

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514062

非对称导波检测埋地聚乙烯管热熔焊接接头缺陷 *

方 舟, 陈千禧, 黄宴委

(福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108)

摘要: 对称导波模态在传播至圆管缺陷位置时, 因缺陷导致的能量不均匀反射会产生非对称导波, 其传播特性与缺陷的位置、尺寸存在量化关系, 可以用于检测圆管缺陷。然而, 聚乙烯(PE)管中缺陷产生的非对称导波传播特性目前并不明确。针对埋地聚乙烯管热熔焊接接头开裂的问题, 研究了非对称纵向导波 $L(M,2)$ 在聚乙烯管中的能量分布规律, 并利用该规律检测与评估聚乙烯管中热熔焊接接头的缺陷。为分析聚乙烯管热熔焊接接头缺陷产生的非对称导波, 首先, 通过理论研究了离散分布式压电阵列在金属圆管中激励非对称导波的可行性。并优化压电陶瓷阵列的压电陶瓷数量。其次, 提出了缺陷诱导非对称导波的方法, 并通过仿真验证了可以利用缺陷产生的非对称导波来检测与评估缺陷。再将优化的压电陶瓷阵列用于聚乙烯管中非对称导波的激励, 并量化分析了其在聚乙烯管中的轴向传播特性。再通过实验证明了聚乙烯管中缺陷产生的非对称导波传播特性与理论相符。随后, 带有热熔焊接接头聚乙烯管中的实验证明了完好的焊接接头不会产生非对称导波。最后, 埋地聚乙烯管实验表明通过分析热熔焊接接头缺陷产生的非对称导波, 能够判断埋地聚乙烯管热熔焊接接头是否存在缺陷, 并评估缺陷的周向位置。

关键词: 聚乙烯管; 热熔接头; 无损检测; 非对称导波

中图分类号: TH552 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 4030

Defect detection in heat fusion welds of buried polyethylene pipes based on non-axisymmetric guided wave

Fang Zhou, Chen Qianxi, Huang Yanwei

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: When axisymmetric guided wave modes propagate to the defect location in a circular pipe, the uneven reflection of energy caused by the defect generates non-axisymmetric guided waves. The propagation characteristics of these waves have a quantitative relationship with the position and size of the defect, which can be used to detect pipeline defects. However, the propagation characteristics of non-axisymmetric guided waves generated by defects in polyethylene (PE) pipes are currently unclear. To address the issue of cracking at heat-fused joints in buried PE pipes, this study investigates the energy distribution patterns of non-axisymmetric longitudinal guided wave $L(M,2)$ in PE pipes and utilizes these patterns to detect and evaluate defects at heat-fused joints. First, the feasibility of exciting non-axisymmetric guided waves in metal pipes using a discretely distributed piezoelectric array was first theoretically investigated, and the number of piezoelectric elements in the array was optimized. Next, a method for defect-induced non-axisymmetric guided waves was proposed, and simulations confirmed that the generated non-axisymmetric guided waves could be used to detect and evaluate defects. The optimized piezoelectric array was then applied to excite non-axisymmetric guided waves in PE pipes, and their axial propagation characteristics were quantitatively analyzed. Experiments verified that the propagation characteristics of defect-induced non-axisymmetric guided waves in PE pipes aligned with predictions. Subsequently, experiments on PE pipes with heat-fused joints demonstrated that intact joints do not generate non-axisymmetric guided waves. Finally, experiments on buried PE pipes showed that by analyzing the non-axisymmetric guided waves generated by defects at heat-fused joints, it is possible to determine the presence of defects

and assess their circumferential locations.

Keywords: polyethylene tube; heat fusion weld; nondestructive testing; non-axisymmetric guided wave

0 引言

聚乙烯管由于较好的耐腐蚀性、成本低的优势,广泛应用于石油、天然气的运输^[1]。然而,管道焊缝处由于焊接操作不当、长期风化、第三方施工等因素可能产生裂缝造成油气泄漏^[2],并造成火灾或爆炸等事故,导致严重的人员伤亡与经济损失^[3]。邵泽龙等^[4]通过实验证明了微波能检测聚乙烯管道中的缺陷。但易受温度、气压、取样位置的影响,需要考虑补偿措施。且其零点漂移和标定问题尚未很好的解决。Wang 等^[5]通过 X 射线实现了聚乙烯管缺陷尺寸的测量。但其底片评定周期较长,检验速度较慢。肖权旌等^[6]基于改进 YOLOv5 的全聚焦成像的方法能够识别聚乙烯管热熔接头的缺陷。由于采集数据量庞大,且随着数据集维度增加,导致计算效率变低。且这些方法均无法穿透土壤检测到埋地后的聚乙烯管中焊接接头的缺陷。

超声导波^[7-8]能够在埋置的聚乙烯管中传播,利用导波的传播特性在焊接接头缺陷处的变化可有效评估聚乙烯管的损伤状态。然而,自激励自接收^[9-11]的信号采集方式难以在高衰减的聚乙烯管中产生可辨识的缺陷反射回波。一激一收^[12-13]的信号采集方式虽然能够接收到直达波信号,但通过对能量均匀分布于圆管圆周的对称导波模态的分析,难以评估管中是否存在缺陷及其位置。不同于传统的对称导波模态,非对称导波的能量不均匀地分布于圆管的各周向位置,并且随着轴向传播距离的增加有规律地变化,可用于圆管结构缺陷的检测与周向定位。目前,非对称导波在聚乙烯管中的应用中存在 2 个问题。

首先,聚乙烯管中非对称导波的传播特性尚不明确。Kim 等^[14]提出了一种基于磁致伸缩贴片式传感器阵列的剪切水平(shear horizontal, SH) 波检测方法。通过分析磁致伸缩贴片式传感器阵列产生 SH 波的传播特性,实现了钢制圆管缺陷的轴向、周向位置同步检测。Zhang 等^[15]提出了描述钢制圆管中非对称导波周期性聚焦现象的公式,揭示了角轮廓分布随传播距离与波数比值的周期性变化规律。Chen 等^[16]提出了一种基于周期性能量分布变化的缺陷诱导非对称直达波模型。通过分析非对称导波在钢制圆管中的能量分布规律,实现了高衰减圆管的缺陷检测与定位。然而,聚乙烯管中非对称导波的传播规律尚不明确。因此,需要对聚乙烯管中非对称导波的传播规律进行量化分析,才能利用非对称导波能量分布与其轴向传播位置的量化关系对聚乙烯管焊接接头缺陷进行有效评估。

其次,目前非对称导波传播规律的量化分析^[17]大都建立在大面积覆盖圆管的磁致伸缩贴片式传感器模型之上。然而,不同于金属圆管,聚乙烯管对导波的衰减较大,仅压电传感器能在其中产生出足以辨识的信号。而压电阵列激励的非对称导波,其传播特性不仅在聚乙烯管中不明确,在金属圆管中也鲜有学者研究。因此,本研究先以金属圆管中磁致伸缩贴片式传感器激励的非对称导波为基准,研究金属圆管中最佳压电阵列后,将最佳压电阵列应用到聚乙烯管中。然而压电陶瓷尺寸较小^[18-19],在激励导波时与圆管结构接触范围有限。若要模仿磁致伸缩贴片式传感器^[20]大面积覆盖圆管的形式,比如:覆盖圆管一半圆周,则需要粘贴很多压电陶瓷片,费时费力。因此,常以阵列方式离散布置在圆管表面^[21-23],与非对称导波传播规律理论分析的模型不符。因此,为掌握非对称导波在聚乙烯管中的传播特点,需先探究离散分布式半覆盖压电陶瓷阵列在聚乙烯管中激励非对称导波的规律。

综上,本研究首先以金属圆管中磁致伸缩贴片式传感器激励非对称导波的模型为基准,利用简正模态分解法理论分析了离散分布式半覆盖压电陶瓷阵列产生非对称导波的传播特性。随后,将传感器数量优化的压电陶瓷阵列用于聚乙烯管非对称导波传播规律的研究。随后,验证了缺陷产生非对称导波传播特性与压电陶瓷阵列激励非对称导波传播特性的一致性。再利用聚乙烯管中非对称导波能量分布与其轴向位置的量化关系,确定激励与接收压电陶瓷阵列的位置。最后,理论、仿真、实验的结果均证实了非对称导波可用于埋地聚乙烯管中热熔焊接接头缺陷的检测。

1 离散分布式压电阵列激励非对称导波

本章理论分析了离散分布的压电阵列激励方式下产生的非对称导波的传播特性。并与局部覆盖的磁致伸缩贴片式传感器产生的非对称导波进行对比。

1.1 简正模态分解

本研究所述的非对称导波是由一个对称模态 $L(0,2)$ 与多个相同模数不同周向阶数的弯曲模态 $L(M,2)$ 组成,如图 1 所示。

局部载荷作用下产生的非对称导波由这些相互正交的模态按一定系数叠加而得到。其速度场如式(1)所示。

$$v(r, \theta) e^{i(\omega t - k_N^M)} = \sum_{M,N} A_N^M(z) v_N^M(r, \theta) e^{i\omega t} \quad (1)$$

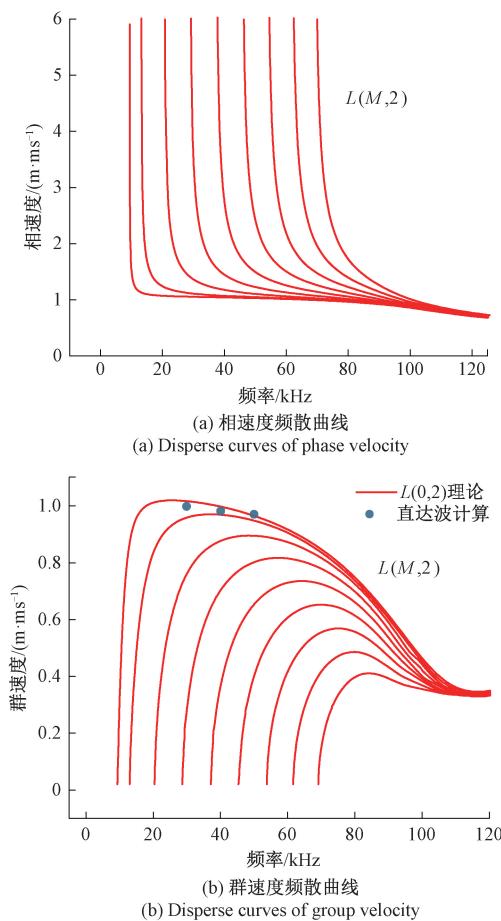


图1 外直径40 mm、壁厚4 mm聚乙烯管频散曲线

Fig. 1 Disperse curves of PE pipe with 40 mm outer diameter, 4 mm thickness

式中: ω 与 k_N^M 分别表示激励的非对称导波的角频率与波数; r 、 θ 与 z 分别表示圆管中的径向、周向与轴向; $v_N^M(r, \theta)$ 是模数为 M 、周向阶次为 N 的超声导波模态的速度场,其具体表达式如式(2)所示。

$$v_N^M(r, \theta) = \sum_{\alpha=r, \theta, z} R_{N\alpha}^M(r) \Theta_\alpha^M(M\theta) e_a \quad (2)$$

