

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513644

# 带包覆层圆管缺陷的非线性超声零频波 检测方法研究\*

孙 弋, 赖泉青, 邓明晰

(重庆大学航空航天学院 重庆 400044)

**摘要:**带包覆层圆管因绝缘、耐高压以及抗振动等优势被广泛地应用于石油、化工等领域。为保证带包覆层圆管在服役过程中的安全运行,有必要对其缺陷进行检测。然而,带包覆层圆管通常采用具有高声吸收衰减特性的高分子聚合物材料作为包覆层,从而使得传统的高频超声导波检测方法存在信噪比低等问题。另一方面,低频超声导波能传播足够长的距离,但存在检测盲区较大和分辨率较低等缺点。为此,提出一种基于非线性超声零频波的低声衰减、高灵敏度的带包覆层圆管缺陷检测方法。首先理论分析了非线性超声零频波沿圆管结构轴向传播时的生成机制,随后通过有限元仿真和实验验证探究了非线性超声零频波在自由圆管以及带包覆层圆管中的传播特性,最终在实验中利用非线性超声零频波成功地检测出带包覆层圆管内存在的切口状缺陷。结果表明:非线性超声零频波具有较低的声衰减特性,在线性基频超声波已完全衰减的情况下,非线性超声零频波仍然能够准确地识别出带包覆圆管内部存在的多个缺陷。该方法所述的非线性超声零频波因其载波频率为0而具有低声衰减的特性,能够用于带包覆层高声衰减圆管结构的无损检测。

**关键词:**带包覆层圆管;高声吸收衰减;缺陷;非线性超声;零频波

中图分类号: TH89 O426.9

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40 140.20

## A nonlinear ultrasonic zero-frequency wave detection method for coated pipe with flaws

Sun Yi, Lai Quanqing, Deng Mingxi

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The coated pipe is widely used in the petroleum, the chemical industry, and other fields because of its advantages of insulation, high-pressure resistance and vibration resistance. To ensure the safe operation of the coated pipe during service, it is necessary to detect its flaws. However, the high polymer material with high sound absorption and attenuation characteristics is usually used as the coating layer of the coated pipe, which makes the traditional high-frequency ultrasonic guided wave detection methods have low signal-to-noise ratio problems. On the other hand, the low-frequency ultrasonic guided wave can travel a long enough distance, but it has the disadvantages of large detection blind areas and low resolution. For this reason, a high-sensitivity method based on nonlinear ultrasonic zero-frequency wave low attenuation is proposed to detect the flaws of coated pipe. Firstly, the generation mechanism of nonlinear ultrasonic zero-frequency wave propagating along the pipe structure was theoretically analyzed. Then, the propagation characteristics of nonlinear ultrasonic zero-frequency wave in free and coated pipe are investigated through finite element simulation and experimental verification. Finally, the notched defects in the coated pipe are successfully detected by using a nonlinear ultrasonic zero-frequency wave in the experiment. The results show that the nonlinear ultrasonic zero-frequency wave has a low attenuation characteristic, and the nonlinear ultrasonic zero-frequency wave can still accurately identify multiple defects in the coated pipe when the linear fundamental frequency ultrasonic wave has been completely attenuated. The nonlinear ultrasonic zero-frequency wave in the method has the characteristic of low attenuation because the carrier frequency is zero, and can be used in the nondestructive testing of the circular pipe structure with high attenuation of the coated layer.

**Keywords:** coated pipe; high sound absorption attenuation; flaws; nonlinear ultrasound; zero-frequency wave

## 0 引 言

带包覆层圆管是一种以金属圆管为基体,表面包覆有一定厚度防护层的复合圆管<sup>[1]</sup>,具有绝缘、耐高压以及抗振动等优点。因此,带包覆层圆管被广泛应用于石油化工以及暖通等行业中的液体或气体的运输。在服役过程中,带包覆层圆管内部长期处于高温、高压甚至酸性的恶劣工作环境<sup>[2]</sup>,导致管道表面极易出现坑洞、开裂等缺陷,进而威胁工业生产安全并酿成重大事故<sup>[3-4]</sup>。因此,检测带包覆层圆管中存在的缺陷对设备的安全运行至关重要<sup>[5]</sup>。超声技术是目前使用最广泛的无损检测技术之一<sup>[6]</sup>。然而,带包覆层圆管通常采用高分子聚合物材料作为包覆层,超声波在其中传播时遭受严重的声衰减,导致信号幅值和信噪比严重降低,故传统超声波无损检测技术无法有效地检测带包覆层圆管的损伤情况<sup>[7]</sup>。另一方面,工业中需停机后人工拆除包覆层才能进行带包覆层圆管的检测工作,检测代价较高<sup>[8-9]</sup>。因此,亟需提出一种低成本且有效的带包覆层圆管的无损检测方法。

随着技术的进步,学者们尝试利用一些新的超声技术检测带包覆层圆管中的缺陷。Luo 等<sup>[10]</sup>利用周向传感器阵列对具有粘弹性的沥青包覆管进行检测,成功地识别出沥青包覆管中的分层和缺陷;Kirby 等<sup>[11-13]</sup>量化了带包覆层管道的沥青层对弹性波的反射系数的影响,并讨论了传播过程中的弹性波受轴对称与非轴对称缺陷带来的散射问题;Wang 等<sup>[14]</sup>提出了一种针对在役的包覆层钢管缺陷的谐波磁场检测技术,除了能够有效地识别管道内外壁的缺陷外,还能够检测带包覆层圆管的壁厚;Pedram 等<sup>[15]</sup>将导波无损检测技术与分裂频谱处理技术结合,通过减少背景噪声以提升缺陷回波信号的信噪比,经分裂频谱处理后的声信号对于带包覆层圆管的缺陷和焊缝特征都有较好的灵敏度;Menon<sup>[16]</sup>使用电磁超声换能器结合奇异谱分析算法来表征碳钢管道内部涂覆层的缺陷,该方法无需对电磁超声换能器做任何改进,检测成本低;Yu 等<sup>[17]</sup>提出了一种利用微波同轴谐振传感器检测高衰减聚乙烯管道缺陷的新方法,能够避免由开口波导扫描引起的间距效应问题;吕瑞宏等<sup>[18]</sup>提出了一种结合空耦超声谐振内检测技术的管道防腐层裂纹识别算法,成功地识别并预测了防腐层的损伤类型和裂纹长度。上述研究在带包覆层圆管缺陷检测技术方面取得了显著进展。然而,上述研究中包覆层长度普遍较短且检测范围有限,而实际工程应用中包覆层覆盖于整个圆管结构上且长度较长。另一方面,声衰减随着频率的降低而减小。因此,上述研究大都依赖低频超声波具有较低衰减的特点实现带包覆层圆管缺陷的检测。然而,低频超声波的盲区较大、分辨率低。同时,低频超声波的波长较长,会严重降低对缺陷的识别能力。

众所周知,载波频率为  $f$  的基频波在非线性弹性固体中传播时,由于和频非线性会产生载波频率为  $2f$  的二次谐波,由于差频非线性会产生载波频率为  $0$  的零频波<sup>[19]</sup>。已有研究表明,非线性超声零频波具有较小的声衰减<sup>[20-21]</sup>。同时,其持续时间和基频波的包络持续时间相同,故具有较好的时间分辨率<sup>[22]</sup>。因此,过去几年来已有部分学者将零频波用于圆管结构的早期损伤评价。Gao 等<sup>[23]</sup>探究了各向同性管道中零频波的传播特性,并利用零频波评价了受盐酸腐蚀影响的各向同性管道的早期损伤情况;Jiang 等<sup>[24]</sup>研究了群速度失配条件下零频波在管道中的发生机理,并尝试利用零频波进行管道的微损伤定位;同年,Jiang 等<sup>[25]</sup>通过有限元仿真和实验探究了纤维增强复合材料管道中零频波的发生及传播现象,证明了零频波可以用于评价管道的热疲劳损伤。上述研究重点讨论了零频波在管道中的传播特性,并证明了零频波对管道早期损伤评价具有较高的敏感性。然而,上述研究并未考虑介质的衰减效应,且基频波皆处于几百千赫兹的低频范围内。一般说来,超声导波在圆管中传播时频厚积越大,模态越复杂,频散现象越严重。但是,关于零频波在高频范围内的传播机理及考虑衰减效应的情形却鲜见报道。

因此,本研究提出并研究了一种基于零频波的带包覆层圆管缺陷检测技术。首先,理论分析了在圆管结构中伴随高频基频波产生的零频波的生成机理;其次,利用数值模拟探究了自由圆管和带包覆层圆管中的高频超声导波产生的零频波的传播特性;最后,搭建了超声实验测量系统,分析比较基频波和零频波在自由圆管和带包覆层圆管中的表现差异,并利用零频波实现带包覆层圆管中的多缺陷检测。该方法可为带包覆层管道超声无损检测技术的进一步发展提供有益的参考。

## 1 理论基础

首先介绍非线性超声零频波在半无限大固体介质中的产生机理。需要注意的是,在半无限大介质中所传播的超声波是体波,不具备频散特性。假设在半无限大介质中,  $x$  为描述质点在初始状态 ( $t = 0$ ) 下的拉格朗日坐标,在给定任意时间  $t$ , 距离初始位置  $x$  时, 超声纵波在  $x$  方向上的非线性波动方程<sup>[19]</sup>为:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

