

文章编号: 2095-2163(2020)03-0294-05

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

# CFRP 薄壁管红外热成像和 CT 检测的研究分析

郭德伟, 马其华

(上海工程技术大学, 上海 201620)

**摘要:**碳纤维复合材料(CFRP)具有高强度、高刚度及耐高温等优异特性,其在航空、航天、车辆等领域应用得非常广泛。复合材料结构件因复杂的结构导致其在生产和使用过程中会产生如分层、脱粘和裂纹等各类缺陷,使得复合材料的性能降低,具有安全隐患。研究和发​​展能够准确检测碳纤维复合材料的损伤十分有意义。本文分析了主流的无损检测技术方法的检测原理及特点,对比了不同的形状及不同损伤所适用的检测原理。本文利用红外热成像的方法建立实验装置,得到实验结果,得出预制的 CFRP 薄壁管样件表面损伤面积为  $1\ 342\ \text{mm}^2$ 。并且利用 CT 技术对样件的损伤做检测分析。并对红外的检测方法进行了对照。

**关键词:** 复合材料; 薄壁管; 损伤检测; 损伤评价; CT; 红外热成像

## Research and analysis of infrared thermography and CT detection of thin-walled CFRP tube

GUO Dewei, MA Qihua

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**【Abstract】** Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is widely used in aerospace, vehicle and other fields because of its high strength, high stiffness and high temperature resistance. Due to the complex structure of composite structure, it will produce various defects such as delamination, debonding and cracks in the process of production and use, which will reduce the performance of composite materials and have security risks. It is of great significance to study and develop the method to accurately detect the damage of carbon fiber composite. This paper analyzes the testing principle and characteristics of the mainstream nondestructive testing technology, and compares the testing principles of different shapes and different damages. In this research, the infrared thermal imaging method is used to set up the experimental device. The experimental results show that the surface damage area of the prefabricated thin-walled CFRP tube sample is  $1\ 342\ \text{mm}^2$ . In addition, CT technology is used to detect and analyze the damage of the sample compared with the results of infrared detection method.

**【Key words】** CFRP; thin-walled tube; damage detection; damage mechanism; CT; infrared thermography

### 0 引言

碳纤维复合材料(CFRP)凭借其超强韧性、能量吸收性能、轻柔性、结构稳定、耐腐蚀与耐高温等特性<sup>[1]</sup>,成为了当下新能源汽车产业的原材料首选。复合材料在生产和服役的过程中,特别是服役的过程中,由于撞击、疲劳、腐蚀等物理化学因素的影响,复合材料中很容易产生分层、裂纹、冲击损伤等缺陷。会导致结构的热力和机械等特性的改变,影响结构的可靠性和安全性。多数情况下的检测需要在不损害材料的使用性能的前提下,对 CFRP 进行检测与评价,这也对检测方法提出了更高的要求。目前的学术界多是集中在对板材的研究,而对于 CFRP 缠绕管的检测技术一直是研发中的技术难点。对此本文拟展开研究论述如下。

### 1 常用无损检测方法对比

#### 1.1 碳纤维复合材料(CFRP)的缺陷

碳纤维复合材料(CFRP)的缺陷包括分层、脱胶、纤维断裂、夹杂、孔隙和裂纹等等<sup>[2]</sup>。由于复合材料属于非均匀各向异性材料,因此其无损检测比各向同性的金属的检测更为复杂<sup>[3]</sup>。适合于复合材料的检测方法主要有: X 射线照相检测、计算机层析成像(CT)、超声检测技术、涡流检测技术、红外热成像检测技术、激光检测技术等<sup>[4]</sup>。但不同技术质检有一定的适用范围,并且由于各种检测原理特点,其评价参数不统一,对于同样的样件评价机理各不相同,为实际应用造成了较大的困扰。复合材料主要无损检测方法对比见表 1。

**作者简介:** 郭德伟(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:汽车轻量化; 马其华(1980-),男,博士,副教授,主要研究方向:汽车轻量化及碳纤维复合材料应用。

收稿日期: 2019-12-13

表1 复合材料主要无损检测方法对比

Tab. 1 Comparison of main nondestructive testing of CFRP

方法	适用范围	优点	缺点
微波法	胶脱、分层、裂纹、孔隙等	简单、直观、无需预处理	仅适用较大缺陷
超声扫描	内部缺陷(疏松、分层、夹杂物、孔隙和裂纹)和材料性能表征 <sup>[5]</sup>	易操作、快速、可靠、灵敏度高、精确度高,可确认缺陷的位置与分析	需要使用耦合剂,对不同缺陷专业度要求高
CT	裂纹、夹杂物、气孔、分层、密度分布	空间分辨率高、检测动态范围大、成像的尺度精度高	效率低,不太适合薄板构件和一些大的样件现场检测 <sup>[6]</sup>
热成像	表面裂纹、脱粘、锈蚀等损伤	非接触、面积大、速度快、定量测量、图像显示、在役在线	检测深度小,很难发现内部缺陷,分辨率低

