

超薄覆层/基层复合结构界面联接特性低频超声多导波估计方法

张锐¹ 万明习¹ 曹文武²

¹(西安交通大学电子与信息工程学院生物医学工程系 西安 710049)

²(美国宾夕法尼亚州州立大学学院间联合材料研究实验室)

摘要 文章提出低频超声多导波方法估计超薄覆层/基层层状复合结构界面联接特性。文中分析了超薄覆层/基层界面处于刚性联接、滑移联接和完全脱层三种情况下多种超声导波的色散特性,提出了以色散曲线为依据的低频超声多导波界面特性估计方法,进一步分析了影响方法估计准确性的各种因素。结合超声泄露导波频域分析方法,文章采用超声耦合剂耦合方式和一对中心频率为2MHz的宽带纵波换能器,获取了 $h < 0.1\lambda$,具有不同界面联接特性的超薄覆层/基层层状复合结构样品的超声多导波色散曲线,并对界面联接状况进行了定量估计。实验结果与理论符合的非常好。

关键词 复合结构 界面特性 超声波定量无损估计 色散

Low Frequency Ultrasonic Multi-guided Wave Method for Estimating of the Interface Bonding Property of the Ultra-thin Coating/Substrate Composite

Zhang Rui¹ Wan Mingxi¹ Cao Wenwu²

¹(Dep. of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

²(Intercollege Materials Research Lab., Pennsylvania State Univ., University Park, PA, 16802)

Abstract A low-frequency ultrasonic multi-guided wave method suitable for estimating the interface bonding property of the ultra-thin coating/substrate composite is presented. The dispersion properties of the ultrasonic multi-guided waves in ultra-thin coating/substrate composites under the conditions of perfect bond, kissing bond and complete misbond are analyzed, which is the criterion of the interface bonding estimation method. The factors that influence the accuracy of the method are also analyzed. Using the ultrasound coupler and a pair of broadband longitudinal wave transducers with 2MHz center frequency, we achieve the ultrasonic multi-guided wave dispersion curve of the ultra-thin coating/substrate composite with $h < 0.1\lambda$ and different interface properties by employing the leaky guided wave frequency-domain analysis method. Reasonably good comparison between the theory and experiment was observed.

Key words Composite Interface property Ultrasonic QNDE Dispersion

1 引言

超薄覆层/基层信息、功能和智能层状复合结构

在航空、航海、信息科学、生物医学工程等众多领域被广泛应用与研究,覆层可以对基层起到绝缘、绝热、抗磨损、抗氧化、抗腐蚀等作用^[1-3]。这里“薄”的概念是指覆层厚度 h 小于其中的超声波波长 λ ,以致采用传统的超声波纵波方法对其进行原位测试时,无法在时域上区分覆盖层前后界面的各次回波信号^[4]。

覆盖层/基层之间的界面特性是影响复合结构力学特性的重要因素,在无损估计领域,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

• 本文于1999年5月收到。

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

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波和透射波的能量,但结果并不十分理想^[5-6]。主要存在如下几方面原因:首先,垂直入射的纵波作为一种体积波,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;其次,对于超‘薄’覆层/基层复合结构,界面信息被覆盖层多次反射信号所混迭。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覆盖层厚度越来越小的样品^[4],例如,当覆层厚度为10 μm 左右时,使用频率为125MHz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为提高。此外,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;再有当遇到两种声阻抗差较小的联接界面,如铝/铁层状复合结构,纵波检测方法灵敏度很低,这对于许多实际应用场合下是一个很大的不足。

与传统体积波方法对应,具有多种传播模式和色散特性、沿覆层传播的超声导波同时激发法向和切向应力,它们的传播特性不仅与材料的纵波声速、横波声速、厚度和密度等多种参数有着直接的关系,也与覆盖层/基层之间的界面特性密切相关,信号中蕴涵的信息远多于传统体积波方法,可以用来对超薄覆层/基层界面进行估计^[7-11]。本文提出以低频超声导波色散特性为基础的超薄覆层/基层界面联接特性估计方法,并分

析了影响估计准确性的各种因素,实验结果证实了理论的正确性。

2 低频超声导波覆层估计方法

2.1 三种界面联接情况下超声导波传播特性

图1所示为覆层/基层复合结构中超声导波传播示意图,假设层状复合结构在y方向上无限延伸并且位移梯度为零。为了确定覆层/基层复合结构中超声导波的传播特性,根据该坐标系建立波动方程和位移解的通解形式,综合边界条件,可以确定初始位移解中的待定参量,同时得到描述沿覆层/基层复合结构表面传播的超声导波色散特性的色散方程。

