

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.257

# 基于 $S_0$ 波的正交铺层复合材料板 拉伸弹性模量的测量方法

王云林<sup>1a</sup>, 刘瑶璐<sup>1a,1b</sup>, 胡宁<sup>1a,2</sup>

(1. 重庆大学 a. 航空航天学院; b. 非均质材料力学重庆市重点实验室, 重庆 400044;  
2. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300401)

**摘要:**提出了一种基于兰姆波的正交铺层复合材料板弹性模量测量方法。正交铺设层合板相当于具有 9 个独立弹性常数的单层正交各向异性板。研究了正交各向异性板中  $S_0$  模态兰姆波 ( $S_0$  波) 群速度对 9 个工程弹性常数的敏感性。研究发现, 在低频率厚度积下,  $S_0$  波的群速度仅与正交各向异性板的拉伸弹性模量和面内泊松比有关。通过分析正交铺设层合板等效工程弹性常数的变化范围, 发现正交铺设层合板的面内泊松比变化很小, 足以忽略其对  $S_0$  波群速度的影响。因此, 可以用  $S_0$  波的群速度来估计正交铺层复合材料板的拉伸弹性模量, 并建立了  $S_0$  波群速度与拉伸弹性模量的映射关系。该方法已在碳纤维增强正交铺设层合板上进行了数值模拟和实验验证。数值模拟和传统的静态拉伸实验验证了该方法的有效性。结果表明, 该方法得到的复合材料板拉伸弹性模量与实际值的误差小于 10%, 为航空航天等工业领域相关结构参数的测量提供了方便。

**关键词:**正交铺层复合材料板; 兰姆波; 群速度; 拉伸弹性模量

中图分类号: TB553 文献标志码: A 文章编号: 1000-582X(2024)02-084-11

## A method for measuring the tensile elastic modulus of cross-ply composite plates based on $S_0$ Lamb waves

WANG Yunlin<sup>1a</sup>, LIU Yaolu<sup>1a,1b</sup>, HU Ning<sup>1a,2</sup>

(1a. College of Aerospace Engineering; 1b. Chongqing Key Laboratory of Heterogeneous Material Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

收稿日期: 2023-02-10 网络出版日期: 2023-06-19

**基金项目:**国家自然科学基金项目(12227801, U1864208); 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1443); 深空探测省部共建协同创新中心开放课题(SKTC202108); 国家科技重大专项项目(2017-VII-0011-0106); 河北省自然科学基金创新群体研究项目(A2020202002); 天津市自然科学基金重点项目(S20ZDF077); 新疆兵团区域创新引导计划(2022BB004)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (12227801, U1864208), Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2022NSCQ-MSX1443), the Open Project from Collaborative Innovation Center for Deep Space Exploration Co-constructed by Province and Ministry (SKTC202108), National Science and Technology Major Project (2017-VII-0011-0106), the Fund for Innovative Research Groups of Natural Science Foundation of Hebei Province (A2020202002), the Key Project of Natural Science Foundation of Tianjin (S20ZDF077), and Xinjiang Production and Construction Corps Regional Innovation Guidance Program (2022BB004).

**作者简介:**王云林(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事超声无损检测方法的研究, (E-mail) wangyunlin@cqu.edu.cn。

**通信作者:**刘瑶璐, 女, 副教授, 工学博士, 硕士研究生导师, (E-mail) liuyaolu@cqu.edu.cn。

**Abstract:** This paper introduces a method for measuring the elastic modulus of cross-ply composite plates based on Lamb waves. Cross-ply composite plates are equivalent to a single-layer orthotropic plate with 9 independent elastic constants. The sensitivity of the group velocity of  $S_0$  Lamb waves to elastic constants is studied. It is observed that the group velocity of  $S_0$  Lamb waves is only related to the tensile elastic modulus and the in-plane Poisson's ratio of the orthotropic plate at the low-dispersive frequency-thickness products range. By analyzing the change ranges of equivalent engineering elastic constants for cross-ply composite plates, it is discovered that the change in the in-plane Poisson's ratio of cross-ply composite plates is small enough to ignore its effect on the group velocity of  $S_0$  Lamb waves. Therefore, the group velocity of  $S_0$  Lamb waves can be used to estimate the tensile elastic modulus of the cross-ply composite plates, and a mapping relationship between the group velocity of  $S_0$  Lamb waves and the tensile elastic modulus can be established. The method has been verified by numerical simulation and experiment, and the error between the tensile modulus and the actual value of the composite plate obtained by this method is less than 10%. This provides convenience for the measurement of relevant structural parameters in aerospace and other industrial fields.

