

Application Analysis of Backfilling and Consolidation Grouting Construction Technology in Hydraulic Tunnel

Siyang Li

Sinohydro Bureau 7 CO., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

When lining is completed in hydraulic tunnels for water diversion or flood discharge, improper treatment of the back cavity and surrounding rock fractures may lead to leakage, voids, and localized stress anomalies during operation. Backfilling and consolidation grouting, as common concealed reinforcement procedures, require simultaneous execution of slurry preparation, delivery, degassing, pressure stabilization, and hole sealing within confined spaces, coordinated with lining curing and tunnel drainage. In TBM segments, water-rich fractured zones, and karst tunnel sections, the process must emphasize water isolation, degassing, drainage, and re-grouting scheduling. This paper identifies actionable control points for backfilling and consolidation grouting based on current standards and typical engineering cases.

Keywords

Hydraulic tunnel; Backfilling; Consolidation; Grouting; Construction technology; Application

水工隧洞中回填及固结灌浆施工技术的应用分析

李思阳

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川·成都 610213

摘要

引水、泄洪等水工隧洞衬砌完成后, 背后空腔与围岩裂隙若处理不当, 运行期易出现渗漏、空鼓与局部受力异常。回填与固结灌浆是常用的隐蔽加固工序, 需在受限空间内完成制浆、输浆、排气、稳压与封孔, 并与衬砌养护和洞内排水同步组织。在TBM管片、富水破碎带与岩溶洞段, 工艺组织更应强调隔离止水、排气导排与复灌安排。本文结合现行规范与典型工程案例, 就水工隧洞提炼回填与固结灌浆两项施工技术可执行控制点。

关键词

水工隧洞; 回填; 固结; 灌浆; 施工技术; 应用

1 引言

水工隧洞衬砌完成后, 由于围岩的地质、衬砌混凝土浇筑及混凝土终凝的收缩等原因, 在衬砌混凝土和岩面之间难免会出现缝隙, 拱顶甚至会出现脱空现象^[1]。因此工程上通常按“先回填、后固结”的顺序组织灌浆处理。有鉴于此, 文章将通过查阅相关文献以及结合实践下就水工隧洞中回填及固结灌浆施工技术应用展开探讨, 以供参考。

2 水工隧洞中回填灌浆施工技术的应用

2.1 分段封闭与排气通道的布置

回填作业宜先把衬砌背后空腔划分为可控制的区段, 并以封闭与排气两条线同步布置, 使浆液充填过程具备可观察、可调整的条件。第一, 分段推进应顺洞轴坡度由低端向

高端实施, 同一段内先布置低位进浆口并逐孔上移, 进浆与排气按一进一排配对设置, 同时在高位留设排气与返浆通道, 形成气体上浮、浆液跟进的连续充填路线。第二, 端部封堵要做到强度与密封并重, 区段端部宜设置止浆墙或封堵块并配合止浆带, 灌前以试水检漏确认无贯通渗漏后再接入阀组, 封堵位置应避开施工缝薄弱区, 并预留拆除或二次开启的操作空间以便补灌。第三, 顶拱与拱肩应设置独立排气管或排气孔并保持畅通到稳定出浆, 排气管宜高出拱顶并加装阀门便于调节, 遇塌腔或不规则空腔时在最高点增设观察孔并设置简易量杯统计返浆, 确保气阻释放后再进入稳压充填阶段。第四, 区段长度宜结合洞径与浆液可泵性控制在四五十米量级, 区段交界处可布置复核孔核对饱满度及时并做好编号标识便于追溯, 孔深与空腔几何应通过成孔记录与探测复核, 必要时用探杆核对空腔高度变化, 并据此调整排气孔位置与管路走向, 使每段形成进浆、排气、观察相互对应的布置。

【作者简介】李思阳(1991—), 男, 中国四川眉山人, 本科, 工程师, 从事水利水电施工及经营管理研究。

2.2 浆材级配与稠度的现场适配

回填灌浆需在不同空隙尺度与渗水条件下形成可泵送、充填密实的浆体,浆材级配与稠度宜随现场响应调整。第一,细缝与衬砌接触面起灌宜用较稀纯水泥浆,开灌前先用清水或稀浆试注疏通管路并润湿基面,孔口配置止回装置,回浆由断续转连续后,再依据注入率下降、压力波动减小等特征分级加浓,并在短时停浆后按规范提出的注入状态选择继续使用原配比或适当稀释恢复灌注,防止滤水结团引起假终止。第二,局部空腔大或夹带碎渣段宜改用水泥砂浆或细砂浆,砂料经筛分去除杂物,施工前用同批材料试拌核查流动性、密度与泌水,砂量以不堵管、不抬压为限,注入顺序采用少量纯浆扫缝后再上砂浆,掺砂分批加入并维持连续搅拌,必要时歇循环输浆,避免沉底离析与局部堵塞^[2]。第三,TBM管片环隙或豆砾石回填段多为长距离连通空间,宜按仓段设置止浆环、封堵板与排气孔,并配合充气软管等分段隔离工艺控制串流,灌注由近端向远端递进,先以高流动浆液充填骨料孔隙并完成排气,再以较稠砂浆稳压补强,远端返浆稳定后转入限流稳压终止,必要时对末端补灌一至两次以消除空带。第四,制浆与输送应保持连续与均匀,搅拌时间、停浆间隔和水泥批次宜稳定,采用密度杯与流动度筒抽检,泵前对管路接头与回浆口作例检,高温季缩短停放并循环搅拌,停浆超限弃浆,配合比调整与注入量、返浆性状联动记录。

