



文章编号: 0253-987X(2000)06-0023-04

超薄双层胶结复合结构低频超声类兰姆波定征方法

张锐¹, 万明习¹, 李刚¹, 曹文武²

(1. 西安交通大学, 710049, 西安; 2. 宾州大学)

摘要: 提出用低频超声类兰姆波定征方法来估计超薄双层胶结复合结构各层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数。采用超声耦合剂耦合方式, 结合超声漏类兰姆波频域分析方法获取复合结构类兰姆波色散曲线, 提出以色散特性为基础的低频超声类兰姆波定征方法和在最小二乘意义下以色散曲线为基础的反向算法对超薄双层胶结复合结构进行参数估计。进一步分析了影响估计准确性的各种因素, 研究了低频超声类兰姆波定征方法对超薄双层胶结复合结构各参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。实验结果证实, 对于铝/铜双层胶结复合结构, 该方法能够准确估计厚度小到 24 μm 的铝层和铜层的声学参数。

关键词: 胶结复合结构; 超声定量无损定征; 超声类兰姆波; 色散特性

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A

Low Frequency Ultrasonic Method for Characterizing Ultra Thin Bi-Layer Composite

Zhang Rui¹, Wan Mingxi¹, Li Gang¹, Cao Wenwu²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Pennsylvania State University)

Abstract: A low-frequency ultrasonic (Lamb-like) wave method is used for characterizing the shear, longitudinal wave velocities, the thickness, and the density of ultra-thin two-layered bonding composite. The layer thickness is only a fraction of the ultrasound wavelength so that the echoes from the front and back surfaces cannot be separated in the time domain. The least square method and the secant algorithm are applied to determine the governing parameters basing on the measured dispersion curve of the low frequency Lamb wave propagating along the composite. The reasons for evaluation error of the parameters and the sensitivity of the method for different parameters are analyzed. The technique is employed experimentally to characterize the ultra-thin aluminum and brass layers of the aluminum/brass composite with thickness down to five percent of the ultrasonic wavelength by using a pair of broadband longitudinal wave transducers of 2 MHz. It is observed that the nominal value agrees well with the estimation.

Keywords: adhesive composites; ultrasonic QNDE; ultrasonic Lamb-like wave; dispersion property

收稿日期: 1999-08-27. 作者简介: 张锐,男,1973年4月生,博士生;万明习(联系人),男,电子与信息工程学院生物医学工程系,教授,博士生导师.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69631020); 美国 Office of Naval Research 资助项目(00014-93-1-0340).

超薄双层胶结复合结构应用极为广泛,这里“薄”的概念是指复合结构各层厚度 h 均小于层中声波波长 λ ,导致在时域上复合结构前后界面的各次回波信号相互混叠^[1-8]。以往的单载频脉冲重合法、共振法以及脉冲-回波等方法由于受原理的限制,只适用于测试 $h > \lambda$ 的样本^[2-3]。虽然可以使用频带更宽和频率更高的单脉冲超声波来测量厚度越来越小的样品,但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。国内外学者已经分别提出用低频频域定征方法来对厚度小到 0.1λ 的超薄双层复合结构进行参数定征,但由于该方法只激发了单一模式的体积波,因此只能估计材料的纵波声速^[4-6]。

沿超薄双层胶结复合结构传播的超声类兰姆波是一种超声波导波,它与传统体积波方法相对应,具有多种传播模式和色散特性,同时能激发法向和切向应力,其传播特性与材料的纵波声速、横波声速、厚度和密度等多种参数有着直接的关系,信号中蕴涵的信息远多于传统体积波方法,可以用来对超薄双层胶结复合结构进行多参数的定征^[7-8]。本文提出用以低频超声类兰姆波色散特性为基础的超薄双层胶结复合结构定征方法,以及在最小二乘意义下以低频类兰姆波色散曲线为基础的反向算法对各层

的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数进行估计,并分析了影响估计准确性的各种因素,研究了低频超声类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。

