

水利隧洞掘进中不良地质段处理技术分析

谭金玮

鄂北地区水资源配置工程建设与管理局(筹) 湖北 武汉 430000

【摘要】：水利隧洞掘进常遭遇破碎围岩、富水断层等不良地质条件，由此引发的地层失稳、工艺适配不足及监测管控缺失，持续制约施工安全与进度。本文结合鄂北工程隧洞施工实际情况，围绕地层稳定控制、掘进工艺适配、动态监测预警三个维度，系统梳理了超前预注浆加固、复合支护体系构建、爆破参数动态优化及全过程地质探测等成套处置技术。多层次支护可强化破碎围岩整体性，改良开挖工艺能有效降低岩体扰动，动态监测体系则实现地质风险的前置管控。整套技术可有效控制围岩变形、规避涌泥塌方灾害，为水利隧洞不良地质段安全高效掘进提供标准化技术支撑。

【关键词】：鄂北工程；水利隧洞；不良地质；围岩支护；掘进工艺；地质监测

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.050

引言

随着国家水网骨干网络的不断推进建设，大口径长距离输水隧洞越来越多，穿越复杂地层的概率显著增加，不良地质诱发的塌方、涌水已成为制约工程提质增效的关键瓶颈。立足工程安全与绿色施工理念，针对地层失稳、工艺适配不足、监测体系不完善三类核心制约因素，本文结合鄂北工程隧洞施工实际，系统梳理了适用于复杂围岩的加固防护、掘进优化与动态监测成套技术路径。各类处置技术相互协同，形成覆盖施工全流程的管控体系，兼顾施工安全、工程成本与建设周期，可为同类水利隧洞不良地质段施工提供可落地的技术参考。

1 水利隧洞不良地质段掘进施工研究基础

水利输水隧洞线路常穿越复杂地层，施工中极易遭遇断层破碎带、陡倾页岩夹层、富水松散岩体等不良地质，衍生围岩变形、渗水涌泥、局部坍塌等病害，直接增加施工投入并打乱既定工期。隧洞掘进扰动会进一步削弱岩体自稳能力，常规开挖支护模式难以适配不稳定地层。依托鄂北工程一期输水隧洞工程实践，不良地质处置核心在于前置地质预判、弱化爆破扰动与多层次支护加固的协同配合，配套排水减载、快速衬砌闭环等手段^[1]。施工前需全面排查区域水文地质条件，严控进场建材性能，细化岗位管控体系，依据注浆压力变化、差异化锚杆施工工艺、超前地质勘探和支护等参数，构建覆盖开挖、支护、衬砌全流程的成套处置体系，保障隧洞掘进全过程施工安全与结构成型质量。

2 不良地质围岩引发隧洞掘进施工制约因素梳理

(1) 软弱破碎围岩地层结构稳定性制约：地层内部断层构造导致岩体整体性大幅丧失，陡倾页岩夹层抗剪强度偏低，叠加地下水持续渗流侵蚀，围岩原生结构不断劣化，地层自稳周期明显缩短。爆破作业产生的冲击荷载会进一步撕裂破碎岩

体，诱发围岩持续收敛变形，变形累积至临界状态后便会引发塌方、突泥灾害。地下水位偏高时，渗水持续软化软弱夹层，增大围岩侧向水压力，进一步削弱地层整体承载力。常规无加固开挖方式无法约束岩体松散位移，若支护布设滞后、构件间距偏大，破碎围岩将持续剥落掉块，大幅抬升现场安全管控难度，同时增加后期修复与加固施工成本，持续干扰隧洞掘进连续作业节奏。

(2) 常规掘进工艺与复杂地层匹配不足：标准掘进爆破参数仅适用于完整硬质围岩，应用于不良地质段时，固定循环进尺与统一装药量会产生过大扰动，加剧围岩破损。常规单一锚杆配合薄层喷混凝土的支护体系承载力有限，难以抵御破碎地层与富水地层叠加形成的多重荷载。普通开挖流程缺少超前预加固工序，掌子面前方松散岩体未经提前固结便直接开挖，塌方风险显著上升^[2]。常规排水手段仅依靠简易沟槽，无法快速疏导大面积侧壁渗水，水压力长期作用会破坏初期支护结构。原有施工工序未设置快速衬砌闭环环节，初期支护长期单独受力，易出现钢拱架下沉、喷层开裂等病害，难以满足复杂地层掘进需求。

(3) 施工全过程地质监测管控存在缺口：未落实常态化超前探测作业时，掌子面前方断层、富水破碎带无法提前辨识，地质突变问题缺少前置处置缓冲空间。短隧洞可依靠常规钻探掌握地层情况，长距离隧洞仅凭单次探测难以捕捉地层动态变化，地质信息更新存在明显滞后。现场监测多聚焦成型洞段围岩变形，缺少掘进全过程实时数据采集，渗水流量、围岩收敛速率等关键指标无法实现连续把控。隐患分级管控体系执行不到位，不同风险等级不良地质段未配套差异化防护措施，材料进场质量及支护施工工序均缺少全过程跟踪核查。监测数据未能及时反馈至开挖与支护方案调整环节，地质风险出现后只能被动补救，难以实现动态化防控目标。如图1。



