

航空复合材料内部缺陷差动式激光红外热成像检测

王 强¹, 胡秋平^{1*}, 邱金星², 裴翠祥², 刘 铭¹, 李欣屹¹, 周洪斌¹

(1. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051;

2. 西安交通大学 航天航空学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 航空复合材料内部缺陷的存在严重威胁着飞行安全。以航空碳纤维复合材料层合板为检测对象, 利用激光作为红外热成像检测技术的热激励源, 充分利用激光的远距离精准加热、高功率密度等优点, 实现对复合材料内部分层缺陷的定位检测。利用激光红外热成像技术对缺陷试件和参考试件进行多次差动检测, 并且依据试件与热像仪的空间位置关系, 选择温差最大时刻计算内部分层缺陷的直径。实验结果表明: 激光红外热成像技术可有效检测航空碳纤维复合材料内部分层缺陷。同时, 首次使用的差动式激光红外方法可有效消除激光能量分布不均对检测结果带来的影响, 使缺陷成像结果更清晰。

关键词: 差动式激光红外热图像; 航空复合材料; 定位检测; 内部缺陷

中图分类号: V214.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0504003

Detection of internal defects in aviation composites with differential laser infrared thermal imaging

Wang Qiang¹, Hu Qiuping^{1*}, Qiu Jinxing², Pei Cuixiang², Liu Ming¹, Li Xinyi¹, Zhou Hongbin¹

(1. Equipment Management and UAV Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The existence of internal defects of aviation composites is a serious threat to air safety. In this paper, a novel infrared thermal imaging technique with laser as a heat source was applied to detect the internal defects in the carbon fiber reinforced plastics (CFRP) used in aviation field. With the advantages of remote feature and high-power density of laser, the positioning detection for the internal delamination defects of CFRP could be realized precisely. Multiple differential detection was carried out for the defect specimen as same as the reference specimen by using laser infrared thermal imaging technology. At the same time, according to the spatial position relationship between the specimen and the thermal imager, the max temperature difference in thermographs would be selected to calculate the diameter of the internal delaminate defect. The result shows that the laser infrared thermal imaging technology can effectively detect the internal delamination defects of CFRP. Especially, the differential laser infrared thermal imaging technology used for the first time can effectively eliminate the influence of the uneven laser energy distribution and make the defect image much clearer.

Key words: differential laser infrared thermal images; aviation composites; positioning detection; internal defects

收稿日期: 2018-12-11; 修订日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(71701210)

作者简介: 王强(1976-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事装备系统工程与装备结构安全分析、装备安全性检测方面的研究。

Email: 3198501761@qq.com

通信作者: 胡秋平(1993-), 男, 硕士生, 主要从事红外无损检测方面研究。Email: 2284966489@qq.com

0 引言

复合材料因具有轻质、高强度、高比刚度、耐腐蚀、热膨胀率小等优良特性而广泛应用于航空航天等领域^[1]。现代先进航空器,如飞机,其机翼、蒙皮等结构越来越多地采用性能优异的复合材料。然而,在制造加工以及使用阶段,操作失误、加工技术不纯熟以及使用不当等都可能给复合材料带来损伤缺陷。轻则影响材料的性能,重则可能对航空器的飞行安全带来严重的威胁。因此,对航空复合材料的损伤检测以及对其损伤情况的评估尤为重要。

