

输水隧洞混凝土衬砌裂缝处理技术

郑 旭

浙江兴亚工程管理有限公司 浙江 金华 321000

摘 要：输水隧洞混凝土衬砌裂缝处理需结合成因制定方案。对于浅表裂缝，采用水泥基柔性防水材料涂刷，封闭裂缝防止渗水；宽深裂缝则根据受力情况，选用水溶性聚氨酯或环氧树脂复合材料，通过钻孔灌浆填充裂缝。施工时需严格封缝、布孔，控制注浆压力与材料配比，处理后通过压水试验、钻孔取芯等手段检验效果，确保结构整体性与耐久性。

关键词：输水隧洞；混凝土衬砌；裂缝处理技术

引言：输水隧洞作为水利工程的关键组成部分，其混凝土衬砌长期承受内外水压力、温度变化及地质活动影响，易产生裂缝，不仅威胁结构安全，还可能引发渗漏、钢筋锈蚀等连锁问题，影响工程效益与耐久性。当前，裂缝处理技术涵盖表面封闭、灌浆加固、结构补强等多种方法，但不同工况下的材料选择、施工工艺及质量控制仍面临挑战。本文系统探讨裂缝成因与分类，分析典型处理技术适用性，为工程实践提供参考。

1 输水隧洞混凝土衬砌裂缝类型与成因分析

1.1 裂缝成因机理研究

(1) 内因：混凝土材料性能是裂缝产生的核心基础。水灰比过大易导致混凝土干缩率增加，降低结构密实度；添加剂选型或掺量不当可能破坏混凝土内部结构稳定性；养护条件不足会使混凝土强度增长缓慢，无法有效抵抗收缩应力和温差应力，进而诱发裂缝。(2) 外因：地质条件方面，围岩应力分布不均会对衬砌产生不规则挤压，地下水渗透会加剧衬砌材料劣化并产生附加水压力；施工工艺方面，浇筑振捣不充分会形成内部孔隙，模板支护刚度不足易导致衬砌变形开裂，浇筑顺序不合理会引发应力集中；运行环境方面，水温周期性变化会使衬砌产生反复热胀冷缩，水压波动则会加剧衬砌的疲劳损伤，诱发裂缝扩展^[1]。

1.2 裂缝危害性评估方法

(1) 结构安全分析：采用有限元模拟技术，构建隧洞衬砌三维模型，模拟不同裂缝工况下的应力分布状态，评估裂缝对结构承载力的影响；通过布设应力应变监测点，实时采集衬砌关键部位的受力数据，判断裂缝是否会引发结构变形或失稳。(2) 耐久性影响：通过分析裂缝形成的渗流路径，评估地下水渗透对衬砌混凝土的侵蚀程度；结合裂缝宽度和环境湿度，判断钢筋锈蚀风险，进而评估裂缝对衬砌结构长期耐久性的破坏程度，为后

续修复加固提供依据。

2 输水隧洞混凝土衬砌裂缝检测与诊断技术

2.1 传统检测方法

(1) 锤击法：利用锤击衬砌表面产生的声音差异，判断混凝土内部是否存在裂缝及空洞。声音清脆表明结构密实，声音沉闷或空洞则提示可能存在缺陷，可辅助定位内部裂缝，但定性精度较低，需结合其他方法验证。(2) 超声波检测：通过发射超声波穿透混凝土，根据声波传播速度、幅值变化分析内部裂缝情况。能检测深层裂缝，量化裂缝深度，但其检测结果易受混凝土内部骨料分布影响，需专业人员解读数据。

