺,曹函,张可能,等.非开挖水平定向钻进地表变形规律及防控技术研究[M].湖南长沙:中南大学出版社,2017.
- [7] Cox S E, Beaven R P, Powrie W, et al. Installation of Horizontal Wells in Landfilled Waste Using Directional Drilling[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7):869-878.
- [8] Milligan G W E, Norris P. Site-based research in pipe jacking—objectives, procedures and a case history[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1996, 11(95):3-24.
- [9] Beaven, R. P. The hydrogeological and geotechnical properties of household waste in relation to sustainable landfilling[D]. Queen Mary University of London, 2000.
- [10] Sun P, Tian M, Cao H, et al. Study on the mechanism of ENI action on preventing drilling fluid overflowing in HDD [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 94-102.