

桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术对比研究

章博辉, 蔡庆森*

(温州市交通工程试验检测有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要 预应力混凝土桥梁广泛应用于交通基建, 预应力孔道注浆密实度直接关系到预应力筋防腐、结构整体性及耐久性, 注浆缺陷易引发桥梁安全隐患。无损检测技术凭借非破坏性、高效性等优势, 成为注浆密实度评估的核心手段。本文梳理超声法、雷达法等五种主流无损检测技术的原理、特点及适用范围, 从检测精度、操作难度等多维度对比分析, 探讨技术局限性与优化方向, 以期检测技术选型、质量控制及行业标准完善提供理论参考。

关键词 桥梁工程; 预应力孔道; 注浆密实度; 无损检测

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.004

0 引言

随着我国交通基建快速推进, 预应力混凝土桥梁建设规模扩大, 其结构安全性与耐久性备受关注。预应力孔道注浆的核心作用是包裹预应力筋、隔绝水汽防腐, 同时传递张力保障结构受力稳定。受施工多种因素影响, 注浆易出现空洞、裂隙等缺陷, 超过 30% 的预应力桥梁病害与此相关, 精准检测管控至关重要。传统钻芯取样法存在破坏性、效率低等弊端, 无损检测技术以无损伤、高效全面的优势, 弥补其不足并成为研究与应用主流。本文对比主流无损检测技术的优劣及适用条件, 为技术选型、精度提升提供依据。

1 桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术原理及特点

1.1 超声法检测技术

1. 检测原理。超声法基于弹性波传播理论, 借助超声波在不同介质中传播参数(速度、振幅、频率等)的差异, 评估孔道注浆密实度。注浆密实区域介质均匀, 超声波传播速度快、振幅衰减小、波形稳定; 若存在空洞、裂隙等缺陷, 声波会发生反射、折射, 导致参数异常。通过在孔道两侧或同侧布置换能器, 发射并分析超声信号, 可判定注浆密实度及缺陷情况。按检测方式可分为穿透法与反射法, 前者需双侧布置换能器, 适用于孔道明确、双侧可达场景; 后者单侧布置即可, 适配复杂工况。

2. 技术特点。超声法的优势在于检测精度高, 能

够准确识别毫米级缺陷, 对空洞、裂隙等缺陷的敏感性高; 检测设备轻便、操作简单, 可实现现场快速检测, 检测成本较低; 适用于各类混凝土强度等级及注浆材料, 不受浆体类型限制。同时, 超声法也存在一定局限性: 受结构尺寸、钢筋分布影响较大, 密集钢筋会对超声波信号产生干扰, 导致检测结果偏差; 对检测人员专业技能要求较高, 信号参数分析需结合经验判断; 难以检测大跨度、复杂布置的孔道, 检测范围有限^[1]。

1.2 雷达法检测技术

1. 检测原理。雷达法(地质雷达法)基于电磁波传播理论, 发射 100 MHz ~ 2 GHz 高频电磁波穿透混凝土结构, 其不同介质界面会发生反射、折射, 反射波参数与介质介电常数等密切相关。注浆密实区域浆体与混凝土介电常数差异小, 反射波微弱; 存在空洞时, 空气与浆体介电常数差异大, 产生强反射波。通过接收分析反射波信号, 可反演注浆分布及缺陷情况。检测时移动雷达天线连续收发电磁波, 形成剖面图, 解译后实现注浆密实度连续评估。

2. 技术特点。雷达法具有十分明显的核心优势, 检测速度较快, 能开展大面积连续扫描, 检测效率比超声法更高。使用该方法无需耦合剂, 对桥梁结构表面的损伤较小, 适应性也较强, 还能清晰展示孔道的走向以及缺陷的三维形态, 可视化效果良好, 适用于复杂孔道布置和大跨度桥梁的检测工作。不过它也存在突出局限性: 检测精度会受电磁波频率影响, 难以同时兼顾穿透深度与分辨率; 容易受到环境电磁干扰,

作者简介: 章博辉(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 交通检测。

*通信作者: 蔡庆森(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 交通检测。E-mail: tsyww0001@163.com

对浆体离析等缺陷的敏感性较差；设备成本较高，且对操作人员的信号解译能力有严格要求^[2]。

1.3 冲击回波法检测技术

1. 检测原理。冲击回波法的检测原理以应力波反射理论为基础，借助锤击或电磁冲击装置，向结构表面施加瞬时冲击，从而激发 10 ~ 100 kHz 的低频应力波，让其在结构内部传播。应力波在不同介质的界面会产生反射，当遇到孔道缺陷时，反射波的传播时间和振幅会出现变化。该方法的核心是利用应力波在不同密度介质中传播特性的差异，密实区域中应力波传播稳定，缺陷区域则因介质不连续，导致波能衰减、波形畸变。通过传感器接收相关信号，提取特征参数并结合结构参数，就能计算出缺陷的位置和尺寸，进而评估注浆密实度。

