

基于超声能量特征的复合结构材料 脱粘检测方法

封华楠¹, 王鉴², 聂鹏飞², 秦鹏², 韩焱^{2*}

(1. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室;

2. 中北大学 山西省现代无损检测工程技术研究中心: 太原 030051)

摘要: 针对受限于复合结构的厚度、层数、材料种类等因素导致超声回波信号混叠, 难以实现界面脱粘检测的问题, 提出一种直接利用超声纵波反射混叠信号的能量特征进行复合结构脱粘缺陷检测的方法。首先建立单层与多层复合结构的超声信号反射与透射特性模型; 然后提取并分析不同界面粘接状态下结构的超声回波能量特征, 并基于该模型进行钢-橡胶-橡胶复合结构的脱粘检测仿真, 通过引入能量差异值进行脱粘界面识别; 最后, 利用超声波探伤设备对钢-橡胶-橡胶复合结构试样进行实际脱粘缺陷检测。理论分析和实验验证均表明, 该方法可以实现多层复合结构脱粘缺陷的有效检测。

关键词: 多层复合结构; 界面脱粘缺陷; 超声反射模型; 能量特征; 超声检测

中图分类号: TB559; TG496

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)02-0211-08

DOI: 10.12126/see.2023134

A method for debonding detection of composite structural materials based on ultrasonic energy characteristics

FENG Huanan¹, WANG Jian², NIE Pengfei², QIN Peng², HAN Yan^{2*}

(1. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, North University of China;

2. Shanxi Research Center of Modern NDT Engineering Technology, North University of China: Taiyuan, 030051, China)

Abstract: In view of the aliasing of ultrasonic echo signal due to the constraints of thickness, number of layers, and types of composite materials, a method for detecting the interface debonding of composite structures was proposed in this paper, which directly used the energy characteristics of the ultrasonic longitudinal wave reflection of the aliasing signal. Firstly, the ultrasonic signal reflection and transmission characteristic model of single- and multi-layer composite structures was established. Then, the ultrasonic echo energy characteristics of structures under different interface bonding states were extracted and analyzed. Based on this model, the debonding detection simulation of steel-rubber-rubber composite structures was carried out. The interface debonding was identified by the introduction of energy difference of signals. Finally, the steel-rubber-rubber composite structural debonding samples were discovered by the ultrasonic flaw detection equipment. Both theoretical analysis and experimental verification show that the proposed method may realize effective defect detection of multi-layer composite structures.

Keywords: multi-layer composite structures; interface debonding defect; ultrasonic reflection model; energy characteristics; ultrasonic testing

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2024-04-03

基金项目: 山西省基础研究计划项目 (编号: 202103021224189)

引用格式: 封华楠, 王鉴, 聂鹏飞, 等. 基于超声能量特征的复合结构材料脱粘检测方法[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(2): 211-218

FENG H N, WANG J, NIE P F, et al. A method for debonding detection of composite structural materials based on ultrasonic energy characteristics[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(2): 211-218

0 引言

复合材料因具有高比强度、耐腐蚀、良好的抗疲劳和抗冲击性能以及较佳的空间环境适应性等优点,被广泛应用于航空、航天、军工、化工等领域。金属与金属、金属与非金属、非金属与非金属等多层复合结构材料是应用较为普遍的特殊结构复合材料;但在其生产制造过程中,常常出现层间脱粘等缺陷,影响产品的质量和使用安全性。因此,复合结构材料的缺陷检测是当前无损检测领域的研究热点^[1]。

适用于复合结构界面粘接质量检测的方法主要使用 X 射线、CT 扫描、超声检测、红外检测、微波检测及太赫兹波检测技术,其中超声检测技术具有穿透力强、灵敏度高、成本低等优点,且超声波以振动波进行传播,不受复合材料与结构的限制,具有衰减、透射、反射、衍射等特征。考虑脱粘缺陷实际上是结构中界面和声阻抗不连续特征的表现,当声阻抗不连续时,会在界面产生反射。因此,超声波的上述特点为不同复合结构的质量检测提供了可能^[2]。国内外学者从理论和实践两方面进行了研究。理论方面, Kazys 等^[3]基于矩阵演算的方法,针对多层结构建立一维简化的超声传播模型,并对其分层特性进行表征; Hagglund 等^[4]针对多层结构各个层信息难以提取的问题,提出参数层模型的系统识别方法,用模型参数的极大似然估计方法来检测多层结构中的缺陷,但局限于恒定相位延迟;郭旭飞^[5]建立多层结构的超声幅度谱模型,获得了归一化幅频特性和相频曲线。实践方面,张建生等^[6]针对多层粘接结构界面回波信号难以区分的问题,提出用同态滤波解卷积方法对二界面信号进行位置和幅值的判别;李海宁等^[7]针对金属-胶-炸药结构中胶层厚度对缺陷检测的影响,利用水耦合介质延时,通过分析不同的胶层厚度对多次脉冲回波幅值的影响,实现脱粘检测和成像,但该方法不适用于直接耦合检测;郑金华等^[8]针对超声波在钢-玻璃钢粘接界面良好与脱粘时的衰减差异大,提出利用频域谐波谱特征识别脱粘的方法,但该方法仅在基频时对脱粘的检测效果与 C 扫结果是一致的;郑善朴等^[9]针对无法判定多层结构内部缺陷类型的问题,提出利用 BP 神经网络从特征域到类别域的非线性映射功能,对缺陷进行定性、定位和定量,但算