红外热成像技术具有非接触、无损伤、检测速度快、单次检测面积大等优点^[2]。对被检试件施加主动的热激励,使其内部缺陷或异构结构以表面温度分布差异表现出来^[3]。Ruizhen Yang^[4]总结了激光红外热像法等多种主动式红外热成像技术,并介绍了其运用实例。激光是一种具有良好的汇聚性的热源。相比于传统的加热方式,如卤素灯和电涡流加热,激光具有能量密度高,能够远距离对被测物体进行加热并精确控制热源的位置和分布,可以大幅度提高红外检测方法对于复合材料内部缺陷检测的能力。目前,激光这一激励方式主要是作为超声产生源应用在不损伤检测领域^[5]及作为强热源对试件进行表面处理等^[6],而作为红外热成像技术的主动热激励研究较少。Liu Haoche 等^[7]利用激光加热金属板面,检测出金属内部不同形状的分层缺陷,缺陷的径深比可达 1.0。Qiu jinxing 等^[8]利用激光加热金属,对金属表面裂纹的分布情况进行研究,取得较好的检测结果。吴恩启等^[9]利用调制激光加热编织碳纤维复合材料,研究热在其平面内部的传导规律。目前对于利用激光作为激励热源,对航空复合材料内部缺陷进行无损检测的研究仍然较少。同时,研究发现激光光斑的能量分布不均匀,严重影响检测图像的质量和缺陷的识别能力。文中利用差动式激光红外热成像技术对航空碳纤维复合材料层合板内部缺陷进行检测。实验表明,激光作为红外热成像技术的热激励源,可快速有效地检测出材料的内部分层缺陷,首次引入使用的差动式激光红外热成像技术能有效消除激光能量分布不均所带来的影响,提高检测图像的质量和缺陷的识别能力,同时,对材料表面缺

陷也十分敏感。

1 激光红外检测系统及方法

激光作为红外热像无损检测技术的激励源,是近年来才兴起的新的激励方式。作为一种高功率、可远距离加热和准直性良好的热激励,激光激励具有许多独特的优势。

1.1 激光红外热成像检测系统

实验采用自行搭建的激光红外热成像检测系统进行缺陷检测,系统如图 1 所示。该系统主要包含三个单元:控制单元、热激励单元及数据采集与处理单元。控制单元由激光信号及电流控制系统组成,热激励单元由激光发生器和扩束透镜(凹透镜)组成,数据采集与分析单元则由热像仪和相应的图像分析软件组成。采用反射式结构对试件进行检测^[10]。通过升降平台以及试件平移量来调整试件加热部位。

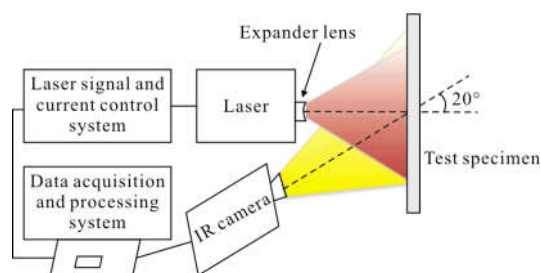


图 1 激光红外热成像检测系统

Fig.1 Laser infrared thermal imaging detection system

实验的主要设备为一台高性能激光器和高分辨率红外热像仪。所使用的 1 064 nm 激光器,额定功率为 100 W,入射激光的直径为 4 mm,脉冲激光宽度在 1 ms~500 s 内可调,红外热像仪为 FLIR-X6530sc,分辨率为 0.05 k,像素可达 640 512,且其红外波长敏感范围为 3.7~5.0 μm ,满足成像精度需求。

激光红外热成像系统的工作流程为:①信号发生器将调制好的信号传送到激光器,当电流强度达到出光条件时,激光器发出调制频率的激光;②激光加载到试件表面,高分辨率红外热像仪记录下试件表面的温度分布;③采集的热像图经过图像处理,将试件的缺陷清晰地显现。

1.2 差动式激光红外检测方法

激光红外热成像技术,采用激光作为主动热激励,试件表面受热而温度上升,从而辐射的红外射线

中包含有足量的内部信息。当物体内部或表面存在缺陷(如分层、脱粘、夹杂)时,由于缺陷处的热传导率与完好处的不同,使得温度在试件中的分布产生差异。

差动式激光红外热成像检测,则是在激光红外热成像技术上改进。利用无缺陷试件作为参考试件,获取相对于缺陷试件的参考表面温度信息。假设两块试件均一致(无缺陷),则提取两块试件相同条件下加热相同时间的温度信息,两者间相减,其差值应当接近于零。而当其中一块内部存在缺陷时,则缺陷所引起的温差信息则会在两者的差值中清晰显现。公式(1)可更为清晰地表述差动式激光红外热成像技术的检测机理。

$$\varepsilon = T' - T_0 \quad (1)$$

式中: T' 为被测缺陷件的表面温度分布; T_0 为参考试件表面温度分布; ε 为温度分布差异。这样便使噪声繁杂的原始温度分布信息转化成为更易分辨缺陷的差动温差分布热像图。

