

# 双层粘接界面特性的空气耦合超声导波检测\*

王兴国, 刘红伟, 李晓高, 黄志诚, 范跃农, 刘 阳

(景德镇陶瓷大学机械电子工程学院 景德镇, 333403)

**摘要** 针对粘接界面质量难以检测与评价的问题,提出了一种空气耦合超声导波检测方法。基于超声导波在双层介质中传播特性和界面弹簧模型理论,推导出了不同粘接界面条件下的频散方程。通过对频散方程的数值求解,获得了刚性粘接、滑移粘接和完全脱粘 3 种粘接界面质量的频散曲线。频散曲线分析表明:在  $A_0$  模态的一定频率范围内,界面趋于刚性粘接时导波的传播相速度大于滑移粘接的相速度,完全脱粘时相速度频散曲线出现双重对称与反对称模式,这与上下单层频散曲线重合。采用 3 种不同粘接界面质量进行了超声导波实验,由实验获得的导波相速度与数值计算结果基本吻合,刚性粘接条件下的导波幅值和声能量最小,完全脱粘条件下的导波幅值和声能量最大。该结果为超声检测不同粘接界面质量奠定一定的理论基础。

**关键词** 超声导波;粘接界面;弹簧模型;频散曲线;相速度

**中图分类号** TH113.1; TB553

## 引 言

双层粘接结构因比强度、比模量高等优点,被广泛应用于航空航天和装甲车辆等领域<sup>[1-2]</sup>。由于粘接结构在制作过程中受工艺、温度和固化时间等因素的影响,以及在使用过程中受振动损伤、老化和蠕变等交变载荷和静载荷的影响,容易导致界面产生气孔、粘接不良、裂纹及分层损伤等缺陷,这些缺陷影响粘接构件的可靠性和安全性。因此,对粘接结构质量的检测是十分必要的。超声无损检测具有无辐射、安全检测和检测设备携带方便等优点,可以较好地解决界面脱粘、宏观缺陷和胶层厚度等检测问题,成为检测粘接界面质量的重要手段之一<sup>[3-4]</sup>,也是目前解决粘接界面质量评价困难的一种有效方法。

国内外学者利用不同超声检测方法研究了多层结构粘接界面质量问题。Thomson<sup>[5]</sup>利用超声透射方法从理论上分析透射系数与粘接界面质量的关系。郑善朴等<sup>[6]</sup>利用脉冲回波法研究了多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法,实现了缺陷的定位和定量分析。文献[7-9]利用超声纵波法对粘接结构的声反射和声透射进行了研究,并利用界面弹簧模型从理论上给出了不同界面刚度系数下的反射波谱。丁俊才等<sup>[10]</sup>研究了板状粘接结构中对称和反对称纵波与界面的相互作用,给出了纵波垂直入射和斜入

射时的声波特性。与上述超声透射或反射等检测方法相比,超声导波具有检测频率低、声衰减小和检测距离长等优点。另外,频散特性沿薄层传播的导波可以同时激发出法向和切向应力,其传播特性不仅与材料的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数有关,还受界面粘接质量的影响<sup>[11]</sup>。Koodalil 等<sup>[12]</sup>利用剪切水平导波评估了不同粘接强度的剪切接头,发现接头粘接强度对水平剪切波一阶模态的频散特性影响最大,提出了采用水平剪切波一阶模态在剪切接头中传播的时间来判断粘接质量的方法。张海燕等<sup>[13-14]</sup>分析了在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性以及界面层对层状各向异性复合结构 Lamb 波的影响。常新龙等<sup>[15]</sup>在理论方面研究了脱粘缺陷对粘接结构频散特性的影响。张玉洁等<sup>[16]</sup>研究了钢-混凝土结构界面层在不同粘接条件下的理论参数及衰减特性,给出了不同厚度的粘接界面对超声导波衰减的影响规律。彭博等<sup>[17]</sup>研究了导波在蜂窝夹层板中传播时的特性,分析了导波的各阶模态,结果表明  $A_0$  模态对脱粘损伤最敏感,并用  $A_0$  模态幅值来确定损伤位置。Liu 等<sup>[18]</sup>用空气耦合超声检测复合材料层合梁的分层损伤,在理论上揭示了  $A_0$  模式 Lamb 波与脱层相互作用的关系,并进行了实验验证。综上所述,以上研究多为从理论方面优化导波检测参量,缺少实验结果验证。

\* 国家自然科学基金资助项目(51565020,11862007)

收稿日期:2021-01-23;修回日期:2021-04-19

笔者利用超声导波理论和界面弹簧模型,推导出不同粘接界面质量的数学频散方程。通过数值计算求解,得到3种不同界面条件下的频散曲线,并利用空气耦合超声检测技术验证了数值计算结果的正确性。