式中: $R_{N\alpha}^M(r)$ 、 $\Theta_\alpha^M(M\theta)$ 分别表示该超声导波模态的径向与周向波结构; $A_N^M(z)$ 表示相互正交模态的幅值系数,如式(3)所示。

$$A_N^M(z) = \frac{R_{Nr}^M(b) e^{-ik_N^M z}}{4P_{NN}^{MM}} \langle \Theta_r^M, p_1(\theta) \rangle \langle p_2(z), e^{ik_N^M z} \rangle \quad (3)$$

式中: P_{NN}^{MM} 表示该超声导波模态的能量流密度; $\langle \Theta_r^M, p_1(\theta) \rangle$ 和 $\langle p_2(z), e^{ik_N^M z} \rangle$ 分别表示周向以及轴向的幅值系数。非对称导波的能量非对称分布于圆管的各周向位置。同时,其能量周向分布会随着非对称导波在轴向传播的过程中周期性地发生变化。任一个包含于非对

称导波的超声导波模态传播距离因子 $e^{-\frac{iM^2\lambda}{4\pi r_0^2}}$ 的极性由该

模态的周向阶次 M 以及轴向传播距离 z 同时决定,其规律如表1^[17]所示。

表1 传播距离因子的极性

Table 1 Polarity of the propagation distance factor

$e^{-\frac{iM^2\lambda}{4\pi r_0^2}}$ 的极性	M 为奇数	M 为偶数
$z = \frac{4(2n-1)\pi^2 r_0^2}{\lambda}$	正/负	负/正
$z = \frac{8(2n-1)\pi^2 r_0^2}{\lambda}$	正/负	正/负

如表1所示,当非对称导波传播到了 $\frac{8(2n-1)\pi^2 r_0^2}{\lambda}$

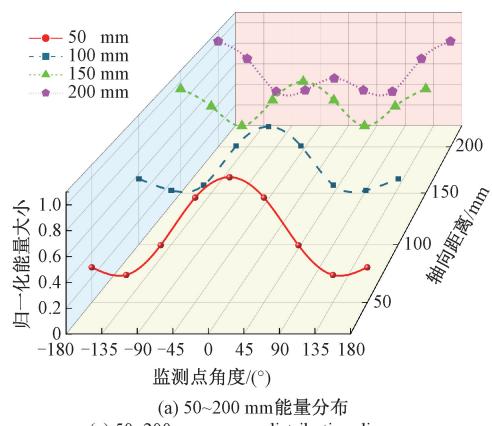
($n=1, 2, \dots$)轴向位置时,无论周向阶次是奇数还是偶数,所有包含于非对称导波的超声导波模态传播距离因子的极性都相同。此时,能量聚焦在传感器激励非对称导波时的周向位置。而当非对称导波传播到了 $\frac{4(2n-1)\pi^2 r_0^2}{\lambda}$ 轴向位置时,非对称导波中各模态的奇数周向阶次模态与偶数周向阶次模态的传播因子相反。此时,能量聚焦的周向位置与传感器激励非对称导波时的周向位置相反。因此,非对称导波能量周向分布的轴向距离周期为 $\frac{8(2n-1)\pi^2 r_0^2}{\lambda}$ 。

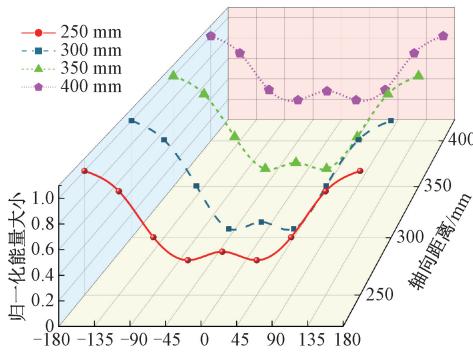
1.2 非对称导波的传播特性

磁致伸缩贴片式传感器由磁致伸缩材料与多段式回折线圈组成,能够完全覆盖圆管圆周的一半,磁致伸缩贴片式传感器模型的周向幅值系数如式(4)所示。

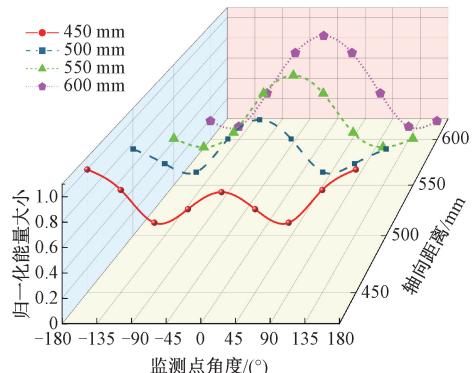
$$\langle \Theta_r^M, p(\theta) \rangle_{MPT} = b P_{10} \int_{-\beta/2}^{\beta/2} \cos(M\theta) d\theta \quad (4)$$

在直径40 mm、壁厚4 mm的钢制圆管中,由一半圆周覆盖的磁致伸缩贴片式传感器激励的200 kHz非对称导波 $L(M,2)$ 传播到不同轴向位置时的能量分布图,如图2所示。

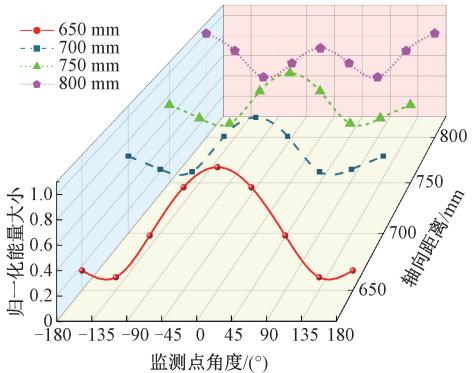




(b) 250~400 mm 能量分布
(b) 250~400 mm energy distribution diagram



(c) 450~600 mm 能量分布
(c) 450~600 mm energy distribution diagram



(d) 650~800 mm 能量分布
(d) 650~800 mm energy distribution diagram

图 2 钢管中 200 kHz 非对称导波 $L(M,2)$ 随距离变化的能量分布

Fig. 2 Energy distribution of non-axisymmetric guided wave $L(M,2)$ at 200 kHz in steel pipe with distance variation

在刚被激励时,非对称导波大部分能量聚焦于传感器所在的周向位置,设为 0° 周向位置,如图 2(a)所示。而随着非对称导波 $L(M,2)$ 向圆管轴向传播,能量逐渐从 0° 迁移至 180° 周向位置,如图 2(b) 所示。随后,能量又会逐渐从 180° 逐渐迁移回 0° 周向位置,如图 2(c) 所

示。最后,进行周期循环变化,如图 2(d) 所示。根据 1.1 节中公式计算得到非对称导波能量周向分布轴向距离周期的理论值 658 mm。

为了验证理论模型的准确性,利用 Abaqus 有限元仿真软件构建了一系列三维数值模型,如图 3 所示。

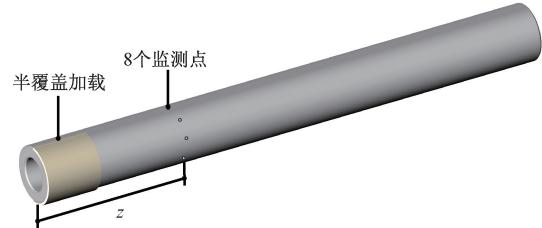


图 3 电磁传感器激励非对称导波仿真模型

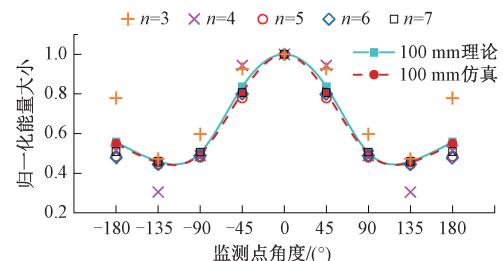
Fig. 3 Simulation model of electromagnetic transducer triggering non-axisymmetric guided wave

如图 3 所示,仿真模型设置半覆盖的载荷来模拟磁致伸缩贴片式传感器。在仿真的过程中,通过调整 8 个不同角度的监测点与信号激励端的距离 z ,即可得到非对称导波传播过程中,不同轴向距离的能量分布变化情况。

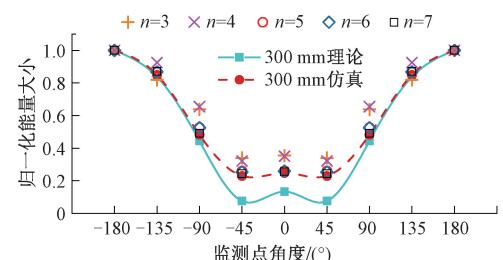
选取了 $z=100, 300, 500$ 以及 700 mm 这 4 个不同的轴向位置进行仿真。对每个距离处监测点所检测到的非对称导波信号能量进行了归一化处理,如图 4 所示,两条曲线的形态趋势与大小较为一致,说明不同轴向位置的仿真与理论预测结果基本一致。

