

文章编号: 1000-3851(2001)01-0020-05

超薄单向纤维增强复合材料低频多模式 超声兰姆波定征方法

张锐¹, 万明习¹, 陈晓¹, Cao Wen-wu²

(1. 西安交通大学 生物医学工程系, 西安 710049;

2. Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802)

摘要: 提出低频多模式超声兰姆波定征方法来估计超薄层状单向纤维增强复合材料的密度、厚度、弹性常数等参数。这里“超薄”的概念是指材料厚度 h 远小于材料中的声波波长 λ , 导致在时域上材料前后界面的各次回波信号相互混迭。分析了沿平行和垂直于纤维两个方向上, 在超薄层状单向纤维增强复合材料中传播的低频兰姆波色散特性, 提出在最小二乘意义下以材料色散曲线为基础的反向算法对材料参数进行了估计。文中分析了影响估计准确性的各种因素, 研究了该方法对材料参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。结合超声漏兰姆波频域分析方法, 并使用超声耦合剂耦合方式和一对中心频率为 2MHz 的宽带纵波换能器, 实验结果证实, 该方法能够准确估计 $h < 0.05 \lambda$ 的单向玻璃纤维增强双酚 A 型聚砜 (PSF) 复合材料的材料参数。

关键词: 复合材料; 超声兰姆波; 定量无损定征; 色散特性

中图分类号: TB332 文献标识码: A

LOW FREQUENCY ULTRASONIC MULTI-MODE LAMB WAVE METHOD FOR CHARACTERIZING THE ULTRA-THIN FIBER REINFORCED COMPOSITE

ZHANG Rui¹, WAN Ming-xi¹, CHEN Xiao¹, CAO Wen-wu²

(1. Department of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802)

Abstract: A low-frequency multi-mode ultrasonic Lamb wave method suitable for characterizing thickness, density and elastic stiffness tensors of the ultra-thin uni-direction fiber-reinforced composite layer is presented. The “ultra-thin” there means that the thickness of the plate is only a fraction of the ultrasound wavelength. The dispersion properties of the low frequency Lamb wave propagating a-long and parallel to the fiber direction are derived, which is the basis of the characterization method. In conjunction with the method of least squares, the secant algorithm is used to estimate the parameters of the ultra-thin fiber-reinforced composite layer. The reasons for evaluation error of the parameters and the sensitivity of all methods for different parameters are analyzed. Using the ultrasound coupler and a pair of broadband longitudinal wave transducers with 2 MHz center frequency, one can successfully estimate the parameters of the ultra-thin GF/PSF composite layer by combination with employing the leaky guided wave frequency-domain analysis method.

Key words: composite; ultrasonic Lamb wave; QNDE; dispersion

利用超声波对层状纤维增强型复合材料的声学、力学及界面特性等进行原位、无损定量估计是复合材料研究领域的重要问题之一。在许多应用场合, 层状纤维增强型复合材料很薄。这里“薄”的概念是

指覆层厚度 h 小于材料中的超声波波长 λ , 以致采用传统的超声波纵波方法对其进行原位测试时, 无法在时域上区分材料前后界面的各次回波信号^[1~6]。虽然可以使用频带更宽和频率更高的单脉

收稿日期: 1999-06-08; 收修改稿日期: 1999-10-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(69925101); 美国 Office of Naval Research 资助 Grant(N00014-93-1-0340)

作者简介: 张锐(1973), 男, 博士, 研究方向: 薄层复合材料及界面超声波定征。

冲超声波来测量厚度越来越小的样品,例如,当复合材料厚度为 10 μm 左右时,使用频率为 150 MHz 以上的超声波进行检测,但是如此高频率的超声波检测系统,需要使用特制的高频换能器和相应的宽带处理设备,从而使检测系统的成本大大提高。另外,纤维等材料微结构对超声波的散射将干扰回波信号,使声学参数的测量变得困难。本文作者希望寻找一种方便准确的低频超声波多参数定征方法,能够对超薄纤维增强复合材料进行更为全面的估计。

