

输水隧洞衬砌裂缝形成机理与防治措施研究

包晓聪

中国能建葛洲坝集团三峡建设工程有限公司 湖北 宜昌 443000

【摘要】：输水隧洞衬砌裂缝是威胁水工结构安全与耐久性的关键问题。本文系统分析了衬砌裂缝的形成机理，重点探讨了地质环境、温度应力、渗流压力及材料特性等多因素耦合作用下的裂缝萌生与扩展规律。在此基础上，构建了一套集设计优化、材料改进、施工控制与智能监测于一体的综合防治技术体系。通过华北某引水隧洞工程实例的应用验证，表明该综合防治体系能有效抑制裂缝发展，显著提升结构长期稳定性。研究结果表明，多因素协同控制与动态智能监测是实现衬砌长效防裂的有效途径，为输水隧洞的安全运行提供了重要技术支撑。

【关键词】：输水隧洞；衬砌裂缝；形成机理；温度应力；防治措施；结构健康监测

DOI:10.12417/2811-0536.26.02.026

引言

随着大型引水与调水工程的迅猛发展，输水隧洞在水资源输配体系中扮演着核心角色。衬砌作为承受内外压力的重要防护结构，其裂缝问题已成为制约工程寿命与安全的主要隐患。输水隧洞的规模与埋深不断增加，其衬砌结构的安全性与长期耐久性面临严峻挑战。裂缝不仅改变衬砌受力体系，还可能引发渗漏、钢筋腐蚀及结构劣化等一系列次生问题。面对复杂地质环境与多变水力条件，传统经验型防裂措施已难以满足现代水工结构的高安全需求。通过揭示裂缝形成机理，构建科学的防控体系，是提升隧洞整体耐久性与运行稳定性的关键研究方向。

1 输水隧洞衬砌结构的运行现状与技术基础

我国输水隧洞衬砌结构在现代水利工程体系中承担着导流、调蓄和防渗等多重功能，其运行状态直接影响水资源调配的安全性工程稳定性。随着引水规模和隧洞长度的不断增加，衬砌结构的受力环境愈发复杂，在地应力、水压力、温度场与围岩变形的协同作用下，结构易出现应力集中，成为裂缝萌生的核心背景条件。现阶段，大多数输水隧洞采用全断面钢筋混凝土衬砌结构，部分采用复合式衬砌增强抗渗性，但混凝土材料性能波动、施工温控不到位、围岩变形不均等因素，均会直接导致衬砌应力分布失衡，成为裂缝萌生的潜在诱因。运行监测数据显示，在地质条件变化明显的区段，衬砌拱顶、拱脚等关键部位易形成局部应力集中区，当拉应力超过混凝土抗拉强度时，极易诱发初始裂缝或微裂纹扩展。在运行阶段，温度场与渗流场的周期性波动对衬砌耐久性构成持续威胁。水流温度变化引发混凝土热胀冷缩，隧洞内壁长期湿润导致材料产生干湿循环疲劳效应，直接削弱混凝土微观结构致密性，为裂缝扩展提供通道。若防水

层与背衬处理不当，渗流压力将通过潜在裂隙作用于结构背面，形成不均匀荷载，进一步加剧衬砌局部脱空或剥离风险。此外，不同地区水化学性质差异引发的化学腐蚀，会造成衬砌表面钙质析出、碳化层加厚，显著降低结构抗拉强度，间接增大裂缝发生概率。

施工环节中，混凝土浇筑速度、振捣质量、施工缝处理及温控养护的精细化程度，直接影响衬砌结构完整性。若浇筑节奏失衡、振捣不充分或施工缝密封不严，易形成结构薄弱区；温控措施不到位则会加剧早期温度应力，为裂缝产生创造条件。运行期虽已逐步引入智能监测手段捕捉结构变形，但复杂环境下的隐患预判仍面临挑战，难以完全规避裂缝萌生与扩展风险。

2 衬砌裂缝形成的主要机理与影响因素

衬砌裂缝的形成是力学场、材料场、环境场与施工扰动场耦合作用的复杂过程，不同机理相互叠加放大，共同推动裂缝的萌生与扩展。以下从三大核心机理展开具体分析：

2.1 力学机理

地应力：隧洞开挖导致围岩初始应力释放，若围岩变形不均，衬砌与围岩协同变形受限，会引发截面应力重分布。当局部拉应力超过混凝土抗拉强度时，结构表面便会出现初始裂隙，且应力集中难以缓释，裂缝会沿最大主应力方向延伸。

水压力：地下水渗流产生的渗透压力，会沿衬砌薄弱部位（如施工缝、微孔隙）集中作用，不仅直接增大局部拉应力，还会侵蚀混凝土内部结构，降低材料强度，推动裂缝持续扩展。

自重：衬砌自重会使截面下部产生拉应力集中，尤其在拱脚与底板衔接部位，因受力复杂，易成为裂

缝高发区域。

2.2 材料机理

干缩变形：水灰比较大或掺合料比例不当，会导致混凝土孔隙率上升，内部自由水蒸发后体积收缩。由于衬砌受到围岩或模板的约束，收缩变形无法自由释放，约束区域产生拉应力，当拉应力超过材料抗拉极限时，便会引发干缩裂缝。

