

# 胶结复合结构超薄胶结层低频超声 类兰姆波定征方法\*

张锐 万明习 陈晓

曹文武

(西安交通大学电子与信息工程学院生物医学工程系, 陕西西安, 710049)

(宾夕法尼亚大学材料研究实验室)

**摘要** 本文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频散曲线, 提出以频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频散曲线为基础的反向算法对胶结复合结构超薄胶结层进行了参数估计。文中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胶结复合结构胶结层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/不锈钢胶结复合结构, 该方法能够准确估计厚度小到  $112\mu\text{m}$  的胶结层的声学参数。

**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

在航空、航天器和航海舰艇制造过程中, 多种新型层状信息、功能和智能胶结复合结构被广泛应用与研究。利用超声波对其声学、力学和界面特性进行原位、无损地定量估计日益引起国内外学者的重视, 且针对不同的问题产生了许多新的检测方法和技术, 目前部分已达到定量检测的水平<sup>[1-6]</sup>。

胶结层的厚度、密度和其它声学参数与胶结质量密切相关, 但是在对胶结层的定征中, 由于其厚度很“薄”而遇到困难, 在这里“薄”的概念是指胶结层厚度  $h$  小于其中的超声波波长  $\lambda$ , 以致采用传统的超声波纵波方法对其纵波声速和厚度参数进行原位测试时, 无法在时域上区分材料前后界面的各次回波信号<sup>[1]</sup>。以往的单载频脉冲重合法、共振法以及脉冲—回波等方法受原理的限制, 也只适用于测试  $h > \lambda$  的样本。国内外学者已经分别提出了低频频域定征方法来对厚度小到  $0.1\lambda$  的超薄胶结层进行参数定征, 但由于只激发了单一模式的体积波, 因此只能估计材料纵波声速<sup>[4,5]</sup>。

与传统体积波方法对应, 超声类兰姆波是一种超声波导波, 同时激发法向和切向应力, 其传播特性

与各层材料及胶结层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等多种参数有着直接的关系, 可以用来对超薄胶结层进行多参数的定征<sup>[6-13]</sup>。本文提出以低频超声类兰姆波频散特性为基础的超薄胶结层定征方法和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超薄胶结层的纵波声速、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。实验结果与理论符合较好。

## 1 方法

### 1.1 低频类兰姆波定征方法

如图 1.1 所示为胶结复合结构的示意图, 层 1 和层 3 是被胶结层, 层 2 即是厚度很“薄”的胶结层。由于复合结构在  $X$  和  $Y$  方向上的尺寸远大于  $Z$  方向上的尺寸, 考虑沿多层复合结构  $X$  方向传播的超声类兰姆波传播特性, 并假定沿层状复合结构传播的波在  $Y$  方向上的位移与应力梯度为零,  $K$  为沿  $X$  方向传播的超声类兰姆波的波矢。

2001年1月收稿, 2002年1月定稿。

\* 国家杰出青年基金资助项目(69925101)

\* 美国 Office of Naval Research 资助项目(Grant: # N00014-93-1-0340)

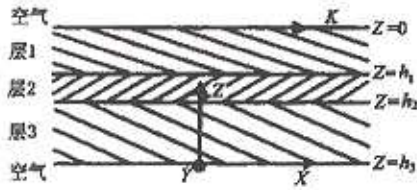


图 1.1 胶结复合结构中超声类兰姆波传播示意图

Fig. 1.1 Lamb waves in the bonding structures

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 g_\alpha & k_1 \\ C_\alpha g_\alpha & -C_\alpha \\ i\rho B g_\alpha & \frac{i\rho B}{g_\alpha} \\ 2i\rho k_1 \beta^2 C_\alpha g_\alpha & -\frac{2i\rho k_1 \beta^2 C_\alpha}{g_\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\beta g_\beta & -C_\beta \\ -k_1 g_\beta & \frac{-k_1}{g_\beta} \\ -2i\rho k_1 \beta^2 C_\beta g_\beta & \frac{2i\rho k_1 \beta^2 C_\beta}{g_\beta} \\ i\rho b g_\beta & \frac{i\rho b}{g_\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{(L+)} \\ A_{(L-)} \\ A_{(S+)} \\ A_{(S-)} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

