

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311598

复合材料板的空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法^{*}

王丙泉^{1,2}, 赵 勃^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学超精密仪器技术及智能化工业和
信息化部重点实验室 哈尔滨 150080)

摘 要:为了实现大部件复合材料板的原位应力测量,提出了基于 Lamb 波的复合材料板空气耦合超声应力测量方法。目前,由于空耦超声换能器声阻抗的严重不匹配导致能量损失严重,空耦超声信号较为微弱,在声学特征准确提取上难度较大。与此同时,空耦超声 Lamb 波应力测量方法在复合材料中的应用仍处于理论与实验的探索阶段。通过实验方法探究碳纤维复合材料的 Lamb 波声弹性效应规律。根据复合材料板相速度与最佳入射角频散特性分析确定了空耦超声换能器的中心频率与相对纯净 A0 模态 Lamb 波的激励方式,使空耦超声 Lamb 波具有较好的信噪比,保证声时提取的准确度。为了验证所提出方法的有效性,分别沿着 0°、15°、30°、45°、60°、75°以及 90°纤维方向获得 7 个不同的拉伸试样进行应力测量。实验结果表明,在 0~100 MPa 范围内测量误差小于±8.1 MPa,测量重复性为 7.5 MPa。该方法在测量精度和测量重复性等方面具有显著优势,可为大部件复合材料板的原位应力测量提供一种先进可行的技术。

关键词: 复合材料板;原位应力测量;空气耦合超声;Lamb 波

中图分类号: TH878 TB511 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 140.20

In-situ stress measurement method for composite plate based on air-coupled ultrasonic Lamb wave

Wang Bingquan^{1,2}, Zhao Bo^{1,2}

(1. Center of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
2. Key Lab of Ultra-precision Intelligent Instrumentation, Ministry of Industry and Information Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To realize the in-situ stress measurement of large composite plates, an air-coupled ultrasonic stress measurement method for composite plates based on Lamb waves is proposed. At present, due to the severe impedance mismatch of the air-coupled ultrasonic transducer, energy loss is severe, and the air-coupled ultrasonic signal is relatively weak, making it difficult to accurately extract acoustic features. Meanwhile, the application of the air-coupled ultrasonic Lamb wave stress measurement method in composite materials is still in the exploration stage of theory and experiment. The Lamb wave acoustic elastic effect of carbon fiber composite materials is explored through experimental methods. According to composite plates' the phase velocity and the optimal incident dispersion characteristics analysis, the center frequency of the air-coupled ultrasonic transducers, and the excitation method of the relatively pure A0 mode Lamb wave is determined. The accuracy of sound time extraction is ensured by a good signal-to-noise ratio of the spatially coupled ultrasonic Lamb wave. To evaluate the effectiveness of the proposed method, seven different tensile specimens are obtained along the fiber directions of 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90° for stress measurement. The experimental results show that the measurement error is less than ±8.1 MPa in the range of 0~100 MPa, and the measurement repeatability is 7.5 MPa. This method has significant advantages in measurement accuracy and repeatability and could provide an advanced and feasible technique for in-situ stress measurement of large composite plates.

Keywords: composite plate; in-situ stress measurement; air-coupled ultrasonic; Lamb wave

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有性能可设计、多功能兼容、可整体成型以及高比强度和比刚度、疲劳性能好、耐腐蚀等特点,广泛应用于新型飞机的机身、机翼和机舱以及汽车、船舶等领域^[1-4]。复合材料中的应力主要表现为残余应力和结构承力,其中有些可以弥合部分分层、裂纹等损伤而增加结构的强度和稳定性。有些反而会使分层、裂纹等损伤加剧,进而造成结构强度和稳定性大幅下降,从而影响其应用领域的安全性^[5-7]。因此,发展适用于各向异性碳纤维复合材料板的原位应力测量方法,对其应力状态及时进行快速、精确的测量,对于实现其应用领域的健康监测和评价具有重要的指导意义^[8-9]。

应力测量超声法是利用超声波声弹性效应,即弹性波(包括纵波、横波、板波、表面波等)传播速度受应力影响而发生变化的现象^[10]。对于大部件复合材料板,Lamb波是一种理想的方法选择。Lamb波在传播过程中能量衰减小且传播距离远,能够大范围、高效率地实现应力的测量^[11]。Safikhhanlu等^[12]对厚度为0.5 mm的铝1050样品进行应力测量,实验结果显示S0和A0兰姆波的飞行时间变化是临界折射纵波(critically refracted longitudinal, L_{CR})变化的3.75倍和1.91倍,对应应力测量更加敏感。Alghalandis等^[13]利用兰姆波评估薄钢板中的局部残余应力。在不同的频率和应力下,观察A0模式的行为。结果表明,A0模式对应应力变化敏感,其对残余应力的变化遵循特定的趋势。此外,对残余应力的敏感性随着频率的增加而降低。Lim等^[14]提出了一种基于兰姆波测量和卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的动态和静态载荷下金属板状结构在线应力监测技术的发展。所提出的技术能够在最大误差2 MPa和均方根误差1 MPa范围内估计静态应力。但以上的研究均是基于Lamb波的声弹性效应面向金属等各向同性材料实现应力测量。基于Lamb波的复合材料声弹性应力测量还处于理论和试验探索阶段。