1.3 压电陶瓷数量对非对称导波的影响

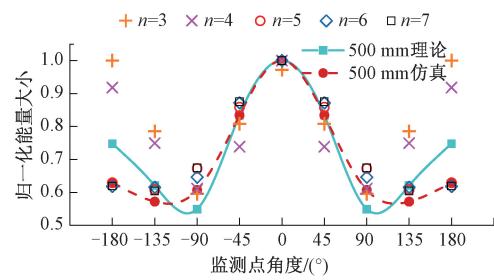
区别于磁致伸缩贴片式传感器,压电陶瓷传感器尺寸有限,当多个压电陶瓷组成阵列,该阵列是以离散分布的形式覆盖于圆管表面,如图 5 所示。



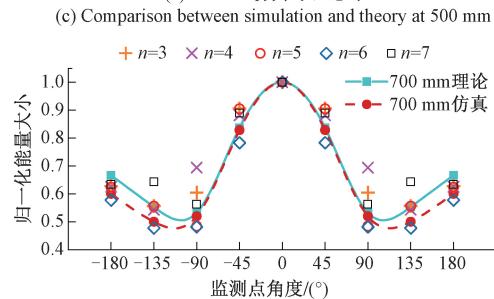
(a) 100 mm 仿真与理论对比
(a) Comparison between simulation and theory at 100 mm



(b) 300 mm 仿真与理论对比
(b) Comparison between simulation and theory at 300 mm



(c) 500 mm 仿真与理论对比



(d) 700 mm 仿真与理论对比

图4 钢管不同距离下 200 kHz 非对称导波

 $L(M,2)$ 传播理论与仿真对比能量图Fig. 4 Energy comparison between theory and simulation of non-axisymmetric guided wave $L(M,2)$ at 200 kHz

propagating at different distances of a steel tube

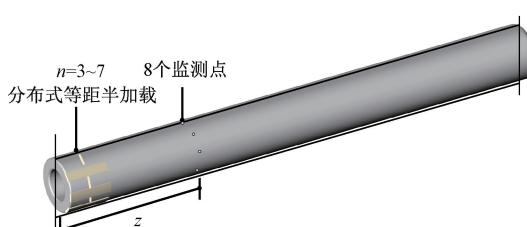


图5 离散化压电陶瓷阵列激励非对称导波仿真模型

Fig. 5 Simulation model of discrete piezoelectric array triggering non-axisymmetric guided wave

压电陶瓷阵列模型的周向幅值系数如式(5)所示。

$$\langle \Theta_r^M, p(\theta) \rangle_{PZT} = b P_{10} \sum_{j=1}^N \int_{-\pi j/N + \theta/2}^{\pi j/N + \theta/2} \cos(M\theta) d\theta \quad (5)$$

如式(5)所示,每片压电陶瓷传感器的周向角范围是: $\Omega_j = \left[\frac{\pi j}{n} - \frac{\theta}{2}, \frac{\pi j}{n} + \frac{\theta}{2} \right]$, $j = 0, 1, 2, \dots, N$ 。为了模拟压电陶瓷阵列激励的非对称导波,利用Abaqus仿真研究了在同一个半圆周覆盖范围内,压电陶瓷数量 n 从 3~7 变化时非对称导波的能量分布散点,如图 4 所示。

如图 4 散点所示,可知 4 组由压电陶瓷阵列与磁致伸缩贴片式传感器半覆盖钢制圆管激励得到的 200 kHz 非对称导波 $L(M,2)$ 理论能量分布变化规律基本一致。

对不同数量的压电陶瓷仿真所得的能量曲线与标准半加载产生非对称导波理论模型曲线的偏差程度进行分析。以如图 4(a)所示轴向距离为 100 mm 时的分析结果为例。如图 6 所示,当压电陶瓷数量 $n=3$ 时,离散分布式压电阵列激励非对称导波的能量分布与标准能量分布的偏差程度较大,其标准差曲线位于图 6 中较高位置。而当 $n=4$ 时,多数监测点的误差低于 $n=3$ 时的误差,但也有部分误差点高于 $n=3$ 。因此。 $n=4$ 与 $n=3$ 误差曲线都呈现误差起伏大、较不稳定的状态。

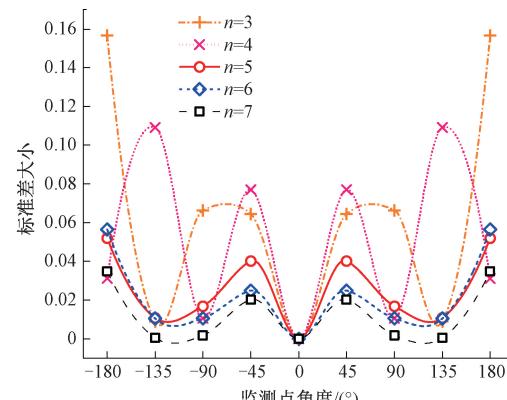
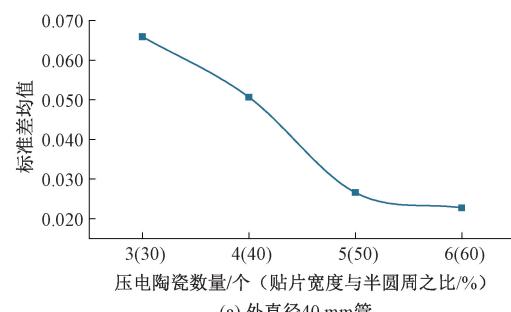


图6 100 mm 距离下压电陶瓷阵列激励非对称导波标准差

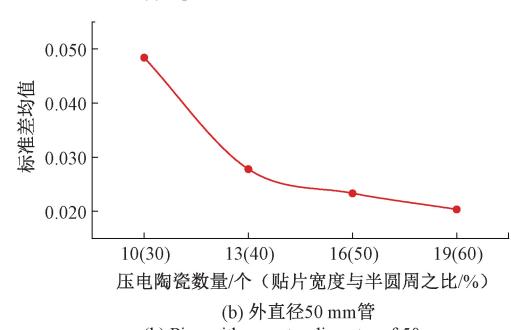
Fig. 6 Standard deviation of asymmetric guided waves excited by piezoelectric ceramic arrays at a distance of 100 mm

然而,从当 $n>5$ 时,偏差程度趋于稳定。对各监测点的标准差进行累加并取均值处理,最终得到了标准差均值曲线,如图 7 所示。



(a) 外直径40 mm管

(a) Pipe with an outer diameter of 40 mm



(b) 外直径50 mm管

(b) Pipe with an outer diameter of 50 mm

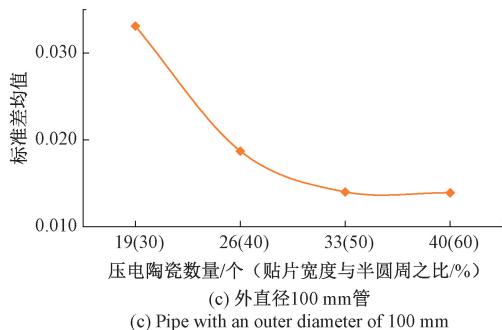


图 7 传感器个数与非对称导波信号标准差量化关系

Fig. 7 Relationship between the number of sensors and the standard deviation of the non-axisymmetric guided wave signal

如图 7(a) 曲线所示,当压电陶瓷数量从 3 逐渐增加至 5 时,即压电陶瓷贴片宽度总和与半圆周长的百分比从 30% 逐渐增加至约 50% 时,标准差均值呈现快速的下降趋势。这表明压电陶瓷阵列激励的非对称导波与理论预测结果符合程度显著提升;而当压电陶瓷贴片宽度总和与半圆周长的百分比超过 50% 时,标准差均值的下降幅度逐渐减小并趋于平稳。这说明在 40 mm 外直径圆管的尺寸下,当压电陶瓷贴片宽度总和达到 50% 半圆周长时,压电陶瓷阵列产生非对称导波的传播特性与完全半覆盖传感器产生非对称导波的传播特性基本一致。同时,又能够避免因过度增加压电陶瓷数量而导致的时间成本和资源浪费。

为拓展上述结论,研究了不同管径最佳压电陶瓷贴片宽度总和与半圆周长的百分比,如图 7(b)、(c) 所示。与图 7(a) 类似,图 7(b)、(c) 所示标准差均值在 50% 占比之前快速下降,在 50% 占比之后趋于平缓。这说明:只需保证贴片宽度和与半圆周长的百分比达到 50%,离散分布式覆盖压电陶瓷阵列与完全半覆盖传感器产生非对称导波的传播特性就基本一致。因此,在后文的非对称导波激励实验中,统一采用 5 片压电阵列。

2 缺陷诱导非对称导波

本章通过有限元仿真研究缺陷产生非对称导波能量分布变化规律,并提出基于非对称导波的圆管缺陷检测方法。

2.1 能量周向聚焦系数

为简化非对称导波能量分布的比较,可将如图 2 所示的非对称导波能量周向分布简化为一个指数。该指数通过相差 180° 的两个周向位置之间导波能量的改善相对百分比差异来计算,可表示为非对称导波的能量聚焦系数(improved relative percentage difference, IRPD)。能量聚焦系数具体公式如式(6)所示。

$$IRPD = \frac{\sum_{n=1}^i \frac{(R_{n,\theta} - R_{n,\theta+\pi})}{(R_{n,\theta} + R_{n,\theta+\pi})}}{i} \quad (6)$$

式中: i 是相差 180° 周向位置的压电片对的数量,如图 8 所示,中心箭头两两所指。例:阵列包含 8 片压电片时,相差 180° 周向位置的压电片共有 4 对。因此,此时参数 i 的值为 4。

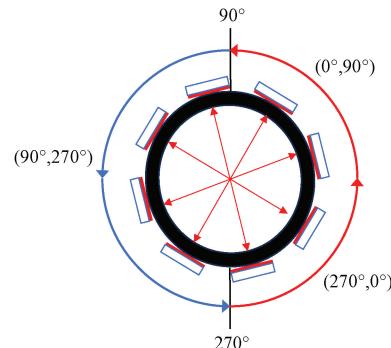


图 8 压电传感器阵列布置

Fig. 8 Schematic diagram of the piezoelectric sensor array layout

角度区间 $(270^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 90^\circ)$ 的划分如图 8 右侧弧线所示。 $(90^\circ, 270^\circ)$ 的划分如图 8 左侧弧线所示。 $R_{n,\theta}, R_{n,\theta+\pi}$ 分别是 $(270^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 90^\circ), (90^\circ, 270^\circ)$ 角度范围内第 n 个周向位置的信号幅值。

