

大直径长距离顶管穿越复杂地层施工技术

杜 磊

陕西华山路桥集团有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：大直径长距离顶管穿越复杂地层施工面临诸多技术难题，其施工技术的优化关乎工程成败与周边环境安全。顶管机选型需适配地层特性，顶进控制要精准把握方向，减阻措施与地层改良可有效降低施工风险。针对施工中设备故障、顶进偏差、地层扰动等问题，强化设备管理、优化控制方法、加强地层保护等策略，能显著提升施工质量与效率，为类似工程提供关键技术支撑。

关键词：大直径长距离；顶管穿越；复杂地层；施工技术

引言

随着地下空间开发向纵深发展，大直径长距离顶管技术在穿越复杂地层工程中应用愈发广泛。然而，复杂地层条件下，施工面临顶管机适应性差、顶进过程控制难、地层扰动风险高等挑战，严重影响工程安全与进度。本文聚焦大直径长距离顶管穿越复杂地层施工，系统剖析关键技术，深入探讨常见问题及应对策略，旨在为提升该施工技术水平、保障工程顺利实施提供理论与实践参考。

1 大直径长距离顶管穿越复杂地层施工的重要性

大直径长距离顶管穿越复杂地层施工在现代化城市建设中具有不可忽视的重要性。随着城市化进程加速，地下空间开发需求激增，此类技术成为解决复杂地质条件下管线敷设难题的关键手段。在松软岩层、断层破碎带、含水层等复杂地质中，传统开挖施工易引发塌方、涌水等事故，而顶管技术通过非开挖方式实现地下穿越，有效规避了地质风险，保障了施工安全。该技术对城市运行的影响显著降低。传统开挖施工需大面积破路，易造成交通拥堵和中断，而顶管施工无需开挖地面，可穿越道路、铁路等交通要道，维持城市交通正常运转。非开挖施工避免了路面和绿化破坏，减少噪音粉尘污染，降低了对周边居民生活的干扰，提升了施工的社会接受度。在复杂地质条件下，大直径长距离顶管技术展现了卓越的适应性和经济性。通过泥水平衡、注浆润滑等工艺创新，该技术可应对高应力环境、软硬岩层交替等极端地质条件，确保管道顺利顶进。相较于盾构法，顶管施工具有造价低、工期短、对地基沉降适应能力强等优势，显著提升了工程综合效益。该技术对城市基础设施的长期稳定性至关重要。通过精确的导向系统和注浆加固，顶管施工可有效控制地层损失和沉降，避免对周边建筑物和地下管线造成破坏。在城市核心区等

敏感区域，该技术实现了静默施工、精准高效，保障了社会生活的连续性，为现代化城市的高质量发展提供了坚实的技术支撑。

2 大直径长距离顶管穿越复杂地层的关键施工技术

2.1 顶管机选型技术

大直径长距离顶管穿越复杂地层时，顶管机选型需综合地质特性、管径、顶进距离等因素，是保障施工顺利推进的核心基础。在富含卵石、砾石地层，泥水平衡顶管机优势明显。其刀盘配置高强度合金刀具，能破碎坚硬石块，借助泥水循环系统排出渣土，维持开挖面稳定。软土地层中，土压平衡顶管机通过控制土仓压力与推进速度的动态平衡，防止土体坍塌或隆起，螺旋输送机精准控制出土量，最大限度减少地层扰动。面对岩层，岩石顶管机的滚刀与切削刀协同作业，滚刀碾压破碎、切削刀刮削，实现硬岩高效开挖，护盾结构可保护顶管机本体及人员安全。不同类型顶管机的驱动系统与纠偏装置差异显著。电动驱动顶管机响应快、控制精度高，适用于顶进轨迹要求严格的场景；液压驱动顶管机推力与扭矩大，更适合长距离、大直径工程。合理选型能提升施工效率，降低设备故障率与维修成本，保障工程稳定推进。顶管机选型还需考虑中继间适配性。超长距离顶管工程中，若顶管机顶推力不足，需设置中继间辅助顶进。选型时应确保顶管机与中继间在结构设计、动力传输、控制方式等方面匹配，保障整个顶管系统协调运行^[1]。

2.2 顶进控制技术

顶进控制技术是大直径长距离顶管穿越复杂地层施工的核心，关乎施工质量与工程安全。顶推力精准调控是关键。其大小需综合地层阻力、管道自重、摩阻力等计算确定，施工中实时监测顶推力变化，结合地层条件调整顶进速度，避免推力过大致管道失稳或推力不足致

