

基于超声 Lamb 波截止频率的双层薄板 各层厚度表征

潘 蕾, 沈中华, 刘祥恩, 阚威威
(南京理工大学 理学院, 南京 210094)

摘 要: 双层薄板材料在建筑、航空航天、镀膜等行业都有非常广泛的应用, 厚度是板状材料的重要参数, 因此对厚度进行表征具有重要意义。提出了一种基于超声 Lamb 波截止频率测量双层薄板各层厚度的方法, 推导出双层薄板 Lamb 波截止频率与两板厚度比的关系, 各层厚度可用总厚度和两板厚度比表征。通过理论公式计算了不同厚度比的双层薄板(非铝/铝)Lamb 波一阶反对称模态(A_1)的截止频率, 得到 A_1 模态截止频率随厚度比变化的曲线, 并分析了非铝板横波速度对其变化的影响。

关键词: Lamb 波; 截止频率; 双层薄板; A_1 模态
中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2022)06-0006-04

Characterization of each layer thickness of the bi-layer thin plates based on the cut-off frequency of the ultrasonic Lamb waves

PAN Lei, SHEN Zhonghua, LIU Xiang'en, KAN Weiwei
(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Bi-layer thin plates are widely used in the construction industry, aerospace, coating technology, etc. The thickness is an important parameter of slab materials, so the characterization of thickness is of great significance. This paper proposed a method for measuring the thickness of each layer of the bi-layer thin plates based on the cut-off frequency of ultrasonic Lamb waves. It was theoretically deduced that cut-off frequency of the bi-layer thin plates is related to the thickness ratio of the two plates. The thickness of each layer was characterized by the total thickness and the thickness ratio of the two plates. The cut-off frequencies of the first-order anti-symmetric mode (A_1) of the bi-layer thin plates (non-aluminum/aluminum) with different thickness ratios were calculated by theoretical formulas, resulting in a curve of the A_1 mode cut-off frequency with the thickness ratio of the two plates, and at the same time the effect of non-aluminum plate's transverse wave velocity on its change was analyzed.

Key words: Lamb wave; cut-off frequency; bi-layer thin plate ; A_1 mode

双层板状材料具有刚度大、冲击性能好、成本低等优点, 在建筑、汽车制造、航空航天、压力容器制造及镀膜等行业都有非常广泛的应用, 如表面带涂层

的涡轮叶片、飞机多层黏合材料或搭接材料等。板状材料的厚度是该结构的重要参数, 因此对其厚度进行表征尤为重要。

超声波测量方法具有对被测结构要求低、空间分辨率高、受测试环境影响小、对人体无害等优点, 广泛用于物体厚度的测量。目前, 常用的超声波测量方法有脉冲回波法、表面波法和 Lamb 波法。脉冲回波法通过测量超声脉冲在样品中的传播时间, 然后根据传播速度求得样品厚度。但该法通常会在

收稿日期: 2021-12-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(61975080)
作者简介: 潘 蕾(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光超声
通信作者: 沈中华(1973—), 女, 教授, 主要研究方向为激光超声, shenzh@njjust.edu.cn

测量的样品厚度为波长量级时达到极限,被测样品上、下表面、交界面处的反射回波混叠在一起,导致无法计算层厚^[1-2]。黄巧盛等^[3]针对三层结构测量中的回波混叠问题,采用 RLS 自适应滤波算法处理提取下界面回波信号,成功测量了 0.15,0.17,0.19,0.21 mm 等 4 种硅橡胶层的厚度,最大误差为 3.5%。KRUGER 等^[4]通过在 TiN 膜表面处激发出表面波,测量薄膜的厚度,测量误差为 3%。XIAO 等^[5]通过研究薄膜厚度对声表面波频散现象的影响,提出了一种基于理论和试验色散曲线的厚度计算方法,测得 SiO₂ 膜厚度的相对误差最大为 2.18%,但该方法只适用于测量层厚较厚(大于波长量级)的双层结构;对于两层都很薄的双层板,可采用 Lamb 波法,Lamb 波法通常利用 Lamb 波在频域上产生的尖锐明显的共振峰信号来测量厚度^[6-7]。GRUENSTEIDL 等^[8]提出了一种利用零群速度 Lamb 波同时确定各向同性板厚度及纵向和剪切弹性波速度的方法,厚度测量误差为 1.7%。CHO 等^[9]将其应用于多层结构中几十毫米厚的中间层厚度测量,各模态零群速度频率随连接层厚度增加而单调下降,对厚度的测量误差在微米量级。Lamb 波群速度共振法虽能很好地对双层薄板进行测量,但在试验中不易观察到明显的共振现象。

