

三层介质超声谐振模式随材料和界面粘接性能变化的演变规律

刘婧 徐卫疆 胡文祥

Evolution of the ultrasonic resonance modes in a three-layer structure with change of material and interface adhesion properties

Liu Jing Xu Wei-Jiang Hu Wen-Xiang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 074301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.074301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矩形表面波探头声场的高斯声束叠加法

[Multi-Gaussian beam model for ultrasonic surface waves with angle beam rectangular transducers](#)

物理学报.2014, 63(1): 014301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014301>

基于弹性模量检测骨疲劳的超声导波方法研究

[Study of bone fatigue evaluation with ultrasonic guide waves based on elastic modulus](#)

物理学报.2012, 61(13): 134304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.134304>

界面条件下线型超声相控阵声场特性研究

[Acoustic field characteristics of ultrasonic linear phased array for an interface condition](#)

物理学报.2011, 60(9): 094301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.094301>

三层介质超声谐振模式随材料和界面粘接性能变化的演变规律*

刘婧¹⁾ 徐卫疆²⁾ 胡文祥^{1)†}

1)(同济大学声学研究所, 上海 200092)

2)(Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie UMR CNRS 8520, Département Opto-Acousto-Electronique, Université de Valenciennes, Valenciennes 59313, France)

(2015年10月8日收到; 2015年12月7日收到修改稿)

在用超声波谐振对粘接材料的粘接强度进行无损评估时, 不同模式对粘接强度的敏感程度受到众多因素和参数的影响, 对检测结果的可靠性至关重要. 基于多层介质中声传播和界面弱粘接边界条件的理论模型, 将一个上下非对称的金属-粘接剂-金属三层结构的平面波反射系数函数中的谐振模式看作是上下铝金属层各自的 Lamb 波频散模式通过夹心粘接剂层相互耦合后叠加组成. 改变影响结构粘接强度的因素, 即粘接剂的性能参数(声阻抗、密度、厚度)和界面切向劲度系数 k_t 来分析三层结构谐振模式耦合方式的变化, 得出结论: 粘接结构粘接性能的变化基本上不改变与被粘铝层相关的固有部分的 Lamb 波模式, 而它们的耦合模式则在谐振频率上产生平移并会与固有模式进行交换和替代; 不同参数的变化引起的模式演变有各自的规律, 大多可彼此区分.

关键词: 粘接结构, 界面粘接强度, 声反射谐振函数, 模式频散

PACS: 43.20.El, 43.35.Cg, 43.40.Le, 43.20.Bi

DOI: 10.7498/aps.65.074301

1 引言

粘接技术由于不增加组件的额外重量、使材料结合面具有分散和均匀的应力分布、成本低等优点在工业制造领域, 尤其是航空航天、交通、能源、军事等领域中逐渐替代了传统的组合技术, 如螺栓、铆接和焊接. 为了保证粘接组件使用中的安全性, 需要对其进行无损评估, 也就是在不影响组件使用的情况下, 定量地预测粘接体和被粘接体之间的粘附和结合强度. 然而, 尽管从20世纪50—60年代起, 经过了大量的研究和众多的努力, 材料界面粘接力的无损评估始终是一个迫切需要而又未能解决的问题^[1,2]. 究其原因, 一是对粘接剂和材料表面粘附现象的物理化学微观机理尚没有了解透彻^[3], 以致难以建立起确切的理论模型^[4]; 二是粘

附现象本质上是一个力学问题, 现代无损检测技术常用的 X 射线、超声波、红外热波、涡流等各种手段, 基于他们和材料相互作用的机理不同, 仅有机波形态的超声波具有检测粘附强度的敏感性, 因而检测手段非常有限.

粘接结构或材料通常是一层状介质, 如镀层, 复合材料, 最常见的是“三明治”结构胶接板. 在胶接板结构中, 影响两个被粘体之间最终粘接强度的因素主要来自两个方面. 一个是粘接剂本身的性能, 除了其中会出现裂缝、杂质、气孔等缺陷, 主要与其内聚强度和厚度有关; 另一个是粘接剂和被粘体界面上的结合强度, 在结构的使用过程中会逐渐减弱最终引起界面的脱粘. 但更通常的情况是介于脱粘和理想粘接之间的弱界面粘接, 是个统计和细观层面上的弱连接. 超声波很容易检测到如开裂、

* 国家自然科学基金(批准号: 11374230)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 10834009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wxhu@tongji.edu.cn

杂质、脱粘等引起声阻抗突变的缺陷,也尚能对粘接剂的内聚强度进行定量表征.因后者与粘接剂的弹性模量、声阻抗、粘滞性和厚度等可测物理参数有关.但对于粘接剂和被粘体界面的连接和粘附,由于其仅取决于材料界面处微米级厚度范围内原子、分子的相互作用力,对超声波的敏感性非常小,而通常恰恰是界面间的弱粘附比粘接剂内聚强度的减弱更早出现,而引起材料粘接最终的失效,所以界面弱粘接是粘接强度无损检测的关键.

超声对粘接体界面的无损检测通常分为体波界面反射法^[5-9]、体波谐振法^[10-14]和导波法^[15-22].理论上界面波对界面的检测最为敏感,但由于其激发和接收困难无法在实际中得到应用^[23].体声波反射法在使用中主要考虑体波在界面的反射,为了区分不同界面的反射波信号,一般需要使用高频宽带波^[5,6],而使得超声波的穿透深度有限;有研究表明横波(或切向应力)对界面粘附状态或边界条件更为敏感^[8],但使用单纯的横波探头会碰到入射波耦合的不稳定问题;使用纵波探头在斜入射条件下依靠模式的转换能够在界面产生切向应力^[7,8],但对接收反射波的实验条件要求非常苛刻,需要使用精确的测角仪设备^[9].此外,通常粘接剂和被粘材料的声阻抗反差很大,在其界面的反射率很高而掩盖了其中弱粘接的信息.谐振法是体波界面反射法中对两个以上界面反射波做频谱分析,其本质是由材料厚度方向的多次反射形成驻波,产生谐振模式.谐振模式的形成既和材料层自身的声学性质有关,也取决于该层上下端界面的边界条件(粘附状态).斜入射条件下,可以产生具有界面切向应力集中的模式,原则上讲对界面状态更具敏感性,但在实验上亦需要使用测角仪设备^[24,25].对导波而言,则是由厚度方向的谐振和界面方向的传播构成,传统的导波技术通常使用相距一定距离的发射和接收两个传感器来考察导波传播的相速度/群速度或衰减,针对一个比较大的区域进行检测,激发和接收的模式也非常有限,而且高频模式衰减增大难以检测.此外,由于导波和整体结构的参数都有关,用于粘接结构评估时,要从各种不同的影响因素中区分出界面参数的影响也并非易事.

针对超声波在检测粘接结构界面粘接强度上

的困难以及上述体波法和导波法的不足,一个更有效的方法是聚焦波反射法,或称 $V(z)$ 反演法^[26,27].该方法使用单一的聚焦和宽带纵波探头,工作于垂直入射和反射模式,大张角的聚焦声波能够有效地在粘接层内部激发出切向应力,而无需借助斜入射的实验手段.而宽带信号则能直接得到结构的谐振,经过反射信号的反演算法处理,重建出聚焦声场所有入射角覆盖范围内以及带宽内的谐振谱,也就是反射系数随入射角和频率变化的函数.而该反射函数的谐振恰好代表了结构的导波频散曲线.但它是一个结构局域处的导波模态分布,从而避免了传播衰减(尤其是高频模式).该方法已用于层状复合材料的检测^[28]和镀层界面的评估^[29],也可进一步应用于胶接板的粘接强度研究^[30].