2.2 现代无损检测技术

(1) 地质雷达探测 (GPR)：借助高频电磁波反射特性，探测衬砌内部裂缝、脱空等缺陷。探测速度快、范围广，可实现连续扫描成像，清晰呈现缺陷空间分布，适用于长距离隧洞快速检测。(2) 红外热成像：利用混凝土裂缝与完整区域的热传导差异，通过红外相机捕捉温度场分布。裂缝区域因渗漏水或空气填充，温度与周边存在差异，可快速识别表面及浅表层裂缝，尤其适用于渗漏裂缝检测。(3) 光纤传感监测：将光纤传感器预埋或粘贴于衬砌结构，实时监测应力应变变化，间接判断裂缝萌生与扩展。具有精度高、抗干扰强、可长期在线监测的优势，能为裂缝发展趋势预警提供数据支撑^[2]。

2.3 裂缝诊断流程与标准

(1) 检测数据整合分析：汇总不同检测方法获取的参数，剔除无效数据，结合隧洞地质、施工及运行资料，建立综合数据库，确保数据全面性与准确性，为后续诊断提供可靠依据。(2) 裂缝分级：依据裂缝宽度、深度、扩展速度及影响范围，分为轻度 (宽度 < 0.2mm, 无扩展)、中度 (0.2~1.0mm, 缓慢扩展)、严重 (> 1.0mm或贯穿性, 快速扩展) 三级，明确各级裂缝危害程度。(3) 处

理方案制定：针对不同分级结果匹配对应处理措施，轻度裂缝采用表面封闭，中度裂缝实施压力灌浆，严重裂缝需进行结构加固，确保处理方案科学合理、经济高效。

3 输水隧洞混凝土衬砌裂缝处理技术体系与优化

3.1 表面封闭处理技术

(1) 适用场景：该技术专为宽度 $< 0.2\text{mm}$ 的微裂缝设计，此类裂缝深度较浅、无明显扩展趋势，主要危害是易引发混凝土碳化和钢筋锈蚀，通过表面封闭可阻断外界水分、有害介质侵入，保障结构耐久性。适用于隧洞衬砌表面干燥区域的微裂缝处理，尤其适用于轻度裂缝的预防性防护。(2) 材料与工艺：常用材料包括环氧树脂涂层、水泥基渗透结晶材料、聚脲涂层。环氧树脂涂层粘结力强、抗渗性优，施工时需先将裂缝表面打磨平整、清除浮尘油污，采用毛刷或喷涂方式均匀涂刷，确保涂层完全覆盖裂缝及周边区域，养护至规定强度；水泥基渗透结晶材料依托毛细作用渗透至裂缝内部，遇水发生化学反应生成不溶于水的结晶体封堵裂缝，施工时需调配成糊状涂抹于裂缝表面，压实抹平后洒水养护；聚脲涂层具有高强度、高弹性和优异的耐腐蚀性，采用专用喷涂设备施工，可快速形成连续无缝的防护层，适用于潮湿环境下的微裂缝处理。

3.2 压力灌浆修补技术

(1) 适用场景：针对宽度 $0.2\text{mm}\sim 1.0\text{mm}$ 的活动裂缝，此类裂缝可能随围岩变形、水温变化产生周期性开合，常规表面处理难以根治，通过压力灌浆可将修补材料注入裂缝深部，实现裂缝填充、粘结补强，同时阻断渗流通道。广泛应用于中度裂缝及部分发展中的裂缝处理，是隧洞裂缝修补的核心技术之一。(2) 材料选择：主要分为化学灌浆材料 and 水泥基灌浆料两类。化学灌浆材料中，环氧树脂灌浆料粘结强度高、收缩率小，适用于干燥环境下的结构性裂缝修补；聚氨酯灌浆料遇水膨胀，可有效封堵渗漏裂缝，尤其适用于地下水丰富区域。水泥基灌浆料取材便捷、成本较低，适用于宽度较大的非活动裂缝修补，但流动性和粘结性略逊于化学灌浆材料，需根据裂缝工况合理选型。(3) 工艺控制：核心在于灌浆压力、孔位布置和封缝技术。灌浆压力需根据裂缝宽度、深度及衬砌厚度精准控制，一般为 $0.2\sim 0.5\text{MPa}$ ，既要保证材料充分渗透至裂缝末端，又要避免压力过大造成衬砌二次损伤；孔位布置采用“骑缝钻孔”方式，间距控制在 $30\sim 50\text{cm}$ ，设置进浆孔、排气孔和观察孔，确保灌浆通道畅通；封缝需采用专用密封材料封堵裂缝表面及孔口周边，待封缝材料固化达标后再进行灌浆，防止灌浆材料渗漏，保障灌浆效果。

