

# 水利工程压力钢管超声检测关键技术剖析

田 波

中国水电建设集团十五工程局有限公司（陕西秦海检测科技有限公司） 陕西 咸阳 712000

**摘要：**水利工程压力钢管超声检测对保障工程安全意义重大。本文剖析超声检测基础理论，涵盖超声波传播原理、核心物理机制及材料特性影响。阐述检测核心技术环节，包括检测前准备、检测方法 with 缺陷信号分析。探讨关键影响因素及控制措施，如结构形态、环境因素等。最后提出检测技术优化方向，如智能化发展、多技术融合及极端工况创新，为提升压力钢管超声检测水平提供参考。

**关键词：**水利工程；压力钢管；超声检测；缺陷识别；技术优化

引言：水利工程中，压力钢管承担着高压、大流量介质输送任务，其安全稳定运行关乎整个工程的效益与安全。超声检测作为一种高效的无损检测手段，在压力钢管检测中发挥着关键作用。通过超声检测，可及时发现钢管内部缺陷，评估其结构完整性，为工程维护与决策提供科学依据。深入剖析水利工程压力钢管超声检测关键技术，有助于提升检测精度与效率，保障水利工程长期安全运行。

## 1 水利工程压力钢管超声检测基础理论

### 1.1 超声波传播基本原理

超声波在介质中的传播遵循弹性波理论，其波型特性直接影响检测精度。纵波传播时，介质质点振动方向与波传播方向平行，这种特性使其成为唯一能在固体、液体、气体中传播的波型<sup>[1]</sup>。当压电换能器在钢管端部激发纵波时，粒子沿管道轴向发生周期性位移，在钢质管道中传播速度可达5920m/s。横波传播时，质点振动方向垂直于波传播方向，因依赖介质的剪切模量，仅能在固体中传播，相同频率下速度约为纵波的一半。表面波沿介质表面传播，其质点运动轨迹为椭圆，可视为纵波与横波的合成，在距离表面1/4波长处振幅最大，随深度增加迅速衰减，这种特性使其对表面缺陷具有高灵敏度。

### 1.2 超声检测的核心物理机制

超声检测依赖声波与缺陷的相互作用规律。当超声波遇到材料内部缺陷时，声阻抗差异导致反射、折射与衍射现象。反射波幅度与缺陷尺寸正相关，通过分析反射波时间差可定位缺陷深度。折射现象遵循斯涅尔定律，在斜探头检测中，通过调整入射角可控制横波或纵波的传播方向。衍射时差法（TOFD）利用缺陷端部衍射波的时间差进行定量分析，精度可达毫米级。对于微小缺陷，散射效应显著，需通过信号处理提取散射波特征。相位阵列技术通过多阵元探头实现声束聚焦，结合

全矩阵捕获（FMC）与全聚焦方法（TFM），可生成高分辨率C扫描图像，提升微裂纹检测能力。

### 1.3 压力钢管材料特性对超声传播的影响机理

压力钢管的材质特性直接影响超声传播参数。钢的弹性模量与密度决定声速，典型钢质管道中纵波速度为5920m/s，衰减系数为0.05-0.2dB/m。晶粒尺寸对检测灵敏度有显著影响，粗晶材料（如铸铁）会增强散射，导致信噪比下降。温度变化影响声速，钢中温度每上升100℃，声速下降1-2%。管壁厚度决定检测频率选择，薄壁管中高阶模态易被激发，增加信号复杂性，需通过频散曲线校正。曲率半径影响波速分布，弯管处波速可达直管段的85-95%，需采用曲面修正算法补偿声程差异。表面粗糙度超过10μm时，散射损耗显著增加，需优化耦合剂配方提升能量传递效率。材料物性变化还会导致导波模态频散特性改变，需通过数值模拟分析纵向模态L(0,2)与扭转模态T(0,m)的相速度、群速度对弹性模量、泊松比、密度的灵敏度，为检测参数优化提供理论依据。

## 2 压力钢管超声检测核心技术环节

### 2.1 检测前准备关键技术

检测区域表面处理需满足严格的平整度与清洁度要求，良好的表面处理是保证检测结果准确性的前提条件。钢质表面粗糙度应控制在6.3μm以下，避免因表面凹凸导致超声波散射衰减。氧化皮与油污需通过机械打磨与溶剂清洗联合处理，确保耦合剂层均匀分布<sup>[2]</sup>。检测参数预设需综合材料特性与检测需求，频率选择需平衡分辨率与穿透力，薄壁管检测宜采用5MHz以上高频探头，厚壁管则选用1-2.5MHz低频探头。探头角度依据管壁曲率与缺陷类型确定，斜探头入射角需满足折射横波覆盖检测区域的要求。耦合方式选型需考虑检测效率与精度，水浸法适用于自动化检测，接触法更适用于复杂曲

