

文章编号: 1001-4888(2016)05-0635-10

厚壁管道周向超声导波缺陷检测研究^{*}

戴翔^{1,2}, 罗更生^{1,3}, 张勇芳¹, 李丁¹, 卢超²

(1. 湖南省特种设备检验检测研究院, 长沙 410117; 2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

3. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

摘要: 厚壁管道在特种承压设备领域中广泛使用, 常规无损检测技术难以实现其快速有效地检测。本文采用数值模拟与实验相结合来研究周向导波快速检测厚壁管道的方法。首先, 利用有限差分软件研究了不同角度激励下外径 269mm、壁厚 32mm 的厚壁管道中周向导波的传播特性, 优化了探头激励角度范围; 然后分别制作了 55° 和 45° 的斜楔, 并搭建了实验系统, 研究了周向导波与厚壁管道壁厚方向不同位置缺陷的相互作用规律。研究结果表明, 周向导波适用于厚壁管道快速检测。检测时需选择角度适中的探头。激发角度过小时, 厚壁管中形成的周向导波模式较多, 使得波包宽度较大, 影响检测分辨率; 而角度过大时, 会使得盲区增大, 导致靠近内壁区域缺陷漏检。本文的研究结论为厚壁管道缺陷周向导波的实际检测应用提供了指导。

关键词: 厚壁管道; 周向导波; 传播特性; 缺陷检测

中图分类号: TG115.28; TB553

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-183

0 引言

厚壁管道在石油化工、核电、军工等能源行业领域的承压特种设备中被广泛使用, 比如特种设备中的压力管道、石油地质钻探管、电站锅炉中的“四大管道”系统(主蒸汽管道、热再热蒸汽管道、冷再热蒸汽管道以及高压给水管)等, 这类厚壁管道常在高温、高压甚至高腐蚀、高放射性等十分恶劣的环境中服役。在经过长期使用后, 由于材料蠕变、应力松弛, 管道会出现疲劳裂纹以及腐蚀性缺陷, 容易导致泄漏甚至爆炸事故发生, 从而造成极大的经济损失、环境污染, 甚至是人员伤亡。

目前, 国内外对厚壁管道结构的检测评价主要采用射线、磁粉、超声波等无损检测方法, 这些常规的无损检测技术由于各自检测的局限性, 难以实现厚壁管道快速有效的检测。近些年来, 超声导波检测技术得到快速发展, 与常规超声检测不同, 该检测技术具有一处激发长距离检测的优势, 能够大幅度提高检测效率。目前, 超声导波检测技术已广泛应用于薄壁管道、板材、钢轨、杆材等波导结构构件的无损检测^[1-4]。超声导波随着波导介质不同而呈现不同的传播模态。管道中的超声导波根据传播方向的不同分为轴向导波和周向导波。考虑到被检管道的壁厚越大, 轴向导波在管道中衰减越严重, 而在厚壁管道中, 周向导波可实现周向的长距离传播, 可通过模式和频率的优化选取, 提高缺陷的识别能力。

Gridin^[5]等基于渐进法推导了周向 SH 型和周向 Lamb 型的频散关系, 揭示了周向导波的本质属性, 并为径向裂纹缺陷的检测提供了指导。何存富^[6, 7]等研究了周向导波在薄壁管道中的传播特性, 并通过实验验证了周向导波的频散现象以及模态与斜探头楔块之间的关系。Satyarnarayan^[8]等利用高

^{*} 收稿日期: 2015-10-09; 修回日期: 2016-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51265044, 11374134), 湖南省质监局科研计划项目(2016KYJH19), 无损检测教育部重点实验室项目(ZD201429002), 湖南省科技计划项目(2013TT2028)

通讯作者: 戴翔(1989—), 男, 硕士。主要研究方向: 从事承压特种设备检验检测研究以及超声无损检测新技术研究。Email: daixiangniat@163.com

阶周向导波对管道与支架间的缺陷进行数值模拟和实验研究。Nishino^[9]等用 EMAT 传感器和横波直探头激发高频周向 SH 波和周向 Lamb 波对管道缺陷进行检测,并结合小波时频分析方法对所采集导波信号进行模态识别,取得了很好的实验结果。目前,管道周向导波的研究主要集中在薄壁管道,对于厚壁管道缺陷周向导波检测的应用研究比较少,吴斌^[10]等通过实验研究发现,采用 60°楔块使探头斜激发时其检测信噪比最佳,对表面轴向裂纹以及不同形状的缺陷进行了检测,验证了该检测技术的有效性。刘增华^[11]等采用连续小波变换得到了探头晶片激励中心频率处的波包包络,并利用信号幅值进行扫描成像研究。葛建明^[12]等研究了不同尺寸以及不同频率压电晶片的探头对厚壁管道外表面轴向裂纹缺陷检测的影响,发现检测时选用大尺寸和较低频率的压电晶片得到的检测灵敏度最高。以上科研工作者关于厚壁管道周向导波检测技术的研究都仅采用 60°斜探头进行缺陷检测,但本文研究成果表明采用大角度斜探头检测厚壁管道缺陷时,虽然检测分辨率很高,但存在内表面检测盲区,实际检测时需选择角度适中的导波斜探头。本文基于此问题,利用有限差分 Wave3000 仿真软件研究了压电晶片以不同角度激发时厚壁管道中周向导波的传播特性,分析了不同角度激励下周向导波在厚壁管道中声场分布特点,优化了探头激励角度范围;在此基础上制作了两种不同角度有机玻璃楔块,对沿壁厚方向上不同位置的五个缺陷进行了检测研究,结果可为厚壁管道缺陷周向导波检测技术的实际应用提供指导。