法相对复杂;何琦等^[10]将模糊模式识别的方法应用于多层粘接结构中脱粘类型的定位和定量,但该方法只适用于具有模糊性的脱粘类型。

上述脱粘缺陷的超声检测研究基本上是基于信号特征开展的,然而,对于多层复合结构,由于超声波在界面多次反射导致回波信号混叠严重,信号特征难以分离,影响检测的有效性。为此,本文提出一种基于超声波能量特征的复合结构材料脱粘检测的方法,通过直接提取超声纵波多次反射混叠信号能量特征的变化,实现脱粘缺陷的有效检测。

1 声波在介质中传播的基本特性

1.1 超声信号的衰减

超声波在介质中传播时,会随传播距离的增长而产生衰减。主要包括扩散衰减、散射衰减和吸收衰减等。其传播 x 距离后的声压衰减方程为

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

式中: P_0 为发射波声压; α 为声波在介质中的衰减系数,与介质材料的密度和超声信号的频率相关。

1.2 超声信号的反射与透射

当超声波入射到两种介质的界面时,其反射系数 R 和透射系数 T 分别为:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad (2)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (3)$$

式中: Z_1 为第一种介质的声阻抗; Z_2 为第二种介质的声阻抗。声阻抗 Z 与介质材料的密度 ρ 及介质内声波传播的速度 c 相关,常通过 $Z = \rho c$ 求得。多层结构由于不同层的材料密度和声速都不同,其声阻抗也不同。

1.3 超声信号的传播

超声信号在多层介质中的传输可以表述为信号通过线性级联的系统,不同时段信号的时域卷积,即时域的线性卷积模型为^[5]

$$\begin{cases} y(t) = x(t) \otimes h(t), \\ h(t) = h_1(t) \otimes h_2(t) \otimes \cdots \otimes h_n(t). \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x(t)$ 是输入信号; $y(t)$ 是输出信号; $h(t)$ 是多层结构冲击响应函数; \otimes 为卷积运算符。

2 基于超声能量特征的复合材料缺陷检测原理

超声波在多层复合结构内的传播过程是复杂的,文献 [5-6] 在建模过程中所涉及的反射、透射系数均为复数形式,求解过程复杂且物理意义不够明确。此外,由式 (2) 和式 (3) 可以看出,工程中的反射与透射系数为实数,只考虑反射与透射的量。因此,本文在文献 [5-6] 的基础上,以反射、透射系数为实数建立多层结构的超声传播时域与频域模型。

2.1 基本原理

超声脉冲反射法是利用超声纵波在不同界面产生的回波信号进行检测的方法。对于多层复合结构,超声换能器产生的脉冲波通过耦合介质垂直入射到被检测物体上,在界面 1 会产生反射和透射,反射波被换能器接收,而透射波继续传播到界面 2; 在界面 2 再次发生反射和透射,界面 2 的反射波在界面 1 向上透射,直至最后被换能器接收,透射波继续传播到界面 3。在传播过程中,超声波随传播路径和传播时间的推延不断被衰减,通过提取超声信号的衰减特征,即可实现多层结构的脱粘检测和缺陷所在层的定位,其原理如图 1 所示。

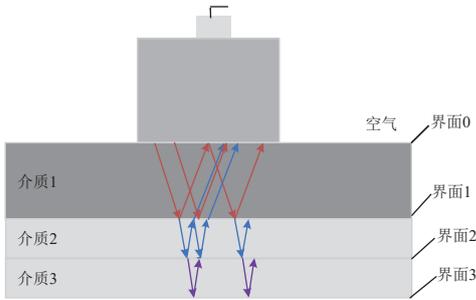


图 1 超声脉冲反射法原理
Fig. 1 Principle of ultrasonic pulse reflection method

2.2 单层介质中超声波多次反射的频域模型

图 2 是超声波在单层介质内多次反射的示意图,其中,单层介质的厚度为 d , 超声波在介质中经过 n 次反射的信号为 $P(t)$ 。以 T_{01} 表示换能器与第一介质耦合的透射系数,假设换能器直接耦合,即 $T_{01} \approx 1$, 则入射到介质中的信号为 $T_{01}x(t)=x(t)$, 进入介质后传播到底界面的信号为 $x_{12}(t)=x(t)e^{-\alpha d}$ 。以 R_{12} 表示介质底面反射系数,因为第二介质为空气,而空气声阻抗远远小于固体声阻抗,所以超声信号几乎被全反射,即 $R_{12} \approx -1$, 则反射信号与原信号方

