



## 层状粘接复合结构界面力学参数 声导波定征方法\*

张 锐<sup>1</sup> 万明习<sup>1</sup> Cao Wenwu<sup>2</sup>

西安交通大学 西安 710049)<sup>1</sup>

Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802)<sup>2</sup>

### 摘 要

在推导层状粘接复合结构良好粘接及存在弱界面、滑移界面和脱层等几种不同界面条件下声导波的广义频散方程的基础上,分析了界面径向与轴向力学参数对声导波传播特性的影响,进一步提出以频散特性为基础的超声导波定征方法和在最小二乘意义下的反向算法对粘接复合结构层间界面力学参数进行了估计。分析了影响估计准确性的各种因素,研究了超声导波定征方法对粘接复合结构层间力学参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。

关键词:层状粘接复合结构;界面;超声导波;无损定征

中图分类号:TB553 文献标识码: A

### 1 引 言

层间界面力学特性是影响层状粘接复合结构总体力学性能的重要因素,在无损评价领域,对层状复合结构界面的联接质量进行检测一直是极其重要的研究课题。以往对联接界面的检测主要使用纵波垂直入射或倾斜入射层状复合结构并分析其反射或透射系数与界面特性之间的联系,但由于纵波在复合结构中激发的是垂直方向的应力,所以对于垂直方向应力连续,切向应力不连续的弱联接界面或滑移联接界面不灵敏。还有在遇到两种声阻抗差较小的联接界面情况下,如铝-铁层状复合结构,纵波检测方法灵敏度很低<sup>[1-4]</sup>。

与传统体波方法对应,具有多种传播模式和频散特性、沿层状复合结构传播的低频声导波同时激发法向和切向应力,它们的传播特性与层间界面力学特性密切相关,可以用来对层状复

\* 基金项目:本文受国家自然科学基金(69631020)和美国 Office of Naval Research 资助(00014-93-1-0340)

来稿日期:2000-01-19 修回日期:2000-03-13

第一作者简介:张锐,男,1973年生,博士,西安交通大学电子与信息学院生物医学工程系;研究方向:超薄层状复合结构超声波及其界面特性定征方法研究。

合结构的界面力学特征参数进行估计<sup>5-12]</sup>。本文在以往理论和研究工作基础上,推导得到了层状粘接复合结构良好粘接及存在弱界面、滑移界面和脱层等几种不同界面情况下声导波的广义频散方程,综合分析了界面径向与轴向力学参数对声导波传播特性的影响,进一步提出以频散特性为基础的超声导波定征方法和在最小二乘意义下的反向算法对粘接复合结构层间界面力学参数进行了估计,实验结果与理论符合的非常好。

## 2 理论分析

### 2.1 不同界面条件下声导波广义频散方程

如图 1 所示为  $n$  层粘接复合结构的示意图,第 0 层与第  $n+1$  层为空气组成的半无限大空间。复合结构在  $X$  轴和  $Y$  轴方向上的尺寸远大于  $Z$  轴方向上的尺寸,考虑沿多层粘接复合结构  $X$  轴方向传播的声导波传播特性,并假定沿层状复合结构传播的波在  $Y$  轴方向上的位移与应力梯度为零。

假定沿复合结构  $X$  轴方向传播的声导波在每层中均是由  $Z$  轴方向波矢分量  $k_z$  是沿  $\pm Z$  方向纵波和  $Z$  轴方向波矢分量  $k_z$  是沿  $\pm Z$  方向横波这四个波合成的结果,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  $X$  轴方向上的位移  $u_1$ 、 $Z$  轴方向上的位移  $u_2$ 、 $XOZ$  平面上切应力  $\sigma_{12}$ 、 $XOZ$  平面上法应力  $\sigma_{22}$  与沿正负  $Z$  轴方向传播的纵波幅度  $A_{L+}$ 、 $A_{L-}$  横波幅度  $A_{S+}$ 、 $A_{S-}$  的关系的方程组:

