

城市地铁盾构施工难点及优化措施

孔庆伟

天津国际工程建设监理有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：随着城市化进程加快，盾构法因机械化程度高、对周边环境扰动小，成为城市地铁隧道施工的主流工法。本文结合城市地铁盾构施工实际，阐述其技术基础与核心特征，系统分析复杂地层、环境约束、设备技术及安全质量四大类施工难点，针对性提出地层改良、环境适配、设备优化及安全管控等对应措施，为解决盾构施工难题、提升施工效率与安全性提供实践参考，助力城市地铁工程高质量推进。

关键词：城市地铁；盾构施工；难点；优化措施

引言：城市地铁是缓解交通拥堵、完善城市交通网络的核心基础设施，盾构施工作为地铁隧道暗挖的关键技术，已广泛应用于各类城市地铁工程。但城市核心区建筑密集、地下管线复杂，加之地层条件多变，导致盾构施工面临诸多难点，易引发地面沉降、设备故障等问题。因此，深入剖析施工难点、探索科学优化路径，对保障地铁施工安全、缩短工期、降低成本具有重要现实意义与工程价值。

1 城市地铁盾构施工相关理论基础

1.1 盾构施工技术概述

(1) 盾构施工核心原理：以盾构机为核心施工设备，通过盾构壳体承受地层压力、防止围岩坍塌，同时利用刀盘切削土体，将渣土排出洞外，同步完成管片拼装和注浆加固，实现隧道暗挖施工的技术，核心是“边挖边护、同步成型”，最大限度减少对周边环境的扰动。(2) 盾构施工主要流程：分为施工准备、盾构始发、正常掘进、盾构接收四大环节，具体包括场地布置、盾构机安装调试、端头加固、洞口密封，随后盾构机始发掘进，过程中同步进行渣土改良、管片拼装、同步注浆，掘进至接收端后完成拆机、洞口封堵，形成完整隧道。(3) 常用盾构机型及适用范围：土压平衡盾构机，适用于软土、粉质黏土等富水地层，通过控制土仓压力平衡地层压力；泥水平衡盾构机，适用于砂层、卵石层及高水压地层，利用泥浆支护开挖面；硬岩盾构机，适用于岩层地层，依靠滚刀破碎岩石，各机型适配不同地质条件，保障施工安全。

1.2 城市地铁盾构施工的核心特征

(1) 施工环境复杂性：城市地铁多位于繁华地段，周边建筑物密集、地下管线繁多，地层多为软土、复合地层，且受地下水影响大，施工空间有限，需兼顾施工进度与周边环境保护，避免引发地面沉降、管线破损等问

题。(2) 施工精度要求高：地铁隧道需满足线路平面、高程精度要求，管片拼装间隙、轴线偏差需控制在规范范围内，否则会影响隧道结构稳定性和后续轨道铺设，直接关系到地铁运营安全。(3) 施工风险关联性强：盾构施工各环节相互关联，刀盘磨损、渣土改良不当、注浆不及时等任一环节出现问题，都可能引发掌子面坍塌、地面沉降、管片破损等连锁风险，风险传导速度快、影响范围广^[1]。

1.3 盾构施工关键技术参数

(1) 掘进速度与压力控制参数：掘进速度需结合地层条件调整，软土地层一般控制在2-5cm/min，岩层地层适当降低；土仓压力需与地层压力匹配，通常为0.1-0.3MPa，避免压力过高导致管片破损、过低引发坍塌。(2) 渣土改良相关参数：根据渣土性质添加膨润土、泡沫等改良剂，改良剂掺量一般为渣土质量的3%-8%，确保渣土具有良好的流塑性和止水性，便于渣土排出，同时减少刀盘结泥饼现象。(3) 管片拼装与注浆参数：管片拼装间隙控制在3-5mm，拼装速度与掘进速度协同；同步注浆压力为0.2-0.4MPa，注浆量为理论空隙体积的1.2-1.5倍，确保注浆饱满，填充管片与围岩间隙，防止后期沉降。

2 城市地铁盾构施工主要难点分析

2.1 复杂地层条件下的施工难点

(1) 富水砂层盾构掘进难点，易出现渣土喷涌、地层失稳问题。富水砂层颗粒松散、渗透性强，盾构掘进时土仓压力控制不当，极易导致地下水携带砂土喷涌，引发掌子面坍塌；且砂层自稳性差，开挖后无法快速形成有效支护，易产生地层沉降，威胁周边环境安全，需精准把控掘进参数与渣土改良效果。(2) 复合地层掘进难点，砂土、黏土、岩石交叠导致掘进效率低下。复合地层地质多变，不同地层的硬度、渗透性差异显著，盾构刀盘

需频繁调整切削参数,导致刀具磨损不均;黏土易黏附刀盘形成泥饼,砂土易造成排渣堵塞,频繁切换掘进模式大幅降低施工效率、增加施工成本。(3)软土地层施工难点,易引发地面沉降、盾构姿态失稳。软土地层承载力低、压缩性高,盾构掘进扰动会破坏地层结构,易产生不均匀地面沉降,甚至导致周边建筑物开裂;同时软土对盾构机约束力不足,易出现姿态偏移、滚动等问题,影响隧道轴线精度。