其中,  $c$  为纵波波速,  $\beta$  为非线性声学系数。对式(1)求解以得到纵波在半无限大介质中传播时的位移场。考虑规定位移边界条件,施加位移的初始值为:

$$u_0(t) = UP(t) \sin \omega t \quad (2)$$

其中,  $U$  表示位移振幅,  $\omega$  为角频率,  $P(t)$  是由 Heaviside 阶跃函数  $H(t)$  所构成的窗函数,即:

$$P(t) = H(t)H(\tau - t) \quad (3)$$

其中,  $\tau = 2n\pi/\omega, n \in N^+$ 。将式(2)代回式(1), 可求得规定位移边界条件下, 质点的位移解析解如式(4)所示<sup>[19]</sup>。

$$u(x, t) = U \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \times P \left( t - \frac{x}{c} \right) + \frac{\beta U^2 \omega^2 x}{8c^2} \cos 2\omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \times P \left( t - \frac{x}{c} \right) + \frac{\beta U^2 \omega^2 x}{8c^2} \times P \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (4)$$

据式(4)不难发现, 等式右边第1项是载波频率为  $\omega$  的基频波分量, 第2项是载波频率为  $2\omega$  的二次谐波分量, 第3项是载波频率为0的零频波分量。式(4)表明, 在不考虑衰减的情况下, 零频波分量的幅值随传播距离  $x$  以及基频波频率的平方  $\omega^2$  线性增长。

然而, 超声导波在圆管结构中传播时具备频散和多模态特性。当考虑导波  $G(i, j)$  沿管轴向传播时, 会存在3种不同的模态类型: 纵向  $L$ 、扭转  $T$  以及弯曲  $F$  模态, 阶次  $i$  反映该模态绕管壁螺旋式传播形态,  $i \in N$ , 族群数  $j$  反映该模态在管厚方向上的振动形态,  $j \in N^{[26]}$ 。纵向  $L$  和扭转  $T$  模态的阶次  $i=0$ , 弯曲  $F$  模态的阶次  $i \geq 1$ 。因此, 超声导波沿圆管轴向传播时, 信号将变得极其复杂, 零频波的传播亦会受到显著影响。

相较于圆管结构中其他非线性导波问题来说, 零频波发生效应可忽略相速度匹配条件。然而, 在有限持续时间下, 圆管结构中的导波仍需考虑群速度频散性质和群速度匹配条件。因此, 建立了简易的理论分析模型来直观描述群速度匹配/不匹配情况下的零频波沿圆管轴向传播时的形成过程, 如图1所示。

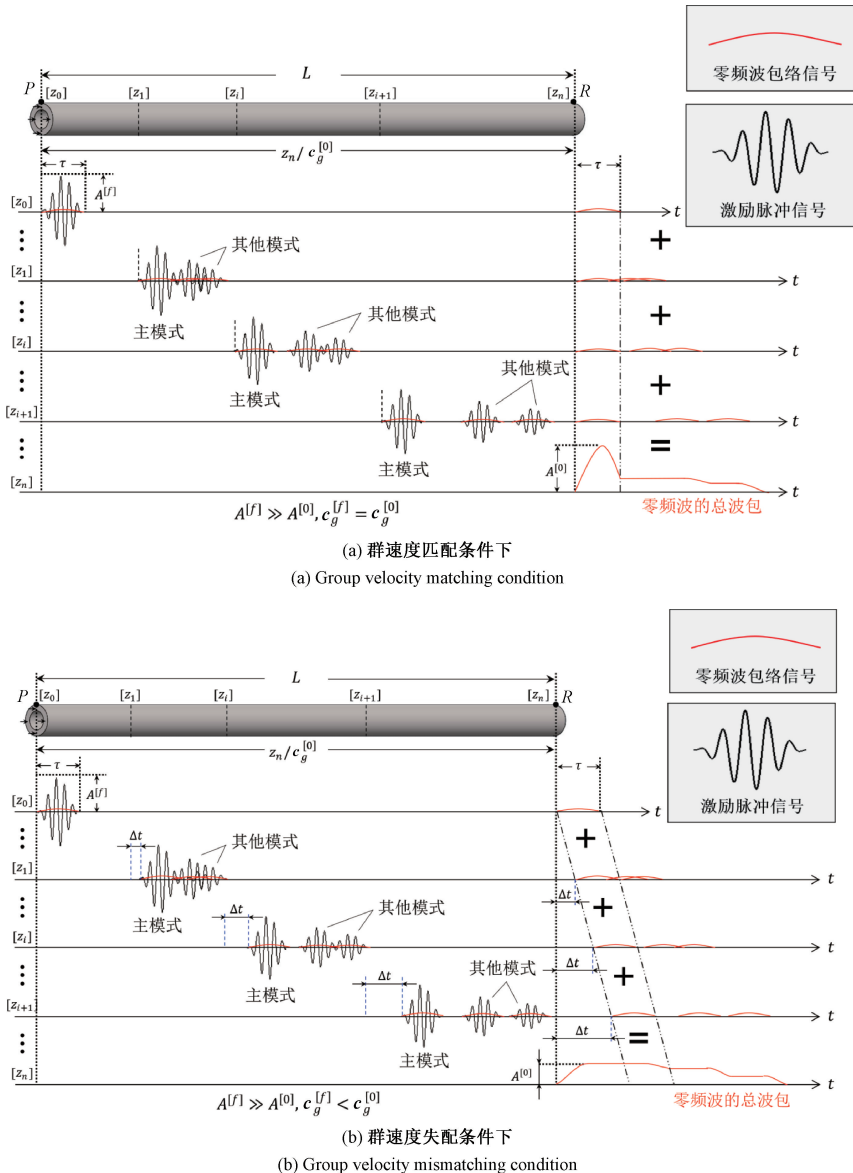


图1 零频波沿圆管轴向传播所发生的物理过程

Fig. 1 Physical process of zero-frequency wave propagating axially along a pipe

首先,假设满足群速度严格匹配条件,即基频波的群速度  $c_g^{[1]} = c_g^{[0]}$ 。一持续时间为  $\tau$ 、幅值为  $A^{[1]}$  的激励脉冲信号在在圆管端面  $P$  点 ( $z_0$ ) 被激励,以群速度  $c_g^{[1]}$  沿长度为  $L$  的圆管轴向 ( $z$  方向) 传播,到达接收点  $R$  处 ( $z_n$ ) 的时刻为  $z_n/c_g^{[0]}$ 。图 1(a) 给出了群速度严格匹配情况下有限持续时间的圆管结构中轴向的零频波形成的物理过程。具体来说,当激励脉冲信号传播至  $z_i$  位置时,沿圆管轴向传播的导波发生频散,产生数个同频率的但不同模式的基频波信号。它们彼此之间存在群速度上的差异,其中能量最大的信号被称为主模态。通常情况下,相较于圆管中的其他模态,主模态的群速度最大。与此同时,包括主模态在内的每一个模态都将产生对应的零频波信号,但由于群速度匹配条件,只有主模态产生的零频波信号的幅值具有累积增长效应,其他模态产生的零频波会滞后于主模态产生的零频波。需要指出的是,激励脉冲信号传播过程中,频散现象与零频波的产生是同时发生的。接着,当激励脉冲信号传播到  $z_i$  位置,由于主模态与其他模态之间存在群速度差异,模态之间的分离将持续加剧。同时,伴随主模态产生的零频波将持续产生,而其他模态产生的零频波将继续滞后。 $z_{i+1}$  位置所发生的物理过程与  $z_i$  位置大体相似,模态之间将进一步地分离,直到所有信号传播至  $z_n$  位置处结束。由于零频波满足群速度匹配条件,不同位置处激发产生的零频波包络将同时到达接收点  $z_n$ 。这些包络将在时域上完全重叠,并在特定持续时间  $\tau$  内线性叠加形成零频波的总包络。同时,可以看出随着  $z_n$  的增大,零频波信号幅值  $A^{[0]}$  也会增加。因此,与半无限大介质和薄板结构相似,圆管结构中沿轴向产生的零频波具有累积增长效应。然而,其他模态产生的零频波因群速度不匹配将存在持续且不均匀的滞后现象。需指出的

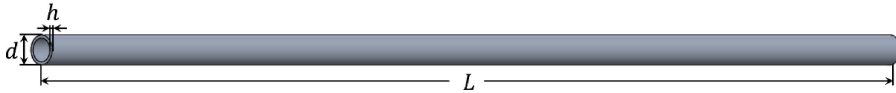


图2 自由圆管有限元模型

Fig. 2 Finite element model of free pipe

表1 6061#铝合金的材料参数

Table 1 Material parameters of 6061# aluminum alloy

密度 / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/GPa	泊松比	$l$ /GPa	$m$ /GPa	$n$ /GPa	$\lambda$ /GPa	$\mu$ /GPa
2 700	69	0.33	-250	-330	-350	51	26

已有研究表明,圆管中任意  $L$  或  $T$  模态信号产生的零频波具有相同的群速度,等于  $L(0,1)$  模态频率趋于 0 时的群速度<sup>[24]</sup>。从图 3(a) 的群速度频散曲线可以看出,在 4.88 MHz 处存在多个  $L$  模态,其中  $L(0,7)$  模态中

