

文章编号: 0255-8297(2001)02-0107-06

低频超声类兰姆波超薄黏结复合结构定征方法

张锐¹, 万明习¹, CAO Wen-wu²

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院 生物医学工程与仪器系, 陕西 西安 710049;

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

摘要: 提出用低频超声类兰姆波定征方法来估计超薄黏结复合结构各层与黏结层的厚度、密度、纵波声速和横波声速等参数。采用超声耦合剂耦合方式, 结合超声泄漏类兰姆波频域分析方法获取黏结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超薄黏结复合结构各层与黏结层进行了参数估计。还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黏结复合结构中各层参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。实验结果证实, 对于超薄不锈钢/黄铜黏结复合结构, 该方法能够准确估计各层 $h < 0.05\lambda$ 复合结构的声学参数。

关键词: 黏结复合结构; 超声定量无损定征; 超声类兰姆波; 色散特性

中图分类号: TB533 文献标识码: A

Low Frequency Ultrasonic Multi-mode Lamb-like Wave Method for Characterizing the Ultra-thin Bonding Composite

ZHANG Rui¹, WAN Ming-xi¹, 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 ultrasonic Lamb-like wave method suitable for characterizing the thickness, density, shear and longitudinal wave velocities of the ultra-thin bonding composite is presented. The dispersion property of the low frequency Lamb-like wave propagating along the ultra-thin bonding composite is derived, which is the basis of the characterization method. In conjunction with the method of the least square, the secant algorithm is used to estimate each layer's parameters of the ultra-thin bonding composite. The reasons for evaluation error of the parameters and the sensitivity of the method for different parameters are analyzed. Using the ultrasound coupler and a pair of broadband longitudinal wave transducers with 1MHz center frequency, we can successfully estimate the parameters of the ultra-thin bonding layer (with h of each layer smaller than 0.05λ) of the steel/brass composite by employing the leaky guided wave frequency-domain analysis method.

Key words: bonding composites; ultrasonic QNDE; ultrasonic Lamb-like wave; dispersion property

近年来, 在航空、航天、信息科学和生物医学工程等众多领域的多种新型层状信息、功能和智能黏

结复合结构被广泛应用与研究。利用超声波对其各层与黏结层的声学、力学和界面特性进行原位、无损

收稿日期: 2000-01-06 修订日期: 2000-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(69631020); 美国 Office of Naval Research (Grant # N00014-93-1-0340) 资助项目

作者简介: 张锐(1973-), 男, 陕西西安人, 博士; 万明习(1962-), 男, 湖北天门人, 教授, 博导; CAO Wen-wu(1957-), 男, 吉林长春人, 教授, 博导。

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^[1-6]。

当复合结构各层与黏结层的厚度都很‘薄’的情况下,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遇到困难,这里‘薄’的概念是指黏结层厚度 h 小于其中的超声波波长 λ ,以致无法在时域上区分材料前后界面的各次回波信号^[1]。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。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,例如,当黏结层厚度为 $10\mu\text{m}$ 左右时,使用频率为 150MHz 以上的超声波进行检测。但是如此高频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,材料中的各种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。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 0.1λ 的超薄黏结层进行参数定征,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^[4,5]。我们希望寻找一种方便准确的低频超声波多参数定征方法,能够对超薄黏结层进行更为全面的估计。

与传统体积波方法对应,具有多种传播模式和频散特性,沿黏结复合结构传播的超声类兰姆波是一种超声导波,它同时激发法向和切向应力,其传播特性与各层及黏结层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等多种参数有着直接的关系,信号中蕴涵的信息远多于传统体积波方法,可以用来对超薄黏结复合结构进行多参数的定征^[6-10]。本文提出以低频超声类兰姆波频散特性为基础的超薄黏结复合结构定

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复合结构各层及黏结层的纵波声速、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。实验结果与理论符合得非常好。

1 方法

1.1 低频类兰姆波定征方法

图1为黏结复合结构的示意图,层1和层3是被黏结层,层2即是厚度很‘薄’的黏结层。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。

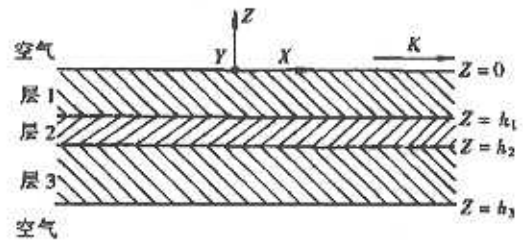


图1 黏结复合结构中超声类兰姆波传播示意图

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, $X-Y$ 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^[13,16]

