

水平定向钻进技术在排水领域的创新应用

袁冉青, 戚沁蕊

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401120)

摘要: 水平定向钻进技术(HDD技术)作为非开挖领域的核心技术之一,在DN300以下小管径工程中已形成较为成熟的应用体系。以某堰塞湖应急排水工程为实例,针对需DN1200管径的排水流量需求,创新性地提出DN600双管并排铺设的方案,通过双管并行实现大管等效流量,突破传统HDD技术在大管径场景的应用瓶颈。工程实践表明,该方案不仅满足排水流量要求,且具备技术可行性强、施工难度低、经济成本低等优势,为HDD技术在排水领域的应用提供了创新思路,为非开挖技术的扩展、优化提供了理论支撑与实践参考。

关键词: 水平定向钻进技术;双管;并排铺设;大管径;应急排水;非开挖技术

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0419-05

Innovative Application of Horizontal Directional Drilling Technology in Drainage Field

YUAN Ranqing, QI Qinhan

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The horizontal directional drilling (HDD) technology, as one of the core technologies in the trenchless field, has formed a mature application system for the small-diameter pipelines below DN300. Taking an emergency drainage project of a barrier lake as an example, to meet the drainage flow requirement equivalent to DN1200 pipe diameter, a DN600 dual-pipe parallel laying scheme is innovatively proposed. By achieving the equivalent flow of large pipes through dual-pipe parallelism, the application bottleneck of traditional HDD technology in large-pipe diameter scenarios is broken through. The engineering practice demonstrates that this scheme not only meets the drainage flow requirements, but also has the advantages including strong technical feasibility, low construction difficulty, and excellent cost-effectiveness, which provides the innovative ideas for the application of HDD technology in the field of drainage and offers the theoretical support and practical reference for the expansion and optimization of trenchless technology.

Keywords: horizontal directional drilling; dual-pipe; parallel laying; large pipe diameter; emergency drainage; trenchless technology

0 引言

随着城市化进程的加速,传统明挖法在管道施工中的局限性日益凸显。明开挖施工涉及大面积破拆地表,不仅会导致交通中断,还可能破坏现状地下管线,尤其在老旧城区、复杂地质条件下,施工成本与风险显著增加。在此背景下,非开挖技术凭借其“绿色、高效、低干扰”的优势快速发展,逐渐成为复杂建设条件下市政管道建设、修复的替代方案。

水平定向钻进技术(horizontal directional drilling machine, HDD)作为非开挖领域的核心技术之一,在20世纪70年代首次应用于管道铺设,在多年的发展

应用中,已从单一场景拓展至油气输送、市政管网等多领域。其核心原理是通过高精度导向系统精准控制钻头轨迹,与泥浆护壁协同控制,实现地下管线的曲线铺设,尤其适用于河流、公路、铁路等障碍物的穿越,该技术在DN300以下小管径给水管道工程中已形成较为成熟的应用体系。然而,传统HDD技术受到管径和回拖力制约,一般应用于管径DN1000以下的场景,而市政排水管道管径通常较大,大管径管道更多采用顶管法或盾构法进行施工。

该工程创新性采用双管并排铺设的技术方式,在不使用新型设备、大吨位钻机、多级扩孔工艺的情况下,解决传统HDD技术在大流量、大管径场景中难以应用的问题,不仅满足了排水流量需求,还节约了工程成本,做到技术可行、施工难度小、经济合理,实现了HDD技术在排水管道领域的创新性应用,为

收稿日期: 2025-05-23

作者简介: 袁冉青(1994—),女,学士,工程师,从事市政排水设计工作。

非开挖技术的扩展、优化提供了理论支撑与实践参考。

1 排水设计方案分析

1.1 工程概况

该项目位于重庆市某产业园北区,设计范围为该区域北二路北侧的堰塞湖应急排水工程。项目范围内存在现状冲沟,排水方向自西向东,由于项目东北侧相邻的1#地块已进行平场,平场标高约540 m,平场回填范围刚好位于现状冲沟下游,阻断了冲沟的原有排水出路,造成范围内形成两处堰塞湖,现状湖面标高约533 m,面积约51 600 m²。现北一路、北二路已进场准备施工,如不尽快将堰塞湖积水疏导排出,待道路形成后,积水将浸泡路基,对路基安全造成较大影响。