## 1 双层介质导波传播数学模型

图1为导波在双层粘接介质中的传播示意图。如果声波波长大于粘接结构的上下层板厚,或者两者相近,就会在层板内产生导波,在此不考虑粘接层的厚度。假定 $x, y$ 方向的尺寸远大于 $z$ 方向上的尺寸,设 $y$ 方向无限延伸并且位移梯度为零,且声波沿 $x$ 方向传播。

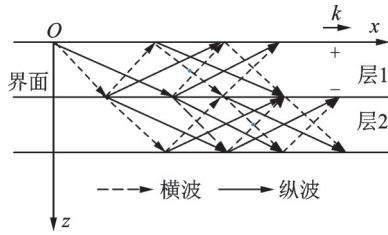


图1 导波传播示意图

Fig.1 Guided wave propagation diagram

假定每层沿 $x$ 方向传播的声导波均为 $z$ 正负方向传播横波和纵波的合成。结合边界条件,推导出每一层上表面导波沿 $x$ 轴方向的位移 $u_x$ 、沿 $z$ 轴方向的位移 $u_z$ 、平面上的正应力 $\sigma_z$ 以及平面上的切应力 $\sigma_x$ 。平面上沿 $z$ 轴正负方向的纵波和横波幅值分别为 $\phi^+, \phi^-$ 和 $\varphi^+, \varphi^-$ 。经过 $u_x, u_z$ 振幅之比,利用胡克定律得到 $\sigma_x, \sigma_z$ 关系,简化后<sup>[19]</sup>得到

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_z \\ \sigma_z \\ \sigma_x \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \phi^- \\ \varphi^+ \\ \varphi^- \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \mu(\beta_3^2 - 1)\mu(\beta_3^2 - 1) & -2\mu & -2\mu & \\ 2\mu\beta_1 & -2\mu\beta_1 & \mu(\beta_3^2 - 1)/\beta_3 - \mu(\beta_3^2 - 1)/\beta_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{14} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $\beta_1 = \sqrt{C_V^2/C_L^2 - 1}$ ;  $\beta_3 = \sqrt{C_V^2/C_T^2 - 1}$ ;  $\beta_2 = -\beta_1$ ;  $\beta_4 = -\beta_3$ ;  $E_{11} = e^{i\beta_1 dk}$ ;  $E_{12} = e^{-i\beta_1 dk}$ ;  $E_{13} = e^{i\beta_3 dk}$ ;

$E_{14} = e^{-i\beta_3 dk}$ ;  $k = 2\pi f/C_P$ ;  $C_L$ 为各向同性材料中的纵波波速,  $C_L = ((\lambda + 2\mu)/\rho)^{1/2}$ ;  $C_T$ 为各向同性材料中的横波波速,  $C_T = (\mu/\rho)^{1/2}$ ;  $C_P$ 为导波的相速度;  $\lambda$ 和 $\mu$ 分别为梅拉常数的第1、第2参数;  $\rho$ 为每层介质的密度;  $i$ 为虚数符号;  $k$ 为导波沿 $x$ 轴方向的分量;  $f$ 为频率;  $d$ 为每层介质的厚度。

根据边界条件,将第1层上表面与第1层下表面联立,得到第1层传递矩阵为

$$L_1 = D_{1,a} D_{1,b}^{-1} \quad (3)$$

其中: $D_{1,a}$ 为第1层上表面矩阵;  $D_{1,b}$ 为第1层下表面矩阵。

在理想粘接条件下,各层之间界面上应力和位移都是相等的,因此有

$$D_{1,b}^{-1} = D_{2,a} \quad (4)$$

其中: $D_{2,a}$ 为第2层上表面矩阵。

根据边界条件,将第2层上表面与第2层下表面联立,得到第2层传递矩阵为

$$L_2 = D_{2,a} D_{2,b}^{-1} \quad (5)$$

其中: $D_{2,b}$ 为第2层下表面矩阵。

联立式(3)~(5),得到两层理想粘接界面结构的传递矩阵为

$$S = L_1 L_2 \quad (6)$$

如果粘接结构的2个面都满足自由边界条件,则第1层上表面和第2层下表面的边界条件是切向应力和法向应力都为0。联立式(1)和式(6),得到理想粘接条件下两层粘接结构的频散方程为

$$F(C_L, C_T, \rho, d, f, C_P) = S_{31} S_{42} - S_{41} S_{32} = 0 \quad (7)$$

其中: $S$ 下角标表示矩阵的行和列。

当界面层出现滑移粘接和完全脱粘时,此时把粘接结构分为上下两层,即 $S_1$ 和 $S_2$ ,利用弹簧模型模拟两层板之间的粘接特性,弹簧模型公式为

$$\begin{cases} \sigma_{x(2)}^- = K_T (u_{x(1)}^- - u_{x(2)}^+) \\ \sigma_{x(1)}^- = \sigma_{x(2)}^+ \\ \sigma_{z(2)}^- = K_N (u_{z(1)}^- - u_{z(2)}^+) \\ \sigma_{z(1)}^- = \sigma_{z(2)}^+ \end{cases} \quad (8)$$

