

泥水平衡顶管机在砂砾石地层中的适应性分析

张 本

云南省水利水电勘测设计院有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：砂砾石地层因颗粒松散、渗透性强、承载能力不均等特性，给顶管施工带来诸多挑战。本文以滇中引水二期配套工程玉溪段红塔干线研和水厂分干线顶管工程为背景，针对工程所处的第四系冲积层砂砾石地层特点，系统分析泥水平衡顶管机在该类地层中的适应性。从顶管机核心结构适配性、施工参数优化、泥浆系统调控、施工风险防控等方面展开研究，结合工程具体计算数据与施工实践成果，验证泥水平衡顶管机在砂砾石地层中应用的可行性与可靠性，并提出针对性的优化措施。研究成果可为类似砂砾石地层顶管工程的设备选型与施工技术优化提供参考，对提升水利工程顶管施工质量与效率具有重要意义。

【关键词】：泥水平衡顶管机；砂砾石地层；适应性分析；滇中引水工程；施工优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.090

1 引言

滇中引水工程是云南省的重大战略性水利基础设施，也是国家重大水利建设工程，二期工程是在滇中引水一期总干渠工程的基础上，向受水区进行水资源配置的供水干线工程，线路不可避免需穿越市区、铁路、高速公路等敏感区域。为减少施工对周边环境、交通及居民生活的干扰，顶管技术因其对地表扰动小、拆迁量少、施工效率高的优势，成为滇中引水工程穿越复杂区域的首选施工方式。泥水平衡顶管机通过向掌子面注入泥浆形成泥膜，平衡地下水压力与土压力，同时利用泥浆携带渣土排出，适用于多种复杂地层。本文结合滇中引水二期配套工程玉溪段的具体地质条件与施工实践，深入分析泥水平衡顶管机在砂砾石地层中的适应性，重点探讨设备结构改造、施工参数调控、泥浆性能优化等关键技术，为同类工程提供技术支持。

2 工程背景与砂砾石地层特性分析

2.1 工程概况

滇中引水二期配套工程玉溪段红塔干线研和水厂分干线顶管段，起点位于玉溪市红塔区红龙路与玉河路交叉口，管线大致自东向西布置，依次穿越科普知识文化主题公园、玉溪大河、玉溪一中附近区域、“大河三期”项目施工道路、老昆玉河铁路、西河路及汇溪路，最终至唐旗小区附近结束。顶管段覆土厚度为8~19m，除与昆磨高速交叉段采用 $\phi 3000\text{mm}$ 钢筋混凝土管外，其余段均采用材质为Q355C、管径1800mm、壁厚24mm的钢管。沿线共布置9个工作井和9个接收井，均采用沉井方式，平均深度19m，工作井与接收井间距为64m~985m。

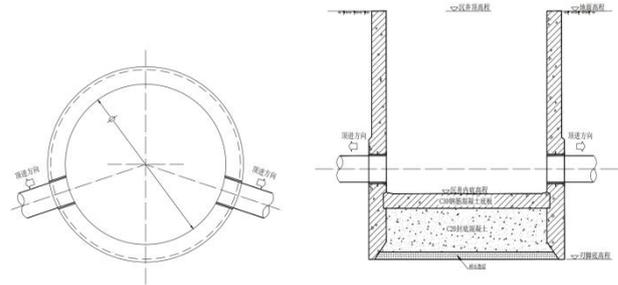


图1 工作井下部平面示意图 图2 工作井剖面示意图

2.2 砂砾石地层核心特性

根据工程地质勘察报告，顶管线路所涉砂砾石地层主要为第四系冲洪积层，其核心特性如下。

(1) 颗粒级配不均：砂砾石颗粒粒径范围较广，从几毫米的砂粒到数厘米的砾石均有分布，局部夹杂少量卵砾石，颗粒分选性差，导致地层孔隙率差异较大，渗透系数高达 $10^{-2} \sim 10^{-1}\text{cm/s}$ ，地下水渗透能力强。(2) 力学性质不稳定：地层整体呈中密状态，但局部因颗粒排列差异存在松散区域，抗剪强度较低，内摩擦角一般为 $22^\circ \sim 30^\circ$ ，粘聚力极小，掌子面易失稳坍塌。同时，地层承载能力不均，易导致顶管机姿态偏移、管道沉降。(3) 地下水影响显著：管线基本位于地下水位以下，砂砾石地层的高渗透性使得地下水易快速涌入施工区域，形成涌水涌砂风险，不仅影响施工安全，还可能导致周边地面沉降。(4) 对设备磨损严重：砂砾石颗粒硬度较高，在顶管施工过程中，易对顶管机刀盘、刀具、螺旋输送机核心部件造成严重磨损，影响设备使用寿命与施工效率。