面局部检测。设备校准需在标准试块上完成,声速校准采用已知厚度的平底孔试块,灵敏度校准依据对比试块中人工缺陷的反射幅度设定,确保检测系统稳定性。

## 2.2 核心检测技术与方法

常规超声检测中,直探头用于检测与表面垂直的缺陷,如分层与气孔,通过底波衰减程度评估缺陷尺寸,直探头检测是超声检测中最基础且常用的方法之一,广泛应用于压力钢管母材区域的基础缺陷筛查。斜探头通过调整入射角实现横波检测,适用于焊缝中未熔合与裂纹的检测,波束方向与缺陷走向夹角需大于 $60^\circ$ 以提高反射率,实际检测中需根据焊缝坡口形式调整探头移动轨迹。相控阵技术凭借多阵元探头的协同工作实现波束动态聚焦,电子扫描覆盖范围可达 $120^\circ$ ,成像分辨率较常规探头提升3倍以上,能清晰呈现缺陷的形态与分布,特别适用于异形结构、复杂焊缝等常规检测难以覆盖的区域。TOFD技术利用缺陷端部衍射波时间差定位,对未焊透缺陷检测灵敏度达 $0.1\text{mm}$ ,检测速度较射线检测快5倍,且无辐射危害,已成为焊缝内部缺陷精准检测的主流技术之一。导波技术通过低频纵波与扭转波组合实现长距离检测,单次检测距离可达 $100\text{m}$ ,无需大面积剥离管道防腐层,适用于埋地管道与支管连接处的周向裂纹筛查,大幅提升了长距离管道检测的效率。

## 2.3 缺陷信号识别与分析技术

缺陷信号识别需区分材料晶粒散射与缺陷反射,通过频谱分析提取信号主频成分,缺陷信号主频通常低于晶粒散射信号,准确的信号识别是缺陷分析的重要环节。缺陷定位采用声程定位法,结合探头位置与声速计算缺陷三维坐标,定位误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内。定性分析依据回波幅度与波形特征,裂纹信号呈现多次反射与波形畸变,气孔信号则表现为单峰高幅回波。定量分析采用当量法与DAC曲线,通过对比试块建立距离幅度校正曲线,实现缺陷尺寸精确评估。信号处理技术包括小波变换滤波去除高频噪声,自适应增益补偿衰减信号,主成分分析提取信号特征参数,提升缺陷识别准确率至95%以上,先进的信号处理技术为缺陷的准确识别和分析提供了有力支持。

## 3 超声检测技术应用的关键影响因素与控制

### 3.1 压力钢管结构形态对检测的影响与应对措施

压力钢管的曲率半径与管径尺寸直接影响超声波传播路径。小曲率半径管段会导致声束发散,检测盲区增大,需采用聚焦探头或相控阵技术补偿声能损失<sup>[1]</sup>。管径变化引发声程差异,厚壁管检测时需调整增益补偿衰减,避免近场区信号过饱和与远场区信号衰减过度。异

形结构如支管连接处存在声波反射复杂区域,需通过多角度探头组合扫描或导波技术实现全覆盖检测。焊缝余高超过 $2\text{mm}$ 时,斜探头入射点偏移,需重新标定折射角,确保横波覆盖焊缝根部。对于空间受限的检测区域,微型探头与柔性机械臂的应用可提升操作灵活性,减少结构形态对检测的制约。

### 3.2 环境因素影响与控制技术

温度变化导致声速波动,钢中声速随温度升高呈线性下降趋势,每 $100^\circ\text{C}$ 降幅约1-2%,需通过实时温度补偿算法修正定位误差,环境温度是影响超声检测精度的重要因素之一,必须加以控制。湿度过高易在探头表面形成水膜,引发信号衰减与杂波干扰,检测环境相对湿度应控制在60%以下,必要时采用干燥气体吹扫。电磁干扰对电子设备稳定性产生影响,强电磁场环境下需采用屏蔽探头线缆与金属外壳接地措施。声场干扰多源于机械振动,检测平台需具备减震功能,振动频率应低于 $10\text{Hz}$ ,避免与超声波频率重叠引发共振。多设备协同作业时,不同频率探头需分时工作,防止声波相互干扰导致信号失真。

### 3.3 耦合剂性能影响与选型优化

耦合剂声阻抗需与钢管材料匹配,水基耦合剂声阻抗接近钢的 $1/4$ ,适用于常规检测;甘油基耦合剂声阻抗更高,可减少界面反射损失,提升薄壁管检测灵敏度,耦合剂性能对超声检测效果有着重要影响,合理选型至关重要。粘度影响耦合稳定性,低粘度耦合剂易流失,高粘度耦合剂可能残留影响后续检测,需根据检测时长选择适宜粘度等级。温度适应性方面,冬季需选用凝固点低于 $-10^\circ\text{C}$ 的耦合剂,夏季则需选用沸点高于 $50^\circ\text{C}$ 的型号。新型半永久性耦合剂通过微胶囊技术实现长效稳定,单次涂抹可持续检测8小时以上,减少频繁补涂对效率的影响。