因此,需要一种当双层薄板各层厚度在波长量级甚至小于波长时,也能够很好地测量各层厚度的方法以解决上述问题。笔者提出了一种基于超声 Lamb 波截止频率测量双层薄板各层厚度的方法,理论推导了双层薄板 Lamb 波截止频率与两板厚度比的关系。以双层薄板(非铝/铝)为研究对象,理论计算了不同厚度比的双层薄板 Lamb 波 A₁ 模态截止频率,得到 A₁ 模态截止频率随厚度比变化的曲线,并分析了非铝板横波速度对其变化的影响。

1 双层薄板 Lamb 波截止频率的理论研究

Lamb 波是一种板波,横波分量和纵波分量在双层板状材料中传播时,在上下边界和交界面处会发生反射,且纵波与横波间会发生模式转换,形成 Lamb 波^[10-11]。Lamb 波具有衰减小、传播距离远、信号强、多模态等特点,广泛应用于薄板材料的无损检测与缺陷评估中。

为了简化分析,假定双层薄板各层都是各向同性的,薄板在 x 和 y 方向上无限均匀延伸,在 z 方向上有限,交界面与两自由表面平行,双层板的几何

描述如图 1 所示。其中两板的纵波速度为 c_{Li} ;横波速度为 c_{Ti} ;厚度为 h_i ;密度为 ρ_i , $i(i=1,2)$ 表示层数; d 为两板总厚度。

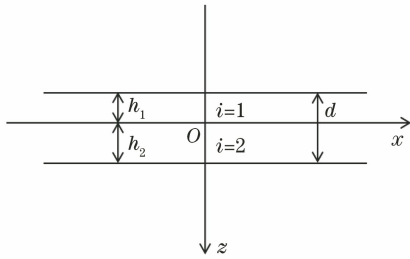


图 1 双层板的几何描述示意

通常采用 Helmholtz 分解法求解运动方程^[12],每一层得到两个独立的波动方程,即

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z^2} = \frac{1}{c_{Li}^2} \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial z^2} = \frac{1}{c_{Ti}^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中: ϕ_i 为纵波; ψ_i 为横波势函数。

$$\phi_i = [A_{iL} \cos(p_i z) + B_{iL} \sin(p_i z)] \exp[i(kx - \omega t)] \quad (3)$$

$$\psi_i = [A_{iT} \cos(q_i z) + B_{iT} \sin(q_i z)] \exp[i(kx - \omega t)] \quad (4)$$

式中: $A_{iL(T)}$, $B_{iL(T)}$ 为常数; p_i 满足 $p_i^2 + k^2 = \frac{\omega^2}{c_{Li}^2}$; q_i

满足 $q_i^2 + k^2 = \frac{\omega^2}{c_{Ti}^2}$; k 为波数; ω 为角频率; t 为时间。

切向位移 u_x 和法向位移 u_z 满足

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}, u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

切向应力 σ_{xz} 和法向应力 σ_{zz} 满足

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right), \\ \sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ 和 μ 为拉梅常数。

在两板的自由表面处($z = -h_2$ 和 $z = h_1$)应力都为零;在交界面处($z = 0$),位移和应力连续。所有表达式略去 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 项,方程组有非平凡解则令系数矩阵行列式为零,得到波数 k 和频率 f 的关系。

厚度共振响应表现为 $k = 0, f \neq 0$ 的点处,此时频率 f 为截止频率,表示为 f_c ,代入到值为零的行列式中,得到

$$c_{L(T)2}\rho_2\tan\left(\frac{2\pi f_c}{c_{L(T)2}}\cdot\frac{d}{1+r}\right)+c_{L(T)1}\rho_1\tan\left(\frac{2\pi f_c}{c_{L(T)1}}\cdot\frac{rd}{1+r}\right)=0\tag{7}$$

式中: r 为两板厚度比; $c_{L(T)1}$ 为第一层板的横波或纵波波速; $c_{L(T)2}$ 为第二层板的横波或纵波波速; ρ_1 为第一层板密度; ρ_2 为第二层板密度;纵波波速 c_L 可用横波波速 c_T 和泊松比 ν 表示,即 $c_L=$

$$c_T\sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}。$$

当固定双层薄板总厚度和其中一层材料参数时,Lamb 波截止频率与两板厚度比和另一层材料的性质有关,分析时用横波速度来描述材料性质。下面以总厚度 1 mm 的双层薄板(非铝/铝)为研究对象,计算不同厚度比的双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率,得到 A_1 模态截止频率随厚度比变化的曲线,分析非铝板横波速度对其变化的影响。

