

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312194

基于周向 SH 导波的钢制环氧套筒胶结缺陷检测方法研究*

张宏远,殷晓康,赵雨生,袁新安,李伟

(中国石油大学(华东)海洋物探及勘探开发装备国家工程研究中心 青岛 266580)

摘要:钢制环氧套筒目前已在油气管道损伤修复领域得到广泛应用,其树脂层的胶结质量对管道修复后的补强效果至关重要。对此,本文提出了基于电磁超声周向 SH 导波的钢制环氧套筒胶结缺陷检测方法。首先,通过建立有限元模型研究了周向 SH0 模式导波在钢制环氧套筒结构中的传播特性;其次,采用有限元仿真与实验研究相结合的方式探究了周向 SH0 模式导波检测钢制环氧套筒胶结层内预制的阶梯型贯穿空腔缺陷的可行性。仿真和实验结果均表明,SH0 模式直达波幅值与空腔宽度基本呈线性正相关,说明该方法可实现对胶结层中贯穿型空腔缺陷的检测,并且可区分空腔大小,验证了所提方法用于检测钢制环氧套筒胶结缺陷的可行性。

关键词:钢制环氧套筒;EMAT;周向 SH 导波;胶结缺陷;管道损伤修复

中图分类号:TH878 TB552 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**140.2076 43025

Research on detection method of bonding defects of steel epoxy sleeves based on circumferential SH guided waves

Zhang Hongyuan, Yin Xiaokang, Zhao Yusheng, Yuan Xin'an, Li Wei

(National Engineering Research Center of Marine Geophysical Prospecting and Exploration and Development Equipment, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Steel epoxy sleeves have found extensive applications in the repair of damage in oil and gas pipelines, and the bonding quality of the resin layer is crucial for the reinforcing effect after repair. In this paper, a method for inspecting the bonding defects in steel epoxy sleeves utilizing Circumferential Shear Horizontal (CSH) guided waves generated by Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) was proposed. Firstly, the propagation characteristics of CSH0 mode guided wave in the steel epoxy sleeve were studied by establishing a finite element model. Secondly, the feasibility of using CSH0 mode guided wave to detect step-type through-cavity defects pre-made in the bonding layer of the steel epoxy sleeve was explored through a combination of finite element simulation and experimental research. Both simulation and experimental results consistently indicate that the amplitude of the direct wave of the CSH0 mode is basically linearly correlated with the cavity width. This suggests that the method can effectively detect through-type cavity defects in the bonding layer and distinguish their sizes. This verifies the feasibility of the proposed method for detecting bonding defects in steel epoxy sleeves.

Keywords: steel epoxy sleeves; EMAT; circumferential SH guided waves; bonding defects; pipeline damage repair

0 引言

钢制环氧套筒修复技术由于具有无需焊接、无需停输、施工效率高等优势而被广泛应用于管道损伤修复中^[1-3]。在钢制环氧套筒的安装过程中,其中一个关键流

程是将环氧树脂填充至套筒和管壁之间的密闭环形空间,最终形成一个完整的加固体系^[2,4]。之后,在管道缺陷部位产生的应力集中将由管道、树脂层、螺栓以及套筒几部分共同承担,从而实现对损伤部位的有效修复^[1,4]。然而,由于环氧树脂灌注过程中存在的施工不当等问题,易导致钢制环氧套筒胶结层(即树脂层)内

收稿日期:2023-11-25 Received Date: 2023-11-25

* 基金项目:国家自然科学基金(52075549, 52275556)、国家重点研发计划(2023YFF0615200)、中石油重大科技项目(ZD2019183004)资助

出现气泡、空腔(或未灌满)等缺陷,使得管道所受应力传递不佳,从而严重影响套筒的补强效果^[3,5]。因此,对钢制环氧套筒树脂层的胶结缺陷进行无损检测的意义重大。

目前,研究人员多采用有限元仿真以及开展力学试验的方法对钢制环氧套筒的补强效果进行测试^[3,6-7]。国内外将无损检测技术直接用于检测钢制环氧套筒胶结缺陷的报道较少,但超声检测技术常用于检测与钢制环氧套筒结构类似的多层结构的胶结质量^[8]。Song 等^[9]采用空气耦合超声激励 Lamb 波,并利用 Lamb 波在结构中传播的频散及衰减特性的变化检测了钢-混凝土界面的胶结情况。Chen 等^[10]采用压电换能器激励表面波,并通过分析表面波的能量泄漏及其模式转换情况对钢-混凝土的界面脱粘缺陷进行了检测。

本文采用周期性永磁铁式电磁声换能器(periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducers, PPM EMAT)激励零阶周向水平剪切(circumferential shear horizontal, CSH)导波的方法对钢制环氧套筒的胶结缺陷进行检测,相比之下该方法具有以下两点优势:

1) SH 导波的频散特性简单,且 CSH0 模态仅具有弱频散特性^[11-12];

2) EMAT 可实现非接触检测,拥有更强的模式控制能力^[13-18]。

综上,本文首先采用 COMSOL 建立了胶结层内预制阶梯型贯穿空腔的钢制环氧套筒结构的三维有限元模型,并研究了 CSH0 模态导波在钢制环氧套筒结构中的传播特性;其次,分别通过有限元仿真及实验研究的方式对不同尺寸的空腔缺陷进行扫查,以研究 CSH0 模态导波检测钢制环氧套筒胶结层内空腔缺陷的可行性,进而验证所提方法用于检测钢制环氧套筒胶结缺陷的有效性。

1 理论基础

1.1 CSH 导波与 PPM EMAT

在单层各向同性钢管中,CSH 导波的频散方程如式(1)所示,其详细的推导过程可参考文献[19]。

$$\det(\mathbf{D}(p, \omega)) = 0 \quad (1)$$

式中: p 为角波数; ω 为角频率;系数矩阵 $\mathbf{D}$ 可表示为:

$$\mathbf{D}(p, \omega) =$$

$$\begin{bmatrix} J_{p-1}(k_s r_1) - J_{p+1}(k_s r_1) & Y_{p-1}(k_s r_1) - Y_{p+1}(k_s r_1) \\ J_{p-1}(k_s r_2) - J_{p+1}(k_s r_2) & Y_{p-1}(k_s r_2) - Y_{p+1}(k_s r_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: J 、 Y 分别是第 1 类、第 2 类贝塞尔函数; $p-1$ 与 $p+1$ 均为贝塞尔函数的阶数; k_s 为横波的环向波数; r_1 、 r_2 分别为钢管的内、外半径。

