

水利盾构法施工技术及其应用研究

唐海北

中电建西部建设投资发展有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4812

[摘要] 以盾构机为核心的水利盾构法,通过切削围岩、临时支护、渣土输送与管片拼装构建地下隧洞,具有环境适应性强、施工效率稳定、安全保障到位、工程质量可靠的特点。其核心技术涵盖盾构机选型、施工参数动态控制、管片衬砌与注浆、隧洞防水处理,需结合水利工程需求优化应用。该技术已在跨流域调水、城市防洪排涝、灌区输水、水电站引水及沿海水利工程中广泛应用,有效解决不同场景下的施工难题,为水利工程建设提供关键技术支撑,推动水利事业高质量发展。

[关键词] 水利; 盾构法; 施工技术; 应用

中图分类号: TV554 文献标识码: A

Construction Technology and Application Research of Hydraulic Shield Tunneling Method

Haibei Tang

PowerChina Western Construction Investment Development Co., Ltd.

[Abstract] The hydraulic shield tunneling method, centered around the shield tunneling machine, constructs underground tunnels by excavating surrounding rock, providing temporary support, transporting muck, and assembling segments. It is characterized by strong environmental adaptability, stable construction efficiency, adequate safety assurance, and reliable engineering quality. Its core technologies include shield machine selection, dynamic control of construction parameters, segment lining and grouting, and tunnel waterproofing, which need to be optimized for hydraulic engineering requirements. This technology has been widely applied in inter-basin water diversion, urban flood control and drainage, irrigation district water conveyance, hydropower plant water diversion, and coastal hydraulic projects. It effectively addresses construction challenges in various scenarios, providing key technical support for hydraulic engineering construction and promoting the high-quality development of water conservancy initiatives.

[Key words] Hydraulic; Shield Tunneling Method; Construction Technology; Application

引言

水利工程在水资源调配、防灾减灾、保障生产生活等方面发挥着不可替代的作用,随着工程建设向复杂地质与敏感环境区域延伸,传统施工技术面临诸多挑战,如难以适应复杂地层、易对周边环境造成影响、施工效率与质量难以平衡等。在此背景下,水利盾构法施工技术凭借独特优势逐渐成为重要选择,其能应对多样地质条件、保障施工安全与质量,满足不同水利工程的功能需求。以下将从技术原理与特点、核心施工要点、具体应用等方面展开分析,深入探讨该技术在水利工程中的应用价值与实践路径。

1 水利盾构法施工技术原理与特点

水利盾构法以盾构机为核心设备,作业时通过刀盘切削掌子面围岩,借助盾构机外壳提供临时支护,防止围岩坍塌;破碎后的渣土经出土系统输送至洞外,同时同步完成管片拼装,形成

永久衬砌,最终构建水利地下隧洞。相较于传统施工技术,其特点鲜明:一是环境适应性强,可在软土、砂层、岩溶等复杂地质条件下施工,能精准控制地表沉降,保护周边水体、植被及建筑物;二是施工效率稳定,盾构机实现多工序同步作业,不受气候影响,进度可控性强;三是安全保障到位,内部封闭作业空间可规避涌水、突泥、坍塌等风险,降低安全隐患;四是工程质量可靠,管片工厂化预制与现场机械化拼装结合,减少人为误差,衬砌结构的密封性、耐久性满足水利工程长期输水需求。由于水利工程对隧洞防水与结构稳定要求较高,盾构法应用时需要针对性优化技术,选用抗渗性更强的管片材料,设置多道止水密封装置,调整盾构机推进参数以适配水利隧洞大断面、长距离施工需求,确保技术与工程功能匹配^[1]。