1.3 试件准备

被检试件选用中航工业复合材料有限责任公司生产的实用型航空碳纤维层合板。被检试件为两块大小、厚度一致的碳纤维层合板,如图 2(a)所示,

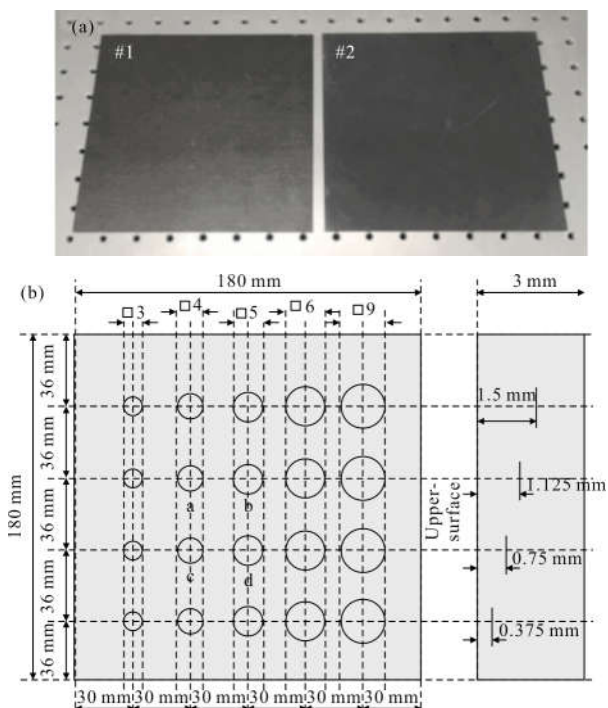


图 2 (a)被检试件,(b)被检试件缺陷位置及尺寸示意图

Fig.2 (a) Tested specimen, (b) schematic diagram of defect position and size of tested specimen

试件大小为 180 mm×180 mm×3 mm,由相同数目的碳纤维铺层浸渍环氧树脂固化得到,每个铺层厚度约为 0.125 mm。试件编号依次为 #5、#6 号,其中 #1 为内置缺陷件,不同厚度处预置缺陷,其缺陷位置及试件尺寸如图 2(b),图 2(b)中红框内的缺陷即为此次实验定位检测的缺陷内容,而 #2 则为参考试件。

2 实验结果分析

利用 1.1 节的激光红外热成像检测系统对上述两块试件进行检测。经过前期多次的预实验检测,得到检测效果较好的参数设置,激光激励红外热成像技术的检测参数设置如表 1 所示。在此种加载参数下,激光光斑直径在 8 cm 左右,实际功率为 60 W。

表 1 红外热像技术检测参数

Tab.1 Infrared thermal imaging detection parameters

Loading method	Frequency/Hz	Excitation time/s	Loading distance/mm
Pulse heating	50	6	700

对被测试件表面进行必要的清洁清理工作后,调整好光路,使得激光光斑能够稳定的投射到试件表面。实验中,激光器、试件加热区域与红外相机之间成 20°角,以获得较好的成像效果^[1],将红外热像仪的采集帧率设置为最大(60 帧/s),以保证得到丰富的温度变化细节。激光激励方式采取方波输入形式,在 6 s 的持续时间内,前 3 s 为加热阶段,后 3 s 处于降温阶段

2.1 原始热像图分析

按照实验设计搭建好实验系统,调整好光路,以及激光器、试件与红外热像仪之间的角度,使得试件的相邻两条直角边正好能够在采集软件上与屏幕范围重合。分别对 #5 和 #6 进行激光激励热成像,获得相应的红外热像图序列,如图 3 和图 4(a)~(f)所示。