鉴于反射谐振或导波频散与整个胶接层结构的材料、几何参数和界面粘接状态都有关,因此在反演结构中某个界面的弱粘接的过程中,或是需要预先确切地得知材料的其他各项性能和参数,或是要进行一个多参量的反演并从中区分出界面弱粘接的参数,但这种情况下常会碰到解的惟一性问题.本工作的目的在于研究和归纳粘接结构中影响其粘接强度包括粘接剂和界面强度的各个参数.以典型的金属-粘接剂-金属三层粘合板为例,从理论上分析粘接剂的声阻抗、密度、厚度以及粘接界面劲度系数变化对反射谐振或导波频散的影响,得出其演变规律和特性.为以谐振模式为依据,对粘接件的弱粘接界面进行无损检测提供理论基础.

本文首先建立超声波在多层介质中传播的模型,用于计算其平面波反射系数随入射角和频率变化的函数与导波频散曲线,并以一个液体中非对称厚度的铝金属-环氧树脂粘接剂-铝金属三层结构为例,解释两者一致性的条件.模型中用等效于线性弹簧的非连续位移-应力边界条件(或界面劲度系数)来描述界面的粘接性能.然后基于三层结构中两个单层铝金属的Lamb波来构造和组成总体结构的谐振或导波模式的频散,并以此作为分析谐振模式受其他参量改变而变化的依据和出发点.本文第二部分详细分析上述各个有关粘接强度的参量对模式频散变化的影响差异和特点,以便区分粘接剂本身的强度和粘接界面的强度.最后进行总结和讨论.

2 粘接结构声反射系数谐振函数和导波模式频散曲线

2.1 多层介质中声传播的建模

考虑一个浸润于无限延伸液体中的 N 层各向同性平面固体介质, 采用如图 1 所示坐标系并设其原点位于多层介质上表面, 一平面纵波以幅度 I_0 和角度 θ_0 入射, 分别在上、下液体中产生一反射纵波 R_0 和一透射纵波 T_{N+1} , 并在每层介质中形成四个部分波: 反射纵波 R_1 、反射横波 R_t 、透射纵波 T_1 和透射横波 T_t , 各介质中波动的位移矢量场可表示为该层内 ($z_{i-1} < z < z_i$) 所有平面波 (部分波) 的叠加,

$$B_i = \begin{bmatrix} \sin \theta_{1,i} & -\cos \theta_{t,i} & \sin \theta_{1,i} & \cos \theta_{t,i} \\ \cos \theta_{1,i} & \sin \theta_{t,i} & -\cos \theta_{1,i} & \sin \theta_{t,i} \\ j\omega Z_l \cos 2\theta_{t,i} & j\omega Z_l \sin 2\theta_{t,i} \frac{\sin \theta_{t,i}}{\sin \theta_{1,i}} & j\omega Z_l \cos 2\theta_{t,i} & -j\omega Z_l \cos 2\theta_{t,i} \frac{\sin \theta_{t,i}}{\sin \theta_{1,i}} \\ 2j\omega Z_t \sin \theta_{t,i} \sin \theta_{1,i} & -j\omega Z_t \cos 2\theta_{t,i} & -2j\omega Z_t \sin \theta_{t,i} \sin \theta_{1,i} & -j\omega Z_t \cos 2\theta_{t,i} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 Z_l, Z_t 分别为纵波和横波的声阻抗.

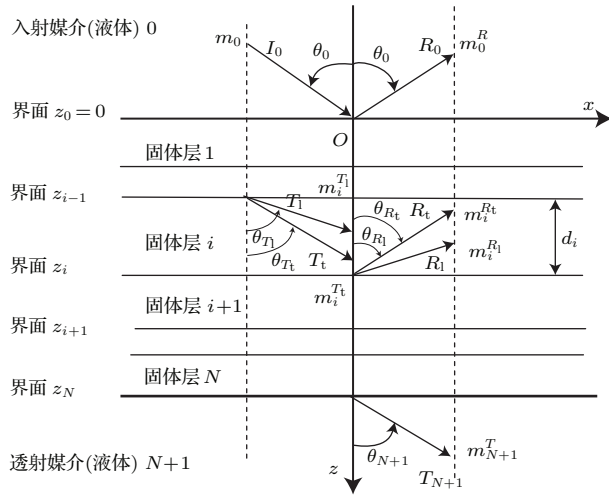


图 1 多层介质平面声波传播、反射和透射示意图

Fig. 1. Sketch of plane wave propagation, reflection and refraction in a multi-layered media.

根据方程 (2), 可以得到厚度为 d_i 的第 i 层上界面 $z = z_{i-1}$ 处的位移-应力 $U_i(x, z_{i-1})$ 和下界面 $z = z_i$ 处位移-应力 $U_i(x, z_i)$ 具有如下传递关系:

$$U_i(x, z_i) = T_i(d)U_i(x, z_{i-1}), \quad (4)$$

$$u_i(x, z) = \sum_{M=T_1, T_t, R_1, R_t} a_i^M e^{j\omega(m_x x + m_{z,i}^M z)}, \quad (1)$$

其中, ω 为角频率, m_x 为所有平面波慢度矢共同的 x 方向分量, $m_{z,i}^M$ 为慢度矢不同的 z 分量, a_i^M 为波动幅度矢量, 而各平面波的入射或反射角 $\theta_{T_1,i} = \theta_{R_1,i} = \theta_{1,i}$, $\theta_{T_t,i} = \theta_{R_t,i} = \theta_{t,i}$ 则可由 Snell 定理确定. 根据介质中位移和应力的关系, 可将波的位移-应力分量用矩阵形式表示成

$$U_i(x, z) = [u_{x,i} \ u_{z,i} \ \sigma_{zz,i} \ \sigma_{xz,i}]^T = B_i E_i A_i e^{j\omega m_x x}, \quad (2)$$

其中, $A_i = [a_i^{T_1} \ a_i^{T_t} \ a_i^{R_1} \ a_i^{R_t}]^T$ 由矢量 a_i^M 的 M 个波幅组成, $E_i = [\text{diag}(e^{j\omega m_{z,i}^M z})]$ 为一对角矩阵, B_i 被看作 i 层介质的特征矩阵,

其中 $T_i(d) = B_i E_i(d) B_i^{-1}$ 就是所谓的传递矩阵 [31,32].

另一方面, 在一个弱粘接 i 界面上, 其边界条件可采用如下应力-位移模型 [4,33]:

$$\begin{cases} \sigma_{zz,i+1} = \sigma_{zz,i} = k_n (u_{z,i+1} - u_{z,i}), \\ \sigma_{xz,i+1} = \sigma_{xz,i} = k_t (u_{x,i+1} - u_{x,i}), \end{cases} \quad (5)$$

其中 k_n, k_t 分别为界面的法向和切向线性劲度系数. (5) 式同样可以被表达成一个传递矩阵的形式,

$$U_{i+1}(x, z_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & k_t^{-1} \\ 0 & 1 & k_n^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} U_i(x, z_i) = I_i U_i(x, z_i). \quad (6)$$

然后按照每一层的应力-位移传递矩阵关系和界面传递矩阵关系进行递推, 最终得到多层介质上表面 $z = z_0 = 0$ 处的应力-位移和下表面 $z = D$ (多层介质总厚度) 处的应力-位移关系,

$$U_N(x, z_N) = T_G U_1(x, z_0), \quad (7)$$

其中 $T_G = T_N \prod_{i=N-1}^1 I_i T_i$ 为多层介质的应力-位移总传递矩阵.