是,零频波作为一种基频波产生的非线性信号,其理论求解建立在二阶微扰近似条件下,本身信号较微弱,故激励脉冲信号幅值  $A^{[1]}$  始终远大于累积增长的零频波信号幅值  $A^{[0]}$ ,即  $A^{[1]} \gg A^{[0]}$ 。

进一步,若不满足群速度匹配条件,比如所有模式的群速度皆小于零频波的群速度,即  $c_g^{[1]} < c_g^{[0]}$ 。零频波沿圆管轴向传播所发生的物理过程如图 1(b) 所示。当激励脉冲信号传播至  $z_i$  位置时,主模态信号将滞后于伴随其产生的零频波信号,其他模态产生的零频波同理。上述现象伴随整个传播过程,任意  $z_i$  位置的基频波信号都将产生滞后的零频波信号,滞后时间  $\Delta t$  随传播距离增加而变大。这表明产生的零频波信号幅值无法随传播距离的增加而累积增长。其他模态的群速度大于零频的群速度的物理过程与上述过程类似,这里不重复讨论。

综上所述,满足群速度匹配条件下的零频波信号幅值最大,有较高的信噪比,故而更易于实现圆管的缺陷检测。

## 2 数值模拟

### 2.1 自由圆管的有限元模拟

本节通过有限元模拟探究零频波在圆管结构中的传播特性,并讨论包覆层对信号造成的影响。首先,通过 COMSOL 仿真软件构建如图 2 所示的自由圆管的二维轴对称模型。圆管材料为 6061#铝合金,材料参数见表 1。圆管外直径  $d$ 、壁厚  $h$  以及长度  $L$  分别为 20、2 和 800 mm。根据圆管的材料参数和几何参数,由 GUIGUW 软件计算得到该圆管  $L$  模态与  $T$  模态的群速度频散曲线,如图 3 所示。由于圆管的  $F$  模态在传播过程中呈现出更为复杂的振动形态,故此处暂时不进行研究。

$B$  点的群速度为 4 964 m/s,恰好与  $L(0,1)$  模态 0 MHz 处模态  $A$  点的群速度 (4 991 m/s) 近似匹配<sup>[24]</sup>。因此,当圆管中的激励脉冲信号中心频率为 4.88 MHz 时,满足群速度近似匹配要求,使得在此条件下产生的零频波具有累

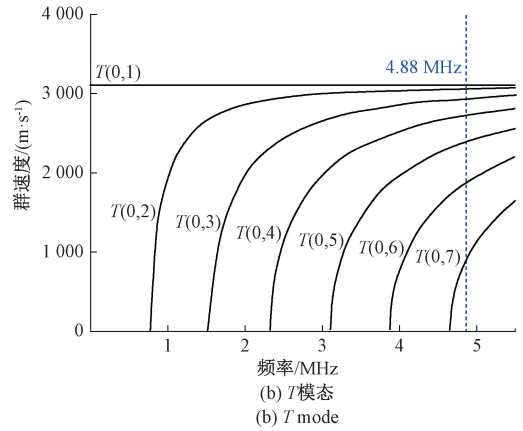
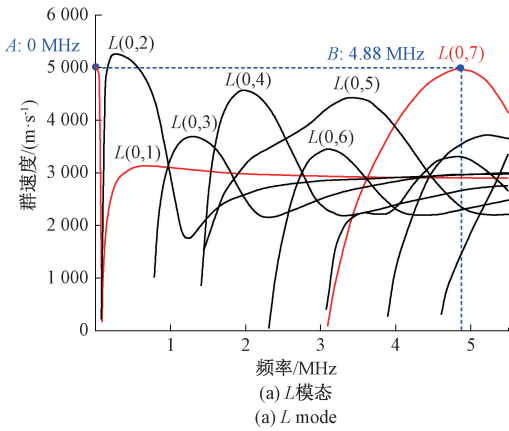


图3 自由圆管的群速度频散曲线

Fig. 3 Group velocity dispersion curve of free pipe

积效应。图3(b)指出 $T$ 模式的群速度随频率增大最终接近3000 m/s,无法满足群速度匹配条件。因此,仿真的激励脉冲信号的中心频率选择4.88 MHz,对应的模式为 $L(0,7)$ 模式。需要指出的是,零频波的累积增长效应不需要满足相速度匹配条件,故不再讨论圆管中导波的相速度频散性质。为了尽可能得到较为纯净的 $L(0,7)$ 模式的信号,于圆管的左端面沿轴向施加一个包含波结构的位移分布函数 $D(x,t)$ ,具体表达式为:

$$D(x,t) = A_0 F(t) \times U_z^{L(0,7)}(x) \quad (5)$$

其中, $A_0 = 10^{-7}$  m。 $F(t)$ 是一个频率为4.88 MHz,周波数为50的汉宁窗调制的正弦激励脉冲信号,其时域信号及其相应的幅频曲线如图4所示。 $U_z^{L(0,7)}(x)$ 是在4.88 MHz频率下 $L(0,7)$ 模式的波结构,如图5所示。图5中 $U_r$ 表示径向位移, $U_z$ 代表轴向位移。因仅探究超声波在圆管结构轴向方向传播的情形,故只在时域信号 $F(t)$ 的基础上增加了轴向位移 $U_z$ 。最后,沿管道外表面的轴向方向距激励初始位置( $z=0$  mm)为60、120、180、200、240以及300 mm处分别设置点探针,来监测沿轴向传播的基频波和零频波时域信号。

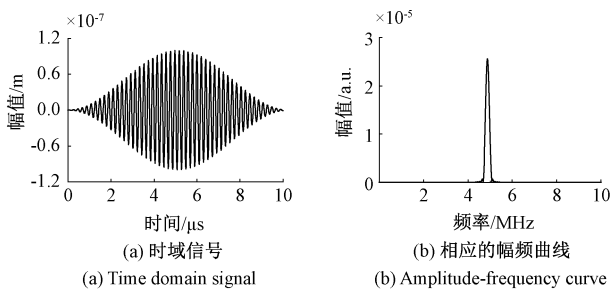
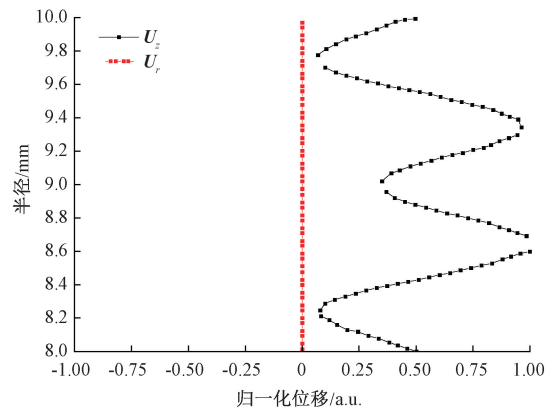


图4 汉宁窗调制的正弦激励脉冲信号

Fig. 4 Hanning window modulated sinusoidal pulse excitation signal

图5 圆管 $L(0,7)$ 模式的波结构Fig. 5 Wave structure of  $L(0,7)$  mode of pipe

此外,为保证计算精度且节约计算资源,该数值模拟采用的时间步长 $\Delta t$ 和网格尺寸 $\Delta l$ 遵循式(6)中的规则。

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{1}{10f_c} \\ \Delta l = \frac{\lambda_c}{10} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $f_c$ 为激励脉冲信号的中心频率, $\lambda_c$ 为该中心频率对应的波长。故本节数值模拟中时间步长和网格尺寸分别是0.02  $\mu$ s和0.1 mm。

图6(a)展示了距激励位置200和300 mm处管道外表面上的轴向位移时域信号。可以看出,高频超声波在圆管中传播时存在强烈的频散现象,具体表现为一个幅值较大的信号后紧随着一系列复杂信号。其中,两个幅值较大信号的峰值时间差为20.8  $\mu$ s,计算得到该信号对应的群速度为4808 m/s,与 $L(0,7)$ 模式的群速度理论值(4964 m/s)基本一致。进一步地,对上述信号进行二维傅里叶变换,结合频散曲线可以得到如图6(b)所示

的圆管波数-频率图像。可以看出,在 4.88 MHz 频率附近,沿纵轴出现多个亮斑,其中  $L(0,7)$  模态的亮斑幅值最大。其他亮斑的存在表示圆管中存在除  $L(0,7)$  模态外的其他  $L$  模态,但这些模态并不显著。因此,图 6(a)中幅值最大的信号对应  $L(0,7)$  模态,之后的复杂波包是传播过程中由于强烈频散而分离的其他模态。需要指出的是,图 6(b)中接近 0 MHz 处也存在一微弱亮斑,该亮斑表明  $L(0,7)$  模态基频波产生了零频波,对应于频率趋近 0 MHz 时的  $L(0,1)$  模态信号。