通过能量聚焦系数表示如图 2 所示能量分布,所得的曲线如图 9 所示。能量聚焦系数为 1 时,表示非对称导波能量完全聚焦在圆管 0° 周向位置;能量聚焦系数为 -1 时,表示非对称导波能量完全聚焦在圆管 180° 周向位置;当非对称导波的能量平均分布在圆管各周向位置时,能量聚焦系数为 0。该系数能够反映非对称导波能量从 0° ~ 180° 过渡,最终回归至 0° 位置的规律。如图 9 所示,钢管中非对称导波 $L(M, 2)$ 的能量聚焦系

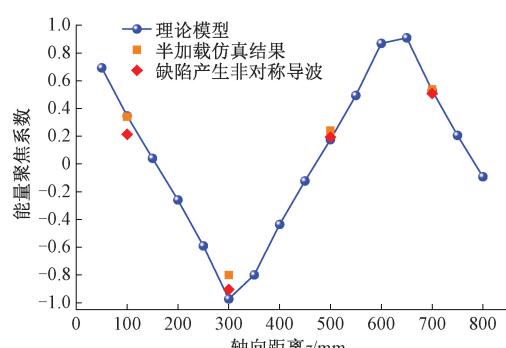


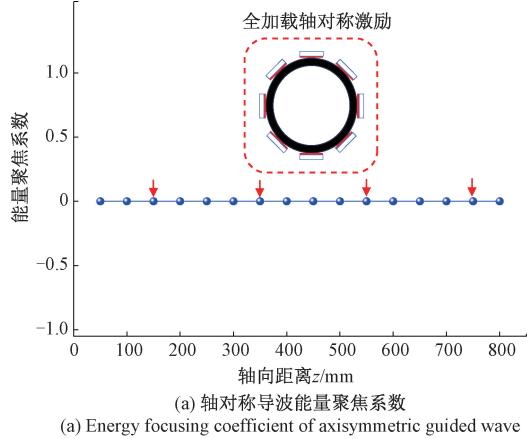
图 9 钢管 200 kHz 非对称导波 $L(M, 2)$ 能量聚焦系数

Fig. 9 Energy focusing coefficient diagram of non-axisymmetric guided wave $L(M, 2)$ in steel pipe at 200 kHz

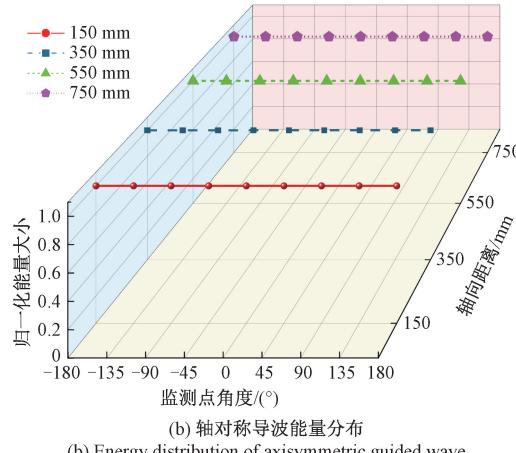
数的变化周期约为 650 mm,与 1.1 节中公式计算的理论值基本一致。

2.2 由缺陷产生非对称导波的传播特性

除了半覆盖传感器之外,部分覆盖圆管圆周的缺陷也能产生非对称导波。当缺陷圆管中激励出了轴对称导波,由于轴对称导波能量均匀分布于圆管各周向,因此,接收传感器在任意轴向距离上接收到的 8 个监测信号能量大小理论上应相等,即:能量聚焦系数均为 0,归一化能量大小为 1,如图 10(a)、(b) 所示。



(a) 轴对称导波能量聚焦系数
Energy focusing coefficient of axisymmetric guided wave



(b) 轴对称导波能量分布
Energy distribution of axisymmetric guided wave

图 10 钢管中 200 kHz 轴对称导波 $L(0,2)$ 钢管能量聚焦系数与能量分布

Fig. 10 Energy focusing coefficient and energy distribution of axisymmetric guided wave $L(0,2)$ at 200 kHz within a steel pipe

当圆管中存在缺陷时,缺陷允许部分轴对称导波继续传播,而阻碍另一部分轴对称导波继续传播,从而产生非对称导波。为研究缺陷产生非对称导波的传播规律,利用 Abaqus 软件构建带缺陷的钢制圆管三维仿真模型。在圆管模型的其中一个端部位置,采用了 8 片压电阵列全加载激励方式以产生轴对称导波。并在与缺陷相距 100、300、500 以及 700 mm 的轴向位置监测非对称导波信并计算其能量聚焦系数。

如图 11(a)所示,轴对称导波尚未传播到缺陷区域时,保持着轴对称的能量分布特性。如图 11(b)所示,当轴对称导波遭遇缺陷时,缺陷的存在阻碍了部分导波的传播,仅有部分导波能够通过。此时,缺陷诱导出了非对称导波,可以视为非对称导波的触发源。如图 11(c)所示,为缺陷产生的非对称导波。该非对称导波可由接收传感器接收,并通过分析能量周向分布的聚焦图来定位缺陷。

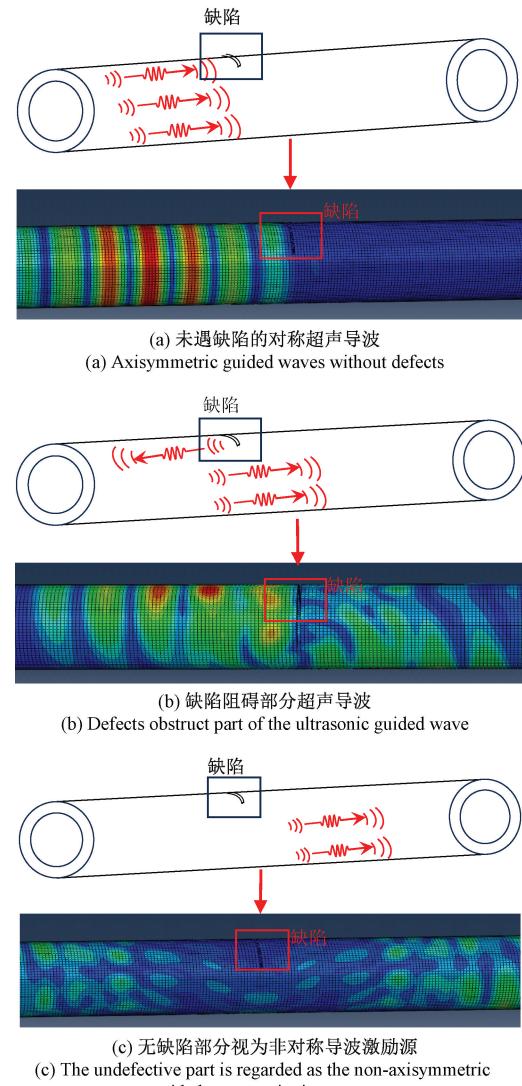


图 11 缺陷产生非对称导波的仿真动画切片
Fig. 11 Simulation animation slicings of non-axisymmetric guided wave generated by defects within a steel pipe

如图 9 所示,菱形标记点仿真结果显示 100、300、500 以及 700 mm 的轴向位置监测得到的非对称导波能量聚焦系数与理论预测值基本匹配。这说明:缺陷可产生非对称导波,其传播规律与传感器半加载产生的方形标记点基本一致。

需要注意的是,采用 5 片的压电阵列是为了激励非

对称导波，并与缺陷产生的非对称导波进行对比，证明缺陷能够产生非对称导波，如图 9 所示，并不是为了检测缺陷。本文提出的检测方法是通过对称布置的 8 片压电阵列激励能量周向覆盖范围 100% 的对称导波，遇到缺陷后产生非对称导波。

3 聚乙烯管中的非对称导波

本章通过理论与实验研究聚乙烯管中 30 kHz 频率非对称导波 $L(M,2)$ 的传播特性。随着频率的提高，如图 12 所示，对称导波 $L(0,2)$ 直达波的信号幅值不断下降。这说明频率越低，超声导波的能量越高。由于本研究中选用的实验装置可激励信号的最低频率为 30 kHz。因此，实验选用 30 kHz 作为激励频率。

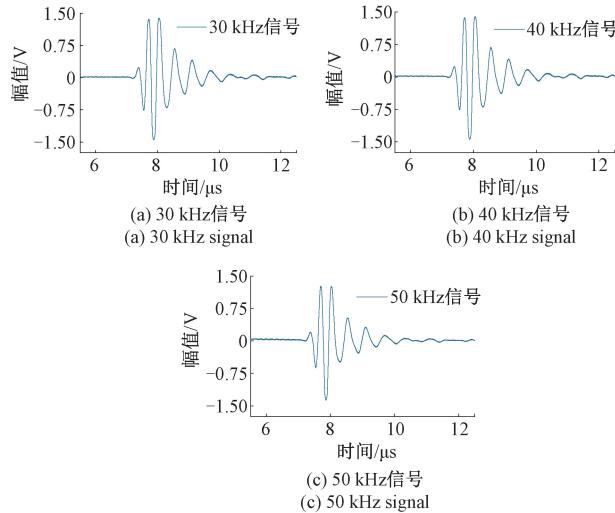


图 12 聚乙烯管中不同频率对称导波 $L(0,2)$ 的直达波信号

Fig. 12 Direct wave signals of symmetrical guided waves $L(0,2)$ of different frequencies in polyethylene pipes

其次，如图 12 所示，由于接收传感器与激励传感器轴向距离为 700 mm，根据直达波的到达时间可算得 $L(0,2)$ 的群速度，如表 2 所示。将计算得到的群速度与频散曲线的理论群速度进行对比，如图 1(b) 散点所示，计算得到的群速度与频散曲线理论群速度基本符合。

表 2 聚乙烯管中不同频率对称导波 $L(0,2)$ 的直达波信号的幅值与群速度

Table 2 The amplitude and group velocity of the direct wave signal from the symmetric guided wave $L(0,2)$ at different frequencies in polyethylene pipes.

