

顶管施工技术在引水管道工程中的应用

朱永超¹ 李晓芳² 黄晓玲²

1. 义乌市水资源开发有限公司 浙江义乌 322000

2. 浙江农林大学暨阳学院 浙江义乌 322000

摘要: 随着城市化进程加速,传统明挖引水管道施工面临交通阻断、生态破坏及管线冲突等挑战。顶管技术作为非开挖施工的核心手段,通过液压系统将预制管节精准顶入地下,实现引水管道的高效铺设。在引水工程中,其应用不仅解决了传统施工的管线无序问题,更通过整合资源提升了供水系统可靠性。本文将系统剖析顶管技术、关键环节及创新实践,为引水管道建设提供技术参考。

关键词: 顶管施工技术; 引水管道工程; 应用

顶管技术通过非开挖方式铺设管道,减少地面开挖量90%以上,显著降低对城市交通、生态敏感区及既有设施的干扰。该技术可应对软土、砂砾、硬岩等多种地质条件。

一、顶管技术在引水管道工程中的应用背景与意义

1. 应用背景

城市化进程加速: 随着城市扩张,引水管道需穿越密集建筑区、交通枢纽及生态敏感区,传统开挖施工易导致交通中断、地面沉降及环境破坏,非开挖技术成为刚性需求。地质条件复杂化: 引水工程常穿越软土、砂砾、硬岩等多变地层,常规开挖易引发塌方或渗漏,顶管技术通过机械破岩与泥水平衡机制,显著提升地层适应性。工程效率与成本压力: 长距离引水管道需快速推进以缩短工期,顶管技术通过多设备同步作业实现高效施工,同时减少拆迁与土方处理成本。

2. 应用意义

环境效益突出: 减少地面开挖90%以上,避免对城市绿化、道路及地下管线的破坏,保护生态平衡。施工噪声与粉尘污染显著降低,符合城市可持续发展要求。技术优势显著: 适应复杂障碍物(如穿越高架、运河、轨道交通),通过导向系统控制精度误差在厘米级,保障管道安全。采用泥浆减阻技术,长距离顶进摩阻力降低40%,延长设备寿命^[1]。

二、顶管施工技术概述

1. 顶管技术的定义与分类

定义: 顶管技术是一种非开挖地下管道铺设施工方法,通过液压千斤顶将预制管节从工作井顶推至接收井,

利用工具管刀盘切削土体并排土,形成与管节匹配的地下通道。其核心在于“边顶进、边切削、边排土”的连续作业原则,适用于市政管线、引水管道等工程。分类: 按施工方式: 分为人工顶管、机械顶管(如泥水平衡法)和微型顶管(地箭式工法)。其中,微型顶管适用于DN600以下管道,具有精度高、占地小的特点。按地质适应性: 包括敞开式(适合软土)和密闭式(适合硬岩或高水压地层)。例如,在岩石地层中需改装刀盘结构以增强破岩能力。

2. 顶管施工的基本流程与步骤

前期准备: 进行地质勘察,分析土层分布、地下水位及岩石特性,以优化机头选型和管道设计。同时,确定工作井与接收井位置,其结构形式需根据地质条件选择,并做好支撑防护。设备安装与调试: 安装导轨(确保纵坡与管道设计坡度一致)、液压千斤顶(对称布置于管道中心线)及油泵(性能良好并与千斤顶匹配)。调试时需检查刀盘磨损、推力均匀性及激光定位精度。顶进作业: 遵循“先压后顶、随顶随注、及时补浆”原则,通过触变泥浆注浆减少管壁与土层摩擦阻力。顶进过程中,利用激光导向系统实时监测管道轴线偏差,并通过纠偏千斤顶校正轨迹。管道铺设与接口处理: 分段顶进管道,做好接口密封工作,确保防水性能。完成后进行管道高程检测、闭水试验及CCTV内部检查。

三、顶管施工技术在引水管道工程中的优势

1. 减少地面开挖,降低对周边环境的影响

顶管技术通过非开挖方式铺设管道,避免了传统明挖施工对地表的大规模破坏。在引水管道工程中,尤其

适用于穿越城市道路、河流、生态保护区等敏感区域，可有效减少土方开挖量，降低扬尘、噪音污染，保护周边植被和建筑结构。例如，在穿越城市主干道时，顶管技术可将施工对交通的干扰降至最低，同时避免因开挖导致的管线交叉冲突问题。

2. 适应复杂地质条件，提高施工安全性

顶管技术通过工具管刀盘切削土体，结合泥水平衡或土压平衡原理，可适应软土、砂砾、硬岩等多种地质条件。在引水管道工程中，若遇到地下水位高、土层松散或岩石硬度不均等情况，可通过调整机头结构（如增加刮刀、降低开口率）或采用密闭式顶管（如泥水平衡法）确保施工安全。