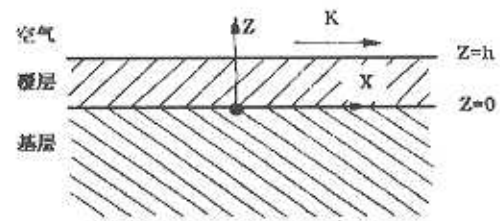


图1 覆层/基层复合结构中超声导波传播示意图

当覆盖层与基层呈刚性联接情况下,各界面上位移和应力均连续,波动方程应满足六个边界条件。分别是在 $z=0$ 平面上,覆层与基层沿x方向的剪切应力与位移相等、沿z方向的正应力与位移相等、在 $z=h$ 平面上,覆层沿x方向的剪切应力与正应力为零,这时沿超薄覆层/基层层状复合结构表面传播的超声导波又称为类瑞利波,其色散特性由如下式所示的色散方程决定^[18]:

$$f_6(\hat{v}_h, \hat{v}_h, \hat{h}, \hat{\rho}, \hat{v}_h, \hat{v}_h, \hat{\rho}, \hat{\omega}, \hat{v}) = \begin{vmatrix} b^{(1)} & -1 & -b^{(1)} & -1 & -b^{(3)} & 1 \\ -1 & -b^{(2)} & -1 & b^{(2)} & 1 & b^{(4)} \\ c^{(1)} & 2b^{(2)} & c^{(1)} & -2b^{(2)} & -rc^{(3)} & -2rb^{(4)} \\ 2b^{(1)} & -c^{(1)} & -2b^{(1)} & -c^{(1)} & -2rb^{(3)} & rc^{(3)} \\ c^{(1)}d^{(1)} & 2b^{(2)}d^{(2)} & c^{(1)}/d^{(1)} & -2b^{(2)}/d^{(2)} & 0 & 0 \\ 2b^{(1)}d^{(1)} & -c^{(1)}d^{(2)} & 2b^{(1)}/d^{(1)} & -c^{(1)}/d^{(2)} & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\text{式中 } b^{(1)} = + \sqrt{1 - (v/v_h)^2} \quad b^{(2)} = + \sqrt{1 - (v/v_i)^2} \quad b^{(3)} = - \sqrt{1 - (v/v_i)^2} \quad b^{(4)} = - \sqrt{1 - (v/v_i)^2} \\ c^{(1)} = 1 - (b^{(1)})^2 \quad c^{(3)} = 1 - (b^{(3)})^2 \quad d^{(1)} = \exp(\hat{k}b^{(1)}\hat{h}) \quad d^{(2)} = \exp(\hat{k}b^{(2)}\hat{h}) \quad r = \hat{\rho}_v^2/\hat{\rho}_v^2$$

\hat{k} ——超声波波数, $\hat{k} = \frac{2\pi f}{v}$

$\hat{\omega}$ ——检测超声波频率

i ——虚部符号, \hat{v}_h , \hat{v}_i , \hat{h} 和 $\hat{\rho}$ 分别是超薄覆层的纵波声速、横波声速、厚度和密度

v_h , v_i , ρ ——分别是基层的纵波声速、横波声速

和密度

v ——沿层状复合结构表面传播的超声类瑞利波声速

而在覆盖层与基层之间具有滑移联接界面情况下,由于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^[5-6]。改变式(1)中行列式

实验采用铁和铝两种材料分别作为复合结构的覆层与基层,并制作了具有刚性联接、滑移联接和完全脱层三种界面特性的覆层/基层复合结构样品,样品覆层与基层的纵波声速、横波声速、厚度和密度参数的参考值是在购买时由商家提供,仪器的测量误差是 $\pm 2.54\mu\text{m}$ 。各样品基层与覆层参数示于表1。实验在恒温环境中进行,吸水水槽内的水温控制在 $22\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

3.2 超声泄漏导波频域分析方法

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导波。通过分析超声泄漏导波信号的频谱,发现由于传感器波束宽度与发射信号带宽的影响,接收到的泄漏超声导波信号也是宽带信号,并且在频域上有一些峰值点。这些谱峰即意味着存在以此频率沿复合结构表面传播的超声导波,它的声速由下式决定:

$$v = v_c / \sin(\theta) \quad (5)$$

式中 v_c ——耦合剂中的超声波速度

θ ——发射信号主轴方向与垂直材料表面方向之间夹角^[20]

