http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0007

Al-CFRP 复合结构黏接界面固化过程的超声透射检测

卜繁强[1]，刘勇[1]，王兴国[1,*]，李晓高[1]，沈国浪[1]，马成文[2]

(1. 景德镇陶瓷大学 机械电子工程学院，景德镇 333403；2. 江西昌兴航空装备股份有限公司，景德镇 333032)

摘 要：针对各向同性-各向异性复合结构黏接界面状态评价困难的问题，提出一种超声透射检测方法。基于传递矩阵法，采用无量纲参数 $\omega\tau$ 描述黏接界面状态，以 Al 与碳纤维增强复合材料 (CFRP) 树脂黏接获得的复合结构为对象，建立超声传播理论模型，分析黏接界面状态对超声透射特性的影响。理论分析结果表明，当 $\omega\tau$ 增大时，同种入射角度下的透射系数逐渐增大，透射系数峰值频率向高频移动。建立 Al-CFRP 复合结构的超声透射时域仿真模型，仿真结果表明，当 $\omega\tau$ 增大时，快速傅里叶变换 (FFT) 幅值逐渐增大，峰值频率逐渐向高频移动，透射系数随 $\omega\tau$ 的增大先迅速增大后缓慢增大，最终趋于稳定。对不同黏接状态下 Al-CFRP 黏接试件进行超声透射检测实验，FFT 幅值及透射系数随固化时间的变化趋势与仿真结果相似。

关 键 词：各向同性；各向异性；复合结构；黏接界面；超声透射

中图分类号：V467; TB553

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)11-3758-12

各向同性与各向异性复合材料黏接结构具有比强度、比模量高及轻量化等优点，在航空航天、核工业等领域中得到了广泛应用，如直升机机翼、飞机蒙皮和固体火箭发动机外壳等[1-3]。在生产和使用过程中，由于载荷的作用会产生界面弱化甚至脱黏等问题[4-5]，黏接结构的无损检测与评估是关注的重点。目前，超声检测对界面特性的高敏感性成为评估黏接质量常用的方法之一[6-8]。

针对多层各向同性黏接结构中的超声波传播特性，研究人员进行了大量的理论分析和实验研究。基于 Thomson 传递矩阵模型[9]，Pilarski[10] 与丁俊才[11] 等分别建立了双层板和三层板黏接结构中的声波传播模型，分析了入射角、频率及基体材料等对声波反射和透射特性的影响。在此基础上，孙凯华[12] 和吴斌[13-14] 等均采用弹簧模型表征界面黏接强度，分别探究了刚度系数、刚度比与反射/透射系数的关系。与多层各向同性黏接结构相比，含各向异性介质的黏接结构中的超声波传播特性更为复杂[15]，这方面的研究也逐渐受到重视[16-18]。Maghsoodi[19] 和宋国荣[20] 等改进了传统的传递矩阵，通过全局矩阵的方法推导出各向异性黏接结构中声波的传播模型。Son 等[21] 研究了处于弹性层之间的横观各向同性多孔层中剪切波的传播特性，得到了相速度与孔隙率之间的变化关系。Wang 等[22] 建立了浸没在液体中的各向异性复合材料层合板的时域仿真模型，研究了随机纤维铺层方向和入射角对声波传播特性的影响。He 等[23] 针对具有厚胶层的 FRP-to-FRP 黏接结构，分析了单界面与双界面刚度变化对反射特性的影响。然而，关于各向同性与各向异性黏接结构的研究不多，此类黏接结构的超声传播机理尚不明确，缺乏理论和实验研究。

本文基于传递矩阵法，引用无量纲参数 $\omega\tau$ 来描述不同的黏接界面状态，推导出各向同性-各向异性黏接结构中纵波入射条件下反射/透射系数的表达式。同时，建立了声波接触式入射条件下各向同性-各向异性黏接结构 (Al-CFRP 结构) 的透射时

收稿日期：2025-01-06；**录用日期**：2025-02-07；**网络出版时间**：2025-02-27 14:23

网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250227.1349.002

基金项目：国家自然科学基金 (52265020)；景德镇市基础研究和前沿技术项目 (2025JCYJ001)

* **通信作者**. E-mail：wangxingguo@jcu.edu.cn

引用格式：卜繁强，刘勇，王兴国，等. Al-CFRP 复合结构黏接界面固化过程的超声透射检测 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（11）：3758-3769. Bu F Q，Liu Y，Wang X G，et al. Ultrasonic transmission testing of bonding interface curing process in Al-CFRP composite structures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（11）：3758-3769（in Chinese）.

域仿真模型, 着重分析了黏接界面状态对透射特性的影响。此外, 通过实验测量了不同胶层固化时间下声波的透射时域信号, 分析了不同黏接界面状态时的透射系数变化规律, 并与理论求解结果和仿真结果进行对比。

1　理论分析

1.1　理论建模

对于各向同性-各向异性复合黏接结构的声波传播模型, 将全局坐标系的 x 轴置于黏接结构的下界面 (I1 界面), 固体层厚度沿 z 方向, 如图 1 所示。其中, O 为坐标原点, d_1 和 d_3 分别为各向异性层和各向同性层的厚度; I1 和 I3 分别为两楔块与各向异性层和各向同性层的黏接界面, 假设这 2 个界面为理想的完好黏接形式; I2 假设为各向同性层和各向异性层之间的黏接薄层, 厚度 d_2 远小于波长; "+" 和 "–" 分别为黏接界面的上侧和下侧; L 表示纵波, T 表示横波, θ_{i4}、θ_{L4}、θ_{T4} 分别为发射楔块中的纵波入射、反射角、横波反射角, θ_{L0} 和 θ_{T0} 分别为接收楔块中的纵波透射角和横波透射角。

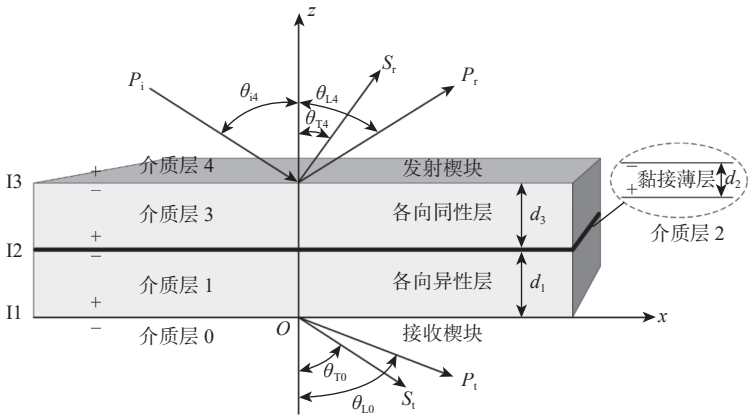


图 1　各向同性-各向异性黏接结构的声波传播模型

Fig. 1　Acoustic wave propagation model in isotropic-anisotropic bonded structures

以角频率为 ω 的简谐平面波 (P_i 波) 由发射楔块入射到黏接结构中, 根据 Snell 定律, 所有反射波与折射波的波矢量沿着 x 方向的分量都相等且为 δ。需说明的是, 本文暂不考虑声波在黏接结构传播过程中的衰减。

假设声波的入射平面为 x-z 平面, 黏接结构中, 各向同性介质的纵波 (P 波) 和横波 (S 波) 的位移势函数可分别表述为[15]

$$\begin{cases} \Phi_{(n)} = \left(\phi_{i(n)}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\alpha_z^{(n)}z} + \phi_{r(n)}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\alpha_z^{(n)}z}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t-\delta x)} \\ \Psi_{(n)} = \left(\psi_{i(n)}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\beta_z^{(n)}z} + \psi_{r(n)}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\beta_z^{(n)}z}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t-\delta x)} \end{cases} \tag{1}$$

式中: n 为各向同性介质的层数, n=0,4; $\phi_{i(n)}$和$\phi_{r(n)}$分别为入射和反射纵波的位移势幅值; $\psi_{i(n)}$和$\psi_{r(n)}$分别为入射和反射横波的位移势幅值; $\alpha_z^{(n)}$ 和 $\beta_z^{(n)}$ 分别为纵波和横波矢量的 z 轴分量, $\alpha_z^{(n)}=\omega\cos\theta_{Ln}/C_{Ln}$, $\beta_z^{(n)}=\omega\cos\theta_{Tn}/C_{Tn}$, C_{Tn}, C_{Ln} 和 C_{Tn} 分别为介质中纵波和横波的速度。