基于声弹性效应的接触式超声Lamb波测量方法需要使用耦合剂实现换能器和待检测样本之间的有效耦合^[15]。然而,耦合剂的厚度不均匀会直接影响声时差的测量从而引入应力测量误差。此外,耦合剂的存在会大大降低测量的灵活性,因此,非接触式超声检测更适合用于实现碳纤维复合材料板的原位应力测量。空气耦合超声检测技术以空气作为耦合剂,具有完全非接触和无污染的特点^[16-17]。尤其对于复合材料,其声阻抗更接近于空气的声阻抗,更容易在复合材料板中激励产生模式单一的Lamb波。因此,本文确定基于Lamb波的空气耦合超声测量方法实现大部件复合材料板的原位应力测量。

碳纤维复合材料自身的各向异性导致其声弹性效应尚不明确。由于Lamb波具有多种模式和复杂的频散特性,在实际应用中受到很多局限。同时,由于空气耦合超声换能器存在声阻抗的严重不匹配导致能量损失严重、空耦超声信号较为微弱,在声学特征准确提取上增加了难度^[18-19]。因此,本文聚焦于空气耦合超声Lamb波应力测量技术,为大部件复合材料板的应力场原位测量提供有效的方法。通过对CFRP板的Lamb波频散特性进行理论分析,选择合适中心频率的空气耦合超声换能器产生模式单一的纯净Lamb波,保证空耦超声Lamb波的信噪比、声时提取与应力测量精度。通过实验方法探究碳纤维复合材料的Lamb波声弹性效应规律,验证基于Lamb波的空耦超声测量方法对于碳纤维复合材料板原位应力测量的可行性。

1 Lamb波声弹性效应及频散特性

1.1 Lamb波声弹性效应

为了研究兰姆波在应力介质中的传播规律,定义了3种状态,即自然状态、变形状态和测量状态,如图1所示。

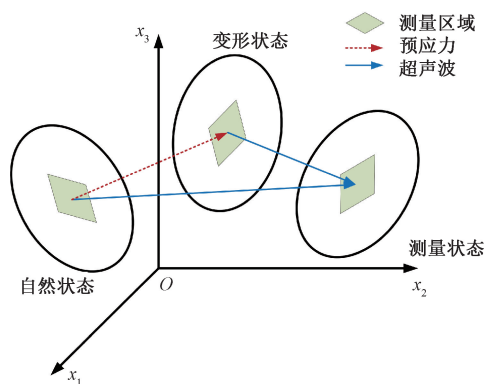


图1 应力测量中涉及的3种变形状态示意图

Fig. 1 Three states involved in stress measurement

根据声弹性效应理论,小振幅超声波在处于自然状态的介质中传播时的Christoffel方程为:

$$(\rho v^2 \delta_{il} - C_{ijkl} l_j l_k) u_l = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; v 为声速; δ_{il} 为Kronecher函数; C_{ijkl} 为固体介质的刚度系数; l_j, l_k 为波前法向量的方向余弦; u_l 为谐振平面波。满足 $u_i = u_l \delta_{il}, k_j = kl_j, k_k = kl_k, v^2 = \omega^2 / k^2, k$ 为波数, ω 为角频率。

当弹性波在处于变形形态的受力介质中传播时,各向异性介质在受力变形状态时的Christoffel方程为:

$$(\rho v^2 \delta_{il} - A_{ijkl} l_j l_k) u_l = 0 \quad (2)$$

式中: $A_{ijkl} = C_{ijkl} + t_{jl}\delta_{ik}$ 为受力介质的等效刚度系数; t_{jl} 为相对于变形状态的 Cauchy 应力张量。

式(1)和(2)存在非零解的条件为:

$$\rho v_0^2 \delta_{il} = C_{ijkl} l_j l_k \quad (3)$$

$$\rho v_0^2 \delta_{il} = A_{ijkl} l_j l_k \quad (4)$$

式中: v_0 为各向异性介质不受力时的声速; v 为各向异性介质受力时的声速。

由于速度在受力前后的变化往往是微弱的, 故 $v \approx v_0$, 联立式(3)和(4)可得^[20-21]:

$$\Delta v = v - v_0 = \frac{t_{jl}}{2v_0\rho} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在受力的各向异性介质中, 超声波的速度变化与应力存在近似线性关系。Zhu 等^[22] 以及 Gandhi 等^[23] 已经分析了 2 个主应力对 Lamb 波相速度的影响并验证了 2 个正应力的 Lamb 声弹性效应满足线性叠加关系:

$$\Delta v_1 = K_{11}\sigma_{11} + K_{12}\sigma_{22} \quad (6)$$

$$\Delta v_2 = K_{21}\sigma_{11} + K_{22}\sigma_{22}$$

式中: Δv_1 和 Δv_2 分别是在 x_1 和 x_2 方向上无应力前后的 Lamb 波相速度变化; σ_{11} 和 σ_{22} 分别为 x_1 和 x_2 方向上的 2 个主应力; K_{11} 、 K_{12} 、 K_{21} 、 K_{22} 是声弹性系数。