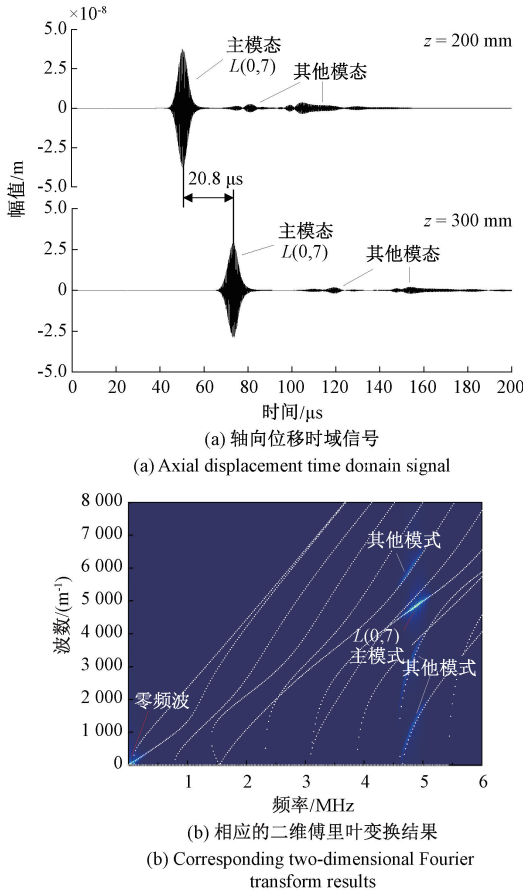


图 6 圆管外壁所接收到的位移信号

Fig. 6 The displacement signal received by the outer wall of pipe

进一步地,利用相位反相方法提取得到 200 和 300 mm 处轴向位移信号中对应的零频波信号。具体操作是:保持中心频率与周波数不变,将激励脉冲信号的相位变为  $\pi$ ,再以同样的方式激励并提取反相后的信号,最后将该信号与原信号相加。上述方法能够消除基频波线性超声波信号及其奇次谐波,保留如零频波以及二次谐波等偶次项非线性信号。最终,提取到的零频波时域信号和相应的短时傅里叶变换结果如图 7 所示。

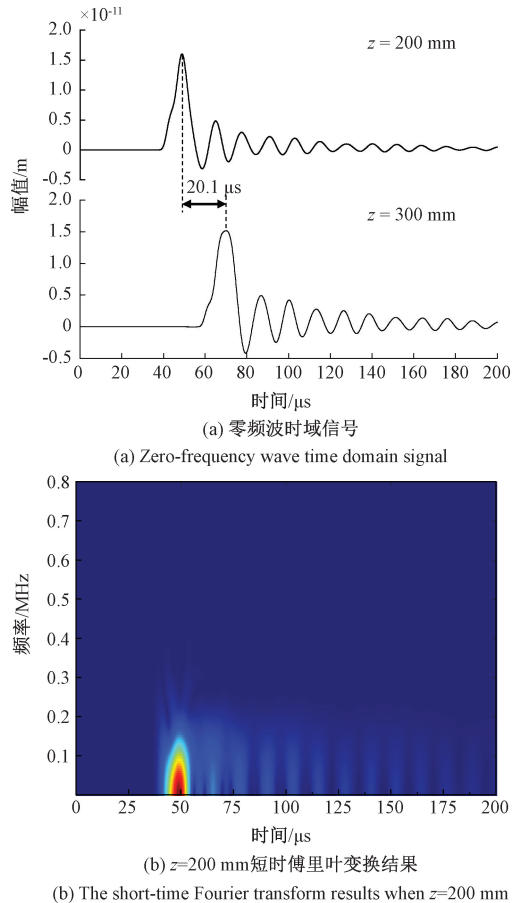


图 7 圆管外壁所接收到的零频波信号与相应的短时傅里叶变换结果

Fig. 7 The zero-frequency wave signal received by the outer wall of pipe and the corresponding short-time Fourier transform result

从图 7(b)可以看出,50  $\mu\text{s}$  附近存在一个频率接近 0 MHz 的信号,其后紧跟一系列复杂信号。观察图 7(a)可知,零频波信号的峰值时间差为 20.1  $\mu\text{s}$ ,计算得到得零频波的群速度为 4 975 m/s,与  $L(0,1)$  模态在 0 MHz 处的群速度理论值(4 991 m/s)几乎一致。由此可确定,上述信号是伴随主模态  $L(0,7)$  产生的零频波信号,紧随其后的复杂信号则是由其他模态引起的滞后的零频波信号。由于满足群速度匹配条件,伴随主模态产生的零频波信号存在明显的累积增长现象。然而,其他模态彼此之间存在群速度上的差异,这些模态将在传播过程中随着距离的增加逐渐分离。同时,伴随其他模态产生的零频波信号又始终滞后于主模态信号,因此导致了如图 7(a)所示的“余振”形态的零频波波包拖长现象。基于上述分析,进一步提取沿传播方向距初始位置( $z=0$  mm)分别为 60、120、180、240 和 300 mm 的管道外表面上的轴向位移时域信号,并对上述信号进行相位反相处理以提取对应的

零频波信号,结果如图8所示。

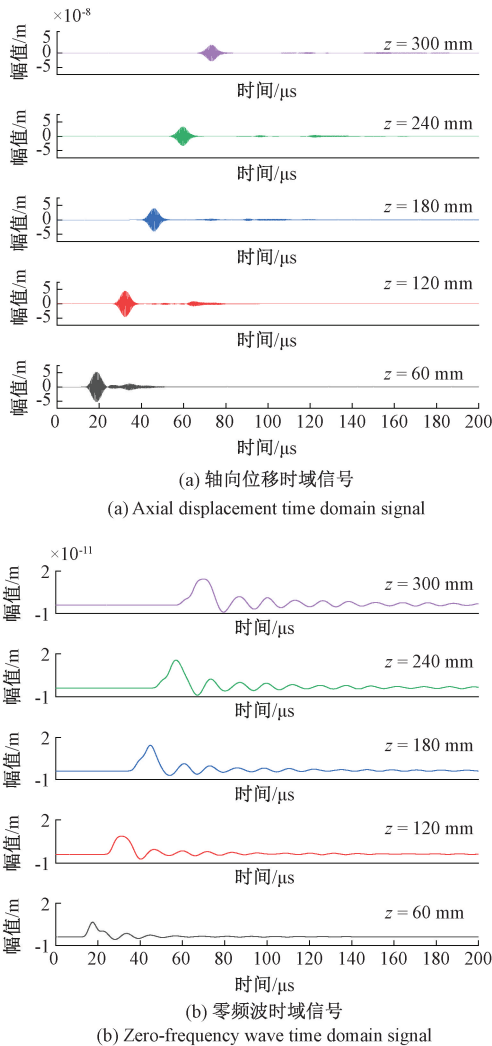


图8 圆管外壁随传播距离变化的位移信号以及对应的零频波信号

Fig. 8 The displacement signal of the outer wall of pipe varies with the propagation distance and the corresponding zero-frequency wave signal

从图8(a)可以看出,基频波各模态随着传播距离的增加逐渐分离开来。类似地,在图8(b)中,“余振”形态的波包也随着传播距离的增大而变长。这一现象间接表明,波包的拖长现象源于其他模态信号在圆管结构中传播时的群速度不匹配。

## 2.2 带包覆层圆管的有限元模拟

与自由圆管不同,带包覆层圆管的外表面通常覆有一层均匀厚度的高分子材料。这种材料通常表现出显著的粘滞性,具有强烈的声吸收衰减特性。与自由圆管模型相比,在其他条件保持不变的情况下,本模型仅在圆管表面增加了一层厚度为0.5 mm的硅橡胶层作为包覆层。

硅橡胶是典型的超弹性材料,其本构方程可由Mooney-Rivlin双参数模型表示,具体的材料参数<sup>[27]</sup>如表2所示。

表2 硅橡胶的材料参数

Table 2 Material parameters of silicone rubber

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/MPa	泊松比	$C_{10}$ /MPa	$C_{01}$ /MPa
1 200	142.29	0.48	19.2	4.8

另一方面,硅橡胶具有显著的声吸收衰减特性<sup>[20]</sup>。以往研究表明,瑞利阻尼( $C = \alpha M + \beta K$ ,其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 是质量阻尼和刚度阻尼系数, $C$ 、 $M$ 、 $K$ 分别是阻尼、质量和刚度矩阵)可以用来模拟超声波在材料中传播时的衰减效应。其中, $\alpha$ 是质量阻尼系数,决定质量对系统阻尼的影响, $\alpha$ 值越大,则表示低频振动的阻尼越大; $\beta$ 是刚度阻尼系数,决定刚度对系统阻尼的影响, $\beta$ 值越大,则表示高频振动的阻尼越大<sup>[28]</sup>。仿真所研究的频率为高频,故设质量阻尼为0,刚度阻尼系数为 $3 \times 10^{-8}$ 。

此外,将探针点设置在沿带包覆层管道外表面的轴向方向上距离初始位置( $z = 0 \text{ mm}$ )为200、300、400、500和600 mm处,以监测沿轴向传播的基频波信号与零频波信号。提取带包覆层圆管外表面 $z = 300 \text{ mm}$ 处的轴向位移时域信号,如图9所示。与自由圆管相同位置相比,带包覆层圆管中的基频波信号幅值在传播过程中减小了3个数量级。

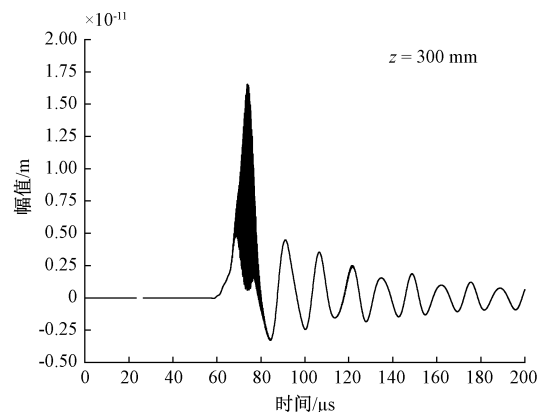


图9 带包覆层圆管外壁300 mm处轴向位移信号  
Fig. 9 Axial displacement signal of the outer wall of the coated pipe at 300 mm

