

文章编号: 1000-1158(2000)01-0059-09

低频多模式超声兰姆波超薄弹性层定征方法

张 锐¹, 万明习¹, 巩欣洲¹, Cao Wenwu²

(1. 西安交通大学生物医学工程与仪器系, 西安 710049; 2. Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802, USA)

摘要: 提出了用低频多模式超声兰姆波定征方法来估计超薄弹性层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数。这里“超薄”是指材料厚度 h 远小于材料中的声波波长 λ , 由此导致在时域上材料前后界面的各次回波信号相互混迭。文中采用水浸耦合方式, 结合空间波场设计和泄漏兰姆波频域分析方法获取了材料零阶对称与反对称模式兰姆波色散曲线, 并以色散特性为基础的零阶对称模式兰姆波定征方法、简化方法、零阶反对称模式兰姆波定征方法和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, 研究了低频多模式超声兰姆波定征方法对各材料参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。实验结果表明, 该方法能够准确估计厚度小到 $26\mu\text{m}$ 铝箔的材料参数。

关键词: 超薄弹性层; 超声定征; 兰姆波; 定量无损估计

中图分类号: TB551 **文献标识码:** A

1 引言

在对诸如材料表面保护涂层、粘贴型复合材料粘贴层、稀有金属箔状材料、心脏瓣膜等多种超薄层状材料或结构进行超声波测试时, 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, 只适用于测试 $h > \lambda$ (h 为材料厚度, λ 为测量声波在材料中的波长) 的样本^[1-4]。这里“超薄”是指材料厚度 h 远小于材料中的声波波长 λ 。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, 但是当使用上百兆赫高频超声波检测超薄层材料或结构时, 材料对声波的衰减很大, 探测深度受到限制; 并且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。国内外学者提出用低频频域定征方法和低频直接测量方法来对厚度小到 0.01λ 的超薄层材料进行参数定征, 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^[5-10]。我们希望寻找一种方便准确的低频超声波参数定征方法, 使之能对超薄层状材料参数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色散特性、沿薄板传播的兰姆波是一种超声波导波, 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

收稿日期: 1998-12-26; 修订日期: 1999-03-10

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

号中蕴涵的信息远多于传统体积波方法,可以用来对超薄弹性层进行多参数的定征^[11-15]。本文提出用低频多模式兰姆波色散特性为基础的零阶对称模式兰姆波定征方法、简化方法、零阶反对称模式兰姆波定征方法和在最小二乘意义下以低频多模式兰姆波色散曲线为基础的反向算法对超薄弹性层的纵波声速、横波声速、厚度、密度等参数进行了估计分析,分析了影响估计准确度的各种因素,并研究了低频多模式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。

2 方法

2.1 低频零阶对称模式兰姆波定征方法及简化方法

水浸耦合方式下,在层状弹性薄板中传播的对称模式兰姆波的色散特性由下列方程决定^[16]:

$$f_s(v_1, v_s, h, \rho, \omega, v_b) = (k^2 + s^2)^2 \operatorname{cth}\left(\frac{qh}{2}\right) - 4k^2 qs \operatorname{cth}\left(\frac{sh}{2}\right) - i \frac{\rho_w}{\rho} \frac{qk_1^4}{\sqrt{k_w^2 - k^2}} \quad (1)$$

式中: v_1 、 v_s 、 h 和 ρ 分别是薄板的纵波声速、横波声速、厚度和密度; v_w 和 ρ_w 分别是水中声速和水密度; v_b 是层状弹性薄板中兰姆波声速; ω 是入射超声波的角频率; $k = \omega/v_b$; $k_1 = \omega/v_1$; $k_s = \omega/v_s$; $k_w = \omega/v_w$; $s = \sqrt{k^2 - k_1^2}$; $q = \sqrt{k^2 - k_s^2}$ 。