该项目考虑新建排水管道,将堰塞湖积水引导至下游冲沟排放,从而解决积水影响道路路基安全等问题。项目已于2024年6月顺利实施完工,经现场踏勘,原堰塞湖区域内积水已顺利疏导排放至下游,后期北一路、北二路完工后的路基不再有被浸泡的风险。

1.2 设计分析

本次设计拟新建排水管道,自西向东北铺设,起点设置八字式进水口接现状堰塞湖,终点排入现状冲沟;起点堰塞湖湖底标高528.4 m,设计管内底标高528.8 m,终点冲沟沟底标高526.5 m。根据现状地形规划的排水路径,排水管道会经过自然地形标高548.4 m的一座山头,按照管道坡度0.003推算,该山头处的管道标高约527.8 m、管道埋深将达到20 m,若进行传统管道明开挖施工,将远超过该项目的计划工程体量和经济成本。且开挖深度达到20m,将面临地质复杂、施工难、土石方扰动大、环境破坏大、管道受压大等挑战,开挖边坡的稳定性、安全性均需要进行专项论证。因此,项目组考虑采用非开挖施工方式进行管道建设。

经多方面对比,项目组选择顶管法和水平定向钻进技术2种非开挖工艺进行比较。

1.2.1 顶管法

顶管法是通过在地下推动预制管道实现管道铺设,其原理是利用顶进设备产生的推力克服管壁与土壤之间的摩擦,达到管道顶入土壤的目的。该方法通常由一个顶进工作井和一个接收井组成,管道从顶进井开始,被液压顶推设备逐段推进,直到到达

接收井。

顶管施工过程中需要工人钻进管道挖掘,因此适用于大口径管材,管径一般为DN800~DN4500。

1.2.2 水平定向钻进技术

水平定向钻进技术主要通过控制钻头的方向,实现高效且精准的管道铺设。首先进行导向孔的钻进施工;导向孔成型后,卸下导向钻头,换上反扩钻头及分动器,进行回拖扩孔作业,利用导向钻机回拉钻杆,逐步将导向孔扩大至设计孔径。扩孔作业完成后,将预先连接妥当的成品管逐段回拉入钻孔中,实现管道铺设。

整个施工过程可简单总结为:定向钻头向前钻孔—回拖扩孔—拖回管道—施工完成。

定向钻孔路径通常存在一定的弧度,因此管道材料需承受一定的变形弯曲,一般采用PE管,也可以用钢管。管径主要取决于钻头大小,一般不大于DN1000, DN300 以下的应用较多。

1.2.3 对比分析

定向钻井设备通常重量小,机动性强。到达现场时,可以简单地准备和定位施工。顶管顶进设备重量大,运到现场后,需要先挖工作坑,工作坑还需要支撑,需要做设备基础和背墙,再将顶进设备吊装入坑,安装调试,整个过程非常复杂。顶管的技术要求非常复杂,定向钻的技术要求一般低于顶管。

根据雨水量计算结果,该堰塞湖设计流量为1 697 L/s,需要DN1200的管径,从传统的顶管法和定向钻技术应用场景、管径进行比较,本次工程可选择顶管法。项目组进行多次现场踏勘,获知管线铺设位置均为自然山地、丘陵地形,该处地形地质条件、非开挖管段的长度定向钻法均可适用,仅存在的限制条件是管径太大,超过了定向钻技术的传统管径应用场景。考虑到顶管的施工难度与成本均远大于定向钻技术,项目组创新性的提出采用两条管道并排排水的理念,既满足了排水流量的要求,又能降低项目的技术难度和经济成本。

