

〈无损检测〉

# 线激光扫描热成像无损检测参数有限元仿真分析

谭 丹, 张志杰, 王禄祥, 王丁迺恺

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 038507)

**摘要:** 为进一步研究线激光扫描红外热成像无损检测技术, 探究检测过程中可调参数及被检材料参数对热成像结果的影响, 以获取最佳缺陷检测效果。本文使用 COMSOL 软件建立线激光扫描碳纤维复合材料的有限元分析模型, 选取缺陷中心处及无缺陷处表面最大温差作为衡量检测效果的特征量, 分析线激光长度、缺陷大小及缺陷深度对 CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastics) 热成像结果的影响规律, 并分别对 3 个参数与检测效果的关系进行拟合。研究可为搭建激光扫描热成像检测系统和制定准确可靠的检测标准提供参考。

**关键词:** 线激光扫描热成像; CFRP; 无损检测; COMSOL 仿真; 参数分析

**中图分类号:** TN219      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2025)01-0121-09

## Finite Element Simulation Analysis of Nondestructive Testing Parameters in Line Laser Scanning Thermal Imaging

TAN Dan, ZHANG Zhijie, WANG Luxiang, WANG Dingerkai

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 038507, China)

**Abstract:** To further study the nondestructive testing technology of line laser scanning IR thermography, the effects of adjustable parameters and tested material parameters on the thermal imaging results was explored to obtain the best defect detection results. COMSOL software was used to establish a finite element analysis model of line laser scanning carbon fiber composite materials, and the maximum surface temperature difference between the defect center and non-defect area was selected as the characteristic quantity to measure the detection effect. The influence of the linear laser length, defect size, and defect depth on the thermal imaging results of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) was analyzed, and the relationship between the three and the detection effect was fitted. This study provides a reference for the establishment of a laser scanning thermal imaging detection system and accurate and reliable detection standards.

**Key words:** line laser scanning thermal imaging, CFRP, non-destructive testing, COMSOL simulation, parameter analysis

### 0 引言

碳纤维复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 由碳纤维和环氧树脂结合而成, 具有高强度、低密度、耐腐蚀、耐高温、耐疲劳等众多优异性能, 目前已广泛应用于航空航天<sup>[1-2]</sup>、土木工程<sup>[3]</sup>、汽车<sup>[4]</sup>和油田<sup>[5]</sup>等领域。然而在工艺制作及材料使用的过程中极易出现各种损伤, 影响材料的各项性能。

为了保证材料的使用安全, 有必要对 CFRP 进行损伤检测。CFRP 损伤检测方法主要有破坏性检测及无损检测两种<sup>[6]</sup>。破坏性检测方法, 顾名思义, 就是在检测过程中会对材料造成二次损伤, 这显然不是我们想要的结果。因而, 为保证被检材料结构的完整性, 主要使用无损检测技术, 即采用非破坏手段对材料进行缺陷检测。

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2024-05-15.

作者简介: 谭丹 (1997-), 女, 四川南江人, 硕士研究生, 主要从事红外热成像缺陷检测、图像处理方面的研究。E-mail: tandan97319@163.com.

通信作者: 张志杰 (1965-), 男, 山西五台人, 教授, 博士生导师, 主要从事动态测试理论与信号处理、动态误差及不确定度等方面的研究。

E-mail: zhangzhijie@nuc.edu.cn.

激光扫描热成像无损检测方法作为一种新型红外热波无损检测技术,具有检测面积大、响应速度快、检测结果直观、适用范围广等优点,因而被广泛地应用到复合材料的检测中。2011 年 S.E. Burrows 等<sup>[7]</sup>使用线激光扫描热成像方法来检测表面裂纹缺陷,利用激光对 304 不锈钢和铝板样品进行检测,实验结果表明该方法可以有效检测到涂层下的裂纹。2019 年 Jiacheng Wei 等<sup>[8]</sup>使用激光阵列热成像扫描技术,对 CFRP 的亚表面分层与脱粘情况进行了检测,为减少横向热扩散的中断,提出了一种相似光流算法,提高了缺陷检测效率。2019 年杨正伟等<sup>[9]</sup>搭建了激光扫描热成像仿真模型,研究了样品材料、缺陷大小、缺陷深度、激光扫描速度和激光扫描功率对检测的影响。2021 年何志艺等<sup>[10]</sup>对联动扫描热成像近似模型进行了理论和实验分析,从面型激励一维热传导模型推导出线型激光扫描激励的近似模型,发现了线型激光扫描激励近似模型与面型脉冲激励模型非常接近。2022 年李胤等<sup>[6]</sup>总结了常用的 CFRP 无损检测方法,综述了主动热成像技术和被动热成像技术在 CFRP 损伤演化规律中的研究现状,同时根据各自检测机理及条件的不同,分别探讨了其在 CFRP 损伤热成像检测中的适用性。2023 年王禄祥等<sup>[11]</sup>利用有限元仿真模型分析了 CFRP 检测过程中线激光扫描方向、扫描速度及激光功率等参数对检测效果的影响。

以上对线激光扫描热成像检测原理及提高成像检测能力的方法作了大量的研究,而对检测过程中线激光长度、缺陷尺寸对系统检测结果产生的影响研究较少。本文基于热传导理论,建立了热成像扫描碳纤维复合材料仿真模型,研究检测参数对成像效果的影响规律。与文献[5]和文献[9]不同,本文通过 COMSOL 软件仿真了线激光扫描 CFRP 热成像过程,研究成像过程中检测参数对成像结果的影响。与文献[8]相比,本文工作的不同之处在于检测材料不同,分析了缺陷大小及缺陷深度变化对碳纤维复合材料检测结果的影响,着重分析了线激光长度对缺陷检测结果的影响。

文章针对 CFRP 的检测,分析了线激光激励条件下材料内部的热传导以及表面温度场的分布;使用 COMSOL 软件搭建线激光扫描热成像检测模型;以材料表面的最大温差作为评价检测效果好坏的特征量,提出了线激光长度、缺陷大小及缺陷深度 3 个可能影响成像效果的检测参数,研究参数变化对检测结果的影响规律并进行关系曲线拟合;最后,出于对实际情况应用的考量,缺陷检测要考虑检测效率和检测效果二者的结合,总结了参数的选取原则。

