

铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法研究

谈宝林, 祝太福, 黄卫超, 陆富斌

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

摘要: CFRP 材料因其轻质、高强和可加工性等优点, 在航空航天领域得到了广泛应用; 由于铝蜂窝填充 CFRP 结构表面具有一定的复杂性, 在提取表面响应信号和表面图像的综合特征中存在技术难点; 为了更准确地评估 CFRP 结构的健康状况, 研究铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法; 根据使用红外激光设备的改装情况, 设定设备的工作参数, 划分铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤类型, 设定不同损伤类型表面的标准特征, 作为损伤检测标准; 利用红外激光技术分别获取 CFRP 结构的响应信号和表面图像, 提取信号和图像特征, 采用特征匹配的方式检测 CFRP 结构损伤类型, 得出表面损伤深度、面积、位置等参数的检测结果; 通过性能测试实验得出结论: 优化设计方法的表面损伤类型误检系数明显降低, 损伤面积和损伤深度的检测误差最低, 分别为 0.19 mm^2 和 0.06 mm , 具有良好的检测能力。

关键词: 铝蜂窝填充; CFRP 结构; 红外激光检测; 表面损伤; 响应信号

Research on Infrared Laser Surface Damage Detection Method for Aluminum Honeycomb Filled CFRP Structures

TAN Baolin, ZHU Taifu, HUANG Weichao, LU Fubin

(Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., AVIC, Xi'an 710089, China)

Abstract: Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) materials have the advantages of lightweight, high strength, and processing ability, which are widely used in the aerospace industry. Due to the complexity of aluminum honeycomb filled CFRP structural surface, It is difficult to extract the comprehensive features of surface response signals and surface images. In order to more accurately evaluate the health status of CFRP structures, an infrared laser surface damage detection method for aluminum honeycomb filled CFRP structures is studied. Based on the modification of infrared laser equipment, set the working parameters of the equipment, classify the types of infrared laser surface damage on aluminum honeycomb filled CFRP structures, and set standard features for different types of damage surfaces as damage detection standard. An infrared laser technology is used to obtain the response signals and surface images of CFRP structures, and extract signal and image features. Using feature matching to detect damage types of CFRP structures, thus obtaining detection results for parameters such as surface damage depth, area, and location. Through performance testing experiments, the results show that the optimized design method significantly reduces the coefficient of surface damage type false detection, with the lowest detection errors of 0.19 mm^2 and 0.06 mm in the damage area and depth, respectively, demonstrating a good detection capability.

Keywords: aluminum honeycomb filling; CFRP structure; infrared laser detection; surface damage; response signal

0 引言

铝蜂窝填充碳纤维增强复合材料 (CFRP, carbon fibre-reinforced polymer) 结构是一种先进的复合材料结

构, 它结合了铝蜂窝芯的高强度、轻质和 CFRP 的优异性能, 能够有效地支撑和增强 CFRP 结构。CFRP 作为一种高性能的增强材料, 以其高强度、高模量、低密度以及良好的导电性、导热性和耐腐蚀性等特点而著称。

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-08-14。

作者简介: 谈宝林 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 谈宝林, 祝太福, 黄卫超, 等. 铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 1-7, 36.

在铝蜂窝填充 CFRP 结构中, CFRP 作为外层材料, 通过特定的工艺与铝蜂窝芯紧密结合, 形成一个整体结构^[1]。受到机械冲击、环境因素、化学腐蚀、疲劳载荷等影响, 导致铝蜂窝填充 CFRP 结构表面出现不同程度、不同类型的损伤, 进而对结构整体性能产生负面影响。为了及时监测铝蜂窝填充 CFRP 结构表面的损伤检测, 及时对表面损伤进行处理, 将损伤带来的负面影响降至最低, 提出铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤检测方法。

文献 [1] 运用双线性插值技术和低照度增强算法对获取的偏振图像进行预处理, 提取偏振图像中像素的颜色特征和灰度共生矩阵特征, 这些特征被分别用于训练两个独立的最小二乘支持向量机分类模型。经过深入的理论探讨和实验模拟验证, 最终通过串联这两个分类模型, 实现了对表面机械损伤的早期精准检测。上述方法仅能对机械类型的损伤进行检测, 将其应用到铝蜂窝填充 CFRP 结构中, 无法实现对其他类型的损伤进行检测, 因此无法保证检测性能。文献 [2] 根据样本图像中滚子外圆角的分布特征, 精确地裁剪出样本的核心检测区域, 通过聚类预选框和损伤评估函数, 从数据集的负样本中精心筛选出尺寸和纵横比都符合要求的关键损伤区域, 完成表面损伤检测工作。上述方法以轴承鼓形滚子作为检测对象, 将其应用 CFRP 结构的损伤检测工作中, 无法保证性能检测精度。文献 [3] 结合 Rayleigh 波和 MASW 技术, 构建了钢-混凝土组合板的有限元模型, 通过施加正弦激励信号来激发 Rayleigh 波, 分析其波速衰减的特性, 针对波速衰减的 MASW 损伤识别算法, 准确地得出损伤检测结果。上述方法针对的是表面剥离类型的损伤进行检测识别, 无法保证检测结果的完整度。文献 [4] 通过对超声能量信号的分析, 得出损伤检测结果, 然而上述方法在运行过程中, 对超声能量信号的采集质量要求较高, 若采集的超声能量信号中存在噪声干扰, 则会影响损伤的检测精度。另外, 文献 [5] 通过数值模拟, 确定损伤深度与损伤指标的关系, 最终通过对损伤指标的求解, 得出损伤量化检测结果。上述方法能够有效地对不同深度的表面损伤进行检测, 但无法保证采集兰姆波信号质量, 因此无法保证损伤的检测性能。