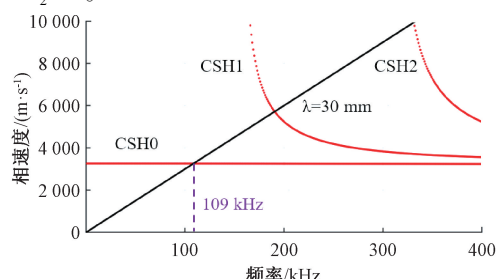
在半径 r 处导波的线性相速度和群速度可表示为:

$$c_p(r) = \frac{\omega}{p} \quad (3)$$

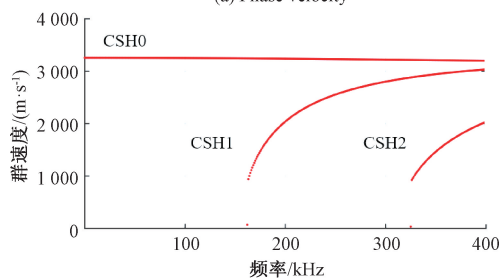
$$c_g(r) = \frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (4)$$

式中: c_p 与 c_g 分别为相速度和群速度。

求解式(1)可得到 CSH 导波在频率-波数平面内的频散曲线,再通过式(3)和(4)即可分别求得 CSH 导波的相速度和群速度频散曲线。对于厚度、外径和横波波速分别为 10 mm、260 mm、3 130 m/s 的钢管,所得的 CSH 导波相速度和群速度频散曲线如图 1 所示。由于是在套筒外壁进行 CSH 导波的激励与接收,因此式(3)和(4)中取 $r=r_2$ ^[20]。



(a) 相速度
(a) Phase velocity



(b) 群速度
(b) Group velocity

图 1 10 mm 厚、260 mm 外径钢管的 CSH 导波频散曲线

Fig. 1 Dispersion curves of CSH guided waves in a steel pipe with a 10 mm thick and 260 mm outer diameter

从图 1 中可以看出,与其他模态相比,CSH0 模态仅具有弱频散特性,并且在低频厚积范围内可实现单一模态激励且不易发生模式转换,进而可大幅降低信号的分析难度^[21]。因此,本文选择在低频范围内激励单一 CSH0 模态用于钢制环氧套筒的胶结缺陷检测。此外,需要说明的是,对于钢制环氧套筒这类多层管道结构来讲,管道层数的增加会增大 CSH 导波的衰减,并改变导波在管壁上的能量分布及模态数量,但当在模态较少的低频范围内时可选用单层套筒上 CSH 导波的频散曲线近似代替整个钢制环氧套筒结构^[20]。

图 2 为位于管道外壁的典型 PPM EMAT 结构示意图,主要由周期分布的永磁铁阵列和跑道型线圈组成。

其中钢管的厚度为 w , 单个磁铁的宽度为 d , 相同极性磁铁的中心间距为 λ , 即所激励 CSH 导波(或 PPM)的标称波长, 且当左右相邻的磁铁单元直接接触时满足 $\lambda = 2d$ 。

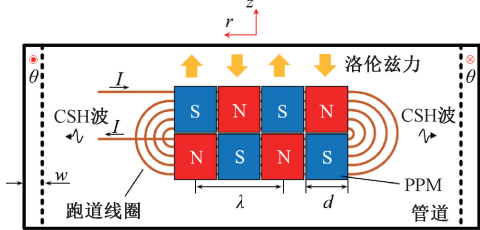


图 2 位于管道外壁的典型 PPM EMAT 示意图
Fig. 2 Schematic of PPM EMAT located on the outer wall of a pipe

PPM EMAT 的激励机制如下: 当线圈中通入交变电流后会在管道外壁诱导出与外壁平行且与线圈内电流方向相反的交变涡流 J_e 。由于涡流的集肤深度较浅, 在周期分布的偏置磁场 B 的作用下即可在外壁表面生成周期分布的轴向洛伦兹力 F_L ^[22-23], 如式(5)所示, 从而激励出与洛伦兹力方向垂直并沿管道周向传播的 CSH 导波。

$$F_L = J_e \times B \tag{5}$$

虽然 PPM EMAT 会在钢管表面同时产生洛伦兹力与磁致伸缩力, 但其中洛伦兹力机制占主导^[24-25], 因此本文忽略磁致伸缩机制的影响。同时, 考虑到 EMAT 的重量和体积, 本文选用 1 周期、波长为 30 mm(即每个磁铁单元的宽度 d 为 15 mm)的 PPM 制作 EMAT。

此外, 观察图 1(a) 可知, $\lambda = 30$ mm 的波长线与 CSH0 模态频散曲线的交点频率为 109 kHz。之前有研究表明^[26], 在钢管中激励 CSH 导波时, CSH0 模态的激发强度(即信号幅值)会随着激励频率的降低而升高。然而, 频率降的过低会导致信号的脉宽增大, 从而在探头间距一定时会使得近侧(short path, SP)直达波受串扰影响过大并同时可能出现 SP 与远侧(long path, LP)直达波包混叠的问题; 同理, 信号的周期数也不能过多。此外, 为避免因激励信号的频率带宽过大而同时激励出高阶模态, 则要求信号的周期数不能过少^[11]。综上, 最终选定了 EMAT 的激励信号为中心频率等于 100 kHz 的 3 周期 Hann 窗调制的余弦信号, 如图 3 所示。

1.2 胶结层空腔缺陷检测原理

钢制环氧套筒的结构组成示意图如图 4 所示, 分别由上、下 2 部分钢制套筒、环氧树脂以及高强度螺栓组成^[1]。

图 5 为从简化后的钢制环氧套筒轴向截面所见的 CSH 导波检测胶结层内空腔缺陷的探头布置图, 采用的是一发(T)一收(R)配置。由激励探头 T 产生的 CSH 导波会沿钢制套筒的周向同时进行顺时针与逆时针方向的

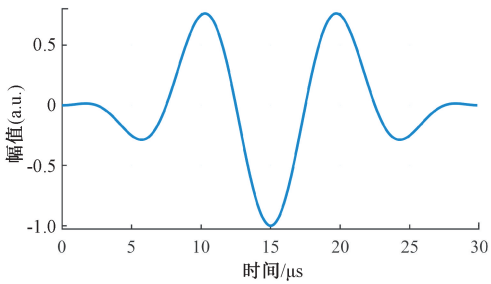


图 3 中心频率为 100 kHz 的 3 周期 Hann 窗调制余弦信号波形
Fig. 3 Temporal waveform of a 3-cycle Hann windowed modulated cosine signal with a center frequency of 100 kHz