$$\begin{cases} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} k_1 g_a & \frac{k_1}{g_a} & C_{\beta} g_{\beta} & -\frac{C_{\beta}}{g_{\beta}} \\ C_a g_a & -\frac{C_a}{g_a} & -k_1 g_{\beta} & -\frac{k_1}{g_{\beta}} \\ i\rho B g_a & \frac{i\rho B}{g_a} & -2i\rho k_1 \beta^2 C_{\beta} g_{\beta} & \frac{2i\rho k_1 \beta^2 C_{\beta}}{g_{\beta}} \\ 2i\rho k_1 \beta^2 C_a g_a & -\frac{2i\rho k_1 \beta^2 C_a}{g_a} & i\rho b g_{\beta} & \frac{i\rho B}{g_{\beta}} \end{bmatrix} \begin{cases} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $C_a = (\omega^2 h^2 - k_1^2)^{1/2}$ ,  $C_{\beta} = (\omega^2 \beta^2 - k_1^2)^{1/2}$ ,  $g_a = e^{i(\omega^2 h^2 - k_1^2)^{1/2} z}$ ,  $g_{\beta} = e^{i(\omega^2 \beta^2 - k_1^2)^{1/2} z}$ ,  $B = \omega^2 - 2\beta^2 k_1^2$ ,  $k_1 = \frac{2\pi f}{v}$ ,  $k_1$  是声导波波数沿  $X$  轴方向的分量,  $f$  代表频率,  $i$  是虚部符号,  $a$ 、 $\beta$ 、 $h$  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声导波声速。

令 (1) 式中的  $4 \times 4$  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:

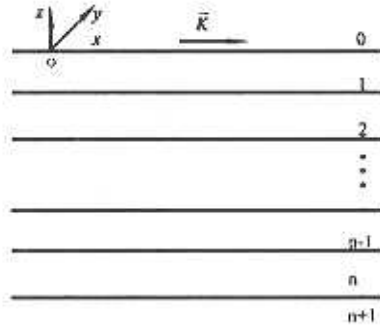


图 1 多层复合结构中声导波传播示意图

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{底}} = [D]_{l_1, \text{底}} [D]_{l_1, \text{顶}}^{-1} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{顶}} \quad (2)$$

在良好粘接条件下,界面两侧各层之间的剪切应力相等、切向位移相等,正应力相等和垂直方向上的位移相等,令  $[L]_{l_1} = [D]_{l_1, \text{底}} [D]_{l_1, \text{顶}}^{-1}$ , 则:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_2, \text{顶}} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{底}} = [L]_{l_1} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{顶}} \quad (3)$$

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:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_n, \text{底}} = [S] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{顶}} \quad (4)$$

其中,  $[S] = [L]_{l_1} [L]_{l_2} \cdots [L]_{l_n}$

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的边界上,切应力和法向应力均为零,即:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_n, \text{底}} = \begin{Bmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{顶}} = 0 \quad (5)$$

为使上式成立,应使 4) 式中的  $[S]$  矩阵满足下式:

$$f(\alpha_j, \beta_j, h_j, \rho_j, f, v) = S_{31} * S_{42} - S_{41} * S_{32} = 0 \quad j = 1 \cdots n \quad (6)$$

这就是在刚性联接界面情况下,描述沿多层复合结构传播的声导波频散特性的特征方程,  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$ ,  $h_j$  和  $\rho_j$  分别是各层的纵波声速、横波声速、厚度和密度。

在实际情况下,复合结构层间存在很薄的界面层,其力学参数与两边固体媒质力学参数不同。在复合结构或复合材料使用过程中,界面处会出现微裂纹,力学强度降低,形成弱界面层。弹簧模型可以描述平面状弱界面的物理特性,并由此可得到界面处力学量的边界条件。当  $m$  层  $m+1$  层之间界面为弱界面条件下,其边界条件满足<sup>[2]</sup>:

$$\tau_{22}|_{l_m, \text{底}} = \tau_{22}|_{l_{m+1}, \text{顶}} = K_n (u_2|_{l_m, \text{底}} - u_2|_{l_{m+1}, \text{顶}}) \quad (7)$$

$$\tau_{12}|_{l_m, \text{底}} = \tau_{12}|_{l_{m+1}, \text{顶}} = K_t (u_1|_{l_m, \text{底}} - u_1|_{l_{m+1}, \text{顶}}) \quad (8)$$

其中  $K_n$  和  $K_t$  分别是径向劲度系数与轴向劲度系数,它们与界面层媒质的厚度  $h_0$ 、等效体弹性模量  $K_0$  和切变模量  $G_0$  之间的关系为<sup>[2]</sup>:

$$K_n = (K_0 + \frac{4}{3}G_0) h_0; K_t = G_0 h_0 \quad (9)$$

此时可将复合结构分为  $1 \sim m$  层和  $m+1 \sim n$  层两部分,仍沿用 4) ~ 6) 式可得两传递矩阵:



$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_m, \text{底}} = [S^1] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_1, \text{顶}} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_m, \text{底}} = [S^2] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{l_{m+1}, \text{顶}} \quad (11)$$

将 (7) 和 (8) 式代入 (8)、(9) 式中, 经过较为繁复的推导, 可以得到描述当  $m$  层  $m+1$  层之间界面为弱界面条件下声导波的频散方程为:

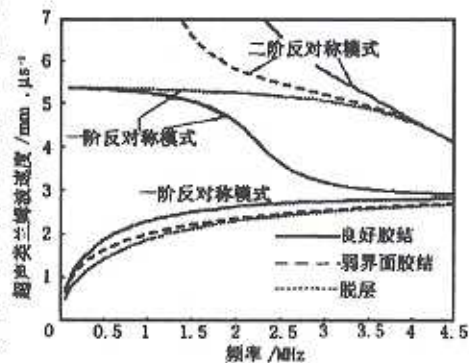
$$f(\alpha_j, \beta_j, h_j, \rho_j, f, \nu, K_n, K_t) = \begin{bmatrix} S_{31}^1 & S_{32}^1 & S_{33}^1 & S_{34}^1 \\ S_{41}^1 & S_{42}^1 & S_{43}^1 & S_{44}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11}^2 + S_{41}^2 K_t & S_{12}^2 + S_{42}^2 K_t \\ S_{21}^2 + S_{31}^2 K_n & S_{22}^2 + S_{32}^2 K_n \\ S_{31}^2 & S_{32}^2 \\ S_{41}^2 & S_{42}^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

$j = 1 \cdots n$

## 2.2 弱界面条件下声导波传播特性数值分析

为突出界面力学特性对层状粘接复合结构声导波频散特性的影响, 数值计算和本文实验结果均是由同样厚度单一材料构成的双层复合结构为基础的。利用式 (6) 和公式 (12), 我们计算了铝质双层复合结构良好粘接及存在弱界面和脱层界面情况下最低阶三种模式的声导波频散曲线, 分别用实线、虚线和点线表示, 如图 2 所示。其中弱界面情况下,  $K_t$  为  $0.3 \times 10^{14} \text{ N M}^3$ , 而  $K_n$  为无穷大, 其它样品参数在图中给出。

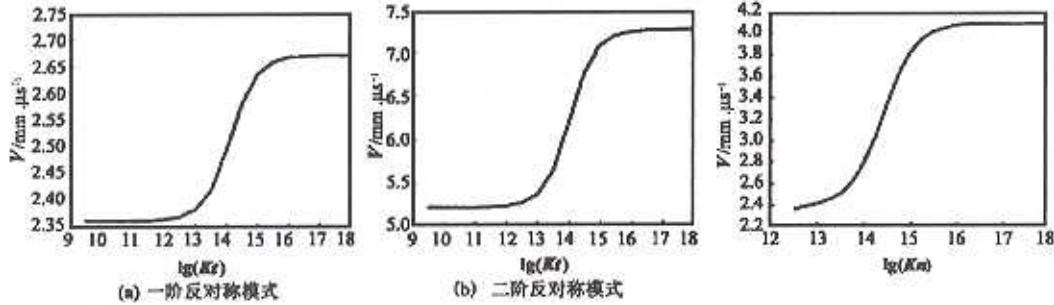
分析图 2 可以看出, 当层状粘接复合结构界面处为弱界面情况下, 对于等厚薄层构成双层复合结构而言, 轴向劲度系数的数值大小对对称模式导波的频散特性影响很小, 以至于弱界面情况下层状粘接复合结构的一阶对称模式声导波频散曲线与良好粘接情况下几乎完全重叠在一起而难于分辨。但另一方面, 轴向劲度系数则显著改变反对称模式导波的频散特性。我们尝试在保持径向劲度系数很大且不变的前提下, 使轴向劲度系数在无穷大和无穷小之间改变, 结果发现当层状粘接复合结构轴向劲度系数趋近于无穷大的情况下, 其频散特性与良好粘接情况下的反对称模式声导波频散特性完全相同, 而当轴向劲度系数趋近于零的时候, 一阶反对称模式导波的频散特性趋向于脱层界面情况下一阶反对称模式的导波频散特性, 而二阶反对称模式导波的频散特性趋向于脱层界面情况下一阶对称模式的导波频散特性。



$$\begin{aligned} b_1 &= 6.407 \text{ mm } f_{\text{as}}, \nu_s = 3.010 \text{ mm } f_{\text{as}}, \\ \rho &= 2.640 \text{ g } \text{cm}^{-3}, h_1 = h_2 = 0.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

