

引文: 刘刚, 张旭, 闫朔, 等. 聚乙烯板壳结构早期性能退化的非线性导波评价方法[J]. 油气储运, 2025, 44(8): 899-911.

LIU Gang, ZHANG Xu, YAN Shuo, et al. Nonlinear guided wave evaluation method for detecting incipient performance degradation in polyethylene plate/shell structure[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(8): 899-911.

## 聚乙烯板壳结构早期性能退化的非线性导波评价方法

刘刚<sup>1</sup> 张旭<sup>1</sup> 闫朔<sup>2</sup> 张泽徽<sup>1</sup> 董雨轩<sup>1</sup> 马云修<sup>1,2</sup> 陈雷<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气与新能源储运安全重点实验室;  
2. 国家管网集团(徐州)管道检验检测有限公司

**摘要:** 【目的】聚乙烯板壳结构早期损伤程度的定量表征对于保障油气设施的安全服役与预防维护至关重要。传统超声检测技术的可检缺陷精度受波长衍射极限的限制, 对材料早期性能退化与结构微纳尺度缺陷并不敏感。而非线性导波评价方法易受复杂环境中的温度变化与结构应力干扰, 会严重影响检测结果的可靠性与准确性。【方法】结合热致声弹性理论与超弹性本构方程, 建立温度-应力耦合作用下板壳结构的频散分析模型, 量化不同导波模态相速度对环境温度变化与结构应力的敏感性, 为损伤检测中导波激励模态的优选提供指导。采用离散压电单元代替传统叉指换能器, 提出一种基于时空调谐的压电阵列结构及导波激励模态控制方法, 构建阵列激发特性的理论分析模型, 并通过试验验证不同激发参数对导波激励声场的影响。搭建非线性超声导波检测系统, 结合相位反转技术与低通滤波处理, 提取损伤信号中的零频响应特征, 引入非线性声学参数以定量表征聚乙烯试样的早期性能退化程度。【结果】 $S_0$  模态、 $SH_0$  模态与中高频范围(超过 20 kHz·mm)的  $A_0$  模态对环境温度变化与结构应力都具有较弱的敏感性。采用自主研制的 1-3 型压电复合阵列探头能够在聚乙烯平板中实现单一导波模态的控制激励, 从而大幅降低检测信号的分析难度。零频响应的时域形貌与激励信号的脉冲包络相似, 其频域幅值在传播过程中可持续累积。此外, 聚乙烯试样中非线性声学系数会随老化时间的延长而增大。【结论】非线性超声导波的零频响应对材料微观组织演化具有较高的检测灵敏度, 可定量评估聚乙烯板壳结构的早期性能退化, 为油气设施剩余寿命预测提供可靠的数据支撑。(图 17, 参 35)

**关键词:** 聚乙烯板壳结构; 早期性能退化; 老化损伤; 超声导波; 零频响应

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)08-0899-13

DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2025.08.007](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2025.08.007)

## Nonlinear guided wave evaluation method for detecting incipient performance degradation in polyethylene plate/shell structure

LIU Gang<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, YAN Shuo<sup>2</sup>, ZHANG Zehui<sup>1</sup>, DONG Yuxuan<sup>1</sup>, MA Yunxiu<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//Shandong Provincial Key Laboratory of Oil, Gas and New Energy Storage and Transportation Safety; 2. PipeChina (Xuzhou) Pipeline Inspection and Testing Co., Ltd.

**Abstract:** [Objective] Quantitative characterization of the extent of incipient damage in polyethylene plate/shell structures is crucial for ensuring the safe operation and preventive maintenance of oil and gas facilities. However, traditional ultrasonic testing techniques are limited by the accuracy of detectable defects due to the wavelength diffraction limit, rendering them insensitive to incipient performance degradation and structural defects at the micro-nano scale. Additionally, the nonlinear guided wave evaluation method is sensitive to temperature variations and structural stress in complex environments, leading to significant impacts on the reliability and accuracy of the results.

**[Methods]** By combining thermoacoustic elasticity theory with the hyperelastic constitutive equation, a dispersion analysis model for plate/shell structures under temperature-stress coupling was established. This model quantifies the sensitivity of phase velocities in various guided wave modes to changes in ambient temperature and structural stress, thereby providing guidance for optimizing guided wave excitation modes in damage detection. Instead of traditional interdigital transducers, discrete piezoelectric units were utilized to propose a piezoelectric array structure based on temporal-spatial tuning and a guided wave excitation mode control method. This led to the

development of a theoretical analysis model to reveal the array's excitation characteristics. Additionally, the influence of various excitation parameters on the guided wave excitation sound field was verified through experiments. A nonlinear ultrasonic guided wave detection system was also developed, incorporating phase reversal and low-pass filtering techniques to extract zero-frequency response characteristics in damage signals. The introduction of nonlinear acoustic parameters facilitates the quantitative characterization of the extent of incipient performance degradation in polyethylene samples. **[Results]** Modes  $S_0$ ,  $SH_0$ , and  $A_0$  in the medium and high-frequency range ( $> 20$  kHz) were identified as having weak sensitivity to changes in ambient temperature and structural stress. The independently developed 1-3 type piezoelectric composite array transducer demonstrated its capability for excitation control in a single guided wave mode in polyethylene plates, significantly reducing the difficulty of analyzing detection signals. The time-domain morphology of zero-frequency responses was found to be similar to the pulse envelope of the excitation signals, while the frequency-domain amplitude was observed to accumulate continuously during propagation. Additionally, the nonlinear acoustic parameters in polyethylene samples exhibited an upward trend with the extension of aging time. **[Conclusion]** The zero-frequency response of nonlinear ultrasonic guided waves demonstrates high sensitivity in detecting the microstructural evolution of materials. This approach enables a quantitative evaluation of incipient performance degradation in polyethylene plate/shell structures, providing reliable data to support predictions regarding the remaining lifespan of oil and gas facilities.

(17 Figures, 35 References)

**Key words:** polyethylene plate/shell structure, incipient performance degradation, aging damage, ultrasonic guided wave, zero-frequency response

聚乙烯板壳结构具有柔韧性好、耐磨损、抗冲击等优异性能，在油田集输与城镇燃气输送领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但受环境、疲劳载荷及温度波动等复杂因素影响，聚乙烯板壳在服役过程中其微观组织结构演变会导致材料力学性能逐渐退化，严重影响油气设施的可靠性与安全性<sup>[3-4]</sup>。开展结构本体智能健康监测，实现跨尺度损伤定量评估，是保障在役设施安全运行与预防维护的关键。然而，基于线弹性理论的传统超声检测技术受波长衍射极限的限制<sup>[5]</sup>，只能表征损伤后期的宏观裂纹缺陷，对材料早期性能退化与结构微纳尺度损伤并不敏感。因此，构建材料早期性能退化的检测与评价方法，对聚乙烯板壳结构全生命周期的服役损伤评估至关重要。

超声导波作为一种受结构边界约束且导向的机械弹性波，与传播介质中的微观组织损伤相互作用会产生波形畸变、谐波滋生、边频带等非线性声学响应<sup>[6-7]</sup>，可以有效表征材料的早期性能退化与内部微观缺陷。Deng 等<sup>[8-9]</sup>结合二阶微扰近似与正交模式展开法，理论分析了板壳结构中高次谐波的声场特性，明确了兰姆波谐波响应累积效应的共振条件，即相速度匹配与非零能量流准则。在此基础上，Xiang 等<sup>[10-12]</sup>采用非线性兰姆波对金属高温热损伤进行实验评价，探究了微观组织演化对二次谐波频域幅值的影响，并提出非线性声学参数与材料力学性能退化之间的定量关系。但

由于实验系统中传感器、耦合剂等额外因素引入非线性干扰，该方法难以区分谐波响应的非线性来源，且无法实现局部损伤的定位检测。非线性超声混频技术通过控制不同频率导波的声束混叠区域，依据混频响应的频域幅值，可以准确表征与定位材料早期损伤阶段的疲劳裂纹与塑性变形<sup>[13-15]</sup>。然而，该技术需要精确调控入射波的相位、频率以及角度等激发参数，并通过移动混叠区域进行结构空间扫描，这显著增加了导波信号的处理难度。相较于高次谐波与混频效应，超声导波的零频响应具有低衰减、弱散射及带宽可调特性，无需相速度匹配条件即可在传播过程中持续累积静态位移分量，更适用于高衰减材料的早期损伤识别与评价。Deng 等<sup>[16-17]</sup>数值分析了超声导波零频响应的时域传播特性，并提出基于低频压电换能器的零频波动态测量方法。随后，Sun 等<sup>[18]</sup>利用非线性兰姆波对铝合金试样的局部塑性变形进行定量评估，结果表明零频响应对金属结构的微观组织损伤具有高度敏感性。但关于非金属材料早期性能退化的导波零频响应实验研究却鲜有报道。

针对服役工况下聚乙烯板壳结构的非线性超声导波检测技术，目前仍面临以下两大关键问题：环境温度变化与结构应力会影响导波传播特性，导致损伤特征虚报或误报，从而限制检测结果的可靠性；板壳结构的复杂多模态特性会增加信号处理与分析难度，并降