精确控制入射波入射角度和接收换能器接收角度,使两者相等,并在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 范围内以一定角度间隔改变入射角,记录不同入射角处的频率峰值点,就可以得到覆层/基层复合结构的超声导波色散曲线。

4 结果与讨论

本文使用低频超声多导波界面特性估计方法对具有不同界面特性的覆层/基层复合结构进行估计,铁/铝层状复合结构和铝/铁层状复合结构在三种界面联

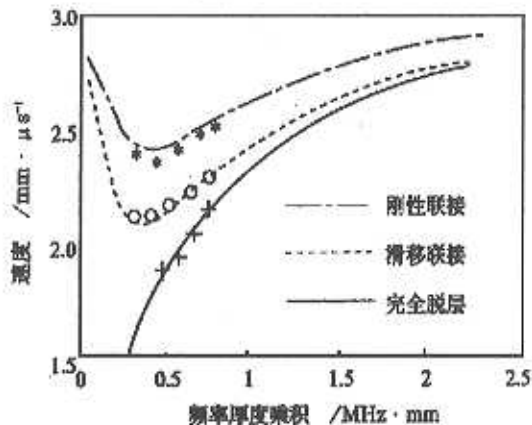


图3 样品1,2和3的超声导波色散特性实验数据
(覆层材料:铁, $v_l = 5.945\text{m}/\mu\text{s}$, $v_s = 3.227\text{m}/\mu\text{s}$, $h = 254\mu\text{m}$
基层材料:铝, $v_l = 6.407\text{m}/\mu\text{s}$, $v_s = 3.011\text{m}/\mu\text{s}$.)

接情况下的实验结果分别如图3和图4所示,其中的“·”、“○”和“+”分别是在复合结构界面处于刚性联接、滑移联接和完全脱层三种情况下实验测量得到的超声导波色散曲线数值。

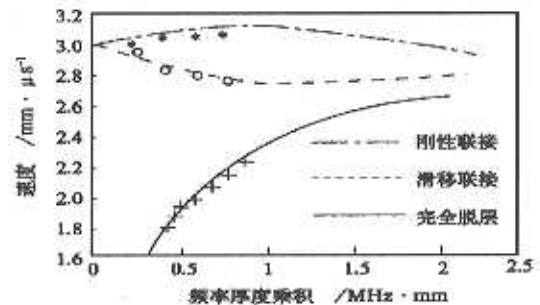


图4 样品4,5和6的超声导波色散特性实验数据
(覆层材料:铝, $v_l = 6.411\text{m}/\mu\text{s}$, $v_s = 3.021\text{m}/\mu\text{s}$, $h = 228\mu\text{m}$
基层材料:铁, $v_l = 5.936\text{m}/\mu\text{s}$, $v_s = 3.220\text{m}/\mu\text{s}$.)

由图3和图4所示,在不同的联接状态下,覆盖层/基层复合结构中的导波具有不同的色散特性。在滑移联接界面情况下,导波传播速度介于刚性联接与完全脱层两种情况下导波速度之间。由于滑移联接界面是界面弱联接的一种极端情况,所以可以推断,当联接剂老化使联接界面处于紧密接触,而联接强度大为降低情况下,复合结构导波速度介于刚性联接与滑移联接两种情况下导波速度之间,而当联接界面出现局部脱层情况下,其导波传播速度介于滑移联接与完全脱层两种情况下导波速度之间。如表2所示为使用低频超声多导波界面特性估计方法对各样品的估计结果。

表2 样品界面特性估计结果

	样品1	样品2	样品3
理论值	100%	41%	0%
估计值	96%	37%	4%
	样品4	样品5	样品6
理论值	100%	66%	0%
估计值	95%	63%	1%

由表2,可以得出这样的结论,随着超薄覆层/基层复合结构联接强度的提高,该估计方法的估计值越大,当使用该方法的估计值大于90%,即可以认为是良好联接。当然,为能使方法能够在不同的应用场合下应用,可以通过对标准件的测量计算出不同的阈值以判断产品是否合格。一般而言,即使界面是良好联接,估计值也小于100%,这是由于实际的界面联接强度总是小于理想条件下的刚性联接状况。

经过分析发现,低频超声多导波界面联接特性估计方法对层状复合结构界面特性的估计误差主要是由

换能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导波速度测量误差。由于实验中的待测材料在低频率厚度积条件下的导波速度对应的角度范围为 30° 左右,可以看出在此范围中,存在约 2% 的兰姆波速度误差。