使用低频零阶对称模式兰姆波定征方法对超薄弹性层的参数估计,即是通过在最小二乘误差意义下材料的低频零阶对称模式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:

$$E(p) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| f_s(v_1, v_s, h, \rho, \omega^j, v_b^j) \|^2 \quad (2)$$

式中: N 是待测材料厚度与发射及接收时传感器的频宽乘积带内对应的速度扫描点数, p 为 v 、 h 、 ρ 中之一。

同时,我们注意到在超声波入射频率 f 与材料厚度 h 乘积较小的范围内,低频零阶对称模式兰姆波几乎是非色散的,也就是说在此范围内兰姆波的声速几乎是不变的,近似于 $f \cdot h$ 等于零处的兰姆波波速,由如下的公式给出:

$$v_b = 2v_s \sqrt{1 - (v_s/v_1)^2} \quad (3)$$

由于在实验中采用一对中心频率为2MHz的低频纵波宽带压电换能器对超薄弹性层状材料进行估计,我们尝试分别使用下面的式(4)和式(5)来估计超薄弹性层的横波声速和纵波声速(以下简称此为简化方法):

$$v_s = \sqrt{\frac{v_1^2 - v_1 \sqrt{v_1^2 - v_b^2}}{2}} \quad (4)$$

$$v_1 = \frac{2v_s^2}{\sqrt{4v_s^2 - v_b^2}} \quad (5)$$

2.2 低频零阶反对称模式兰姆波定征方法

在使用低频零阶对称模式兰姆波定征方法对超薄层材料进行参数估计时,发现该方法对材料厚度和密度参数的定征准确度较差。为此,我们引入低频零阶反对称模式兰姆波定征方

法。水浸耦合方式下,在薄层材料中传播的反对称模式兰姆波的色散特性方程为

$$f_a(v_1, v_2, h, \rho, \bar{\omega}, v_b) = (k^2 + s^2)^2 \operatorname{th}\left(\frac{qh}{2}\right) - 4k^2 q s \operatorname{th}\left(\frac{sh}{2}\right) - i \frac{\rho_w}{\rho} \frac{qk_1^4}{\sqrt{k_w^2 - k^2}} = 0 \quad (6)$$

低频零阶反对称模式兰姆波定征方法所使用的反向算法同低频零阶对称模式兰姆波定征方法相似,只是将公式(2)中的 $f_s(v_1, v_2, h, \rho, \bar{\omega}, v_b)$ 改为 $f_a(v_1, v_2, h, \rho, \bar{\omega}, v_b)$, 这里从略。

由于本文采用水浸耦合和倾斜入射及接收测试方式,因此,当超薄弹性层材料的厚度小于一定值的时候,低频零阶反对称模式兰姆波定征方法无法对材料参数进行定征。在本文的实验结果与讨论部分,将对该方法的定征阈值进行更详细的讨论。

2.3 反向计算方法

由于水浸耦合方式的影响,兰姆波在材料中传播时会不断向水中泄漏,造成兰姆波的衰减,所以式(1)和(6)中的波数参数 k 是复数值,即 $k = k_1 + ik_2$, k_1 、 k_2 分别代表水浸方式下超薄弹性层中兰姆波的波数和传播衰减。我们采用二维割线法解出使式(2)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。

3 实验

3.1 测量系统

实验测量系统如图1所示。将一对精密匹配、中心频率为2MHz的纵波宽带压电传感器放在材料的同侧倾斜地浸于水中,发射传感器T的入射角度、接收传感器R的接收角度和两个传感器与材料表面之间的距离由一套精密机械控制装置控制,从而保证接收传感器接收的是漏兰姆波信号。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传感器,CTS-5将接收传感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 $f_s = 100\text{MHz}$ 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。

