

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107633

基于材料参数的管道防腐层粘接状态识别研究*

吕瑞宏, 杨佳怡, 张昊宇, 赵艺伟

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要:附着防腐层管道的粘接状态识别是管道状态预诊断的热门研究方向。将弯曲的管道划分为多个紧密相连的微体元平板结构,建立非线性超声导波在微体元结构中的传播模型,分析导波在微体元中以及相邻微体元之间传播的频散特性及能量传递特性,采用SPWVD时频分析与小波包分解算法对回波信号进行分析,以提取能够表征管道不同粘接状态的特征量。以与附着防腐层管道性能接近的有机玻璃-铝双层粘接结构为实验对象,分别采集其粘接完好状态、基于密度变化的弱粘接状态和基于厚度变化的部分脱粘状态下的超声回波信号,分析其材料参数与粘接状态之间的对应关系,并采用特征量间具有独立性的朴素贝叶斯分类器对其粘接状态进行识别分类,得到识别率为92.31%。

关键词:管道结构;超声波;时频分析;特征提取;粘接状态

中图分类号: TB553 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.55

Research on identification of adhesion state of pipeline coating based on material parameters

Lyu Ruihong, Yang Jiayi, Zhang Haoyu, Zhao Yiwei

(School of information science and engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The identification of adhesion state of pipeline with anti-corrosion coating is a hot research direction of pipeline state pre diagnosis. The curved pipe is divided into several closely connected micro body element plate structures, the propagation model of nonlinear ultrasonic guided wave in micro body element structure is established, the dispersion characteristics and energy transfer characteristics of guided wave in micro body element and between adjacent micro body elements are analyzed, and the echo signal is analyzed by spwvd time-frequency analysis and wavelet packet decomposition algorithm, In order to extract the characteristic quantity which can represent the different bonding state of pipeline. In this paper, the PMMA aluminum double-layer bonding structure with similar performance to the pipeline with anti-corrosion coating is taken as the experimental object. The ultrasonic echo signals of the intact bonding state, the weak bonding state based on the density change and the partial debonding state based on the thickness change are collected respectively, and the corresponding relationship between the material parameters and the bonding state is analyzed, The recognition rate is 92.31%.

Keywords: pipeline structure; ultrasonic; time frequency analysis; feature extraction; bonding state

0 引 言

目前,针对附着防腐层的管道缺陷检测是管道状态预诊断的热门研究方向,利用超声导波检测多层结构粘接状态具有明显优势^[1-2]。因超声导波检测信号具有频散特性,所以研究粘接状态与信号对应关系并进行深入

分析、识别处理具有一定难度^[3-6]。在防腐层粘接状态检测中,粘接状态主要包括粘接完好、脱粘状态和弱粘接状态^[7]。张玉洁等^[8]研究了弱粘接结构无损检测方法和技术,为弱粘接结构检测提供了理论参考和实践指导;刘婧等^[9]研究了超声谐振模式随粘接性能的变化规律,建立了材料参数与粘接强度之间的关系;孙凯华等^[10]研究了粘接强度对超声导波反射特性透射特性的影响,为材料

收稿日期:2021-03-19 Received Date: 2021-03-19

* 基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(LQGD2020021)资助

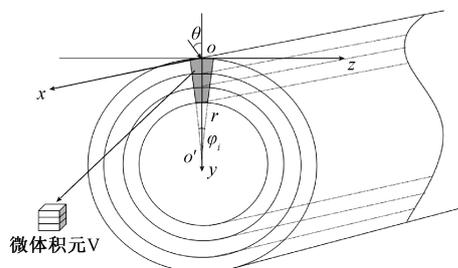


参数对反射特性透射特性的影响提供了理论依据。脱粘结构的出现伴随着脱粘处介质材料参数的变化,通过分析介质参数与超声回波信号之间的关系,即可识别多层结构的粘接状态^[11-12]。

因此,本文将附着防腐层的管道材料参数作为研究对象,建立基于微体元材料参数的超声导波传播模型,分析管道防腐层中超声导波的频散特性及能量传递特性,利用非线性超声导波信号分析管道防腐层粘接状态^[13-16]。建立基于管道防腐层结构的密度属性、厚度函数与超声透射系数、反射系数的幅值变化之间的关系,通过管道防腐层粘接状态不同时的介质参数变化建立粘接状态识别方法,进一步为管道防腐层预诊断提供一定的理论依据。

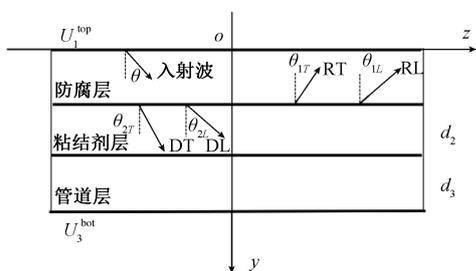
1 微体元材料参数的超声导波传播模型

附着防腐层管道模型示意图如图1所示,其为3层结构,分别为防腐层、粘结剂层和管道层。由于目前国内油气管道尺寸 D_0 大多介于220~1220 mm,设管道宽度 d_0 在2~10 mm的管道段为管道微体元结构V,因 $D_0/d_0 > 100$,因此其传播特性可由板状结构近似替代。将管道划分为 N 个宽度为 d_0 的三层管道微体元结构,记为 V_m ,研究 V_m 中导波传播特性并建立 V_m 与 V_{m+1} 间传递模型。在管道中超声导波能量变化表现为 V_m 与 V_{m+1} 间导波能量衰减作用之和, V_m 与 V_{m+1} 之间导波传播特性可



(a) 附着防腐层的管道模型图

(a) Pipeline model drawing with anticorrosive coating



(b) 微体元V粘接结构模型图

(b) Model diagram of micro voxel V bonding structure

图1 附着防腐层管道的超声传播模型图

Fig. 1 Ultrasonic propagation model of pipeline with anticorrosive coating

用角度补偿算子进行表示。如图1(b)所示为图1(a)中管道微体元V结构图,每层材料均为各向同性,不考虑 x 方向时,超声导波斜入射层状结构在 $y-z$ 平面内。本文公式中所有下标 n 均表示微体元的第 n 层结构,沿 y 方向表示为 $n=1,2,3$ 。 D 为微体元V的厚度, $D = \sum_{n=1}^3 d_n$, d_n 为微体元V中第 n 层的厚度。

