

地铁工程盾构施工关键技术研究

方晓风

中铁四局集团有限公司城市轨道交通工程分公司 安徽 合肥 230000

摘要: 盾构法作为地铁工程关键技术,集开挖、支护、推进、出渣于一体。本文围绕盾构施工关键技术展开研究,涵盖设备选型、掘进参数控制、特殊地质施工及风险控制等方面。通过分析不同地质条件下的技术需求,提出针对性解决方案,优化施工参数,强化风险防控,保障盾构施工安全高效推进,为地铁工程建设提供有力技术支撑。

关键词: 地铁工程;盾构施工;掘进参数;特殊地质;风险控制

引言:地铁建设作为城市交通发展的重要方向,对缓解交通压力、提升城市运行效率意义重大。盾构法凭借高效、安全等优势,成为地铁隧道施工的主流方法。然而,地铁工程地质条件复杂多样,不同地层特性对盾构施工提出诸多挑战。深入研究盾构施工关键技术,合理选型盾构设备,精准控制掘进参数,有效应对特殊地质条件,强化风险防控,是确保地铁盾构施工顺利推进、保障工程质量的必然要求。

1 盾构法施工原理与设备选型

1.1 盾构法基本原理

盾构机工作机制围绕开挖、支护、推进、出渣四大环节有序衔接,构成完整施工循环。开挖作业依靠前端刀盘旋转切削地层土体,支护通过盾壳对开挖面及周边地层形成有效防护,避免土体坍塌,推进作业由千斤顶提供动力,依托已拼装衬砌传递作用力实现盾构前移,出渣作业通过专用输送装置将切削渣土及时排出,各环节协同配合保障施工连续推进^[1]。封闭式与敞开式盾构的适用场景存在明显差异,敞开式盾构依赖地层自身稳定性,适用于自稳性强的地层,封闭式盾构通过压力平衡维持开挖面稳定,适用于自稳性差、含水丰富的地层。土压平衡与泥水平衡盾构的技术差异集中在压力平衡方式与出渣系统,土压平衡盾构以切削渣土为介质平衡开挖面压力,通过螺旋输送机完成出渣,泥水平衡盾构以泥浆为介质形成泥膜平衡压力,借助泥浆输送系统实现渣土排出与泥浆循环利用。

1.2 盾构机选型依据

地质条件是盾构机选型的核心前提,软土地层对盾构机刀盘耐磨性、土体改良系统及密封性能提出较高要求,软土地层的内摩擦角一般在 5° - 20° 之间,黏聚力在10-50千帕,需要刀盘具备较好的耐磨性以应对长时间切削。岩层地层需强化刀盘破岩能力与主驱动扭矩,岩石的单轴抗压强度可达50-200兆帕,这就要求刀盘具备足够

的破岩能力。复合地层则要求盾构机具备多工况适配能力,可灵活调整作业参数适配不同地层特性。隧道断面尺寸直接决定盾构机直径设计,盾构机直径需与隧道断面尺寸精准匹配,兼顾管片拼装间隙与盾尾密封需求,一般来说,管片拼装间隙控制在10-30毫米,盾尾密封的宽度在50-100毫米,避免尺寸偏差影响施工质量与效率。施工环境的适应性直接关系施工安全与周边环境安全,埋深决定盾构机推进压力与盾体结构强度设计,当埋深超过20米时,地层压力会显著增加,对盾体结构强度要求更高。地下水位影响盾构机密封系统与压力平衡方式选择,地下水位较高时,如超过隧道底部标高5米以上,需要采用更可靠的密封方式。周边建筑物分布要求盾构机具备精准姿态控制能力,减少施工扰动对建筑物的影响,当周边建筑物距离隧道轴线小于3倍隧道直径时,需严格控制盾构机姿态偏差。

2 盾构掘进参数控制技术

2.1 推进系统参数优化

推进速度与刀盘转速的协同控制需结合地层特性动态调整,速度设定需匹配刀盘切削效率,避免速度过快导致刀盘切削负荷过大、土体扰动加剧,或速度过慢影响施工进度^[2]。在软土地层中,推进速度一般控制在10-30毫米/分钟;在岩层中,推进速度可能降低至5-15毫米/分钟。刀盘转速调整需适配地层硬度,硬度较高地层需适当降低转速以提升切削扭矩,软土地层可适度提高转速减少土体黏结。例如,在硬度较高的花岗岩地层中,刀盘转速可降低至0.3-0.8转/分钟;在软黏土地层中,刀盘转速可提高至1-2转/分钟。总推力与土舱压力需建立动态平衡,总推力调整需兼顾推进需求与土舱压力稳定,推力过大易导致土舱压力骤升引发地层隆起,推力过小则难以克服地层阻力,需通过实时监测数据动态调控两者适配关系。铰接装置在曲线段施工中的角度调整需贴合曲线半径设计,根据隧道曲线曲率缓慢调整铰