## 1 相关原理

红外热波无损检测技术主要基于传热学理论。传热学是研究热量传递规律的一门学科。热力学第二定律指出,在一个物体内部或物系之间,只要有温差存在,热量总是自发地从高温区传向低温区<sup>[12]</sup>。这种由温差引起的能量传递过程称为热传递,包含 3 种基本方式:热传导、热对流和热辐射。在红外热波无损检测中,影响材料表面温度分布的主要原因是热辐射和热传导<sup>[13]</sup>。

### 1.1 热辐射

由于物体具有温度而向外辐射电磁波的现象称为热辐射<sup>[14]</sup>。自然界中,任何绝对温度大于 0 K 的物体,都在不断向外辐射电磁波,且温度越高,辐射能力越大。辐射力为单位时间内单位面积的物体向周围半球空间内所有方向发射出去的所有波长的辐射能的总和。热辐射公式如下:

$$q = \varepsilon \delta (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

式中:  $\delta \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。  $q$  为单位面积热流密度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\varepsilon$  为发射率;  $\delta$  为斯提芬波尔赫兹常数;  $T_1$ 、 $T_2$  分别为辐射表面 1 和 2 的绝对温度, K。由上式可知:辐射力的大小由温度大小和物体表面材料属性决定。

### 1.2 热传导

物体各部分间不发生相对位移,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的随机热运动而产生的热量传递称为热传导。三维热传导微分方程形式<sup>[15]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q \quad (2)$$

式中:  $T$  为温度增量, K;  $t$  为时间, s;  $\rho$  为材料密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c$  为材料的比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为材料在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $q$  为材料内部热源在单位时间内单位体积产生的热量,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。该微分方程表明:物体内部的温度增量等于该物体从各方向吸收的热量与自身产生的热量之和。

对于均匀、各向同性且无内热源的材料,即  $k_x = k_y = k_z = k$ ,  $q = 0$ , 微分方程形式为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为热扩散系数,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 可表示为:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (4)$$

### 1.3 线激光激励下的热传导

线激光扫描检测模型如图1所示,使用激光对材料表面施加连续的热流。假设激光在垂直于传播方向( $z$ 方向)的 $oxy$ 平面上呈椭圆形,并以速度 $v$ 沿 $x$ 轴正向移动。假设 $x$ 、 $y$ 两个方向上的激光强度分布服从高斯分布。对于连续加热的高斯形状椭圆光斑,当长轴半径值 $r_y$ 远大于短轴半径值 $r_x$ 时,其接近线源。定义线激光长度 $l=2r_y$ ,线激光半径为 $r_x$ 。激光强度分布为式(5)<sup>[16-17]</sup>:

$$I = \frac{P}{2\pi r_x r_y} (1-R) \exp\left(-\frac{x^2}{2r_x^2} - \frac{y^2}{2r_y^2}\right) * \exp(-\beta z) \quad (5)$$

式中: $P$ 为总入射功率; $r_x$ 为激光椭圆光斑短轴半径值; $r_y$ 为椭圆光斑长轴半径值。 $R$ 为被照射材料的反射系数; $\beta$ 为材料对激光的线性吸收系数 $\beta=4\pi k/\lambda$ ,其中 $k$ 为消光系数, $\lambda$ 为激光波长。

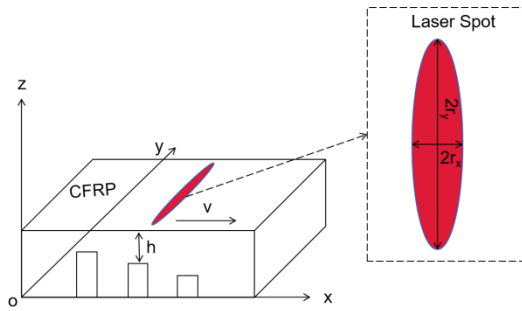


图1 线激光扫描检测模型

Fig.1 Line laser scanning detection model

定义坐标系:三维笛卡尔坐标系坐标点 $(x_0, y_0, z_0)$ 为材料表面的激光中心,激光椭圆形光斑的短轴和长轴分别指向 $x$ 方向和 $y$ 方向。激光束的传播方向为 $z$ 方向(垂直于材料表面)。当线激光以速度 $v$ 沿 $x$ 方向上运动时,激光吸收率为:

$$Q(x, y, z, t) = -\frac{dI}{dz} = \frac{P}{2\pi r_x r_y} \beta (1-R) * \exp\left[-\frac{(x-x_0-vt)^2}{2r_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2r_y^2}\right] * \exp[-\beta(z-z_0)] \quad (6)$$

式(6)表明,能量吸收率在 $z$ 方向呈指数衰减。

本研究中,输入的能量被认为是通过材料表面的热通量,而不是在 $z$ 方向上呈指数衰减的光吸收。该热流密度模型中,式(2)中的产热率为零,激光能量通过表面热流密度传递到材料表面。由于对流损失不显著,我们忽略材料表面的对流热损失,只考虑表面对环境的辐射,假设材料其他面的温度位于环境温度。相应的边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \varepsilon \delta (T_1^4 - T_2^4) + A_b \frac{P}{2\pi r_x r_y} * \exp\left[-\frac{(x-x_0-vt)^2}{2r_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2r_y^2}\right] \quad (7)$$

式(7)中: $A_b$ 为材料表面的吸收率,由经验确定: $\varepsilon=A_b$ 。对于不透明材料表面有 $R+A_b=1$ 。

为了研究线激光长度 $l=2r_y$ 变换对检测效果的影响,这里我们假设 $r_x$ 不变,则 $r_y$ 越大,激光能量密度越小,也就是线激光长度 $l$ 越大,激光能量密度越小。因此,可以得出:线激光长度越长,激光能量传递到材料表面的热流密度越小。