对比参考试件 #2 和缺陷试件 #1 不同加热时间热像图可以看出,未施加激励时,试件表面的温度分布较为均匀,具体表现为热像图颜色一致,实际温差小,而 $t=0$ s 时刻的热像图中出现温度不一致的小区域,则是由于手指触碰导致的小温差。从 #2 的热像图可清晰看出激光能量分布由中间像四周逐渐降低,这一能量分布不均将增加检测难度。同时从 #1

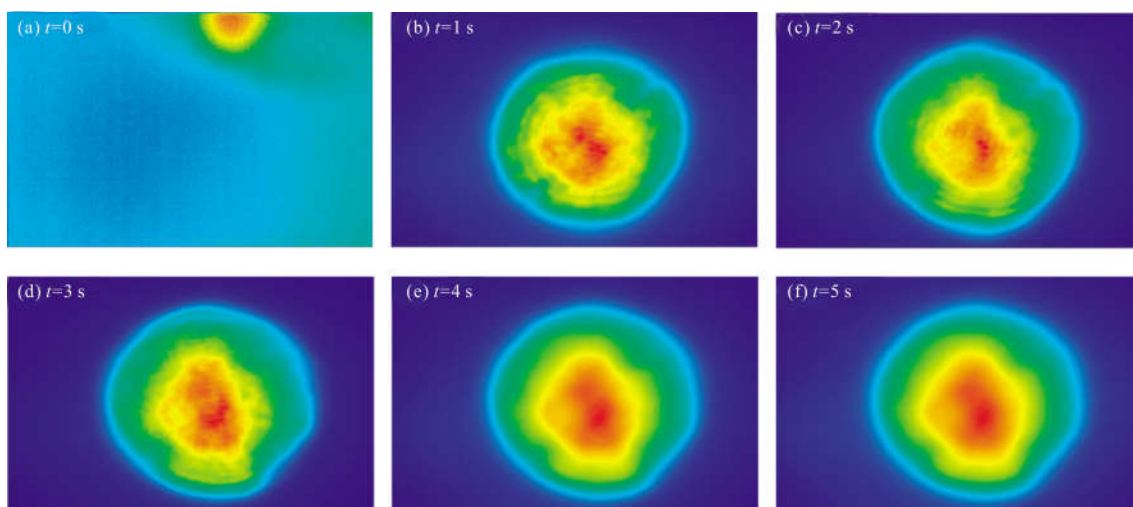


图 3 #2 不同加热时间热像图

Fig.3 Thermal images of specimens at different heating time

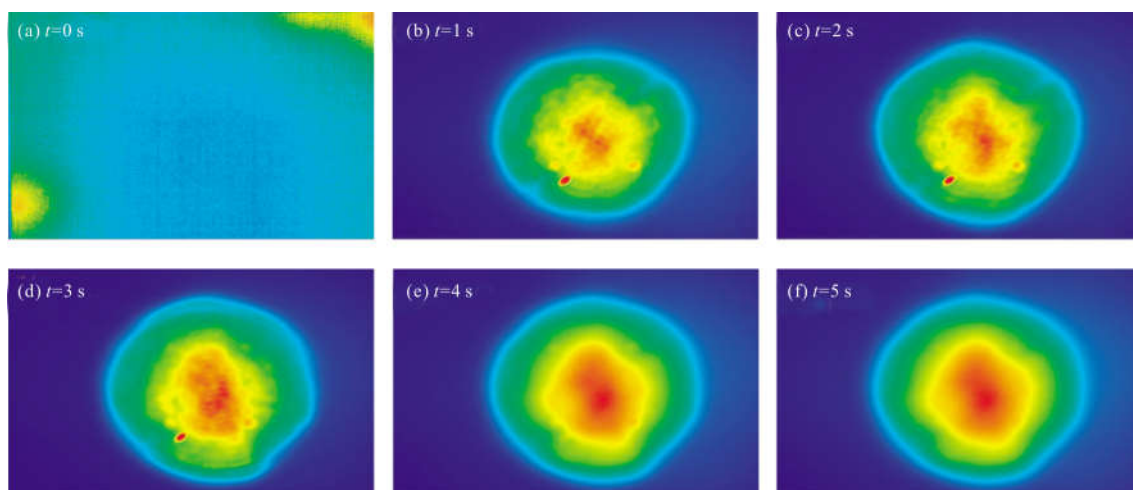


图 4 #1 不同加热时间热像图

Fig.4 Thermal images at different heating time

的温度上升阶段热像图 4 (b)~(d) 和散热阶段热像图 4(e)、(f)对比可知,对于热激励所得的原始热像图而言,在试件温度上升阶段,缺陷显露更为明显。