**Keywords:** cross-ply composite plate; Lamb waves; group velocity; tensile elastic modulus measurement

纤维增强复合材料具有比强度高、耐疲劳、耐高温、耐腐蚀等优点,因此被广泛应用于航空航天<sup>[1-3]</sup>领域。材料力学性能的测量对各种复杂载荷条件下结构的仿真建模、力学行为和可靠性评估具有重要意义。而弹性模量作为力学性能测量和评价的基础,如何快速、准确地测量弹性模量就成为了工业上的热点和难点问题。传统的弹性模量测量方法主要有静态拉伸法和动态拉伸法<sup>[4]</sup>。这些方法或复杂费时或对材料损伤大、重复使用率低,不适用于价格昂贵的材料和已经成型的材料。因此展开对材料力学性能的无损检测和评价至关重要。

在各种无损检测方法中,超声波检测技术具有高灵敏度、可重复性、非侵入性和无污染性等优点,因此逐渐成为国内外研究的重点。使用超声波测量材料力学性能的方法主要分为体波法和导波法,White<sup>[5]</sup>在1963年通过建立模型描述了纵波在固体材料中的传播,文献[6-8]根据固体中体波波速与材料弹性模量、泊松比和密度的关系,通过对声速的测量计算出材料的弹性模量。当超声波波长与试样厚度为相同数量级时,超声波在固体中以导波的形式传播,陈倩栎等<sup>[9]</sup>利用超声导波法检测了Ni,Cu,Ag,Au等薄膜涂层的弹性模量。Spicer等<sup>[10]</sup>通过有限元模拟得到兰姆波在板中的传播速度,并对比超声实验结果,通过调整参数反演得到近似弹性模量。Cao等<sup>[11]</sup>提出了一种基于改进粒子群优化算法的板厚和弹性常数反演方法,基于该算法可以从测量的零阶模态兰姆波相速度频散曲线中准确获得板的杨氏模量、泊松比和厚度,并在各向同性材料铝板中得到了验证。Eremin等<sup>[12]</sup>基于遗传算法程序建立了 $S_0$ 波和 $A_0$ 波的群速度与复合材料的5个弹性模量之间的关系,并成功测试了单向和交叉铺层碳纤维增强塑料板。

尽管目前取得了许多进展,但采用这些方法测量材料的力学性能仍有许多不足,或需要人工繁琐地调节参数,或需要复杂的数据支持,如多传播路径、多模态、多频率等信息,在操作中存在困难。由于在实际的工程应用中,相较于剪切模量,材料拉伸模量的测量仍为主要需求,例如文献[13-15]在研究三维机织复合材料和橡胶复合材料在结构中的受力分析时,大量考虑材料受外部拉伸力的变形和破坏,以及王正等<sup>[16]</sup>和赵剑等<sup>[17]</sup>在研究定向刨花板和蜂窝结构时,发现材料的拉伸性能通常比剪切性能更容易测量和控制。因此笔者提出了一种基于兰姆波的测量正交铺层复合材料板等效拉伸弹性模量的简单方法,首先,分析兰姆波传播对正交各向异性板中9个独立弹性常数的敏感性,确定 $S_0$ 波在正交铺层复合材料板内的传播群速度主要与拉伸弹性模量和面内泊松比相关。然后,根据经典层合板理论计算了正交铺层复合材料板各面内弹性常数变化范围,排除面内泊松比影响后,建立了拉伸弹性模量与 $S_0$ 波群速度和频厚积之间的映射关系。最后,在数值模拟的基础上进行超声实验和拉伸试验,并对结果进行了讨论。

# 1 理论

## 1.1 基于层合板理论的等效模量计算

单层板在宏观上属于横向各向同性或正交各向异性体。根据线弹性理论,单层板的应力-应变关系为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于层合板是由单层板按一定的顺序和角度叠合而成,需要将每个铺层的坐标系转换到整体坐标系中,通过坐标转换,可以得到偏轴刚度矩阵表达式为

$$[\bar{Q}] = T^T Q T, \quad (2)$$

式中:

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$m = \cos \theta, \quad n = \sin \theta. \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为铺层角度。根据经典层合板理论,整理得到层合板内应力-应变关系:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中拉伸刚度矩阵元素:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}); \quad (6)$$

耦合刚度矩阵元素:

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2); \quad (7)$$

弯曲刚度矩阵元素:

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (8)$$

以处于单轴向载荷作用下的对称层合板为例,式(5)前两项为:

$$N_x = A_{11} \varepsilon_x^0 + A_{12} \varepsilon_y^0, \quad (9)$$

$$0 = A_{12} \varepsilon_x^0 + A_{22} \varepsilon_y^0. \quad (10)$$

解得:

$$N_x = \frac{(A_{11} A_{12} - A_{12}^2)}{A_{22}} \varepsilon_x^0. \quad (11)$$

令层合板厚度为  $h$ , 则该层合板沿  $x$  轴的面内拉伸弹性模量为

$$E_{xx} = \frac{(A_{11} A_{12} - A_{12}^2)}{h A_{22}}; \quad (12)$$

面内剪切弹性模量:

$$G_{xy} = \frac{A_{66}}{h}; \quad (13)$$

面内泊松比:

$$\nu_{xy} = -\frac{A_{12}}{A_{22}}. \quad (14)$$

## 1.2 正交各向异性单层板的弹性参数对 $S_0$ 波频散曲线的影响

正交铺层压板的铺层角度为 $0^\circ$ 或 $90^\circ$ ,由于其每一层都表现为特殊的正交各向异性单层板,因此,正交铺层压板整体可等效为同厚度的正交各向异性单层板,如图1所示,该单层板的弹性参数即为正交铺层压板的等效弹性参数。由于兰姆波的波长与板厚处于同一数量级,兰姆波在复合材料层合板中的传播可等效为在对应的等效均质单层板中的传播。因此,通过研究正交各向异性单层板的9个工程弹性常数对 $S_0$ 波频散曲线的影响,探究利用 $S_0$ 波测量正交铺层压板的有效面内拉伸弹性模量的方法。