另外, 考虑到多层介质上下表面的边界条件为固-液界面, 其切向应力为零, 方程 (7) 缩减为

$$\begin{bmatrix} u_{z,N+1} \\ \sigma_{zz,N+1} \end{bmatrix}_{z=D} = T'_G \begin{bmatrix} u_{z,0} \\ \sigma_{zz,0} \end{bmatrix}_{z=0}, \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} T'_G &= \begin{bmatrix} t'_{11} & t'_{12} \\ t'_{21} & t'_{22} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} t_{22} - t_{21}t_{42}/t_{41} & t_{23} - t_{21}t_{43}/t_{41} \\ t_{32} - t_{31}t_{42}/t_{41} & t_{33} - t_{31}t_{43}/t_{41} \end{bmatrix}, \quad (9) \end{aligned}$$

t_{ij} 和 t'_{ij} 分别为矩阵 T_G 和 T'_G 的元素.

根据 (2) 式, 在入射和透射液体中分别有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{z,0} \\ \sigma_{zz,0} \end{bmatrix}_{z=0} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\cos \theta_0 \\ j\omega Z_0 & j\omega Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ R_0 \end{bmatrix}, \quad (10) \\ \begin{bmatrix} u_{z,N+1} \\ \sigma_{zz,N+1} \end{bmatrix}_{z=D} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\cos \theta_0 \\ j\omega Z_0 & j\omega Z_0 \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} e^{j\omega D \cos \theta_0 / v_0} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} T_{N+1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11) \end{aligned}$$

其中 v_0, Z_0 分别为入射-透射液中的声速和声阻抗. 结合方程 (8) 和 (9), 得到如下方程组:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} t'_{11} \cos \theta_0 - t'_{12}j\omega Z_0 \cos \theta_0 \exp(j\omega D / v_0 \cos \theta_0) \\ t'_{21} \cos \theta_0 - t'_{22}j\omega Z_0 \cos \theta_0 \exp(j\omega D / v_0 \cos \theta_0) \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} R_0 \\ T_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t'_{11} \cos \theta_0 + t'_{12}j\omega Z_0 \\ t'_{21} \cos \theta_0 + t'_{22}j\omega Z_0 \end{bmatrix} I_0. \quad (12) \end{aligned}$$

该方程包含了多层介质 (包括其内部界面和外部液体加载在内) 所有超声传播特性和参数, 是该系统的一个完备方程. 令 I_0 为单位幅度, 则多层介质的平面波反射系数函数为

$$\begin{aligned} R_0(\theta_0, \omega) &= [(t'_{11} - t'_{22})\omega Z_0 \cos \theta_0 \\ &\quad + j(t'_{21} \cos^2 \theta_0 + t'_{12}\omega^2 Z_0^2)] / M, \quad (13) \end{aligned}$$

其中分母

$$M = (t'_{11} + t'_{22})\omega Z_0 \cos \theta_0$$

$$+ j(t'_{21} \cos^2 \theta_0 - t'_{12}\omega^2 Z_0^2), \quad (14)$$

令其为零,

$$M(\theta_0, \omega) \equiv 0, \quad (15)$$

便得到多层介质加载时的导波频散方程. 如果多层介质是在真空中或近似地在空气中, 可将 (15) 式中的负荷液体的声阻抗趋于零, $Z_0 \rightarrow 0$, 则有 $t'_{21} \equiv 0$ 或

$$t_{41}t_{32} - t_{31}t_{42} \equiv 0, \quad (16)$$

即得到多层介质无负荷时的导波频散方程.

根据由此建立的多层介质中的声传播模型, 理论上可以分别计算一个平面多层各向同性介质的声反射系数和导波模式频散曲线. 实际数值计算中, 有可能碰到所谓的数值稳定性问题, 可参照文献 [34] 进行处理和解决.

2.2 反射系数函数和导波频散曲线的关系

鉴于本工作最终涉及的检测手段是通过聚焦波反射来分析层状介质的导波模式行为, 进而探究界面的粘接性能和强度, 此处先明确反射系数函数与导波频散曲线之间的关系.

表 1 铝-环氧树脂-铝三层介质材料参数

Table 1. Parameters of aluminum-epoxy-aluminum three-layer structure.

	纵波声速 /m·s ⁻¹	横波声速 /m·s ⁻¹	密度 ρ/kg·m ⁻³	厚度/ mm
上层铝板	6212	3119	2699	1.416
环氧树脂	2200	920	1260	0.132
下层铝板	6212	3119	2699	0.544
上、下负荷 (水)	1500	0	1000	无限大

以一个铝-环氧树脂-铝三层平面粘接结构为例 (其材料参数如表 1 所列), 按 (13) 和 (16) 式分别计算该结构在水中的平面波反射系数随入射角和频率变化的函数和无负载 (真空中) 时的导波模式频散曲线. 图 2 (a) 中以灰度级形式给出反射系数的模量 $|R(\theta_0, f)|$ (深黑色代表低反射, 浅白色代表高反射); 图 2 (b) 为导波模式频散曲线, 为便于比较, 频散曲线的纵坐标与通常以相速度或波矢的表达方式不同, 是按关系式 $\theta_0 = \sin^{-1}(v_0/v_p)$, 将相速度 v_p 等效换算成角度 θ_0 的坐标, 而 v_p 与上节中参量 m_x 的关系为 $v_p = 1/m_x$, 以此方式再在图 2 (b) 中同时给出反射系数模量函数 $|R(\theta_0, f)|$.

可以看到, 导波的频散曲线与反射系数的零值或谷值(灰黑色)在 $[\theta_0, f]$ 域内的轨迹几乎完全一致. 为描述方便, 并考虑到三层介质厚度结构上的非对称性, 此处把导波模式按截止频率出现的顺序, 标记为 M_0, M_1, M_2, \dots . 比较上述频散曲线和反射系数函数, 两者有区别的地方仅为最低阶 M_0 模式.