2 水利盾构法核心施工技术要点

2.1 盾构机选型技术

盾构机选型是施工前提, 需要结合水利隧洞地质条件、断面尺寸、施工长度、输水要求综合确定, 核心是实现“地质适配”与“工程适配”。(1) 针对地质条件: 软土地层宜选用土压平衡盾构机, 通过控制土仓压力与出土量平衡掌子面水土压力, 防止涌水与地表沉降; 砂卵石地层应选用泥水平衡盾构机, 利用泥水压力稳定掌子面, 配备耐磨刀盘与高效渣土分离系统, 避免刀盘磨损与管路堵塞; 岩溶发育地层需改造盾构机, 增设超前地质探测与岩溶处理系统, 提前填充溶洞, 防止设备卡顿或涌水。(2) 结合水利工程需求: 大断面输水隧洞可选用矩形或双圆盾构机, 减少断面分割提升输水能力; 长距离隧洞需优化盾构机动力、冷却、出土系统, 配备管片运输与注浆补给装置, 保障设备稳定运行; 有抗渗、抗腐蚀要求的隧洞, 盾构机需要配套管片拼装精度控制装置, 确保接缝密封, 避免后期渗漏。选型需多方案比选, 通过地质勘察模拟、施工仿真分析确定最优设备与参数。

2. 2 施工参数动态控制技术

施工中, 推进速度、土仓(或泥水)压力、刀盘转速、出土量、管片拼装速度等参数需要根据地质变化与进度要求动态调整, 平衡效率、安全与质量。(1) 推进速度需要结合围岩稳定性: 软土或砂层中控制推进速度, 避免掌子面失稳; 硬岩地层可适当提高速度, 但需同步调整刀盘转速, 防止刀盘过载磨损。(2) 土仓(或泥水)压力控制是关键: 土压平衡盾构机的土仓压力需略大于掌子面水土压力, 通过传感器实时监测并结合出土量调节; 泥水平衡盾构机的泥水压力根据地层渗透系数调整, 渗透系数大的地层提高泥水密度, 确保掌子面形成有效泥膜, 防止泥水流失。出土量需与推进速度匹配: 土压平衡盾构机控制出土量偏差, 避免掌子面压力不足或土仓堵塞; 泥水平衡盾构机监测泥水流量与浓度, 保障渣土分离效率, 防止循环系统故障。(3) 盾构机姿态控制至关重要: 水利隧洞对轴线精度要求高, 需要通过激光导向系统实时监测姿态, 每环推进后调整俯仰角、滚动角与水平偏差, 确保轴线偏差符合规范, 避免影响管片拼装与输水功能^[2]。

2. 3 管片衬砌与注浆施工技术

管片衬砌是隧洞永久支护结构, 质量决定密封性与耐久性, 需要从预制、拼装、注浆三环节把控。(1) 管片预制采用工厂化生产, 选用高强度混凝土, 掺入抗渗剂与抗裂纤维, 保障抗渗性能; 采用高精度钢模, 定期校验防止尺寸偏差; 结合蒸汽与自然养护, 确保混凝土强度达标, 表面无缺陷。(2) 现场拼装采用机械化系统, 遵循“先下后上、先邻后顶”原则, 通过定位销与螺栓固定管片; 拼装前清理管片表面与密封槽, 涂抹止水条润滑剂确保贴合紧密; 拼装后检查接缝间隙, 超差时调整位置避免影响防水。(3) 同步注浆在拼装后立即进行, 采用水泥-粉煤灰-膨润土浆液, 填充管片与围岩间隙, 防止围岩变形与管片位移; 二次注浆在同步注浆浆液初凝后开展, 采用水泥-水玻璃双液浆, 填充未密实区域与接缝, 提升隧洞稳定性与抗渗性, 注浆压力需合理控制避免浆液窜入洞内。