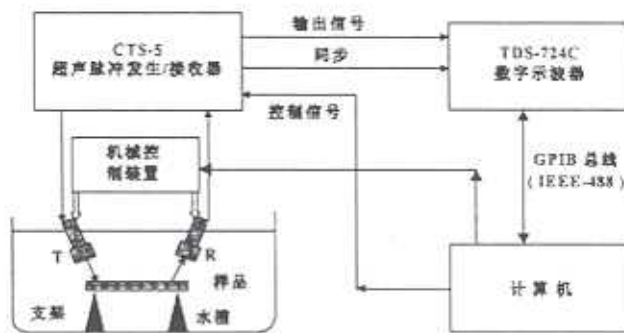


图1 实验测量系统原理框图

实验用的测试材料是各种不同厚度的铝箔、铁箔、铜箔和玻璃薄层,其纵波、横波声速及厚度数据是在美国宾夕法尼亚州购买时由商家提供的,我们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 $\pm 2.54\mu\text{m}$ 。密度参数是利用阿基米德原理测量的。整个实验在恒温环境中进行,吸水水槽内的水温控制在 $23 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

3.2 漏兰姆波空间波场设计

由于兰姆波在路径上的衰减,为了保证一定的信噪比,要尽可能减小两传感器的距离。但是当距离太近时,材料表面对入射信号的反射会很大程度上影响对漏兰姆波信号的接收,而反射信号对漏兰姆波信号的干扰程度又取决于传感器在水中的波场形状、两传感器之间及它们与材料之间的距离、超声波入射角度和接收角度等因素,所以必须妥善安排两传感器之间以及它们与待测材料之间的位置,以保证接收到正确的漏兰姆波信号^[15],漏兰姆波实验方法空间波场设计如图2所示。

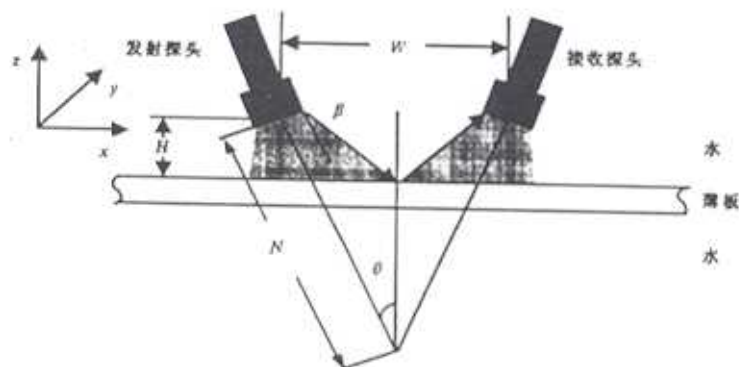


图2 漏兰姆波实验方法空间波场设计示意图

图2中, N 为传感器近场距离, β 为传感器主波束半开角, 分别由以下两式决定:

$$N = (D^2 - \lambda^2)/4\lambda \quad (7)$$

$$\beta = \arcsin(1.2\lambda/D) \quad (8)$$

式中: D 为传感器半径, λ 为发射声波在水中的波长。 θ 为超声波入射角, W 为发射传感器与接收传感器之间的距离, H 为传感器与材料表面之间的距离, 这3个参数由机械控制装置调节。为使接收传感器接收的信号不受材料表面的反射信号干扰而只接收漏兰姆波, W 和 H 必须满足以下两式:

$$W \geq 2N \sin \theta \quad (9)$$

$$H \leq \frac{N \sin \theta}{\tan(\theta + \beta)} \quad (10)$$

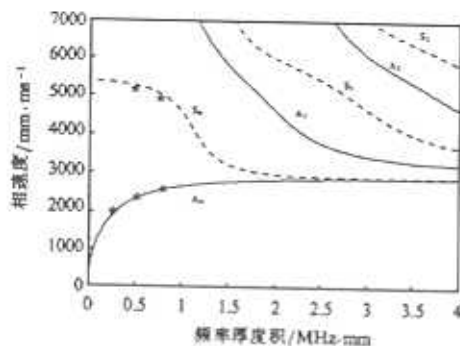


图3 兰姆波色散曲线(A:反对称模式;S:对称模式;下标为阶数)