低非线性导波响应对材料早期性能退化的分析灵敏度。为此, 建立温度-应力耦合作用下板壳结构的频散分析模型, 通过环境敏感性分析, 优选导波激励模态与频率, 研发可时空调谐的压电复合阵列探头, 形成基于非线性导波零频响应的损伤评价技术, 从而实现聚乙烯材料早期性能退化的定量评估。

## 1 温度-应力耦合作用下的导波频散特性分析

### 1.1 频散模型建立

#### 1.1.1 超弹性材料本构模型

环境温度  $T$  变化与结构应力对导波传播速度的影响属于典型的非线性行为<sup>[19]</sup>。因此, 引入三阶弹性张量来描述聚乙烯板壳结构在有限应变条件下的非线性力学响应<sup>[20]</sup>。设定环境温度为 25 ℃, 温度-应力耦合作用对超弹性介质所做的功  $W$  被存储为应变能密度, 通过应变张量  $E$  的多项式泰勒级数展开可以将其表示为:

$$W(E, \Delta T) = \frac{B_{\alpha\beta\gamma\delta} TE_{\alpha\beta} E_{\gamma\delta}}{2} + \frac{B_{\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\eta} E_{\alpha\beta} E_{\gamma\delta} E_{\epsilon\eta}}{6} - \Theta_{\alpha\beta} E_{\alpha\beta} \Delta T \quad (1)$$

式中:  $\Delta T$  为环境温度变化量, K;  $B_{\alpha\beta\gamma\delta}$  为随温度变化的二阶弹性张量, GPa;  $E_{\alpha\beta}$ 、 $E_{\gamma\delta}$ 、 $E_{\epsilon\eta}$  为应变张量;  $B_{\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\eta}$  为三阶弹性张量, GPa;  $\Theta_{\alpha\beta}$  为热弹性张量, GPa/K; 下角标均采用爱因斯坦求和约定。

对于各向同性材料, 三阶弹性张量  $B_{\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\eta}$  包含 3 个独立的默纳汉常数, 而二阶弹性张量  $B_{T\alpha\beta\gamma\delta}$  可采用拉梅常数  $\lambda_T$  与  $\mu_T$  表示:

$$\lambda_T = \frac{\rho_0}{(1 + a_T \Delta T)^3} (v_L^2 - 2 v_C^2) \quad (2)$$

$$\mu_T = \frac{\rho_0}{(1 + a_T \Delta T)^3} v_C^2 \quad (3)$$

式中:  $\rho_0$  为环境温度下的材料密度, kg/m<sup>3</sup>;  $a_T$  为线性热膨胀系数, K<sup>-1</sup>;  $v_L$ 、 $v_C$  分别为材料的横波、纵波波速, m/s。

在均匀热变形条件下, 各向同性材料的热弹性张量  $\Theta_{\alpha\beta}$  可表示为:

$$\Theta_{\alpha\beta} = (3 \lambda_T + 2 \mu_T) a_T \delta_{\alpha\beta} \quad (4)$$

式中:  $\delta_{\alpha\beta}$  为克罗内克函数。

以中国石油兰州石化公司生产的聚乙烯试样为研究对象, 其尺寸为 5 mm×5 mm×2 mm, 25 ℃ 下材料

密度  $\rho_0 = 968.6$  kg/m<sup>3</sup>。通过热声弹性测定实验<sup>[21]</sup>, 确定材料默纳汉常数  $l = -28.43$  GPa、 $m = -22.54$  GPa、 $n = -10.36$  GPa。依据 GB/T 16535—2008《精细陶瓷线热膨胀系数试验方法顶杆法》, 使用热机械分析仪获取试样的温度-形变曲线(图 1a), 确定材料的线性热膨胀系数  $a_T = 1.31 \times 10^{-4}$  K<sup>-1</sup>。在无应力条件下, 采用脉冲回波法测定不同温度下试样的横纵波波速(图 1b), 代入式(2)与式(3)可得到随温度变化的二阶弹性张量。

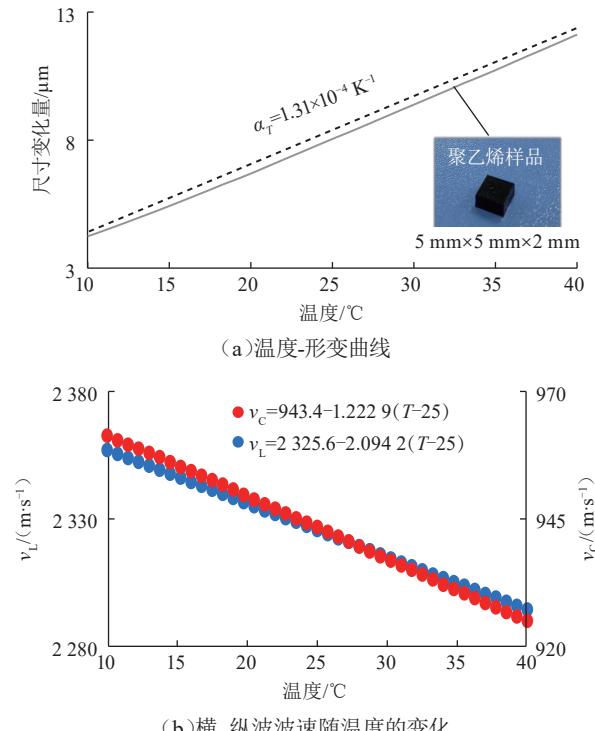


图 1 聚乙烯试样材料参数随温度的变化曲线  
Fig. 1 Temperature-dependent variations in material parameters of polyethylene samples

#### 1.1.2 几何结构与边界条件

聚乙烯板壳结构可视为由若干相同几何与物理特征的子结构排列而成, 选择尺寸为  $l_x \times l_y \times d$  的三维子结构进行几何建模, 可有效缩减数值模型的计算成本。频散模型分别采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件中的固体力学与固体传热模块设置边界条件, 并通过热膨胀接口进行多物理场耦合(图 2, 其中  $k_F$  为波数)。

在固体传热模块中, 设定未变形状态下子结构的参考温度为 25 ℃, 对其上表面、下表面分别施加恒温边界  $T_p$ 、 $T_b$ , 周围表面设为绝热边界, 以考虑均匀温度变化引起的热效应。在固体力学模块中, 对子结构的外表面分别施加沿  $x$  轴与  $y$  轴的均匀载荷条件, 即双轴拉伸应力  $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ , 以模拟聚乙烯板壳结构的平面应

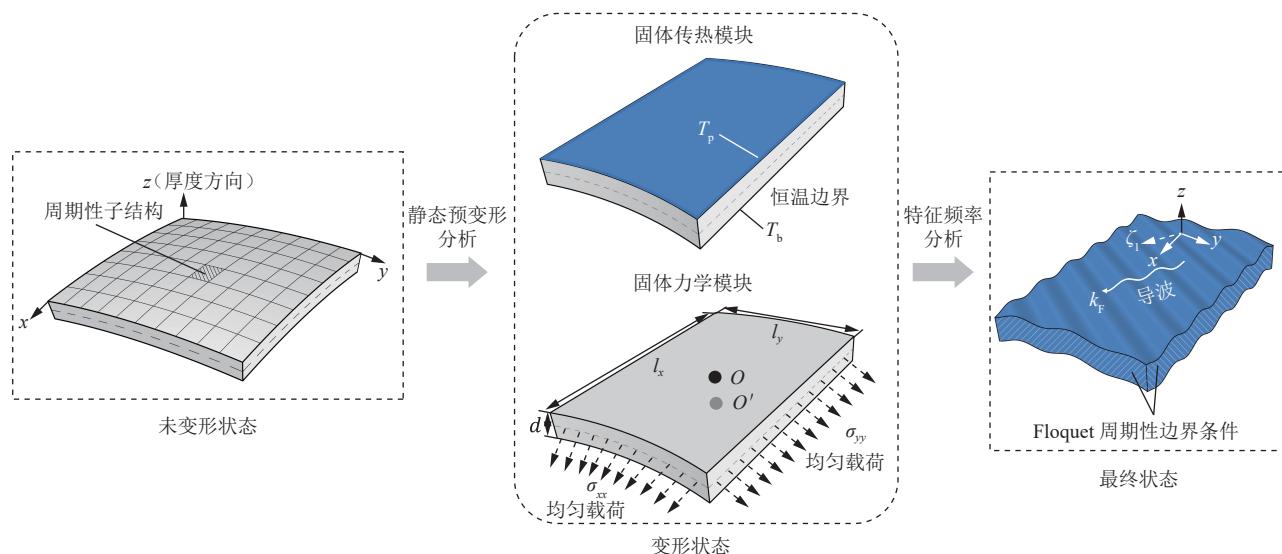


图2 温度-应力耦合作用下聚乙烯板壳结构的频散分析模型示意图

Fig. 2 Dispersion analysis model of polyethylene plate/shell structure under temperature-stress coupling

力状态。为确保数值求解收敛,需对点  $O(l_x/2, l_y/2, d)$  施加  $x, y$  方向上的位移约束,对点  $O'(l_x/2, l_y/2, d/2)$  施加固定约束条件。