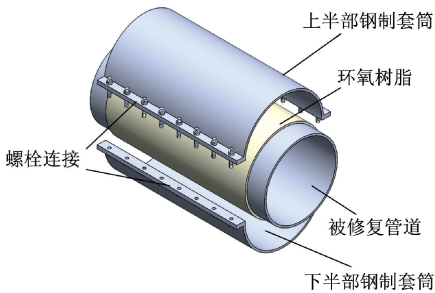


图 4 钢制环氧套筒结构示意图
Fig. 4 Schematic of the structure of the steel epoxy sleeve

传播, 则对于接收探头 R 来讲, 顺时针传播的 CSH 导波为 SP 波, 逆时针传播的为 LP 波, 如图 5 中标注所示。

当钢制套筒内壁与环氧树脂界面(即第一界面)胶结良好时, 由于钢制套筒与环氧树脂的声阻抗相差不大, 因此在钢制套筒内部传播的 CSH 导波会有一部分泄漏(或透射)进入树脂层中, 如图 5 中标注所示。由此可知, 钢制套筒内的 CSH 导波在传播过程中产生的衰减主要包括在套筒中的几何扩散衰减及其离开套筒向树脂层中泄漏能量而造成的泄漏衰减^[27]。

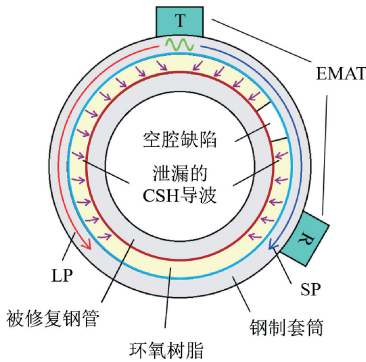


图 5 CSH 导波空腔检测 EMAT 布置图
Fig. 5 EMAT layout diagram for CSH guided waves cavity detection

此外,由于 CSH 导波属于剪切波,其无法在空气中传播,因此当 CSH 导波经过贯穿型空腔缺陷时(如图 5 中标注所示),CSH 将无法向空腔中泄漏能量。即表明与完好区域相比,CSH 导波保留在钢制套筒内的成分更多,产生的泄漏衰减更小,因此所得信号 SP 直达波的幅值更高。

2 有限元仿真

2.1 有限元模型设置

本文采用商业有限元软件 COMSOL Multiphysics 对钢制环氧套筒胶结层空腔缺陷检测进行仿真研究,所建立的钢制套筒-环氧树脂-钢管的三维多层管道模型如图 6 所示。

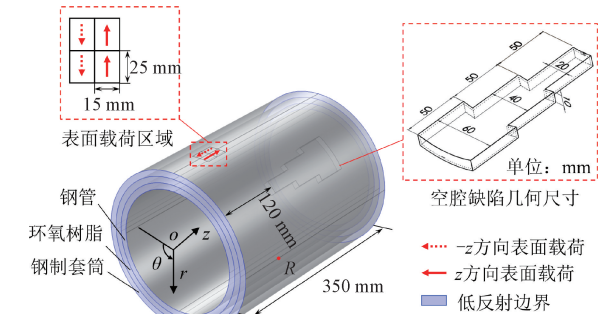


图 6 空腔缺陷检测的仿真模型

Fig. 6 Simulation model for cavity defects detection

其中,钢制环氧套筒结构的长度为 350 mm,钢管、树脂层、钢制套筒内/外径尺寸及其各自的材料参数分别如表 1、2 所示。此外,在树脂层内建立了与钢管外壁和套筒内壁弧度一致的宽度分别为 20、40、60 mm 的阶梯型贯穿空腔,每部分的长度为 50 mm,厚度为 10 mm。为避免边界反射的影响,在模型两侧截面处均设置了低反射边界。

表 1 钢制环氧套筒尺寸参数表

Table 1 Dimensional parameters of the steel epoxy sleeve

描述对象	mm	
	内径	外径
钢管	200	220
环氧树脂	220	240
钢制套筒	240	260

假设 EMAT 与钢制套筒之间的提高很小,则可将 EMAT 产生的洛伦兹力视为在空间上沿套筒周向呈周期均匀分布的表面力^[28-30]。采用在套筒外壁施加沿 z 或 -z 方向均匀分布的表面载荷(图中分别用实线和虚线箭

表 2 钢制环氧套筒的材料参数表

Table 2 Material parameters of the steel epoxy sleeve

描述对象	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν
钢管	7 850	200	0.30
环氧树脂	1 132	4	0.35
钢制套筒	7 850	200	0.30

头表示)的方式来模拟 EMAT 所产生的洛伦兹力,同时所施加的载荷在时域内随激励信号的变化而变化^[31-32]。模型中共创建了 4 个载荷单元以对应 1 周期 PPM 中的磁铁单元,载荷单元的长度和宽度分别为 25 mm 与 15 mm,表面载荷区域的中心与阶梯型空腔缺陷的轴线之间的圆心角为 45°。

为了探究 CSH 导波经过完好胶结(空腔缺陷为 0 mm)、20 mm、40 mm、60 mm 空腔缺陷时对信号直达波幅值的影响,通过修改表面载荷区域中心的 z 值,使其分别位于 $z = 80 \text{ mm}$ 、 $z = 145 \text{ mm}$ 、 $z = 195 \text{ mm}$ 和 $z = 245 \text{ mm}$ 处,从而使得 CSH 导波传播经过不同宽度空腔缺陷的轴向中心位置,实现对空腔缺陷的扫查。所用激励信号为中心频率为 100 kHz 的 3 周期 Hann 窗调制余弦信号,如图 3 所示。接收点的轴向位置与表面载荷区域中心始终保持一致,在周向与表面载荷区域中心相距套筒外壁的 1/4 周长(即所对应圆心角为 90°)。

需说明的是,仿真模型中假设除了预设空腔位置之外的其余区域均胶结良好;此外,如 1.2 节所述,空腔缺陷检测主要关注的是 SP 直达波幅值的变化,因此本文忽略了钢制套筒两侧的螺栓连接部位可能出现的反射波的影响。