现针对水平定向钻DN600双管并排方案与顶管法单管DN1200方案进行技术经济比选分析(见表1),基于施工周期、占地空间、环境扰动、经济成本等核心维度进行量化对照。

本项目地质勘探显示管道施工区不存在卵石层。在堰塞湖应急抢险背景下,HDD双管方案可节省工期16天以上,在抢险工程中具有核心优势,在多个维度量化对照后,HDD双管方案凭借工期短、成

表 1 方案核心参数对比表

项目	HDD 方案(双管 DN600)	顶管法方案(单管 DN1200)
管道规格	2×DN600 HDPE 实壁管(SDR17)	1×DN1200 钢筋混凝土管
施工工艺	水平定向钻非开挖拖拉施工	机械顶管开挖进、出工作井+非开挖推进管道
坡度	0.012 靠钻孔轨迹控制	0.002 靠顶进形态控制
连接方式	热熔连接(现场熔接)	承插式(橡胶圈密封)

表 2 方案关键指标量化对照表

比选维度	HDD 方案(双管 DN600)	顶管法方案(单管 DN1200)	对比结论
施工周期	10~12 d;1.导向孔 1 d;2.扩孔 2 d(分 2 级);3.管道回拖 2 d(分 2 次);4.热熔连接 3 d(含检测)	28~35 d;1.工作井施工 14 d(深 20 m);2.顶进 125 m×0.8 d/10 m≈10 d;3.设备安装/拆除 5 d;4.注浆固结 3 d	HDD 节省 16 d 以上抢险中具有核心优势
占地空间	300 m ² ;仅需两端作业区(15 m×10 m×2 个)	800 m ² ;工作井 10 m×15 m;接收井 8 m×8 m;堆土场/设备区 500 m ²	HDD 节约 62.5% 可减少征地
环境扰动	扰动低:地表开挖少而浅;泥浆循环利用(废浆量≤300 m ³)	扰动显著:开挖进出工作井;开挖土方量≥1 500 m ³	HDD 较环保利于堰塞湖周围地质稳定
材料设备成本	约 120 万元:管材 2×125 m×800 元/m=20 万;HDD 施工:70 万(含泥浆处理);热熔设备/检测 30 万	约 180 万元:管材 125 m×2 200 元/ m=27.5 万;顶进施工 100 万(含井建);土方外运/降水 32.5 万;注浆加固 20 万	HDD 节约 33%(HDD 省去土方与井建)
地质适应性	受限条件:卵石层不适用;硬质岩层需改用岩钻机	优势条件:硬岩层使用岩石顶管机;流沙层需配合冻结法	顶管法适应更复杂地层
抢险时效性	单管完工后即可通水	需全线顶进完成才具备排水能力	HDD 支持分阶段应急

本低、扰动小三重优势成为优选方案。

最终,经对比分析,在管道穿越山头、埋深大于 12 m 的管段,项目组决定采用定向钻技术,并排铺设两根管道排放堰塞湖积水,管道管径为 DN600,长度约 125 m。

2 排水系统设计

2.1 雨水量计算

排水管道雨水量根据各管段所服务的面积,按最大流量逐段计算,采用满流管渠流量计算公式计算。

雨水设计流量公式:

$$Q = q \psi F$$

式中:Q 为雨水设计流量,L/s;q 为暴雨强度,L/(s·hm²),采用《关于发布重庆市暴雨强度修订公式及设计暴雨雨型的通知》(渝建〔2017〕443 号)中渝北暴雨强度公式计算; ψ 为综合径流系数,现状地形取 0.3;F 为汇水面积,分地块计算,hm²,本次汇水面积为 34.1 hm²。

$$q = \frac{1\,111(1 + 0.945 \lg P)}{(t + 9.713)^{0.561}}$$

式中:P 为暴雨重现期,临时排水 P 取 1 a;t 为设计降雨历时,min, $t=t_1+t_2$;t₁ 为地面集水时间,为 5 min;t₂ 为管渠内雨水流行时间,min,按计算确定。