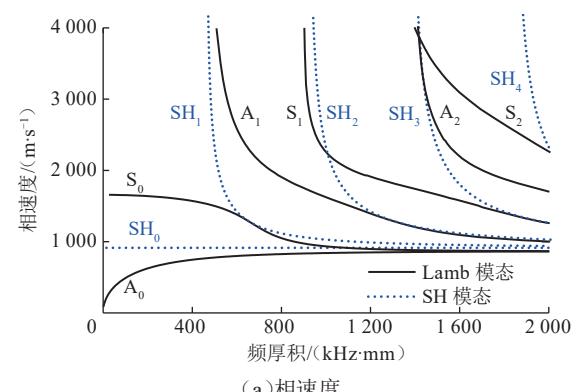
假设最终状态下导波在平面  $(x, y)$  上沿着  $\zeta_1$  方向以简谐波形式传播,传播方向与  $x$  轴的夹角定义为  $\theta$ 。不考虑阻尼效应,在子结构的上下表面设置自由边界,并在四周平行表面上施加 2 组 Floquet 周期性边界条件。

### 1.1.3 多步叠加求解

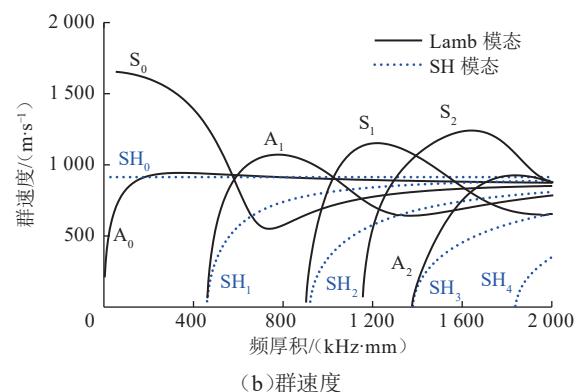
模型求解包括温度-应力耦合作用下的结构稳态分析与叠加在静态预变形上的特征频率分析。其中,应力场与温度场被设为研究步骤间的继承变量:①结构稳态分析通过求解温度-应力耦合作用下子结构的静态预变形,得到应变能密度  $U(E, \Delta T)$ ;②特征频率分析通过对波数进行参数化扫描,采用线性特征值求解,获得温度-应力耦合作用下子结构的频散关系。需要注意的是,在稳态分析时需禁用 Floquet 周期性边界条件,在特征频率分析时需禁用位移约束与载荷边界条件。

以 2.0 mm 厚度的聚乙烯平板为例,建立一个几何尺寸为  $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$  的子结构频散模型,设置波数扫描步长、起始值、截止值分别为  $50 \text{ rad/m}$ 、 $0, 9000 \text{ rad/m}$ 。采用自由四面体网格划分子结构,控制最大网格单元尺寸为  $0.04 \text{ mm}$ 。设置环境温度为  $T_p = T_b = 40^\circ\text{C}$ , 双轴拉伸应力  $\sigma_{xx} = 5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{yy} = 3 \text{ MPa}$ , 导波沿  $x$  方向传播。通过多步叠加求解,可得到温度-应力耦合作用下聚乙烯平板的相速度、群速度频散曲

线(图 3)。依据波型位移分布特性<sup>[22]</sup>,将平板内的导波划分为兰姆波(Lamb)模态与水平剪切波(SH)模态,其中反对称模态包括  $A_0, SH_1, A_1, SH_3, A_2$ , 对称模态包括  $SH_0, S_0, SH_2, S_1, SH_4, S_2$ 。文献 [23] 通过实验测量了温度变化与单轴应力对板壳结构中导波传播速度的影响,并以此验证了所建立频散分析模型的准确性。



(a)相速度



(b)群速度

图3 温度-应力耦合作用下聚乙烯平板的频散曲线

Fig. 3 Dispersion curves for polyethylene plates under temperature-stress coupling

## 1.2 频散结果分析

### 1.2.1 相速度变化

通过对双轴应力作用与无应力作用下聚乙烯平板的频散曲线, 可以得到不同导波模态的相速度变化结果。分析在双轴拉伸应力  $\sigma_{xx}=5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{yy}=3 \text{ MPa}$  作用下, 环境温度为 10 °C、15 °C、20 °C、25 °C、30 °C、35 °C、40 °C 时, 由温度变化与结构应力协同效应引起的  $A_0$ 、 $S_0$ 、 $SH_1$ 、 $A_1$  导波模态相速度变化量  $\Delta C_{\sigma,T}$  及由温度变化与结构应力引起的导波模态相速度变化之和 ( $\Delta C_{\sigma} + \Delta C_T$ ) (图 4)。可以发现, 环境温度变化与结构

应力都会显著影响导波模态的相速度。在恒定双轴应力下, 相速度随温度升高不断减小, 这是由二阶弹性张量对温度的依赖性与热效应造成的结构密度变化引起的。导波模态在不同频厚积下的相速度变化存在较大差异, 其中  $S_0$  模态在 640~720 kHz·mm 范围内相速度变化最为明显。随着频厚积增大, 导波模态会收敛于材料的瑞利波速与剪切波速, 因此相速度变化也会趋于定值。值得注意的是, 截止频厚积 460 kHz·mm 附近的高阶模态  $A_1$  与  $SH_1$  对温度变化与结构应力都具有很强的敏感性。

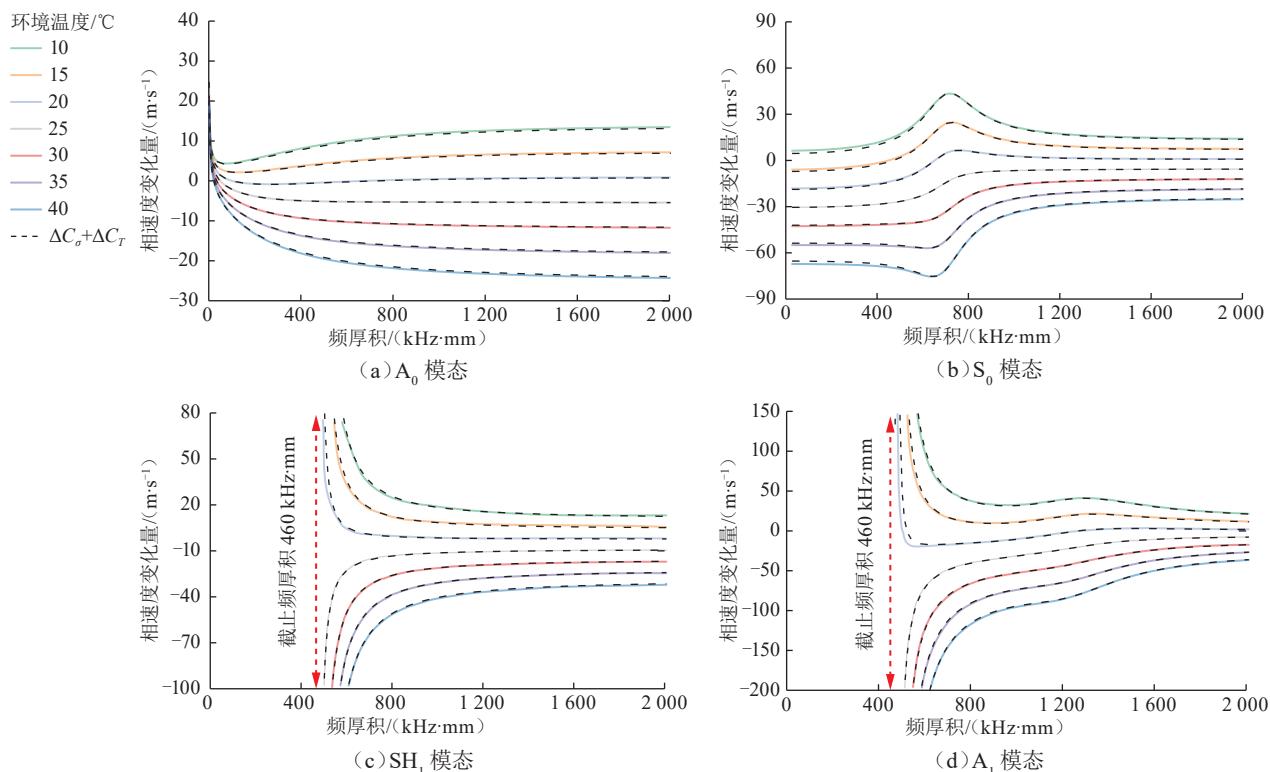


图 4 不同温度-应力耦合作用下导波模态的相速度变化曲线

Fig. 4 Variations in phase velocity across various guided wave modes under different temperature-stress coupling effects

为进一步探究温度-应力耦合作用与单一因素影响之和的偏差, 分别计算温度变化与结构应力引起的导波模态相速度变化, 通过对比  $\Delta C_{\sigma,T}$  与  $(\Delta C_{\sigma} + \Delta C_T)$  结果发现: 在恒定拉伸应力条件下, 不同环境温度的导波模态相速度变化曲线极为接近。由此说明, 聚乙烯平板中温度-应力耦合作用引起的导波模态相速度变化可以近似分解为单一结构应力与温度变化影响的线性叠加。