接角度，避免角度调整过快导致盾体姿态偏移，同时保障盾壳与地层贴合度，减少曲线段施工中的土体扰动。

2.2 出土与渣土改良技术

排土量与掘进速度的匹配需遵循地层体积置换原则，排土量需与刀盘切削土体体积精准适配，排土量不足会导致土舱压力过高，排土量过大会造成土舱压力骤降引发开挖面坍塌。一般来说，排土量与掘进速度的比例关系需根据地层密度进行计算，例如在软土地层中，每掘进1米，排土量约为10-20立方米。渣土改良剂选取泡沫与聚合物两类常用材料，注入方式采用分区多点均匀注入，确保改良剂与渣土充分混合，提升渣土流塑性与止水性。泡沫类改良剂通过降低渣土黏结性减少刀盘结泥饼风险，聚合物类改良剂可增强渣土结构性，适配不同地质条件需求。不同地质条件下渣土流塑性控制需遵循对应标准，软土地层需提升渣土流塑性便于输送，岩层地层需适度提高渣土黏稠度避免输送过程中坍塌，复合地层需根据地层变化动态调整流塑性控制标准。

2.3 同步注浆与二次补浆技术

注浆材料需满足特定性能要求，凝结时间需适配施工进度节奏，既要保证注浆后快速形成强度支撑地层，又要预留充足时间完成注浆作业，注浆材料的初凝时间一般控制在2-6小时，终凝时间控制在12-24小时。强度需达到设计标准，确保衬砌背后支护稳定性，注浆材料的28天抗压强度一般不低于10兆帕。流动性需兼顾输送便捷性与填充密实度，避免流动性不足导致注浆堵塞或填充不充分，注浆材料的流动度一般控制在200-300毫米。注浆压力需与地层压力保持平衡，压力设定需结合地层埋深与土体特性，压力过高易导致地层劈裂，压力过低则无法实现有效填充。一般来说，注浆压力应比地层压力高0.05-0.1兆帕。二次补浆时机需结合注浆体凝结情况确定，待初次注浆体达到一定强度、检测发现衬砌背后存在空隙时启动补浆作业，补浆点位需通过监测数据精准定位，优先选择空隙较大区域及衬砌接缝处，确保补浆均匀，提升衬砌背后填充密实度，保障隧道结构长期稳定性。

3 特殊地质条件下的施工技术

3.1 软土地层施工

盾构姿态控制与纠偏技术需兼顾垂直与水平两个方向，垂直方向需重点控制盾构高程偏差，通过调整千斤顶受力分配实现高程精准调控，避免出现高程偏移超出设计范围；水平方向需控制盾构轴线偏移，结合地层变形监测数据缓慢调整推进方向，确保盾构沿设计轴线推进^[3]。地表沉降的主动控制可采用超前注浆加固措施，通

过在盾构前方地层注入加固材料，提升软土地层整体性与承载力，减少盾构掘进过程中土体扰动引发的地表沉降。超前注浆的加固范围一般控制在盾构前方3-5米，注浆孔间距在0.5-1米之间。盾构机防磕头、防栽头需通过设计改进实现，优化盾构机重心分布，强化前端支撑结构，调整千斤顶布置方式，提升盾构机在软土地层中的稳定性，避免掘进过程中出现磕头、栽头现象影响施工质量。

3.2 岩层与复合地层施工

滚刀与刮刀的组合配置需适配岩层与复合地层特性，根据地层硬度与岩性分布合理搭配两种刀具，岩层区域以滚刀为主承担破岩任务，软岩或土体区域以刮刀辅助切削，同时建立刀具磨损监测体系，实时掌握刀具磨损状态，及时进行更换与调整。岩渣破碎与排出存在明显技术难点，岩层破碎后易形成大块岩渣，需通过刀盘优化设计提升破碎效率，配套优化出渣系统，避免岩渣堵塞输送通道影响施工连续性。盾构机在断层破碎带的通过性保障需强化设备防护与参数调控，优化盾体密封性能，防止破碎带土体与地下水涌入，调整掘进参数降低推进速度，同步加强地层加固，提升断层破碎带地层稳定性，确保盾构机顺利通过。

3.3 高水压地层施工

密封系统可靠性设计聚焦主轴承密封与盾尾密封两大核心，主轴承密封需采用多道密封结构，提升密封性能以抵御高水压侵袭，防止地下水渗入设备内部损坏核心部件；盾尾密封需优化密封刷材质与布置密度，增强密封贴合度，避免水压作用下出现渗漏现象。泥水循环系统的压力稳定性控制需依托实时监测与动态调控，根据地层水压变化调整循环系统压力，确保系统压力与地层水压适配，避免压力波动引发泥膜破裂或地下水倒灌。突涌水事故的预防需建立完善防控体系，加强地层水压监测与地质勘察，提前识别突涌水风险点并采取加固措施；应急处理机制需明确处置流程，配备专用应急设备与材料，一旦发生突涌水事故，快速启动处置措施，控制事故扩大，保障施工安全。