其中: $K_N$ 为法向刚度系数;  $K_T$ 为切向刚度系数。

通过改变 $K_N$ 和 $K_T$ 模拟不同的界面粘接特性,式(8)经变换后得到

$$\begin{bmatrix} u_{x(1)}^- \\ u_{z(1)}^- \\ \sigma_{z(1)}^- \\ \sigma_{x(1)}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1/K_T \\ 0 & 1 & 1/K_N & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{x(2)}^+ \\ u_{z(2)}^+ \\ \sigma_{z(2)}^+ \\ \sigma_{x(2)}^+ \end{bmatrix} \quad (9)$$

联立式(7)和式(9),推导出不同粘接界面刚度的频散方程为

$$F(C_L, C_T, \rho, d, f, C_P, K_T, K_N) = S^1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1/K_T \\ 0 & 1 & 1/K_N & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} S^2 = 0 \quad (10)$$

该方程包含了每层介质材料的物理与声学参数。

## 2 数值计算结果

经过推导得到的频散方程是非线性复数超越方程。由于方程中的频率和相速度的隐式关系难以直接求解,故采用数值求解。笔者以有机玻璃和铝双层结构作为研究对象。表1为两层介质材料的声学及物理参数。刚性粘接界面法向刚度系数和切向刚度系数分别为 $K_N$ 趋于 $\infty$ , $K_T$ 趋于 $\infty$ 。当滑移粘接界面为 $K_N$ 趋于 $1 \times 10^{15} \text{ N/m}^3$ 时, $K_T$ 趋于0;完全脱粘界面为 $K_N$ 趋于0, $K_T$ 趋于0。需要说明的是, $\infty$ 表示大于 $1 \times 10^{15} \text{ N/m}^3$ 。通过数值求解获得了刚性粘接、滑移粘接和完全脱粘粘接结构的频散特性。数值求解结果只考虑导波在双层板中的传播情况。

表1 两层介质材料的声学及物理参数

Tab.1 Acoustic and physical parameters of two-layer medium

介质材料	纵波速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	横波速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	瑞利波速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
有机玻璃	2.73	1.46	1.20	1.18
铝	6.26	3.08	2.90	2.70

图2为有机玻璃/铝双层板刚性粘接与滑移粘接的频散曲线。由图2可知,从刚性粘接界面到滑移粘接界面,频散曲线的对称模式和反对称模式并未发生模式转换,但法向和切向的刚度系数对导波的传播速度有很大影响,表现为各阶模式的相速度具有比较大的差异。在0.3~0.7 MHz之间,刚性粘接的 $A_0$ 模式导波相速度大于滑移粘接的相速度;在0~0.7 MHz之间,刚性粘接的 $S_0$ 模式导波相速度远大于滑移粘接的相速度。其他模式也具有相似的差异性,这里不再赘述。随着频率的增加,刚性粘接界面和滑移粘接界面的各个模式相速度最终均收敛于某一速度。研究表明,对于单层板导波频散曲线具有基阶模式( $A_0, S_0$ )收敛于瑞利波波速,高阶模式收敛于横波波速的特点。由于笔者研究的是有机玻璃/铝双层板,不管是刚性粘接还是滑移粘接,频散曲线基阶( $A_0, S_0$ )均收敛于速度1.36 km/s,该速度介于有机玻璃层和铝层瑞利波波速之间。同理,高

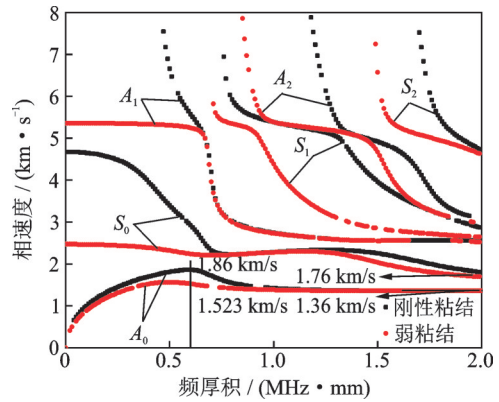


图2 有机玻璃/铝双层板刚性粘接与滑移粘接的频散曲线  
Fig.2 Frequency dispersion curve of rigid bond and sliding bond for plexiglass/aluminum