随后,采用相位反相法提取相应的零频波信号并对处理后的信号进行短时傅里叶变换,结果如图10所示。从图10(a)可以看出,带包覆层圆管中的零频波信号与自由圆管中的零频波信号具有高度相似性,但其信号幅值相较于自由圆管的结果仅减小了一半。由此可见,零频波的衰减远小于基频波的衰减。

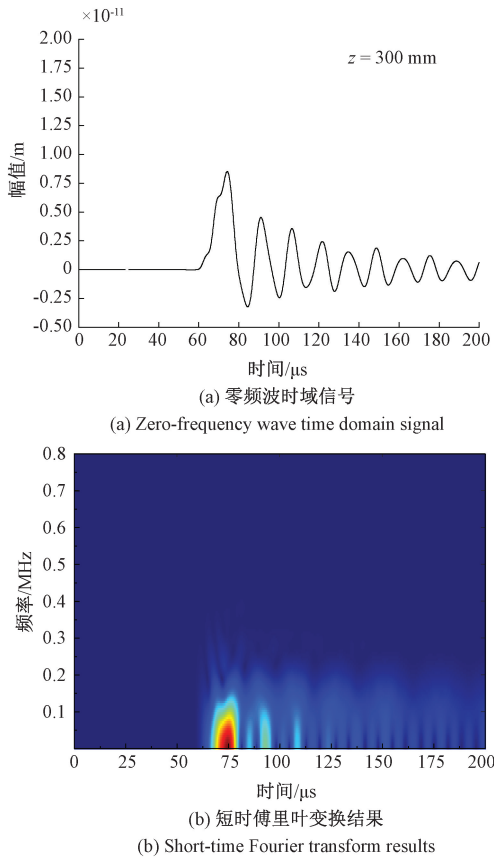


图 10 带包覆层圆管外壁  $z = 300\text{ mm}$  处零频波信号与相应的短时傅里叶变换结果  
 Fig. 10 Zero-frequency wave signal and corresponding short-time Fourier transform results on the outer wall of coated pipe at  $z = 300\text{ mm}$

同样地,分别提取带包覆层圆管中沿轴向方向距初始位置( $z = 0\text{ mm}$ ) 200、300、400、500 和 600 mm 处管道外表面的轴向位移时域信号,并对上述信号进行相位反相处理提取对应的零频波信号,结果如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,随着传播距离的增加,主模态  $L(0, 7)$  的基频波信号幅值逐渐衰减,并在传播至 600 mm 处几乎完全消失。然而,伴随主模态  $L(0, 7)$  传播产生的零频波信号仍然清晰可见,且在从 200 ~ 600 mm 的过程中衰减极小。此外,选定 300 和 500 mm 处的信号计算得到零频波的群速度约为 4 517 m/s,与理论值(4 991 m/s)存在差异。这一点可归因于橡胶包覆层导致圆管的截面尺寸发生了变化,且衰减性质的包覆层的引入会使群速度减小,从而使群速度频散曲线在 0 MHz 处出现少量偏移。该偏移并不会对数值模

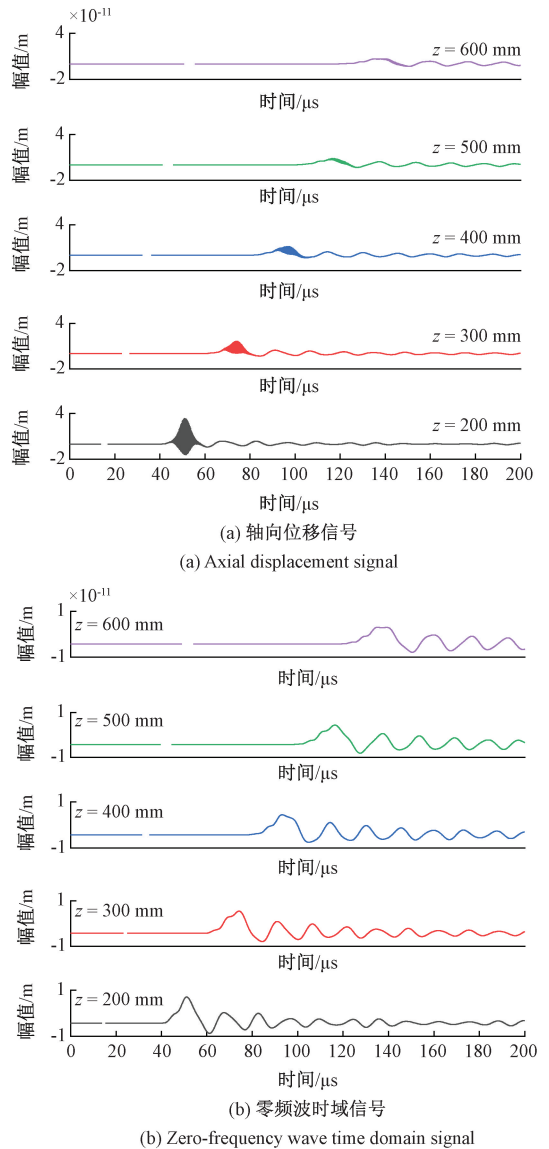


图 11 带包覆层圆管外壁随传播距离变化的轴向位移信号以及对应的零频波时域信号  
 Fig. 11 Axial displacement signal of the outer wall of the coated pipe varies with the propagation distance and the corresponding zero-frequency wave time-domain signal

拟的最终结论产生较大影响。

通过对比自由圆管与带包覆层圆管的数值模拟结果可见,基频波信号在硅橡胶包覆层的衰减作用下受到显著影响,难以传播较远距离。相反,零频波信号因其载波频率为 0 而具有较低的声衰减,可以在带包覆层圆管中传播足够长的距离,有利于带包覆层圆管的缺陷检测。上述的数值模拟结果为后续实验验证提供了重要的依据和指导。



### 3 实验研究

#### 3.1 试件与实验系统

基于前文的理论分析与数值模拟,实验部分将分别比较自由圆管、带包覆层圆管以及具有缺陷的带包覆层圆管中的基频波和零频波信号。4支 6061#铝合金圆管

试件如图 12 所示,图中序号①~④分别表示自由圆管、带包覆层圆管、具有单个缺陷的带包覆层圆管和具有 2 个缺陷的带包覆层圆管。其中金属圆管直径和厚度分别为 20 与 2 mm,而包覆层材料为高声衰减材料聚氯乙烯。为了更直观地区别各试件的差异,试件以及缺陷的具体参数如表 3 所示。人为加工的切口状缺陷如图 13 所示,其长度约为 8 mm。

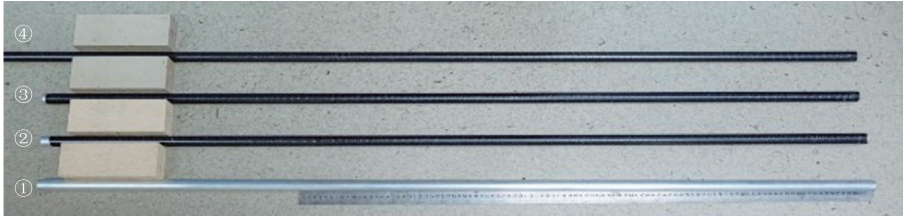


图 12 实验试件

Fig. 12 Experiment specimen

表 3 试件与缺陷参数

Table 3 Specimen and flaw parameters

序号	试件名称	长度/m	包覆层厚度/mm	包覆层长度/m	缺陷数量/个	缺陷相对底面距离/mm	缺陷间距/mm	备注
①	自由圆管	1.5						对照组
②	带包覆层圆管	1.5	0.3	1.5				实验组
③	具有单个缺陷的带包覆层圆管	1.5	0.3	1.5	1	375		实验组
④	具有 2 个缺陷的带包覆层圆管	3.0	0.3	3.0	2	650	650	实验组

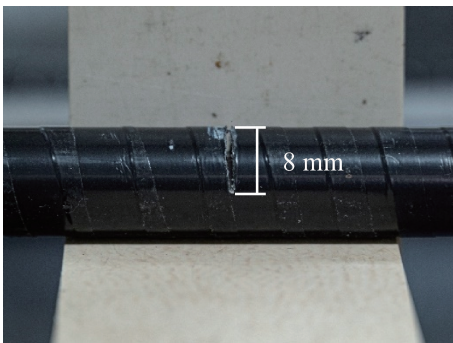


图 13 切口状缺陷

Fig. 13 Notched flaw

搭建如图 14(a)所示的基于 SNAP-5000 的超声实验测量系统。其中 SNAP-5000 是 RITEC 公司所生产的超声测量设备,该设备可输出幅度、宽度以及载波频率可调的射频激励脉冲信号,同时可对接收信号进行分析处理。整个实验流程如图 14(b)所示。首先,通过计算机调整激励信号频率和周波数,由 SNAP-5000 设备输出汉宁窗调制的正弦激励脉冲信号到截止频率为 2.25 MHz 的 RHPF-2.25 高通滤波器中,目的是消除设备本身所带来