## 2 模型建立

本文基于COMSOL Multiphysics 5.6多物理场仿真软件平台建立物理模型。首先建立一个CFRP试样模型,并在检测试样上施加激光热激励源。图2为简化的CFRP热成像缺陷检测的物理模型。其中,长方体为CFRP层合板,内部的圆柱为缺陷, $D$ 为圆柱的直径,即缺陷直径, $h$ 为圆柱上表面到长方体上表面的距离,也即缺陷深度, $Q(t)$ 为激励热源。

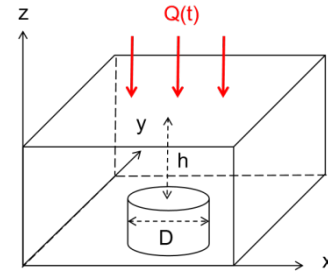


图2 CFRP热成像缺陷检测物理模型

Fig.2 Physical model of CFRP thermal imaging defect detection

### 2.1 物理模型

基于上述简化模型建立CFRP层板结构模型。CFRP层板几何形状及圆柱形空洞空间分布位置如图3(a)所示。圆柱形空洞为圆形平底孔缺陷,设置在板子底部,用来模拟实际缺陷。在尺寸为 $150\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的几何模型中分布8个不同的平底孔缺陷,第一行的4个缺陷直径相同、深度不同,缺陷直径 $D$ 均为 $10\text{ mm}$ ,缺陷深度 $h$ 分别为 $0.5\text{ mm}$ 、 $1\text{ mm}$ 、 $2\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}$ ;第二行的4个缺陷深度相同、直径不同,缺陷深度 $h$ 均为 $1\text{ mm}$ ,缺陷直径 $D$ 分别为 $3\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $15\text{ mm}$ 。毋庸置疑,网格划分尺寸越小,计算精度越高。但实际上网格划分并不是越细越好,因为网格划分过于密集,处理的数据量也越庞大,所需计算时间也就越长。因此,应根据具体需求权衡取舍,选择合适的网格密度以及形状,以兼顾计算精度与计

算速度。本文采用自由四面体网格进行划分，单元大小选择较细化，并在缺陷处进行加密，几何模型网格分割结果如图 3(b)所示。

仿真研究对象为碳纤维复合材料，缺陷内部填充空气，碳纤维复合材料的建模材料参数见表 1。

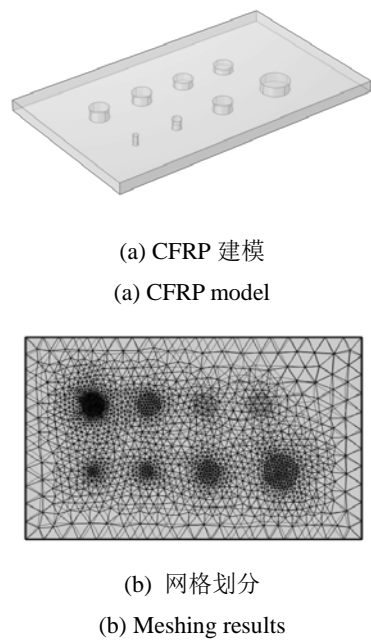


图 3 COMSOL 仿真建模和网格划分结果

Fig.3 Results of COMSOL simulation modeling and mesh division

表 1 材料属性参数

Table 1 Material property parameters			
Properties	Density $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Specific heat capacity $c/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	Thermal conductivity $k/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$
CFRP	1536	865	$k_x=4.2$ $k_y=0.56$ $k_z=0.56$
Air	1.186	1005	0.0261

2.2 边界条件

为对建模过程进行简化，在做激光加热的时候，对于热源的设定往往采用表面热源和体热源两种情况。而表面热源适用于在具有特定波长的激光的照射下，材料为不透明或几乎不透明的情况，这个时候我们将激光看作表面热源，不计算光场。通过函数定义热源分布、输出功率、作用时间、焦点位置以及光斑内能量分布，从而实现线激光扫描 CFRP 缺陷板的动态过程。

假设试样处于绝热环境，忽略侧边对流和辐射，将激励热源作为边界条件施加在材料表面，则初始条

件及边界条件如下：

初始条件： $T|_{t=0}=T_{\text{amb}}=20^{\circ}\text{C}$

边界条件：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=\varepsilon\delta(T^4-T_{\text{amb}}^4)+q$$

(8)

式(8)中： $k$  为导热系数； $\frac{\partial T}{\partial n}$  为温度沿表面外法线方向的偏导数； $\varepsilon$ 为材料表面辐射率； $\delta$ 为斯特潘玻尔兹曼常数； $T$ 为材料表面温度； $T_{\text{amb}}$  为环境温度； $q$  为激光热通量，服从高斯分布。

3 结果与分析

3.1 传热仿真结果

模型在  $t=16\text{s}$  时，CFRP 表面热分布图如图 4 所示。可以看出第二列缺陷中第一行的缺陷温度高于第二行，第三列缺陷中第一行的缺陷温度小于第二行。这是因为第二列缺陷中第一行缺陷的直径更大，第三列的缺陷中第一行的缺陷深度更深。选取缺陷中心点表面温度与较远处无缺陷区域表面参考点的温差作为衡量检测效果好坏的物理量。

