

水利工程隧洞衬砌混凝土脱空缺陷检测与处理

盛东升

新疆水发水务集团有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6896

[摘要] 水利工程隧洞作为跨流域调水、农田灌溉、水力发电等工程的核心枢纽,衬砌混凝土结构承担着承受围岩压力、抗渗防渗及保障洞体稳定的核心功能。本文结合水利工程隧洞的服役环境特殊性,深入剖析衬砌混凝土脱空缺陷的形成机理,系统阐述脱空缺陷的精准检测技术原理与应用要点,提出针对性的处理工艺及质量控制标准,为水利工程隧洞衬砌脱空缺陷的防控、检测与治理提供理论支撑和技术参考,助力水利工程隧洞安全运维与长效服役。

[关键词] 水利工程; 隧洞衬砌; 混凝土脱空; 缺陷检测; 处理工艺

中图分类号: TV5 文献标识码: A

Detection and Treatment of Void Defects in Concrete Lining of Hydraulic Tunnels

Dongsheng Sheng

Xinjiang Water Resources Development Group Co., Ltd.

[Abstract] As the core hub of inter-basin water transfer, agricultural irrigation, hydropower generation, and other projects, the concrete lining structure of hydraulic tunnels bears the critical functions of withstanding surrounding rock pressure, ensuring impermeability and anti-seepage, and maintaining tunnel stability. This paper, taking into account the unique service environment of hydraulic tunnels, delves into the formation mechanism of void defects in concrete lining, systematically elaborates on the principles and key application points of precise detection technologies for void defects, and proposes targeted treatment processes and quality control standards. It provides theoretical support and technical references for the prevention, detection, and remediation of void defects in hydraulic tunnel linings, contributing to the safe operation and long-term service of hydraulic tunnel engineering.

[Key words] hydraulic engineering; tunnel lining; concrete void; defect detection; treatment process

引言

利工程隧洞作为调水、发电及灌溉工程的核心构筑物,其衬砌混凝土不仅承担围岩压力,更肩负防渗抗渗的关键功能,直接决定工程的安全与寿命。然而,受施工工艺、地质条件及环境荷载的耦合影响,衬砌背后脱空成为最常见的隐蔽性缺陷。该缺陷破坏衬砌与围岩的协同受力体系,导致应力集中与结构破损;同时形成渗水通道,引发内水外渗或地下水内侵,形成“脱空—渗漏—结构劣化”的恶性循环,显著缩短隧洞服役寿命,增加运维成本。鉴于脱空缺陷的隐蔽性与严重危害,精准检测与有效治理已成为保障隧洞长期安全运行的关键。

1 水利工程隧洞衬砌脱空形成原因

1.1 施工工艺

水利工程隧洞衬砌施工中,模板安装精度不足、支撑体系不牢固,易导致模板与围岩之间形成不规则间隙,混凝土浇筑过程中无法充分填充该间隙,直接形成脱空;混凝土浇筑顺序不合

理、振捣工艺不规范,尤其是隧洞拱顶、边墙等空间狭窄部位,振捣作业难度大,易出现混凝土蜂窝、麻面等缺陷,进而发展为脱空;衬砌背后回填灌浆工艺不到位,灌浆压力不足、浆液浓度不合理、灌浆孔布设间距过大,导致浆液无法充分填充衬砌与围岩、初期支护之间的空隙,形成脱空隐患。

1.2 地质条件

复杂地质条件是脱空缺陷形成的重要外部因素。水利工程隧洞多穿越软弱围岩、破碎岩层、富水地层等复杂地质区域,围岩稳定性差,易发生坍塌、变形,导致衬砌施工时围岩表面平整度不足,模板无法与围岩紧密贴合,形成天然间隙;富水地层中,地下水渗漏会稀释混凝土浆液,降低混凝土流动性与密实度,同时地下水的浮力作用会导致衬砌混凝土与围岩产生分离趋势,形成脱空;软弱围岩在衬砌施工后易发生蠕变变形,导致衬砌与围岩之间产生相对位移,破坏两者粘结界面,进而形成脱空。

1.3 环境因素

水利工程隧洞服役环境复杂,长期承受冻融循环作用,混凝土会发生冻融破坏,体积产生交替膨胀收缩,导致衬砌与围岩之间的粘结力下降,逐步形成脱空;内水压力的周期性变化会导致衬砌结构产生反复变形,加剧衬砌与围岩的分离程度,扩大脱空范围;地下水的侵蚀作用会破坏混凝土的微观结构,导致衬砌表面剥落,进一步加剧脱空缺陷的发展。

