

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412411

用于 ZGV Lamb 波检测的 PVDF 梳状换能器及性能研究*

郭 帅, 尹莘新, 邓明晰
(重庆大学航空航天学院 重庆 400044)

摘要:能够准确激励与响应零群速度(ZGV)Lamb波的换能器是ZGV Lamb波检测应用的重要支撑。现有用于ZGV Lamb波检测的换能器存在信号弱、信噪比低等问题,为此,本文设计了一种柔性好、灵敏度高的聚偏二氟乙烯(PVDF)梳状换能器,并研究了换能器对ZGV Lamb波的激发响应性能。首先,分析了梳状换能器的工作特性,根据薄铝板的ZGV模式设计制作了PVDF梳状换能器;其次,在不同中心频率的脉冲信号下通过PVDF梳状换能器激发ZGV Lamb波,并与PVDF方形电极换能器做了性能对比实验;最后,分析了PVDF梳状换能器电压响应特性与附着层厚度之间的关系。实验结果表明,设计制作的PVDF梳状换能器能够精准的激励与响应ZGV Lamb波,其响应信号的ZGV频域幅值相对大小随着附着层厚度的增加显著减小。

关键词: 零群速度 Lamb 波; PVDF; 梳状换能器; 附着层厚度

中图分类号: TH89 O426. 4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40 140. 20

PVDF comb transducers for ZGV Lamb waves detection and its performance study

Guo Shuai, Yin Shenxin, Deng Mingxi

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The transducer that can accurately excite and respond to zero group velocity (ZGV) Lamb waves is crucial for the application of ZGV Lamb waves detection. The traditional transducers used for ZGV Lamb waves detection suffer from issues such as weak signals and low signal-to-noise ratio. In this paper, a polyvinylidene fluoride (PVDF) comb transducer with good flexibility and high sensitivity is designed, and the excitation response performance of the transducer to ZGV Lamb waves is studied. Firstly, the operating characteristics of the comb transducer are analyzed, and the PVDF comb transducer is designed and manufactured according to the ZGV mode of a thin aluminum plate. Subsequently, the ZGV Lamb waves were excited by the PVDF comb transducer under the pulse signals with different center frequencies, and performance comparison experiments were conducted with PVDF square electrode transducers. Finally, the relationship between the voltage response characteristics of the PVDF comb transducer and the thickness of the attachment layer was analyzed. Experimental results demonstrate that the PVDF comb transducer designed and manufactured can accurately excite and respond to the ZGV Lamb waves. Moreover, the relative amplitude of the ZGV frequency domain of the response signals decreases significantly with the increase of the thickness of the attachment layer.

Keywords: ZGV; Lamb waves; PVDF; comb transducers; attachment layer thickness

0 引 言

零群速度(zero group velocity, ZGV) Lamb波是群速度为0但相速度不为0的特殊Lamb波模式^[1],能量被限制于激发源附近无法传播,频域上表现为尖锐的共振峰,

常被用于检测材料特性、厚度变化^[2-4]。在结构中能够准确激励与响应ZGV Lamb波的换能器是实现ZGV Lamb波有效检测的关键。传统锆钛酸铅(lead zirconium titanate, PZT)压电换能器^[5]由于给待测结构带来过大质量与刚度,极大改变了ZGV模式的形成条件,难以准确激发与响应ZGV Lamb波。目前,具有非接触优势的激

光超声换能器被广泛应用于 ZGV Lamb 波检测的实验研究中^[6-8]。然而,激光超声换能器体积庞大且价格昂贵,原位检测及在线监测困难。同时,受到热弹性条件的限制,在结构中激发的 ZGV Lamb 波信号较弱,信噪比低。

近年来,聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 压电换能器被证实可用于 ZGV Lamb 波的激励与响应。Liu 等^[9]利用 PVDF-TrFE 换能器成功激发 ZGV Lamb 波并用于层合板脱键缺陷的评估;Cao 等^[10]采用涂层式 PVDF 换能器研究了 ZGV Lamb 波的频移与衰减特性及其检测粘结结构的能力。与传统 PZT 压电换能器相比,PVDF 压电换能器具有结构轻量化、外形薄、柔性高等优势,使其可长期紧密贴合于待测结构表面,从而开展损伤检测与结构健康监测工作^[11-12]。然而 PVDF 压电薄膜换能器的压电系数低,激励的 ZGV Lamb 波信号微弱^[13];并且受到 Lamb 波多模态特性的影响^[14],信号分析复杂。PVDF 梳状换能器^[15]具有良好的导波模式选择能力而吸引了众多研究学者的关注,Li 等^[16]研究了能在管道表面激发与接收 $L(0,6)$ 模态 Lamb 波的 PVDF 梳状换能器,并用于检测材料热疲劳损伤;Zhu 等^[17]设计制作了可在铝板中激发出特定模式兰姆波的 PVDF 梳状换能器,并成功用其检测到非线性信号。PVDF 梳状换能器不仅能够降低兰姆波多模态特性的影响,且可将能量集中于所选择的模式,有效弥补 PVDF 压电薄膜换能器激发的信号能量微弱问题。然而国内外鲜有用于 ZGV Lamb 波检测的 PVDF 梳状换能器,或基于 PVDF 梳状换能器激励与响应 ZGV Lamb 波实验研究。