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

其中, $C_{\alpha} = (\omega^2/\alpha^2 - k_1^2)^{1/2}$, $C_{\beta} = (\omega^2/\beta^2 - k_1^2)^{1/2}$, $g_{\alpha} = e^{i(\omega^2/\alpha^2 - k_1^2)^{1/2}x_i}$, $g_{\beta} = e^{i(\omega^2/\beta^2 - k_1^2)^{1/2}x_i}$, $B = \omega^2 - 2\beta^2 k_1^2$; $k_1 = \frac{2\pi f}{v}$, 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, α 、 β 、 h 和 ρ 分别是层的纵波声速、横波声速、厚度和密度, v 代表层中沿 x 方向传播的超声兰姆波声速。

令式(1)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:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{bottom}} = D_{i, \text{bottom}} D_{i, \text{top}}^{-1} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{top}} \quad (2)$$

在良好黏结条件下, 各层之间界面上的剪切应力及切向位移相等, 正应力及垂直方向上的位移相等, 令 $L_i = D_{i, \text{bottom}} D_{i, \text{top}}^{-1}$, 则

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{top}} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{bottom}} = L_i \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{top}} \quad (3)$$

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

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{bottom}} = S \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{top}} \quad (4)$$

其中 $S = L_i L_{i-1} \dots L_{i, n-1} L_{i, 1}$ 。

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

$$\begin{pmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{bottom}} = \begin{pmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{i, \text{top}} = 0 \quad (5)$$

为使上式成立, 应使式(4)中的 S 矩阵满足下式

$$F(\alpha, \beta, h, \rho, f, v) = S_{31} \cdot S_{42} - S_{41} \cdot S_{32} = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

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, 在超薄黏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黏结复合结构进行估计, 在此频率段沿超薄黏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, 本文就是使用二阶模式的超声类兰姆波的色散特性对超薄黏结复合结构的参数进行定量估计^[14]。

1.2 特性参数定量估计方法

低频超声类兰姆波黏结复合结构参数定征方法即是通过在最小二乘误差意义上层状黏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, 估算出各层的声学参数值。各层参数的实验估计值应使下式取得最小值。

$$E(p) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| F(\alpha, \beta, h, \rho, f^j, v^j) \|^2 \quad (j = 1, \dots, N) \quad (7)$$

其中 N 是换能器频带内对应的声速扫描点数, p 为 α 、 β 、 h 和 ρ 其中之一。在正确测得超声类兰姆波色散曲线之后, 本文使用割线法解出使公式(7)中 $E(p)$ 为最小的各层参数值, 它的优点是一定能够收敛得到终值。迭代初值为各层参数真值约 $\pm 30\%$ 范围内的一个预估值。

2 实验方法

2.1 实验系统与样品

实验测试系统如图 2 所示, 一对精密匹配的中心频率为 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°。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 $S_r = 100\text{MHz}$ 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。

实验采用不锈钢和黄铜(铜 70%, 锌 30%)作为黏结复合结构的基本材料,在制作样品前,不锈钢和黄铜层的纵波声速、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,黏结层的厚度是黏结复合结构厚度减去不锈钢和黄铜层厚度的结果,仪器的测量误差是 $\pm 2.54\mu\text{m}$ 。样品各层参数在实验结果中附带给给出,整个实验在恒温环境中进行,吸水水槽内的水温控制在 $22 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

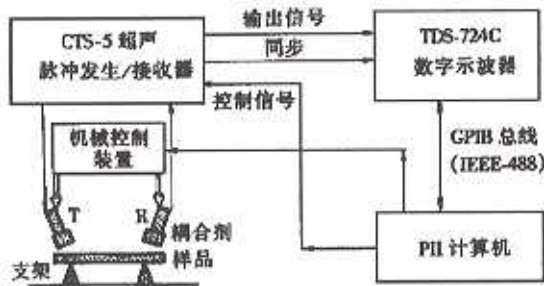


图2 实验测试系统原理框图

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,可以获取泄漏超声兰姆波信号,然后通过分析信号的频谱,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;并且在频域上存在一些峰值点,这些谱峰即意味着此频率处的泄漏超声兰姆波信号的声速是换能器主波束方向与材料表面的夹角对应的超声兰姆波声速^[15,16]。所以,超声泄漏兰姆波频域分析方法的核是控制入射及接收角度以选择和决定何种模式的超声兰姆波以多大的声速沿复合结构传播,再确定此声速的超声兰姆波对应的频率成分。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,就可以得到黏结复合结构的超声类兰姆波色散曲线。如图3所示为对黏结复合结构样品的测试数据,图中各条曲线分别对应于不同模式的超声类兰姆波的理论频散特性,小圈的中心即实验测量得到的频散数据。

