

隧道无损检测中冲击回波法的有效性探究

阮 钊

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710000

摘要：隧道衬砌病害直接影响结构安全与运营稳定性，无损检测是病害排查的核心手段。本文以冲击回波法为研究对象，结合隧道无损检测基础理论，阐述该方法的核心原理、检测系统组成及操作流程，重点分析其在衬砌厚度、裂缝、空洞三类主要病害检测中的有效性，从设备、操作、干扰防控、人员能力四个维度提出优化对策。研究表明，冲击回波法检测精度高、抗干扰性强、适配性好，可有效满足隧道衬砌病害无损检测需求，为隧道运维与病害整治提供可靠技术支持。

关键词：隧道无损检测；冲击回波法；衬砌病害；有效性分析

引言

随着隧道工程建设规模扩大，衬砌裂缝、空洞、厚度不足等病害频发，严重威胁行车安全与结构耐久性，无损检测技术成为保障隧道健康运营的关键。传统破损检测易造成二次伤害，而冲击回波法作为新型无损检测技术，具有操作便捷、无损高效等优势，在隧道检测中应用日益广泛。本文探究冲击回波法在隧道衬砌主要病害检测中的有效性，分析现存问题并提出优化对策，旨在完善该方法的工程应用体系，为隧道无损检测提供理论与实践参考。

1 隧道无损检测相关基础理论

1.1 隧道无损检测技术概述

隧道无损检测技术是在不破坏隧道结构、不影响其正常使用的前提下，通过物理手段采集结构内外信息，判断病害类型、程度及分布的技术。其核心特点为“无损性”“准确性”“高效性”，相较于传统破损检测，可避免二次伤害并快速获取全面数据，为隧道运维和病害整治提供支撑。常用技术主要分为声波类、电磁类、振动类等，依据不同物理原理适配各类病害检测，共同构成隧道结构健康监测的完整技术体系。

1.2 隧道检测中常见病害类型

受地质、施工、运营荷载及环境影响，隧道易产生三类主要病害：（1）衬砌结构病害，含裂缝、厚度不足、强度不达标、空洞等，其中裂缝最常见，易引发渗水、剥落甚至坍塌；（2）渗漏水病害，多由衬砌缝隙或防水失效导致，长期渗水会腐蚀钢筋、软化围岩，降低结构耐久性；（3）围岩及附属设施病害，如围岩变形、掉块，以及排水沟堵塞、路面破损等，虽不直接影响主体安全，但会加剧主体病害，影响正常运营。

1.3 隧道病害无损检测的核心需求

隧道病害无损检测核心需求围绕“精准、高效、全面、实用”展开：（1）精准性，需准确识别病害类型、测定参数，避免误判漏判，为评估提供可靠数据；（2）高效性，需缩短作业时间、减少交通影响，降低检测成本；（3）全面性，需覆盖隧道全断面、全长度，兼顾内外病害，消除检测盲区；（4）实用性，需保证检测结果易解读、可对接整治方案，且技术适配隧道复杂环境，具备强抗干扰能力，确保不同工况下稳定发挥作用^[1]。

2 冲击回波法的基本原理与检测系统

2.1 冲击回波法的原理

冲击回波法是基于应力波传播特性的隧道无损检测核心技术，其原理是通过人工施加瞬时冲击，使衬砌产生应力波，利用应力波在结构内部的传播、反射规律，解读回波信号以识别内部病害。冲击锤对衬砌表面施加轻微瞬时冲击时，会产生低频应力波并向内部传播，遇到裂缝、空洞等声学阻抗突变处时，应力波会反射传回表面。传感器捕捉回波后，分析其传播时间、频率等参数，结合应力波在衬砌材料中的传播速度，可精准计算衬砌厚度、病害位置及尺寸，实现无损检测且不破坏结构完整性。

2.2 冲击回波法检测系统组成

冲击回波法检测系统由冲击装置、信号采集装置和信号处理与分析系统三部分组成，协同保障检测精度。冲击装置核心为冲击锤，有钢质和橡胶缓冲两种类型，可根据衬砌材料硬度选择，以产生稳定可控的瞬时冲击。信号采集装置以压电式加速度传感器为核心，搭配数据传输模块，紧贴衬砌表面布置，将应力波振动信号转化为电信号并传输。信号处理与分析系统由硬件终端和专用软件构成，可对原始信号进行滤波、降噪等处理，提取特征参数并生成图谱，辅助检测人员解读病害

信息。

2.3 冲击回波法的检测流程

冲击回波法隧道检测流程分为三个核心步骤，确保结果准确。检测前需清理衬砌表面杂物，避免干扰信号采集，同时检查设备性能，校准传感器灵敏度和冲击力度，结合衬砌设计参数确定检测点位。现场检测时，按预设点位固定传感器，用冲击锤在其附近垂直施加均匀瞬时冲击，同步启动采集系统记录信号，每个点位重复冲击3-5次以避免偶然误差。最后通过专用软件处理原始信号、剔除干扰，提取特征参数并结合材料波速计算相关数据，生成检测报告为病害评估提供支撑^[2]。

