

# 预应力孔道压浆质量无损检测实验研究

杨忠<sup>1</sup> 许涛<sup>2</sup>

1. 浙江致欣检测技术有限公司 浙江 嘉兴 314000

2. 温州市交通工程试验检测有限公司 浙江 温州 325000

**摘要:** 预应力孔道压浆质量直接影响结构耐久性与安全性。本文聚焦预应力孔道压浆质量无损检测实验研究。先阐述主流无损检测方法原理,如弹性波穿透法、冲击回波法等,并说明实验设备选型与参数要求。接着设计检测方法适配性验证、实验方案及影响因素控制方案。详细介绍原始信号采集规范、数据处理核心流程与检测信号有效性判定标准。通过系统实验研究,为准确评估预应力孔道压浆质量提供理论与技术支持,有助于提升工程结构安全性和耐久性。

**关键词:** 预应力孔道; 压浆质量; 无损检测; 实验研究; 信号处理

引言: 预应力孔道压浆质量对工程结构安全至关重要。传统检测方法存在局限性,难以全面精准评估压浆质量。无损检测技术凭借非破坏性、高效性等优势,成为研究热点。然而,不同无损检测方法原理各异,对孔道及压浆体条件适配性不同,且检测过程受多种因素影响。为明确各方法适用范围,保障检测结果精准可靠,开展预应力孔道压浆质量无损检测实验研究,具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1 无损检测技术原理与设备配置

### 1.1 主流无损检测方法技术原理

弹性波穿透法基于应力波在介质中的传播特性,通过分析波速、衰减率等参数评估压浆密实度<sup>[1]</sup>。当弹性波遇到缺陷界面时,部分能量被反射或散射,导致接收信号的振幅衰减或频率偏移,进而推断压浆体内部结构完整性。冲击回波法利用瞬时机械冲击产生低频应力波,应力波在混凝土与压浆体界面处发生反射,形成特征共振频率。通过分析反射波的时域波形与频域能量分布,可定位空洞、离析等缺陷位置,并量化其严重程度。超声波对测法通过发射与接收换能器间的信号传输特性检测压浆质量。高频超声波在密实压浆体中传播时能量损耗较低,波速稳定;若存在缺陷,超声波路径发生绕射或反射,导致接收信号强度减弱、传播时间延长,从而判断压浆密实度。其他适配检测方法包括探地雷达法与红外热成像法。探地雷达通过电磁波在介质中的反射差异识别缺陷,适用于非金属波纹管;红外热成像法利用压浆缺陷与密实区域的热辐射差异进行定性分析,但受环境温度影响较大。

### 1.2 实验设备选型与参数要求

激振设备需满足能量可控、频率可调的技术指标。

冲击器应具备多档位激振能量输出功能,以适应不同检测深度需求;发射探头频率范围需覆盖低频(1-10kHz)至高频(50-100kHz),确保对微小缺陷的敏感性。接收设备性能参数直接影响信号采集质量。传感器灵敏度应高于-80dB,频响范围需覆盖检测信号主频;接收探头需具备抗干扰能力,以减少环境噪声对检测结果的干扰。信号采集与分析系统需配置高精度数据采集卡(采样率 $\geq 1\text{MHz}$ )与专业分析软件,支持时域波形显示、频谱分析及缺陷自动识别功能。系统应具备数据存储与导出功能,便于后续对比分析。辅助设备选用需严格遵循标准。定位装置需保证测点间距误差小于5mm,以提高检测重复性;耦合剂应选择与混凝土及压浆体声阻抗匹配的材料,以减少信号传输损耗。

