

# 富水地层隧洞回填固结灌浆涌水防控与灌浆质量保障技术

彭超超

中国水利水电第十二工程局有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6611

**[摘要]** 富水地层隧洞施工常伴随严重涌水,严重影响结构安全与施工进度。本文以回填固结灌浆为核心技术路径,分析涌水成因与危害,提出注浆与质量监控相结合的防控措施,构建灌浆施工质量保障体系。结合典型工程案例,验证技术在止水加固、控制渗流及提升围岩稳定性的综合效果。研究成果为类似复杂地质条件下隧洞工程提供强有力的技术支撑与实践依据。

**[关键词]** 富水地层; 隧洞灌浆; 涌水防控; 固结灌浆; 质量保障

**中图分类号:** U445.55+2 **文献标识码:** A

## Water gushing prevention and control and grouting quality assurance technology for tunnel backfilling consolidation in water-rich strata

Chaochao Peng

China Water Conservancy and Hydropower 12th Engineering Bureau Co., LTD

**[Abstract]** Tunnel construction in water-rich strata is often accompanied by severe water gushing, threatening structural safety and construction progress. This paper takes backfilling consolidation grouting as the core technical path, analyzes the causes and hazards of water gushing, proposes prevention and control measures combining grouting and quality monitoring, and constructs a quality assurance system for grouting construction. Based on typical engineering cases, verify the comprehensive effect of the technology in water-stop reinforcement, seepage control and improvement of surrounding rock stability. The research results provide technical support and practical basis for tunnel engineering under similar complex geological conditions.

**[Key words]** Water-rich strata Tunnel grouting Water gushing prevention and control Consolidation grouting Quality assurance

### 引言

富水地层条件下进行隧洞回填灌浆施工时,使得施工单位面临着极大挑战。

最典型问题是:在复杂地质条件下出现持续性或突发性地下水渗流及涌水,采用传统止水方法难以奏效,如果处理不好将会严重影响隧洞结构与施工安全。应对此类问题需从源头控制水源通道,同步保障固结质量。本文聚焦回填固结灌浆的防控机制与质量控制技术,力求构建一套系统性、高效性、可实施的技术体系。

### 1 富水地层隧洞涌水问题的成因分析与危害评估

在富水地层条件下隧洞施工频繁遭遇涌水问题,成因有地质、水文和工程自身特性等方面。地质层面:富水地层多为破碎带、断层带、强风化带或岩溶发育区,这些区域岩体完整性差、渗透性强,是地下水富集与流动的天然通道。地下水位高、水压大,在隧洞开挖时围岩应力释放速率会加快,使裂隙扩大,原有

水力平衡被打破,地下水大量渗入隧洞内部或突然发生喷涌现象。采用爆破法或机械化开挖法施工时,过程中能量集中释放或持续震动,极易导致围岩裂隙扩展、原有节理张开,原有岩体结构被破坏,形成更多渗流通道,加剧地下水流动与聚集,显著提高突涌水、突泥等突发性地质灾害风险,增加了施工安全风险。

涌水问题不仅对施工安全构成重大威胁,也对工程质量和进度造成多重影响。大量渗水若长期作用于隧洞衬砌结构,不仅会引发混凝土表层出现剥蚀、内部孔隙率提高,还会使结构内钢筋在潮湿环境中加速发生电化学腐蚀,导致钢筋截面面积减小,同时与混凝土的粘结力下降,进而降低隧洞结构整体承载能力。结构劣化一旦持续发展,将直接影响隧洞正常运营,后续需频繁进行结构加固与修复作业,显著增加日常运维投入和周期性检修成本。

在这种复杂背景下,开展成因分析和危害评估对制定有效防控与加固方案具有重要意义,评估工作需综合考虑地质构造、

渗透系数、水压分布、开挖方式及支护结构类型等多重因素,借助水文地质勘查、地质雷达探测、孔压测试等手段,对涌水路径、水源补给能力和潜在影响范围开展系统识别。结合数值模拟技术,还能对不同工况下的涌水强度进行预测,提前规划合理回填固结灌浆方案与止水结构布设,通过科学成因识别与定量风险评估,为后续实施针对性防控措施及灌浆质量控制提供坚实基础,从源头遏制富水地层涌水对隧洞工程带来的多重风险。