(材料:铝, $v_1 = 6.206 \text{ nm}/\mu\text{s}$, $v_2 = 3.045 \text{ nm}/\mu\text{s}$, $h = 256 \mu\text{m}$)

3.3 漏兰姆波频域分析方法

准确调整系统传感器与材料空间位置并获取漏兰姆波信号之后,通过分析信号的频谱可

以发现,由于传感器波束宽度与发射信号带宽的影响,接收到的漏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漏兰姆波信号的声速是发射信号主轴方向与材料表面的临界角对应的兰姆波声速。所以,漏兰姆波频谱方法的核心是控制入射及接收角度,以选择和决定何种模式的兰姆波以多大的速度沿弹性薄层传播,并确定此速度的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,并记录不同入射角所对应频率峰值点,就可以得到材料的色散曲线。以铝为例,其色散曲线如图3所示,其中“*”点是兰姆波色散曲线测量值。

4 实验结果与讨论

我们分别使用低频对称模式和反对称模式兰姆波对铝、铁等材料进行了测量与参数估计,测量结果如表1、2所示,表中带有“*”号上标的参数为各材料参数的标称值,缺省项是指对材料参数的估计误差大于10%。

表1 对称模式兰姆波定征方法及简化方法对材料纵波声速、横波声速参数的估计结果

样品	材料	h^*	ρ^*	v_l^*	v_s^*	低频零阶对称模式 兰姆波定征方法				低频零阶对称模式 兰姆波简化定征方法			
						v_l		v_s		v_l		v_s	
						mm/ μ s	Err(%)	mm/ μ s	Err(%)	mm/ μ s	Err(%)	mm/ μ s	Err(%)
1	铝	26	2.69	6.206	3.045	6.060	-2.4	3.011	-1.1	6.049	-2.7	3.007	-1.2
2	铝	112	2.69	6.206	3.045	6.068	-2.2	3.015	-1.0	5.996	-3.4	2.995	-1.6
3	铝	256	2.69	6.206	3.045	6.079	-2.0	3.024	-0.7	5.762	-7.2	2.933	-3.7
4	铝	521	2.69	6.206	3.045	6.077	-2.0	3.019	-0.9	/	/	/	/
5	铁	76	7.86	5.949	3.241	5.880	-1.0	3.219	-0.7	5.868	-1.2	3.214	-0.9
6	黄铜	101	8.47	4.714	2.093	4.797	1.8	2.103	0.5	4.644	-1.5	2.086	-0.5
7	玻璃	115	2.32	5.579	3.319	5.574	-0.1	3.313	-0.2	5.558	-0.4	3.304	-0.4

表2 零阶反对称模式兰姆波定征方法对材料参数的估计结果

样品	材料	h^*	ρ^*	v_l^*	v_s^*	h		ρ		v_l		v_s	
						μ m	Err(%)	g/mm^3	Err(%)	mm/ μ s	Err(%)	mm/ μ s	Err(%)
1	铝	152	2.69	6.206	3.045	156	2.6	/	/	6.310	1.7	3.065	0.7
2	铝	256	2.69	6.206	3.045	252	-1.6	2.89	7.5	6.100	1.2	3.023	-0.7
3	铁	106	7.86	5.949	3.241	105	-0.1	7.96	0.9	5.850	-1.5	3.220	-0.7
4	黄铜	381	8.47	4.714	2.039	382	0.3	8.35	-1.4	4.726	0.3	2.094	0.1
5	玻璃	216	2.32	5.579	3.319	217	0.5	2.27	-2.0	5.591	0.2	3.323	0.1