对于 x_1 轴上的单轴应力, 式(6)可以简化为:

$$\Delta v_1 = K_{11}\sigma_{11} \quad (7)$$

通常在实际测量过程中, 声速的变化很微弱, 直接测量声速会引入更多误差。为了测量更加直接, 引入物理量声时差 T , 将声速的测量转化为对传播距离 L 的声时差的测量。

$$T = \Delta t = - (L/v_0^2) \Delta v \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)即可得到声时差 T 与应力的关系为:

$$\sigma_{11} = - (v_0^2/L)/K_{11} T = K_1 T \quad (9)$$

式中: K_1 为应力系数。

由式(9)可知, 通过实验标定(即改变 σ_{11} 的大小, 获得 x_1 方向上 Lamb 波在相同传播距离下的声时差 T) 获得应力系数 K_1 。通过测量固定传播距离下的声时差并结合标定获得的应力系数即可实现碳纤维复合材料板 x_1 轴上的单轴应力的测量。

1.2 Lamb 波频散特性

N 层 CFRP 板结构如图 2 所示, 每层的厚度为 $h^{(n)}$ 。每个层的材料参数在其局部坐标系中定义, 然后旋转到全局坐标系。采用部分波法和传递矩阵法得到 Lamb 波在 CFRP 板中的频散曲线。

假设波的传播方向为坐标系 (x_1, x_2, x_3) 中的 x_1 方向。根据部分波法分析可得, 碳纤维复合材料层合板的每一层声场可以描述为 6 个部分波的线性组合。其中,

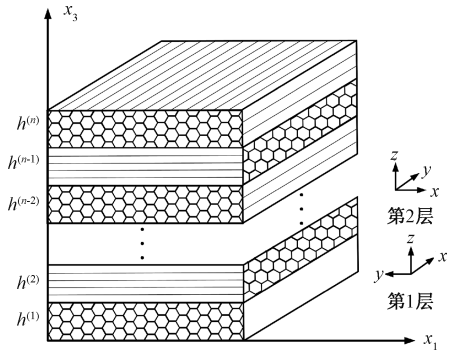


图2 碳纤维复合材料层合板示意图

Fig. 2 Diagram of multi-layer CFRP plate

传递矩阵方法中自由边界条件和界面连续性条件涉及到 $u_l (l=1,2,3)$ 和 $\sigma_l (l=3,4,5)$, 即 $\sigma_{3l} (l=1,2,3)$, 6 个部分波。

$$u_l = \left[\sum_{m=1}^6 B_m U_{lm} e^{jk\alpha_m x_3} \right] e^{jk(kx_1 - c_p t)} \quad (10)$$

$$\sigma_l = \left[\sum_{m=1}^6 M_{lm} B_m e^{jk\alpha_m x_3} \right] (jk) e^{jk(kx_1 - c_p t)} \quad (11)$$

为了方便计算和表示, 令:

$$\mathbf{P}^{(n)} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \sigma_3/jk \\ \sigma_4/jk \\ \sigma_5/jk \end{bmatrix}^{(n)} \quad \mathbf{B}^{(n)} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix}^{(n)} \quad (12)$$

$$\mathbf{D}^{(n)} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} & U_{15} & U_{16} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} & U_{25} & U_{26} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} & U_{35} & U_{36} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} & M_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{jk\alpha_1 x_3} \\ e^{jk\alpha_2 x_3} \\ e^{jk\alpha_3 x_3} \\ e^{jk\alpha_4 x_3} \\ e^{jk\alpha_5 x_3} \\ e^{jk\alpha_6 x_3} \end{bmatrix}^{(n)}$$

所有 N 层材料的应力自由边界条件和界面连续性条件如下:

$$\sigma_l^{(1)} = 0, \quad l = 3, 4, 5, \quad x_3 = 0$$

$$u_l^{(n)} = u_l^{(n-1)}, \quad l = 1, 2, 3, \quad x_3 = h^{(n-1)}, \quad n = 2, 3, \dots, N$$

$$\sigma_l^{(n)} = \sigma_l^{(n-1)}, \quad l = 3, 4, 5, \quad x_3 = h^{(n-1)}, \quad n = 2, 3, \dots, N$$

$$\sigma_I^{(N)} = 0, \quad I = 3, 4, 5, \quad x_3 = h^{(N)} \tag{13}$$

由以上条件可得到 Lamb 波传播特性满足的一个特征方程:

$$\begin{bmatrix} \sigma_I^{(1)} \\ \mathbf{P}^{(2)} - \mathbf{P}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{P}^{(n)} - \mathbf{P}^{(n-1)} \\ \vdots \\ \mathbf{P}^{(N)} - \mathbf{P}^{(N-1)} \\ \sigma_I^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{D}^{(1)}]_{4,5,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{D}^{(2)} & -\mathbf{D}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{D}^{(n)} & -\mathbf{D}^{(n-1)} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{D}^{(N)} & \mathbf{D}^{(N-1)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [\mathbf{D}^{(N)}]_{4,5,6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{(1)} \\ \mathbf{B}_{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{(n)} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{(N-1)} \\ \mathbf{B}_{(N)} \end{bmatrix} = 0 \tag{14}$$

式中: $[\]_{4,5,6}$ 为取公式的第 4、5、6 行进行计算。

式(14)的导波传播的特征方程简略表达为:

$$\mathbf{D} \times \mathbf{B} = 0 \tag{15}$$

式中: $\mathbf{D}$ 为 $6N \times 6N$ 的矩阵; $\mathbf{B}$ 为 $6N$ 的矢量。

本文所研究的碳纤维复合材料板为对称铺层结构,当给定材料参数确定系统的 Lamb 波的特征方程后,特征方程的行列式为零 ($|\mathbf{D}| = 0$) 的解对应频散曲线。利用解析方法求解 c_p 与 f_h 的关系式,求出 Lamb 波的频散曲线。把 (f_h, c_p) 代入特征方程,求解齐次线性方程组得到 $\mathbf{B}$ 的解,就可以得到每一层的波结构及相关声场的解。根据对称模式与反对称模式的在上下表面以及中间面的区别,对求得的 Lamb 波频散曲线进行区分可以分别获得层合板中的对称模式与反对称模式的频散曲线。