2.2 仿真结果分析

首先,以表面载荷中心在无空腔位置($z = 80 \text{ mm}$)为例,研究了 CSH0 模态导波在钢制环氧套筒结构中的传播特征,所得不同时刻下 CSH0 模态的轴向截面位移场快照如图 7 所示。从图 7(a)中可见,在 10.6 μs 时钢制套筒内已存在 CSH0 导波,并可见其通过第一界面(钢制套筒-树脂层)向树脂层中泄漏能量;在 20 μs 时,钢制套筒及树脂层内的导波成分已经开始沿周向同时进行逆时针与顺时针方向的传播,并且树脂层内的导波已通过第二界面(树脂层-钢管)透射进入钢管中,如图 7(b)所示;当到了 36 μs 时,由第二界面反射回树脂层的导波成分会再次透射进入钢制套筒内,如图 7(c)所示;随后,钢制套筒内的直达波以及二界面反射回波先后沿周向继续向两侧传播,如图 7(d)所示。

图 8 为 49 μs 时不同宽度空腔位置处 CSH0 模态的轴向截面位移场快照。从图 8 中可看出,对于钢制套筒中的 CSH 导波而言,其在钢制套筒中传播时主要分为沿

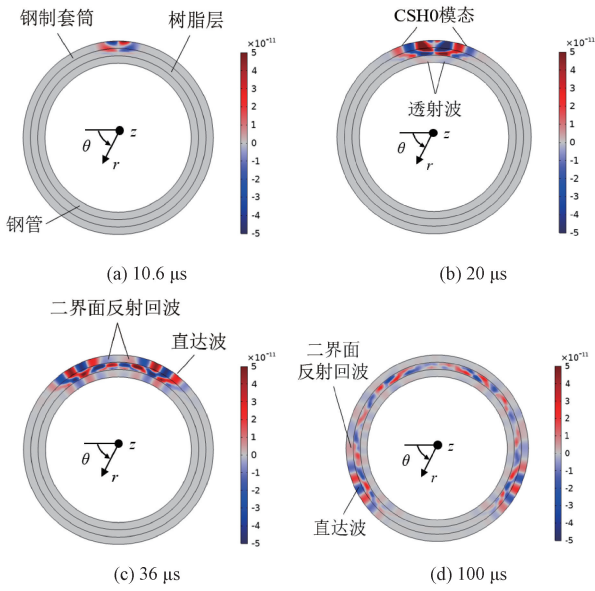


图7 不同时刻下 CSH0 模态轴向截面位移场快照

Fig. 7 Snapshots of the axial cross-sectional displacement field of CSH0 mode at different times

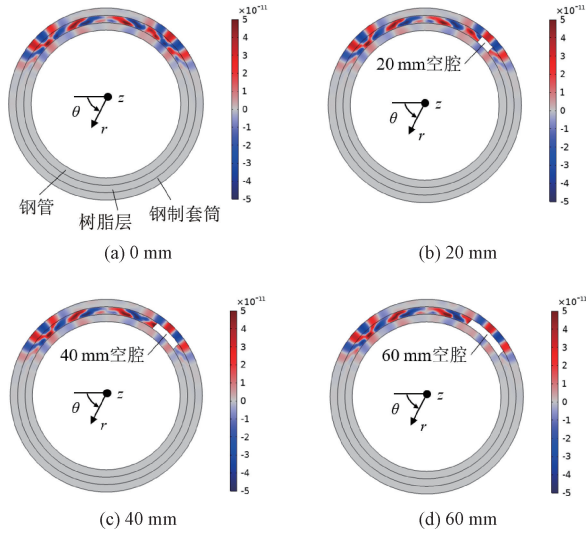


图8 49 μs 时不同宽度空腔处 CSH0 模态轴向截面位移场快照

Fig. 8 Snapshots of the axial cross-sectional displacement field of CSH0 mode at cavities with different widths at 49 μs

套筒传播以及向树脂层中泄漏的部分。然而,如 1.2 节所述,由于 CSH 导波无法在空气中传播,因此当沿钢制套筒周向传播的 CSH0 模态导波遇到树脂层中的贯穿型空腔缺陷时(如图 8(b)、(c)、(d)所示),其会保留在钢制套筒内部通过空腔区域而不会向空腔中泄漏能量,则此时接收信号中的直达波幅值相比无空腔区域(如图 8(a)所示)会有所增大;同时,随树脂层中空腔宽度的

增大,CSH0 模态导波向树脂层中泄漏的能量会逐渐减少,即保留在钢制套筒内部的导波成分逐渐增多,因此 SP 直达波的幅值逐渐变大。

仿真中在不同宽度空腔位置所得的 CSH0 模态信号时域波形如图 9 所示,其中 B 代表空腔宽度。由图 7(d)可知,直达波在沿钢制套筒周向传播的过程中后方会跟随二界面反射回波,即接收信号波形中会同时包含 CSH0 模态直达波与二界面反射回波成分,二者在时域上的分布大体如图 9 中标注所示。由于树脂层的厚度较薄,即表明 CSH0 模态导波穿过树脂层到达第二界面再经由二界面反射后穿过树脂层返回到外层钢制套筒的时间较短,因此易出现二界面反射波与直达波混叠的问题。然而,由于在检测胶结层内空腔缺陷时主要关注的是直达波幅值的变化,因此在检测中需要避免二界面反射回波的影响。

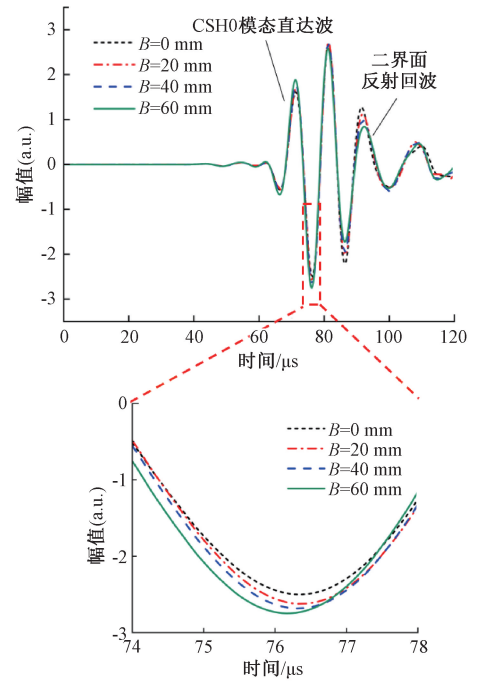


图9 不同宽度空腔处所得的 CSH0 模态仿真信号时域波形

Fig. 9 Temporal waveforms of CSH0 mode simulation signals obtained from cavities with different widths