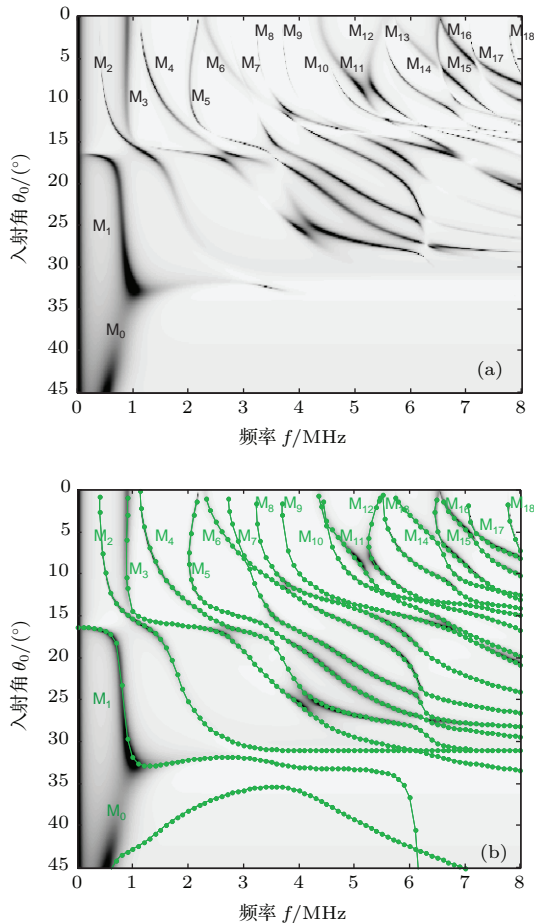


图2 铝-环氧树脂-铝三层介质理想界面条件下, (a) 反射系数函数的模量 $|R(\theta_0, f)|$ (水中) 以及 (b) 无负荷时(真空中) 导波模式频散曲线与 $|R(\theta_0, f)|$ 的叠加比较

Fig. 2. (a) Modulus of the reflection coefficient function $|R(\theta_0, f)|$ (in water); (b) comparison of the $|R(\theta_0, f)|$ with the guided wave modes dispersion curves (in vacuum) for an Al/epoxy-resin/Al three-layer having perfect interface bonding.

这种反射系数函数和导波频散曲线的一致性可以用上述系统方程的解 (13) 和 (14) 式来进行解释: 图2中反射系数函数的谷值(最小值)是解析 (13) 式中分子函数当频率 f 是实数时入射角 θ_0 在其实轴上的极小值点, 这些极小值不一定是零点却和入射角复平面上的零点相距不远, 近似地等于其实部; 而其分母函数在入射角复平面上的零点(或该解析式的极点)则相当于同样条件下(水负荷介

质)的泄漏导波的复频散曲线. 通常情况下, 一个函数的零点和极点并不一致和相同, 有研究指出 [35], 只有当固体介质的密度或声阻抗远大于负荷介质的密度或声阻抗时, 两者才趋于一致. 但如果作比较的是反射系数函数的极小值和无水负荷时的导波频散曲线, 则此处的解相当于 (14) 或 (13) 式的分母函数中当水的声阻抗 $Z_0 = 0$ 时的解. 实际上, 当 $Z_0 \rightarrow 0$ 时, 原先入射角复平面上的零点移动到了实轴上, 但其实部的变化不明显, 也就是和原先分子上零点的实部一致, 此时物理上体现为导波不再具有泄漏. 事实上我们也数值计算了结构带水负荷时的导波频散解, 与反射系数函数极小值作比较时, 反而无水负荷时的导波解与之更趋一致. 关于导波的实根与复根解以及有无负荷时解的区别问题, 可以作进一步的研究, 因不是本文的主要议题, 不在此赘述.

为方便叙述起见, 以下将反射系数入射角和频率谐振函数以及导波模式频散曲线统称为结构的谐振函数或模式谐振.

2.3 三层介质理想粘接界面条件下谐振模式的组成结构

为了有效地分析粘接结构不同参数变化对其谐振模式的影响以及影响的程度和规律, 需要有一个该结构谐振模式的标准或参照, 相当于结构在理想界面粘接以及正常的材料参数条件下的谐振模式行为. 对本文研究的三层介质而言, 这个模式参照有其自身的组成规律. 考虑到金属铝和粘接剂声阻抗的反差以及上下铝层的位置, 可以从单层铝板的导波谐振模式入手, 图3给出了三层粘接结构以反射函数形式给出的谐振模式(灰度级表达, 极小值处的模式标为 M_i) 和该三层结构中上下两个铝层单独的导波模式频散曲线(红色为上层厚铝板频散模式, S_i, A_i 分别为其对称和反对称模式; 蓝色为下层薄铝板频散模式, S_i^*, A_i^* 分别为其对称和反对称模式). 从图3可以看到, 三层结构的谐振模式中的相当一部分与上下两层铝板单独的模式重叠, 其中三层结构的某一个模式频散曲线可以由不同铝单层或同一铝单层的模式在不同频段上分段组成, 或者说同一单层模式可以分属于三层结构不同模式中, 而未重叠部分则与铝单层模式 S_i, A_i 及 S_i^*, A_i^* 相互交接并使得他们之间能够相互过渡, 具

体可以将三层结构的谐振模式 M_i 对照图 3 中重叠和不重叠的成分组成按频率由低到高的顺序依次连接, 表达如下:

$$\begin{aligned}
 M_0 &= A_0; \\
 M_1 &= S_0 + M_1 + A_0 + M_1 + A_0^*; \\
 M_2 &= M_2 + S_0; \\
 M_3 &= M_3 + S_0^* + A_1 + M_3; \\
 M_4 &= A_1 + S_0^* + M_4 + A_1 + S_0^*; \\
 M_5 &= S_1 + M_5 + S_0^* + M_5; \\
 M_6 &= S_2 + M_6 + S_1 + M_6 + A_1; \\
 M_7 &= A_1^* + M_7 + S_2 + A_2 + M_7 + S_1; \\
 M_8 &= A_2 + S_2 + M_8 + A_2; \\
 M_9 &= M_9 + A_1^* + S_2; \\
 M_{10} &= S_3 + M_{10} + A_1^*; \\
 M_{11} &= A_3 + S_1^* + A_3; \\
 M_{12} &= S_1^* + A_3 + S_1^*; \\
 M_{13} &= A_4 + M_{13} + S_3; \\
 M_{14} &= S_2^* + M_{14} + A_4; \\
 M_{15} &= S_4 + M_{15} + S_4; \\
 M_{16} &= S_5 + S_2^* + M_{16}; \\
 M_{17} &= M_{17} + S_5; \\
 M_{18} &= A_5.
 \end{aligned}$$

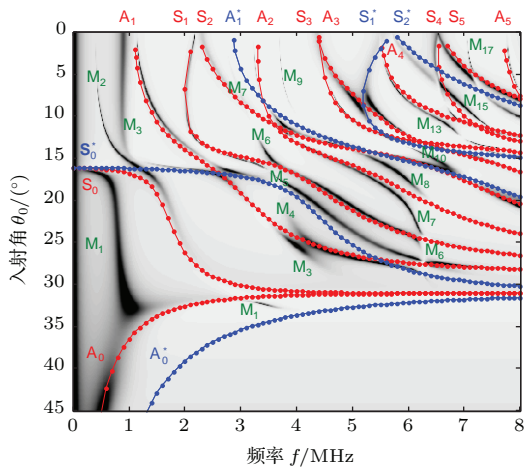


图 3 铝-环氧树脂-铝三层介质理想界面条件下的反射谐振函数模量 $|R(\theta_0, f)|$ 和(真空中)厚、薄铝单层的模式频散曲线比较(厚层, 红色线条; 薄层, 蓝色线条)

Fig. 3. Modulus of the reflection resonance function $|R(\theta_0, f)|$ of Al/epoxy-resin/Al three-layer having perfect interface bonding and its comparison with the guided modes dispersion of a single thick (in red) and a thin (in blue) aluminum layer.

在这些组合中, 三层结构模式从一个铝单层模式过渡到另一个铝单层模式的部分(以绿色字母标记), 属于三层结构自身的谐振模式, 或者认为是上下铝层通过中间层粘接剂耦合而形成的模式. 它们的位置和形态, 主要取决于粘接层的特性及其与上下铝层粘接界面的特性, 正是这一部分的谐振模式反映了粘接剂强度和界面粘接强度的性能. 以下把这部分属于三层粘接结构总体谐振的模式部分称为可变部分(相对于上、下铝层的谐振模式为固定部分), 并基于这部分谐振模式的变化规律, 来研究三层结构粘接剂和粘接界面的强度.

