

融合兰姆波损伤指数的碳纤维板分层缺陷成像方法

巫轶伦,冯搏

(华中科技大学机械科学与工程学院,湖北武汉430074)

摘要:兰姆(Lamb)波在结构健康监测中具有潜在的应用价值,但有关分层损伤的研究大多局限于分层定位和精度提高,对分层尺寸测量的研究较少。研究了碳纤维复合材料板中分层缺陷尺寸对不同波长Lamb波的影响。通过有限元模拟研究了线性调频Lamb波A0模态与不同分层尺寸之间的相互作用,发现当波长大于分层尺寸时,扰动程度随分层尺寸的增大而单调增大,当波长小于分层尺寸时,扰动程度呈振荡状态的现象。借助该现象提出一种碳纤维板分层缺陷的检测方法,选用波长较大的信号作为激励,利用损伤指数刻画扰动程度,将损伤指数融入成像算法中,使成像结果能反映分层尺寸信息。

关键词:线性调频兰姆波;碳纤维复合材料;分层缺陷;缺陷定位;尺寸估计

中图分类号:TN911.73;TB332 **文献标识码:**A

Imaging of Delamination Defects in CFRP Plates Via the Fusion of the Damage Index of Lamb Waves

WU Yilun, FENG Bo

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Lamb waves have potential applications in structural health monitoring; however, most studies on delamination damage are limited to delamination localization and accuracy improvement, and few studies on delamination size measurement exist. This study investigates the effects of the delamination defect size on Lamb waves of different wavelengths in carbon fiber composite panels. The interaction between the A0 mode of linear FM Lamb waves and different delamination sizes is investigated via finite element simulation, and the degree of perturbation is found to increase monotonically with the delamination size when the wavelength is larger than the delamination size and that the degree of perturbation is in an oscillatory state when the wavelength is smaller than the delamination size. Facilitated by this phenomenon, a method is proposed to detect delamination defects in carbon fiber boards. A signal with a larger wavelength is selected as the excitation, and the damage index is used to portray the degree of disturbance. Moreover, the damage index is integrated into the imaging algorithm so that the imaging results can reflect the delamination size information.

Key words: linear FM Lamb wave; CFRP; delamination defects; defect localization; dimensional estimation

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有重量轻、强度高、可塑性强等特点。分层是CFRP板最常见的一种内部缺陷,会严重影响结构强度和稳定性。兰姆(Lamb)波是一种超声导波,具有检测速度快、检测范围广的特点。基于Lamb波的板类结构损伤监测是最具应用前景的SHM技术之一。

Hayashi等^[1]仿真了Lamb波在分层损伤层合

板中的传播,发现Lamb波在传播到分层处时会在分层入口分裂成两个波。波在分层上、下面独立传播,这两种波以不同的相位和到达时间到达分层的出口。Pudipeddi等^[2]以A0模态Lamb波为入射波,研究了分层处A0散射波和模态转换产生的S0模态Lamb波。结果表明,A0散射波和产生的S0模态Lamb波的幅值取决于外层板的纤维取向以及分层的尺寸和厚度位置。Yeum等^[3]研究了A0模

收稿日期:2024-09-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52105551)

作者简介:巫轶伦(1999-),男,四川省内江市人,硕士生。通信作者:冯搏,男,博士,副教授,硕士生导师。

态和分层之间的相互作用,利用从内部分层反射的第一个 A0 模态来识别分层的存在。Feng 等^[4]采用 chirp 信号激励产生不同波长的 Lamb 波,发现并验证了受分层扰动的最低频率随着分层长度的增加而减小的效应。王梓尧等^[5]通过数值仿真和试验发现随着分层长度的增加,Lamb 波的传播时间逐渐延长,并与分层长度呈线性关系。Nandyala 等^[6]通过数值模拟和实验研究了分层尺寸对不同中心频率下 Lamb 波的影响,并对损伤程度进行了量化。Ramadas 等^[7]研究了 A0 模态与对称分层的相互作用,当 A0 模态入射到分层的出入口处时,会产生一个新的模态 S0,该模态仅限于亚层板,只有入射和模式转换的 A0 模式在主层合板中传播。Michaels 等^[8]使用线性调频脉冲激励提取窄带突发信号响应,可以一次性采集多个不同的频率范围,同时具有高信噪比。

本文研究了不同波长下信号对分层尺寸的敏感性,提出了一种线性 chirp 信号激励的复合材料板分层损伤检测方法,在定位缺陷的同时,对损伤大小进行估计。

1 基于 chirp 信号的分层检测理论

1.1 chirp 信号分解

chirp 信号的频率在给定时间范围 T_c 内由起始频率 f_0 到终止频率 f_1 线性变换,其时域表达式为

$$S(t) = \sin \left[2\pi f_0 t + \frac{\pi(f_1 - f_0)}{T_c} t^2 \right] \quad (1)$$