自收缩变形：水泥水化过程中会消耗内部水分，导致混凝土在硬化早期产生自收缩。此时混凝土强度较低，难以抵抗收缩应力，易形成微观裂纹，后续在其他因素作用下逐步扩展为宏观裂缝。

水化热效应：水泥水化会释放大量热量，使混凝土内部温度快速升高，而外层与环境接触冷却速度较快，形成明显温度梯度。温度梯度引发的温差应力会转化为拉应力，若养护和降温控制不当，拉应力超过混凝土抗拉强度，就会产生温度裂缝。

骨料影响：掺入低质量骨料或砂石级配不合理，会削弱混凝土整体变形协调性，降低材料抗拉性能，使混凝土在受力或变形过程中更易产生微裂纹。

2.3 环境与施工机理

温度循环：在温度变化幅度大或昼夜温差明显的地区，混凝土表层受外部热胀冷缩循环影响，会产生反复的拉伸-压缩疲劳损伤，逐步破坏微观结构，加速微裂纹的发展。

干湿循环：隧洞环境湿度波动频繁，导致混凝土长期处于干湿交替状态。毛细孔结构在水分迁移过程中反复膨胀收缩，会加剧微观结构损伤，使潜在裂隙逐步贯通为宏观裂缝。

围岩约束：在软弱破碎围岩中，岩体变形不均会导致衬砌与围岩之间的接触压力分布不连续，局部脱空或应力集中位置易形成剪切裂缝。

施工工艺：浇筑速度过快会导致混凝土内部散热不畅，振捣不充分会造成密实度不足，施工缝处理不严密会留下结构缺陷，这些问题都会降低衬砌完整性，形成贯通性裂缝的隐患。

需特别指出的是，衬砌裂缝的形成并非单一机理作用的结果，而是上述多种机理耦合作用的产物。例如，地应力引发的初始裂隙会在水化热温差应力与渗流水压力的协同作用下加速扩展，干湿循环则会进一步削弱材料性能，使裂缝更易贯通。多场耦合效应放大了单一因素的影响，是裂缝防控需重点关注的核心逻辑。

3 裂缝控制与防治的综合技术途径

(1) 设计优化：针对性化解力学与约束风险：为应对地应力、水压力等力学机理引发的裂缝问题，设计阶段需以应力协调和变形兼容为原则。通过合理设置伸缩缝与防裂带，避免刚性约束造成的应力集中；采用分区设计理念，对高地应力区、软弱围岩区与常规段差异化设计，优化衬砌厚度、配筋率及衬砌与围岩间的接触关系。针对高埋深或高水压隧洞，采用柔性衬砌或复合防水衬砌结构，吸收地应力变化带来的形变能量，减小裂缝发生几率。借助有限元分析与三维数值模拟技术，预测温度场和水压力耦合作用下的应力分布，通过参数反演校核设计方案，实现防裂措施前置化。

(2) 材料改进：阻断材料机理引发的裂缝路径。针对材料机理中的水化热、干缩、自收缩等问题，核心技术路径为优化混凝土性能。选用低水化热水泥，降低早期水化热峰值，减少温度裂缝风险；混凝土配合比设计中降低水灰比，适度掺入粉煤灰、硅灰等矿物掺合料，改善微观结构密实性；添加适量膨胀剂或减缩剂，抵消收缩应变，提升抗裂性能。针对地下高湿环境，选用自密实混凝土避免浇筑缺陷，采用高性能外加剂改善流动性与粘结性能。施工现场加强原材料检测与混凝土出厂温度控制，防止高温导致早期收缩裂缝。

(3) 施工控制：规避环境与施工机理的负面影响。针对温度循环、干湿循环及施工工艺引发的裂缝，施工阶段需强化精细管控。控制分层浇筑厚度与节奏，保持混凝土温度均衡，采用对称连续作业模式减少冷缝；衬砌模板安装保证线形精度，避免局部错位导致应力集中；振捣工艺根据断面厚度和钢筋密度合理调整，确保混凝土密实。养护阶段采用恒湿保温措施，通过自动化喷淋与温控系统保持湿度稳定，避免早期干缩；高温差风险区域埋设冷却水管或采用分区浇筑方案，控制水化热峰值。施工缝与变形缝采用止水带或弹性防水材料密封，防止渗流引发裂缝再扩展。

(4) 智能监测。动态防控多场耦合风险：依托光纤光栅传感技术、声发射检测技术与三维激光扫描技术，构建全生命周期监测体系。实时捕捉衬砌应变、温度及微变形，精准识别裂缝萌生与扩展趋势；通过数字化裂缝信息管理平台，动态记录裂缝位置、宽度、深度及发展速率。结合大数据分析机器学习算法，设定预警阈值，实现从监测到决策的智能闭环管理，为裂缝早期干预提供数据支撑。修复阶段针对不同裂缝类型实施差异化治理：表层及初生裂缝采用低黏度