3 粘接结构中 与粘接强度有关的参数 改变引起的谐振模式变化

3.1 界面切向劲度系数 k_t 改变引起的模式变化

实际中, 粘接材料的负载能力通常被剪切粘接强度所限制^[36], 因此本文仅改变切向 k_t 值来表征界面粘接强度并分析该值变化时与三层粘接结构谐振模式变化之间的关系. 图 4 给出了上述铝-环氧树脂-铝结构上下界面 k_t 变化时的反射谐振函数, 并与其中厚薄两个单层铝板的模式频散曲线作对比, 图 4(a1) 和图 4(a2) 分别为上界面切向劲度系数 $k_t^{(1)}$ 为 5×10^{13} 和 10^{12} N/m³ 时的计算结果; 图 4(b1) 和图 4(b2) 分别为下界面 $k_t^{(2)}$ 为 5×10^{13} 和 10^{12} N/m³ 时的结果; 图 4(c1) 和图 4(c2) 分别为上界面 $k_t^{(1)}$ 、下界面 $k_t^{(2)}$ 均取 5×10^{13} 和 10^{12} N/m³ 时的结果. $k_t = 5 \times 10^{13}$ N/m³ 相当于一个中等强度的弱粘接界面, 而 $k_t = 10^{12}$ N/m³ 则为弱粘接强度的下限. 通过对图 4 中各谐振模式变化的分析并与图 3 中理想粘接界面的结果进行比较, 可以得出以下结论: 1) 当界面粘接劲度系数 k_t 改变时, 三层结构谐振模式中原本属于上、下单铝层的固定模式(图 4 中红色和蓝色曲线以及字母的标记段)基本不受影响; 2) 当界面粘接劲度系数 k_t 值连续地减小时, 可变模式部分(图 4 中由绿色字母标记段)均朝频率减小的方向偏移; 3) 上界面的 $k_t^{(1)}$ 参数变化或下界面的 $k_t^{(2)}$ 变化产生同方向的模式谐振频率偏移, 因此仅从偏移量的改变上比较难以区分是由哪一个界面粘接劲度系数变化而引起; 4) 当上下界面的 $k_t^{(1)}$ 、 $k_t^{(2)}$ 参数同时变化时, 移动部分模式

曲线的偏移量(谐振频率)甚于由单个界面 k_t 参数变化引起的偏移量, 由于两种情况都朝同样的方向偏移, 不会互相抵消, 因此当 k_t 均减小至下限值时

(相当于滑移界面), 双滑移界面的模式谐振或频散曲线分布(偏移量)不同于单个界面滑移条件时的分布.

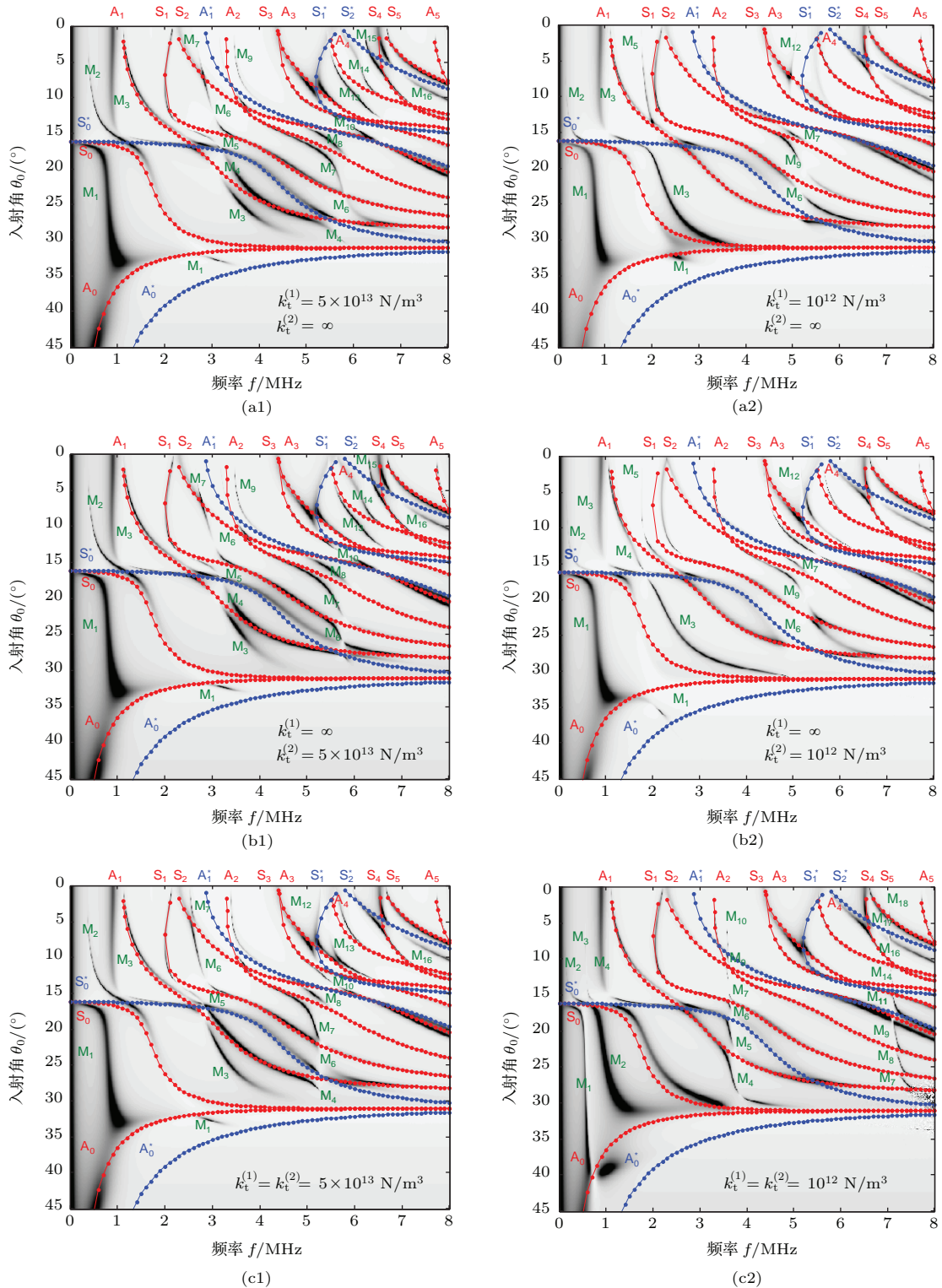


图4 铝-环氧树脂-铝三层介质非理想界面条件下 ($k_t^{(1)}, k_t^{(2)}$ 分别为上、下界面切向劲度系数) 的反射系数谐振函数模量 $|R(\theta_0, f)|$ 的变化及其与厚、薄铝单层的模式频散曲线的比较 (厚层, 红色线条; 薄层, 蓝色线条)

Fig. 4. Changes in modulus of the reflection resonance function $|R(\theta_0, f)|$ for the Al/epoxy-resin/Al three-layer having imperfect interface bonding ($k_t^{(1)}, k_t^{(2)}$ represent respectively the upper and lower interface shear stiffness) and its comparison with the modes dispersion curves of a single thick (in red) and thin (in blue) aluminum layer.