从获取的序列图中选择较为清晰的图像,如图 5 所示。根据预埋缺陷间的位置,从图中可以清晰地看到材料内部预置的圆孔分层缺陷(黑框内)。此外,热图中有一处最亮的区域,存在很明显的与周围区域温度差异高温区,这是在预实验时引入的表面烧蚀缺陷,由此可见,激光红外热成像技术对于表面烧蚀缺陷的检测具有良好的检测效果和检测精度。同时,在图中还存在多处如 a1 的小区域,该类区域内的温度低于周围温度,这种情况的出现与激光能量分布不均相关。

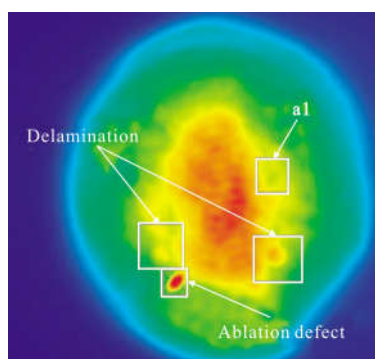


图 5 缺陷区域局部热像图

Fig.5 Local thermal image of the defect area

从以上分析可知,激光光斑能量分布不均匀对图像质量和缺陷检测结果影响较大,致使某些可能

存在的缺陷信息被掩盖。因此减小甚至消除激光光斑能量分布不均匀对缺陷信息的影响就显得十分重要。

2.2 差动式激光红外热成像检测结果

为减小激光光斑能量分布不均匀的影响, 选用 #6 这一无缺陷试件作为参考试件。在同样的条件

下, 对 #2 试件施加与 #1 相同的激励, 获得无缺陷试件的序列热图。之后提取出与 #1 加热相同时刻的热图。该实验处理方案中分别选取激励 1、2 s、温度最大时刻、散热 0.5 s、散热 1 s 和散热 2 s 时刻的热像图进行差动处理, 其结果分别对应图 6(a)~(f)。

