

激光扫描热成像无损检测关键参数影响分析

杨正伟, 谢星宇, 李胤, 张炜, 田干

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 对一种新型红外热波无损检测技术——激光扫描热成像无损检测技术进行了研究。在深入分析检测机理的基础上建立了激光扫描热成像有限元数值计算模型, 选取缺陷处和非缺陷处表面最大温差作为特征量, 对样品材料、缺陷大小、缺陷深度、激光扫描速度和激光扫描功率等关键参数对激光扫描热成像检测的影响规律进行了仿真和分析, 为该新技术的进一步发展和应用提供了参考; 采用数据拟合方法得出了各参数和表面最大温差关系, 并以此为基础提出了激光扫描热成像技术检测参数控制策略, 实际检测过程中, 可据此针对样品缺陷特征快速准确设置检测参数, 提高检测能力。

关键词: 激光扫描热成像; 无损检测; 有限元仿真; 参数分析

中图分类号: TH978 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1105008

Influence analysis of key parameters in laser scanning thermography nondestructive testing

Yang Zhengwei, Xie Xingyu, Li Yin, Zhang Wei, Tian Gan

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: A new Infrared Thermal Wave Nondestructive Testing technology—laser scanning thermography nondestructive testing technology was investigated in this work. A finite element simulation model was built based on the deeply analysis of detection mechanism, and the temperature difference between defect and non-defect was selected to analyze the influence rules of the key parameters such as sample material, defect size, defect depth, laser scanning speed and laser scanning power on laser scanning thermography nondestructive testing technology, which provided a reference for the further development and application of the new technology. The relationship between the parameters and the maximum surface temperature difference were numerically investigated. On this basis, the control strategy of detection parameter in the laser scanning thermography nondestructive testing technology was put forward, which can facilitate to set the detection parameters quickly and accurately for the corresponding defect characteristics of sample in actual detection process, and to improve the detection ability.

Key words: laser scanning thermography; nondestructive testing; finite element simulation; parameter analysis

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(51575516, 51605481)

作者简介: 杨正伟(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事无损检测方面的研究。Email: yangzhengwei1136@163.com

0 引言

主动式红外热波无损检测技术, 凭借着其检测面积大、速度快、易操作和非接触等优点, 已经被广泛应用于航空航天、武器、高端制造装备等领域, 对大部分材料的缺陷都有很好的检出效果^[1-4]。主动式红外热波无损检测技术的基本原理是: 对样品表面进行热激励, 使其产生热波并向样品内部传播, 当热波传播到缺陷处时, 缺陷会对热波的传播起到阻碍作用, 并将部分热波进行反射, 导致缺陷处样品表面的温度高于正常区域, 利用红外热像仪捕捉样品表面的温度差异, 即可实现对缺陷的检测, 检测结果直观准确^[5]。

目前, 主流的激励方式主要包括高能闪光灯激励、超声激励、涡流激励和锁相激励等。研究表明, 缺陷的检测效果与所采用的激励方式紧密相关, 每种激励方式都有其独特的检测优势。高能闪光灯激励适用于检测面积较大的缺陷^[6], 超声激励适用于检测贴合型缺陷, 涡流激励则适用于检测浅表面缺陷, 锁相激励具有一次性检测面积大, 所得的相位图不易受热激励不均匀性等外界环境影响的特点^[7-9]。但是, 任何一种激励方式都不能适用于检测所有的缺陷。因此, 不断探索新的激励方式以满足不同的缺陷检测需求具有重要意义, 一直是红外热波无损检测技术研究的热点之一。

激光扫描热成像无损检测技术是近年来发展出的一种新型红外热波无损检测技术, 具有很好的应用前景。英国巴斯大学 S.E. Burrows 等人采用激光扫描热成像无损检测技术对铝和不锈钢材料中的裂纹缺陷进行了有效检测^[9]; 南京诺威尔光电设备有限公司江海军等人采用激光扫描热成像方法对薄膜厚度评估方法进行了深入研究^[10]; 北京交通大学 T. Li 等建立了点激光扫描激励热传导模型并进行了仿真分析^[11]。上述研究有效提高了激光扫描热成像检测能力, 但在检测过程中各主要影响参数对检测效果的影响并没有得到系统的研究, 如何设置合理的检测参数达到更佳检测效果仍需要进一步进行研究。