雨水系统计算结果如表 3 所示。

表 3 雨水系统水力计算结果表

序号	计算管段	设计流量/(L·s ⁻¹)	管道内径/mm	坡度/%	流速 v/(m·s ⁻¹)	过流能力/(L·s ⁻¹)
1	Y-1 至 Y-4	1 697	DN1200	0.3	2.45	2 776
2	Y-4 至 Y-5	1 697	2×DN600	1.2	3.09	1 749

经计算本次设计管道需承担的雨水设计流量为 1 697 L/s,现对管段 Y-4 至 Y-5,单管排水、双管并排水的水力计算进行对比分析。

表 4 单管、双管水力计算对比分析表

方案	设计流量/(L·s ⁻¹)	管道内径/mm	坡度/%	流速 v/(m·s ⁻¹)	过流能力/(L·s ⁻¹)
单管排水	1 697	DN1200	0.2	2.00	2267
双管并排排水	1 697	DN600	1.2	3.09	874
		2×DN600	1.2	3.09	1748

由以上水力计算对比分析结果可知,雨水设计流量为 1 697 L/s;若采用 1 根管径为 DN1200 的管道,坡度取 0.002 时,管道的过流能力为 2 267 L/s,满足雨水排放需求;在适当加大管道坡度的情况下,坡度

取0.012时, DN600单管的过流能力为874 L/s, DN600双管并排时的总过流能力为1 748 L/s, 大于雨水设计流量1 697 L/s; 因此两根DN600的管道过流能力能满足雨水排放需求。

2.2 新建排水管道设计

本次设计新建排水管道, 起点设置八字式进水口接现状堰塞湖(设计管内底标高528.795 m, 现状堰塞湖底标高528.400 m), 先采用明开挖施工, 自西北向东南排放, 再采用水平定向钻施工, 自西南向东北排放, 最终设置八字式出水口排入现状冲沟(设计管内底标高526.500 m, 现状冲沟底标高526.500 m)。

新建明开挖段排水管道管径为DN1200, 坡度为0.003, 全长约265 m。明开挖段排水管道铺设后, 近期回填至管顶以上1.0m, 远期根据地块平场标高回填至标高540m。

新建水平定向钻段排水管道管径为DN600, 坡度为0.012, 全长约125 m, 考虑并排铺设两根管道共同排放雨水。排水总平面图详如图1所示。

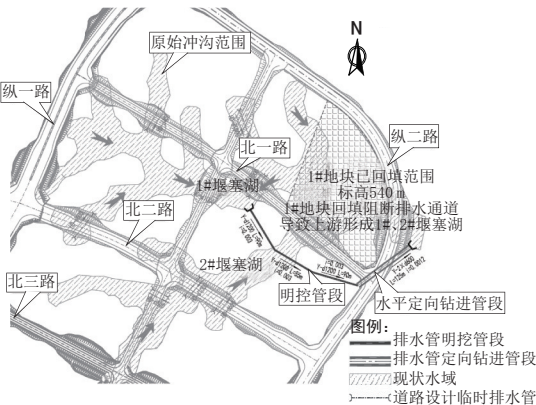


图1 排水总平面图

3 水平定向钻施工工艺

本项目Y-4~Y-5段采用水平定向钻施工方式, 施工应满足《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》及其他相关规定。