综合表1和表2可以看出,低频零阶对称模式兰姆波定征方法与其简化方法对超薄层材料的纵波、横波速度参数的定征具有同样的准确度,误差小于2%。但低频零阶对称模式兰姆波定征方法的定征准确度不会因为材料厚度的变化而发生变化,而其简化方法对材料纵波、横波速度参数的定征准确度在材料厚度增大的情况下越来越差。图4为在假定不存在测量误差前提下,在一定频率厚度积范围内,简化定征方法估计铝质薄层横波速度的预计误差的比较曲线。由图4可知,为保证对铝质薄层横波速度的估计误差不大于2%,低频零阶对称模式兰姆波简化定征方法只适用于入射频率材料厚度积小于0.6MHz·mm的范围。

经过分析我们发现,低频零阶对称模式与反对称模式兰姆波定征方法测量材料参数的估计误差主要是由传感器角度分辨率决定的兰姆波速度测量误差引起的,图5所示为超声波在不同入射角度时可能带来的兰姆波速度测量误差。由于实验中的待测材料在低频率厚度积条件下的兰姆波速度对应的角度范围为 16° 左右,由图可以看出在此范围中,存在约2%的兰姆波速度误差。

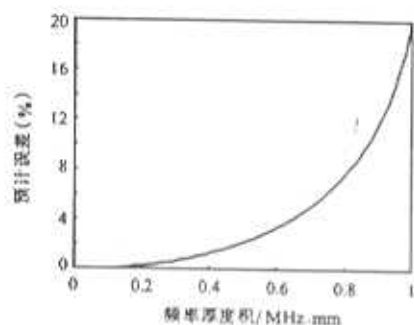


图4 低频对称模式兰姆波简化定征方法估计横波速度的预计误差曲线

(材料:铝, $v_1 = 6.206\text{mm}/\mu\text{s}$, $v_2 = 3.045\text{mm}/\mu\text{s}$)

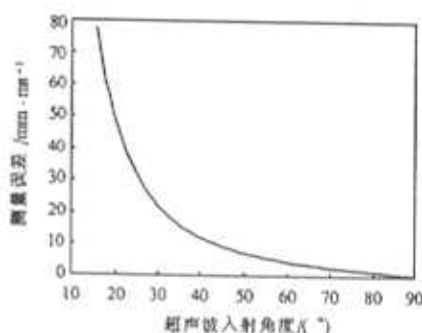
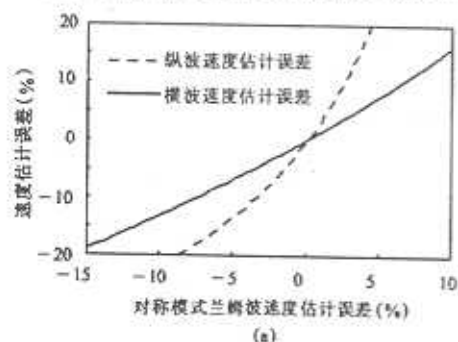


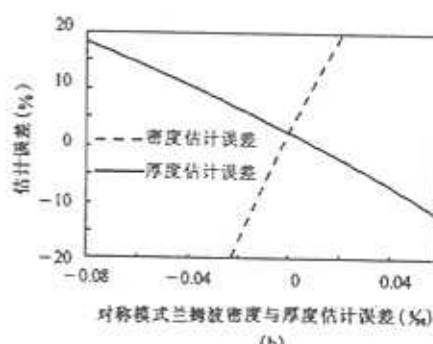
图5 不同入射角对应的兰姆波速度测量误差

(传感器角度分辨率为 0.5°)

图6为零阶对称模式兰姆波定征方法对材料各声学参数的估计误差曲线,由图可以看出,当使用零阶对称模式兰姆波定征方法并存在兰姆波声速测量误差时,零阶对称模式兰姆波定征方法对横波速度的灵敏度从总体上来讲大于对纵波速度的灵敏度,在同样的兰姆波声速测量误差条件下,对纵波的反演误差较大。大致上看,兰姆波测量误差与横波测量误差之间存在着线性关系。由于零阶对称模式兰姆波定征方法主要用于超薄弹性层,零阶对称模式兰姆波简化定征方法的估计误差曲线与图6所示十分相似,这里从略。