进一步分析可知,由于 CSH0 模态导波由钢制套筒透射进入树脂层时会在二界面之间出现多次反射,因此第 1 次经由二界面反射穿过树脂层返回到钢制套筒的二界面回波到达时间最早,其传播距离 $L = 20$ mm。在已知环氧树脂的材料参数(如表 2 所示)的前提下,由式(6)及(7)即可求得树脂的剪切波波速 c_s 以及二界面反射波的到达时间 t_0 。

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (6)$$

$$t = \frac{L}{c_s} \tag{7}$$

式中： E 、 ρ 、 v 分别为环氧树脂材料的杨氏模量、密度和泊松比。

求得 c_s 与 t 分别为 1 144 m/s 和 17.5 μ s，即在 17.5 μ s 时二界面反射回波与直达波发生混叠，并一同沿钢制套筒的周向继续传播。由图 3 可知，17.5 μ s 处于激励信号第二周期的后半段。由于 CSH0 模态仅具有弱频散特性，即当传播距离较小时可近似认为接收信号直达波波包不发生频散。因此，在图 9 中可同样认为二界面回波从直达波第二周期后半段开始与直达波发生混叠，并且从图 9 中接收信号直达波波包形状也可看出，其与图 3 所示的参考信号形状显然不符，尤其在 80 μ s 后，考虑是由于此时已经出现了直达波与二界面反射回波混叠的问题所致。

为避免该问题，此处选取图 9 中直达波波包第二周期的峰值做后续分析，如图 9 中虚框位置所示。从图 9 的局部放大图中可以看出，第二周期峰值的绝对值随空腔宽度的增大而增大。为更好的观察该趋势，提取了各扫查位置第二周期的峰值并绘制了其与空腔宽度的关系图，如图 10 所示。观察图 10 可知，CSH0 模态直达波第二周期的峰值与空腔宽度基本呈现线性正相关。该结果与图 8 中预期的结果一致，因此证明了采用 CSH 导波的方法可实现对钢制环氧套筒胶结层中贯穿空腔缺陷的检测，并可区分空腔的宽度大小。

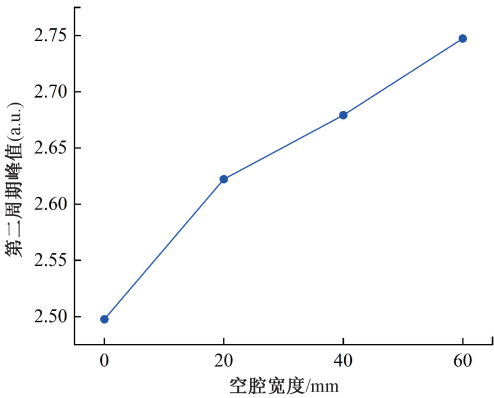


图 10 仿真信号直达波第二周期峰值与空腔宽度关系图
Fig. 10 The relationship between the second period amplitudes of direct waves of simulation signals and the cavity widths

3 实验研究

3.1 PPM EMAT 与钢制环氧套筒试件制备

为验证仿真结果开展了相应的实验研究。首先进行了 PPM EMAT 的试制与封装，EMAT 与铝合金封装外壳

的结构组成及几何尺寸示意图如图 11 所示。所采用的 PPM 为 1 周期 30 mm 波长，其中每个磁铁单元的长、宽、高分别为 25 mm、15 mm、20 mm，磁铁由 NdFeB 材料制作而成，其型号为 N48。所用跑道型线圈由漆包铜线绕制而成，线径为 0.2 mm，匝数为 122，其宽度和长度分别为 50 mm 与 80 mm。所用封装外壳下侧边缘的弧度与钢制套筒外壁一致，其后盖上预制了 4 个螺栓孔以便与外壳固定连接，后盖中间的圆孔为信号线的通孔。

在探头封装时，首先将 PPM 与跑道线圈固定并置于外壳内部，保持线圈与外壳的下边缘齐平；其次，在外壳底面粘贴防磨胶带进行封口，在保证密封的同时可避免线圈磨损；最后，从壳体上方灌注环氧树脂胶并固定后盖，待胶水固化后即完成探头的封装。

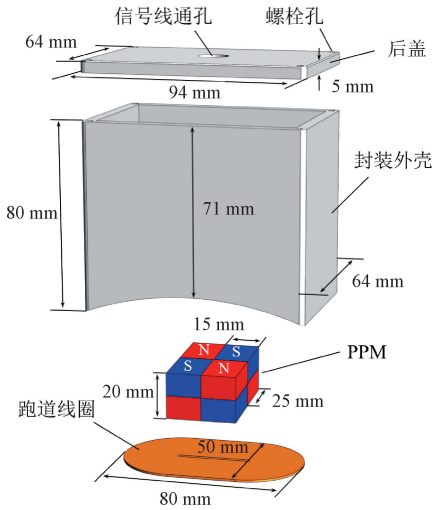


图 11 PPM EMAT 与封装外壳结构组成及几何尺寸示意图
Fig. 11 Schematic of the structure and geometric dimensions of PPM EMAT and the shell

对于钢制环氧套筒试件，由于其实际的制作工艺较为复杂（涉及密封与抽真空等环节），因此本文在不影响说明胶结层检测的前提下对钢制环氧套筒试件的制备进行了简化。采用内、外两层且中间带有环空的钢管（材料参数如表 2 所示）等效被修复管道与钢制套筒，试件整体可视为钢管-环氧树脂-钢管的三层管道结构。其中每层的内、外径尺寸与仿真参数相同（如表 1 所示），外层管道的高度为 350 mm。为便于试件的装配，所用内层管道的高度为 400 mm，并预制了用于固定内、外层钢管位置的树脂底座。此外，为模拟胶结层中存在的空腔缺陷，3 D 打印了与仿真模型中尺寸相同的阶梯形空腔缺陷，其为树脂材料，并对内部进行了抽壳处理，壁厚为 1 mm。

钢制环氧套筒试件的制作过程如图 12 所示，具体步骤如下：

1) 固定空腔：配置少量双酚 A 型环氧树脂（材料参

数如表 2 所示,下同)将阶梯形空腔固定在外层管内壁轴向的中心位置,即空腔的上、下端距外层管的上、下边缘的距离均为 100 mm,同时在吊环处缠绕尼龙绳进一步固定空腔位置;

2) 固定内外管:先后将外层管(带有预制空腔)与内层管对中置于底座上,并配置少量双酚 A 型环氧树脂填充内、外层钢管底面与底座之间的缝隙,以起到密封作用并便于之后环氧树脂的灌注;