向相反,能量与原信号叠加,此时,在第一介质底界面处的信号为 $x_{21}(t)=2x(t)e^{-\alpha d}$, 反射后传播到换能器的信号为 $x_{10}(t)=x(t)e^{-2\alpha d}$, 因此在下面的推导中,所有的反射系数均表示为反射系数的模。

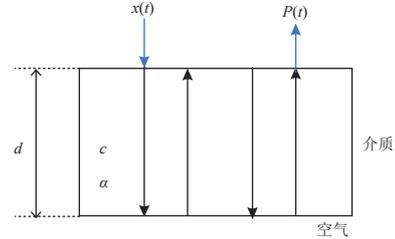


图 2 单层介质内的超声多次反射
Fig. 2 Multiple ultrasonic reflections in single-layer medium

根据图 2 可以得到以下关系式:

第 1 次反射到换能器的信号为

$$P_1(t) = T_{01}R_{12}T_{10}e^{-2\alpha d}x(t-\tau) = e^{-2\alpha d}x(t-\tau); \quad (5)$$

第 2 次反射到换能器的信号为

$$P_2(t) = T_{01}R_{12}^2R_{10}T_{10}e^{-4\alpha d}x(t-2\tau) = R_{10}e^{-4\alpha d}x(t-2\tau); \quad (6)$$

第 n 次反射到换能器的信号为

$$P_n(t) = T_{01}R_{12}^nR_{10}^{n-1}T_{10}e^{-2n\alpha d}x(t-n\tau) = R_{10}^{n-1}e^{-2n\alpha d}x(t-n\tau). \quad (7)$$

因此,多次反射后到达换能器的总信号为

$$P(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) = \sum_{i=1}^N R_{10}^{i-1}e^{-2i\alpha d}x(t-i\tau). \quad (8)$$

对式 (9) 进行傅里叶变换,有

$$P(j\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{(R_{10}e^{-2\alpha d}e^{-j\omega\tau})^i}{R_{10}} |X(j\omega)| = \sum_{i=1}^N \frac{e^{-(2\alpha d+j\omega\tau)} [1 - (R_{10}e^{-(2\alpha d+j\omega\tau)})^N]}{R_{10} [1 - R_{10}e^{-(2\alpha d+j\omega\tau)}]} |X(j\omega)|, \quad (9)$$

当 N 趋于无穷大时,

$$P(j\omega) = \frac{e^{-(2\alpha d+j\omega\tau)}}{R_{10} [1 - R_{10}e^{-(2\alpha d+j\omega\tau)}]} |X(j\omega)|. \quad (10)$$

第 1 次透射的信号为

$$Q_1(t) = T_{01}T_{12}e^{-\alpha d}x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) = T_{12}e^{-\alpha d}x\left(t - \frac{\tau}{2}\right); \quad (11)$$

第 2 次透射的信号为

$$Q_2(t) = T_{01}R_{10}R_{12}T_{12}e^{-3\alpha d}x\left(t - \frac{3\tau}{2}\right) = R_{10}T_{12}e^{-3\alpha d}x\left(t - \frac{3\tau}{2}\right); \quad (12)$$

第 n 次透射的信号为

$$\begin{aligned} Q_n(t) &= T_{01} R_{12}^{n-1} R_{10}^{n-1} T_{12} e^{-(2n-1)\alpha d} x\left(t - \frac{2n-1}{2}\tau\right) \\ &= R_{10}^{n-1} T_{12} e^{-(2n-1)\alpha d} x\left(t - \frac{2n-1}{2}\tau\right). \end{aligned} \quad (13)$$

与反射同理,多次透射后的总信号为

$$Q(j\omega) = \frac{T_{12}^2}{R_{10} [1 - R_{10} e^{-(2\alpha d + j\omega\tau)}]} |X(j\omega)|. \quad (14)$$

式(6)~(14)中, τ 为超声波在介质中反射信号产生的时延, $\tau = 2d/c$ 。

2.3 多层介质中超声波多次反射的频域模型

图3是超声波在多层介质内多次反射的示意图。显然,随着层数的增加,描述来自各层所有回波信号的传播路径的复杂性迅速增加;但每一层内的超声传播与在单层介质内的传播相似,因此找到任意层的反射回波信号的传播规律是可取的。对于任意第 q 层,超声波在多层结构内部传播和接收可以划分为3种情形,其频域响应视为各层频率响应的级联。

