

超声导波在长输管道裂纹识别中的适用性研究

梁永雪¹ 董立昆²

1. 天津滨海概念人力信息科技有限公司 天津市 300450; 2. 天津五合伟业工程管理服务有限公司 天津市 300453

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19735

[摘要] 超声导波技术凭借传播远、效率高、非接触的优势,在长输管道裂纹识别中具有良好应用潜力。长输管道服役环境复杂,裂纹易因应力、介质侵蚀等形成,传统检测方法存在明显局限。超声导波可捕捉管道表面及内部裂纹特征,适配复杂检测场景,但受干扰因素影响,识别稳定性需优化。明确其适用场景与限制,可为长输管道无损检测提供支撑,保障管道安全稳定运行。

[关键词] 超声导波; 长输管道; 裂纹识别; 无损检测

引言

长输管道是能源输送的核心载体,广泛应用于石油、天然气领域,安全运行关乎能源供应与环境安全。长期服役中,管道受介质腐蚀、压力波动等影响,易产生隐蔽性强、扩展快的裂纹,若未及时识别,可能引发严重安全事故。传统无损检测方法难以实现长距离、全方位高效检测,超声导波技术可突破这一局限,探究其在该领域的适用性,既能弥补现有技术短板,也能为管道安全运维提供可靠技术支撑。

一、长输管道裂纹特征及检测需求

长输管道裂纹的形成与材质特性、服役环境及运行工况相关,不同形成机理对应不同类型裂纹,形态、分布及扩展规律差异显著。疲劳裂纹多源于材质微小缺陷的长期应力扩展,集中在焊缝、弯头等区域;介质侵蚀会形成片状或网状腐蚀裂纹;安装工艺缺陷、运维机械损伤也会催生裂纹^[1]。裂纹识别需满足长距离、高精度、适配复杂环境及无损检测的核心要求,而传统无损检测技术均有局限,射线检测有辐射且不适用于长距离,超声脉冲反射法效率低,磁粉、渗透检测范围有限,难以满足实际需求。

二、超声导波技术核心特性及识别原理

(一) 超声导波技术的核心传播特性

超声导波是可沿介质界面或结构传播的弹性波,其传播特性与传统超声波差异显著,也是其适配长输管道裂纹识别的核心优势。它可沿管道轴向远距离传播,能量衰减慢,单一检测点位即可覆盖数十至上百米范围,无需逐段拆解管道或大量布设点位,大幅提升检测效率、节省人力时间成本。其具备多模态传播特性,不同模态对不同类型、位置的裂纹敏感性不同,可按需选择适配模态,提升识别针对性。

(二) 超声导波在裂纹识别中的作用原理

超声导波在长输管道裂纹识别中的核心作用原理,基于波的反射、折射与模式转换特性。当超声导波沿管道传播时,若遇到裂纹等缺陷,部分导波会被裂纹反射,部分会发生折射与模式转换,形成反射波、折射波等不同类型的波信号。通过接收并分析这些波信号的传播时间、幅值、频率等特征,可判断裂纹的存在与否,实现对裂纹的初步识别。裂纹的尺寸、深度、位置不同,会导致反射波、折射波的信号特征发生相应变化,例如裂纹尺寸越大、深度越深,反射波的幅值会越高,传播时间也会出现明显差异,这些信号差异为裂纹参数的判断提供了依据。

(三) 超声导波技术的固有优势

相较于传统无损检测技术,超声导波技术在长输管道裂纹识别中具备诸多固有优势,使其具备良好的应用基础。检测效率极高,无需逐点检测,单一检测点位即可实现长距离管道覆盖,大幅缩短检测周期,尤其适用于长距离、大范围的长输管道检测,能够快速完成管道全域的裂纹排查^[2]。检测范围全面,既能识别管道表面的裂纹,也能捕捉管道内部及近表面的裂纹,弥补了传统检测技术检测范围有限的短板,实现对管道裂纹的全方位识别。适配性强,可在埋地、带保温层、高温、潮湿等复杂工况下稳定工作,不受管道铺设环境与运行状态的过多限制,能够适应长输管道多样的服役场景。检测过程无损、非接触,无需破坏管道结构与涂层,也不会影响管道的正常运行,降低了检测过程中的安全风险与经济损失,符合长输管道安全运维的核心需求。