与纵波方法对应,具有色散特性和多种传播模式、沿超薄层状纤维增强型复合材料传播的兰姆波是一种超声波导波,其传播特性与材料的声速、厚度、密度、弹性常数、纤维方向等多种参数有着密切的关系^[7-13]。本文中提出以色散特性为基础的低频多模式兰姆波定征方法和在最小二乘意义下以低频兰姆波色散曲线为基础的反向算法对超薄单向纤维增强复合材料的厚度、密度和弹性常数等参数进行估计,并分析了影响估计准确性的各种因素,研究了低频超声兰姆波定征方法对材料各参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。实验结果与理论符合得非常好。

1 方 法

假设 z 轴为纤维方向, x 轴垂直于超薄层状 1-3 纤维增强复合材料表面,复合材料沿 y 轴和 z 轴方向无限延伸。在此坐标系下,超薄层状 1-3 纤维增强复合材料具有与六角对称晶体非常类似的弹性特征,可用五个独立的弹性常数 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}$ 来表征。根据该坐标系建立波动方程和位移解的通解形式,综合表征超薄层状 1-3 纤维增强复合材料应力-应变关系的广义胡克定理,描述位移-应变的几何方程、运动方程和边界条件,可以确定初始位移解中的特定参量,同时得到描述沿 1-3 纤维增强复合材料表面传播的低频对称模式与反对称模式超声兰姆波色散特性的色散方程。当超声兰姆波传播方向平行于 z 轴, y 轴方向上位移梯度为零情况下,超薄 1-3 纤维增强复合材料中超声兰姆波的传播特性为^[9]

$$f_x(\rho, d, C_{11}, C_{13}, C_{33}, C_{44}) = \frac{\text{tg}(k_{xp}d/2)}{\text{tg}(k_{xm}d/2)} - \left[\frac{G_p H_m}{G_m H_p} \right]^{\pm 1} = 0 \quad (1)$$

其中: $G_p = C_{11}R_p k_{xp} + C_{13}k_x$, $H_p = k_{xp} + k_x R_p$,
 $G_m = C_{11}R_m k_{xm} + C_{13}k_x$, $H_m = k_{xm} + k_x R_m$, $R_p =$

$\frac{(C_{13} + C_{33})k_{xp} + k_x}{\rho\omega^2 - C_{11}k_{xp}^2 - C_{44}k_x^2}$, $R_m = \frac{(C_{13} + C_{33})k_{xm} + k_x}{\rho\omega^2 - C_{11}k_{xm}^2 - C_{44}k_x^2}$, 方程右端取‘+’号代表对称模式兰姆波色散特性,取‘-’号代表反对称模式兰姆波色散特性, k_x 是兰姆波波数沿 z 轴方向的分量, $k_x = \omega/v_x$, ω 是入射超声波的角频率, v_x 即兰姆波沿 z 轴方向的传播速度, ρ 与 d 分别是材料密度与厚度。 k_x 是兰姆波波数沿 x 轴的分量,它是 k_x 的函数,结合层状复合材料边界条件和应力-应变关系,可得 k_x 与 k_x 的关系式

$$(C_{13} + C_{33})^2 k_x^2 k_x^2 = (\rho\omega^2 - C_{11}k_x^2 - C_{44}k_x^2)(\rho\omega^2 - C_{11}k_x^2 - C_{33}k_x^2) \quad (2)$$

k_{xp} 和 k_{xm} 分别是上式解得的两个根。

当超声兰姆波传播方向平行于 y 轴情况下,超薄 1-3 纤维增强复合材料中超声兰姆波传播特性的色散方程形式与式(1)类似

$$f_y(\rho, d, C_{11}, C_{12}) = \frac{\text{tg}(k_{yp}d/2)}{\text{tg}(k_{ym}d/2)} - \left[\frac{G_p H_m}{G_m H_p} \right]^{\pm 1} = 0 \quad (3)$$

式中: G_p, G_m, H_p, H_m 形如式(1),但此时 R_p 和 R_m 分别由下式给出:

$$R_p = \frac{(C_{12} + C_{66})k_{yp}k_y}{\rho\omega^2 - C_{11}k_{yp}^2 - C_{66}k_y^2}$$

$$R_m = \frac{(C_{12} + C_{66})k_{ym}k_y}{\rho\omega^2 - C_{11}k_{ym}^2 - C_{66}k_y^2} \quad (4)$$

