

异形截面复合材料构件高速超声检测技术

余旭东

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

[摘要] 针对航空航天异形截面复合材料构件的长距离无损检测难题, 研究了一种基于超声特征结构导波的快速扫描技术。通过半解析有限元方法对具有各向异性、粘弹性的任意截面形状波导结构进行模态分析, 在两种典型复杂复合材料构件单元, 即翼梁弯角(R区)和加筋壁板粘接结构中定征出了能量高度汇聚的超声导波模式。该类导波被证明能够将声波能量高度聚集于特征结构内部, 并引导所捕获能量仅沿其传播, 且具有低色散、低衰减等优异的传播特性。进而, 采用三维有限元仿真与实验测试方法, 验证了所选导波模式的频散特性, 并研究了其与特征结构内多种类型缺陷(如分层、裂纹、脱粘等)的声散射规律。利用声波-缺陷能量共振现象以及缺陷反射回波信息, 实现了对长构件内部缺陷的精确定位。研究证明, 所提出的超声特征结构导波检测技术可应用于飞行器复杂形状复合材料构件的远程、在役、快速检测。

关键词: 复合材料; 异形截面; 无损检测; 超声导波; 能量汇聚

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.055



余旭东

副教授, 博士生导师, 致力于航空航天复杂材料结构的先进超声无损检测及结构健康监测技术研究。负责实施了新加坡政府资助的多项重大科研项目, 曾获日本石川岛播磨重工业(IHI)最高项目评级。已取得国际发明专利成果转化2项, 国家发明专利授权1项, 发表学术论文20余篇。

随着预制体制备技术及成型工艺的不断发展, 纤维增强异形截面复合材料结构, 如翼梁、加筋壁板、肋条等(图1)得以整体成形制造, 并作为重要的承力构件, 大量应用于航空航天工业。飞行器服役条件下, 受应力集中、冲击载荷、疲劳效应等因素的影响, 这些层压构件内部易产生多种类型的缺陷损伤, 如脱粘分层、纤维断裂、基体开裂等^[1-3]。该类初始缺陷若不能被及时有效地筛查, 其损伤程度将在构件持续服役过程中加剧, 并在跨层次结构中扩展与蔓延^[4], 导致结构强度与刚度的急剧损失, 并最终造成灾难性的后果。因此, 研究针对异形截面复合材料构件的高效无损检测技术对保障飞行器运行的可靠性和安全性至关重要。

超声检测方法因其穿透能力强、

灵敏度高、成本低等特点, 在复合材料结构的缺陷检测方面获得了最为广泛的应用^[5-6]。然而, 传统的超声波探伤须通过超声探头配合特定形状楔块, 以实现复杂型面构件的逐点扫描。该方法在长距离检测时不仅费时费力, 且无法实现对探头接触不到区域的检测。同时, 需要制造具有不同曲率半径轮廓的楔块以满足不同构件型面的要求。先进水浸超声相控阵技术可以不受其限制^[7-8], 但须设计较为复杂的时间延迟法则以适配构件型面, 并同时补偿材料各向异性以及探头位置偏差对超声波束的影响。因而, 该方法成本较高, 通常适用于对构件特定部位深部缺陷的定量分析, 而不适合构件的长距离筛查和在役检测。

针对该难点, 超声导波检测凭其

较少的换能器激励位置要求以及困难接触区域的远程扫描效能,有望成为有效的解决手段。近年来,一种能量高度汇聚的特征结构导波被广泛研究,并成功应用于金属焊缝^[9-12]、弯角^[13-15]、加筋壁板^[16]等多种金属板类结构的缺陷检测。本文作者进一步深入研究了材料各向异性、非均质性、粘弹性对弹性波传播的耦合作用机理,并发现该特征结构导波也存在于多种复杂形状复合材料结构^[17-19]。基于上述已发表工作,本文进而针对两类典型复合材料构件单元的检测问题做深入探讨,总结了超声特征结构导波在异形截面复合材料结构长距离检测方面的应用优势及限制。

复合材料构件 R 区缺陷远程检测

检测对象为 L 形碳纤维增强树脂基复合材料构件,密度为 1540kg/m³。构件整体尺寸为 800mm×500mm×2.4mm,其中 R 角为 90°,R 区半径为 4mm。试件由 16 层预浸料(Gurit Inc., USA, 型号: SE84LV)按照 [0°/45°/90°/-45°]_{2s} 顺序铺层,并于 120°C 温度和 0.4MPa 真空度条件下热压成形。铺层过程中,0° 纤维沿波导结构(即波传播方向)布置;材料定义参考坐标系中,x₃ 方向与纤维走向平行,x₁ 方向与层间界面垂直。超声实验方法测得该材料单方向纤维层合板(具有横观各向同性对称性)的刚度矩阵,如表 1 所示;结合 Backus 平均法^[20]可进一步求得具有任意铺层方向、铺层顺序的层合板的等效刚度矩阵。

1 弯角截面复合材料构件模态分析

为研究复合材料弯角结构内所存在的导波模式及其特性,采用半解析有限元(Semi-Analytical Finite Element, SAFE)方法^[21]在频域下进行模态分析。该方法基于特征值

问题求解,仅需对波导截面做有限元网格划分,而在沿波导结构方向(即波传播方向)上设定简谐波假设,即可将三维波传播问题转化为二维模型进行计算。凭其较高的计算效率,SAFE 方法广泛应用于各种异形截面各向同性介质^[10,14,21-24]以及复合材料平板类结构^[25-27]内导波的研究。其基本计算原理简述如下。

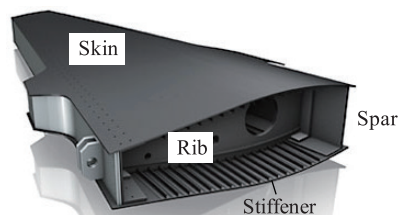
根据所述假设,沿任意截面形状波导结构传播的导波在 t 时刻的位移场可描述为:

$$u_i(x_1, x_2, x_3, t) = U_i(x_1, x_2) e^{i(kx_3 - \omega t)} \quad (1)$$

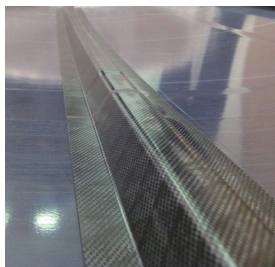
式中, k 为复数波数,实部对应波传播状态,虚部对应导波衰减系数; I 为虚数单位; ω 为角频率; $i=1,2,3$ 对应主坐标系振动自由度。结合各向异性材料本构关系及平衡方程,可获得导波质点运动方程,即

$$\sum_{j,k,l=1}^3 \left[C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} \right] + \rho \omega^2 u_i = 0 \quad (2)$$

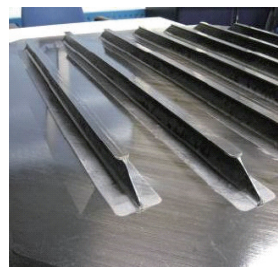
式中, C_{ijkl} 为四阶弹性系数张量; ρ 为介质密度。然后将式(1)代入方程



(a) 飞行器机翼盒段结构



(b) 复合材料翼梁弯角



(c) 复合材料加筋壁板

图1 典型异形截面复合材料构件示例

Fig.1 Typical complex-shaped composite components

表1 所用复合材料的弹性系数

Table 1 Elastic properties of composite material used

GPa

弹性系数	[0°] ₁₆ 碳纤维层合板	[0°/45°/90°/-45°] _{2s} 碳纤维层合板
C ₁₁	10.31	10.31
C ₁₂	4.24	4.38
C ₁₃	4.51	4.38
C ₂₂	10.31	47.64
C ₂₃	4.51	15.92
C ₃₃	107.8	47.64
C ₄₄	4.45	15.86
C ₅₅	4.45	3.61
C ₆₆	3.04	3.61

(2),该微分运动方程即可表达为特征值问题形式,即:

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_k \partial x_l} + I(C_{i3jk} + C_{ikj3}) \frac{\partial(kU_j)}{\partial x_k} - kC_{i3j3}(kU_j) + \rho\omega^2 \delta_{ij} U_j = 0 \quad (3)$$

式(3)在 $j=1,2,3$ 和 $k, l=1,2$ 上累加求和。该特征值问题对应的偏微分方程可通过商用有限元分析工具 COMSOL 求解,以计算单个频率下波导结构中存在的的所有导波模式的特征值波数及特征向量;在多个频率下重复上述计算即可求得各导波模式在所研究频率范围内的频散特性。