停滞。顶进轨迹精确控制也很重要。现代施工多采用激光导向系统,激光发射器固定于工作井,激光束投射至顶管机光靶,操作人员依光靶偏移调纠偏千斤顶行程,实现毫米级修正,保证沿设计线路顶进。穿越敏感区域时,用高精度陀螺仪与倾斜仪辅助监测,实时获取姿态数据,提前纠偏,保护周边环境。土压与泥水压控制是开挖面稳定的保障。通过压力传感器反馈土仓或泥水仓压力,自动调节螺旋输送机转速或泥水流量,维持压力平衡,防涌水、塌方。长距离顶进时,中继间设置与控制是重要补充。中继间可分散顶进阻力,减少主顶千斤顶负荷。施工中合理安排其启动顺序与顶推力分配,确保各中继间与主顶千斤顶协同,稳定顶进速度与推力,防管道变形或偏差。实时监测中继间密封和液压系统状态,保障安全可靠。

2.3 减阻措施技术

在大直径长距离顶管穿越复杂地层施工中,减阻措施技术对降低顶进阻力、提升施工效率至关重要。管道与周围土体的摩阻力是主要阻力,触变泥浆减阻是常用且有效的手段。触变泥浆由膨润土、水、添加剂按特定比例配制,具有触变性,灌注时呈液态,能在管道外壁形成泥浆套,将土体与管道的直接接触转化为泥浆润滑,降低摩阻力。施工前需依据地层特性优化泥浆配比,如在黏性土层增加添加剂以增强悬浮性和稳定性,在砂性土层提高泥浆黏度防止渗漏。泥浆灌注采用多点、分段、同步方式,保证泥浆套均匀完整,并定期检测压力和黏度,及时补浆。管道外壁减阻涂层技术也被广泛应用,该技术通过精准喷涂高分子减阻材料,可形成稳定低摩擦界面,进一步实现高效降阻。优化管道接口设计,采用柔性密封材料和合理结构,减少接口处摩擦阻力和应力集中,显著提升减阻效果。中继间的应用与减阻密切相关,设置时需考虑其与管道的密封和减阻,良好密封可防止泥浆泄漏,维持减阻效果;中继间结构设计应减少与土体摩擦,如采用光滑外壁和合理轮廓,降低额外阻力;其推进系统要与减阻措施配合,顶进时不破坏泥浆套,保持稳定减阻效果,提高顶管工程施工效率^[2]。

2.4 地层改良技术

地层改良技术是大直径长距离顶管施工中,应对复杂地层、保障施工安全与质量的关键手段。在软土地层,土体强度低、压缩性大,易引发顶管机下沉和地面沉降。高压旋喷注浆技术能有效改良土体,高压旋喷设备将水泥浆高速喷入土体,搅拌后形成有强度和止水性的加固体,提升土体承载能力与稳定性,为顶管机筑

牢基础。砂卵石地层透水性强、自稳性差,注浆加固技术可填充孔隙,增强土体密实度,降低地下水渗透系数,防范涌水、塌方。根据地层条件和工程需求,可选水泥-水玻璃双液浆、超细水泥浆等材料,精准控制注浆压力、量和时间,实现理想改良效果。岩石地层中,针对高硬度、难破碎的岩层,采用超前预裂爆破技术,在顶管机前方微差爆破,预先破碎岩石,降低开挖难度,提高施工效率。爆破后用注浆技术加固,防止岩石松动掉落影响施工。采用地层改良技术时,需注重与中继间施工配合。比如地层注浆改良时,避免对中继间安装和运行产生不良影响,合理规划注浆区域和顺序,保证中继间设置处的地层改良效果符合要求。中继间设置也应依据改良后地层特性,调整参数和施工工艺,适应地层变化,确保顶管施工顺利推进。

3 大直径长距离顶管穿越复杂地层施工中常见问题及应对策略

3.1 常见问题

3.1.1 设备故障频发

大直径长距离顶管穿越复杂地层施工中,设备故障频发严重影响工程进度与安全。顶管机长期处于高负荷运转状态,加之复杂地质条件下的岩石冲击、土体摩擦,致使刀盘、螺旋输送机关键部件磨损加剧,机械密封件易老化失效,引发设备故障。液压系统因长期高压工作,管路易出现渗漏、堵塞,液压油受污染导致元件磨损,影响顶推力与纠偏功能正常发挥。电气控制系统在潮湿、粉尘环境下,线路易短路、接触不良,传感器数据传输异常,造成设备运行参数失控。顶进过程中突发的卡管现象,会使顶管机承受巨大应力,导致驱动系统过载,甚至损坏传动部件,增加维修成本与施工风险。