3.1 设计及施工总体要求

(1)拉管管材及做法

在水平定向钻非开挖施工中, 管材和连接方式的选择需满足抗弯曲、抗拉伸、耐腐蚀、密封性等核心要求。

资料显示, HDPE实壁管在HDD行业中市场占比较大, 现对HDD工程中行业通用的选型方案进行比较。

以上对比可知, 相比于钢管, HDPE实壁管在

表5 管材及连接方式特征分析

比选维度	HDPE实壁管+热熔连接	钢管+焊接
柔韧性	适应复杂曲线	需大曲率半径
耐腐蚀性	免维护	依赖涂层寿命
施工速度	快速熔接	焊接/检测耗时
综合成本	材料+维护成本低	防腐+焊接成本高
弯曲段可靠性	分子融合无弱点	焊缝易疲劳

HDD行业中的应用更具优势。

HDPE实壁管, 管材表面光滑, 摩擦系数低, 有利于在钻孔泥浆的润滑下更顺畅地回拖, 显著降低所需回拖力; 管材密度远低于金属或混凝土管, 重量轻, 减轻了施工强度, 也降低了回拖时的摩擦阻力。排水管道需长期深埋在复杂地质环境中, HDPE实壁管对广泛的酸、碱、盐等化学物质具有极强的惰性, 几乎不受电化学腐蚀, 耐腐蚀性高于金属管道, 这确保了管材长期使用的可靠性, 降低了后期的维护成本。

HDPE实壁管因其卓越的柔韧性、抗拉强度、耐腐蚀性、抗裂性能(SCG/RCP)、低摩擦系数和轻量化等特性, 能有效满足HDD苛刻的施工要求和长期排水的服役环境。

管材连接是确保整个非开挖排水管道系统成功实施和长期安全运行的关键环节, 热熔连接可以形成均质、连续的分子结构, 热熔接头继承了PE管材的优异性能, 包括出色的抗弯曲能力。在严格保证焊接工艺质量、进行有效检测并合理规划接头位置的情况下, 热熔连接在HDD弯曲段具有极高的可靠性, 其强度、密封性和长期耐久性与管道本体无异。

HDPE实壁管+热熔连接是HDD技术的优选组合, 其柔韧一体性和零泄漏密封非常匹配非开挖工艺的弯曲工况; 钢管一般在超大口径或高压场景中作为补充方案。

综合以上分析, 本项目拉管管材采用HDPE实壁管, 每节管道长度6 m, 施工时可根据拉管的具体长度进行调整。采用热熔连接, 连接需严格遵守熔接工艺标准, 严格按施工要求进行。

(2)工作坑、接收坑设计

水平定向钻施工工程, 应在现场布置适宜的工作区域, 并根据地形地貌、管线材质规格、管线覆土深度和地质条件设置起始工作坑和接收工作坑。工作坑、接收坑需设置在被铺设管线的中心线上, 并满足钻孔、拉管、导向距离等要求。

(3)先导孔轨迹设计

先导孔轨迹由斜线段、曲线段和水平直线段组成,其中水平直线段坡度与排水管坡度一致($i=0.012$),详见图 2。

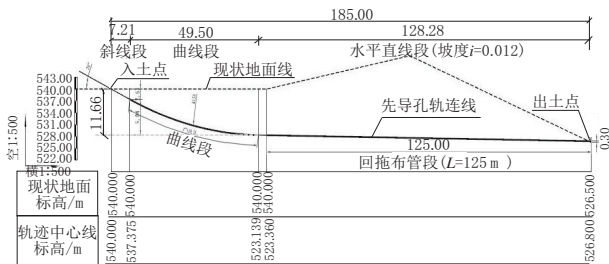


图 2 水平定向钻先导孔轨迹设计图

先导孔轨迹可根据实际施工工艺调整,入土角应为 $8^{\circ} \sim 30^{\circ}$,曲率半径不应小于 150 m。

(4)拉管施工

定向钻拉管施工前应进行管线复测和地质复勘。

导向施工前必须对现有管线进行坑探,必须掌握现有管道的准确位置及埋深。动力头、钻杆、导向钻头等导向孔钻具应根据钻孔长度、埋深和地质条件进行合理组合。导向孔按设计入土角钻入地层,沿设计线路钻进,如要调整导向轨迹,应进行测量。在导向孔钻进过程中,若遇振动、卡钻等异常,应立刻停钻,排查原因,待故障解除后再继续施工。