2 双层薄板 Lamb 波截止频率的计算

对双层薄板 Lamb 波截止频率进行理论计算,计算时固定薄板总厚度为 1 mm,第一层材料为铝,改变第二层材料和两板厚度比,厚度比 r 为铝板厚度与非铝板厚度的比值。为了系统地研究不同材料性质对双层薄板 Lamb 波截止频率的影响,设定 m 为非铝板横波速度与铝板横波速度的比值。笔者分别选取横波速度比铝的横波速度小很多($0.2\leq m\leq 0.6$)、相对接近($0.6<m<0.9$)、相差很小($0.9\leq m\leq 1.1$)和接近 2 倍($m=1.99$)的材料与铝组成的双层薄板,计算厚度比对截止频率的影响。理论计算时使用的材料及其物理参数如表 1 所示^[13]。

表 1 理论计算时使用的材料及其物理参数

材料	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$c_L(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$c_T(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	m
铝	2.71	6 190	3120	1.00
铅	11.40	2 160	700	0.23
金	19.30	3 240	1 200	0.39
银	10.50	3 600	1 590	0.51
铜	8.90	4 410	2 120	0.68
锌	7.10	4 170	2 410	0.77
钨	19.30	5 180	2 870	0.92
钛	4.51	6 130	3 180	1.02
氮化硅	3.19	10 610	6 200	1.99

以表 1 中材料组成的非铝/铝双层薄板为研究对象,其总厚度为 1 mm,改变两板厚度比 r , r 的变化范围为 $[1/9,9]$ 。研究时取 Lamb 波 A_1 模态截止频率,计算不同厚度比对应的截止频率,作出其随

厚度比变化的曲线,根据变化规律将 m 分成 4 种情况: $0.2\leq m\leq 0.6$; $0.6<m<0.9$; $0.9\leq m\leq 1.1$ 和 m 值很大($m=1.99$)。 m 不同时双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率随厚度比的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可见,当厚度比趋近于 9 时, A_1 模态截止频率逐渐趋近于 1 mm 铝单板 A_1 模态截止频率;当厚度比趋近于 1/9 时,截止频率逐渐趋近于 1 mm 非铝单板 A_1 模态截止频率。

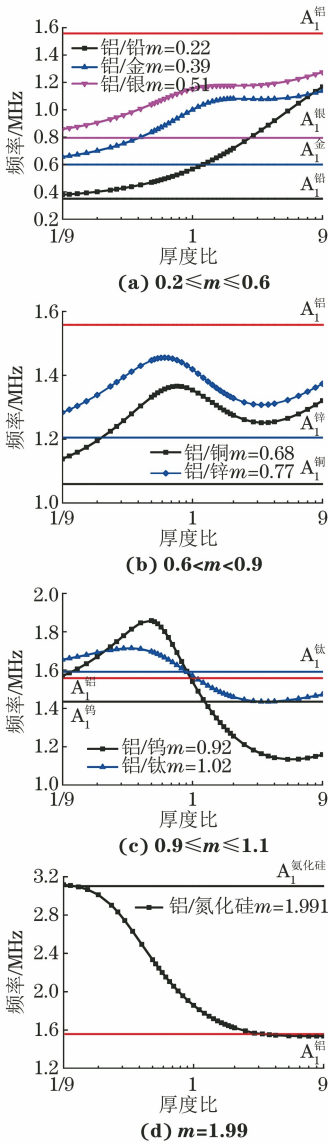


图 2 m 不同时双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率随厚度比的变化曲线

如图 2(a)所示,当 $0.2\leq m\leq 0.6$ 时,非铝板与铝材料性质差别很大。双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率随厚度比单调递增或除某一段区间内出现截止频率平台外单调递增。可以清晰地看出铝/铝双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率在 $[1/9,9]$ 内单调递增,截止频率与厚度比一一对应,当试验测得

A_1 模态截止频率时,可以在曲线上找到唯一的厚度比,从而求出薄板各层厚度;而金/铝和银/铝双层薄板 A_1 模态截止频率分别在 r 为 2.4 和 1.9 时出现略微下降,后趋于平缓,截止频率分别在 1.08 MHz 和 1.18 MHz 左右出现平台,也就是说当测得截止频率在这两个值附近时,无法区分厚度比,测量误差较大,而在其他频率处测量薄层厚度是可行的。

