

基于反射的 $L(0,1)$ 导波的分段式管道腐蚀定量监测方法研究

刘 洋, 冯 新*

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 腐蚀导致管道壁厚减薄, 进而降低管道的强度和完整性, 威胁管道的运行安全. 提出了一种基于反射的 $L(0,1)$ 导波的分段式管道腐蚀定量监测方法. 通过分析不同壁厚下管道中 $L(0,1)$ 导波的变化规律, 提出使用反射的 $L(0,1)$ 导波走时变化作为壁厚损失敏感特征, 建立了反射波走时变化与壁厚损失的理论关系, 根据实测的反射波走时变化和该理论关系量化管道壁厚损失. 开展了实验研究, 在管道上激发 $L(0,1)$ 导波, 使用实测的反射波走时变化评价管道壁厚损失, 并结合理论关系得到对应的壁厚损失. 结果表明: 通过反射波走时变化可以灵敏识别和准确量化管道壁厚损失, 由反射波走时变化评估的壁厚损失与超声测试值较为一致. 与已有的导波方法相比, 所提方法提高了对管道壁厚损失的分辨率和量化精度. 而且, 该方法克服了超声测试只能逐点扫描, 检测精度受多种因素影响, 无法远程实时在线定量监测管道壁厚损失的不足.

关键词: 分段式管道; 腐蚀; 壁厚损失; 反射的 $L(0,1)$ 导波; 走时变化; 定量监测

中图分类号: TB553

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202304012

0 引言

管道广泛应用于水、石油、天然气、化工原料等物资的远距离输送, 然而, 其在长期运行过程中, 不可避免地会遭受各种腐蚀侵害^[1-2]. 管道内部和外部腐蚀介质的作用, 以及管道内输送介质的冲刷等会使管道发生全面腐蚀. 全面腐蚀会使管道壁厚逐渐减薄, 导致管道的完整性和承载力降低, 使用寿命缩短, 甚至引发泄漏和爆管等事故. 腐蚀的发生和发展是长期的动态过程, 腐蚀随着时间增长而恶化, 但在复杂因素作用下, 可能存在腐蚀加速的情况, 造成管道在常规检测前就突发腐蚀失效. 为了确保管道服役安全, 及早发现微小腐蚀和准确量化腐蚀程度是十分必要的.

超声测试是传统的管道壁厚测量方法^[3], 属于典型的点式检测技术, 通常需要逐点扫描, 操作烦琐费时, 无法检测隐蔽区域, 不适用于对长距离的管道结构进行全面腐蚀检测. 超声测试对管道表面要求高, 需要探头和表面良好耦合, 如果管道表面粗糙度大, 腐蚀坑和沉积物多, 则检测精度大

大降低. 此外, 漏磁、涡流、X射线等技术也被广泛用于腐蚀检测, 但都存在与超声测试类似的缺陷^[4-6].

采用超声导波技术可以有效监测结构腐蚀损伤. 超声导波技术使用压电换能器在结构上激发超声导波信号, 导波在结构上传播时遇到腐蚀缺陷会发生反射、透射、模态转换等现象, 通过分析接收的包含腐蚀缺陷信息的导波信号可以主动识别结构腐蚀损伤. 近年来, 超声导波技术迅速发展, 广泛应用于各种结构的损伤监测^[7-10]. 超声导波可以沿整个管壁传播, 传播距离远、衰减小, 可以快速全面探测长距离管段, 包括物理上无法到达的区域, 使得该技术可以对长距离管道结构进行远程全面监测^[11-13].

基于超声导波的管道损伤监测已经在国内外开展较多研究. Alleyne 等^[14] 和 Demma 等^[15] 分别使用 $L(0,2)$ 和 $T(0,1)$ 导波的缺陷回波幅值评估管道缺陷尺寸. 周进节等^[16] 使用时间反转技术监测管道缺陷, 实验结果显示时间反转技术可以

收稿日期: 2022-04-14; 修回日期: 2023-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079024); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3801000).

作者简介: 刘 洋(1990—), 男, 博士生, E-mail: 1598511871@qq.com; 冯 新*(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: fengxin@dlut.edu.cn.

提高缺陷回波幅值,增加了对缺陷的敏感性. Guan 等^[17]使用非线性超声导波监测管道微小裂纹,根据由微小裂纹引起的多模二次谐波识别微小裂纹损伤,并引入非线性指数评价微小裂纹损伤. Amjad 等^[18]使用 $L(0,2)$ 导波直达波走时变化评价管道上圆形缺陷,实验结果表明导波走时变化可以量化圆形缺陷的直径. 现有研究虽然已经确定通过导波信号中幅值、走时、非线性参数等指标可以识别管道缺陷,但是主要集中在对管道损伤程度的定性评价,无法从理论上建立评价指标与管道腐蚀深度之间精确的定量关系,不能准确量化管道壁厚损失. 另外,这些方法对微小壁厚损失的分辨率低,稳定性和适用性不足. 使用超声导波技术灵敏识别和精确量化管道壁厚损失的有效性需要进一步研究.

除了焊接管道外,在实际工程中普遍采用具有承插口、法兰等连接的分段式管道. 本文基于超声导波技术提出一种可以灵敏识别和精确量化腐蚀引起的分段式管道壁厚损失的监测方法. 通过分析不同管道壁厚下 $L(0,1)$ 导波的速度频散曲线,提出使用反射的 $L(0,1)$ 导波走时变化作为腐蚀敏感参数,并进一步建立反射波走时变化与管道壁厚损失的理论关系,根据实测的反射波走时变化和该理论关系实现对腐蚀引起的管道壁厚损失的精确量化. 为了验证所提方法的有效性,使用所提方法对管道进行腐蚀监测实验.

1 监测原理

1.1 管道中超声导波的传播特性

导波沿管壁传播,腐蚀引起的截面变化会导致其传播特性发生变化,因此通过监测管道中超声导波信号的变化可以识别管道腐蚀损伤. 柱面导波在管道中传播时的运动方程满足 Navier 位移方程:

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot u) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: μ 和 λ 为管道材料的 Lamé 常数; ∇^2 为拉普拉斯算子; ρ 为管道密度; u 和 t 分别为位移和时间.