1.2 损伤样件的制备

空心圆铝管采用材质 6061 的铝管,几何尺寸为 34 mm×2 mm×300 mm(内径×壁厚×长度)。碳纤维增强复合材料(CFRP)选用的是日本的东丽株式会社的 T700-12K 单向带和浙江百合航太公司 BAC177 树脂制备而成。缠绕后,薄壁管几何尺寸为 41 mm×3.5 mm×300 mm(内径×壁厚×长度),CFRP 缠绕薄壁铝管样件如图 1 所示。为了预制损伤,实验采用三点弯曲试验,对 CFRP 缠绕的铝管进行弯曲加载,加载辊和支辊的直径均为 15 mm,试件长度为 300 mm,试验中的加载辊加载速率为 10 mm/min,加载位移为 40 mm。本文只讨论对于 CFRP 缠绕薄壁铝管的损伤检测和检测方法的对比,不对制备工艺以及制备样件的力学性能做深入探索。



(a) (b)

图1 CFRP缠绕薄壁铝管样件

Fig. 1 Thin-walled CFRP tube

2 碳纤维复合材料损伤的红外热成像检测

2.1 红外热成像的检测原理

红外热成像检测是对碳纤维复合材料进行加

热,在材料表面和内部会形成温度差,红外辐射能力会根据材料温度而发生变化,并呈现在红外热像仪上,形成清晰直观的图像,通过分析辐射分布来判断材料内部的缺陷<sup>[7]</sup>。

根据基尔霍夫定律描述的物体的红外辐射与温度之间的转换关系,使用红外探测设备采集物体表面的辐射并以温度场的形式表现出来。损伤缺陷的温度表现特点如图 2 所示。在通常情况下,温度场按照一定时间内其各位置上的温度是否随外部条件的变化而变化<sup>[8]</sup>。

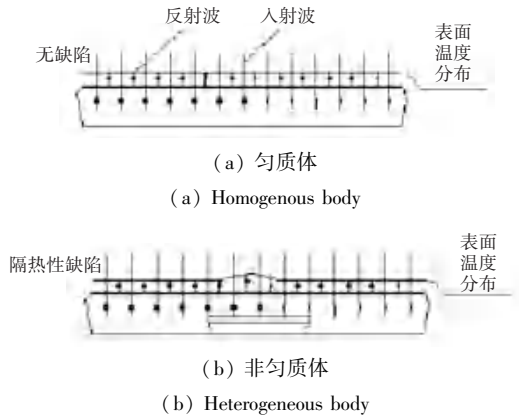


图2 损伤缺陷的温度表现特点

Fig. 2 Temperature characteristics of damage defects

当样件表面的边界条件、物理性质、加热激励、以及表面的传热系数、外部环境因素、缺陷的特征属性都能确定时,为了达到简化计算的目的,本文采用一维热传导模型作为理论基础,表示为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - Q + \tilde{N}(k \tilde{N}T(z, t)) = 0, \quad (1)$$

其中,ρ表示该材料的材料密度;c<sub>p</sub>表示比热容;k表示材料的导热率;z表示与表面的深度;T(z,t)表示t时刻深度为z处的温度。

求解式(1)所示的方程,便可得出温度与深度和时间的关系,如下式所示:

$$T(z, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \rho c_p k t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right). \quad (2)$$