阶模式收敛于1.76 km/s,该速度介于有机玻璃层和铝层横波速度之间。但是,不管是基阶还是高阶,收敛的速度只与上下层材料的物理和声学参数有关,与粘接特性无关。

图3为有机玻璃/铝双层板完全脱粘的频散曲线。可以看出,完全脱粘时相速度频散曲线出现了双重对称与反对称模式,即存在2种与单层介质相同模式的频散曲线, $S_0$ 和 $A_0$ 及以上各模式具有2条曲线,2种模式的频散曲线分别来自于有机玻璃层和铝层。究其原因,在完全脱层的情况下,有机玻璃层和铝层之间存在分层现象,分层导致两层之间的声透射系数趋于0,声波能量仅在各自层板内发生反射而无透射,因此图中的数值计算结果为有机玻璃和铝板频散曲线的叠加。

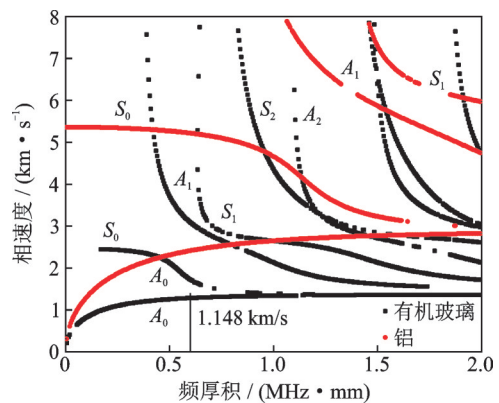


图3 有机玻璃/铝层双层板完全脱粘的频散曲线  
Fig.3 Dispersion curve of completely debonding for plexiglass/aluminum

## 3 实验

### 3.1 实验设备及方法

图4为双层板超声导波实验装置。其中,上层

是厚度为 1.5 mm 的有机玻璃层,下层是厚度为 1.5 mm 的铝层。为了模拟不同界面条件的粘接质量,以环氧树脂和水作为粘接剂,当两层板之间均匀分布环氧树脂,根据环氧树脂粘接剂的使用说明,固化 24 h 后,可以认为是完好界面即刚性粘接;当两层板之间均匀分布水,认为是滑移界面(滑移粘接);界面不作任何处理,界面存在大量的空气层则认为是完全脱粘。粘接层厚度不计。实验采用一对焦距为 40 mm、中心频率为 400 kHz 的空气耦合超声换能器,按照一定角度放置在被测材料的同侧,一个作为发射端,另一个作为接收端。通过控制超声检测软件触发脉冲发射/接收装置(型号 JPR-10CN)产生脉冲信号激励空气耦合超声发射换能器,经放大器(型号 PR-60A-06)放大后,再由另一端空气耦合超声换能器接收,最后由脉冲发射/接收装置将收到的信号送至计算机保存并记录。

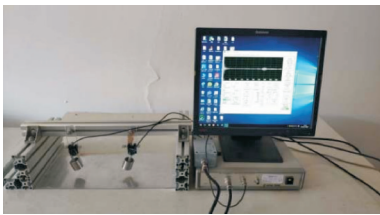


图4 双层板超声导波实验装置

Fig.4 Experimental device for ultrasonic guide of plexiglass/aluminum

采用移动空气耦合超声换能器的位置获取相对位移,再测量两次换能器位置所对应导波波峰的时间差计算导波传播速度。为了提高测量精度,设置了3个不同测量位置,取两次位置计算的导波速度平均值作为最后的实验结果。图5为双层板超声导波实验示意图。发射超声换能器位置不变,接收换能器位置分别为测量位置1,2,3。每个测量位置利用刻度尺记录位置信息,同时获取每个测量位置的导波时域信号。群速度  $C_g$  计算公式为

$$C_g = \Delta x / \Delta t \quad (11)$$

其中: $\Delta x$ 为换能器之间的移动距离; $\Delta t$ 为2个波包峰值时间差。

由于导波实验计算得到的是群速度,为了与数值计算获取的相速度进行比较,故需要将群速度转换为相速度,关系式为

$$C_g = C_p^2 \left[ C_p - (fd) \frac{dC_p}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (12)$$