根据 Gazis^[19]关于方程(1)位移 u 的推导,求解柱面导波位移 u 最终归结为求解管道中柱面导波的频散方程,即

$$|C_{ij}| = 0 \quad (2)$$

式(2)为一个关于波数 k 和角频率 ω 的 6×6 阶行列式,其中 $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; C_{ij} 与管道材

料的 Lamé 常数 μ 和 λ 、管道密度 ρ 、内半径 a 和外半径 b 等参数有关^[19]. 式(2)的解对应 3 种导波模式:纵向导波、扭转导波和弯曲导波. 导波模式可以用导波群速度 $C_g = d\omega/dk$ 和相速度 $C_p = \omega/k$ 频散曲线表示,其关系式为^[20]

$$C_g = C_p^2 \left[C_p - (fd) \frac{dC_p}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: $f = \omega/2\pi$, 为频率; d 为管道壁厚.

由式(3)可知,管道中导波群速度 C_g 是管道壁厚 d 和导波频率 f 的函数. 对式(2)进行数值求解可以得到导波的频散曲线,从而进行模式分析,为导波模式和激励频率的选择提供依据. 本文以外径 70 mm、壁厚 8 mm 的钢管为例,使用 Matlab 开源程序 Disperse 求解式(2)得到导波的频散曲线^[21]. 如图 1 所示,整个频段内,扭转模式 $T(0,1)$ 是非频散的,其群速度对壁厚变化不敏感. 弯曲模式虽然是频散的,但是衰减大,不易长距离传播,且其种类繁多复杂,在较宽的频段内许多弯曲模式的波速接近,难以激发和控制单一弯曲模式,会造成模式混叠. $L(0,2)$ 导波在 28.5~50.0 kHz 是频散的,说明该范围内 $L(0,2)$ 导波群速度受壁厚变化影响,但是该范围内同时存在 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 导波,容易造成模式干扰,使信号分析困难. 整个频段内, $L(0,1)$ 导波是频散的,因此其群速度受壁厚变化影响,而且纵向导波便于激励和控制,在传播过程中衰减小,当激励频率低于 $L(0,2)$ 导波的截止频率时,可以激发出单一的 $L(0,1)$ 导波,易于信号处理. 综上分析,选择 $L(0,1)$ 导波监测管道腐蚀,腐蚀引起的管道壁厚损失会导致 $L(0,1)$ 导波的群速度发生变化,进而使导波走时发生变化,通过分析 $L(0,1)$ 导波的走

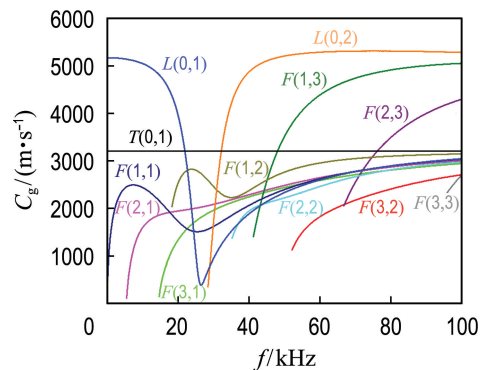


图1 管道中导波的群速度频散曲线

Fig. 1 Group velocity dispersion curves of guided waves in the pipe

时变化可以监测管道壁厚损失。

1.2 管道壁厚损失的量化

为了研究管道壁厚损失对导波特性的影响,绘制不同壁厚下 $L(0,1)$ 导波的群速度曲线,得到管道壁厚损失与 $L(0,1)$ 导波走时变化之间的定量关系。图 2 绘制了管道壁厚从 8.0 mm 减小到 6.0 mm 时, $L(0,1)$ 导波的群速度频散曲线。可以发现,整个频段内群速度与壁厚呈正相关。因此,随着管道壁厚损失的增加, $L(0,1)$ 导波走时变化逐渐增加。为了研究群速度变化 C_{gn} 与频率的关系,用 7.5 mm 壁厚下的群速度减去 8.0 mm 壁厚下的群速度,得到了在不同频率处 0.5 mm 壁厚损失引起的群速度变化。如图 3 所示,在 0~24.5 kHz,频率越大,群速度对壁厚变化越敏感;在 24.5~26.0 kHz,随着频率增加,群速度对壁厚变化敏感性降低,在 24.5 kHz 处群速度对壁厚变化最敏感。因此,为了更加有效地监测管道腐蚀,在满足能够激发单一 $L(0,1)$ 导波和接收单一且幅值 A 清晰的 $L(0,1)$ 导波条件下,尽量选择对壁厚损失敏感的频率作为激励信号的中心频率。

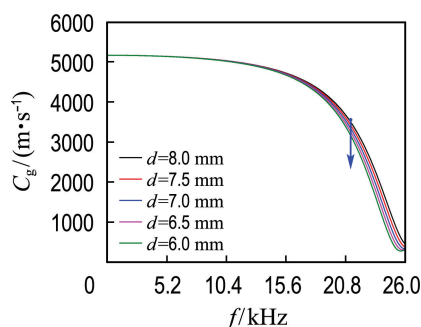


图 2 不同壁厚下 $L(0,1)$ 导波的群速度频散曲线
Fig. 2 Group velocity dispersion curves of $L(0,1)$ guided waves with different wall thicknesses

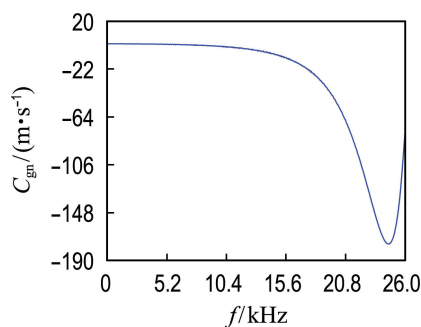


图 3 $L(0,1)$ 导波的群速度变化曲线
Fig. 3 Group velocity variation curve of $L(0,1)$ guided wave

分别将管道初始内半径 a_h 和减薄后的内半径 a_c 代入式(2),使用 Disperse 求解,可以得到管道初始壁厚 d_h 和减薄后的壁厚 d_c 对应的群速度频散曲线,从而分别获得在固定频率 f_0 处 d_h 和 d_c 对应的群速度 C_{gh} 和 C_{gc} 。已知导波传播长度即可确定 d_h 和 d_c 分别对应的走时 t_h 和 t_c 。管道壁厚损失和该壁厚损失下的导波走时变化的表达式如下:

$$\begin{aligned} d_n &= a_c - a_h = d_h - d_c \\ t_n &= t_c - t_h = L \left(\frac{1}{C_{gc}} - \frac{1}{C_{gh}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: d_n 和 t_n 分别为管道壁厚损失和对应的导波走时变化; L 为导波传播长度。