对于各向同性介质, 其内部空间声场所产生的位移分量 $u_{x(n)}$ 和 $u_{z(n)}$ 及应力分量 $\sigma_{zx(n)}$ 和 $\sigma_{zz(n)}$ 可分别表述为[24]

$$\begin{cases} u_{x(n)} = \dfrac{\partial\Phi_{(n)}}{\partial x} - \dfrac{\partial\Psi_{(n)}}{\partial z} \\ u_{z(n)} = \dfrac{\partial\Phi_{(n)}}{\partial z} + \dfrac{\partial\Psi_{(n)}}{\partial x} \\ \sigma_{zx(n)} = \mu_n\left(\dfrac{\partial u_{x(n)}}{\partial z} + \dfrac{\partial u_{z(n)}}{\partial x}\right) \\ \sigma_{zz(n)} = \lambda_n\left(\dfrac{\partial u_{x(n)}}{\partial x} + \dfrac{\partial u_{z(n)}}{\partial z}\right) + 2\mu_n\left(\dfrac{\partial u_{z(n)}}{\partial z}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中: $u_{x(n)}$ 和 $\sigma_{zx(n)}$ 分别为切向位移和应力分量; $u_{z(n)}$ 和 $\sigma_{zz(n)}$ 分别为法向位移和应力分量; λ_n 和 μ_n 为各向同性介质的 Lame 常数。

在发射楔块中, 将式 (1) 中表示的纵波、横波位移势函数 $\Phi_{(4)}$ 和 $\Psi_{(4)}$ 代入式 (2), 可得介质层 4 中声场与界面 I3 上力学参量 (质点位移和应力) 的关系, 矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} \phi_{i(4)} \\ \phi_{r(4)} \\ \psi_{i(4)} \\ \psi_{r(4)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega^2}\begin{bmatrix} C_{T4}\sin\theta_{T4} & -\dfrac{C_{L4}\cos(2\theta_{T4})}{2\cos\theta_{L4}} & -\dfrac{1}{2\rho_4} & \dfrac{1}{2\rho_4}\tan\theta_{L4} \\ C_{T4}\sin\theta_{T4} & \dfrac{C_{L4}\cos(2\theta_{T4})}{2\cos\theta_{L4}} & -\dfrac{1}{2\rho_4} & -\dfrac{1}{2\rho_4}\tan\theta_{L4} \\ \dfrac{C_{T4}\cos(2\theta_{T4})}{2\cos\theta_{T4}} & C_{T4}\sin\theta_{T4} & \dfrac{1}{2\rho_4}\tan\theta_{T4} & \dfrac{1}{2\rho_4} \\ -\dfrac{C_{T4}\cos(2\theta_{T4})}{2\cos\theta_{T4}} & C_{T4}\sin\theta_{T4} & -\dfrac{1}{2\rho_4}\tan\theta_{T4} & \dfrac{1}{2\rho_4} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{x(3)}^+ \\ u_{z(3)}^+ \\ \sigma_{zz(3)}^+ \\ \sigma_{zx(3)}^+ \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$u^{+}_{x(3)}$、$u^{+}_{z(3)}$和$\sigma^{+}_{zz(3)}$、$\sigma^{+}_{zx(3)}$分别为黏接界面I3上侧质点位移分量和应力分量；ρ_4、$C_{\mathrm{L}4}$和$C_{\mathrm{T}4}$分别为楔块介质的密度、纵波速度和横波速度。用矩阵$\boldsymbol{A}_4$表示上述4×4阶矩阵。

假设I3和I1界面为完好黏接状态，即黏接界面上侧和下侧之间的质点位移和应力连续，I3和I1界面处的边界条件可表示为

$$\begin{cases} u^{+}_{x(3)}=u^{-}_{x(3)},u^{+}_{z(3)}=u^{-}_{z(3)} \\ \sigma^{+}_{zx(3)}=\sigma^{-}_{zx(3)},\sigma^{+}_{zz(3)}=\sigma^{-}_{zz(3)} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} u^{+}_{x(1)}=u^{-}_{x(1)},u^{+}_{z(1)}=u^{-}_{z(1)} \\ \sigma^{+}_{zx(1)}=\sigma^{-}_{zx(1)},\sigma^{+}_{zz(1)}=\sigma^{-}_{zz(1)} \end{cases} \tag{5}$$

在各向同性层中，其固体层上下界面处质点位移和应力分量的传递矩阵如下[25]：

$$\begin{bmatrix} u^{-}_{x(3)} \\ u^{-}_{z(3)} \\ \sigma^{-}_{zz(3)} \\ \sigma^{-}_{zx(3)} \end{bmatrix}=\boldsymbol{B}_3\begin{bmatrix} u^{+}_{x(2)} \\ u^{+}_{z(2)} \\ \sigma^{+}_{zz(2)} \\ \sigma^{+}_{zx(2)} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：矩阵$\boldsymbol{B}_3$为4×4阶矩阵，包含各向同性层介质的厚度、密度、纵波和横波速度及两波在介质层中的传播角等参数。具体相关参数见附录A。

在黏接薄层中，考虑其厚度可忽略且远小于波长，用来描述I2界面处的黏接状态，将薄层上下界面处质点位移和应力分量用矩阵的形式联系起来，并写成[26]

$$\begin{bmatrix} u^{+}_{x(2)} \\ u^{+}_{z(2)} \\ \sigma^{+}_{zz(2)} \\ \sigma^{+}_{zx(2)} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & -\mathrm{i}kd_2 & 0 & -\mathrm{i}\omega d_2/\mu_2 \\ -\mathrm{i}\omega\rho_2 d_2 M & 1 & -\mathrm{i}\omega d_2/N & 0 \\ 0 & -\mathrm{i}\omega\rho_2 d_2 & 1 & -\mathrm{i}kd_2 \\ -\mathrm{i}kd_2 Q & 0 & -\mathrm{i}\omega\rho_2 d_2 M & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u^{-}_{x(2)} \\ u^{-}_{z(2)} \\ \sigma^{-}_{zz(2)} \\ \sigma^{-}_{zx(2)} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：k为波数在界面上的投影；$M=1-4(1-\varepsilon^2)(k/k_{\mathrm{T}2})^2$，$N=\lambda_2+2\mu_2$，$Q=1-2\varepsilon^2$，$\varepsilon=C_{\mathrm{T}2}/C_{\mathrm{L}2}$，$k_{\mathrm{T}2}$为薄层中横波的波数，$\rho_2$和$\lambda_2$、$\mu_2$分别为薄层的密度和2个Lame常数。用矩阵$\boldsymbol{C}_2$表示上述4×4阶的传递矩阵。

为了更精确地描述I2界面处的黏接状态，可将薄层定义为具有松弛时间τ的黏弹性体[27-28]。根据其由液态向固态的变化过程来描述I2界面从弱黏接向完好黏接的转变。这种黏弹性体的剪切模量和体积弹性模量可表示为

$$\begin{cases} \mu_2=\mu_{2\infty}\left[\dfrac{(\omega\tau)^2}{1+(\omega\tau)^2}-\mathrm{i}\dfrac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2}\right] \\ K_2=K_0+(K_{2\infty}-K_0)\left[\dfrac{(\omega\tau)^2}{1+(\omega\tau)^2}-\mathrm{i}\dfrac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2}\right] \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\omega\tau$为无量纲参数；$\mu_{2\infty}$和$K_{2\infty}$分别为薄层固态时的剪切模量和体积弹性模量；K_0为薄层液态时的体积弹性模量。通过定义$\omega\tau$的不同值来模拟黏接薄层由液态转变成固态的过程。根据$\lambda_2=K_2-2\mu_2/3$计算出黏接薄层的第一Lame常数λ_2，并代入矩阵$\boldsymbol{C}_2$中。

在各向异性层中，假设其为材料弹性主轴与所选取的全局坐标系(笛卡儿坐标系)坐标轴重合的正交各向异性材料，同样可将上下界面处质点位移和应力分量用矩阵的形式联系起来，并写成对应的传递矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} u^{-}_{x(2)} \\ u^{-}_{z(2)} \\ \sigma^{-}_{zz(2)} \\ \sigma^{-}_{zx(2)} \end{bmatrix}=\boldsymbol{D}_1\begin{bmatrix} u^{+}_{x(1)} \\ u^{+}_{z(1)} \\ \sigma^{+}_{zz(1)} \\ \sigma^{+}_{zx(1)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：矩阵$\boldsymbol{D}_1$为4×4阶的传递矩阵，包含各向异性层的厚度、密度、弹性常数(如C_{ij}，$i,j=1,2,3$)、准纵波和准横波速度及2种波在各向异性层中的传播角等参数[29]。

