

超声导波对石油化工管道弯头处缺陷检测的研究

赵兵强 王孝祖 张鹏翀 刘建新 (机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司, 上海 200000)

摘要: 为了探索超声导波用于带弯头石油化工业管道缺陷检测的方法, 该文对超声导波传播特性进行研究, 主要包括弯头对于导波传播特性分析, 以及导波传播特性随弯头弯曲激励频率变化规律。通过对激励频率的优化选择, 管道缺陷设计与制作和试验验证表明弯头引起的导波衰减明显增大, 本研究针对性地对检测参数进行优化。实验结果发现弯头结构内导波衰减特别显著, 主要表现为弯头导致模式转换产生非对称模式。

关键词: 超声导波; 石油化工管道; 弯头管道; 缺陷检测

中图分类号: TH878

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0139-03

Research on the Detection of Defects at the Elbows of Petrochemical Pipelines Using Ultrasonic Guided Waves

Zhao Bingqiang, Wang Xiaozu, Zhang Pengchong, Liu Jianxin (Shanghai LANYA Petrochemical Equipment Inspection Institute Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: To explore the method of using ultrasonic guided waves for defect detection in petrochemical pipelines with elbows, this paper studies the propagation characteristics of ultrasonic guided waves, mainly including the analysis of the influence of elbows on the propagation characteristics of guided waves and the variation law of the propagation characteristics of guided waves with the excitation frequency of elbow bending. Through the optimization selection of excitation frequency, the design and manufacture of pipeline defects and experimental verification show that the attenuation of guided waves caused by elbows is significantly increased. This study specifically optimizes the detection parameters. The experimental results show that the attenuation of guided waves in the elbow structure is particularly significant, mainly manifested as the mode conversion caused by elbows resulting in asymmetric modes.

Keywords: Ultrasonic Guided Waves; Petrochemical Pipeline; Elbow Pipe; Defect Detection

管道是石油化工行业运输易燃易爆和有毒介质的设施, 管道结构的健康至关重要。管道服役过程中, 由于受到介质腐蚀以及恶劣环境的影响, 容易出现壁厚变薄、泄漏等事故, 对生产安全造成严重威胁。所以定期有效地检测管道缺陷是非常关键的。超声导波技术因其出色的长距离无损检测能力、高度的灵敏度和经济高效的特点, 在长距离管道检测领域展示了巨大的应用潜力^[1-2]。但管道系统弯头结构给超声导波传播特性带来显著挑战, 造成信号衰减增强和模式耦合复杂等问题, 提高缺陷检测难度。

超声导波在波导中传播距离长、信号衰减少、对管道腐蚀造成的截面损失敏感性高、适合长距离管道无损检测等特点^[3]。但是弯头结构的出现显著改变了超声导波传播特性。朱翔龙等用半解析有限元法进行了计算, 发现在不同几何参数时弯管内导波频散曲线特征较直管要复杂得多, 模式耦合与分支现象显著。王晓娟等人对弯管内 $L(0,2)$ 模式导波传播特性作了进一步的研究, 并指出弯头和焊缝结构可使超声导波的能量显著衰减并引入非对称模式而使缺陷检测变得更为复杂。针对上述情况, 对带弯头管道内超声导波传播特性及用于缺陷检测进行深入研究, 对促进管道健康监测水平的提高有着十分重要的意义。本文聚焦

于 $T(0,1)$ 导波模式, 探讨其在带焊缝弯管缺陷检测中的可行性, 旨在为管道安全评估提供科学依据。

1 超声导波技术原理及其在管道检测中的应用

超声导波技术, 依赖于超声导波沿波导结构传播的特性进行缺陷检测。尽管超声导波技术在管道检测中展现出巨大潜力, 但其在实际应用中仍面临诸多挑战。尤其在加工有弯头的工业管道中, 弯头结构显著影响超声导波传播特性^[4]。一方面弯头焊缝将使导波能量发生大幅度衰减, 从而使接收端的信号强度下降, 加大缺陷识别难度。另一方面导波进入弯头后产生非对称模式, 使波形变得更为复杂, 导波频散特征更复杂, 存在模式耦合和分支现象, 进一步加剧了检测的挑战性。因此如何对检测参数进行优化以提高超声导波对带弯头管道检测的准确性与效率已成为目前的一个研究热点与难点问题。本文实验来检测不同频率下 $T(0,1)$ 模式导波在 90° 弯头和大弯曲半径 ($5D$) 弯头中的传播特性, 结合其各方面研究分析, 选取优化激励频率。