由式(4)可知,腐蚀引起的管道壁厚损失 d_n 可以通过导波走时变化 t_n 来评价。通过计算不同壁厚损失和对应的走时变化可以建立走时变化与壁厚损失之间的关系曲线,以固定频率 f_0 为 21 kHz,传播长度 L 分别为 1.5、4.5、9.0 m,壁厚损失由 0 mm 逐渐增加到 1.1 mm 为例,绘制走时变化与壁厚损失的理论关系曲线,由图 4 可知,在特定的频率和传播长度下,导波走时变化与壁厚损失呈正相关,利用走时变化与壁厚损失的理论关系曲线可以量化管道壁厚损失。相同壁厚损失下,走时变化与导波传播长度呈正相关。

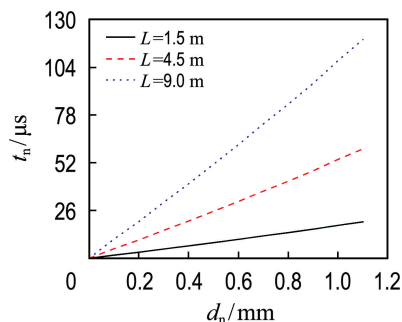


图 4 走时变化与壁厚损失的理论关系曲线
Fig. 4 Theoretical relation curve between time-of-flight variation and wall thickness loss

由式(4)和图 4 可知,走时变化 t_n 的测量精度决定了壁厚损失 d_n 的量化精度。然而,现实中由于随机误差和系统误差的影响会使走时变化 t_n 的测量存在一定的不确定性,当腐蚀引起的导波走时变化较小时,提取的走时变化的精度低,导致壁厚损失量化精度低。因此,为了灵敏识别微小腐蚀和准确量化壁厚损失,需要尽可能增加走时变化。在固定频率 f_0 处,导波走时变化对管道壁厚

损失的分辨率主要取决于导波传播长度 L 。直达波只经过一次激发和接收之间的路径,对于特定的待监测管道,其监测路径长度确定,选择好激励频率后,则直达波对管道壁厚损失的分辨率确定。使用直达波走时变化监测管道腐蚀会存在对管道微小壁厚损失分辨率不足的可能,容易误判,无法精确量化管道壁厚损失。反射波在管道来回传播,可以明显提高导波的传播长度,对管道重复采样,起到对管道微小壁厚损失的放大作用,从而提高对管道壁厚损失的分辨率和量化精度。相同管道壁厚损失下,直达波和反射波走时变化如下:

$$\begin{aligned} t_{ns} &= t_{sc} - t_{sh} = L_s \left(\frac{1}{C_{gc}} - \frac{1}{C_{gh}} \right) \\ t_{nr} &= t_{rc} - t_{rh} = mL_s \left(\frac{1}{C_{gc}} - \frac{1}{C_{gh}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: t_{ns} 和 t_{nr} 分别为直达波和反射波走时变化; t_{sh} 和 t_{sc} 分别为管道健康状态和腐蚀状态的直达波走时; t_{rh} 和 t_{rc} 分别为管道健康状态和腐蚀状态的反射波走时; L_s 和 mL_s 分别为直达波和反射波的传播长度。

由式(5)可知,理论上,对于确定长度的管道,相同管道壁厚损失下,传播长度为直达波传播长度 m 倍的反射波,其时移也是直达波时移的 m 倍,即反射波走时变化对管道壁厚损失的分辨率为直达波走时变化的 m 倍。因此,通过选择合适的反射波,在固定频率 f_0 和传播长度 mL_s 下,建立反射波走时变化 t_{nr} 与管道壁厚损失 d_n 之间的理论关系,利用由实测导波信号提取的反射波走时变化和该理论关系便可以推导出相应的管道壁厚损失,实现对管道壁厚损失的识别和量化。接收的导波信号是典型的非平稳信号,包含不同的频率成分,为降低噪声和准确提取中心频率处导波信号的走时,使用连续小波变换技术^[22]对接收的导波时域信号进行时频分析,提取中心频率处小波系数对应的走时,得到不同腐蚀程度下反射波走时变化。

2 实验设置

为了验证所提方法的有效性,选择一根无缝钢管进行管道腐蚀监测实验研究。如图5所示,实验钢管的长度为4.00 m,外径为70 mm,壁厚为8 mm,压电传感器(PZT)的尺寸为20 mm×5 mm×1 mm。在距管道左端1.25 m处沿周向等间距布设16个PZT作为激励器。距管道左端

2.75 m处布设接收环,每个接收传感器接收的信号主要反映该传感器所在轴向路径的腐蚀深度信息,为了确定接收传感器的数量,应根据管道的结构和工作环境等条件判断是否可以确定需要被监测区域所在的周向位置,如果可以,则在接收环上与该区域周向相同的位置处安装1个接收传感器就可以量化该区域所在轴向路径的管道壁厚损失;否则,为了提高监测能力和尽可能多地获得管道周向不同位置对应的轴向路径的管道壁厚损失,在满足经济合理、便于安装的条件下可以沿接收环的周向均匀布设尽可能多的接收传感器。本文在接收环周向等间距布设4个PZT作为接收传感器分别接收导波信号,编号依次为1、2、3、4,对应的管道轴向监测路径分别为路径1、2、3、4。使用任意波形发生器(PXI-5421)生成的激励信号,经功率放大器(Trek2100HF)放大后接入激励器在管道上激发导波信号,示波器(PXI-5122)连接接收传感器接收导波信号,PXI-5421和PXI-5122集成在PXI-1033机箱中。实验中使用基于LabVIEW的虚拟控制平台激励和采集信号,示波器采样频率设为4 MHz,采样时间为4.5 ms。

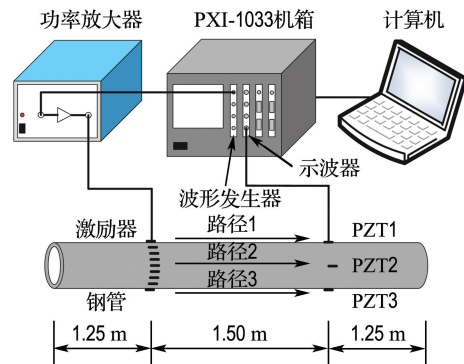


图5 实验装置示意图

Fig. 5 Diagram of experimental device

实验中采用外加电流加速腐蚀方法腐蚀管道。如图6所示,在管道内部中心位置沿管道轴向放置一根外径为20 mm、壁厚为1 mm、长度为4.50 m的不锈钢管,不锈钢管接入直流电源负极作为阴极,实验钢管接入直流电源正极作为阳极。在水箱内配制3.5%的NaCl溶液,在管道两端各粘贴一块有机玻璃板将管道两端封住,在管道一端安装水管通过水泵将管道内部充满NaCl溶液,在管道另一端安装水管连接到水箱,及时排出腐蚀产生的气体和腐蚀产物。每个腐蚀工况中,将

管道的左端和右端轮流作为电流输入端,腐蚀相同的时间;电流大小设为 18 A,对应的电流密度较小约为 2.65 mA/cm^2 ,尽量减小管道两端的腐蚀速度差别,保证整个管道内部腐蚀均匀.