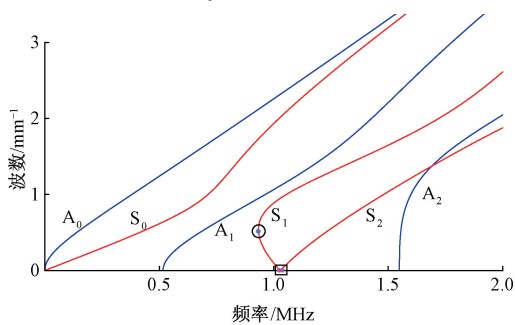
基于以上原因,本文利用梳状电极的 ZGV 模式选择条件设计制作了一种 PVDF 梳状换能器,通过在薄铝板中安置 PVDF 梳状换能器对 ZGV 模式的激发响应性能进行了实验测试,并基于 ZGV 模式验证了 PVDF 梳状换能器检测薄板表面附着层厚度的能力。

1 PVDF 梳状换能器设计

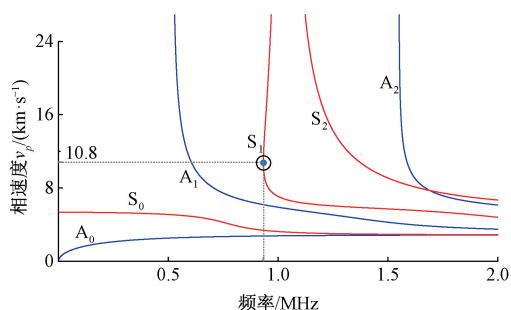
1.1 ZGV 点的确定

PVDF 梳状换能器的设计需要先确定待测结构的 ZGV 点。以 3 mm 厚度的 6061 铝板为例,如图 1 所示是其频散曲线,从图 1(a) 频率-波数关系可知, S_1 模式中存在一个特殊拐点(圆框内标点所示),该点频率最小且波数不为零,即为 ZGV 模式。该 ZGV 点的频率 $f=0.933$ MHz、波数 $k=0.537$ mm⁻¹、相速度 $v_p=10.8$ km/s。需要注意的是在 S_1 模式与 S_2 模式的波数 $k=0$ 处,存在两个十分接近的截止频率点^[18](方框内标点所示),频率分别为 1.023、1.033 MHz,截止频率点处会产生厚度共振响应,类似于光学中的法布里-珀罗共振,这些厚度共振模式与纵波或横波相关联^[19]。ZGV 模式与厚度共振模式相比,两者时

域上都为长时间振荡波,表现为能量不传播;不同的是 ZGV 模式相速度不为 0。



(a) 波数-频率关系
(a) Wavenumber-frequency relation



(b) 相速度-频率关系
(b) Phase velocity-frequency relation

图1 铝板中 Lamb 波频曲线

Fig. 1 Dispersion curves of Lamb waves in an aluminum plate

1.2 梳状换能器参数选择

为了能够精准激励与响应 ZGV Lamb 波并排除其他信号的干扰,根据梳状电极 ZGV 模式选择条件^[17]设计 PVDF 梳状换能器的周期节长、指条宽度等参数。梳状换能器的结构示意图如图 2 所示,梳状电极的主要几何参数包括指条长度 W 、指条数目 n 、周期节长 L 、指条宽度 a 、指间间隔 b ,其中周期节长 $L=a+b$ 。梳状电极的每个指条长度 W 相等,并假设每个指条激发等幅的简谐超声波且传播过程无衰减,根据指条的周期排列,相邻指条之间的相位差公式如下^[20]:

$$\Delta\varphi = \omega\tau = \omega L/v_p \quad (1)$$

其中, ω 为角频率, τ 为时间, v_p 为相速度。梳状电极的总输出为所有指条的输出之和,当总输出达到最大值,由式(1)可知,周期节长可以表示为:

$$L = 2\pi v_p / \omega = v_p / f = \lambda \quad (2)$$

其中, f 和 λ 分别表示频率和波长。根据式(2)可知,用于选择性激励及响应 ZGV 模式的 PVDF 梳状换能器需要满足的基本条件是梳状电极的周期节长与 ZGV 模式的波长相等^[21]。其中,ZGV 模式的波长依据频散曲线中 ZGV 点对应的相速度 v_p 与频率 f 求得。需要注意的是,虽然 PVDF 压电薄膜具有轻质量特性,但其与待测