其中: $C_{66} = (C_{11} - C_{22})/2$, k_y 是兰姆波波数沿 y 轴方向的分量, $k_y = \omega/v_y$, v_y 即兰姆波沿 y 轴方向的传播速度。与推导兰姆波沿 z 轴传播情况色散特性类似, k_y 与 k_x 之间关系如下:

$$(C_{12} + C_{66})^2 k_y^2 k_x^2 = (\rho\omega^2 - C_{11}k_x^2 - C_{66}k_y^2)(\rho\omega^2 - C_{11}k_x^2 - C_{66}k_y^2) \quad (5)$$

k_{yp} 和 k_{ym} 分别是通过上式解得的两个根。

可以看出,沿 z 轴方向和沿 y 轴方向传播的兰姆波,都与超薄 1-3 纤维增强复合材料的密度、厚度和 C_{11} 有关,而其它的四个常数 C_{12}, C_{13}, C_{33} 和 C_{44} 分别只与沿 z 轴方向或沿 y 轴方向传播的兰姆波有关。弹性层的参数估计即是通过在最小二乘误差意义上材料的低频兰姆波色散曲线与理论色散特性方程的比较,估算出材料的声学参数值,材料参数的实验估计值应使下式取得最小值:

$$E(P) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| f_x(\rho, d, C_{11}, C_{13}, C_{33}, C_{44}) \|^2 \quad (6)$$

$$E(P) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| f_y(\rho, d, C_{11}, C_{12}) \|^2 \quad (7)$$

其中, P 代表材料的密度,厚度和弹性常数中的任意

一个量, $j=1, \dots, N$, N 是待测材料厚度与发射及接收时传感器频宽乘积带内对应的速度扫描点数。利用割线法解出使式(6)和式(7)中 $E(P)$ 为最小的材料参数值, 迭代初值为材料参数的预估值, 在材料参数真值的约 $\pm 30\%$ 范围内。

2 实 验

实验测试系统如图 1 所示。一对精密匹配、中心频率为 2 MHz 的纵波宽带压电换能器 T 和 R, 相对倾斜地放置于待测材料的同侧, 发射换能器 T 的入射角度、接收换能器 R 的接收角度、换能器之间及它们与材料之间的距离、及兰姆波传播方向均由一套精密机械控制装置控制, 角度分辨率为 0.5° 。换能器与待测样品之间通过超声耦合剂耦合, 测量系统在计算机的控制下, 触发脉冲发生器 CTS-5 产生尖脉冲激励发射换能器, CTS-5 将接收换能器收到的信号经内部放大器预放后送至 TDS-724C 型数字示波器进行采样, 示波器的采样频率 $S_r=100$ MHz 是预先设定的。为了减小随机噪声对实验结果的影响, 数字示波器进行持续 5 min 的多次采样, 并且一边采样, 一边将采样信号进行平均。最后, 平均后的采样信号通过 GPIB(IEEE-488) 总线送入计算机做进一步分析。

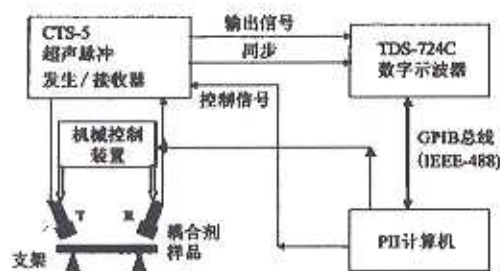


图 1 实验测量系统原理框图

Fig. 1 The block diagram of experimental system

测试样品为单向玻璃纤维增强双酚 A 型聚醚(PSF)复合材料, 其厚度是在美国宾夕法尼亚州购买时由商家提供的, 使用电子测厚仪对厚度参数进行了校准, 仪器的测量误差是 $\pm 2.54 \mu\text{m}$ 。密度参数根据阿基米德原理测量。整个实验在恒温环境中进行, 吸水水槽内的水温控制在 $23 \text{ C} \pm 0.1 \text{ C}$ 。