上述传统损伤检测方法均存在不同程度的检测性能不佳的问题, 为此针对铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤, 引入红外激光技术, 对损伤检测方法进行优化设计。利用红外激光照射铝蜂窝填充 CFRP 结构表面, 通过检测激光与材料相互作用快速获取和处理数据, 实现实时检测。使用 NI USB-6229 BNC 数据采集卡进行线性调频调制, 并控制激光强度, 使检测结果更具客观性。采用特征匹配法将提取的特征与预设的各类

损伤标准特征进行比对, 确定损伤类型和程度, 减少人工干预, 提高检测效率。使用高通和低通滤波器对图像进行噪声过滤和平滑处理, 捕捉试件微小的表面变化, 提高检测的灵敏度, 实现红外激光表面损伤检测。

1 红外激光表面损伤检测方法设计

优化设计的铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法, 以红外激光检测方式作为技术支持, 根据铝蜂窝填充 CFRP 结构的标准特征, 设置不同类型表面损伤的检测标准。在红外激光技术的支持下, 从激光响应信号和激光图像两个方面分析铝蜂窝填充 CFRP 结构特征, 最终采用特征匹配的方式判断铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤类型, 并得出损伤深度、损伤面积等参数的检测结果。

1.1 设定红外激光设备工作参数

由于红外激光信号可能会在一定程度上对铝蜂窝填充 CFRP 结构表面产生影响, 为了能够在提供红外激光信号的同时, 最大程度地降低激光信号对检测结果产生的影响, 需要对红外激光设备进行改装调整^[2]。改装的红外激光设备由激光器、控制元件、传感单元以及保护单元等部分组成, 选择波长为 808 nm 的半导体激光器作为激励源, 808 nm 波长的激光在铝蜂窝填充 CFRP 结构中的材料组分上具有较好的吸收特性, 能够更有效地与材料相互作用, 从而提供所需的检测或加工效果。基于此, 在激光器中添加 NI USB-6229 BNC 数据采集卡, 用以产生线性调频调制信号, 并控制激光强度按调制的信号变化情况。控制单元的核心职能涵盖了激光的激励、光路偏转指导以及数据采集的指令传递等。此单元的核心构成是一枚型号为 NIPXIe-8133 的嵌入式控制器。其采样能力卓越, 每通道均可达到 2.86 MS/s 的采样率, 分辨率高达 16 位, 且输出信号幅值为 $\pm 10\text{ V}$ ^[3]。此外, 传感器方面选用了型号为 PXI5105 的声发射传感器, 能够满足长时间、连续的数据采集需求。加设的保护单元包括光学衰减器、温控元件和滤波器, 光学衰减器可以通过吸收、反射或散射部分激光能量来减少输出, 从而降低红外激光设备输出信号的能量值, 降低红外激光信号对铝蜂窝填充 CFRP 结构表面产生的影响^[4]。红外激光设备在运行过程中会产生热量, 过高的温度可能损害设备性能, 因此加设一个热敏电阻以监测和控制设备温度, 确保其在安全范围内运行。滤波器用来滤除红外激光设备输出信号中不需要的波长, 减少输出信号的能量值^[4]。为了在保证红外激光信号强度的同时, 降低红外激光信号对试件产生负面影响, 对激光器的光斑直径以及光束能量分布系数进行设定, 具体设定情况如下:

$$\begin{cases} D_0 = 2.44 \times \frac{f_0 \lambda}{D_{\text{light beam}}} (3\beta + 1) \\ W_0 = \frac{D_0 P}{\pi g r_z^2} \exp\left(-\frac{2d_c^2}{r_z^2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中: f_0 为激光器内部透镜的焦距值, λ 和 $D_{\text{light beam}}$ 分别为初始发射激光信号的波长值以及聚焦前光束直径, β 为激光振动膜的阶数, P 和 g 分别为初始发射激光信号的功率值和频率值, d_c 和 r_z 对应的是任意一点到光斑中心的距离以及为激光光束在传播轴线 z 点的光斑半径。按照上述方式完成红外激光设备内部组成结构的改装, 并对其工作参数进行初始设定。