2.2 施工环境约束下的难点

(1)城市密集建筑群周边施工难点,易扰动周边建筑结构。密集建筑群下施工时,盾构掘进产生的地层沉降和振动会传递至周边建筑,尤其是老旧建筑,易引发墙体开裂、基础沉降等隐患,需严格控制施工扰动范围和沉降量,大幅增加了施工难度。(2)地下管线错综复杂区域施工难点,易造成管线破损。城市地下分布着燃气、供水、供电、通信等各类管线,部分管线铺设年代久、位置不明,盾构掘进时若避让不当,极易造成管线破损,引发燃气泄漏、停水停电等安全事故,需提前全面排查管线并制定精准避让方案。(3)城市核心区施工难点,施工场地受限、施工干扰大。城市核心区土地紧张,盾构施工场地狭小,设备安装、渣土运输等作业空间不足;同时核心区人流量、车流量大,施工噪音、扬尘易受管控,施工进度易受严重干扰^[2]。

2.3 盾构施工设备与技术难点

(1)盾构机刀具磨损与泥饼结附难题,影响掘进连续性。盾构机刀具切削岩石、硬土时磨损严重,需频繁停机更换,延误施工进度;黏性土层中,渣土易黏附刀盘和土仓内壁形成泥饼,堵塞排渣通道导致掘进受阻,需优化刀具设计与渣土改良工艺。(2)渣土改良技术难点,难以实现渣土性状精准调控。不同地层渣土性质差异大,需根据实际情况调整改良剂种类和掺量,调控不当会导致渣土流塑性差、止水性不足,引发排渣困难、掌子面失稳等问题,对施工技术和经验要求极高。(3)盾构姿态与轴线控制难点,易出现轴线偏差。盾构掘进中,受地层阻力、设备自身精度等因素影响,易出现水平、垂直方向姿态偏移,若调整不及时,会导致隧道轴线偏差超标,影响后续管片拼装和轨道铺设,甚至需返工处理。

2.4 施工安全与质量控制难点

(1)施工安全风险防控难点,易发生坍塌、涌水等事故。盾构施工隐蔽性强,掌子面坍塌、涌水等风险具有突发性,难以提前预判;且施工环节多、人员设备集中,安全管理难度大,需建立完善的风险防控体系,实

时监测施工状态。(2)管片拼装质量控制难点,易出现错缝、渗漏问题。管片拼装精度受盾构姿态、拼装工艺等影响,操作不当易出现管片错缝、间隙过大等问题,后期易引发隧道渗漏,影响结构耐久性,需严格控制拼装流程和质量检查。(3)施工监测精度不足难点,难以实时掌控施工隐患。城市地铁盾构施工监测范围广、参数多,受监测设备精度、环境干扰等影响,部分监测数据存在误差,无法精准、实时反映地层沉降、盾构姿态等变化,难以及时发现和处置施工隐患。

3 城市地铁盾构施工难点的优化措施

3.1 复杂地层施工难点优化措施

(1)富水砂层针对性优化,优选渣土改良剂、优化掘进参数。针对富水砂层渣土喷涌、地层失稳问题,优先选用膨润土与泡沫复合改良剂,按砂层含水量精准调整掺量,提升渣土流塑性和止水性,防止砂土喷涌;优化掘进速度与土仓压力参数,采用“低速匀速”掘进模式,将土仓压力控制在略高于地层水压 $0.02\sim 0.05\text{MPa}$,同步加大排渣力度,避免土仓内渣土堆积,有效抑制地层失稳和地面沉降。(2)复合地层掘进优化,采用适配刀具与动态掘进模式。结合复合地层砂土、黏土、岩石交叠的特点,定制耐磨型复合刀具,在刀盘上合理布置滚刀与刮刀,针对不同地层区域动态切换刀具切削模式;建立地层实时识别系统,根据地质探测数据及时调整掘进速度、土仓压力和渣土改良参数,避免频繁停机,减少刀具磨损,提升掘进效率,降低施工成本^[3]。(3)软土地层加固优化,采用超前注浆、降水等预处理技术。针对软土地层承载力低、易沉降的问题,施工前采用超前注浆加固技术,向盾构掘进前方地层注入水泥浆与水玻璃双液浆,形成加固帷幕,提升地层承载力;对于富水软土地层,提前采用轻型井点降水,降低地下水位,减少地下水对施工的影响,同时优化盾构姿态控制参数,增设导向纠偏装置,防止盾构姿态失稳。

