

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407992

# 蜂窝夹层复材板超声兰姆波成像检测技术\*

李佳<sup>1</sup> 卢今<sup>2,3</sup> 陈振华<sup>3</sup> 李泽<sup>1</sup> 卢超<sup>3</sup>

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司 上海 201306; 2. 中车制动系统有限公司 青岛 266031;

3. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

**摘要:** 飞机蜂窝夹层复合材料板具有结构复杂、尺寸大、缺陷类型多的特点,常规超声无损检测技术存在效率低、精度差的问题。提出蜂窝夹层复材板的非线性超声兰姆波成像检测技术,将兰姆波大范围传播及缺陷的非线性响应敏感性强的优势相结合以提高蜂窝夹层复材板粘接缺陷的无损检测能力。首先,分析板中兰姆波传播特性,基于波传播的各向异性特征设计探头布置方法并定义缺陷因子;其次,设计和优化成像算法以提高蜂窝夹层复材板内部缺陷的非线性兰姆波成像效果;最后,参照空耦C扫描及金相观察分析非线性兰姆波检测图像对板中缺陷的显示能力。研究表明,非线性超声兰姆波检测图像与空气耦合超声C扫描图像相比具有较差的分辨率,无法显示蜂窝细节,但能够显示蜂窝夹层复材板的脱粘和弱粘接缺陷区域,并兼顾高效率的优势,其同侧收发探头布置方式提高了对检测环境的适应性,可用于在役蜂窝夹层复材板粘接缺陷的无损检测。

**关键词:** 非线性超声检测;兰姆波;蜂窝夹层复合材料板;成像算法;缺陷因子

**中图分类号:** TG115.28; TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

## Study on ultrasonic lamb wave imaging testing technology for honeycomb sandwich composite panels

Li Jia<sup>1</sup> Lu Jin<sup>2,3</sup> Chen Zhenhua<sup>3</sup> Li Ze<sup>1</sup> Lu Chao<sup>3</sup>

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

2. CRRC Braking System Co., Ltd., Qingdao 266031, China;

3. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Aircraft honeycomb sandwich composite panel has the characteristics of complex structure, large size and many types of defects, and the conventional ultrasonic nondestructive testing technology has the problems of low efficiency and poor accuracy. In the study, nonlinear ultrasonic Lamb wave imaging technology for honeycomb sandwich composites is proposed, which combines the advantages of large range propagation of Lamb waves and strong sensitivity of nonlinear response of defects to improve the non-destructive testing ability of honeycomb sandwich composites. Firstly, the propagation characteristics of Lamb waves in the panel are analyzed, and the probe arrangement method is designed and the defect factor is defined based on the anisotropic characteristics of wave propagation. Secondly, the imaging algorithm is designed and optimized to improve the nonlinear Lamb wave imaging effect of the defects in the honeycomb sandwich composite panel. Finally, the ability of nonlinear Lamb wave detection image to display the defects in the panel is analyzed by referring to the air-coupled C-scan and metallographic observation. The results indicate that the nonlinear ultrasonic Lamb wave image has poor resolution compared with the air-coupled ultrasonic C-scan image, which cannot show the honeycomb details. Nevertheless, the debonding and weak bonding defect areas of honeycomb sandwich composite panel can be displayed by the nonlinear ultrasonic Lamb wave testing, and it also possesses the advantages of high efficiency and same-side transceiver probe arrangement which improves the adaptability to the detection environment. Thus, it can be used for the non-destructive detection of bonding defects of honeycomb sandwich composite panels in service.

**Keywords:** non-linear ultrasonic; lamb wave; honeycomb sandwich composite panels; imaging algorithm; defect factor

收稿日期:2024-11-28 Received Date: 2024-11-28

\* 基金项目:国家自然科学基金(12464059)、江西省重点研发项目(20212BBE51006)资助

## 0 引言

蜂窝夹层复合材料板通常由复合材料或金属制造的上下蒙皮和中间轻质蜂窝芯粘接固化而成;芳纶纸蜂窝具有质量轻、耐腐蚀性、阻燃性、透波性能好的优势,已成为飞机复合材料夹层结构中的首选芯材<sup>[1-3]</sup>。由于其制造工艺和材料结构的复杂性,制造过程可能出现脱粘、裂纹等缺陷<sup>[4-5]</sup>。蒙皮与蜂窝芯层间的脱粘损伤是最常见和危害最严重的缺陷,会使航空装备的服役寿命和承载能力显著下降。超声波具有传播距离远、穿透力强、无污染以及使用便捷等优点,常用的复合材料超声检测方法有高频脉冲反射法、低频脉冲穿透法、超声兰姆波法等<sup>[6-8]</sup>。Wang 等<sup>[9]</sup>指出了复合材料无损检测技术向具有高精度和高效数据处理能力的智能和自动化检测系统方向发展。刘增华等<sup>[10]</sup>提出考虑碳纤维复合材料板各向异性的改进型密集传感器阵列板结构缺陷定位算法,利用虚拟聚焦原理对板结构进行全聚焦成像,对复合材料板损伤的定位精度达到 1 mm。高频脉冲反射法通常只能对复合材料薄板的粘结质量进行检测,检测精度较高但效率较低;低频超声空气耦合穿透法可进行非接触式检测,能避免因耦合剂污染,可获得板结构的 C 扫描图像,但同样无法解决检测效率低的问题<sup>[11]</sup>。超声兰姆波具有大范围检测、效率高的优势;但受夹层复材板中复杂兰姆波模态结构的影响,常规兰姆波检测技术容易出现误判、漏检、精度差的问题<sup>[12-14]</sup>。非线性超声检测技术利用超声波在结构中传播时表现出来的非线性特征来检测损伤,对于接触型透声强的缺陷更为敏感<sup>[15-16]</sup>。然而,由于蜂窝结构中超声传播的复杂性和非线性信号易干扰,基于非线性超声兰姆波的脱粘检测存在检测信号复杂、可靠性差的问题。本文将超声波的非线性传播特征应用于蜂窝夹层复合材料的兰姆波无损检测兼顾高效率和高精度优势,有望用于大型航空蜂窝夹层复材结构的无损检测中。