2. 技术特点。冲击回波法有着显著优势，只需单侧接触结构表面就能操作，十分便捷，适合单侧可达而另一侧无法接触的工况。它的设备体积小、重量轻，方便在现场移动检测，且对结构表面平整度要求不高，无需复杂预处理，不会受钢筋分布干扰，检测深层缺陷的效果比超声法更好。不过它也有明显局限：检测精度不如超声法和雷达法，难以识别小尺寸缺陷；检测速度较慢，不适合大面积快速检测，对冲击能量控制要求严格，还容易受环境振动干扰^[3]。

1.4 声发射法检测技术

1. 检测原理。声发射法以材料损伤发声为基础，当注浆体及混凝土结构内部的空洞、裂隙等缺陷受到力发生变形或者扩展时，会释放出弹性波，就是声发射信号。在结构表面布置传感器能够捕捉信号，分析振幅、频率等参数，判断缺陷是否存在、位置及发展趋势，对注浆密实度进行评估。它与其他技术不同，属于动态检测，需施加荷载让缺陷释放信号，适宜于结构服役时的实时监测及损伤评估。

2. 技术特点。声发射法具有突出优势，能实现动态监测，实时捕捉缺陷发展过程，为结构安全评估提供动态数据；检测范围广，对隐蔽性缺陷识别能力强，还能区分缺陷类型及发展阶段，为修复工作提供精准依据。其局限性也很明显：属于被动检测，需施加荷载激发信号，不适用于静态工况；易受环境噪声干扰，设备复杂且成本高，无法检测静止的微小缺陷。

1.5 红外热成像法检测技术

1. 检测原理。红外热成像法以热传导理论为基础，借助注浆体与混凝土之间的热传导系数差异，对结构表面温度场分布情况的分析来对注浆密实度开展评估工作。注浆密实的区域温度场分布比较均匀，而空洞的地方因为空气形成热屏障，会出现温差异常。此方

法分为主动式和被动式，分别依靠外部热源和自然温差，适宜在环境温度变化比较明显的场景中应用。

2. 技术特点。红外热成像法优势明显，检测速度快，能实现大面积非接触式检测，可视化效果好，可快速地定位缺陷区域。其设备操作简便，无需接触结构表面，适配高空、狭小空间等复杂工况，对大面积空洞缺陷识别力强。但它受环境因素影响大，对小尺寸及深层缺陷敏感差，主动式设备携带不便、成本较高。

2 各类无损检测技术对比分析

2.1 检测精度对比

检测精度是评估注浆密实度的核心指标，直接决定缺陷识别准确性。超声法对弹性波参数捕捉精准，识别精度最高，可检出直径 ≥ 5 mm 的小尺寸缺陷，能区分空洞、裂隙及浆体离析等类型。雷达法精度受电磁波频率影响，高频 (≥ 1 GHz) 对小缺陷识别精度次之，低频适用于深层检测但精度偏低。冲击回波法对小缺陷识别能力弱，仅能精准识别直径 ≥ 20 mm 的空洞。红外热成像法对小尺寸及深层缺陷精度最低，易漏判微小缺陷。声发射法精度与荷载施加相关，适配荷载下对活动缺陷精度较高，对静态微小缺陷敏感性差。

2.2 操作难度对比

操作难度直接影响检测效率与现场适用性。冲击回波法与红外热成像法（被动式）难度最低，只需单侧接触结构表面，设备调试简单，无需复杂预处理。雷达法难度中等，设备移动便捷，但反射波信号解译需专业经验，对操作人员技能要求较高。超声法难度较高，穿透法需精准布置双侧换能器，信号分析需结合结构参数调整，对操作规范性要求严格。声发射法难度最高，需设计荷载方案，信号降噪及缺陷定位分析复杂，对专业知识与经验要求极高^[4]。

2.3 检测速度对比

检测速度直接决定技术在大面积场景的适用性。雷达法速度最快，可连续扫描，每小时检测 100 ~ 200 m²，适配大跨度桥梁快速检测。红外热成像法（主动式）次之，每小时 80 ~ 150 m²，被动式受环境温度影响，速度波动较大。超声法速度较慢，需逐点检测，每小时仅 20 ~ 50 m²，不适用于大面积检测。冲击回波法速度较慢，单点耗时久，每小时 15 ~ 40 m²。声发射法速度最慢，需施加荷载并持续监测，单次检测数小时至数天，仅适用于小范围动态监测。

2.4 环境适应性对比

环境适应性是评估技术现场应用能力的关键。超声法适应性较强，不受温湿度影响，但易受电磁及钢筋分布干扰。雷达法适应性较弱，受电磁干扰、结构

表面平整度及植被覆盖影响,高温高湿环境下信号稳定性下降。冲击回波法适应性较强,不受电磁、温湿度影响,对结构表面条件要求低。声发射法适应性最差,易受环境噪声、振动干扰,对检测环境密封性和稳定性要求严格。红外热成像法适应性较弱,受温湿度、风速、光照影响极大,仅晴朗无风环境效果佳。