针对本文所研究的异形截面复

合材料结构,为准确表征弯角区域的空间各向异性,还须建立坐标依赖的刚度矩阵旋转关系^[16],将材料参考坐标系下定义的四阶弹性系数张量 C_{mnrst} 相对主坐标系 3 个旋转自由度进行相应的旋转后赋予波导截面划分的各网格节点,其计算表达式为:

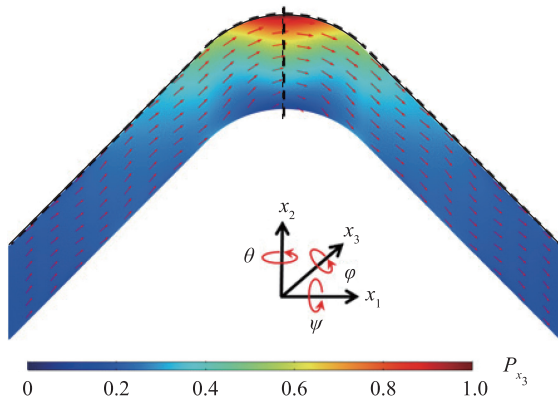
$$C'_{ijkl} = \omega_{im} \omega_{jn} \omega_{kr} \omega_{ls} C_{mnrst} \quad (4)$$

式中, ω_{ij} 为正交旋转张量。

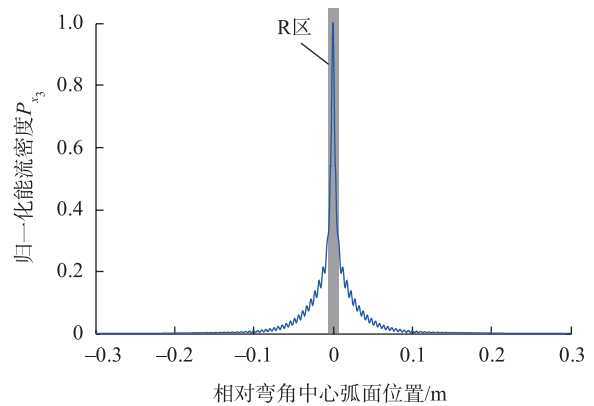
在 50~400kHz 频率范围内计算该各向异性弯角结构内存在的导波模式,再依据各模式沿波导方向传播的能流密度(即 Poynting 矢量^[28])的分布状态以选出特征结构导波模式,其计算公式为:

$$P = -\frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{v}^* \cdot \boldsymbol{\sigma}) = \begin{bmatrix} P_{x_1} \\ P_{x_2} \\ P_{x_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

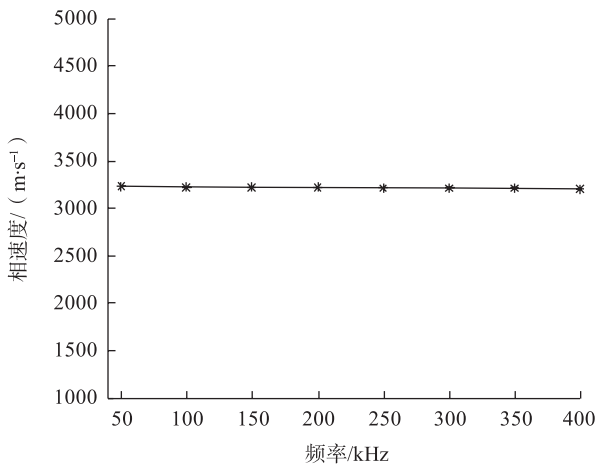
式中, \mathbf{v}^* 为粒子速度矢量的共轭; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量。图 2 显示了通过 SAFE 计算所定征的一种水平剪切型导波模式,该模式能够将声波能量高度汇聚于弯角区域,其能流密度沿波导方向分量 P_{x_3} 在邻接的平板结构内出现幅值迅速下降,因而该导波模式能够有效捕获声场能量,使其仅沿着弯角区域传播,进而提供了针对复合材料构件 R 区进行特异性检测的可能性。同时,在所研究频率范围内,该模式具有非色散、低衰减的传播特



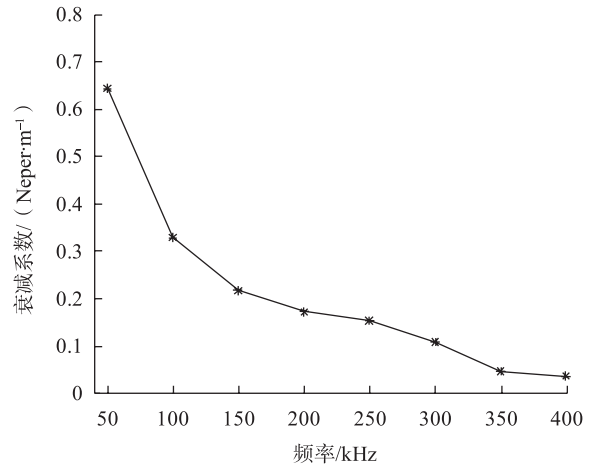
(a) 弯角导波模式的振动模式及沿波导方向能流密度分布状态(频率300kHz)



(b) 沿弯角外弧面提取的归一化能流密度分布(频率300kHz)



(c) 弯角导波模式的相速度频散曲线



(d) 弯角导波模式的衰减系数频散曲线

图2 沿R区传播的弯角导波振动模式及频散特性

Fig.2 Mode shape illustration of bend-guided mode and predicted dispersion curves

性,能够在R区内进行长距离扫描。

为定量地描述该导波模式在特征结构即弯角区域内的能量汇聚程度,图3进一步计算了其能流密度 P_{x_3} 沿R区分布的半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)^[10];显然,其幅值越小则表示导波能量集中程度越强。由50~400kHz范围内的半峰全宽变化趋势可知,该弯角导波能量随频率增加而愈加集中于构件R区内,意味着更高的声场能量得以与该区域中的缺陷产生交互作用,因而有望获得较高的检测灵敏度。

相互作用,因而有望获得较高的检测灵敏度。

2 弯角导波三维有限元仿真及实验验证

为验证所定征的弯角导波模式的传播特性并研究其与R区缺陷的声散射规律,采用三维有限元方法进行时域下的波传播模拟。与SAFE模型类似,在三维有限元模型中,须定义一系列的当地坐标系群以准确表征弯角区域随曲率变化的各向异性弹性系数。如图4所示,通过

在弯角端面沿厚度施加水平剪切力(采用5-cycle Hanning-windowed toneburst信号,中心频率为300kHz),激励产生了能量高度汇聚于R区并沿Z方向传播的弯角导波,且传播能量极少从弯角区域泄露至邻接板内,即该模式具有低衰减系数。

图5显示了实验所用的超声导波激光测试系统。测试采取了与有限元仿真类似的激励方式,即将剪切型换能器(Olympus Inc., USA,型号:V154RM)与试样弯角端面耦合压

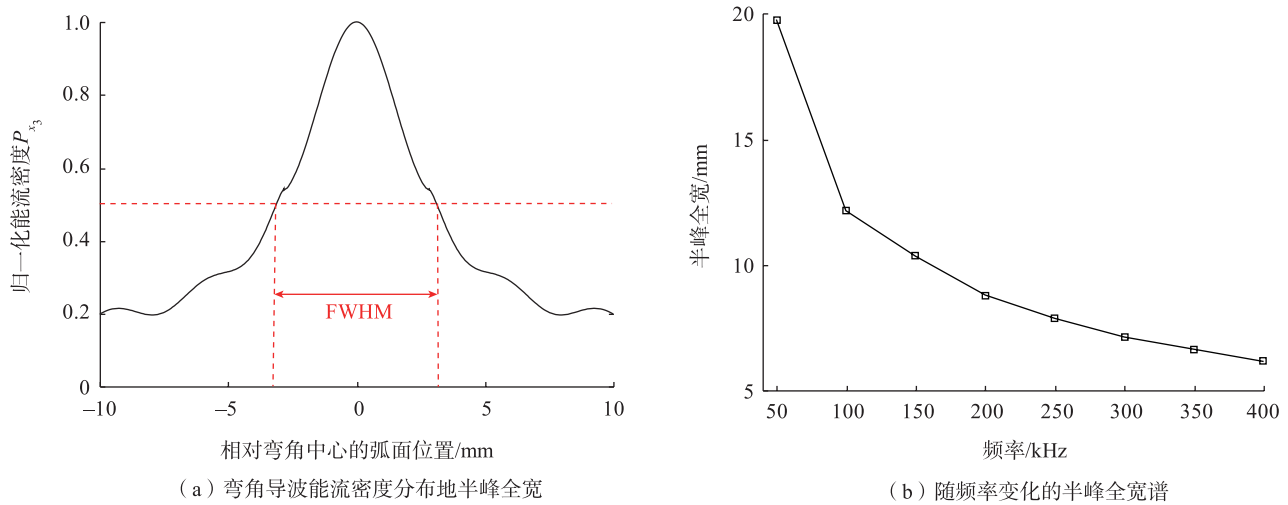


图3 不同频率下导波能量于R区汇聚程度对比

Fig.3 FWHM spectrum of bend-guided mode showing extent of wave energy concentration at frequencies