的低频信号。接着,滤波后的激励脉冲信号通过双工器输出到双频超声换能器。该双频超声换能器是如图 14(c)所示的一种垂直堆叠结构的双压电陶瓷片的超声换能器<sup>[29]</sup>,能够在激发 5 MHz 高频信号的同时接收 500 kHz 的低频信号。随后,通过 TCA-1 外夹式超声波传感器专用耦合剂使一体化双频超声换能器直接耦合于待测试件端面,并将激励脉冲信号入射到圆管结构中,经过底面反射回来被双频超声换能器接收,并将回波信号输入到 SNAP-5000 设备中。最终由 DOP 3014 示波器显示和储存接收到的回波信号。



(a) 实验系统照片

(a) Experiment system photograph

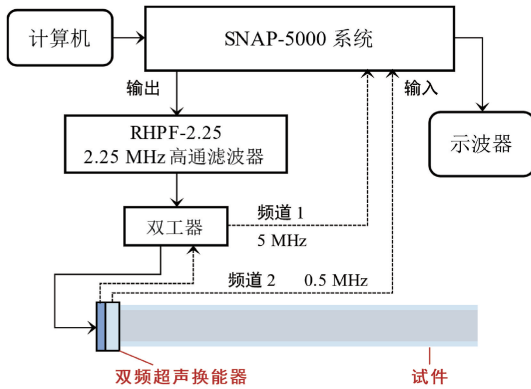


图 14 超声实验测量系统

Fig. 14 Ultrasonic experimental measurement system

需要注意的是,实验中所采用的汉宁窗调制的正弦脉冲激励脉冲信号中心频率与数值模拟中的频率保持一致,为 4.88 MHz。零频波的载波频率为 0,换能器本身响应不到频率为 0 的信号。然而,Deng<sup>[30]</sup>提出用低频超声换能器直接接收高频超声纵波在固体中传播时由材料非线性产生的零频波。为了使响应到的零频波幅值最大,要求零频波的频谱与接收换能器的频响曲线充分重叠,可以通过调整激励信号的周波数来实现。实验发现,当周波数为 240 时,接收到的零频波信号响应最大。因此,后续实验中激励信号采用中心频率为 4.88 MHz,周波数为 240 的汉宁窗调制的正弦脉冲信号。

### 3.2 自由圆管实验

图 15 分别展示了自由圆管中双频超声换能器的高频晶片和低频晶片接收到的时域信号及相应的第 1 次底面回波对应的快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 结果。图 15(a) 中的基频波信号至多观测到 4 次回波,而图 15(b) 中的响应到的零频波信号至少可以观测到 6 次回波。由此可见,零频波的声衰减显著低于基频波。对图 15(c) 和 (d) 的 [0 kHz, 200 kHz] 区间进行局部放大,可以看出,高频晶片接收到 4.88 MHz 的基频波信号和一小部分低频信号,该低频信号可能是由于基线偏移和高频换能器响应到的零频波所致。同样,低频晶片由于带宽较大不仅接收到基波信号,也接收到中心频率为 26 kHz 的低频信号。激励信号本身不含有低频信

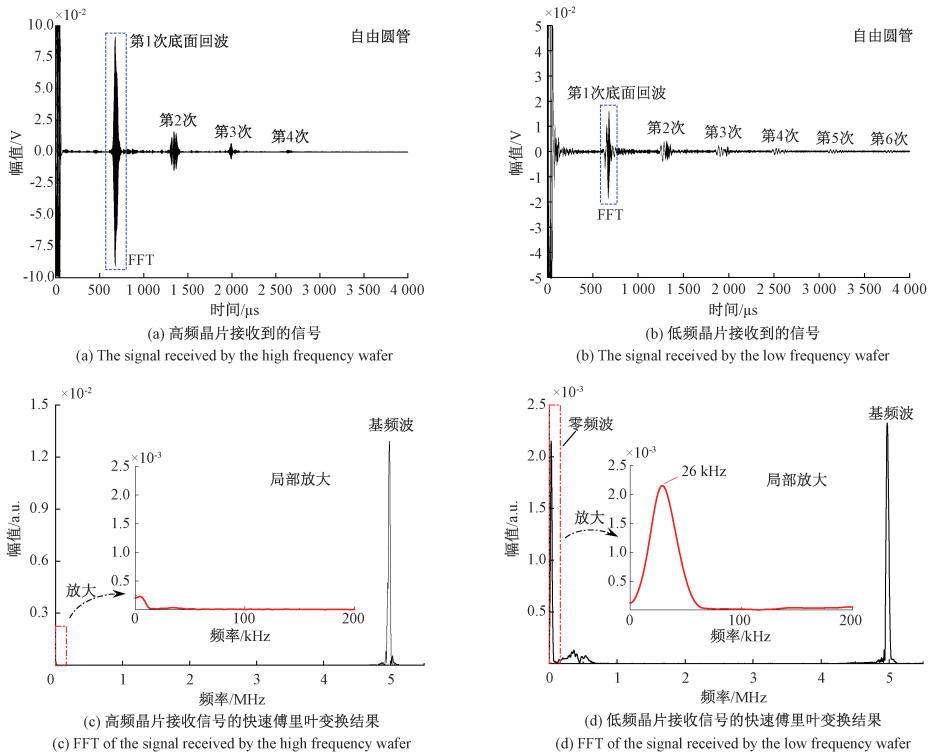


图 15 自由圆管实验结果

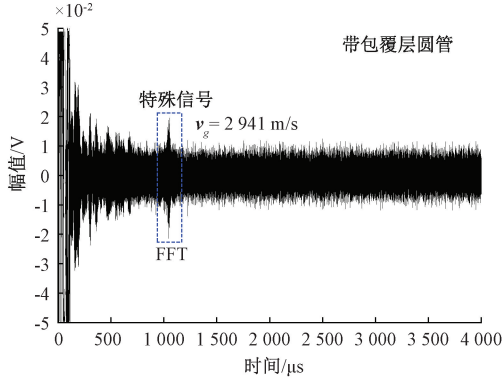
Fig. 15 Experiment results of the free pipe

号成分,故该 26 kHz 的低频信号只能是由材料非线性产生的零频波信号。

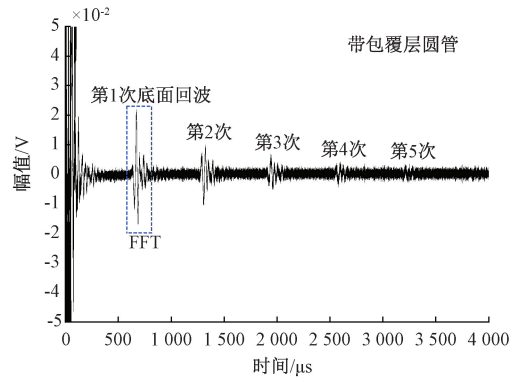
### 3.3 带包覆层圆管实验

图 16(a)和(b)展示了在带包覆层圆管中双频超声换能器所接收到的时域信号。可以看出,基频波因包覆层的高声吸收衰减特性几乎被完全衰减,而零频波仍可

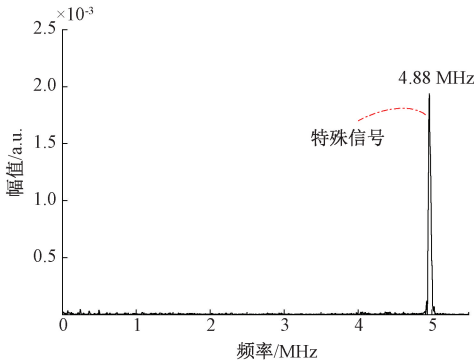
以被观测到 5 次回波。注意到图 16(a)中在 1 020  $\mu\text{s}$  处存在一个特殊信号,对该特殊信号进行快速傅里叶变换得到图 16(c),结果表明该特殊信号是一个中心频率为 4.88 MHz 的脉冲信号。进一步地,对图 16(b)的第 1 次底面回波进行快速傅里叶变换得到图 16(d),结果表明,低频晶片接收到的信号仅包含零频波成分。



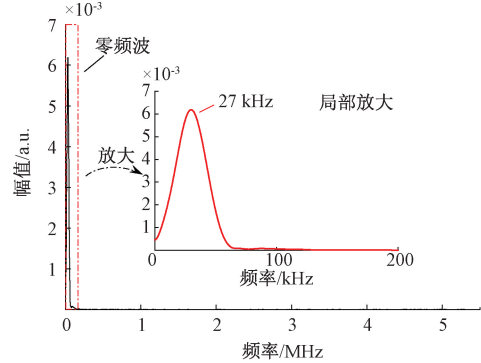
(a) 高频晶片接收到的信号  
(a) The signal received by the high frequency wafer



(b) 低频晶片接收到的信号  
(b) The signal received by the low frequency wafer



(c) 高频晶片接收信号的快速傅里叶变换结果  
(c) FFT of the signal received by the high frequency wafer



(d) 低频晶片接收信号的快速傅里叶变换结果  
(d) FFT of the signal received by the low frequency wafer

图 16 带包覆层圆管实验结果

Fig. 16 Experiment results of the coated pipe

为了确认基频波是否仍存在,在带包覆层圆管端面发射中心频率为 520 kHz,周波数为 50 的激励脉冲信号,并接收其回波信号。所接收到的回波信号及其短时傅里叶变换的结果如图 17 所示。