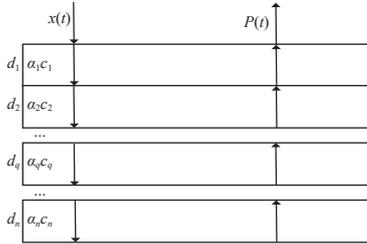


图3 多层介质内的超声多次反射

Fig. 3 Multiple ultrasonic reflections in multi-layer medium

1)信号从第 $q+1$ 层入射到第 q 层,经过多次反

$$W_2(j\omega) = \left(\frac{e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1}}{R_{10}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})} + \frac{T_{12}^3 T_{21}^3 e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2}}{R_{10}R_{12}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})^2(1 - R_{21}e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2})} \right) |X(j\omega)|. \quad (19)$$

当所有界面粘接良好时,超声波在三层介质中多次反射、透射,过程非常复杂,只考虑反射和透射

$$W_3(j\omega) = \left(\frac{e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1}}{R_{10}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})} + \frac{e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2} T_{12}^3 T_{21}^3}{R_{10}R_{12}R_{23}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})^2(1 - R_{23}R_{21}e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2})} + \frac{T_{23}^3 T_{32}^3 T_{12}^2 T_{21}^2 e^{-2\alpha_3 d_3 - j\omega\tau_3}}{R_{23}R_{21}(1 - R_{32}e^{-2\alpha_3 d_3 - j\omega\tau_3})(1 - R_{23}R_{21}e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2})^2} \right) |X(j\omega)|. \quad (20)$$

对比以上3种情况下的信号成分,结合复合结构反射系数的大小,取极限值可算出 $W_1 > W_2 > W_3$,符合超声脉冲反射原理。随着传播路径的增长以及介质内的衰减,多次反射后信号的能量随之减弱。

2.4 能量理论

超声波穿过复合结构受材料声阻抗影响导致能量

射后透射到第 $q+1$ 层,所对应的反射信号总输出为

$$P_1(\omega) = \frac{T_{q-1,q} T_{q,q-1} e^{-(2\alpha_q d_q + j\omega\tau_q)} |X(\omega)|}{R_{q,q+1} [1 - R_{q,q+1} R_{q,q-1} e^{-(2\alpha_q d_q + j\omega\tau_q)}]}, \quad (15)$$

式中: d_q 和 α_q 分别为第 q 层介质的厚度和声波衰减系数; τ_q 为信号在第 q 层上下界面反射1次的时间, $\tau_q = 2d_q/c_q$ 。

2)信号从第 $q+1$ 层入射到第 q 层,经过多次反射后透射到第 $q-1$ 层,所对应的透射信号总输出为

$$P_2(\omega) = \frac{T_{q+1,q}^2 T_{q,q-1}^2 X(\omega)}{R_{q,q+1} [1 - R_{q,q+1} R_{q,q-1} e^{-(2\alpha_q d_q + j\omega\tau_q)}]}. \quad (16)$$

3)信号从第 $q-1$ 层入射到第 q 层,经过多次反射后透射到第 $q+1$ 层,所对应的透射信号总输出为

$$P_3(\omega) = \frac{T_{q-1,q}^2 T_{q,q+1}^2 X(\omega)}{R_{q,q-1} [1 - R_{q,q+1} R_{q,q-1} e^{-(2\alpha_q d_q + j\omega\tau_q)}]}. \quad (17)$$

应用上述任意层信号的建模方法,对图1所示的三层介质反射模型进行分析。当界面1(介质1与介质2间)完全脱粘时,超声波在该界面发生全反射,即界面1的反射系数 $R_{12} \approx 1$,只考虑反射和透射的量进行化简,信号只有经过介质1的信号成分,其表达式为

$$W_1(j\omega) = \frac{e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1} |X(j\omega)|}{R_{10}(1 - R_{10}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})}. \quad (18)$$

当界面2(介质2与介质3间)完全脱粘时,界面2的反射系数 $R_{23} \approx 1$,只考虑反射和透射的量进行化简,信号至少在介质1中传播1次,经过介质2而没有经过介质3,其表达式为

$$W_2(j\omega) = \left(\frac{e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1}}{R_{10}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})} + \frac{T_{12}^3 T_{21}^3 e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2}}{R_{10}R_{12}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})^2(1 - R_{21}e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2})} \right) |X(j\omega)|. \quad (19)$$

当所有界面粘接良好时,超声波在三层介质中的量进行化简,信号至少在介质1、介质2中传播1次,其表达式为

$$W_3(j\omega) = \left(\frac{e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1}}{R_{10}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})} + \frac{e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2} T_{12}^3 T_{21}^3}{R_{10}R_{12}R_{23}(1 - R_{10}R_{12}e^{-2\alpha_1 d_1 - j\omega\tau_1})^2(1 - R_{23}R_{21}e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2})} + \frac{T_{23}^3 T_{32}^3 T_{12}^2 T_{21}^2 e^{-2\alpha_3 d_3 - j\omega\tau_3}}{R_{23}R_{21}(1 - R_{32}e^{-2\alpha_3 d_3 - j\omega\tau_3})(1 - R_{23}R_{21}e^{-2\alpha_2 d_2 - j\omega\tau_2})^2} \right) |X(j\omega)|. \quad (20)$$