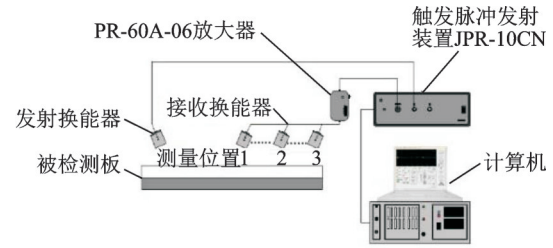


图5 双层板超声导波实验示意图

Fig.5 Schematic diagram of ultrasonic guided wave experiment for plexiglass/aluminum

### 3.2 实验结果与讨论

由于  $A_0$  模态的离面位移分量大于  $S_0$  模态,  $A_0$  模态的导波从空气到介质中的振动更明显,所以采用频散曲线  $A_0$  模态作为超声检测参数。检测入射角度由 Snell 定律可知

$$\sin \theta = C_{\text{air}} / C_p \quad (13)$$

其中:声波在空气中传播的速度  $C_{\text{air}}$  为 0.34 km/s。

在 0.3~0.7 MHz·mm 之间,刚性粘接的  $A_0$  模态导波相速度与滑移粘接的相速度具有较大的差异性,其中 0.6 MHz·mm 二者差异最大,敏感性也就最高。因此选择的超声换能器中心频率为 400 kHz,在该中心频率下的刚性粘接  $C_p$  为 1.86 km/s,滑移粘接界面中  $C_p$  为 1.53 km/s。利用式(13)求得刚性粘接界面的超声检测换能器入射角度约为  $11^\circ$ ;滑移粘接界面的入射角度约为  $13^\circ$ 。由于本次实验有机玻璃在上层、铝层在下层,完全脱粘时大部分声波的能量在有机玻璃层传播,因此仅以在  $A_0$  模态下的有机玻璃层作为分析对象。有机玻璃层的相速度  $C_p$  为 1.148 km/s,经计算完全脱粘界面的入射角度约为  $17^\circ$ 。图6~8分别为刚性粘接、滑移粘接、完全脱粘界面条件下测量位置1、测量位置2、测量位置3的时域波形。每个时域图给出了接收导波波峰所对应的时间和幅值。图中标记出了声波上升开始时间  $t_1$  和下降时间结束时间  $t_2$ 。可见,随着发射换能器与接收换能器位置的增大,导波波峰位置右移,传播的时间增大而幅值降低,持续时间越短。这是因为传播距离的增大导致声波能量衰减严重。通过纵向对比还可以发现,在同一测量位置,刚性粘接峰值幅值最小,持续时间最短;完全脱粘时峰值幅值最大,持续时间也最长。

表2为不同界面粘接条件下导波相速度实验测量结果与数值计算结果对比。由表2可知,刚性粘接的相速度实验结果为 2.014 km/s,略大于数值求解结果 1.86 km/s;滑移粘接的相速度实验结果为