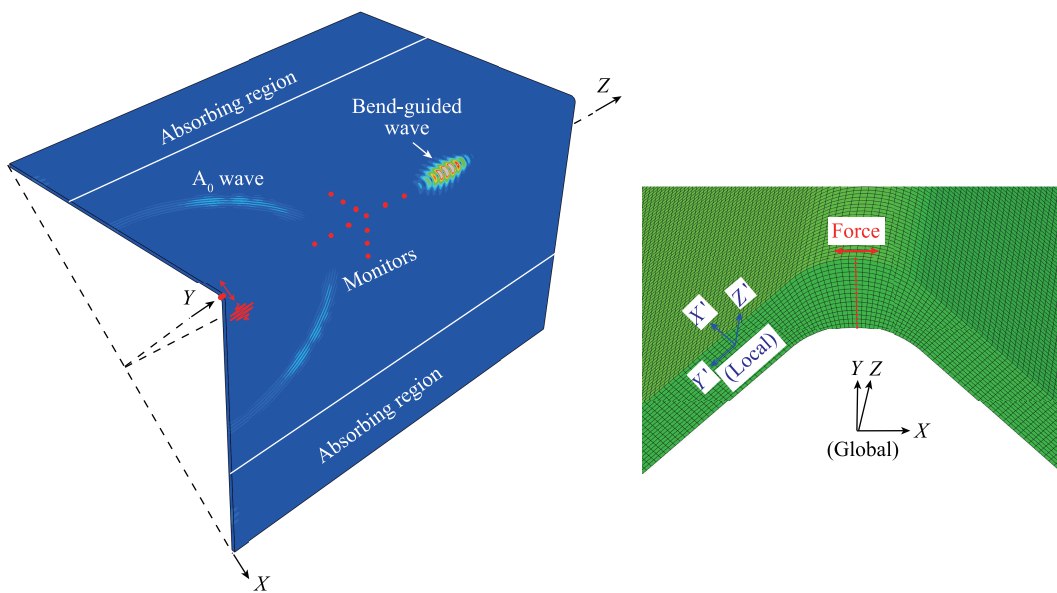


图4 弯角导波传播三维有限元仿真结果示例

Fig.4 Snapshot of bend-guided wave propagating in composite bent plate

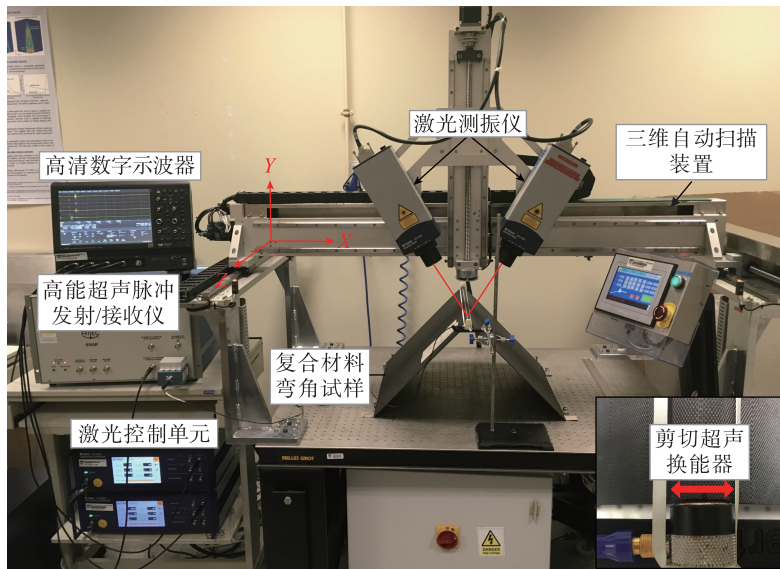


图5 超声导波激光测试系统及换能器布置

Fig.5 Experimental set-up for measuring bend-guided waves with shear transduction shown

紧,并由高能超声脉冲发射仪(Ritec Inc., USA,型号:RAM-5000)驱动该换能器产生剪切振动。声场测试则通过两个呈 60° 夹角布置^[29]的激光多普勒测振仪(Polytec, Germany,型号:OFV-5000)同时发射激光束并在试样表面同一点聚焦,以实现对该地的导波粒子振动速度/位移的测量。基于该激光布置,两个方向所测激光信号经高清数字示波器(Teledyne LeCroy, USA,型号:HDO6054)分

别作差、求和即可获得粒子振动的面内和离面位移分量,再经几何关系转换^[14],即可计算弯角导波在R区传播时的切向位移分量(主要振动形式)与法向位移分量。

图6(a)显示了在距激励端200mm处沿R区表面横向(即X方向)测得的导波面内振动幅值,其归一化分布状态与有限元仿真结果一致性较好,实验证明了该弯角导波模式所具备的R区能量汇聚特性。此

外,实验沿导波传播方向于R区中线顺次采集了距激励端50~200mm的151个等距位点的面内振动信号。通过二维傅里叶变换(2D-FFT)^[30],计算了该导波模式的相速度频散曲线。图6(b)定量地比较了3种方法求得的相速度幅值,仿真与实验结果高度吻合,因而验证了该导波模式的非色散传播特性,同时也有效地证明了所用两种有限元分析模型的准确性。

3 弯角区域不同类型缺陷检测

验证了弯角导波模式的传播特性,进而研究该导波模式与R区内常见的两类缺陷,即脱粘分层和横向裂纹之间的交互作用,对缺陷进行远程扫描检测。首先,实验所用试样内脱粘缺陷的制造过程是在预浸料铺层时于顶部 $0^\circ/45^\circ$ 纤维层间的弯角区域粘贴Teflon薄片(宽度:20mm,长度:10mm),分层位置距激励端面200mm。三维有限元模型则是通过在相邻网格共面处分离微小的径向距离(即Volume split方法^[31])以模拟与实验试样具有相同尺寸的分层缺陷。由实验测试信号以及有限元仿真结果可以发现,弯角导波与R区分层缺陷交互作用过程中产生的反射回波幅值较弱,难以作为缺陷定

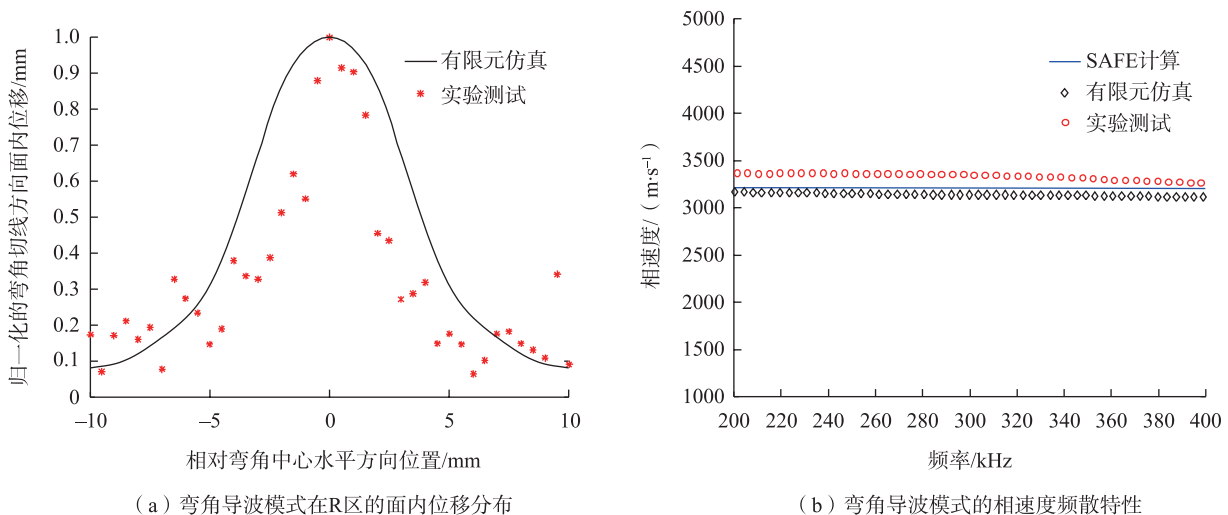


图6 弯角导波模式传播特性实验验证

Fig.6 Experimental validation of modal properties of identified SH type bend-guided wave