1 厚壁管道周向导波理论背景

本文研究的是周向导波对厚壁管道缺陷检测的应用问题,信号激励源采用斜探头,探头的偏振方向垂直于管道轴向,即在厚壁管道中传播的是类 Lamb 型周向导波。欲采用类 Lamb 型周向导波对厚壁管中缺陷进行检测,需要对厚壁管道周向导波的理论进行分析,早在 1998 年, Liu^[13]等推导了周向导波的特征方程和波结构。本文将利用 disperse 软件求解类 Lamb 型周向导波的频散曲线。针对外径 269mm,壁厚 32mm 的厚壁管道,取纵波波速 5900m/s,横波波速 3200m/s,密度 7850kg/m³,计算得到该尺寸厚壁管道类 Lamb 型周向导波的频散曲线,如图 1 所示。

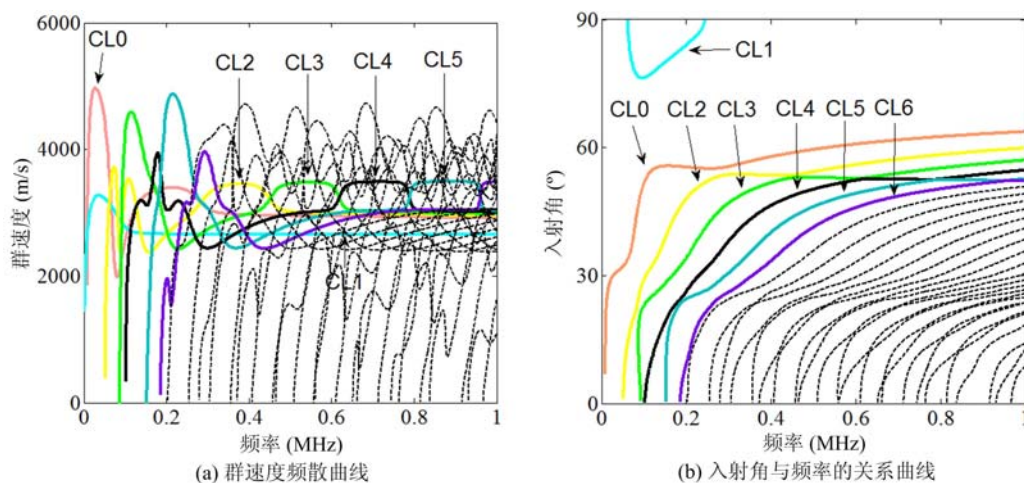


图 1 频散曲线

Fig. 1 Dispersion curve

从群速度频散曲线可以看出,在 0~1MHz 频率范围内共存在 28 种模式,显然在实际检测中难以激发出单一模式的周向导波来检测厚壁管道缺陷,对于厚壁管道而言,周向导波检测技术实质上是多模态检测。由图 1(a)可知,随着频率增大,各低阶模式的群速度逐渐收敛于表面波速,其频散曲线趋于平坦,而高阶模式导波变化剧烈,并处于截止频率处,随着频率进一步增大,群速度趋近于表面波速的模式越来越多,为实现厚壁管道缺陷长距离检测以及减小频散程度,检测所选取的频率不宜过高,本文选择 0.5MHz 信号对厚壁管道进行实验研究;同时由图 1(b)可知,检测时所选取的楔块角度也不宜过小,因为角度过小时激发出来的模式也较多,影响检测分辨率。

2 厚壁管道中周向导波传播特性分析

有限差分数值方法是模拟波传播特性的强大工具,与有限元、边界元方法相比,有限差分法有一些突出的优势,如计算效率高、实用性强。在地震学、地球物理学、声学等学科领域,众多学者利用有限差分法得到了许多类型微分方程和偏微分方程的解。Chen^[14]等采用三维有限差分代码模拟了声波测井工具,在交错网格上基于一阶速度应力有限差分技术模拟了弹性波的传播和散射问题,为减小模型大小,对模型施加了吸收边界。Gsell^[15]等采用有限差分法模拟了三维圆柱结构构件中弹性波的传播问题,在波动方程求解过程中,直接将位移运动方程离散化,消除了方程中6个应力分量,减小了变量个数,从而缩短了计算时间。

本节采用 Wave3000 软件对厚壁管道周向导波的传播进行三维数值模拟,分析周向导波在厚壁管道中的传播特性。Wave3000 是一款专门计算超声波声场的软件包,该软件基于有限差分法,用于求解三维弹性波动方程。随着计算机硬件性能的提高,该软件包可应用于各个领域,如无损检测、材料评价、医疗成像等。其算法所用到的声学方程由下式给出:

$$\rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = \left[\mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 \omega + \left[\lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla (\nabla \cdot \omega) \quad (1)$$