为了确定图1(b)中微体元V每一层的位移场,利用Helmholtz分解将广义位移场分解为膨胀波和等容波两部分

$$u_n = \nabla \Phi_n + \nabla \times \psi_n \quad n = 1, 2, 3 \quad (1)$$

它的通解形式为

$$\Phi_n = C_1^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} + y \cos \theta_{nL})] + C_2^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} - y \cos \theta_{nL})] \quad (2)$$

$$\psi_n = C_3^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} + y \cos \theta_{nT})] + C_4^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} - y \cos \theta_{nT})] \quad (3)$$

$$k_{nL} = \frac{\omega}{C_{nL}}, k_{nT} = \frac{\omega}{C_{nT}} \quad (4)$$

式中: C_{nL} 为纵波在第 n 层中的波速, C_{nT} 为横波在第 n 层中的波速, $C_1^n, C_2^n, C_3^n, C_4^n$ 是任意常数。

式(2)和(3)的每一势函数均为两项之和,其中 y 为正表示平面波向下传播,为负表示向上传播,因此在微体元的每层介质中存在两个纵波和两个横波,其中一个纵波和一个横波分别沿与法向成 θ_{nL} 和 θ_{nT} 角的方向向下传播,另外的一个纵波和一个横波沿与法向成相同角度的方向向上传播。

声波在第 n 层传播时沿 y 轴和 z 轴表示的位移场分量分别用 u_{yn} 和 u_{zn} 表示。

$$u_{yn} = ik_{nL} \cos \theta_{nL} C_1^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} + y \cos \theta_{nL})] - ik_{nL} \cos \theta_{nL} C_2^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} - y \cos \theta_{nL})] + ik_{nT} \sin \theta_{nT} C_3^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} + y \cos \theta_{nT})] + ik_{nT} \sin \theta_{nT} C_4^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} - y \cos \theta_{nT})] \quad (5)$$

$$u_{zn} = ik_{nL} \sin \theta_{nL} C_1^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} + y \cos \theta_{nL})] + ik_{nL} \sin \theta_{nL} C_2^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} - y \cos \theta_{nL})] + ik_{nT} \cos \theta_{nT} C_3^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} + y \cos \theta_{nT})] - ik_{nT} \cos \theta_{nT} C_4^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} - y \cos \theta_{nT})] \quad (6)$$

根据胡克定律关系式,依据应变-应力的关系可获得微体元V第 n 层粘接结构中的应力分量。

$$\sigma_{yy} = -k_{nL}^2 (\lambda_n + 2\mu_n \cos^2 \theta_{nL}) C_1^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} + y \cos \theta_{nL})] - k_{nL}^2 (\lambda_n + 2\mu_n \cos^2 \theta_{nL}) C_2^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} - y \cos \theta_{nL})] - 2\mu_n k_{nT}^2 \sin \theta_{nT} \cos \theta_{nT} C_3^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} + y \cos \theta_{nT})] + 2\mu_n k_{nT}^2 \sin \theta_{nT} \cos \theta_{nT} C_4^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} - y \cos \theta_{nT})] \quad (7)$$

$$\sigma_{yz} = -2\mu_n k_{nL}^2 \sin 2\theta_{nL} C_1^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} + y \cos \theta_{nL})] + 2\mu_n k_{nL}^2 \sin 2\theta_{nL} C_2^n \exp[ik_{nL}(z \sin \theta_{nL} - y \cos \theta_{nL})] +$$



$$\mu_n k_{nT}^2 \cos 2\theta_{nT} C_3^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} + y \cos \theta_{nT})] + \mu_n k_{nT}^2 \cos 2\theta_{nT} C_4^n \exp[ik_{nT}(z \sin \theta_{nT} - y \cos \theta_{nT})] \quad (8)$$

式中: λ_n, μ_n 为拉梅常数, $\lambda_n + 2\mu_n = \rho_n C_{nL}^2, \mu_n = \rho_n C_{nT}^2, \rho_n$ 为微体元 V 中第 n 层结构材料的密度。根据 Snell 定理, 有:

$$k_{nT} \sin \theta_{nT} = k_{nL} \sin \theta_{nL} = s \quad (9)$$

附着防腐层管道的上下表面均为自由表面, 则微体元的上下表面也均为自由表面, 在自由表面上应力矢量场为零。

$$\sigma_{yy1}^{top} = \sigma_{yz1}^{top} = 0, \quad y = 0 \quad (10)$$

$$\sigma_{yy3}^{top} = \sigma_{yz3}^{top} = 0, \quad y = D \quad (11)$$

由式(5)~(8), 可将微体元 V 第 n 层材料中导波的位移-应力分量用矩阵形式表示。

$$U_n(y, z) = [u_{yn} \quad u_{zn} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{yz}]^T = D_n [k_{nL} C_1^n \quad k_{nL} C_2^n \quad k_{nT} C_3^n \quad k_{nT} C_4^n]^T e^{isz} = D_n [A_{nL}^+ \quad A_{nL}^- \quad A_{nT}^+ \quad A_{nT}^-]^T e^{isz} = D_n A_n e^{isz} \quad (12)$$

式中: e^{isz} 为简谐因子; A_{nL} 表示微体元 V 第 n 层介质中纵波的位移振幅; A_{nT} 表示第 n 层介质中横波的位移振幅, 且 $A_{nL} = k_{nL} C^n, A_{nT} = k_{nT} C^n, A_n = [A_{nL}^+ \quad A_{nL}^- \quad A_{nT}^+ \quad A_{nT}^-]^T$ 由 4 个子波的幅值组成, D_n 为第 n 层材料的参数特征矩阵。

$$D_n = \begin{bmatrix} e^{l_n} \cos \theta_{nL} & -e^{-l_n} \cos \theta_{nL} \\ e^{l_n} \sin \theta_{nL} & e^{-l_n} \sin \theta_{nL} \\ -a_n e^{l_n} & -a_n e^{-l_n} \\ -2c_n e^{l_n} \sin 2\theta_{nL} & 2c_n e^{-l_n} \sin 2\theta_{nL} \\ e^{l_n} \sin \theta_{nT} & e^{-l_n} \sin \theta_{nT} \\ e^{l_n} \cos \theta_{nT} & e^{-l_n} \cos \theta_{nT} \\ -2b_n e^{l_n} \sin 2\theta_{nT} & 2b_n e^{-l_n} \sin 2\theta_{nT} \\ b_n e^{l_n} \cos 2\theta_{nT} & b_n e^{-l_n} \cos 2\theta_{nT} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $t_n = i\omega y \cos \theta_{nT} / C_{nT}, l_n = i\omega y \cos \theta_{nL} / C_{nL}, a_n = \omega \rho_n (C_{nL}^2 - 2C_{nT}^2 \sin^2 \theta_{nL}) / C_{nL}, b_n = \omega \rho_n C_{nT}, c_n = \omega \rho_n C_{nT}^2 / C_{nL}$ 。