损失,根据能量衰减理论可推导出反射能量占比^[11]为

$$I_R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2; \quad (21)$$

回波信号的时域能量可表示为

$$E = \sum_{i=1}^N (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_i^2), \quad (22)$$

式中 x_i 为回波信号任一点的强度值。

提取超声波在复合结构各状态下的传播能量特征值, 若它们的信号能量差异越明显, 证明基于超声波能量特征的检测效果越好。

3 实验验证

3.1 仿真实验

仍以图 1 所示模型为实验对象, 该模型为钢-硬橡胶-软橡胶三层材料粘接结构, 图中介质 1~3 依次代表钢、硬橡胶、软橡胶, 各层材料参数见表 1^[12]。利用超声多次反射时频域模型来研究多层结构的界面 1 脱粘、界面 2 脱粘和所有界面粘接良好 3 种情况(这里的脱粘是指完全脱粘, 则超声波入射到脱粘界面几乎完全反射)。根据式 (22), 可知钢-橡胶界面的反射回波能量占比为 88.4%, 这与钢-空气界面发生的全反射相比有显著差异, 因此通过超声波在介质中多次传播后信号总能量的大小, 可实现脱粘情况的表征。

表 1 多层结构的材料参数
Table 1 Material parameters of multi-layer structure

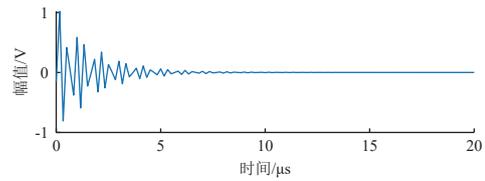
层号	材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纵波声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	厚度/ mm	衰减系数/ ($\text{dB}\cdot\text{mm}^{-1}$)
1	钢	7800	5800	2	0.108
2	硬橡胶	1200	2300	0.95	4.75
3	软橡胶	1200	2300	0.95	0.5
4	空气	1.2	344	∞	—

当输入信号为指数衰减的余弦信号, 信号周期为 10, 信号频率设为 2.5 MHz, 根据饱和值和周期可求出换能器的衰减参数 $\beta=0.57$, 即输入信号为 $x(t)=e^{-0.57t} \cos(\omega t)$, $t>0 \mu\text{s}$ 。

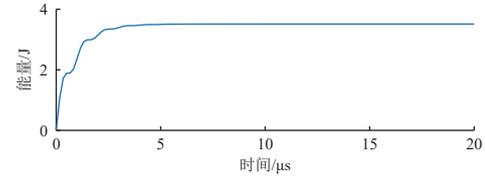
3.1.1 界面 1 脱粘的时域信号和能量

如图 1 所示, 当界面 1 脱粘时, 超声波垂直入射钢层, 仅在钢层上下界面来回反射, 波形中只有界面 1 的回波。由式 (19) 可计算得到相应超声回波信号的时域波形(见图 4(a)), 由式 (23) 可得到信号能量随时间的变化曲线(见图 4(b)), 仿真时间选取 $0\sim 20 \mu\text{s}$ 。

由图 4 分析: 根据超声波在均一介质中的传播速度不变, 换能器在 $0.68 \mu\text{s}$ 接收到声波在钢-硬橡胶界面的第 1 次反射回波, 经过 $1.36 \mu\text{s}$ 接收到第 2 次反射回波, 经过对应的时间延迟叠加形成一定程度衰减的波形。回波信号总能量以不同的速率增加, 最后趋于稳定值 3.510 V 。



(a) 时域波形

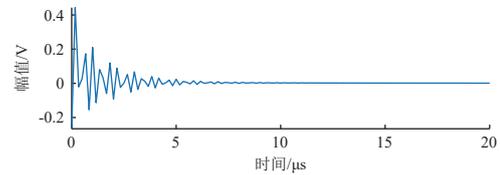


(b) 能量随时间变化曲线

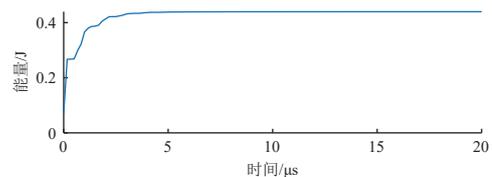
图 4 界面 1 脱粘情形下的超声波时域信号和能量曲线
Fig. 4 Curves of ultrasonic time domain signal and energy for debonding of interface 1