式中, ρ 是介质密度; λ 和 μ 是Lame常数; η 是剪切粘度; ϕ 是体积粘度; ∇ 是梯度算子; $\nabla \cdot$ 是散度算子; t 是时间; ω 是三维列向量,其分量分别是质点在 x 、 y 和 z 三个方向上的位移,即 $\omega = [\omega_x(x, y, z, t), \omega_y(x, y, z, t), \omega_z(x, y, z, t)]^T$ 。

2.1 三维模型建立

三维数值模拟实验的模型如图2所示,该模型主要由有机玻璃和钢材料厚壁管道构成,厚壁管道的外径为269mm,壁厚为32mm,考虑到计算效率,管道长设计为20mm。有机玻璃的密度 $\rho = 1.150 \text{ g/cm}^3$,纵波速度 $V_L = 2700 \text{ m/s}$,横波速度 $V_T = 1100 \text{ m/s}$;厚壁管道的密度 $\rho = 7850 \text{ g/cm}^3$,纵波速度 $V_L = 5900 \text{ m/s}$,横波速度 $V_T = 3200 \text{ m/s}$ 。压电晶片采用直径为20mm的圆形晶片,将压电晶片置于有机玻璃中,为防止端面反射回波对声场分布的影响,设置了无限边界。信号发射源激励信号采用10周期高斯窗调制的正弦脉冲信号,激励信号频率为0.5MHz,且激励信号的脉冲宽度为 $10 \mu\text{s}$ 。本模拟分别采用 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 55° 和 60° 六种不同角度压电晶片激励信号,分析厚壁管道中周向导波的传播特性。

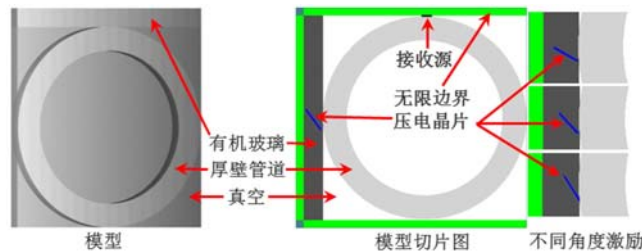


图2 三维模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-dimensional model

2.2 模拟结果分析

经过 Wave3000 软件计算分析,得到不同角度压电晶片激励下不同时间段厚壁管道中周向导波传播的波场快照图。虽然所建模型为三维,但只能显示某一切面的波场快照,在此说明,本节中所选取的波场快照图均为激励源正中心所在切面。

由图3~图8可知,当超声波经过有机玻璃与钢管界面时,一部分声波从界面反射回来,被有机玻璃左边的无限边界所吸收,另一部分声波透射进入钢管,在厚壁管道的内外壁往复地反射以及波形转换,形成周向导波在厚壁管道中传播。这三种不同角度的压电晶片激励信号后,在厚壁管道中传播的周向导波有较大差异,该差异将直接影响周向导波在厚壁管道缺陷检测中的应用。当压电晶片分别以 30° 、 35° 、 40° 激励信号时,厚壁管道中周向导波的波包较宽,频散严重,不利于实际检测;当压电晶片以 45° 激励信号时,厚壁管道中周向导波的波包比较集中,在传播过程中声场覆盖整个厚壁,有望实现厚壁