3.1.2 顶进偏差失控

顶进偏差失控是施工中的棘手难题。在复杂地层环境下,地质条件差异显著,软硬不均的地层会给顶管机带来不均匀的受力,进而致使顶进方向偏离原本设计线路。顶管机自身结构若存在不对称、重心偏移等问题,或者纠偏千斤顶行程不一致,在长距离顶进过程中,这些因素会逐渐累积偏差。初始顶进时导轨安装精度不够、工作井基础发生沉降,也会让顶管机初始姿态出现偏差。在穿越既有建筑物、地下管线等特殊区域时,若对周边环境预估不足,未能及时调整顶进参数,顶进轨迹就会偏离,严重时可能破坏周边设施,严重影响工程质量与城市安全^[3]。

3.1.3 地层扰动与环境影响

地层扰动及环境影响是大直径长距离顶管施工不可

忽视的问题。在顶管施工时,开挖面土体卸载及顶管机持续推进挤压土体,会使地层应力重新分布,引发地面沉降或隆起。触变泥浆渗漏、泥浆套不完整等问题,会增大管道与土体间摩阻力,加剧地层扰动。在富水地层施工,若顶管机密封失效,易出现涌水、流沙,造成地层空洞,危及周边建筑物与地下管线安全。施工过程中产生的噪音、振动以及废弃泥浆排放,会对周边居民生活和生态环境造成不良影响。若处理方式不当,还可能引发二次污染,这不仅增加了环境治理成本,还会提高施工纠纷风险。

3.2 应对策略

3.2.1 强化设备管理与维护

(1) 建立完善的设备全生命周期管理体系,依据施工地质条件与设备运行状况,制定个性化的维护计划,定期对顶管机刀盘、螺旋输送机等关键部件进行检查,通过无损检测技术评估磨损程度,及时更换磨损超限部件。(2) 加强液压系统的精细化管理,设置高效的液压油过滤装置,定期检测液压油品质,防止油液污染;对液压管路进行压力测试与密封性检查,及时修复渗漏点,确保液压系统稳定运行。(3) 优化电气控制系统防护措施,采用防潮、防尘电气柜,对线路进行冗余设计,定期校准传感器,建立设备运行参数实时监测平台,通过数据分析提前预判设备故障隐患,实现预防性维护。

3.2.2 优化顶进偏差控制

(1) 在施工前对地层进行详细勘察,采用地质雷达、超前钻探等技术准确把握地层分布情况,根据地质特性优化顶管机选型与施工参数,确保顶管机在不同地层中受力均衡。(2) 提高设备安装精度,对工作井导轨进行严格的水平度与直线度校准,加强基础稳定性检测,采用高精度测量仪器实时监测顶管机初始姿态,确保顶进起始位置精准。(3) 完善顶进过程中的动态纠偏机制,结合激光导向系统、高精度陀螺仪与倾斜仪数

据,建立偏差预测模型,根据预测结果提前调整纠偏千斤顶行程与顶进速度,实现顶进轨迹的实时修正与精确控制。

3.2.3 加强地层保护与环境治理

(1) 优化触变泥浆配比与灌注工艺,根据不同地层特性调整泥浆性能参数,采用智能注浆设备实现多点、分段、同步精准灌注,实时监测泥浆压力与黏度,及时补浆维护泥浆套完整性,降低地层扰动。(2) 在富水地层施工时,加强顶管机密封结构与检测,采用双道密封装置并设置压力监测系统,一旦发现渗漏及时采取注浆封堵措施,防止涌水、流沙现象发生,保障地层稳定。(3) 建立施工环境综合管理体系,对施工噪音、振动进行实时监测,采用低噪音设备与隔振措施降低环境影响;对废弃泥浆进行集中处理,通过沉淀、过滤、固化等工艺实现泥浆无害化处置,减少环境污染风险^[4]。

结语

综上所述,大直径长距离顶管穿越复杂地层施工技术是一个系统工程,关键技术的合理应用与问题的有效解决对工程成功至关重要。通过科学选型顶管机、精准顶进控制、优化减阻与地层改良措施,配合针对性的问题应对策略,可显著提升施工质量与安全性。未来,随着技术的不断创新与发展,该施工技术将在复杂地质条件下的地下工程中发挥更大作用,值得进一步深入研究与实践探索。

参考文献

- [1]王宝龙.大直径超深长距离湖底岩石顶管遇不均匀地质夹层施工处理[J].中华建设,2020(31):136-137.
- [2]王清江,王悦.山区长距离大直径复杂地质顶管技术探讨与实践[J].山西建筑,2020,46(2):1-2.
- [3]闵瑞,李存笔,舒兆亚,等.中继间自动化控制系统在长距离顶管施工中的应用[J].江苏水利,2022(8):16-22.
- [4]陈黎明,李必正,何远圆.大直径长距离过江顶管工程设计与施工[J].供水技术,2023,17(5):25-30.