分析蜂窝夹层复材板中兰姆波传播的各向异性特征及其模态结构,确定检测换能器布置方式,并基于非线性累积效应选取特定模态兰姆波开展非线性超声检测;提出兰姆波成像方法及其改进算法,将非线性超声兰姆波成像结果与空气耦合超声检测结果、金相分析结果对比分析。研究表明,非线性兰姆波成像方法能够检测蜂窝夹层复材板的脱粘缺陷,兼顾了非线性超声的高灵敏度及兰姆波大范围传播的高效率优势,对于提高复材板脱粘缺陷的检测能力及检测效率,保障构件的安全运行具有重要的工程应用价值。

## 1 检测试样与试验方法

### 1.1 检测试样

检测试样为尺寸 300 mm×300 mm×6 mm 的蜂窝夹层复合材料板,由 2 mm 厚的上、下蒙皮和 2 mm 厚的芳纶纸蜂窝芯层粘接而成,如图 1(a) 所示。蒙皮为 T300 级碳纤维复合材料层合板,单层碳纤维布厚度为 0.2 mm,单一方向铺层,共 10 层,碳纤维复合材料性能参数如表 1 所示。其中, $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  为材料弹性模量、 $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$  为材料剪切模量、 $\nu_{12}$ 、 $\nu_{13}$ 、 $\nu_{23}$  为材料泊松比、 $\rho$  为材料密度;蜂窝芯层为间位芳纶纸蜂窝,由紧密相接的壁厚 0.2 mm、孔径 1.8 mm 的正六边形蜂窝孔格组成。待测试样如图 1(b) 所示,设试样纬线编织方向( $0^\circ$ )方向为  $x$  方向、与纬线垂直的经线编织( $90^\circ$ )方向为  $y$  方向、板厚方向为  $z$  方向。

表 1 单层碳纤维复合材料参数

Table 1 Parameters of single-layer carbon fiber composites

$E_1/$	$E_2/$	$E_3/$	$G_{12}/$	$G_{13}/$	$G_{23}/$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$\rho/$
GP	GP	GP	GP	GP	GP				( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
25	13.6	13.6	3	3.5	3.5	0.3	0.3	0.3	1.76

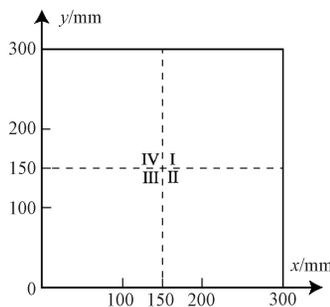
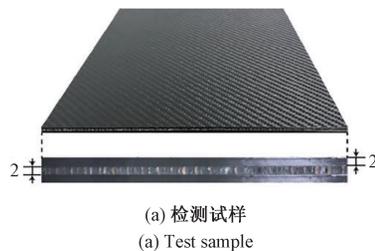


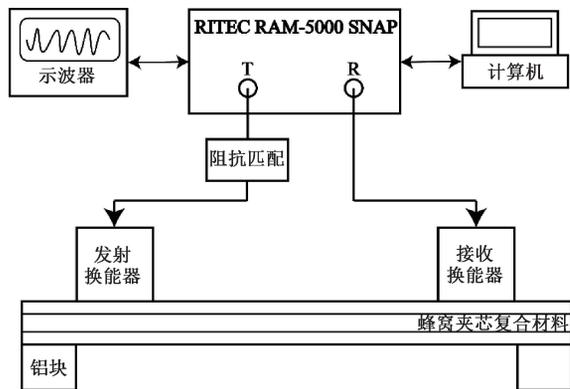
图 1 蜂窝夹层复合材料板试样

Fig. 1 Honeycomb sandwich composite panel sample

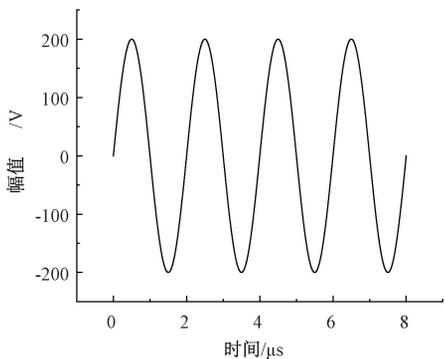
### 1.2 非线性超声兰姆波检测方法

以高功率脉冲发生接收仪为核心搭建非线性超声兰姆波检测系统,发射换能器和接收换能器的中心频率分别为 0.5 和 1.0 MHz。高功率脉冲发射接收仪产生多周期正弦激励信号经 50  $\Omega$  阻抗匹配后输出至发射换能器,