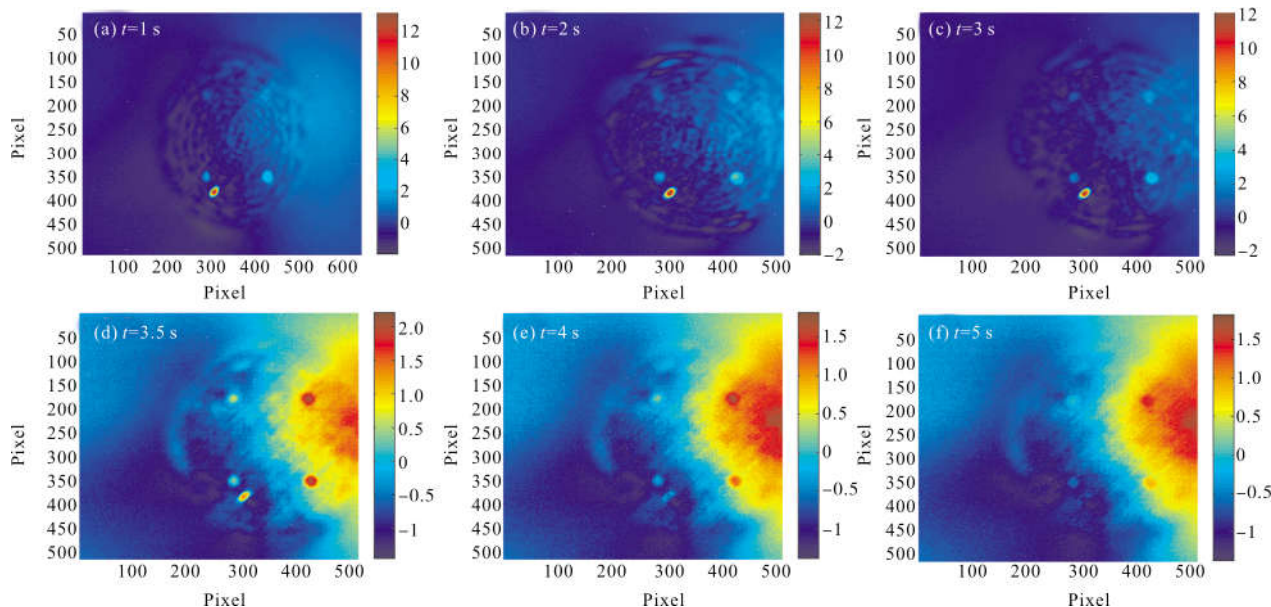


图 6 不同加热时刻热像图差动处理结果

Fig.6 Differential processing results of thermal imaging at different heating time

从图中可清晰看出激光光斑能量分布不均的影响得到明显的减弱, 两处被激光光斑所覆盖的缺陷也明显显露出来。在温度上升阶段, 随着加热时间的增长, 缺陷信息显露得愈发明显。而温度下降阶段的图像处理结果, 明显与温度上升阶段结果相反, 温度下降时间越短则缺陷显露得越明显。虽然已经能够明显识别出缺陷, 但是缺陷的边缘仍然比较模糊, 因此仍需对缺陷信息进行提取, 使得缺陷边缘更为清晰。

2.3 差动式激光红外热成像检测能力评估

评估对航空复合材料内部缺陷的检测能力, 还应当对其内部缺陷做定量测量。为准确评估差动式激光红外热成像技术对航空复合材料层合板内部缺陷的检测能力, 在减小激光光斑影响的热像图中选取温度最大时刻的热像图作为缺陷提取及分割的对象。

利用阈值对图像进行分割是目前应用较为广泛的方法。在得到图像中温差最值的情况下, 采用循环迭代的方法求得较好的分割效果的阈值, 对原

始差动结果热像图进行缺陷分割。热像图分割的结果如图 7 所示。

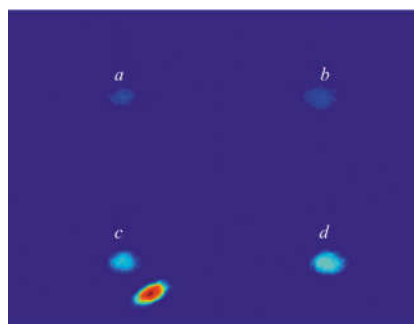


图 7 缺陷分割结果

Fig.7 Defect segmentation result

从分割的结果中可以看出, 缺陷 a 和 b 缺陷范围明显要比缺陷 c 和 d 小许多。这是因为其埋深达到 1.125 mm, 而缺陷 c 和 d 的埋深在 0.75 mm, 从而使得较深缺陷导致的表面温差更小, 分割后所得的温度差异范围小于埋深较浅的缺陷。

利用试件与热像仪间的空间位置关系, 测出实

际缺陷大小与像素计算得出的直径间的关系。缺陷直径可由以下公式获得：

$$l=L \times \frac{b_0}{b} \quad (2)$$

式中： l 为测量得到的分层缺陷直径； L 为在镜头内的试件部分长度； b_0 为测量得到的缺陷直径方向像素差，而 b 则为试件长度方向像素差。对同一缺陷区域进行三次加热采集热像数据并进行图像分割处理，经过不同时刻结果对比分析选取温度最大时刻的热像图作为测量缺陷直径的数据源，将三次计算得到的直径取均值作为缺陷直径，如表 2 所示。

