

复杂地质条件下水利隧洞施工关键技术研究

刘端婧 王 博

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘要：水利隧洞作为水资源调配与能源开发的重要载体，其建设质量直接影响工程综合效益。在复杂地质环境中，隧洞施工常遭遇岩体破碎、高地应力、地下水活动等不利因素，易引发塌方、渗漏等工程灾害，严重威胁施工安全和工程耐久性。传统施工技术难以有效应对多变的工程地质条件，亟需通过技术创新实现地质风险精准识别与施工过程协同控制。本文聚焦复杂地质环境下水利隧洞施工的关键技术体系，希望通过系统化的技术集成与工艺优化，构建适应性强、可靠性高的施工解决方案，为类似工程提供科学指导。

关键词：复杂地质条件；水利隧洞；围岩稳定性

复杂地质环境对水利隧洞工程的施工安全与长期稳定性构成严峻挑战。受构造运动、岩性非均质及水文条件耦合作用影响，隧洞穿越区常呈现软硬互层、节理密集带、岩溶发育等复杂地质特征，导致施工过程中围岩大变形、突发性渗流等灾害频发。现有技术体系中，地质条件动态响应机制与施工工艺适配性不足的问题日益凸显，亟需探索精细化地质判识与工程措施联动的技术路径。

1 复杂地质条件下水利隧洞施工特点

复杂地质条件下水利隧洞施工具有显著的不确定性与动态响应特征。首先，地质条件呈现多尺度非均质性，围岩岩性突变频繁，如软弱夹层与硬岩交错分布、节理裂隙密集发育等，导致开挖面自稳能力差，易引发局部塌方或岩爆^[1]。其次，水文地质环境复杂，高水压裂隙带、岩溶管道或富水断层等隐伏构造普遍存在，施工过程中突水涌泥风险高，且渗流路径动态变化，加剧了地下水控制难度。此外，高地应力、构造破碎带等易诱发围岩大变形，支护结构需兼具即时承载与长期协调变形能力。施工过程需实时应对地质条件的空间异质性与时间演化特性，强调地质预判、动态设计与工艺调整的协同耦合，对机械化作业、安全监测及风险防控提出更高集成化要求。

2 复杂地质条件下水利隧洞施工的重要性

2.1 保障工程安全与人员生命安全

复杂地质条件中，隧洞施工面临围岩失稳、突水涌泥、岩爆等突发性灾害的高风险。例如，断层破碎带或富水岩层在开挖过程中可能因应力释放引发大规模塌方或高压涌水，直接威胁施工人员安全及设备完整性。若缺乏精准的地质预判技术与快速响应措施，灾害发生概率显著增加，甚至导致工程中断或人员伤亡。通过超前

地质预报实时探明隐伏构造，结合围岩稳定性动态评估系统，可提前识别风险区域。同时，采用超前注浆加固、钢拱架快速支护等应急技术，能有效抑制灾害扩展，确保施工环境安全可控，为人员与设备提供基础保障。

2.2 确保工程功能与长期稳定性

复杂地层中，隧洞结构易受地下水侵蚀、围岩蠕变及高地应力作用影响，导致衬砌开裂、渗漏或变形超标。例如，穿越岩溶区时，未封堵的溶洞可能引发持续性渗漏，破坏隧洞输水功能；高地应力区围岩大变形若未及时控制，将挤压支护结构，造成衬砌破损。通过高压灌浆封堵裂隙、自适应支护体系等技术，可精准匹配围岩变形特性，增强结构抗渗性与承载能力。此外，施工过程中动态调整支护参数，结合长期监测数据优化维护策略，能够显著延长工程寿命，避免因地质缺陷导致功能失效或后期高昂修复成本^[2]。

2.3 支撑区域水资源优化配置与灾害防治

水利隧洞是水资源跨区域调配、防洪排涝及水力发电的核心基础设施，其施工质量直接影响区域水安全与生态平衡。在复杂地质区，若施工技术不足导致隧洞轴线偏移或结构破损，可能引发地表沉降、地下水系紊乱等次生灾害，破坏周边农田、居民区或生态敏感区。例如，断层带施工扰动可能激活地下水流场，造成泉眼枯竭或湿地退化。而通过岩体分级开挖、生态敏感区保护性掘进，可最大限度减少对地质环境的扰动。同时，精准的隧洞轴线控制与结构防渗设计，能够保障输水效率，避免水资源浪费，为区域防洪抗旱、生态补水等提供可靠工程支撑，推动可持续发展目标的实现。