起始频率、终止频率、持续时间分别为 400 kHz、25 kHz、100 μ s 的 chirp 信号时频图如图 1 所示。

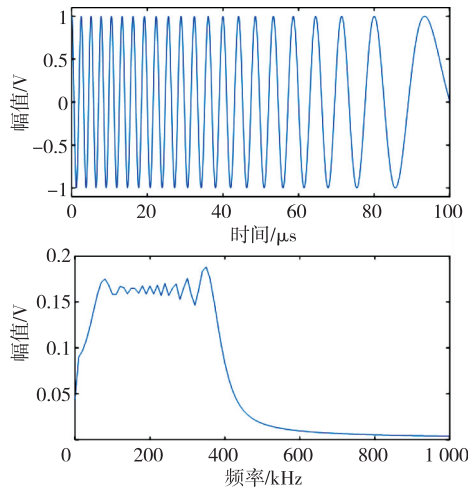


图 1 25~400 kHz 频率范围的 chirp 信号

利用 chirp 信号作为激励,在接收传感器处测得的响应为

$$V(\omega) = H(\omega)S(\omega) \quad (2)$$

式中: $S(\omega)$ 为式(1)的傅里叶变换; $H(\omega)$ 为系统的传递函数,包含了电声转换传递函数、波在板中的传递函数; $V(\omega)$ 为接收信号的傅里叶变换。

设 $S_E(\omega)$ 为期望的激励信号,系统的传递函数不发生变换,期望的接收信号 $V_E(\omega)$ 为

$$V_E(\omega) = H(\omega)S_E(\omega) \quad (3)$$

由式(2)-(3)可得:

$$V_E(\omega) = \frac{S_E(\omega)V(\omega)}{S(\omega)} \quad (4)$$

由于 $S(\omega)$ 、 $S_E(\omega)$ 已知, $V(\omega)$ 为对接收信号的傅里叶变换,故对式(4)进行傅里叶反变换,可得到期望的时域接收信号。由此只需一次激励即可得到一系列与窄带激励相同的接收信号,其频带宽度在 chirp 频带宽度之内。

1.2 Lamb 波与分层的作用

Lamb 波传播到分层处时,会在分层的入口分裂成两个波,波在分层上、下面独立传播,并在出口处叠加后在主层板中传播。在含对称分层的复合材料层合板中,当 A0 模态入射到分层的入口时,会产生一个新的模态 S0,该模态仅限于亚层板,并在分层区域的两端发生多次反射、透射和模式转换^[7]。

波在遇到障碍物时会发生衍射,当波长与障碍物的尺寸相当时,衍射效应更明显;而当波长远大于障碍物尺寸时,波能以较小干扰通过障碍物,受扰动较小。为了定量刻画扰动程度引入损伤指数 (DI)^[9],定义为

$$DI = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}} \right| \quad (5)$$

式中: a 和 b 分别为损伤前后的信号; \bar{a} 和 \bar{b} 为平均值; a_i 和 b_i 为 a 、 b 的第 i 个采样点值。DI 越大,说明信号受损伤的扰动越大。

1.3 损伤概率密度法

Lamb 波在遇到缺陷时会发生散射,用 PZT 激励并接收 Lamb 波,图 2 为散射波传播示意图。

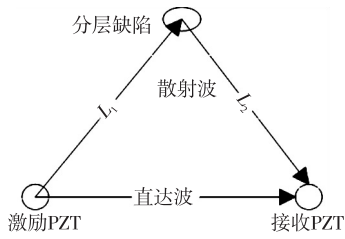


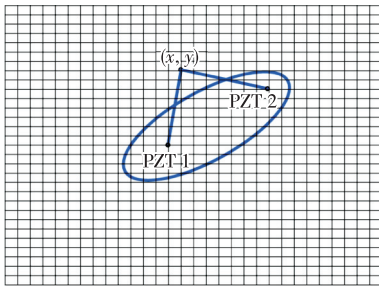
图2 散射波传播示意图

散射波的飞行时间(ToF)可通过到达时间减去施加激励的时间得到,关系为

$$L_1 + L_2 = V_g \Delta T \quad (6)$$

式中: L_1, L_2 为散射波飞行路程; V_g 为群速度; ΔT 为 ToF。

对于每一对发射接收传感器,散射波可以绘制一个椭圆,所有椭圆的交点指示了缺陷的位置。然而在实际情况下,多个接收发射路径绘制的椭圆通常不会精确交于同一点。针对椭圆不交于一点问题,用虚拟均匀网格划分 CFRP 板,将板离散为如图 3 所示的 $N \times N$ 的网格,每个交点代表了一个位置。

图3 用 $N \times N$ 个点划分 CFRP 板

假定实际损伤点位置为 (x, y) ,激励 PZT1 的位置为 (x_1, y_1) ,接收 PZT2 的位置为 (x_2, y_2) ,求点 (x, y) 到 PZT1、PZT2 的路径之和 L 为

$$L = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \quad (7)$$

利用 L 与散射波飞行路程 R 构造函数:

$$P(x, y) = \frac{e^{-\sqrt{(L-R)^2}/10}}{\sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