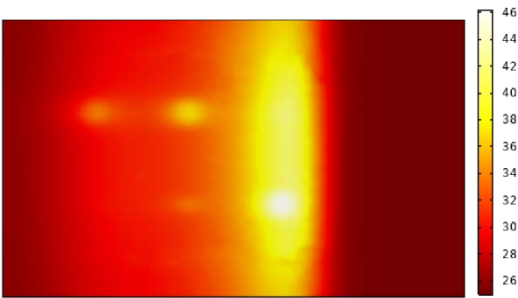


图 4  $t=16\text{s}$ ，CFRP 表面温度分布

Fig.4  $t=16\text{s}$ , surface temperature distribution of CFRP

设定参数：线激光长度为  $24\text{mm}$ ，输出功率为  $30\text{W}$ ，初始加热位置坐标(15, 30, 6)，扫描方向沿  $x$  轴正方向，扫描速度为  $5\text{mm}/\text{s}$ ，进行仿真，得到线激光加热后部分时刻的材料板表面温度分布，如图 5 所示。从图中看出， $t=0\text{s}$  时，线激光位于起始点，开始扫描加热； $t=2\text{s}$  时，线激光未到达缺陷区域，而此时已经能检测到缺陷，这与线激光能量分布以及材料中发生的热扩散有关； $t=3\text{s}$  时，线激光扫描至缺陷中心， $D=10\text{mm}$ ， $h=0.5\text{mm}$  的缺陷表面温度差异明显， $D=3\text{mm}$ ， $h=1\text{mm}$  的缺陷表面温度差异不明显； $t=6\text{s}$  时，激光到达无缺陷区域， $D=10\text{mm}$ ， $h=0.5\text{mm}$  的缺陷此时处于散热过程，缺陷检测效果好； $t=9\text{s}$  时，激光到达第二列缺陷中心， $D=10\text{mm}$ ， $h=1\text{mm}$  与  $D=5\text{mm}$ ， $h=1\text{mm}$  的缺陷处于加热过程，表面温度差异不明显； $t=15\text{s}$  时，激光扫描至  $D=10\text{mm}$ ， $h=2$



mm、1 mm 缺陷中心， $h=1\text{ mm}$  的缺陷温度变化更明显，视觉效果更好； $t=27\text{ s}$  后，激光停止加热，缺陷进入降温阶段；从  $t=49、60\text{ s}$  看出，随着热量的扩散，材料板最高温度逐渐减小，缺陷处积累的热量逐渐扩散至无缺陷处，两区域温度差异减小，难以检测出缺陷。仿真结果表明：线激光 CFRP 扫描热成像技术能够检测出平底孔缺陷；缺陷直径大、深度浅的缺陷更容易被检测出；缺陷检测效果最佳的时机处于散热前期的时间段内；降温阶段后期的热量分布沿  $x$  轴（纤维方向）方向扩散范围大，沿  $y$  轴方向扩散范围小。

3.2 缺陷大小对检测效果的影响

设定仿真参数：激光初始加热位置坐标(15,30,6)，激光功率 30W，线激光半径 12mm，扫描方向沿  $x$  轴正方向，扫描速度 5mm/s。为表现温升全过程，从线激光扫描至缺陷中心处 3 s 前分别采集  $h=1\text{ mm}$ ， $D=$

3 mm、5 mm、10 mm、15 mm 缺陷中心温度数据，得到不同缺陷大小表面温度及温差曲线如图 6、7 所示。

从图 6 中可以看出，随着缺陷直径的增大，缺陷中心表面温升增大，温升曲线达到最高值的时间基本一致，且缺陷处的温升高于无缺陷区域。这主要是因为圆形平底孔缺陷内部填充的空气介质的导热系数小于 CFRP 材料的导热系数。当线激光对材料表面进行加热时，材料表面的热量会向下扩散，当遇到圆形平底孔时，热量除了向下扩散还会反射回材料表面，并重复此过程。材料表面的温度得到加强，出现温升过程。而无缺陷区域的热量会持续向下扩散，反射回表面的热量较少，故缺陷表面温升会高于无缺陷区域。在缺陷深度一致的情况下，缺陷尺寸越大，这种阻碍热量传导的作用越强，因此得到的表面最大温升越高。

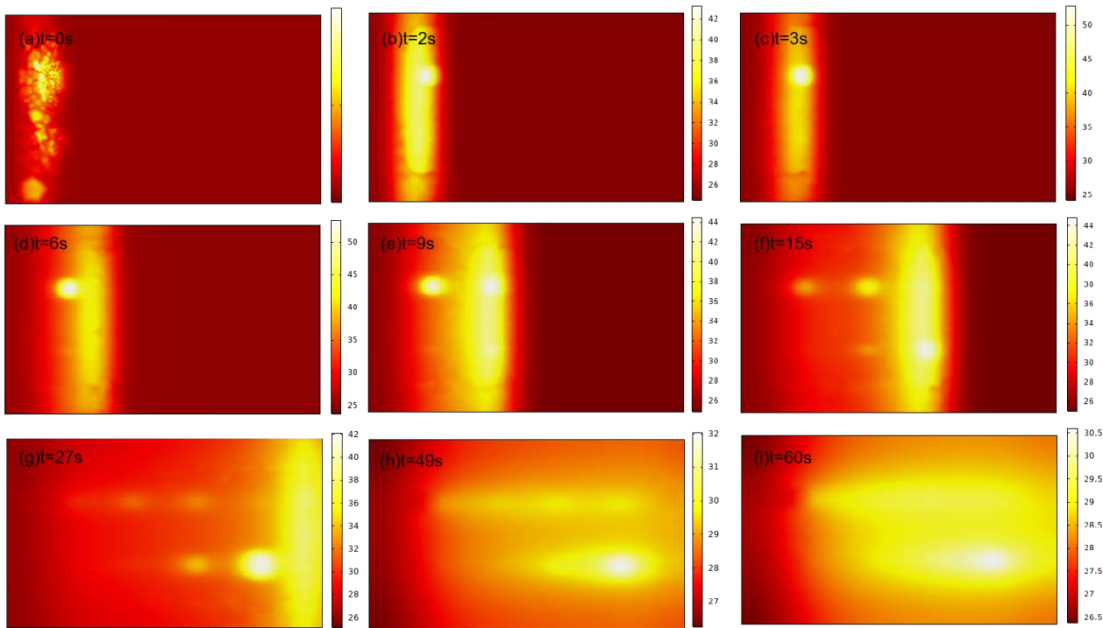


图 5 线激光加热后部分时刻材料表面温度分布

Fig.5 Temperature distribution of material surface at some time after linear laser heating

