

聚乙烯管道热熔接头TOFD检测研究

韦中悬¹ 欧建华¹ 李园园² 富一鸣¹ 张健强¹ 马骊欣¹ 刘海林¹

1.东莞市特种设备检测与节能技术服务中心有限公司 广东 东莞 523000

2.中山职业技术学院 广东 中山 528400

摘要: 聚乙烯 (PE) 管道凭借其优异的化学稳定性、耐腐蚀性、柔韧性及经济性, 在市政、燃气、给排水等领域应用广泛。管道系统的长期安全运行高度依赖于热熔接头的质量。传统无损检测技术在应对PE材料特性及接头内部缺陷识别方面存在一定局限。本研究聚焦于衍射时差法超声波检测 (TOFD) 技术, 探讨其在PE管道热熔接头质量评估中的适用性与潜力。通过理论分析与技术方案设计, 研究表明TOFD技术在缺陷定位精度、微小缺陷识别及检测效率方面展现出独特优势, 有望为PE管道接头质量控制提供一种有效手段。未来需结合实验验证与工程实践进一步优化技术参数与操作流程。

关键词: 聚乙烯PE管道; 热熔接头; 衍射时差法超声波检测 (TOFD); 无损检测

引言:

聚乙烯 (PE) 管道因其综合性能突出, 已成为现代管网工程的重要选择。管道系统通过热熔焊接实现连接时, 接头区域的完整性直接影响整体密封性与结构强度, PE管道系统的结构和密封强度大量依赖于接头的质量, 对接头进行可靠的无损检测至关重要。然而, PE材料的特殊物理性质 (如高声衰减、低声速、非均质性) 以及接头焊接工艺的复杂性, 传统无损检测方法难以检测。寻求一种适应PE材料特性、能有效识别内部缺陷的检测技术, 具有现实意义。

金属管道中, 无损检测能够保障管道系统的完整性和密封性, 及时发现和修复潜在的接头问题, 防止泄漏和破裂, 保护公共安全和环境。热熔接头是PE管道系统的薄弱环节, 接头内部可能存在的裂纹、孔洞、未熔合等缺陷, 在长期服役载荷作用下可能引发泄漏甚至破裂, 危及公共安全和环境。无损检测作为保障接头质量的关键环节, 其核心目标是在不破坏构件的前提下, 准确识别并定位缺陷。

一、研究方法

本研究采取实验室测试与现场应用结合的方式, 通过构建多种聚乙烯PE管道接头缺陷模型, 评估TOFD技术在检测和定位这些缺陷上的效果。研究过程分为几个关键步骤: 选择合适的探头、设定最优的扫描参数、应用耦合剂以及进行数据采集和分析。

(一) 实验设计

(1) 缺陷模型构建: 模拟实际工程中的接头缺陷, 包括裂纹和气孔等, 为TOFD检测提供实验对象。(2) 探头和参数选择: 根据PE管道的特点, 选择适宜的TOFD探头和调整扫描参数, 以确保检测的全面性和高质量数据的获取。

(3) 耦合剂的关键作用: 正确使用耦合剂以增强超声波信号的传输效率, 对提升数据质量至关重要。

(二) 实验数据收集与分析

(1) 执行TOFD扫描: 在保证探头与管道表面良好接触的情况下, 对每个缺陷模型进行详细扫描, 收集数据。

(2) 数据记录与处理: 记录超声波信号等数据, 并利用专业TOFD软件进行预处理, 包括信号增强和噪声滤除等, 提升数据解析性。(3) 缺陷识别与定位: 分析处理后的数据, 识别衍射信号, 准确判定缺陷位置和评估其大小、形状。(4) 结果验证: 通过与其他无损检测方法的交叉验证, 确认TOFD检测结果的准确性。

(三) 技术方案

(1) 探头选择: 需选用低频探头 (如2MHz) 以增加穿透深度, 并考虑设计合理的探头角度 (如45° -70°) 以适应接头形状和优化衍射信号接收。探头晶片尺寸和聚焦特性也需优化。(2) 探头架: 浮动反向补偿结构, 使探头与待检测件表面有效结合, 测量的两个探头保持相对位置不变, 从而提高了定位精度和检测精度, 同时避免了因采用水囊造成的误差。(3) 检测仪器: 左端探头发出信号同过空气传播覆盖整个管道内部再由另一端探头接收信号获取图像, 可用勾股定理精确计算出缺陷深度。(4) 自动扫