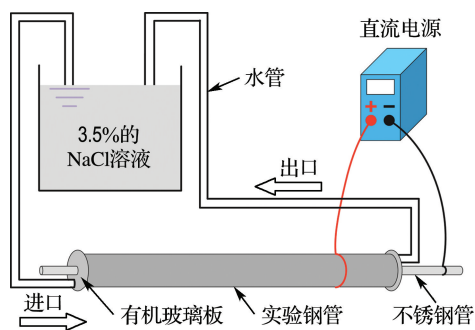


图 6 加速腐蚀装置

Fig. 6 Accelerated corrosion device

距管道左端 0.50 m 处,在管道外表面每个监测路径上等间距布设 7 个壁厚测点,测点轴向间距为 0.50 m,计算 7 个测点所测得壁厚的平均值作为该路径的管道壁厚,通过测量腐蚀前后管道各路径的壁厚得到相应的管道壁厚损失.由于实验钢管较长且模拟的是管道内腐蚀,壁厚测点距管道端部较远,使用游标卡尺不便于测量各测点的壁厚,因此采用分辨率为 0.01 mm 的超声波测厚仪测量各测点的壁厚.为了验证超声测试的准确性,在初始管道上距左侧端部 0.01 m 处沿周向等间距布设 4 个测点,分别用游标卡尺和超声波测厚仪测量 4 个测点的壁厚.结果表明,在每个测点处游标卡尺测量值和超声测试值较为一致,因此使用超声测试可以有效测量该管道的壁厚.由超声测试获取的各测点的壁厚发现,整个腐蚀过程中在相同腐蚀时间 t_y 下同一轴向路径上各测点的壁厚损失差别不大,腐蚀 4 次后各路径中 7 个测点的壁厚损失之间的差别最大,其中最大标准差为 0.08 mm.各腐蚀工况下管道 4 个路径的壁厚损失见表 1.由表 1 可知,整个腐蚀过程中管道内壁发生较为均匀的全面腐蚀.

基于 1.2 节关于群速度变化与频率关系的分析,分别设置中心频率为 20、21、22、23 和 24 kHz,汉宁窗调制的 20 周期正弦波作为激励信号,根据实验中接收的导波信号发现,当中心频率为 21 kHz 时可以接收幅值较大、模态清晰的 $L(0,1)$ 导波,且各波包相互分离,不存在模态干扰,易于分析和提取各波包的走时.当中心频率超

表 1 管道 4 个路径的壁厚损失

Tab. 1 Wall thickness losses of 4 paths of the pipe

管道 路径	壁厚损失/mm			
	$t_y=62 \text{ h}$	$t_y=122 \text{ h}$	$t_y=195 \text{ h}$	$t_y=275 \text{ h}$
1	0.19	0.35	0.57	0.84
2	0.19	0.35	0.59	0.93
3	0.20	0.38	0.57	0.90
4	0.17	0.39	0.62	0.87

过 21 kHz 时,信号衰减逐渐严重,幅值较小,波形逐渐畸变,并逐渐出现其他模态,造成模态混叠,因此使用中心频率为 21 kHz,汉宁窗调制的 20 周期正弦波作为激励信号.由于激励信号的频率低于 $L(0,2)$ 导波的截止频率,而且各波包的群速度与 $L(0,1)$ 导波对应的群速度一致,可以确认实测的各波包都为 $L(0,1)$ 模态.

3 实验结果与分析

3.1 导波信号分析

由 1.2 节的理论分析可知,导波传播长度越长,其对壁厚损失的敏感性越高,根据实测的导波信号发现第 4 个反射波的波形清晰,幅值较大,可以和前后波形明显区分,此后的各反射波波形逐渐发生畸变和相互干扰,幅值小,易受噪声影响,因此选择第 4 个反射波监测管道腐蚀.4 个 PZT 接收的信号基本一致,都是利用第 4 个反射波,其传播长度一样.因此,理论上这 4 个路径壁厚损失的量化精度也一样.以 PZT1 为例,由图 7 可以看出,其接收的导波时域信号包含 5 个完整波包,第 1 个波包为直达波,后面 4 个波包为反射波.通过小波时频分析,可以将接收的导波信号清晰地分离为 5 个波包,具有较高的时频分辨率.结合第 2 章的分析,可以判定这 5 个波包都为 $L(0,1)$ 模态.不同波包的传播长度如图 8 所示,其中,直达波的传播长度最短,为 1.50 m,第 4 个反射波的传播长度最长,为 12.00 m.由式(5)可知,理论上第 4 个反射波走时变化对管道壁厚损失的分辨率是直达波走时变化的 8 倍.

同样以 PZT1 为例,其在初始状态和不同腐蚀时间下接收的整体导波信号、0.8~1.0 ms 的直达波信号、3.7~3.9 ms 的反射波信号如图 9 所示.随着腐蚀时间的增加,导波信号逐渐向右偏移,导波幅值呈现微小的波动变化.这是因为腐蚀导致管壁逐渐变薄,改变了导波的传播特性,使导