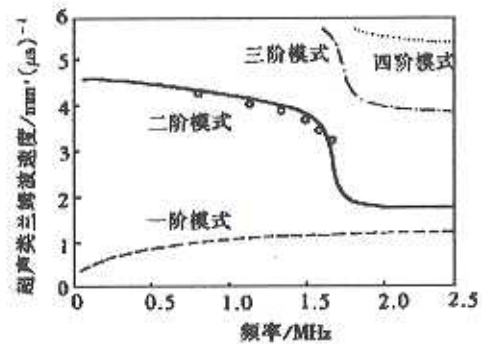


图3 低频超声类兰姆波色散实验数据

样品各层参数: 不锈钢层 $\alpha=5.794\text{m}/\mu\text{s}$, $\beta=3.103\text{m}/\mu\text{s}$,
 $h=158\mu\text{m}$
 黏结层 $\alpha=2.331\text{m}/\mu\text{s}$, $\beta=1.107\text{m}/\mu\text{s}$,
 $h=86\mu\text{m}$
 黄铜层 $\alpha=4.706\text{m}/\mu\text{s}$, $\beta=2.090\text{m}/\mu\text{s}$,
 $h=112\mu\text{m}$

3 结果与讨论

本文使用低频超声类兰姆波定征方法对不锈钢/黄铜黏结复合结构各层参数进行了参数估计,表中为估计结果。

表 低频超声类兰姆波定征方法对黏结复合结构各层参数的估计结果

	参数	参考值	估计值	相对误差(%)
不锈钢层	$h(\mu\text{m})$	158	160	1.5
	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	7.90	7.99	1.2
	$\alpha(\text{m}/\mu\text{s})$	5.794	5.630	-2.9
	$\beta(\text{m}/\mu\text{s})$	3.103	3.031	-2.4
黏结层	$h(\mu\text{m})$	86	87	1.3
	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.09	1.07	-1.4
	$\alpha(\text{m}/\mu\text{s})$	2.331	2.319	-0.5
	$\beta(\text{m}/\mu\text{s})$	1.107	1.080	-2.5
黄铜层	$h(\mu\text{m})$	112	114	1.7
	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	8.56	8.69	1.6
	$\alpha(\text{m}/\mu\text{s})$	4.706	4.433	-5.8
	$\beta(\text{m}/\mu\text{s})$	2.090	2.065	-1.2

由表可以看出,低频超声类兰姆波定征方法能够对超薄黏结复合结构中各层及黏结层的纵波声速、横波声速、厚度和密度参数进行定征,具有较高的准确度。仔细比较可以看出,总体上该方法对黏结层的参数定征的准确度较好,而在4种参数中,对纵波声速参数定征的准确度最好,对厚度和密度定征的准确度次之,参数估计误差小于2%。低频超声类兰姆波定征方法对不锈钢层和黄铜层的定征准确度相近,但方法对黄铜层的纵波声速的定征准确度存

在较大的误差, 经过分析发现, 低频超声类兰姆波定征方法对超薄黏结复合结构中黏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 4 所示为超声波在不同入射角度时可能带来的超声类兰姆波声速测量误差。由于实验中超声类兰姆波声速对应的角度范围大致在 25° 附近, 可以看出在此范围中存在约 1% 的超声类兰姆波声速测量误差。

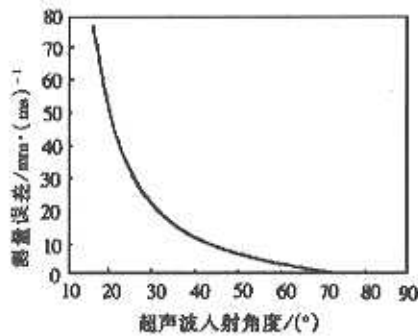


图 4 不同入射角对应的类兰姆波声速测量误差 (传感器角度分辨率为 0.5°)

图 5 为低频超声类兰姆波定征方法对超薄黏结复合结构中各层声学参数的灵敏度曲线, 它们是通过下式计算得到的

$$\frac{\partial v}{\partial p} = \lim_{p' \rightarrow p} \frac{(v' - v)p'}{v'(p' - p)} \quad (8)$$

其中, p 为 α 、 β 、 h 和 ρ 其中之一, p' 为介质参数真实值, p' 为介质参数真实值附近的数值, v 为兰姆波声速真实值, v' 为介质参数为 p' 时兰姆波声速数值。

综合图 5 中 4 个分图, 可以得到下面结论: 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; 误差的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则参数估计误差越小, 但不能简单地认为它们之间成反比的关系。结合这 4 个分图也从理论上解释了低频超声类兰姆波定征方法对黏结层参数进行定征的灵敏度从总体上来讲大于对其余各层参数的定征灵敏度的原因。即在同样的超声类兰姆波声速测量误差条件下, 对不锈钢层和黄铜层参数的估计误差较对黏结层参数的估计误差大。在黏结层的 4 种参数中, 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。