1.2 划分铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤类型

铝蜂窝填充 CFRP 结构的基本组成如图 1 所示。

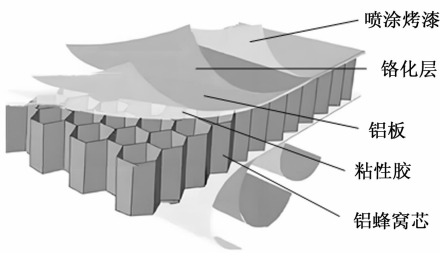


图 1 铝蜂窝填充 CFRP 结构基本组成示意图

从图 1 中可以看出, 铝蜂窝填充 CFRP 结构包括喷涂烤漆、铬化层、铝板、高分子粘性胶及铝蜂窝芯等, 喷涂烤漆是铝蜂窝填充 CFRP 结构表面的最外层, 提供了良好的外观保护和装饰效果。铬化层通常位于铝板与高分子粘性胶之间, 用于增强铝板与胶层之间的粘附力, 铝板是铝蜂窝填充 CFRP 结构的主要外部构件, 不仅提供了结构的支撑和稳定性, 还赋予了结构良好的外观质感。高分子粘性胶能够确保铝板和铝蜂窝芯之间的紧密连接, 防止空气和水分进入结构内部, 铝蜂窝芯是铝蜂窝填充 CFRP 结构的核心部分, 由多个六边形或正方形的蜂窝单元组成^[5]。铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤类型包括机械冲击损伤、机械划伤损伤、化学腐蚀损伤及疲劳载荷损伤等, 机械冲击损伤的表面特征就是冲击点周围的铝板可能出现凹陷或凸起, CFRP 层可能出现裂纹或纤维断裂, 存在机械冲击损伤铝蜂窝填充 CFRP 结构的特征可以表示为:

$$\tau_{\text{Impact}} = \log_{\chi} \frac{W_0 S}{k_{\text{material}}} \quad (2)$$

其中: E 为机械冲击面积, k_{material} 和 χ 分别为材料常数和经验指数^[6]。按照上述方式, 结合铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤的作用机理, 得出不同类型损伤结构表面的标准特征, 以此作为铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤的检测标准。

1.3 获取铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面响应信号

通过设定红外激光设备的工作参数, 可以在提供足够强度的红外激光信号以进行检测的同时, 最大程度地降低激光信号对铝蜂窝填充 CFRP 结构表面可能产生的负面影响。在此基础之上划分结构表面损伤类型, 可以对红外激光设备的工作参数进行有针对性的调整。在此基础之上, 当红外激光照射到铝蜂窝填充 CFRP 结构表面时, 材料会吸收部分激光能量并转化为热能, 无损区域的能量吸收和分布与损伤区域存在差异, 由此对铝蜂窝填充 CFRP 结构表面的红外激光响应信号进行采集, 由此来反映 CFRP 结构表面的损伤情况^[7]。红外激光响应信号的产生原理如图 2 所示。

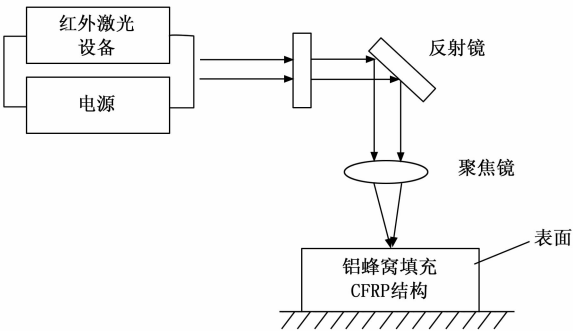


图 2 红外激光响应信号产生原理图

红外激光检测过程中, 当脉冲激光与介质材料表面相遇时, 其能量会经历两种主要转化路径: 一部分能量被介质吸收, 进而转化为热能; 另一部分则直接在介质表面发生反射。被介质吸收的能量将引起材料表面局部温度的瞬间提升, 这一温度提升会导致材料的热膨胀现象^[8]。而这种热膨胀现象, 在介质材料内部, 将产生热弹应力。在这些热弹应力的作用下, 材料表面的微小质点将发生相互的力学作用, 进而产生振动, 这些振动最终将激发出声表面波, 表面波通过反射、散射、折射等现象被红外激光接收器接收, 并记录接收激光的基本信息 and 时间信息。接收器实际接收的红外激光响应信号功率如下:

$$P_{\text{echo}} = \tau_{\text{Impact}} \frac{4P_{\text{launch}} \kappa_{\text{tran}} \mu_{\text{launch}} S_{\text{section}}}{\pi \theta^2 d_{\text{receive}}^2} \frac{\pi r_{\text{receive}}^2 \mu_{\text{receive}}}{4d_{\text{launch}}^2} \quad (3)$$