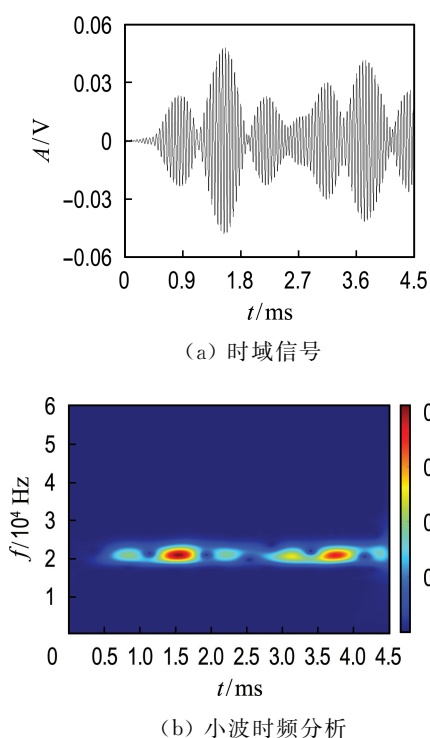


图7 腐蚀前 PZT1 接收的导波

Fig. 7 Guided wave received by PZT1 before corrosion

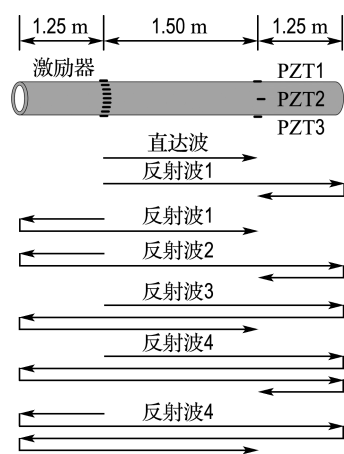


图8 导波传播长度示意图

Fig. 8 Diagram of the propagation lengths of the guided waves

波的群速度逐渐减小,导致接收的导波信号走时增加,幅值发生变化. 整个腐蚀过程中,接收的导波信号保持稳定,峰值的频率基本保持为 21 kHz. 相同腐蚀程度下的反射波时移远大于直达波时移,因此,与直达波相比,反射波对腐蚀更加敏感,可以更加有效监测腐蚀引起的管道壁厚损失的发生和发展.

3.2 管道壁厚损失的量化结果分析

通过分析反射波的变化趋势只能定性识别管

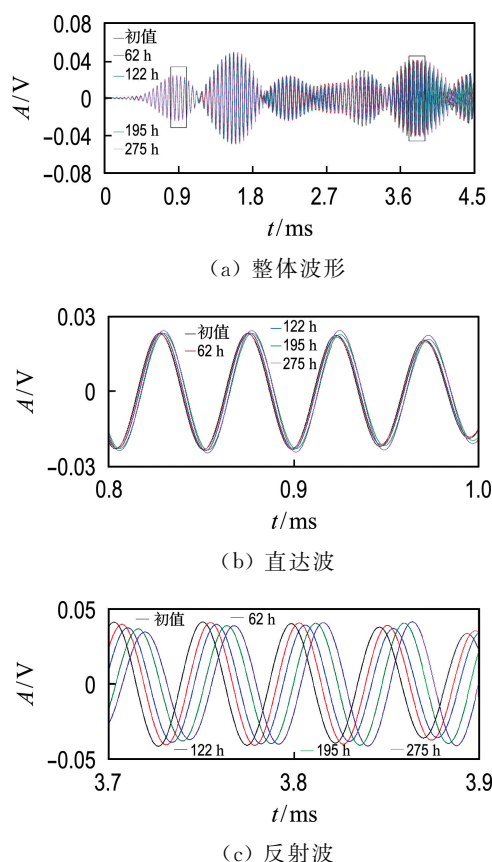
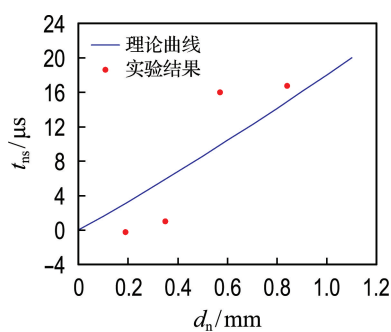


图9 初始状态和不同腐蚀时间下 PZT1 接收的导波信号

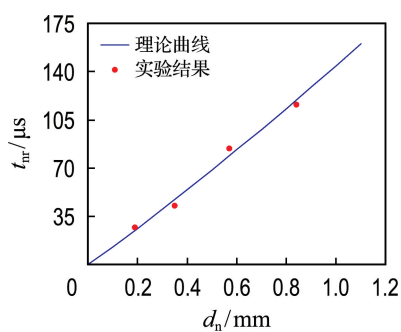
Fig. 9 Guided wave signals received by PZT1 at the baseline and different corrosion time

道壁厚损失,为了准确量化管道壁厚损失,分别从理论上得到直达波走时变化和反射波走时变化与管道壁厚损失的定量关系曲线,使用从实测导波信号中提取的直达波和反射波走时变化定量评价管道壁厚损失.

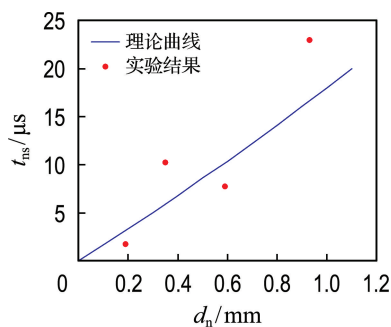
由图 10 可知,随着腐蚀程度的增加,4 个路径对应的直达波走时变化整体上都呈增加趋势,但是会有波动变化,直达波走时变化和对应的理论走时变化之间偏差较大,说明直达波走时变化对管道壁厚损失的敏感性较低,容易造成误判,不能有效量化管道壁厚损失. 由图 11 可知,反射波走时变化对管道壁厚损失十分敏感,腐蚀 1 次后,4 个路径的管道壁厚损失都较小,各路径对应的反射波走时变化都较大,且与对应的理论走时变化较为一致,说明通过反射波走时变化可以灵敏识别和准确量化微小的管道壁厚损失. 随着腐蚀程度的发展,各路径的反射波走时变化都逐渐增加. 4 个路径的管道壁厚损失量化精度有一定差别,这主要是由实验误差引起的,4 个路径的反射