2 超声导波在带弯头管道中的传播特性研究

弯头对超声导波传播特性的影响。导波在焊缝及弯头区域传播过程中, 因管道几何形状突变导致导波能量衰减很大。需要考虑焊缝及弯头对检测信号的影

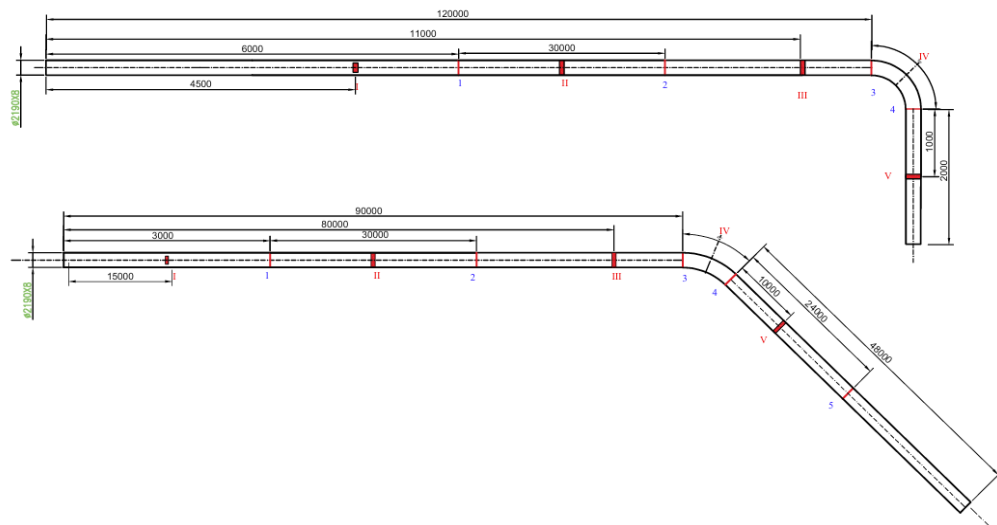


图 1 实验试管示意图

响。本研究设计制作了不同管道特征结构和缺陷的试管如图 1 所示，深入研究焊缝及弯头对超声导波传播特征的影响规律，提高管道缺陷检测的可靠性。研究中所用弯管几何参数和材料参数如表 1 所示。

表 1 管道模型几何参数及材料特性

序号	外径 D/mm	厚度 T/mm	长度 L/mm	弯曲 半径/ °	弹性模量 G/MPa	泊松 比	密度 ρ (Kg/m ³)
1	219	8	13800	45	200	0.3	7850
2	219	8	14000	90	200	0.3	7850

实验预设人工缺陷作为导波不连续的反射体，人工反射体以管道界面损失率来表示：

$$\eta = (A_0 - A_d) / A_0 \times 100\%$$

A_0 ：管道原始截面积； A_d ：缺陷处剩余截面积。

根据上述公式设计不连续反射体的截面积损失率如表 2 所示：

表 2 管道人工预制不连续反射体参数

管道缺陷	不连续 反射体 I	不连续反 射体 II	不连续反 射体 III	不连续反 射体 IV	不连续反 射体 V
截面损失率 η	3%	5%	10%	5%	10%

注：图中管道缺陷为不连续的人工预制反射体(I、II、III、IV、V)。焊缝为(1、2、3、4、5)。

激励信号为采用余弦函数调制的 10 周期的正弦信号，信号函数表达式为：

$$f(t) = 0.5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi f_c t}{n} \right) \right] \sin(2\pi f_c t)$$