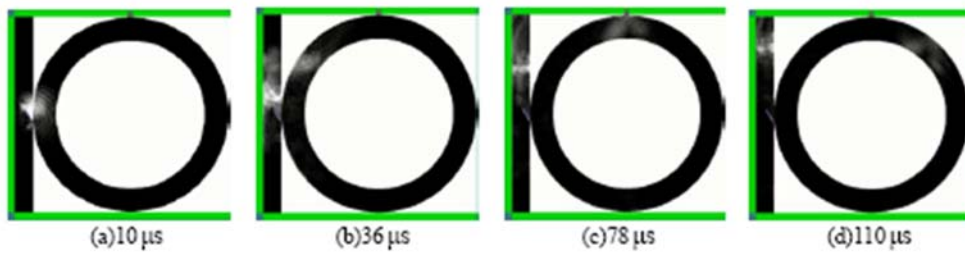


图 3 30°激励下不同时间的波场快照图

Fig. 3 Wave field snapshots of different times with 30° angle excitation

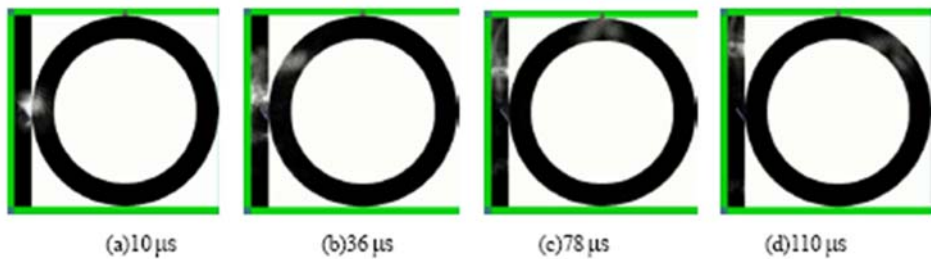


图 4 35°激励下不同时间的波场快照图

Fig. 4 Wave field snapshots of different times with 35° angle excitation

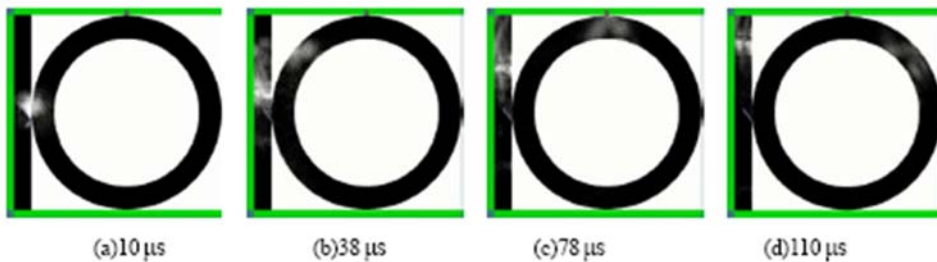


图 5 40°激励下不同时间的波场快照图

Fig. 5 Wave field snapshots of different times with 40° angle excitation

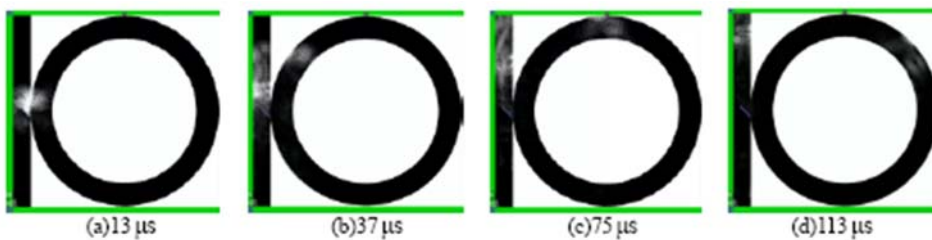


图 6 45°激励下不同时间的波场快照图

Fig. 6 Wave field snapshots of different times with 45° angle excitation

管道缺陷检测;当压电晶片分别以 55°、60°激励信号时,周向导波刚开始传播,波包比较集中,声场覆盖整个壁厚,但传播至一定距离时,声场主要覆盖管道外表面至中部附近,且激励角度越大,靠近外表面的声场能量越强。

为进一步研究不同角度压电晶片激励对检测产生的影响,提取了这六个模型中接收源所接收到的信号,分析在不同角度激励下产生信号的特点,以便选择合适角度的超声换能器。

图 9 是压电晶片在不同角度激励下信号接收源所接收的信号。从所形成的波包宽度看,当压电晶片分别以 30°、35°、40°激励信号时,波包很宽,在主要传播模式附近存在其他模式导波,无法形成单一模式的导波信号,不适合采用小角度探头检测厚壁管道;当压电晶片分别以 45°、55°、60°激励信号时,厚壁管道中所形成的周向导波波包单一,信号圆滑,主要传播的几种模式几乎形成以一个包络传播,其他模