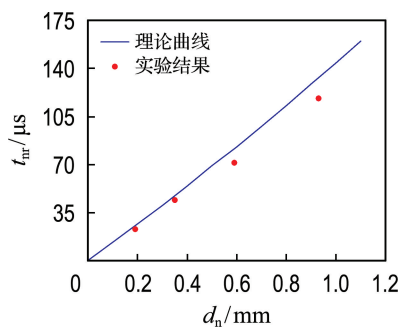
(a) 路径 1



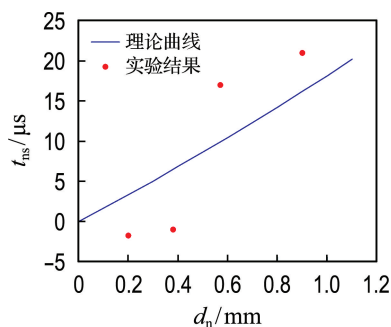
(a) 路径 1



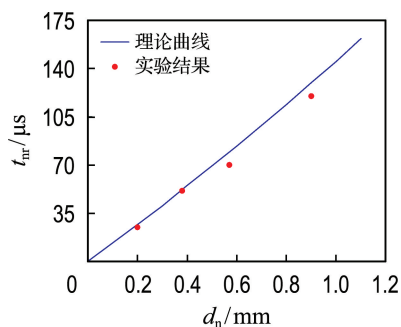
(b) 路径 2



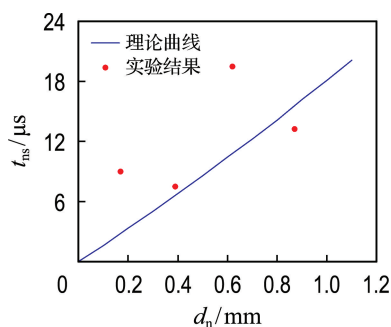
(b) 路径 2



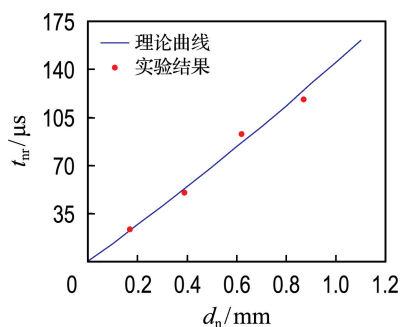
(c) 路径 3



(c) 路径 3



(d) 路径 4



(d) 路径 4

图 10 不同管道壁厚损失的直达波走时变化

Fig. 10 Time-of-flight variations of the direct waves with different wall thickness losses of the pipe

波走时变化都与各自对应的理论值较为一致, 均可以准确量化各自路径的管道壁厚损失. 在相同腐蚀程度下, 同一路径的反射波走时变化明显大于直达波走时变化, 说明反射波走时变化对管道

图 11 不同管道壁厚损失的反射波走时变化

Fig. 11 Time-of-flight variations of the reflected waves with different wall thickness losses of the pipe

壁厚损失更加敏感.

为了更加直观评价管道壁厚损失, 将实验中获取的直达波走时变化代入直达波走时变化和管道壁厚损失的理论关系曲线, 反射波走时变化代

入反射波走时变化和管道壁厚损失的理论关系曲线,分别得到由实测的直达波和反射波走时变化评估的管道壁厚损失,并与超声测试值进行对比。

由图 12 可知,随着腐蚀时间的增加,由直达波走时变化获得的 4 个路径的管道壁厚损失虽然整体上都呈增加趋势,但是会有波动变化,而且存在由直达波走时变化获得的管道壁厚损失与超声测试值之间的相对误差较大的情况,因此,由直达波走时变化获得的管道壁厚损失的精度较低。由图 13 可知,腐蚀 62 h 时,管道各路径壁厚损失都较小,在 0.17~0.20 mm,根据各路径对应的反射波走时变化得到的管道壁厚损失与对应的超声测试值之间的误差较小,说明该方法对微小管道壁厚损失敏感,可以识别 0.17 mm 的管道壁厚损失。随着腐蚀时间的增加,由反射波走时变化获得的管道各路径壁厚损失都逐渐增加,没有波动情况,腐蚀 275 h 后,各路径的管道壁厚损失较大,都超过了 0.8 mm。整个腐蚀过程中,根据各路径对应的反射波走时变化评估的管道壁厚损失与相应的超声测试值较为一致,最大误差为-9.66%。因此,该方法对管道壁厚损失的量化精度高,监测范围大,同时具有较好的稳定性和适用性。使用布设的接收传感器网络可以实现对整个管道腐蚀的全面监测,利用各路径对应的反射波走时变化能够分布式量化管道各轴向路径的壁厚损失。该方法简单高效,仅使用几个永久监测点就可以快速全面定量监测长距离管道的腐蚀,同时可以远程实时在线监测,克服了传统的超声测试只能靠近管道逐点测试,检测精度受管道表面粗糙度和耦合效果等因素影响,稳定性和适用性不足,不能远程实时在线对长距离管道的壁厚损失进行全面定量监测的缺陷。

3.3 讨 论

本文利用从管道端部反射的 $L(0,1)$ 导波的走时变化定量监测管道壁厚损失。激励的 $L(0,1)$ 导波为轴对称纵向模态,其遇到法兰等轴对称结构产生的反射波主要为轴对称纵向模态^[23],当激励频率小于 $L(0,2)$ 导波的截止频率时,可以激励出单一的 $L(0,1)$ 导波,且生成的 $L(0,1)$ 导波可以从轴对称结构处反射单一的 $L(0,1)$ 导波。在实际工程中广泛使用的分段式管道,通过法兰、承插口等连接形式将多个管节组成一条管道,采用前述方法在分段式管道的单一管节上激发 $L(0,1)$ 导波,从而可以从法兰或承插口处反射单一的

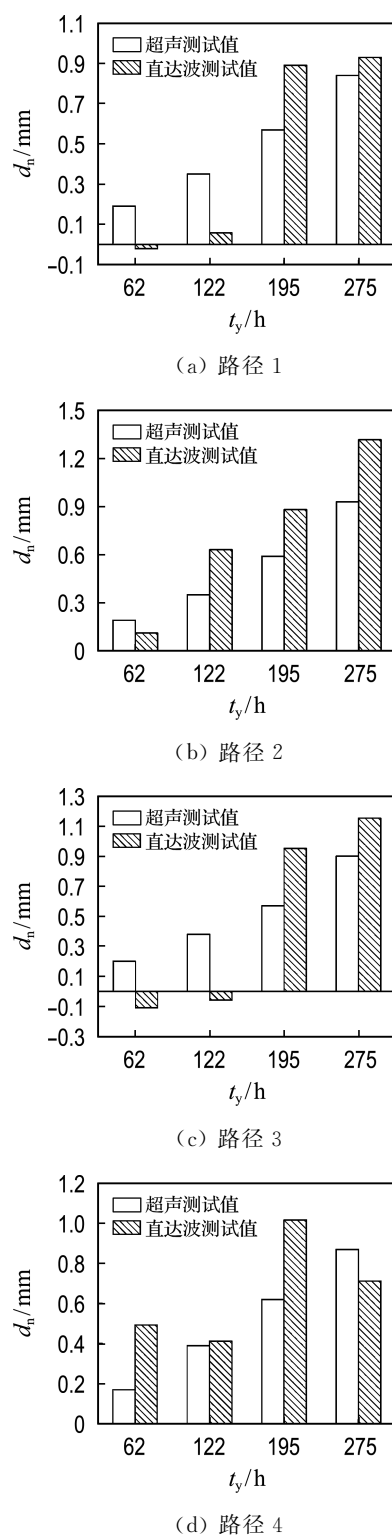


图 12 利用直达波走时变化和超声测试获得的管道壁厚损失

Fig. 12 Wall thickness losses of the pipe obtained by the time-of-flight variations of the direct waves and ultrasonic testing