其中,α为热扩散系数。

红外热成像的检测通常用于检测碳纤维层压板的缺陷、冲击性损伤以及碳纤维复合材料内部粘合的缺陷等等。

2.2 热激励红外热成像检测方法试验方法及过程

2.2.1 热激励的方式加热

采用 1 000 W 的闪光灯对样件进行热激励,热量在构件内部进行传导,缺陷的存在会导致热流传递受阻,使构件有无缺陷处对应表面温度分布产生

差异<sup>[9]</sup>。闪光热激励红外热波检测基本原理如图 3 所示。

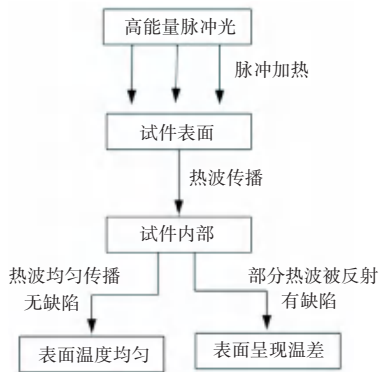


图 3 闪光热激励红外热波检测基本原理

Fig. 3 Detection principle of infrared thermal wave excited by flash heat

2.2.2 试验环境搭建

试验系统组成如图 4 所示。由图 4 可知,该系统包括:计算机、热成像仪、灯罩、闪光灯及电源、以及热成像仪采集软件。

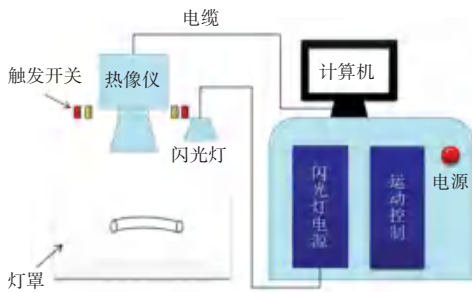


图 4 实验设备简图

Fig. 4 Laboratory equipment

闪光灯激励后,默认设置丢弃采集前未被激励的图像,并且由于激励时,可能产生的干扰情况,丢弃开始采集后的 2 帧的图像帧数。试验参数及采集参数见表 2。

表 2 试验参数及采集参数

Tab. 2 Test parameters

采集参数	参数值
热像仪分辨率 $x * y$	384 * 288
热像间隔采集时间/ms	78
采集总时间/s	10
采集结尾时间/ms	3
采集延迟时间/ms	6
闪光灯最大能量/J	12 000
热激励能量百分比/%	100
采集背景图像帧数	34
采集图像总帧数 $N$	128

2.3 试验结果分析

红外热像仪记录并存储受热激励的 CFRP 薄壁管的受载背面表面的热图,其实得到的结果是基于时间的热图像序列图,时-空模型如图 5 所示,可以表示为:

$$T_{x,y}(n) = \begin{pmatrix} \hat{e}_{t_{1,1}(n)} & t_{1,2}(n) & \cdots & t_{1,y}(n) \\ \hat{e}_{t_{2,1}(n)} & t_{2,2}(n) & \cdots & t_{2,y}(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{e}_{t_{x,1}(n)} & \cdots & \cdots & t_{x,y}(n) \end{pmatrix} \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{matrix}$$

$$x \subseteq [1,384], y \subseteq [1,288], n \subseteq [1,128]. \quad (3)$$

其中,  $n$  为采集的图像的帧数;  $t(n)$  表示第 1 帧图像;  $x$  为矩阵的第  $x$  行,表示热成像面阵 CCD 的  $x$  的坐标;  $y$  为第  $y$  列,表示热成像面阵 CCD 的  $y$  的坐标;  $x * y$  表示热像仪的分辨率,即  $384 * 288$ ;  $T_{x,y}(n)$  是空间坐标为第  $n$  帧  $x$  行  $y$  列像素点的温度值。

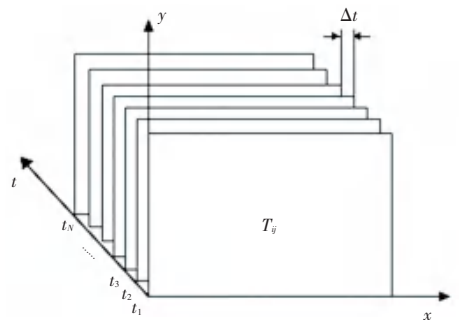
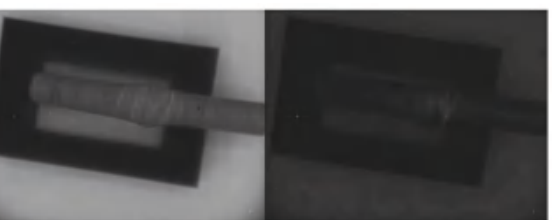


图 5 热成像采集的图像序列

Fig. 5 Image sequence acquired by thermal imaging



(a) 第 5 帧 (b) 第 100 帧  
(a) Frame 5 (b) Frame 100

图 6 热激励后  $t$  时刻的热图

Fig. 6 Comparison of images at time  $t$  after thermal excitation

3 热成像图的图像增强及结果分析

图像中灰色线条状的纹路为碳纤维复合材料的损伤处,为 CFRP 薄壁管表面碳纤维复合材料的裂纹以及纤维断裂。经过对比选取第 8 帧图像,其损伤处与周围材料的灰度值有较大的对比度,选取为基础样图如图 7 所示。下文采用图像增强的方法,