3) 灌注环氧树脂:将配置好的双酚 A 型环氧树脂缓慢灌注于内、外层管的环空中,为避免树脂层固化过程中产生气泡缺陷,将环氧树脂的灌注过程分为 3 次,每次静置一段时间等待树脂中气泡排出后,再进行下一次灌注,直至最终灌满为止。

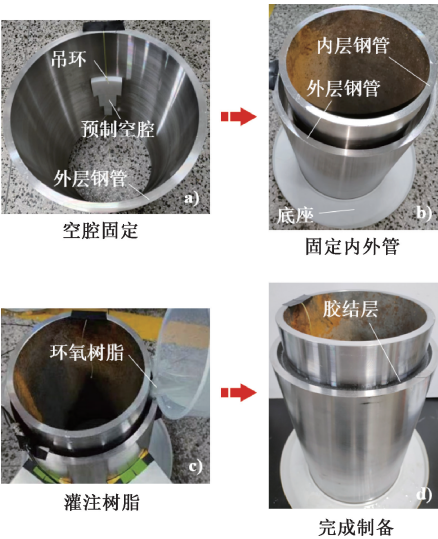


图 12 钢制环氧套筒试件的制作过程

Fig. 12 Manufacturing process of the steel epoxy sleeve specimen

3.2 空腔检测实验系统与实验方案

待环氧树脂固化完成后,即可进行树脂层空腔缺陷的检测实验。所搭建的实验系统如图 13 所示,主要由高功率脉冲发射/接收器(RPR-4000, RITEC, USA)、任意波形发生器(TGA-1241, Aim-TTi, UK)、示波器(DPO-2002B, Tektronix, USA)、RT-150(150 Ω 电阻终端)、激励/接收 EMAT 以及钢制环氧套筒试件组成。同时,在实验中所用的激励信号与仿真一致,均为中心频率为 100 kHz 的 3 周期 Hann 窗调制余弦信号。

胶结层空腔缺陷检测的实验方案及探头布置如图 14 所示。首先,以预制空腔缺陷的中心为对称轴将激励 EMAT(T)与接收 EMAT(R)布置于空腔缺陷两侧

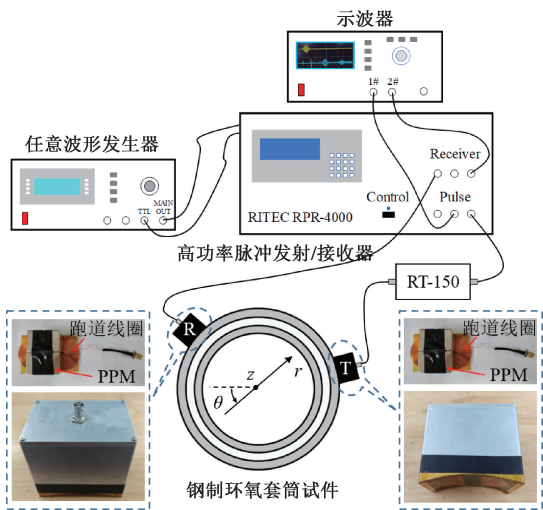
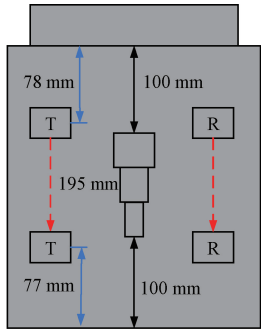


图 13 实验系统示意图

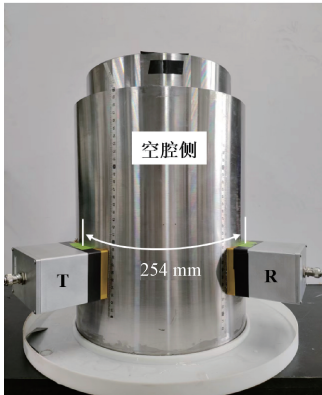
Fig. 13 Schematic of the experimental setup

图 14(a)中虚线箭头所示,扫描距离为 195 mm,步长为 5 mm。



(a) 示意图

(a) Schematic



(b) 实物图

(b) Actual picture

图 14 胶结层空腔缺陷检测实验方案及探头布置图

Fig. 14 Experimental plan and probe layout for cavity defects detection in bonding layer

3.3 实验结果分析

将线扫描实验所得波形数据绘制为时间-扫描位置的

二维平面图,如图 15 所示,图中已根据扫查位置确定了不同宽度的空腔区域,从中可清晰观察到 SP 直达波与二界面反射回波。由于本文检测空腔缺陷时主要关注 SP 直达波幅值的变化,因此不对二界面反射回波做展开分析。

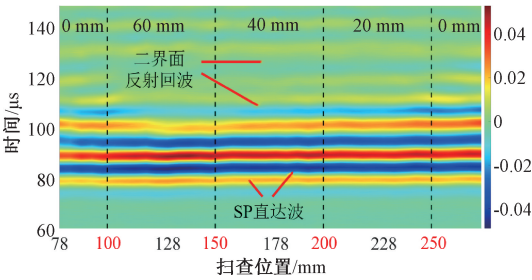


图 15 空腔检测实验线扫描结果图

Fig. 15 Line scan results of cavity detection experiment

选取其中 128 mm 位置的接收信号波形用于导波模式识别,如图 16 所示。采用飞行时间法计算了直达波波包的群速度,其中波包的到达时间为 79.46 μs ,传播距离为 254 mm,计算所得的波包实际群速度约为 3 197 m/s。由图 1(b)可知,当中心频率为 100 kHz 时 CSH0 模态的理论群速度为 3 252 m/s,该值与波包的实际群速度接近,且相对误差仅为 1.02%,因此可认定线扫描实验中所激励的是 CSH0 模态导波。

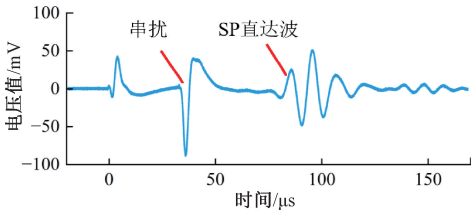


图 16 128 mm 处所得接收信号时域波形

Fig. 16 Temporal waveform of the received signal obtained at 128 mm

为了在不受二界面回波混叠影响的前提下对比分析不同扫查位置 CSH0 模态 SP 直达波幅值的变化,采用与仿真分析中相同的做法,即提取 SP 直达波波包第二周期的峰值用于后续分析,所绘制的第二周期峰值-扫查位置的关系图如图 17 所示。其中不同宽度空腔区域及上、下方的无空腔区域(0 mm)均已在图中标出。从不同区域的散点图中可以看出,无空腔区域的幅值整体明显小于有空腔区域,并且随着空腔宽度的增大,不同区域幅值整体呈增大趋势,如图中箭头所指。