在接收楔块中，采用发射楔块中相似的分析，将纵波、横波位移势函数$\Phi_{(0)}$和$\Psi_{(0)}$代入式(2)，可得介质层0中声场与界面I1上力学参量(质点位移和应力)的关系，并写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} u^{-}_{x(1)} \\ u^{-}_{z(1)} \\ \sigma^{-}_{zz(1)} \\ \sigma^{-}_{zx(1)} \end{bmatrix}=\boldsymbol{E}_0\begin{bmatrix} \phi_{\mathrm{r}(0)} \\ \phi_{\mathrm{i}(0)} \\ \psi_{\mathrm{r}(0)} \\ \psi_{\mathrm{i}(0)} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：矩阵$\boldsymbol{E}_0$与$\boldsymbol{A}_4$互为逆矩阵形式，且矩阵$\boldsymbol{A}_4$中的$\theta_{\mathrm{L}4}$、$\theta_{\mathrm{T}4}$、ρ_4、$C_{\mathrm{L}4}$和$C_{\mathrm{T}4}$分别被$\theta_{\mathrm{L}0}$、$\theta_{\mathrm{T}0}$、ρ_0、$C_{\mathrm{L}0}$和$C_{\mathrm{T}0}$所代替。

联立式(3)～式(10)，可得到联系上下楔块基体层中声场的矩阵表达式：

$$\begin{bmatrix} \phi_{\mathrm{i}(4)} \\ \phi_{\mathrm{r}(4)} \\ \psi_{\mathrm{i}(4)} \\ \psi_{\mathrm{r}(4)} \end{bmatrix}=\boldsymbol{F}\begin{bmatrix} \phi_{\mathrm{r}(0)} \\ \phi_{\mathrm{i}(0)} \\ \psi_{\mathrm{r}(0)} \\ \psi_{\mathrm{i}(0)} \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中：矩阵$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{A}_4\boldsymbol{B}_3\boldsymbol{C}_2\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{E}_0$。

假设仅考虑纵波从I3界面处入射，令$\psi_{\mathrm{i}(4)}=\phi_{\mathrm{i}(0)}=\psi_{\mathrm{i}(0)}=0$，并代入式(11)中，可得纵波反射系数$R_{\mathrm{LL}}$与透射系数$T_{\mathrm{LL}}$为

$$\begin{cases} R_{\mathrm{LL}}=\dfrac{\phi_{\mathrm{r}(4)}}{\phi_{\mathrm{i}(4)}}=\dfrac{F_{33}F_{21}-F_{31}F_{23}}{F_{11}F_{33}-F_{13}F_{31}} \\ T_{\mathrm{LL}}=\dfrac{\phi_{\mathrm{r}(0)}}{\phi_{\mathrm{i}(4)}}=\dfrac{F_{33}}{F_{11}F_{33}-F_{13}F_{31}} \end{cases} \tag{12}$$

1.2 数值求解及结果分析

利用式(1)～式(12)可求解纵波入射条件下的声波透射系数。本文以有机玻璃(polymethyl methacrylate, PMMA)为上下楔块材料，铝板(Al)为各向同性层，环氧树脂为黏接薄层，碳纤维增强复

合材料 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 板为各向异性层。其中, CFRP 板选用 T300/914 材料, 为单向纤维增强复合材料。环氧树脂在液态和固态时的体积模量分别为 K_0=1.9 GPa 和 $K_{2\infty}$=3.6 GPa, 固态时的剪切模量为 $\mu_{2\infty}$=1.2 GPa。相关材料的具体参数如表 1 所示[18,29]。

图 2 为不同入射角度与 $\omega\tau$ 下纵波透射系数与频率的关系, 其中, 入射角度分别为 0°、20°、40°(随机选取), $\omega\tau$ 分别为 10^{-1}、10^{0}、10^{1} 和 10^{2}。铝板和 CFRP 板的厚度均为 2 mm。环氧树脂薄层的厚度为 0.02 mm, 厚度远小于声波波长, 可忽略厚度对超声透射特性的影响。

表 1　材料参数[18,29]

Table 1　Material parameters[18,29]

材料	密度/(kg·m^{-3})	C_{11}/GPa	C_{12}/GPa	C_{22}/GPa	C_{23}/GPa	C_{44}/GPa	C_{55}/GPa	纵波声速/(m·s^{-1})	横波声速/(m·s^{-1})
铝板	2 700	111.00	61.00	111.00	61.00	25.00	25.00	6 320	3 080
环氧树脂	1 300	6.72	3.98	6.72	3.98	1.37	1.37	2 800	1 100
CFRP板	1 560	143.80	6.20	13.30	6.50	3.60	5.70		
PMMA	1 180	3.47	1.28	3.47	1.28	1.20	1.20	2 730	1 460

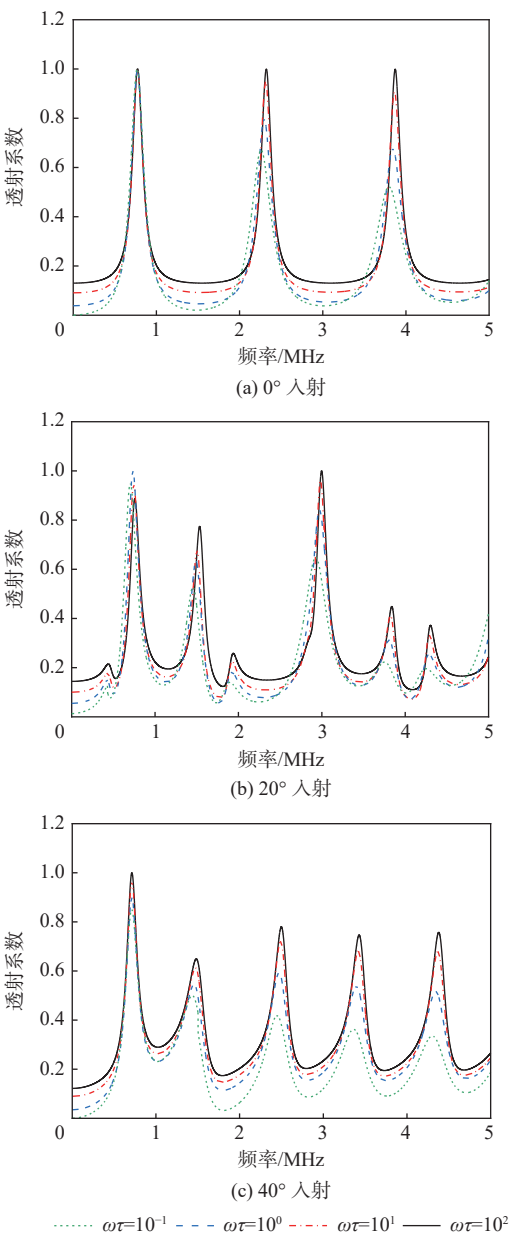


图 2　透射系数与频率之间的关系

Fig. 2　Relationship between transmission coefficients and frequencies

由图 2(a) 可知, 当入射角为 0°时, 由于界面处不存在波形转换, 纵波的传播过程不受各向异性材料特性的影响, 透射系数曲线出现共振现象; 当入射角为 20°和 40°时, 周期性共振现象消失, 曲线变得不规则, 且透射系数峰值的数量增加, 如图 2(b) 与图 2(c) 所示。此外, 在同一入射角度中, 当 $\omega\tau$ 增大时, 透射系数峰值逐渐增大, 并且峰值频率逐渐向高频移动; 当 $\omega\tau$=10^2 时, 不同入射角度时的透射系数峰值均达到最大值, 说明此时黏接界面为完好黏接状态。

2　Al-CFRP 黏接结构透射时域仿真分析

2.1　黏接结构透射时域仿真模型的建立

基于上述理论, 利用有限元仿真软件 COMSOL 建立了 Al-CFRP 黏接结构的透射时域仿真模型, 如图 3 所示, 其为简化的二维平面结构, 并设置接触式的超声发射/接收楔块。其中, CFRP 板的长度与厚度分别为 100 mm 和 2 mm, 与铝板的长度和厚度一致。仿真模型中, 具体的材料参数与表 1 中的参数一致。此外, 上下楔块的黏接界面处设置为完好黏接状态。整个有限元仿真模型不考虑声波在黏接结构内部的衰减特性。