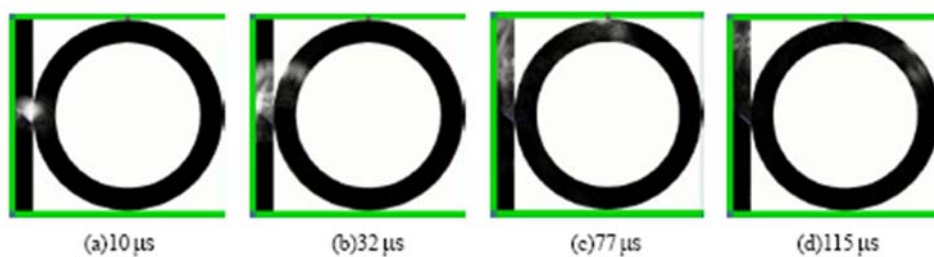


图7 55°激励下不同时间的波场快照图

Fig. 7 Wave field snapshots of different times with 55° angle excitation

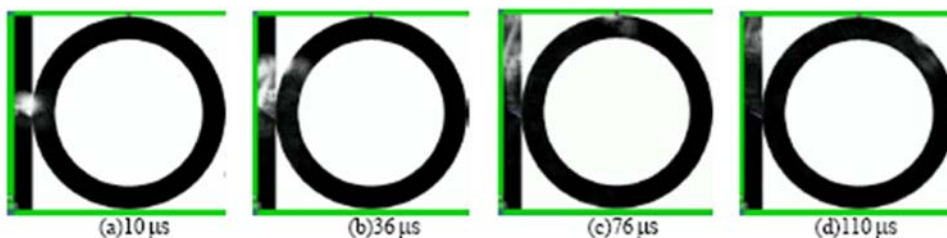


图8 60°激励下不同时间的波场快照图

Fig. 8 Wave field snapshots of different times with 60° angle excitation

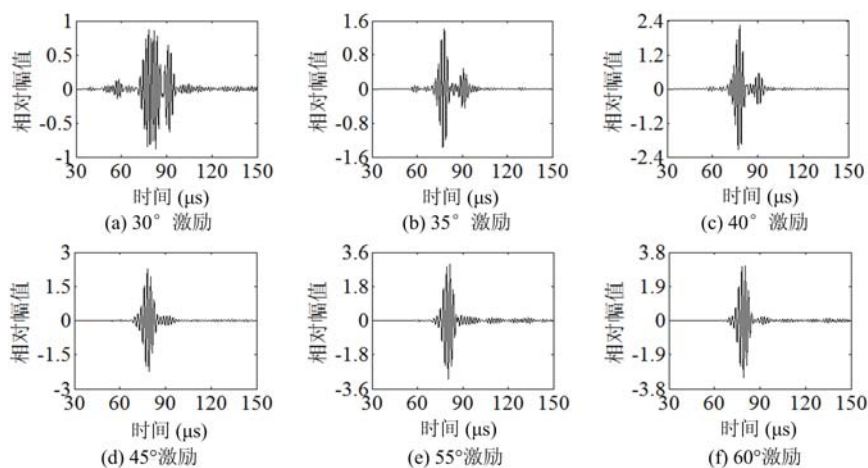


图9 不同角度激励下信号接收源所接收的信号

Fig. 9 Signals that were received with different angle excitation

式导波对检测的影响小,有望采用这三种角度的探头进行检测。从所形成的波包幅度看,不同角度压电晶片检测,接收源接收的信号幅值也不同。压电晶片角度越大,波包幅度越大,信号分辨率越高。

综合分析不同角度激励下的波场快照以及接收源接收到的信号,可以得知:不适合采用小角度探头检测厚壁管道缺陷,此时厚壁管中周向导波的波包较宽且传播模式较多;同时,激发角度也不宜过大,入射角度过大时,厚壁管中会形成类表面波,会使得内表面附近缺陷检测灵敏度较低;从周向导波在厚壁管中的声场分布以及其检测分辨率看,宜选用角度适中的探头检测厚壁管道缺陷。

3 厚壁管道缺陷检测实验研究

基于数值模拟的结果,制作了 55°、45°两种角度的有机玻璃楔块,本节将研究压电晶片在 55°、45°下周向导波对厚壁管道壁厚方向上不同位置缺陷的检测能力。

3.1 实验系统及缺陷试块设计

如图 10 所示,实验系统由计算机、数据采集器、高功率超声信号发射接收器、导波直探头、有机玻璃楔块、厚壁管道组成。

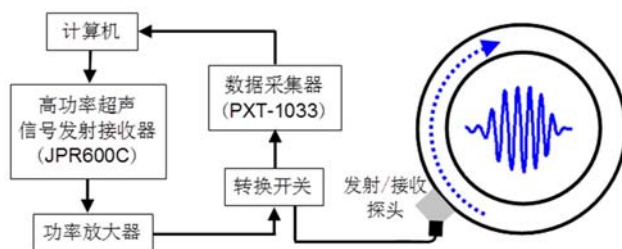


图 10 实验系统

Fig. 10 Experimental system

针对外径 269mm、壁厚 32mm 的厚壁管道,设计了五个沿壁厚方向上不同位置的典型缺陷,分别是外壁轴向裂纹缺陷,中上部轴向圆孔缺陷,中部轴向圆孔缺陷,中下部轴向圆孔缺陷,内壁轴向裂纹缺陷,其中中上部轴向圆孔缺陷与中下部轴向圆孔缺陷在同一圆周截面上,两缺陷在圆周方向相距 120°。这五个缺陷的尺寸如表 1 所示,缺陷在管道上的具体位置如图 11 所示。

表 1 缺陷尺寸及位置

Tab. 1 The dimension and location of the defects

缺陷沿壁厚方向上的位置	轴向长(mm)	周向宽(mm)	径向深(mm)	直径(mm)
外壁缺陷	20	3	3	/
中上部圆孔缺陷	25	/	/	3
中部圆孔缺陷	25	/	/	3
中下部圆孔缺陷	25	/	/	3
内壁缺陷	20	3	3	/

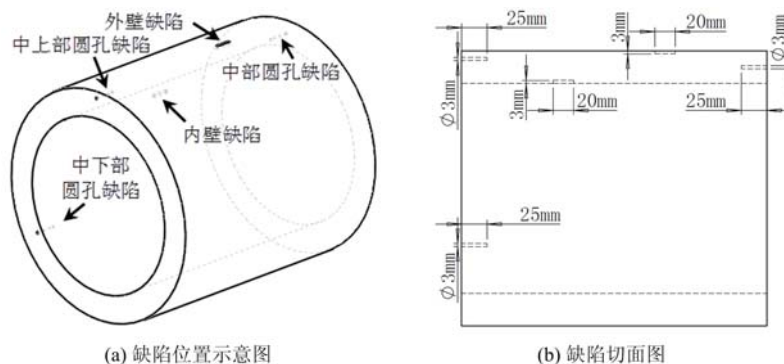


图 11 缺陷试块设计

Fig. 11 The design of defect specimen

3.2 壁厚方向不同位置缺陷检测

实验采用自发自收的方式,压电晶片的中心频率选取 500kHz,激励信号采用 Chirp 线性调频函数调制的正弦波信号,周期数设为 10,如图 12 所示,显然当采用 Chirp 线性调频激励信号时,其频带宽度很窄,中心频率在 500kHz 处且两侧基本对称,带宽仅有 160kHz。将不同入射角度的压电换能器置于厚壁管道外壁,两者通过机油耦合,整个实验过程中保持耦合良好,信号垂直于管道轴向方向激励。