### 1.3 检测方法适配性验证设计

检测方法适配性验证,旨在明确不同技术对各类孔道及压浆体条件的适用范围,为后续实验选合理检测手段提供依据。验证参数涵盖孔道尺寸、压浆密实度梯度及缺陷类型。孔道尺寸方面,设计不同直径与形状的孔道,如小直径( $\leq 50\text{mm}$ )、大直径( $> 50\text{mm}$ )以及圆形、椭圆、矩形等异形孔道,探究检测方法适配能力。压浆密实度梯度上,制作密实、轻度离析、重度离析、存在空洞等不同密实度的压浆体试件,模拟实际工程状况,验证检测方法对密实度梯度的识别效果。缺陷类型设置空洞、离析、裂缝等,研究不同检测方法对各类缺陷的检测成效与适用性。验证流程先开展单一方法验证,针对每种检测方法,分别对不同参数设定的孔道和压浆体试件进行检测,记录数据与结果,分析该方法对不同条件的检测能力与局限。接着进行多方法对比验证,在相同条件下,用多种检测方法对同一试件检测,

对比结果，剖析各方法优缺点与互补性。最后依据单一与多方法验证结果，制定不同检测方法对不同孔道/压浆体条件的适配性判定标准，如检测信号清晰度、缺陷定位准确性、量化指标可靠性等。验证过程中，需记录方法有效性指标，如检测成功率、误判率、漏判率，以及适配偏差数据，如波速偏差、频率偏差、缺陷尺寸偏差，为方法修正改进提供依据。

## 2 实验方案设计

### 2.1 检测测点布置原则

孔道轴向测点分布遵循缺陷敏感区域全覆盖原则<sup>[2]</sup>。弯折段、锚固端因几何形态突变或应力集中，压浆易出现缺陷；压浆施工薄弱区（如进浆口、排气口周边）操作难度大，密实度难保证，这些区域测点需密集布置。直线段压浆质量相对稳定，可适当放宽间距，平衡检测效率与精度。轴向测点数量依孔道长度调整：短孔道（ $\leq 10\text{m}$ ）测点间距设 $0.5\text{m}$ ，长孔道（ $> 10\text{m}$ ）放宽至 $1\text{m}$ ，确保缺陷定位误差小于测点间距 $50\%$ 。截面测点布置结合孔道几何特征。圆形孔道截面压浆缺陷分布较均匀，沿径向对称布置 $4\sim 6$ 个测点，覆盖中心至边缘区域；异形孔道（如椭圆、矩形）角部易形成压浆盲区，需增加边缘测点数量，重点检测角部密实度。截面与轴向测点形成三维检测网格，立体化检测压浆质量，避免漏检局部缺陷。测点间距设定综合压浆材料性能、缺陷尺寸及检测方法灵敏度。密实度检测时，间距小于弹性波波速 $1/2$ ，捕捉密实状态变化；空洞定位时，间距小于空洞直径 $1/3$ ，锁定空洞位置。最终间距通过预实验验证，确保检测结果重复性达标。

### 2.2 实验操作流程设计

检测前准备工作需严格规范。混凝土表面应清除浮浆、油污及松散颗粒，露出坚实基面；压浆孔道两端需密封处理，防止激振能量泄漏。设备校准包括传感器灵敏度测试、激振能量标定及信号采集系统时间同步，确保多设备数据一致性。激振参数设定需匹配孔道特征。冲击能量应根据孔道直径调整，小直径孔道（ $\leq 50\text{mm}$ ）选用低能量（ $1\sim 5\text{J}$ ），大直径孔道（ $> 50\text{mm}$ ）采用高能量（ $5\sim 10\text{J}$ ）；频率范围需覆盖压浆体共振频率，通常设定为 $1\sim 20\text{kHz}$ ，以捕捉不同尺度缺陷反射信号。信号采集操作规范要求传感器与混凝土表面紧密耦合，耦合剂需均匀涂抹且无气泡。每个测点采集 $3$ 组独立信号，剔除异常值后取均值，降低随机误差影响。采集过程中需保持环境振动干扰小于 $5\text{mm/s}$ ，确保信号稳定性。多方法协同检测流程需分阶段实施。先采用冲击回波法进行全孔道快速筛查，定位疑似缺陷区域；再利用超声波对测法对重