在仿真模型中, 利用弹性波 (时域显示)、固体力学 (弹性波) 物理场来模拟声-结构的时域相互作用。通过线激励和线接收的方式分别模拟超声激励探头和接收探头, 激励端和接收端的长度都设置为 13 mm, 两端面相互平行且端面中心点连线垂直于端面。对于声波传播的模拟, 通过弹性波物理场中的指定速度作为超声激励方式, 激励函数表达式为

$$V(t)=0.5(1-\cos(\pi f_0 t))\sin(2\pi f_0 t) \tag{13}$$

式中: $V(t)$ 为施加的指定速度; f_0 为超声的入射激励

频率；t 为时间，$0\leqslant t\leqslant 2T$，T 为正弦波的周期。当激励中心频率 f_0=2.5 MHz 时，激励信号的时域波形如图 4(a) 所示，通过快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）变换可得频率谱，如图 4(b) 所示。可知，当 f_0=2.5 MHz 时，有效带宽（−6 dB）为 1.27～3.76 MHz。

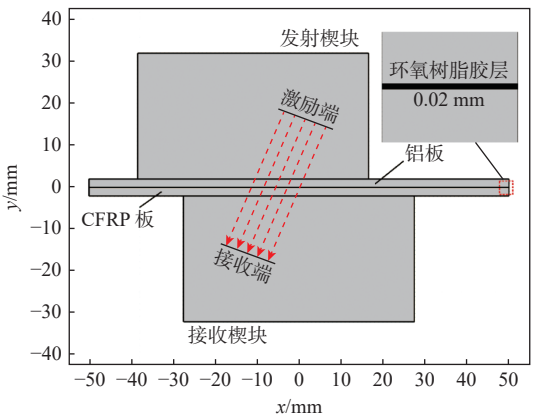


图 3 Al-CFRP 黏接结构透射时域仿真模型

Fig. 3 Time-domain simulation model of transmission for Al-CFRP bonding structure

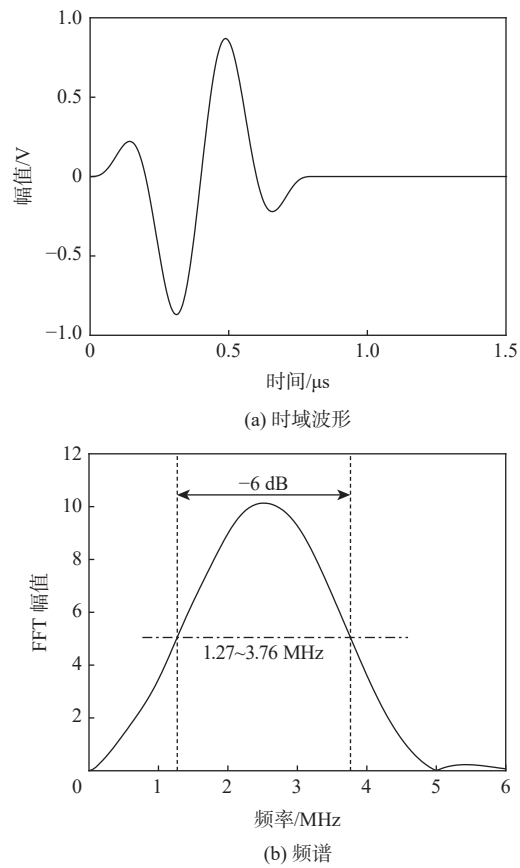


图 4 2.5 MHz 激励中心频率的时域与频谱图

Fig. 4 Time-domain and frequency spectrum plots with 2.5 MHz excitation central frequency

环氧树脂薄层的厚度设置为 0.02 mm，厚度远小于声波波长，可忽略厚度对超声透射特性的影响。因此，环氧树脂薄层可看作 Al-CFRP 黏接结构的黏接界面，通过薄层物理特性的变化来模拟黏接界面的状态。利用式 (14)[30]，将体积弹性模量 K_2 和剪切模量 μ_2 的变化转换成弹性模量 E_2 的变化，从而模拟对应 $\omega\tau$ 取值下的黏接界面状态。图 5 给出了弹性模量 E_2 与 $\omega\tau$ 的关系曲线。当 $\omega\tau$ 增大时，E_2 先逐渐增大，后趋于稳定，在 $\omega\tau=10^2$ 时达到最大值 3.24 GPa。

$$E_2=\frac{9K_2\mu_2}{3K_2+\mu_2} \tag{14}$$

在有限元求解过程中，网格大小的选择至关重要，决定了整个数值模拟结果的准确性。网格选取的表达式为

$$L_e\leqslant c_m/(10f_0) \tag{15}$$

式中：L_e 为有限元网格的大小；c_m 为各层材料中的声速。此外，将模型中的上下楔块两侧边界均设置为低反射边界，可减小边界对声波传播过程中的影响。

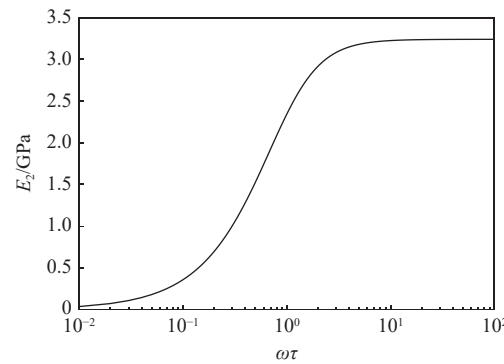


图 5 弹性模量 E_2 与 $\omega\tau$ 之间的关系

Fig. 5 Relationship between elastic modulus E_2 and $\omega\tau$

2.2 黏接结构超声仿真分析

首先，为验证 $\omega\tau$ 与入射角对透射特性的影响，两楔块之间不设置黏接结构，可分别求解得到 0°、20°、40°入射角时的透射信号（见图 6）作为参考信号，V_{ref} 为信号的最大正数幅值。其次，通过求解图 3

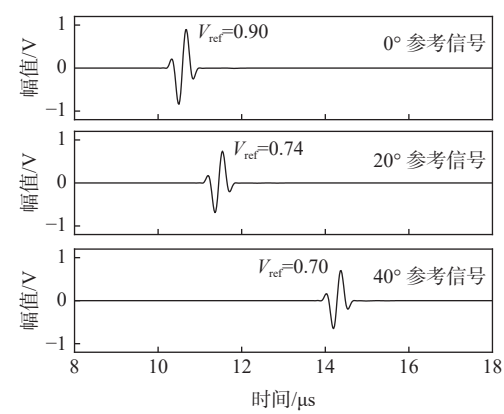


图 6 不同入射角度时的参考信号

Fig. 6 Reference signals at different incident angles

中的仿真模型, 得到不同入射角与 $\omega\tau$ 时的超声透射信号, 如图 7 所示, 图中给出 $\omega\tau$=10^{-1}, 10^{0}, 10^{1}, 10^{2} 时的仿真结果。图 7 中, 由线框标记的信号为首次在接收端所获得的时域信号, 即黏接结构中的透射信号。在相同入射角下, 当 $\omega\tau$ 增大时, 透射幅值对应的时间减少, 而幅值逐渐增大。主要原因是: $\omega\tau$ 增大导致薄层弹性模量 E_2 增大, 从而使声波在黏接结构中的传播速度增大, 黏接界面趋于完好黏接状态, 最终接收端得到的声能增加。

通过对图 7 中的透射时域信号进行 FFT 变换, 可得相应的透射频率谱, 如图 8 所示。其中, 将 $\omega\tau$=10^{2} 时的透射峰值设为 1, 并对频域进行归一化处理。可知, 不同入射角和 $\omega\tau$ 时的频域峰值频率都在有效带宽内。在同种入射角度下, 当 $\omega\tau$ 增大时, FFT 幅值增大, 并且峰值频率逐渐向高频移动; 不同入射角度时的峰值频率移动的距离不同。这与理论分析中的“峰值漂移”现象相似。

已知透射幅值与透射系数成正比, 仿真模型中的透射系数可通过 V_t 与 V_{ref} 的比值计算得到, V_t 为图 7 中透射信号的最大正数幅值。通过计算及归