### 1.2.2 敏感性分析

分别引入应力敏感因子  $Q_{\sigma}$  与温度敏感因子  $Q_T$ , 用于量化不同频率下导波模态对结构应力与温度变化

的敏感程度, 为导波损伤检测中激发模态及频率的优选提供理论指导, 定义如下:

$$Q_{\sigma} = \frac{|\Delta C_{\sigma}/C_0|}{\varepsilon_{\sigma}} \quad (5)$$

$$Q_T = \frac{|\Delta C_T/C_0|}{\varepsilon_T} \quad (6)$$

式中:  $C_0$  为 25 °C 无应力状态下导波模态的相速度, m/s;  $\varepsilon_{\sigma}$  为结构应力引起的应变;  $\varepsilon_T$  为温度变化引起的应变。

根据聚乙烯平板相速度频散曲线与敏感因子分布的叠加图(图 5)可知: 高阶 Lamb 模态在截止频厚积附

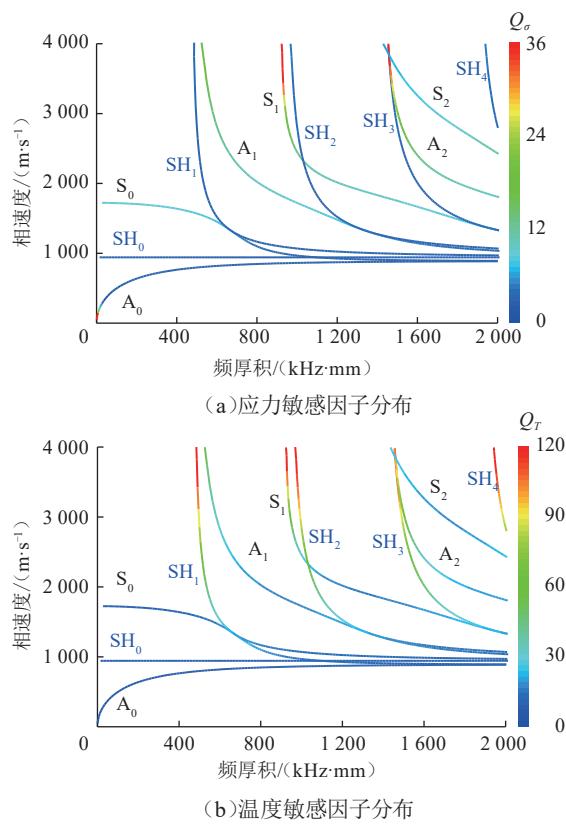


图 5 聚乙烯平板相速度频散曲线与敏感因子分布叠加图  
Fig. 5 Superposed phase velocity dispersion curves and sensitivity factor distributions for polyethylene plates

近对应力与温度变化均表现出显著的敏感性,而 SH 模态在整个频厚积范围内对应力变化的敏感程度始终很低<sup>[24]</sup>。此外,低阶 A<sub>0</sub> 模态对温度变化的敏感性较弱,但在低频厚积范围内(0~20 kHz·mm)对应力变化极为敏感。综合分析表明, S<sub>0</sub> 模态、SH<sub>0</sub> 模态以及中高频范围的 A<sub>0</sub> 模态对温度变化与结构应力的敏感性均较低,适宜作为导波激励模态以降低环境因素带来的非线性干扰。

## 2 基于时空调谐的导波激励模态调控

### 2.1 压电阵列结构

提出一种基于时空调谐的压电阵列结构与导波激励模态控制方法(图 6),采用厚度方向极化的压电单元,以特定的宽度与间距沿导波激励方向线性排列。离散电极布置在压电单元的上、下表面,通过电路连接可以将任意数量的相邻压电单元组合成独立的激发通道。相邻激发通道的电极极性正负交替且周期性排列,从而取代传统压电换能器中固定间距的叉指和梳状电极<sup>[25]</sup>。对激发通道内的压电单元施加相应的脉冲

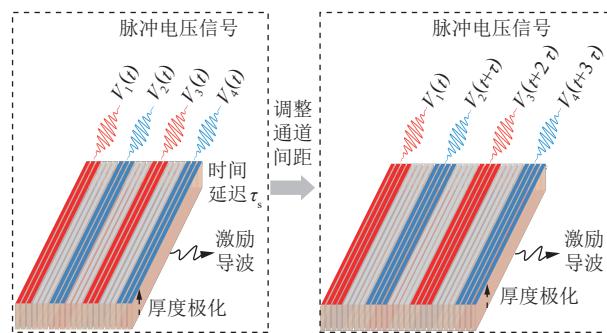


图 6 基于时空调谐的压电阵列结构及导波模态控制原理示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of piezoelectric array structure and guided wave mode control based on temporal-spatial tuning

电压信号  $V(t)$ ,在逆压电效应的作用下,压电阵列会在结构表面产生周期分布的激发应力,从而实现特定波长与频率的导波模态激励。在此基础上,无需更改压电阵列的几何结构,通过电路控制调整激发通道的空间分布间距,并引入时间延迟  $\tau$ ,即可实现单一导波激励模态的灵活调控。

#### 2.1.1 理论分析模型

假设所有压电单元都与结构表面紧密耦合,构建压电阵列激发特性的理论分析模型(图 7),探究空间结构参数与时域信号参数对导波激发模态的影响。

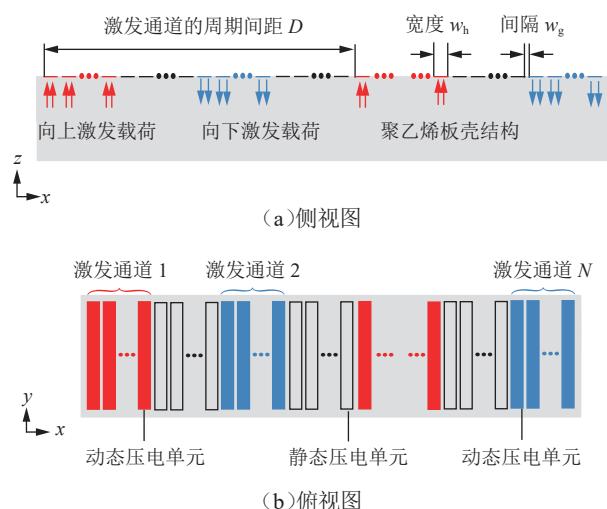


图 7 压电阵列激发特性的理论分析模型图  
Fig. 7 Theoretical analysis model of excitation characteristics for piezoelectric array

宽度为  $w_h$  的压电单元以固定间隔  $w_g$  沿  $x$  方向线性排列,其在结构表面产生的激发载荷可简化为矩形平面内的均匀法向应力,采用方波函数  $\prod_{w_h}(x)$  表示:

$$\prod_{w_h}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{w_h}{2} \\ 0, & |x| > \frac{w_h}{2} \end{cases} \quad (7)$$

通过电路连接可以同时驱动多个相邻的压电单元组成独立的激发通道, 其中施加电压信号并产生法向应力的压电单元被称为动态压电单元, 而未受到电压信号驱动的压电单元被称为静态压电单元。激发通道的宽度、间隔可分别通过控制相邻的动态、静态压电单元数量来调节。假设每个激发通道包含  $n_h$  个动态压电单元, 激发通道宽度  $w'$  为:

$$w' = n_h (w_h + w_g) \quad (8)$$

结合式(7)、式(8), 在  $x$  方向进行空间叠加可得到单个激发通道的应力分布函数  $F_w(x)$  为:

$$F_w(x) = \sum_{j=1}^{n_h} \prod_{w_h} [x - j(w_h + w_g)] \quad (9)$$

式中:  $j$  为求和索引, 表示对一系列项进行求和时的循环变量。

定义激发通道数量为  $N$ , 激发通道间的静态压电单元数量为  $n_g$ , 间隔为  $n_g (w_h + w_g)$ , 相邻通道的法向应力方向相反并呈周期性排布, 构建复合方波函数  $\prod_D(x)$ , 结合式(9)可以得到整个压电阵列沿  $x$  方向的激发应力分布函数  $F(x)$ :

$$\prod_D(x) = \begin{cases} F_w(x), & \frac{w_h + w_g}{2} \leq x \leq (2n_h + 1)\frac{w_h + w_g}{2} \\ 0, & x < \frac{w_h + w_g}{2} \text{ 或 } x > (2n_h + 1)\frac{w_h + w_g}{2} \end{cases} \quad (10)$$

$$F(x) = \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^j \prod_D \left( x - \frac{jD}{2} \right) \quad (11)$$

$$D = 2(n_h + n_g)(w_h + w_g) \quad (12)$$

定义相邻激发通道的线性相位延迟为  $\varphi$ , 通过引入函数  $e^{ij\varphi}$  (其中,  $i$  为虚部单位,  $e$  为自然对数的底数), 可得到包含相位延迟的压电阵列激发应力分布函数  $F(x, \varphi)$ :

$$F(x, \varphi) = \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^j \prod_D \left( x - \frac{jD}{2} \right) e^{ij\varphi} \quad (13)$$