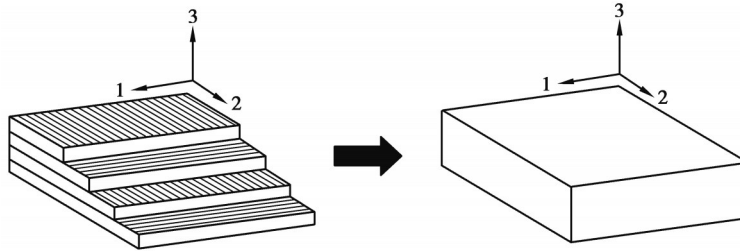


图1 正交铺层压板和等效均质正交各向异性单层板

Fig. 1 Orthogonal laminates and equivalent monolayers

以密度 $1500\text{ kg/m}^3$ 、厚度 $1\text{ mm}$ 的正交各向异性复合板为例,材料属性如表1所示。依次改变其中1个弹性参数,考察该弹性常数对 $S_0$ 波频散曲线的影响。将单层板的工程弹性常数变化设定在正交各向异性复合材料的实际变化范围,如 $E_1$ 和 $E_2$ 从 $40\text{ GPa}$ 变化到 $120\text{ GPa}$ , $\nu_{13}$ 和 $\nu_{23}$ 从 $0.1$ 到 $0.5$ <sup>[18]</sup>, $\nu_{12}$ 从 $0.01$ 到 $0.7$ <sup>[19]</sup>。利用伦敦帝国理工学院NDT实验室开发的频散曲线计算软件DISPERSE,得到了 $S_0$ 波沿单层板主方向1传播时其群速度频散曲线对拉伸弹性模量、剪切弹性模量和泊松比的敏感性,分别如图2所示。

表1 单层复合板材料属性

Table 1 Material properties of composite monolayer plates

拉伸模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$E_1=80$	$G_{12}=8$	$\nu_{12}=0.1$	$\rho=1500$
$E_2=80$	$G_{13}=4$	$\nu_{13}=0.4$	
$E_3=10$	$G_{23}=4$	$\nu_{23}=0.4$	

从图2中观察到,当频厚积处于较低范围时( $0\sim 0.8\text{ MHz}\cdot\text{mm}$ ), $S_0$ 波的群速度仅与拉伸弹性模量 $E_1$ 和面内泊松比 $\nu_{12}$ 相关,弹性常数 $E_3$ 只影响 $S_0$ 波的频散范围。由于材料的正交各向异性的特性,可知在相同的频厚积范围, $S_0$ 波沿单层板主方向2传播时,其群速度仅与拉伸弹性模量 $E_2$ 和面内泊松比 $\nu_{12}$ 有关。

对于正交铺层合板 $[0_a/90_b]_c$  ( $a, b, c>0$ ),考虑到不同的基体材料和纤维种类,其单层结构的材料参数变化范围大致如表2所示。将9个工程弹性常数均设为随机变量,基于层合板理论计算了 $10^5$ 次正交铺层合板的等效工程弹性常数,获取各面内等效工程弹性常数的变化范围,如表3所示。表3显示正交铺层合板的面内泊松比 $\nu_{12}$ 的变化范围小于一般铺层合板,约为 $0.01\sim 0.3$ 。特别是,研究发现当 $a=b$ 时,均衡正交铺层合板的 $\nu_{12}$ 甚至小于 $0.1$ 。于是,接下来研究正交铺层合板中 $S_0$ 波群速度受面内泊松比 $\nu_{12}$ 的影响。如图3(a)所示,以 $0.5\text{ MHz}\cdot\text{mm}$ 频厚积时情况为例,固定 $E_1$ 而改变 $\nu_{12}$ ,泊松比 $\nu_{12}$ 从 $0.01$ 变化到 $0.3$ 所引起的 $S_0$ 波群速度的增加不超过 $283\text{ m/s}$ 。若取 $\nu_{12}=0.1$ 时的群速度为参考值, $\nu_{12}$ 在变化范围内引起的群速度变化小于 $4.6\%$ ,如图3(b)所示。因此,对于正交铺层合板,面内泊松比 $\nu_{12}$ 对 $S_0$ 波群速度的影响可以忽略不计。

根据前文分析,发现可以用 $S_0$ 波来预测正交铺层复合材料板的等效弹性模量,需要建立 $S_0$ 波的群速度与板的等效弹性模量之间的映射关系。图4(a)给出了固定频厚积下正交各向异性板的拉伸弹性模量与 $S_0$ 波群速度的关系。为了减少误差,将平面内泊松比 $\nu_{12}$ 设为 $0.1$ 。可以看出,拉伸弹性模量与 $S_0$ 波群

速度几乎呈线性关系,频厚积对 $S_0$ 波群速度影响不大,这是由于 $S_0$ 波在低频厚积范围内(0~0.8 MHz·mm)频散性较低。图4(b)进一步给出了 $S_0$ 波群速度在低频厚积域(0~0.8 MHz·mm)与拉伸弹性模量的映射关系。因此,一旦测量了正交铺层复合材料板沿主方向传播的 $S_0$ 波群速度,就可以得到复合材料板的拉伸弹性模量。