其中: P_{launch} 为激光器发射功率, μ_{receive} 和 μ_{launch} 分别为发射和接收光学设备的工作效率, d_{receive} 和 d_{launch} 分别为发射机到铝蜂窝填充 CFRP 结构目标的距离和该目标到接收机的距离, κ_{tran} 为红外激光信号在大气环境中的传输系数, r_{receive} 和 S_{section} 分别为铝蜂窝填充 CFRP 结构目标与激光器之间的距离和激光截面, θ 为红外激光信号在大气中的散射角^[9]。由此可以得出采集铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面响应信号的脉冲波形为:

$$B_{\text{receive}} = P_{\text{echo}} \times B_0 \times P_{\text{echo}} \times \kappa_{\text{space}} \quad (4)$$

式中, B_0 为红外激光器中激光发射元件输出的激光信号脉冲波形, κ_{space} 为红外激光脉冲的空间分布系数^[10]。在实际的信号获取过程中, 利用改进的红外激光设备生成激光信号并保证铝蜂窝填充 CFRP 结构表面在生成红外激光信号的传播路径上, 综合考虑红外激光信号在大气环境中的衰减情况, 得出铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面响应信号的获取结果, 以脉冲波形形式进行记录。

1.4 生成铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面图像

铝蜂窝填充 CFRP 结构表面的红外激光图像生成原理为: 红外激光束照射到目标物体上, 这些物体在受到红外辐射时会发射出相应的红外能量, 红外传感器捕捉到这些红外能量, 将捕捉到的红外能量转化为电信号。这些电信号随后被放大, 以便进一步处理和分析, 通过显示设备或记录设备输出铝蜂窝填充 CFRP 结构表面红外激光图像的生成结果^[11]。按照上述原理, 输入铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面响应信号, 将红外激光表面图像的生成结果的计算公式表示为:

$$I(n) = B_{\text{receive}} \begin{bmatrix} I_{1,1}(n) & \cdots & I_{1,y}(n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{x,1}(n) & \cdots & I_{x,y}(n) \end{bmatrix}, n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中, $I_{x,y}(n)$ 表示的是第 x 行和第 y 列铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面图像像素点的生成结果, n 为离散时间变量, N 为生成表面图像序列的总帧数。按照上述方式将生成的所有像素点按照空间关系进行连接, 得出铝蜂窝填充 CFRP 结构表面任意位置的红外激光成像结果^[12]。为保证表面图像的生成质量, 需要对初始生成图像进行预处理, 即采用高通和低通滤波器过滤初始生成激光图像中的噪声部分, 高通滤波器能够有效放大高频成分, 同时显著抑制或阻断低频成分。这种处理方式显著增强了图像中代表细节和跳变的高频部分, 因此在将频域处理结果转换回空间域时, 图像的边缘将呈现出更为陡峭的轮廓, 使图像的边缘部分更加鲜明^[13]。而低通滤波器则主要用于滤除反映细节和跳变的高频分量, 其主要作用在于消除图像中的尖峰噪声, 但可能导致图像略显模糊, 这是因为滤除了图像边缘的跳变信息。对于遭受尖峰电磁干扰或显著颗粒状干扰的图像, 优化设计方法中使用具有平滑滤波功能的低通滤波器进行平滑处理。

1.5 提取铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面特征

以初始采集的红外激光表面响应信号和表面图像作为处理对象, 提取铝蜂窝填充 CFRP 结构表面特征, 以此作为铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤的判定条件。

1.5.1 红外激光表面响应信号特征

在红外激光表面响应信号的特征提取过程中, 主要确定能够描述信号动态行为和物理特性的关键参数, 具体包括峰值幅值、波形因子、能量分布等, 红外激光表面响应信号中的峰值幅值反映了信号的最大强度, 可以找到信号中的最大值点来确定该特征参数的具体取值^[14]。峰值幅值特征分量的提取结果计算公式如下:

$$\gamma_{\text{peak value}} = [\max(|B_{\text{receive}}(t)|)]I_{x,y}(n) \quad (6)$$

其中: $\max(\cdot)$ 为最大值求解函数, $B_{\text{receive}}(t)$ 为 t 时刻采集的红外激光表面响应信号。波形因子是信号有效值与均方根值的比值, 用于描述信号的波形形状, 通过分析信号的能量谱密度, 可以了解信号能量在不同频率上的分布。上述特征分量的提取过程可以量化表示为:

$$\begin{cases} \gamma_{\text{wave form}} = \frac{\delta}{\zeta} \\ \gamma_{\text{energy}} = \lim_{t_c \rightarrow \infty} \frac{|\rho_B|^2}{t_c} \end{cases} \quad (7)$$

式中, δ 和 ζ 分别为信号的均方根值和峰值间幅度, ρ_B 和 t_c 分别为信号的能量谱密度和采样时间^[15]。按照上述方式可以得出红外激光表面响应信号所有特征分量的提取结果, 并采用加权融合的方式对提取的特征分量进行融合处理, 处理结果的计算公式如下:

$$\gamma_B = \bar{\omega}_1 \gamma_{\text{peak value}} + \bar{\omega}_2 \gamma_{\text{wave form}} + \bar{\omega}_3 \gamma_{\text{energy}} \quad (8)$$