3 泥水平衡顶管机工作原理与核心适配性分析

3.1 泥水平衡顶管机工作原理

泥水平衡顶管机通过泥浆输送系统向顶管机密封舱内注

入特制泥浆,泥浆在掌子面形成一层致密的泥膜,利用泥膜的支撑作用平衡地下水压力与土压力,防止掌子面坍塌。同时,顶管机刀盘旋转切削地层土体,切削后的渣土与泥浆混合形成泥砂混合物,通过吸泥泵与管道将其排出至地面处理系统。该机型的核心优势在于通过泥浆压力的精准调控实现掌子面稳定,适用于地下水位高、渗透性强的复杂地层,与本工程砂砾石地层的施工需求高度契合。

3.2 核心结构与砂砾石地层适配性分析

(1) 刀盘系统适配性:刀盘是顶管机切削地层的核心部件,其结构设计直接影响切削效率与设备磨损。针对本工程砂砾石地层颗粒硬度高、粒径大的特点,选用了面板式刀盘,刀盘开口率控制在30%~35%。开口率过大易导致大粒径砾石进入密封舱,造成设备卡阻;开口率过小则会影响渣土排出效率。同时,刀盘上配备了耐磨合金刀具,其中中心刀采用锥形耐磨刀头,适用于切削中粗砂与小粒径砾石;周边刀采用宽幅耐磨刮刀,增强对刀盘边缘的保护;此外,在刀盘面板上增设了耐磨合金条,进一步提升刀盘抗磨损能力。施工实践表明,该刀盘系统可有效切削粒径 $\leq 30\text{cm}$ 的砂砾石,对于更大粒径的卵砾石,通过刀盘旋转挤压使其破碎或挤入泥浆循环系统排出,未出现刀盘卡阻或严重磨损问题,切削效率稳定在5~10cm/min,满足工程施工进度要求。

(2) 密封系统适配性:砂砾石地层高渗透性与地下水压力大的特点,对顶管机密封系统提出了严格要求。本工程选用的泥水平衡顶管机采用多重密封结构,包括主密封、副密封及应急密封。主密封采用唇形密封圈,材质为耐磨耐油橡胶,可有效阻挡泥浆与细小砂粒进入驱动系统;副密封采用填料密封,进一步增强密封效果;应急密封在主密封与副密封失效时启用,通过注入密封胶形成临时密封屏障,防止地下水与渣土大量涌入。同时,在密封系统设置了压力监测装置与润滑系统,实时监测密封腔压力,当压力异常时及时报警;润滑系统定期向密封面注入润滑脂,减少密封件与旋转部件的摩擦磨损,延长密封件使用寿命。施工过程中,密封系统运行稳定,未出现渗漏问题,确保了顶管机内部设备的正常运行。

(3) 泥浆循环系统适配性:泥浆循环系统是泥水平衡顶管机稳定掌子面、携带渣土的核心系统,其适配性直接影响施工安全与效率。针对本工程砂砾石地层孔隙率大、渗透性强的特点,泥浆循环系统主要进行了以下适配设计:一是采用大流量泥浆泵,型号为3PNL,流量为150m³/h,扬程为50m,确保泥浆能快速填充掌子面孔隙,形成稳定泥膜;二是在泥浆输送管道上设置了过滤装置,过滤精度为2mm,防止大粒径砾石进入管道造成堵塞;三是配备了泥浆处理系统,包括沉淀池、分离器及压滤机,将排出的泥砂混合物进行分离处理,分离后