2 水利工程隧洞衬砌混凝土脱空缺陷检测技术

水利工程隧洞衬砌混凝土脱空缺陷具有隐蔽性强、分布不均匀、检测难度大等特点,且隧洞内部空间狭窄、光线不足、湿度高,进一步增加了检测工作的难度。无损检测技术因其不破坏衬砌结构、检测效率高、适用范围广等优势,在水利工程隧洞脱空检测中应用最为广泛。

2.1 地质雷达检测技术

地质雷达检测技术基于高频电磁波传播原理,利用高频电磁波在不同介质中的传播速度、反射系数差异,通过发射天线向衬砌混凝土发射电磁波,接收天线接收反射信号,通过分析反射信号的幅值、相位、传播时间等参数,判断衬砌混凝土内部及衬砌与围岩之间的脱空缺陷。该技术具有检测速度快、分辨率高、操作简便、可实现连续检测等优势,适用于水利工程隧洞衬砌脱空缺陷的快速普查与精准定位,尤其适用于拱顶、边墙等关键部位的脱空检测。针对水利工程隧洞高湿度、易渗水的特殊性,地质雷达检测技术应用时需进行针对性优化。检测前需对衬砌表面进行清理,去除积水、浮浆及杂物,确保检测表面平整干燥,避免水分影响电磁波传播,导致检测信号失真;对于富水隧洞,应选用抗干扰能力强的高频天线,减少地下水对检测信号的干扰。检测过程中,天线需与衬砌表面紧密贴合,移动速度保持均匀,避免因移动过快导致信号漏检;隧洞拱顶部位可采用可伸缩检测架,确保天线全面覆盖检测区域,消除检测盲区。

2.2 冲击回波法检测技术

冲击回波法检测技术基于应力波传播原理,利用冲击锤对衬砌混凝土表面进行冲击,产生弹性应力波,应力波在衬砌混凝土内部传播,当遇到脱空缺陷(空气与混凝土的界面)时,会发生反射与折射,通过传感器接收反射应力波,分析反射波的频率、幅值等参数,判断脱空缺陷的存在及相关参数。该技术具有检测精度高、不受钢筋干扰、可检测深层脱空等优势,适用于水利工程隧洞衬砌脱空缺陷的精准检测,尤其适用于钢筋密集区域的脱空检测。结合水利工程隧洞的服役环境,冲击回波法检测技术应用时需注意三个要点:一是检测前需对衬砌表面进行打磨处理,去除浮浆、油污及杂物,确保冲击锤与衬砌表面接触良好,避免冲击能量损失;二是对于有渗漏水的部位,需先进行止水处理,避免水分影响应力波传播,防止检测信号失真;三是冲击锤的冲击力需根据衬砌厚度、混凝土强度进行调整,既要保证产生足够的应力波以检测深层脱空,又要避免冲击力过大损坏衬砌结构。

2.3 超声检测技术

超声检测技术基于超声波传播原理,利用超声波探头向衬砌混凝土内部发射超声波,超声波在混凝土内部传播过程中,遇到脱空缺陷时会发生反射、折射与散射,导致超声波的传播速度、幅值及波形发生变化,通过分析这些变化参数,判断脱空缺陷的存在及相关参数。该技术具有检测精度高、操作简便、成本低等优势,适用于水利工程隧洞衬砌脱空缺陷的局部精准检测,尤其适用于脱空缺陷的深度检测。针对水利工程隧洞的特殊性,超声检测技术应用时需进行针对性调整:一是对于潮湿、渗水的衬砌表面,应采用防水型超声波探头,避免水分进入探头影响检测效果;二是检测时需将探头与衬砌表面之间涂抹耦合剂(如凡士林、耦合浆),确保超声波顺利传入混凝土内部,减少能量损失;三是对于大断面隧洞,可采用多探头阵列检测,提高检测效率,消除检测盲区。