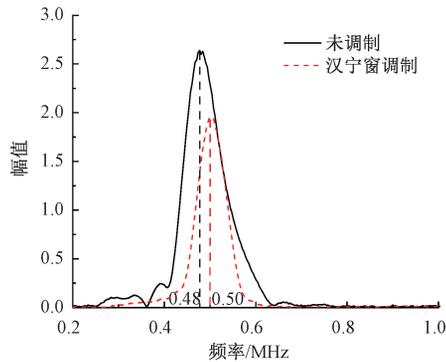
发射换能器受电信号激励后发射超声波在蜂窝夹层复材板中形成兰姆波传播,并由接收换能器接收;蜂窝板检测试样的四角均采用铝块垫高以防止板材与工作台直接接触,避免板中兰姆波通过工作台泄露,如图 2(a)所示。检测试验采用经汉宁窗调制的 200 V 振幅、0.5 MHz 频率、四周期的正弦脉冲激励信号,如图 2(b)所示。经汉宁窗调制前的激励信号峰值频率边缘存在较多旁瓣,且中心频率有一定偏离、对称性差;经过加窗调制后,频谱分布的对称性明显改善,旁瓣干扰也得到了有效抑制,有利于非线性超声频谱分析与特征提取,如图 2(c)所示。



(a) 检测系统框图  
(a) Inspection system diagram



(b) 四周期激励信号  
(b) Four cycle excitation signal

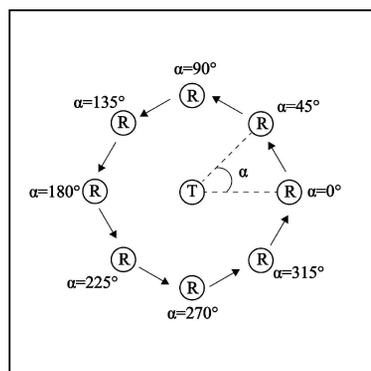


(c) 未调制与调制信号  
(c) Unmodulated and modulated signals

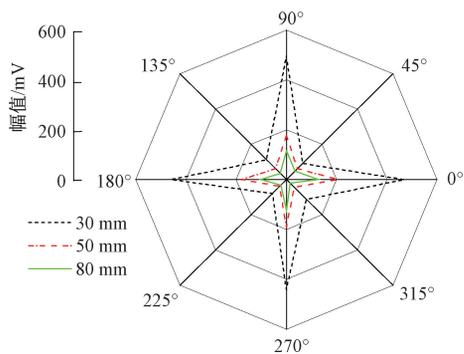
图 2 激励信号频谱图

Fig. 2 Excitation signal spectrum diagram

通过试验方法分析蜂窝夹层复材板的兰姆波声学各向异性特征以确定探头布置方法。发射和接收换能器的中心频率均为 0.5 MHz,接收换能器在以发射换能器为圆心、半径分别为 30、50 和 80 mm 圆弧上每隔 45°接收兰姆波信号,定义任意一个与纤维丝平行方向(纬向)为 0°方向、与此纤维丝垂直的方向(径向)为 90°方向,如图 3(a)所示。各圆弧上接收信号幅值随方向的变化如图 3(b)所示,复材板中兰姆波呈现明显的与复材板蒙皮结构相关的各向异性特征,接收信号幅值在 0°、90°、180°和 270°方向最大,在 45°、135°、225°和 315°方向上最小。因此,为了保证能够以较高能量高效接收板中检测信号,应沿 0°或 90°方向布置换能器,即:应沿着复材板纬向或经向布置换能器才可高效接收到超声兰姆波。



(a) 测试方法  
(a) Test method



(b) 测试结果  
(b) Test result

图 3 各向异性特征测试方法及测试结果

Fig. 3 Anisotropy characteristic test method and test result

### 1.3 兰姆波模态分析

改变换能器间距  $\Delta S$ ,跟踪记录波包波峰对应时间随换能器间距的变化  $\Delta T$ ,则该波包群速度可表示为<sup>[17-18]</sup>:

$$C_g = \Delta S / \Delta T \tag{1}$$

在换能器中心距(收发探头声束入射点间距) 80 mm 范围内,接收到的兰姆波检测信号主要由 3 个波包组成,分别标示为波包 1、2、3;其中,波包 2 的幅度最高,其它波

包相对较弱,如图 4(a)所示。每隔  $\Delta S = 10 \text{ mm}$  采集检测信号,并记录波包 2 峰值达到时间分别为 25.68、27.20、28.72、30.20、31.76 和 33.28  $\mu\text{s}$ ,据式(1)可测量波包 2 群速度分别为 658、658、679、641、658  $\text{m/s}$ ,则波包 2 平均群速度为 658.8  $\text{m/s}$ 。将其与理论群速度频散曲线(图 4(b))对照分析可知,波包 2(0.5 MHz, 658.8  $\text{m/s}$  群速度)为 A0 模态兰姆波,且 A0 模态兰姆波与其他模态(A0、S0、A1 模态)相比具有最小的频散特性,因此重点讨论 A0 模态(波包 2)的非线性响应特性。分别计算 A0 模态在各接收位置的相对非线性系数  $\beta'$ ,其在换能器间距 80 ~ 130 mm 内随着传播距离的增加而增加,如图 4(c)所示。据此可知,A0 模态具有明显的非线性累积效应<sup>[19-21]</sup>。考虑到换能器间距为 130 mm 时接收波幅较弱,为了兼顾检测信号抗干扰能力和较大的检测范围,将换能器中心距设置为 120 mm。综上,在  $0^\circ$ (纬向)方向和  $90^\circ$ (经向)方向可在蜂窝夹层复材板中激发 A0 模态兰姆波,该模态兰姆波频散小,符合非线性超声检测群速度匹配、非线性系数累积的要求,可用于非线性超声兰姆波检测。