频率/kHz	直达波幅值/V	群速度/(m·s ⁻¹)
30	1.389	998.89
40	1.263	981.77
50	1.239	975.64

3.1 聚乙烯管中非对称导波的传播规律

聚乙烯管中 30 kHz 非对称导波 $L(M,2)$ 的理论聚焦变化规律，如图 13 所示。

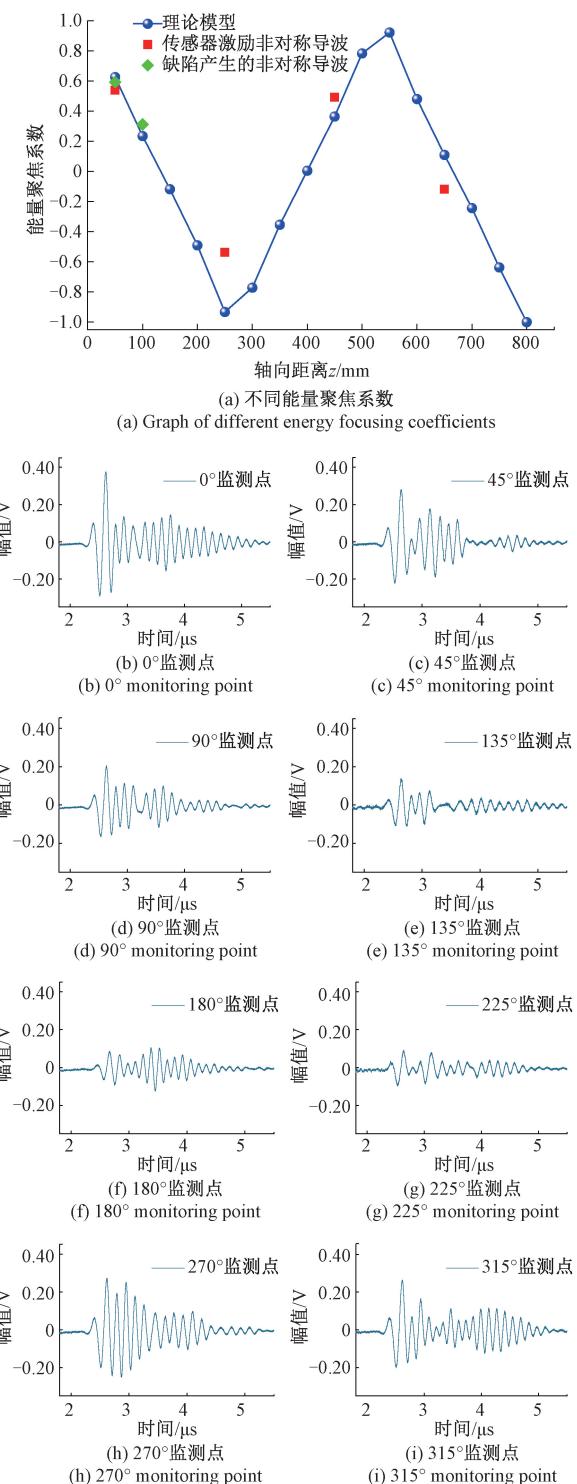


图 13 无焊缝聚乙烯管非对称导波 $L(M,2)$ 检测

Fig. 13 Non-welded polyethylene pipe non-axisymmetric guided wave $L(M,2)$ detection

为验证其规律,通过如图 14 所示的设备开展实验。实验中采用高功率超声系统 RPR-4000 产生 5 周期的正弦波,传递至由 5 片压电陶瓷构成的离散分布式传感器阵列,在聚乙烯管中产生非对称导波。再通过 8 片压电陶瓷传感器接收信号。每片压电陶瓷传感器对应聚乙烯管圆周中一个角度的监测点。监测点是由 0° 开始,以 45° 递增,离散均匀分布在圆周上。由数字示波器 MDO32 对每个监测点进行显示与记录。信号的激励频率、幅值、增益、采样频率分别设定为 30 kHz 、 1 V 、 60 dB 以及 10 MHz 。激励与接收传感器轴向距离分别设置为 50 、 250 、 450 和 650 mm 。无裂纹实验结果,如图 13(a) 方形标记点所示。

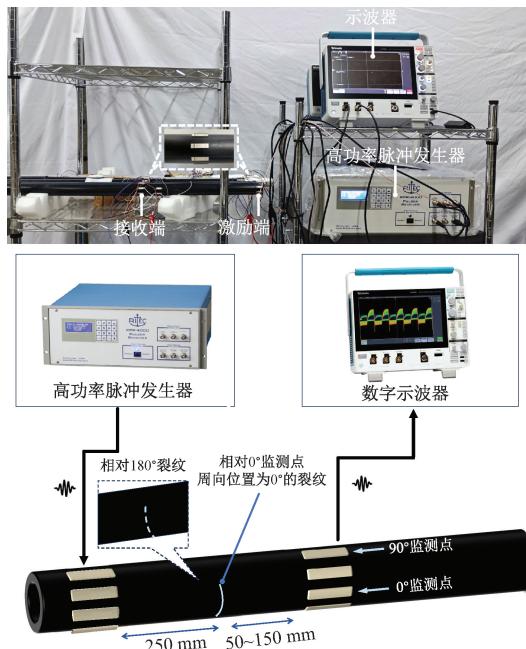


图 14 聚乙烯管无损检测实验装置

Fig. 14 Equipment for polyethylene pipe test

如图 13(a) 所示,传感器激励实验与理论预测的结果基本一致。部分实验数据与理论预测结果之间存在偏差,其原因可归结为 3 点:1) 实际的聚乙烯管的材料特性在不同圆周方向上存在差异,这与理论模型中假设的理想状态不符。2) 实际操作时,压电陶瓷传感器在聚乙烯管圆周方向上的分布难以实现完全等距排布,这会对实验所测得的非对称导波能量分布有所影响。3) 压电陶瓷传感器与聚乙烯管不同圆周处的接触存在差异。例如:粘合剂的用量无法保证完全一致,以及压电陶瓷与聚乙烯管之间的粘合紧密度也不可避免地存在差异。材料特性差异以及传感器分布不均匀对实验结果的影响程度分析如下所述。

针对材料特性差异问题,使用 Abaqus 有限元仿真定义得到周向异性的材料来研究材料特性差异对实验结果的具体影响程度。由于仿真中难以模拟聚乙烯管中非对称导波,因此,仿真以钢制圆管中的非对称导波为例,分析材料特性差异、传感器分布不均匀等对实验结果的具体影响程度。

如图 15 所示,将圆管的圆周分为 4 个部分,第 I、III、IV 部分设置为标准钢材料特性,密度参数为 7.8×10^{-9} ,杨氏模量为 $216\,900$,泊松比为 0.2865 。第 II 部分改变材料的杨氏模量,分别减小杨氏模量 5%、10%、15%、20%。4 组仿真模型的激励端均采用非对称加载方式,以得到非对称导波。设置接收传感器位于激励端 50 mm 的轴向距离处。

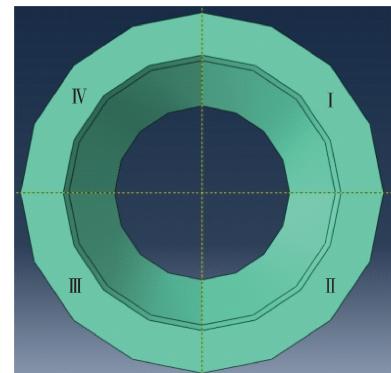
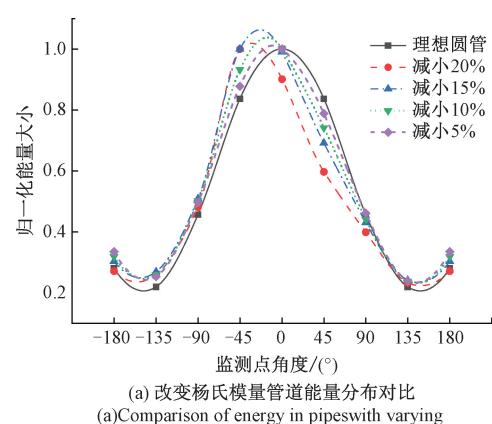


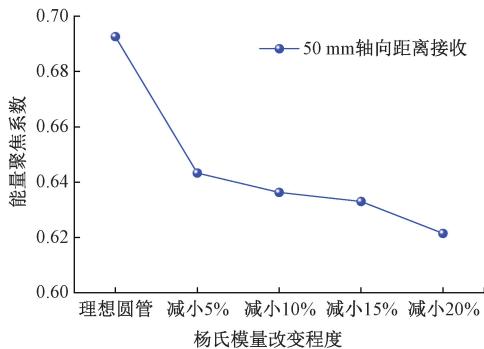
图 15 材料各向异性仿真模型

Fig. 15 Simulation model for material anisotropy

非对称导波在杨氏模量各向异性圆管与各向同性的理想圆管中,各周向位置的能量存在差异,如图 16 所示。将图 16(a) 所示的能量分布根据式(6)转化为能量聚焦系数。如图 16(b) 所示,杨氏模量的改变程度越大,能量聚焦系数变化越大。且当杨氏模量改变 5% 时,其能量聚焦系数就有 7% 的改变。

该仿真仅讨论了如图 15 所示第 II 部分杨氏模量变化对能量聚焦系数的影响。而实际材料各向异性更加复杂,并且受到密度、泊松比等参数影响。这说明材料特性差异是导致实验结果与理论不符的因素之一。





(b) 改变杨氏模量管道能量聚焦系数对比
(b) Comparison of energy focusing coefficients in pipes with varying Young's modulus