可以看出,经过 3 m 的传播距离后,520 kHz 激励脉冲信号几乎被完全衰减,仅能检测到零频波信号。而 4.88 MHz  $\gg$  520 kHz,基频波必然被完全衰减,因此该特殊信号可能是一种具有较低衰减的信号。计算特殊信号的群速度  $v_g$  约为 2941 m/s,恰好与图 3(b)中的  $T$  模式在 4.88 MHz 处的群速度近似匹配。因此,该信号可能源自圆管导波中  $L$  模式信号在端面处的反射,经过模式转换后生成  $T$  模式信号<sup>[31]</sup>。目前,已有相关文献报道指出, $T$  模式所具有的低衰减特性能够有效地用于充液或埋地管道的缺陷检测<sup>[32-33]</sup>。

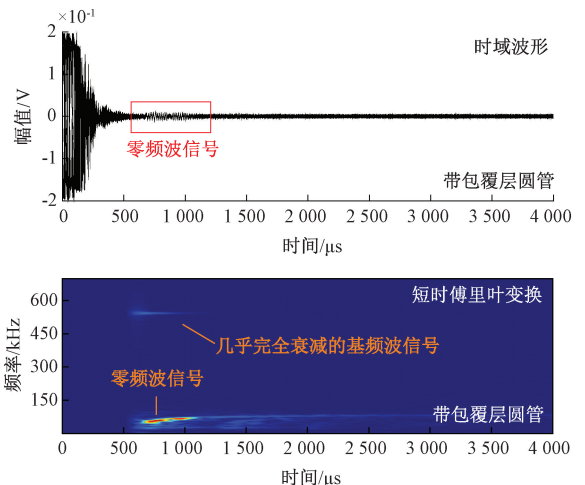


图 17 线性信号(520 kHz)的验证性实验结果

Fig. 17 Verified experimental results of linear signal (520 kHz)

综上所述,4.88 MHz 的  $L$  模态基频波在带包覆层圆管中传播存在巨大衰减,无法有效地检测到回波信号。相反,零频波在传播时所表现出的低衰减特性为带包覆层圆管的缺陷检测提供了依据和指导。

### 3.4 具有缺陷的带包覆层圆管实验

最后,利用零频波分别对带包覆层圆管中的单个缺陷和两个缺陷进行检测。对于具有单个缺陷的带包覆层圆管的实验结果如图 18 所示。

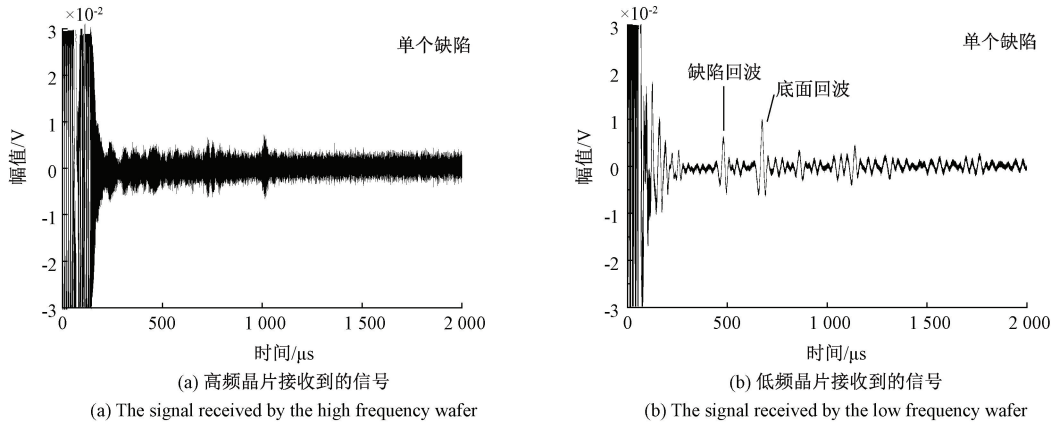


图 18 具有单个缺陷的带包覆层圆管实验结果

Fig. 18 Experimental results of the coated pipe with single flaw

从图 18(a) 中可以看出,基频波信号已经被淹没在噪声当中,未能观察到任何有效的回波信号。而图 18(b) 中能够清晰地观测到来源于缺陷及底面的零频波回波信号。需要注意的是,1 000  $\mu\text{s}$  后的回波信号出现了混叠现象,这主要是零频波在缺陷与两个端面之间存在多次反射造成的。对于缺陷的检测主要关注首次回波信号,1 000  $\mu\text{s}$  后的回波信号不为关注重点。

具有两个缺陷的带包覆层圆管的实验结果如图 19 所示。与单个缺陷的实验结果类似,同样无法观察到任何有效的基波回波信号。相比之下,可以清晰地观测到来源于两个缺陷及底面的零频波回波信号。然而,由于圆管试件及其包覆层的长度增加至 3 m,声衰减进一步增加,导致接收到的零频波信号幅值也有所减小。

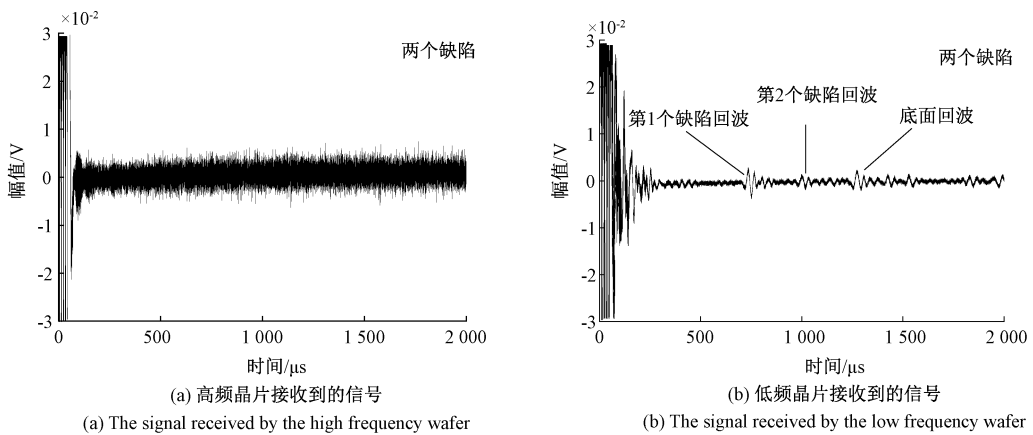


图 19 具有两个缺陷的带包覆层圆管实验结果

Fig. 19 Experimental results of the coated pipe with double flaws

进一步地,对带包覆层圆管缺陷与底面处的零频波信号进行短时傅里叶变换,结果如图 20 所示。可以看出,零频波能够有效地检测带包覆层圆管中的单个或两个缺陷,且缺陷回波信号清晰明显。通过实验测量得到

的带包覆层圆管的缺陷位置与实际缺陷的位置对比结果如表 4 所示。实验结果表明,零频波可以有效地检测和定位带包覆层圆管中的缺陷,且缺陷定位的相对误差较小(不超过 0.39%)。

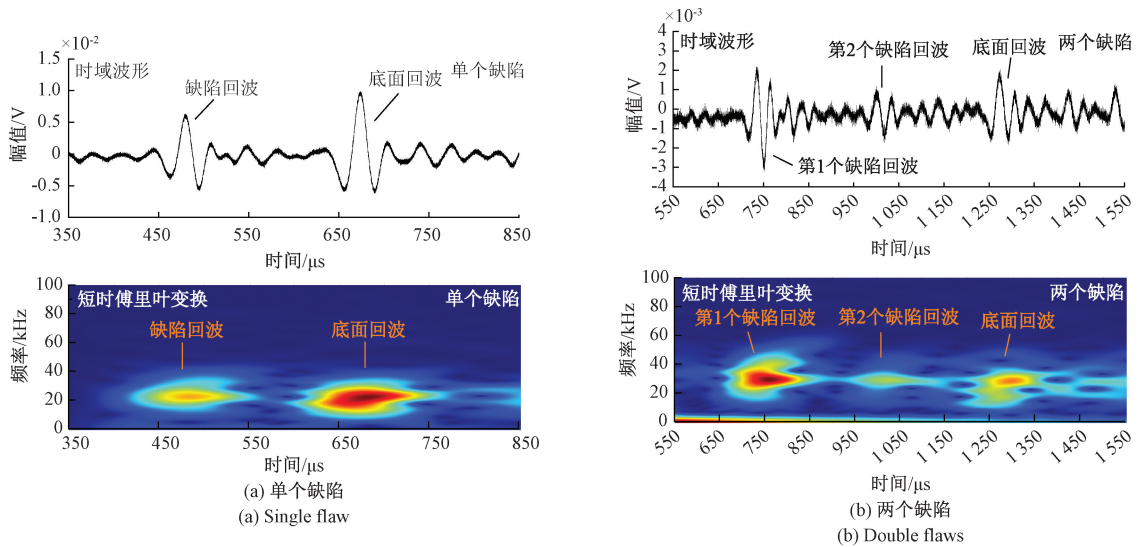


图20 缺陷的零频波信号与短时傅里叶变换结果

Fig. 20 Zero-frequency wave signal of flaws and short time Fourier transform results