1 低频类兰姆波定征方法

图1为双层胶结复合结构中超声类兰姆波传播示意图,假设层状复合结构在 Y 方向上无限延伸并且位移梯度为0,在层与层之间具有刚性联接的情况下,由于界面能承受垂直的法向应力和切向应力,所以处于界面两边的介质,其法向、切向应力及法向、切向位移均连续。在 $Z = h$ 和 $Z = -h$ 的平面上,复合结构沿 X 方向的剪切应力与正应力为0。结合波动方程和位移解的通解形式,可以得到描述沿双层复合结构传播的超声类兰姆波传播速度与频率之间关系的色散特性方程

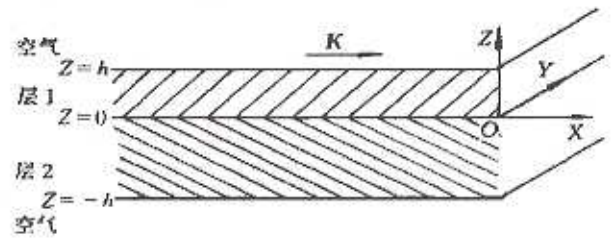


图1 双层复合结构中超声类兰姆波传播示意图

$$\begin{vmatrix} -b_1 & 1 & b_1 & 1 & b_3 & -1 & -b_3 & -1 \\ 1 & b_2 & 1 & -b_2 & -1 & -b_4 & -1 & b_4 \\ c_1 & 2b_2 & c_1 & -2b_2 & -rc_3 & -2rb_4 & -rc_3 & 2rb_4 \\ 2b_1 & -c_1 & -2b_1 & -c_1 & -2rb_3 & rc_3 & 2rb_3 & rc_3 \\ 2b_1 d_1 & -c_1 d_2 & -2b_1/d_1 & -c_1/d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 d_1 & 2b_2 d_2 & c_1/d_1 & -2b_2/d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 d_3 & 2b_4 d_4 & c_3/d_3 & -2b_4/d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2b_3 d_3 & c_3 d_4 & 2b_3/d_3 & c_3/d_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中: $b_1 = i[1 - (v/\hat{v}_s)^2]^{1/2}$; $b_2 = i[1 - (v/\hat{v}_l)^2]^{1/2}$; $b_3 = i[1 - (v/\hat{v}_s)^2]^{1/2}$; $b_4 = i[1 - (v/\hat{v}_l)^2]^{1/2}$; $c_1 = 1 - (b_1)^2$; $c_3 = 1 - (b_3)^2$; $d_1 = \exp(ikb_1 \hat{h})$; $d_2 = \exp(ikb_2 \hat{h})$; $d_3 = \exp(ikb_3 h)$; $d_4 = \exp(ikb_4 h)$; $k = 2\pi f/v$, k 是超声类兰姆波波数; f 代表频率; i 是虚部符号; \hat{v}_l 、 \hat{v}_s 、 \hat{h} 和 $\hat{\rho}$ 分别是层1的纵波声速、横波声速、厚度和密度; v_l 、 v_s 、 h 和 ρ 分别是层2的纵波声速、横波声速、厚度和密度; v

代表沿层状复合结构表面传播的超声类兰姆波声速。

式(1)可简化如下

$$f(\hat{v}_l, \hat{v}_s, \hat{h}, \hat{\rho}, v_l, v_s, h, \rho, f, v) = 0 \quad (2)$$

低频超声类兰姆波复合结构参数定征方法,是通过在最小二乘误差意义上层状复合结构低频超声类兰姆波色散曲线与理论色散特性曲线的比较,估

算出复合结构的声学参数值.复合结构参数的实验估计值应使下式取得最小值

$$E(p) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| f(\hat{v}_1, \hat{v}_s, \hat{h}, \hat{\rho}, v_1, v_s, h, \rho, f^j, v^j) \|^2 = 0 \quad (3)$$

式中: $j=1, \dots, N$, N 是超薄覆层厚度与换能器频宽乘积带内对应的速度扫描点数, p 为 $\hat{v}_1, \hat{v}_s, \hat{h}, \hat{\rho}$ 之一.正确测量出超声类兰姆波色散曲线之后,在参数真值的 $\pm 30\%$ 范围内选择一预估值,使用割线法解出使公式(3)中 $E(p)$ 为最小的参数估计值.