此外还可以发现, 固定不变的谐振模式除了上下两个单铝层的模式外, 还包括三层结构 M_1 , M_3 模式的低频垂直段 ($f < 1.5$ MHz, $\theta_0 < 35^\circ$); 而可变模式部分在最初理想界面条件下基本分布于两个频率附近(见图 3), 一是 4 MHz 附近, 二是 7 MHz 附近. 随着两个界面 k_t 值的逐渐减小, 这两组曲线段落各自向频率低的方向不断地平移, 当 k_t 值同时减至近下限值 10^{12} N/m³ 时(图 4(c2)), 这些移动模式渐渐地收敛成三条垂直线, 原来 4 MHz 附近的模式趋近至 0 MHz, 原来 7 MHz 附近的模式趋近至 3.5 MHz, 而汇集于 7 MHz 频率处的模式则来自于原先 8 MHz 以上的频段, 它们之间最终的间隔为 3.5 MHz, 这个频率周期恰好是三层结构中粘接剂层中的横波在其厚度上的谐振频率, 相当于其上下界面为滑移边界条件时形成的横波自由边界谐振模式. 当然这个横波谐振只是趋于极端界面条件下的一种渐近模式, 物理上无法直接通过上下铝层激发得到, 而实际上也很少达到这种两端都是自由边界的条件.

此处需要理解的是, 模式曲线在 $[\theta_0, f]$ 域内的移动是一个连续渐变的过程, 当某个移动模式趋近一个固定模式位置时, 将会停止不动, 变为固定模式, 而原来的固定模式则接替原来移动的模式继续推进, 这样就产生了一个模式交换和替代的过程, 如果是向频率低的方向移动的话, 原先低阶模式的位置会被高阶模式所替代.

3.2 粘接剂层厚度改变引起的模式变化

设三层结构为理想粘接状态, 图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了当粘接剂层的厚度 d_c 为 0.1 和 0.2 mm 时的反射谐振函数与 d_c 为 0.132 mm 时模式频散曲线的对照. 通过分析, 其变化规律可归结为: 1) 当粘接剂层的厚度 d_c 减小时, 可变部分的谐振模式一致地向频率高的方向偏移; d_c 增大时, 向低频处偏移; 2) 这种由粘接剂厚度改变而引起的谐振模式频散的变化与界面参数改变而引起的频散变化有着相似性, 均是朝着同一个频率变化方向偏移, 但与界面参数改变不同的是, 粘接剂厚度的改变亦引起结构模式 M_1 , M_3 低频段 ($f < 1.5$ MHz) 的漂移, 因而在进行界面粘接强度检测时一方面可以预先测定粘接剂层的厚度, 再来测定界面参数, 另一方面也可以以低频 M_1 , M_3 模式作为标记和参

考, 来区分界面参数和粘接剂层的厚度对谐振模式带来变化的不同.

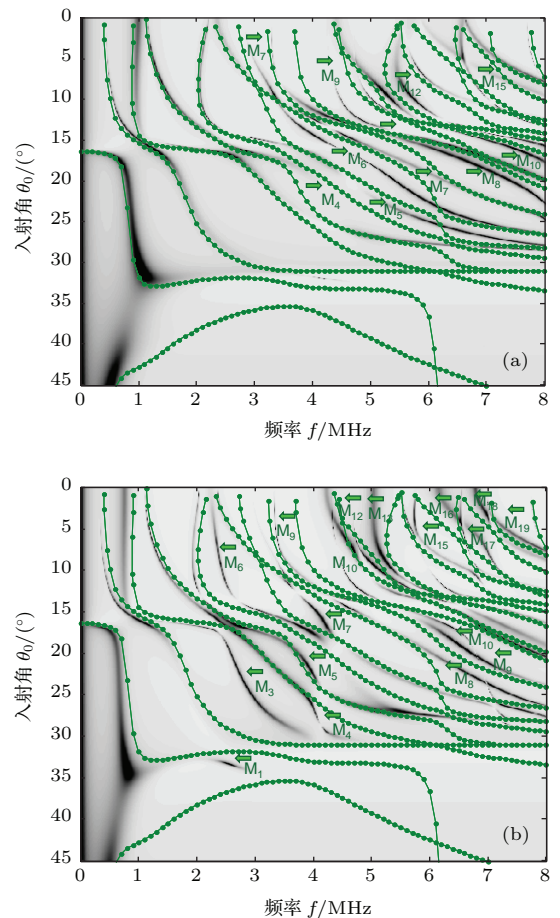


图 5 铝-环氧树脂-铝三层介质理想界面条件下改变粘接剂层厚度 d_c 时的反射谐振函数模量 $|R(\theta_0, f)|$ 及其与三层结构粘接剂层厚度为 $d_c = 0.132$ mm 时的模式频散曲线(绿色线条)的对比 (a) $d_c = 0.1$ mm; (b) $d_c = 0.2$ mm

Fig. 5. Changes in modulus of the reflection resonance function $|R(\theta_0, f)|$ for the Al/epoxy-resin/Al three-layer having different thicknesses d_c of the epoxy layer and its comparison with the mode dispersion curves (in green) of the three-layer having $d_c = 0.132$ mm: (a) $d_c = 0.1$ mm; (b) $d_c = 0.2$ mm.

3.3 粘接剂性能参量(质量密度)改变引起的模式变化

这一节分析粘接剂质量密度改变对三层结构谐振模式的影响. 图 6(a) 和图 6(b) 给出了三层粘接结构中粘接剂密度分别为 $\rho_c = \rho_0/2$ 和 $\rho_c = 2\rho_0$ 时的谐振函数与固定密度 $\rho_0 = 1260$ kg/m³ 时的模式频散曲线的对比. 通过对比和观测, 可得出: 1) 当粘接剂密度改变时, 不同模式的谐振频率不再沿同一个方向偏移, 而是既有向高频方向偏移的模

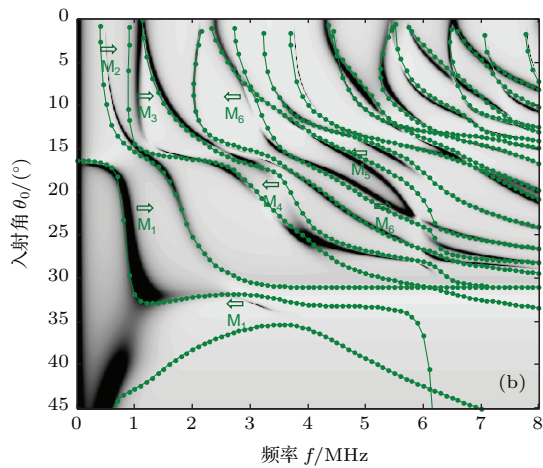
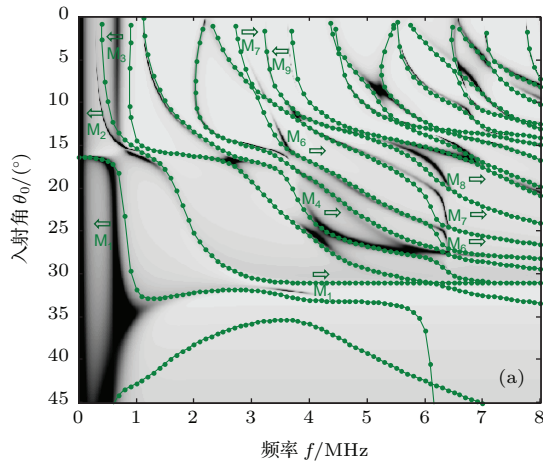