结构耦合后,仍会给结构带来附加质量与刚度,有可能导致 ZGV 点发生偏移。理论上计算频散曲线时应将 PVDF 梳状换能器的影响考虑在内,但这无疑会增加设计难度。故本文先忽略 PVDF 梳状换能器对结构 ZGV 点的影响,按照铝板的 ZGV 点波长设计梳状电极,再进一步通过实验验证和讨论该假设是否可行。由图 1 可知, S_1 模式的 ZGV 点波长 $\lambda = v_p / f = 10.8 / 0.933 = 11.6 \text{ mm}$,因此周期节长 $L = \lambda = 11.6 \text{ mm}$ 。权衡其尺寸大小和信号强度,取指条长度 $W = 32 \text{ mm}$ 、指条数目 $n = 5$,根据以上参数用带背胶的薄铜箔制作梳状电极。PVDF 压电薄膜的尺寸应大于梳状电极并能够覆盖实际检测区域,因此本文选择 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的 $110 \mu\text{m}$ 厚度 PVDF 压电薄膜。将裁剪好的梳状电极粘贴于 PVDF 压电薄膜表面中心制作成 PVDF 梳状换能器。

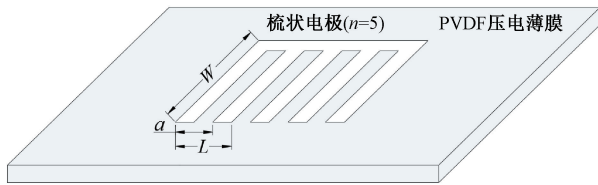


图 2 PVDF 梳状换能器结构示意图

Fig. 2 The diagram of a PVDF comb transducer

2 性能测试与对比分析

2.1 实验系统

为了研究 PVDF 梳状换能器对 ZGV Lamb 波的激发响应特性,拟通过实验进行性能测试。如图 3 所示,通过 PVDF 梳状换能器、6061 铝板、RAM-5000 超声检测仪器及示波器等搭建 PVDF 梳状换能器-ZGV Lamb 波检测实验系统。PVDF 梳状换能器被耦合于 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 的 3 mm 厚度铝板中心,梳状电极作为正极、铝板作为负极,采用自发自收式开展 PVDF 梳状换能器的性能探究。

利用 RAM-5000 超声检测系统输出脉冲信号,脉冲信号为峰-峰值 $A_0 = 1 \text{ V}$ 的加汉宁窗正弦脉冲电压信号,函数公式为:

$$A = \frac{A_0}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{m}\right) \right) \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

其中, A 为输出电压, A_0 为峰-峰值电压, f 为频率, t 为时间, m 为周期数。

脉冲信号依次通过 6 dB 衰减器和标准双工器后到达 PVDF 梳状换能器,换能器的逆压电效应将电信号转换为应力信号并在待测铝板中产生 Lamb 波;再利用换能器的正压电效应接收携带检测信息的 Lamb 波信号,经过 50 dB 内置放大器放大信号后由示波器显示并存

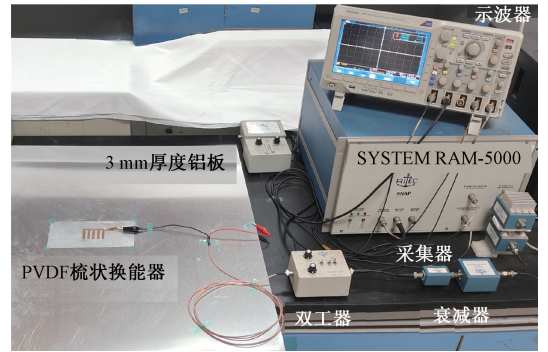


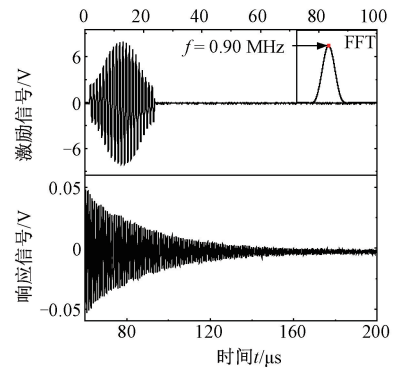
图 3 实验系统

Fig. 3 The experimental system

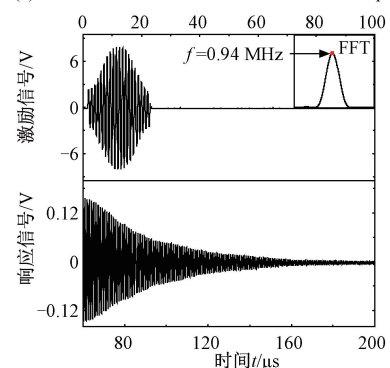
储。同时,系统的激励信号在经过衰减器后由信号采集器传输至示波器。

2.2 性能测试

为了测试所设计的 PVDF 梳状换能器能否有效的激励与响应 ZGV Lamb 波,分别激发中心频率为 $f = 0.90$ 、 0.94 、 0.98 MHz 、周期数为 $m = 20$ 的汉宁窗调制脉冲信号。激励信号与相对应的响应信号如图 4 所示,可以看出响应信号均表现为长时间振荡波,且幅值逐渐衰减,表明 3 种中心频率下 PVDF 梳状换能器均成功激发并响应了共振波,且 0.94 MHz 中心频率激励下的共振波幅值最大。另外在图 4(c) 中, 0.98 MHz 中心频率激励下的响应