依据经典的 Thomson 传递矩阵方法, 将位移-应力关系矩阵从上界面 U_n^{top} 转换到下界面 $U_n^{bot}, I_n(d) = D_n^{top} D_n^{bot-1}$ 为传递矩阵。

$$U_n^{bot} = I_n(d) U_n^{top} \quad (14)$$

在介质的粘接界面处应满足界面位移和应力连续的条件, 在微体元 V 第 n 层介质的上界面处位移-应力应满足如下连续条件。

$$\begin{cases} \sigma_{yy(n)}^{top} = \sigma_{yy(n-1)}^{bot} = K_N^{n-1} (u_{y(n-1)}^{bot} - u_{yn}^{top}) \\ \sigma_{yz(n)}^{top} = \sigma_{yz(n-1)}^{bot} = K_T^{n-1} (u_{z(n-1)}^{bot} - u_{zn}^{top}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: K_N^{n-1} 与 K_T^{n-1} 分别为微体元 V 中第 n 层介质与第 $n-1$ 层介质间界面处的法向和切向劲度分量。由此可得

到相邻界面间导波位移-应力矩阵的传递关系如(16)所示, 其中 L_{n-1} 为微体元 V 中相邻两层介质界面应力-位移场传递矩阵。

$$U_n^{top} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{K_N^{n-1}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{K_T^{n-1}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} U_{n-1}^{bot} = L_{n-1} U_{n-1}^{top} \quad (16)$$

最终, 按照微体元 V 的每层介质上下界面间的应力-位移传递矩阵关系式(14)和介质粘接界面处应力-位移传递矩阵关系式(16), 通过递归方法得到微体元 V 上表面处的应力-位移和下表面处的应力-位移关系为:

$$U_3^{bot} = I_3(d_3) L_2 I_2(d_2) L_1 I_1(d_1) U_1^{top} \quad (17)$$

由此可得到微体元 V 每一层介质中四个子波幅值的传递规律为:

$$A_3 = D_3^{top-1} L_2 I_2(d_2) L_1 I_1(d_1) D_1^{bot} A_1 = Q_3(\rho, d) A_1 \quad (18)$$

式中: Q_3 为微体元 V 的总传递矩阵, $Q_3(\rho, d)$ 是介质材料固有属性密度和厚度的函数。每一层的 4 个子波可表示为透射纵波 DL , 透射横波 DT , 反射纵波 RL 和反射横波 RT 。当入射波的幅值为单位幅值时, DL, RL, DT, RT 即为微体元 V 的超声透射系数和反射系数的幅值。

$$A_i = [DL_i \quad DT_i \quad RL_i \quad RT_i]^T \quad (19)$$

当单位幅值纵波入射到微体元 V 表面时, 则第 n 层介质中子波幅值为

$$A_n = \begin{bmatrix} DL_n \\ RL_n \\ DT_n \\ RT_n \end{bmatrix} = Q_n(\rho, d) \begin{bmatrix} DL_1 \\ 1 \\ DT_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

当单位幅值横波入射到微体元 V 表面时, 则第 n 层介质中子波幅值为

$$A_n = \begin{bmatrix} DL_n \\ RL_n \\ DT_n \\ RT_n \end{bmatrix} = Q_n(\rho, d) \begin{bmatrix} DL_1 \\ 0 \\ DT_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

依据式(20)和(21)即可求出超声导波在微体元 V 中传递的反射系数与透射系数。

根据固体介质粘接界面处位移和应力场的法向分量和切向分量都连续的理论, 依据式(15)可以得到如下方程。

$$u_{y(n-1)}^{bot} = u_{yn}^{top}, u_{z(n-1)}^{bot} = u_{zn}^{top}, \quad y = d_n \quad (22)$$

$$\sigma_{yy(n-1)}^{bot} = \sigma_{yy(n)}^{top}, \sigma_{yz(n-1)}^{bot} = \sigma_{yz(n)}^{top}, \quad y = d_n \quad (23)$$

微体元 V 的每一层介质中含有 4 个未知系数 C_1^n ,



C_2^n, C_3^n, C_4^n , 3层粘接结构中即含有 4×3 个未知量。依据自由表面应力场为零和粘接界面处位移场应力场连续的理论,可得出式(10)、(11)、(22)、(23),将其联立成为一个齐次方程组。

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1(12)} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2(12)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{(12)1} & G_{(12)2} & \cdots & G_{(12)(12)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^1 \\ C_2^1 \\ \vdots \\ C_4^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:矩阵 G 中各元素分别为未知量矩阵 C 的系数。

令矩阵 G 为 0 即可得到微体元 V 的频散方程,实际上就是求解式(24)方程的解,频散方程可以表示为

$$|G(\omega, k, \lambda, \mu, d, \rho, \theta)| = 0 \quad (25)$$

对于给定的材料参数 λ, μ 和几何参数 d , 依据式(25)即可求其解频散方程。

超声导波在附着防腐层的管道微体元 V 中传播到原先静止的介质中时,会使介质质点在平衡位置附近来回振动,使介质质点具有了声能量。将附着防腐层的管道粘接结构看作由许多紧密相连的微小体积元组成,如图1(a)所示,选取其中一个单位体积元,则声波传递使该体积元得到的能量为

$$E = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (26)$$

超声导波在多层介质中传播时,其能量不仅随传播距离的增加而减小,还会透过刚性粘接界面泄漏到相邻介质层中,刚性界面越长能量泄漏越多。对于存在导波频散的管道三层粘接结构,其介质内能量传播速度与导波的群速度相等。在管道粘接结构中用声压来表示超声波传递中的衰减,微体元中某点的声压可以表示为

$$q_x = q_0 e^{-\alpha x} \quad (27)$$

式中: α 为衰减系数; q_0 为起始点声压; x 为导波从起始点开始传播的距离。

导波能量泄漏的大小可以表示为:

$$q_y = q_0 e^{-\beta y} \quad (28)$$

式中: β 为能量泄漏系数; y 表示刚性界面的距离。

因此,超声导波能量在微体元 V 中传播大小表示为

$$q = q_0 e^{-\alpha x - \beta y} \quad (29)$$

由于导波能量在整个管道的传递过程中不受导波入射角度的影响,因此能量的变化只与传递距离及介质有关,所以整个管道具有的信号能量为

$$q_{\text{总}} = \sum_{i=1}^N q_0 e^{-\alpha \frac{\varphi_i \pi r}{180} - \beta y} \quad (30)$$