图6 铝-环氧树脂-铝三层介质中改变环氧树脂密度 ρ_c 时的反射谐振函数模量 $|R(\theta_0, f)|$ 及其与三层结构粘接剂固定密度时 ($\rho_0 = 1260 \text{ kg/m}^3$) 的模式频散曲线 (绿色线条) 的对比 (a) $\rho_c = \rho_0/2$; (b) $\rho_c = 2\rho_0$

Fig. 6. Changes in modulus of the reflection resonance function $|R(\theta_0, f)|$ for the Al/epoxy-resin/Al three-layer having different adhesive densities of the epoxy layer and its comparison with the mode dispersion curves (in green) of the three-layer having $\rho_c = 1260 \text{ kg/m}^3$: (a) $\rho_c = \rho_0/2$; (b) $\rho_c = 2\rho_0$.

式, 也有向低频方向偏移的模式 (见图6中各箭头所指), 其结果是某些模式之间的相对距离 (频率间隔) 变得更大, 某些变得更小. 因而在其他参量都确定的情况下, 至少能够从谐振模式的频散上, 识别和区分是界面参数 k_t 的改变还是粘接剂密度的改变引起了谐振模式的变化; 2) 粘接剂密度的改变, 除了影响模式的谐振频率外, 也会引起反射函数谐振宽度的变化, 使图6中代表模式谐振的黑色峰谷变得更宽, 因此对谐振峰宽度的定量测定也可用作对结构中粘接剂性能进行检测的一项声学指标. 能引起谐振峰变宽的参数还有粘接剂的粘滞系数或

声衰减系数, 因本文未考虑这些参数的介入, 故此处不对其做进一步的研究.

3.4 粘接剂性能参量 (声阻抗比) 改变引起的模式变化

粘接剂声阻抗比的改变相当于其纵波声速和横波声速之比的变化, 设 $r = Z_L/Z_T$, 其中 Z_L 和 Z_T 分别是粘接剂的纵波声阻抗和横波声阻抗, 图7为三层结构中 $r = 1.5$ 和 $r = 3$ 时的谐振函数并与 r 取 $Z_L/Z_T = 2200/920=2.39$ 时的模式频散曲线作对比.

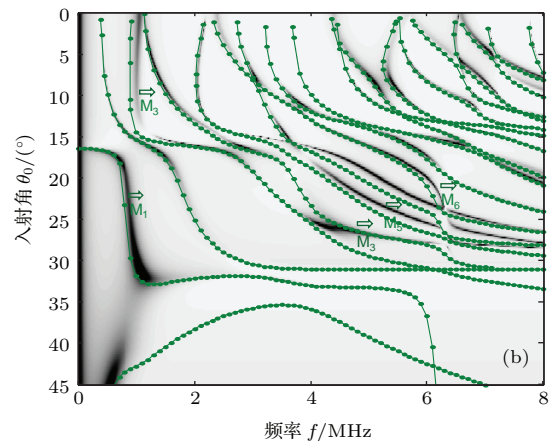
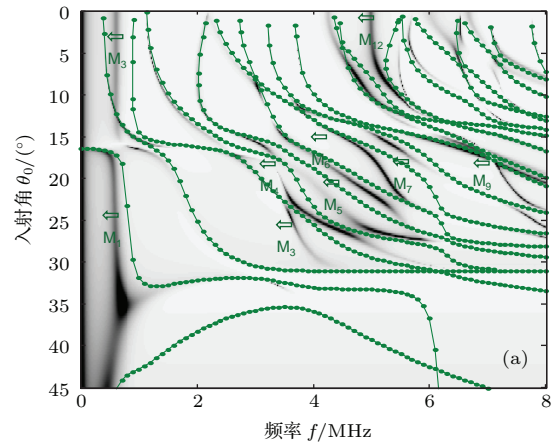


图7 铝-环氧树脂-铝三层介质中改变环氧树脂纵波和横波声阻抗之比 $r = Z_L/Z_T$ 时的反射谐振函数模量 $|R(\theta_0, f)|$ 及其与三层结构粘接剂 $r = 2.39$ 时的模式频散曲线 (绿色线条) 的对比 (a) $r = 1.5$; (b) $r = 3.0$

Fig. 7. Changes in modulus of the reflection resonance function $|R(\theta_0, f)|$ for the Al/epoxy-resin/Al three-layer having different acoustical impedance ratios between longitudinal and shear waves $r = Z_L/Z_T$ of the epoxy layer and its comparison with the mode dispersion curves (in green) of the three-layer having $r = 2.39$: (a) $r = 1.5$; (b) $r = 3.0$.

此时谐振模频率的改变趋势类似于当粘接剂层厚度改变时的变化,即一致地朝低频或高频的方向移动,但不同模式移动的程度则与厚度改变时的变化有区别.厚度改变时,移动模式的形态主要与频率和厚度的乘积有关,比如厚度变大时,粘接剂层模式在频率上的飘移量基本上可以按频率与厚度之积不变来断定,当然也受其与上下层模式的连接方式的影响.而当 r 变化时,则需要进一步分析这些模式中哪些具有纵波谐振的性质,哪些具有横波谐振性质,也就是说这些模式的谐振频率有些取决于纵波声速,有些取决于横波声速,如果能识别谐振频率的性质(纵波或横波),也就能区分这种变化与其他参数引起变化的不同.

4 结 论

本文针对粘接材料界面粘接强度超声无损检测中的困难和遇到的具体问题,提出用宽带聚焦声波在平面粘接结构垂直方向作反射波的 $V(z)$ 测量,以反演方法得到结构平面波随频率和入射角变化的反射系数函数,并以此作为目标函数,来评估粘接结构的各项性能,尤其是结构界面的粘接强度.

为此,首先在建立多层介质中声传播模型的基础上,计算了一个铝-环氧树脂-铝三层粘接结构的反射系数函数和导波频散曲线,分析了两者的-致性,将其作为粘接结构的谐振模式,用以分析结构的各个参数,尤其针对和其中粘接剂性能有关的参数和反映界面粘接强度的界面劲度系数 k_t .

为了揭示不同参数对谐振模式的影响和影响的程度和方式,一方面将三层粘接结构中上下两个单铝层的Lamb导波模式作为参照,表明三层结构的大部分谐振模式本身包含了被粘材料层的导波模式或由这些模式的组合构成,而且这些模式基本不受夹心层环氧树脂性能和界面粘接状态的影响,改变界面切向劲度系数 k_t ,可观察到谐振模式的变化规律为其可变部分的模式段在固定模式段之间进行频率平移并产生与固定模式的交换和替代;另一方面改变粘接剂层的性能参数(厚度、密度和声阻抗),将其谐振模式与理想粘接三层结构的导波模式作比较,分析和归纳了这些参数改变时谐振模式各自不同的演变规律.

以上研究为进一步应用超声谐振模式对材料粘接强度的定量无损评估提供了理论依据.