其中,  $C_\alpha = (\omega^2/\alpha^2 - k_1^2)^{1/2}$ ,  $C_\beta = (\omega^2/\beta^2 - k_1^2)^{1/2}$ ,  $g_\alpha = e^{i(\omega^2/\alpha^2 - k_1^2)^{1/2}z}$ ,  $g_\beta = e^{i(\omega^2/\beta^2 - k_1^2)^{1/2}z}$ ,  $B = \omega^2 - 2\beta^2 k_1^2$ ,  $k_1 = 2\pi f/v$ ,  $k_1$  是超声类兰姆波波数沿  $X$  方向的分量,  $f$  代表频率,  $i$  是虚部符号,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\rho$  分别是层的纵波声速、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兰姆波声速。

令(1.1)式中的 4 乘 4 矩阵为  $[D]$ , 层 1 上表面的位移、应力与下表面的位移、应力可由下式联系起来:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_1, \text{bottom}} = [D]_{l_1, \text{bottom}} [D]_{l_1, \text{top}}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_1, \text{top}} \quad (1.2)$$

在良好胶结条件下, 各层之间界面上的应力与位移连续, 令  $[L]_{l_i} = [D]_{l_i, \text{bottom}} [D]_{l_i, \text{top}}^{-1}$ , 则

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_i, \text{top}} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_i, \text{bottom}} = [L]_{l_i} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_i, \text{top}} \quad (1.3)$$

以此类推, 可以得到任意多层复合结构的位移与应力表达式为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_n, \text{top}} = [S] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}_{l_1, \text{top}} \quad (1.4)$$

其中,  $[S] = [L]_{l_1} [L]_{l_2} \cdots [L]_{l_{(n-1)}}$ .

假定沿复合结构传播的超声类兰姆波在每层中均是由沿正负  $Z$  方向传播的纵波和沿正负  $Z$  方向传播的横波合成的结果, 结合边界条件, 经过较为繁复的推导, 可以得到表达单层中波沿  $X$ 、 $Z$  方向上的位移、 $X$ - $Z$  平面上切应力、法应力与沿正负  $Z$  方向传播的纵、横波幅度的关系的方程组<sup>[13,16]</sup>:

如果复合结构的两个端面都满足自由边界条件, 可知在第一边界和最后边界上, 切应力和法向应力均为零, 即

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_i, \text{top}} = \begin{Bmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_i, \text{top}} = 0 \quad (1.5)$$

为使上式成立, 应使(1.4)式中的  $[S]$  矩阵满足下式:

$$f(\alpha_i, \beta_i, h_i, \rho_i, f, v) = S_{31} S_{42} - S_{41} S_{32} = 0 \quad i = 1 \cdots n \quad (1.6)$$

这就是描述沿多层复合结构传播的超声类兰姆波色散特性的特征方程。

由于已不存在几何上的对称性, 在超薄胶结复合结构中传播的超声类兰姆波不同于传统意义上的超声兰姆波, 已不能简单用对称模式与反对称模式来分类, 但同样地, 超声类兰姆波也可以以多种模式进行传播。由于本文使用低频超声类兰姆波对超薄胶结复合结构进行估计, 在此频率段, 沿超薄胶结复合结构样品表面传播的实际上是二阶模式的超声类兰姆波, 本文即是使用二阶模式的超声类兰姆波的色散特性对超薄胶结复合结构的参数进行定量估计<sup>[14]</sup>。

## 1.2 特性参数定量估计方法

低频超声类兰姆波胶结层参数定征方法即是通过在最小二乘误差意义上层状胶结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, 估算出胶结层的声学参数值, 胶结层参数的实验估计值应使下式取得最小值:



$$E(p) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\| f(\alpha, \beta, h, \rho, f, v') \right\|^2 \quad (1.7)$$