2 实验方法

实验测试系统如图2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相对倾斜地放置于待测材料的同一侧,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 $S=100$ MHz是预先设定的.为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,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.整个实验温度控制在 $(22 \pm 0.1)^\circ\text{C}$.

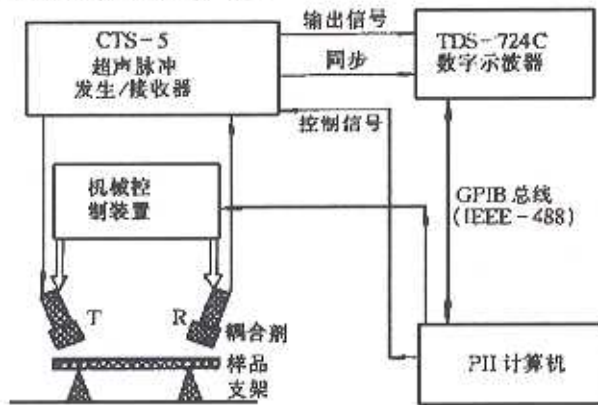


图2 实验测量系统原理框图

通过分析接收信号的频谱,发现由于传感器波束宽度与发射信号带宽的影响,接收到的泄漏超声兰姆波信号也是宽带信号,并且在频率上存在一些

峰值点,峰值点的位置随超声波入射角的不同而发生变化.由于超声波入射角与超声类兰姆波的声速之间满足斯涅尔定理,精确控制入射波的入射角度,在某一角度范围内以一定角度间隔改变入射角,并记录不同入射角处的频率峰值点,就可以确定双层胶结复合结构的色散特性.图3所示为实验样品铝/铜双层胶结复合结构的低频超声类兰姆波色散实验数据.

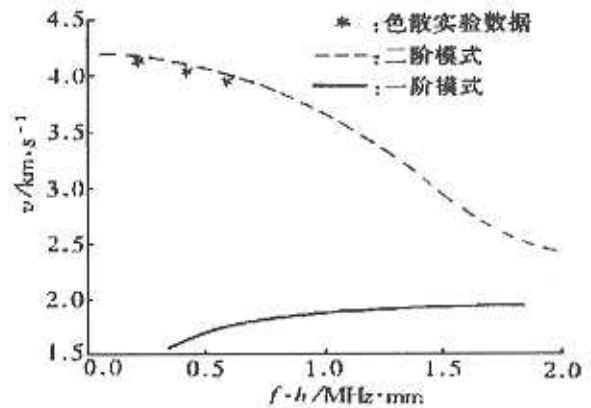


图3 低频超声类兰姆波色散实验数据

3 讨论

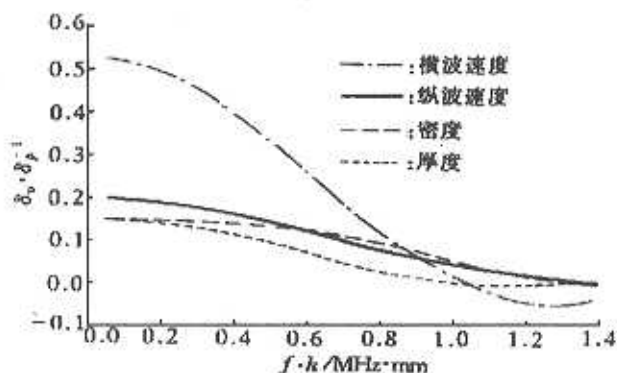
由第一部分可知,低频超声类兰姆波定征方法适合用来定征由各向同性材料构成的双层胶结复合结构,表1为使用本文方法对铝/铜双层胶结复合结构各层参数进行参数估计的估计结果.