其中: $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 和 $\bar{\omega}_3$ 分别为峰值幅值、波形因子和能量分布特征分量的融合权值, 将公式 (6) 和 (7) 的分量提取结果代入公式 (8) 中, 即可得出任意时刻铝蜂窝填充 CFRP 结构表面红外激光响应信号综合特征的提取结果。

1.5.2 红外激光表面图像特征

从边缘、形状以及颜色等方面提取红外激光表面图像特征, 边缘特征采用梯度提取的方式, 即通过计算图像中每个像素点的梯度来检测边缘, 梯度的大小和方向分别反映了边缘的强度和方向, 通过设定合适的阈值, 可以提取出图像中的边缘特征^[16]。红外激光表面图像边缘特征的提取结果的计算公式为:

$$\begin{cases} \gamma_{\text{edge-m}} = \sqrt{\frac{[I(x+1,y) - I(x,y)]^2 + [I(x,y+1) - I(x,y)]^2}{2}} \\ \gamma_{\text{edge-}\varphi} = \gamma_B \tan^{-1} \left[\frac{I(x,y+1) - I(x,y)}{I(x+1,y) - I(x,y)} \right] \end{cases} \quad (9)$$

根据轮廓检测结果, 将边缘点连接成闭合的轮廓线, 从而得出图像形状特征的提取结果。另外, 红外激光表面图像的颜色特征采用灰度直方图分析方式, 将生成的表面图像转换为灰度图像, 计算灰度直方图确定图像中每个灰度级别出现的频率, 从灰度直方图中提取关键特征, 得出图像颜色特征的提取结果^[17]。采用相同的融合方式, 得出红外激光表面图像综合特征的提取

结果。

1.6 实现红外激光表面损伤检测

采用特征匹配的方式, 判断当前铝蜂窝填充 CFRP 结构表面是否存在表面损伤, 并确定表面损伤类型。特征匹配过程可以表示为:

$$s = \gamma_{\text{edge}-\varphi} \frac{\gamma_B \cdot \gamma_0(i)}{\|\gamma_B\| \cdot \|\gamma_0(i)\|} \otimes \gamma_{\text{edge}-m} \frac{\gamma_I \cdot \gamma_0(i)}{\|\gamma_I\| \cdot \|\gamma_0(i)\|} \quad (10)$$

其中: γ_B 和 γ_I 分别为表面响应信号和表面图像综合特征的提取结果, $\gamma_0(i)$ 为 i 类表面损伤的标准特征。若公式 (10) 的计算结果高于阈值 s' , 当前铝蜂窝填充 CFRP 结构表面存在损伤, 且损伤类型为 i , 否则进行下一标准特征的匹配, 直至得出满足阈值条件的检测结果, 否则认为当前铝蜂窝填充 CFRP 结构表面无损伤^[18]。针对存在损伤的铝蜂窝填充 CFRP 结构表面, 需要对损伤深度、损伤面积、损伤位置等参数进行检测, 损伤深度的检测结果的计算公式为:

$$h_{\text{damage}} = \frac{v_{\text{CFRP}} - v_{\text{air}}}{v_{\text{CFRP}} \cdot v_{\text{air}}} \times s_{\text{spread}} \quad (11)$$

其中: v_{CFRP} 和 v_{air} 分别为红外激光信号在铝蜂窝填充 CFRP 结构表面和空气环境中的传输速度, t_{spread} 为红外激光信号的传输时间。另外表面损伤面积的检测结果的计算公式为:

$$S_{\text{damage}} = L_{\text{damage}}(x) \times L_{\text{damage}}(y) \times h_{\text{damage}} \quad (12)$$

式中, $L_{\text{damage}}(x)$ 和 $L_{\text{damage}}(y)$ 为铝蜂窝填充 CFRP 结构表面的损伤长度和宽度。采用红外激光图像损伤位置确定和图像映射两个步骤, 得出损伤位置的检测结果, 最终将损伤状态、损伤类型以及损伤参数的检测结果以可视化的形式输出, 完成铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测任务。

2 性能测试实验分析

为了测试优化设计铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法的损伤检测结果, 设计性能测试实验。此次实验的基本原理为: 制备存在表面损伤的多个铝蜂窝填充 CFRP 结构试件作为实验对象, 利用安装并调试完成的红外激光设备得出响应信号和表面图像的生成结果, 利用优化设计的检测方法得出损伤类型、损伤参数的检测结果, 并与制备的试件参数进行比对, 得出反映优化设计方法检测性能的测试结果。

2.1 制备表面损伤铝蜂窝填充 CFRP 结构试件

准备铝蜂窝芯材、CFRP 面板等原材料, 制备铝蜂窝填充 CFRP 结构试件, 通过对试件的损伤处理, 得出不同表面损伤类型的铝蜂窝填充 CFRP 结构试件, 以此作为待检测的实验试件。