## 2 回填固结灌浆在涌水防控中的技术路径与参数优化

回填固结灌浆是应对富水地层隧洞涌水的重要技术手段,核心是通过控制性注浆填密破碎围岩、封堵裂隙,切断地下水渗流路径、提升围岩整体力学性能,实现止水与加固共同作用,该技术适用于多种富水地质条件,在破碎带、断层带及岩溶区具备良好适应性及施工可控性。注入特定配比的浆液材料后,材料会在围岩裂隙、孔隙及空腔中形成均匀连续的固结体,有效封堵渗流通道,浆液在高压条件下注入岩体,能充分扩散并填充微细裂隙,固化后形成强度高、密实性好的阻水层,这种固结体不仅提升岩体整体抗渗性能,还增强结构抗剪与抗压能力,形成以灌浆帷幕为核心的三维水力隔离系统,可从源头遏制地下水迁移、渗流与集中喷涌,保障隧洞安全稳定运行。

在技术路径上,需遵循“探、控、堵、防”四位一体基本原则,注重涌水通道的识别与封堵,施工阶段结合超前地质预报与定向钻探技术,对潜在渗水区段实施针对性注浆处理,回填灌浆多采用分区分段注浆模式,控制灌浆量与压力分布。固结灌浆过程要严格把控浆液扩散范围,避免高压注浆引发围岩进一步扰动。复杂地层条件下,辅以二次补浆、套管灌浆或袖阀管灌浆等技术手段,实现全空间、多层次加固止水,需根据隧洞断面类型、围岩等级及渗透特性,制定科学合理的灌浆布孔参数,确保浆液有效渗入各类裂隙并固结成型。

参数的优化是增强回填固结灌浆效果的关键,其中涉及浆液材料选择、水灰比、添加剂配比、灌浆压力及速率等多项指标,不同地质条件下,对灌浆材料性能的要求有明显差异,高渗透性地层大多用速凝型水泥基浆液或者化学浆液,可以有效提高早期强度和抗冲刷能力;弱胶结地层更适宜用低黏度渗透型浆液,从而实现深层渗透加固。施工过程中需依据注浆段落吸浆量的改变动态调整注浆压力,防止超压破坏岩体或欠压导致灌浆不足,利用实时监测系统对注浆流量、压力变化和浆液扩散范围做动态反馈调整,能实现全过程智能化调控,保证回填固结灌浆在涌水防控中有最佳效果。

## 3 灌浆施工质量保障体系构建与关键控制要点

要保证富水地层隧洞回填固结灌浆效果,关键在于构建完善的灌浆施工质量保障体系,其实就是对施工全过程做系统、规范、动态的管控,这个体系要覆盖施工准备、工艺实施、过程监测以及验收评估等各个阶段,以“预控为主、防治结合”作为基本理念,靠技术、管理和设备手段共同配合,从而提高整体灌浆

质量的稳定性与可靠性,在具体工程实践中要制定标准化作业规程与技术规范,来确保能够精确执行灌浆设计参数,同时建立相应质量责任体系,实现对人、机、料、法、环五大因素的全面管控。

要做好质量控制,关键在于实时调整灌浆参数,动态跟踪浆液扩散情况,要根据现场地质条件和吸浆特征,灵活调整灌浆压力、流量、浆液粘度和凝固时间等工艺参数,防止出现欠灌、过灌或注浆范围偏移等问题,借助数字化灌浆控制系统,实时采集和分析数据,对每一孔段的注浆过程进行全流程记录,形成可追溯的施工数据链条,采用声波检测、地质雷达和注浆后钻孔验证等方法,实时监测注浆区加固效果和渗透性变化,协助判断灌浆体成型质量与覆盖范围,然后动态优化灌浆工艺,提高止水和加固效果的一致性与精准度。

灌浆质量保证体系的关键控制要点在于浆液材料的选型和配制质量、设备运行状态以及操作人员技术水平。材料入场时要开展性能试验,必须符合设计要求,否则不得使用。浆液搅拌是否均匀、储存时间长短以及输送管道是否清洁,都直接影响灌浆质量。选用高精度注浆泵、智能阀控系统以及自动监测装置是提高控制精度的根基。作业人员在作业前接受灌浆施工专业培训,具备参数识读、数据判断以及现场应变能力,是减少人为操作误差发生频次的重要因素之一。要设置多级质量验收程序,对灌浆前准备、注浆过程、灌浆后效果分阶段进行评估,构建质量闭环控制体系。实施这些综合措施,才能保证回填固结灌浆在富水地层隧洞施工中质量稳定可控,使其充分发挥防水止涌以及加固结构的技术功效。