2.5 检测成本对比

检测成本涵盖设备购置、运营及人力成本。超声法与冲击回波法成本最低,设备购置费用5~15万元,操作简便、人力成本低,适合大规模推广。红外热成像法成本中等,设备购置15~30万元,主动式需额外投入热源设备,运营成本略高。雷达法成本较高,设备购置30~80万元,信号解译需专业人员,人力成本偏高。声发射法成本最高,设备购置超100万元,荷载设备复杂,运营及人力成本极高,仅适用于高精度专项检测。

2.6 适用范围及缺陷识别能力对比

超声法适用于深度 ≤ 50 cm的中浅层孔道,擅长识别中小尺寸空洞、裂隙及浆体离析,适配各类混凝土桥梁注浆检测。雷达法适用于 ≤ 100 cm中深层孔道及大面积检测,对空洞识别力强但对离析敏感差,适配大跨度及复杂孔道。冲击回波法适用于 ≤ 80 cm深层孔道、单侧可达工况,抗钢筋干扰,专攻深层空洞检测。声发射法适用于动态监测,可评估活动缺陷发展,适配长期健康监测。红外热成像法适用于 ≤ 5 cm浅层孔道,快速筛查浅层空洞^[6]。

3 无损检测技术的优化方向

3.1 多技术融合检测

多技术融合检测需要整合各类技术的优点,构建协同检测体系,凭借优势互补提高检测的精度和可靠性。例如:超声法和雷达法结合,运用超声法的高精度去识别小尺寸缺陷,搭配雷达法的快速扫描实现大面积的检测;冲击回波法和声发射法联用,依靠冲击回波法定位静态缺陷,借助声发射法监测缺陷的动态变化;红外热成像法与超声法融合,对浅层和中深层缺陷进行全面检测,有效弥补单一技术的不足,使缺陷识别的准确性和全面性得到进一步的提升。

3.2 智能化信号解译技术

智能化信号解译技术需引入人工智能、机器学习及大数据等技术,开发相应的智能解译系统,减少人为因素所造成的影响。通过构建海量检测信号数据库,对机器学习模型进行训练,使信号参数自动提取、缺陷类型智能识别及检测结果精准判定得以实现。例如:借助深度学习算法自动解译雷达剖面图与超声信号波

形,能够快速对缺陷进行定位与量化;借助大数据分析整合多工况数据,对判定标准进行优化,提升检测结果的一致性与客观性^[6]。

3.3 检测设备轻量化与集成化

针对检测设备的轻量化及集成化,需要对其结构设计进行优化,以此使设备变得更轻便、小巧,且实现功能的集成,提升现场操作的便捷性。例如:开发便携式多通道超声检测仪,及将雷达和红外热成像一体化的设备,同时开展无线传感技术的研发工作,使其能够适配复杂的工况,增强设备的抗干扰能力,对信号模块进行优化,减少环境带来的干扰^[7]。

3.4 完善检测标准与规范

无损检测技术规范化的关键是要不断完善检测标准以及相关的规范。需要制定统一的标准以及判定缺陷的规范,明确各种技术的检测参数、操作流程以及评价方法;建立健全人员资质认证体系,借助专业培训对操作和解译的精准度进行提高;建立检测结果溯源机制,对数据流程进行规范,推动技术实现标准化的推广。

4 结束语

预应力孔道注浆密实度无损检测技术是保障桥梁质量与寿命的关键。本文对比五种主流技术特性得出:超声法高精度低成本,适用于中浅层小缺陷;雷达法高效可视化,适配大面积复杂孔道;冲击回波法抗钢筋干扰,擅长深层缺陷检测;声发射法可动态监测缺陷发展;红外热成像法非接触,适用于浅层快速筛查。现有技术各有局限,单一技术难以适应复杂工况,未来需聚焦多技术融合、智能解译等方向的优化,实践中按需选型,推动技术创新应用,为交通基建安全提供支撑。

参考文献:

- [1] 庄肃言.智能检测技术在预应力箱梁质量评估中的应用[J].绿色建造与智能建筑,2025(08):117-119.
- [2] 刘勇,任东华.无损检测技术在桥梁养护管理中的应用[J].运输经理世界,2025(19):133-135.
- [3] 单志龙,侯福金,梅波,等.混凝土桥梁预应力钢筋锈蚀的研究进展[J].材料导报,2025,39(20):199-209.
- [4] 董洪伟.预应力混凝土桥梁锚杆无损检测技术应用[J].运输经理世界,2024(32):107-109.
- [5] 许恒.超声波无损检测技术在桥梁工程中的应用分析[J].运输经理世界,2024(07):71-73.
- [6] 朱妍,张小琼,张林文,等.预应力索孔道注浆密实度检测技术及其应用[J].无损检测,2023,45(08):14-18.
- [7] 刘安桥,熊超,贾万权.冲击回波法检测预应力孔道注浆密实度实践研究[J].低碳世界,2021,11(02):165-166.