三、超声导波在长输管道裂纹识别中的适用场景及适配性

(一) 不同工况下的超声导波适配性分析

长输管道服役环境多样,不同工况对超声导波裂纹识别的适配性提出了不同要求,其适配性主要体现在对环境因素的抗干扰能力上。在埋地管道工况中,超声导波可穿透土壤介质实现传播,无需挖掘管道即可完成检测,有效规避了埋地管道检测中挖掘成本高、工期长的问题,且能有效抵抗土壤湿度、密度等因素的干扰,保持检测信号的稳定性,确保裂纹识别的准确性^[3]。在带保温层管道工况中,超声导波可穿透保温层传播,无需拆除保温层,避免了保温层拆除与恢复带来的成本与工期损耗,同时可适应保温层老化、破损等复杂情况,确保裂纹识别的有效性,不影响管道的保温性能与正常运行。在高温、高压运行工况中,超声导波可在一定温度与压力范围内稳定传播,能够准确捕捉裂纹特征,适配长输管道的正常运行状态,无需停机检测,保障能源输送的连续性。

(二) 不同类型裂纹的超声导波识别适配性

超声导波对长输管道中不同类型的裂纹具备不同的识别适配性,可根据裂纹类型选择合适的导波模态与检测参数,提升识别效果。对于疲劳裂纹,其多分布在应力集中区域,超声导波的特定模态对这类集中性裂纹敏感性较强,能够捕捉到微小疲劳裂纹的信号特征,实现早期识别与定位,有效防止裂纹进一步扩展,避免疲劳裂纹发展为断裂隐患。对于腐蚀裂纹,其多呈现片状、网状分布,超声导波可通过多模态组合检测,全面覆盖裂纹分布区域,准确识别裂纹的范围与严重程度,弥补了传统检测技术对腐蚀裂纹识别不全面的短板,为腐蚀裂纹的针对性处理提供支撑。对于机械损伤引发的裂纹,其多为表面或近表面裂纹,超声导波传播过程中能量衰减较小,可快速捕捉裂纹信号,实现精准识别与定位,为及时修复提供支撑,降低机械损伤带来的安全风险。

(三) 长输管道特殊部位的超声导波适配性

长输管道的焊缝、弯头、阀门等特殊部位,是裂纹的高发区域,且结构复杂,对检测技术的适配性要求较高,超声导波在这些特殊部位的裂纹识别中具备良好的适配性。焊缝部位结构不均匀,易产生焊接裂纹,超声导波可通过调整传播模态,避开焊缝结构对波信号的干扰,准确捕捉焊缝处的裂纹特征,实现对焊接裂纹的有效识别,避免焊接裂纹引发的管道泄漏。弯头部位应力集中明显,易产生疲劳裂纹,超声导波可沿弯头曲面稳定传播,能够精准识别弯头处不同方

向、不同深度的裂纹,避免因结构复杂导致的漏检,保障弯头部位的结构完整性。阀门连接部位易因密封不良、应力作用产生裂纹,超声导波可实现非接触检测,无需拆卸阀门即可完成裂纹识别,既保证了检测效率,也避免了对管道运行的影响,确保阀门连接部位的安全。

四、超声导波在长输管道裂纹识别中的应用限制及解决路径

(一) 超声导波在裂纹识别中的主要应用限制

尽管超声导波在长输管道裂纹识别中具备诸多优势,但在实际应用中仍存在一些限制,影响其识别效果与适用范围。超声导波在管道中传播时,易受到管道材质不均匀性的影响,材质内部的杂质、缺陷会导致导波能量衰减、信号畸变,难以准确捕捉裂纹特征,尤其对于材质较差的老旧管道,这种影响更为明显,易造成裂纹误判或漏判。管道表面的锈蚀、涂层破损等因素,会干扰导波的传播,导致反射波、折射波信号模糊,影响裂纹识别的精度,增加检测难度^[4]。超声导波对微小裂纹的识别精度受传播距离影响较大,随着传播距离增加,信号衰减加剧,难以准确识别远距离管道上的微小裂纹,限制了其在超长距离管道检测中的应用,无法满足部分长输管道全域精准检测的需求。

(二) 材质与表面状态干扰的解决路径

针对管道材质不均匀、表面状态不佳带来的干扰,可通过针对性的预处理与参数优化,提升超声导波裂纹识别的稳定性与精度。在检测前,对管道表面进行清理,去除表面锈蚀、油污、破损涂层等干扰因素,确保导波能够顺畅传播,减少表面因素对信号的干扰,为精准检测奠定基础。对于材质不均匀的管道,可通过前期试验确定适配的导波频率与模态,调整检测参数,降低材质不均匀性对导波传播的影响,减少信号畸变,确保信号的完整性与准确性。采用信号增强技术,优化接收信号的处理流程,过滤干扰信号,突出裂纹对应的特征信号,提升裂纹识别的准确性,有效规避材质与表面状态带来的检测局限,扩大超声导波的适用范围。

(三) 传播距离与微小裂纹识别的优化措施

为解决超声导波传播距离与微小裂纹识别之间的矛盾,可通过技术优化与检测方案调整,提升其适用能力。在检测方案设计上,合理布设检测点位,根据管道长度与工况,划分检测区段,缩短单一检测点位的传播距离,确保微小裂纹