3 冲击回波法在隧道衬砌主要病害检测中的有效性分析

3.1 在隧道衬砌厚度检测中的有效性分析

冲击回波法是隧道衬砌厚度无损检测中应用广泛的技术，其有效性主要体现在检测精度、适配性及稳定性三个核心维度：（1）检测精度的实际表现。衬砌厚度检测的核心有效性指标是检测结果与实际厚度的偏差范围，冲击回波法通过精准捕捉应力波传播与反射时间，结合衬砌材料波速计算厚度，有效控制了检测误差。在实际隧道检测中，针对C30-C50常用衬砌混凝土，该方法的检测误差可控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内，满足隧道衬砌厚度检测的规范要求，相较于传统检测方法，无需破坏衬砌结构即可实现高精度检测，避免了二次损伤带来的检测有效性下降问题。其检测精度受衬砌表面平整度影响较小，经简单表面清理后，即可保持稳定的检测精度，适配隧道衬砌表面常见的轻微不平整工况。（2）不同工况下的适配有效性。隧道衬砌厚度存在局部偏差、渐变偏差等不同工况，冲击回波法可灵活适配各类工况，确保检测有效性全覆盖。对于衬砌厚度均匀区域，该方法可快速完成批量检测，提升检测效率；对于衬砌厚度突变区域，应力波反射信号会出现明显特征变化，可精准捕捉厚度突变节点，明确突变范围与偏差数值。此外，该方法对衬砌背后回填不密实区域的厚度检测同样具备有效性，可通过回波信号的幅值变化，辅助判断衬砌与围岩的贴合程度，间接验证衬砌厚度检测结果的可靠性，弥补了部分无损检测方法仅能检测衬砌本体厚度的局限性。（3）检测稳定性的实际验证。有效性的核心支撑是检测结果的稳定性，冲击回波法在同一检测点位多次重复检测时，厚度检测结果的变异系数较小，可稳定输出一致数据。在长期工程检测实践中，该方法受环境温度、湿度等外界因素影响较小，即便在隧道内部潮湿、通风不良的工况下，仍能保持稳定的检测精度，无需复杂的环境调控措施，降低了检测过程中的干扰因素影响，进一步提

升了其在实际隧道衬砌厚度检测中的有效性^[3]。

3.2 在隧道衬砌裂缝检测中的有效性分析

隧道衬砌裂缝是最常见的病害类型，冲击回波法对裂缝检测的有效性，主要集中在裂缝参数识别精度、裂缝检出能力及抗干扰性三个方面：（1）裂缝核心参数的识别有效性。裂缝检测的核心是精准识别裂缝深度、长度及宽度等关键参数，冲击回波法可通过回波信号的特征变化，实现对各类参数的有效识别。对于裂缝深度检测，当应力波传播至裂缝底部时，会产生明显的反射回波，通过计算回波传播时间与波速，可精准计算裂缝深度，尤其适用于深度5-500mm的中浅层裂缝，检测精度可满足规范要求；对于裂缝长度与宽度检测，通过沿裂缝走向布置连续检测点位，捕捉各点位回波信号的差异，可明确裂缝的延伸范围与宽度变化，对细微裂缝（宽度 $\geq 0.1\text{mm}$ ）具备良好的识别能力，可有效避免细微裂缝的漏判问题。（2）不同形态裂缝的检出有效性。隧道衬砌裂缝形态多样，包括纵向裂缝、横向裂缝、斜向裂缝及网状裂缝等，冲击回波法可根据不同形态裂缝的应力波反射规律，实现全面检出。对于单一方向裂缝，连续检测可清晰捕捉裂缝的延伸轨迹，明确裂缝起止位置；对于网状裂缝，通过加密检测点位，可区分各条裂缝的分布规律与相互关联，避免出现裂缝重叠误判的情况。同时，该方法可有效区分裂缝与衬砌表面划痕、浮浆缝隙，通过回波信号的幅值与频率差异，排除非结构性缝隙的干扰，确保裂缝检测的准确性，提升检测有效性。（3）实际检测中的抗干扰有效性。隧道内部存在衬砌表面附着物、施工残留杂物等干扰因素，冲击回波法具备较强的抗干扰能力，可确保检测有效性不受明显影响。经简单清理衬砌表面后，该方法可忽略轻微附着物的干扰，聚焦裂缝本身的信号特征；同时其采用低频应力波检测，可有效避免隧道内部振动、噪音等因素对信号采集的干扰，确保回波信号的稳定性与完整性。此外，该方法对裂缝内部填充杂物（如灰尘、渗水）的适应性较强，即便裂缝内部存在少量填充物质，仍能通过回波信号的细微变化，识别裂缝的核心参数，进一步适配实际隧道检测的复杂工况。