文中在分析激光扫描热成像检测机理的基础上, 通过建立有限元数值仿真模型, 对激光扫描热成

像检测过程进行数值模拟, 分析不同材料、缺陷大小和深度、激光扫描速度和功率对检测效果的影响规律, 并以此为依据提出针对不同特征缺陷的检测参数设置策略, 从而为激光扫描热成像的应用奠定基础。

1 激光扫描热成像检测原理

激光扫描热成像无损检测技术的检测原理如图 1 所示。激光器发出的激光束, 经棱镜整形成线激光后, 再通过振镜反射到样品表面进行热激励; 扫描控制系统控制振镜偏转角度, 让激光束在样品表面进行扫描, 以实现对整个样品的热激励; 利用热像仪对样品表面温度场数据进行采集, 根据前文所述主动式红外热波无损检测技术的基本原理, 通过对热像仪采集到的数据和热图序列进行分析, 即可实现对缺陷的检测。

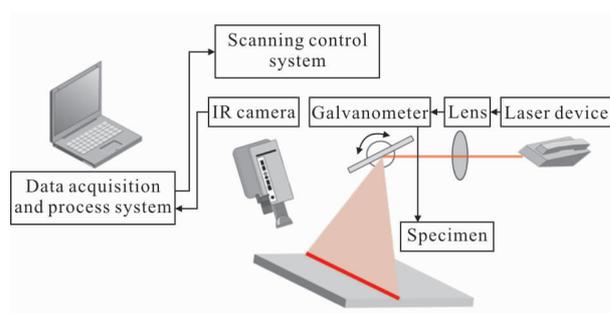


图 1 激光扫描热成像无损检测系统示意图

Fig.1 Laser scanning thermography nondestructive testing technology system diagram

这种独特的激励方式和激光本身具有的特性, 让激光扫描热成像无损检测技术具备了高可控性和高精度的特性, 在实际检测中, 可以根据材料和缺陷的特点设置最合适的检测参数, 以达到最佳的检测效果, 提高缺陷的检出能力。同时, 也可有效回避现有主流激励方式存在的一些问题, 如高能闪光灯激励中加热不均匀和尾光, 超声激励中超声枪和样品之间需要耦合, 涡流激励必须是铁磁性材料等问题^[12-14]。

与闪光灯系统同时对整个样品表面进行热激励不同, 激光扫描对样品表面的激励有时序, 热传导不仅发生在深度方向, 还会沿着样品表面进行热传导, 热传导模型将从一维热传导变为更加复杂的二维热传导。由于热波衰减速度很快, 对于无缺陷处可视为

半无限大介质,对于长 $2A$ 宽 $2B$,功率为 P_0 ,移动速度 $v=v_x i+v_y j$ 的矩形均匀光束,设 $t=0$ 时刻,光束的中心坐标为 (x_0, y_0) ,则 t 时刻材料表面邻近区域的温度场分布为^[15]:

$$T(x, y, z, t, v) - T_0 = \frac{\rho_0 P_0 \sqrt{a}}{16kAB\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^t dt' \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha(t-t')}\right)}{\sqrt{t-t'}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{A+v_x t'+x_0-x}{\sqrt{4\alpha(t-t')}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-A+v_x t'+x_0-x}{\sqrt{4\alpha(t-t')}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{B+v_y t'+y_0-y}{\sqrt{4\alpha(t-t')}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-B+v_y t'+y_0-y}{\sqrt{4\alpha(t-t')}}\right) \right] \quad (1)$$

式中: ρ_0 为材料表面的吸收系数; $\alpha=k/\rho c$ 为材料的热扩散系数, k 是材料的导热系数, ρ 为材料的密度, c 是材料的比热容。对于缺陷等有限厚度区域,还必须采用“像热源”法进一步分析,将使公式更加繁杂,难以求得温度场的解析解。因此,采用数值仿真对表面温度场进行研究。

2 建模与计算

2.1 模型的建立

在红外热波无损检测技术中,常用平底孔模拟真实缺陷^[16-17],其原理图如图 2 所示,图中 Δh 是平底孔缺陷距样品表面的距离,即缺陷的深度, D 是平底孔缺陷的直径。