式中 $R = V_g \Delta T$ 。当点位于椭圆轨迹上时概率值最大,点到轨迹的距离越远则存在损伤的概率越低,且呈现指数程度衰减。通过式(8)可求得板上每一个顶点损伤的概率。每对收发传感器都能得到一个概率图像,将其相加以增强鲁棒性,提高信噪比。

本文利用 chirp 信号作为激励,研究频率对不同尺寸的敏感性,利用损伤指数刻画扰动程度。当

波长大于分层长度时,随着分层尺寸靠近波长,损伤指数逐渐增加。使用较低频率的信号进行激励,计算各传感器路径上的损伤指数,再取其平均值并应用到成像结果中,从而使得成像结果能够反映缺陷的尺寸特征。

2 有限元仿真

采用商业软件 ABAQUS version 6.14 建立三维有限元模型,模拟完整和带有分层损伤的各向异性 CFRP 板。板长 600 mm,宽 600 mm,厚 2 mm,铺层层数共 8 层,铺层角度为 $[0/90]_{2s}$,T300 碳纤维板材料参数见表 1,绘制频散曲线如图 4 所示。

表 1 T300 碳纤维板工程常数

参数	参数值
E_1/GPa	126
$E_2 = E_3/\text{GPa}$	11.3
$G_{12} = G_{13}/\text{GPa}$	5.4
G_{23}/GPa	3.9
$\nu_{12} = \nu_{13}/(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})$	0.3
$\nu_{23}/(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})$	0.45
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 550

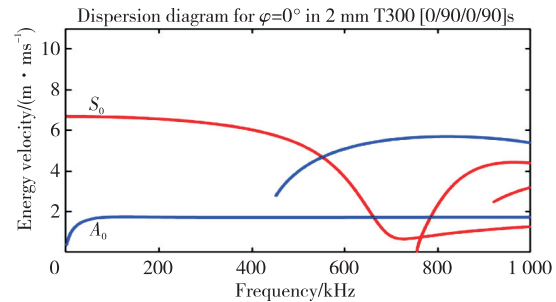


图4 频散曲线

有限元模型使用 8 节点六面体线性减缩积分单元。以图 1 中的信号为激励信号,在有限元模型中通过直接对节点施加面外位移的方式激励 Lamb 波的 A_0 模态,避免了对压电陶瓷换能器进行建模^[2]。通过在相邻两层之间形成体积劈裂,使得跨越损伤面上的节点被小距离分开,从而产生分层效果^[10],图 5 为数值仿真截面示意图。

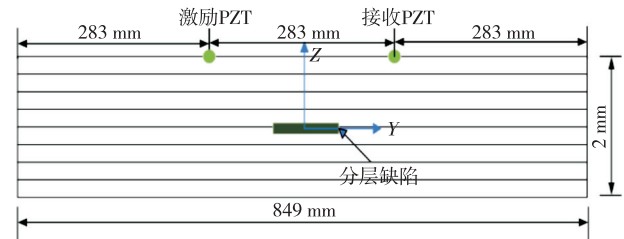


图5 数值仿真截面示意图

将 chirp 信号激励得到的响应信号按第 1 节中的方法进行分解,得到分解信号。以中心频率为 200 kHz 的汉宁窗调制五周期正弦信号作为激励,得到接收信号。经对比两者波形一致,如图 6 所示。

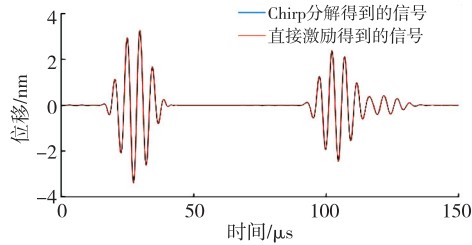


图 6 Chirp 分解与直接激励得到的信号对比
在板的中心处模拟了直径分别为 $\varnothing 4$ 、 $\varnothing 10$ 、

$\varnothing 20$ 、 $\varnothing 30$ 、 $\varnothing 50$ mm 的分层缺陷。以 chirp 为激励,信号的频率从 400 kHz 递减到 25 kHz, A0 模态对应群速度逐渐递减,信号高频部分到达较早,低频部分到达较晚。将损伤信号与基线信号作差得到散射波信号,如图 7 所示。由图 7 可见,随着分层尺寸的增加,对低频部分的扰动增加。图 8 为将散射波信号进行小波变换后得到的结果。由图 8 可看出,低频部分对尺寸变化更加敏感。

将 chirp 信号分解成多个频率,在无损板上将波的到达时间减去起始时间得到飞行时间。PZT 间距确定,可求出传播速度,从而得到波长。不同频率下的波长如表 2 所示。