将附着防腐层的管道划分为 N 个微体元,令每个微体元结构对应的圆周角为 φ_i , 超声导波以角度 θ 入射到第 m 个小粘接结构表面,最终以 θ_i 反射进下一个微体元结构之中,由于相邻的两个微体元结构之间对应不同位置的圆心角,因此用 $\theta_i \pm \varphi_i$ 补偿算子来表示其相邻的微

体元结构的导波入射角度,由式(16)可得到第 m 个微体元 V_m 的导波传递关系为

$$A_{m3} = D_{m3}^{\text{top}-1} L_{m2} I_{m2} L_{m1} I_{m1} D_{m1}^{\text{bot}} A_{m1} = Q_{m3}(\rho, d) A_{m1} \quad (31)$$

依据角度补偿算子可以得到第 $m+1$ 个微体元 V_{m+1} 的导波传递关系为

$$A_{(m+1)3} = Q_{m3}(\rho, d, (\theta_i \pm \varphi_i)) A_{m1} = Q_{(m+1)3}(\rho, d) A_{(m+1)1} \quad (32)$$

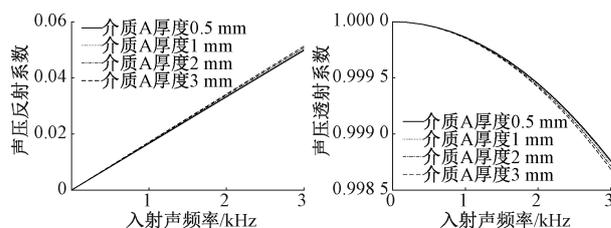
则整个管道的导波传递关系可以表示为

$$A_{3\text{总}} = \lim_{\varphi \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N I_3 L_2 I_2 L_1 I_1 U_1^{\text{top}} = \lim_{\varphi \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N Q_3(\rho, d, (\theta_i \pm \varphi_i)) A_1 \quad (33)$$

由此建立的超声导波在管道中的传播模型,为下一步研究材料参数变化对粘接性能的影响提供了理论依据。

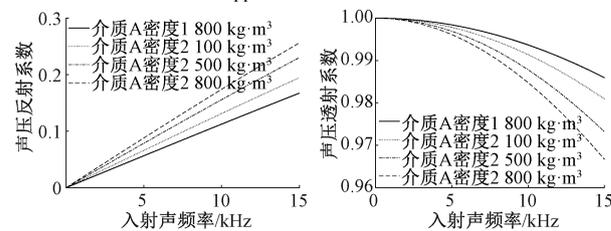
2 微体元材料参数变化时的信号特性分析

选择双层粘接结构的微体元,分析其介质参数变化对超声反射系数和透射系数的影响。如图2所示分别为上层介质厚度变化和密度变化对整个粘接结构的超声反射系数和透射系数的影响。从图2中可以看出,当上层介质厚度变化时,在非常微小的范围内,反射系数随上层介质厚度增大而增大,透射系数随上层介质厚度增大而减小,且透射系数远大于反射系数。当上层介质密度变化时,反射系数随密度增大而增大,透射系数随密度的增大而减小。



(a) 上层介质不同厚度时的反射系数透射系数

(a) Reflection coefficient and transmission coefficient of upper medium with different thickness



(b) 上层介质不同密度时的反射系数透射系数

(b) Reflection coefficient and transmission coefficient of upper medium with different density

图2 双层粘接结构不同状态下的反射系数透射系数

Fig. 2 Reflection coefficient and transmission coefficient of double-layer bonding structure in different states



通过对超声导波传播特性分析可知,超声导波具有频散特性,对于确定的粘接材料和超声信号的发射频率及角度,不同密度和厚度的介质具有不同的频散特性。不同介质参数状态下的频散曲线如图 2 所示。

图 3(a)中实线和点划线分别表示 1 mm 厚度有机玻璃板的频散曲线,虚线和双划线分别表示 2 mm 厚度有机玻璃板的频散曲线。通过对比分析可知,下层介质厚度不改变,当上层介质厚度增加时,其频散模态曲线向频厚积减小的方向偏移。图 3(b)中实线和点划线分别表示双层铝板的频散曲线,虚线和双划线表示有机玻璃板-铝板的频散曲线,且上层铝板和上层有机玻璃板厚度相同,铝板的密度是有机玻璃板密度的两倍有余。通过对比分析可知,当下层铝板厚度相同时,上层介质的密度增大,其频散模态曲线向频厚积增大的方向偏移。

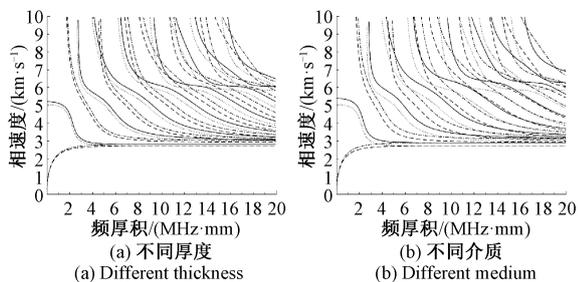


图 3 双层粘接结构不同状态下的频散曲线

Fig. 3 The dispersion curves of two-layer bonding structures in different states

依据超声导波能量衰减随传播距离变化的规律,可通过小波包算法获得微体元的信号能量。表 1 所示为微体元不同粘接状态下所具有的信号能量,可以看出信号能量与信号最大幅值具有一致性,微体元的脱粘部分越大,其自由界面越大,使得信号具有的能量越大。

表 1 微体元不同粘接状态时的信号能量

Table 1 Signal energy of microbody in different bonding states

微体元粘接状态	信号最大幅值/V	信号能量/v ²
粘接完好	0.118 0	15.173 7
小部分脱粘	0.153 4	15.440 9
大部分脱粘	0.180 1	77.375 6

针对超声导波的微体元粘接结构检测,超声导波的频散和多模态特性使得接收到的超声回波信号是非平稳信号,其频域特征是随时间变化的,需从时域、频域对其进行局部分析。平滑伪 Wigner-Ville 分布 SPWVD 是一种双线性时频分布,且时频特性和聚集性能也均保持较好,因为有窗函数 $g(u)$ 在时间、频率两方面进行平滑,它还具有较佳的消交叉项效果。SPWVD 表达式为

$$SPW_x = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} g(u) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^* \times \left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\tau} dud\tau \quad (34)$$