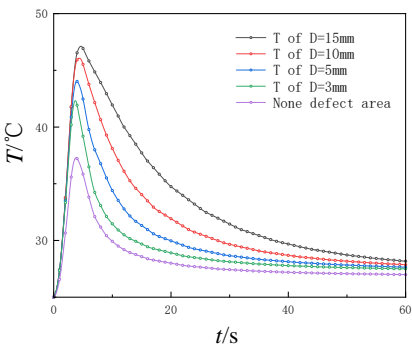


图 6 不同缺陷大小表面温度

Fig.6 Surface temperature diagram of different defect sizes

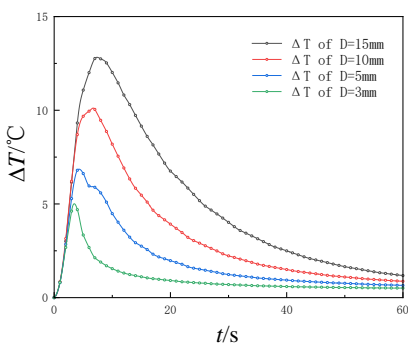


图 7 不同缺陷大小表面温差

Fig.7 Surface temperature difference of different defect sizes

由图 7 可以看出,随着缺陷直径的增加,缺陷表面最大温差也越高,且达到峰值的时间越迟。观察 4 条曲线的分布结合仿真计算数据进行分析:在加热前 3 s, 4 条曲线基本重合,缺陷大小对检测效果的影响较小;之后 4 条曲线分离,温差曲线向上增长,分别达到各自的峰值(12.76℃、10.04℃、6.79℃、4.69℃)后下降;到 20s 时,温差分别为 6.75℃、3.92℃、1.97℃、0.91℃,从 3~20s 的过程,温差曲线差异明显,缺陷尺寸对缺陷表面温差的影响大;随后曲线差异缩小,直至重合。而不同尺寸的缺陷达到温差峰值的时间不同,这是因为有缺陷和无缺陷区域温度下降速度的差异。有缺陷区域温度下降速度小于无缺陷区域,且缺陷越大,温度下降速度越慢。因此,可以得出,缺陷尺寸越大,缺陷表面最大温差越大,温差持续时间越长,检测效果越好,越有利于缺陷的检测。

为了消除量纲的影响,使数据处于同一数量级,将其进行归一化处理,转换关系见表 2。对表 2 中的数据进行拟合,拟合结果如图 8。关系式如式(9):

$$y = 0.9764e^{0.0195x} - 0.007834e^{-2.162x}$$

(9)

表 2 缺陷直径与最大温差数据转换表

Table 2 Data conversion table of defect diameter and maximum temperature difference

Defect diameter $D/\text{mm}$		Maximum temperature difference $\Delta T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	
Original value	Normalized value( $x$ )	Original value	Normalized value( $y$ )
15	1	46.92	1
10	0.6667	45.92	0.9787
5	0.3333	44.013	0.938
3	0.2	41.912	0.83999

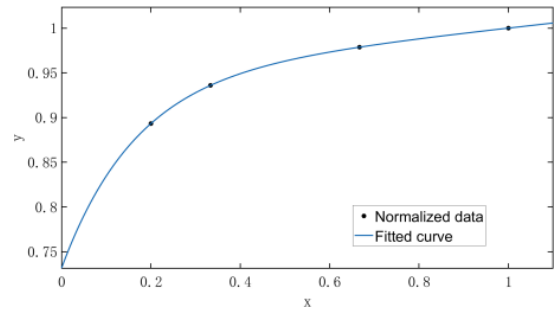


图 8 缺陷直径与最大温差拟合图

Fig.8 Fitting diagram of defect diameter and maximum temperature difference

从拟合结果可以看出:缺陷直径越大,材料表面最大温差越大,且随着直径的增加,相同增量的缺陷

直径,导致的表面最大温差增加的幅度越小。也就是说越小的缺陷,缺陷直径的变化对表面最大温差的影响越大,检测灵敏度越高。

3.3 缺陷深度对检测效果的影响

设定仿真参数:激光初始加热位置坐标(15,60,6),激光功率为 30 W,线激光半径为 12 mm,扫描方向沿  $x$  轴正方向,扫描速度为 5 mm/s。为表现温升全过程,从线激光扫描至缺陷中心处 3 s 前分别采集  $D=10$  mm,  $h=0.5$  mm、1 mm、2 mm、3 mm 缺陷中心温度数据,得到不同缺陷深度表面温度及温差曲线如图 9、10 所示。

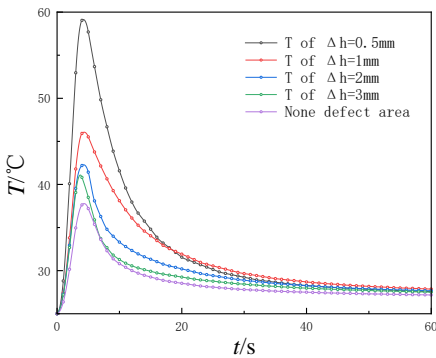


图 9 不同缺陷深度表面温度图

Fig.9 Surface temperature of different defect depths

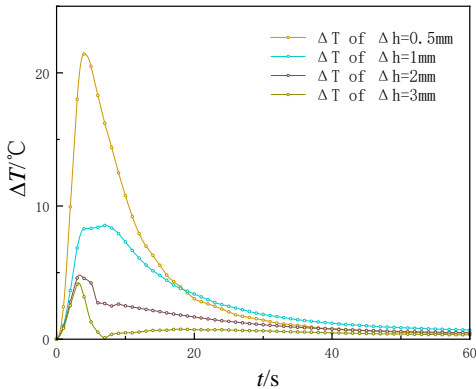


图 10 不同缺陷深度表面温差图

Fig.10 Surface temperature difference map of different defect depths

观察图 9、10 可以发现,曲线变化趋势与缺陷尺寸相反,即缺陷深度值越小,缺陷中心处的表面最大温升越大,缺陷与非缺陷区域的表面最大温差值也越大,越有利于缺陷的检出。对缺陷深度与表面最大温差数据做归一化,数据转换结果见表 3。对表 3 中的数据进行拟合,拟合曲线如图 11。

拟合关系式为:

$$y = 3.331e^{-8.752x} + 0.2331e^{-0.1952x}$$

(10)

比较相同增量缺陷深度对应的温差变化:取不同深度的缺陷,施加同一深度增量,发现深度越浅的缺

陷,最大温差下降幅度越大。即深度较浅缺陷的深度变化对温差的影响较大,缺陷深度微小变化引起的表面最大温差变化显著;深度越深的缺陷深度变化,其表面最大温差变化不明显,故激光加热热成像方法不利于检测较深的缺陷。