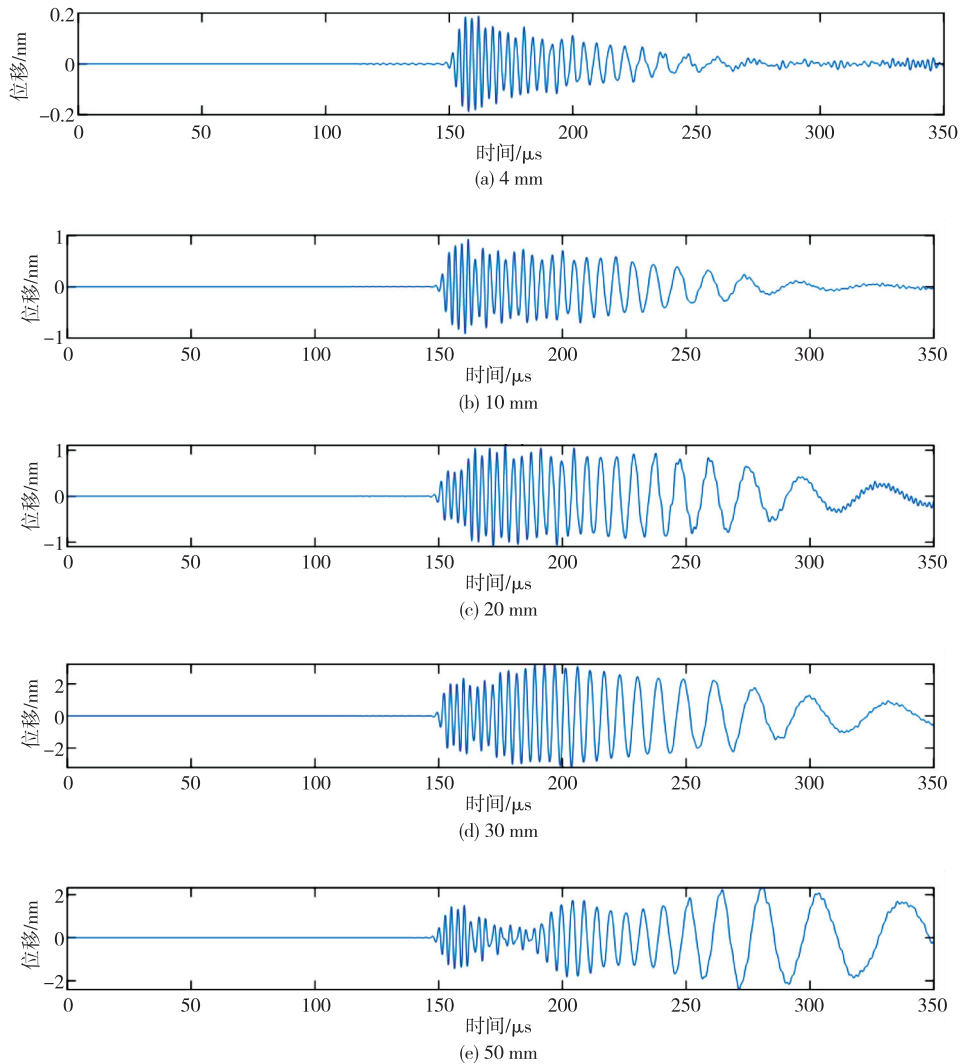


图 7 不同直径分层的散射波信号

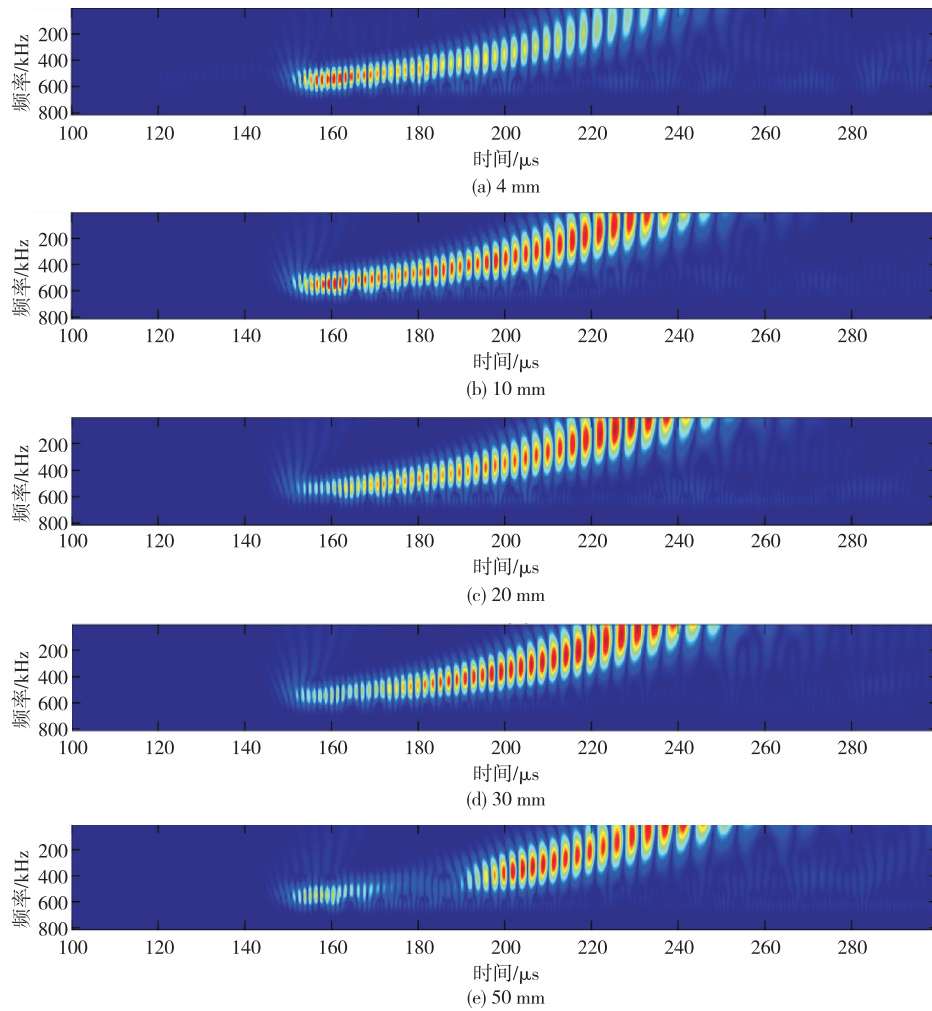


图8 散射波小波变换

表2 Lamb波A0模态的波长

频率/kHz	波长/mm
25	60.45
50	33.55
100	17.22
150	12.00
200	9.15
250	7.36
300	6.13
350	5.21

将 chirp 信号分解,截取基准信号、损伤信号的第一个波,如图9所示。两者截取的时间起点、终点相同,利用式(5)计算损伤指数。

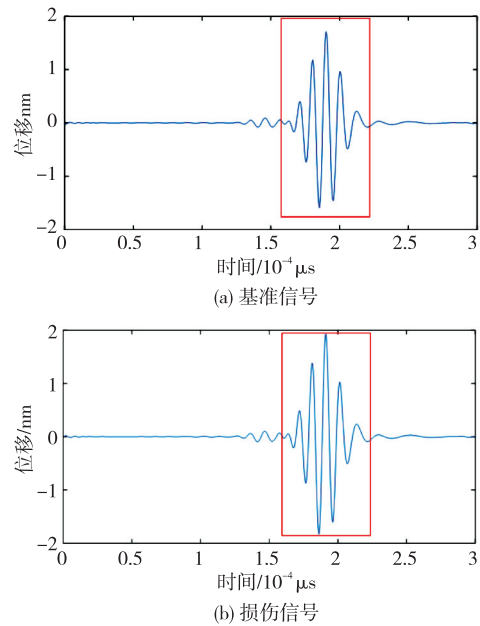


图9 截取信号计算DI值

计算得到分层对不同波长信号的损伤指数,如图 10 所示。由图可看出,当尺寸为 4 mm 时,对所有频率的扰动都接近于 0。