2.3 注入压力与止抬控制的操作细则

回填灌浆压力既要保证浆液进入空腔并实现饱满,又要避免衬砌抬动与止水构造受扰,因此现场应把压力设定、异常处置与终灌判据固化为可执行的操作细则。第一,灌前依据衬砌厚度、配筋与施工缝型式核定控制压力并落实到孔段记录,混凝土衬砌一般取0.2~0.3MPa,钢筋混凝土可取0.3~0.5MPa,遇薄弱部位再下调并以试灌校核,升压采用小流量分级递增,压力每上一个台阶即停留核对孔口渗漏、衬砌裂缝与回弹,异常先降压稳住后再调整比级与流量。第二,出现串浆、冒浆或邻孔压力突降时,现场先停升压并回到低压小流量,改用多孔并联稳压或分孔轮灌重建浆路,利用阀门分区切换实现局部限流,必要时以较稀浆扫通后再按由稀到浓恢复,并同步巡查衬砌面与排气孔,避免高压强推引起空腔扩展或面层鼓胀。第三,止抬控制按有盖重灌浆要求布设抬动监测装置,拱顶、施工缝及止水带附近设置基准点并取得初始值,灌浆期间专人连续或按班次复测,单孔注入率设上限并保持供浆平稳,一旦监测出现抬动趋势或超过允许值即降压或停灌,待读数稳定后改用偏稠浆分次补灌并适当延长稳压时段。第四,终灌以规定压力下吸浆量明显衰减且稳压阶段保持稳定为主,稳压时间不少于5min,条件允许可延续至10min,并以排气孔由气夹浆转为连续浆体、返浆稠度接近设计比级作为复核,停泵后检查回压无异常,再以导管注浆法封孔并压抹平整,封孔砂浆达到规定强度后

拆管,最后冲洗泵管并记录终压、注入量、比级与稳压时间,并在孔口设置标识牌便于后续复灌。

3 水工隧洞中固结灌浆施工技术的应用

固结灌浆面向的是衬砌外侧围岩一定范围内的裂隙、破碎带与软弱夹层,通过注入浆液改善围岩整体性、降低渗透性,并为衬砌与围岩的共同受力创造条件。标准体系对固结灌浆的孔深、孔距、灌浆方式与质量检验提出了框架要求,工程实施中更需要围绕“孔网布置合理、分段分级清楚、效果可检验”三条主线组织。

3.1 孔网布置与孔深控制

水工隧洞围岩固结灌浆中,孔网与孔深需在地质条件、衬砌受力及施工工序约束下统筹确定。第一,布孔前复核中心线及拱肩、边墙控制点,放样后对孔号、孔口高程与设计孔深逐孔核对,结合围岩分级、裂隙产状与渗漏带沿拱肩、边墙加密,断层破碎带采用带状加密孔网并据编录修正孔向,使孔轴与主裂隙交切,孔位对称成网,孔距排距一般取2~4m并以试验微调。第二,孔深以覆盖松动圈并进入较完整围岩为准,深度宜不小于洞径或洞宽的0.5倍,钻进中依据返渣、涌水量及岩性突变及时校核,超挖和破碎段适当补深,遇软弱夹层或溶蚀带可超深,并按分段灌浆预留封塞与止浆段长度,孔深用钻机计数与钢尺复测双控,避免欠深^[3]。第三,成孔控制以孔斜、孔径、孔壁稳定和孔内洁净度为主,孔径满足下管与封塞器安装,开孔用导向套管稳孔,钻进按进尺分段测斜复核,偏斜超限及时纠偏或补孔,灌前采用水或汽水冲洗至回水清洁,必要时二次扫孔并控制沉渣厚度,再开展压水试验,记录透水率与压力响应以确定分段和压力。第四,孔口采用预埋管或护壁套管连接,配置承压止浆盖头与闸组,封口用快凝砂浆或封孔浆体并先做低压保压检查,灌前校核压力表零点与管路通畅,发现孔口渗漏先处理后开灌,孔序按先周边后中间、按排分序加密推进,并在回填灌浆完成且满足强度与间隔后实施固结灌浆。

3.2 分段灌注与浆液变换

在水工隧洞固结灌浆中,分段灌注与浆液变换应围绕孔段裂隙的进浆路径与压力边界进行联动控制。第一,孔内宜采用封闭器自孔底向孔口分段推进的工艺,开灌前以清水循环或低压试压核对孔段通畅与坐封可靠,再按围岩完整性、吸浆速率及回浆稳定性确定段长,破碎及剪切带段宜控制在1.0~2.0m以便识别吸浆特征并及时调整,较完整岩段可放宽至2.0~4.0m以减少无效停泵时间,换段前应以低压回灌把管路与封闭器内残浆置换干净并复核孔口封闭,避免带浆起段导致假升压或串段。第二,浆液比级宜遵循由稀到浓逐级加密的节奏,起灌可选水灰比较大的水泥浆降低起灌阻力,随后依据压力上升速率、注入率衰减幅度与返浆稠度同步判定加浓时点,当压力基本不变而注入率持续减少,或注入率变化不大而压力持续升高时,现场不宜立即改