### 3.4 检测人员操作规范性影响与控制

探头移动速度过快会导致信号采集不完整,标准要求扫描速度不超过 $50\text{mm/s}$ ,需通过编码器实时监控,检测人员的操作规范性直接影响检测结果的准确性,必须严格规范操作。施加压力不均会改变耦合层厚度,引发信号幅度波动,操作规范要求压力控制在 $2-5\text{N}$ 范围内。探头角度偏差超过 $2^\circ$ 将导致声束偏离目标区域,需通过激光定位装置辅助校准。信号解读能力直接影响缺陷判定准确性,需通过分级培训体系提升人员对波形特征、频谱分布的识别水平,定期进行盲样考核确保技能稳定性。操作记录数字化管理可追溯检测过程参数,为结果复核提供依据。

## 4 超声检测技术的优化与发展趋势

### 4.1 现有检测技术的不足与优化方向

当前超声检测技术面临分辨率与穿透力的矛盾，高频探头虽能提升分辨率，但衰减加剧限制了厚壁管道检测深度；低频探头穿透力强，却难以识别微小缺陷。优化方向聚焦于开发变频率探头技术，通过动态调整中心频率实现分辨率与穿透力的平衡<sup>[4]</sup>。现有设备对复杂曲面检测适应性不足，需改进机械扫描装置的自由度，研发六轴机械臂搭载相控阵探头，提升异形结构检测覆盖率。信号处理算法对噪声抑制能力有限，需引入深度学习模型优化滤波效果，通过大量缺陷样本训练提升特征提取精度。检测效率方面，单探头扫描速度受机械移动限制，多探头阵列并行检测技术可缩短检测周期，但需解决声束干扰问题。

### 4.2 智能化超声检测技术发展

自动扫描系统通过编码器与激光定位实现探头精准轨迹控制，扫描速度较人工操作提升3倍以上，重复定位精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，智能化超声检测技术是未来发展的趋势，具有巨大的发展潜力。AI信号识别技术利用卷积神经网络（CNN）对B扫图像进行缺陷分类，准确率超过95%，较传统阈值法提升20%。迁移学习模型的应用使小样本场景下的缺陷识别成为可能，通过预训练模型微调适应不同材质管道检测需求。智能决策系统整合检测参数、环境数据与历史结果，动态调整检测策略，例如根据温度变化自动修正声速参数，减少人为干预误差。云端数据分析平台支持多设备数据同步，通过大数据挖掘建立缺陷演化模型，实现预测性维护，智能化超声检测技术将大大提高检测效率和准确性。

### 4.3 多技术融合检测方案

超声与射线检测融合可弥补各自局限，超声对近表面缺陷敏感，射线对体积型缺陷识别率高，联合使用可提升检测完整性。电磁超声技术（EMAT）无需耦合剂，与常规超声组合可检测高温管道，解决传统方法在高温环境下的应用难题。激光超声技术通过激光脉冲激发超声波，适用于狭窄空间检测，与相控阵技术结合可实现

非接触式三维成像。声发射技术监测缺陷扩展过程，与超声定期检测形成互补，构建全生命周期监测体系。多物理场耦合仿真技术通过数值模拟优化检测参数，指导不同技术组合应用，提升复杂工况检测可靠性。

### 4.4 适用于极端工况的超声检测技术创新

高温环境检测需开发耐高温探头，采用陶瓷换能器与高温耦合剂，实现 $300\text{℃}$ 以上工况稳定检测，极端工况对超声检测技术提出了更高要求，需要不断创新以满足实际需求。低温环境下，探头材料需具备抗脆化性能，低温耦合剂凝固点需低于 $-40\text{℃}$ 。强辐射场景中，电子元器件需进行辐射硬化处理，采用光纤传输信号避免电磁干扰。深海检测需解决水压对探头密封性的影响，研发钛合金外壳与压力补偿装置，确保 $1000\text{m}$ 水深正常工作。高速在线检测技术通过优化信号处理算法，实现管道流速超过 $5\text{m/s}$ 时的实时检测，满足连续生产需求。新型纳米材料耦合剂可适应极端清洁度要求，在核电管道检测中减少放射性污染风险。

### 结束语

水利工程压力钢管超声检测技术经过多年发展，已取得显著成果，在保障工程安全方面发挥着不可替代的作用。然而，面对复杂多变的工程环境与不断提高了检测要求，仍需持续优化现有技术，推动智能化、多技术融合及极端工况检测创新。通过不断探索与实践，超声检测技术将进一步提升检测能力，为水利工程压力钢管的安全运行提供更坚实的技术支撑，助力水利事业蓬勃发展。

### 参考文献

- [1] 祁涛,李海军.输水钢管对接焊缝超声波检测技术与质量控制[J].四川水力发电,2024,43(5):98-102.
- [2] 李长征,李姝昱.水工隧洞钢管衬砌脱空超声检测方法研究[J].人民黄河,2023,45(11):151-155.
- [3] 万家瑞,曾建锋,李兆恒.输水钢管加劲环半熔透T型焊缝相控阵检测[J].广东水利水电,2022(11):80-84.
- [4] 李阳,赵晓健,李志翔.水利工程质量检测中超声波检测技术运用探究[J].精品,2022(14):157-159.