采用汉宁窗调制的正弦脉冲波  $V(t)$  作为激发通道的时域信号, 以有效抑制旁瓣能量, 减少频谱泄漏, 其计算式为:

$$V(t) = \frac{V_0}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi f_0 t}{P_0} \right) \right] \sin(2\pi f_0 t) \quad (14)$$

式中:  $V_0$  为激发信号的幅值,  $V$ ;  $f_0$  为激发信号的中心频率, kHz;  $P_0$  为正弦脉冲波的周期数;  $t$  为时间, s。

需要说明的是, 激发通道间的相位延迟  $\varphi$  可通过式(15)转换为脉冲信号间的时间延迟  $\tau$ :

$$\tau = \frac{1}{f_0} \frac{\varphi}{2\pi} \quad (15)$$

对式(13)、式(14)分别进行空间与时域傅里叶变换, 可得到激发应力分布所对应的波数谱与频谱, 将其与聚乙烯平板的相速度频散曲线进行叠加, 可以直观地分析压电阵列激发源设计与导波激励模态之间的关系。

### 2.1.2 激发特性分析

压电阵列的激发特性取决于其空间结构尺寸与时域脉冲信号, 其中激发通道的周期间距  $D$  与时域信号的相位延迟  $\varphi$  是影响导波激励模态的关键参数。在此以 2 mm 厚度聚乙烯平板为例, 通过理论分析模型探究不同  $D$  与  $\varphi$  下压电阵列的导波激发特性。首先, 设置压电阵列的激发通道数量  $N=8$ ,  $\varphi=0$ ,  $D$  分别为 7.2 mm、9.6 mm、12.0 mm、14.4 mm。激励信号采用不同中心频率下 10 周期汉宁窗调制的正弦脉冲串。根据聚乙烯平板相速度频散曲线与压电阵列激发能量分布的叠加图(图 8)可知, 主瓣峰值的波长  $\lambda_s$  与激发通道的周期间距极为接近。当激发周期的通道间距增大时, 主瓣波长带宽也随之增加。因此, 通过调整激发通道的周期间距, 结合不同中心频率  $f_0$  的正弦脉冲激励信号, 即可实现单一导波模态的选择性激发。

由于压电单元宽度与间距的尺寸限制, 仅调整激发通道的周期间距, 难以实现对任意波长导波模态的选择性激励。因此, 考虑引入激发通道间时域信号的相位延迟, 以进一步调节压电阵列的激发波长。保持激发通道宽度与间隔相等, 设置激发通道的周期间距  $D=4.8$  mm, 时域信号的相位延迟  $\varphi=\pi/2$  rad。根据聚乙烯平板相速度频散曲线与压电阵列激发能量分布的叠加图(图 9a)可知, 引入正相位延迟后, 波数谱会向右移动, 主瓣峰值波长  $\lambda_s$  减至 3.21 mm。结合中心频率  $f_0=500$  kHz 的正弦脉冲激励信号, 可在高频区间内激发单一的  $A_1$  模态。相较之下, 设置激发通道的周期间距  $D=14.4$  mm, 引入负相位延迟  $\varphi=-\pi/4$  rad 时, 主瓣峰值的波长  $\lambda_s$  增至 19.24 mm, 从而实现低频区间内  $S_0$  模态的控制激发(图 9b)。

综上, 采用离散压电单元代替传统固定间距的叉指电极, 通过电路配置调整压电阵列中激发通道的周期间距与时域信号的相位延迟, 能够实现更高精度的模态选择, 从而有效控制聚乙烯平板中的导波激发模态, 抑制非目标模态的干扰。

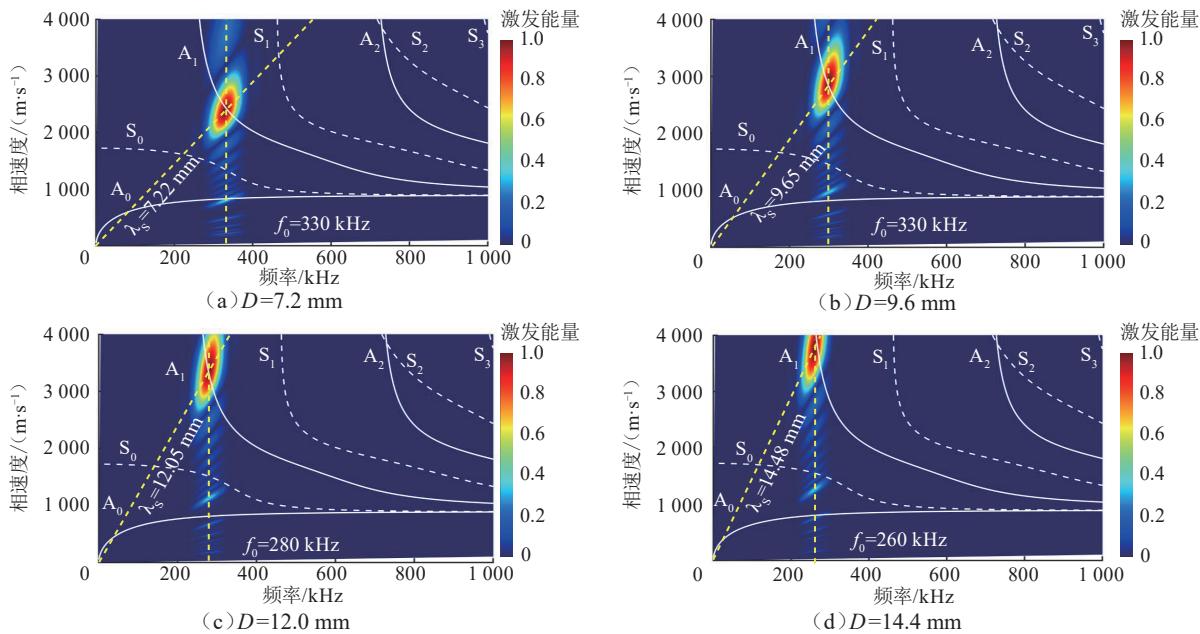
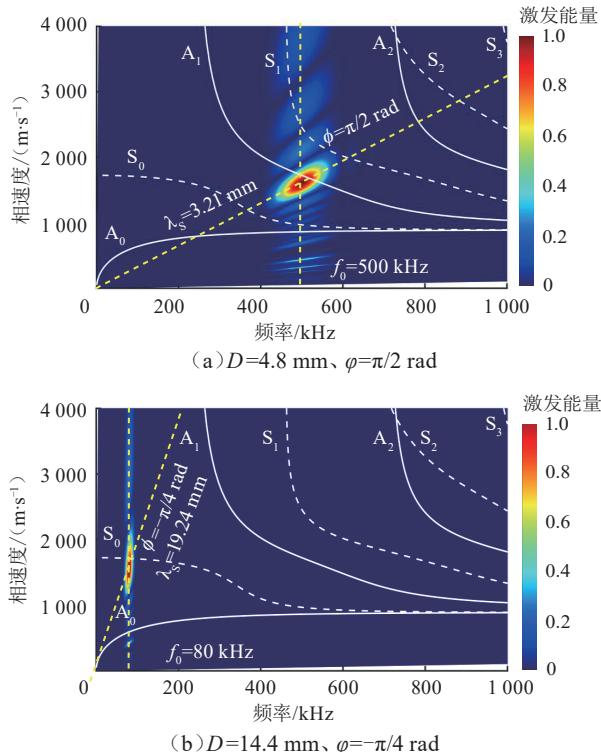


图8 不同周期间距下压电阵列的激发能量分布云图

Fig. 8 Excitation energy distributions of piezoelectric array with different periodic spacings

图9 不同相位延迟下压电阵列的激发能量分布云图  
Fig. 9 Excitation energy distributions of piezoelectric array with different phase delays

## 2.2 压电阵列探头

依据理论分析模型优选的结构尺寸参数制作压电阵列探头(图10)，其中压电单元宽度为0.4 mm、间隔为0.2 mm、长度为25 mm，数目为100。为了拓宽工作频带，压电单元选用厚度方向极化的1-3型压电复合材料，中心工作频率为500 kHz。通过切割填充法，

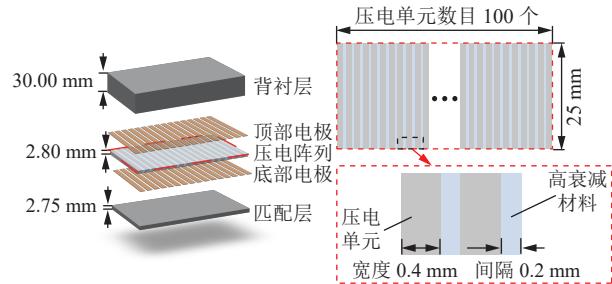


图10 压电阵列探头内部结构示意图

Fig. 10 Internal structure of piezoelectric array transducer

在压电单元间填充由环氧胶与空心微球混合制成的高衰减材料，可以抑制单元间横向耦合振动引起的信号串扰。压电阵列沿水平方向线性排列，其中各单元上、下两面均镀有一层金薄膜电极，并通过独立的信号传输线引至连接器，可以实现不同单元间的协同激励。探头内部的背衬层与匹配层是由金属氧化物/环氧树脂复合材料制成，能够有效降低声波的反向辐射损耗，并提高压电阵列的声波能量转换效率。连接器通过电路配置可以调整激发通道的周期间距与时间延迟，实现聚乙烯板壳结构中单一导波模态的选择性激励，从而简化损伤信号的分析与处理难度。