在尺寸从 4 mm 递增到 50 mm 的过程中,只有 25 kHz 的信号 *DI* 值单调递增,其余频率只在小于某些尺寸时单调。为了进一步研究激励信号波长与分层尺寸对 *DI* 单调性的影响,比较了波长大于分层尺寸的个数与 *DI* 单调递增的个数,如图 11 所示,*DI* 单调递增的个数总是大于等于波长大于分层的个数。选用一个波长较大的信号作为激励,当分层尺寸逐渐接近波长时,可以保证此过程中 *DI* 单调递增;当分层尺寸超过波长时,*DI* 可能减少。因此可用一个波长较大的信号作为激励,测量其 *DI* 值,将其融入定位算法中,使得成像结果能反映缺陷尺寸变化信息。

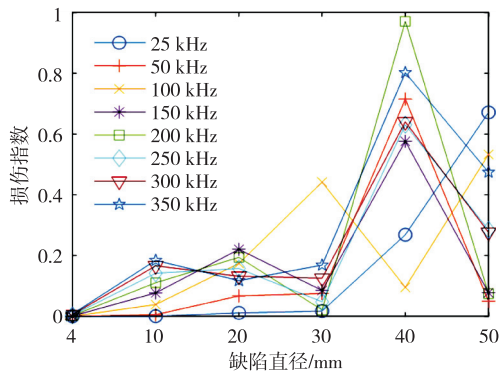


图 10 不同分层尺寸下 *DI* 值变化

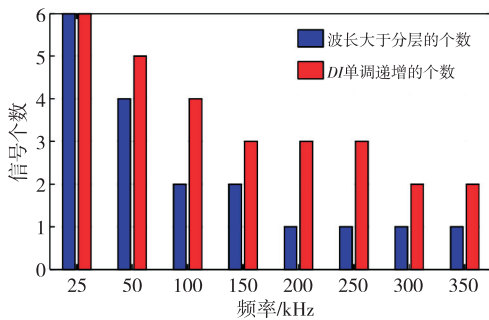
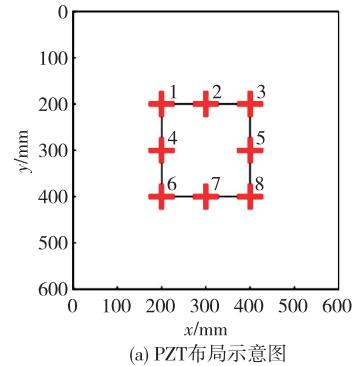