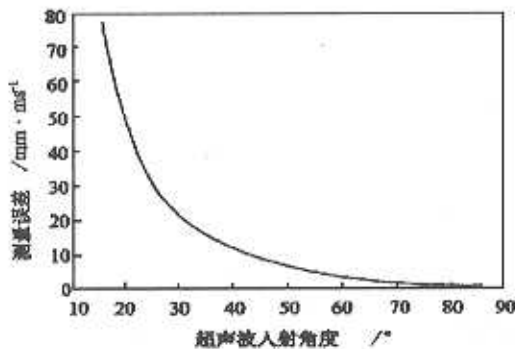


图 5 不同入射角对应的兰姆波速度测量误差
(传感器角度分辨率为 0.5°)

其次,由于待测样品在低频率厚度积条件下的导波速度对应的角度范围与换能器波束特性、频带特性和覆层/基层复合结构超声导波的色散特性等因素有关,所以低频超声多导波界面特性估计方法的估计误差也与这些因素有着密切的关系。

5 结 束 语

本文通过理论分析和实验验证,证实了一种新的低频超声多导波无损估计超薄覆层/基层复合结构界面联接特性方法的有效性,该方法得到如下结论。

在不同的联接状态下,覆盖层/基层复合结构中的导波具有不同的色散特性,在滑移联接界面情况下,导波传播速度介于刚性联接与完全脱层两种情况下导波速度之间。

当联接剂老化使联接界面处于紧密接触,而联接强度大为降低的情况下,复合结构导波速度介于刚性联接与滑移联接两种情况下导波速度之间。而当联接界面出现局部脱层情况下,其导波传播速度是介于滑移联接与完全脱层两种情况下导波速度之间。

该估计方法的估计准确度和发射、接收换能器角度分辨率、波束特性、频带特性和覆层/基层复合结构超声导波的色散特性等因素有密切的关系。

参考文献

- Nondestructive Testing Techniques for Composites for Composites and Bonded Joints. *NDT International*, 1988, 21: 208~ 222.
- 2 R. D. Adams, B. W. Drinkwater. Nondestructive Testing of Adhesively-bonded Joints. *NDT&E International*, 1997, 30(2): 93~ 98.
- 3 S. Akker, J. Arman. Ultrasonic investigation on plane interfaces between polymers. *Ultrasonics*, 1997, 35: 287~ 293.
- 4 J. Krautkramer, M. Krautkramer. *Ultrasonic Testing of Materials: 4th Fully Revised Edition*. Springer Verlag 1990.
- 5 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反射. *声学学报*, 1992, 17(2): 81~ 92.
- 6 A. Pilarski, J. L. Rose. A Transverse Wave Ultrasonic Oblique Incidence Technique for Interfacial Weakness Detection in Adhesive Bonds. *Journal of Applied Physics*, 1988, 63: 300~ 307.
- 7 K. S. Tan, N. Guo C. G. Tui. Comparison of Lamb Waves and Pulse Echo in Detection of Near-surface Defects in Laminate Plates. *NDT & E International, Independent Nondestruct.*, 1995, 28(4): 215.
- 8 J. L. Rose, A. Pilarski. Surface Wave and Plates waves in Layered Structures. *Materials Evaluation*, 1988, 46: 598~ 605.
- 9 J. L. Rose, W. Zhu, M. Zaidi. Ultrasonic NDT of Titanium Diffusion Bonding with Guided Waves. *Materials Evaluation*, 1998, 535~ 539.
- 10 L. Singher. Bond Strength Measurement by Ultrasonic Guided Waves. *Ultrasonics*, 1997, 35: 305~ 315.
- 11 L. Singher, Y. Segal, J. Shamir. Interaction of a Guided Wave with a Nonuniform Adhesion Bond. *Ultrasonics*, 1997, 35: 385~ 391.
- 12 T. M. Hsieh, M. Rosen. Ultrasonic Leaky Waves for Non-destructive Interface Characterization. *Ultrasonics*, 1993, 31(1): 45~ 51.
- 13 N. Guo, P. Cawley. The Interaction of Lamb Waves with Delaminations in Composite Laminates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, 94(4): 2240~ 2246.
- 14 T. Kundu, K. Maslov. Material Interface Inspection by Lamb Waves. *Int. J. Solids Structures*, 1997, 34 (29): 3885~ 3901.
- 15 S. I. Rokhlin. Lamb Wave Interaction with Lap-shear Adhesive Joints: Theory and Experiment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, 89, 2758~ 2765.
- 16 T. Kundu, A. Maji, T. Ghosh, K. Maslov. Detection of Kissing Bonds by Lamb Waves. *Ultrasonics*, 1998, 35: 573~ 580. (下转第 492 页)