$L(0,1)$ 导波,实现管道壁厚损失的实时监测和定量评价。因此,本文提出的方法适用于定量监测具

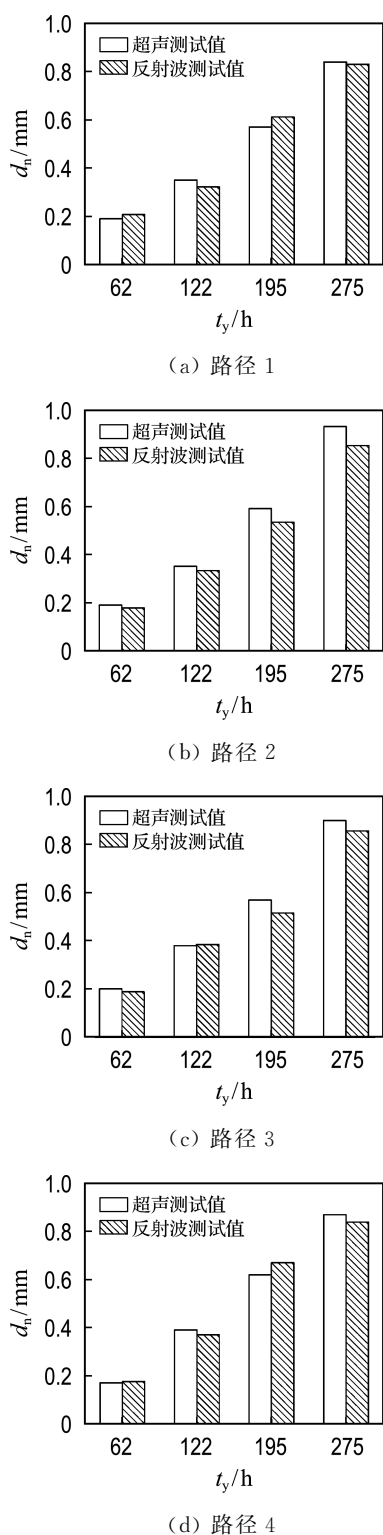


图 13 利用反射波走时变化和超声测试获得的管道壁厚损失

Fig. 13 Wall thickness losses of the pipe obtained by the time-of-flight variations of the reflected waves and ultrasonic testing

有法兰和承插口连接的分段式管道壁厚损失。

本文主要研究管道的全面腐蚀问题。所选频

段内的 $L(0,1)$ 导波是频散的, 反射波走时变化取决于腐蚀区域的管道壁厚损失和轴向长度变化。全面腐蚀的腐蚀区域为整个管段, 反射波走时变化只受管道壁厚损失变化的影响。局部腐蚀缺陷的深度和面积都会变化, 回波走时变化受缺陷处管道壁厚损失和轴向长度变化的影响。如果使用回波走时变化评价缺陷的管道壁厚损失, 首先需要结合其他方法确定缺陷的轴向长度, 然后在已知轴向长度的条件下利用回波走时变化量化管道壁厚损失。另外, 当管壁上存在局部缺陷时, 将引起导波在缺陷处发生反射、透射和模态转换等复杂现象, 使提取和分析所需信号的难度加大, 为了准确量化局部腐蚀的尺寸还需在导波传播理论、监测方法和信号分析等方面进行深入研究。在管道壁厚的监测中, 首先应根据信号判断是否出现缺陷回波以及模态转换和混叠, 如未出现, 则可定性判断该段内发生的为整体腐蚀, 可采用本文方法进行管道壁厚损失的定量识别; 否则, 可定性判断出现了局部缺陷, 需要采用适用于局部腐蚀的方法进行识别。

4 结 语

本文基于超声导波技术提出了一种可以灵敏识别和准确量化腐蚀引起的分段式管道壁厚损失的监测方法。通过分析管道壁厚损失对 $L(0,1)$ 导波群速度的影响, 提出了使用反射的 $L(0,1)$ 导波走时变化作为敏感参数识别管道壁厚损失, 并从理论上建立了反射波走时变化与管道壁厚损失的定量关系, 根据实测的反射波走时变化和该定量关系精确量化管道壁厚损失。使用该方法进行了管道腐蚀监测实验研究, 结果表明反射波走时变化对微小壁厚损失敏感, 可以识别 0.17 mm 的微小壁厚损失, 与直达波走时变化相比, 可以显著提高对管道壁厚损失的分辨率。反射波走时变化随着腐蚀程度的增加而增加, 整个腐蚀过程中, 反射波走时变化与对应的理论走时变化较为一致, 由反射波走时变化获取的管道壁厚损失和超声测试值的误差较小, 最大误差为 -9.66%。使用反射波走时变化可以准确量化管道壁厚损失, 克服了直达波走时变化不能有效量化管道壁厚损失的不足。通过布置的接收传感器网络, 可以有效评价管道各路径的壁厚损失。所提方法弥补了传统的超声测试法只能沿管道表面逐点扫描, 壁厚测量精度受管道表面粗糙度和耦合效果等因素影响大,

稳定性和适用性不足,无法远程实时在线定量监测长输管道壁厚损失的缺陷。

参考文献:

- [1] AHMAD Z. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control** [M]. London: Elsevier, 2006.
- [2] WU K Y, MOSLEH A. Effect of temporal variability of operating parameters in corrosion modelling for natural gas pipelines subject to uniform corrosion [J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2019, **69**: 102930.
- [3] 方 伟, 罗华权, 何 跃. 管道钢管壁厚超声波检测技术 [J]. 焊管, 2015, **38**(2): 56-59.
FANG Wei, LUO Huaquan, HE Yue. Ultrasonic testing technology for wall thickness of steel pipe used for pipeline [J]. **Welded Pipe and Tube**, 2015, **38**(2): 56-59. (in Chinese)
- [4] 杨理践, 耿 浩, 高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术 [J]. 仪器仪表学报, 2016, **37**(8): 1736-1746.
YANG Lijian, GENG Hao, GAO Songwei. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2016, **37**(8): 1736-1746. (in Chinese)
- [5] 赵 番, 汤晓英, 王继锋, 等. 金属管道内外壁缺陷的脉冲涡流检测系统 [J]. 无损检测, 2020, **42**(6): 58-62.
ZHAO Fan, TANG Xiaoying, WANG Jifeng, *et al.* A pulsed eddy current detection system for distinguishing defects in inner and outer walls of metal pipes [J]. **Nondestructive Testing**, 2020, **42**(6): 58-62. (in Chinese)
- [6] 巩德兴, 姚 力, 陈晓辉, 等. X射线数字成像在压力管道检测中的应用 [J]. 无损检测, 2017, **39**(11): 27-30.
GONG Dexing, YAO Li, CHEN Xiaohui, *et al.* Application of X-ray digital radiography in testing of pressure pipelines [J]. **Nondestructive Testing**, 2017, **39**(11): 27-30. (in Chinese)
- [7] 逯彦秋, 安关峰, 程 进. 基于主动导波的钢筋锈蚀识别技术 [J]. 北京工业大学学报, 2014, **40**(6): 865-871.
LU Yanqiu, AN Guanfeng, CHENG Jin. Technology of steel corrosion detection based on the guided wave testing [J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2014, **40**(6): 865-871. (in Chinese)
- [8] RAO Jing, RATASSEPP M, LISEVYCH D, *et al.* On-line corrosion monitoring of plate structures based on guided wave tomography using piezoelectric sensors [J]. **Sensors**, 2017, **17**(12): 2882.
- [9] 周 琛, 何 建, 胡暮平, 等. 基于 $L(0,2)$ 超声导波的管段结构损伤定位研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, **41**(12): 181-191.
ZHOU Chen, HE Jian, HU Muping, *et al.* Research on damage location of pipe section based on $L(0,2)$ ultrasonic guided wave [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2020, **41**(12): 181-191. (in Chinese)
- [10] 郭方宇, 袁慎芳, 鲍 峤. 基于导波的飞机结构腐蚀损伤监测研究 [J]. 航空制造技术, 2018, **61**(7): 70-76.
GUO Fangyu, YUAN Shenfang, BAO Qiao. Research on corrosion damage monitoring of aircraft structure based on guided wave [J]. **Aeronautical Manufacturing Technology**, 2018, **61**(7): 70-76. (in Chinese)
- [11] LI Ziming, HE Cunfu, LIU Zenghua, *et al.* Quantitative detection of lamination defect in thin-walled metallic pipe by using circumferential Lamb waves based on wavenumber analysis method [J]. **NDT and E International**, 2019, **102**: 56-67.
- [12] 陈洪磊, 刘增华, 吴 斌, 等. 基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术研究 [J]. 机械工程学报, 2021, **57**(20): 20-28.
CHEN Honglei, LIU Zenghua, WU Bin, *et al.* Parametric Lamb waves detection technology based on compact array [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2021, **57**(20): 20-28. (in Chinese)
- [13] 王晓娟, 赵 锴, 郑 毅. 管道纵向超声导波的对称模态转换特性分析 [J]. 仪器仪表学报, 2020, **41**(9): 151-160.
WANG Xiaojuan, ZHAO Kai, ZHENG Yi. Characteristics of symmetric mode conversion of longitudinal guided-wave modes in pipeline [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2020, **41**(9): 151-160. (in Chinese)
- [14] ALLEYNE D N, LOWE M J S, CAWLEY P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes [J]. **Journal of Applied Mechanics: Transactions of the ASME**, 1998, **65**(3): 635-641.
- [15] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, *et al.* The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes [J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2003, **114**(2): 611-625.

- [16] 周进节, 郑 阳, 杨 齐, 等. 管道超声导波分段时间反转检测方法研究 [J]. 机械工程学报, 2017, **53**(12): 78-86.
- ZHOU Jinjie, ZHENG Yang, YANG Qi, *et al.* Pipeline section time reversal inspection method with ultrasonic guided waves [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2017, **53**(12): 78-86. (in Chinese)
- [17] GUAN Ruiqi, LU Ye, WANG Kai, *et al.* Fatigue crack detection in pipes with multiple mode nonlinear guided waves [J]. **Structural Health Monitoring**, 2019, **18**(1): 180-192.
- [18] AMJAD U, YADAV S K, KUNDU T. Detection and quantification of pipe damage from change in time of flight and phase [J]. **Ultrasonics**, 2015, **62**: 223-236.
- [19] GAZIS D C. Three-dimension investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1959, **31**(5): 568-573.
- [20] ROSE J L. **Ultrasonic Waves in Solid Media** [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [21] PAVLAKOVIC B, LOWE M, ALLEYNE D, *et al.* Disperse: A general purpose program for creating dispersion curves [M]// THOMPSON D O, CHIMENTI D E. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**. New York: Plenum Press, 1997: 185-192.
- [22] RIOUL O, VETTERLI M. Wavelets and signal processing [J]. **IEEE Signal Processing Magazine**, 1991, **8**(4): 14-38.
- [23] GHAVAMIAN A, MUSTAPHA F, BAHARUDIN B T H T, *et al.* Detection, localisation and assessment of defects in pipes using guided wave techniques: A review [J]. **Sensors**, 2018, **18**(12): 4470.

Research on quantitative monitoring method of corrosion of jointed pipe based on reflected $L(0,1)$ guided wave

LIU Yang, FENG Xin*

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Corrosion leads to the thinning of the wall thickness of the pipe, which reduces the strength and integrity of the pipe and threatens the operation safety of the pipe. A quantitative monitoring method for corrosion of jointed pipe based on the reflected $L(0,1)$ guided wave is proposed. Through analyzing the variation rule of the $L(0,1)$ guided wave in the pipe with different wall thicknesses, the time-of-flight (TOF) variation of the reflected $L(0,1)$ guided wave is proposed as wall thickness loss (WTL)-sensitive feature. The theoretical relation between the TOF variation of the reflected wave and WTL is established, and the WTL of the pipe is quantified according to the measured TOF variation of the reflected wave and the theoretical relation. An experimental study is carried out, the $L(0,1)$ guided wave is excited in the pipe, the measured TOF variation of the reflected wave is used to evaluate the WTL of the pipe, and the corresponding WTL is obtained combined with the theoretical relation. The results show that through the TOF variation of the reflected wave, the WTL of the pipe can be sensitively identified and accurately quantified, and the WTL evaluated by the TOF variation of the reflected wave is consistent with the value of ultrasonic testing. Compared with the existing guided wave methods, the proposed method improves the resolution and quantification precision of the WTL of the pipe. Moreover, this method overcomes the weaknesses of ultrasonic testing that can only point by point scan, the detection precision is affected by various factors, and can not quantitatively monitor the WTL of the pipe in the remote, real-time and online manner.

Key words: jointed pipe; corrosion; wall thickness loss; reflected $L(0,1)$ guided wave; time-of-flight variation; quantitative monitoring