图 2 存在不同界面情况下铝质复合结构频散曲线

实际上,轴向劲度系数趋近于零的界面又常称之为滑移界面,即界面能承受垂直于界面的法向应力,而界面上的切向应力恒为零,处于滑移界面两边的法向应力和位移连续,但切向位移不连续<sup>[5]</sup>。如图 3 (a)和图 3 (b)所示为频率为 2.25MHz 的声导波一阶和二阶反对称模式导波的传播速度与  $K_t$  之间的关系。

图 3 弱界面条件下低阶声导波速度与  $K_t$  关系图 4 一阶对称模式声导波速度与  $K_n$  关系

对应地,我们注意到当  $K_t$  趋近于零的时候, $K_n$  的大小并不影响一阶和二阶反对称模式的导波频散特性,但它与一阶对称模式导波的频散特性之间有着直接的关系。如图 4 所示为频率为 2.25MHz 的声导波一阶对称模式导波的传播速度与  $K_n$  之间的关系。从图中可以看出,当  $K_n$  逐渐变小的情况下,一阶对称模式的导波传播速度减小。

通过上述分析得知,从总体上讲, $K_t$  和  $K_n$  的减小都会使声导波的传播速度减小。但由式(9)可以看出  $G_0$  对径向劲度系数与轴向劲度系数的影响更为主要,所以当  $G_0$  数值较大时,复合结构声导波频散特性趋向于良好粘接情况下声导波频散特性,当  $G_0$  和  $K_0$  同时趋向于零的情况下,复合结构声导波频散特性趋向于脱层界面情况下声导波频散特性。

### 2.3 界面力学参数声导波定征方法

上述研究表明, $K_t$  数值大小与反对称模式声导波的频散特性之间存在直接的关系,对应地, $K_n$  显著影响对称模式声导波的频散特性。所以,超声导波界面力学参数定征方法即是通过在最小二乘误差意义上结合层状复合结构一阶对称模式、二阶反对称模式声导波色散曲线与理论色散特性曲线的比较,估算出层状复合结构界面力学参数的数值, $K_t$ 、 $K_n$  的实验估计值应使下式取得最小值:

$$E(K_n, K_t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|f(\alpha_j, \beta_j, h_j, \rho_j, \rho', \nu', K_n, K_t)\|^2 \quad (13)$$

其中  $j = 1 \cdots N$ ,  $N$  是超薄层状复合结构厚度与换能器频宽乘积带内对应的速度扫描点数。正确测量超声导波色散曲线之后,本文使用割线法解出使公式(13)中  $E(K_n, K_t)$  为最小的界面力学参数值,迭代初值为界面力学参数的预估值,在界面力学参数真值的约  $\pm 30\%$  范围内。

## 3 实 验

### 3.1 实验系统与样品

实验测试系统如图 2 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, 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  $0.5^\circ$ 。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  $S_p = 100\text{MHz}$  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 5 分钟的多次采样, 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。

实验采用均为  $0.5\text{mm}$  厚的铝箔作为四种具有不同粘界面力学特性双层粘接复合结构样品的基本材料, 在制作样品前, 铝箔的纵波声速、横波声速、厚度和密度参数的参考值是在美国宾夕法尼亚州购买时由商家提供的, 并使用电子测厚仪进行校准, 仪器的测量误差是  $\pm 2.54\mu\text{m}$ 。样品参数在实验结果中附带给出。整个实验在恒温环境中进行, 温度控制在  $22 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

### 3.2 结果与讨论

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导波。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, 采用超声泄漏导波频域分析方法, 就可以得到粘接复合结构的超声导波色散曲线<sup>[3]</sup>。弱胶结双层粘接复合结构的频散曲线测试数据如图 6 所示, 由小圈代表。

