

水利水电工程隧洞开挖与支护施工技术创新

唐仕兴

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 针对水利水电工程隧洞复杂地质条件下传统开挖与支护技术的局限性, 本文聚焦施工技术创新实践展开研究。系统阐述了智能化精准爆破、盾构/TBM优化、不良地质段专项开挖等创新开挖技术, 以及智能化喷锚、新型组合式支护、超前支护等创新支护技术, 并介绍了配套的智能化监测与控制体系。研究表明, 这些创新技术可有效提升隧洞施工的精准性、安全性与效率, 解决复杂地质下的施工难题。本文成果为水利水电工程隧洞施工技术升级提供了实践参考。

关键词: 水利水电工程; 隧洞; 开挖; 支护; 技术创新

引言: 随着水利水电工程向复杂地质区域拓展, 隧洞工程面临的地质条件愈发恶劣, 传统开挖与支护施工技术已难以满足安全、高效的建设需求, 存在开挖精度低、支护适配性差、风险管控滞后等问题。隧洞施工质量直接决定工程整体效益与长期稳定性, 技术创新成为突破施工瓶颈的核心路径。因此, 本文围绕隧洞开挖与支护施工技术创新展开探讨, 梳理创新技术的实践要点与应用逻辑, 旨在为提升水利水电隧洞工程建设水平、推动行业技术进步提供理论与实践支撑。

1 水利水电工程隧洞工程地质特征与施工难点

1.1 典型隧洞工程地质条件分析

水利水电工程隧洞多穿越复杂地质区域, 典型地质条件呈现显著多样性与复杂性。多数隧洞沿线涉及沉积岩、岩浆岩及变质岩等多种岩性, 岩体完整性差异较大, 常见风化破碎带、节理裂隙密集区等不良地质段。水利工程区域水文地质条件复杂, 易遭遇富水地层、承压水层, 地下水的渗透压力不仅会增加开挖难度, 还可能引发突水突泥风险。部分隧洞需穿越断层破碎带, 断层破碎带内岩体松散、稳定性极差, 给隧洞开挖与支护带来极大挑战, 其地质条件的不确定性直接影响施工方案的制定与实施效果。

1.2 隧洞开挖与支护核心施工难点

隧洞开挖核心难点集中在精准控制开挖轮廓与围岩稳定性上, 在复杂地质条件下, 开挖扰动易导致围岩变形、坍塌, 尤其在富水破碎带, 突水突泥事故风险极高。同时大断面、长距离隧洞开挖面临通风、排水、出渣效率低等问题, 制约施工进度。支护施工的核心难点则在于支护时机的精准把控与支护结构的适配性, 需根据围岩变形动态及时调整支护方案, 避免支护不及时或支护强度不足引发安全隐患。

1.3 传统施工技术局限性

传统隧洞开挖技术以钻爆法为主, 存在开挖精度低、围岩扰动大等缺陷, 尤其在复杂地质段易引发围岩失稳, 且施工效率受人为因素影响较大。传统支护技术多采用被动式支护模式, 如常规喷锚支护、钢拱架支护等, 对围岩变形的适应性较差, 难以实现支护与围岩的协同承载。同时传统施工技术缺乏精准的实时监测手段, 无法及时掌握围岩变形与支护结构受力状态, 易导致支护方案调整滞后。传统技术在环保性上存在不足, 开挖过程中粉尘、噪音污染较严重, 不符合现代工程绿色施工的要求^[1]。

2 水利水电工程隧洞开挖施工技术创新

2.1 智能化精准爆破开挖技术

智能化精准爆破开挖技术依托现代传感、定位及智能控制技术, 实现爆破全流程精准管控, 核心创新实践如下: (1) 爆破参数智能优化设计, 基于围岩勘察数据构建三维地质模型, 通过数值模拟动态优化孔位、孔深、装药量等参数, 利用智能算法整合岩体力学特性, 自动匹配最优参数组合, 规避传统经验设计的效果波动问题, 保障隧洞轮廓平整, 控制超欠挖量。(2) 爆破施工智能定位与精准作业, 结合无人机测绘与激光定位实现孔位厘米级精准标记, 借助智能凿岩台车完成自动化钻孔, 保障孔位参数与设计契合; 配备智能装药设备, 按孔位参数自动调节装药量, 实现装药均匀精准。(3) 爆破过程实时监测与反馈调控, 在爆破区域布设传感器, 实时采集爆破冲击波、围岩振动等数据并同步至控制中心, 系统自动分析数据偏差, 评估爆破效果与围岩稳定性, 反馈至参数设计模块形成闭环管控, 持续提升爆破精度与安全性。