表3 缺陷深度与最大温差数据转换

Table 3 Data conversion table of defect depth and maximum temperature difference

Defect depth $h/\text{mm}$		Maximum temperature difference $\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	
Original value	Normalized value ( $x$ )	Original value	Normalized value ( $y$ )
3	1	4.118	0.1923
2	0.6667	4.591	0.2144
1	0.3333	8.535	0.3986
0.5	0.1667	21.411	1

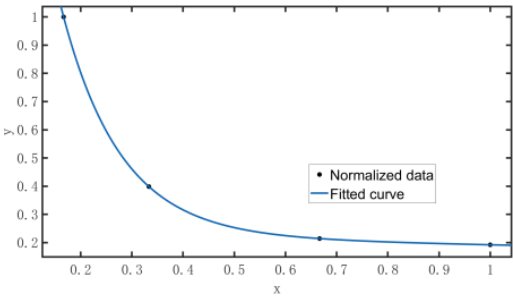


图11 缺陷深度与最大温差拟合图

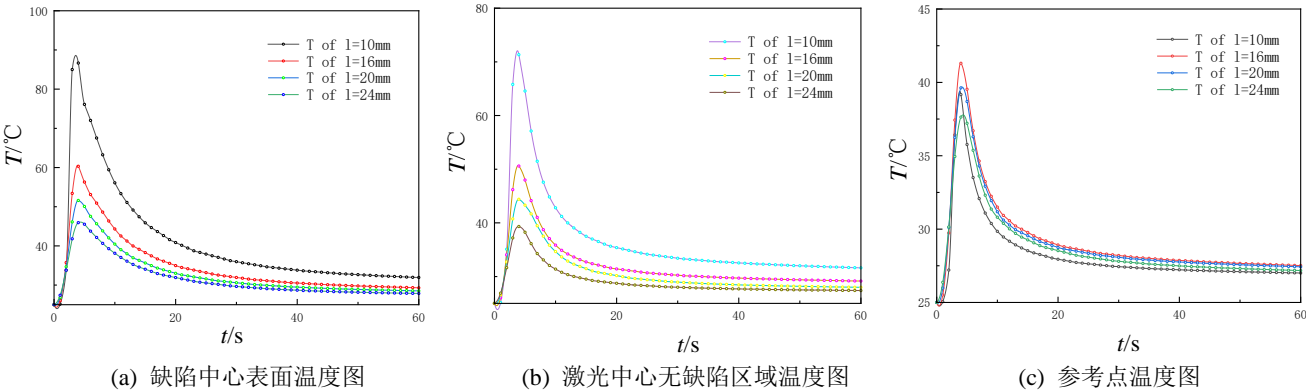
Fig.11 Fitting diagram of defect depth and maximum temperature difference

3.4 线激光长度对检测效果的影响

以直径  $D=10\text{ mm}$  深度  $h=1\text{ mm}$  的平底孔缺陷为例,设定仿真参数:激光功率为  $30\text{ W}$ ,扫描方向沿  $x$  轴正方向,扫描速度为  $5\text{ mm/s}$ 。为表现温升全过程,从线激光扫描至缺陷中心处  $3\text{ s}$  前分别采集线激光长度  $l=10\text{ mm}$ 、 $16\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$ 、 $24\text{ mm}$  缺陷中心温度

数据。不同线激光长度表面温度图如图12所示。

观察图12(a)看出,线激光直径越大,缺陷中心表面温度越低。为排除缺陷的影响,进一步采集无缺陷区域激光中心温度分布数据,如图12(b)所示,温度曲线变化趋势与图12(a)一致。由此可以得出,线激光长度越长,激光中心温度越低。参考点处温度分布数据如图12(c)。图12(c)中,线激光长度为  $16\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$ 、 $24\text{ mm}$  时,参考点温度峰值随线激光长度的增加而减小,线激光长度为  $10\text{ mm}$  时,其温度峰值小于长度为  $16\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$  的线激光温度峰值,大于长度为  $24\text{ mm}$  的线激光温度峰值。为进一步探究线激光长度对参考点温度的影响规律,分别采集  $l=8\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm}$ 、 $14\text{ mm}$  参考点温度数据如图13。由图可知,此线激光长度条件下,参考点温度曲线变化趋势与图12(c)相反。综合图12(c)、图13数据,线激光直径分别为  $l=8\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm}$ 、 $14\text{ mm}$ 、 $16\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$ 、 $24\text{ mm}$  时,对应的最大温升分别为  $T_{\max}=33.812^{\circ}\text{C}$ 、 $39.163^{\circ}\text{C}$ 、 $41.974^{\circ}\text{C}$ 、 $42.843^{\circ}\text{C}$ 、 $41.3^{\circ}\text{C}$ 、 $39.624^{\circ}\text{C}$ 、 $37.631^{\circ}\text{C}$ 。可以观察到:当  $l$  小于  $12\text{ mm}$ ,随着长度的增加,最大温升增加; $l$  大于  $16\text{ mm}$ ,随着长度的增加,最大温升下降; $l=14\text{ mm}$  的最大温升大于  $l=12\text{ mm}$  和  $l=16\text{ mm}$  的最大温升。因此,必然存在一个零界点  $l_0$  位于  $12\sim16\text{ mm}$ ,使得:  $l<l_0$  时,  $l$  增大,  $T_{\max}$  增大;  $l>l_0$  时,  $l$  增大,  $T_{\max}$  减小。参考点最大温升出现转折的原因可能是:当线激光直径过小,小于一个临界值  $l_0$ ,参考点距离热源较远,热量不足以扩散至参考位置,这个时候,线激光直径越大,参考点距离热源越近,最高温度也就大;而当激光直径足够大,大于临界值  $l_0$ ,热源热量足以扩散至参考位置,参考点的温度变化趋势与线激光中心一致,即随着激光直径的增加,参考点最大温升值减小。