查器：有扫查轨道和扫查移动装置两个部分组成，扫查移动装置沿扫查轨道移动。实现了自动扫查功能，极大的减轻劳动强度。（5）耦合技术：高效稳定的声耦合是保证信号质量的前提。需选用适合PE材料表面、声阻抗匹配良好的耦合剂（如专用凝胶），并确保均匀涂布，避免气泡影响。考虑采用柔性探头靴或水囊（需注意水囊带来的声程变化和定位校正）以贴合曲面。（6）探头间距（PCS）设置：PCS需根据管道壁厚、探头角度和预期检测区域深度进行优化计算。（7）仪器与扫查装置：需具备高采样率、低噪声的数字化TOFD采集单元。针对管道环焊缝，设计适配管径的扫查架或编码器系统，确保探头对中稳定、扫查路径精确、速度可控，这对缺陷定位和图像质量至关重要。

二、制定TOFD检测流程

（一）检测前的准备

（1）接头评估：对热熔接头进行外观检查，明确检测范围及其几何特征。（2）设备与探头选择：依据管道直径、接头类型及材质特点，选取适宜的TOFD设备和探头，以确保优化检测效果。（3）设备标定：通过已知缺陷样本或类似参考块对设备进行校准，确保检测精度。

（二）设备与准备

（1）TOFD探头选择：根据检测需求挑选一对合适的发射和接收探头。（2）耦合剂使用：选用适宜的耦合剂确保超声波信号有效传递。（3）扫描装置配置：设置专用扫描装置以保证探头与管道接触的稳定性。

（三）探头定位与校准

（1）探头间距调整：依据管道尺寸调整探头间距，优化信号接收。（2）角度设置：选择最佳探头入射角度，增强缺陷处信号的衍射效果。（3）系统校准：利用标准缺陷样本对检测系统进行灵敏度校准，确保数据准确性。

（四）扫描与数据收集

（1）表面处理：确保接头表面清洁，无障碍地传递超声波信号。（2）耦合剂涂抹：在探头与管道表面间均匀涂抹耦合剂。（3）执行扫描：探头按照预定路径均匀移动，全面收集数据。

（五）数据分析

（1）信号分析：解析超声波数据，识别缺陷信号，如衍射波变化。（2）缺陷定位与评估：基于时间差和波速计算缺陷位置和大小，完成接头质量评估。（3）报告制作：详细记录缺陷信息，并对接头完整性给出评价。

（六）报告制作与人员环境要求

（1）结果记录：详细记录检测结果，包括缺陷的具体信息。（2）评估与建议：基于检测结果对接头状态进行评估，提出修复建议。（3）操作人员培训：强调操作人员需经过专业培训，熟练掌握TOFD技术的操作与数据解析，以

确保检测的高效和准确。（4）环境调控：适应性调整检测参数，以应对温度、湿度等现场环境变化影响。

（七）报告提交与后续

（1）结果解释：向相关方解释检测报告，评估接头状态。（2）修复建议：对有缺陷的接头提出具体的修复或更换建议。（3）质量改进：利用检测结果优化未来焊接与检测流程。

三、研究结果

为了验证TOFD在识别接头缺陷方面的有效性，实验通过模拟不同类型和大小的缺陷（如裂纹、气孔、未熔合区域），评估了TOFD技术的检测性能。结果显示，TOFD能有效识别PE管道接头中的多种缺陷，并在缺陷定位精度和微小缺陷检测方面，相较于传统超声波方法有显著优势。

（1）缺陷识别：TOFD技术准确识别了各类预设缺陷，展现出高灵敏度和广泛的适用性。国际首创高精度的复合TOFD探测技术，浮动反向补偿结构探头架，使探头与待检测件表面有效结合，测量的两个探头保持相对位置不变，从而提高了定位精度和检测精度，同时避免了因采用水囊造成的误差。精准扫查各类工艺缺陷，缺陷定位精度提高到0.1mm，解决了检测精度低不易定位的问题。（2）定位精度：TOFD在确定缺陷具体位置（深度和横向位置）方面优于传统方法，提供了更高的精度。（3）微小缺陷检测：TOFD对微小裂纹和气孔的检测能力强于传统超声波方法，能够捕捉细微结构缺陷。国际首创高灵敏度的三维聚焦检测技术，复合TOFD探头，采用复合材料，利用凹凸面的结构，实现自动对焦功能。采用高灵敏度的三维聚焦检测技术，提供检测灵敏度，能够发现萌芽期的0.5mm的微小缺陷。（4）检测效率：TOFD技术通过快速扫描并生成高清缺陷图像，显著提升了检测效率。

TOFD技术在聚乙烯PE管道热熔接头的无损检测中展现出不可替代的价值，尤其适合于需要快速且准确识别接头缺陷的应用场景。此技术不仅能提升检测的准确性和效率，还有助于增强管道系统的安全性和可靠性。未来的研究将探索TOFD技术在更多条件下的应用，并考虑与其他无损检测技术的结合，以进一步提高检测的全面性和精确度。