首先分析入射角度为 55°时,周向导波对壁厚方向不同位置缺陷的检测结果。

通过实验发现,入射角度为 55°时,仅能探测到外壁缺陷、中上部缺陷和中部缺陷,而靠近内壁附近的损伤难以检测,其原因是该角度激励下,厚壁管中的声场主要集中在外表面附近,靠近内表面区域声能很弱。图 13 给出了入射角度为 55°时,周向导波检测厚壁方向不同位置缺陷得到的信号。由图 13 (a)可知,当管中没有缺陷时,压电换能器仅能接收到微弱的周向回波,该回波是周向导波传播一周后被压电换能器所接收的信号,由于楔块角度较大,所以该周向回波幅值很小;由图 13(b)可知,当缺陷位于

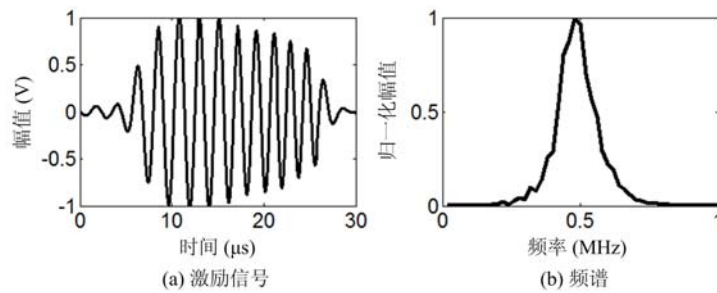
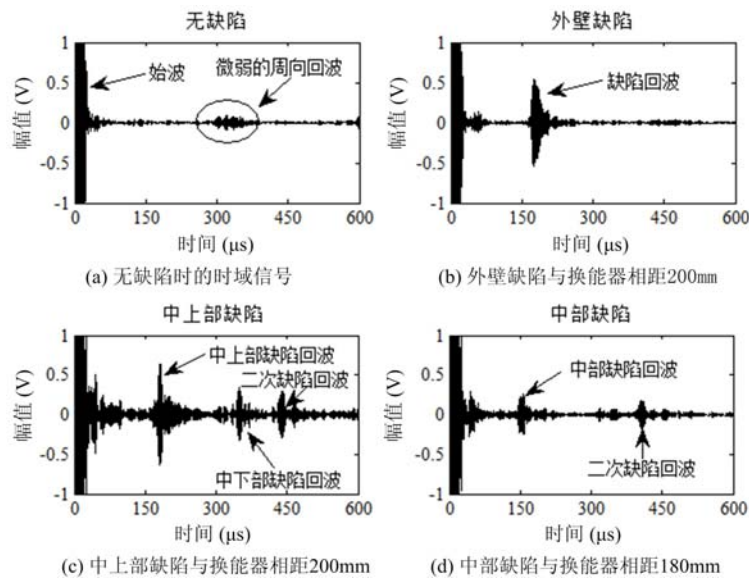


图12 激励信号及其频谱

Fig. 12 Excitation signal and frequency spectrum

图13 入射角度为 55° 时,周向导波检测不同位置缺陷时得到的信号Fig. 13 Obtained signals when circumferential guided wave detect defects on different position with 55° incidence angle

管的外壁时,压电换能器只接收到一次缺陷回波,周向回波消失;由图13(c)可知,当缺陷位于管壁厚的中上部时,压电换能器能够接收到三个缺陷信号,分别是中上部缺陷回波、中下部缺陷回波以及二次缺陷回波,出现中下部缺陷回波的原因是周向导波传播至中上部轴向圆孔缺陷发生散射作用,一部分能量沿着传播路径往回传播被压电换能器接收(即中上部缺陷回波),其余能量发生透射继续向前传播,此时声波不再沿着外壁传播,声场覆盖整个壁厚截面,因此其后的中下部缺陷也能被检测出来;二次缺陷回波是由于周向导波沿着厚壁管道传播一周后又经过中上部缺陷所产生(注:本文中出现的二次缺陷回波均是距离压电换能器较近的缺陷所致,之后不再说明);由图13(d)可知,当缺陷位于管壁厚中部时,可以探测到中部缺陷回波和二次缺陷回波,相对于外壁附近缺陷而言,壁厚中部位置缺陷的检测灵敏度要低得多。而对于中下部缺陷和内壁缺陷,由于超声波难以传播到靠近内壁的区域,使得这两处缺陷难以检出,压电换能器只能接收到微弱的周向回波信号,其接收波形与图13(a)一致。

下面开始分析入射角度为 45° 时,周向导波对壁厚方向不同位置缺陷的检测结果。

实验发现,入射角度为 45° 时,整个壁厚方向上的缺陷都能够被检测,与 55° 斜入射不同的是,该角度检测壁厚方向不同位置缺陷时都会接收到周向回波,而且缺陷信号的波包宽度明显要比 55° 斜入射的宽,这是因为随着入射角降低,厚壁管道中存在的模式更多,且各模式群速度接近,造成信号的波包宽度较宽。图14给出了入射角度为 45° 时,周向导波检测壁厚方向不同位置缺陷得到的信号。由图14(a)可知,当管中没有缺陷时,压电换能器仅能接收到微弱的周向回波,没有其他回波;由图14(b)可知,当缺陷位于管的外壁时,压电换能器可接收到外壁缺陷回波和二次缺陷回波,这两个信号之间还有周向回波;由图14(c)可知,当缺陷位于管壁厚的中上部时,压电换能器能够接收到三个缺陷信号,分别是中