## 3 材料早期性能退化的非线性导波零频响应

### 3.1 老化损伤试样

在实际服役过程中，聚乙烯试样老化的主要环境

诱因包括温度、氧气以及机械应力<sup>[26-29]</sup>。为提高老化试样的制备效率, 采用多工位拉伸夹具, 搭建应力-热氧室内加速老化试验装置(图 11)。聚乙烯试样的长度为 350 mm、宽度为 300 mm、厚度为 2 mm, 将其固定在环境箱内的多工位拉伸夹具上, 将老化温度设定为 90 °C。待箱内温度达到试验设定值后, 通过卧式拉伸试验机施加 5 MPa 的恒定拉伸应力, 进行应力-热氧加速老化试验。老化时间设定为 12 个月, 取样间隔为 2 个月, 最终获得 6 组不同老化程度的聚乙烯试样。

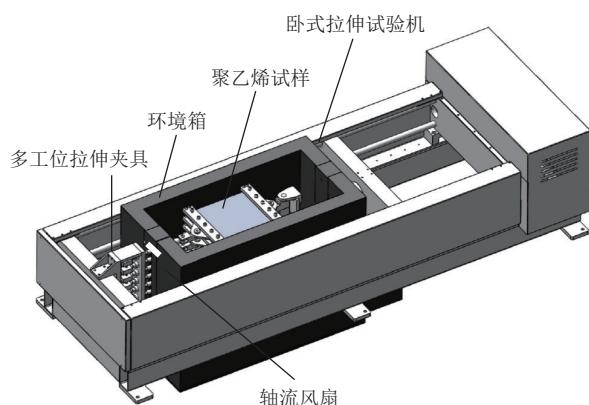


图 11 多工位拉伸夹具与应力-热氧室内加速老化试验装置示意图

Fig. 11 Multi-position tensile fixture and laboratory testing setup for stress-thermal oxidative accelerated aging

## 3.2 非线性超声导波检测系统

### 3.2.1 试验测量系统

为测量聚乙烯老化试样的零频响应特性, 搭建非线性超声导波检测系统(图 12)。多通道任意函数信号发生器产生的脉冲激励信号, 经高压放大器增益后用于驱动压电阵列探头。探头通过甘油耦合剂与试样表

面直接接触, 可激励出单一的目标导波模态。当低频 PZT 压电陶瓷片的中心频率处于零频响应的主瓣频率范围内, 可有效接收损伤信号<sup>[17]</sup>。最后, 通过示波器对接收信号进行平均采样与数据保存, 以便后续分析处理。

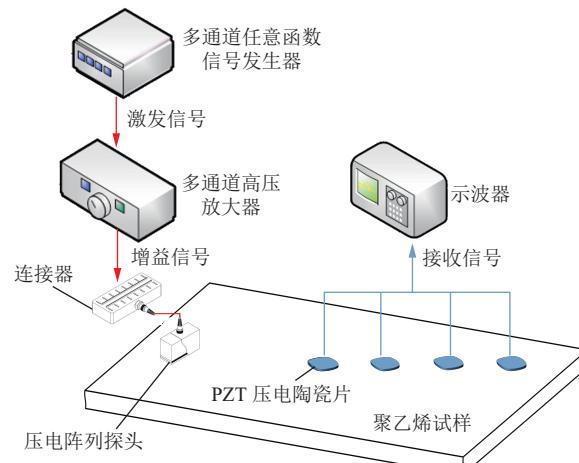


图 12 非线性超声导波检测系统组成示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of nonlinear ultrasonic guided wave detection system

### 3.2.2 信号处理方法

为提取非线性零频响应的时域波形, 采用相位反转<sup>[18]</sup>与低通滤波技术进行信号处理(图 13)。首先, 对同一位点处初始激励相位相反的接收信号  $u_0(t)$ 、 $u_\pi(t)$  进行叠加平均, 这不仅能够消除时域波形中的基频与奇次谐波分量, 同时还可提高试验信号的信噪比。随后, 基于零频响应与二次谐波的频率分布差异, 对时域信号  $u_{ev}(t)$  进行数字低通滤波, 即可得到聚乙烯试样中的零频响应波形  $u_{sc}(t)$ 。

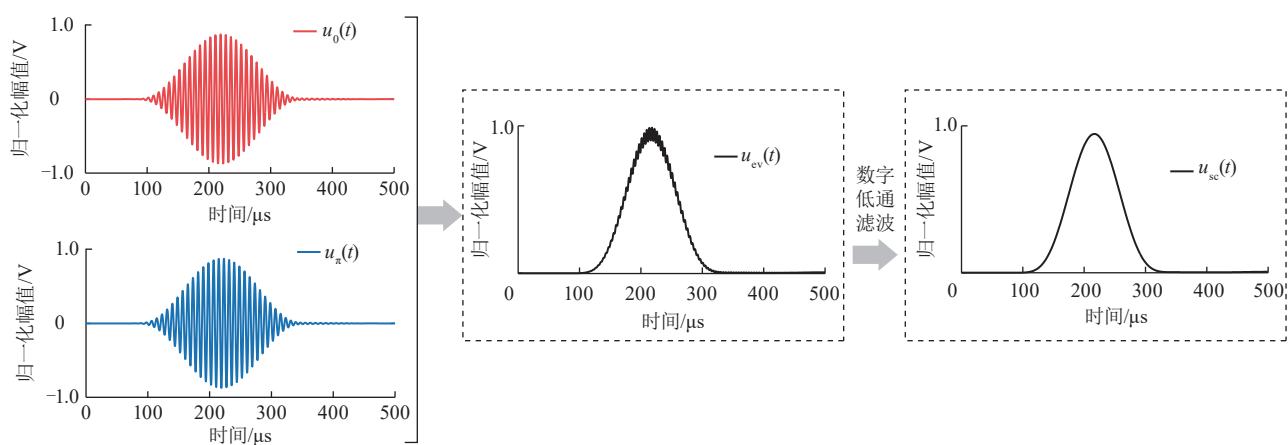


图 13 非线性导波零频响应的信号处理流程示意图  
Fig. 13 Signal processing flow for nonlinear guided wave zero-frequency response

### 3.3 试验结果分析

依据该研究中环境敏感性分析结果, 选取 120 kHz

下的  $S_0$  作为导波激发模态, 激励信号采用 10 周期汉宁窗调制的正弦脉冲波。PZT 压电陶瓷片的径向谐振频

率为 50 kHz, 分别布置在压电阵列探头右端 100 mm、150 mm、200 mm、250 mm 处。以 150 mm 处接收的导波时域信号为例, 通过相位反转与低通滤波处理, 提取聚乙烯试样的非线性零频响应, 可见其时域形貌与接收信号的波包络相似, 呈现出非对称的动态偏置特征(图 14)。

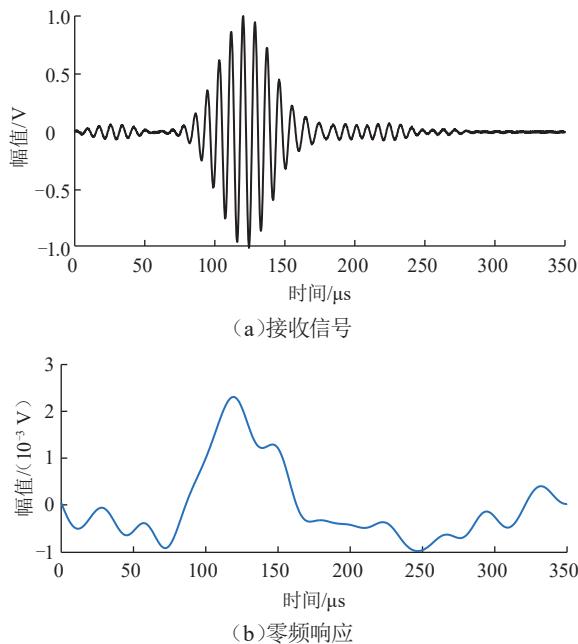


图 14 距压电阵列 150 mm 处导波接收信号与零频响应的时域波形图

Fig. 14 Time-domain waveforms of guided wave signal reception and zero-frequency response at a distance of 150 mm with the piezoelectric array probe