变水灰比,应先保持当前比级连续灌注并观察曲线,再结合单级累计用量与持续时间决定加浓,注入率出现异常波动时应先排查封闭器漏失、管路堵塞与孔内返水,排除异常后再调整比级,避免过快加浓引起孔内架桥堵塞^[4]。第三,遇富水裂隙或明显涌水通道时,可先用中等水灰比水泥浆在较低压力下稳压充填,待回浆含砂量降低且孔段降压趋稳后再恢复常规分级,并可采用短停歇后复压的方法促使浆液向远端裂隙扩散,停歇时间以不致发生离析沉降为限,复压时应由低到高逐步升至该段控制压力并严格限顶,若出现返水夹气、返浆突增或压力骤降,应立即回退比级并复核坐封位置、孔口封闭与邻孔串通风险,必要时缩短段长并改用同水灰比新浆续灌以稳定回浆性状。第四,孔段结束宜采用组合判据控制,即在达到设计或该段控制压力后,注入率降至规定阈值并持续稳定一定时长方可停灌,工程上常用在最大设计压力下注入率不大于 1L/min 并延续灌注约 30min 的控制方式,同时结合返浆由浑转清且稠度稳定、压力波动幅度受控进行复核,停灌后可维持短时保压以利孔内浆体初凝,再及时封孔并完善原始记录,记录应逐段对应吸浆曲线、变换时刻、用量、停歇与复压节点及异常处置过程,便于同类地层参数复用与质量追溯。

3.3 效果检验与复灌组织

固结灌浆完毕后,应把检验、复灌与资料闭合并入同一施工回路,避免衬砌封闭前遗留渗透短路。第一,效果检验以检查孔配合孔压水试验为主,检查孔宜布设在围岩级别变化段、断层破碎带、渗水集中段等代表性与薄弱部位,并与相邻灌浆孔保持间距以避免近孔扰动,试验宜在该部位灌浆结束后约 5d 开展,通常控制在 3 ~ 7d 内,检查孔数量宜按灌浆孔总数的约 5% 控制,采用单点法分级加压,逐级稳压记录稳态注入率、回水含砂与返水现象,并与灌前指标对比判定孔段是否仍呈集中透水或存在短路。第二,灌后观测应覆盖洞内见水点、衬砌裂缝潮湿带、排水沟流量与集水井水位,宜在初期养护阶段加密巡查并形成断面台账,当出现新增渗点、原渗点扩展或排水量短期抬升时,应回溯对应孔段的分段吸浆量、压力波动与停浆条件,结合地质编录判断

是否漏灌、串通或封孔失效,并据此提出复灌孔位与分段范围。第三,复灌组织宜先查因再定法,封塞滑移、孔口漏压或管路回浆时,先复位封塞、补强孔口密封并复检稳压能力后再启动复灌,围岩回弹、裂隙再张开或浆脉不连续时,可将水灰比由稀向浓调整,分段长度缩短至 1 ~ 2m 并延长稳压,使浆液在稳压期内完成充填固结,对异常吸浆段可加密补孔并控制同环联灌的压差以削弱旁通。第四,封孔材料与封孔长度应与孔段压力等级匹配,常用水泥砂浆或微膨胀砂浆分层回填并保证有效封孔长度,封孔后以低压稳压复检孔口密封,孔口处应清晰标识孔号、日期、段深、最大压力与终止标准,同时将检查孔与复灌孔的试验曲线、吸浆记录、封孔参数及对应地质素描同步归档,便于运行期渗漏异常时按里程与孔段快速追溯到加固区段并组织补强^[5]。

4 结语

回填与固结灌浆在水工隧洞衬砌成型后承担着填充空隙与改善围岩两类不同目标,现场管理的关键在于分区封闭、排气导排、浆材适配、压力控制与效果检验能否形成连续的施工逻辑。工程实践表明,将孔位放样、试验段校核、施工记录与复灌阈值前置到组织设计中,并在灌注过程中保持压力与注入率的同步判读,通常更易获得稳定质量。上述要点可为同类水工隧洞回填及固结灌浆施工的现场应用提供可执行的技术路径。

参考文献

- [1] 杜慧超.水工隧洞中回填及固结灌浆施工技术的应用[J].2023(12):25-27.
- [2] 董小虎,李丰年,杨培洲.固结灌浆技术在放空洞围岩处理中的应用[J].水利建设与管理,2024,44(4):71-77.
- [3] 尹广平.水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用研究[J].工程管理,2024(6).
- [4] 尹广平.水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用研究[J].工程管理,2024(6).
- [5] 吕秋影.浅析水工隧洞断层破碎带灌浆加固方法与效果[J].建设机械技术与管理,2024,37(2):124-127.