本文中采用超声兰姆波频谱方法获得样品的兰姆波色散曲线数值, 该方法的核心是精确控制入射及接收角度以决定何种模式的兰姆波以多大的速度

沿弹性薄层传播, 并记录不同入射角处的频率峰值点, 就可以得到材料的色散曲线。图 2 所示为单向玻璃纤维增强双酚 A 型聚醚(PSF)复合材料厚度为 $116 \mu\text{m}$ 实验样品的理论色散曲线, 其中的星号点是实验测量兰姆波色散曲线数值, 样品参数的理论值使用体积波方法对同样材料制成的厚样品进行测试得到。

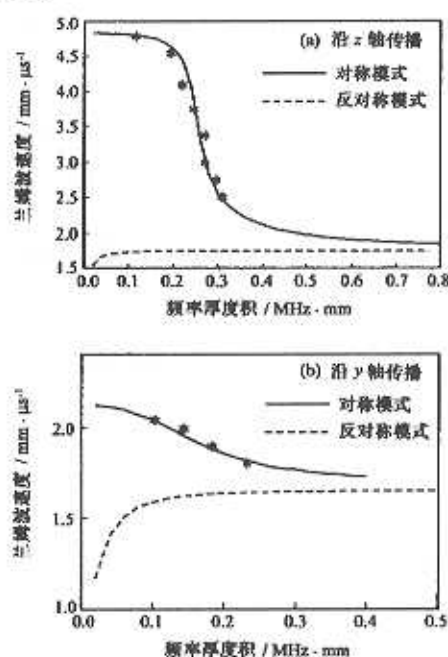


图 2 兰姆波色散特性实验数据

Fig. 2 The experimental dispersion data of the Lamb waves

3 实验结果与讨论

表 1、表 2 分别为利用沿 z 轴和 y 轴方向的低频对称模式兰姆波对样品进行参数估计的结果。

表 1 沿 z 轴方向低频兰姆波定征方法对材料参数的估计结果

Table 1 The evaluation results using the z -axis low frequency Lamb wave method

样品参数	体积波方法	沿 z 轴方向低频兰姆波定征方法	相对误差/%
h/mm	0.116	0.115	-0.8
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.845	1.884	2.1
C_{11}/GPa	19.69	20.26	2.9
C_{13}/GPa	2.44	2.22	-8.7
C_{33}/GPa	57.04	58.31	2.2
C_{44}/GPa	5.65	5.63	-0.3

表 2 沿 y 轴方向低频兰姆波定征方法
对材料参数的估计结果

Table 2 The evaluation results using the y -axis
low frequency Lamb wave method

样品参数	体积波方法	沿 y 轴方向低频 兰姆波定征方法	相对误差 / %
h/mm	0.116	0.118	1.3
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.845	1.780	-3.5
C_{11}/GPa	19.69	19.29	-2.0
C_{12}/GPa	9.48	8.93	-5.8

综合表 1 和表 2 可以看出, 低频兰姆波定征方法可以对 $h < 0.05\lambda$ 的超薄层状单向纤维增强复合材料的参数进行定征, 但对于不同参数的灵敏度不同。沿 z 轴方向和 y 轴方向低频兰姆波定征方法均可对材料厚度和密度进行定征, 但沿 y 轴方向方法准确度较低。相反, 沿 y 轴方向方法对 C_{11} 的准确度较高。为此, 我们研究了两种方法对厚度和密度的灵敏度, 如图 3 所示。

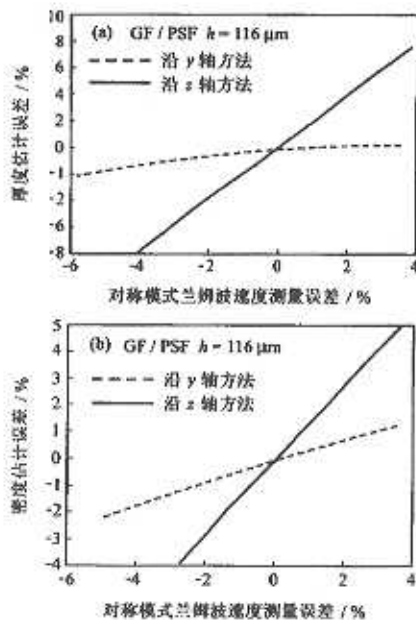


图 3 低频超声兰姆波定征方法对薄层复合材料厚度与密度的估计误差

Fig. 3 The evaluation errors of the low frequency
Lamb wave method for thickness and density