式中: $h(\tau)$ 为矩形窗函数; $g(u)$ 为平滑窗函数。

3 实验与结果分析

本文选择与附着防腐层管道性能接近的有机玻璃板-铝板两层粘接结构为实验对象,分别分析粘接完好、弱粘接和部分脱粘三种粘接状态下不同介质参数改变引起的超声回波信号特征量变化,建立介质参数变化与超声回波信号特征量之间的对应关系。实验中选择频率为 2.5 MHz 的斜探头激发超声导波,在接收探头处接收双层板的超声回波信号。

3.1 粘接完好结构回波信号分析

双层粘接板的材料参数如表 2 所示,其实验模型如图 4 所示,铝板厚度为 15 mm,分别采集有机玻璃板厚度为 1 mm 和 2 mm 时的回波信号,并对检测到的信号做 SPWVD 时频分析,得到的波形如图 5 和 6 所示。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料类型	密度 /(kg·m ⁻³)	纵波波速 /(m·s ⁻¹)	横波波速 /(m·s ⁻¹)
铝板	2 699	6 212	3 119
有机玻璃	1 180	2 730	1 460

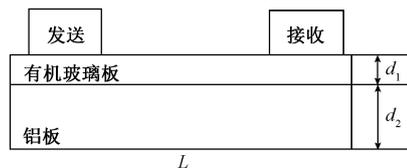


图 4 双层结构粘接完好实验模型

Fig. 4 Experimental model of good adhesion of double layer structure

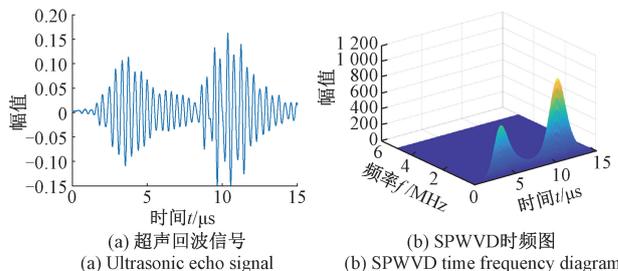


图 5 1 mm 有机玻璃板的超声回波信号与其时频分布图

Fig. 5 Ultrasonic echo signal and its time-frequency distribution of 1 mm plexiglass plate

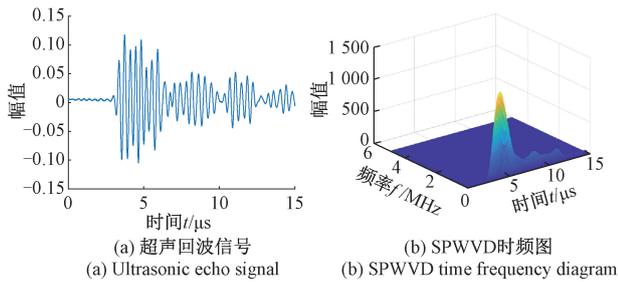


图 6 2 mm 有机玻璃板的超声回波信号与其时频分布图
Fig. 6 Ultrasonic echo signal and its time-frequency distribution of 2 mm plexiglass plate

当双层粘接结构粘接完好但在铝板下表面存在缺陷时的实验模型如图 7 所示,有机玻璃厚度为 1 mm,铝板厚度为 15 mm,分别采集铝板缺陷厚度为 1 mm 和 2 mm 时的超声回波信号,并对其进行 SPWVD 时频分析,如图 8、9 所示。

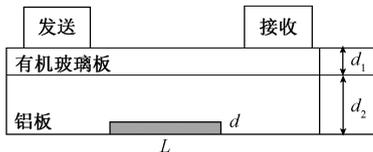


图 7 铝板存在结构缺陷时的实验模型
Fig. 7 Experimental model of aluminum plate with structural defects

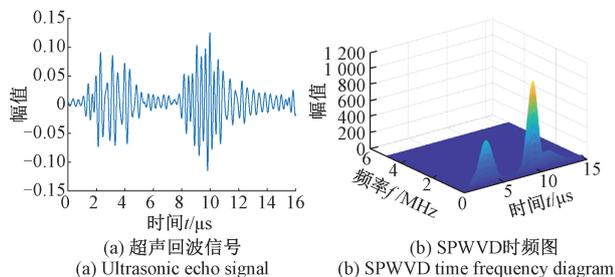


图 8 1 mm 铝板缺陷的超声回波信号与其时频分布图
Fig. 8 Ultrasonic echo signal and its time-frequency distribution of 1 mm aluminum plate defect

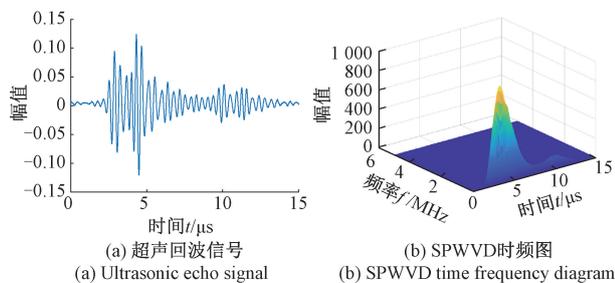


图 9 2 mm 铝板缺陷的超声回波信号与其时频分布图
Fig. 9 Ultrasonic echo signal and its time-frequency distribution of 2 mm aluminum plate defect

对图 4 和 7 实验中采集到的超声回波数据进行分析,并利用小波包分解算法求得回波信号能量,得到的不同状态检测信号对比分析如表 2 所示。其中,图 5 对应的双层板状态为 $d_1 = 1 \text{ mm}, d = 0 \text{ mm}$,图 6 对应的双层板状态为 $d_1 = 2 \text{ mm}, d = 0 \text{ mm}$,图 8 对应的双层板状态为 $d_1 = 1 \text{ mm}, d = 1 \text{ mm}$,图 9 对应的双层板状态为 $d_1 = 1 \text{ mm}, d = 2 \text{ mm}$ 。

由表 3 结合时频图分析可知,当有机玻璃板厚度增大时,超声导波回波信号的最大幅值减小,信号能量减小。由于有机玻璃板为黏弹性介质,其对超声导波的传播有迟滞和衰减作用,因此有机玻璃板厚度越大,导波传递时能量衰减得越快。当有机玻璃板厚度一定,铝板缺陷厚度增大,超声导波回波信号的最大幅值减小,信号能量减小。由于导波在铝板传播过程中遇到非连续界面的缺陷时,不再沿原路径传播,而是会散射成更复杂的路径传播,增加了导波能量的损耗使其能量加速减小,存在缺陷面积越大,导波能量损耗越大。