其中,  $j = 1, \dots, N$ ,  $N$  是超薄胶结层厚度与换能器频宽乘积带内对应的声速扫描点数,  $p$  为  $\alpha, \beta, h$  和  $\rho$  其中之一。

## 2 实验方法

### 2.1 实验系统与样品

实验测试系统如图 2.1 所示。一对精密匹配、中心频率为 1MHz 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, 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, 其采样频率  $S_r = 100\text{MHz}$  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 5min 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。

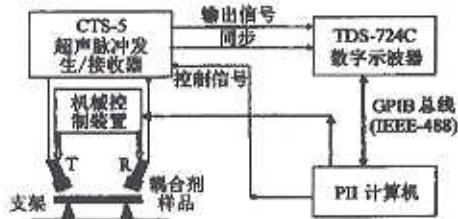


图 2.1 实验测试系统原理框图  
Fig. 2.1 Schedule of the experimental system

### 2.2 超声泄漏兰姆波频域分析方法

由于换能器与待测样品之间通过超声耦合剂耦合, 实际接收到的信号被称作超声泄漏兰姆波。正确调整系统传感器与材料空间位置及换能器之间距离, 可以获取漏超声兰姆波信号, 精确控制入射波入射角度, 在一段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, 就可以得到胶结复合结构的超声类兰姆波色散曲线。

## 3 结果与讨论

本文使用低频超声类兰姆波定征方法对铝/不锈钢胶结复合结构胶结层各参数进行了参数估计, 如表 3.1 为估计结果。

表 3.1 胶结复合结构胶结层各参数的估计结果

Tab.3.1 Estimated results of parameters of bonding structures

胶结层参数	参考值	估计值	相对误差%
$h/\mu\text{m}$	112	114	1.8
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.09	1.06	-2.8
$\alpha/\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	2.331	2.317	-0.6
$\beta/\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	1.107	1.055	-4.7

由表 3.1 可以看出, 低频超声类兰姆波定征方法能够对超薄胶结复合结构中胶结层的纵波声速、横波声速、厚度和密度参数进行定征, 具有较高的准确度。仔细分析比较可以看出, 该方法对纵波声速参数定征的准确度最好, 对厚度定征的准确度次之, 总体误差小于 2%, 但是对密度和横波声速的定征误差较大。经过分析发现, 低频超声类兰姆波定征方法对超薄胶结复合结构中胶结层各参数的估计误差主要是由换能器角度分辨率决定的类兰姆波声速测量误差引起的, 如图 3.1 所示为超声波在不同入射角  $\theta$  时可能带来的声速测量误差  $\delta$ 。由于实验中超声类兰姆波声速对应的角度范围大致在  $25^\circ$  附近, 可以看出在此范围中, 存在约 3% 的超声类兰姆波声速测量误差。

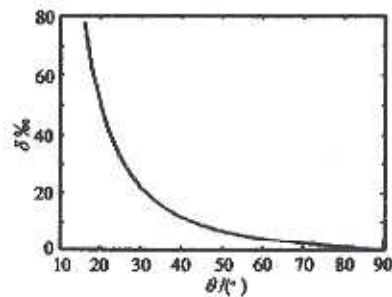


图 3.1 不同入射角对应的类兰姆波声速测量误差  
Fig.3.1 Velocity error measured vs. incident angle

图 3.2 为低频超声类兰姆波定征方法对超薄胶结复合结构中胶结层各声学参数的估计灵敏度曲线, 图中的  $p$  代表四种参数中的一种。从图 3.2((a) 对厚度和纵波声速; (b) 对密度和横波声速) 可以看出, 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估计时, 会带来估计误差。其大小不仅和超声类兰姆波的声速测量误差有关, 也与方法对不同参数的灵敏度、检测频带范围、样品厚度和