点区域进行精细检测，量化缺陷尺寸；最后通过探地雷达法验证缺陷三维分布，形成多维度检测结论。各方法检测数据需统一坐标系，便于结果对比分析。

## 3 实验影响因素控制

### 3.1 孔道相关影响因素

管道材质对检测信号的作用体现在声阻抗差异上。金属波纹管（如镀锌钢带管）与混凝土声阻抗接近，应力波传播时能量损耗较低，反射信号清晰，适用于冲击回波法与超声波法；塑料波纹管（如HDPE管）声阻抗差异显著，易导致信号衰减，需调整激振能量或采用低频传感器以增强穿透性<sup>[3]</sup>。孔道走向与埋深的影响机制与波传播路径相关。竖向孔道因重力作用压浆密实度分布不均，检测时需加密底部测点；水平孔道需重点检测拱顶区域，防止气泡积聚。埋深超过 $1.5\text{m}$ 时，混凝土对高频信号的吸收作用增强，需提高激振频率或采用穿透力更强的弹性波技术。预应力筋分布的干扰控制需考虑钢绞线对波的散射效应。多根钢绞线平行布置时，应力波在筋间多次反射形成复杂波形，易掩盖缺陷信号。检测时应避开钢绞线密集区，或通过调整传感器角度减少干扰，必要时采用波场分离技术提取有效信号。

### 3.2 压浆体相关影响因素

压浆体密实状态的信号响应与波速、衰减率直接相关。密实压浆体中弹性波波速稳定（通常为 $4\sim 5\text{km/s}$ ），衰减率低；存在空洞或离析时，波速降低且衰减率显著增大。检测时需建立波速-密实度关系模型，通过实测波速反演压浆质量。压浆体材质均匀性的影响表现为信号离散性。水泥基压浆材料中水泥用量、水胶比及外加剂掺量波动会导致弹性模量不均，信号振幅与频率分布范围扩大。实验前需对压浆材料进行匀质性测试，确保同一批次材料性能偏差小于 $5\%$ ，减少材质差异对检测结果的干扰。

### 3.3 环境与操作影响因素

环境温湿度控制措施需贯穿检测全过程。温度升高会降低混凝土弹性模量，导致波速下降；湿度过高可能使传感器耦合剂失效，影响信号传输。检测时环境温度应稳定在 $5\sim 35\text{℃}$ ，湿度低于 $80\%$ ，必要时采用温控箱调节试件温度，或选择干燥环境作业。操作手法一致性保障是减少人为误差的关键。激振点位置偏差超过 $5\text{mm}$ 会导致反射信号相位改变，影响缺陷定位精度；传感器耦合压力不足会降低信号强度。操作人员需经过标准化培训，激振时保持落点误差小于 $3\text{mm}$ ，耦合压力稳定在 $2\sim 5\text{N}$ ，确保每次检测条件一致。设备误差控制方式包括定期校准与数据修正。激振设备能量输出偏差需通过标

定装置校正至 $\pm 1\%$ 以内；传感器灵敏度漂移需每月检测一次，超出 $\pm 3\text{dB}$ 时更换；信号采集系统时间同步误差应小于 $0.1\text{ms}$ ，避免多通道数据错位。检测前需对设备进行零点校准，消除系统误差。

#### 4 实验数据采集与处理方法

##### 4.1 原始信号采集规范

时间域信号记录要求涵盖采样率、记录时长与存储格式。采样率需满足奈奎斯特定理，对于弹性波检测，采样率应不低于信号最高频率的2倍，通常设定为 $1\text{--}5\text{MHz}$ ，以完整捕捉高频反射信号。记录时长需覆盖激振后信号衰减至背景噪声水平的时间，一般取 $10\text{--}20\text{ms}$ ，确保完整记录缺陷反射波<sup>[4]</sup>。存储格式应采用二进制或通用数据格式，避免压缩损失信号细节，同时记录检测时间、测点位置及环境参数作为数据标签。频域信号提取标准需明确窗函数选择与分辨率要求。频谱分析时，汉宁窗或平顶窗可有效减少频谱泄漏，窗长度需根据信号长度调整，通常取信号周期的整数倍。频率分辨率应小于缺陷特征频率的 $1/10$ ，例如对于 $1\text{kHz}$ 特征频率，分辨率需优于 $100\text{Hz}$ 。频域信号提取前需进行零均值处理，消除直流分量干扰，确保频谱分析准确性。