2 实验设置

本文所用样品为 T300/QY8911 碳纤维复合材料板,单层参数如表 1 所示。

表 1 单层 T300/QY8911 碳纤维复合材料参数
Table 1 Material properties of single-layer T300/QY8911 CFRP plate

名称	符号	数量
拉伸弹性模量/GPa	E_1	135
	E_2	8.80
	E_3	8.80
剪切弹性模量/GPa	G_{12}	4.47
	G_{13}	4.47
	G_{23}	3.45
泊松比	ν_{12}	0.30
	ν_{13}	0.30
	ν_{23}	0.34
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ	1 560

CFRP 板共 16 层,铺层顺序为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{2s}$,单层和整板的厚度分别为 0.125、2.0 mm,长度为 600 mm,宽度为 100 mm。根据 Wang 等^[24]提出的理论与实验验证可知,单向拉伸时沿不同纤维方向的应力系数在极坐标下关于原点对称。故为了验证本文提出方法的有效性,将分别沿着纤维 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 这 7 个方向切取单向拉伸试样,如图 3 所示,利用空气耦合超声应力测量系统进行应力系数标定和应力测量。

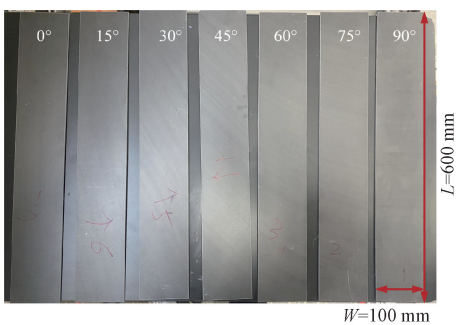


图 3 碳纤维复合材料板单向拉伸试样
Fig. 3 Unidirectional tensile test specimen of CFRP plate

2.1 空耦超声换能器中心频率选择

为了选择并确定空耦超声换能器的中心频率,需要获得单向拉伸试样的相速度频散曲线。根据第 2 节的方法,以沿着纤维 0° 方向的单向拉伸试样为例,得到其相速度频散曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出,给定一个频率,复合材料板内至少存在 3 种模式,且随着频率的增大,Lamb 波模式数量逐渐增多,信号分析难度也逐渐增大。为了声时提取的准确性,应保证信号的模式较为纯净(仅包含 A_0 、 S_0 和 S_1 模式),故空耦超声换能器的中心频率要小于 A_1 模式的截止频率 f_{A1} 。表 2 为 7 个沿不同纤维方向的截止频率 f_{A1} 。由于材料特性与制造工艺的限制,典型的平面空耦超声换能器产品的中心频率一般为 100、200、400、600 kHz 和 1 MHz。由于中心频率越大,信号能量衰减就越大。为了保证接收信号具有较好的信噪比,选择一对中心频率为 100 kHz 的空耦超声换能器。

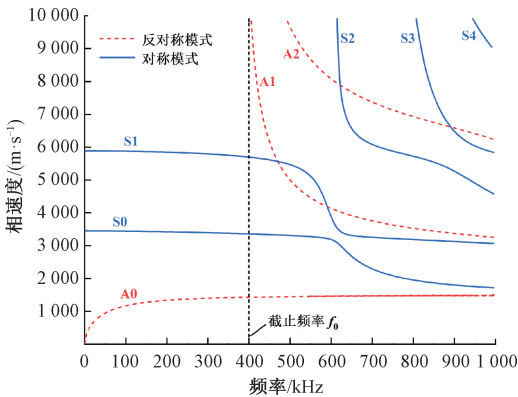


图 4 0°纤维方向碳纤维板相速度频散曲线

Fig. 4 Phase velocity dispersion curve of CFRP plate along 0° fiber direction

表 2 7 个沿不同纤维方向碳纤维板的截止频率 f_{A1}

Table 2 Cutoff frequency f_{A1} of CFRP plates along seven different fiber directions

方向/(°)	0	15	30	45	60	75	90
频率/kHz	404.8	407.6	410.2	410.2	406.3	400.7	396.8

以 0°纤维方向为例,100 kHz 下 A0、S0 和 S1 模式的波结构如图 5 所示。从图 5 中分析可知,A0 模式 Lamb 波的面外位移远远大于 S0 模式和 S1 模式,为了实现碳纤维复合材料的同侧原位非接触式的俯仰方式测量,A0 模式 Lamb 波更适合空气耦超声换能器接收泄漏兰姆波。

2.2 空耦超声换能器入射角确定

根据 Snell 定律,激励与接收 A0 模式的最佳入射角由 100 kHz 下的相速度通过式 (16) 确定。以沿着纤维 0° 方向的单向拉伸试样为例,绘制其最佳入射角频散曲线如图 6 所示。7 个沿纤维不同方向的 A0 模式在 100 kHz 下的相速度以及最佳入射角如表 3 所示。为了避免实验设置调整引入误差,7 组不同纤维方向的碳纤维板实验设置保持一致,根据表 3 将空耦超声换能器的入射角统一设置为 17.5°。