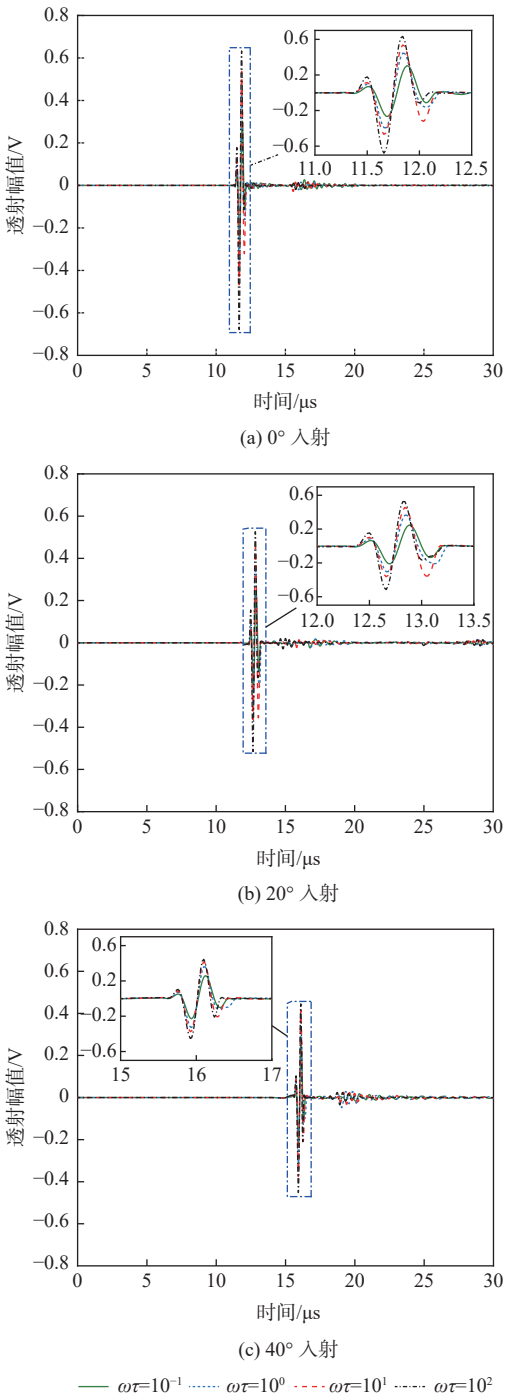


图 7　不同入射角度及 $\omega\tau$ 时的透射信号

Fig. 7　Transmission signals at different incident angles and $\omega\tau$

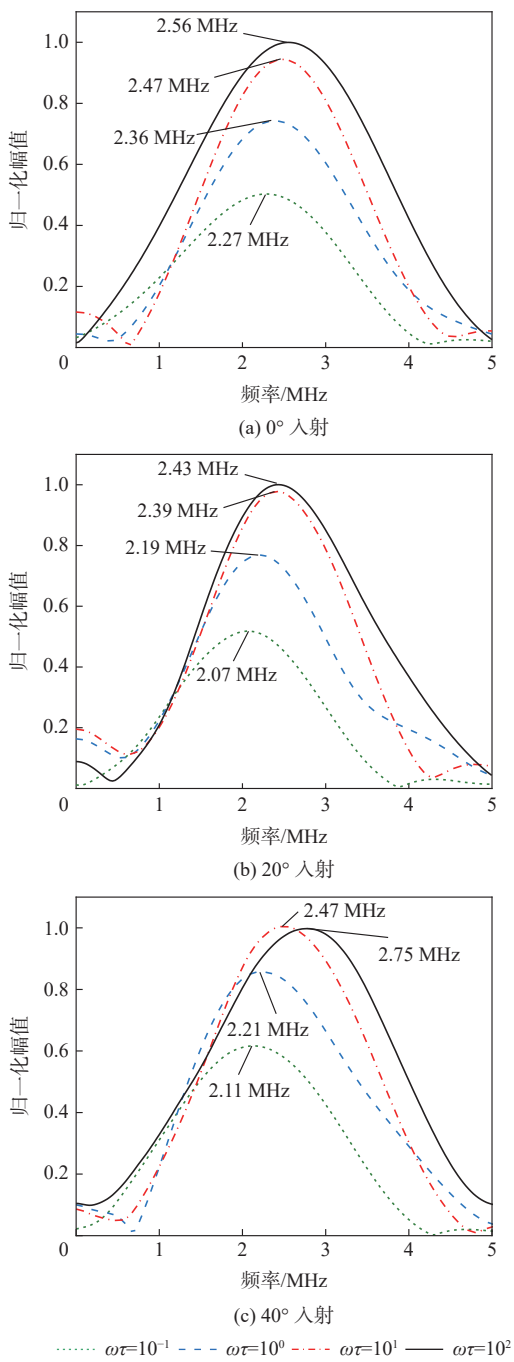
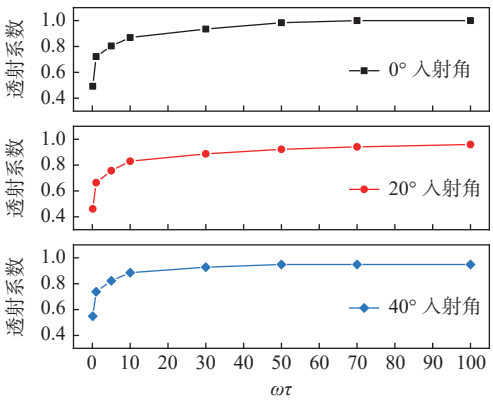


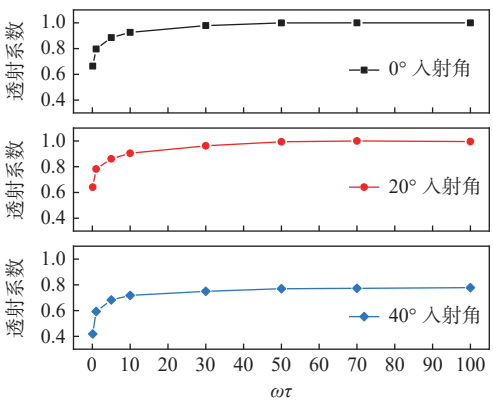
图 8　不同入射角度及 $\omega\tau$ 时的透射频谱图

Fig. 8　Transmission frequency spectrum plots at different incident angles and $\omega\tau$

一化处理后得到透射系数，并与前文理论分析中图 2 的结果进行对比，如图 9 所示。其中，选取图 2 中靠近 2.5 MHz 附近的最大透射系数峰值作为对比。由图 9 可知，当 $\omega\tau$<10 时，黏接界面从弱黏接状态向完好黏接状态演变时，透射系数随着 $\omega\tau$ 的增加而迅速增加；当 $\omega\tau$>10 时，透射系数增加的幅度较小，逐渐趋于稳定，这种现象说明黏接界面接近完好黏接状态；当 $\omega\tau$=100 时，透射系数达到最大值，说明此时黏接界面为完好黏接状态。此外，可以看出，仿真结果与理论计算结果的趋势一致，这也进一步说明，利用无量纲参数 $\omega\tau$ 来描述界面黏接状态是可行的。



(a) 有限元仿真结果



(b) 理论计算结果

图 9 不同入射角度及 $\omega\tau$ 时的透射系数

Fig. 9 Transmission coefficients at different incident angles and $\omega\tau$

3 超声检测实验

3.1 实验试件制备

制备一种各向同性-各向异性黏接结构，基体材料分别为铝板和 CFRP 板 (T300/914)，尺寸均为 100 mm×80 mm×2 mm，CFRP 板为碳纤维取向平行于长度方向的单向层合板，黏接结构示意图如图 10 所示。

为得到不同黏接界面状态的 Al-CFRP 黏接结构，内部环氧树脂胶层的固化时间和厚度控制极其重要。根据环氧树脂胶的使用要求，在基体材料涂上黏接胶后先用恒定重物压在其上方，确保胶层内部空气排出，在需要测试时移开重物。在制作黏接结构试件时，使用游标卡尺测量试件厚度，确保环氧树脂胶层厚度小于 0.02 mm。当基体材料通过环氧树脂胶黏接完成后，分别每 2 h 测量一次，来模拟不同黏接界面状态时的 Al-CFRP 复合材料黏接结构，所制备的试件如图 11 所示。

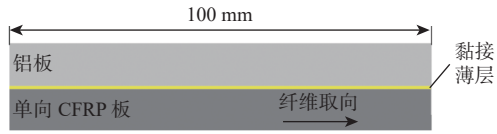


图 10 Al-CFRP 黏接结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of Al-CFRP bonded structure