参考文献

- [1] Maeva E, Severina I, Bondarenko S, Chapman G, O'Neill B, Severin F, Maev R G 2004 *Can. J. Phys.* **82** 981
- [2] Li M X 2009 *10000 Selected Problems in Sciences: Physics* (Beijing: Science Press) p356 (in Chinese) [李明轩 2009 10000个科学难题 物理学卷(北京:科学出版社)第356页]
- [3] Awaja F, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram P J 2009 *Prog. Polym. Sci.* **34** 948
- [4] Baik J M, Thompson R B 1984 *J. Nondestr. Eval.* **4** 177
- [5] Titov S A, Maev R G, Bogachenkov A N 2008 *Ultrasonics* **48** 537
- [6] Zhou H M, Liu G W 2012 *Measurement* **45** 1414
- [7] Pilarski A, Rose J L 1988 *J. Appl. Phys.* **63** 300
- [8] Pilarski A, Rose J L 1988 *NDT International* **21** 241
- [9] Vine K, Cawley P, Kinloch A J 2002 *NDT & E Int.* **35** 241
- [10] Drinkwater B, Cawley P 1997 *Ultrasonics* **35** 479
- [11] Baltazar A, Wang L, Xie B, Rokhlin S I 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **114** 1424
- [12] Leiderman R, Braga A M B, Barbone P E 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **118** 2154
- [13] Belloncle V V, Rousseau M, Terrien N 2007 *NDT & E Int.* **40** 419
- [14] Akker S, Arman J 1997 *Ultrasonics* **35** 287
- [15] Pilarski A, Rose J L 1992 *J. Nondestr. Eval.* **11** 237
- [16] Singher L, Segal Y, Segal E, Shamir J 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 2497
- [17] Xu P C, Datta S K 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 6779
- [18] Karpur P, Kundu T, Ditri J J 1999 *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (Vol. 18A-18B) (NewYork: Springer US) **18** pp1533-1542
- [19] Castaings M 2014 *Ultrasonics* **54** 1760
- [20] Ren B, Lissenden C J 2013 *Int. J. Adhes. Adhes.* **45** 59
- [21] Gao G J, Deng M X, Li M L, Liu C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224301 (in Chinese) [高广健, 邓明晰, 李明亮, 刘畅 2015 物理学报 **64** 224301]
- [22] Zhang R, Wan M X, Cao W W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1297 (in Chinese) [张锐, 万明习, Cao Wen-Wu 2000 物理学报 **49** 1297]
- [23] Vinh P C, Giang P T H 2011 *Wave Motion* **48** 647
- [24] Bar-Cohen Y, Mal A K, Lih S S 1993 *Materials Evaluation* **51** 1285
- [25] Rokhlin S I, Wang W 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 1876
- [26] Liang K K, Kino G S, Khuri-Yakub B T 1985 *IEEE Trans. Sonics. Ultrason.* **32** 213
- [27] Xü W J, Ourak M 1997 *NDT & E Int.* **30** 75
- [28] Xü W J, Ourak M, Lematre M, Bourse G 2000 *AIP Conference Proceedings* Montreal, Canada, July 25-30, 1999 p1183
- [29] Bourse G, Xü W J, Mouftiez A, Vandevoorde L, Ourak M 2012 *NDT & E Int.* **45** 22
- [30] Liu J, Xu W J, Hu W X, Ourak M, Dubois A 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 124303
- [31] Thomson W T 1950 *J. Appl. Phys.* **21** 89

- [32] Lowe M J S 1995 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **42** 525
- [33] Rokhlin S I, Wang Y J 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 503
- [34] Rokhlin S I, Wang L 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 822
- [35] Chimenti D E, Rokhlin S I 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 1603
- [36] Crom B L, Castaings M 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 2220

Evolution of the ultrasonic resonance modes in a three-layer structure with change of material and interface adhesion properties*

Liu Jing¹⁾ Xu Wei-Jiang²⁾ Hu Wen-Xiang^{1)†}

1) (*Institute of Acoustic, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

2) (*Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie UMR CNRS 8520, Département Opto-Acousto-Electronique, Université de Valenciennes, Valenciennes 59313, France*)

(Received 8 October 2015; revised manuscript received 7 December 2015)

Abstract

The quantitative non-destructive evaluation (NDE) of interface adhesion has long been a challenge for the safe use of bonding structures. It is difficult to predict the adhesion resistance force between adhesive and adhered material without performing destructive testing. Ultrasonic approach seems to be the only potential way for its NDE based on the reason of mechanical nature of the problem.

Different ultrasonic techniques, such as bulk wave echography, reflection resonance, and Lamb guided waves, have been used to evaluate the interface adhesion strength. But no direct relation between the interfacial bonding strength and the ultrasonic measurement has been established. The most used compression wave echography and resonance at normal incidence are less sensitive to the interface condition, except for a disbond. It is essential that the interface should be excited with a shear stress component to increase the measurement sensibility. But it is not easy to excite the interface by using shear waves in experiment, while the use of guided waves will encounter the problems of high attenuation and mode selection as all modes are not sensitive to a certain interface in a bonded structure.

A previous study has shown that the $V(z)$ inversion technique can be used to perform a multimode measurement on a layered structure, where both compression and shear stress resonance occur. This method has the advantage in using a simple experimental setup working at the normal incidence with a focus transducer of large angular aperture. The inversed angular-frequency reflectance function $R(\theta, f)$ gives the resonance modes which are equivalent to the Lamb type guided modes, while it is a local determination of the wave mode, thus the difficulty in guided wave measurement above mentioned can be avoided.

The first part of the paper contains the development of the theoretical model for wave propagation in a multilayered structure where three-layer sandwich bonded structures can be considered as a particular case. A weak interfacial adhesion is described by two interface compression and shear stiffness parameters, namely k_n and k_t . By integrating the transfer matrix formalism under the non-ideal boundary conditions, the plane wave angular (incident angle) and frequency reflection coefficient function $R(\theta, f)$ for a liquid immersed asymmetric metal-adhesive-metal three-layer and

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11374230) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10834009).

† Corresponding author. E-mail: wxhu@tongji.edu.cn

its dispersion curves of guided mode waves with or without charge are calculated. It is confirmed that the evolutions of the reflection zeros (mode resonances) correspond to the dispersion curves of the guided waves of the same structure without charge. Furthermore, the resonance modes observed in $R(\theta, f)$ can be considered as a combination of the respective Lamb modes of the top and bottom single metal layers coupled through the modes conditioned by the middle adhesive layer and the its interface conditions.

The second part of the paper shows the behaviors of the resonance modes by changing the parameters related to the bonding strength. The acoustical impedance, the mass density and the thickness of the adhesive layer, which are related to the cohesive property, and the shear interfacial stiffness coefficient k_t which conditions the adhesive property, are changed respectively to observe the resonance mode evolutions. The mode evolutions due to each parameter are analyzed and differentiated. It can be concluded that the change in the adhesion strength of the bonding structure does not affect significantly the modes belonging to those inherent to the two adhered aluminum layers, while the coupling modes will be shifted in frequency and exchange with or replace the said inherent modes.

It is expected that the obtained results in this study will be of significance for quantitatively characterizing the interfacial properties of an adhesively bonded layered structure by using the $V(z)$ inversion technique.

Keywords: bonding structure, interface adhesion, acoustic reflection resonance function, mode dispersion

PACS: 43.20.El, 43.35.Cg, 43.40.Le, 43.20.Bi

DOI: [10.7498/aps.65.074301](https://doi.org/10.7498/aps.65.074301)