由图 3 可以清楚地看到, 在同样的兰姆波速度测量误差前提下, 沿 y 轴方向低频兰姆波定征方法

对厚度和密度的估计会带来较大的估计误差。所以, 沿 z 轴方向传播的对称模式兰姆波适合用来对 ρ , d , C_{12} , C_{33} 和 C_{44} 进行定征, 而沿 y 轴方向传播的对称模式兰姆波可以对 C_{11} 和 C_{12} 进行定征。

经过分析发现, 低频兰姆波定征方法对复合材料参数的估计误差主要是由换能器角度分辨率决定的兰姆波速度测量误差引起的。其次, 由于待测样品在低频率厚度积条件下的兰姆波速度对应的角度范围与换能器波束特性、频带特性和复合材料超声兰姆波色散特性等因素有关, 所以低频多模式超声兰姆波超薄单向纤维增强复合材料定征方法的估计误差也与这些因素有着密切的关系。

4 结 论

通过理论分析和实验验证, 证实了沿 z 轴方向传播的对称模式兰姆波适合用来对厚度小于十分之一波长的单向玻璃纤维增强双酚 A 型聚砜 (PSF) 复合材料 ρ , d , C_{12} , C_{33} 和 C_{44} 进行定征, 而沿 y 轴方向传播的对称模式兰姆波可以用来对 C_{11} 和 C_{12} 进行定征。除 C_{12} 和 C_{12} 参数外, 总体定征误差小于 2%。结合沿 z 轴和沿 y 轴方向传播的低频对称模式兰姆波定征方法可以对超薄单向纤维增强复合材料的厚度、密度和弹性常数等参数进行定征。该定征方法的定征精度和发射、接收换能器频带特性、波束特性、角度分辨率和材料的色散特性等因素有密切的关系。

参考文献:

- [1] Rokhlin S I, Wang W. Critical angle measurement of elastic constants in composite material[J]. *J Acoust Soc Am*, 1989, 86(5): 1876-1882.
- [2] Rokhlin S I, Wang W. Measurement of elastic constant of very thin anisotropic plates[J]. *J Acoust Soc Am*, 1993, 94(5): 2712-2730.
- [3] Kinra V K, Iyer V R. Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part I: the forward problem[J]. *Ultrasonics*, 1995, 33(2): 95-110.
- [4] Kinra V K, Iyer V R. Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part II: the inverse problem[J]. *Ultrasonics*, 1995, 33(2): 111-122.
- [5] Wan M X, Jiang B, Cao W W. Direct measurement of ultrasonic velocity of thin elastic layers[J]. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(1): 625-628.
- [6] 张 锐, 万明习, 钱 明. 超薄弹性层低频超声频域定征方法[J]. *计量学报*, 1998, 19(4): 291-298.

- [7] 张 锐, 万明习, 巩敬洲, 等. 低频多模式超声兰姆波超薄弹性层定征方法[J]. 计量学报, 2000, 21(1): 1~9.
- [8] Nayfeh A H, Chimenti D E. Propagation of guided waves in fluid-coupled plates of fiber reinforced composite[J]. *J Acoust Soc Am*, 1988, 83: 1736~1743.
- [9] Deyal, Vikram K. Leaky Lamb waves in an anisotropic plate— 1. an exact solution and experiments[J]. *J Acoust Soc Am*, 1989, 85(6): 2268~2276.
- [10] Chimenti D E, Martin R W. Nondestructuve evaluation of composite laminates by leaky Lamb waves[J]. *Ultrasonics*, 1991, 29(1): 13.
- [11] Balasubramaniam K, Rose J L. Physically based dispersion curve feature analysis in the NDE of composite[J]. *J Research in Non-destructive Evaluation*, 1991, 3: 41~67.
- [12] Thompson D O, Chimenti D E. Review of Proppress in Quantitative Non-destructive Evaluation [M]. New York: Plenum Press, 1991. 1555~1560.
- [13] Guo N, Cawley P. Lamb wave reflection for the quick nondestructive evaluation of large composite laminates[J]. *Materials Evaluation*, 1994, 52(3): 404~411.