位的可靠依据。但值得注意的是,弯角导波传播至分层区域时,部分声波能量被该分层缺陷捕获,从而在其前后边界之间往复震荡,进而产生一种声波-缺陷共振现象,导致缺陷处出现了局部能量峰值。类似的现象也被发现并报道于复合材料平板结构分层缺陷引起的导波散射波场^[32]。进而,依据 Parseval 原理,图 7 分别在实验与有限元仿真中计算了 $z=100\sim 300\text{mm}$ 多位点剪切位移信号的能量,即

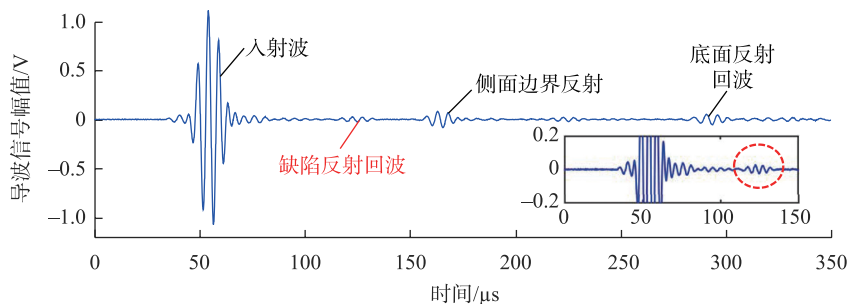
$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df \quad (6)$$

式中, $S(f)$ 为时域信号, $s(t)$ 的傅里叶变换频谱。由弯角导波能量的空间分布可以发现,沿波导方向的当地能量峰值与缺陷位置高度吻合,依此可实现分层缺陷在沿弯角方向上的精确定位。

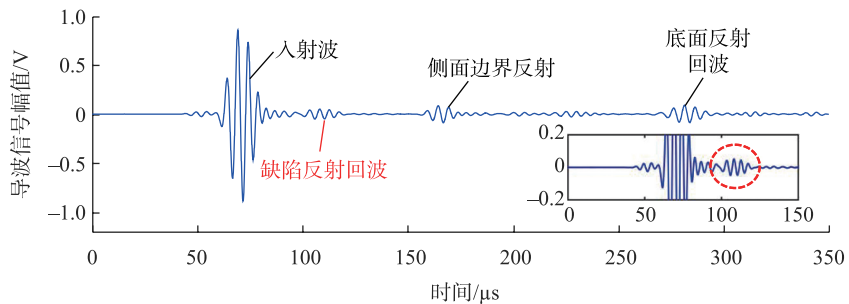
为研究弯角导波与 R 区裂纹缺陷的交互作用,在另一完整实验试样上沿弯角切割了一个横向槽(长度 20mm, 宽度 0.5mm, 径向深度 1.2mm, 即 50% 板厚),其位置距激励端面 210mm。图 8 分别显示了在距激励端 100mm 及 150mm 处测得的

弯角导波面内振动信号。由结果可知,缺陷反射回波均于入射波和侧面边界反射波之间到达;由于该导波模式沿弯角传播时非色散,因而仅依据反射回波到达时间和该模式的群速度即可获得裂纹缺陷的相对位置。为定量地研究弯角导波模式的

反射行为,图 9 计算了频域下导波针对该缺陷的反射系数谱,由于该模式非色散,缺陷长度常以与不同频率成分入射波长的相对比值表示。结果显示,该导波模式反射系数随波长的减小(即频率升高)而增加。由图 3 结果可知,该弯角导波模式的能量



(a) 距激励端 100mm 处测得信号



(b) 距激励端 150mm 处测得信号

图 8 弯角导波针对横向裂纹的面内位移反射信号

Fig.8 Typical time traces of in-plane motion measured along cracked bent plate

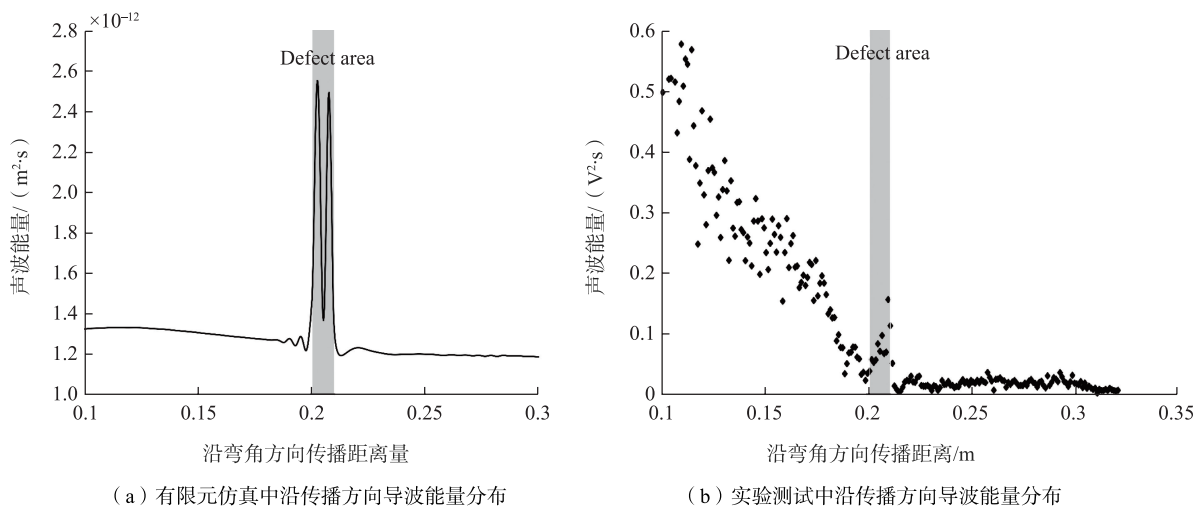


图 7 弯角导波在分层缺陷处局部能量峰值比较

Fig.7 Illustration of local energy peak in delaminated area, derived from FE simulation and experiment

汇聚程度会随频率增加而增强,并愈加集中于R区外表面^[14],因而弯角导波的相对高频成分中将有更多声场能量被该裂纹缺陷反射,引起了更大的反射系数。在反射系数谱的趋势上,有限元仿真与实验测试结果也表现了较好的一致性。通过有限元仿真方法,图10进一步计算了弯角导波针对不同深度裂纹(固定长度:20mm)的反射系数。结果显示,其反射系数随缺陷深度的增加而增大,意味着更多导波能量在缺陷处被反射,这也证明了弯角导波对R区深度缺陷的可检性。但值得注意的是,该导波模式的声场能量相对更集中于弯角外表面,因而对靠近表面处的缺陷应具有更高的检测灵敏度。

复合材料粘接构件脱粘缺陷定征

粘接结构为复杂复合材料组件的又一重要结构单元。检测对象为碳纤维复合材料加筋壁板构件,其组分包括:(1)粘弹性、正交各向异性的碳纤维层合板,即蒙皮;(2)粘弹性、各向同性的树脂粘接层;(3)粘弹性、各向同性的铝制加强筋。各组分的粘弹性系数均由超声实验测得^[33-34],定征结果见表2。蒙皮层合板尺寸为500mm×800mm×1.6mm,密度为1580kg/m³,由8层碳纤维预浸料(Hexcel Inc., USA,型号:M21)按照[0°/45°/90°/-45°]。顺序铺层,并热压成形;其中0°纤维走向与导波传播方向一致。T形加强筋厚度为1.6mm,长度为900mm,其密度为2700kg/m³。粘接层厚度为0.75mm,由双组分树脂胶(Araldite GY784树脂/Aradur 125固化剂)固化得到,混合密度为1050kg/m³。在该组件中,碳纤维材料的热膨胀系数远低于金属铝,因而在温度载荷下,蒙皮与加强筋之间容易引入较高的热应力^[35],使得两者与粘接层的界面处产生脱黏缺陷。因