(a) Under the excitation of 0.90 MHz center frequency



(b) Under the excitation of 0.94 MHz center frequency

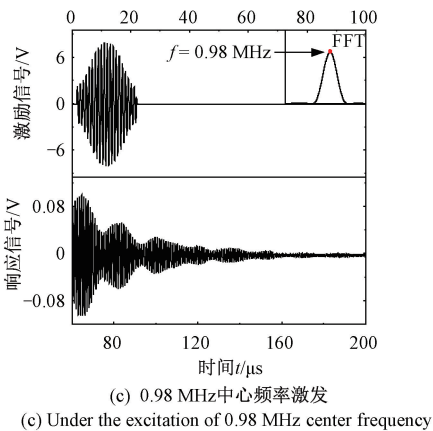


图4 激励信号与响应信号

Fig. 4 The excitation signals and response signals

信号整体呈现衰减趋势,但有波动迹象,表现为强烈“拍”效应,表明响应信号中具有多个共振频率。

为准确识别 PVDF 梳状换能器响应信号中的频率构

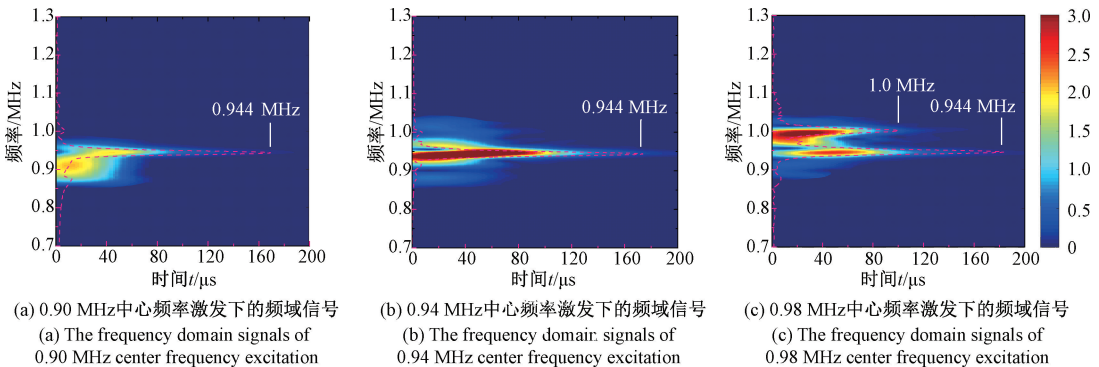


图5 频域信号

Fig. 5 The frequency domain signals

分析结果表明,基于 ZGV 点设计的 PVDF 梳状换能器能够在铝板中准确有效的激励 ZGV Lamb 波,并且成功响应。尽管受到 PVDF 梳状换能器的耦合影响使得结构的 ZGV 频率发生偏移,但是实验结果表明 ZGV 频率偏移量十分有限,对实验结果影响很小,并不妨碍梳状电极的参数设计结果。

2.3 与方形电极换能器对比

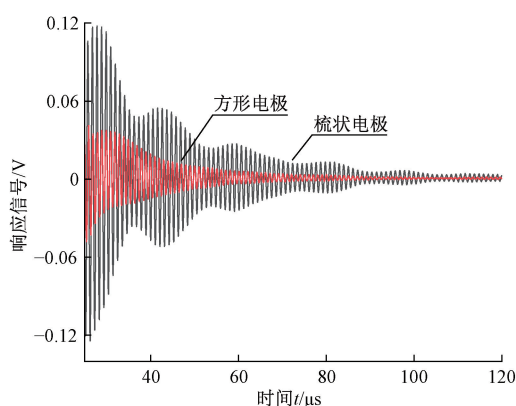
进一步探究用于 ZGV Lamb 波检测的 PVDF 梳状换能器激发响应性能优势,取两片等面积的方形带背胶铜箔,依旧以 32 mm×52 mm 为例,一片作为方形电极,另一片根据前文选择的参数制作成梳状电极。实验过程中为避免压电薄膜与待测结构之间粘接条件对实验的影响,压电薄膜始终粘贴于铝板表面。激励信号均选择 0.96 MHz 中心频率、周期数为 20 的汉宁窗调制的正弦脉冲信号,分别将梳状电极与方形电极粘贴于压电薄膜