SiO_2 分别装在三个坩锅内, 光学膜厚监控采用上反射光监控, 基板用 K9 玻璃和树脂片, 基板温度为室温。

在真空室真空度达到 $4.5 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 以后, 先蒸发 Al_2O_3 膜, 蒸镀的条件是: 无栅等离子源充氩气至 16sccm , 用自动压强仪控制真空室真空度为 $2.2 \times 10^{-2} \text{Pa}$, 无栅离子源阳极电压 80V , 阳极放电电流 40A , 蒸发 Al_2O_3 膜的折射率为 1.65 , 控制 Al_2O_3 膜的光学厚度为 $\lambda_0/4$, $\lambda_0 = 520 \text{nm}$ 。

再蒸镀 TiO_2 膜, 蒸镀条件为: 无栅离子源充氩气至 14sccm , 充氧 20sccm , 真空室真空度 $4 \times 10^{-2} \text{Pa}$, GIS 源阳极电压 80V , 阳极电流 30A , TiO_2 膜折射率 2.4 , 控制膜厚 $\frac{\lambda_0}{20}$ 最后沉积 SiO_2 膜, 蒸镀条件是: 充氩 14sccm , 充氧 20sccm , 真空度保持在 $4 \times 10^{-2} \text{Pa}$, 阳极电压 80V , 阳极电流 30A , SiO_2 膜折射率为 1.45 , 控制 SiO_2 膜光学厚度 $\lambda_0/4$ 。

在 K9 玻璃上增透膜的反射率曲线见图 5, 其牢固

度不低于用 TiO_2 、 SiO_2 在 350° 高温下制造的增透膜。

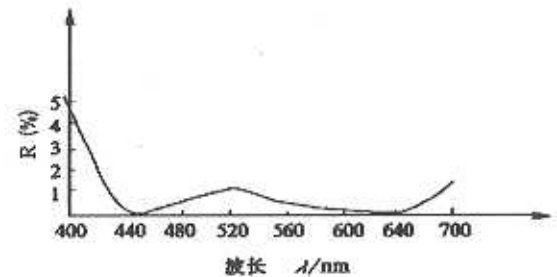


图5 增透膜反射率曲线

参考文献

(上接第 489 页)

- 17 L. Adler M. Billy, G. Quentin. Evaluation of Friction-welded Aluminum-steel Bonds using Dispersive Guided Modes of a Layered Substrate. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68 (12): 6072-6076.
- 18 G. W. Farnell, E. L. Adler. *Elastic Wave Propagation in Thin Layers*. Academic Press, New York, 1976, 35-127.

(接第 513 页)

在压力为 12MPa 下爆膜, 校准 MPM 480 型压力变送器负阶跃回零过程响应输出波形示于图 5。

由时域阶跃响应通过建模与仿真可以得到传感器的幅频特性如图 6 所示, 其 -3dB 截止频率约为 5.2kHz 。厂家给出的指标为频响大于 5kHz 。由此可见测量结果较为可信。

5 结 论

本文介绍的大压力爆膜压力负阶跃校准装置, 经

- 1 S Pongratz, A Zoller. Plasma Ion Assited Deposition. A Promising Technique for Optical Coatings. *J. Vac. sci. Tech.*, 1992, 10: 1897-1904.
- 2 A Zoller, S Beibutenger, R. Gotzemann, K. Matl. Plasma Ion Assited Deposition: A Novel Technique for the Production of Optical Coatings. *SPIE*, 1994, 2253: 394-402.

- 19 I. A. Viktorov *Rayleigh and Lamb Wave: Physical Theory and Application*. Plenum Press, New York, 1967, 117-121.
- 20 J. S. Lowe, P. Cawley. Comparison of Reflection Coefficient Minimum with Dispersion Curves for Ultrasonic Waves in the Embedded Layers. *Rev. In Progress of QNDE*, 1995, 14: 1505.

理论分析和实验验证, 完全可以满足液压系统 $0-40 \text{MPa}$ 压力范围, $0-2 \text{kHz}$ 工作频带压力动态校准要求, 可以弥补激波管和快卸阀门压力范围上的不足。

参考文献

- 1 黄俊钦. 测试系统动力学. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- 2 朱明民, 梁人杰, 柳光辽, 等. 动压测量. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- 3 [苏] B. A. 格拉诺夫斯基著, 傅烈堂、鲍建忠译. 动态测量. 北京: 中国计量出版社, 1989.