3. 施工效率高，缩短工程周期

顶管技术采用连续顶进作业，配合液压千斤顶组和螺旋输送机，可实现长距离、高效率的管道铺设。在引水管道工程中，尤其适用于长距离输水管道或需穿越多个障碍物的场景。例如，采用泥水平衡顶管技术时，可通过泥水循环系统实时排土，避免停机清渣，显著提升施工速度。同时，顶管技术可减少工序衔接时间，缩短整体工期。

4. 经济成本低，环境效益显著

顶管技术通过减少地面开挖和回填工程量，可降低土方工程、临时支护及交通疏解等成本。在引水管道工程中，若采用明挖施工，需额外投入大量资金用于道路修复、管线迁改及环境治理，而顶管技术可避免这些额外支出。此外，顶管技术减少了对周边生态环境的破坏，符合绿色施工理念，长期环境效益显著^[2]。

四、顶管施工技术在引水管道工程中的关键施工环节

1. 施工方案设计

地质条件适配性设计，根据地质勘察结果（如软土、砂砾、硬岩分布），选择顶管机类型（如泥水平衡法适用于高水位砂层，土压平衡法适用于黏土层）。针对岩石地层，需设计刀盘改装方案（如增加刮刀、降低开口率）以提升破岩能力。管线布局与障碍物规避，通过BIM技术模拟管道轴线，优化工作井与接收井位置，避开既有管线、地下构筑物等障碍物。设计曲线顶进路径时，需计算最小转弯半径（通常 \geq 管径的30倍）以避免管道应力集中。顶进参数精细化设定，顶进速度：软土层控制在50–100mm/min，硬岩层降至20–30mm/min以减少设备磨损。泥浆压力：按1.1–1.3倍静止土压力调节，防止

地面沉降或涌水。方案验证与调整，模拟推演：通过有限元分析预测顶进过程中土体变形，优化参数组合。试验验证：首节管顶进10米内加密监测（每0.5米复核一次），确认方案可行性后转入正常顶进。动态调整：根据实时监测数据（如顶力变化、地面沉降）调整注浆压力或顶进速度。

2. 工作井与接收井施工

支护工艺，钢板桩支护：选用拉森钢板桩，通过企口密扣形成围堰，插入深度需超过井底2–3m以防涌水。打桩时采用经纬仪双向控制垂直度，首块桩定位精度直接影响后续施工。沉井法：适用于圆形深井，分节预制、逐节下沉，同步浇筑井壁混凝土。下沉过程中需监测倾斜度，通过纠偏装置（如偏心压重）调整姿态。关键工序，导轨安装：钢质导轨需固定牢固，纵坡与管道设计坡度一致，安装后复测高程误差 $\leq \pm 5\text{mm}$ 。后座墙施工：采用钢筋混凝土结构，预埋顶铁支座，确保与主顶油缸轴线对齐。洞口止水：采用橡胶帘布板+钢压环组合密封，防止水土流失。质量控制要点，沉降控制：基坑开挖时实时监测周边建筑物沉降，预警值 $\leq 10\text{mm}$ 。安全防护：井口设置防护围栏，夜间作业配备警示照明。

3. 顶管顶进施工

顶进参数设定，顶进速度：软土层控制在50–100mm/min，硬岩层降至20–30mm/min以减少设备磨损。泥浆压力：按1.1–1.3倍静止土压力调节，防止地面沉降或涌水。轴线监测与纠偏，每顶进1m进行一次高程复核，坡度误差 $\leq 0.1\%$ 。激光导向系统实时监测轴线偏差，偏差 $\geq 20\text{mm}$ 时启动纠偏程序（如调整千斤顶行程或刀盘方向）。土体处理与排土，软土区采用螺旋输送机连续排土，硬岩区通过刀盘破碎后由泥水循环系统排出。高水位区域需保持泥水压力平衡土体压力，防止挖掘面坍塌。顶进后处理，接口密封，分段顶进管道时，接口采用橡胶止水带+钢压环密封，确保防水性能。泥浆置换，顶进结束后，用水泥砂浆置换触变泥浆，增强管周土体稳定性^[3]。

五、案例分析

位于浙江省义乌市江东街道，旨在将南山水库弃水引至南山坑水库，实现水资源高效利用并提升其应急供水能力。工程采用岩石顶管施工铺设DN2400钢管，管道总长1200米，纵坡4.13‰，属缓坡长洞型调水工程。