2. 4 隧洞防水处理技术

水利隧洞需长期承受水压力, 防水技术是功能保障核心, 需要构建“管片自防水+接缝防水+特殊部位防水”多层体系。(1) 管片自防水通过材料与结构设计实现: 采用低水胶比、高密实度混凝土, 添加膨胀剂与抗裂纤维提升抗渗性; 外表面涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料形成永久防水膜。(2) 接缝防水采用“止水条+密封垫”双重结构: 接缝处设置遇水膨胀止水条, 根据水压力确定尺寸, 遇水膨胀填充间隙; 螺栓孔设置丁腈橡胶密封垫确保无渗漏。特殊部位防水涵盖管片吊装孔、隧洞转弯处、与其他构筑物连接部位: 吊装孔用专用防水塞封堵并灌注防水砂浆; 转弯处采用楔形管片并增加止水条宽度, 防止应力集中导致渗漏; 连接部位采用柔性接头与多道止水环, 适应结构变形避免渗漏。(3) 施工完成后需要全面防水检测, 结合水压试验与渗漏检测: 水压试验按设计水头倍数进行并稳压观察; 渗漏检测采用超声波与目视结合, 重点排查接缝与特殊部位, 发现渗漏及时化学注浆封堵, 确保防水性能达标。

3 水利盾构法施工技术的具体应用

3. 1 跨流域调水工程中的应用

跨流域调水工程需建设长距离、大断面地下输水隧洞, 穿越不同地质单元与生态敏感区, 水利盾构法是首选技术。(1) 应用中需解决“长距离施工效率”与“生态环境保护”问题。长距离隧洞施工需优化盾构机配置, 配备高效刀盘修复与管片自动运输装置, 减少停机时间; 设置中间风井与补给站, 解决通风、排水与材料运输问题; 采用智能化管理系统, 通过BIM与物联网监测设备运行、轴线偏差与围岩变形, 实现远程调控与风险预警。(2) 生态敏感区穿越段需强化环境控制: 严格控制地表沉降, 避免影响周边水体与植被; 采用密闭式出土系统防止渣土污染; 施工废水处理达标后回用, 减少资源消耗与污染。(3) 需采用大断面盾构机, 优化管片拼装工艺确保隧洞断面光滑, 减少水流阻力提升输水效率。通过技术优化, 水利盾构法实现长距离、高效率、低污染施工, 为水资源配置提供保障^[3]。

3. 2 城市防洪排涝工程中的应用

城市防洪排涝工程中, 地下排水隧洞需在密集建筑群、交通线路下方施工, 且需满足大流量排水需求, 水利盾构法“微创性”与“高效性”优势突出。(1) 应用中需关注“施工空间限制”与“快速排水功能”。城市地下空间复杂, 隧洞需避让地下管线、地铁隧道、建筑物基础, 因此采用小半径转弯盾构技术, 选用灵活转向盾构机, 通过调整推进油缸行程差适应复杂线路; 采用楔形管片确保转弯处拼装紧密, 避免渗漏。(2) 为满足大流量排水, 多采用矩形或马蹄形断面, 应用异形盾构技术, 矩形盾构机断面利用率高, 提升排水能力; 马蹄形盾构机兼具稳定性与大断面优势, 适用于复杂地质区域。(3) 工程对施工周期要求高, 采用“多机组并行施工”模式, 设置多个始发井同步推进, 缩短工期。(4) 在隧洞进出口设置消能与截污设施, 结合密封性防止雨水倒灌与污染物入体, 提升生态与安全效益。

3. 3 灌区输水工程中的应用

(1) 灌区输水工程多分布于农田区域, 隧洞需穿越耕地、灌

溉渠道与村庄,施工需兼顾农业保护与低成本建设,水利盾构法应用需突出“经济性”与“适应性”。灌区地质多为软土与砂层,且隧洞断面较小,宜选用中小型土压平衡盾构机,降低设备投资与施工成本。施工中优化方案减少农业影响:采用浅埋盾构技术控制埋深,减少开挖量与工期,避免长期占用耕地;紧凑布置施工场地,利用闲置土地,完工后恢复耕地;选用环保型注浆材料,防止污染土壤与地下水,保障农作物安全。(2)灌区隧洞对耐久性要求高,需抵抗灌溉水中化学物质腐蚀,因此管片选用抗腐蚀混凝土,添加阻锈剂与耐腐蚀纤维;接缝止水条采用耐腐材质延长寿命。此外,需同步预留检修孔与监测设备位置,方便后期运维。通过技术适配,水利盾构法实现低成本、低干扰、高耐久性施工,提升水资源利用效率,保障农业稳定^[4]。