3.3 结构加固技术

(1) 适用场景：适用于贯穿性裂缝、宽度 $> 1.0\text{mm}$ 的严重裂缝，或裂缝导致衬砌结构承载力不足、存在失稳风险的工况。此类裂缝已严重破坏混凝土结构完整性，需通过结构加固提升衬砌承载能力和整体稳定性，保障隧洞运行安全。(2) 方法对比：碳纤维布加固具有轻质高强、耐腐蚀、施工便捷等优势，通过粘结剂将碳纤维布粘贴于裂缝区域，利用其高强度特性分担混凝土受力，适用于曲面衬砌及复杂工况，但对基层平整度要求较高；钢板粘贴加固粘结强度高、承载能力提升显著，适用于承载力缺口较大的严重裂缝加固，但其重量大、易锈蚀，需后期定期维护；预应力锚索加固通过施加预应力约束围岩变形，从根源上抑制裂缝扩展，适用于围岩稳定性较差区域的加固，但施工工艺复杂、成本较高，需结合工程实际选择^[3]。

3.4 新型复合处理技术

(1) 纳米材料改性修补：通过在传统修补材料中掺入纳米 SiO_2 、纳米 TiO_2 等纳米材料，优化材料微观结构，提升修补层的强度、抗渗性和抗老化性能。其中纳米 SiO_2 可填充混凝土内部孔隙，增强界面粘结力，显著提升修补材料的抗裂性和耐久性，适用于对修补质量要求较高的关键部位，目前已在多个大型输水隧洞修复工程中试点应用。(2) 自愈合混凝土技术应用：核心是利用材料自身的自修复能力实现裂缝自主闭合，主要包括微生物矿化技术和胶囊修复技术。微生物矿化技术通过在混凝土中掺入产脲酶微生物，当裂缝产生后，外界水分渗入携带微生物与营养盐发生反应，生成碳酸钙沉淀封堵裂缝；胶囊修复技术将含有修复剂的微胶囊预埋于混凝土内，裂缝扩展时胶囊破裂，修复剂自动流出并与混凝土发生反应实现愈合。该类技术可减少后期维护成本，尤其适用于隧洞隐蔽区域裂缝的长效治理，是未来裂缝处理技术的重要发展方向。

3.5 裂缝渗水防护措施

(1) 适用场景：专为存在渗水现象的隧洞衬砌裂缝设计，涵盖不同宽度的渗水裂缝及伴生渗漏通道的工况。此类裂缝不仅影响结构耐久性，还可能因渗流水压加剧裂缝扩展，甚至引发衬砌剥落、围岩失稳，适用于隧洞高水位段、地下水富集区等渗水风险较高区域的裂缝协同处理，是保障输水安全的关键配套措施。(2) 核心措施：分为源头截渗和局部堵渗两类。源头截渗通过在隧洞外侧设置防渗帷幕或注浆加固圈，阻断地下水补给通道，从根源减少渗水；局部堵渗采用“堵排结合”策略，对集中渗水裂缝，先埋设排水导管导出渗流，再采用快

硬水泥、丙烯酸酯等速凝堵漏材料封堵裂缝,最后进行常规修补加固。(3)工艺要点:排水导管需精准定位渗水点,采用斜向钻孔埋设确保排水顺畅;堵渗材料施工前需清理裂缝内积水、泥砂,分层压实封堵;对高水压渗水裂缝,需分级施加压力进行封堵,固化后进行压水试验,确保渗漏量满足设计要求,同时同步做好修补后的抗渗防护。