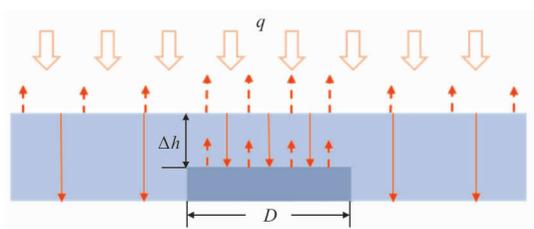
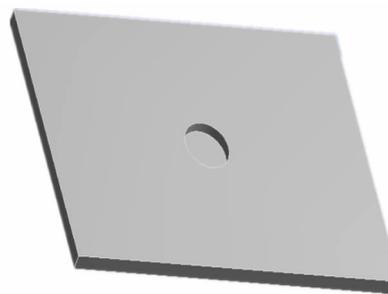


图 2 平底孔模型原理图

Fig.2 Cylindrical bottomed holes model

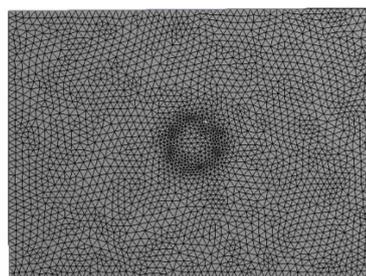
在 ANSYS 18.0 中选择 SOLID87 3D 10 节点四面体热固单元进行建模,样品的尺寸为 $0.15\text{ m} \times 0.11\text{ m} \times 0.005\text{ m}$,采用曲率网格法对网格进行划分,并在缺陷处对网格进行加密,以保证计算的准确性,结果如图 3 所示。在仿真中,设环境温度 $22\text{ }^\circ\text{C}$,环境对流换热系数 $h_c=20\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 保持不变,且不存在

内热源。



(a) 仿真模型

(a) Simulation model



(b) 网格划分结果

(b) Mesh result

图 3 ANSYS 仿真建模结果图

Fig.3 Simulation result in ANSYS

根据激光扫描热成像的检测原理,对缺陷的检测是依据缺陷处和非缺陷处的表面温度差异实现的,表面温差越大,则热像仪采集到的红外热图颜色对比越明显,越容易实现对缺陷的检测。因此,文中选取缺陷中心处表面最大温差 ΔT_{\max} 作为评估检测效果好坏的重要参数,重点研究在各种检测条件下 ΔT_{\max} 的变化趋势,找出各检测参数和 ΔT_{\max} 的关系。

2.2 激励的加载

根据激光扫描热激励的特点,初始条件及边界条件设置如下。

初始条件 $T|_{t=0} = T_e = 25\text{ }^\circ\text{C}$,

边界条件 根据热平衡的物理意义:任意时间间隔内,该区域因热扩散从单位面积传入材料内部的热能、因对流换热向外界逸出的热能和因热辐射从表面向外流失的热能三者之和,应等于该区域从激光吸收的能量,即:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T_s - T_e) + \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_e^4) = \rho_0(T) \times p \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度沿表面外法线方向的偏导数; h 为

对流换热系数; T_s 为材料表面温度; T_e 为环境温度; σ 为玻耳兹曼常数; $\rho_0(T)$ 为材料表面对激光光能的吸收系数; p 是激光功率。

仿真中最关键的是如何实现激光扫描即移动线热源的加载。为此,文中从高斯点热源入手,通过改进高斯热源公式^[10],最终得到移动线热源的加载公式:

$$p(x, y, z) = \frac{P_0}{2rl} \exp\left(-\frac{(x-v_0t)+z^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

2.3 模型的验证

根据初始条件和边界条件,进行加载求解,仿真结果与实验结果进行对比以验证模型的正确性,设置检测参数:结构钢材料($\rho=7850\text{kg}/\text{m}^3$, $C=434\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $k=49.8\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\alpha=1.46\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$), 激光扫描功率 200 W,扫描速度 20 mm/s, $\Delta h=1\text{mm}$, $D=20\text{mm}$,采用德国 InfraTec 公司生产的非制冷式热像仪,光谱响应范围 7.4~14 μm ,采样频率 60 Hz,NETD 为 40 mK,可提供 640 pixel \times 480 pixel 高分辨率图像。

仿真结果和实验结果如图 4 所示,两者的表面温差曲线如图 5 所示。从图 4、5 中可以看出,仿真和实验都能实现对缺陷的有效检测,且两者的表面温差曲线下降趋势是一致的,数值也非常接近,最大误差仅为 0.13 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,可以证明仿真模型的正确性,后续基于该模型进行的仿真分析结果是可靠的。