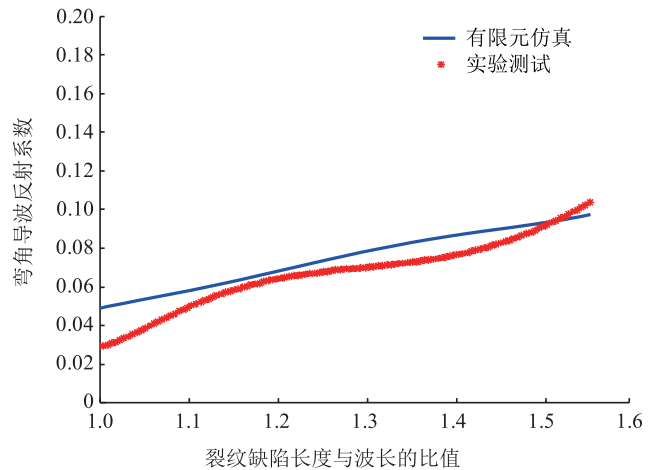


图9 弯角导波针对横向裂纹的反射系数谱

Fig.9 Reflection coefficient spectra for transverse crack in bend region

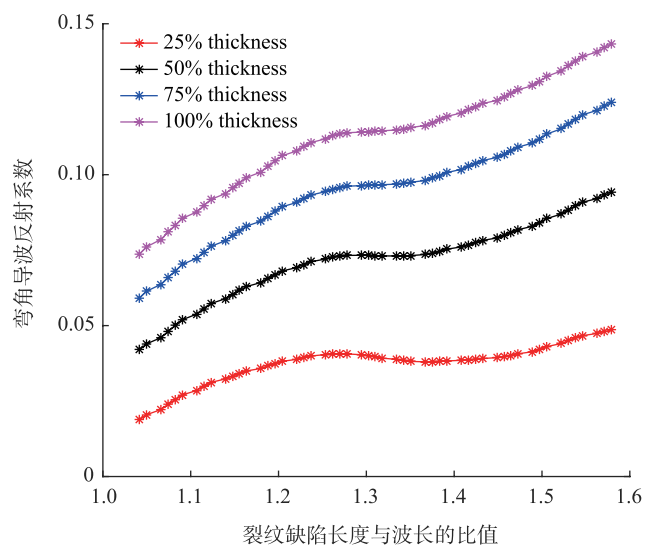


图10 不同深度裂纹缺陷的反射系数谱对比

Fig.10 Comparison of reflection coefficient spectra for cracks with different depths

表2 加筋壁板各组分弹性及粘弹性系数

Table 2 Elastic/viscoelastic properties of components contained in composite adhesive joint

GPa

弹性及粘弹性系数	碳纤维层合板	树脂粘接层	铝制加强筋
C_{11}	13.1+0.4i	5.6+0.5i	107.84
C_{12}	6.97+0.11i	4.5+0.4i	54.76
C_{13}	6.97+0.11i	4.5+0.4i	54.76
C_{22}	63.7+3.1i	5.6+0.5i	107.84
C_{23}	20.4+0.82i	4.5+0.4i	54.76
C_{33}	63.7+3.1i	5.6+0.5i	107.84
C_{44}	21.6+0.86i	0.5+0.05i	26.54
C_{55}	3.9+0.11i	0.5+0.05i	26.54
C_{66}	3.9+0.11i	0.5+0.05i	26.54

此,须针对该类复合材料组件的脱粘缺陷研究快速无损检测技术。

1 加筋壁板内的特征结构导波模式

基于 SAFE 方法对复合材料粘接结构进行模态分析,在 50~200kHz 频率范围内定征了多种特征结构导波模式,这些模式能够将声波能量集中于加筋壁板组件的不同部位,如筋条、缘条、粘接层等。研究发现,依据导波在所联结蒙皮板中不同的振动模态,所定征的加筋壁板导波大体可划分为 3 类模式^[18],包括纵波簇 (Longitudinal type, L),水平剪切波簇 (Shear Horizontal type, SH),以及弯曲波簇 (Flexural type, F)。本文以水平剪切模式为例,介绍如何通过加筋壁板导波对粘接层进行长距离扫描,以检测定位脱粘缺陷。

图 11 显示了该频率范围内定征的 4 种 SH 型特征结构导波模式的振动模态。依据导波在筋条上所呈现的弯曲振动节点数目,可将其分别定义为 SH(1)~SH(4) 模式。由波导方向能流密度分布状态可以发现,SH(3) 和 SH(4) 模式能够将声波能量汇聚于加强筋底部的缘条区域,那么在其沿波导结构传播过程中将更易促使部分声场能量进入下方的粘接层,与脱粘缺陷产生交互作用,因而更有望提供更高的检测灵敏度。

为进一步评估导波模式对脱粘缺陷的检测灵敏度,图 12 分别计算了其在加筋壁板各组分内沿厚度位置的离面能流密度 P_{x1} 。由结果可知,SH(3) 模式在粘接层内部有着远高于其他模式的 P_{x1} 幅值,这意味着其在粘接层、缘条、蒙皮之间具备更高的层间能量传递效率,那么粘接层内产生的缺陷则更容易影响并改变 SH(3) 模式的传播情形,进而可能提供更灵敏的检测机制。由于粘弹性介质中用能量速度而非群速度表征导波能量传播速度,图 13 计算了各模式的能量速度以及衰减系数的色散曲线。由结果可知,SH(3) 模式在

100~120kHz 频率段同时具备相对较小的色散程度和较低的衰减系数,因此将其选为最优模式-频率组合对加筋壁板构件进行长距离扫描。

2 特征结构导波针对脱粘缺陷的声反射规律

采用三维有限元分析方法,研究

所选加筋壁板导波模式在脱粘缺陷处的散射波场,并揭示其针对不同尺寸缺陷的声反射规律。有限元模型中通过在加筋壁板缘条的端面处施加水平剪切力以激励 SH(3) 导波声场;激励采用 5-cycle Hanning-windowed toneburst 信号,中心频率

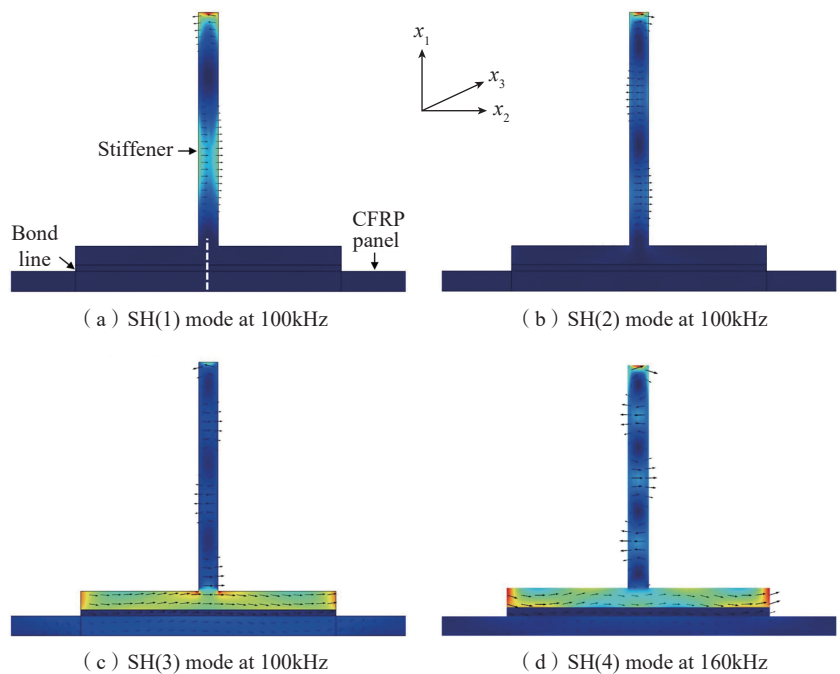


图 11 典型的水平剪切型加筋壁板导波模式振动模态及其波导方向能流密度 P_{x3} 分布
Fig.11 Mode shape illustration and axial power flow distribution of SH-type feature guided modes in stiffener section

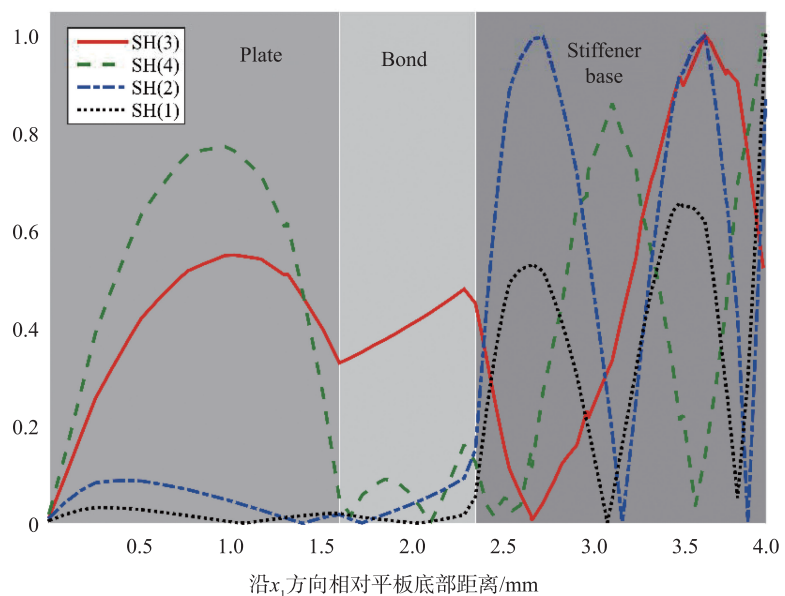


图 12 SH 型加筋壁板导波模式在其不同组分内部的离面能流密度 P_{x1} 分布状态
Fig.12 Variation of out-of-plane power flow for different SH-type feature guided modes