对图像进行处理。

### 3.1 图像增强

图像增强的目的在于增强图像的对比度, 比出损伤与基体的差别, 为后续的图像识别等做预处理。预处理的结果呈现如图 8~图 10 所示。

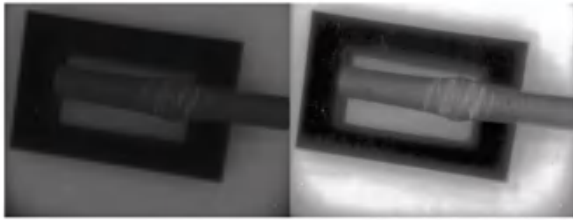


图 7 原图 图 8 直方图均衡化后图像

Fig. 7 Raw image Fig. 8 Histogram equalized image

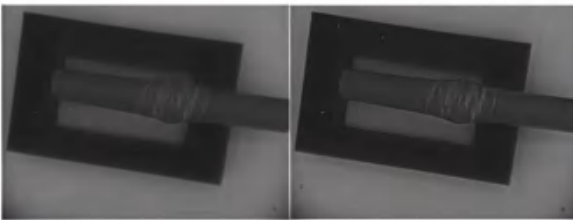


图 9 拉普拉斯算子五邻域锐化、八邻域锐化

Fig. 9 Sharpening image with 5 or 8 neighborhood of Laplace operator



图 10 调整对比度与亮度后的图像

Fig. 10 Image of adjusting contrast and brightness

### 3.2 不同算子的边缘检测

为了更加清楚地分辨出纤维断裂损伤处的特征, 本文采取边缘检测的方法对热图进行图像处理。采用不同算子后的图像处理结果如图 11 所示。

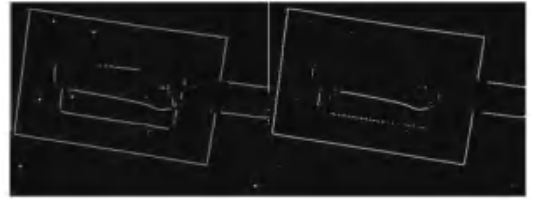
经过比对, Canny 算子的边缘检测相对完整, 与 zerocross 算子检测差别不大, Canny 算子识别的损伤的轮廓更加封闭。

### 3.3 碳纤维损伤特征提取

经过测算后, 匹配出缠绕管的边缘, 在此基础上进行图像分割。缠绕管的轮廓比较清晰, 通过 Canny 边缘检测后的图像减去样件的轮廓可以得到检测后的特征分割图像如图 12 所示。

由于边缘检测后, 部分损伤区域还不是闭合的区域, 本文采用了基于八邻域轮廓跟踪方法对目标

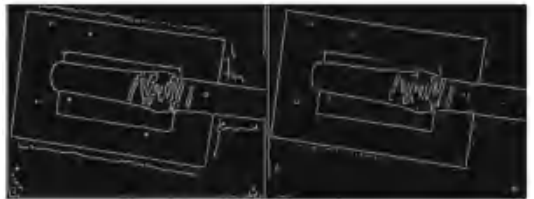
边缘进行轮廓跟踪, 得到图 13。此方法测量精度较高, 测量误差较小, 能实现复杂多封闭区域几何尺寸的测量。



(a) Prewitt 算子 (b) Log 算子  
(a) Prewitt operator (b) Log operator



(c) Roberts 算子 (d) Sobel 算子  
(c) Roberts operator (d) Sobel operator



(e) Canny 算子 (f) zerocross 算子  
(e) Canny operator (f) zerocross operator

图 11 不同算子边缘检测后的图像

Fig. 11 Image after edge detection with different operators



图 12 特征分割

图 13 轮廓跟踪图像

Fig. 12 Feature segmentation Fig. 13 Contour tracking

### 3.4 损伤特征量化评价

经过计算区域内的像素点, 得出损伤区域面积像素为 1 617。经过数据拟合后, 一个像素点的长度对应 0.911 mm, 推算后损伤面积约为 1 342 mm<sup>2</sup>。

## 4 CFRP 薄壁管红外热成像损伤的 CT 检测及结果分析

计算机断层扫描技术 (Computed Tomography, CT) 的基本原理是利用 X 射线束对被检测件的整体或局部进行照射, 数字探测器接收经过透照该样件衰减后的 X 射线, 将其转化为光电信号, 得到灰度图像, 再利用三维重建技术, 继而得到 CT 三维数据<sup>[10]</sup>。CT 的检测方法的运用对复合材料内部的分