3.2 施工环境约束下的优化措施

(1)建筑群周边施工优化,采用精准监测与微扰动掘进技术。在密集建筑群周边施工时,布设全方位监测体系,对建筑物沉降、倾斜及墙体裂缝进行实时监测,设定预警阈值,一旦超标立即停机处置;采用微扰动掘进技术,降低盾构掘进速度,优化刀盘转速,减少地层振动,同时加大同步注浆量,缩短注浆滞后时间,有效控制地面沉降,保护周边建筑结构安全。(2)地下管线区域施工优化,提前探测、精准避让与防护。施工前采用地质雷达、钻孔探测等多种方式,全面排查地下管线的位置、走向、埋深及材质,建立管线数字化台账;针

对重要管线,采用人工挖探沟进一步确认,制定精准避让方案,调整盾构掘进路线和参数,必要时对管线采用钢板桩、波纹管等进行防护,避免盾构掘进过程中造成管线破损。(3)核心区施工优化,优化施工组织、采用小型化施工设备。针对城市核心区施工场地受限、干扰大的问题,优化施工组织方案,合理规划设备进场、渣土运输路线和作业时间,避开人流、车流高峰;采用小型化盾构设备和紧凑型施工机械,减少施工场地占用,同时采用低噪音、低扬尘施工工艺,安装降噪、降尘设备,降低施工对周边环境的干扰,确保施工顺利推进。

3.3 设备与技术层面优化措施

(1)盾构机刀具与泥饼防控优化,优化刀具布局、改进渣土改良工艺。优化盾构机刀盘刀具布局,增加刀具耐磨层,延长刀具使用寿命,同时在刀盘设置高压冲洗装置,定期冲洗刀盘表面,防止黏土黏附形成泥饼;改进渣土改良工艺,采用智能化配比系统,根据渣土实时性状调整改良剂种类和掺量,从源头减少泥饼形成,保障掘进连续性。(2)渣土改良技术优化,建立精准配比与智能调控体系。搭建渣土性状智能监测平台,实时检测渣土的含水量、流塑性等参数,结合地层条件建立改良剂精准配比模型,实现改良剂掺量的自动化调控;针对不同地层定制专用改良剂,如黏性土层采用泡沫改良剂,砂层采用膨润土改良剂,确保渣土性状满足掘进和排渣要求,提升施工效率^[4]。(3)盾构姿态控制优化,采用智能导向与动态参数调整技术。引入盾构智能导向系统,实时采集盾构姿态、轴线偏差等数据,通过大数据分析精准判断姿态偏移趋势,提前进行纠偏调整;建立动态参数调整机制,根据地层阻力变化及时优化推进速度、推力分配等参数,避免姿态偏移过大,确保隧道轴线精度符合规范要求,减少返工。

3.4 安全与质量控制优化措施

(1)安全风险防控优化,建立智能监测预警与应急处置体系。构建盾构施工全流程智能监测预警系统,对掌子面稳定性、地下水位、盾构设备运行状态等进行实时监测,一旦出现风险隐患立即发出预警;制定完善的

应急处置方案,配备应急物资和专业救援队伍,针对坍塌、涌水等突发事件开展应急演练,提升应急处置能力,保障施工安全。(2)管片拼装质量优化,规范拼装流程、加强过程管控。制定标准化管片拼装流程,明确拼装顺序、速度和力度要求,安排专业人员进行现场指导,避免出现管片错缝、间隙过大等问题;加强拼装过程管控,采用激光定位技术确保拼装精度,拼装完成后及时进行质量检查,对不合格部位立即整改,同时优化同步注浆工艺,提升注浆饱满度,防止隧道渗漏。(3)施工监测优化,采用智能监测设备与数据实时分析技术。更换高精度智能监测设备,扩大监测范围,涵盖地层沉降、盾构姿态、管片应力等多个参数,减少监测误差;搭建监测数据实时分析平台,对监测数据进行同步处理和分析,精准识别施工隐患,为施工调整提供科学依据,实现施工隐患的早发现、早处置,保障施工质量和安全^[5]。

结束语

城市地铁盾构施工难度大、涉及面广,其难点贯穿施工全流程,与地层条件、施工环境、设备技术及安全管理密切相关。本文提出的优化措施贴合工程实际,可有效破解各类施工难题,提升施工的安全性与高效性。未来需结合智能建造技术,持续优化施工工艺与设备性能,积累工程实践经验,为同类城市地铁盾构施工提供更完善的技术支撑,推动城市地下交通工程持续健康发展。

参考文献

- [1]陈铖.浅析地铁盾构施工的风险管理[J].城市建筑.2024,18(27):89-93.
- [2]闫官锋.地铁盾构施工安全风险分析与综合防治对策[J].建筑工程技术与设计.2025,12(7):142-145.
- [3]周艺超,刘诚斌,管学铭.北京市地铁盾构施工风险分析及其规避措施[J].城市建筑.2024,28(30):351-353.
- [4]于宝疆,吴江滨,陈雪晶.盾构掘进地层变形分析与控制[J].市政技术.2023,9(6):77-79.
- [5]钟茂华,史聪灵,符泰然.我国的地铁安全科技保障体系建设[J].劳动保护.2024,6(11).78-81.