表 3 双层结构不同状态下的检测信号对比分析
Table 3 Comparative analysis of detection signals in different states of double layer structure

双层板不同状态 /mm	最大幅值 /V	幅值峰值时 刻/ μs	信号能量 / V^2
$d_1 = 1, d = 0$	0.162 2	10.37	35.121 4
$d_1 = 2, d = 0$	0.117 5	3.730	15.185 7
$d_1 = 1, d = 1$	0.125 1	8.973	16.042 7
$d_1 = 1, d = 2$	0.123 7	4.414	10.120 2

3.2 基于密度变化的弱粘接结构回波信号分析

由于有机玻璃板在粘接界面处介质密度变化而引起双层板弱粘接的实验模型如图 10 所示。聚丙烯板密度略小于有机玻璃,实验中用其代替有机玻璃密度变化的部分,表示双层粘接结构为弱粘接状态。

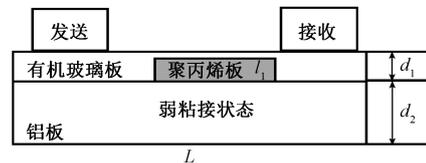


图 10 双层结构弱粘接实验模型
Fig. 10 Experimental model of weak bonding of double layer structure

铝板厚度为 15 mm,有机玻璃板厚度为 2 mm,宽度均为 L,聚丙烯板厚度为 1 mm,分别采集其宽度 $l_1 = 50 \text{ mm}$ 和 $l_1 = 100 \text{ mm}$ 时的超声回波信号,并对其时频分析,得到波形如图 11 所示。对图 11 中采



集到的超声回波数据进行分析, 并利用小波包分解算法求得回波信号能量, 得到的不同状态检测信号对比分析如表 4 所示。

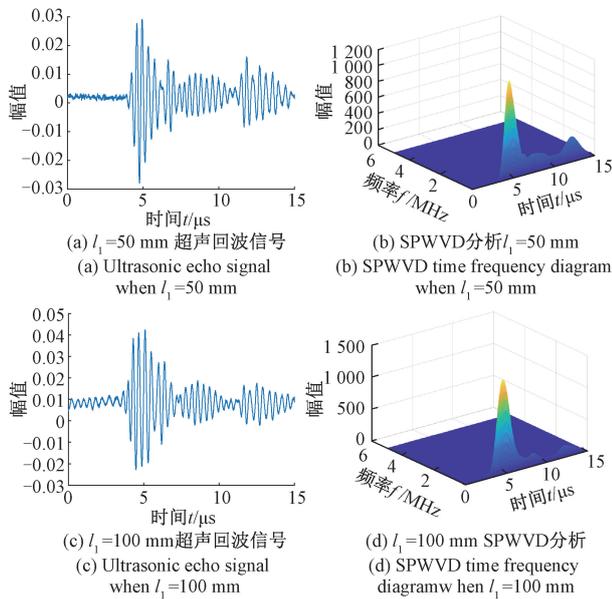


图 11 双层结构弱粘接状态的超声回波信号与其时频分布图

Fig. 11 Ultrasonic echo signal and its time-frequency distribution in weak bonding state of double-layer structure

表 4 双层结构弱粘接状态下的检测信号对比分析
Table 4 Comparative analysis of detection signals of double layer structure under weak bonding state

弱粘接宽度 /mm	最大幅值 /V	幅值峰值时刻 / μ s	信号能量 / v^2
$l_1 = 50$	0.029 1	4.936	0.662 7
$l_1 = 100$	0.042 4	5.084	2.105 5

由表 4 结合时频图分析可知, 弱粘接的面积越大, 超声回波信号的最大幅值越大, 能量越大。由于弱粘接部分介质的密度减小, 使得导波的反射能力减弱, 透射能力增强, 存在弱粘接的部位可看作为 3 层不同介质的粘接结构, 其中中间层的密度最小, 根据超声导波传递特性和频散特性, 信号能量向中间层聚集, 因此中间层宽度越大, 信号具有能量越大。与图 6 粘接完好状态相比, 最大幅值和信号能量都大大减小, 这是由于在实验中用聚丙烯板替代部分有机玻璃板, 不同介质相连接时存在结构不连续现象, 使得导波传递的损耗加大, 导致信号能量减小。

3.3 基于厚度变化的部分脱粘结构回波信号分析

由于有机玻璃结构缺陷导致双层粘接结构部分脱粘的检测模型如图 12 所示。

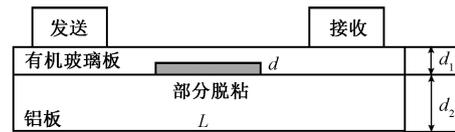


图 12 双层结构部分脱粘实验模型

Fig. 12 Experimental model of partial debonding of double layer structure

其中铝板厚度为 15 mm, 宽度为 L , 脱粘部分为空气, 宽度为 $L/3$ 。当有机玻璃板厚度为 1 mm 时, 采集脱粘厚度 $d = 1$ mm 时的超声回波信号, 当有机玻璃板厚度为 2 mm 时, 分别采集脱粘厚度 $d = 1$ mm 和 $d = 2$ mm 时的超声回波信号, 分别对其进行 SPWVD 时频分析, 得到波形如图 13 和 14 所示。

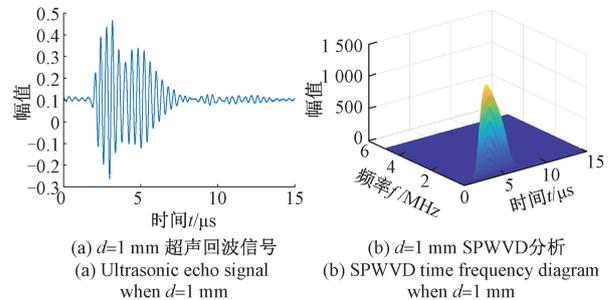


图 13 1 mm 有机玻璃板脱粘结构超声回波信号与时频分布图

Fig. 13 Ultrasonic echo signal and time frequency distribution of 1 mm PMMA debonding structure