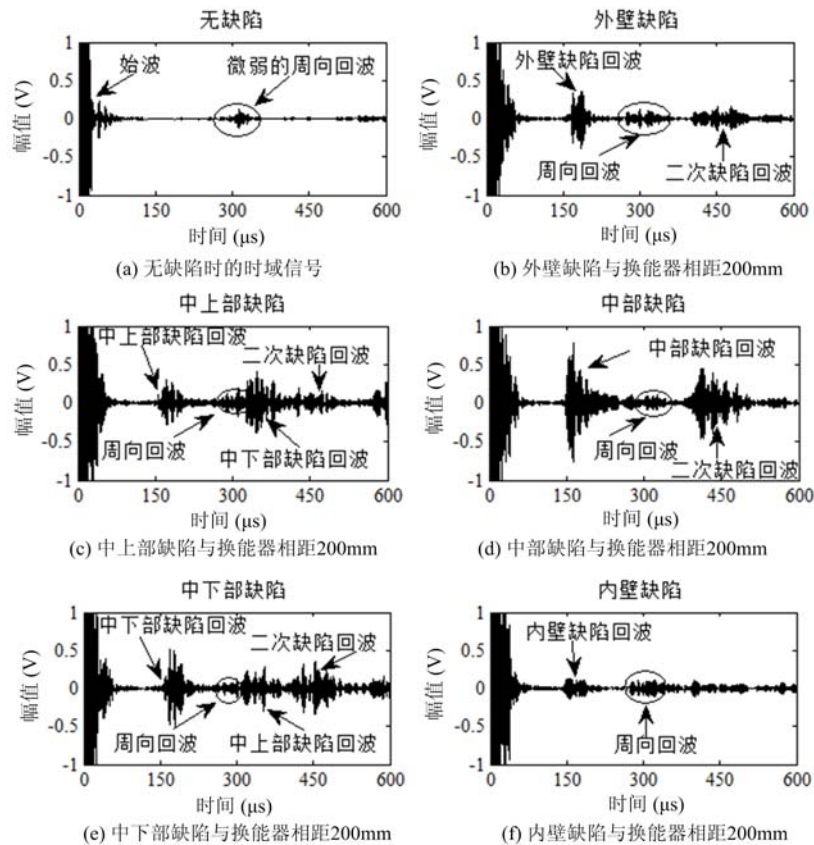


图 14 入射角度为 45° 时,周向导波检测不同位置缺陷时得到的信号

Fig. 14 Obtained signals when circumferential guided wave detect defects on different position with 45° incidence angle

上部缺陷回波、中下部缺陷回波以及二次缺陷回波,说明 45° 斜入射能够进行多缺陷检测,其中中下部缺陷回波幅值要比中上部缺陷回波高,其原因是声波经过中上部缺陷后,使得透射信号的能量沿壁厚方向上的分布更加复杂;由图 14(d)可知,当缺陷位于管壁厚中部时,可以接收到中部缺陷回波和二次缺陷回波;由图 14(e)可知,当检测中下部位置缺陷时,可以接收到中下部缺陷回波和二次缺陷回波,该缺陷后面的中上部缺陷也能被检出;由图 14(f)可知,内壁缺陷也能检测,该位置缺陷检测灵敏度要低于壁厚方向其他位置缺陷。

4 结论

本文提供了一种厚壁管道缺陷周向超声导波检测方法,能够快速有效地检测厚壁管道缺陷。本文通过理论分析、有限差分数值模拟以及实验开展了厚壁管道周向导波检测技术研究,分析了周向导波在厚壁管中的传播特性以及与缺陷的相互作用规律。

(1) 针对壁厚 32mm、外径 269mm 的厚壁管道,通过 Wave3000 三维有限差分数值模拟软件,得到了压电晶片以不同角度激励下的波场快照以及信号波形,结果表明周向导波在厚壁管道的声场分布有较大差异,该差异将影响缺陷检测。当激发角度较小时,周向导波波包较宽且传播模式较多,对检测分辨率有一定的影响;当激发角度过大时,厚壁管内壁附近声能较弱,会使得靠近管道内表面区域的缺陷难以检出;而当激发角度为 45° 时,周向导波波包集中,且传播过程中声场覆盖整个壁厚截面。

(2) 基于数值模拟结果,制作了 55° 和 45° 斜楔,加工了厚壁管缺陷试块,对壁厚方向不同位置的缺陷进行检测,入射角度为 55° 时,周向导波沿着外壁传播,内壁附近声场较弱,靠近内壁区域的缺陷难以检出;入射角度为 45° 时,整个壁厚范围上的缺陷都能够被检测;该实验结果与数值模拟基本一致,研究结果表明不同激励角度对壁厚方向不同位置缺陷的检测灵敏度有很大不同,采用周向导波检测厚壁管

道缺陷时需选择角度适中的压电换能器,确保整个壁厚截面上的缺陷都能被检出。

参考文献:

- [1] 何存富,孙雅欣,吴斌等.超声导波技术在埋地锚杆检测中的应用研究[J].岩土工程学报,2006,28(9):1144—1147(HE Cunfu, SUN Yaxin, WU Bin, et al. Application of ultrasonic guided waves technology to inspection of bolt embedded in soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9):1144—1147(in Chinese))
- [2] 卢超,李诚,常俊杰.钢轨轨底垂直振动模式导波检测技术的实验研究[J].实验力学,2012,27(5):593—600(LU Chao, LI Chen, CHANG Junjie. Experimental investigation on guided wave detection technology for rail bottom vertical vibration mode[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5):593—600(in Chinese))
- [3] 卢超,刘芮辰,常俊杰.钢轨垂直振动模式的导波频散曲线、波结构及应用[J].振动工程学报,2014,27(4):598—604(LU Chao, LIU Ruichen, CHANG Junjie. Guided waves dispersion curves and wave structures of the rail's vertically vibrating modes and their application[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(4):598—604(in Chinese))
- [4] 罗宏建,周重回,王炯耿等.铝制焊接容器超声导波成像检测[J].应用声学,2014,34(6):520—527(LUO Hongjian, ZHOU Chonghui, WANG Jionggen, et al. Ultrasonic guided waves imaging testing on aluminum welded shell[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 34(6):520—527(in Chinese))
- [5] Gridin D, Craster R V, Fong J, et al. The high-frequency asymptotic analysis of guided waves in a circular elastic annulus[J]. Wave Motion, 2003, 38(1):67—90.
- [6] 何存富,李隆涛,吴斌.周向超声导波在薄壁管道中的传播研究[J].实验力学,2002,17(4):419—424(HE Cunfu, LI Longtao, WU Bin. Research on guided circumferential waves in a thin-walled pipe[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(4):419—424(in Chinese))
- [7] 李隆涛,何存富,吴斌.周向超声导波对管道纵向缺陷检测的研究[J].声学学报,2005(4):343—348(LI Longtao, HE Cunfu, WU Bin. Detection of a longitudinal defect in a pipe based on guided circumferential waves techniques[J]. Acta Acustica, 2005(4):343—348(in Chinese))
- [8] Satyarnarayan L, Chandrasekaran J, Maxfield B, et al. Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions[J]. NDT & E International, 2008, 41(1):32—43.
- [9] Nishino H, Yokoyama R, Ogura K, et al. Tone-burst generation of circumferential guided waves by a bulk shear wave sensor and their wide-range time-frequency analyses[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(5S):3885.
- [10] 吴斌,颜小东,刘增华等.厚壁管道周向导波检测技术实验研究[J].实验力学,2011,26(5):625—631(WU Bin, XIE Xiaodong, LIU Zenghua, et al. Experimental investigation on thick wall pipes based on circumferential guided waves inspection technology[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):625—631(in Chinese))
- [11] 刘增华,颜小东,吴斌等.基于连续小波变换的厚壁管道周向导波扫描成像试验研究[J].机械工程学报,2013,49(2):14—19(LIU Zenghua, XIE Xiaodong, WU Bin, et al. Experimental research on circumferential guided wave scanning imaging of thick wall pipes based on continuous wavelet transform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2):14—19(in Chinese))
- [12] 葛建明,刘兴林,戴翔等.基于周向导波的厚壁管道缺陷检测及成像[J].无损检测,2015,37(8):39—42(GE Jianming, LIU Xinglin, DAI Xiang, et al. The detection and imaging for thick walled pipes using circumferential guided wave[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(8):39—42(in Chinese))
- [13] Liu Guoli, Qu J. Guided circumferential waves in a circular annulus[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(2):424—430.
- [14] Chen Y H, Chew W C, Liu Q H. A three-dimensional finite difference code for the modeling of sonic logging tools[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(2):702—712.
- [15] Gsell D, Leutenegger T, Dual J. Modeling three-dimensional elastic wave propagation in circular cylindrical structures using a finite-difference approach[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(6):3284—3293.

On the Defect Detection of Thick-Walled Pipe by using Circumferential Ultrasonic Guided Wave

DAI Xiang^{1,2}, LUO Geng-sheng^{1,3}, ZHANG Yong-fang¹, LI Ding¹, LU Chao²

(1. Hunan Provincial Special Equipment Inspection and Testing Institute, Changsha 410117, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing(Nanchang Hangkong University), Ministry of Education, Nanchang 330063, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Thick-walled pipes are widely used in the field of special pressure equipment industry. Conventional nondestructive testing technique is difficult to achieve fast and effective detection. In this paper, both numerical simulation and experiment are adopted to study the rapid detection of thick-walled pipe by using circumferential guided wave. Firstly, finite difference software was used to study propagation characteristics of circumferential guided wave excited at different angles in a thick-walled pipe with 269mm outside diameter and 32mm wall thickness, and the excitation angle range was optimized. Then, two kinds of wedge with apex angle of 55° and 45° were fabricated respectively, and the experimental system was established. The interaction between circumferential guided wave and defects located at different positions along wall thickness direction in a thick-walled pipe was experimentally studied. Experimental results show that circumferential guided wave is suitable for rapid detection in thick-walled pipes. In defect detection, it is necessary to select probe with appropriate angle. If the excitation angle is too small, the circumferential guided wave modes formed in thick walled pipe will be increasing, which leads to the large width of wave packet and lower detection resolution. On the other hand, too large excitation angle will lead to increase of blind area and the defects close to the inner wall may be undetected. Above results may provide reference for practical defect detection application of thick-walled pipe by using circumferential guided wave.

Keywords: thick-walled pipe; circumferential guided wave; propagation characteristics; defect detection