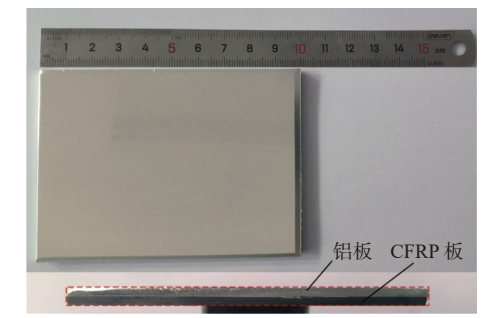


图 11 制备的 Al-CFRP 黏接试件

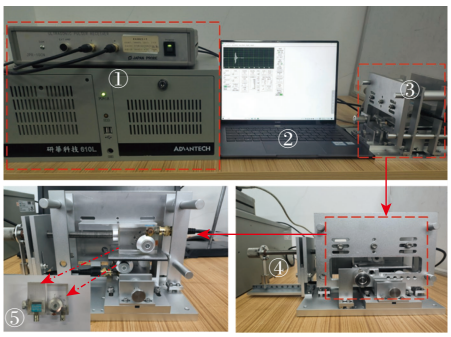
Fig. 11 Prepared Al-CFRP bonded specimen

3.2 超声透射实验及分析

为获得 Al-CFRP 黏接试件的超声透射信号，搭建了可移动接触式的超声透射检测系统，如图 12 所示，主要包含脉冲发射/接收装置 (日本探头公司生产，型号 JPR-10)、一对可调角度超声传感器 (中心频率为 2.5 MHz，传感器端面尺寸为 13 mm×13 mm，入射/接收角度范围为 0°～90°)、计算机、可移动接触式超声检测装置等。超声实验均在常温、常压下进行。

首先，上下楔块之间不放置黏接试件，得到不同入射角时的参考信号，如图 13 所示。其次，环氧树脂薄层受固化时间的影响，导致黏接试件的黏接界面状态发生变化。借助可移动接触式超声透射检测系统对图 11 中不同固化时间下的试件进行检测。图 14 给出了不同固化时间 (2,6,10,14 h) 与入射角 (0°,20°,40°) 时的超声透射信号。

由图 14 可知，当环氧树脂薄层固化时间增加时，透射时域幅值逐渐增大，幅值对应的时间减少，与前文仿真结果中的现象相似。环氧树脂薄层固化时间增大，薄层弹性模量增大，基体之间的界面黏接强度也增加。当固化时间为 14 h 时，幅值达到



① 脉冲发射/接收装置; ② 计算机;
③ 可移动接触式超声检测装置; ④ 移动推杆;
⑤ 可调角度楔块 (超声发射/接收换能器)。

图 12　可移动接触式超声透射检测系统

Fig. 12　Movable contact ultrasonic transmission testing system

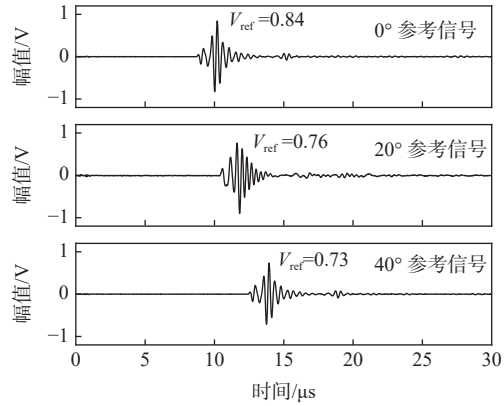


图 13　无试件下不同入射角度时的参考信号

Fig. 13　Reference signals at different incident angles without specimen

最大值, 不同入射角度下幅值对应时间如表 2 所示, 同时, 与有限元仿真中幅值对应时间比较可知, 两者在时间上的误差均小于 5%。通过对图 14 中的透射信号进行 FFT 变换, 得到归一化的频域幅值, 如图 15 所示。由图 15 中红色实线箭头可知, 在同种入射角度下, 当固化时间增大时, FFT 幅值逐渐增大, 峰值频率逐渐向高频移动, 这与有限元仿真和理论分析中峰值频率偏移的特征一致。

类似地, 通过 V_t 与 V_{ref} 的比值及归一化处理后得到相应的透射系数, 并与仿真结果进行对比, 如图 16 所示。可知, 当胶层固化时间小于 10 h 时, 透射系数随固化时间增大而迅速增大, 即初始固化时间对透射系数的影响较大, 这与有限元仿真结果中 $\omega\tau$<10 时的透射系数变化一致; 当固化时间大于 10 h 时, 透射系数随固化时间增大而缓慢增大; 当固化时间大于 12 h 时, 透射系数基本保持不变, 说明此时黏接界面接近于完好黏接状态, 对应仿真结

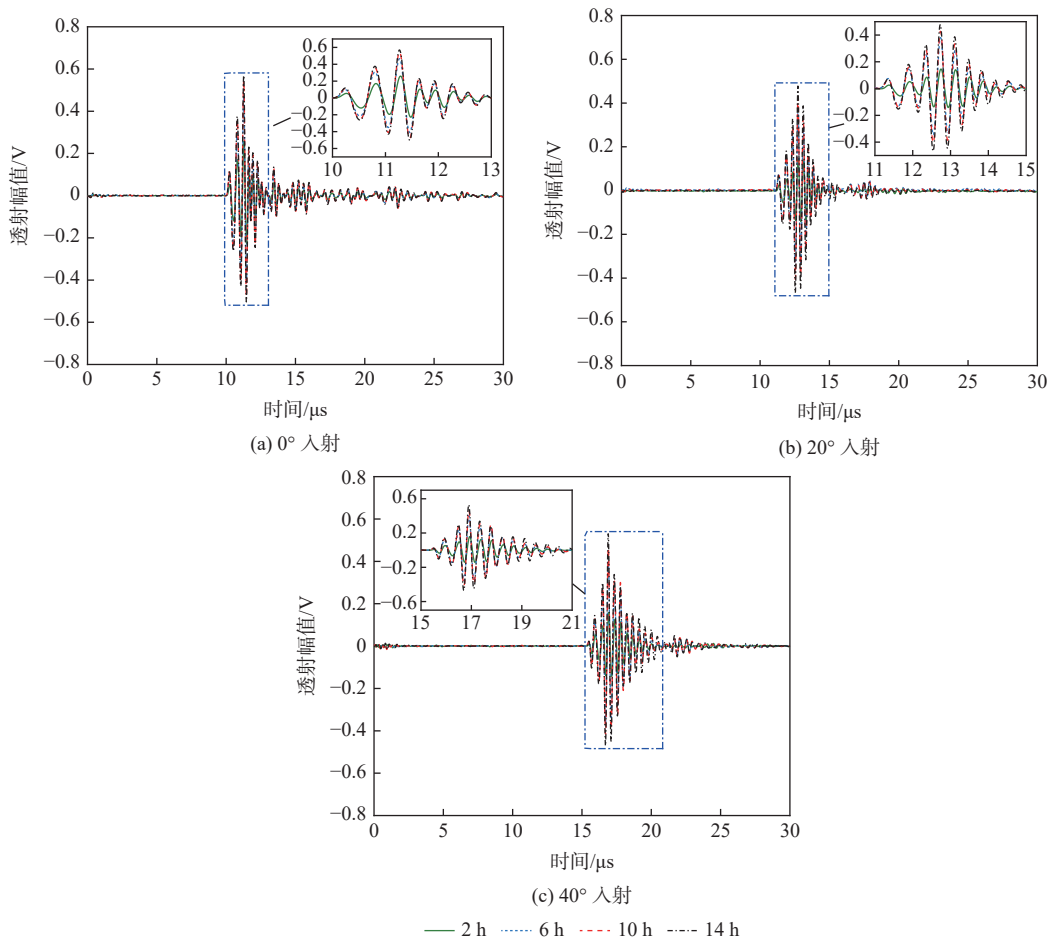


图 14　不同入射角度及固化时间的透射信号

Fig. 14　Transmission signals at different incident angles and curing times

表 2 时间误差分析

Table 2 Analysis of time errors

入射角度/(°)	时间/μs		误差/%
	有限元仿真结果	实验检测结果	
0	11.84	11.27	4.8
20	12.82	12.74	0.6
40	16.11	16.89	4.8