3 水利工程隧洞衬砌混凝土脱空缺陷处理

3.1 灌浆处理

灌浆处理是水利工程隧洞衬砌混凝土脱空缺陷处理中最常用、最有效的工艺,其核心原理是通过在衬砌混凝土上布设灌浆孔,将浆液高压注入脱空空隙中,浆液凝固后与衬砌混凝土、围岩、初期支护形成整体,填充脱空空隙,增强粘结力,恢复衬砌结构的协同受力能力与防渗性能。该工艺具有施工简便、处理效果好、适用范围广等优势,适用于各类脱空缺陷的处理,尤其适用于深层脱空、大面积脱空及有渗漏水的脱空缺陷处理,是水利工程隧洞脱空缺陷处理的首选工艺。

灌浆施工的关键是确保浆液均匀、密实填充脱空空隙,避免出现漏灌、少灌等问题,结合水利工程隧洞的特殊性,灌浆施工应遵循以下要点:(1)灌浆孔的布设,需根据脱空缺陷的位置、范围与深度,合理布设灌浆孔,灌浆孔的间距、孔径与深度需结合脱空情况确定,一般情况下,灌浆孔间距为1.5~2.5m,孔径为42~50mm,深度需穿透衬砌混凝土,直达脱空空隙底部。拱顶部位的脱空缺陷,灌浆孔应呈梅花形布设,确保浆液全面填充脱空空隙;边墙部位的脱空缺陷,灌浆孔应垂直于衬砌表面布设,避免浆液流失。此外,可在衬砌拱顶部位设置注浆管系统,便于后期通过压力注浆填充收缩微隙,构建完整的防渗体系。(2)灌浆压力的控制,灌浆压力需根据衬砌厚度、混凝土强度、脱空深度与范围等因素确定,既要保证浆液顺利注入脱空空隙,又要避免压力过大损坏衬砌结构。一般情况下,灌浆压力控制在0.3~0.8MPa,对于深层脱空、大面积脱空,可适当提高灌浆压力,但最大压力不得超过衬砌混凝土设计抗压强度的1/2。灌浆过程中,需实时监测灌浆压力,根据压力变化调整灌浆速度与浆液浓度,确保灌浆过程稳定。对于富水隧洞,可采用分级升压方式,逐步提高灌浆压力,避免因压力骤升导致浆液流失。(3)灌浆顺序的确定,灌浆顺序应遵循“由浅入深、由疏到密、分序灌浆”的原则,先灌注浅层脱空缺陷,再灌注深层脱空缺陷;先灌注边缘部位,再灌注中心部位;分序灌浆可分为I序孔、II序孔,先灌注I序孔,待浆液凝固后,再灌注II序孔,确保浆液均匀填充脱空空隙,避免出现漏灌部位。对于有渗漏水的脱空缺陷,需先

进行堵漏处理, 再进行灌浆, 避免浆液被地下水稀释, 影响处理效果。

3.2 喷射混凝土处理

喷射混凝土处理工艺适用于脱空间隙较小、表面破损较严重的衬砌脱空缺陷处理, 其原理是通过喷射设备将混凝土浆液高速喷射到衬砌表面与脱空间隙中, 混凝土浆液快速凝固后, 与原衬砌混凝土、围岩形成整体, 填充脱空间隙, 修复衬砌表面破损, 增强衬砌结构的承载能力与防渗性能。该工艺具有施工速度快、操作简便、成本低等优势, 适用于隧洞边墙、拱腰等部位的浅层脱空缺陷处理, 尤其适用于脱空间隙小于5cm的缺陷处理。

喷射施工的关键是确保喷射混凝土均匀、密实填充脱空间隙, 与原衬砌混凝土紧密结合, 结合水利工程隧洞的特殊性, 喷射施工应遵循以下要点: (1) 施工前准备, 需对衬砌表面进行清理, 去除浮浆、油污、杂物及松动混凝土块, 对脱空间隙进行清理, 去除间隙内的泥土、碎石等杂物, 确保喷射混凝土与原衬砌混凝土、围岩紧密结合; 对于有渗漏水的部位, 需先进行止水处理, 减少地下水对喷射混凝土的影响。同时, 需检查喷射设备性能, 确保设备正常运行。(2) 喷射参数的控制, 喷射压力控制在0.2~0.4MPa, 喷射距离控制在1.5~2.0m, 喷射角度垂直于衬砌表面, 避免倾斜喷射导致混凝土脱落; 喷射速度保持均匀, 避免过快导致混凝土密实度不足, 过慢导致混凝土堆积、脱落。喷射过程中, 采用分层喷射方式, 每层喷射厚度控制在5~10cm, 待前一层混凝土凝固后, 再进行下一层喷射, 直至填充至设计厚度, 避免一次性喷射过厚导致混凝土开裂、脱落。(3) 养护处理, 喷射混凝土施工完成后, 需及时进行养护, 养护时间不得少于14d, 养护期间需保持混凝土表面湿润, 避免混凝土失水开裂。对于冻融地区, 养护期间需采取保温措施, 防止混凝土发生冻融破坏; 对于有渗漏水的部位, 养护期间需加强止水措施, 避免渗水影响混凝土的凝固与强度发展。此外, 可采用高压喷涂设备施作养护膜, 成膜物质渗透至混凝土表层形成双向锁水结构, 提升养护效果。