为了更加清晰地对比不同宽度空腔区域内接收信号直达波幅值的大小,计算了图 17 中不同区域内线扫描结果的平均值,并绘制了平均峰值-空腔宽度关系图,如图 18 所示。从中可见随空腔宽度的增大,CSH0 模态导波直达波的平均峰值基本呈线性增长趋势。

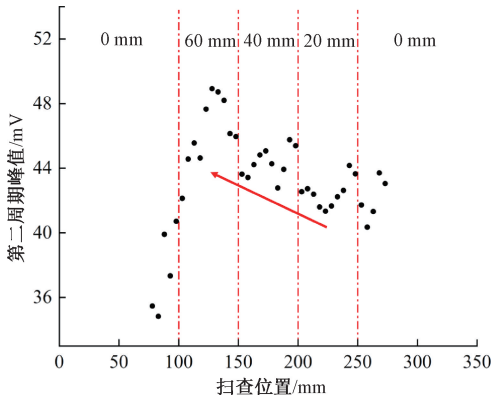


图 17 实验信号直达波第二周期峰值与扫查位置关系图

Fig. 17 The relationship between the second period amplitudes of direct waves of experimental signals and the scanning location

进一步地,分别对图 10 与图 18 中的直达波峰值进行归一化处理,得到如图 19 所示的仿真和实验结果对比图。可以看出,在不同空腔宽度下,所得仿真和实验结果的峰值大小及其变化趋势均基本一致,因此仿真的结果得到了验证,并同样证实了本文所提方法用于检测钢制环氧套筒胶层内部贯穿型空腔缺陷的可行性。

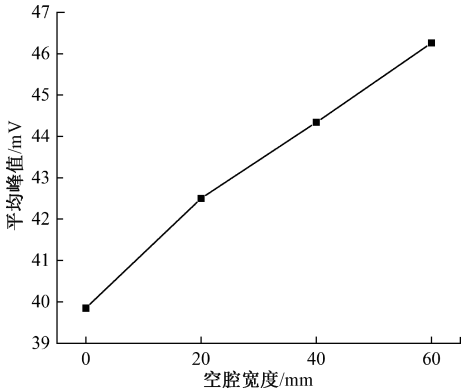


图 18 平均峰值与空腔宽度关系图

Fig. 18 The relationship between the average peak values and the cavity widths

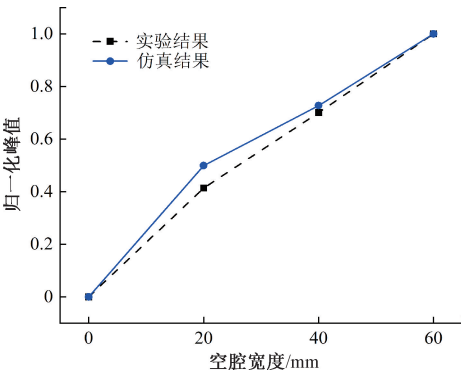


图 19 仿真与实验结果对比图

Fig. 19 Comparison of simulation and experimental results

4 结 论

本文采用电磁超声激励CSH0模态导波对钢制环氧套筒胶结层内空腔缺陷的检测进行了研究,所得结论如下:

1) 仿真结果表明,在套筒内激励的CSH0模态导波在沿套筒周向传播时会向树脂层及内部钢管中泄漏能量;同时,经树脂-钢管界面(第二界面)反射后的导波会穿过树脂层透射到套筒中随直达波继续沿套筒周向传播;

2) 钢制环氧套筒胶结层空腔缺陷检测的有限元仿真及实验研究的结果均表明,CSH0模态直达波幅值与空腔宽度近似呈线性正相关,证明了通过分析CSH导波直达波幅值的变化不仅可实现对钢制环氧套筒胶结层中贯穿型空腔缺陷的检测,而且可区分空腔的大小;

3) 本研究后续拟对不同厚度的非贯穿型空腔以及胶结层中其他缺陷类型(如界面脱粘、气泡等)作进一步分析,同时考虑钢制套筒结构的螺栓连接部位对检测结果的影响,以为后续将该方法应用在实际工程中提供基础。

参考文献

- [1] 庞平,董绍华. 钢制套筒环氧补强缺陷修复技术开发与应用研究[J]. 管道技术与设备, 2019(4): 44-48.
PANG P, DONG SH H. Development of steel socket epoxy reinforcement defection repair technology and application research [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2019(4): 44-48.
- [2] 余东亮,杨川,吴东容,等. X80管道环焊缝缺陷钢质环氧套筒补强试验[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 997-1007.
YU D L, YANG CH, WU D R, et al. Reinforcement test of epoxy-filled steel sleeves for girth weld defects of X80 pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 997-1007.
- [3] 蔡梓建,高勇杰,朱立,等. 钢制环氧套筒修复环焊缝缺陷管道影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(3): 130-136.
CAI Z J, GAO Y J, ZHU L, et al. Study on influencing factors of steel epoxy sleeve in repairing pipeline with girth weld defects[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(3): 130-136.