图 11 波长与分层尺寸对 *DI* 单调性的影响

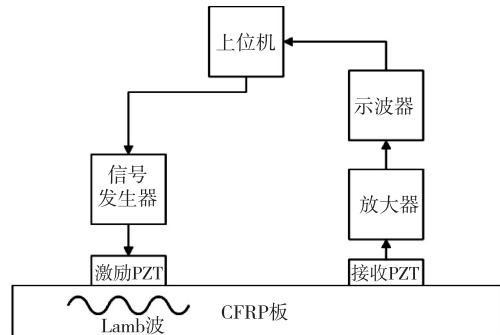
3 实验验证

实验所用 CFRP 板由东丽 T300B-3000-40B 碳纤维布铺成,粘合剂采用惠柏 5600 环氧树脂。几何尺寸、铺层数层数、铺层角度同仿真一致。使用直径为 $\varnothing 10$ mm、厚度为 2 mm 的圆形 PZT 产生 Lamb 波,以汉宁窗调制的五周期正弦信号作为激励信号。由于制造一系列尺寸的分层比较耗时,故采用添加不同尺寸质量块的方式来模拟一系列尺寸的分层。图 12 展示了 PZT 布局图以及实验装

置。实验装置包括函数发生器、数字示波器、电荷放大器和 PZT 传感器。以 PZT2 激励,PZT7 接收,在 PZT2 处下表面对称粘贴压电陶瓷片,2 个压电陶瓷片既可单片激励,也可反对称并联同时激励以增强 A0 模式。



(a) PZT 布局示意图



(b) 实验装置示意图

图 12 实验装置

图 13 展示了通过比较两种情况下波形变化来识别可能的 A0 模式。信号经过希尔伯特变换提取包络后得到波包的飞行时间,进而根据飞行时间和 PZT 间距计算出群速度为 1.511 m/ms。根据仿真参数计算的频散曲线可知,该速度与 A0 模式接近,以此判断为 A0 模式。表 3 为对应频率的波长。

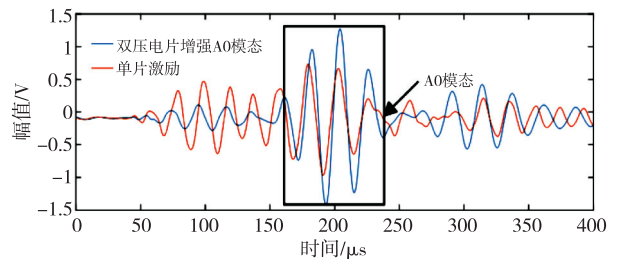


图 13 A0 模式识别

表 3 Lamb 波 A0 模式的波长

频率/kHz	波长/mm
20	53.22
25	47.70

续表

频率/kHz	波长/mm
30	43.84
40	37.38
50	31.55
60	26.65
70	22.44
80	19.33
90	18.00
100	16.77
150	11.26
200	9.80
250	8.09

质量块尺寸与位置设置与仿真相同,计算增强A0模态下的损伤指数,不同分层半径下DI值变化如图14所示。由图可看出,20 kHz频率下DI随直径增加而单调递增。图15比较了不同频率下波长大于分层的个数与DI单调递增的个数。由图15可看出,当激励信号的波长大于分层时,总能保证随着分层长度增加,DI值单调递增,与仿真结论一致。

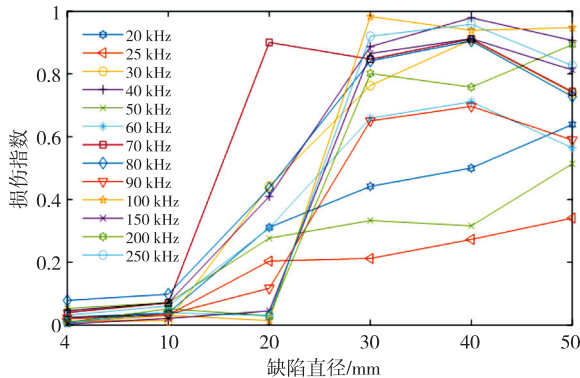


图14 不同分层半径下DI值变化

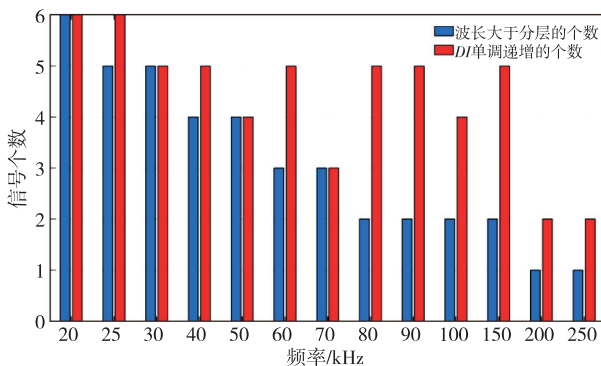


图15 实验波长与尺寸对DI单调性的影响

在坐标(350, 250)处放置直径分别为 $\varnothing 20$ 、

$\varnothing 30$ 、 $\varnothing 50$ mm的质量块模拟缺陷,计算20 kHz下的损伤指数,结果如图16所示。由图可看出,不同传感器路径的DI随着分层尺寸增加而单调增加,且传感器1-5连线最接近缺陷所在位置,DI值最大,在所有路径DI相加取平均值时对其影响最大。