(c) 实验结果

(c) Experimental result

图 4 模型验证结果图

Fig.4 Model validation result

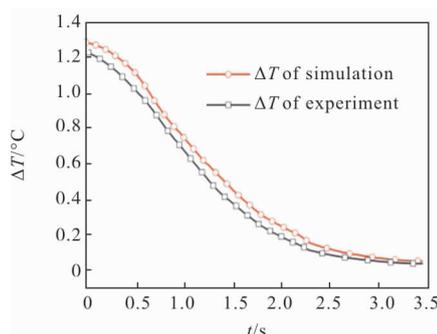


图 5 仿真结果与实验结果温差曲线对比图

Fig.5 Temperature difference curve between simulation results and experimental results

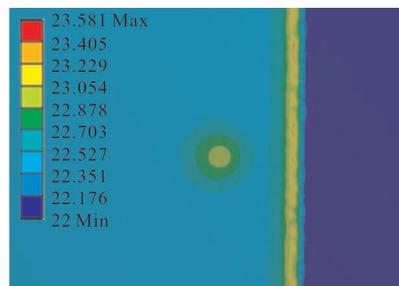
3 仿真分析

根据 2.1 节所提出的模型和网格划分规则,在 ANSYS 18.0 中建立如图 6 所示的样品,尺寸为



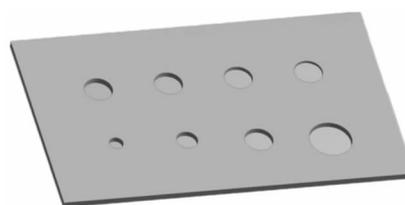
(a) 样品实物

(a) Sample



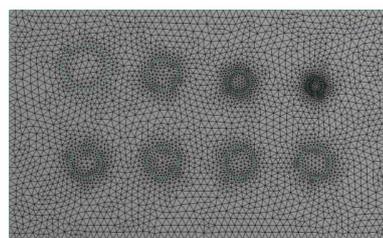
(b) 仿真结果

(b) Simulation result



(a) 仿真模型

(a) Simulation model



(b) 网格划分结果

(b) Mesh result

图 6 ANSYS 仿真建模结果图

Fig.6 Simulation result in ANSYS

0.25 m × 0.15 m × 0.005 m, 样品中第一行缺陷直径均相同, 缺陷深度 Δh 依次为 0.5、1、2、3 mm, 第二行缺陷 Δh 均相同, 缺陷直径依次为 10、15、20、30 mm。

设置激光扫描功率 200 W, 扫描速度 4 mm/s, 其仿真结果如图 7 所示。从图中可看出, 在 $t=5.6$ s 时, 线激光未达到缺陷区域; 在 $t=12.5$ s 时, 线激光扫描至 $D=30$ mm 缺陷和 $\Delta h=3$ mm 缺陷中心, 样品表面出现明显温差, 对于 $\Delta h=3$ mm 的缺陷, 由于缺陷深度太深, 导致表面温差很小, 消失速度快。随着

第一行缺陷的缺陷深度 Δh 不断减少, 缺陷区域表面温差越来越明显, 消失速度减缓, 持续时间越来越长, 在 $t=53.7$ s 时, 缺陷已经可以被完整地观察到, 表明缺陷深度 Δh 对检测结果具有很大的影响。同时, 随着第二行缺陷的缺陷直径 D 不断减少, 导致缺陷区域表面温差越来越少, 消失速度变快, 在 $t=53.7$ s 时已经无法观察到缺陷, 说明缺陷直径 D 对检测结果也具有很大的影响。