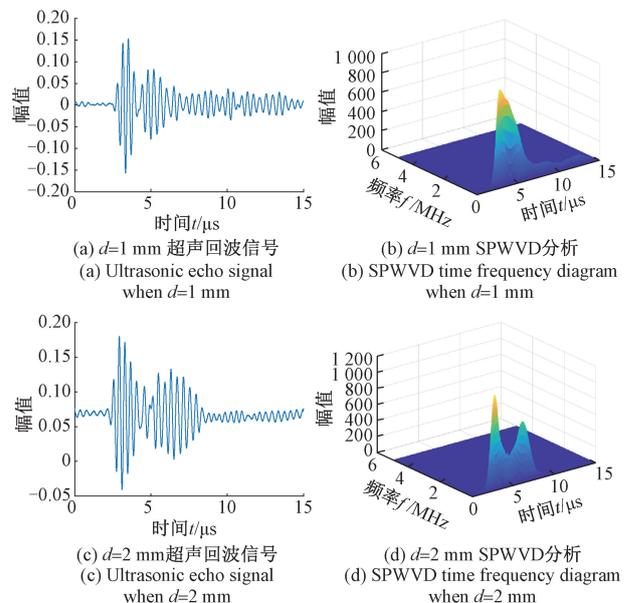


图 14 2 mm 有机玻璃板脱粘结构超声回波信号与时频分布图

Fig. 14 Ultrasonic echo signal and time frequency distribution of 2 mm PMMA debonding structure



对图 13 和 14 中采集到的超声回波数据进行分析,并利用小波包分解算法求得回波信号能量,得到的不同状态检测信号对比分析如表 5 所示。

表 5 双层结构部分脱粘状态下检测信号对比分析

Table 5 Comparative analysis of detection signals of double layer structure under partial debonding state

脱粘厚度 /mm	最大幅值 /V	幅值峰值时刻 / μ s	信号能量 / v^2
$d_1 = 1, d = 1$	0.465 7	3.164	290.587 3
$d_1 = 2, d = 1$	0.153 3	3.516	15.474 1
$d_1 = 2, d = 2$	0.180 1	2.928	81.132 7

由表 5 结合图 13 和 14 时频图分析可知,当有机玻璃板厚度为 1 mm 时,信号有最大幅值和最大能量,此时双层粘接结构可视为粘接完好的“凹”型结构,相比于图 8 铝板缺陷状态,导波传播路径更简单,衰减更缓慢,因此信号具有较大能量;当有机玻璃板厚度为 2 mm 时,脱粘厚度越大,超声回波信号的最大幅值越大,信号能量越大,结合图 6 粘接完好状态分析,存在脱粘结构的信号能量大于粘接完好结构,这是因为脱粘界面为自由界面,导波信号传递到自由界面时能量不会泄漏,传播路径缩短使得信号衰减变缓慢,因此信号能量较大。

3.4 实验结果分析

如图 15 所示为双层板 7 种粘接状态下超声回波信号的最大幅值与信号能量的变化趋势图。可以看出,粘接状态从完好过渡到弱粘接时,信号的能量会有所下降;从弱粘接状态转变为部分脱粘时,信号的能量明显上升;当铝板下表面存在缺陷时,信号能量介于完好状态与弱粘接状态之间。由于信号的特征量在各种粘接状态间存在明显的差异,因此可以用其来识别多层结构的粘接状态。

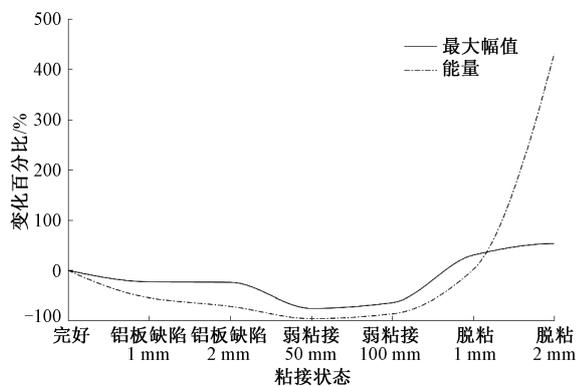


图 15 7 种粘接状态下回波信号特征值变化趋势图

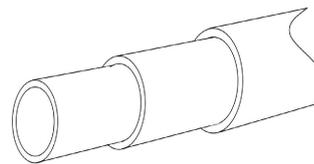
Fig. 15 Variation trend of echo signal eigenvalues under seven bonding states

基于上述分析过程,发现对于由材料参数变化而引起的粘接状态改变的识别,回波信号的最大幅值和信号能量两个特征量有良好的效果。如图 16 为附着防腐层的管道,其上有防腐层粘接完好,基于防腐层密度变化的弱粘接和基于防腐层厚度变化的部分脱粘三种状态,对每种状态分别进行超声导波检测,总共获取到 130 组有效检测信号,包括 50 组防腐层粘接完好信号,40 组防腐层密度变化的信号和 40 组防腐层厚度变化的信号。上述 50 组粘接完好信号中包含 20 组铝板缺陷信号,由于本课题研究的是管道防腐层粘接状态,故对由铝板缺陷引起的粘接状态弱化不做深入研究,仅探讨了对粘接状态不造成影响的铝板下表面缺陷,发现其信号能量介于粘接完好状态与弱粘接状态之间且远大于弱粘接状态,故在识别分类时将其归于粘接完好状态。以 7:3 的比例分配训练集和测试集,其中 91 组作为训练集,39 组作为测试集,使用特征量具有独立性的朴素贝叶斯分类器对其粘接状态进行检测识别。检测结果为:朴素贝叶斯分类器能正确识别 36 组信号的粘接状态,识别率达到了 92.31%。



(a) 附着防腐层管道

(a) Pipeline with anticorrosive coating



(b) 3层管道结构

(b) Three layer pipeline structure

图 16 附着防腐层管道三层结构

Fig. 16 Three layer structure of pipeline with anticorrosive coating

4 结 论

本文利用非线性超声导波对附着防腐层的管道粘接结构进行检测,首先建立超声导波在管道微体元粘接结构中的传播模型,分析导波传播过程中的频散特性及能量传递特性,再通过引入角度因子将微体元的导波传播特性变换到附着防腐层管道结构中。选择与附着防腐层管道性质相近的有机玻璃-铝板作为实验对象,针对双层



粘接结构粘接完好状态、基于密度变化的弱粘接状态和基于厚度变化的部分脱粘状态三种情况进行分析,采用时频特性和聚集性均保持较好的双线性伪 Wigner-Ville 分布 SPWVD 对回波信号做时频分析,采用小波包分解算法获取回波信号的能量,根据不同粘接状态的超声回波信号可得出其介质参数变化与信号特征量之间的关系,由此作为判断多层结构粘接状态及识别介质参数变化的依据。