(a)



(b)

图6 零阶对称模式兰姆波定征方法声学参数估计误差

(a) 纵波及横波速度估计误差; (b) 厚度及密度估计误差

(材料:铝, $v_1 = 6.206\text{mm}/\mu\text{s}$, $v_2 = 3.045\text{mm}/\mu\text{s}$, $h = 26\mu\text{m}$)

零阶反对称模式兰姆波定征方法对横波和纵波速度的估计的灵敏度略小于零阶对称模式兰姆波定征方法,但对厚度和密度的估计灵敏度远大于零阶对称模式兰姆波定征方法,如图7所示。结合图5所示,可知零阶反对称模式兰姆波测量误差远小于零阶对称模式兰姆波测量误差,两者之间可以相差4倍之多。综合这两种因素,可知零阶反对称模式兰姆波定征方法的定征准确度从总体上大于零阶对称模式兰姆波定征方法,尤其适用于对材料的厚度和密度参

数进行估计。

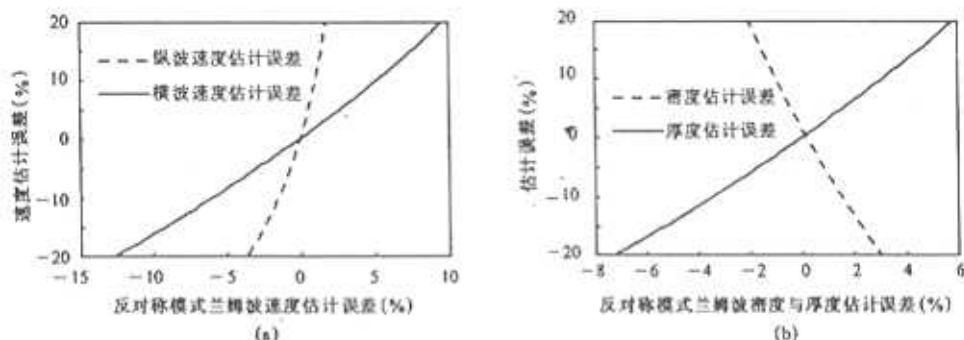


图 7 零阶反对称模式兰姆波定征方法声学参数估计误差

(a) 纵波及横波速度估计误差; (b) 厚度及密度估计误差

(材料: 铝, $v_1 = 6.206 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $v_2 = 3.045 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $h = 152 \mu\text{m}$)

同时,我们还注意到低频零阶反对称模式兰姆波定征方法的定征阈值可以通过采用空气耦合传感器来提高,在表 3 中列出了使用空气耦合传感器时,该方法对厚度参数的定征阈值。表中 h 为材料厚度, λ_1 为与薄层材料纵波声速对应的纵波波长。从表 3 中可以看出,在使用空气耦合传感器条件下,该方法可以对小于百分之一纵波波长的超薄层材料进行定征。

表 3 零阶反对称模式兰姆波定征方法厚度阈值

样 品	材 料	水耦合方式		空气耦合方式	
		h (mm)	h/λ_1	h (mm)	h/λ_1
1	铝	0.069	0.022	0.015	0.005
2	铁	0.068	0.023	0.015	0.005
3	钢化玻璃	0.069	0.024	0.015	0.005
4	黄铜	0.134	0.057	0.030	0.009

注:入射超声波频率为 2MHz。

4 结论

本文通过理论分析和实验验证,证实了一种新的低频超声波无损估计超薄弹性层参数(声速、厚度、密度和衰减等)方法的有效性。

1. 低频零阶对称模式兰姆波定征方法及其简化方法可以用来定征超薄弹性层的纵波速度和横波速度参数,定征误差小于 2%。

2. 低频零阶对称模式兰姆波简化定征方法的定征准确度随材料厚度的增大而降低,对铝质薄层而言,为保证定征误差不大于 2%,只能适用于入射频率材料厚度积小于 0.6MHz·mm 的范围。