复合结构的组成等因素有关。总体来讲,方法对参数的灵敏度越大,参数估计误差越小,但不能简单地认为它们之间成反比的关系。结合两图发现,低频超声类兰姆波定征方法对纵波声速进行定征的灵敏度从总体上来讲大于对厚度定征的灵敏度,即在同样的超声类兰姆波声速测量误差条件下,对厚度的反演误差较大。低频超声类兰姆波定征方法对横波声速参数最不灵敏,也就意味着该方法对横波声速参数的反演误差最大。

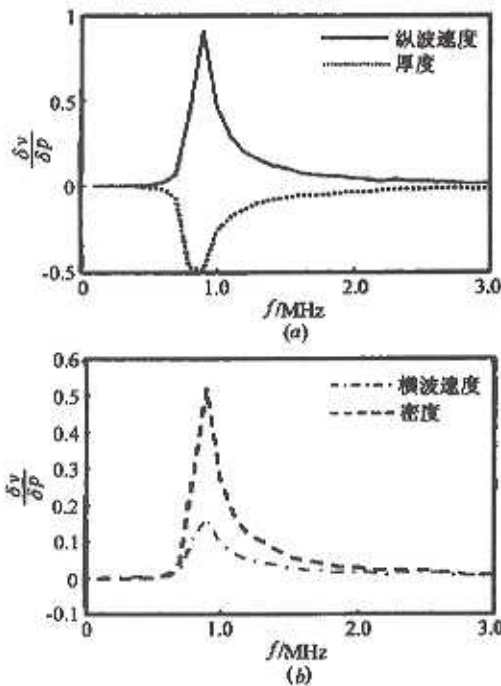


图 3.2 超薄胶结层各声学参数估计灵敏度分析

Fig.3.2 Sensitivity of acoustical parameters

综合上面的讨论,可以得到如下结论:低频超声类兰姆波超薄胶结层定征方法对胶结层各声学参数进行定征的准确度不仅和发射、接收换能器波束、频带特性有关,也与该方法对不同参数的灵敏度、样品厚度和组成、以及低频超声类兰姆波在超薄胶结复合结构中的传播特性等因素有关。

#### 4 结语

本文通过理论推导、灵敏度分析和实验验证,证实了一种新的低频超声类兰姆波波无损定征超薄胶结复合结构中胶结层各声学参数方法的有效性,该方法得到如下结论:

(1) 低频超声类兰姆波定征方法可以用来对超

薄胶结复合结构中胶结层的纵波声速、横波声速、厚度和密度参数进行定征。

(2) 对于超薄铝/不锈钢胶结复合结构,该方法可以有效地对  $h < 0.05\lambda$  的胶结层进行定征,除横波声速参数之外,估计误差不大于 3%。

(3) 低频超声类兰姆波定征方法对超薄胶结复合结构中各层的纵波声速定征最为准确,对横波声速参数的定征存在较大误差。

(4) 该定征方法的准确度不仅和发射、接收换能器波束、频带特性有关,也与方法对不同参数的灵敏度、样品厚度及组成、以及低频超声类兰姆波在超薄胶结复合结构中的传播特性等因素有关。