(a) 缺陷中心表面温度图 (b) 激光中心无缺陷区域温度图 (c) 参考点温度图  
(a) Surface temperature diagram of the defect center (b) Temperature map of the defect free region in the laser center (c) Reference point temperature map

图12  $l=10\text{ mm}$ 、 $16\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$ 、 $24\text{ mm}$  表面温度图

Fig.12  $l=10\text{ mm}$ ,  $16\text{ mm}$ ,  $20\text{ mm}$ ,  $24\text{ mm}$  surface temperature diagram

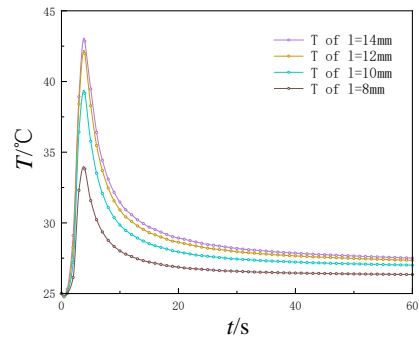
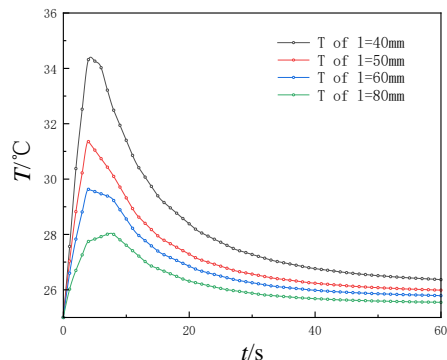


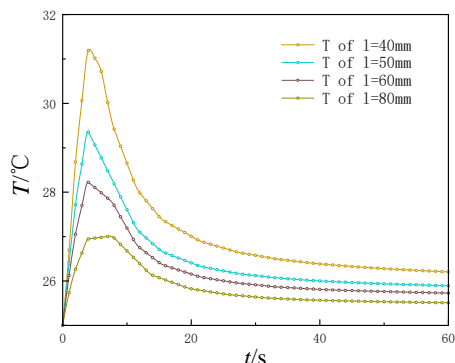
图 13  $l=8\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm}$ 、 $14\text{ mm}$  参考点表面温度图  
Fig.13 Surface temperature diagram of  $l=8\text{ mm}$ ,  $10\text{ mm}$ ,  $12\text{ mm}$ ,  $14\text{ mm}$  reference points

考虑到实际情况，应尽可能大地提升线激光长度以大面积检测缺陷板，从而提升检测效率，我们采集线激光直径分别为  $l=40\text{ mm}$ 、 $50\text{ mm}$ 、 $60\text{ mm}$ 、 $80\text{ mm}$  表面温度及温差数据如图 14、15 所示。由图 15 可知，随着线激光长度的增加，缺陷表面最大温差值越小，检测效果越差。线激光长度与最大温差数据归一化转换表见表 4，拟合曲线如图 16。拟合关系式如下：

$$y = 0.1969e^{-1.208x} + 0.2988e^{-0.07014x} \tag{11}$$



(a) 缺陷中心表面温度图  
(a) Surface temperature diagram of the defect center



(b) 参考点温度图  
(b) Reference point temperature map

图 14  $l=40\text{ mm}$ 、 $50\text{ mm}$ 、 $60\text{ mm}$ 、 $80\text{ mm}$  表面温度图  
Fig.14  $l=40\text{ mm}$ ,  $50\text{ mm}$ ,  $60\text{ mm}$ ,  $80\text{ mm}$  surface temperature diagram

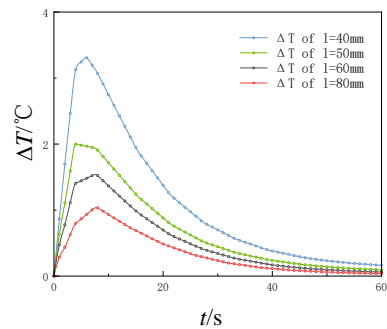


图 15  $l=40\text{ mm}$ 、 $50\text{ mm}$ 、 $60\text{ mm}$ 、 $80\text{ mm}$  表面温差图  
Fig.15  $l=40\text{ mm}$ ,  $50\text{ mm}$ ,  $60\text{ mm}$ ,  $80\text{ mm}$  surface temperature difference map

表 4 线激光长度与最大温差数据转换表

Table 4 Line Laser length and maximum temperature difference data conversion table

Laser length $l/\text{mm}$		Maximum temperature difference $\Delta T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	
Original value	Normalized value(x)	Original value	Normalized value(y)
80	1	1.033	0.3125
60	0.75	1.523	0.4607
50	0.625	2.125	0.6428
40	0.5	3.306	1

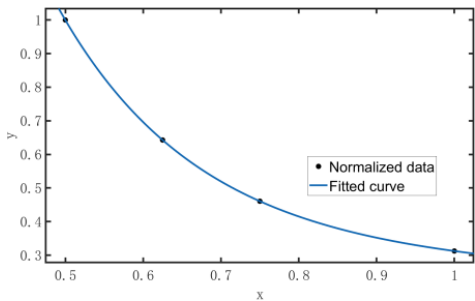


图 16 线激光长度与最大温差拟合图  
Fig.16 Fitting diagram of line laser length and maximum temperature difference

从拟合结果可以看出：激光线长越长，材料表面最大温差越小，且随着线长的增加，相同增量的线激光长度，导致的表面最大温差增加的幅度越小。也就是说越短的线激光线长变化对表面最大温差的影响越大，检测灵敏度越高。这是因为线激光长度越长，激光功率密度越低，故表面温差越小，且检测灵敏度越低。

曲线拟合，是一种把现有数据透过数学方法来代入一条数式的表示方式。拟合的目的是为了寻求现有数据之间的关系，而大部分已获数据点能保证落在这条关系曲线上。本研究，分别对缺陷大小、缺陷深度以及线激光长度与相应的材料表面最大温差数据



进行拟合,得到三者与表征缺陷检测效果好坏的特征量之间的关系。拟合结果为实际应用中参数调整提供方向,根据检测目标,能够快速确定实验参数或调整方针。反过来,该拟合关系也可以通过实际实验得到进一步的验证。

