

盾构法隧道施工在水利工程建设中的应用

赵梓豪

河南省水利第二工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要：盾构法隧道施工在水利工程建设中应用广泛，适用于长距离输水隧洞、水电站压力管道、城市防洪排涝及跨流域调水等工程。其通过机械化作业实现开挖、支护、出渣一体化，具有地质适应性强、施工安全性高、环境影响小等优势。在水利工程中，盾构法需强化防水设计、选用耐久材料，并采取生态保护措施，以满足高压水环境、长期服役及生态保护需求，推动水利工程建设高质量发展。

关键词：盾构法；隧道施工；水利工程建设；应用

引言：随着水利工程建设规模持续扩大、施工条件日益复杂，传统隧道施工方法在应对长距离、高水压、复杂地质等挑战时逐渐显现局限。盾构法隧道施工凭借全机械化作业模式、强地质适应性及环境友好性，成为破解水利工程难题的关键技术。其通过自动化掘进与精准支护，有效降低施工风险，提升工程效率，尤其适用于跨流域调水、城市防洪排涝等场景，为水利建设高质量发展提供重要支撑。

1 盾构法隧道施工技术原理与特点

1.1 盾构法基本原理

(1) 盾构机结构组成：核心由刀盘、推进系统、管片拼装机、出土系统及控制系统构成。刀盘负责地层开挖，推进系统通过千斤顶提供掘进动力，管片拼装机实现预制管片的精准拼装，出土系统将开挖渣土转运至地面，控制系统统筹调控各部件协同作业。(2) 施工流程：遵循“开挖-出土-支护-管片安装-壁后注浆”的循环作业流程。首先由刀盘切削地层，渣土经出土系统排出；同步通过盾构壳体提供临时支护，防止地层坍塌；随后拼装机安装预制管片形成永久支护；最后向管片与地层间隙注入浆液，完成地层加固与防水密封。

1.2 技术优势

(1) 地质适应性强：可适配软土、砂层、复合地层等多种地质条件，通过更换刀盘、调整掘进参数，能有效应对复杂地层掘进挑战，适配水利工程跨区域施工的地质差异需求。(2) 施工安全性高：采用全机械化作业模式，作业人员主要在盾构机密闭舱内操作，大幅减少人员直接暴露于地质风险中的概率，降低坍塌、涌水等事故隐患。(3) 环境影响小：施工过程振动、噪音水平低，且通过精准控制掘进参数和壁后注浆，能有效控制地表沉降，减少对周边建筑物、地下管线及水体环境的干扰^[1]。

1.3 水利工程中的特殊需求

(1) 抗渗性要求：针对水利工程高压水环境，需强化防水设计，包括采用多道密封胶圈的管片结构、高性能同步注浆材料，确保隧道整体抗渗性，防止地下水渗漏影响工程运行。(2) 耐久性要求：隧道长期处于水侵蚀环境，需选用抗冻、抗腐蚀的高强混凝土管片，优化钢筋防腐处理，保障结构长期稳定性，满足水利工程长期服役需求。(3) 生态保护要求：施工需严格控制废水、废渣排放，减少对施工区域水体、植被的破坏，同步制定生态修复方案，实现工程建设与生态保护协同。

2 盾构法隧道施工在水利工程建设中的典型应用

2.1 引水隧洞工程

(1) 长距离输水隧洞施工：在长距离跨区域输水工程中，盾构法是核心施工技术之一，典型案例为南水北调中线工程。该工程部分输水隧洞段采用盾构施工，针对长距离掘进需求，配备了大直径泥水平衡盾构机，通过智能化掘进控制系统实现连续作业，有效缩短了施工周期。此类工程中，盾构施工需解决长距离通风、渣土转运、管片运输等难题，通常采用“分段掘进+同步配套”的施工方案，保障施工效率与质量^[2]。(2) 穿越复杂地层的技术措施：当引水隧洞穿越断层破碎带、高压水地层等复杂区域时，需针对性采取专项技术措施。面对断层破碎带，采用“超前地质预报+超前注浆加固”的组合方案，通过地质雷达、超前钻探精准探明地层情况，再利用水泥-水玻璃双液浆对破碎岩体进行预加固，提升围岩稳定性；针对高压水地层，选用抗水压性能优异的泥水平衡盾构机，优化刀盘密封系统与管片防水结构，同时严格控制壁后注浆压力与注浆量，防止地下水渗漏与管片变形。