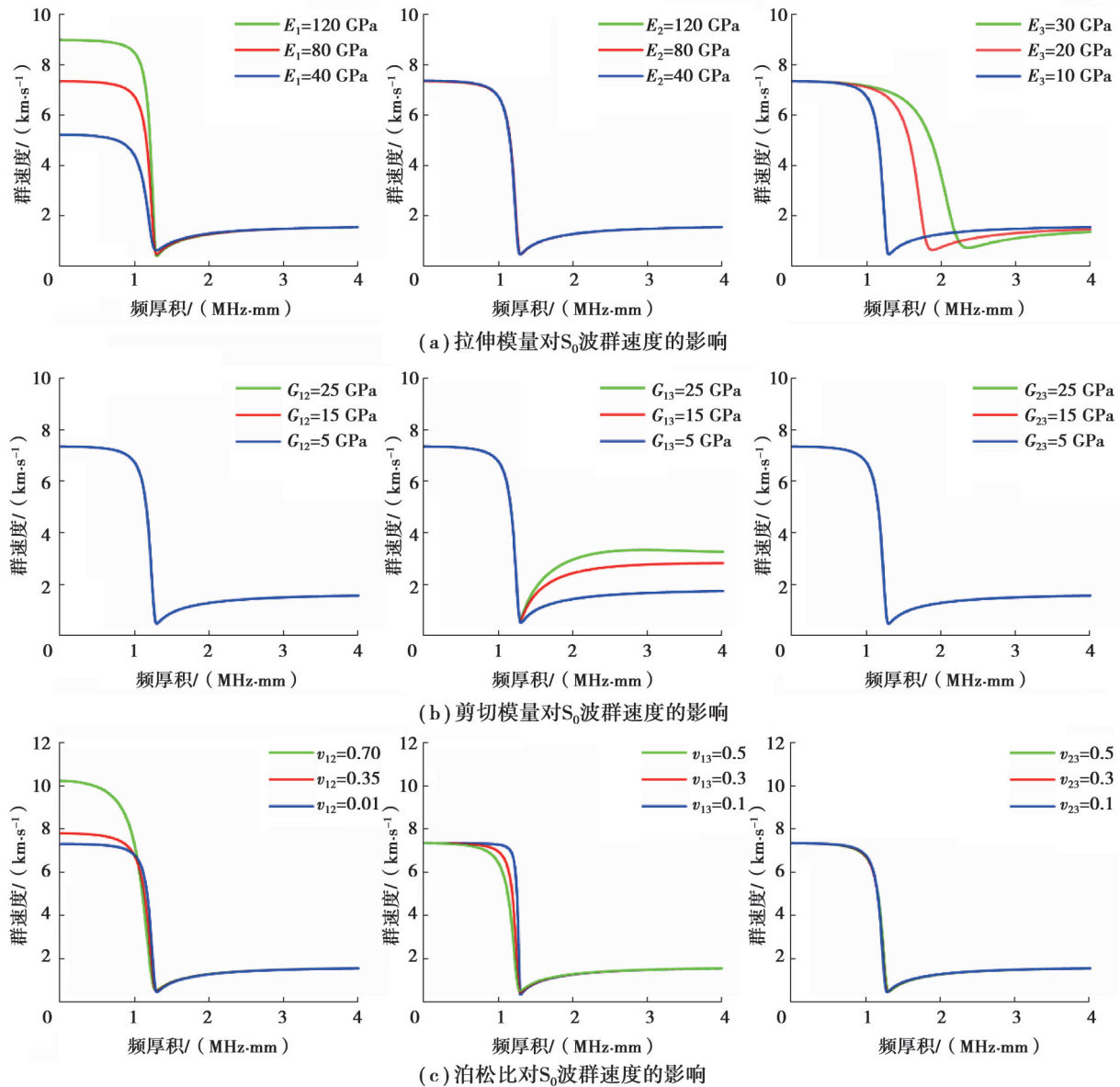


图2 单层板的工程弹性常数对 $S_0$ 波群速度的影响

Fig. 2 The effect of engineering constants of a single plate on the group velocity of  $S_0$  Lamb wave

表2 单层结构的材料参数变化范围

Table 2 Variation range of material parameters of single layer structure

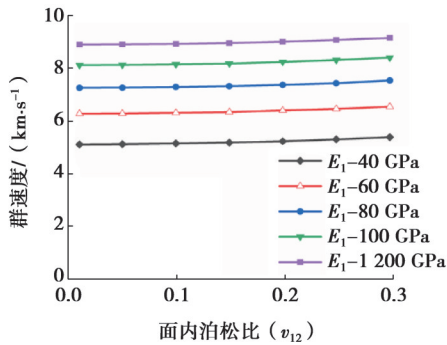
拉伸模量/GPa			剪切模量/GPa			泊松比		
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
(30, 150)	(2, 20)	(2, 20)	(2, 20)	(2, 20)	(1, 10)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)