3.3 在隧道衬砌空洞检测中的有效性分析

隧道衬砌空洞多分布于衬砌与围岩之间或衬砌内部，隐蔽性强，冲击回波法对空洞检测的有效性，主要体现在空洞定位精度、参数识别能力及工况适配性三个方面：（1）空洞定位的精准有效性。空洞的精准定位是检测有效性的核心前提，冲击回波法通过应力波在空洞界面的反射规律，可精准确定空洞的平面位置与埋藏深

度。当应力波传播至空洞界面时,会产生强烈的反射回波,相较于完整衬砌区域的回波信号,空洞反射回波的幅值明显增大、传播时间存在显著差异,通过分析各检测点位的回波信号差异,可快速锁定空洞的平面范围,结合波速计算,可精准得出空洞的埋藏深度,定位误差较小,可满足实际工程中对空洞定位的检测要求,为后续空洞整治提供精准的位置参考。(2) 空洞核心参数的识别有效性。冲击回波法可有效识别空洞的尺寸、形态等核心参数,为空洞危害评估提供可靠数据支撑。对于空洞尺寸检测,通过加密空洞区域检测点位,捕捉回波信号的变化范围,可计算空洞的长度、宽度与高度,尤其适用于体积 $\geq 0.1\text{m}^3$ 的空洞检测,对小型隐蔽空洞具备良好的识别能力;对于空洞形态检测,通过分析不同方向的回波信号特征,可判断空洞的大致形态(如圆形、椭圆形、不规则形),明确空洞的分布特征,避免因空洞形态误判导致的危害评估偏差,提升检测有效性。

(3) 复杂工况下的适配有效性。隧道衬砌空洞的分布位置、埋藏深度存在较大差异,冲击回波法可灵活适配各类复杂工况,确保检测有效性全覆盖。对于衬砌内部空洞与衬砌背后空洞,该方法可通过回波信号的传播路径差异,明确区分两类空洞的位置类型;对于埋藏深度不同的空洞,可通过调整冲击力度与传感器灵敏度,优化信号采集效果,确保不同深度空洞均能被有效检出。该方法可有效区分空洞与衬砌疏松区域,通过回波信号的频率差异,排除疏松区域的干扰,避免将疏松区域误判为空洞,进一步提升了其在实际隧道衬砌空洞检测中的准确性与有效性^[4]。

4 提升冲击回波法在隧道无损检测中有效性的对策

为切实提升冲击回波法在隧道无损检测中的有效性,针对性制定以下可落地的优化对策:(1) 优化检测设备性能。对冲击装置进行改进,根据衬砌材料类型配套不同规格冲击锤,增设缓冲调节装置,确保冲击力度均匀可控;升级压电式加速度传感器,提升信号采集灵敏度和抗干扰能力,减少环境振动对信号的影响;优

化信号处理软件,增加自动滤波、降噪功能,简化操作流程,提升信号解读效率。(2) 规范检测参数与操作流程。结合隧道衬砌设计参数,明确不同工况下冲击力度、传感器布置间距等核心参数的选取标准;制定统一现场操作规范,要求检测前彻底清理衬砌表面,检测中保证冲击角度垂直、每个点位重复冲击3-5次,避免人为操作误差。(3) 强化干扰因素防控。针对隧道内部潮湿、粉尘等环境干扰,为传感器配备防水防尘护套;对衬砌疏松、表面附着物等结构干扰,提前进行预处理,区分干扰信号与病害信号;合理规划检测时间,避开隧道交通繁忙、振动剧烈时段。(4) 提升检测人员专业能力。建立常态化专业培训体系,结合实际检测案例,讲解设备操作、信号解读及病害识别技巧;定期开展实操考核,确保检测人员熟练掌握设备操作和参数优化方法,减少人为误判,保障检测结果精准可靠^[5]。

结束语

本文围绕冲击回波法在隧道无损检测中的有效性展开系统探究,梳理了隧道无损检测基础理论与冲击回波法核心技术,通过分析其在三类衬砌主要病害检测中的表现,验证了该方法的实用性与可靠性,并针对性提出提升有效性的优化对策。冲击回波法可有效解决隧道衬砌病害隐蔽性检测难题,弥补传统检测技术的不足。

参考文献

- [1] 李柯柯,李雪莲,杜永潇,谢礼安,陈海斌.冲击回波法检测沉管隧道浮态浇筑质量试验研究[J].广州建筑,2024,52(9):75-80.
- [2] 吴文丰.无损检测方法在单壳隧道衬砌中的实际应用[J].建筑机械,2023(4):139-143.
- [3] 王兴照.冲击回波声频法在铁路隧道衬砌缺陷检测中的应用研究[J].铁道建筑技术,2025(4):126-129.
- [4] 强光鹏.应用无损检测方法对隧道喷射混凝土衬砌进行健康监测[J].水利科学与寒区工程,2022,5(3):15-18.
- [5] 汪徐.基于应力波的无损检测方法进行隧道衬砌评估研究[J].水利科学与寒区工程,2022,5(2):85-90.