2.2 大型盾构/TBM掘进技术优化与创新应用

针对隧洞大断面、长距离、复杂地质掘进需求,大型盾构/TBM掘进技术通过结构优化、智能升级及适配改造实现效能提升,创新实践重点:(1)掘进设备结构优化与适配改造,结合水文地质特点,定制化优化刀盘、护盾及推进系统:采用高强度耐磨刀盘与可更换刀具,提升硬岩、破碎岩切削能力;优化护盾刚度与密封性,增强富水地层抗渗性;改进推进系统动力分配,实现推进速度与推力精准调控,适配不同地质掘进。(2)掘进过程智能化管控升级,集成BIM、物联网与大数据技术构建智能管控平台,通过设备传感器实时采集掘进速度、刀盘转速等数据,结合BIM模型实现可视化监控;利用大数据分析预测刀具磨损与围岩变形趋势,预警设备故障与施工风险,通过智能控制系统自动调节掘进参数,保障掘进平稳连续。(3)高效排渣与同步衬砌协同创新。优化排渣系统,采用高压水枪冲洗与螺旋输送机组合模式,提升黏土地层、富水地层排渣效率,避免通道堵塞;开发同步衬砌技术实现掘进与衬砌并行,缩短工期。

2.3 不良地质段开挖专项创新技术

针对富水、破碎带等不良地质,通过超前预处理、开挖优化、动态支护协同等专项技术实现安全高效开挖,具体实践:(1)超前地质探测与预处理创新,采用地质雷达、超前钻探等综合探测手段,精准探明不良地质范围、富水及岩体破碎情况;基于探测结果实施超前注浆加固,通过定制化注浆材料与智能注浆设备,精准控制注浆范围、压力及用量,提升破碎岩体完整性与抗渗性;对富水段采用超前钻孔排水、轻型井点降水等方式,降低地下水压力,创造安全开挖条件。(2)开挖方式优化与精细化施工,针对围岩稳定性差的特点,采用台阶法、CD法等分部开挖方式,减少单次开挖扰动范围;严格控制循环进尺,缩短开挖面暴露时间,优化开挖顺序,优先开挖稳定区域再推进核心破碎区;采用静态破碎、机械切削等弱爆破或无爆破技术,最大限度降低围岩扰动,规避坍塌、突水风险。(3)动态支护协同与实时调控技术,建立开挖与支护协同机制,采用“超前支护+初期支护+二次支护”复合体系,根据围岩变形动态调整支护时机与参数;初期支护采用高强度锚杆、钢拱架、喷射混凝土组合形式,通过智能喷锚设备精准布设;利用实时动态监测系统跟踪围岩变形与支护受力状态,数据超预警阈值时及时采取增设锚杆、加密钢拱架等补强措施,保障支护安全稳定,实现开挖与支护动态平衡^[2]。

3 水利水电工程隧洞支护施工技术创新

3.1 智能化喷锚支护技术

智能化喷锚支护技术融合智能定位、精准控制及自

动化作业技术,突破传统人工经验依赖局限,实现支护精准化、高效化与标准化,核心创新实践体现在:(1)智能定位与工况感知,依托激光扫描与BIM建模技术,快速获取隧洞开挖断面轮廓及围岩形态数据,精准定位支护薄弱区域与喷锚点位;通过布设压力、位移传感器实时感知围岩变形与喷层受力状态,为喷锚参数动态调整提供数据支撑,保障支护时机与强度适配围岩工况。(2)精准喷射与自动化作业,采用智能喷射机器人,借助自动导航系统沿隧洞断面匀速移动,结合定位数据精准控制喷射角度与范围;搭载流量与压力闭环控制系统,根据地质条件自动调节混凝土喷射量与压力,确保喷层厚度均匀,规避漏喷、超喷问题;配套智能锚杆施工设备,实现锚杆孔位精准钻孔、自动推送及锚固剂精准注入,提升安装质量与效率。(3)喷锚质量智能监测与管控,采用超声波、雷达等无损检测技术,实时检测喷层厚度、密实度及锚杆锚固力,检测数据自动上传管控平台;系统对比分析数据与设计标准,生成质量评估报告,自动标记不合格区域并推送整改方案,形成“定位-作业-监测-整改”全流程闭环管控,保障支护质量。

3.2 新型组合式支护结构技术

新型组合式支护结构以钢拱架、锚杆、喷射混凝土协同承载为核心,通过参数优化、材料升级及工艺改进,提升支护体系承载能力、稳定性与耐久性,创新实践重点包括:(1)支护结构参数优化设计,基于围岩力学特性与隧洞受力分析,采用数值模拟技术优化钢拱架型号、间距,锚杆长度、直径及喷射混凝土强度等级等参数;调整各构件空间布置,构建“刚柔并济”的协同承载体系,充分发挥钢拱架刚性支撑、锚杆锚固拉结及喷射混凝土封闭防护与协同承载作用,提升整体抗变形能力。(2)支护材料适配与性能升级,选用高强度抗震钢拱架,增强抗冲击与抗变形能力;采用玻璃钢锚杆、中空注浆锚杆等高性能材料,提升锚固力与耐腐蚀性;研发纤维增强、早强快硬等特种喷射混凝土,适配不同地质条件,提升喷层抗裂性、耐磨性与早期强度,缩短养护周期。(3)组合施工工艺协同优化,创新钢拱架激光定位安装技术,保障其中心轴线与隧洞设计轴线偏差符合规范;优化锚杆钻孔、清孔、注浆、锚固一体化工艺,提升锚固可靠性;改进“初喷-安装钢拱架-复喷”施工顺序,确保喷层与围岩、钢拱架紧密贴合,强化协同承载效果。