图1 水利隧洞掘进不良地质施工制约因素及灾害传导逻辑图

3 适配不良地质围岩的隧洞掘进处置技术实践路径

(1) 破碎围岩地层稳固防护施工技术：破碎围岩区域采用多层级复合支护体系实施地层预加固与长期约束，以鄂北工程纪洪隧洞施工为例对隧洞围岩不稳定的IV、V类围岩及土洞，采取超前支护措施。超前支护措施采用注浆小导管，沿隧洞纵向在拱顶 120° （土洞 150° ）范围布置小导管。小导管沿隧洞轴线方向每3m布置一排，沿拱的环向布置间距为50cm（土洞为30cm），单根管长4m，搭接长度1m，钢管沿拱的环向外插角为 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。小导管注浆采用425#普通硅酸盐水泥浆，控制注浆压力维持在0.3~1.0MPa，水泥浆液快速凝固后于洞周形成连续加固隔离水圈，同步完成岩体固结与渗水封堵。针对松散夹层布置超前砂浆锚杆，可选用普通砂浆锚杆或中空注浆锚杆两类构件，依据施工工艺调整钻孔孔径，确保杆体周边浆液饱满密实，从掌子面前方约束岩体位移。开挖后及时架设工字钢拱架，依据围岩破碎程度缩小拱架布设间距，加厚连接板并加密纵向连接钢筋，洞底增设垫块以防止拱架下沉。拱架表层铺设钢筋网并喷射混凝土，由此构成锚杆、钢拱架与喷混凝土的联合支护结构。初期支护成型后快速推进二次衬砌施工，使支护体系尽早封闭成环，从而降低破碎岩体持续变形、掉块及塌方风险，自前期预加固至永久衬砌形成完整的地层防护链条。

(2) 贴合复杂地质条件掘进施工工艺调整方案：进入不良地质区域后，摒弃完整围岩条件下的固定施工参数，重新开展爆破试验优化整套开挖方案，缩短单次循环进尺并调整掏槽形式、炮孔排布及光爆参数，同步降低单孔装药量，削减爆破冲击波对周边破碎岩体的扰动影响。开挖前增设超前地质钻探

以提前探明前方地层分布，针对涌水、突泥风险段预先布设排水系统，洞底设置连续排水沟与集水坑，洞壁渗水点位钻孔埋设排水管，遵循堵排结合、以排为主的思路削减侧向水压力^[1]。鄂北工程纪洪隧洞通过岩溶、岩溶水、断层破碎带等不良地层时，隧洞开挖过程中采用超前地质预报及超前探孔等手段，对可能存在的岩溶、断层破碎带、涌突水现象进行探测，确定岩溶水地质情况，防止岩溶涌水、突泥，并预备足够的排水设备。对于超前钻探孔单孔流量大于2L/s岩溶段，应预留5~10m的岩盘进行注浆堵水。对于超前钻孔单孔流量小于2L/s，或溶洞与地表及外部岩层无水力联系时，可按疏导的办法进行处理，适当增加排水孔的数量。开挖与支护工序紧密衔接，取消大面积裸洞静置时间，采用超前预加固先行、分层分段开挖、随挖随支的作业模式。依据围岩实时变形状态动态调整支护强度，破碎严重地段叠加管棚支护强化地层承载力，整套工艺围绕降低围岩扰动、提前加固、及时支护三大核心，适配各类复杂地层掘进作业要求。

(3) 全流程地质动态监测配套实施举措：隧洞掘进全过程建立常态化超前探测机制，利用潜孔钻持续钻探掌子面前方地层，临近破碎带或富水区域时加密探测频次，实时更新前方地质信息，为施工方案调整预留充足缓冲时间。区分不同隧洞长度匹配监测方式，短距离隧洞依靠常规超前钻探即可掌握地层状况，长隧洞则将超前探测与现场工艺调整同步推进，以持续捕捉地层突变信号。现场划分地质隐患等级，针对不同风险区域落实差异化防护标准，同步建立建材进场全检机制以确保支护材料性能达标。施工期间持续采集围岩收敛变形、渗水量、支护结构受力等数据，依据监测反馈动态调整爆破参数、拱架间距与注浆施工安排，同时落实岗位精细化管理，将监测管控责任分配至各施工班组，依靠实时数据实现地质风险前置防控，避免塌方、涌泥等突发事故出现后的被动补救局面。

4 结语

水利隧洞不良地质段掘进需统筹地层稳定、施工工艺与动态监测这三类核心要素。破碎围岩依托多级复合支护完成预加固及闭环约束，掘进参数动态调整可削减爆破对岩体的扰动强度，全流程地质探测能够提前识别地层突变风险。各类处置技术相互配合形成完整的作业链条，有效抑制围岩变形、涌泥渗水等地质灾害。相关技术方案兼顾施工安全、建设成本与施工进度，可为复杂地质条件下水工隧洞开挖提供标准化技术参照，助力水利工程建设高质量推进。

参考文献：

- [1] 陈昱钦,王瑞鹏.水利隧洞TBM施工中不良地质段超前支护关键技术[J].科技创新与应用,2025,15(31):170-173.
- [2] 刘扬扬.水利工程中隧洞不良地质处理新材料与新工艺的应用研究[J].水上安全,2025,(12):172-174.
- [3] 把发仓.水工隧洞不良地质段的处理方式的探讨[J].水上安全,2023,(5):152-154.