3 复杂地质条件下水利隧洞施工关键技术

3.1 地质超前预报与风险预警技术

地质超前预报与风险预警技术是复杂地质隧洞施工

的核心前置保障,其核心在于构建多源信息融合的探测体系与动态预警机制。技术实施以“长-短结合、空-地协同”为原则,综合运用地球物理探测、地质钻探及实时监测手段,形成覆盖施工掌子面前方30~200米范围的立体化地质信息感知网络。在长距离预报阶段,采用TSP地震波反射法、瞬变电磁法等物探技术,结合区域地质构造分析,解译岩体完整性、富水区及断层破碎带的空间展布特征;短距离精探阶段则依托地质雷达、钻孔成像技术,通过高频电磁波反射信号与钻孔岩芯取样,精准识别掌子面前方5~30米范围内的岩性界面、裂隙密集带及隐伏含水构造。探测数据经三维地质模型逆向重构后,可直观呈现围岩结构面产状、渗流通道网络及潜在灾害体的空间演化规律,为施工方案动态优化提供量化依据。

风险预警体系构建过程中,应布设微震监测阵列、围岩收敛监测点及渗压传感器,实时获取开挖扰动下的围岩应力重分布、变形速率及地下水压力变化数据,结合机器学习算法建立灾害前兆特征识别模型。当监测指标超越预设阈值时,系统自动触发分级预警信号,同步生成风险处置建议。该技术贯穿于隧洞全断面掘进周期,通过“探测-解译-预警-处置”闭环管理,显著提升隐伏地质风险的主动防控能力,避免灾害滞后响应导致的工程损失^[3]。在实践中,在每循环开挖前,严格按照“物探先行、钻探验证”流程执行,确保超前预报成果与掌子面揭露地质条件的一致性。对于高风险区段,采用多孔位交叉钻孔验证技术,通过钻孔岩粉成分、涌水量及钻进速度参数的综合判识,修正物探解译误差。同时,建立地质信息动态数据库,将历史探测数据、施工响应记录与实时监测结果集成分析,形成具有时空连续性的风险演化图谱,为后续施工段的灾害预判提供经验支撑。

3.2 围岩动态支护与变形控制技术

围岩动态支护与变形控制技术核心在于构建“监测-评价-调控”一体化的闭环支护体系,实现支护参数与围岩力学响应的动态适配。技术实施以“分级控制、时序优化”为原则,基于围岩实时变形特征与应力演化规律,采用差异化支护结构组合与分阶段加载策略。在初支阶段,通过喷射钢纤维混凝土快速封闭开挖面,抑制表层围岩松弛,同步布设可伸缩式锚杆或预应力中空注浆锚杆,利用锚杆轴向变形能力吸收部分围岩变形能,避免应力集中导致支护结构早期破坏。针对大变形区段,采用双层初期支护设计,内层设置可压缩垫层或U型钢拱架,通过预留变形量实现围岩应力释放与支护体承

载的时序协调,降低支护结构承受的峰值荷载。

同时,在沿隧洞轴线布设光纤光栅传感器、多点位移计及应力计,实时采集围岩径向收敛、深部位移及支护结构应力分布数据,结合数值反演模型定量评价围岩塑性区扩展深度与稳定性阈值。当监测数据超过预设警戒值时,启动动态调控程序:通过增补径向注浆导管改良围岩力学参数,调整二次衬砌施作时机;对持续变形段采用预应力锚索进行补强,施加主动约束力抵消围岩流变效应。对于软岩或断层影响带,采用注浆锚杆与格栅钢架联合支护,通过注浆加固圈与刚性支撑体的协同作用,形成“外柔内刚”的复合承载结构,有效控制变形速率并提升围岩自承能力。施工工艺的精细化控制层面,应采用“短进尺、弱爆破”开挖工法,最大限度减少对围岩的扰动,开挖后立即施作初喷混凝土封闭岩面,防止风化剥落。针对不同岩体质量分区,制定差异化的支护时序:完整硬岩段采用“一次支护到位”模式,软弱破碎段则采用“分次加载、渐进强化”策略,通过调整锚杆排距、喷射混凝土厚度及钢拱架密度的空间组合,实现支护刚度与围岩变形特征的精准匹配。在衬砌阶段,采用模筑混凝土与可调式模板系统,预留变形补偿空间,避免衬砌过早承受围岩压力。

3.3 高压涌水防治与堵漏技术

复杂地质环境中,高压涌水问题始终是水利隧洞施工面临的核心挑战之一。其防控体系需基于地下水赋存特征与渗流路径的精准识别,运用多技术协同实现堵漏效果与工程安全的动态平衡。高压涌水防治与堵漏技术实施以“分级管控、分区治理”为原则,通过超前探明含水构造空间分布特征,能够针对性设计注浆堵漏方案。具体来说,在超前探测阶段,采用地质雷达、瞬变电磁法与钻孔成像技术,结合钻孔渗压监测数据,分析裂隙发育程度、导水通道连通性及静水压力梯度,划分涌水风险等级并预判潜在突涌点位。针对高风险富水区,采用超前帷幕注浆工艺,通过多排径向钻孔形成环状注浆加固圈,优先注入水泥-水玻璃双液浆或超细水泥基材料,充填岩体裂隙并降低渗透系数,在开挖轮廓线外形成截水屏障,阻断地下水向隧洞内的集中渗流路径^[4]。