3 实验研究

3.1 实验验证优化的激励频率

本文采用了压电式超声导波检测仪器激励 T(0,1) 模态导波，压电式超声导波多用于管道检测，对管径规格有很高的适应性，在工业管道检测领域具有广

泛的应用，本实验采用压电式超声导波检测仪器检测带直角弯头（90°）和大弯曲半径（5D）弯头的管道。由于压电式导波在检测时不需要在管道表面粘贴合金带材，在实际检测中需要对管道表面状态要求不高，需要表面油漆不超过 2mm，通常不需要打磨探头布置位置。检测时探头的布置距离管端面 0.5m，避免检测时管端回波信号影响。

超声导波检测时，激励频率选取对检测效果有显著影响。为了确定最优的激励频率，本研究采用了仿真比较法，仿真激励信号选取了 42kHz 至 90kHz 范围内的多个频率点（42kHz、50kHz、60kHz、70kHz、80kHz、以及 90kHz）进行研究。通过激励不同频率下导波在样管中的传播信号，计算在不同频率下导波在管道中的衰减率，确定最优的激励频率。

计算导波能量的衰减以及衰减系数的计算表达式如下：

$$S = -20 \lg \frac{F_1}{F_2}$$

F_1 为激励端信号的峰值； F_2 为端面回波信号峰值的一半。

经过计算可知导波的衰减情况，计算后选择合适的激励频率。

3.2 实验验证优化的激励频率

实验激励信号选取了 42kHz 至 90kHz 范围内的多个频率点（42kHz、50kHz、60kHz、70kHz、80kHz、以及 90kHz）进行研究。

实验发现信号为 50KHz 时信号随传播距离衰减最小；而激励信号为 60kHz、70kHz、80kHz 时发现导波信号经过焊缝和不连续反射体后波发生严重频散，影响对缺陷的检出率，对弯头处缺陷的检出影响尤为严重，所以，对于大弯曲半径（5D）弯头管道检测优化

频率选择为 50KHz。

通过激励 50KHz 的扭转波 T (0,1) 模态的导波进行实验,图 2 为实验的距离波幅曲线,图中信号峰值编号按照图 1 中设计试管结构特征表示(管道缺陷为不连续的人工预制反射体(I、II、III、IV、V)。焊缝为(1、2、3、4、5)),结合管道设计图纸,可以发现焊缝 3 与焊缝 4 中间位置有明显的不连续反射体 IV 的信号,各个位置设置的不连续反射体信号都可以检出,达到了预期的检测效果,且导波信号经过大弯曲半径弯头时信号衰减较小,频散现象不明显,对过弯头不连续反射体有一定的检测效果。

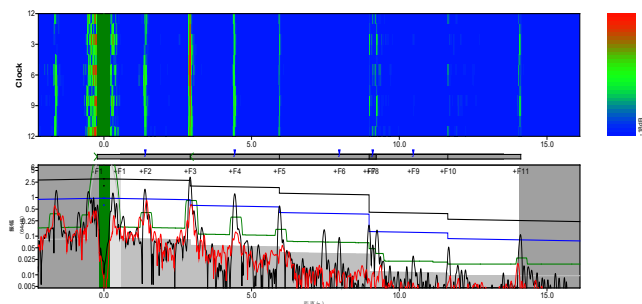


图 2 大弯曲半径 (5D) 弯头管道检测信号距离波幅曲线图
注: 图中 F2、F4、F6、F8, 对应人工反射体 (I、II、III、IV、V);
F3、F5、F7、F10 焊缝为 (1、2、3、4、5)

通过激励实验信号 42kHz 至 90kHz 范围内的多个频率点 (42kHz、50kHz、60kHz、70kHz、80kHz、以及 90kHz), 实验得到带直角 (90°) 弯头管道检测信号多频率 B 成像和距离波幅曲线图, 对于实验管径 D (219mm) 的管道, 激励信号为 64kHz 时信号衰减最小, 检测距离最长, 在直管段信号频散不明显, 过直角弯头后信号频散严重, 无法检测过直角弯头的结构特征 (不连续反射体 V), 同样的端面反射信号幅值最高。