为 100kHz, 激励带宽完全覆盖所选频率范围。

此外, 通过移除粘接层网格引入槽状空隙以模拟脱粘缺陷, 缺陷长度为 22.75mm (即 0.8 倍 SH (3) 模式波长), 缺陷宽度和高度则覆盖粘接层完整尺寸, 即 20mm 和 0.75mm。实验中也加工制造了类似的脱粘缺陷, 用以比较验证。

图 14 显示了 SH (3) 模式在与入射、脱粘缺陷交互作用、以及反射阶段的典型波场。通过分析散射波

场能够发现, 该模式 - 频率组合对脱粘缺陷较为敏感, 交互过程中产生了较强的衍射波信号和反射回波信号。这里基于反射波场, 结合二维傅里叶变换^[18], 图 15 进一步计算了不同宽度、长度脱粘缺陷, 以及不同粘接层厚度情况下的反射系数谱。由结果可知, 反射系数幅值随脱粘缺陷的宽度、长度增加而升高; 另外, 在保持其他尺寸不变的情况下, 粘接层厚度越小, 反射系数越大。例如, 当粘接层厚度为 0.5mm 时, 缺陷反射系数

可达 10%~14%。

3 加筋壁板脱粘缺陷的实验检测及评价

实验试样内的脱粘缺陷制造是在蒙皮与加强筋之间的树脂胶粘接层固化过程中预埋相应尺寸的可滑动金属片, 并在联结强度达到约 70%~80% 时再将该预埋物移出以留出槽状空隙。所用实验测试系统如图 16 所示, 其中试样中所制造缺陷长度约为 24mm, 距激励端 308mm。激励方式是将两个剪切换

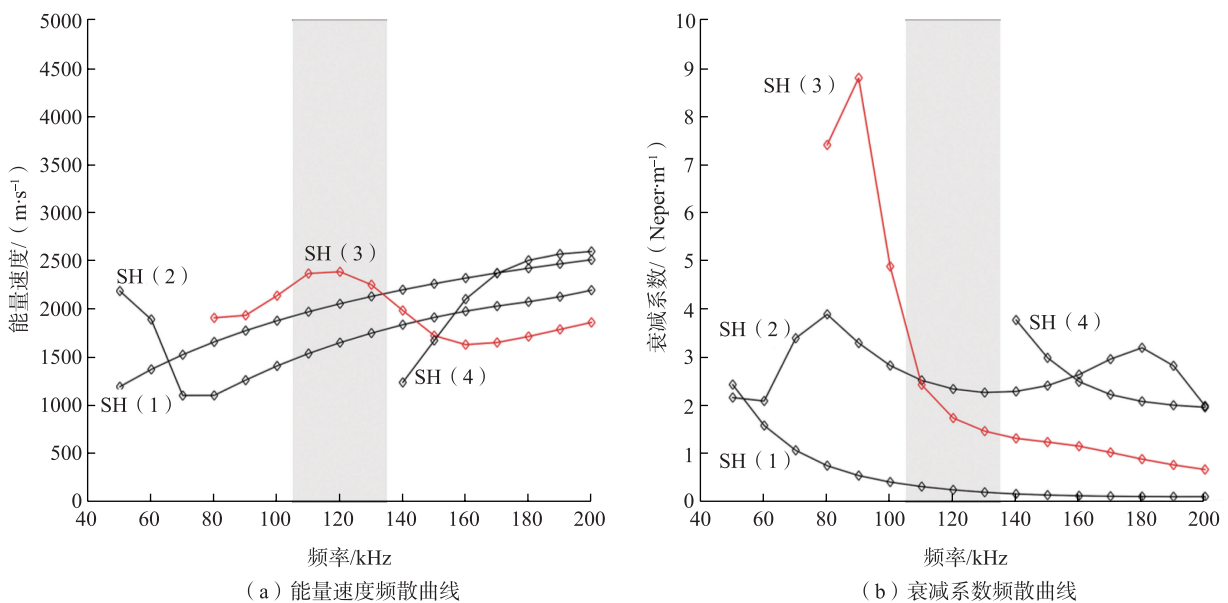


图13 SH型加筋壁板导波模式的频散曲线
Fig.13 Dispersion characteristics of identified SH-type feature guided modes

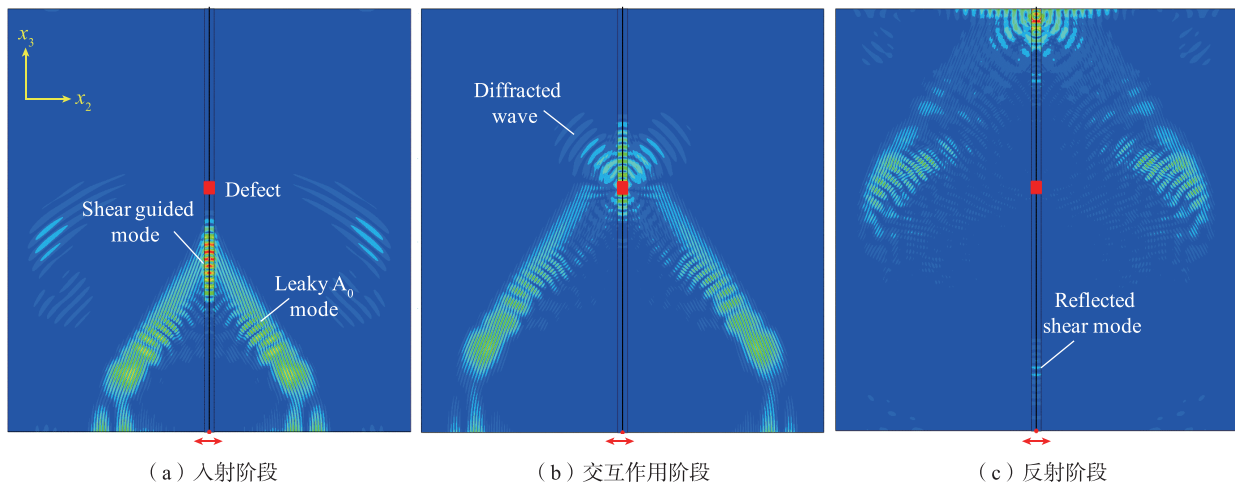


图14 SH (3) 模式与脱粘缺陷交互作用的有限元模拟
Fig.14 FE simulation of SH (3) wave interacting with an adhesive defect in bond line