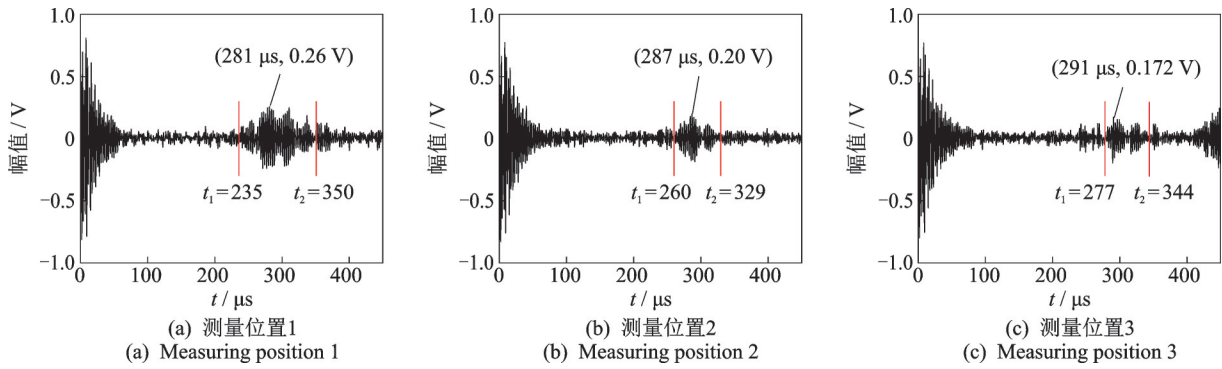


图6 刚性粘接时域波形

Fig.6 Rigid bond time waveform

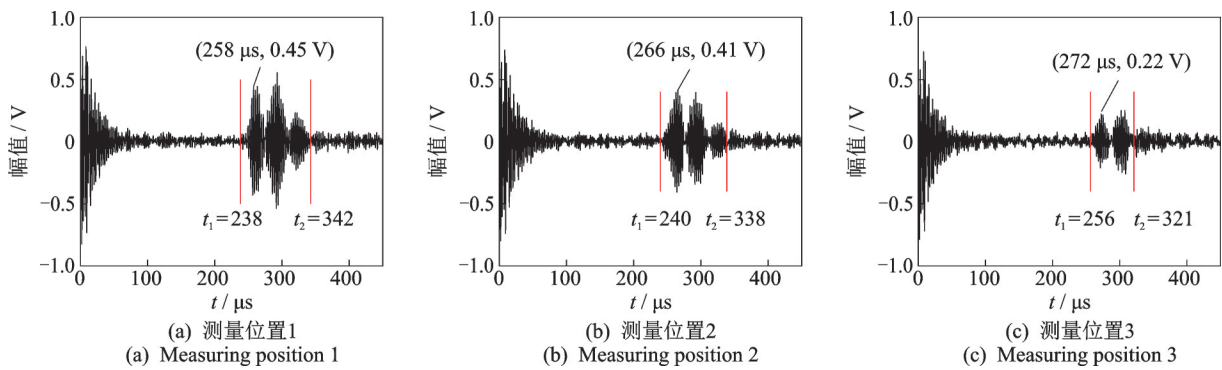


图7 滑移粘接时域波形

Fig.7 Sliding bond time waveform

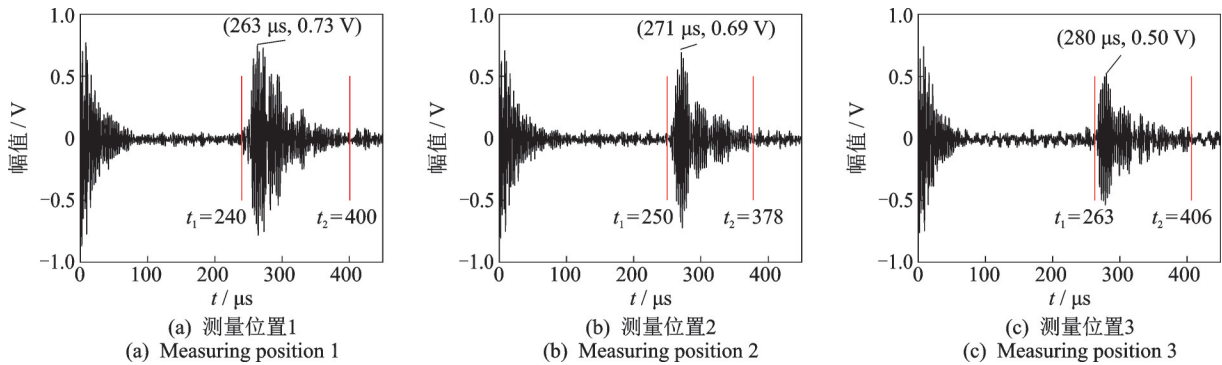


图8 完全脱粘时域波形

Fig.8 Completely debonding time waveform

1.364 km/s, 略小于数值求解结果 1.53 km/s; 完全脱粘时相速度实验结果与数值求解结果非常相近, 分别为 1.123 km/s 和 1.148 km/s。通过对实验结果和数值求解结果的分析发现, 滑移粘接界面层液体水层内存在一些针孔型的气孔, 气孔的存在可能导致了声波传播的延迟, 传播速度变小; 相反, 刚性粘接界面层是固体薄层, 固体层的声速大于有机玻璃层的声速, 故实验测得的相速度大于数值求解结果。因此, 由实验获得的刚性粘接和滑移粘接的相速度差异性明显大于由数值求解获得的; 在相同模态条件下, 滑移粘接的相速度小于刚性粘接相速度。

图9为利用图6~8时域波形计算得到的不同粘接界面条件下导波传播幅值和声能量。其中, 声能量利用波包面积表示。声能量的计算公式为

$$E = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (14)$$

其中:  $t$  为积分时间, 积分范围从导波上升开始时间  $t_1$  到导波下降结束时间  $t_2$ 。

可见, 在相同测量位置, 刚性粘接的声波幅值与声能量最小, 完全脱粘的声波幅值与声能量最大。主要是因为刚性粘接时上下层更接近一种理想界面, 声波在界面产生反射与透射, 反射系数与透射系

表 2 不同界面粘接条件下导波相速度实验测量结果与数值计算结果对比

Tab.2 Comparison of experimental and numerical simulation results of guided wave phase velocity under the different interfacial bonding conditions