2.1.1 制备铝蜂窝填充 CFRP 结构试件

铝蜂窝填充 CFRP 结构试件的制备材料包括铝蜂窝

芯材、CFRP 预浸料和辅助材料, 铝蜂窝芯材选用规格一致、质量稳定的铝蜂窝芯材, 确保每个试件的铝蜂窝芯材具有相同的几何尺寸、蜂窝单元大小和壁厚。在 CFRP 试件的制备中, 选用了 PWCT300 型号的碳纤维/CYCOM970 环氧树脂基预浸料。这里的 PWCT300 意味着该预浸料中的碳纤维采用了平纹编织工艺, T300 标识了碳纤维的品级。单层预浸料的厚度精确控制在 0.2 mm 左右, 且其含胶量达到 40%。详细来说, T300 碳纤维是由聚丙烯晴基材料制成, 其密度大约为 1.8 g/cm³, 单丝纤维的直径为 7 μm。这种碳纤维具有良好的力学性能, 抗拉强度高达 3 600 MPa, 拉伸模量达到 230 GPa, 断裂伸长率为 1.5%, 因此在应用中表现出良好的抗断裂和变形能力^[19]。至于 CYCOM970 环氧树脂, 它是一种高温热固性树脂, 密度约为 1.2 g/cm³, 其固化温度设定在 177 °C, 确保了在制备过程中的稳定性和可靠性。试件制备过程中需要使用的辅助材料包括脱模布、透气毡及真空袋等, 选用质量可靠、规格相同的辅助材料, 以保证制备过程的一致性。在实际的制备过程中, 为了确保每个试件的外部尺寸和形状精确统一, 采用了相同尺寸和精度的模具。在 CFRP 试样的制造过程中, 严格按照层合板制造工艺铺设及固化, 特别关注蜂窝芯材的位置和方向, 确保没有错位或变形。预浸料的铺设遵循 [0, ±45°, 0] 2 s 的对称方式, 并在铺叠过程中使用材料辊子有效压挤层间的空气。随后, 将铺叠好的预浸料连同模具一同放入热压罐内^[20]。罐内升温速率设定为 2 °C/min, 短暂升温后, 将固化压力控制在约 0.5 MPa, 固化温度设置为 180 °C, 并维持此温度 120 min。完成固化后, 采用 3 °C/min 的降温速率使试样冷却至室温, 再取出试件。待试件完全固化后, 进行脱模处理。脱模后的试件还需经过一系列后处理步骤, 如细致的打磨和精确的切割, 以确保试件的尺寸和形状完全符合实验所需的标准。为保证实验结果的可信度共准备 500 个材料相同、尺寸相同的初始试件, 并通过质检保证初始试件表面无明显损伤。

2.1.2 铝蜂窝填充 CFRP 结构试件表面的损伤处理

以初始制备的铝蜂窝填充 CFRP 结构试件为操作对象, 利用损伤加载设备在试件表面添加损伤, 从而满足优化设计检测方法的检测需求。施加的表面损伤类型包括冲击损伤、机械划伤以及化学腐蚀损伤等, 以冲击损伤施加处理为例, 准备不同尺寸的落锤设备作为加载设备, 设置落锤下落的高度和速度, 并保证运动参数的可控性。将试件放置在落锤下方, 确保试件在冲击过程中不会移动, 且保证落锤能够准确击中试件表面。使用冲击器以预设的速度和角度对试件表面进行冲击, 使其对试件表面造成预期的损伤。机械划伤损伤的添加过程中, 利用刀类划伤工具, 以预设的划痕长度、深度和间

距进行划伤,得出存在表面划伤损伤的试件。而化学腐蚀损伤则是准备能够腐蚀 CFRP 结构的化学腐蚀溶液,精准配比溶液中的腐蚀物浓度、温度以及 pH 值,将试件表面部分浸入化学腐蚀溶液中,控制浸泡时间和溶液浓度,得出不同程度化学腐蚀损伤的试件。需要注意的是,存在化学腐蚀损伤的试件在实际检测之前,需要使用清水冲洗干净并干燥,最大程度地降低腐蚀残留对实验结果产生的影响。按照上述方式,选择任意一种对试件进行损伤加载处理,得出存在单一类型损伤的铝蜂窝填充 CFRP 结构试件。

2.1.3 标记铝蜂窝填充 CFRP 结构试件表面损伤信息

通过改装红外激光设备并设定其工作参数,采集铝蜂窝填充 CFRP 结构试件的数据信息,将 PXI5105 传感器用于监测红外激光与铝蜂窝填充 CFRP 结构表面相互作用时产生的微弱声波或振动信号。红外激光接收器根据记录接收到的激光基本信息和时间信息,形成红外激光响应信号,将这些红外能量转化为电信号,其中包含了关于材料表面热响应和振动特性的信息,能够反映 CFRP 结构表面的损伤情况。根据铝蜂窝填充 CFRP 结构试件表面损伤的实际处理情况,记录各试件表面的实际损伤信息,部分试件表面损伤信息的实际情况,如表 1 所示。