成,对时间段为 60~150 μs 的响应信号进行快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT) 以及短时傅里叶变换 (short-time fourier transform, STFT),得到频域信号图如图 5 所示。图 5(a) 显示,能量初期集中于 0.9 MHz 频率附近,随后转移至 0.944 MHz 频率附近,并随时间缓慢衰减至完全消失,频域上表现为 0.944 MHz 中心频率的尖锐共振峰,其他两组现象类似,因此可判断 0.944 MHz 中心频率的共振信号为 ZGV 共振。结合原结构 ZGV 频率是 0.933 MHz,表明 ZGV 点发生了偏移,根据前文分析,此偏移应是换能器耦合的影响。但在 0.90、0.94、0.98 MHz 中心频率激发下 PVDF 梳状换能器都能有效的激励并响应 ZGV Lamb 波,说明 PVDF 梳状换能器对 ZGV 点的影响可忽略。另外图 5(c) 在 0.98 MHz 中心频率激发下出现了 1 MHz 中心频率的共振峰,表明激发出了 S_1 模式截止频率处的厚度共振,这是由于 0.98 MHz 中心频率激发下带宽覆盖范围包含 1 MHz 频率的缘故 (如图 5(c) 所示)。

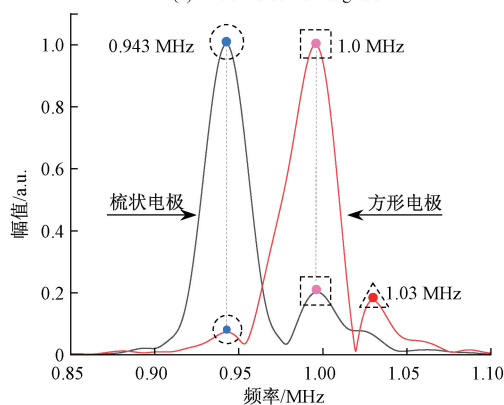
表面形成梳状换能器与方形电极换能器,保持其他实验条件不变,激发并接收 ZGV Lamb 波信号。

PVDF 梳状换能器与 PVDF 方形电极换能器接收的响应信号如图 6 所示,从图 6(a) 中可以看出两者的时域信号均表现为长时间共振波,且幅值逐渐衰减,说明两个换能器均能激励共振信号,但方形电极压电薄膜换能器的响应信号明显弱于 PVDF 梳状换能器的响应信号。

Lamb 波的多模频散特性会使激励的信号中包含 ZGV 模式以及其他导波模式,其中影响最大的是厚度共振模式,由图 1 可知结构的截止频率与 ZGV 频率十分接近,在有限带宽内易同时激发出截止频率处的厚度共振与 ZGV 共振。因此为了验证换能器的 ZGV 模式选择能力,可在 PVDF 梳状换能器与方形电极换能器的幅频曲线中比较 ZGV 共振峰与截止频率共振峰的相对大小。对两者时间段为 30~100 μs 的时域信号进行 FFT 处理,



(a) The time domain signals



(b) The amplitude frequency curves

图6 梳状换能器与方形电极换能器的响应信号

Fig.6 Response signals of the comb transducer and the square electrode transducer

并分别归一化后得到幅频曲线如图6(b)所示。可以看出,方形电极换能器与梳状换能器的幅频曲线出现了两个中心频率相同的共振峰,共振峰的中心频率分别为0.943和1 MHz,结合铝板的频散曲线表明0.943 MHz对应 S_1 -ZGV频率(圆框内标点所示),1 MHz对应 S_1 模式截止频率(方框内标点所示)。另外方形电极换能器还出现了中心频率为1.03 MHz的共振峰,其对应 S_2 模式截止频率(三角框内标点所示)。从频域幅值的相对大小来看,方形电极换能器的响应信号以 S_1 模式截止频率为主,而梳状换能器的响应信号以 S_1 模式ZGV频率为主。

从实验结果来看,PVDF梳状换能器与PVDF方形电极换能器均能激励与响应ZGV Lamb波。但方形电极换能器的响应信号相对微弱,且主要表现为截止频率处的厚度共振,ZGV共振效应十分有限,无法有效的激励ZGV Lamb波。相比之下,PVDF梳状换能器的模式选择能力可将能量集中于ZGV Lamb波,显著抑制了截止频率处的厚度共振,使ZGV共振信号更加强烈且易明确识别。更有利于ZGV Lamb波检测。

3 附着层厚度检测

3.1 附着层厚度表征

单层及多层薄壁结构内壁的附着物厚度状况是工业生产安全性评价的一项重要指标^[22-24]。ZGV模式对材料特性、厚度变化具有高敏感特性,附着层厚度变化会改变ZGV模式在结构中的传播规律,能量约束于局部区域的能力减弱,利用此特性可检测薄板结构表面附着层厚度的变化。通过在铝板表面粘贴不同厚度的TPU薄膜模拟不同的附着层厚度,TPU薄膜的厚度为0.05~0.25 mm以0.05 mm的间隔逐步递增。考虑到ZGV Lamb波的局部检测特性以及梳状换能器的尺寸,TPU粘贴于铝板的背面中心如图7所示,尺寸为200 mm×300 mm。实验中采用中心频率为0.95 MHz、 $n=20$ 的加汉宁窗正弦脉冲电压信号进行激励。为了保证实验结果的准确性,每组实验重复4次。