## 2 兰姆波成像检测

### 2.1 检测方法及其改进算法

将蜂窝夹层复材板均分为四个检测区域,按顺时针方向定义为区域 I ~ IV,如图 1(b)所示。换能器分别沿经向和纬向布置,中心间距 120 mm。保持换能器间距不变,沿经向布置的换能器沿纬向扫描,每隔 2 mm 采集一个检测信号  $H(i)$ ;沿纬向布置的换能器沿经向扫描,每隔 2 mm 采集一个检测信号  $S(j)$ ,如图 5 所示。则定义  $i, j$  路径相交处的损伤因子  $P(i, j)$  为:

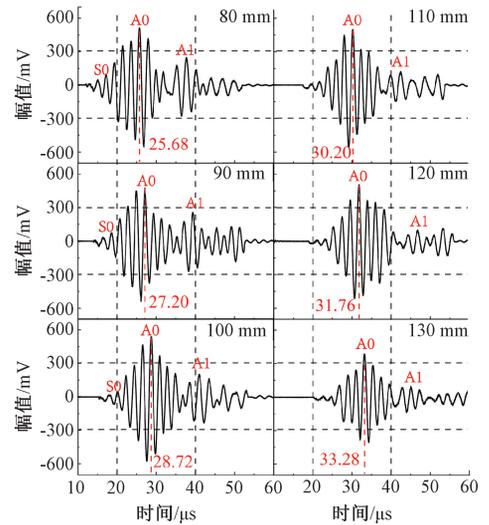
$$P(i, j) = H(i) \cdot S(j) \quad (2)$$

式中: $i, j$  均为整数; $P(i, j)$  的二维空间分布即为基于 A0 模态兰姆波的损伤因子分布。

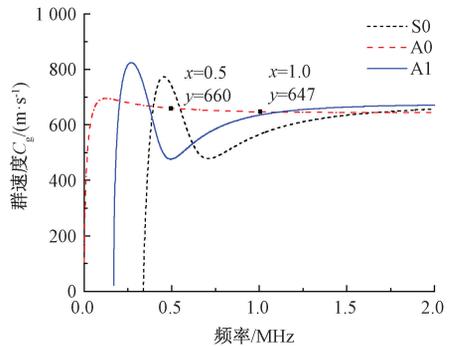
### 2.2 兰姆波检测特征图像分析

兰姆波在蜂窝夹层板中传播时除了在复材板中传播外还会泄漏到蜂窝芯中,形成漏兰姆波传播。若蒙皮与蜂窝粘接良好,漏兰姆波能量增强、换能器接收的兰姆波能量减小;反之,泄露到蜂窝中的漏兰姆波降低,换能器接收到的兰姆波能量增大,如图 6 所示。因此,当复材中出现脱粘时,在蒙皮中传播的兰姆波能量更高,即基波幅度更高。此外复材板的固有非线性使二次谐波幅度随基波幅度的增大而增大,但由于此时蒙皮与蜂窝界面处缺失(脱粘),导致复材板与蜂窝界面处产生的兰姆波非线性响应下降,即材料的相对非线性系数降低。

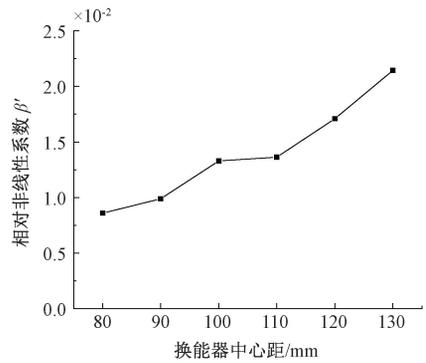
特征参数分别采用线性超声兰姆波幅度、二次谐波



(a) 各间距(80~130 mm)检测信号  
(a) Each interval (80~130 mm) inspect signals



(b) 群速度频散曲线  
(b) Group velocity dispersion curve



(c) 非线性累积  
(c) Nonlinear accumulation

图 4 模态分析

Fig. 4 Modal analysis

幅度及二阶相对非线性系数,通过式(2)计算损伤因子。由于基于三种特征参数计算的损伤因子值各不相同,为了能够对比 3 种损伤因子,对这 3 种损伤因子进行归一化处理。归一化后的损伤因子  $\bar{D}$  表示为:

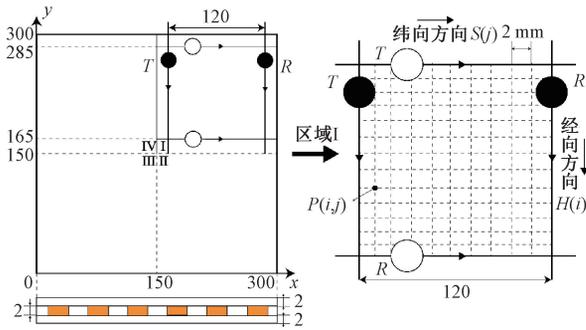


图5 扫描成像方法

Fig. 5 Scanning imaging method

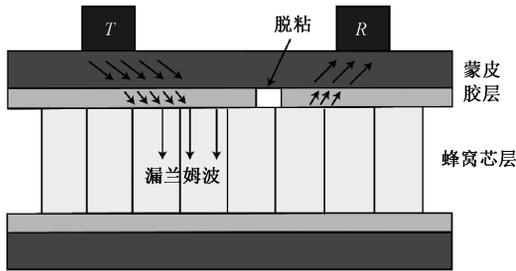


图6 漏兰姆波示意图

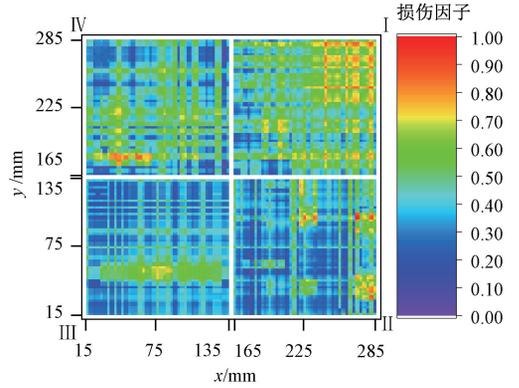
Fig. 6 Leakage lamb wave diagram

$$\bar{D} = \frac{\frac{D}{D_{\max}} - \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)_{\min}}{\left[\frac{D}{D_{\max}} - \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)_{\min}\right]_{\max}} \quad (3)$$

式中： $D_{\max}$  为检测区域内损伤因子最大值，下标 min 表示最小值。

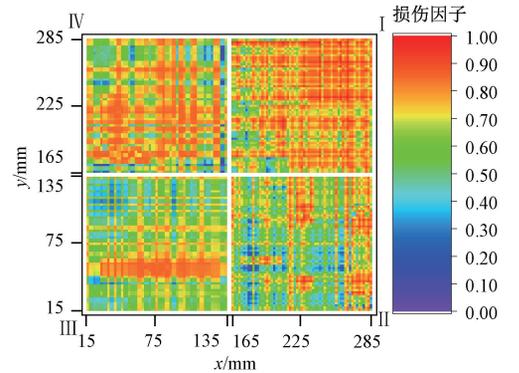
基于3种特征参数定义的归一化损伤因子成像如图7所示。图7(a)为基于基波幅度(线性特征)定义的归一化损伤因子成像图,粘接不良使兰姆波很难泄露到蜂窝中,使得基波幅度显著增大,粘接不良区域显示为红色和黄色区域( $1 \geq \bar{D} \geq 0.7$ );图7(b)为基于二次谐波幅度定义的归一化损伤因子检测成像,粘接不良区域的兰姆波难以泄露大蜂窝中,使得复材板中兰姆波能力增大、进而二次谐波幅度增大,粘接不良区域显示为红色和黄色区域( $1 \geq \bar{D} \geq 0.7$ );图7(c)为基于相对非线性系数定义的归一化损伤因子图像,尽管基波幅度增大使复材板中二次谐波幅度增大,但由于脱粘导致蜂窝与纤维板间的粘接界面消失,导致粘接不良区域的非线性响应总体变弱,相对非线性系数下降,粘接不良区域显示为红色和黄色区域( $0 \geq \bar{D} \geq 0.3$ )。由于相对非线性系数由基波和二次谐波共同决定,且表示的是材料非线性响应程度,因此采用相对非线性系数表示粘接状态能够在保证较高灵敏度的同时具有较好的可靠性。

非线性超声检测的检测灵敏度很高,能够发现微小



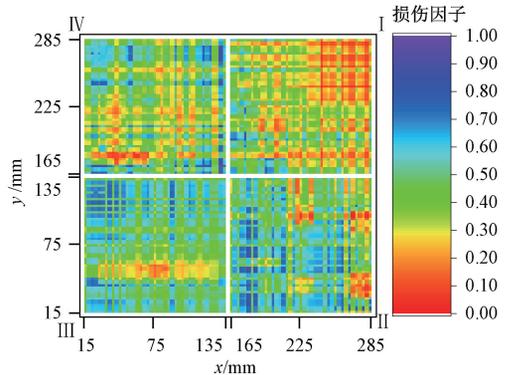
(a) 基波幅度成像

(a) Fundamental wave amplitude imaging



(b) 谐波幅度成像

(b) Harmonic wave amplitude imaging



(c) 非线性系数成像

(c) Nonlinear coefficient imaging

图7 兰姆波成像

Fig. 7 Lamb wave imaging

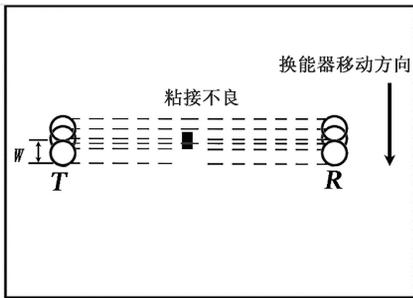
的脱粘缺陷。然而,高的检测灵敏度导致检测数据极易受环境影响产生波动、检测结果不稳定。由于板中声传播的各向异性特征,兰姆波会在经向和纬向的探头连线附近( $w$ 宽度)形成较高的超声兰姆波能量,在该区域内均能接收到脱粘的非线性响应信号。为增强缺陷的成像显示及降低检测结果波动,提出损伤因子的综合评估方法,即:将换能器连线附近 $w$ 宽度范围内的多个损伤因子指向同一缺陷,如图8(a)所示。设 $w$ 宽度范围内有 $2n$