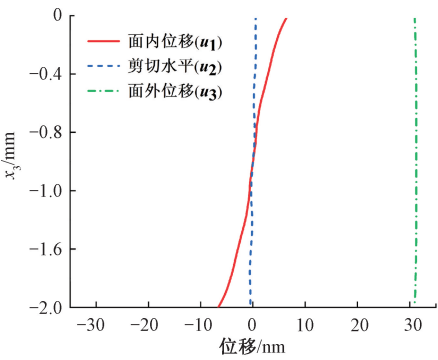
$$\theta = \arcsin(c_{\text{air}}/c_p) \tag{16}$$

式中: θ 为最佳入射角; c_{air} 为空气中的声速; c_p 为 Lamb 波的相速度。

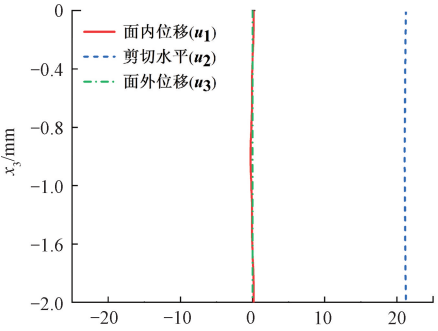
表 3 7 个沿不同纤维方向碳纤维板 A0 模式的最佳入射角

Table 3 Optimal incident angle of A0 mode of CFRP plates along seven different fiber direction (°)

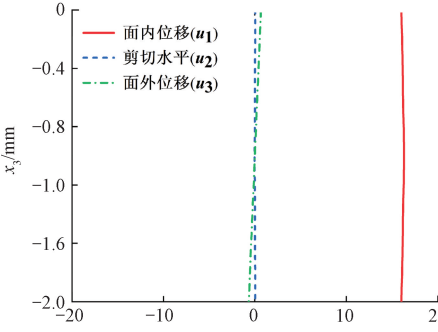
纤维方向	0	15	30	45	60	75	90
最佳入射角	16.8	16.9	17.0	17.5	17.8	17.8	18.3



(a) A0 模式



(b) S0 模式



(c) S1 模式

图 5 0°纤维方向碳纤维板模式波结构
Fig. 5 Modal wave structures of CFRP plate along 0° fiber direction

2.3 空耦超声应力测量系统

空气耦合超声应力测量系统如图 7 所示,包括力学试验机(WDW-200 G, HST, 中国)、任意信号发生器(AFG31022, Tektronix, 美国)、功率放大器(ATA-2041, Aigtek, 中国)、前置放大器(LNA-40-60-80-HF, Ciprian, 法国)、空耦超声换能器(AIR-100, Teclab, 中国)、高速采集设备和上位机。力学试验机输出特定的拉力,在拉伸试样中产生均匀的应力。任意信号发生器产生汉宁窗调制、中心频率为 100 kHz 的 5 周期正弦脉冲信号。功率放大器将激励信号电压放大至 200 V 峰峰值确保空耦

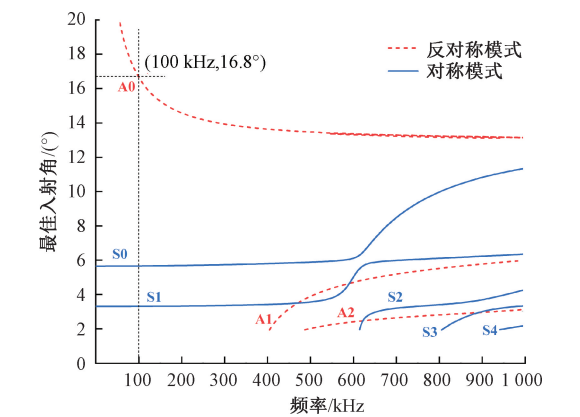


图 6 0°纤维方向碳纤维板最佳入射角频散曲线

Fig.6 Optimal incident angle dispersion curve of CFRP plate along 0° fiber direction

超声换能器激励出足够声能量的信号。接收信号通过前置放大器进行低噪声放大后,由上位机控制高速采集设备进行采集处理。

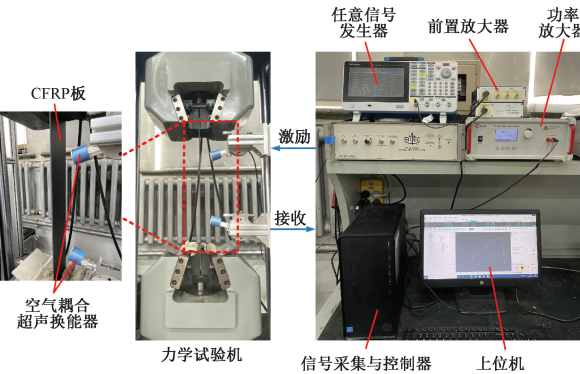


图 7 空耦超声应力测量系统

Fig. 7 The diagram of air-coupled ultrasonic stress measurement system

3 实验结果与分析

在对单向拉伸试样进行应力系数标定之前,需要按照 GB/T 25712 所述方法,对试样进行振动去应力处理,近似得到零应力试样。单向拉伸试样的空耦超声应力系数标定示意图如图 8 所示。