针对不同规模渗流通道,采用差异化注浆策略,对于弥散型裂隙网络,采用孔口封闭灌浆法,通过分段升压注浆控制浆液扩散半径,确保浆液在高压下充分渗透至微裂隙;对于集中涌水孔洞,采用模袋注浆或袖阀管定向注浆技术,利用高分子纳米材料快速凝结特性,在出水点周围形成局部封堵体。施工过程中,通过实时监测注浆压力、流量及地层吸浆量变化,动态调整浆液

配比与注浆速率,避免浆液过度扩散造成材料浪费或堵漏盲区。对于高压动水条件,采用“先排后堵”工艺,通过钻孔引流降低水压后实施复合注浆,增强堵漏体抗渗稳定性。堵漏完成后,布设渗压监测孔与检查孔,通过压水试验验证堵水效果,确保渗流量满足施工安全阈值。在隧洞掘进过程中,沿洞轴线布设分布式光纤渗流监测系统,实时捕捉衬砌后缘渗漏点位置与渗流量变化,结合围岩应力-渗流耦合模型,评估堵漏结构的长期服役性能。针对局部渗漏复发区域,采用化学注浆补强技术,注入聚氨酯或环氧树脂类材料,通过材料遇水膨胀特性实现渗流通道二次封堵。同时,在永久衬砌施工阶段,采用抗渗混凝土与可重复注浆管一体化设计,预埋注浆导管网络,为运营期渗漏修复提供技术冗余。

3.4 破碎带安全掘进与协同加固技术

随着水利隧洞工程向深部复杂地层延伸,破碎带安全掘进与协同加固技术成为保障工程安全的核心支撑。其核心在于通过“超前改良、分步释能、协同承载”的综合技术路径,实现破碎岩体的渐进式稳定与结构安全。在超前探测阶段,采用TSP地震波反射法与钻孔全景成像技术,精准圈定破碎带边界及内部结构面空间展布,结合岩体质量分级确定开挖预留变形量及支护强度需求。针对宽幅破碎带,采用“微台阶分序开挖”工法,通过预留核心土抑制掌子面垮塌,控制单循环进尺至0.5~1.0米,同步实施超前小导管注浆预加固,注入超细水泥-水玻璃双液浆充填裂隙网络,形成厚度不小于3米的改良承载拱,降低开挖对围岩的二次损伤。

在初支阶段采用“钢拱架+注浆锚杆+钢筋网”组合支护,通过径向系统锚杆植入深度穿透破碎带至稳定岩体,利用注浆压力恢复岩体黏聚力;钢拱架安装后及时喷射钢纤维混凝土,形成“壳-架”复合承载体,兼顾即时支护刚度与长期变形协调能力。针对高应力破碎带,增设可压缩型锁脚锚管,允许初期围岩应力适度释放,避免支护结构过载破坏。在二次衬砌阶段,采用“先柔

后刚”设计理念,衬砌混凝土内预埋可调式伸缩缝与注浆导管,通过后期补偿注浆消除围岩蠕变引起的接触空腔,确保衬砌与围岩的紧密耦合。与此同时,布设光纤光栅传感器与多点位移计,实时监测破碎带段围岩收敛速率、支护结构应力重分布及注浆体完整性数据,结合三维数值反演模型评估围岩塑性区扩展趋势。当监测数据接近安全阈值时,启动应急调控程序:通过加密径向注浆孔改良破碎岩体力学参数,增设预应力锚索构建主动承载网络,或调整衬砌施作时机以平衡围岩应力释放与结构承载需求^[5]。对于极破碎岩体,采用管棚超前支护与注浆锚固桩联合技术,形成“纵向连续梁+横向增强体”的空间加固体系,显著提升破碎带整体稳定性。

结束语

复杂地质条件下水利隧洞施工技术体系通过地质风险精准识别、围岩协同控制、涌水高效防治及破碎带安全掘进等关键技术的集成创新,实现了施工过程风险可控与工程质量的全面提升,为类似工程提供了系统化解决方案,推动了地质适配性施工技术的标准化与智能化发展。未来,相关研究人员需进一步深化多学科交叉融合,强化智能监测与绿色施工技术应用,助力水利隧洞工程在复杂地层中实现更高水平的安全、高效与可持续发展。

参考文献

- [1]张金兰.大型水利工程中复杂地质条件下的施工技术挑战与解决方案[J].散装水泥,2025,(01):112-114.
- [2]刘松良.复杂地质条件下水利工程施工地基处理灌浆技术研究[J].工程技术研究,2024,9(22):85-87.
- [3]田光辉.复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降水施工方法研究[J].价值工程,2024,43(26):67-70.
- [4]陈政.复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降水施工方法研究[J].甘肃科学学报,2024,36(03):100-106.
- [5]白玉龙.沙坡头水利枢纽复杂地质条件下的帷幕缺陷处理经验分析[J].水利建设与管理,2018,38(04):67-71.