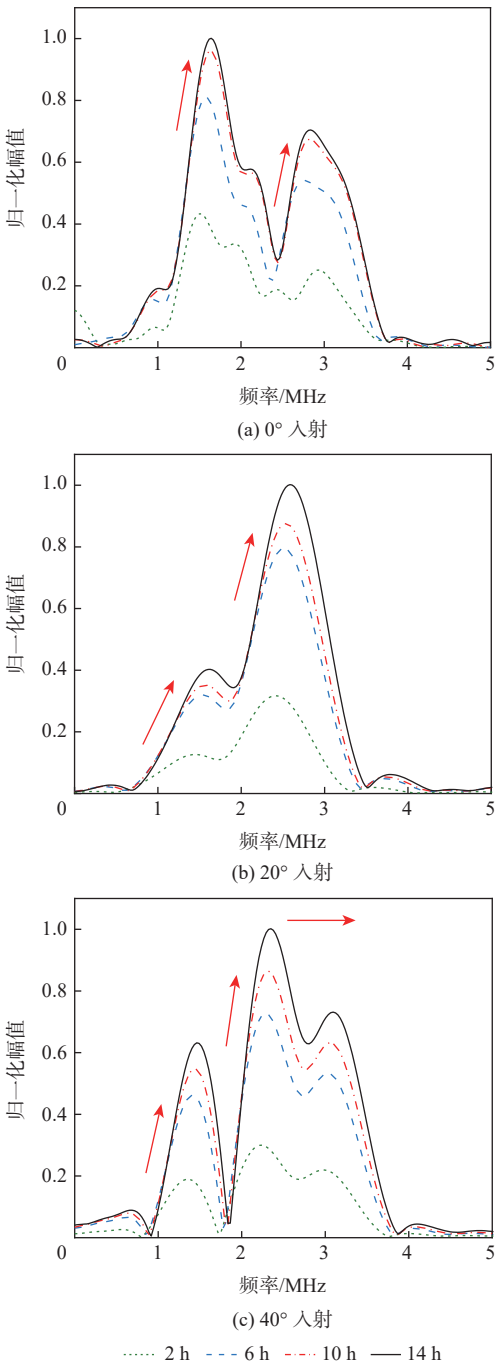


图 15 不同入射角度及固化时间的透射频谱图

Fig. 15 Transmission frequency spectrum plots at different incident angles and curing times

果中 $\omega\tau$=100 时界面的黏接状态。因此，实验结果与仿真结果对比发现，透射系数曲线的变化趋势整体相似。

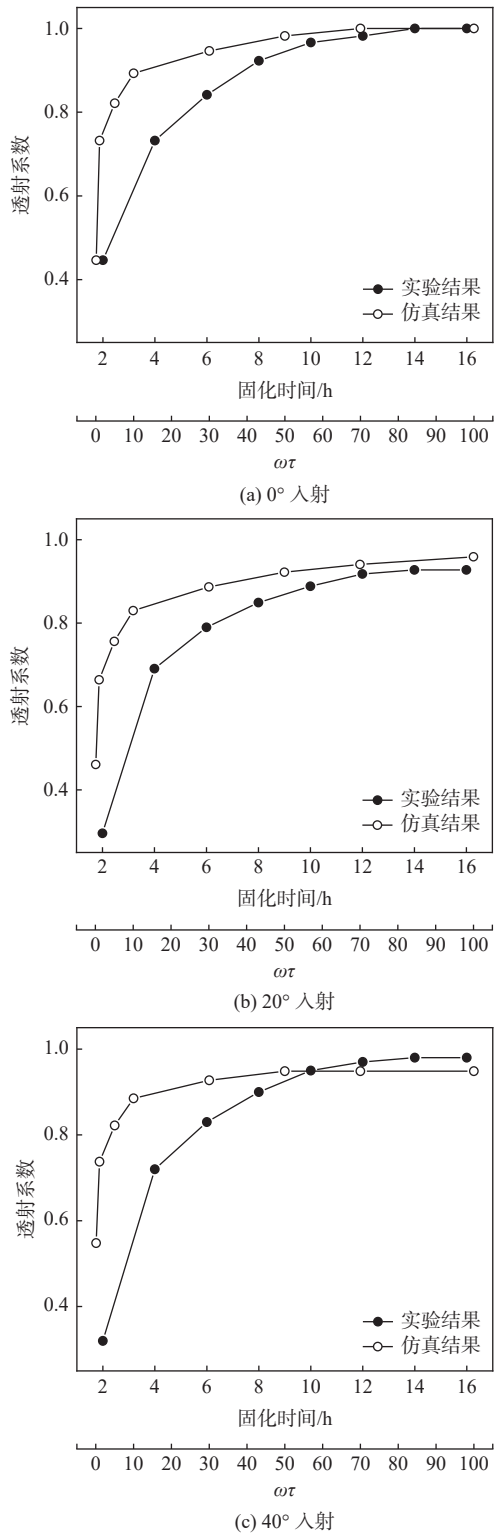


图 16 不同入射角度时的透射系数对比

Fig. 16 Comparison of transmission coefficients at different incident angles

4 结 论

针对 Al-CFRP 黏接结构中的超声传播特性，利用理论分析、有限元仿真及实验测试的方法，研究了黏接界面状态及入射角度对超声透射特性的影响。

1）利用传递矩阵法，建立了基于无量纲参数 $\omega\tau$

的黏接结构超声传播理论模型。当入射角为 0°时，透射系数曲线出现共振现象；当入射角为 20°和 40°时，周期性共振现象消失，透射系数峰值数量增多。在同一入射角度中，随着 $\omega\tau$ 的增大，透射系数峰值增大，峰值频率逐渐向高频移动。

2）建立了 Al-CFRP 黏接结构的超声透射时域仿真模型，研究了接触式条件下 Al-CFRP 黏接结构中的声波透射特性。随着 $\omega\tau$ 的增大，FFT 幅值逐渐增大，峰值频率逐渐向高频移动，与理论分析中的“峰值漂移”现象相似。透射系数随着 $\omega\tau$ 的增加先迅速增大后缓慢增大。有限元仿真结果与数值理论结果的趋势一致。

3）利用超声透射检测系统，获得了胶层不同固化时间下的透射频率谱，FFT 峰值频率随 $\omega\tau$ 的变化而发生偏移现象。当固化时间小于 10 h，透射系数随固化时间增大而迅速增大；当固化时间大于 10 h 时，透射系数随固化时间增大而缓慢增大；当固化时间大于 12 h 时，透射系数基本保持不变。实验结果与仿真结果变化趋势相似。

参考文献（References）

[1] Talebitooti R, Gohari H D, Zarastvand M R. Multi objective optimization of sound transmission across laminated composite cylindrical shell lined with porous core investigating non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 69: 269-280.

[2] 张震, 曾亮, 张永华, 等. 粘接结构质量超声检测和信号处理方法[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(2): 126-130.
Zhang Z, Zeng L, Zhang Y H, et al. Review on ultrasonic testing technology and processing method for bonding structure quality[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(2): 126-130(in Chinese).

[3] 周正干, 滕利臣, 李洋. 复杂结构焊缝缺陷双线阵全聚焦超声成像方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(12): 2407-2413.
Zhou Z G, Teng L C, Li Y. Dual-linear-array TFM ultrasonic imaging method for weld defects of complex structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(12): 2407-2413(in Chinese).

[4] 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.

[5] Zhou W, Lv Z H, Wang Y R, et al. Acoustic response and microdamage mechanism of fiber composite materials under mode-II delamination[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(4): 046201.

[6] Valente L L, Sarkis-Onofre R, Gonçalves 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.

[7] Wang X G, Wang J X, Shen G L, et al. Research on interface bonding characteristics of layered medium using ultrasonic oblique incidence[J]. Composite Structures, 2022, 295: 115733.

[8] 周正干, 王俊, 李洋, 等. 多层黏接结构的阵列超声检测评价方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(12): 3207-3214.
Zhou Z G, Wang J, Li Y, et al. Ultrasonic array testing and evaluation method of multilayer bonded structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(12): 3207-3214 (in Chinese).

[9] Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 89-93.

[10] Pilarski A, Rose J L. A transverse-wave ultrasonic oblique-incidence technique for interfacial weakness detection in adhesive bonds[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(2): 300-307.

[11] 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 J C, Wu B, He C F. 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).

[12] 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 C M, et al. Influences of bonding strength on reflection and transmission characteristics of ultrasonic bulk waves in steel-lead bonded structure[J]. Applied Acoustics, 2019, 38(1): 93-104(in Chinese).