四、创新点

（1）高分辨率缺陷定位：TOFD技术利用超声波在材料中传播的时间差和衍射波原理，能够实现高精度的缺陷定位，包括缺陷的深度和平面位置，这对于传统的超声波检测方法来说是一个重大的进步。（2）微小缺陷检测能力：TOFD技术对微小裂纹和其他微小缺陷具有极高的灵敏度，这在聚乙烯PE管道热熔接头的检测中尤为重要，因为即使是微小的缺陷也对管道的长期性能产生重大影响。（3）实时检测与评估：通过使用先进的数据采集和分析软件，TOFD允许实

时检测和评估,大大缩短了检测周期,提高了检测效率。

(4) 全面的缺陷评估:除了定位和尺寸评估,TOFD还能提供关于缺陷形态和性质的信息,这有助于更全面地理解缺陷对管道性能的影响,为后续的维修提供重要信息。

五、应用注意事项

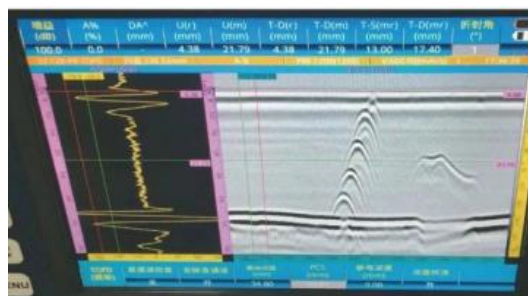
(1) 探头选择与配置:必须选择适合聚乙烯PE材料特性和接头形状的探头,并正确配置探头间距和角度,以优化检测性能。(2) 耦合剂的应用:提高耦合剂均匀涂抹在探头和管道表面之间,避免空气泡影响超声波信号的传输。(3) 扫描速度与压力:控制探头的扫描速度和施加的压力,以保持稳定的信号质量和避免对管道表面造成损伤。

(4) 数据解析专业性:操作人员需要具备专业的数据解析能力,正确理解和解释TOFD信号,包括衍射波的识别和缺陷的定位与评估。(5) 环境与设备条件:检测前提高环境条件适宜(如温度、湿度)并验证设备的准确性和稳定性,以防数据误差。(6) 安全措施:在进行TOFD检测时,应遵守相关的安全措施,保护操作人员和周围人员的安全。

通过注意这些细节,TOFD技术在聚乙烯PE管道热熔接头的无损检测中的应用可以更加有效和准确,从而提高管道系统的安全性和可靠性。



(a) 充水模块及探头 (b) 扫描架及编码器 (c) TOFD主机



六、研究结论

在聚乙烯PE管道热熔接头的无损检测中,TOFD技术具有优异的准确性和全面性。这项技术预期将成为PE管道接头检测的标准之一。通过详细的实验和现场应用分析,本研究突显了TOFD在定位精度和识别微小缺陷方面相较于传统方法的优势。

(1) 应用价值:TOFD准确识别和定位了PE管道接头中的裂纹、气孔等缺陷,对保障管道系统安全运行至关重要。(2) 技术优势:与传统超声波检测相比,TOFD在检测速度和微缺陷识别能力上具有明显优势,成为检测PE管道接头的有效工具。(3) 发展潜力:随技术进步,TOFD的操作便利性、数据处理和自动化将进一步提升,有望成为PE管道接头检测的首选方法。(4) 未来研究:建议未来研究聚焦于优化检测参数、集成多技术检测方案、加强操作人员培训。

综合而言,TOFD技术提升聚乙烯PE管道系统的安全性和可靠性,其在无损检测领域的应用价值和前景广阔。随着技术的持续发展,预计TOFD将在管道检测中扮演更加关键的角色。

参考文献:

- [1] 乔帅,苑一琳,沈功田,等.聚乙烯热熔接头冷焊缺陷的微波检测技术进展及展望[J].中国特种设备安全,2025,41(5).
[2] 潘金平,王震,朱潮明,等.介电材料的微波无损检测[J].中国特种设备安全,2024,40(10).

- [3] 邵泽龙,李玮.PE管道电熔接头冷焊缺陷的微波实验研究[J].中国特种设备安全,2025,41(5).
[4] 邵泽龙,左延田.聚乙烯管道夹杂缺陷的微波检测实验研究[J].石油化工设备,2024,53(11).
[5] 高乾祥,李勇,王若男,等.PE管道外壁缺陷的微波可视化定量检测[J].无损检测,2024,46(10).

基金: 东莞市面上项目《聚乙烯(PE)管道超声波衍射时差法(TOFD)检测仪研发》编号:20231800902462; 中山市科技局《基于超声波衍射时差法(TOFD)的聚乙烯(PE)管道新型检测仪的研究与应用》编号:2023B2047