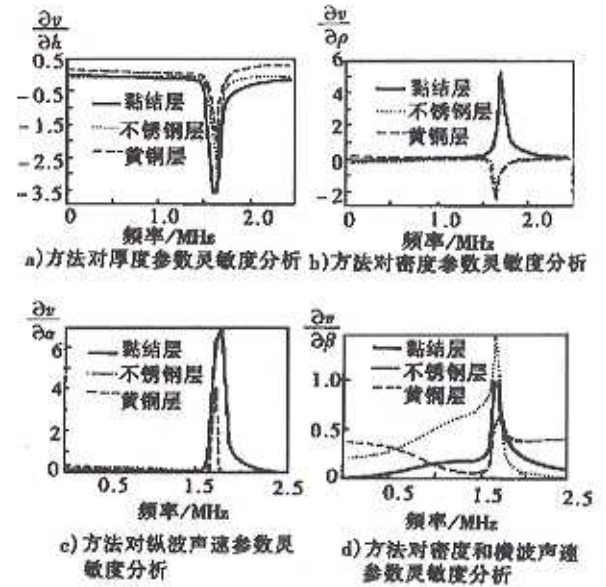


图 5 低频超声类兰姆波定征方法对超薄黏结层各声学参数估计的灵敏度分析

综合上面的讨论, 可以得到结论: 低频超声类兰姆波超薄黏结复合结构定征方法对各层与黏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黏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无损定征超薄黏结复合结构中各层声学参数方法的有效性, 由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黏结复合结构中各层与黏结层的纵波声速、横波声速、厚度和密度参数进行定征。

(2) 对于超薄不锈钢/黄铜黏结复合结构, 该方法可以有效地对 $h < 0.05\lambda$ 的各层进行定征, 除对黄铜层的纵波声速参数之外, 估计误差不大于 3%。

(3) 低频超声类兰姆波定征方法对超薄黏结复合结构中黏结层的参数定征准确度较其他层高, 但对横波声速参数的定征误差较大。

(4) 该定征方法的准确度不仅和发射、接收换

能器波束及频带特性有关,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黏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 and bonded joints[J]. *NDT International*, 1988, 21: 208 - 222.
- [2] Adams R D, Drinkwater B W. Nondestructive testing of adhesively-bonded joints[J]. *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[J]. *Brit J NDT*, 1992, 34: 591 - 594.
- [4] Wan Mingxi, Jiang B, Cao Wenwu. Direct measurement of ultrasonic velocity of thin elastic layers[J]. *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[J]. *计量学报*, 1998, 19(4): 291 - 298.
- [6] 张锐, 万明习, 巩欣洲, Cao Wenwu. 低频多模式超声兰姆波超薄弹性层定征方法[J]. *计量学报*, 1999, 20(4): 1 - 9.
- [7] Rose J L, Ditri J J, Pilarski A. Lamb waves for aircraft bond inspection[J]. *Journal for Italian Society for NDT*. Dec 1994.
- [8] Mal A K. Guided wave in layered solids with interface zone[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1988, 26: 873 - 881.
- [9] Nagy Peter B, Adler Laszlo. Nondestructive evaluation of adhesive joints by guided waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(10): 4658 - 4664.
- [10] Teller Cecil M, Diecks K, Jerome Bar-Cohen Yoseph. Recent advances in the application of leaky Lamb waves to the nondestructive evaluation of adhesive bonds[J]. *Journal of Adhesion*, 1989, 30(1/4): 243 - 261.
- [11] Mal A jit K, Xu Pei-cheng, Bar-Cohen Yoseph. Leaky Lamb waves for the ultrasonic nondestructive evaluation of adhesive bonds[J]. *Transactions of the ASME Journal of Engineering*, 1990, 112(3): 255 - 263.
- [12] Balasubramaniam K, Issa C, Sullivan. Quantitative evaluation of adhesive interface layer properties using ultrasonic dispersion technique[C]. in *Rev Prog QNDE*, 1992, 1229 - 1236.
- [13] Lowe M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Contr*, 1995, 42(4): 525 - 542.
- [14] Rose J L, Pilarski A, Ditri J J. An approach to guided wave mode selection for inspection of laminated plate[J]. *J Reinforced Plastics and Composites*, 1993, 12(5).
- [15] Karpur P, Benson D M, Matikas T E, et al. An approach to determine the experimental transmitter-receiver geometry for the reception of leaky Lamb waves[J]. *Material Evaluation*, 1995, 53(12): 1348 - 1352.
- [16] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb Wave: Physical Theory and Application [M]. New York: Plenum Press, 1967. 67 - 144.