2.2 水电站压力管道工程

(1) 高内水压力下的盾构管片设计：水电站压力

管道需承受巨大内水压力,盾构管片设计需突破常规标准。采用厚壁管片结构,通过增大管片混凝土强度等级(通常选用C60及以上高强混凝土)、优化钢筋配筋率提升承载能力;同时引入预应力锚固技术,在管片拼装完成后施加环向预应力,抵消部分内水压力产生的拉应力,避免管片出现裂缝。此外,管片接缝处采用多道密封胶圈,搭配遇水膨胀止水条,确保高压下的防水可靠性。(2)盾构机选型与刀盘配置优化:水电站压力管道常穿越岩石与土层混合地层,对盾构机适应性要求极高。选型上优先采用土压平衡-硬岩复合式盾构机,兼具土层掘进的稳定性与硬岩破碎的高效性;刀盘配置针对性优化,在土层段选用耐磨刮刀,岩石段配备高强度滚刀,同时设置刀盘磨损监测装置,实现刀盘刀具的动态更换与维护。通过自适应掘进参数调节系统,根据地层变化实时调整推进速度、刀盘转速与出土压力,保障掘进顺畅^[3]。

2.3 城市防洪排涝工程

(1)地下排水隧道施工:在城市深层排水隧洞工程中,盾构法因对地面交通、周边建筑干扰小的优势被广泛应用。以上海、广州等城市深层排水隧道项目为例,采用大直径盾构机施工大断面排水隧洞,隧道直径可达10米以上,有效提升排水能力。施工中需重点解决城市地下管线密集、施工空间受限等问题,通过三维地质建模与管线探测精准避让障碍物,采用浅埋暗挖与盾构结合的施工方式,保障工程安全与周边环境稳定。(2)盾构法与顶管法的对比分析:经济性方面,盾构法初期设备投入较大,但适用于大直径、长距离隧道施工,随着施工长度增加,单位长度成本逐渐降低;顶管法设备投入相对较低,但多用于中小直径、短距离隧道,长距离施工时成本优势弱化。施工效率方面,盾构法机械化程度更高,掘进速度更快,日均掘进可达10-20米;顶管法受地层适应性限制,掘进速度较慢,日均掘进约3-5米。实际应用中,需根据隧道直径、长度、地质条件及工程预算综合选择施工工艺。

2.4 跨流域调水工程

(1)盾构法在长距离、大直径隧洞中的适应性:跨流域调水工程常需建设长距离、大直径输水隧洞,盾构法展现出极强的适应性,典型案例为引江济淮工程。该工程部分隧洞段采用直径8米以上的大型盾构机施工,针对长距离掘进特点,优化了盾构机动力系统与润滑系统,减少设备故障发生率;同时采用管片自动化拼装技术,提升拼装效率与精度。大直径盾构施工可有效提升输水能力,减少隧洞数量,降低工程总体造价^[4]。(2)

施工期水文条件对盾构掘进的影响及应对策略:施工期水文条件(如汛期水位上涨、地下水补给变化)会对盾构掘进产生显著影响。水位上涨可能导致盾构机承受的水土压力增大,易引发管片渗漏、推进困难等问题;地下水补给变化可能导致地层稳定性下降。应对策略包括:施工前建立水文监测系统,实时监测水位与水流变化;在汛期前完成关键隧洞段施工,或采取基坑降水、围堰挡水等措施控制水位;针对地下水补给变化,提前储备超前注浆材料,及时对地层进行加固处理,保障掘进安全。

3 水利工程建设中盾构法隧道施工的关键技术问题

3.1 地质条件适应性挑战

(1)软硬不均地层中的掘进参数控制:面对软硬交互地层,需精准调控掘进扭矩、推力及刀盘转速。硬岩段需降低刀盘转速、增大扭矩以保障破碎效果,同时控制推力避免设备过载;软土段则需提高转速、减小推力,防止地层坍塌,通过智能化系统实时反馈调整参数,实现平稳掘进。(2)高水压条件下的盾构密封技术:核心在于强化主轴承密封与铰接密封性能。主轴承采用多道密封环叠加设计,填充高性能润滑脂形成密封屏障;铰接密封增设遇水膨胀橡胶圈,配合压力补偿装置平衡内外水压,防止高压水渗入盾构内部损坏设备。

3.2 管片设计与拼装技术

(1)管片受力分析与结构优化:结合水利工程高压水环境,重点优化管片抗渗、抗裂及耐久性。采用高强纤维混凝土提升抗裂性能,增设多道密封胶圈强化防水;通过有限元分析模拟受力状态,优化钢筋布置,确保管片承受水土压力及内水压力时结构稳定。(2)错缝拼装与通缝拼装的适用性对比:错缝拼装整体性强、抗变形能力优,适用于复杂地质及高水压段,能有效分散应力避免管片开裂,但拼装精度要求高、效率较低;通缝拼装施工便捷、速度快,适用于地质稳定、压力较小的区段,需通过加强环向连接提升整体性,需根据工程工况合理选择。

3.3 壁后注浆与地层加固

(1)同步注浆材料性能要求:需满足早期强度高、流动性好、抗渗性优异的特性。选用水泥-粉煤灰-膨润土复合浆液,通过调整配比保障浆液扩散均匀,快速填充管片间隙形成支护,同时阻断地下水渗透通道。(2)二次注浆时机与压力控制:当同步注浆效果不佳或地层沉降风险较高时实施二次注浆,时机优选同步注浆完成后3-7天、浆液初凝前。压力控制需结合地层特性,以略高于地层水压力且不导致管片上浮或开裂为原则,采用分