层和空隙等缺陷及损伤有良好的效果,还能实现特征的准确定位和定量。利用 CT 技术对 CFRP 薄壁管的断层扫描图如图 14、图 15 所示,可探测出损伤如灰度缺失的地方。



图 14 CT 断层扫描正面图

Fig. 14 The front image of CT SCAN



图 15 CT 断层扫描端面图

Fig. 15 The top image of CT SCAN

由图 14、图 15 可知,CT 能非常清晰地剖析出碳纤维复合材料的分层、断裂情况。而且能清晰地表达出内部铝管的变形受损情况,并可从不同的角度得出样件的损伤情况的评价。由于 CT 结果表达清晰,本文不做过多其他量化展示与研究。但由于 CT 的检测方法的特性,不能在线测量,而且射线对人体有害而且必须要到防辐射的实验室做测量,应用上也受到一定限制。

## 5 结束语

本文通过对 CFRP 薄壁管红外热成像理论研究,建立实验装置,并对 CFRP 薄壁管预制样件,进行热图采样,通过取帧、图像增强、边缘识别、边缘轮廓跟踪、损伤特征提取、损伤特征量化的方式,得出预制样件的表面损伤面积为  $1\ 342\ \text{mm}^2$  的结论,对于后续的管状碳纤维复合材料的热成像检测及后续

图像处理、损伤量化评价的研究提供一定的参考。另外,本文通过预制样件的 CT 检测,从断层扫描的角度检测了 CFRP 薄壁管。结果发现,CT 方法对于管状样件内部的损伤的表达非常清晰,但由于断层扫描的特点,不能直观地得到表面损伤情况。本文提到的红外热成像的方法对结果起到了补充和方法的作用展示。

## 参考文献

- [1] 张立侃. 碳纤维复合材料在新能源汽车行业中的应用[J]. 汽车与驾驶维修(维修版),2017(6):140.
- [2] 陈越超. 基于超声背散射信号处理的碳纤维复合材料孔隙检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [3] 贺梦悦,黄梅. 浅谈适用于复合材料的几种无损检测技术[J]. 建材与装饰,2018(30):65.
- [4] 江海军,陈力. 红外热波成像技术在复合材料无损检测中的应用[J]. 无损检测,2018,40(11):37.
- [5] 张惠玲. 碳纤维复合材料主要缺陷无损检测和识别研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
- [6] 凡汉云. 碳纤维复合材料电磁检测试验研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2010.
- [7] 肖亚楠. 碳纤维复合材料的无损检测方法探讨[J]. 科技风,2017(9):10.
- [8] 梁涛. 复合材料脱粘缺陷红外热成像无损检测定量分析研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [9] 唐庆菊,高帅帅. 碳纤维复合材料界面脱粘缺陷的红外热波检测[J]. 煤矿机械,2018,39(8):163.
- [10] 宋子国. 医学图像三维重建的预处理算法研究[D]. 广州:广东工业大学,2012.
- [11] WALLY G, OSWALD-TRANTA B. The influence of crack shapes and geometries on the results of the thermo-inductive crack detection [C]//Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics. Bangkok, Thailand: IEEE, 2007: 654111.
- [12] BECKER S, ULLMANN T, BUSSE G. 3D Terahertz imaging of hidden defects in oxide fibre reinforced ceramic composites [C]//4<sup>th</sup> International Symposium on NDT in Aerospace. Augsburg, Deutschland: [s.n.], 2012:1.
- [13] KOYAMA K, HOSHIKAWA H, KOJIMA G. Eddy current nondestructive testing for carbon fiber-reinforced composites [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013, 135(4): 041501.
- [14] SEDIQ A S B, QADDOUMI N. Near-field microwave image formation of defective composites utilizing open-ended waveguides with arbitrary cross sections [J]. Composite structures, 2005, 71(3): 343.

(上接第 293 页)

- [18] WANG Yuankai, WANG C F. Face detection with automatic white balance for digital still camera [C]//2008 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Harbin: IEEE, 2008: 1.
- [19] 胡波,林青,陈光梦,等. 基于先验知识的自动白平衡[J]. 电路与系统学报,2001,6(2):25.
- [20] BUCHSBAUM G. A spatial processor model for object color

perception [J]. Journal of the Franklin Institute, 1980, 310(1): 337.

- [21] 严世珺. 数字图像白平衡处理算法研究与改进[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [22] 敖宇. 基于欧拉视频放大技术的火焰异常信号可视化研究[D]. 贵州:贵州大学,2019.