的泥浆可循环利用,渣土则进行外运处理。

(4) 驱动系统适配性:砂砾石地层切削阻力大的特点,要求顶管机驱动系统具备足够的输出扭矩与功率。本工程选用的泥水平衡顶管机采用液压驱动系统,配备了4台液压马达,总输出扭矩为800kN·m,功率为220kW。驱动系统采用变量泵控制,可根据切削阻力的变化实时调整输出扭矩与转速,当遇到大粒径砾石等切削阻力较大的情况时,自动增大扭矩,确保刀盘正常旋转切削;当切削阻力较小时,降低扭矩与转速,节约能耗。同时,驱动系统设置了过载保护装置,当负载超过额定值的110%时,系统自动停机并报警,防止设备因过载损坏。施工过程中,驱动系统动力充足,可有效应对砂砾石地层的切削阻力,未出现过载停机问题,保障了施工连续性。

4 施工参数优化与适应性验证

4.1 核心施工参数确定依据

泥水平衡顶管机在砂砾石地层中的施工参数需结合地层特性、设备性能及工程要求综合确定。本工程主要依据《给排水工程顶管技术规程》(CECS246-2008)、工程地质勘察报告及顶管机设备说明书,通过理论计算与现场试顶相结合的方式,优化确定顶进速度、泥浆性能、顶力等核心施工参数。

4.2 关键施工参数优化

(1) 顶进速度优化:顶进速度过快易导致掌子面泥膜未形成稳定即被破坏,引发坍塌与涌水涌砂风险;顶进速度过慢则会降低施工效率,增加施工成本。结合本工程砂砾石地层特性,通过试顶确定顶进速度控制范围为5~10cm/min。当穿越中密砂砾石层时,顶进速度取5~7cm/min,确保泥浆有足够时间填充孔隙形成泥膜;当穿越含砾粘土层等切削阻力较小的地层时,顶进速度可提升至8~10cm/min,提高施工效率。(2) 泥浆性能优化:泥浆性能是保证掌子面稳定的关键,针对本工程砂砾石地层,泥浆主要选用膨润土为基材,添加纯碱、CMC(羧甲基纤维素钠)及聚丙烯酰胺等外加剂,优化后的泥浆性能指标如下:比重为1.05~1.15,粘度为20~25s(马氏漏斗粘度),含砂率 $\leq 3\%$,静切力为1~2Pa。该性能的泥浆具有良好的流动性与护壁性能,可快速填充砂砾石孔隙,形成致密泥膜,同时能有效携带切削后的渣土排出。施工过程中,根据地层渗透性实时调整泥浆性能,当穿越渗透性较强的砂砾石层时,适当提高泥浆比重至1.10~1.15,增加泥浆粘度至23~25s;当穿越含砾粘土层时,适当降低泥浆比重至1.05~1.10,粘度至20~22s,避免泥浆过度粘稠造成管道堵塞。(3) 顶力控制优化:顶力是顶管施工的重要参数,过大的顶力易导致管道损坏、工作井后背土体失稳;过小的顶力则无法推动管道前进。本工程根据《给排水工程顶管技术规程》

(CECS246-2008), 采用以下公式估算总顶力:

$$P = \pi D L f + F_1$$

式中: P 为总顶力标准值 (kN); D 为管道外径 (m), 钢管外径为 1.844m; L 为管道设计顶进长度 (m); f 为管道外壁与土的平均摩阻力 (kN/m²), 结合砂砾石地层特性取 12kN/m²; F_1 为顶管机的迎面阻力 (kN), 对于泥水平衡式顶管机, $F_1 = \pi D_1^2 / 4 \times (\gamma h + P_w)$, 其中 D_1 为顶管机外径 (m), 取 1.86m; γ 为土的重度 (kN/m³), 取 20kN/m³; h 为顶管覆土层厚度 (m), 取 8~19m; P_w 为地下水压力 (kN/m²), 取 150~280kN/m²。通过计算, 本工程钢管顶管段总顶力范围为 5266~69106kN, 结合试顶结果, 顶力控制在计算值的 1.0~1.2 倍范围内。当顶力超过计算值的 1.2 倍时, 及时停止顶进, 排查原因, 通过调整泥浆性能、清理管道周边土体等方式降低顶力, 避免管道损坏。