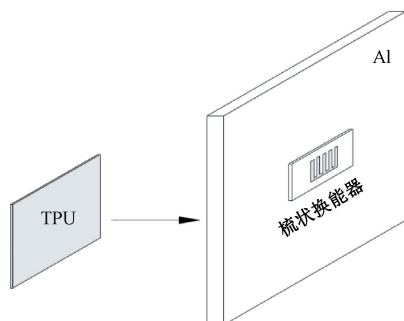


图7 TPU薄膜布置示意图

Fig.7 The diagram of TPU film layout

3.2 实验结果分析

如图8所示,在0、0.15、0.25 mm厚度的TPU情况下,响应信号均发生了长时间共振,这说明PVDF梳状换能器都激发并响应了ZGV Lamb波。信号幅值呈现波动性衰减表明信号中同样存在截止频率处的厚度共振。随着TPU厚度的增加,信号的响应幅值逐渐减弱,并且衰减的速度也越快。在0~0.25 mm薄膜厚度下时间段为30~120 μs的响应信号加汉宁窗FFT处理后得到幅频曲线如图9(a)所示,以无TPU薄膜时的ZGV频域幅值为基准做一条辅助线(如图9(a)竖直虚线所示),该辅助线与不同TPU薄膜幅频曲线的交点为对应的频域幅值,由于在无TPU条件下ZGV Lamb波的共振条件满足时,ZGV Lamb波被很好地约束在PVDF梳状换能器所在区域,此时在图9(a)的幅频曲线中,ZGV频率对应的频域幅值最大。但当附着层厚度增加时,原ZGV频率下ZGV Lamb波的共振条件不再满足,即该频率下Lamb波的群速度不再为0,其声能量将沿PVDF梳状换能器两侧向外

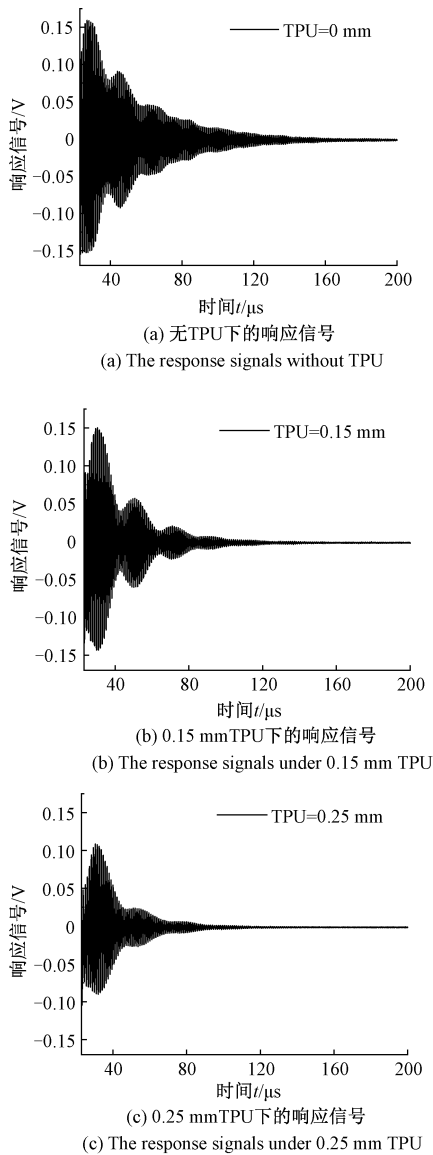


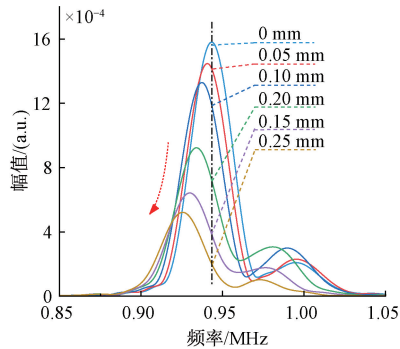
图8 不同层厚TPU薄膜下梳状换能器的响应信号
Fig. 8 The response signals of comb transducers under different thickness TPU films

传播,对应频域幅值发生改变。为了更直观地表示ZGV模式随TPU厚度变化的关系,将频域幅值和ZGV频率以无TPU薄膜时的ZGV频率和频域幅值为基准做归一化后得到图9(b)与(c),每个数据点由均值±标准误差($\bar{x} \pm s$)表示。

