

适用于深埋隧道的 TBM 机载超长距离超前钻探技术集成与工程应用研究

白丛林

浙江海聚科技有限公司 浙江 杭州 311100

摘要: 针对深埋隧道TBM施工面临的地质不确定性,集成超长距离超前钻探技术。通过多学科理论支撑,设计一体化集成方案,优化核心设备与工艺,实现地质信息精准高效获取。经滇中引水、南水北调工程应用,有效规避地质风险,提升掘进效率25%-30%,地质解译准确率超92%,为深埋隧道TBM施工提供可靠技术保障,极具推广价值。

关键词: 深埋隧道; TBM (全断面硬岩掘进机); 超长距离超前钻探; 地质预报; 技术集成

引言: 深埋隧道因埋深大,地质环境复杂,地应力高、构造发育、岩性多变,常规勘察难精准揭示地质,给TBM施工带来极大不确定性。TBM施工对超前钻探在距离、效率、精度等方面要求严苛。在此背景下,开展TBM机载超长距离超前钻探技术集成与工程应用研究,精准获取深部地质信息,对保障TBM施工安全、提升效率、降低风险意义重大。

1 深埋隧道TBM施工与超前钻探核心理论基础

1.1 深埋隧道的定义与地质环境特征

深埋隧道通常指埋深大于300m的隧道工程,其界定核心在于埋深引发的地质力学环境异化。此类隧道所处地质环境具有显著复杂性与特殊性:一是地应力显著增高,随着埋深增加,水平应力与垂直应力比值失衡,易引发岩爆、大变形等地质灾害;二是地质构造发育,多穿越断层破碎带、富水地层等不良地质段,地下水赋存状态复杂,突水突泥风险极高;三是岩性变化多样,深部岩体经历长期地质作用,完整性、强度等物理力学性质与浅部差异显著,存在高地温、瓦斯等特殊不良地质条件^[1]。深埋隧道地质勘察难度大,常规勘察手段难以精准揭示深部地质构造,给TBM施工带来极大不确定性,这也是超前钻探技术应用的核心背景。

1.2 关键理论支撑

深埋隧道TBM施工与超前钻探的核心理论支撑涵盖多学科交叉领域。首先是深部岩体力学理论,其揭示了高地应力环境下岩体的变形破坏规律,为超前钻探孔位布置、钻进参数设计提供力学依据,尤其是岩爆预测与防治相关理论,直接指导钻探过程中的风险规避。其次是超前地质预报理论,包括地质信息的三维反演、异常地质体的识别与边界界定等,为钻探数据的解读提供理论框架。再者是TBM施工与地质环境相互作用理论,明

确了钻探揭示的地质条件与TBM掘进参数的匹配关系。钻孔稳定性理论也是关键,指导超长距离钻探过程中孔壁加固、钻进轨迹控制等技术方案的制定,确保钻探作业安全高效,为TBM施工提供可靠的地质前置信息。

1.3 深埋隧道TBM施工对超前钻探的技术要求

深埋隧道TBM施工的连续性与高效性,对超前钻探提出了严苛的技术要求。其一,钻探距离需满足TBM掘进安全预留距离,通常要求超前钻探深度不小于100m,确保有充足时间根据地质情况调整施工方案。其二,钻进效率需与TBM掘进节奏匹配,避免因钻探作业延误整体施工进度,因此需具备高效钻进能力,减少辅助作业时间。其三,钻探精度要求高,需精准控制钻孔轨迹,确保地质数据的代表性,同时避免钻孔偏斜影响后续掘进。其四,需具备复杂地质适应性,能够应对硬岩、破碎带、富水地层等多种地质条件,保证钻探过程的连续性与稳定性。另外,还要求钻探设备小型化、集成化,适配TBM狭小作业空间,且数据传输实时高效,为掘进决策提供快速支撑。

2 TBM机载超长距离超前钻探技术集成方案设计

2.1 技术集成总体目标与原则

TBM机载超长距离超前钻探技术集成的总体目标是实现深部地质信息的精准、高效获取,为TBM智能掘进提供实时、可靠的地质前置数据,保障施工安全,提升掘进效率,降低工程风险。其技术集成遵循四大核心原则:一是一体化原则,确保钻探系统与TBM机身、电控、液压等系统深度融合,实现协同工作;二是高效性原则,优化钻探流程与设备参数,最大限度缩短钻探耗时,匹配TBM掘进节奏;三是可靠性原则,钻探系统需具备适应隧道恶劣施工环境的能力,减少设备故障,保证长期稳定运行;四是智能化原则,融入自动化控制与