4 输水隧洞混凝土衬砌裂缝预防与长期维护策略

4.1 设计阶段预防措施

(1)优化衬砌结构形式:结合隧洞地质条件和受力特性,采用柔性接头、合理分缝等设计方案。柔性接头可有效吸收围岩变形和混凝土收缩产生的应力,减少应力集中引发的裂缝;分缝设计需科学确定缝间距和缝宽,设置止水构造,避免因温度变化、结构沉降导致衬砌拉裂,尤其适用于长距离、大断面输水隧洞工程。(2)抗裂混凝土配合比设计:选用低热硅酸盐水泥降低水化热峰值,掺入粉煤灰、矿渣粉等掺合料替代部分水泥,减少水化热释放;添加钢纤维、聚丙烯纤维等增强材料,提升混凝土抗拉强度和韧性,抑制裂缝萌生与扩展。同时严格控制水灰比和坍落度,保障混凝土密实度,从材料层面提升衬砌抗裂性能。

4.2 施工阶段质量控制

(1)温控措施:在混凝土内部埋设冷却水管,通过循环水散热降低内外温差,控制温差不超过 25°C ;采用分层浇筑工艺,每层浇筑厚度控制在 $30\sim 50\text{cm}$,合理安排浇筑间歇时间,避免层间结合不良和温度应力累积。浇筑过程中实时监测温度变化,动态调整冷却供水参数,确保温控效果。(2)养护工艺改进:根据施工环境采用针对性养护方案,低温环境下采用蒸汽养护,快速提升混凝土早期强度,避免冻害引发裂缝;常温环境下采用保湿覆盖养护,通过土工布、保湿膜等覆盖材料保持混凝土表面湿润,养护周期不少于14天,确保混凝土强度

稳步增长,减少干缩裂缝^[4]。

4.3 运行期监测与维护

(1)定期巡检制度:建立“人工+智能”协同巡检模式,结合无人机航拍和隧道机器人自主巡检,实现长距离隧洞全覆盖检测。无人机可快速排查隧洞顶部、高处等人工难以触及区域的裂缝;机器人搭载高清摄像头和传感器,精准采集裂缝参数并实时传输数据,配合人工定期复核,提升巡检效率与精度。(2)应急处理预案:针对突发渗漏或裂缝快速扩展等险情,制定分级响应预案。明确应急处置流程、人员职责和物资储备,配备便携式灌浆设备、快速封堵材料等应急物资。险情发生后立即启动预案,快速阻断渗漏通道、加固裂缝区域,同时开展监测预警,防止险情扩大,保障隧洞运行安全。

结束语

输水隧洞混凝土衬砌裂缝处理是保障工程安全与长期运行的关键环节。通过科学诊断裂缝成因、精准分类,并针对性采用表面封闭、灌浆加固或复合补强等技术,可有效恢复结构整体性与耐久性。实践中需严格把控材料性能、施工工艺及质量验收标准,同时结合监测数据动态优化方案。未来应进一步研发环保高效的新型材料与智能化施工装备,推动裂缝处理技术向精细化、绿色化方向升级。

参考文献

- [1]陈乃或,苏志新,王成山等.水工隧洞混凝土衬砌裂缝主要原因及预防措施[J].东北水利水电,2023,41(02):60-63.
- [2]李钰.水工隧洞衬砌混凝土温控防裂技术研究[J].水利科技与经济,2022,28(09):126-130.
- [3]武荣成,陈杰.高寒地区水电站引水隧洞衬砌混凝土裂缝的控制[J].云南水力发电,2021,37(10):36-40.
- [4]王红帅.北疆某长距离地下引水隧洞衬砌混凝土裂缝原因探讨[J].水利技术监督,2021,(11):7-10.