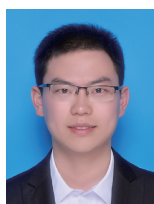
- [4] 敬铎源. 钢制环氧套筒加固管道界面性能及加固效果分析[D]. 绵阳:西南科技大学, 2023.
JING D Y. Analysis of interface performance and reinforcement effect of steel epoxy sleeve reinforcement pipeline[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [5] 李翔. 环氧套筒修复技术研究[D]. 成都:西南石油大学, 2018.
LI X. Study on the repair technology of epoxy sleeve[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [6] CAO J, JIA H D, MA W F, et al. Repair reliability analysis of a special-shaped epoxy steel sleeve for low-strength tee pipes[J]. Metals, 2022, 12(12): 2149.
- [7] 赵秀芳,段宇航,蒋毅. 环氧套筒用于环焊缝缺陷修复适用性研究[J]. 当代化工研究, 2020(14): 150-153.
ZHAO X F, DUAN Y H, JIANG Y. Study on the applicability of epoxy sleeve for repairing defects of girth welds[J]. Modern Chemical Research, 2020(14): 150-153.
- [8] PATTERSON D, INGRAM S, MATUSZYK P J, et al. Enhanced cement bond evaluation in thick casing utilizing guided acoustic modes generated by electromagnetic acoustic transducers[C]. OTC Brasil. OnePetro, 2017: D021S017R003.
- [9] SONG H, POPOVICS J S. Characterization of steel-concrete interface bonding conditions using attenuation characteristics of guided waves[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83: 111-124.
- [10] CHEN H B, XU B, ZHOU T M, et al. Debonding detection for rectangular CFST using surface wave measurement: Test and multi-physical fields numerical simulation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 238-254.
- [11] CLOUGH M, FLEMING M, DIXON S. Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound[J]. NDT & E International, 2017, 86: 20-27.
- [12] 刘增华,钟栩文,李欣,等. 基于全向性SH0模态磁致伸缩贴片型传感器阵列的铝板缺陷成像研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 8-15.
LIU Z H, ZHONG X W, LI X, et al. Research on damage imaging based on omnidirectional SH0 mode

- magnetostrictive patch transducers array in aluminum plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 8-15.
- [13] 黄祺凯, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的钢板电磁超声 Lamb 波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 117-127.
- HUANG Q K, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the detection method of the steel plate with Lamb wave EMATs based on phase coded pulse compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 117-127.
- [14] 石文泽, 陈巍巍, 陈尧, 等. 基于脉冲压缩技术的高温连铸坯壳厚度测量 EMAT 设计及应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 119-130.
- SHI W Z, CHEN W W, CHEN Y, et al. Design and application of an EMAT for solidification shell thickness detection in continuous casting slab based on the pulse compression technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 119-130.
- [15] 石文泽, 陈巍巍, 卢超, 等. 基于脉冲压缩技术的金属锻件缺陷跑道线圈 EMAT 检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 86-97.
- SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Research on racetrack coil EMAT detection technology of metal forging defect based on the pulse compression technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 86-97.
- [16] LI W, WANG Z, YIN X, et al. Differential electromagnetic acoustic probes for quantitative detection of pipeline cracks[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 23(9): 9820-9831.
- [17] 李伟, 邵鑫宇, 张伯莹, 等. 交流电磁场和电磁超声复合无损检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 153-159.
- LI W, SHAO X Y, ZHANG B Y, et al. Research on composite ACFM and EMAT nondestructive testing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 153-159.
- [18] LIU Z H, HUO ZH L, LI AI L, et al. Development of an omnidirectional SH0 mode electromagnetic acoustic transducer employing a circumferential periodic permanent magnet array[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7691-7701.
- [19] ZHAO X L, ROSE J L. Guided circumferential shear horizontal waves in an isotropic hollow cylinder[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 115(5): 1912-1916.
- [20] ZHANG X, CHENG J, LIU G, et al. Circumferential shear horizontal guided wave crack inspection of 3PE-coated pipes based on a CNN[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(2): 42.
- [21] KUBRUSLY A C, FREITAS M A, VON DER WEID J P, et al. Interaction of SH guided waves with wall thinning[J]. NDT & E International, 2019, 101: 94-103.
- [22] ZHAI G F, LI Y Q. Single SH guided wave mode generation method for PPM EMATs[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(5): 371-378.
- [23] SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Interaction of circumferential SH0 guided wave with circumferential cracks in pipelines[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 36(5): 571-596.
- [24] RIBICHINI R, CEGLA F, NAGY P B, et al. Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(12): 2571-2581.
- [25] RIBICHINI R, NAGY P B, OGI H. The impact of magnetostriction on the transduction of normal bias field EMATs[J]. NDT & E International, 2012, 51: 8-15.
- [26] 陈雪莲, 庄妍, 夏飞月, 等. 在套管中激发环向传播的准 SH 波的有限元模拟及实验研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65(4): 1519-1527.
- CHEN X L, ZHUANG Y, XIA F Y, et al. Finite element simulation and experiment study on exciting quasi-SH wave circumferentially in the casing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(4): 1519-1527.
- [27] 陈雪莲, 庄妍, 殷晓康, 等. 套管中环向传播的准 SH 波的衰减特征[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4402-4412.
- CHEN X L, ZHUANG Y, YIN X K, et al. Attenuation characteristics of quasi-SH wave propagating circumferentially in a casing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(10): 4402-4412.
- [28] MURAVEVA O V, MURAVEV V V, MYSHKIN Y V.

Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic-acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors [J]. *NDT & E International*, 2018, 93: 40-56.

- [29] XIANG L, GREENSHIELDS D, DIXON S, et al. Phased electromagnetic acoustic transducer array for Rayleigh wave surface defect detection [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(7): 1403-1411.
- [30] KUBRUSLY A C, KANG L, DIXON S. Selective simultaneous generation of distinct unidirectional wave modes in different directions using dual-array transducer [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 187: 109942.
- [31] KUBRUSLY A C, FREITAS M A, VON DER WEID J P, et al. Mode selectivity of SH guided waves by dual excitation and reception applied to mode conversion analysis [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(7): 1239-1249.
- [32] KUBRUSLY A C, KANG L, DIXON S. Optimal unidirectional generation of a dispersive wave mode with dual-array transducer [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 177: 109138.

作者简介



张宏远, 2018 年于东北石油大学获得学士学位, 2021 年于东北石油大学获得硕士学位, 现为中国石油大学(华东)博士研究生, 主要研究方向为电磁超声无损检测技术。

E-mail: dynupe@163.com

Zhang Hongyuan received his B. Sc. degree in 2018 from Northeast Petroleum University, and received his M. Sc. degree in 2021 from Northeast Petroleum University. He is currently pursuing a Ph. D. degree at China University of Petroleum (East China). His main research interest is electromagnetic ultrasonic non-destructive testing technique.



殷晓康(通信作者), 2005 年于华东理工大学获得学士学位, 2007 年于英国华威大学获得硕士学位, 2011 年于英国华威大学获得博士学位, 现为中国石油大学(华东)教授, 主要研究方向为电磁无损检测与结构健康监测技术。

E-mail: xiaokang.yin@upc.edu.cn

Yin Xiaokang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2005 from East China University of Science and Technology, received his M. Sc. degree in 2007 from University of Warwick, and received his Ph. D. degree in 2011 from University of Warwick. He is currently a professor in China University of Petroleum (East China). His main research interests include electromagnetic non-destructive testing and structural health monitoring techniques.