3.3 超前支护技术创新

超前支护技术创新聚焦富水、破碎带等不良地质段需求,通过结构优化、工艺改进及精度提升,实现围岩

提前加固防护,核心创新实践如下:(1)支护结构形式优化,针对不同不良地质,优化大管棚、小导管结构设计,采用大直径、长距离管棚扩大支护覆盖范围;改进小导管梅花形、扇形等差异化布置方式,增强锚固效果;研发管棚-小导管联合、管棚-注浆帷幕协同等新型复合支护结构,提升复杂地质适配性。(2)注浆材料与工艺创新,研发超细水泥-水玻璃双液浆、化学浆液等高性能注浆材料,提升渗透性、凝结速度与结石体强度,适配不同孔隙率、含水量围岩;采用分段、压力控制、间歇等精准注浆技术,实时监测注浆压力与用量,控制浆液扩散范围,避免注浆不足或过量;依托智能化注浆设备,实现注浆过程自动化控制与数据记录,提升施工标准化水平。(3)施工精准度控制技术,采用地质雷达、超前钻探等技术精准探明不良地质范围与水文条件,为参数设计提供依据;利用导向钻进技术控制大管棚、小导管钻孔轨迹,确保按设计角度与深度布设。

3.4 后期支护补强与耐久性提升创新技术

后期支护补强与耐久性提升技术创新围绕长期服役需求,通过工艺优化、材料应用及长效监测,提升支护长期稳定性与使用寿命,具体创新实践包括:(1)后期补强工艺优化,针对支护裂缝、变形等病害,采用预应力锚杆、锚索补强提升承载能力;通过高压喷射注浆加固薄弱区域,填充支护与围岩空隙;创新碳纤维布、钢板粘贴补强工艺,增强抗裂性与承载能力,且降低对原有支护的扰动。(2)防腐抗渗与耐久性材料应用,采用热镀锌钢拱架、防腐涂层锚杆等防腐材料,提升潮湿环境适应性;在喷射混凝土中添加防腐、抗渗外加剂,增强抗渗性与抗冻性;研发新型防护涂层材料,对暴露支护构件进行防护,阻隔水、氧气等腐蚀介质,延长使用寿命。(3)长效监测与动态补强机制,建立支护长期健康监测监测系统,布设位移、应力、腐蚀等传感器实时监测服役状态;利用大数据分析预测数据趋势,提前识别病害隐患;制定动态补强方案,根据监测结果及时采取针对性措施,实现“监测-预警-补强”动态管控,保障长

期稳定服役^[3]。

4 隧洞开挖与支护施工智能化监测与控制技术创新

隧洞开挖与支护施工智能化监测与控制技术创新,通过多技术融合实现施工全流程动态管控,保障施工安全与质量,核心实践包括:(1)多维度智能监测系统构建,整合地质雷达、光纤传感、无人机测绘等技术,布设覆盖围岩变形、支护结构应力、地下水渗流等指标的监测网络,实现数据实时采集与无线传输,打破传统单点监测局限。(2)智能化管控平台搭建,基于BIM+GIS技术构建可视化管控界面,集成监测数据、施工参数与地质信息,通过大数据分析实现围岩稳定性预判、施工风险预警;联动施工设备控制系统,实现开挖、支护参数的自适应调节,形成“监测-分析-预警-调控”闭环。(3)精准控制技术应用,采用智能定位与自动纠偏技术,保障开挖轮廓与支护构件安装精度;通过远程操控系统实现高危区域施工无人化作业,提升施工安全性与管控效率^[4]。

结束语

本文系统梳理了水利水电工程隧洞开挖与支护施工领域的多项创新技术实践,涵盖开挖、支护及智能化监测控制等核心环节。这些技术通过融合智能装备与先进工艺,有效破解了传统施工模式的诸多难题,显著提升了施工安全性、精准度与效率。未来要进一步加强创新技术的集成应用与迭代优化,结合工程实际深化智能化管控体系建设。

参考文献

- [1]何志英.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用研究[J].漫科学(科技应用),2025(6):22-24.
- [2]吴涛.水利水电工程隧洞开挖与支护施工技术创新[J].全面腐蚀控制,2025,39(5):99-101.
- [3]侯东赛.水利水电工程中隧洞衬砌及喷锚支护加固施工关键技术研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(12):029-032.
- [4]杨家桃.水利工程隧洞开挖施工关键技术探析[J].全面腐蚀控制,2025,39(7):129-131.