3. 对铝质薄层而言,低频零阶反对称模式兰姆波定征方法可以对厚度小至十分之一波长薄板的纵波速度、横波速度、厚度、密度等参数进行定征。

4. 低频零阶反对称模式兰姆波定征方法对材料厚度参数的定征存在阈值,为了对超薄层材料的定征,可以使用空气耦合传感器提高兰姆波方法的检测阈值。

5. 结合低频零阶对称模式和反对称模式兰姆波的多模式兰姆波定征方法可以对超薄弹性层的纵波速度、横波速度、厚度、密度等参数进行定征。该定征方法的定征精度与发射、接收

传感器频带特性、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] Papadakis E P. Ultrasonic velocity and attenuation: Measurement methods with scientific and industrial applications [A]. In: Physical Acoustics Principles and Methods (Vol. 12). Mason W P, Thurston R N, (eds). New York: Academic Press, 1976, 277~374.
- [2] Krautkramer J, Krautkramer M. Ultrasonic testing of materials (4th fully revised edition) [M]. Springer Verlag, 1990.
- [3] Chang F H, Couchman J C, Yee B G W. Ultrasonic resonance measurements of sound velocity in thin composite laminates [J]. *J Composite Material*, 1974, 8(10): 356~363.
- [4] Challis R E, Alper T, Freemantle R J, et al. Acoustic wave velocities in ceramics and other material measured by a broadband goniometric method [J]. *Ultrasonics*, 1995, 33(4): 311~319.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Kinra V K, Zhu C. Time-domain ultrasonic NDE of the wave velocity of sub-half-wavelength elastic layer [J]. *J Testing and Evaluation*, 1993, 21(1): 29~35.
- [8] 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.
- [9] Qing Ming, Wan Mingxi, Cao Wenwu. Ultrasonic characterization of ultra-thin elastic layer using retrieve function [J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 1998, 17(4): 329~340.
- [10] Wan Mingxi, Zhang Rui, Cao Wenwu. The ultrasonic Lamb wave methods for shear wave velocity measurement of thin elastic layers [J]. *J Acoust Soc Am* (to be published).
- [11] 张锐, 万明习. 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.
- [12] Karim M R, Mal A K, Bar-Cohen Y. Inversion of leaky Lamb wave data by simplex algorithm [J]. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89: 482-491.
- [13] Lowe J S, Cawley P. Comparison of reflection coefficient minimum with dispersion curves for ultrasonic waves in the embedded layers [J]. *Review in Progress of QNDE*, 1995, 14: 1505.
- [14] Biagi E, Fort A, Vignoli V. Guided acoustic wave propagation for procelain coating characterization [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Contr*, 1997, 44(4): 906~916.
- [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.
- [16] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb wave: physical theory and application [M]. New York: Plenum Press, 1967: 117~121.

Low Frequency Multi-Mode Ultrasonic Lamb Wave Method for Characterization of the Ultra-Thin Elastic Layer

ZHANG Rui¹, WAN Ming-xi¹, GONG Xin-zhou¹, 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, USA)

Abstract: A low-frequency multi-mode ultrasonic Lamb wave method suitable for characterizing shear and longitudinal wave velocities, thickness and density of ultra-thin elastic layers is presented. By "ultra-thin", we mean that the plate is only a fraction of the ultrasound wavelength. In conjunction with the geometric calculations and leaky Lamb wave frequency-domain analysis, the lowest order symmetrical mode Lamb wave method, the approximate method and the lowest order anti-symmetrical mode Lamb wave method are used to characterize the parameters of the plate coupled by water. The reasons for evaluation error of the parameters and the sensitivity of all methods for different parameters are analyzed. Using a pair of broadband water immersion longitudinal wave with 2MHz center frequency transducers, we have accurately characterized the parameters of aluminum foil with the thickness down to 26 μm .

Key words: Ultra-thin elastic layer; Ultrasonic characterization; Lamb wave; Quantity NDE