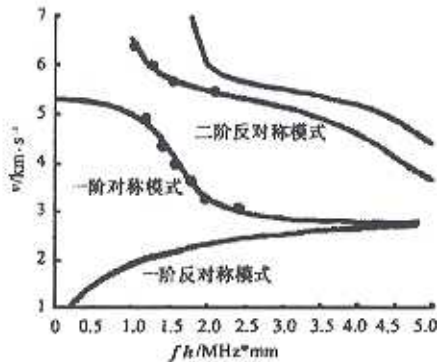


图 6 双层粘接复合结构三号样品的频散曲线测试数据

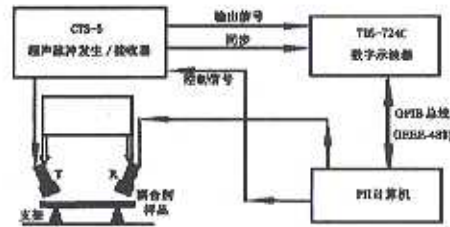
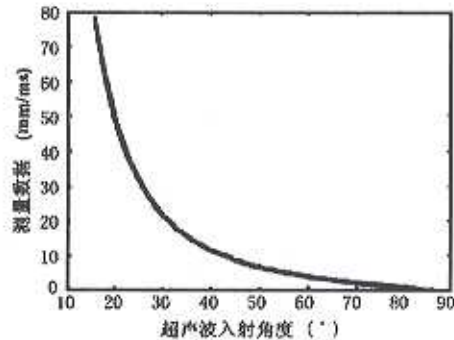


图 5 实验测试系统原理框图



传感器角度分辨率为  $0.5^\circ$

图 7 不同入射角对应的导波声速测量误差

如表 1 所示为使用超声导波定征方法对铝质双层粘接复合结构层间轴向劲度系数和径向劲度系数参数进行估计的结果。

表 1 双层粘接复合结构层间力学参数声导波定征方法估计结果 (单位:  $10^{14}$  牛顿 /米<sup>3</sup>)

样品	径向劲度系数	轴向劲度系数
样品一 (强胶结)	3.92	2.18
样品二 (中度胶结)	1.29	0.77
样品三 (弱胶结)	0.55	0.37
样品四 (脱层)	0	0

经分析发现,低频超声导波定征方法对层状粘接复合结构界面力学参数的估计误差主要是由实验声速测量误差引起的,而实验声速测量误差与超声波换能器角度分辨率之间存在直接的关系,如图 7 所示为超声波在不同入射角度时可能带来的超声导波声速测量误差。可以看出在不同入射角度下,超声导波的实验测量误差,本文实验中超声导波声速对应的角度范围大致在  $15^\circ$  附近,可以看出在此范围中,存在约 1% 的超声导波声速测量误差。

综合上面的讨论,可以得到下面的结论:低频超声导波层状粘接复合结构层间界面力学参数定征方法对界面力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,也与样品构成以及低频超声导波在超薄粘接复合结构中的传播特性等因素有关。

## 4 结 语

本文推导了层状粘接复合结构良好粘接及存在弱界面、滑移界面和脱层等几种不同界面条件下声导波的广义频散方程,通过数值计算和实验验证,证实了一种新的超声导波定征方法对层状粘接复合结构层间界面力学参数进行了估计,该方法得到如下结论:

- 1) 轴向劲度系数的数值大小对对称模式导波的频散特性影响很小,但轴向劲度系数则显著改变反对称模式导波的频散特性。
- 2) 当层状粘接复合结构轴向劲度系数趋近于无穷大的情况下,其频散特性与良好粘接情况下的反对称模式声导波频散特性完全相同;而当轴向劲度系数趋近于零的时候,一阶反对称模式导波的频散特性趋向于脱层界面情况下一阶反对称模式的导波散特性,而二阶反对称模式导波的频散特性趋向于脱层界面情况下一阶对称模式的导波频散特性。
- 3) 从总体上讲,  $K_t$  和  $K_n$  的减小都会使声导波的传播速度减小。当  $G_0$  数值较大时,复合结构声导波频散特性趋向于良好粘接情况下声导波频散特性,当  $G_0$  和  $K_0$  同时趋向于零的情况下,复合结构声导波频散特性趋向于脱层界面情况下声导波频散特性。
- 4) 综合对称与反对称模式声导波频散特性,可以同时(layered adhesive composite structure)轴向劲度系数和径向劲度系数进行定征。