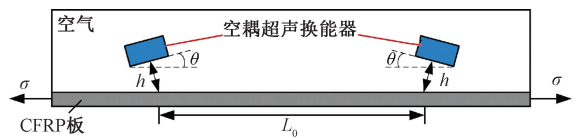


图 8 空耦超声应力系数标定示意图

Fig. 8 The diagram of air-coupled ultrasonic stress coefficient calibration

为了消除直达波对 Lamb 波信号的影响,结合实际实验情况考虑,选取 $h = 50\text{ mm}$, $L_0 = 150\text{ mm}$ 。按照 GB/T 3354-2014 规定的方法,在常温环境 $22\pm2^\circ\text{C}$ 下,对零应力试样进行拉伸试验,实现对长度为 L_0 的标定区域进行应力系数标定,实验条件相关设置如表 4 所示。

表 4 实验条件相关设置				
Table 4 Experimental conditions related settings				
激励信号类型	V_{pp}	放大倍数	h	L_0
汉宁窗调制的 5 周期正弦脉冲	200 V	1 000 倍	50 mm	150 mm

在 0~100 MPa 内以 10 MPa 为步进,以零应力试样的信号作为参考信号,记录接收信号的声时差 T 和力学试验机输出的拉应力 σ 。每个应力下进行 10 次重复性实验,得到拉伸应力值与声时差的坐标图。对数据进行线性拟合,得到的直线斜率的倒数即为标定区域 L_0 对应的应力系数。图 9 为 0°纤维方向 CFRP 板应力系数标定时从不同应力下的空耦超声 Lamb 波接收回波信号。从图 9(a)可以看出,采用上述实验设置有效地激励出较为纯净的 A0 模式 Lamb 波。从图 9(b)可以看出,随着应力的变化,波形存在声时差的变化。

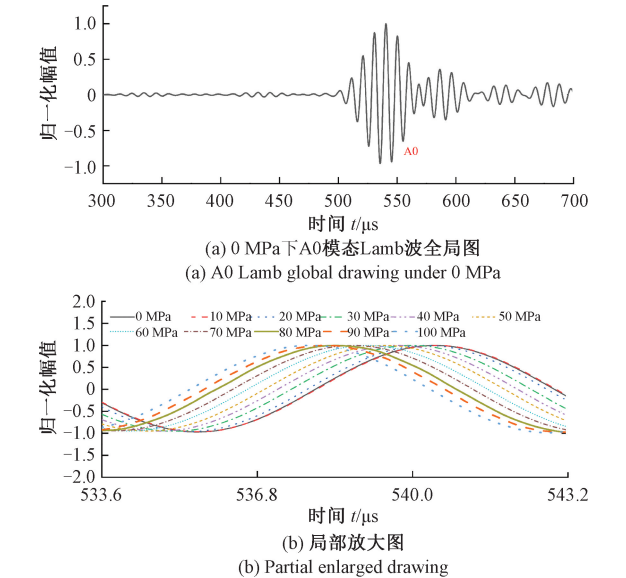
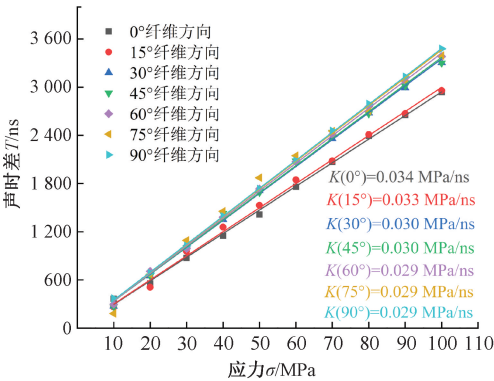


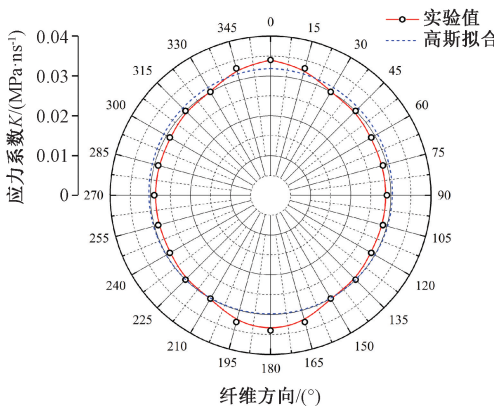
图 9 不同应力下空耦超声 Lamb 波接收回波

Fig. 9 The received signal of air-coupled ultrasonic Lamb waves under different stresses

如图 10 所示,7 个不同纤维方向的应力系数标定结果的拟合线性度较好,线性拟合相关系数 R 均大于 0.98,表明了应力系数标定的正确性。对于 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 循环铺层的碳纤维复合材料板来说,沿不同纤维方向的应力系数相差不大,可以近似认为是同向同性。



(a) 应力系数标定结果
(a) A0 Lamb global drawing



(b) 应力系数拟合趋势
(b) A0 Lamb global drawing

图 10 应力系数标定结果及拟合趋势

Fig. 10 Stress coefficient calibration results and fitting trends

采用应力系数标定结果,通过对零应力试件进行单轴拉伸试验获取声时差实现应力测量,测量结果如图 11 与表 5 所示。为了提高实验结果的可信度,每个应力下进行 10 次重复性实验。从实验结果可以计算得出,在 0~100 MPa 范围内测量误差小于 ± 8.1 MPa,测量重复性为 7.5 MPa。测量误差的主要来源包括力学试验机的稳定性、环境因素(温度、湿度,尤其是空气波动)和电磁噪声干扰。这些也是未来进一步提高空气耦合超声应力测量精度的研究方向。