个损伤因子,则将  $2n$  个损伤因子的均值作为综合损伤因子  $\bar{P}(i, j)$  表示为:

$$\bar{P}(i, j) = \frac{\sum_{m=-n}^n P(i+m, j+m)}{2n} \quad (4)$$

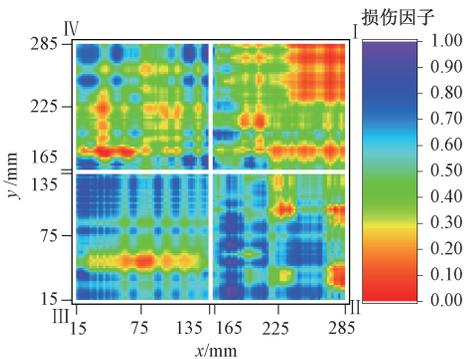
式中:  $P(i, j)$  为第  $i$  行、第  $j$  列相交处损伤因子;  $n$  为整数。

$n$  取 3, 即换能器在其纬向或径向连线的 12 mm 范围内能够采集到同一缺陷的非线性响应信号; 经过综合评估算法处理后的检测图像显示该算法平滑了图像边缘, 增强脱粘区域显示, 降低了检测结果的波动性, 如图 8(b) 所示。



(a) 综合评估算法示意图

(a) Comprehensive evaluation algorithm diagram



(b) 综合损伤因子成像图

(b) Comprehensive damage factor imaging

图 8 Lamb 波传播示意图

Fig. 8 Lamb wave propagation diagram

### 3 对比试验分析

为对比分析兰姆波检测结果的可靠性, 采用空气耦合超声透射法对蜂窝夹层复合材料板进行 C 扫描成像检测。检测系统结构及探头布置方法如图 9 所示, 收发换能器的中心频率均为 400 kHz, 晶片直径  $\varphi=20$  mm、标称焦距为 40 mm, 调整换能器距试样间距离  $h=40$  mm, 使焦点位于蜂窝夹层复合材料板中间, C 扫描步进为 0.5 mm。

图 10(a) 所示为蜂窝夹层板的空耦合超声 C 扫描图像, 分为 3 种图像特征区域。区域 A 为清晰的蜂窝显示,

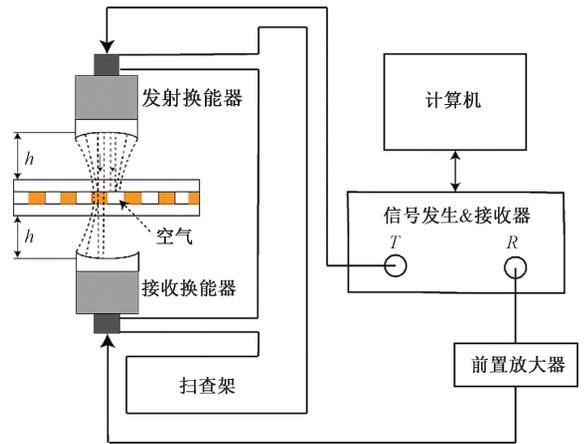
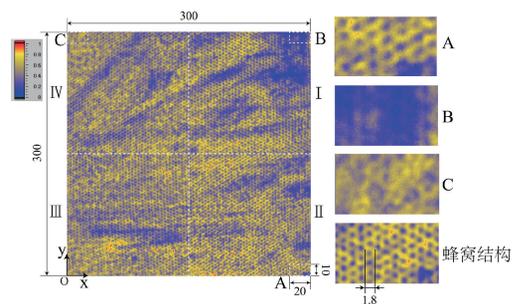


图 9 空气耦合超声检测

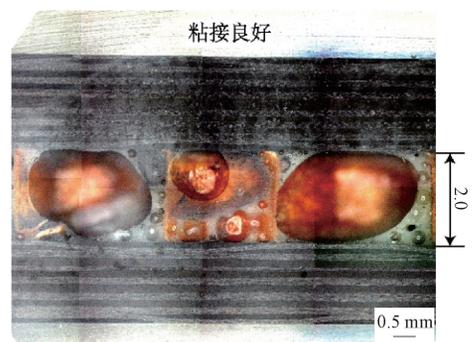
Fig. 9 Air coupled ultrasonic inspection

区域 B 显示为蓝色无蜂窝显示, 区域 C 为模糊的黄色显示、蜂窝并不清晰。将区域 A~C 取样, 并切割制样观察其截面结构如图 10(b)~(d) 所示。区域 A 截面粘结完好, 超声波能够通过蜂窝壁透射至接收探头; 区域 B 截面观察到明显脱粘, 超声波无法通过蜂窝透射至接收探头, 接收探头能量很低显示为蓝色; 区域 C 蜂窝芯从正常状态的 2 mm 压缩至 1.5 mm, 超声波能够通过蜂窝透射至接收探头且能量最高, 但无法显示清晰的蜂窝结构。即空耦 C 扫描图中, 特征图像区域 A 为完好蜂窝结构、区域 B 为脱粘结构、区域 C 为蜂窝芯压缩区域。