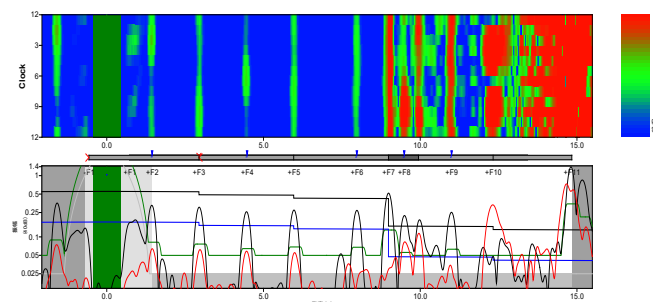


图 3 带直角 (90°) 弯头管道 50KHz 检测信号距离波幅曲线图
注: 图中 F3、F5、F6、F9, 对应人工反射体 (I、II、III、IV、V);
F4、F8、F7、F10 焊缝为 (1、2、3、4、5)

图 3 中为带直角 (90°) 弯头管道 50KHz 检测信号距离波幅曲线图, 从图 3 中可以看到, 导波信号经过直角弯头后导波能量衰减程度及模态耦合现象随频率变化而复杂化, 对于弯头后的焊缝以及不连续反射

体的特征信号失去检测能力, 但对直角弯头外弯处的缺陷同样可以检出。

从图 3 中可以看到带直角 (90°) 弯头管道内导波传播特性随激励频率变化表现出显著差异, 一定频率的导波在经过焊缝后产生其他模态的导波, 对于弯头后的焊缝以及不连续反射体的特征信号失去检测能力, 因此, 压电式导波无法通过直角弯头检测弯头后的缺陷, 但可以检测弯头外弯侧的缺陷。

3.3 实验结果对比分析

试验结果表明: 试验结果对导波传播特性, 缺陷响应和信号衰减都表现出高度一致性。尤其对于弯头区域而言, 虽然导波传播特性越来越复杂, 但是该实验模型仍然可以精确地检测出导波传播路径以及能量分布。另外, 通过试验证明频率优选对提高缺陷信噪比及检测灵敏度具有较好的效果, 进一步提高超声导波技术检测复杂管道结构缺陷的能力。

4 结论

①导波对带大弯曲半径弯头管道检测研究后, 得出导波对各个位置设置的不连续反射体信号都可以检出, 达到了预期的检测效果, 且导波信号经过大弯曲半径弯头时信号衰减较小, 频散现象不明显, 对过弯头不连续反射体有一定的检测效果。

②导波对带直角弯头管道实验研究发现, 导波信号经过直角弯头后导波能量衰减程度及模态耦合现象随频率变化而复杂化, 对于弯头后的焊缝以及不连续反射体的特征信号失去检测能力, 但对直角弯头外弯处的缺陷同样可以检出。

进一步发现弯头结构内导波衰减特别显著, 主要表现为弯头导致模态转换并引入非对称模态。所以在激励频率优化中, 需要专门考虑弯头对于导波传播特征的影响来保证检测信号准确可靠。通过该研究不仅加深了人们对复杂管道结构超声导波传播特征的认识, 而且为实际探测时参数的优选提供理论依据。

参考文献:

- [1] 梁灏然, 武静, 刘锋, 等. 聚脲防腐管道中超声导波的缺陷检测研究 [J]. 机械强度, 2023(2):296-304.
- [2] 张泽宇, 胡世超, 佟宇, 等. 含弯头管道超声导波检测研究 [J]. 中国设备工程, 2023(6):176-178.
- [3] 卫小龙, 杜国锋, 周凯, 等. 基于相似路径的管道焊缝区域超声导波缺陷检测 [J]. 石油机械, 2023(7):121-129.
- [4] 李忠虎, 李靖, 王金明, 等. 管道超声导波检测缺陷周向定位数值模拟 [J]. 化工设备与管道, 2022(1):81-87.

作者简介:

赵兵强 (1998-), 男, 汉族, 甘肃白银人, 硕士, 研究方向: 无损检测。