实验结果表明:回波信号的最大幅值与信号能量具有一致性,基于厚度变化的部分脱粘状态的信号能量最大,且脱粘面积越大信号能量越大;基于密度变化的弱粘接状态的信号能量最小,且弱粘接面积越小信号能量越小;当粘接结构存在不影响粘接状态的缺陷时,信号能量稍小于粘接完好状态且介于粘接完好状态与弱粘接状态之间,缺陷面积越大信号能量越小。以回波信号的最大幅值和信号能量作为识别管道防腐层粘接状态的特征量,使用朴素贝叶斯分类器得到识别率为 92.31%。

参考文献

- [1] 杨理践,吕瑞宏,高松巍,等. 基于 SH 导波的防腐层能量密度检测机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2016(5): 1101-1109.
YANG L J, LYU R H, GAO S W, et al. Research on energy density detection mechanism of anticorrosive coating based on SH guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2016(5):1101-1109.
- [2] NSENGIYUNMVA W, ZHONG S C, LIN J W, et al. Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures; A state-of-the-art review [J]. Composite Structures Volume, 2021, 256:112951.
- [3] 凡丽梅,董方旭,安志武,等. 橡胶/铝合金粘接构件脱粘缺陷非线性超声检测技术研究[J]. 中国测试, 2020,6(8): 15-21+43.
FAN L M, DONG F X, AN ZH W, et al. Non linear ultrasonic testing technology for debonding defects of rubber/aluminum alloy bonded components [J]. China Test, 2020, 6(8):15-21+43.
- [4] 焦敬品,李立,马百义,等. 基于超声局部谐振的板结构缺陷定量检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12):1-8.
JIAO J P, LI L, MA B Y, et al. Quantitative detection method of plate structure defects based on ultrasonic local resonance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(12):1-8.
- [5] WANG G F, LI F C, LIU Z Q, et al. Research on ultrasonic guided wave-based damage localization for pipeline structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3):440-448.
- [6] VETRONE J, OBREGON J E, INDACOCHEA E J. The characterization of deformation stage of metals using acoustic emission combined with nonlinear ultrasonics[J]. Measurement Volume, 2021, DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109407.
- [7] 戴世玉. 埋地管道防腐层检测技术在燃气管道检测中的应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(23):60-62.
DAI SH Y. Research on application of buried pipeline anticorrosive coating detection technology in gas pipeline detection[J]. Standards and quality of China Petroleum and Chemical Industry, 2020,40(23):60-62.
- [8] 张玉洁,陈兴杰,朱文发. 钢-混凝土结构弱粘接界面缺陷的超声导波检测[J]. 应用声学, 2020, 39(3): 379-385.
ZHANG Y J, CHEN X J, ZHU W F. Ultrasonic guided wave detection of weak bonding interface defects of steel concrete structure [J]. Applied Acoustics, 2020, 39(3): 379-385.
- [9] 刘婧,徐卫疆,胡文祥. 三层介质超声谐振模式随材料和界面粘接性能变化的演变规律[J]. 物理学报, 2016(7):211-222.
LIU J, XU W J, HU W X. Evolution of ultrasonic resonance mode of three-layer medium with material and interface bonding properties [J]. Acta Physica Sinica, 2016(7):211-222.
- [10] 孙凯华,李建文,孙朝明,等. 钢-铅粘接结构的粘接强度对超声体波反射与透射特性的影响[J]. 应用声学, 2019,38(1):93-104.
SUN K H, LI J W, SUN ZH Y, et al. Influence of bonding strength of steel lead bonding structure on ultrasonic body wave reflection and transmission characteristics [J]. Applied acoustics, 2019, 38(1): 93-104.
- [11] PALUMBO D, TAMBORRINO R, GALIETTI U, et al. Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints [J]. NDT & E International, 2015, 78(March): 1-9.
- [12] KUANSHUANG Z, SHICHENG L, ZHENGGAN Z. Detection of disbonds in multi-layer bonded structures using the laser ultrasonic pulse-echo mode [J]. Ultrasonics, 2018, DOI: 10.1016/j.ultras.2018.06.005.
- [13] 石明江,罗仁泽,付元华. 小波和能量特征提取的旋转



机械故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8):1114-1120.

SHI M J, LUO R Z, FU Y H. Fault diagnosis method of rotating machinery based on Wavelet and energy feature extraction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8):1114-1120.

- [14] 王一鹏,陈学振,李连玉. 基于小波包混合特征和支持向量机的机床主轴轴承故障诊断研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 59-64.

WANG Y P, CHEN X ZH, LI L Y. Fault diagnosis of machine tool spindle bearing based on wavelet packet hybrid feature and support vector machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 59-64.

- [15] 张海强,王楠,刘松,等. 基于参数优化 VMD 和 SPWVD 的轨道波磨辨识方法[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(6): 18-24.

ZHNAG H Q, WANG N, LIU S, et al. Identification method of track wave wear based on parameter optimization VMD and spwvd [J]. Railway Computer Application, 2020, 29(6): 18-24.

- [16] 齐添添,陈尧,何才厚,等. 损伤声发射信号小波包神经网络特征识别方法[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(1):124-130.

QI T T, CHEN R, HE C H, et al. Wavelet packet neural network feature recognition method for damage acoustic emission signal[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(1): 124-130.

作者简介



吕瑞宏, 2003 年于吉林大学获得学士学位, 2007 年于吉林大学获得硕士学位, 2016 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学副教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、超声检测、弱信号处理等。

E-mail: 13940303171@163.com

Lyu Ruihong obtained a bachelor's degree from Jilin University in 2003, a master's degree from Jilin University in 2007, and a doctorate degree from Shenyang University of technology in 2016. Now, she is an associate professor of Shenyang University of Technology, whose main research direction is the detection technology and related theories, ultrasonic detection and weak signal processing of long oil and gas pipelines.



杨佳怡(通信作者), 2018 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学在读硕士研究生, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、超声检测、弱信号处理等。

E-mail: 2918782350@qq.com

Yang Jiayi (Corresponding author), obtained a bachelor's degree from Shenyang University of Technology in 2018, is now a master's student in Shenyang University of Technology. Her main research direction is the detection technology and related theories, ultrasonic detection and weak signal processing of long oil and gas pipelines.