图 16 杨氏模量变化对比分析

Fig. 16 Comparative analysis of Young's modulus variations

其次,针对传感器分布不均匀的问题,同样进行仿真研究。如图 17 所示,移动激励端的部分压电片,以产生两种传感器非均匀分布的效果。

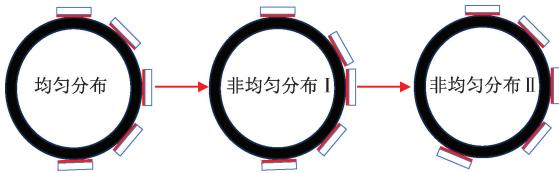


图 17 传感器非均匀分布示意

Fig. 17 Illustration of non-uniform distribution of sensors

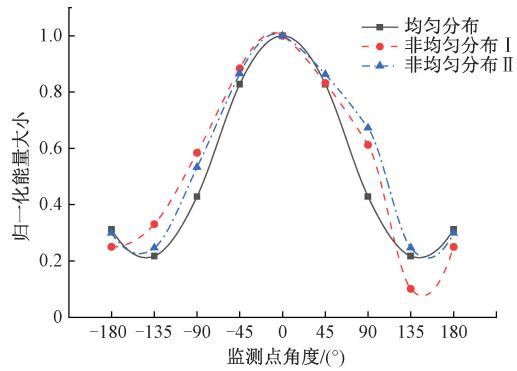
针对两种非均匀分布情况,监测该情况下所激发非对称导波传播 50 mm 轴向距离的能量。所得的能量对比,如图 18(a)所示。传感器非均匀分布的曲线与传感器均匀分布的曲线具有不同程度上的差异。将图 18(a)所示的能量分布根据式(6)转化为能量聚焦系数,则如图 18(b)所示。如图 18(b)所示,2 种传感器非均匀分布与传感器均匀分布的能量聚焦系数有较为明显的差异。同时,传感器非均匀分布情况的不同,能量聚焦系数分别呈现出数值偏大与数值偏小的情况。其能量聚焦系数改变程度分别为 7.83% 和 2.5%。

该仿真仅讨论了移动其中一片压电片导致的传感器非均匀分布对能量聚焦系数的影响。而实际中,压电片阵列非均匀分布的情况可能更加复杂。这说明压电片阵列非均匀分布是导致实验结果与理论不符的因素之一。

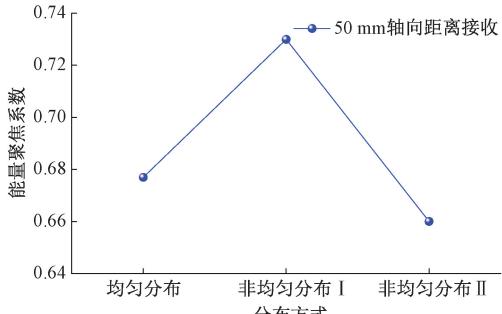
当材料特性差异、压电片阵列非均匀分布等几种因素叠加在一起时,便有可能导致实验结果与理论存在一定程度的不符。

3.2 聚乙烯管中因缺陷产生的非对称导波

为验证聚乙烯管中缺陷诱导非对称导波的传播特性,在聚乙烯管道中人工制作了一个约 1/4 周长的裂



(a) 不同传感器分布下的能量分布
(a) Energy distribution under different sensor distributions



(b) 不同传感器分布下的能量聚焦系数
(b) Energy focusing coefficient of different sensor distributions

图 18 传感器分布变化对比分析

Fig. 18 Comparative analysis of sensor distribution variations

纹,宽度为 1 mm,裂纹与激励传感器相距 250 mm,如图 14 模型图所示。将裂纹的周向位置设定为 180°周向位置。

需要指出:0°和 180°的设定仅用于标识圆管的相对周向位置。并不意味所提出的方法仅限于确定 0°或 180°周向位置的缺陷。实际上,所提出的方法能确定任何周向位置的缺陷。设置、讨论 0°或 180°周向位置的原因在于本研究的缺陷周向位置 θ 定位方法只存在 2 种情况:1)当接收到的非对称导波计算的能量聚焦系数为正值时,缺陷周向位置 θ 与最大信号幅值对应的压电陶瓷周向位置 φ 相同;2)当接收到的非对称导波计算的能量聚焦系数为负值时,缺陷与最大信号幅值对应压电陶瓷的周向位置 φ 满足 $\theta = \varphi + 180^\circ$ 的关系。

为保证非对称导波的能量周向分布与缺陷的轴向位置能一一对应,接收传感器与缺陷的轴向距离应在非对称导波能量分布变化周期的 1/4 范围内,约 150 mm 内。因此,设置 8 个均匀分布的压电陶瓷接收传感器与裂纹之间的轴向距离分别为 50 和 100 mm。同时,为验证实验系统与方案能监测到缺陷诱导产生的非对称导波信号,以接收传感器与裂纹间的轴向距离 50 mm 为例。如图 13(b)~(i)所示,展示了 8 片压电陶瓷传感器在聚乙烯管中接收到的未归一化监测点时域信号。比较如

图 13(a)所示菱形标记点与理论线条可知:在 2 个轴向距离下,缺陷产生非对称导波的能量聚焦系数的实验结果均与非对称导波理论模型结果相吻合。这说明轴对称导波在通过裂纹之时,缺陷的确诱导出了非对称导波。同时,该非对称导波的传播特性与半加载激励的非对称导波一致。为研究接收传感器与缺陷的最佳轴向距离,对图 13(a)所示 2 个不同轴向距离的菱形标记点实验结果进行标准差分析,如图 19 所示。

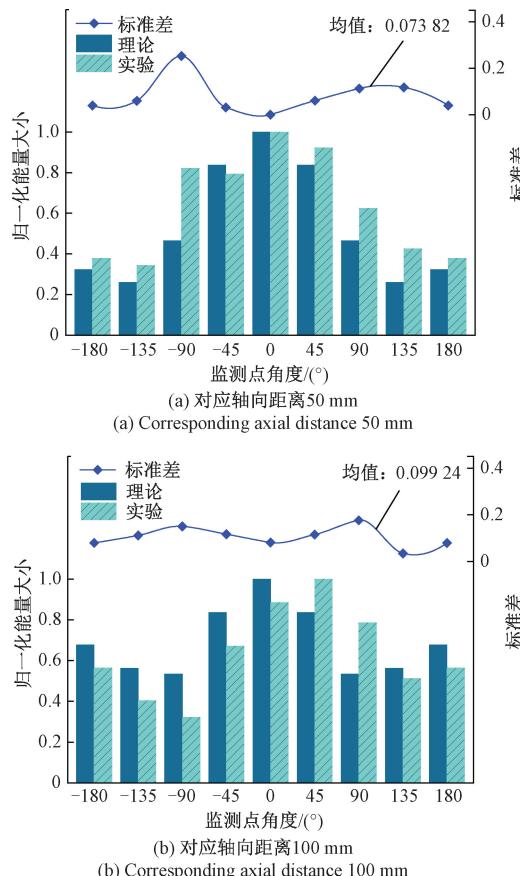


图 19 不同接收距离下缺陷诱导非对称导波的标准差分析

Fig. 19 Standard deviation analysis of a defect induced non-axisymmetric guided wave at different receiving distances

如图 19 所示,在 $(90^\circ, 180^\circ)$ 和 $(180^\circ, 270^\circ)$ 区间角度范围,不论是理论还是实验方面,50 mm 距离下的归一化能量大小均低于 100 mm 距离下的。而在该范围之外,两者的归一化能量大小近似相等。这说明 50 mm 距离下,非对称导波各周向位置的能量具有更高的区分度。更不容易被实验误差影响。例如:相比 100 mm 的距离,50 mm 距离下 0° 与 180° 监测点之间的能量差值更大。同时,50 mm 距离下得到的曲线具有更低的标准差均值。这说明:50 mm 距离时,测量误差对检测结果的影响更小。

4 聚乙烯管焊接接头缺陷检测

本章研究聚乙烯管焊接接头缺陷产生的非对称导波及其在缺陷检测中的应用。

4.1 焊接接头对轴对称导波的影响

如图 20 所示,采用热熔的方式焊接聚乙烯管。首先,通过角磨机打磨两支待焊接的聚乙烯管,并固定于焊接支架上;随后利用电热熔焊板对管材进行热熔处理,形成熔融界面;再将熔融界面的聚乙烯管材进行对接,并保持对接状态直至管材冷却固化。

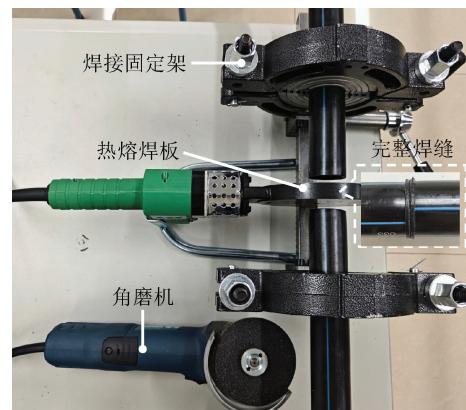


图 20 聚乙烯管热熔焊接系统实物

Fig. 20 Polyethylene pipe hot melt welding system

在焊接后的聚乙烯管上轴对称布置压电阵列激励轴对称导波,使其通过无缺陷焊接接头区,再利用压电传感器阵列监测信号。2 组实验中接收与激励传感器分别相距 300 和 700 mm。热熔焊接接头位于两者中间,与激励传感器相距 250 mm。根据如图 21(a)所示示意图进行实验。如图 21(b)标记点所示,轴对称导波在通过无缺陷焊接接头时,其传播特性并未受到影晌。

4.2 由缺陷焊接接头产生的非对称导波

本节探讨轴对称导波通过有缺陷焊接接头后产生的非对称导波的传播特性。如图 22(a)所示,在聚乙烯管焊接接头处引入了一条人工裂纹。裂纹长度为聚乙烯管周长的 $1/8$ 、宽 1 mm、深 4 mm 的贯穿裂纹。裂纹的周向位置设为 0° 。根据 3.2 节的分析,焊接接头裂纹将产生非对称导波。需要注意的是:焊接接头的轴向位置在实际工程中是固定的。因此,只有接头裂纹的周向位置需要评估。为使缺陷诱导出的非对称导波能量分布图中各周向能量有明显的差异,以实现对焊接接头缺陷的检测与周向定位,将接收传感器布置在与焊接接头相距 50 mm 的轴向位置。即压电陶瓷片与