界面条件	测量位置	时间/ $\mu\text{s}$	距离/ $\text{mm}$	$C_p$ 实验结果/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_p$ 数值计算结果/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
刚性粘接	1	281.4	100.6		
	2	286.6	110.2	2.014	1.86
	3	290.8	119.4		
滑移粘接	1	257.7	99.8		
	2	265.7	110.6	1.364	1.53
	3	272.5	120.0		
完全脱粘	1	263.2	101.0		
	2	271.2	110.1	1.123	1.148
	3	279.9	119.9		

数与上下层介质的声阻抗有关,更多的声能量进入到下层,导致接收到的声波幅值与声能量降低。另外,与测量位置 2 和测量位置 3 相比,由测量位置 1

获得的刚性粘接、滑移粘接和完全脱粘的导波幅值和声能量最大,测量位置 2 次之,测量位置 3 则最小。究其原因,声波传播的能量除了与界面粘接条件有关,还与传播路径的长短有关。测量位置 3 的声波传播距离最大,此时声波能量衰减占据主要因素。因此,采用超声导波检测界面粘接质量时要充分考虑发射与接收换能器的距离,距离过大可能导致声波衰减严重,最终影响检测精度。例如,测量位置 3 刚性粘接与滑移粘接的导波幅值变化很小,分别为 0.17 V 和 0.22 V。

## 4 结 论

1) 刚性粘接和滑移粘接对比发现,频散曲线模态并未发生模式转换,但对导波的传播速度有很大影响。在一定频率范围内,刚性粘接界面下的导波相速度比滑移粘接下的相速度要快。数值求解获得相速度结果与实验结果基本吻合。

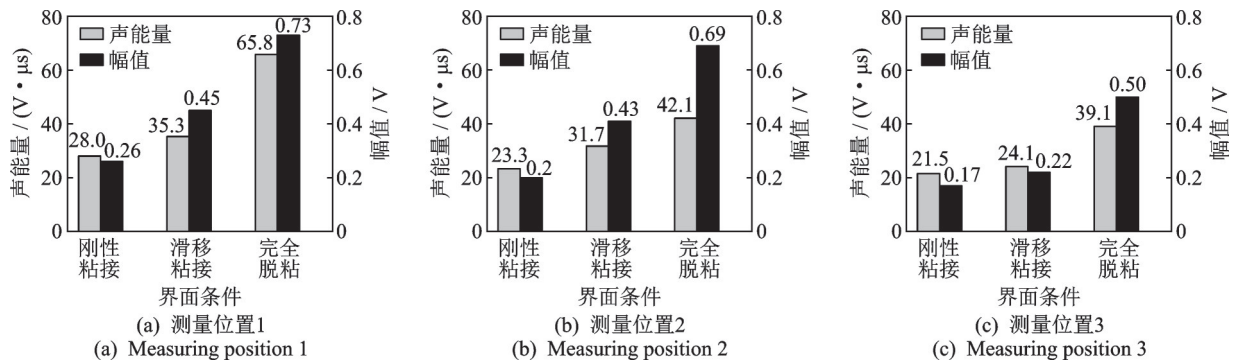


图 9 不同界面条件下导波幅值和声能量

Fig.9 Guided wave amplitude and acoustic energy under the different interface conditions

2) 不管是刚性粘接还是滑移粘接,频散曲线的基阶( $A_0$ ,  $S_0$ )均收敛于速度 1.36 km/s,该速度介于有机玻璃层和铝层瑞利波波速之间;高阶模态则收敛于 1.76 km/s,该速度介于有机玻璃层和铝层横波速度之间。不管是基阶还是高阶,模态收敛的速度只与上下层材料的物理和声学参数有关,与粘接特性无关。

3) 当界面趋近于刚性粘接时,导波幅值和声能量最小;趋近于完全脱粘时,导波幅值和声能量最大。随着检测距离(发射换能器与接收换能器之间距离)的增大,这种趋势越加不明显。因此,检测距离对这种基于幅值和声能量的识别方法具有一定的局限性。

4) 推导的频散方程可作为优化导波检测参数的理论依据,也为检测多层结构界面质量提供了思路。

## 参 考 文 献

- [1] VALENTELL, SARKIS-ONOFRE, GONCALVES A P, et al. Repair bond strength of dental composites: systematic review and meta-analysis [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 69:15-26.
- [2] 艾春安. 多层结构超声检测理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2014:6-7.
- [3] WANG X G, YAO L F, HUANG Z C, et al. Evaluating interfacial bonding characteristics of the composite material thin layer by ultrasound delay time spectrum[J]. Composite Structures, 2019, 222: 110913.
- [4] WANG X G, WU W L, HUANG Z C, et al. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures [J]. Materials, 2018, 11(2): 310.
- [5] THOMSON W. Transmission of elastic waves through