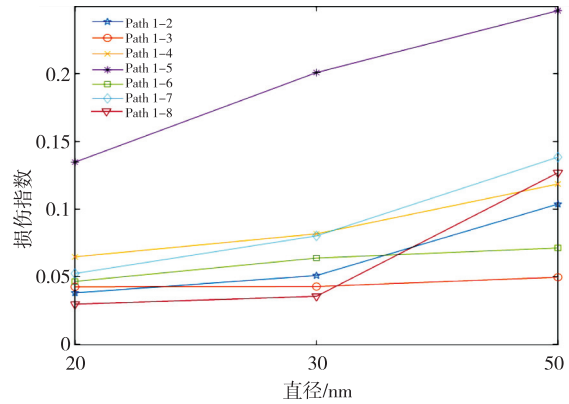
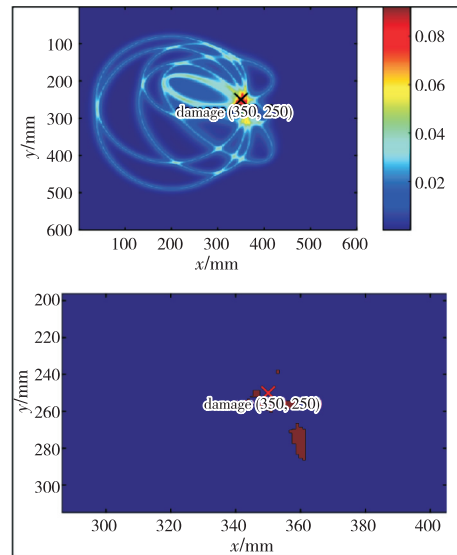


图16 分层尺寸对不同路径上20 kHz频率的扰动

选择20 kHz频率进行成像,通过减去基准信号并提取包络,得到散射波TOF,进而计算每条传感器路径上的群速度。由于材料的各向异性使得各个方向上的速度不同,而缺陷点的位置事先未知,为了减小误差将各个传感器路径上的速度取平均值。将板划分为 600×600 的网格,求得每个像素点的损伤概率,并将所有损伤概率矩阵相加。然后将每条传感器路径上的DI值累加取平均值,乘入累加后的损伤概率矩阵中,取固定阈值0.08,得到不同尺寸下的定位结果,如图17所示。由图可看出,缺陷尺寸越大,成像区域越大。



(a) 20 mm

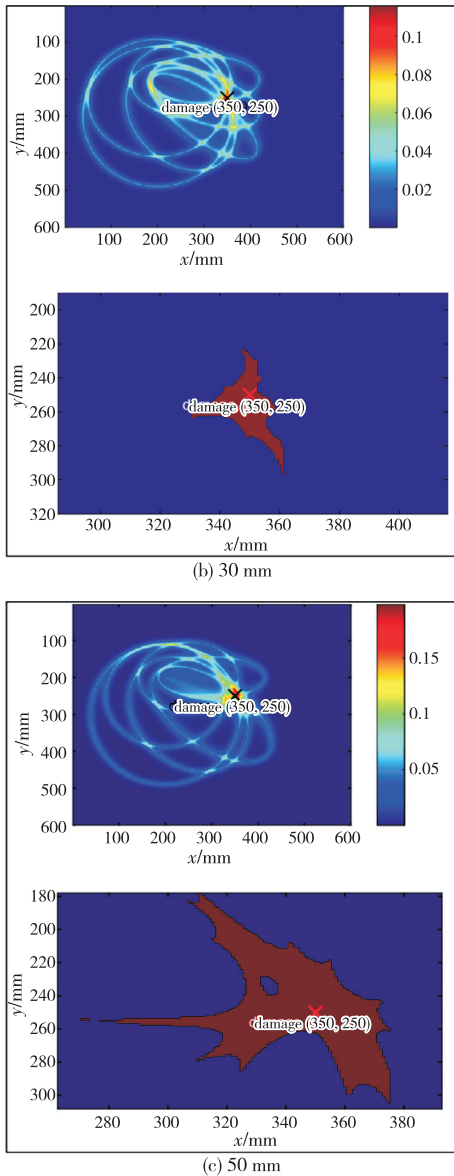


图 17 不同尺寸成像

在与实际缺陷相同形状的区域,以 1 mm 为步长扫过概率矩阵上的每个点,求出区域内像素点累加概率值最大时对应的位置,得到成像效果图如图 18 所示。设实际缺陷圆心坐标为 (x, y) , 成像区域圆心坐标为 (x_1, y_1) , 则定位误差 ϵ 为

$$\epsilon = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (9)$$

利用式(9)计算 20、30、50 mm 缺陷的定位精度分别为 5.83 mm、7.62 mm、6.32 mm,由此可见,成像方法具有较高的定位精度。误差的原因可能是 CFRP 板的各向异性导致不同方向的波速差异,以及 PZT 贴附和质块放置位置与设定坐标点之间的偏差。