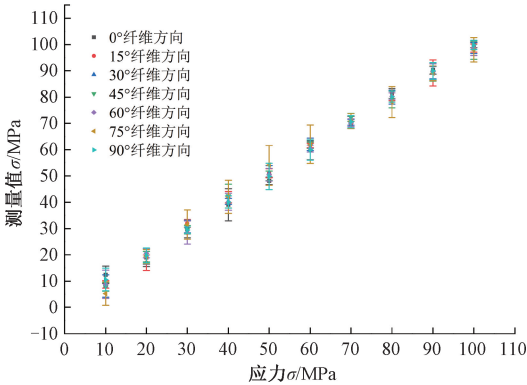


图 11 不同纤维方向 CFRP 板应力测量结果

Fig. 11 Stress measurement results of CFRP plates with different fiber directions

表 5 7 个不同纤维方向的应力测量结果

Table 5 Stress measurement results with seven different fiber directions

MPa

应力	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
	ME(TSD)	ME(TSD)	ME(TSD)	ME(TSD)	ME(TSD)	ME(TSD)	ME(TSD)
10	2.41(3.24)	-3.26(1.44)	-1.87(4.26)	-3.16(1.74)	-4.21(5.35)	-8.11(4.52)	0.59(4.29)
20	-3.08(3.42)	-5.03(2.95)	-1.57(3.07)	-2.74(2.23)	2.60(1.81)	-0.72(2.72)	-0.25(2.82)
30	-2.22(3.27)	3.94(1.50)	0.84(2.38)	-0.43(1.55)	-1.56(4.41)	1.50(5.49)	-0.56(1.20)
40	-7.95(6.18)	2.97(0.73)	2.37(1.11)	4.37(4.55)	2.13(3.25)	2.05(6.32)	0.07(2.36)
50	-1.85(1.44)	5.03(2.20)	1.98(2.91)	1.05(1.80)	0.44(2.37)	4.07(7.54)	-0.20(4.97)
60	-5.22(3.60)	1.62(0.90)	5.04(2.42)	2.66(1.21)	5.43(1.33)	2.00(7.31)	-0.09(3.87)
70	1.35(2.31)	-1.52(1.26)	0.37(1.06)	3.24(1.55)	4.23(1.49)	0.86(2.85)	0.59(2.25)
80	3.41(1.83)	0.41(1.81)	-0.62(2.67)	-2.86(3.19)	0.30(1.34)	-1.93(5.92)	0.19(2.11)
90	1.26(1.59)	-2.83(4.96)	-1.75(2.31)	-1.59(3.34)	-3.41(3.08)	-0.95(2.84)	-0.08(3.25)
100	-2.14(1.05)	-1.34(1.59)	-2.37(2.10)	-3.15(3.47)	-6.29(2.93)	-2.01(4.62)	-0.13(1.75)

注:ME(measurement error); TSD(triple standard deviation)

4 结 论

对各向异性碳纤维复合材料板的应力状态及时进行快速、精确的测量,对于实现其应用领域的健康监测和评价具有重要的指导意义。为解决工程实际中大部件复合材料板高效、原位应力测量,本文提出了空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法。为了验证所提方法的有效性,针对本文所使用的铺层顺序为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{2s}$ 的 16 层碳纤维复合材料板,分别获得了 7 个不同纤维方向的单向拉伸试样。采用部分波法与传递矩阵法获得沿不同纤维方向 CFRP 板的相速度频散曲线。以 A1 模态截止频率为参考,确定空耦超声换能器的中心频率为 100 kHz 以获得模态较为纯净的 A0 模态 Lamb 波,实现空耦超声同侧原位应力测量并保证声时提取的准确性。根据 Snell 定律获得了不同纤维方向 CFRP 板在 100 kHz 下的最佳入射角频散曲线。为了避免实验设置调整引入误差,将 7 组不同纤维方向的碳纤维板实验设置保持一致,确定了空耦超声换能器的入射角为 17.5° 。通过应力系数标定实验发现,沿不同纤维方向的应力系数相差不大,可以近似认为是同向同性。采用 7 个沿不同纤维方向的应力系数标定结果,通过对零应力试件进行单轴拉伸试验获取声时差实现应力测量。实验结果表明,在 0~100 MPa 范围内测量误差小于 ± 8.1 MPa,测量重复性为 7.5 MPa。本文提出的基于 Lamb 波的空耦超声应力测量方法在测量精度和测量重复性等方面具有显著优势,可为大部件 CFRP 板的原位应力测量提供一种先进可行的技术。