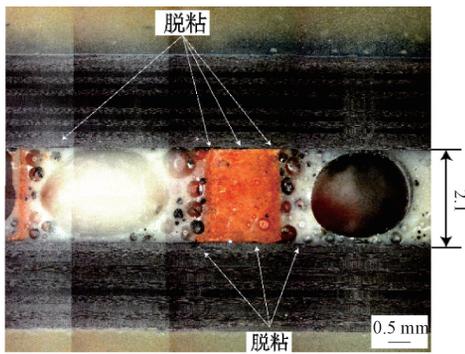
(a) 蜂窝夹层复合材料板空气耦合 C 扫描图

(a) Air-coupled C-scan of honeycomb sandwich composite panel



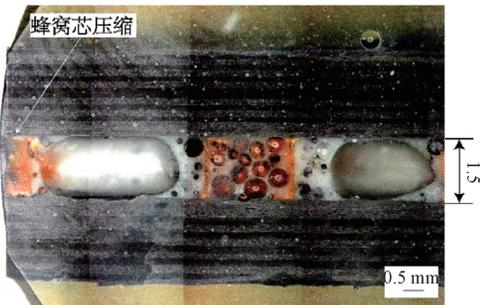
(b) A 区金相

(b) Zone A metallographic



(c) B区金相

(c) Zone B metallographic



(d) C区金相

(d) Zone C metallographic

图 10 空耦 C 扫描图像特征区域分析

Fig. 10 Feature region analysis of air-coupled C-scan image

将空气耦合超声 C 扫描图像中粘接不良显示区域(0~0.2 值)与由相对非线性定义的损伤因子的兰姆波检测图像显示的粘接不良区域(0~0.3 值)对比分析,如图 11 所示。基于非线性兰姆波损伤因子统计的脱粘面积接近于空气耦合超声 C 扫描成像统计的面积,非线性超声兰姆波检测图像可有效检测脱粘缺陷。但空气耦合超声 C 扫描检测图像与非线性兰姆波检测图像相比具有更好的图像分辨率,空气耦合超声 C 扫描检测图像更为准确,如图 11 所示,空气耦合超声与非线性兰姆波检测在脱粘面积统计上仍存在一定差异,需进一步研究相关算法、研制高频传感器,从而提高非线性兰姆波成像质量。

此外,按 120 mm×120 mm 正形成像检测区域成像计算,非线性超声兰姆波检测需间隔 2 mm 采样,共在 60+60=120 个检测位置采集检测数据;而空气耦合超声如按相同步进逐点扫描,则需要 60×60=3 600 个检测位置采集检测数据,若位置变化速度相同,则空气耦合超声 C 扫描所需时间为非线性兰姆波检测时间的 30 倍。因此,非线性超声兰姆波检测图像除了具有与空耦检测图像相近的检测能力外,非线性兰姆波检测技术在检测效率和检测方法的现场(环境)适应性上具有显著优势,更适用于大型机体结构的现场检测。

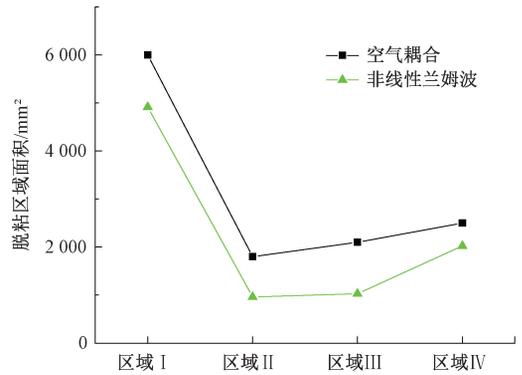


图 11 对比分析

Fig. 11 Comparative analysis

## 4 结 论

本文对蜂窝夹层复合材料的非线性兰姆波检测方法、特征提取和缺陷成像开展了相关研究工作,实现了夹层复合材料脱粘缺陷的快速非线性兰姆波成像检测。蜂窝夹层板中的兰姆波传播具有明显的各向异性特征,沿复材板织构经向和纬向传播的 A0 模态兰姆波具有最高幅度、最小的频散且具有非线性累积效应,可用于非线性兰姆波检测;基于相对非线性系数定义归一化损伤因子,结合综合损伤因子计算方法,有效的降低了相对非线性系数的波动性、平滑了非线性超声兰姆波图像的边缘,并增强了粘结不良区域的图像显示;非线性兰姆波图像显示的脱粘缺陷面积与空耦 C 扫描图像显示的脱粘缺陷面积基本一致,非线性兰姆波成像检测技术能够用于检测蜂窝夹层复合材料板的脱粘缺陷,具有检测效率高、检测现场适应性强的优势。但非线性兰姆波检测图像的分辨率较差,后续需进一步研究相关算法、研制高频传感器,改善非线性兰姆波成像质量。

## 参考文献

- [1] 熊健,李志彬,刘惠彬,等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1629-1650.  
XIONG J, LI ZH B, LIU H B, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structures [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 38(6): 1629-1650.
- [2] 王燕,程文礼,王绍凯. 复合材料蜂窝夹层结构在民用飞机上的应用综述[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(2): 73-77.  
WANG Y, CHENG W L, WANG SH K. Application review of composite honeycomb sandwich structures in civil aircraft [J]. Fibrous Composites, 2021, 38(2):