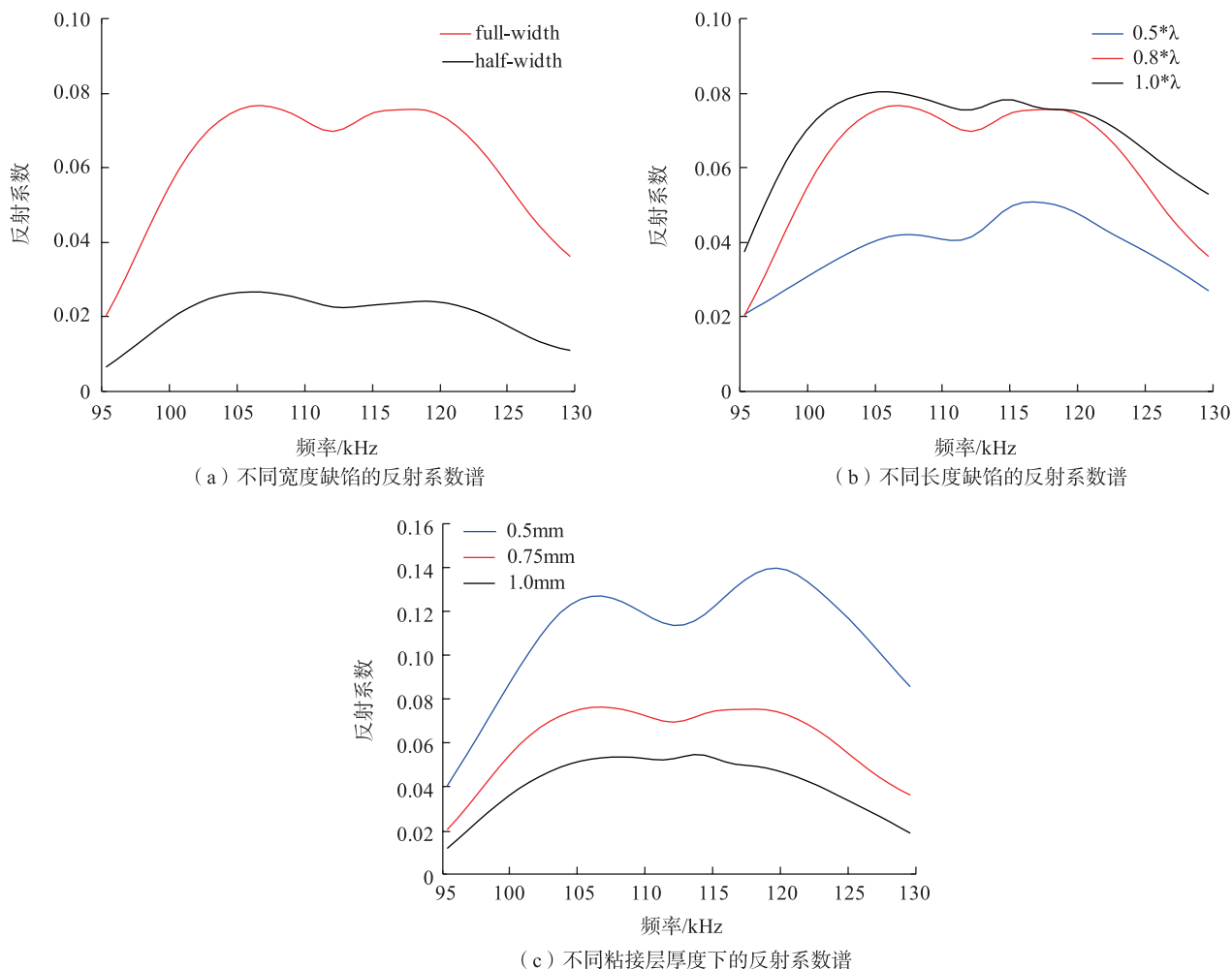


图15 SH (3) 模式针对不同尺寸缺陷的反射系数谱
Fig.15 Reflection coefficient spectra of SH (3) for adhesive defects with different sizes

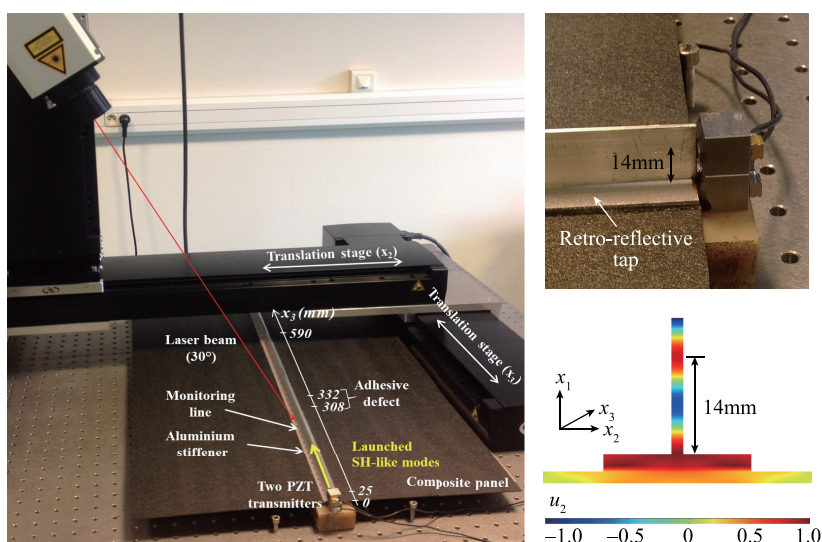


图16 加筋壁板导波测试系统与优化激励方式
Fig.16 Experimental setup for measuring feature guided waves along stiffener with optimized transduction

能器 (Guided Ultrasonics Ltd., UK) 分别与加强筋缘条、筋条特定位置耦合压紧, 参照 SH (3) 模式的面内位移分布状态, 在相应区域产生同相位的水平剪切振动, 以强化激励所选导波模式。波场信号则由激光多普勒测振仪在缘条上端面沿波导方向 (即 x_3 方向) 测得。

图 17 显示了所采集导波信号的正向传播波包和反射波包中包含的模式组分, 该实验色散曲线由二维傅里叶变换处理求得, SAFE 计算结果 (实线表示) 与实验结果高度重合。由正向波包可知, 除所选 SH (3) 模式外, SH (1) 与 SH (2) 模式也被同时激励出来, 并沿加筋壁板传播。但由于这两种模式在粘接层及其周

围区域的能量分布较少(见图 11),未能与脱粘缺陷产生有效交互作用,因而反射波包内依然由 SH(3)模式主导,意味着该检测方式能够提供单一模式导波的检测效能。图 18 则进一步计算了该导波模式针对脱粘缺陷的反射系数谱,且仿真结果和实验测试结果吻合度较高。检测过程中,通过 SH(3)模式反射回波到达时间结合其能量速度即可对脱粘缺陷在加筋壁板方向上快速定位;基

于其反射系数的幅值也可以推测脱粘缺陷的严重程度。

结论

(1) 所提出的超声特征结构导波能够将声波能量高度汇聚于异形截面复合材料板类构件的特征结构区域,如 R 角、加筋壁板等,从而实现对该类复杂构件的长距离、快速、特异性扫描。

(2) 通过所定征的水平剪切型

特征结构导波与复合材料构件中常见缺陷,如分层、裂纹、脱粘等的交互作用,基于声散射波场,可实现对这些缺陷的精确位置定征,并推测其严重程度。

(3) 由于复合材料构件的损伤和破坏过程具有多层次性和相互关联性,内部缺陷也通常在跨层次结构中扩展与蔓延。因而,在实际检测过程中,导波声场能量在特征结构内的非均匀分布一般不会严格限制其对深度方向缺陷的可检性。

(4) 特征结构导波检测方法可为航空航天工业中常见的异形截面复合材料构件提供高效率、长距离、在役检测效能。该方法适用于对缺陷位置的快速定征,但受导波波长的限制,难以实现对缺陷尺寸的精确量化,须结合后续的高频率超声体波手段,如相控阵等在其所定征的缺陷位置做进一步检测,进而准确识别缺陷的尺寸与类型信息。因而,超声特征结构导波扫描与相控阵手段相结合,将为飞行器异形截面复合材料构件的提供更高效、更精确的检测效能。

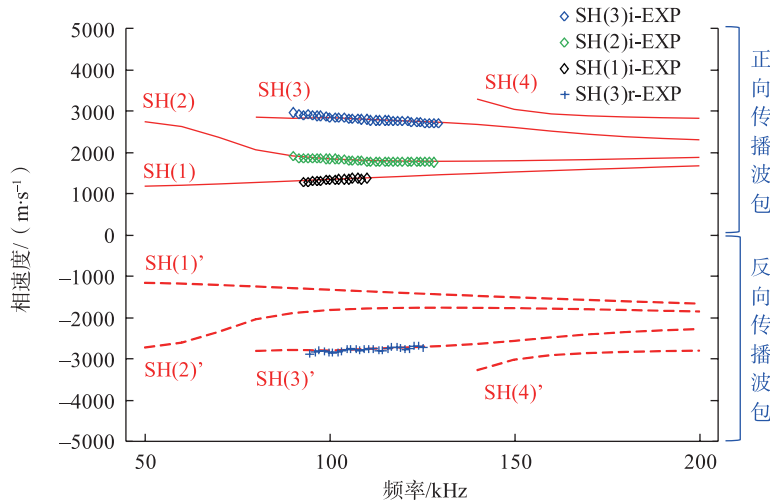


图17 实验测得特征结构导波波包所含模式成分

Fig.17 Experimentally measured phase velocity dispersion curves of modes that contained in excited wave packet

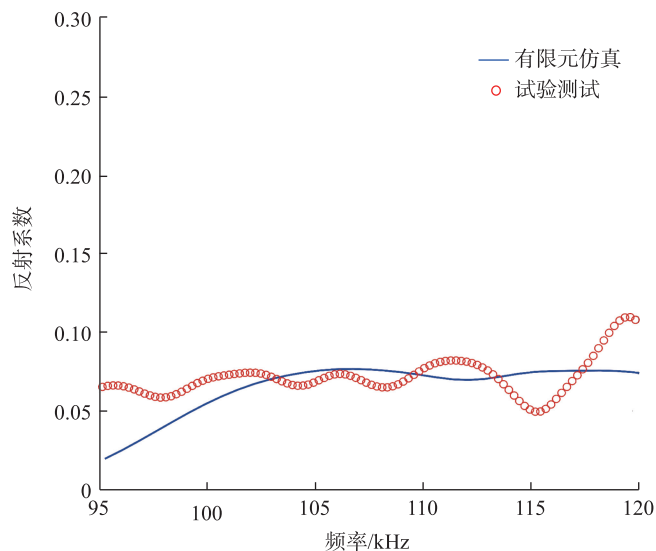


图18 SH(3)模式针对脱粘缺陷反射系数的实验验证

Fig.18 Experimental validation of reflection coefficient spectrum of the SH(3) mode

参考文献

- [1] TASDEMIR B, COKER, D. Comparison of damage mechanisms in curved composite laminates under static and fatigue loading[J]. Composite Structures, 2019, 213: 190-203.
- [2] ZHOU L D, ZHUANG Z. Strength analysis of three-dimensional braided T-shaped composite structures[J]. Composite Structures, 2013, 104: 162-168.
- [3] YANG Q D, RUGG K L, COX B N, et al. Failure in the junction region of T-stiffeners: 3D-braided vs. 2D tape laminate stiffeners[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(7): 1653-1668.
- [4] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [5] DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [5] 周正干, 李文涛. 航空航天领域中先进超声检测技术的发展和应[J]. 航空制

造技术, 2018, 61(19): 34–44.