3.1.2 界面 2 脱粘的时域信号和能量

如图 1 所示, 超声波垂直入射钢层, 透射进钢层的超声波在钢层和硬橡胶层间的界面 1 处发生反射和透射, 透射进硬橡胶的超声波在硬橡胶和软橡胶间的界面 2 脱粘处发生全反射。由式 (20) 可计算得到相应超声回波信号的时域波形(见图 5(a)), 由式 (23) 可得到信号能量随时间的变化曲线(见图 5(b)), 仿真时间选取 $0\sim 20 \mu\text{s}$ 。



(a) 时域波形



(b) 能量随时间变化曲线

图 5 界面 2 脱粘情形下的超声波时域信号和能量曲线
Fig. 5 Curves of ultrasonic time domain signal and energy for debonding of interface 2

由图 5 分析: 该时域信号的衰减程度明显高于界面 1 脱粘时的, 是由于穿透至橡胶中的超声波大部分被衰减; 换能器在 $0.68 \mu\text{s}$ 接收到钢-硬橡胶界面的第 1 次反射回波, 在 $1.36 \mu\text{s}$ 接收到在钢-硬橡胶界面的第 2 次反射回波, 在 $1.86 \mu\text{s}$ 接收到硬橡胶-软橡胶界面的第 1 次反射回波, 经过界面相应的时间延迟接收到不同界面的第 2 次、第 3 次反射回波。回波信号总能量以不同的速率增加, 最后趋于稳定值 0.439 V 。

3.1.3 所有界面粘接良好的时域信号和能量

如图 1 所示, 超声波垂直入射钢层, 在界面 0 发生反射和透射, 透射进钢层的超声波在钢-硬橡胶界面(界面 1)处发生反射和透射, 透射进硬橡胶层的超声波在硬橡胶和软橡胶界面(界面 2)处继续反射和透射, 透射进软橡胶层的超声波直至最后界面(界面 3)被反射。由式 (21) 取 $n=3$ 可计算得到相应超声回波信号的时域波形(见图 6(a)), 由式 (23) 可得到信号能量随时间的变化曲线(见图 6(b)), 仿真时间选取 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 。

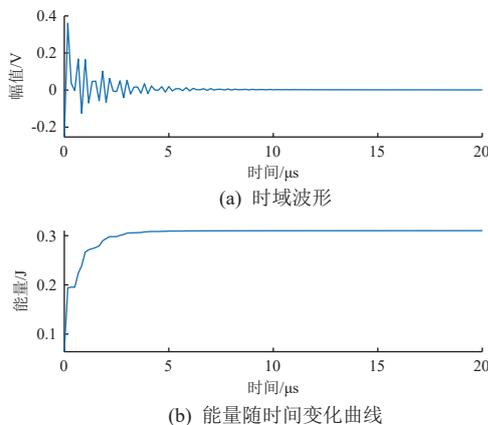


图 6 粘接良好情形下的超声波时域信号和能量曲线
Fig. 6 Curves of ultrasonic time domain signal and energy under good adhesion

由图 6 分析: 该信号时域波形与界面 2 脱粘时的相似, 整体幅值较小。换能器在大约 $1.03 \mu\text{s}$ 接收到声波在钢-硬橡胶界面的第 1 次反射回波, 在 $2.73 \mu\text{s}$ 接收到声波在软橡胶底界面的第 1 次反射回波, 经过界面相应的时间延迟接收到不同界面的第 2 次、第 3 次反射回波。回波信号总能量以不同的速率增加, 最后趋于稳定值 0.319 V 。

从图 7 中可以看出界面 1 脱粘时的信号能量最大, 界面 2 脱粘与所有界面粘接良好时的信号能量差异不大, 粘接良好时的信号能量最小。为了进一步量化检测, 将粘接良好信号作为基准, 引入一个能量差异值, 令

$$\text{能量差异值} = \frac{\text{某状态脱粘值} - \text{基准值}}{\text{某状态脱粘值}} \quad (23)$$

利用该能量差异值可区分不同的脱粘状态。若该值大于较大的一个阈值, 则为界面 1 脱粘; 若该值小于较小的一个阈值, 则为界面 2 脱粘。为使能量最大化进入粘接层, 基于超声探头频率求出该频率下的最大波长(即钢厚), 把不同频率下不同钢板

厚度的信号总能量代入式 (24) 中求平均值来确定上述两阈值。经表 2 多次数据验证, 区分界面 1 脱粘的阈值设定为 0.72 V , 区分界面 2 脱粘的阈值设定为 0.36 V 。

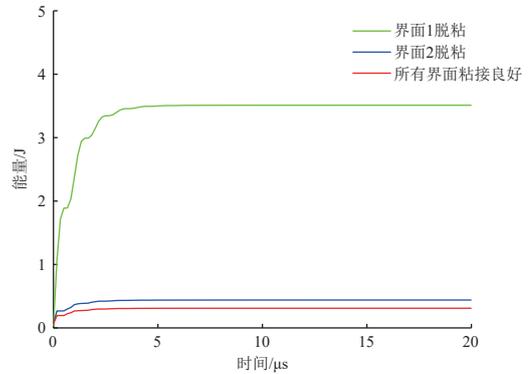


图 7 复合结构不同粘接状态下的信号能量差异
Fig. 7 Energy difference of signals under different bonding states for composite structure