1. 存在的问题

（1）施工管理层面，进度把控不足：施工计划时间

预估不精准,未充分预估山体岩石硬度及复杂情况,设备材料及配件准备不足,需临时采购导致更换维修延误。例如,维修因配件到货中断;顶管刀头磨损严重,平均顶进40米需1天更换5把,耗时过长。安全管理疏漏:涉及有限空间、动火及吊装等关键工序,部分作业未严格按审批方案执行,虽经管理矫正仍偶有发生。(2)技术执行层面,有限空间作业通风系统设计缺陷:由于工程管道长度较大,随着顶进作业持续推进,需连接的各类管道(如供水管、通风管等)持续增加。在设备停机维护期间,原通风软管因密封性差且易老化破损,施工单位被迫采用临时水管替代通风,需反复拆卸与鼓风机连接,导致施工效率显著降低。机头排水装置效能不足:机头位置位于管道前端最低点,导致施工过程中积水自然沉积于该区域。当工人需进入机头进行检修时,必须先行完成排水作业,这一额外步骤大幅延长了停机维修时间,影响整体施工进度。施工方案实施性欠缺:部分方案制定时未充分结合现场地质条件与环境因素,导致可操作性不足。例如,在污水处理池施工中,未充分考虑地形影响,将池体设置在低洼易涝区域,雨季时面临严重积水风险,最终不得不进行方案调整与工程变更,造成额外成本支出。(3)安全质量层面,安全管理体系存在漏洞,施工单位安全管理制度执行流于形式,部分人员安全意识薄弱,存在违规作业行为。现场安全防护设施设置不完善,安全检查与隐患排查工作浮于表面,未能及时发现并整改潜在风险。例如:有限空间作业:日常检查发现,作业审批流程缺失、通风设备未及时启用、监护人员缺位、空气质量检测未执行等问题频发。动火作业:审批手续不规范,监护人员未到岗,乙炔等易燃气瓶随意放置,未按规定进行隔离与固定。吊装作业:司索工未到位即盲目指挥吊装,导致吊装过程存在失控风险。质量控制措施执行不严,质量检验制度落实到位,部分工序未经验收即转入下一环节,影响整体施工质量。原材料进场检验把关不严,个别批次材料与设计要求存在偏差。例如:首批钢管验收:未按设计要求核对壁厚,导致部分钢管壁厚不达标,影响结构强度与耐久性。混凝土浇筑:未严格执行配比要求,部分标号混凝土强度不满足设计要求,存在质量隐患。

2. 后续工程意见建议

(1) 合理制定施工计划,综合考量各类因素,运用

科学方法估算工期,并预留弹性时间以应对突发状况。建立进度动态监控机制,定期检查分析施工进度,及时调整安排,确保关键工序工期不受影响。(2) 设计阶段,需结合工程实际,合理规划泥浆水沉淀池位置与容量,并配套加装泥浆水净化设备。(3) 在硬岩石顶管工程中,优化刀头刀盘材料,采用高硬度耐磨合金(如9Cr18MoV或M390钢材),提升抗冲击和耐磨性能;重新设计刀头分布布局,增加滚刀密度以均匀受力,减少局部磨损。通过材料强化和布局优化,显著降低顶进过程中的刀头更换频率,延长设备使用寿命,同时提高施工效率。(4) 加强顶管设备各类部件的储备。针对工程后期因机械疲劳频发故障、关键部件无现场备件、依赖厂家发货延误维修的问题,需系统性提升备件储备能力,确保故障及时响应,避免工程中断。(5) 改进有限空间作业通风管,针对软管磨损破洞导致密封性不足、通风效果差的问题,建议改用单独密封钢管实现24小时连续通风;原采用进水管通风需排空积水并更换接头,工序繁琐耗时,钢管方案可显著提升效率。(6) 建议在机头前端/侧面设置观察窗,实时监测岩体硬度、空洞裂隙及地下水;同步严格执行安全制度,加大违规处罚,完善防护设施并定期维检,建立隐患台账闭环整改。(7) 优化施工监测与安全管理体系,通过机头侦查窗实现顶进过程外部环境动态观测;同步强化安全制度执行,加大违规追责,确保防护设施完好,落实隐患排查-台账-整改闭环管理。

综上所述,顶管施工技术在引水管道工程中展现出显著的技术优势和经济价值,尤其适用于复杂地质条件和城市敏感区域。通过优化施工方案、强化过程控制及创新技术应用,可进一步提升引水管道建设的效率与可靠性。未来,随着智能化、模块化技术的发展,顶管技术将在引水工程中发挥更大作用。

参考文献

- [1] 李玲. 顶管施工技术在长距离水利管道工程中的应用研究[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 47(7): 138-140.
- [2] 姚云. 市政工程施工中顶管施工技术分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(12): 104-105.
- [3] 肖敏. 基于复杂环境管线迁改项目的顶管法施工技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2024(3): 89-91. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2024.03.029.