- a stratified solid medium [J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(2): 89-93.
- [6] 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 Shanpu, LU Minghui, WANG Jundong, et al. Ultrasonic testing method for debonding defects in multilayer structures[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(1):134-141. (in Chinese)
- [7] 王耀俊. 具有刚性联接界面和滑移界面的层状固体媒质的声反射[J]. *声学学报*, 1992, 17(2):81-92. WANG Yaojun. Sound reflection from layered solid medium with rigid and slip interfaces[J]. *Acta Acustica*, 1992, 17(2):81-92. (in Chinese)
- [8] 王耀俊, 许明翔. 层状各向异性固体媒质的声反射和声透射[J]. *声学学报*, 1995, 20(3):161-169. WANG Yaojun, XU Mingxiang. Sound reflection and transmission on layered anisotropic solid media[J]. *Acta Acustica*, 1995, 20(3):161-169. (in Chinese)
- [9] 王耀俊. 固体间界面的物理模型和界面对声波的反射[J]. *物理*, 2002, 31(12):768-772. WANG Yaojun. A physical model of the interface between two solids and the acoustic reflection therein[J]. *Physics*, 2002, 31(12):768-772. (in Chinese)
- [10] 丁俊才, 吴斌, 何存富. 板状粘接结构中对称和反对称纵波与界面的相互作用[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(6):27-37. DING Juncai, WU Bin, HE Cunfu. Interaction of the symmetric and anti-symmetric longitudinal waves with the interfaces in plate-like adhesive structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(6): 27-37. (in Chinese)
- [11] 张锐, 万明习, CAO Wenwu. 超薄层状复合媒质弱界面深度与声导波[J]. *物理学报*, 2000, 49(7):1297-1302. ZHANG Rui, WAN Mingxi, CAO Wenwu. Guided wave in ultra-thin layered composite structure with weak and slip interface in different depth[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(7):1297-1302. (in Chinese)
- [12] KOODALIL D, BARNONCEL D, RAJAGOPAL P, et al. Detection of interfacial weakness in a lap-shear joint using shear horizontal guided waves[J]. *NDT and E International*, 2020, 112: 102248.
- [13] 张海燕, 刘镇清, 吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J]. *复合材料学报*, 2004(2):111-116. ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing, LÜ Donghui. Global matrix and its application to study on lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004(2): 111-116. (in Chinese)
- [14] 张海燕, 刘镇清, 马小松. 界面层对层状各向异性复合结构中 Lamb 波的影响[J]. *物理学报*, 2003, 52(10): 2492-2499. ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing, MA Xiaosong. The influence of interface layer characteristics on Lamb waves in layered anisotropic media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(10):2492-2499. (in Chinese)
- [15] 常新龙, 尼涛, 艾春安, 等. 脱粘缺陷对粘接结构频散特性的影响[J]. *应用声学*, 2010, 29(3):227-235. CHANG Xinlong, NI Tao, AI Chunan, et al. Influences of disbond defects on the dispersion property of adhesive bonding structure[J]. *Applied Acoustics*, 2010, 29(3):227-235. (in Chinese)
- [16] 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 Yujie, CHEN Xingjie, ZHU Wenfa. Ultrasonic guided wave detection of weak bond interface defects in steel-concrete structures[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2020, 39(3):379-385. (in Chinese)
- [17] 彭博, 税国双, 汪越胜. 蜂窝夹层板结构中导波的传播特性及其脱粘损伤的检测[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(12):140-147. PENG Bo, SHUI Guoshuang, WANG Yuesheng. Properties of guided waves propagating in honeycomb sandwich plates and the detection of debonding damage using ultrasonic waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12):140-147. (in Chinese)
- [18] LIU Z H, YU H T, HE C F, et al. Delamination damage detection of laminated composite beams using air-coupled ultrasonic transducers [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, 56(7):1269-1279.
- [19] 陶勇, 尹西岳, 樊喜刚, 等. 二维点阵夹芯板导波传播特性与频散曲线计算[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2014, 20(1):43-50. TAO Yong, YIN Xiyue, FAN Xigang, et al. Propagation characteristics of guided waves 2D lattice sandwich plate and computation dispersion curves [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2014, 20(1): 43-50. (in Chinese)



**第一作者简介:**王兴国,男,1980年3月生,博士,副教授。主要研究方向为机械关键零部件损伤的检测与评价。曾发表《Evaluating interfacial bonding characteristics of the composite material thin layer by ultrasound delay time spectrum》(《Composite Structures》2019, Vol.222)等论文。

E-mail: wangxingguo@jci.edu.cn