如图 2(b)所示,当 $0.6 < m < 0.9$ 时,非铝板与铝材料性质相对接近。双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率随厚度比先增加后降低再增加,在 1 mm 铝单板 A_1 模态截止频率与 1 mm 非铝单板 A_1 模态截止频率之间变化。这种情况下,在大的厚度比区间内,同一个截止频率会对应至少 2 个厚度比,这时就需要得更高阶截止频率随厚度比变化曲线,来确定唯一的厚度比。

如图 2(c)所示,当 $0.9 \leq m \leq 1.1$ 时,即非铝板与铝材料性质相近,双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率同样随厚度比先增加后降低再增加,但与上一种情况不同的是,截止频率会超出 1 mm 铝单板 A_1 模态截止频率与 1 mm 非铝单板 A_1 模态截止频率的范围。同样地,在该区间内需要更高阶截止频率来确定唯一的厚度比。

如图 2(d)所示,当 m 很大($m=1.99$)时,曲线趋势与 m 在 1 附近时类似。由于 m 很大,氮化硅与铝材料性质差别很大,1 mm 氮化硅板 A_1 模态截止频率是 1 mm 铝板的 m 倍,相差很大。曲线上两个峰值频率对应的厚度比在计算区间的两个端点附近,所以氮化硅/铝双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率在大的厚度比区间 $[1/9, 7]$ 内单调递减,非常适合测双层薄板各层厚度;当 r 大于 7 时,截止频率开始缓慢递增,在 1.54 MHz 处出现平台,导致在 $[7, 9]$ 区间内无法区分厚度比,又由于该区间厚度比都很大,试验测量时并不会出现较大误差。

3 结语

笔者利用 Lamb 波 A_1 模态在截止频率处产生的厚度共振,对双层薄板各层厚度进行表征,理论推导出了双层薄板截止频率与两板厚度比之间的关系。理论计算时以总厚度 1 mm 的非铝/铝双层薄板为研究对象,计算不同厚度比的双层薄板 Lamb 波 A_1 模态截止频率,得到了截止频率随厚度比变化的曲线,发现非铝板横波速度对变化曲线有着重要的影响。当两种材料横波速度相差很大时,用

Lamb 波 A_1 模态截止频率测量厚度是可行的;当横波速度相差相对较小时,则需要更高阶截止频率来确定唯一的厚度比,来得到双层薄板各层厚度。

笔者通过双层薄板 Lamb 波厚度共振的激发探测试验验证了该方法的可行性,试验结果表明,当截止频率随厚度曲线上同一截止频率对应多个厚度比时,需要求得更高阶截止频率与厚度比的变化曲线,并排除不期望的厚度比。

参考文献:

[1] WANG M, ZHENG D D, XU Y. A new method for liquid film thickness measurement based on ultrasonic echo resonance technique in gas-liquid flow [J]. Measurement, 2019, 146: 447-457.

[2] LI Z J, HAN Z L, JIAN X H, et al. Pulse-echo acoustic properties evaluation method using high-frequency transducer [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(12): 125011.

[3] 黄巧盛, 周世圆, 张翰明, 等. 基于自适应滤波的薄层厚度超声测量方法[J]. 中国测试, 2019, 45(10): 34-39.

[4] KRUGER S E, LORD M, MONCHALIN J P. Laser ultrasonic thickness measurements of very thick walls at high temperatures [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 820(1): 240-247.

[5] XIAO X, KONG T, QI H Y, et al. Nondestructive determination of film thickness with laser-induced surface acoustic waves[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(9): 096802.

[6] CÈS M, CLORENNEC D, ROYER D, et al. Thin layer thickness measurements by zero group velocity Lamb mode resonances[J]. The Review of Scientific Instruments, 2011, 82(11): 114902.

[7] GRÜNSTEIDL C, BERER T, HETTICH M, et al. Determination of thickness and bulk sound velocities of isotropic plates using zero-group-velocity Lamb waves[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(25): 251905.

[8] GRÜNSTEIDL C, MURRAY T W, BERER T, et al. Inverse characterization of plates using zero group velocity Lamb modes[J]. Ultrasonics, 2016, 65: 1-4.

[9] CHO H, HARA Y, MATSUO T. Evaluation of the thickness and bond quality of three-layered media using zero-group-velocity lamb waves[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 520: 012023.