通过对时域信号进行快速傅里叶变换, 可得到基频导波与零频响应的频谱分布(图 15)。由于 PZT 压电陶瓷片的频响特性, 基频导波的中心频率会略微偏移。值得注意的是, 不同激发幅值下的基频导波与材料相互作用后产生的零频响应会存在差异<sup>[30-33]</sup>。因此, 引入非线性声学系数  $K_{sc}$ , 用于定量表征不同老化时间下聚乙烯试样的早期性能退化程度, 定义如下:

$$K_{sc} = M_{sc} / (M_{s0})^2 \quad (16)$$

式中:  $M_{sc}$ 、 $M_{s0}$  分别为基频导波与零频响应的频域峰值, V。

提取聚乙烯试样中不同传播距离的非线性声学参数  $K_{sc}$  (图 16), 可以发现超声导波的零频响应具有累积效应,  $K_{sc}$  随着传播距离增大呈现上升趋势, 表明零频响应来自试样材料, 而不是测量系统的电信号。测试 6 组不同老化程度下聚乙烯试样的零频响应, 并绘制非线性声学参数  $K_{sc}$  的变化曲线(图 17)。可以发现,

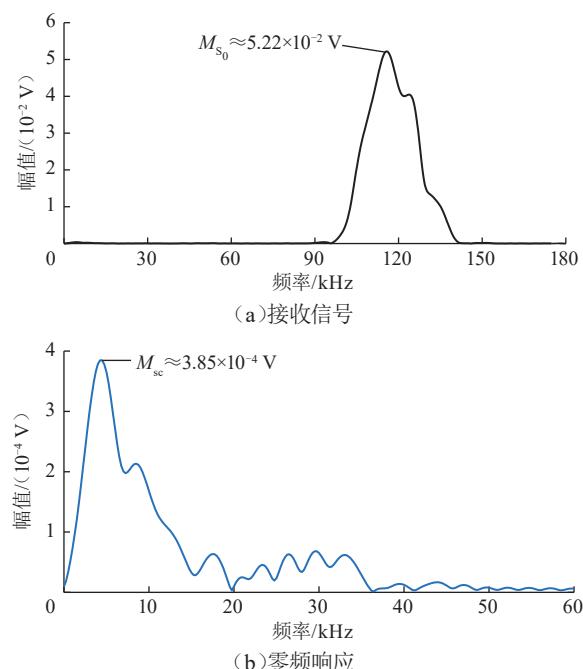


图 15 距压电阵列 150 mm 处导波接收信号与零频响应的频谱图

Fig. 15 Spectrograms of guided wave signal reception and zero-frequency response at a distance of 150 mm with the piezoelectric array probe

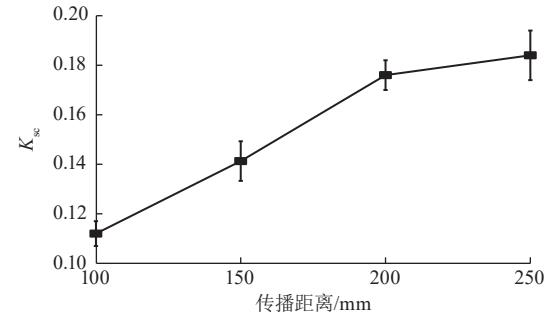


图 16 非线性声学系数随传播距离变化曲线

Fig. 16 Variation curve of nonlinear acoustic coefficient with propagation distance

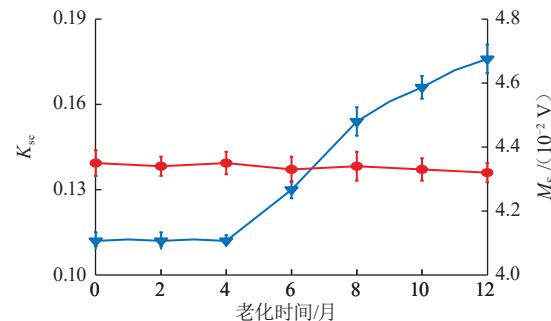


图 17 非线性声学系数与零频响应的频域峰值随老化时间的变化曲线

Fig. 17 Variation curves of nonlinear acoustic coefficient and frequency domain peak of zero-frequency response with aging time

非线性声学参数随着老化时间增加而发生明显变化。在老化前 4 个月,  $K_{sc}$  保持低位平稳状态; 在老化 4~8 个月

期间,  $K_{sc}$  显著增长; 在 9~12 个月期间,  $K_{sc}$  的增长趋势有所放缓。相比之下, 基频导波的频域幅值基本保持不变, 仅出现了微小的下降趋势, 这可能是由于老化孔洞导致的能量衰减<sup>[34-35]</sup>。试验结果表明, 非线性导波零频响应可以有效地评估聚乙烯材料的早期性能退化。

## 4 结论

针对服役环境下聚乙烯板壳结构的早期损伤检测难题, 结合热致声弹性理论与超弹性材料本构方程, 构建考虑温度-应力耦合作用的导波频散分析模型, 量化了不同频率下导波模态对环境温度变化与结构应力的敏感性。在此基础上, 提出一种基于时空调谐的导波激励模态调控方法, 并自主研发了 1-3 型压电复合阵列探头, 搭建非线性超声导波检测系统, 形成材料早期性能退化的非线性超声导波评价方法, 显著提升了超声导波检测方法的可检缺陷精度。研究结果表明:

1) 温度-应力耦合作用对聚乙烯板壳结构中导波传播速度的影响可以近似为单一因素效应的线性叠加。 $S_0$  模态、 $SH_0$  模态以及中高频范围(超过 20 kHz·mm)的  $A_0$  模态对温度变化与结构应力的敏感性均较低, 作为导波激励模态可以降低环境因素对检测信号的非线性干扰。

2) 基于时空调谐的压电复合阵列探头无需改变几何结构尺寸, 通过电路控制即可调整激发通道间的空间分布间距与时间延迟, 从而实现聚乙烯板壳结构中不同频率  $S_0$  模态与  $A_0$  模态的选择性激励, 简化了信号分析与处理难度。

3) 通过相位反转与低通滤波处理, 可以准确提取零频响应的时域信号。试验结果表明, 非线性超声导波的零频响应具有累积效应, 对材料微观组织演化具有较高的检测灵敏度; 非线性声学参数随着老化时间延长呈现上升趋势, 可以有效表征聚乙烯板壳结构的早期性能退化程度, 为油气设施的剩余寿命预测提供了重要数据支撑。

4) 该研究仅采用低频压电陶瓷片来接收聚乙烯试样中的非线性零频响应, 由于压电陶瓷片固有的高通滤波特性, 该方法难以有效测量导波信号中的动态偏置特征, 且容易被环境噪声淹没。未来研究可采用宽频激光测振仪提取传播介质中由微纳尺度缺陷所引起

的零频分量, 从而进一步提升非线性导波检测技术的准确性与灵敏度。

## 参考文献:

- [1] 陈朋超. “双碳”愿景下管网多介质灵活输运与智能化高效利用发展战略思考[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 721-730. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001).  
CHEN P C. Strategic thinking on pipeline network development for flexible multi-media transport and intelligent efficient utilization under dual carbon vision[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(7): 721-730.
- [2] 樊学华, 祝亚男, 于勇, 张红, 金永青, 李向阳. 油气田管道 HDPE 内衬技术的应用[J]. 油气储运, 2021, 40(3): 326-332. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.013](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.013).  
FAN X H, ZHU Y N, YU Y, ZHANG H, JIN Y Q, LI X Y. Application of HDPE lining technology for pipelines in oil and gas fields[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 326-332.
- [3] 李宏伟, 赵博, 周天宇, 苑一琳, 于宇新, 赵志娟. 服役环境下高密度聚乙烯(HDPE)压力管道损伤行为研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(15): 89-96. DOI: [10.3981/j.issn.1000-7857.2023.15.009](https://doi.org/10.3981/j.issn.1000-7857.2023.15.009).  
LI H W, ZHAO B, ZHOU T Y, YUAN Y L, YU Y X, ZHAO Z J. Research progress on damage behavior of high-density polyethylene (HDPE) pressure pipeline in service environment[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(15): 89-96.
- [4] 蒲强, 何霞, 王国荣, 胡刚. 点载荷作用下聚乙烯燃气管道的损伤分析[J]. 中国塑料, 2024, 38(3): 67-72. DOI: [10.19491/j.issn.1001-9278.2024.03.012](https://doi.org/10.19491/j.issn.1001-9278.2024.03.012).  
PU Q, HE X, WANG G R, HU G. Damage analysis of PE gas pipes under point loading[J]. China Plastics, 2024, 38(3): 67-72.
- [5] 项延训. 非线性超声检测方法的应用与挑战[J]. 科学通报, 2022, 67(7): 581-582. DOI: [10.1360/TB-2022-0136](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0136).  
XIANG Y X. Applications and challenges of nonlinear ultrasound testing[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(7): 581-582.
- [6] 刘璐璐, 胡宁, 邓明晰, 赵友选, 李卫彬. 板壳结构中的非线性兰姆波[J]. 力学进展, 2017, 47(1): 503-533. DOI: [10.6052/1000-0992-16-032](https://doi.org/10.6052/1000-0992-16-032).  
LIU Y L, HU N, DENG M X, ZHAO Y X, LI W B. Nonlinear lamb waves in plate/shell structures[J]. Advances in Mechanics, 2017, 47(1): 503-533.
- [7] LISSENDEN C J. Nonlinear ultrasonic guided waves: Principles for