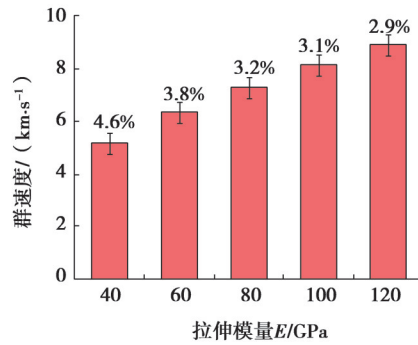
表 3 正交铺设层合板面内等效工程弹性常数变化范围

Table 3 Variation range of equivalent engineering elastic constants in orthogonal laid laminates

面内等效拉伸模量/GPa		面内等效剪切模量/GPa	泊松比
$E_1$	$E_2$	$G_{12}$	$\nu_{12}$
(22.02, 146.71)	(3.33, 79.05)	(2.4, 19.3)	(0.03, 0.348)



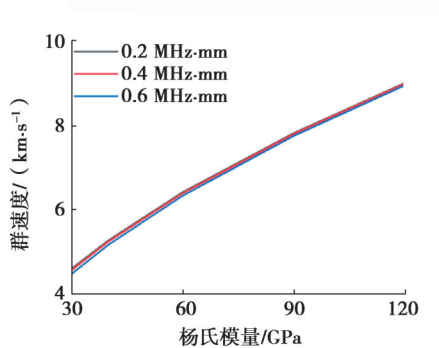
(a) 面内泊松比对  $S_0$  群速度的影响



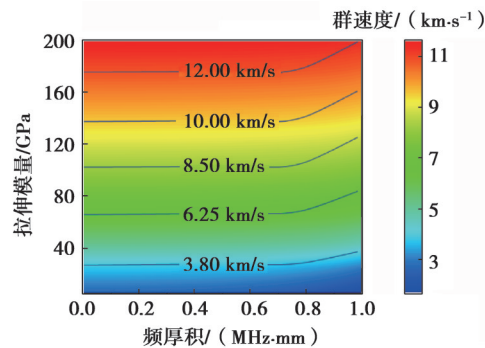
(a) 面内泊松比改变造成的群速度误差

图 3 泊松比  $\nu_{12}$  对  $S_0$  波群速度影响性分析

Fig. 3 The effect of Poisson ratio  $\nu_{12}$  on the velocity of  $S_0$  Lamb wave group



(a) 不同频厚积下拉伸模量与群速度的关系



(b) 拉伸模量、频厚积和  $S_0$  群速度关系云图

图 4 映射关系云图的建立

Fig. 4 The establishment of mapping relationship cloud map

最后,需要注意的是这种映射关系与板的密度有关。这是因为材料密度影响兰姆波的速度。因此,一旦密度发生变化,映射关系也会被修改。

## 2 数值模拟和实验验证

### 2.1 数值模拟

图 5 为本研究所用的复合材料板模型。其几何尺寸设置为  $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$ ,铺层顺序为  $[0/90]_{2s}$ ,层数共计 8 层。单层复合材料属性如表 1 所示,材料密度为  $1\ 500\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

在激励点处施加沿 3 方向的位移边界条件作为激励信号,信号函数为 5 周正弦加窗信号,如图 6 所示。沿测量方向 1 设置 8 个接收点,每个间隔 5 cm,接收 3 方向的位移信号并计算群速度,激励频率设置为 0.1 MHz。此外,为了消除反射波的影响,板的有限元模型在边缘处采用了无限单元,根据要求,除无限单元外的网格尺寸应小于波长的 1/10,因此将网格尺寸设置为 1 mm,共计 2 880 000,并采用动态显示算法进行仿真计算。