#### 参 考 文 献

- 1 Cawley P, Adams R. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites for composites and bonded joints. *NDT International*, 1988, 21: 208-222
- 2 Adams R D, Drinkwater B W. Nondestructive testing of adhesively-bonded joints. *NDT&E International*, 1997, 30(2): 93-98.
- 3 Rose J L, Ditri J J. Pulse-echo and through transmission Lamb wave techniques for adhesive bond inspection. *Brit J NDT*, 1992, 34: 591-594
- 4 Wan M X, Jiang B, Cao W W. Direct measurement of ultrasonic velocity of thin elastic layers. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(1): 626-628
- 5 张锐, 万明习, 钱明. 超薄弹性层低频超声频域定征方法. *计量学报*, 1998, 19(4): 291-298
- 6 张锐, 万明习, 孔欣洲, Cao W W. 低频多模式超声兰姆波超薄弹性层定征方法. *计量学报*, 2000, 21(1): 59-67
- 7 Rose J L, Ditri J J, Pilarski A. Lamb waves for aircraft bond inspection. *Journal for Italian Society for NDT*, 1994, 25: 7-15
- 8 Mal A K. Guided wave in layered solids with interface zone. *International Journal of Engineering Science*, 1988, 26: 873-881
- 9 Nagy P B, Laszlo A. Nondestructive evaluation of adhesive joints by guided waves. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(10): 4658-4664
- 10 Teller C M, Diecks K J, Bar-Cohen Y. Recent advances in the application of leaky lamb waves to the nondestructive evaluation of adhesive bonds. *Journal of Adhesion*, 1989, 30(1/4): 243-261
- 11 Mal A K, Xu P, Bar-Cohen Y. Leaky lamb waves for the ultrasonic non-destructive evaluation of adhesive bonds. *Transactions of the ASME Journal of Engineering*, 1990, 112(3): 255-263
- 12 Balasubramanian K, Issa C, Sullivan R. Quantitative evaluation of adhesive interface layer properties using ultrasonic dispersion technique. in *Rev Prog QNDE*, 1992, 1229-1236
- 13 Rose J L, Pilarski A, Ditri J J. An approach to guided wave mode selection for inspection of laminated plate. *J Reinforced Plastics and Composites*, 1993, 12(5): 134-142



## LOW FREQUENCY ULTRASONIC MULTI-MODE LAMB-LIKE WAVE METHOD FOR THE CHARACTERIZATION OF THE BONDING LAYER IN ULTRA-THIN ADHESIVE COMPOSITES

Zhang Rui Wan Mingxi Chen Xiao

(Department of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Cao Wenou

(Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University)

**Abstract** A low-frequency ultrasonic Lamb-like wave method suitable for characterizing the thickness, density, shear and longitudinal wave velocities of the bonding layer of an ultra-thin adhesive composite was presented. The dispersion property of the low frequency Lamb wave propagating along the ultra-thin adhesive composite was derived, forming the basis of the characterization method. Sources of the evaluation error for the parameters and sensitivity of the method for different parameters were analyzed. Using the ultrasonic coupler and a pair of broadband longitudinal wave transducers with 1MHz center frequency, one can successfully estimate the parameters of the ultra-thin bonding layer (having a thickness of  $112\mu\text{m}$ ) of aluminum/steel composite, employing the leaky guided wave frequency-domain analysis method.

**Key words** adhesive composites, ultrasonic QNDE, ultrasonic Lamb-like wave, dispersion property

•简讯•

### 中国兵工学会第二十九届弹药学术年会在成都举行

2001年9月19日至22日中国兵工学会弹药专业委员会与中国兵器科学研究院联合在成都召开了第二十九届弹药专业学术年会暨“九五”弹箭预研工作总结会。本次会议由中国兵工学会弹药专业委员会和四川省兵工学会共同承办。总装备部科技委、国防科工委系统工程二司、中国兵器工业集团公司科技部弹箭处、中国兵器装备集团公司西南地区部、总装炮兵技术研究所、总装轻武器论证研究所及有关的工厂、研究所、院校等29个单位近80位代表参加会议。

会议共收到学术论文75篇,经论文审查小组审议后出版了论文集,其中防空反导武器技术论文30篇,远程弹药技术论文11篇,其他弹药技术论文23篇。

会上,总装科技委马殿荣委员作了“弹药在武器系统中的地位及作用,未来战争对弹药需求”的学术报告,兵科院弹箭处李新龙处长作了“九五”弹箭预研工作总结报告,会议还邀请有关专家作了炮兵弹药发展趋势、小口径高炮在防空反导中的作用及地位、国外远程弹药技术等专题报告。

通过交流与讨论,与会代表进一步认识到弹药是武器系统中的核心部分,也是最活跃的部分,一代平台有多代弹药,一种弹药可用于多种平台。加强了武器系统观念,对要充分重视弹药与其他分系统的关系的思想,有了新的理解和认识。

(中国兵工学会弹药专业委员会)