- nondestructive evaluation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(2): 021101. DOI: [10.1063/5.0038340](https://doi.org/10.1063/5.0038340).
- [8] DENG M X. Analysis of second-harmonic generation of Lamb modes using a modal analysis approach[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(6): 4152–4159. DOI: [10.1063/1.1601312](https://doi.org/10.1063/1.1601312).
- [9] DENG M X, WANG P, LV X F. Experimental observation of cumulative second-harmonic generation of Lamb-wave propagation in an elastic plate[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(2): 344. DOI: [10.1088/0022-3727/38/2/020](https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/2/020).
- [10] XIANG Y X, DENG M X, XUAN F Z, LIU C J. Cumulative second-harmonic analysis of ultrasonic Lamb waves for ageing behavior study of modified-HP austenite steel[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(8): 974–981. DOI: [10.1016/j.ultras.2011.05.013](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2011.05.013).
- [11] XIANG Y X, DENG M X, XUAN F Z, LIU C J. Experimental study of thermal degradation in ferritic Cr-Ni alloy steel plates using nonlinear Lamb waves[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(8): 768–774. DOI: [10.1016/j.ndteint.2011.08.005](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.08.005).
- [12] XIANG Y X, DENG M X, XUAN F Z. Creep damage characterization using nonlinear ultrasonic guided wave method: a mesoscale model[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(4): 044914. DOI: [10.1063/1.4863639](https://doi.org/10.1063/1.4863639).
- [13] 孙茂循, 项延训, 肖飚, 邓明晰. 超声导波混频表征和定位早期局部损伤的研究进展[J]. *声学技术*, 2022, 41(3): 313–322. DOI: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.003](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.003).
- SUN M X, XIANG Y X, XIAO B, DENG M X. Early detection of the localized damage using nonlinear mixing of guided waves: a review[J]. *Technical Acoustics*, 2022, 41(3): 313–322.
- [14] 苑博, 稅国双, 汪越胜. 非线性超声混频检测技术在无损检测中的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(16): 33–46. DOI: [10.3901/JME.2019.16.033](https://doi.org/10.3901/JME.2019.16.033).
- YUAN B, SHUI G S, WANG Y S. Advances in research of nonlinear ultrasonic wave mixing detection technology in non-destructive evaluation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(16): 33–46.
- [15] ZHU W G, LI Y F, GUAN L Q, WANG X L, YU H Y, LIU X Z. Micro-crack detection of nonlinear Lamb wave propagation in three-dimensional plates with mixed-frequency excitation[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(1): 014302. DOI: [10.1088/1674-1056/ab5931](https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab5931).
- [16] DENG M X. An experimental approach for detection of the acoustic radiation induced static component in solids[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(7): 074301. DOI: [10.1088/0256-307X/37/7/074301](https://doi.org/10.1088/0256-307X/37/7/074301).
- [17] GAO G J, XU C B, CHEN H, DENG M X. Assessment of early fatigue in solid plates using quasi-static component by Lamb wave propagation under group velocity matching[J]. *NDT & E International*, 2024, 141: 103001. DOI: [10.1016/j.ndteint.2023.103001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.103001).
- [18] SUN X Q, SHUI G S, ZHAO Y X, LIU W, HU N, DENG M X. Evaluation of early stage local plastic damage induced by bending using quasi-static component of Lamb waves[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102332. DOI: [10.1016/j.ndteint.2020.102332](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102332).
- [19] 王宇航. 基于基准匹配的超声导波信号环境补偿技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- WANG Y H. Research on environmental compensation technology of ultrasonic guided wave signal based on reference matching[D]. 厦门: Xiamen University, 2018.
- [20] THURSTON R N, BRUGGER K. Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media[J]. *Physical Review*, 1964, 133(6A): A1604–A1610. DOI: [10.1103/PhysRev.133.A1604](https://doi.org/10.1103/PhysRev.133.A1604).
- [21] ZHANG X, CHEN L, JAR P Y B, LIU G, WANG A C. Thermo-acoustoelastic determination of third-order elastic constants using coda wave interferometry[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 271: 109158. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2024.109158](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109158).
- [22] ZHANG X, CHEN L, LIU G, ZHANG Z H, WANG J C. An improved modal tracking algorithm for dispersion analysis of arbitrary prestressed plates[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205(Part C): 112582. DOI: [10.1016/j.tws.2024.112582](https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112582).
- [23] ZHANG X, CHEN L, DU W, LIU G, ZHANG Z H. Thermo-acoustoelastic modeling of guided wave propagation in plate/shell structures under temperature-stress coupling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 220: 111693. DOI: [10.1016/j.ymssp.2024.111693](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111693).
- [24] ZHANG X, LIU G, CHEN L, MA Y X, ZHANG Z H, DONG Y X. A novel multi-step superposition model for the dispersion analysis of multiaxial prestressed plate-like structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 202: 112138. DOI: [10.1016/j.tws.2024.112138](https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112138).
- [25] 丁涛涛, 朱武军, 项延训, 邓明晰. PVDF 梳状换能器接收非线

- 性兰姆波的实验研究[J]. 应用声学, 2019, 38(3): 301–306. DOI: [10.11684/j.issn.1000-310X.2019.03.003](https://doi.org/10.11684/j.issn.1000-310X.2019.03.003).
- DING T T, ZHU W J, XIANG Y X, DENG M X. Receiving nonlinear Lamb waves using PVDF comb transducer[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(3): 301–306.
- [26] 李晓刚, 高瑾, 张三平, 杜翠薇, 卢琳. 高分子材料自然环境老化规律与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3–18.
- LI X G, GAO J, ZHANG S P, DU C W, LU L. Laws and mechanisms of natural environmental aging of polymer materials[M]. Beijing: Science Press, 2011: 3–18.
- [27] WANG H, SHAH J, HAWWAT S E, HUANG Q D, KHATAMI A. A comprehensive review of polyethylene pipes: Failure mechanisms, performance models, inspection methods, and repair solutions[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 4(2): 100174. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100174](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100174).
- [28] SINHA T, DHAR A S. Beam-on-spring modeling of buried MDPE pipes in sand subjected to lateral loads at a pipe junction[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2023, 3(3): 100125. DOI: [10.1016/j.jpse.2023.100125](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100125).
- [29] 郑度奎, 李敬法, 宇波, 刘翠伟, 赵杰, 黄志强, 等. 临氢环境中聚乙烯管道寿命预测方法探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 882–893. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.08.004](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.08.004).
- ZHENG D K, LI J F, YU B, LIU C W, ZHAO J, HUANG Z Q, et al. Lifetime prediction method for polyethylene pipeline in hydrogen environment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 882–893.
- [30] 项延训. 高温构件早期损伤的非线性超声导波评价方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- JIANG Y X. Evaluation of early damage in high-temperature components based on nonlinear ultrasonic guided waves[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [31] 周凯, 尹江水, 朱亚倩, 马骐, 卫小龙. 焊接管道超声导波损伤识别与定位方法[J]. 油气储运, 2024, 43(1): 57–66. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.01.007](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.01.007).
- ZHOU K, YIN J S, ZHU Y Q, MA Q, WEI X L. Damage identification and location method for welded pipe using ultrasonic guided wave[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(1): 57–66.
- [32] 刘刚, 马飞, 凡朝波, 解聪, 杨国昊, 翟喜桐, 等. 基于 BLBL 模型的超声波在钻井液中的传播衰减规律[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(3): 58–64.
- LIU G, MA F, FAN C B, XIE C, YANG G H, ZHAI X T, et al. Study on attenuation law of ultrasonic wave in drilling fluid based on BLBL model[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2024, 39(3): 58–64.
- [33] 孟祥波, 史永晋. 地磁激励条件下 X80 钢拉伸疲劳过程磁记忆信号变化特征[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 774–784. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.006](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.006).
- MENG X B, SHI Y J. Variation features of MMM signals of X80 steel in tensile fatigue process under geomagnetic excitation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(7): 774–784.
- [34] 任强, 孙文龙, 陶立翔, 张光学, 张华军, 盛水平, 等. 非线性超声检测技术研究现状与展望[J]. 声学技术, 2024, 43(3): 299–309. DOI: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.03.001](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.03.001).
- REN Q, SUN W L, TAO L X, ZHANG G X, ZHANG H J, SHENG S P, et al. Research status and prospect of nonlinear ultrasonic detection technique[J]. Technical Acoustics, 2024, 43(3): 299–309.
- [35] 尚飞, 张宏辉. 非线性超声检测技术的应用和发展[J]. 声学技术, 2022, 41(6): 846–853. DOI: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.06.009](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.06.009).
- SHANG F, ZHANG H H. Application and development of nonlinear ultrasonic testing technology[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(6): 846–853.

(编辑: 曾力波)

**基金项目:**国家重点研发计划“机器学习与混合整数规划融合的复杂油气管网优化新算法及工程应用”, 2021YFA100104-1; 中央高校自主创新项目“大型油气管网仿真与运行优化软件研发”, 22CX01001A-5。

**作者简介:**刘刚, 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 2004 年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事油气设施超声导波结构健康监测的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, 266580。电话: 0532-86981819。Email: [liugang@upc.edu.cn](mailto:liugang@upc.edu.cn)

- Received: 2025-01-17
- Revised: 2025-02-25
- Online: 2025-05-06