[13] 吴斌, 张婧, 邱兆国, 等. 斜入射下粘接界面的反射特性[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 801-805.
Wu B, Zhang J, Qiu Z G, et al. The reflective properties of bonding interface in oblique incidence[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 801-805(in Chinese).

[14] 邱兆国, 吴斌, 何存富. 弱粘接结构中谐振频率与刚度比的数值研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 32-37.
Qiu Z G, Wu B, He C F. Numerical analysis of resonance frequency and stiffness ratio in weak bonded structures[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 32-37(in Chinese).

[15] 王耀俊. 多层固体媒质对声波的反射和透射[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1993, 29(1): 49-62.
Wang Y J. Acoustic wave reflectionand transmission on multilayered media[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1993, 29(1): 49-62(in Chinese).

[16] Nayfeh A H, Chimenti D E. Ultrasonic wave reflection from liquid-coupled orthotropic plates with application to fibrous composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(4): 863-870.

[17] Nguyen V H, Abdoulatuf A, Desceliers C, et al. A probabilistic study of reflection and transmission coefficients of random anisotropic elastic plates[J]. Wave Motion, 2016, 64: 103-118.

[18] 宋国荣, 刘明坤, 吕炎, 等. 正交各向异性板液/固界面的声反射与声透射[J]. 声学学报, 2020, 45(1): 77-86.
Song G R, Liu M K, Lv Y, et al. Acoustic reflection and transmission at the interface between orthotropic plate and liquid media[J]. Acta Acustica, 2020, 45(1): 77-86(in Chinese).

[19] Maghsoodi A, Ohadi A, Sadighi M. Calculation of wave dispersion curves in multilayered composite-metal plates[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014: 410514.

[20] 宋国荣, 宋协宏, 吕炎, 等. 基于超声透射特性的复合材料粘接结构粘接质量预测[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4): 230-238.
Song G R, Song X H, Lü Y, et al. Prediction of bonding quality of composite bonded structures based on ultrasonic transmission cha-

racteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4): 230-238(in Chinese).

[21] Son M S, Kang Y J. Propagation of shear waves in a poroelastic layer constrained between two elastic layers[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(8): 3685-3695.

[22] Wang L, Rokhlin S I. Ultrasonic wave interaction with multidirectional composites: modeling and experiment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(5): 2582-2595.

[23] He C F, Li Y K, Lyu Y, et al. Ultrasonic reflection characteristics of FRP-to-FRP bonded joints with thick adhesive layers for bonding evaluation: theoretical analysis[J]. Composite Structures, 2020, 246: 112402.

[24] Rose J L, Nagy P B. Ultrasonic waves in solid media[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(4): 1807-1808.

[25] Brekhovskikh L. Waves in layered media[M]. New York: Academic Press, 2012.

[26] Rokhlin S I, Wang Y J. Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(2): 503-515.

[27] Lavrentyev A I, Rokhlin S I. Models for ultrasonic characterization of environmental degradation of interfaces in adhesive joints[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(8): 4643-4650.

[28] Loukkal A, Lematre M, Bavencoffe M, et al. Modeling and numerical study of the influence of imperfect interface properties on the reflection coefficient for isotropic multilayered structures[J]. Ultrasonics, 2020, 103: 106099.

[29] 丁俊才, 吴斌, 何存富, 等. 含各向异性层的多层结构中的横波传播[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 171-186.
Ding J C, Wu B, He C F, et al. Transverse wave propagation in multilayered structure with an anisotropic layer[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(1): 171-186(in Chinese).

[30] 柴华友, 吴慧明, 张电吉, 等. 弹性介质中的表面波理论及其在岩土工程中应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 18-19.
Chai H Y, Wu H M, Zhang D J, et al. Surface wave theory in elastic medium and its application in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008: 18-19(in Chinese).

附录 A

$$
\begin{cases}
C_{11}=C_{44}=2\sin^2\theta_{T3}\cos P_3+\cos(2\theta_{T3})\cos Q_3\\
C_{12}=C_{34}=\mathrm{i}(\tan\theta_{L3}\cos(2\theta_{T3})\sin P_3-\sin(2\theta_{T3})\sin Q_3)\\
C_{13}=C_{24}=\sin\theta_{L3}(\cos Q_3-\cos P_3)/(\rho_3 C_{L3})\\
C_{14}=-\mathrm{i}(\tan\theta_{L3}\sin\theta_{T3}\sin P_3+\cos\theta_{T3}\sin Q_3)/(\rho_3 C_{T3})\\
C_{21}=C_{43}=\mathrm{i}(2\cot\theta_{L3}\sin^2\theta_{T3}\sin P_3-\\
\qquad\tan\theta_{T3}\cos(2\theta_{T3})\sin Q_3)\\
C_{22}=C_{33}=\cos(2\theta_{T3})\cos P_3+2\sin^2\theta_{T3}\cos Q_3\\
C_{23}=-\mathrm{i}(\cos\theta_{T3}\sin P_3+\tan\theta_{T3}\sin\theta_{L3}\sin Q_3)/(\rho_3 C_{L3})\\
C_{31}=C_{42}=2\rho_3 C_{T3}\sin\theta_{T3}\cos(2\theta_{T3})(\cos Q_3-\cos P_3)\\
C_{32}=-\mathrm{i}\rho_3(C_{L3}\cos^2(2\theta_{T3})\sin P_3/\cos\theta_{L3}+\\
\qquad 4C_{T3}\cos\theta_{T3}\sin^2\theta_{T3}\sin Q_3)\\
C_{41}=-2\mathrm{i}\rho_3 C_{T3}^2[2\cos\theta_{L3}\sin^2\theta_{T3}\sin P_3/C_{L3}+\\
\qquad\cos^2(2\theta_{T3})\sin Q_3/(2C_{T3}\cos\theta_{T3})]
\end{cases}
\tag{A1}
$$

式中：$P_3=\omega d_3\cos\theta_{L3}/C_{L3}$，$Q_3=\omega d_3\cos\theta_{T3}/C_{T3}$，$\theta_{L3}$ 和 θ_{T3} 分别为介质中纵波和横波的入射角，C_{L3} 和 C_{T3} 分别为纵波和横波的传播速度；ρ_3 和 d_3 分别为介质层的密度和厚度。

Ultrasonic transmission testing of bonding interface curing process in Al-CFRP composite structures

BU Fanqiang[1]，LIU Yong[1]，WANG Xingguo[1,*]，LI Xiaogao[1]，SHEN Guolang[1]，MA Chengwen[2]

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering，Jingdezhen Ceramic Institute，Jingdezhen 333403，China；
2. Jiangxi Changxing Aviation Equipment Co.，Ltd.，Jingdezhen 333032，China)

Abstract：An ultrasonic transmission testing method was created in response to the difficulties in assessing the bonding states of isotropic-anisotropic composite structures. Based on the transfer matrix method, a dimensionless parameter $\omega\tau$ was introduced to describe bonding interface states. A theoretical model of ultrasonic propagation was established for the composite structure obtained by resin bonding Al and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) to analyze the influence of the bonding state on the ultrasonic transmission characteristics. The results of theoretical analyses show that the transmission coefficient under the same incident angle gradually increases when $\omega\tau$ increases, and the transmission coefficient peak frequency shifts to higher frequency. Theoretical analyses reveal that the transmission coefficient at a fixed incident angle gradually increases as $\omega\tau$ increases, and the peak frequency shifts to a higher frequency. An ultrasonic transmission time-domain simulation model for the Al-CFRP composite structure was developed, and the simulation results show that the fast Fourier transform (FFT) amplitude gradually increases with $\omega\tau$ increasing, and the peak frequency shifts to a higher frequency. The transmission coefficient increases rapidly with $\omega\tau$ at first, then it increases slowly and eventually stabilizes. The trends in FFT amplitude and transmission coefficient with curing time are compatible with the simulation results, according to ultrasonic transmission testing measurements conducted on Al-CFRP bonded specimens under various bonding interfaces.

Keywords：isotropic; anisotropic; composite structures; bonding interface; ultrasonic transmission

Received：2025-01-06；**Accepted**：2025-02-07；**Published Online**：2025-02-27 14：23

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250227.1349.002

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (52265020); Jingdezhen Municipal Basic Research and Frontier Technology Project (2025JCYJ001)

* **Corresponding author**. E-mail：wangxingguo@jcu.edu.cn