3.3 衬砌加固处理

衬砌加固处理工艺适用于脱空范围较大、衬砌结构破损严重、承载能力显著下降的脱空缺陷处理, 其原理是通过在衬砌表面增设加固层, 增强衬砌结构的承载能力与整体性, 同时填充脱空间隙, 修复破损部位, 确保衬砌结构能够承受围岩压力与内水压力。该工艺具有加固效果好、耐久性强等优势, 适用于水利工程隧洞重大脱空缺陷的处理, 尤其适用于有压隧洞、高围岩压力隧洞的脱空缺陷处理。

钢筋混凝土加固工艺是最常用的衬砌加固工艺, 其操作要

点如下: (1) 施工前准备, 对衬砌表面进行清理、凿毛处理, 去除浮浆、油污及松动混凝土块, 对脱空间隙进行清理与灌浆处理, 确保间隙填充密实; 根据设计要求, 布设加固钢筋, 钢筋的规格、间距与长度需符合设计要求, 钢筋与原衬砌混凝土之间采用植筋方式连接, 确保连接牢固。对于变形超限的衬砌构件, 可采用预应力碳纤维板进行体外补强。(2) 模板安装, 根据加固层的厚度与形状, 安装模板, 模板需安装牢固、平整, 与原衬砌混凝土紧密贴合, 避免出现缝隙, 防止混凝土浇筑时漏浆。模板表面涂覆纳米级脱模剂, 既能保证拆模后混凝土表面光洁度, 又可减少模板清理维护频次。对于大变形洞段, 可在衬砌层与加固层间设置双层可压缩聚乙烯泡沫板缓冲层, 吸收变形并提供支撑。(3) 混凝土浇筑, 采用与原衬砌混凝土强度等级一致或更高的混凝土进行浇筑, 浇筑过程中需振捣密实, 避免出现蜂窝、麻面等缺陷; 浇筑完成后, 及时进行养护, 养护时间不得少于28d, 确保混凝土达到设计强度。浇筑时采用跳仓浇筑法控制收缩应力, 每仓长度不超过8米, 避免收缩裂缝产生。

4 结语

随着水利工程隧洞建设向复杂地质条件延伸, 衬砌混凝土脱空缺陷的检测与处理技术面临新的挑战与机遇。未来研究应聚焦以下方向: 一是研发高精度高效的智能化检测技术, 融合人工智能与大数据分析, 实现脱空缺陷的实时监测与智能识别, 推动检测模式从被动普查向主动预警转变, 显著提升检测效率与准确性。二是开发适应富水、高水压及冻融等特殊工况的新型灌浆材料与处理工艺, 着力提高缺陷修补的耐久性与环境适应性, 满足复杂地质条件下的工程需求。三是构建基于数字孪生的全生命周期防控体系, 通过建立衬砌结构数字模型, 实现脱空缺陷的动态演化模拟与精准治理, 形成“检测-评估-处理-预警”的闭环管控机制。上述研究将为水利工程隧洞的安全运维提供更有力的技术支撑, 助力实现工程长寿命运维目标。

[参考文献]

- [1] 石钰锋, 傅琼华, 高江林. 水工压力隧洞衬砌顶部脱空区对衬砌内力影响分析[J]. 江西水利科技, 2016, 42(3): 157-161.
- [2] 张家俊. 引水工程中隧洞全断面衬砌施工关键技术探究[J]. 工程建设与设计, 2025(26): 169-171.
- [3] 姚德元, 尤林, 舒连刚. 冲击回波法在钢衬脱空检测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2017(6): 55-58.

作者简介:

盛东升(1981--), 男, 汉族, 青海乐都县人, 本科, 工程师, 研究方向为渠道运行管理。