## 参 考 文 献

- 1 P. Cawley and R. Adams. "A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites for composites and bonded joints", NDT International, 1988, 21: 208~222
- 2 R. D. Adams and B. W. Drinkwater. "Nondestructive testing of adhesively-bonded joints", NDT&E International, 1997, 30 (2): 93~98



- 3 J. L. Rose and J. J. Ditre, "Pulse-echo and through transmission Lamb wave techniques for adhesive bond inspection", Brit. J. NDT, 1992, 34: 591~594
- 4 王耀俊, 具有刚性联接界面和滑移界面的层状固体媒质的声导波, 声学学报, 1992, 17: 81~92
- 5 A. K. Mal, "Guided wave in layered solids with interface zone", International Journal of Engineering Science, 1988, 26: 873~881
- 6 K. Balasubramaniam, C. Issa et al., "Quantitative evaluation of adhesive interface layer properties using ultrasonic dispersion technique," in Rev. Prog. QNDE, 1992, 1229~1236
- 7 J. L. Rose, A. Pilarski et al., "An approach to guided wave mode selection for inspection of laminated Plate", J. Reinforced plastics and composites, 1993, 12 (5)
- 8 J. L. Rose, J. J. Ditre et al., "Lamb waves for aircraft bond inspection", Journal for italian society for NDT, Dec. 1994
- 9 Wang Yao-jun, Ning Wei et al., "Lamb wave modes in a two-layered solid medium with a weak interface", Acta physical Sinica (overseas edition), 1994, 3 (8): 561~566
- 10 M. J. S. Lowe, "Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Contr., 1995, 42 (4): 525~542
- 11 Ning Wei and Wang Yao-jun, "Effect of interface layer on lamb wave propagation in solid adhesive joint: a perturbation model", Acta Physical Sinica (overseas Edition), 1995, 4 (6): 428~433
- 12 杜光升, 王耀俊, 袁忆非, 赵庆昌, 具有弱界面的柱状复合结构中轴对称声导波, 物理学报, 1998, 47 (1): 27~33
- 13 Karpur P., Benson D. M., Matikas T. E., Kundu T., Nicolau P. D., "An Approach to determine the experimental transmitter-receiver geometry for the reception of Leaky Lamb Waves," Material evaluation, 1995, 53 (2): 1348~1352





## The Guided Wave Characterization Method for the Interfacial Mechanical Property of the Layered Bonding Composite

Zhang Rui<sup>1</sup> Wan Mingxi<sup>1</sup> Gao Wenwu<sup>2</sup>

(Department of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049)<sup>1</sup>

(Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, 16802)<sup>2</sup>

### Abstract

The generalized dispersion equations for guided waves in layered bonding composites with perfect, weak, slip or unbonded interfaces are derived. The effect of the interfacial mechanical properties on the propagation properties of ultrasonic Lamb waves are analyzed by calculating the dispersion curves of the two-layer bonding composites with different bonding conditions. In conjunction with the method of least square, the secant algorithm is used to estimate the interfacial radial and axial elastic coefficients of the layered bonding composite. The reasons for evaluation error of the parameters and the sensitivity of the method for different parameters are analyzed.

**Keywords:** *layered bonding composite, interface guides wave, nondestructive characterization.*

## A Unified Classical Maximum Likelihood Approach for Estimating P-S-N Curves of Three Commonly Used Fatigue Stress-Life Relations

Zhao Yongxiang<sup>1</sup> Wang Jinnuo<sup>1</sup> Gao Qing<sup>2</sup>

(Institute of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)<sup>1</sup>

(Institute of Applied Mechanics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)<sup>2</sup>

### Abstract

A unified classical maximum likelihood approach for estimating P-S-N curves of the three commonly used fatigue stress-life relations, namely three parameter, Langer and Basquin, is presented by extrapolating the classical maximum likelihood method to the Langer relation. This approach is applied to deal with the S-N data obtained from a so-called maximum likelihood method-fatigue test. In the test, a group of specimens are tested at a so-called reference load, which is specially taken care of by practice, and residual specimens are individually fatigued at different loads. The approach takes a basis of the local statistical parameters of the logarithms of fatigue lives at the reference load. According to an assumption that the material constants in each relation are concurrently in same probabilistic level, the curves is described by a general form of mean and standard deviation curves of the