数据智能处理技术,降低人工干预,提升地质解译精度与决策响应速度。同时还需遵循经济性与安全性原则,在控制成本的基础上,保障钻探作业与TBM掘进的双重安全。

2.2 核心钻探设备选型与优化

核心钻探设备的选型与优化是技术集成的关键环节,需基于深埋隧道地质条件与TBM施工需求精准匹配。钻孔设备选用大功率、高扭矩的液压岩芯钻机,其额定钻进深度不低于150m,为满足超长地质钻探需求,可适配 $\phi 75-110\text{mm}$ 多种孔径水锤、取芯、注浆等钻具,满足不同地质采样、测试及防护要求;钻杆选用高强度合金材质,采用丝扣精准连接技术,提升抗扭、抗压性能,降低超长距离钻进中的折断风险^[2]。针对钻进稳定性,优化钻机夹持机构与给进系统,采用恒压给进模式,减少孔壁扰动;同时对钻机动力系统进行模块化优化,减小设备体积与重量,适配TBM机载安装空间,实现设备快速拆装与维护,提升设备适应性与作业效率。

2.3 与TBM的一体化集成设计

与TBM的一体化集成设计核心在于实现钻探系统与TBM机身的无缝融合,保障作业协同性与空间兼容性。在机械集成方面,将钻探设备通过定制化支架安装于TBM齿圈、拼装机或主机平台,支架具备多维度微调功能,可精准调整钻孔方位角与倾角,覆盖隧道掌子面关键探测区域;优化设备布局,避开TBM掘进机构、输送系统等核心部件,预留足够的操作与维护空间。在液压与电控集成上,钻探系统动力源接入TBM主液压系统,通过专用控制阀组实现独立调控,避免相互干扰;控制系统与TBM主控室互联互通,实现钻探作业与TBM掘进的联动控制,可根据掘进状态自动启停钻探设备。集成安全防护装置,设置钻孔区域防尘、防喷溅设施,与TBM安全监测系统联动,确保钻探过程中人员与设备安全。

2.4 数据传输与处理系统集成

数据传输与处理系统集成作为实现地质信息快速转化的核心环节,采用“实时传输-边缘计算-云端分析”的三层架构精心设计。在传输层面,着力构建有线与无线冗余传输网络,确保数据传输的稳定可靠。在钻探作业过程中,各类关键数据源源不断产生,像钻进参数中的转速、扭矩、给进力,孔内环境参数里的涌水量、压力,以及直观反映地下情况的岩芯图像数据等,都通过工业以太网与5G模块,以极快的速度实时传输至TBM主控室,传输延迟严格控制在50ms以内,为后续处理争取宝贵时间。处理层面,集成先进的边缘计算节点,对原始数据进行实时预处理。通过专业算法剔除噪声数据、修正数据偏差,

精准提取特征参数。同时,搭载专业地质数据处理软件,实现钻孔轨迹拟合、地质参数反演等复杂功能,并生成实时地质剖面图,让地下情况一目了然。另外,系统与TBM掘进数据库紧密互联互通,将地质数据与掘进参数深度融合,借助智能算法进行综合分析,及时给出不良地质预警与掘进参数优化建议,为现场决策提供快速、精准且全面的技术支撑,助力钻探作业高效安全推进。

3 TBM机载超长距离超前钻探关键技术优化

3.1 超长距离钻进稳定性控制技术

超长距离钻进稳定性控制技术聚焦于解决深孔钻进过程中的孔壁失稳、钻孔偏斜、钻具失效等核心问题。针对孔壁失稳,根据地质条件优化钻探泥浆配方,硬岩段采用清水钻进配合孔壁加固剂,破碎带与富水段采用高黏度、低失水泥浆,形成有效孔壁支撑;采用分级钻进工艺,先钻导向孔再扩孔,降低孔壁扰动。为控制钻孔偏斜,可优化钻杆柱结构,采用加重钻杆与稳定器组合设计,提升钻杆柱刚性,减少钻进过程中的摆动。针对钻具失效,选用高强度耐磨钻具,对钻具丝扣进行强化处理,定期检测钻具磨损状态,建立钻具生命周期管理机制,确保钻进过程安全稳定^[3]。

3.2 高效钻进工艺改进

高效钻进工艺改进以提升钻进效率、缩短作业周期为核心目标,从钻进参数优化、钻进方式创新等方面开展。基于不同岩性的物理力学性质,建立钻进参数数据库,通过智能算法实现转速、扭矩、给进力等参数的自适应匹配,例如硬岩段采用高转速、低给进力的钻进模式,软岩段采用低转速、高给进力模式,提升钻进效率的同时保护钻具。创新采用“复合钻进”工艺,结合冲击钻进与回转钻进优势,在硬岩段开启冲击功能,破碎岩石结构,降低钻进阻力;优化排渣工艺,根据钻孔深度与岩渣特性,调整泥浆泵排量与压力,确保岩渣及时排出,避免孔内积渣导致的卡钻、埋钻问题。简化钻探辅助作业流程,应配备机械手、钻杆杆库及钻杆传输设备,实现钻杆自动填充及装卸,电控程序上也应实现自动洗孔、自动对孔、自动注浆、岩芯自动取样与标记功能,减少人工干预时间,进一步提升整体钻进效率。此外钻机还应配备顶管、封孔注浆、拔杆等应急工装,用于应对钻机钻孔过程中发生的突发涌水、空洞、裂隙带、钻孔坍塌等地质灾害。