表 2 缺陷测量计算结果

Tab.2 Defect measurement calculation results

Defect number	Mean diameter/mm	Actual value/mm	Deviation
a	3.576	4	-10.6%
b	4.672	5	-6.56%
c	4.328	4	8.20%
d	5.583	5	11.66%

由表内数据看出：在同一深度处，缺陷的直径越大，测量值与真实值间的误差越大，不同深度时，随着深度的增加，检测效果变得越来越差，同时计算得到的缺陷直径与真实直径的误差更小且误差数据出现负值，这可能是由于激光能量分布不均所导致，同时缺陷的埋深也可能是造成此种结果的影响因素之一。

3 结 论

采用差动式激光红外热成像技术对航空碳纤维复合材料内部分层缺陷进行检测研究，实验结果表明，其具有以下两种优势：

(1) 利用激光作为红外热成像检测技术的热激励源，准确实现对试件的区域定位检测，同时激光能量分布更易于调节以及实现长距离检测。

(2) 采用差动式激光红外热成像检测，可以有效的消除激光光斑能量分布不均造成覆盖部分缺陷信息，而难以显示出全部缺陷的情况。通过差动处理，将原始热像图温差分布转化成缺陷试件与参考试件

的差动温差分布热像图，使得缺陷信息在消除激光光斑后更为清晰且更多地显现出来。

利用激光作为主动激励，采用差动式激光红外热成像技术对碳纤维增强复合材料内部预置缺陷进行检测，能够高效、快速且准确地检测出材料内部的分层，且其缺陷大小与实际大小的差距较小，检测精度较高。

参 考 文 献：

- [1] Huo Yan, Zhang Cunlin. Quantitative infrared prediction method for defect depth in carbon fiber reinforced plastics composite[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(14): 199-205. (in Chinese)
霍雁, 张存林. 碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外测量[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 199-205.
- [2] Ruben Usamentiaga, Pablo Venegas, Jon Guerediaga. Review: infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing[J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 12305-12348.
- [3] Wang Dongdong, Zhang Wei, Jin Guofeng, et al. Application of cusp catastrophic theory in image segmentation of infrared thermal waving inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 1009-1015. (in Chinese)
王冬冬, 张炜, 金国峰, 等. 尖点突变理论在红外热波检测图像分割中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 1009-1015.
- [4] Yang Ruizhen, He Yunze. Optically and non-optically excited thermography for composites: a review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 75: 26-50.
- [5] Everton S, Dickens P, Tuck C. Using laser ultrasound to detect subsurface defects in metal laser powder bed fusion components[J]. *JOM*, 2018, 70(3): 378-383.
- [6] Zhan Xiaohong, Li Yun, Gao Chuanyun. Effect of infrared laser surface treatment on the microstructure and properties of adhesively CFRP bonded joints [J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 106: 398-409.
- [7] Liu Haochen, Pei Cuixiang, Qiu Jinxing. Inspection of delamination defect in first wall panel of tokamak device by using laser infrared thermography technique [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018(9): 1-9.
- [8] Qiu Jinxing, Pei Cuixiang, Liu Haochen. Quantitative evaluation of surface crack depth with laser spot thermography [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 101: 80-85.

- [9] Wu Enqi, Shi Yufang, Li Meihua, et al. In-plane thermal conduction of woven carbon fiber reinforced polymers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (7): 0703004. (in Chinese)
吴恩启, 石玉芳, 李美华, 等. 编织碳纤维复合材料平面内热传导规律研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0703004.
- [10] Ahmed Kbouri, Abdelhamid Khabbazi, Hussein Youlal. Applied multiresolution analysis to infrared images for defects detection in materials [J]. *NDT and E International*, 2017, 92: 38-49.
- [11] Sam Ang Keo, Franck Brachelet, Florin Breaban. Defect detection in CFRP by infrared thermography with CO₂ Laser excitation compared to conventional lock-in infrared thermography[J]. *Composites: Part B*, 2015, 69: 1-5.