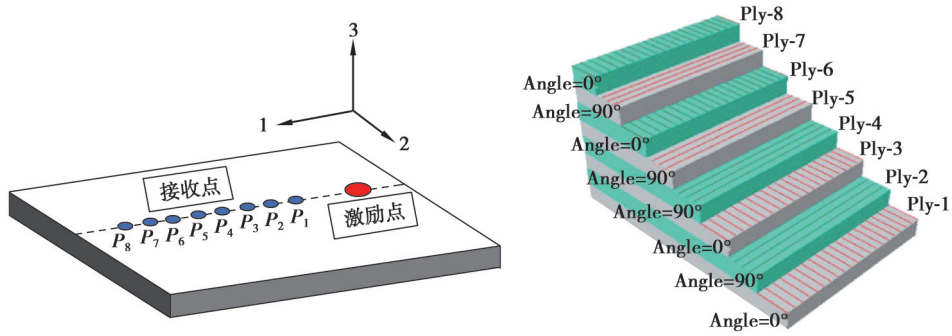


图 5 复合板三维有限元模型

Fig. 5 FEM model of three dimensional composite plate

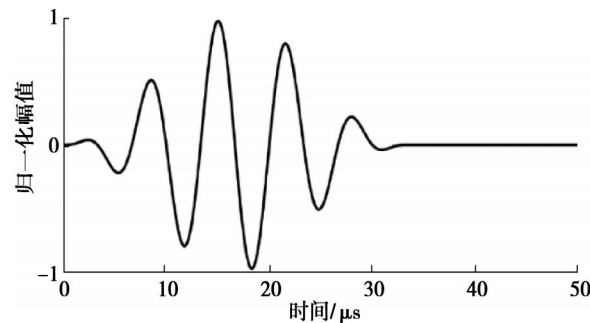


图 6 5 周期加窗激励信号

Fig. 6 Five cycles excitation signal

以  $P_1$  和  $P_6$  接收点的信号图为例,如图 7 所示,可以看到由于  $S_0$  波群速度要比  $A_0$  波群速度快得多,两者在传播过程中呈逐渐分离的趋势。包络的群速度表示其能量传递速度,因此通过 Hilbert 变换得到  $S_0$  波包峰值到达 2 个测量点的时间点  $t_1$  和  $t_6$ ,就能计算出  $S_0$  波从  $P_1$  点到  $P_6$  点的平均群速度,根据各测量点数据最终可以计算出  $S_0$  波在此测量方向上传播的平均群速度。根据第 1 节的内容,预测该正交铺设层合板模型在 1 方向上的等效拉伸模量为 77.6 GPa,与理论等效拉伸模量进行比较,如表 4 所示。数值模拟结果表明了该方法的正确性和实验方案的可行性。

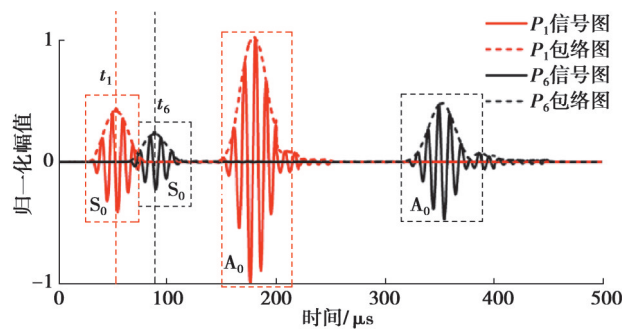


图 7 1 方向上  $P_1$  和  $P_6$  接收点信号图和包络线图

Fig. 7 Signal plots of points  $P_1$  and  $P_6$  in the direction 1

表 4 数值模拟结果与理论计算结果

Table 4 Numerical simulation results and theoretical calculation results

方向	$S_0$ 群速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	超声测量等效拉伸模量/GPa	理论计算等效拉伸模量/GPa	绝对误差/GPa	相对误差/%
1	7 194.25	77.6	75.01	2.59	3.45

## 2.2 实验与讨论

待表征的复合材料板铺层方式为 $[0/90]_{3s}$ ,构成了一个准各向同性结构。板的三维尺寸设计为 $700\text{ mm}\times 700\text{ mm}\times 1.4\text{ mm}$ ,密度为 $1\ 524\text{ kg/m}^3$ 。信号发生器和高压放大器通过BNC数据线连接,最后连接超声换能器。通过声发射(AE)传感器接收复合材料板中沿相互垂直的1、2两个主方向传播的兰姆波信号,并与示波器连接观察并保存数据。超声测量实验系统如图8所示。

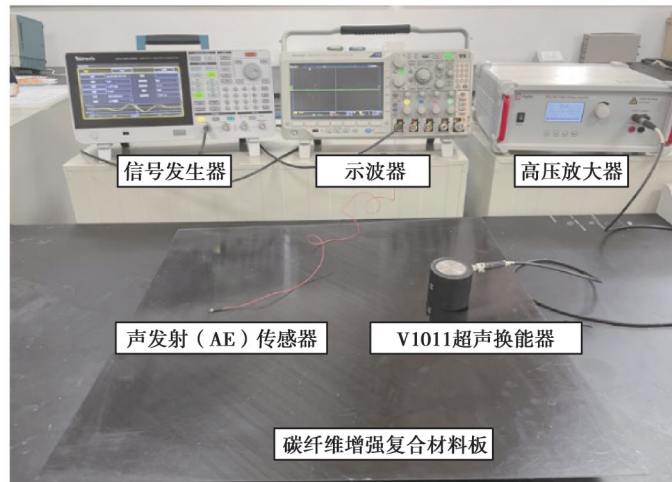


图8 超声导波测量实验装置

Fig. 8 Experimental devices of Ultrasonic guided wave measurement

实验过程中,将加窗调制的5周期信号导入信号发生器,作为激励信号驱动中心频率为 $0.1\text{ MHz}$ 的超声换能器。同时,将声发射传感器沿所规定的方向手动扫描接收信号,如图9所示。在每个方向上设置11个接收点,每个接收点之间的间隔为 $2\text{ cm}$ 。