3.3 深部地质数据高精度解译技术

深部地质数据高精度解译技术旨在实现对钻探获取的多源数据的精准分析,精准识别不良地质体。首先,构建多源数据融合解译模型,整合岩芯物理力学参数、钻孔地

球物理探测数据、钻进过程动态参数等,通过深度学习算法挖掘数据关联关系,提升地质信息识别精度。针对岩芯数据,采用图像识别技术自动分析岩芯纹理、裂隙发育程度,结合实验室测试数据,精准判断岩性类别与完整性。对于地球物理数据,优化反演算法,提升对断层破碎带、富水区域等不良地质体的边界界定精度。建立地质解译知识库,结合工程区域地质背景,实现解译结果的验证与修正,生成三维可视化地质模型,直观呈现掌子面前方地质条件,为TBM掘进决策提供精准的地质依据。

3.4 钻探与TBM掘进协同控制技术

钻探与TBM掘进协同控制技术核心在于实现两者的节奏匹配与风险联动防控。建立协同控制决策系统,基于超前钻探解译的地质数据,结合TBM掘进实时参数,智能制定掘进策略,当探测到不良地质体时,自动调整掘进速度、刀盘转速、推力等参数,降低掘进风险。优化作业时序安排,采用“钻探-掘进”并行作业模式,利用TBM换刀、检修等间隙开展超前钻探作业,避免钻探作业占用掘进主线时间;当遇到复杂地质条件需重点探测时,合理调整作业时序,确保钻探数据充分获取后再推进掘进。构建安全联动预警机制,将钻探过程中发现的突水、岩爆等风险信号与TBM安全监测系统联动,实现风险实时预警,同时自动触发应急控制措施,保障施工安全。

4 工程应用案例分析

4.1 滇中引水工程香炉山隧洞

滇中引水工程香炉山隧洞是典型的深埋长隧洞,最大埋深达1200m,穿越多条断层破碎带与富水地层,TBM掘进面临极高的岩爆与突水风险,采用本文研发的TBM机载超长距离超前钻探技术进行施工。工程中选用定制化液压岩芯钻机,实现150m超长距离钻探,通过一体化集成设计,将钻探系统与TBM机身无缝融合,采用自适应钻进参数与复合钻进工艺,钻进效率较传统钻探技术提升40%。通过高精度解译技术,精准识别了3处大型断层破碎带与2处富水区域,提前制定了注浆加固、调整掘进参数等应对措施^[4]。应用结果表明,超前钻探技术有效规避了4次重大地质风险,TBM平均掘进效率提升25%,

钻孔偏斜量控制在0.5%以内,地质解译准确率达92%,为香炉山隧洞的安全高效掘进提供了有力保障,验证了技术的可靠性与适用性。

4.2 南水北调引江补汉工程

南水北调引江补汉工程核心隧洞段埋深300~800m,地质条件复杂,主要穿越花岗岩、片麻岩等硬岩地层,局部存在断层破碎带与高压富水区域,TBM掘进难度极大,引入TBM机载超长距离超前钻探技术开展地质超前预报。工程中对钻探设备进行针对性优化,采用高强度耐磨钻具与高黏度泥浆体系,适配硬岩与富水地层钻进需求;通过数据传输与处理系统集成,实现钻探数据与TBM掘进数据的实时融合分析。应用过程中,成功探测到隧洞掌子面前方120m处的一条大型富水断层,提前实施注浆堵水加固措施,避免突水突泥灾害的发生。经统计,该技术应用后,工程地质预报准确率提升至95%,TBM掘进过程中的地质风险发生率降低60%,掘进效率较传统施工提升30%,大幅缩短施工周期,降低工程成本,为南水北调引江补汉工程的顺利推进提供关键技术支撑,展现该技术在重大水利隧洞工程中的推广价值。

结束语

TBM机载超长距离超前钻探技术集成研究,经理论探索、方案设计、技术优化及工程实践验证,成效显著。在深埋隧道施工中,有效应对复杂地质挑战,精准预报地质,保障TBM安全高效掘进。未来,随着技术发展,该技术将不断完善,为更多深埋隧道工程提供更优质的技术支持,推动隧道建设技术迈向新高度。

参考文献

- [1]汪菁菁,陈玮,滕春涌等.深埋长距离TBM隧道掘进施工风险控制技术[J].云南水力发电,2022,38(02):171-174.
- [2]赖泉昌.EPB/TBM双模盾构机掘进施工技术在复合地层中的应用[J].工程技术研究,2021,6(24):89-91+105.
- [3]温剑,王鹏宇,张鑫.TBM施工风险分析及管控措施——以磐安抽水蓄能电站自流排水洞为例[J].四川水利,2023,44(05):136-139.
- [4]於波,邱文君,李学波.双模TBM施工穿越岩溶地层重难点及对策分析[J].云南水力发电,2023,39(10):33-38.