ZHOU Zhenggan, LI Wentao. Development and application of advanced ultrasonic testing technology in aerospace[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(19): 34–44.

[6] 周正干, 肖鹏, 刘航航. 航空复合材料先进超声无损检测技术[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(4): 40–43.

ZHOU Zhenggan, XIAO Peng, LIU Hanghang. Advanced ultrasonic testing technology for aviation composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(4): 40–43.

[7] HOPKINS D L, BRASSARD M, NEAU G A, et al. Surface-adaptive ultrasound (SAUL) for phased-array inspection of composite specimens with curved edges and complex geometry[J]. *Annual Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, 2013, 1511(1): 809–816.

[8] BRATH A J, SIMONETTI F. Phased array imaging of complex-geometry composite components[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2017, 64(10): 1573–1582.

[9] SARGENT J P. Corrosion detection in welded steel plates using Lamb waves[J]. *Insight*, 2010, 52(11): 609–616.

[10] FAN Z, LOWE M J. Elastic waves guided by a welded joint in a plate[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, 465: 2053–2068.

[11] FAN Z, LOWE M J. Interaction of weld-guided waves with defects[J]. *NDT & E International*, 2012, 47: 124–133.

[12] YU X, ZUO P, XIAO J, FAN Z. Detection of damage in welded joints using high order feature guided ultrasonic waves[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 126: 176–192.

[13] RAMDHAS A, PATTANAYAK R K, BALASUBRAMANIAM K, et al. Antisymmetric feature-guided ultrasonic waves in thin plates with small radius transverse bends from low-frequency symmetric axial excitation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(3): 1886–1898.

[14] YU X, MANOGHARAN P, FAN Z, et al. Shear horizontal feature guided ultrasonic

waves in plate structures with 90° transverse bends[J]. *Ultrasonics*, 2016, 65: 370–379.

[15] MANOGHARAN P, YU X, FAN Z, et al. Interaction of shear horizontal bend (SHB) guided mode with defects[J]. *NDT & E International*, 2015, 75: 39–47.

[16] YU X, RATASSEPP M, RAJAGOPAL P, et al. Anisotropic effects on ultrasonic guided waves propagation in composite bends[J]. *Ultrasonics*, 2016, 72: 95–105.

[17] YU X, RATASSEPP M, FAN Z. Damage detection in quasi-isotropic composite bends using ultrasonic feature guided waves[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 141: 120–129.

[18] YU X, FAN Z, CASTAINGS M, et al. Feature guided wave inspection of bond line defects between a stiffener and a composite plate[J]. *NDT & E International*, 2017, 89: 44–55.

[19] YU X, FAN Z, PULIYAKOTE S, et al. Remote monitoring of bond line defects between a composite panel and a stiffener using distributed piezoelectric sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(3): 035014.

[20] MILTON G W. *The theory of composites*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

[21] CASTAINGS M, LOWE M. Finite element model for waves guided along solid systems of arbitrary section coupled to infinite solid media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(2): 696–708.

[22] PREDOI M V, CASTAINGS M, HOSTEN B, BACON C. Wave propagation along transversely periodic structures[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121(4): 1935–1944.

[23] HAYASHI T, SONG W J, ROSE J L. Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example[J]. *Ultrasonics*, 2003, 41(3): 175–183.

[24] WILCOX P, EVANS M, DILIGENT O, et al. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section[J]. *Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2002, 615(1): 203–210.

[25] BARTOLI I, MARZANI A, DI SCALEA, et al. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section[J]. *Journal of Sound and Vibration*,

2006, 295(3–5): 685–707.

[26] MUKDADI O M, DESAI Y M, DATTA S K, et al. Elastic guided waves in a layered plate with rectangular cross section[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 112(5): 1766–1779.

[27] MATT H, BARTOLI I, LANZA D I, SCALEA F. Ultrasonic guided wave monitoring of composite wing skin-to-spar bonded joints in aerospace structures[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 118(4): 2240–2252.

[28] AULD B A. *Acoustic fields and waves in solids*[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1990.

[29] FAN Z. *Applications of guided wave propagation on waveguides with irregular crosssection* [D]. London: Imperial College London, 2010.

[30] ALLEYNE D, CAWLEY P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 89(3): 1159–1168.

[31] SU Z, YANG C, PAN N, et al. Assessment of delamination in composite beams using shear horizontal (SH) wave mode[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(2): 244–251.

[32] SOHN H, DUTTA D, YANG J Y, et al. Delamination detection in composites through guided wave field image processing[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(9): 1250–1256.

[33] CASTAINGS M, HOSTEN B, KUNDU T. Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties[J]. *NDT & E International*, 2000, 33(6): 377–392.

[34] BRUNEAU M, POTEL C. *Materials and acoustics handbook*[M]. London: ISTE-WILEY, 2009.

[35] RASTOGI N, SONI S R, NAGAR A. Thermal stresses in aluminum-to-composite double-lap bonded joints[J]. *Advances in Engineering Software*, 1998, 29(3–6): 273–281.

通讯作者: 余旭东, E-mail: yxudong@buaa.edu.cn.

(下转至第 82 页)

A New Method of Rebinning Projections for TR Tomographic Scanning

SUN Liang, JI Yanxiang, SONG Xin, YANG Min

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] TR tomographic scanning can detect large-scale components beyond the beam range, and has important applications in the field of ICT. One of the current reconstruction methods is to directly rebinding TR scan sinogram into standard parallel-beam sinogram without considering the influence of sector angle, and then reconstruct them using parallel-beam reconstruction method, which results in some errors in the reconstructed images. In this paper, a new rebinding algorithm is proposed. Through the coordinate transformation and interpolation calculation, the coordinates and gray scale information of the corresponding mapping points of the sampling points in the parallel sinogram are obtained in the TR scan sinogram. In this way, a complete parallel beam sinogram is obtained. Through simulations and experiments, it is found that the edge smoothness and artifacts are eliminated in both the sinogram and the reconstructed image obtained by the improved algorithm. The new rebinding algorithm can eliminate the errors of the existing rebinding algorithm. The TR scanning method can also achieve correct CT reconstruction when the fan beam angle is large.

Keywords: TR tomographic scanning; Sinogram; Rebinding projections; Coordinate transformation; CT reconstruction

(责编 铃兰)

(上接第66页)

Rapid Ultrasonic Inspection Technology for Complex-Shaped Composite Components

YU Xudong

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Complex-shaped composite components have been extensively utilized in the aerospace industry. This paper investigates the feasibility of using ultrasonic feature guided waves (FGW) for rapid screening of two representative long-range composite structures, i.e. laminated bends and adhesive composite joints. Such FGWs are capable of focusing the propagation energy along the structural feature, with limited leakage into the adjacent plate. They also exhibit little-dispersive and low-attenuative characteristics. Modal studies of the anisotropic viscoelastic waveguide were carried out via the semi-analytical finite element (SAFE) method to reveal the existing FGW modes. Both 3D finite element (FE) simulations and experiments were performed to cross-validate the modal properties of identified FGW modes and to study their interaction with different defects occurring in the structural feature, such as interlaminar delamination, cracks, and adhesive debonding. The wave-defect resonance phenomenon and the reflection behaviour were investigated for localizing these defects. The potential of proposed FGW-based approach for efficient damage detection in complex-shaped composite components is well demonstrated.

Keywords: Composites; Complex shapes; Nondestructive testing (NDT); Ultrasonic guided waves; Energy concentration

(责编 铃兰)