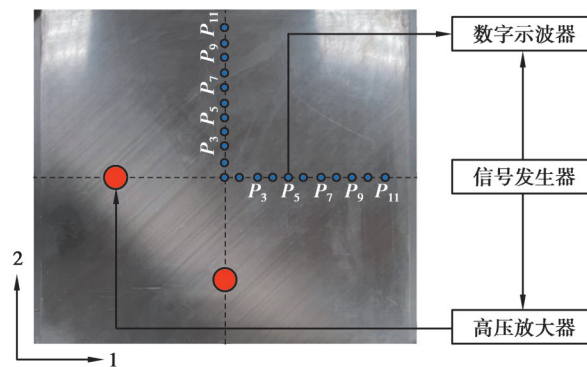


图9 超声导波测量实验方案

Fig. 9 Experimental scheme of Ultrasonic guided wave measurement

图10为两个测量方向上 $P_1$ 和 $P_5$ 点的信号,表5为两个测量方向上 $S_0$ 波群速度计算结果以及据此计算的出的相对应的等效拉伸模量。同时,为了评估测量方法的可靠性,设计了1组单轴拉伸试验,如图11所示。采用铣床切割技术,将复合板沿1和2两个方向分别切割5个单轴拉伸标准试件(共10个),进行拉伸试验,实验结果如表6所示。表7展示了2种方法测量得到的拉伸模量结果,与由拉伸试验得到的实际拉伸模量相比,由 $S_0$ 波群速度测量得到的拉伸模量结果在1方向的相对误差为 $7.71\%$ ,2方向的相对误差为 $3.61\%$ ,比较结果证明了该方法的准确性。对误差来源的分析,主要有两个原因:一是在原理上该方法忽略了面内泊松比 $\nu_{12}$ 的影响,导致方法误差;二是实验时各接收点的信号通过手动移动传感器扫描得到,产生



测量误差。

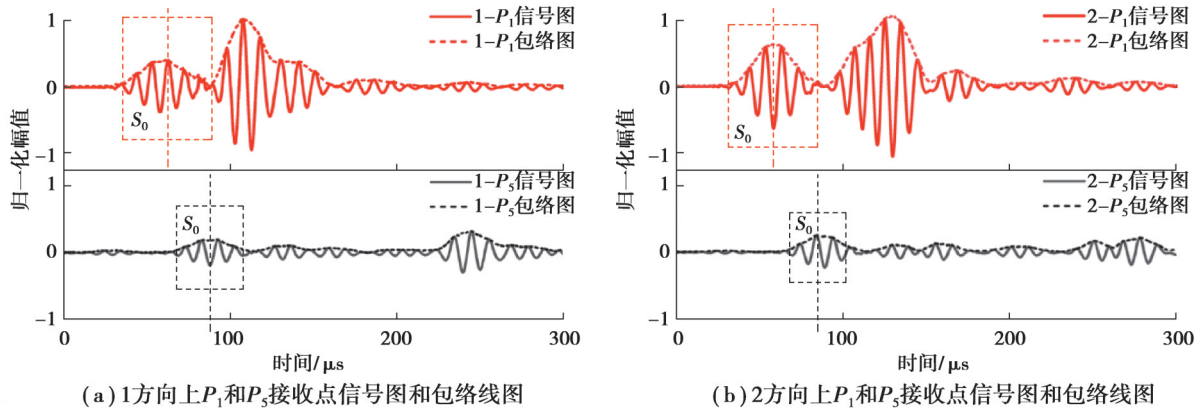


图 10 2个方向上部分点的时域信号图

Fig. 10 Time domain signal diagrams of some points in two directions

表 5  $S_0$  模态兰姆波群速度测量结果及测量得到的弹性常数

Table 5 Measurement results of Lamb wave group velocity and the elastic constants

方向	$S_0$ 群速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	等效拉伸模量 $E$ /GPa
1	7 153.08	74.0
2	7 352.94	77.2

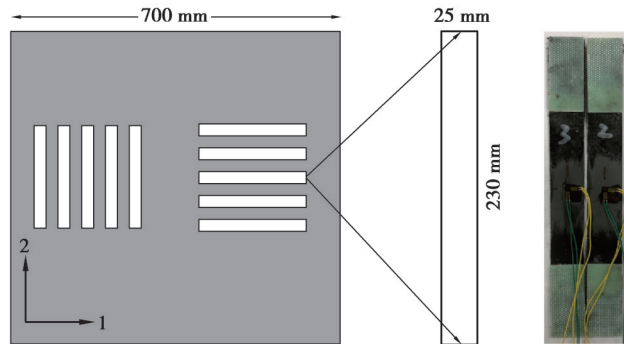


图 11 拉伸试件设计与制作

Fig. 11 Design and production of tensile specimen

表 6 复合材料板拉伸试验结果

Table 6 Tensile test results of composite plates

拉伸试件编号	拉伸模量测量结果 $E$ /GPa	
	1 方向	2 方向
1	73.72	71.90
2	91.64	73.90
3	76.09	84.71
4	77.74	71.63
5	81.76	70.44
平均值	80.19	74.51

表7 2种测量方式结果比较

Table 7 Results of two measurement methods

方向	拉伸试验测量拉伸模量/GPa	$S_0$ 波测量等效拉伸模量/GPa	绝对误差/GPa	相对误差/%
1	80.19	74.0	6.19	7.71
2	74.51	77.2	2.69	3.61

### 3 结 论

1) 分析了 $S_0$ 模态兰姆波在正交各向异性板中传播的群速度对9个独立弹性常数的敏感性。结果表明在低频厚积范围内 $S_0$ 波在正交铺层复合材料板内的传播群速度主要与拉伸弹性模量有关,因此可以用 $S_0$ 波群速度来对正交铺层复合材料板拉伸模量进行表征和测量。

2) 通过建立有限元模型对使用 $S_0$ 波测量拉伸模量进行了数值模拟,仿真结果表明使用 $S_0$ 波群速度来测量正交铺层复合材料板拉伸模量是可行的,并且精度较高,为实验设计和测量提供了指导。