表 2 不同结构及粘接状态下复合结构的信号能量
Table 2 Signal energy of composites under different structures and bonding states

频率/ MHz	钢厚/ mm	信号能量/V		
		界面1脱粘	界面2脱粘	粘接良好
1.5	3.8	0.79	0.28	0.17
	3.7	0.87	0.29	0.18
2.0	2.9	1.70	0.39	0.28
	2.8	1.81	0.40	0.26
2.5	2.2	3.01	0.46	0.31
	2.1	3.28	0.45	0.30
	2.0	3.51	0.43	0.29
3.0	1.9	4.24	0.51	0.37
	1.8	4.53	0.49	0.36
3.5	1.6	5.60	0.55	0.41

在信号频率设为 2.5 MHz 时, 将仿真计算得到的不同状态下的信号总能量代入式 (24) 可得界面 1 脱粘的能量差异值为 0.89 V , 界面 2 脱粘的能量差异值为 0.31 V , 数值均在设定的阈值范围之内, 足以区分不同界面脱粘。随着传播路径的增加, 声衰减持续累加, 造成界面反射回波幅值降低, 从而引起回波能量下降, 与超声波界面反射和透射规律相一致。

3.2 实测实验

为验证基于超声波能量特征的复合材料脱粘检测方法的普适性, 使用超声波探伤仪采取单发单收的方式对复合结构试样进行检测, 试样长 50 cm , 第 1 层为厚 2 mm 的钢板, 第 2 层和第 3 层为厚 1 mm 的橡胶板, 脱粘部分用 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的纸片来模拟, 两层之间通过机油耦合; 将直径为 20 mm 、中

心频率为 2.5 MHz 的超声换能器置于钢板检测面上, 保持探头压力一致, 调节增益, 并使回波幅度至满刻度的 80%, 分别记录各个状态下稳定后的回波信号波形, 将脉冲回波输入至计算机经 Matlab 软件提取信号能量值, 结果如图 8~图 10 所示。

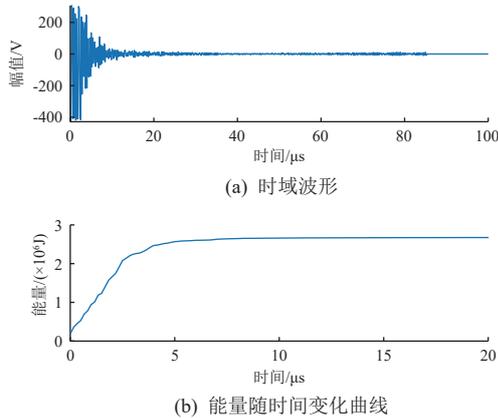


图 8 界面 1 脱粘实验的超声波时域信号和能量曲线
Fig. 8 Curves of ultrasonic time domain signal and energy for debonding test of interface 1

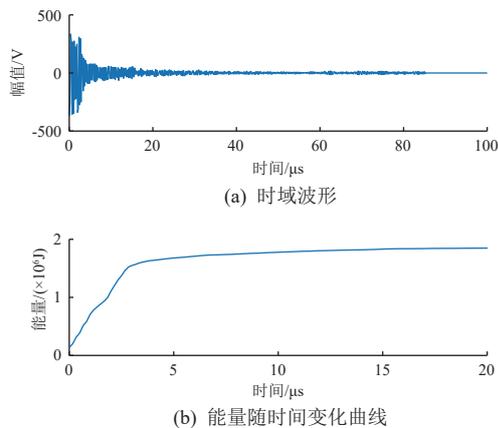


图 9 界面 2 脱粘实验的超声波时域信号和能量曲线
Fig. 9 Curves of ultrasonic time domain signal and energy for debonding test of interface 2

由图 8~图 10 分析可知: 回波信号总体幅值逐渐减弱, 呈指数衰减趋势; 界面 1 脱粘时的信号能量最大, 且不同状态下信号能量都是以不同速率增加最后趋于稳定。该实验所得时域波形和能量曲线与仿真时域模型分析结果基本一致, 表明仿真模型具有一定程度的可靠性; 将实验计算得到不同状态下信号的总能量代入式 (24) 可得, 界面 1 脱粘的能量差异值为 0.51 V, 界面 2 脱粘的能量差异值为 0.12 V, 表明所提出的基于超声能量特征的脱粘检测方法是有效的。