表4 缺陷位置及相对误差

Table 4 Flaws location and relative error

项目	具有单个缺陷的 带包覆层圆管	具有两个缺陷的 带包覆层圆管	
零频波的群速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	4 880.1	4 832.4	4 832.4
实验得出的缺陷位置/mm	1 120.8	1 703.5	2 340.8
缺陷的标准位置/mm	1 125.0	1 700.0	2 350.0
缺陷位置的相对误差/%	0.37	0.21	0.39

## 4 结 论

利用载波频率为0的非线性超声零频波所具备的低声衰减特性,提出了一种全新的带包覆层圆管缺陷的超声无损检测方法。理论分析了零频波沿圆管结构轴向传播时的形成过程,数值模拟与实验探究了零频波于自由圆管以及带包覆层圆管中的传播特性。研究表明:

1) 相较于线性基频超声波,非线性超声零频波在带包覆层圆管中展现出良好的抗衰减能力。

2) 在基频波完全衰减的情况下,零频波仍然能够准确地识别出圆管中的切口状缺陷。

因此,所提出的基于超声零频波的带包覆层圆管的检测方法具有低衰减和高信噪比的优点,能够有效地克服具有高衰减特性圆管结构缺陷检测所面临的技术难题,可为圆管超声导波无损检测技术的进一步发展提供有益的参考。

## 参考文献

- [1] WANG X H, YANG L, SUN T, et al. A review of development and application of out-of-pipe detection technology without removing cladding[J]. Measurement, 2023, 219:113249.
- [2] MAY Z, ALAM M K, NAYAN N A. Recent advances in nondestructive method and assessment of corrosion undercoating in carbon-steel pipelines [J]. Sensors, 2022, 22(17):6654.
- [3] 张祎,李素贞. 基于声-压信号融合的城市供水管道泄漏监测[J]. 仪器仪表学报,2024,45(8):69-76. ZHANG Y, LI S ZH. Leakage monitoring of urban water supply pipelines based on fusion of acoustic-pressure signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8):69-76.
- [4] 马亮,安腾飞,刘文黎,等. 基于声信号的给水管微小泄漏检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2024, 38(12):113-123. MA L, AN T F, LIU W L, et al. Research on small leakage detection technology of the pipeline based on acoustic signals[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(12):113-123.
- [5] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1713-1735. HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(8):1713-1735.

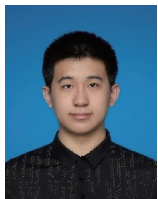
- [ 6 ] WANG Y Q, SONG F, FENG Q SH, et al. Basic theory and applications of oil and gas pipeline non-destructive testing methods[J]. *Energies*, 2024, 17(24): 6366.
- [ 7 ] LAI Q Q, XU C B, WANG G L, et al. Synthetic aperture focusing imaging for defect detection in highly attenuative materials using quasi-static components of ultrasonic longitudinal waves [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 222:111815.
- [ 8 ] ZANG X L, XU ZH D, LU H F, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection; A review[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 206:105033.
- [ 9 ] 魏丞耀,王雪梅,倪文波,等. 衬胶管道脱粘缺陷超声检测与识别方法研究[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(1):23-30.
- WEI CH Y, WANG X M, NI W B, et al. Research on ultrasonic detection and recognition methods for debonding defects in rubber-lined pipe [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(1):23-30.
- [ 10 ] LUO W B, ROSE J L, VAN VELSOR J K, et al. Circumferential guided waves for defect detection in coated pipe [C]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006:165-172.
- [ 11 ] KIRBY R, ZLATEV Z, MUDGE P. On the scattering of torsional elastic waves from axisymmetric defects in coated pipes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(17):3989-4004.
- [ 12 ] KIRBY R, ZLATEV Z, MUDGE P. On the scattering of longitudinal elastic waves from axisymmetric defects in coated pipes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(20):5040-5058.
- [ 13 ] DUAN W B, KIRBY R, MUDGE P. On the scattering of elastic waves from a non-axisymmetric defect in a coated pipe[J]. *Ultrasonics*, 2016, 65:228-241.
- [ 14 ] WANG X H, GU Y P, CHEN Y CH, et al. A new technology for steel pipeline damage detecting without removing cladding [J]. *Measurement*, 2020, 159: 107700.
- [ 15 ] PEDRAM S K, GAN T H, GHAFOURIAN M. Improved defect detection of guided wave testing using split-spectrum processing[J]. *Sensors*, 2020, 20(17):4759.
- [ 16 ] MEMON A M. On detecting internal coating defects in pipes using EMAT[C]. *The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*, 2022:1-10.
- [ 17 ] YU H Y, JIN Q, MENG ZH Z, et al. Detection of defects in polyethylene pipes using open microwave coaxial line resonator sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 358:114427.
- [ 18 ] 吕瑞宏,解海龙,王晨丽,等. 基于空耦超声管道防腐层裂纹识别算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(12):234-245.
- LYU R H, XIE H L, WANG CH L, et al. Research on crack identification algorithm of anti-corrosion layer of air coupling ultrasonic pipeline [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(12):234-245.
- [ 19 ] QU J M, NAGY P B, JACOBS L J. Pulse propagation in an elastic medium with quadratic nonlinearity (L) [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(3):1827-1830.
- [ 20 ] WANG J SH, LAI Q Q, XU C B, et al. High-frequency ultrasound-based thickness measurement of highly attenuating materials [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(3):035004.
- [ 21 ] LAI Q Q, XU C B, WANG G L, et al. Assessment of aging degradation in rubber using quasi-static components of ultrasonic longitudinal waves[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 2025, 8(2):021007.
- [ 22 ] WANG G L, XU C B, LAI Q Q, et al. SAFT imaging for high-density polyethylene using quasi-static components of ultrasonic longitudinal waves[J]. *Ultrasonics*, 2025, 148:107534.
- [ 23 ] GAO M, HU X W, NG CH T, et al. Numerical and experimental investigations on quasi-static component generation of longitudinal wave propagation in isotropic pipes[J]. *Ultrasonics*, 2024, 138:107237.
- [ 24 ] JIANG CH, LI W B, NG C T, et al. Quasistatic component generation of group velocity mismatched guided waves in tubular structures for microdamage localization[J]. *Applied Acoustics*, 2024, 217:109813.
- [ 25 ] JIANG CH, LI W B, NG CH T, et al. Numerical and experimental investigations on quasistatic pulse generation of ultrasonic guided waves in fiber reinforced composite pipes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 574: 118238.
- [ 26 ] 他得安. 超声纵向导波在管状结构中的传播特性研究[D]. 上海:同济大学,2002.
- TA D AN. Studies on the propagation characteristics of ultrasonic longitudinal guided waves in pipes[D]. Shang Hai: Tongji University, 2002.
- [ 27 ] KRMELOVA J, ARTYUKHOV A, KRMELOVÁ V, et al. Determination of material parameters of rubber and composites for computational modeling based on experiment data [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1741(1):012047.
- [ 28 ] 施有志,林树枝,赵花丽. 瑞利阻尼参数对瑞利波作用

下场地动力响应的影响[J]. 人民长江, 2017, 48(3): 75-80.

SHI Y ZH, LIN SH ZH, ZHAO H L. Influence of Rayleigh damping parameters on field dynamic response under Rayleigh wave action[J]. Yangtze River, 2017, 48(3): 75-80.

- [29] LAI Q Q, LU L, XU C B, et al. A novel pulse-echo piezoelectric transducer for detecting quasi-static component induced by an ultrasonic longitudinal wave[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(3): 035118.
- [30] DENG M X. An experimental approach for detection of the acoustic radiation induced static component in solids[J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(7): 24-27.
- [31] SONG ZH H, QI X SH, LIU Z H, et al. Experimental study of guided wave propagation and damage detection in large diameter pipe filled by different fluids[J]. NDT & E International, 2018, 93: 78-85.
- [32] SHOJI M, SAWADA T. Guided wave attenuation in cylindrical bars surrounded by soil [C]. 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2013: 170-173.
- [33] LIU F L, LI ZH Y, HUANG X F, et al. A defects detection method of buried liquid-filled pipes based on  $T(0,1)$  guided waves [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-12.

## 作者简介



孙弋, 2023 年于西南科技大学获得学士学位, 现为重庆大学航空航天学院硕士研究生, 主要研究方向为非线性超声检测。

E-mail: sunyi7029@foxmail.com

**Sun Yi** received his B.Sc. degree from Southwest University of Science and Techno-

logy in 2023. He is currently a master student with the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. His main research interest is nonlinear ultrasonic detection.



赖泉青, 2019 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 2023 年于重庆大学获得硕士学位, 现为重庆大学航空航天学院博士研究生, 主要研究方向为非线性超声无损检测。

E-mail: 17863951714@163.com

**Lai Quanqing** received his B.Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2019, and received his M.Sc. degree from Chongqing University in 2023. He is currently a Ph.D. candidate with the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. His main research interest is nonlinear ultrasonic non-destructive testing techniques.



邓明晰(通信作者), 1986 年于四川大学获得学士学位, 1989 年于南京大学获得硕士学位, 2002 年于同济大学获得博士学位, 现为重庆大学航空航天学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为超声和非线性超声。

E-mail: mx deng@cqu.edu.cn

**Deng Mingxi** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Sichuan University in 1986, received his M.Sc. degree from Nanjing University in 1989, and received his Ph.D. degree from Tongji University in 2002. He is currently a professor and a Ph.D. advisor with the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. His main research interests include linear and nonlinear ultrasound.