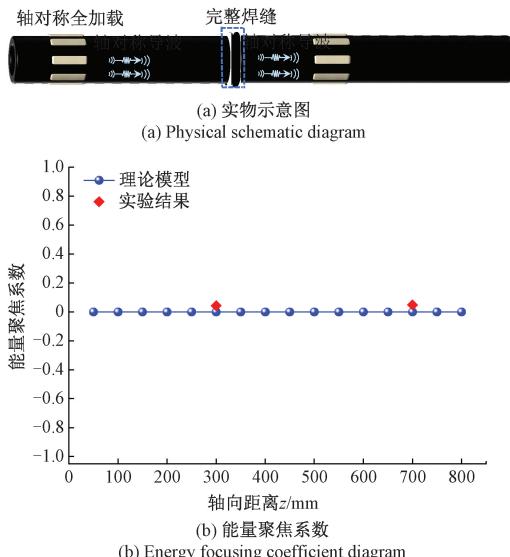


图 21 聚乙烯管焊接接头 30 kHz 轴对称导波能量聚焦系数
Fig. 21 30 kHz axisymmetric guided wave detection diagram of the welded joint of polyethylene pipe

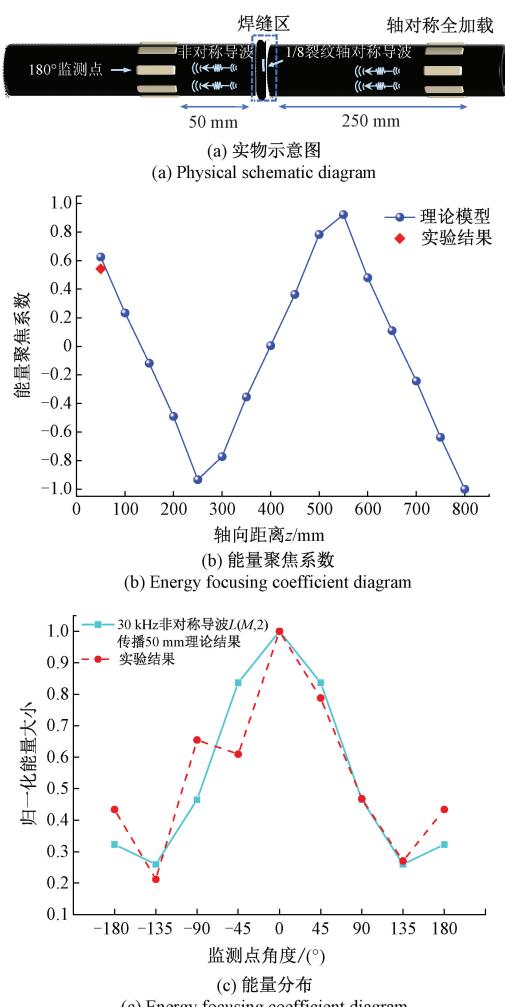


图 22 焊接缺陷诱导非对称导波检测
Fig. 22 Welding defect-induced non-axisymmetric guided wave detection diagram

焊缝位置不重合,而是存在一定距离。用于接收信号的压电陶瓷片阵列与焊缝的轴向距离为 50 mm。

如图 22(b)、(c) 所示,能量聚焦系数图与能量分布图均能说明:轴对称导波在通过存在裂纹的焊接接头并传播了 50 mm 后,能量分布图与非对称导波传播了 50 mm 距离是一致的。这意味着轴对称导波通过焊接接头缺陷区域的过程中产生了非对称导波。因此,可通过产生的非对称导波的能量聚焦系数来判断聚乙烯管道焊接接头是否存在缺陷,并评估其周向位置。

5 埋地聚乙烯管焊接接头缺陷检测

本章研究埋地聚乙烯管焊接接头缺陷产生的非对称导波在缺陷检测中的应用。实验装置如图 23 所示,将带有热熔接头裂纹的聚乙烯管置于长 50 cm、宽 30 cm 的亚克力板容器中,容器内填充栽培土壤。裂纹周向位置设为 180°。实验操作方式与图 22(a) 所示相同。

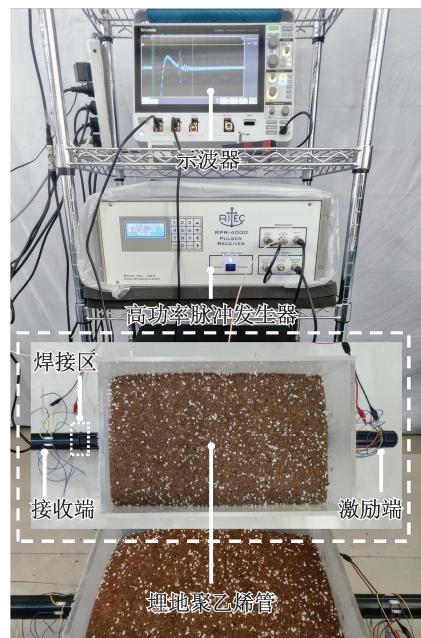


图 23 埋地聚乙烯管热熔焊接接头检测实验装置
Fig. 23 Experimental device for detecting hot melt weld of a buried polyethylene pipe

实验结果如图 24(a) 所示,由于焊接接头缺陷的轴向距离是已知的,为 50 mm。同时,接头裂纹产生非对称导波的能量聚焦系数为正值。根据 3.2 节的缺陷周向位置评估准则,接头裂纹的周向位置可以通过接收到的 8 个信号中直达波幅值最大的周向位置来评估。而在实验结果中,接头裂纹的周向定位结果为 180°,与实际情况匹配。同时,如图 24(b) ~ (i) 所示,接收得到的实验时域信号幅值比如图 13(b) ~ (i) 所示的小,说明土壤的确

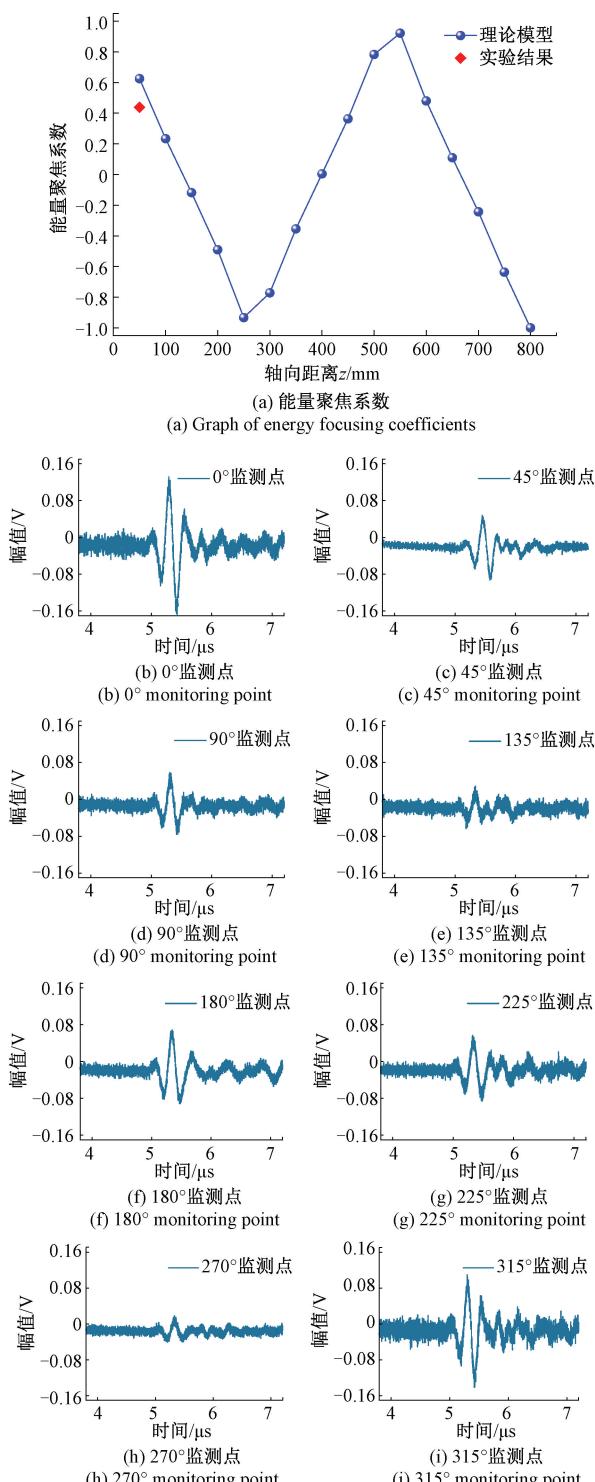


图 24 埋地聚乙烯管热熔焊接接头检测

Fig. 24 Detection diagram of hot-melt welded joints

of buried polyethylene pipes

对导波信号的产生了一定的衰减。但并不会对非对称导波的传播特性产生明显的影响^[16]。其次,利用超声导波的能量聚焦系数可评估聚乙烯管的焊接接头是否存在缺

陷。若超声导波的能量聚焦系数接近于 0,说明焊接接头不存在缺陷。反之,说明存在缺陷。同时,由于焊接接头的轴向位置在实际工程中是固定的。因此,只有接头裂纹的周向位置需要评估。可以通过不同周向位置接收到的 8 个信号算得的能量聚焦系数值可以反向评估焊接接头缺陷的周向位置。

为测试不同土壤对导波衰减的影响,使用细黄土、花园土、沙土 3 种土壤埋置聚乙烯管进行实验,如图 25 所示。

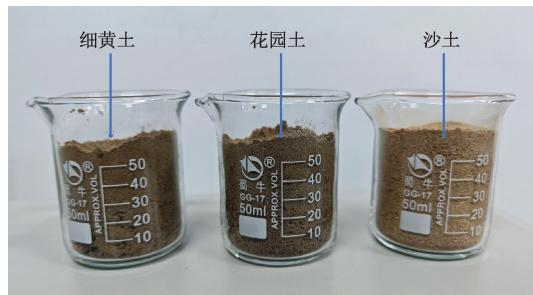


图 25 不同土壤

Fig. 25 Different soils

3 种土壤的土壤条件如表 3 所示。

表 3 不同土壤的条件

Table 3 Conditions of different soils

土壤分类	土壤成分/%	湿度/%	酸碱度(pH)
细黄土	SiO ₂ (50%)、Al ₂ O ₃ (8% ~ 15%)、CaO (10%)、Fe ₂ O ₃ (4% ~ 5%)、MgO (2% ~ 3%)、K ₂ O (2%)	50	6.8
花园土	矿物质、有机质	35	6.9
沙土	SiO ₂ (80%)、CaO + Fe ₂ O ₃ + MgO (20%)	13	6.8