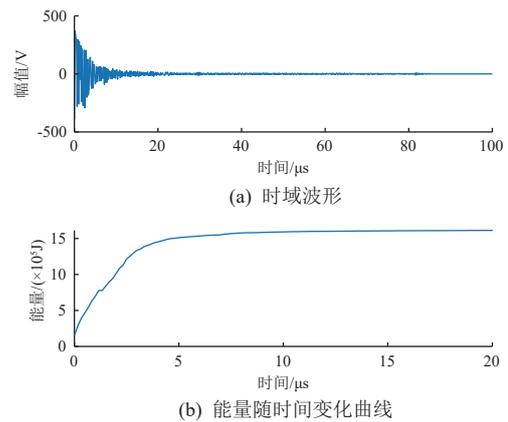


图 10 粘接良好实验的超声波时域信号和能量曲线
Fig. 10 Curves of ultrasonic time domain signal and energy for test of good adhesion

4 结束语

本文针对多层复合结构材料界面脱粘超声检测的问题, 提出一种直接利用超声纵波反射混叠信号的能量特征进行脱粘缺陷检测的方法。建立单层与多层复合结构超声信号反射与透射特性模型, 在此基础上, 提取不同粘接状态下的超声回波能量特征。

实验结果表明, 通过比较界面 1 脱粘、界面 2 脱粘以及粘接良好不同状态下的超声能量差异值可实现脱粘缺陷的有效检测, 避免了混叠回波信号的分离问题, 可验证理论模型的准确性以及普适性。

参考文献 (References)

- [1] 董明利, 祝连庆, 穆婕, 等. 多层结构复合材料的超声检测系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊 1): 179-181
DONG M L, ZHU L Q, MU J, et al. Design of ultrasonic testing system for multilayer structural composites[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Sup 1): 179-181
- [2] LIU S K, SUN W, JING H W, et al. Debonding detection and monitoring for CFRP reinforced concrete beams using piezoceramic sensors[J]. Materials, 2019, 12(13): 2150
- [3] KAZYS R, SVILAINIS L. Ultrasonic detection and characterization of delaminations in thin composite plates using signal processing techniques[J]. Ultrasonics, 1997, 35(5): 367-383
- [4] HAGGLUND F, MARTINSSON J, CARLSON J E. Model-based estimation of thin multi-layered media using ultrasonic measurements[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009,

- 56(8): 1689-1702
- [5] 郭旭飞. 多层非连续阻抗结构超声检测与全矩阵成像方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2022
- [6] 张建生, 李明轩. 层状粘接结构超声检测信号的同态解卷积脱粘界面定征[J]. 应用声学, 2001, 20(1): 23-29
ZHANG J S, LI M X. Homomorphic deconvolution interface characterization of ultrasonic detection: signals of layered bonding structures[J]. Applied Acoustics, 2001, 20(1): 23-29
- [7] 李海宁, 肖盼, 杨占锋, 等. 金属-炸药界面脱粘缺陷的多次超声脉冲反射检测及成像[J]. 含能材料, 2022, 30(9): 952-958
LI H N, XIAO P, YANG Z F, et al. Multiple ultrasonic pulse reflection detection and imaging of metal-explosive interface debonding defects[J]. Materials with Energy, 2022, 30(9): 952-958
- [8] 郑金华, 冯君伟, 盛涛, 等. 傅里叶变换在玻璃钢复合材料胶接质量检测中的应用[J]. 复合材料科学与工程, 2020(6): 79-83
ZHENG J H, FENG J W, SHENG T, et al. Application of Fourier transform in bonding quality detection of FRP composites[J]. Composite Science and Engineering, 2020(6): 79-83
- [9] 郑善朴, 陆铭慧, 王俊东, 等. 多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法[J]. 应用声学, 2019, 38(1): 134-141
ZHENG S P, LU M H, WANG J D, et al. Ultrasonic detection method for debonding defects in multilayer structures[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(1): 134-141
- [10] 何琦, 欧三立. 基于模糊模式识别的紧贴脱粘的超声检测[J]. 中国特种设备安全, 2019, 35(6): 59-61
HE Q, OU S L. Ultrasonic detection of adhesive detachment based on fuzzy pattern recognition[J]. Chinese Journal of Special Equipment Safety, 2019, 35(6): 59-61
- [11] 田天, 宋文涛. 铁路站房雨棚钢结构立柱积水超声检测方法研究[J]. 建设机械技术与管理, 2022, 35(6): 119-122
TIAN T, SONG W T. Research on ultrasonic detection method of water accumulation in steel column of railway station roof[J]. Construction Machinery Technology and Management, 2022, 35(6): 119-122
- [12] 简晓明. 超声检测中信号处理研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 1999

(编辑: 冯露漪)

一作简介: 封华楠, 硕士研究生, 主要从事复合材料的超声缺陷检测。

*通信作者: 韩 焱, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无损检测、探测与成像、信息处理和识别、动态测试。