3.4 水电站引水工程中的应用

水电站引水工程需建设高压引水隧洞,将水流从水库输送至厂房,隧洞需承受高水头压力且穿越山体,地质多为硬岩或混合地层,水利盾构法“高稳定性”与“高密封性”优势充分发挥。(1)应用中需解决“高水头压力抵抗”与“硬岩施工效率”问题。针对高水头压力,强化隧洞结构强度与密封性:选用高强度管片,根据水头确定厚度;优化接缝结构,采用多道止水密封;衬砌完成后进行高压水压试验,验证抗水压能力。(2)硬岩地层施工需提升破岩效率与设备耐久性:选用硬岩盾构机,配备盘形滚刀与耐磨刀盘,调整推进力与刀盘压力提高效率;采用超前钻孔与预裂爆破辅助技术,松动硬岩减少刀盘磨损;定期检查维护刀盘与刀具,采用洞内更换技术减少停机时间。此外,需控制隧洞轴线偏差与管片拼装精度,确保内壁光滑减少水头损失,为水电站高效发电提供保障。

3.5 沿海地区水利工程中的应用

沿海地区水利工程(如防洪、海水利用输水隧洞)需对海水腐蚀、软土地层与潮汐影响,水利盾构法应用需强化“抗腐蚀”与“抗潮汐”能力。(1)抗海水腐蚀方面,从材料与结构优化:管片采用海工混凝土,添加抗盐侵蚀剂与硅灰提升抗氯离子渗透

能力;外表面涂刷聚脲防水涂料形成封闭防腐层;接缝止水条采用耐海水腐蚀材质,避免老化失效。(2)软土地层与潮汐影响区域施工,优化盾构机参数与防水措施:采用土压平衡盾构机,动态调整土仓压力平衡潮汐带来的水土压力波动,防止掌子面涌水;穿越海床段强化同步注浆,采用快凝型浆液确保快速填充间隙,避免潮汐作用导致浆液流失;加强隧洞防水检测,重点排查接缝与特殊部位,确保无渗漏。(3)施工中需关注海水对设备的腐蚀,对盾构机关键部件进行防腐处理,延长设备使用寿命。通过技术优化,水利盾构法在沿海水利工程中实现稳定施工,保障工程长期运行^[5]。

4 结语

水利盾构法施工技术以盾构机为核心,依托环境适应性、效率、安全、质量等方面的显著特点,通过科学的盾构机选型、动态的施工参数控制、严格的管片衬砌与注浆管理及完善的隧洞防水处理,形成了完整的技术体系。在各类水利工程中,该技术针对不同场景优化应用,有效解决长距离施工、复杂环境适应、高压抵抗等难题,保障工程顺利推进与长期稳定运行。未来,随着技术不断创新,水利盾构法将在更复杂的水利工程场景中发挥作用,为水利工程建设持续发展注入更强动力。

[参考文献]

- [1]黄家盛.浅析以水利技术创新提高水利管理能力[J].科学与信息化,2025(9):190-192.
- [2]贺喜德.水利地下设施的盾构法施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(11):190-193.
- [3]张鑫伟,张圈,韩亮.盾构法施工邻近构筑物沉降控制研究[J].建筑机械化,2025,46(5):137-140.
- [4]苏航,尚伟.盾构法隧道施工无人驾驶智能运输关键技术[J].建筑机械化,2025,46(5):84-87.
- [5]胡珉,赵鹏鹏.基于复杂施工条件的盾构法隧道通用管片拼装点位优选方法[J].隧道建设(中英文),2025,45(1):77-84.