## 4 结论

为了能依据缺陷的特征精准快速地确定检测参数,以减少检测用时,本文对碳纤维复合材料进行了COMSOL有限元固体传热仿真。

首先基于热传导分析理论,提出了缺陷直径、缺陷深度以及线激光长度3个可能影响线激光扫描热成像缺陷检测效果的实验参数。然后,通过建立CFRP层合板物理模型并对材料属性进行参数设置、激光激励信号设置、网格划分来建立行有限元模型。其次,传热参数设置完成后,对其进行传热模拟,得到了不同时刻CFRP表面的温度场分布,给出了不同缺陷直径、不同缺陷深度以及不同线激光长度的情况下,缺陷表面温度及表面温差随时间变化的曲线图。最后,分析仿真所得数据,得出了3个参数对缺陷检测效果的影响规律。

实验结果表明:线激光扫描热成像方法能够检测出碳纤维复合材料的脱粘缺陷,并且处于散热前期阶段的缺陷检测效果较加热阶段及散热后期更明显。线激光长度、缺陷大小及缺陷深度对检测结果有影响,理论上可以得出线激光长度越小,缺陷越大,深度越浅,则检测效果越好。但是,线激光长度不能过小,以保证材料板缺陷的有效检出,具体长度设置应根据被检材料大小以及检测目标的清晰程度综合考虑,在保证清晰度的条件下,应尽可能大地增大线激光长度以增大检测范围(减少扫描总路程)从而提高检测效率。

仿真结果的得出有利于激光扫描热成像检测系统的搭建,进一步确定实验方案中合适的实验参数,也为制定准确可靠的检测标准提供参考。

## 参考文献:

- [1] 江海军, 陈力. 激光扫描热波成像技术及在航空领域的应用[J]. 红外技术, 2018, **40**(6): 618-623.  
JIANG Haijun, CHEN Li. Laser scanning thermal wave imaging technology and its application in aviation field[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(6): 618-623.
- [2] 谷雨. 碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 冶金与材料, 2023, **43**(7): 118-120.  
GU Yu. Research progress of Carbon fiber reinforced polymer composites in aerospace field [J]. *Metallurgy and Materials*, 2019, **43**(7): 118-120.
- [3] 葛自力. 土木工程中碳纤维复合材料的运用研究[J]. 当代化工, 2015, **44**(1): 117-119.  
GE Zili. The use of carbon fiber composites in civil engineering research [J]. *Journal of Contemporary Works*, 2015, **44**(1): 117-119.
- [4] 韩善灵, 王涛, 光新杰, 等. CFRP 在汽车轻量化与安全中的应用进展[J]. 复合材料科学与工程, 2024(2): 119-128.  
HAN Shanling, WANG Tao, GUANG Xinjie, et al. Application of CFRP in automotive lightweight and safety[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2024(2): 119-128.
- [5] 孙微, 贺福. 碳纤维复合材料在海底油田领域中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2009, **34**(2): 35-37, 41.  
SUN Wei, HE Fu. Application of carbon fiber composites in subsea oilfield[J]. *High-tech Fibers and Applications*, 2009, **34**(2): 35-37, 41.
- [6] 李胤, 宋远佳, 刘春华. 基于热成像的 CFRP 损伤检测与演化规律研究综述[J]. 材料导报, 2022, **36**(S1): 184-192.  
LI Yin, SONG Yuanjia, LIU Chunhua. Review of damage detection and evolution of CFRP based on thermal imaging[J]. *Materials Review*, 2022, **36**(S1): 184-192.
- [7] Burrows S E, Dixon S, Pickering S G, et al. Thermographic detection of surface breaking defects using a scanning laser source[J]. *NDT & E International*, 2011, **44**(7): 589-596.
- [8] WEI Jiacheng, WANG Fei, LIU Junyan, et al. A laser arrays scan thermography (LAsST) for the rapid inspection of CFRP composite with subsurface defects [J]. *Composite Structures*, 2019, **226**(6): 1-8.
- [9] 杨正伟, 谢星宇, 李胤, 等. 激光扫描热成像无损检测关键参数影响分析[J]. 红外与激光工程, 2019, **48**(11): 91-101.  
YANG Zhengwei, XIE Xingyu, LI Yin, et al. Influence analysis of key parameters of non-destructive testing by laser scanning thermal imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(11): 91-101.
- [10] 何志艺. 碳纤维复合材料联动扫描激光热成像缺陷检测技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
HE Zhiyi. Study on defect detection technology of carbon fiber composite by laser thermal imaging with linkage scanning[D]. Changsha: Hunan university, 2021.
- [11] 王禄祥, 张志杰, 陈昊泽, 等. 线激光扫描热成像无损检测参数仿真[J]. 红外技术, 2023, **45**(10): 1038-1044.  
WANG Luxiang, ZHANG Zhijie, CHEN Haoze, et al. Parameter simulation of nondestructive testing in line laser scanning thermal imaging[J]. *Infrared Technology*, 2023, **45**(10): 1038-1044.
- [12] 姚仲鹏, 王瑞君. 传热学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.  
YAO Zhongpeng, WANG Ruijun. *Heat Transfer*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [13] 黄雅林. 基于红外热成像的 CFRP 加固混凝土缺陷检测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.  
HUANG Yalin. Research on defect detection of CFRP reinforced concrete based on infrared thermal imaging [D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [14] JIN Guofeng, ZHANG Wei, SHI Jun, et al. Numerical analysis of influencing factors and capability for thermal wave NDT in liquid propellant tank corrosion damage detection[J]. *Measurement Science Review*, 2013, **13**(4): 214-222.
- [15] LI T, Almond P D, Rees S A D. Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, **22**(3): 407-414.
- [16] Nissim Y I, Lietoila A, Gold R B, et al. Temperature distributions produced in semiconductors by a scanning elliptical or circular cw laser beam[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(1): 274-279.
- [17] YU Peng, ZHOU Weidong, YU Shengkai, et al. Laser-induced local heating and lubricant depletion in heat assisted magnetic recording systems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **59**: 36-45.