如图 26 所示,利用 3 种土壤中测得的信号通过式(6)算出能量聚焦系数,尽管土壤的成分存在差异,但所测得的能量聚焦系数数值相接近。这说明土壤虽然对非对称导波的能量产生了衰减,但土壤成分、湿度、酸碱度等参数对非对称导波其传播特性的影响差异较小。

因此,如图 23 所示,对于部分开挖的聚乙烯管布置压电阵列,采集非对称导波后,通过式(6)计算能量聚焦系数。根据能量聚焦系数的数值大小与正负,进而判断焊缝缺陷的周向位置。

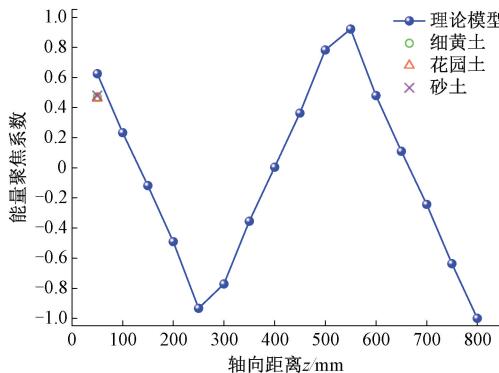


图 26 不同土壤埋置下的能量聚焦系数

Fig. 26 Energy focusing coefficients under different soils

6 结 论

1) 本研究通过简正模态法理论预测了圆管中非对称导波能量周向分布的变化规律。并得到了非对称导波能量周向分布变化周期的公式。

2) 通过有限元仿真验证了非对称导波能量周向分布的理论预测结果。并探讨了离散分布式压电阵列中压电陶瓷数量对非对称导波激励效果的影响。仿真结果表明, 分布式压电陶瓷阵列能够有效激励非对称导波, 且当压电陶瓷数量为 5 时, 与完全半覆盖的磁致伸缩贴片式传感器激励的非对称导波传播特性接近。

3) 仿真和实验结果表明: 轴对称导波遇到缺陷会产生非对称导波。可利用聚乙烯管缺陷产生的非对称导波能量分布来检测缺陷。

4) 聚乙烯管热熔焊接接头实验结果显示: 当焊接接头不存在缺陷时, 缺陷不会影响对轴对称导波; 当焊接接头存在缺陷时, 缺陷会产生非对称导波。利用焊接接头缺陷产生非对称导波的能量分布, 可以判断焊接接头是否存在缺陷, 并确定其周向位置。

5) 埋地聚乙烯管焊接接头缺陷检测实验说明: 土壤会对超声导波产生一定程度的衰减, 但不影响本研究提出的聚乙烯管焊接接头缺陷检测法的应用。

参考文献

- [1] 徐亮, 韩萌, 袁页. 聚乙烯管材在城市燃气管网腐蚀防护中的应用与实践 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(10):34-36.
XU L, HAN M, YUAN Y. Application and practice of polyethylene pipe in corrosion protection of city gas pipe network [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(10):34-36.
- [2] 张行, 唐步云, 刘彤, 等. 油气管道柔性测径传感器设计及其结构优化 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 15-25.
ZHANG H, TANG B Y, LIU T, et al. Design and structural optimization of the flexible sizing sensors for oil and gas pipelines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12):15-25.
- [3] 李建锋, 钱存华. 基于模糊综合评价的城镇埋地聚乙烯天然气管道风险评价 [J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(2):66-72.
LI J F, QIAN C H. Risk assessment of urban buried polyethylene natural gas pipeline based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. China Special Equipment Safety, 2024, 40(2):66-72.
- [4] 邵泽龙, 左延田. 聚乙烯管道的微波无损检测技术研究 [J]. 化工装备技术, 2024, 45(6):1-5.
SHAO Z L, ZUO Y T. Research on microwave non-destructive testing technology for polyethylene pipes [J]. Chemical Equipment Technology, 2024, 45(6):1-5.
- [5] 王振邦, 茅永明, 李晓康, 等. 乙基支链对低温度下双模态聚乙烯中形成串珠晶的影响 [J]. 中华聚丙烯科学, 2021, 39(8):1050-1058.
WANG Z B, MAO Y M, LI X K, et al. The influence of ethyl branch on formation of shish-kebab crystals in bimodal polyethylene under shear at low temperature [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2021, 39(8):1050-1058.
- [6] 肖权旌, 王强, 谷小红, 等. 改进 YOLOv5 的高密度聚乙烯管热熔接头 3D 全聚焦成像缺陷识别分析 [J]. 应用声学, 2025, 44(1):88-96.
XIAO Q J, WANG Q, GU X H, et al. 3D total focusing method imaging defect identification analysis of high density polyethylene thermal butt fusion joint based on improved YOLOv5 [J]. Journal of Applied Acoustics, 2025, 44(1):88-96.
- [7] SESTOKE J, JASIUNIENE E, SLITERIS R, et al. Exciting and detecting higher-order guided lamb wave modes in high-density polyethylene structures using ultrasonic methods [J]. Materials, 2024, 17(1):163.
- [8] 林星佑, 刘蓉. 无损检测技术在城市燃气管道的应用 [J]. 煤气与热力, 2023, 43(12):16-20.
LIN X Y, LIU R. Application of non-destructive testing technology in urban gas pipelines [J]. Gas & Heat, 2023, 43(12):16-20.
- [9] 刘英, 冯晓. 基于反射 L(0,1) 导波的定量检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10):34-36.
LIU Y, FENG X. A novel methodology based on the reflected L(0,1) guided wave for quantitative detection

- of corrosion-induced wall thickness loss in continuous pipes[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14(1):67-82.
- [10] 王晓娟,马旭泽,赵锴,等.纵向L(0,2)模态超声导波在弯管中的传播特性[J].仪器仪表学报,2025,46(3):374-385.
- WANG X J, MA X Z, ZHAO K, et al. Propagation characteristics of longitudinal L(0,2) mode guided waves in bend pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025,46(3):374-385.
- [11] 梁海波,王怡.基于深度学习的天然气钢制管道缺陷检测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(9):148-158.
- LIANG H B, WANG Y. Research on defect detection method of natural gassteel pipeline based on deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(9):148-158.
- [12] SHAH J, EL-HAWWAT S, WANG H. Guided wave ultrasonic testing for crack detection in polyethylene pipes: Laboratory experiments and numerical modeling[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5131.
- [13] 刘轩,吕炎,边策,等.管道电磁超声传感器阵列检测技术研究[J].电子测量与仪器学报,2023,37(11):24-32.
- LIU X, LYU Y, BIAN C, et al. Electromagnetic acoustic transducer array of pipeline inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(11):24-32.
- [14] KIM H W, KWON Y E, CHO S H, et al. Shear-horizontal wave-based pipe damage inspection by arrays of segmented magnetostrictive patches [C]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(12): 2689-2698.
- [15] ZHANG Y F, LI B, WANG J Q. Periodical focusing phenomenon of ultrasonic guided waves in pipes [C]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(1):359-368.
- [16] CHEN SH B, LI W ZH, FANG ZH. Defect induced non-axisymmetric transmitted wave model based on the periodic energy distribution changing analysis for high attenuation circular tube defect detection [J]. Applied Acoustics, 2025, 232:110565.
- [17] FANG ZH, LIN C L, HUANG Y W. Energy concentration degree periodical variation rule of fatigue crack-induced second harmonic non-axisymmetric guided wave within circular tubes [J]. NDT & E International, 2024, 151: 103314.
- [18] SHAH J K, WANG H, EL-HAWWAT S. Detection of internal crack growth in polyethylene pipe using guided wave ultrasonic testing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2024, 23(2): 319-329.
- [19] 王晓娟,杨帆,王错,等.面向超声导波检测的管道腐蚀建模及仿真实现[J].仪器仪表学报,2023,44(5):71-80.
- WANG X J, YANG F, WANG C, et al. Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(5):71-80.
- [20] WANG ZH, HUANG S L, SHEN G T, et al. High resolution tomography of pipeline using multi-helical Lamb wave based on compressed sensing[J]. Construction and Building Materials, 2022, 317:125628.
- [21] LOWE P S, LAIS H, PARUCHURI V, et al. Application of ultrasonic guided waves for inspection of high density polyethylene pipe systems [J]. Sensors, 2020, 20(11):3184.
- [22] NIU X D, TEE K F, MARQUES H R. Superposition model of mode shapes composed of travelling torsional guided waves excited by multiple circular transducer arrays in pipes[J]. Ultrasonics, 2021, 116:106507.
- [23] 谢志峰,王衍学,王一.变温环境下充水管道导波监测的复合误差补偿方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(8):173-181.
- XIE ZH ZH, WANG Y X, WANG Y. Composite error compensation for guided wave monitoring of water-filled pipelines in variable temperature environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(8):173-181.

作者简介



方舟,2011年于中国石油大学(北京)获得学士学位,2014年于北京工业大学获得硕士学位,2020年于香港城市大学获得博士学位,现为福州大学副教授,主要研究方向为超声导波无损检测。

E-mail:fz@fzu.edu.cn

Fang Zhou received his B. Sc. degree from China University of Petroleum, Beijing in 2011, his M. Sc. degree from Beijing

University of Technology in 2014, and his Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2020. Now he is an associate professor at Fuzhou University. His main research interest includes ultrasonic guided wave nondestructive testing.



陈千禧,2023 年于福建理工大学获得学士学位,现为福州大学硕士研究生,主要研究方向为超声导波无损检测。

E-mail:1367953367@qq.com

Chen Qianxi received his B. Sc. degree from Fujian University of Technology in 2023. Now he is a master's student at Fuzhou University. His main research interest includes ultrasonic guided wave nondestructive testing.



黄宴委(通信作者),1999 年于燕山大学获得学士学位,2002 年于燕山大学获得硕士学位,2005 年于上海交通大学获得博士学位,现为福州大学教授,主要研究方向为无人船路径跟踪系统。

E-mail:sjtu_huanghao@fzu.edu.cn

Huang Yanwei (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Yanshan University in 1999 and 2002, respectively, and his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2005. Now he is a professor at Fuzhou University. His main research interest includes unmanned ship path tracking system.