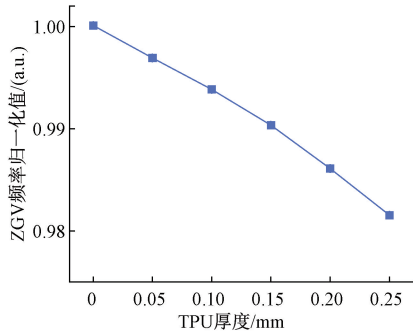
从图9(b)与(c)中可以看出,薄板表面出现附着层时ZGV的频率以及频域幅值会减小;随着附着层TPU厚度不断增加,ZGV的频率以及频域幅值持续减小,ZGV频率相对大小从1减少至0.9815,减少的幅度为1.85%。ZGV频域幅值相对大小从1减少至0.1265,减少的幅度为87.36%。ZGV频率变化幅度远低于ZGV频域幅值变化幅度,因此ZGV频域幅值的

相对大小比ZGV频率的相对大小更能准确评价附着层厚度变化。并且4次重复实验所得到的ZGV频率以及ZGV频域幅值波动较小,意味着实验结果稳定性好且可靠性高。

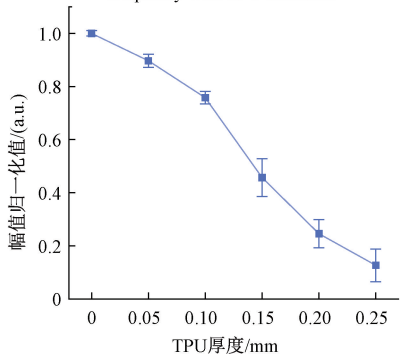
分析表明,PVDF梳状换能器对结构表面不同厚度附着层都具有良好且稳定的电压响应性能。同时,根据PVDF梳状换能器响应的ZGV频域幅值相对大小能够敏感地表征附着层厚度的微小变化。



(a) 不同TPU厚度下的幅频曲线
(a) The amplitude frequency curves under different TPU thicknesses



(b) ZGV频率归一化值随TPU厚度变化曲线
(b) The normalized value variation of ZGV frequency with TPU thickness



(c) ZGV频域幅值归一化值随TPU厚度变化曲线
(c) The normalized value variation of ZGV domain amplitude with TPU thickness

图9 频率与幅值随TPU厚度变化图
Fig. 9 Frequency and amplitude variation with TPU thickness

4 结 论

为了满足 ZGV Lamb 波检测的需求,本文根据铝板的 ZGV 点设计并制作了 PVDF 梳状换能器。通过实验探究了换能器的激发响应性能及附着层检测中的应用。实验结果表明,PVDF 梳状换能器能够准确且敏感地激励与响应 ZGV 模式。与 PVDF 方形电极换能器相比,PVDF 梳状换能器能够选择性激发与接收 ZGV Lamb 波,并有效抑制截止频率处的厚度共振。针对薄板结构表面附着层的厚度变化检测,提出了基于频谱图中 ZGV 频域幅值相对大小表征附着层厚度的方法。本文研究的 PVDF 梳状换能器具有激发响应性能优异、成本低廉、可用于复杂结构、实现原位检测等优点,基于 PVDF 梳状换能器的 ZGV 频域幅值检测方法可以有效表征结构的附着层厚度,为 ZGV Lamb 波检测应用提供了有利支撑。

参考文献

- [1] TOLSTOY I, USDIN E. Low and high mode dispersion in elastic plates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(4): 794-795.
- [2] PRADA C, BALOGUN O, MURRAY T. Laser-based ultrasonic generation and detection of zero-group velocity Lamb waves in thin plates[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(19): 194109.
- [3] LI W B, ZHANG C Y, DENG M X. Modeling and simulation of zero-group velocity combined harmonic generated by guided waves mixing[J]. Ultrasonics, 2023, 132: 106996.
- [4] WU Y N, CUI R T, ZHANG K P, et al. On the existence of zero-group velocity modes in free rails: Modeling and experiments[J]. NDT & E International, 2022, 132: 102727.
- [5] 沈意平, 刘缘, 王钢, 等. 基于 Lamb 波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料传感器制备及应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 19-25.
SHEN Y P, LIU Y, WANG G, et al. Preparation and application of piezoelectric ceramic/epoxy resin composite sensor based on Lamb wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 19-25.
- [6] SPYTEK J, ZIAJA-SUJDAK A, DZIEDZIECH K, et al. Evaluation of disbonds at various interfaces of adhesively bonded aluminum plates using all-optical excitation and detection of zero-group velocity Lamb waves[J]. NDT & E International, 2020, 112: 102249.
- [7] GRUENSTEIDL C M, VERES I A, MURRAY T W. Experimental and numerical study of the excitability of zero group velocity Lamb waves by laser-ultrasound[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(1): 242-250.
- [8] CLORENNEC D, PRADA C, ROYER D. Laser ultrasonic inspection of plates using zero-group velocity Lamb modes[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(5): 1125-1132.
- [9] LIU Q J, LI Y H, GUAN R Q, et al. Advancing measurement of zero-group-velocity Lamb waves using PVDF-TrFE transducers: First data and application to in situ health monitoring of multilayer bonded structures[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(4): 2641-2650.
- [10] CAO S, WONG V K, HU Y, et al. Generation and detection of zero-group-velocity Lamb waves with direct-write piezoelectric transducers for nondestructive evaluation[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(16): 18675-18681.
- [11] DING T T, WAN Q, XIANG Y X, et al. Selectable single-mode guided waves for multi-type damages localization of plate-like structures using film comb transducers[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2023, 38(1): 90-111.
- [12] 何存富, 赵华民, 吕炎, 等. 基于 PZT 的新型柔性梳状表面波传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1675-1682.
HE C F, ZHAO H M, LYU Y, et al. New type of flexible comb rayleigh wave sensor based on the PZT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1675-1682.
- [13] LUO G J. A framework based on flexible transducers and zero group velocity lamb mode for the evaluation of impact damage[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2022.
- [14] 郭中会, 李松松, 何慧敏, 等. 基于电磁超声换能器的兰姆波单一模态激励方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 253-260.
GUO ZH H, LI S S, HE H M, et al. Research on single mode excitation method of Lamb wave based on electromagnetic ultrasonic transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 253-260.
- [15] HAY T R, ROSE J L. Flexible PVDF comb transducers