[10] 李春光. 激光在铝板中激发零群速度 Lamb 波的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

(下转第 14 页)

两位五通电磁阀实现。

3 控制系统

控制系统的总体框图如图 7 所示。

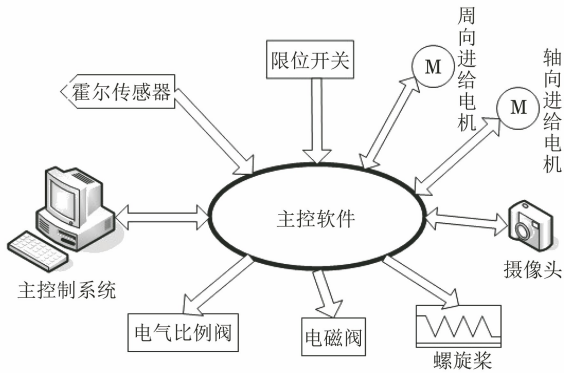


图 7 控制系统的总体框图

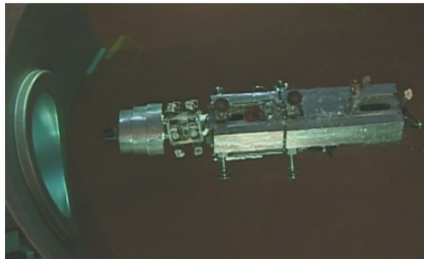
主控控制系统安装在集装箱内，现场安装完毕后，操作人员远程控制检测装置在接管内的动作。使用螺旋桨安装定位时，主控制系统向控制螺旋桨的电机发送指令，驱动螺旋桨将检测装置推入接管。当安装在检测装置上的两个限位开关同时触发时，主控系统打开夹紧气缸的电磁阀，完成定位。

检测装置机架上安装有两个霍尔传感器用来确定端部效应器的轴向零位和周向零位。扫查缺陷前，需首先对探头做校验记录，检查系统灵敏度。端部效应器上安装有一小型摄像头，可以观察到端部效应器气缸的伸缩状态，监测探头运动过程。

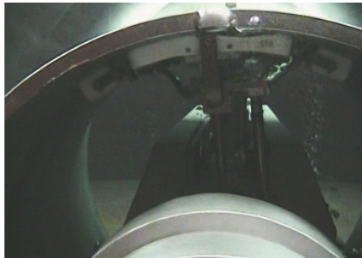
在焊缝缺陷检测过程中，需要首先检出缺陷，而后再确定缺陷的大小即定量。缺陷检出过程中，检测装置的扫查速度很快，而缺陷定量过程中，检测装置的扫查速度很慢。为提高检测效率，节约检测时间，通过试验摸索，笔者确定了缺陷检出和定量最合理的运动参数，并内置到主控软件模块中。操作者只需点击缺陷检出模式或定量模式，检测装置会按照预定的最佳扫查速度运动。

4 检测试验

所研制的接管安全端焊缝缺陷检测装置样机实物如图 8 所示，主控制系统完成检测装置在接管外部及内部姿态调整动作，实现装置管内快速定位功能；检测过程中，通过预设缺陷检出与缺陷定量运动参数，能有效提高检测效率且保证检测质量。笔者通过检测试验验证了接管安全端焊缝缺陷检测装置缺陷检出工艺过程设置合理，运动过程及机械结构稳定可靠。



(a) 姿态调整



(b) 检测运动

图 8 接管安全端焊缝缺陷检测装置样机实物

5 结语

(1) 研制了一种轻便型接管安全端焊缝缺陷检测装置样机，为解决国内核电站该焊缝缺陷检测设备结构庞大、安装困难、操作复杂等问题提供了一定参考，有效提高了接管安全端焊缝缺陷的检测效率。

(2) 该设备可靠的定位机构，合理的校验机构，完善的周向和轴向运动机构可为同类设备结构设计提供参考。

(3) 该设备采用高压驱动低压保压的气路控制模式，有效降低了水下工作时驱动部件的故障率。

(上接第 9 页)

[11] 熊继涛. 激光超声换能器的导波检测应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.

[12] BALOGUN O, MURRAY T W, PRADA C. Simulation and measurement of the optical excitation

of the S1 zero group velocity Lamb wave resonance in plates[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(6): 064914.

[13] Ultrasonic Waves in Solid Media[M]. Beijing: Science Press, 2004.