3) 用超声导波测量方法实际测量了碳纤维增强正交铺层复合材料板,同时对测量用板进行了拉伸试验,获得了实际拉伸模量,将两者作了对比,结果表明通过超声导波测量方法得到的复合材料板拉伸模量与实际值的误差很小,为工业中测量拉伸模量提供了方便。

### 参考文献

- [ 1 ] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.  
Du S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12. (in Chinese)
- [ 2 ] 黄亿洲, 王志瑾, 刘格菲. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J]. 西安航空学院学报, 2021, 39(5): 44-51.  
Huang Y Z, Wang Z J, Liu G F. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2021, 39(5): 44-51. (in Chinese)
- [ 3 ] 马志阳, 高丽敏, 徐吉峰. 复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 24-30.  
Ma Z Y, Gao L M, Xu J F. Application and development for composite primary structure in large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 24-30. (in Chinese)
- [ 4 ] Chen Q, Xu K L, Ta D A. High-resolution Lamb waves dispersion curves estimation and elastic property inversion[J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106427.
- [ 5 ] White R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12): 3559-3567.
- [ 6 ] 曾小进, 王向阳. 混凝土动弹模量超声检测仪的设计[J]. 西南科技大学学报, 2014, 29(4): 72-77.  
Zeng X J, Wang X Y. The design of ultrasonic testing instrument of dynamic elastic modulus of concrete[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2014, 29(4): 72-77. (in Chinese)
- [ 7 ] 张晓峻, 孙晶华, 侯金弟, 等. 测量固体材料泊松比和杨氏模量的新方法[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(4): 75-78, 86.  
Zhang X J, Sun J H, Hou J D, et al. New method for measuring Poisson's ratio and Young's modulus of solid materials[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(4): 75-78, 86. (in Chinese)
- [ 8 ] 宋云飞, 于国洋, 殷合栋, 等. 激光超声技术测量高温下蓝宝石单晶的弹性模量[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064211.  
Song Y F, Yu G Y, Yin H D, et al. Temperature dependence of elastic modulus of single crystal sapphire investigated by laser ultrasonic[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 064211. (in Chinese)
- [ 9 ] 陈倩栋, Herrmann K, Menelao F. 纳米压痕仪和激光超声技术检测薄膜弹性模量[J]. 中国测试技术, 2007, 33(1): 77-81.  
Chen Q L, Herrmann K, Menelao F. Comparative study about the determination of the Young's modulus of thin layers with the instrumented indentation test and the laser-acoustic measuring method[J]. China Measurement, 2007, 33(1): 77-81. (in Chinese)
- [ 10 ] Spicer J B, McKie A D W, Wagner J W. Quantitative theory for laser ultrasonic waves in a thin plate[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(18): 1882-1884.
- [ 11 ] Cao H Q, Guo S F, He Z K, et al. In situ elastic constant determination of unidirectional CFRP composites via backwall

- reflected multi-mode ultrasonic bulk waves using a linear array probe[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 238: 109953.
- [12] Eremin A A, Glushkov E V, Glushkova N V, et al. Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry[J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 449-458.
- [13] 刘俊岭, 孙颖, 陈利. 含变异结构的三维机织复合材料的轴向拉伸性能[J]. *纺织学报*, 2019, 40(12): 162-168.  
Liu J L, Sun Y, Chen L. Axial tensile properties of three-dimensional woven composites with variant structure[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(12): 162-168.(in Chinese)
- [14] 仲健林, 任杰, 马大为, 等. 帘线/橡胶复合材料单层板拉伸模量预测方法研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(6): 81-85.  
Zhong J L, Ren J, Ma D W, et al. Prediction method for tension modulus of nylon/cord-rubber composite material lamina[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(6): 81-85.(in Chinese)
- [15] 王波, 矫桂琼, 陶亮, 等. 三维编织复合材料拉伸模量的有限元分析[J]. *机械科学与技术*, 2001, 20(S):18-19, 41.  
Wang B, Jiao G Q, Tao L, et al. Finite element analysis of tension module in 3D braided composites[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, 20(S):18-19, 41. (in Chinese)
- [16] 王正, 付海燕, 丁叶蔚, 等. 定向刨花板剪切模量和弹性模量动态测试[J]. *林业科学*, 2019, 55(8): 136-146.  
Wang Z, Fu H Y, Ding Y W, et al. Dynamic testing of shear modulus and elastic modulus of oriented strand board[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(8): 136-146.(in Chinese)
- [17] 赵剑, 汪海, 吕新颖, 等. Nomex蜂窝芯体面外宏观剪切模量预测与验证[J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(1): 125-129.  
Zhao J, Wang H, Lyu X Y, et al. Prediction and verification of the out-of-plane shear modulus of Nomex honeycomb core materials[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(1): 125-129.(in Chinese)
- [18] Chung S M, Yap A U J, Koh W K, et al. Measurement of Poisson's ratio of dental composite restorative materials[J]. *Biomaterials*, 2004, 25(13): 2455-2460.
- [19] Yeh H L. A study of negative poisson's ratio in randomly oriented quasi-isotropic composite laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33(19): 1843-1857.

(编辑 郑洁)