- for excitation of axisymmetric guided waves in pipe[J]. Sensors and Actuators A-physical, 2002, 100 (1): 18-23.
- [16] LI W, CHO Y. Thermal fatigue damage assessment in an isotropic pipe using nonlinear ultrasonic guided waves[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54: 1309-1318.
- [17] ZHU Y, ZENG X W, DENG M X, et al. Detection of nonlinear Lamb wave using a PVDF comb transducer[J]. NDT & E International, 2018, 93: 110-116.
- [18] NIVED S, KRISHNAN B. Remnant thickness quantification in small thickness structures utilising the cut-off property of A1 Lamb wave mode employing linear array elements[J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131:174502.
- [19] CAO X S, SHI J P, JIN F. Cut-off frequencies of Lamb waves in various functionally graded thin films [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99 (12): 121907-121907.
- [20] 丁涛涛, 朱武军, 项延训, 等. PVDF 梳状换能器接收非线性兰姆波的实验研究[J]. 应用声学, 2019, 38(3):301-306.
- DING T T, ZHU W J, XIANG Y X, et al. Receiving nonlinear lamb waves using PVDF comb transducer[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(3):301-306.
- [21] FU J Q, ZHOU S Y, LI Z, et al. Research on guided wave excitation mode control method of comb transducer[C]. 2015 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), Zhuhai, 2015: 124-128.
- [22] LUO F, DONG B, XIE J C, et al. Scaling tendency of boiler feedwater without desiliconization treatment[J]. Desalination, 2012, 302: 50-54.
- [23] ARASH E, ALI M, SIAVASH K. Nondestructive evaluation of coated structures using Lamb wave propagation[J]. Applied Acoustics, 2022, 185.
- [24] WU R K, ZHANG H, YANG R Z, et al. Nondestructive

testing for corrosion evaluation of metal under coating[J]. Journal of Sensors, 2021, 2021(2): 1-16.

作者简介



郭帅, 2022 年于燕山大学获得学士学位, 现为重庆大学航空航天学院硕士研究生, 主要研究方向为零群速度兰姆波检测。

E-mail: 1429950043@qq.com

Guo Shuai received his B. Sc. degree in 2022 from Yanshan University. Now he is currently a M. Sc. candidate at College of Aerospace Engineering, Chongqing University. His main research interest is zero group velocity Lamb wave detection.



尹莘新, 2014 年于吉林师范大学获得学士学位, 2017 年于吉林大学获得硕士学位, 2020 年于吉林大学获得博士学位, 现为重庆大学助理研究员, 主要研究方向为线性及非线性超声无损检测。

E-mail: shenxinyin@cqu.edu.cn

Yin Shenxin received her B. Sc. degree in 2014 from Jilin Normal University, received her M. Sc. degree in 2017 from Jilin University, and received her Ph. D. degree in 2020 from Jilin University. Now she is an assistant professor and M. Sc. supervisor in College of Aerospace Engineering, Chongqing University. Her main research interests include linear and nonlinear ultrasonic non-destructive testing techniques.



邓明晰 (通信作者), 1986 年于四川大学获得学士学位, 1989 年于南京大学获得硕士学位, 2002 年于同济大学获得博士学位, 现为重庆大学航空航天学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为超声和非线性超声。

E-mail: mx Deng@cqu.edu.cn

Deng Mingxi (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1986 from Sichuan University, received his M. Sc. degree in 1989 from Nanjin University, and received his Ph. D. degree in 2002 from Tongji University. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in College of Aerospace Engineering, Chongqing University. His main research interests include linear and nonlinear ultrasound.