##### 4.2 数据处理核心流程

信号降噪处理技术包括时域滤波与频域滤波。时域滤波采用小波阈值降噪法，通过分解信号至不同尺度，保留有效成分并抑制高频噪声，降噪阈值需根据信噪比动态调整。频域滤波选用带通滤波器，保留检测信号主频段（通常为 $1\text{--}100\text{kHz}$ ），滤除低频干扰（如机械振动）与高频噪声（如电磁干扰）。滤波后需验证信号能量保留率，确保有效信息损失小于 $10\%$ 。特征参数提取方法聚焦波速、频率与振幅。波速计算需选取首波到达时间，通过测点间距与时间差确定，需进行多次测量取均值以减少误差。频率参数提取采用峰值检测法，识别频谱中主频成分，主频偏移超过 $10\%$ 需重新检测。振幅参数需进行归一化处理，消除激振能量差异影响，以相对振幅比值作为评价依据。数据转换与分析逻辑需建立多参数关联模型。将波速、频率与振幅数据映射至三维坐标系，通过聚类分析区分密实区与缺陷区。密实区数据点应集中分布于高波速、低衰减区域，缺陷区则呈现波速降低、频率偏移特征。分析时需结合压浆体理论模型，

验证数据分布合理性，排除异常值干扰。

##### 4.3 检测信号有效性判定标准

信号有效性判定需综合信噪比、波形重复性与参数稳定性等多方面因素。信噪比作为衡量信号质量的关键指标，应高于 $10\text{dB}$ ，只有达到这一标准，才能确保缺陷信号在众多干扰中清晰可识别，避免因噪声过大而掩盖真实缺陷信息。波形重复性通过多次采集信号相关性分析来验证，相关系数需大于 $0.9$ ，这表明多次采集的信号具有高度一致性，可排除因偶然因素导致的信号异常，保证检测结果的可靠性。参数稳定性要求波速、频率测量值偏差小于 $5\%$ ，振幅偏差小于 $10\%$ ，严格的参数偏差控制能确保检测数据的精准度，为后续准确分析压浆质量提供坚实基础。对于不满足标准的信号，需重新采集或调整检测参数，如适当提高激振能量、更换传感器位置等，直至满足要求后方可纳入分析，以此保障整个检测过程数据的有效性，进而为预应力孔道压浆质量评估提供准确依据。

##### 结束语

预应力孔道压浆质量无损检测实验聚焦技术适配性与检测精准度，通过多方法对比、多参数优化，明确了不同检测技术的适用场景与操作规范。实验建立的测点布置原则、数据处理流程及信号有效性标准，有效解决了缺陷识别不精准、结果可靠性不足等问题，实现了对压浆密实度及各类缺陷的高效检测。该研究形成的技术体系与实验结论，可直接指导工程实践，为提升预应力结构施工质量、保障结构长期安全稳定提供有力支撑，推动无损检测技术在相关领域的规范化应用。

##### 参考文献

- [1]张静.桥梁预应力结构孔道灌浆密度质量检测方法研究[J].交通世界,2024(33):169-172.
- [2]杜德持,国珍珍,刘明壮.预应力混凝土桥梁孔道压浆密实度检测研究现状及分析[J].中国高新科技,2024(4):48-50.
- [3]韦杨兴.预应力孔道压浆料试验检测分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(9):97-99.
- [4]刘昊.预应力混凝土孔道压浆冲击回波法检测分析[J].交通世界,2024(25):161-163.