表 1 铝蜂窝填充 CFRP 结构试件表面损伤信息表

试件编号	损伤类型	损伤面积/mm ²	损伤深度/mm
J01	机械划伤损伤	85	1.5
J02	冲击损伤	62	0.8
J03	冲击损伤	47	1.4
J04	化学腐蚀损伤	36	2.2
J05	冲击损伤	55	1.1
J06	机械划伤损伤	27	0.6
J07	化学腐蚀损伤	49	0.9
J08	机械划伤损伤	67	1.2

按照上述方式能够完成制备所有铝蜂窝填充 CFRP 结构试件表面损伤信息的记录结果,以此作为判定优化设计方法检测性能的比对标准。

2.2 红外激光设备安装与调试

将改装的红外激光设备安装到实验环境中,并对设备的工作参数进行设定。

在实验环境中,改装红外激光设备采用计算机自动触发方式进行启动,输出功率为 15 W,输出激光光束质量为 1.5,脉冲宽度和波长分别为 200 ns 和 1 064 nm,单红外激光脉冲能量为 1 mJ,该设备以 50 kHz 频率进行重复脉冲。实验开始之前,检查红外激光设备中各个元件的连接情况,检查激光发射元件是否能够正常发射红外激光信号,根据具体设备的要求,调整红外线的传输角度和距离,保证红外激光信号能够正常传输,将激

光打在一块光学玻璃上,观察激光的反射情况,通过调节反射镜或凸透镜,将反射激光对准光学玻璃中心点,直到反射激光准直。

2.3 性能测试实验过程

利用 Uiautomator 工具对优化设计的铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法进行开发,通过红外激光信号获取、表面图像生成等步骤,得出铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤的检测结果。图 3 为 J01 号试件的表面损伤检测结果。

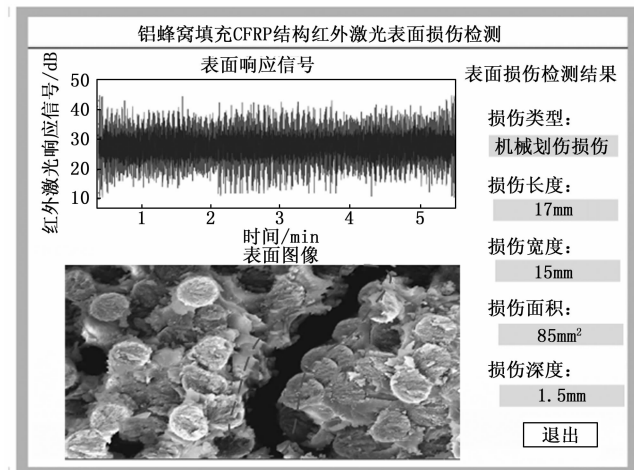


图 3 铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测结果

重复上述操作,更换试件检测对象,得出所有损伤试件的表面损伤检测结果。实验中设置传统的基于偏振成像技术的损伤检测方法和基于损伤区域融合变换的表面损伤检测方法作为实验的对比方法,利用相同的开发工具完成对比方法的开发,并得出所有损伤试件的对比检测结果。

2.4 设置损伤检测性能测试指标

此次实验设置表面损伤类型误检系数、损伤面积和深度的检测误差作为测试指标,其中表面损伤类型误检系数测试结果的计算公式为:

$$\sigma = \frac{n_{err}}{n_{Test\ piece}} \quad (13)$$

其中: n_{err} 和 $n_{Test\ piece}$ 分别为表面损伤类型检测错误的试件数量以及实验准备的试件总数量。损伤面积和深度检测误差测试结果的计算公式如下:

$$\begin{cases} \epsilon_s = |S_{damage} - S_{set}| \\ \epsilon_h = |h_{damage} - h_{set}| \end{cases} \quad (14)$$

式中, S_{set} 和 h_{set} 分别为铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤深度和面积の設定值。最终计算得出 σ 、 ϵ_s 和 ϵ_h 取值越小,证明对应方法的检测性能越优。

2.5 损伤检测性能测试实验结果与分析

通过输出铝蜂窝填充 CFRP 结构表面损伤类型检测

结果的统计以及与设定损伤类型的比对, 确定 n_{err} 的具体取值, 根据试件数量的设定情况将变量 $n_{Test\ piece}$ 赋值为 500, 通过公式 (13) 的计算得出不同检测方法表面损伤类型误检系数的测试对比结果, 如图 4 所示。