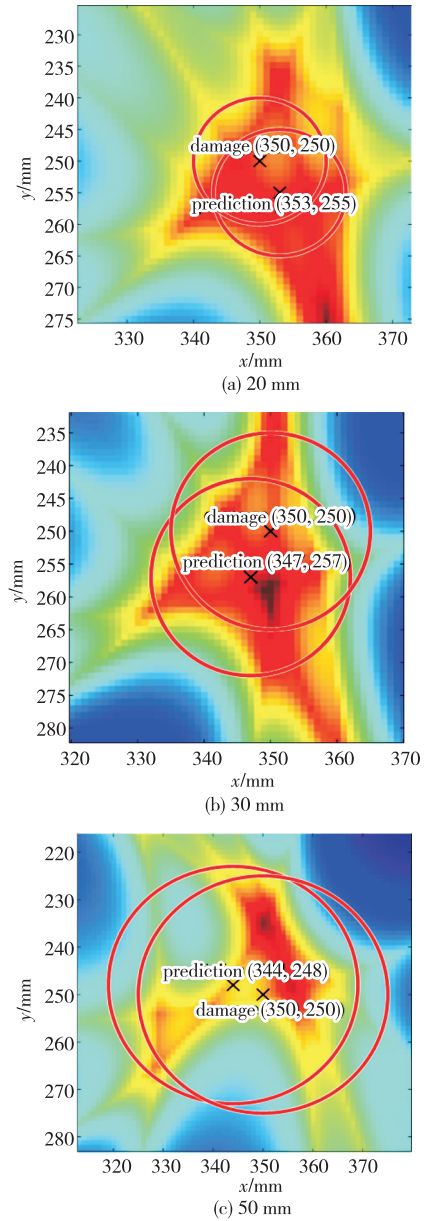


图 18 成像效果图

4 结论

本文提出了一种 CFRP 板分层损伤定位与严重程度估计方法,经仿真与实验得出以下结论:

1) 通过有限元仿真模拟了 chirp 信号与不同分层尺寸之间的作用。结果表明,不同波长下信号对分层尺寸的敏感性不同。采用损伤系数描述扰动程度,当激励信号的波长大于分层时,随着分层长度增加,损伤指数单调递增;当波长小于分层尺寸时,损伤指数振荡。通过实验验证,求取不同尺寸下对不同频率的 DI 值,结论与仿真一致。

2) 使用波长较大的信号进行激励,将不同传感

器路径上的 DI 取平均后乘入损伤概率矩阵, 设定固定阈值后, 成像结果能够反映分层尺寸信息。

参考文献:

- [1] HAYASHI T, KAWASHIMA K. Multiple reflections of lamb waves at a delamination [J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1/8): 193-197.
- [2] PUDIPEDDI G T, NG C T, KOTOUSOV A. Mode conversion and scattering of lamb waves at delaminations in composite laminates[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(5): 04019067.
- [3] YEUM C M, SOHN H, LIM H J, et al. Reference-free delamination detection using Lamb waves [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, 21(5): 675-684.
- [4] FENG Bo, RIBEIRO A L, RAMOS H G. A new method to detect delamination in composites using chirp-excited Lamb wave and wavelet analysis [J]. *NDT & E International*, 2018, 100: 64-73.
- [5] 王梓尧, 严刚. 基于 Lamb 波的复合材料结构分层损伤扩展监测研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(7): 20-26.
WANG Ziyao, YAN Gang. Monitoring of delamination growth for composite structure by using lamb waves[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(7): 20-26.
- [6] NANDYALA A R, DARPE A K, SINGH S P. Damage severity assessment in composite structures using multi-frequency Lamb waves [J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(6): 2834-2850.
- [7] RAMADAS C, BALASUBRAMANIAM K, JOSHI M, et al. Interaction of the primary anti-symmetric Lamb mode (A_0) with symmetric delaminations: numerical and experimental studies[J]. *Smart Material Structures*, 2009, 18(8): 085011.
- [8] MICHAELS J E, LEE SANG jun, CROXFORD A J, et al. Chirp excitation of ultrasonic guided waves[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(1): 265-270.
- [9] SHEEN B, CHO Y. A study on quantitative lamb wave tomogram via modified RAPID algorithm with shape factor optimization[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(5): 671-677.
- [10] SU Zhongqing, YE Lin. Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm[J]. *Composite Structures*, 2004, 66(1/4): 627-637.