表1 低频超声类兰姆波定征方法对双层胶结复合结构各层参数的估计结果

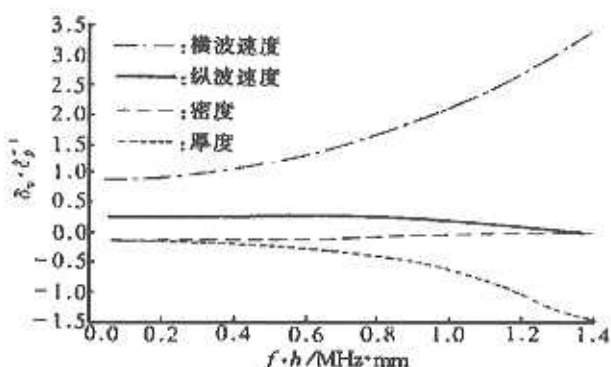
	各层参数	参考值	估计值
铝层	$\hat{h}/\mu\text{m}$	153	146
	$\hat{\rho}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.67	2.60
	$\hat{v}_1/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	6.210	6.067
	$\hat{v}_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	3.035	3.013
铜层	$h/\mu\text{m}$	381	391
	$\rho/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	8.47	8.63
	$v_1/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	4.711	4.649
	$v_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	2.093	2.083

可以看出,低频超声类兰姆波定征方法能够对超薄双层胶结复合结构中各层的纵波速度、横波速度、厚度和密度参数进行定征,具有较高的准确度.仔细比较可以看出,该方法对横波速度参数定征的

准确度最好,对纵波速度定征的准确度次之,总体误差小于2%,但对厚度和密度的定征误差较大.通过分析发现,低频超声类兰姆波定征方法对超薄双层胶结复合结构中各层参数的估计误差,主要是由换能器角度分辨率决定的超声类兰姆波速度测量误差引起的,当存在超声类兰姆波声速测量误差时,利用本文方法对参数进行参数估计时,会带来估计误差.估计误差的大小与超声类兰姆波的声速测量准确度、所用方法对不同参数的灵敏度、检测频带厚度积范围和复合结构的组成等因素有关.图4为低频超声类兰姆波定征方法对超薄双层胶结复合结构中各层声学参数的估计灵敏度曲线.从图4a和图4b可以看出,低频超声类兰姆波定征方法对横波速度进行定征的灵敏度从总体上来讲大于对纵波速度定征的灵敏度,即在同样的超声类兰姆波声速测量误差条件下,对横波速度的反演误差较小.低频超声类兰姆波定征方法对厚度参数最不灵敏,也就意味着该方法对厚度参数的反演误差最大.



(a) 对铝层参数的灵敏度分析



(b) 对铜层参数的灵敏度分析

图4 低频超声类兰姆波定征方法对超薄双层胶结复合结构声学参数估计的灵敏度分析

4 结 论

(1) 低频超声类兰姆波定征方法可以有效地对 $h < 0.05 \lambda$ 的超薄铝/铜胶结复合结构样品的纵波速度、横波速度、厚度和密度参数进行定征,横波速度定征最为准确,除厚度参数之外,估计误差不大于3%.

(2) 该定征方法的准确度不仅和发射、接收换能器的波束、频带特性有关,也与所用方法对不同参数的灵敏度及检测频带厚度积范围内低频超声类兰姆波在超薄双层胶结复合结构中的传播特性等因素有关.

参考文献:

- [1] Adams R D, Drinkwater B W. Nondestructive testing of adhesively bonded joints [J]. *NDT & E International*, 1997, 30(2): 93-98.
- [2] Meksimin H L. Pulse superposition method for measuring the velocity of sound in solids [J]. *J Acoust Soc Am*, 1961, 33(1): 12-16.
- [3] Chang F H, Couchman J C, Yee B G W. Ultrasonic resonance measurements of sound velocity in thin composite laminate [J]. *J Composite Material*, 1974, 8(10): 356-363.
- [4] Kinra V K, Zhu C. Ultrasonic nondestructive evaluation of thin coatings [J]. *J Acoust Soc Am*, 1993, 93(5): 2454-2467.
- [5] Wan Mingxi, Jiang Bei, Cao Wenwu. Direct measurement of ultrasonic velocity of thin elastic layers [J]. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(1): 626-628.
- [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,巩欣洲,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] Lowe J S, Cawley P. Comparison of reflection coefficient minimum with dispersion curves for ultrasonic waves in the embedded layers [J]. *Rev in Progress of QNDE*, 1995, 14: 1505.

(编辑 荆树蓉 王平)