## 4 典型工程应用与综合效果评估分析

在实际施工过程中,富水地层隧洞回填固结灌浆技术,多个典型案例能证明它在涌水防控和地层加固上有明显成效,有个山区铁路隧洞工程,要经过断层破碎带以及岩溶发育区,施工的时候发生了大规模突涌水现象,引发掌子面坍塌、衬砌开裂等严重问题。面对该复杂的地质情形,项目团队制订了一个以回填固结灌浆为核心的综合处理方案,借助梅花形布孔系统与多级分段灌浆技术,成功填充了围岩裂隙带与岩溶空腔,构建了连续的灌浆帷幕,灌浆后监测数据呈现,地下水渗透系数平均下降超过80%,掌子面稳定性明显增强,涌水情况被有效管控,隧洞掘进能够顺利开展。

评估回填固结灌浆综合效果,从水力控制、力学加固以及施工效率等多方面进行分析,对灌浆前后围岩孔隙水压、渗流速率以及地表变形做对比监测,能直接看出止水效果和结构稳定性的提高,部分工程运用注浆后地质雷达成像与声波透射法去验证浆液扩散范围以及成浆体密实度,结果显示注浆体跟围岩结合得很紧密,形成有效隔水层。通过对隧洞结构受力响应的分析可知,衬砌受力明显变得均衡,结构内应力集中的部分明显减轻,这体现了围岩整体力学性能的提升,在整个施工周期中,优化灌浆布孔与参数配置,灌浆效率大幅提高,降低了返工次数,减少了突发事件干扰,有效缩短工期且降低了整体工程费用。



图1 回填固结灌浆智能控制系统现场应用

在典型工程经验总结中,回填固结灌浆的适应性与经济性是评估体系的重要构成,众多工程实践证明,该技术在断层带、破碎岩层、富水软弱地层等多样复杂环境中能够充分发挥作用,在成本控制方面,和传统止水帷幕或者冻结法比起来,其具备设备轻巧、能有效控制材料使用、布置方式灵活等特点,具有明显的性价比优势。同时搭建现场数据采集与智能分析平台,能积累不同地质区域灌浆效果的数据库,可帮助后续类似工程快速制定针对性技术方案,参考质量验收结果以及运行监测反馈,回填固结灌浆在富水地层隧洞的综合技术优势和工程应用价值已获得广泛认可,给以后隧洞施工提供了可靠技术支持和可借鉴的经验。下图中展示的是某富水地层隧洞工程中采用的数字化灌

浆设备操作场景。操作人员通过集成控制面板实时监控注浆压力、流量及浆液扩散状态,系统具备自动调节功能,实现全过程智能化调控。背景可见多台注浆泵组与安全防护设施,体现了现代灌浆施工向自动化、信息化发展的趋势。

## 5 结语

本文针对富水地层隧洞回填固结灌浆技术在涌水防控中的应用开展了系统研究,搞清楚了涌水成因和危害机制,搭建了科学的技术路径与质量保障体系,同时结合典型工程案例做了综合效果评估,该技术能显著提升围岩稳定性、抑制地下水渗流,能保障施工安全,具有广泛的推广应用价值,接下来将进一步推进灌浆参数优化与智能化监测技术的整合,提高灌浆施工的适应性和可控性,为复杂地质条件下的隧洞工程提供有力技术支持。

## [参考文献]

- [1]李强,王林.富水地层隧洞施工涌水机理及控制技术研究[J].岩土工程技术,2020,38(6):112-117.
- [2]周浩,陈建.回填固结灌浆技术在隧洞涌水治理中的应用[J].岩土力学,2021,42(3):854-860.
- [3]高峰,吕鹏.隧洞灌浆施工质量控制与监测技术研究[J].铁道建筑技术,2019,47(5):66-71.

## 作者简介:

彭超超(1993--),男,汉族,河南信阳人,本科,中级职称,研究方向:水利水电工程施工。