信号能够被准确捕捉,避免因传播距离过远导致的信号衰减。优化导波激励与接收装置,提升导波能量,减少传播过程中的能量衰减,延长有效检测距离,同时增强对微小裂纹的敏感性,提升微小裂纹的识别精度。结合多带隙滤波技术,抑制传播过程中的谐波干扰,突出微小裂纹引起的信号特征,提升远距离管道上微小裂纹的识别精度,扩大超声导波的适用范围,满足长输管道全域精准检测的需求。

五、超声导波在长输管道裂纹识别中的应用优化及实践适配

(一) 超声导波检测参数的优化策略

检测参数的合理性直接影响超声导波在长输管道裂纹识别中的效果,需结合管道工况与裂纹特征,进行针对性优化。导波频率的选择需兼顾检测距离与识别精度,频率过高会导致能量衰减过快,缩短检测距离;频率过低则会降低识别精度,难以捕捉微小裂纹。需根据管道材质、壁厚、长度等参数,确定适配的导波频率,实现检测距离与识别精度的平衡,确保检测工作既高效又精准^[6]。导波模式的选择需结合裂纹类型与检测部位,针对不同类型的裂纹与管道特殊部位,选择敏感性强的导波模式,提升识别的针对性与准确性,确保不同场景、不同类型的裂纹都能被有效识别。优化激励信号的强度与持续时间,减少信号干扰,确保导波能够稳定传播,提升检测信号的质量,为裂纹识别提供可靠的信号支撑。

(二) 超声导波检测流程的规范化构建

规范化的检测流程是提升超声导波裂纹识别可靠性、确保检测结果一致性的关键,需结合长输管道的实际工况,构建完整的检测流程。检测前,需完成管道工况调研、表面清理、检测设备调试等准备工作,明确检测范围、重点部位与检测标准,确保检测工作有序开展,避免因准备不足导致的检测失误。检测过程中,严格按照优化后的参数操作,规范检测点位的布设与信号采集流程,确保每一个检测区段都能被有效覆盖,避免漏检,同时保证信号采集的规范性与准确性。检测后,对采集到的信号进行系统分析,准确判断裂纹的存在、位置与严重程度,形成完整的检测报告,为管道维护提供精准依据,同时建立检测档案,为后续常态化检测提供参考,实现检测工作的闭环管理。

(三) 超声导波技术的实践适配与应用完善

超声导波在长输管道裂纹识别中的适用性,最终需通过实践应用进行验证与完善,结合实际管道运维需求,推动技术的落地适配。针对不同行业、不同工况的长输管道,开展针对性的实践应用,总结不同场景下的检测经验,优化检测方案与参数设置,提升技术的适配性,确保超声导波技术能够适应不同类型长输管道的检测需求。加强检测人员的专业培训,提升其对导波信号的分析能力与设备操作水平,确保检测过程的规范性与检测结果的准确性,避免因人员操作不当导致的检测误差。结合管道运维的常态化需求,将超声导波检测融入管道日常维护体系,实现裂纹的定期检测与早期预警,充分发挥其优势,保障长输管道的安全稳定运行,推动超声导波技术在该领域的成熟应用。

结语

本文围绕超声导波在长输管道裂纹识别中的适用性展开系统探究,明确了超声导波技术的核心特性与识别原理,分析了其在不同工况、不同裂纹类型及管道特殊部位的适配性,梳理了应用过程中存在的限制并提出了针对性解决路径,最终给出了技术优化与实践适配的具体措施。超声导波技术在长输管道裂纹识别中具备显著优势,能够有效弥补传统检测技术的局限,适配长输管道复杂的服役环境与检测需求。通过参数优化、流程规范与实践完善,可进一步提升其识别精度与适用范围,为长输管道裂纹早期识别、精准定位提供可靠技术支撑,助力管道安全运维体系的完善,降低裂纹引发的安全风险与经济损失。

[参考文献]

- [1] 乔佳辉. 基于不同加载方式的管道超声导波时间反转技术研究[D]. 西安理工大学, 2024.
- [2] 古龙. 基于超声导波技术的海洋管道裂纹缺陷检测与评估方法[D]. 大连理工大学, 2024.
- [3] 邱广文. 基于降噪自编码器的管道超声导波弱信号识别研究[D]. 东莞理工学院, 2024.
- [4] 陈伟屹. 基于电磁超声的管道裂纹检测方法研究[D]. 沈阳工业大学, 2024.
- [5] 姚森. 焊接薄板中超声导波弧形稀疏阵列多帧成像检测研究[D]. 北方民族大学, 2024.