导向孔施工完成后,应根据待铺设管线的管径进行扩孔施工。根据待铺设管线的规格,分一次或几次逐级扩孔。扩孔完成后需进行清孔,清除扩孔后孔内的残留泥渣后,再进行管线铺设。

本次回拖布管终点为 Y-4 处,长度为 125 m。扩孔、清孔完成后,仔细检查已连接完成的管线长度、接口,都满足要求后,进行管线回拉铺设施工等。为防止管道外表面划伤,减小回拖力和对焊缝的拉应力,回拖管线时须用滚轮支架架起管线。管线回拉期间,宜进行匀速慢拉,拉力应按照设计要求,严格控制在和管材可承受的拉力范围内。

管道完全进入预定位置后,填充钻孔与管道之间的空隙。定向钻施工结束后,工作坑宜用原生土或者其他填埋材料填埋并且压实,恢复到施工前的使用功能。

3.2 设计要点及环境要求

(1)双管间距需 ≥ 1.5 倍管径,即 ≥ 0.9 m,避免管道之间相互干扰。

(2)导向孔钻进扩孔的直径应控制在设计管线直径的 1.2~1.5 倍,在满足施工要求的情况下尽量减小扩孔孔径。

(3)在导向孔钻进、扩孔及管道回拖过程中,应及时向孔内注入钻进液,钻进液粘度应根据地质情况随时调整,从而保证孔壁稳定,并起到将钻屑携带至地表的作用;拖管结束后,钻孔及管线外壁的间隙采取置换水泥浆加固,防止产生沉降。

3.3 施工技术要求

(1)根据岩土工程勘察报告定向钻主要是在岩层中穿越,定向钻机具的选择须考虑到有可能遇到坚硬障碍物的情况。

(2)施工过程中做好施工监测,若测量到沉降,需及时调整钻进速度。钻进开始后每小时测量 1 次,施工间歇时每 2 h 测量 1 次,当路基连续沉降,并在累计沉降量达到 15 mm 设置预警值,立即停止作业。

(3)导向孔钻进时,造斜段测量计算的频率为每 0.5~3 m,水平直线段测量计算可按 3~5 m 进行,钻进过程中,轨迹偏误需小于钻杆直径的 1.5 倍,若不满足,应退回原址进行纠偏。

(4)管线回拖前应检查已热熔连接完成的管线长度、接缝等质量,检查合格后方能进行拖管,若采用分段拖管敷设,段数不宜超过两段,接管时间应尽量缩短。

4 结 语

本文以堰塞湖应急排水工程为实例,通过对排水路径、现状地形、施工条件等对比分析,最终选定定向钻技术。传统 HDD 管径多局限于 DN1000 以下,在配合大吨位新型钻机、多级扩孔工艺等措施的情况下,HDD 管径可实现 DN1000 及以上的场景。而大吨位新型钻机租售成本高、能耗大、运输时间长;多级扩孔工艺施工时间长、成本高,在堰塞湖应急抢险背景下,难以运用到本项目。该工程在未使用新型设备、未采用多级扩孔工艺的情况下,本工程创新性的扩展技术边界:针对需 DN1200 管径的排水需求,采用双管并排铺设方案(2×DN600,坡度 0.012,全长 125 m),通过双管并行实现大管等效流量,突破传统定向钻技术在大管径场景的应用瓶颈。尽管 2×DN600 管径与 125 m 长度未达行业极限,但在小工程、低成本的应急抢险场景下仍能体现显著创新。这一创新不仅验证了定向钻技术在大管径排水场景的可行性,更拓展了其应用维度,为类似应急工程提供了“小管代大管”的技术参考示例,为堰塞湖抢险提供了中小管径 HDD 低成本的施工范例,进一步扩

(下转第 436 页)