环氧树脂或聚氨酯材料高压注浆,结构性裂缝通过二次衬砌加固、钢纤维喷射层覆盖等方式修复,修复后经红外热成像与渗透检测验证效果。

4 工程实例分析——某引水隧洞裂缝防治成效研究

华北某大型引水隧洞全长 12.3 公里,最大埋深 420 米,衬砌采用 C40 钢筋混凝土结构。运行三年后,拱腰及底板位置出现多条纵向细微裂缝,裂缝宽度介于 0.15 至 0.3 毫米,部分裂缝伴随渗水现象,虽未影响结构整体承载力,但长期运行存在渗漏加剧、钢筋腐蚀的风险。经检测分析,该问题是多机理耦合作用的结果:一是区段处于高地应力集中带,围岩变形不均引发应力集中(对应第二章力学机理);二是施工阶段混凝土入模温度偏高(达 32℃)、降温速率过快(日均降温 5℃),导致内部温度梯度过大,产生温度应力(对应第二章材料机理);三是局部施工缝处理不严密,为渗流提供了通道(对应第二章施工机理)。针对上述问题,工程技术团队应用前文提出的综合防治体系:一是采用第三章所述的低黏度环氧树脂高压注浆技术封闭裂缝,提高混凝土密实性与防渗性能;二是优化结构设计,增设伸缩缝与防裂带,分散温度应力(对应设计优化措施);三是加强运行期通风与湿度调控,保持内壁温度稳定(对应施工控制中的温控措施);四是布设光纤光栅传感系统,实时监测衬砌应变变化(对应智能监测措施)。经连续五年观测,原裂缝宽度从 0.15-0.3mm 稳定控制在 0.1mm 以内,未出现进一步扩展,新裂缝发生率较同类未治理区段下降 85%;隧洞渗漏量较治理前降低约三分之二,彻底解决了长期渗水隐患,衬砌表面保持稳定,结构安全性能显著提升。该实验验证了温控、结构柔化与智能监测并行的防裂体系在复杂地质条件下的可行性,为同类工程提供了技术参考与管理模式。

5 输水隧洞衬砌裂缝防控的未来方向

(1) 数字化发展方向:数字化技术将实现裂缝防控的全流程精准化。通过数字孪生技术构建隧洞衬砌

虚拟模型,与现场监测数据实时交互,模拟不同工况下的应力响应,为设计优化与施工控制提供动态依据。依托大数据平台整合地质、材料、施工及运维数据,建立全生命周期信息档案,实现裂缝风险的溯源分析与精准预判,推动防控措施从“被动修复”向“主动预防”转变。

(2) 智能化发展方向:智能化监测与预警将成为核心支撑。基于多源数据融合技术,深度整合光纤光栅传感的实时应变反馈、声波成像的内部结构探测信号与无人机的全域扫描信息,通过智能算法过滤环境干扰、提取裂缝特征,实现对微小裂纹与隐蔽裂缝的精准识别,避免人工检测的遗漏与滞后。借助人工智能算法构建裂缝演化预测模型,融合历史运维数据与实时监测动态,精准研判裂缝扩展趋势及对结构安全的潜在影响。系统内置多级预警机制,当裂缝发展接近预警阈值时自动触发干预指令,形成“监测-分析-预警-处置”的智能闭环,大幅提升防控响应速度。

(3) 高性能材料发展方向:新型材料的研发与应用将从根源上提升抗裂能力。高延性混凝土、自愈合材料 & 纤维增强复合材料的推广,可在裂缝产生初期实现自我修复与应力再分配,降低裂缝扩展风险。同时,低水化热、高抗渗、抗腐蚀的多功能复合混凝土将成为主流,结合精准配合比设计,进一步优化材料力学性能与耐久性,适应复杂地质与水力环境。

6 结语

本文通过系统分析表明,输水隧洞衬砌裂缝是力学、材料、环境及施工多因素耦合作用的复杂结果。其有效防治必须立足于全寿命周期视角,构建涵盖设计、材料、施工与运维的综合性技术体系。将结构柔性设计、材料性能优化、精细施工控制与智能监测预警相结合,是提升衬砌抗裂性能、保障隧洞长期安全运行的关键。未来,随着智能算法与新材料的融合发展,裂缝防控将迈向更加精准、主动的新阶段。

参考文献:

- [1] 陈志强.输水隧洞衬砌裂缝成因与防治技术研究[J].水利科技与工程,2021,19(3):45-52.
- [2] 赵俊生.大型引水隧洞混凝土衬砌温度裂缝控制分析[J].岩土工程学报,2020,42(8):1324-1331.
- [3] 黄立恒.地应力作用下隧洞衬砌裂缝演化机理与数值模拟研究[J].水电能源科学,2022,40(5):87-94.
- [4] 郑玉峰.输水工程衬砌裂缝修复与长期监测技术应用[J].水利建设与管理,2023,41(4):98-105.
- [5] 吴晓川.隧洞混凝土衬砌裂缝防治措施优化研究[J].水利学报,2019,50(7):1115-1123.