参考文献

- [1] GEIER N, DAVIM J P, SZALAVY T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125: 105552.
- [2] 邢丽英,冯志海,包建文. 碳纤维及树脂基复合材料产业发展面临的机遇与挑战[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2700-2706.
XING L Y, FENG ZH H, BAO J W. Opportunities and challenges faced by the development of carbon fiber and resin-based composite material industry [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37 (11): 2700-2706.
- [3] JIAO F, LI Y X, NIU Y. A review on the drilling of CFRP/Ti stacks: Machining characteristics, damage mechanisms and suppression strategies at stack interface[J]. Composite Structures, 2022, 305: 116489.
- [4] KUPSKI J, FREITAS S T D. Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures [J]. Composite Structures, 2021, 268: 113923.
- [5] SHIMODA M, UMEMURA M, ALI M A, et al. Shape and topology optimization method for fiber placement design of CFRP plate and shell structures[J]. Composite Structures, 2023, 309: 116729.
- [6] 王丹宏,叶波,段启明. 基于 Lamb 波能量和飞行时间的碳纤维复合材料疲劳损伤成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 205-213.
WANG D H, YE B, DUAN Q M. Fatigue damage imaging of carbon fiber composite materials based on Lamb wave energy and flight time [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 205-213.
- [7] BABAEIAN M, MOHAMMADIMEHR M. Investigation of the time elapsed effect on residual stress measurement in a composite plate by DIC method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 128: 106002.
- [8] TINKLOH S, WU T, TROSTER T. A micromechanical-based finite element simulation of process-induced residual stresses in metal-CFRP-hybrid structures [J]. Composite Structures, 2020, 238: 111926.
- [9] NAUMAN S, ASFAR Z, AHMED S, et al. On the in-situ on-line structural health monitoring of composites using screen-printed sensors [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2023, 36 (1): 234-252.
- [10] 安志武,胡中韬,廉国选. 固体介质中超声应力场的定量测量[J]. 应用声学, 2018, 37(1): 83-87.
AN ZH W, HU ZH T, LIAN G X. Quantitative measurement of the ultrasonic stress field in solid media[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(1): 83-87.
- [11] 沈意平,刘缘,王钢,等. 基于 Lamb 波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料传感器制备及应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 19-25.
SHEN Y P, LIU Y, WANG G, et al. Preparation and application of piezoelectric ceramic/epoxy resin composite sensor based on Lamb wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 19-25.
- [12] SAFIKHANLU H, ALIMIRZAEI S, NAJAFABADI M A. Behavior of critically refracted longitudinal and lamb waves with stress variations in Al 1050 sample [J]. Modares Mechanical Engineering, 2020, 20 (5):

- 1223-1234.
- [13] ALGHALANDIS B M, NAEINI H S, SOORGEE M H. Numerical modeling of local residual stress detection in thin plates using the fundamental antisymmetric mode of ultrasonic Lamb waves[J]. *NDT Technology*, 2021(2): 70-78.
- [14] LIM H J, SOHN H. Online stress monitoring technique based on lamb-wave measurements and a convolutional neural network under static and dynamic loadings[J]. *Experimental Mechanics*, 2020, 60: 171-179.
- [15] 何星亮, 陈平. 基于高频柱面超声导波的螺栓轴向应力测量[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 179-186.
- HE X L, CHEN P. Bolt axial stress measurement based on high-frequency cylindrical ultrasonic guided wave[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 179-186.
- [16] 王宝定, 吴俊伟, 廖为圣. 玻璃钢缺陷的空耦激光超声检测[J]. *无损检测*, 2022, 44(6): 26-31.
- WANG B D, WU J W, LIAO W SH. Air-coupled laser ultrasonic testing of fiberglass defects[J]. *Nondestructive Testing*, 2022, 44(6): 26-31.
- [17] 张斌, 何梅洪, 杨涛. 复合材料空气耦合超声检测技术[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2015, 262(12): 94-98.
- ZHANG B, HE M H, YANG T. Air-coupled ultrasonic testing technology for composite materials[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2015, 262(12): 94-98.
- [18] ZHANG C C, ZHANG Y H, LIU D Z, et al. A novel two-level approach to defect detection in braided CFRP using air-coupled ultrasonic testing[J]. *Ultrasonics*, 2023, 128: 106884.
- [19] ZHANG H, LI S J, WANG J J, et al. Air-coupled capacitive micromachined transducer array for non-contact Lamb wave detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 355: 114315.
- [20] 宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- SONG W T. Research on ultrasonic non-destructive testing and control technology for residual stress[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [21] 王伟. 复合材料结构的超声应力无损检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WANG W. Research on ultrasonic stress non-destructive testing technology for composite material structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [22] ZHU Z H, POST M A, MEGUID S A. The potential of ultrasonic non-destructive measurement of residual stresses by modal frequency spacing using leaky lamb waves[J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52: 1329-1339.
- [23] GANDHI N, MICHAELS J E, LEE S J. Acoustoelastic Lamb wave propagation in biaxially stressed plates[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(3): 1284-1293.
- [24] WANG W, ZHANG Y M, ZHOU Y F, et al. Plane stress measurement of orthotropic materials using critically refracted longitudinal waves[J]. *Ultrasonics*, 2019, 94: 403-437.

作者简介



王丙泉, 2019 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2021 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现于哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所博士研究生, 主要研究方向为高性能空耦超声换能器的研制及其在高端装备微缺陷与应力场的测量应用。

E-mail: 21B901023@stu.hit.edu.cn

Wang Bingquan received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2019, and M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2021. He is currently a Ph.D. candidate at Harbin Institute of Technology. His main research interests include the development of high-performance air-coupled ultrasonic transducers and their application in the measurement of micro-defects and stress fields in high-end equipment.



赵勃(通信作者), 2004 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2006 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2011 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授, 主要研究方向为压电驱动技术与精密测量与仪器技术。

E-mail: hitzhaobo@hit.edu.cn

Zhao Bo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2004, M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2006, and Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2011. He is currently a professor at Harbin Institute of Technology. His main research interests include piezoelectric drive technology, and precision measurement and instrument technology.