4.3 适应性验证结果

结合本工程施工实践, 施工过程中, 通过优化泥浆性能与顶进速度, 掌子面始终保持稳定, 未出现坍塌、涌水涌砂问题。周边地面沉降量控制在 30mm 以内, 满足《给排水工程顶管技术规程》(CECS246-2008) 中地面沉降允许值要求。顶管机平均日顶进长度为 12~15m, 月顶进长度为 360~450m, 相较于传统顶管设备在砂砾石地层中的施工效率提升了 30% 以上, 确保了工程工期目标的实现。施工完成后, 对顶管机刀盘、刀具等核心部件进行检查, 磨损量均在允许范围内。其中刀盘面板磨损量为 2~3mm, 刀具磨损量为 5~8mm, 未出现严重磨损问题, 设备使用寿命符合预期。顶管完成后, 对管道轴线偏差与竖向变形进行检测, 轴线偏差最大为 15mm, 竖向变形最大为 35mm, 均满足规范要求 (轴线偏差 ≤ 20mm, 竖向变形 ≤ 54mm, 即管径的 3%)。管道强度与稳定性验算结果显示, 钢管管壁最大组合折算应力为 180N/mm², 小于钢材强度设计值 295N/mm², 满足强度要求; 管道稳定系数为 2.2, 大于设计值 2.0, 满足稳定要求。

5 施工风险防控与适应性提升措施

5.1 主要施工风险识别

泥水平衡顶管机在砂砾石地层中施工, 主要面临以下风

险: 一是掌子面坍塌与涌水涌砂风险, 因地层渗透性强, 泥浆膜易破损; 二是管道堵塞风险, 大粒径砾石易在泥浆管道或密封舱内堆积; 三是设备磨损与故障风险, 砂砾石颗粒硬度高, 易对刀盘、刀具等部件造成磨损; 四是地面沉降过大风险, 地层扰动可能导致周边建筑物与管线损坏。

5.2 风险防控与适应性提升措施

(1) 掌子面稳定防控措施: 实时监测泥浆压力与流量, 采用压力传感器与流量传感器实时采集数据, 当压力下降超过 10% 或流量异常增大时, 及时调整泥浆性能与输送压力, 补充泥浆。在顶管机头部设置地质雷达探测装置, 提前探测前方地层变化, 若发现松散砂砾石区域, 提前调整顶进速度与泥浆比重, 必要时注入水泥浆进行加固; 加强掌子面观察, 通过顶管机摄像头实时观察掌子面状态, 若出现泥膜破损、土体坍塌迹象, 立即停止顶进, 采取回填泥浆或注入聚氨酯等措施进行处理。(2) 管道堵塞防控措施: 优化泥浆性能, 适当提高泥浆粘度与流动性, 增强泥浆携带渣土的能力; 定期清理过滤装置与泥浆处理系统, 防止大粒径砾石堆积; 在顶管机密封舱内设置搅拌装置, 防止渣土在舱内堆积; 四是当出现管道堵塞迹象时, 采用反向冲洗的方式清理管道, 必要时停机拆解管道进行清理。(3) 设备磨损防控措施: 选用耐磨性能优异的部件, 刀盘面板采用 NM450 耐磨钢板, 刀具采用硬质合金材质; 定期对设备进行检查与维护, 每天施工结束后检查刀盘、刀具、密封件等部件的磨损情况, 及时更换磨损严重的部件; 在刀盘与刀具表面喷涂耐磨涂层, 增强耐磨性能; 四是优化切削参数, 避免刀盘过载切削, 减少设备磨损。

6 结论

本文结合滇中引水二期配套工程实例, 系统分析了泥水平衡顶管机在砂砾石地层中的适应性。泥水平衡顶管机通过核心结构的适配设计, 包括面板式刀盘、多重密封系统、大流量泥浆循环系统及大功率驱动系统, 可有效适应砂砾石地层颗粒硬度高、渗透性强、切削阻力大的特性。通过采取实时监测、地质探测、设备耐磨防护、地面沉降控制等风险防控措施, 可有效降低施工风险, 进一步提升泥水平衡顶管机在砂砾石地层中的适应性与可靠性。

参考文献

- [1] 杜国涛, 陈林成. 大直径泥水平衡顶管机长距离顶进施工关键技术研究[J]. 建筑机械, 2025, (04): 281-286.
- [2] 周雄威, 曹亚奇, 罗桂军, 等. 泥水平衡顶管机穿越填土及孤石施工技术应用[J]. 建筑机械化, 2021, 42(11): 47-49.
- [3] 彭富波, 张磊, 鲁燕杜, 等. 市政管网小管径泥水平衡顶管机不同地层刀盘选型技术[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2020, 37(02): 4-7.