- 73-77.
- [ 3 ] 魏贺冉, 闫联生, 孙建涛. 蜂窝夹层结构的制备与应用进展[J]. 航天制造技术, 2022 (4): 43-49.  
WEI H R, YAN L SH, SUN J T. Preparation and application progress of honeycomb sandwich structure[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022 (4): 43-49.
- [ 4 ] 郝威, 李明, 王珏, 等. 复合材料芳纶蜂窝夹层结构件特殊缺陷检测[J]. 航空学报, 2022, 43 (7): 438-446.  
HAO W, LI M, WANG J, et al. Special defects inspection of composite aramid honeycomb sandwich structure[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 438-446.
- [ 5 ] 杨庆峰, 孙金立, 胡丑, 等. 飞机铝蜂窝复合材料的典型缺陷检测[J]. 无损检测, 2019, 41(12): 45-48.  
YANG Q F, SUN J L, HU CH, et al. Typical defect detection of aluminum honeycomb composites for aircraft[J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(12): 45-48.
- [ 6 ] 张继敏, 周晖, 刘奎. 航空复合材料多层蜂窝夹层结构的空气耦合式超声检测技术研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(9): 74-78, 99.  
ZHANG J M, ZHOU H, LIU K. Study on air-coupled ultrasonic inspection technology of multi-layer honeycomb sandwich structure of aviation composite[J]. Composite Materials Science and Engineering, 2020 (9): 74-78, 99.
- [ 7 ] LI H G, ZHOU Z G. Detection and characterization of debonding defects in aeronautical honeycomb sandwich composites using noncontact air coupled ultrasonic testing technique[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 283.
- [ 8 ] 许国琛, 陈振华, 李承庚, 等. CFRP 层板低能冲击损伤的非线性兰姆波特征成像[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 40-47.  
XU G CH, CHEN ZH H, LI CH G, et al. Nonlinear Lamb wave characteristic imaging of low-energy impact damage of CFRP laminates [J]. Acta Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 40-47.
- [ 9 ] WANG B, ZHONG S C, LEE T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(4): 1-28.
- [ 10 ] 刘增华, 王美灵, 朱艳萍, 等. 改进型密集阵列全聚焦成像算法的碳纤维复合材料板损伤定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 120-132.  
LIU Z H, WANG M L, ZHU Y P, et al. Research on damage localization of carbon fiber composite plates based on improved dense array total focusing imaging algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45 (6): 120-132.
- [ 11 ] 常俊杰, 李媛媛. 蜂窝结构复合材料的空气耦合 Lamb 波检测技术 [J]. 复合材料科学与工程, 2020(2): 62-68.  
CHANG J J, LI Y Y. Air-coupled lamb wave detection technique for honeycomb structure composites [J]. Composite Materials Science and Engineering, 2020(2): 62-68.
- [ 12 ] FIESLER SAXENA I, GUZMAN N, HUI K, et al. Disbond detection in a composite honeycomb structure of an aircraft vertical stabilizer by fiber Bragg gratings detecting guided ultrasound waves [J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(16): 3001-3010.
- [ 13 ] 周正干, 孙广开, 李洋. 先进无损检测技术在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 航天制造技术, 2016(4): 8. 30-35.  
ZHOU ZH G, SUN G K, LI Y. Application of advanced Nondestructive testing technology in Defect detection of composite materials [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(4): 8. 30-35.
- [ 14 ] 陈晓, 戴杰. 基于相同传播距离路径的兰姆波无基准损伤概率成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 94-104.  
CHEN X, DAI J. Lamb wave baseline-free damage probability imaging based on same propagation distance path [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 94-104.
- [ 15 ] 苑博. 基于声波非线性的材料损伤超声无损评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
YUAN B, Ultrasonic nondestructive evaluation of material damage based on acoustic nonlinearity [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [ 16 ] ZHU W J, XIANG Y X, LIU C J, et al. A feasibility study on fatigue damage evaluation using nonlinear Lamb waves with group-velocity mismatching[J]. Ultrasonics, 2018, 90: 18-22.
- [ 17 ] 李晓阳. 基于非线性导波的粘接结构损伤超声无损评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.  
LI X Y. Ultrasonic nondestructive evaluation of adhesive structure damage based on nonlinear guided wave [D].

Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

- [18] 李剑, 刘松平. 铝板中 Lamb 波模式识别方法[J]. 无损检测, 2008, 30(12): 872-876.  
LI J, LIU S P. Lamb wave pattern recognition method in aluminum plate [J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(12): 872-876.
- [19] 刘瑶璐, 胡宁, 邓明晰, 等. 板壳结构中的非线性兰姆波[J]. 力学进展, 2017, 47(1): 503-533.  
LIU Y L, HU N, DENG M X, et al. Nonlinear Lamb waves in plate-shell structures [J]. Progress in Mechanics, 2017, 47(1): 503-533.
- [20] COURTNEY C R P, DRINKWATER B W, NEILD S A, et al. Factors affecting the ultrasonic intermodulation crack detection technique using bispectral analysis [J]. Ndt & E International, 2008, 41(3): 223-234.
- [21] 何龙龙. 金属基复合材料粘接强度的电磁超声非线性检测[D]. 天津:河北工业大学, 2020.  
HE L L. Electromagnetic ultrasonic nonlinear detection of bonding strength of Metal matrix composites [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.

## 作者简介



**李佳**, 2013 年于南昌航空大学获得硕士学位, 现为中国航发商用航空发动机有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为航空发动机零部件的无损检测。

E-mail: lijia@126.com

**Li Jia** received her M. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2013. She is now a senior engineer in AECC Commercial Aircraft Engine Co., LTD. Her main research interests include non-destructive testing of aero engine parts and components.



**陈振华**(通信作者), 2010 年于北京工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向: 先进超声波无损检测技术及其系统。

E-mail: zhenhuachen@yeah.net

**Chen Zhenhua** (Corresponding author) received his Ph. D. from Beijing University of Technology in 2010. He is now a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include advanced ultrasonic nondestructive testing technology and systems.