4 盾构施工风险控制技术

4.1 盾构机姿态失控风险

姿态监测系统以激光导向与陀螺仪为核心组成，精度要求严格契合盾构施工设计规范，是保障姿态控制精准性的核心基础^[4]。激光导向系统需重点把控轴线定位精度，将定位误差严格限制在设计允许区间，避免轴线偏差累积破坏隧道结构完整性；陀螺仪需强化姿态角度监测的灵敏度与准确性，实时捕捉盾构姿态细微波动，为

后续姿态调整提供可靠数据支撑。姿态偏差的分级预警需结合隧道设计允许偏差范围,科学划分预警等级,各等级对应清晰预警阈值,确保预警信号具备针对性与有效性。纠偏流程依托实时监测数据有序推进,结合偏差等级、偏差类型及地层特性制定个性化纠偏方案,通过缓慢调整推进参数与千斤顶受力分配,逐步修正姿态偏差,杜绝纠偏过快引发的二次偏移,保障姿态调整的平稳性与精准性。人工干预与自动控制需建立高效协同机制,自动控制系统承担实时监测与基础参数调控任务,快速响应姿态细微变化实现常态化控制;人工干预聚焦异常工况处置,当自动控制系统无法有效调控偏差、监测数据出现异常波动或遭遇复杂地层干扰时,及时介入开展人工调整,形成优势互补,全方位保障姿态控制的精准性与可靠性。

4.2 地层变形与沉降风险

地层损失率的控制目标结合隧道设计标准与周边环境敏感程度综合确定,核心是将地层损失率控制在不危害周边建筑物、地下管线安全的合理范围,为施工安全与周边环境防护筑牢基础。实现路径贯穿盾构掘进全流程,通过精准调控掘进速度、刀盘转速等核心参数减少地层扰动;优化渣土改良工艺,提升渣土流塑性与稳定性,降低渣土输送过程中的地层损失;强化衬砌背后填充质量,提升填充密实度,弥补掘进过程中产生的地层空隙,多维度管控地层损失。分区注浆与动态调整的补偿技术是控制变形沉降的关键,根据地层变形实时监测数据科学划分注浆区域,针对不同区域变形程度、地层特性制定差异化注浆方案,动态调整注浆压力、注浆量与注浆时机,实现地层变形精准补偿,有效抑制沉降加剧。周边环境监测数据的实时反馈与高效应用是防控风险的重要支撑,在周边建筑物、地下管线上合理布设监测点位,实时捕捉变形数据,经快速处理后传输至施工控制中心,技术人员结合数据变化趋势调整施工参数,采取针对性防控措施,防范变形沉降对周边环境造成不利影响。

4.3 设备故障与停机风险

关键部件的冗余设计是降低设备故障停机风险的核

心举措,重点针对主轴承与刀盘驱动两大核心部件优化设计。主轴承采用双冗余结构,通过增设备用结构提升运行可靠性,避免单一部件损坏导致盾构机整体停机,保障施工连续性;刀盘驱动配备独立备用驱动单元,主驱动系统出现异常时可快速切换,维持刀盘正常运转,减少故障对施工进度的干扰。故障诊断系统需具备快速响应与精准定位能力,在设备关键部位布设高精度传感器,实时采集运行参数与状态数据,经实时分析、筛选与处理,及时识别异常故障信号,精准定位故障部位、类型及程度,为故障快速处置提供明确技术依据,缩短排查时间^[5]。备件储备与快速更换的保障兼顾合理性与高效性,结合关键部件损耗规律、施工进度需求及设备维护标准,合理储备主轴承、刀盘驱动等核心备件,避免备件短缺延误故障处置;制定标准化快速更换流程,明确操作步骤、规范与时间要求,配备专业技术人员与专用设备,提升更换效率,最大限度缩短故障处置时长,降低对施工进度的影响,保障盾构施工有序推进。

结束语

地铁工程盾构施工关键技术涵盖多方面内容,从施工原理与设备选型,到掘进参数精准控制,再到特殊地质条件下的针对性施工以及全面的风险防控,各环节紧密相连、相互影响。掌握并灵活运用这些技术,能够有效应对复杂地质条件带来的挑战,降低施工风险,保障盾构施工的安全、高效与高质量推进,为城市地铁建设提供坚实的技术支撑,推动城市交通基础设施不断完善。

参考文献

- [1]赵江.地铁工程建设中的盾构法施工技术探析[J].居业,2026(1):61-63.
- [2]万正飞.地铁复杂地层盾构施工关键技术及稳定性自助控制研究[J].粘接,2025,52(12):260-262,266.
- [3]欧广州,谢培娟,陆小龙.岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术探讨[J].四川建材,2025,51(6):182-184,199.
- [4]刘振武.地铁区间隧道盾构法施工中的测量关键技术[J].科学技术创新,2025(6):145-148.
- [5]贺勇,米少龙.岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术研究[J].现代隧道技术,2022,59(z1):903-910.