级加压方式确保注浆效果。

3.4 施工监测与风险控制

(1) 实时监测系统：构建涵盖地表沉降、管片变形、地下水位的全方位监测体系。采用自动化传感器实时采集数据，通过云端平台分析预警，确保沉降量控制在规范范围内，及时发现管片位移及水位异常。(2) 突发风险应急预案：针对刀盘卡顿、涌水涌砂等突发情况制定预案。刀盘卡顿时，采用高压射水冲洗或局部注浆加固后反向脱困；涌水涌砂时，立即停止掘进，启动应急注浆系统封堵渗漏通道，同步抽排地下水，待地层稳定后再恢复施工。

4 盾构法隧道施工在水利工程建设中的发展趋势

4.1 技术优化方向

(1) 智能化盾构机研发：核心聚焦自动导向与掘进参数自适应控制技术升级。通过搭载高精度激光导向系统与多传感器融合感知模块，实现盾构机姿态实时精准定位，偏差控制精度可达毫米级；依托大数据与人工智能算法构建掘进参数数据库，根据水利工程复杂地质（如高水压、软硬不均地层）的实时监测数据，自动适配调整推力、扭矩、刀盘转速等参数，大幅降低人为操作误差，提升掘进效率与安全性。同时，智能化系统可实现设备故障预警与远程运维，减少施工中断时间。

(2) 新型管片材料应用：重点推广高强度、自修复混凝土等新型材料。针对水利工程高压、高侵蚀的服役环境，研发强度等级更高、抗渗抗冻性能更优的纤维增强混凝土管片，提升结构承载能力与耐久性；探索自修复混凝土材料在管片生产中的应用，通过内置微生物菌剂或胶囊型修复剂，实现管片微小裂缝的自主愈合，降低后期维护成本，延长隧道使用寿命，适配水利工程长期稳定运行的核心需求。

4.2 绿色施工理念

(1) 低碳化施工：以节能设备升级与可再生能源利用为核心路径。研发应用低能耗盾构机，优化动力系统降低能耗损耗；在施工现场推广太阳能、风能等可再生能源供电，用于照明、设备辅助运行等环节；同时，采用渣土资源化处理技术，将施工产生的渣土加工为再生骨料用于道路垫层或管片生产，减少固废排放，实现资源循环利用，降低施工碳排放。(2) 生态修复技术：强化施工后水体与植被的生态恢复。水利工程盾构

施工往往涉及水体周边区域，施工完成后需采取生态修复措施，包括清理施工区域水体污染物、投放水生生物载体促进水体生态系统恢复；在地表施工迹地种植本土植被，构建植被缓冲带，减少水土流失，提升区域生态承载力，实现工程建设与生态保护的协同发展。

4.3 多技术融合应用

(1) 盾构法与TBM的复合施工模式：针对水利工程隧洞常穿越“软土-硬岩”复合地层的特点，发展盾构-TBM复合掘进模式。通过研发可快速切换掘进模式的复合式设备，在软土段采用盾构法掘进保障地层稳定，在硬岩段切换为TBM模式提升破碎效率，避免设备频繁更换，缩短施工周期，适配跨流域调水、引水隧洞等长距离工程需求。(2) BIM技术全生命周期应用：将BIM技术深度融入盾构施工全流程管理。施工前构建三维地质与工程模型，实现施工方案可视化模拟与优化；施工中通过BIM模型整合实时监测数据，实现掘进参数、管片拼装质量等信息的协同管理；运营阶段依托BIM模型建立隧道维护管理系统，实时跟踪结构状态与病害发展，为水利工程隧道长期运维提供数据支撑，提升工程管理智能化水平。

结束语

盾构法隧道施工在水利工程建设中的应用，彰显了技术创新与工程实践的深度融合。其不仅突破了复杂地质与高水压环境的施工瓶颈，更以高效、安全、环保的优势推动了水利工程的现代化转型。未来，随着智能化装备、绿色材料及多技术协同的持续升级，盾构法将进一步拓展应用边界，为跨流域调水、城市水安全保障等国家战略工程提供更坚实的技术支撑，助力水利建设迈向更高质量的发展阶段。

参考文献

- [1]刘斌,陈杰.盾构法隧道施工技术的研究与应用[J].土木工程学报,2022,55(07):116-120.
- [2]孙国辉,张涛,高鹏.隧道盾构施工技术的优化与创新[J].岩土工程技术,2021,49(09):132-135.
- [3]吴东.施工技术在隧道工程施工中的应用与挑战[J].建筑技术科学,2024,(05):77-79.
- [4]贾伟.盾构法隧道施工中测绘技术的应用与挑战[J].建筑科学,2025,(03):40-42.