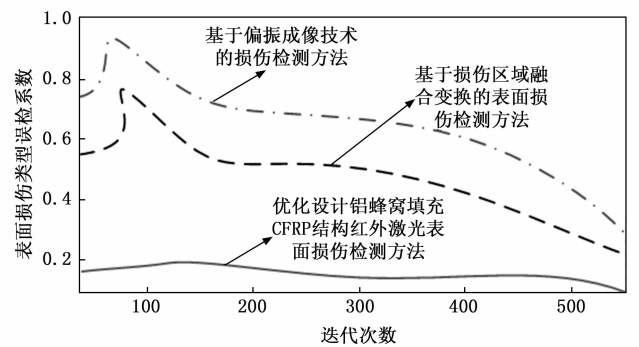


图 4 表面损伤类型误检系数测试对比结果

从图 4 中可以直观看出, 与两种传统方法相比, 优化设计方法得出表面损伤类型误检系数明显降低, 表明该方法具有良好的检测性能。

另外, 损伤深度和面积检测误差的测试结果, 如表 2 所示。

表 2 表面损伤深度和面积检测误差测试数据表						
试件 编号	基于偏振成像 技术的损伤 检测方法		基于损伤区域 融合变换的表面 损伤检测方法		优化设计铝蜂窝填 充 CFRP 结构红外激 光表面损伤检测方法	
	损伤面 积/mm ²	损伤深 度/mm	损伤面 积/mm ²	损伤深 度/mm	损伤面 积/mm ²	损伤深 度/mm
J01	85.6	1.1	85.3	1.3	85.1	1.4
J02	62.5	0.5	62.4	0.6	62.2	0.8
J03	47.7	1.0	47.5	1.2	47.3	1.5
J04	36.9	2.6	36.7	2.0	36.4	2.1
J05	55.4	1.5	55.2	1.0	55.0	1.0
J06	27.6	0.3	27.4	0.4	27.0	0.5
J07	49.8	0.5	49.6	0.7	49.1	0.9
J08	67.7	1.5	67.5	1.0	67.4	1.2

将表 2 中的数据代入公式 (14) 中, 计算得出 3 种检测方法的损伤面积平均检测误差分别为 0.65、0.45 和 0.19 mm², 损伤深度检测误差的平均值分别为 0.36、0.19 和 0.06 mm。由结果可知, 所提方法的检测误差最小, 表明该方法的检测效果更好。

感知损失是一种衡量检测结果与真实结果之间感知差异的指标, 它通过比较检测结果与真实结果在高层特征空间的差异评估方法的检测精度。一般来说, 感知损失的值应该在 0~1 之间, 其中 0 表示检测图像与真实图像完全相同, 1 表示检测的图像与真实图像完全不同。3 种方法的感知损失结果如表 3 所示。

观察表 3 中的数据可以看出, 在不同试件编号中,

优化设计方法的感知损失值明显低于其他两种方法, 这表明本文方法对于这些缺陷类型的检测和分类能力更强, 可以应用于实际的铝蜂窝填充 CFRP 结构检测中。

表 3 感知损失结果

试件 编号	感知损失		
	优化设计方法	基于超声能量扩 散的检测方法	基于兰姆波 的检测方法
J01	0.11	0.28	0.35
J02	0.19	0.27	0.38
J03	0.20	0.24	0.37
J04	0.21	0.22	0.30
J05	0.09	0.19	0.29
J06	0.15	0.26	0.28
J07	0.14	0.22	0.35
J08	0.08	0.23	0.36

3 结束语

铝蜂窝填充 CFRP 结构因其轻质高强、耐腐蚀等特性, 在航空航天、汽车制造等领域得到了广泛应用。然而, 其表面在红外激光等极端条件下的损伤问题, 一直是制约其性能和应用的重要因素。在此次研究中, 通过对铝蜂窝填充 CFRP 结构红外激光表面损伤检测方法的优化设计, 能够及时发现并评估损伤情况, 为结构的安全性和可靠性提供了重要保障, 同时推动无损检测技术的创新和发展。

参考文献:

[1] 汪 靓, 杨 宇, 黄 敏, 等. 基于偏振成像技术的油桃机械损伤检测 [J]. 激光技术, 2022, 46 (6): 841-849.

[2] 艾青林, 崔景瑞, 吕冰海, 等. 基于损伤区域融合变换的轴承鼓形滚子表面损伤检测方法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2023, 57 (5): 1009-1020.

[3] 阎 石, 于水旺, 王 鲁, 等. 基于 MASW 的钢-混凝土组合板界面剥离损伤识别 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (1): 17-23.

[4] 李 宁, 张海月, 高树灵, 等. 基于超声能量扩散的 CFST 界面剥离损伤检测方法与验证 [J]. 工程力学, 2023, 40 (1): 111-120.

[5] HU M, HE J, ZHOU C, et al. Surface damage detection of steel plate with different depths based on Lamb wave [J]. Measurement, 2022, 187: 110364.

[6] 王光瑞, 鲍 峤, 胡伟伟, 等. 基于激光干涉测量的冲击损伤程度表征 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (3): 74-81.

[7] 沈 宁. 基于双目视觉的选煤厂用胶带输送机表面异物检测 [J]. 工矿自动化, 2023, 49 (s1): 82-85.

(下转第 36 页)