通过仿真, 可以得出一个直观的结论: 激光扫描

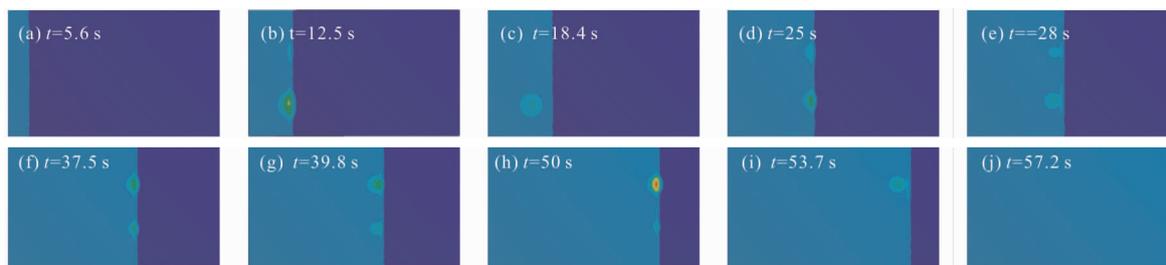


图 7 仿真结果时序图

Fig.7 Time sequence diagram of simulation results

热成像可对缺陷进行有效检测, 直径越大, 缺陷越浅, 缺陷越容易被检测到, 且缺陷区域温差消失速度快, 只能维持一段较短的时间。因此, 研究缺陷参数(材料、缺陷深度和缺陷尺寸)和热激励源参数(线激光扫描速度、线激光扫描功率)等关键参数对检测效果的影响, 对于提高激光扫描热成像无损检测技术的检测能力具有重要意义。

同时, 由于样品内的热传导是一个非常复杂的过程, 如何根据缺陷特征, 快速准确地设置检测参数获得满足检测需求的 ΔT_{\max} 也十分重要, 采用比较法对仿真数据进行分析是解决该问题的一种有效途径。该方法包含三个主要步骤:

(1) 选取一组检测参数作为标准值(文中选取结构钢材料 $\alpha_0=1.46 \times 10^{-5}$, 激光扫描速度 $v_0=4$ mm/s, 扫描功率 $P_0=200$ W, $D_0=20$ mm, $\Delta h_0=1$ mm 的缺陷的数据作为标准值), 将其他组仿真数据按照比例进行转换;

(2) 采用单一变量法找出各个参数对 ΔT_{\max} 的影响规律, 拟合出关系式;

(3) 综合考虑各拟合关系式, 得到检测参数控制策略, 为根据缺陷特征选取检测参数提供理论依据。

3.1 不同材料的影响

不同的材料具有不同的热物性参数, 在相同的测试条件下, 不同的材料会有不同的检测结果。定义材料的热扩散系数 $\alpha=k/(\rho C)$, 单位是 m^2/s , 其中 k 是材料的导热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ 是材料的密度, 单位 kg/m^3 ; C 是材料的比热容, 单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。设定激光扫描功率 200 W, 扫描速度 4 mm/s, 分别选取常见的金属材料: 钛合金、结构钢、铝合金和铜合金进行仿真, 材料的参数如表 1 所示。采集 $D=20$ mm, $\Delta h=1$ mm 的缺陷中心温度数据, 得到表面温度和表面温差曲线如图 8 所示。

从图 8、图 9 中可以看出, 在 $t=25$ s 激光束扫描至缺陷中心处前, 缺陷中心处均已产生了温升, 可以证明在激光扫描热成像无损检测中, 样品表面受到热激励后, 样品内部进行的是二维热传导。同时, 热扩散系数越大, 说明材料的热传导速度越快, 则温升开始的越早, 在激励后温升消失的也越快, 越不利于检测。对于钛合金, 其缺陷中心处最大温度 $T_{\max}=35.58$ $^{\circ}\text{C}$, 表面最大温差 $\Delta T_{\max}=9.09$ $^{\circ}\text{C}$; 结构钢 $T_{\max}=30.25$ $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\max}=5.22$ $^{\circ}\text{C}$; 铝合金 $T_{\max}=28.08$ $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\max}=2.61$ $^{\circ}\text{C}$; 铜合金 $T_{\max}=25.34$ $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\max}=0.98$ $^{\circ}\text{C}$ 。通过仿真数据可以得出结论: 随着材料热扩散系数增大, 表面最大温差呈下降趋势不利于检测, 激光扫描热

表 1 材料参数表

Tab.1 Material parameter table

Material	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\alpha/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Structural steel	4 620	522	21.9	9.08×10^{-6}
Titanium alloy	7 850	434	49.8	1.46×10^{-5}
Aluminum alloy	2 270	875	144	7.20×10^{-5}
Copper alloy	8 300	385	401	1.25×10^{-4}

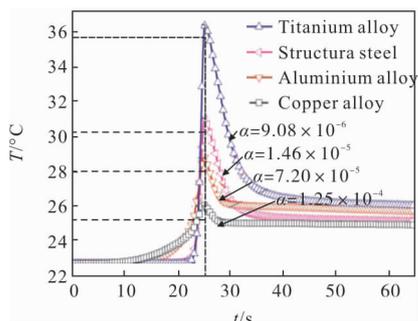


图 8 不同材料表面温度图

Fig.8 $T-t$ curves of different materials

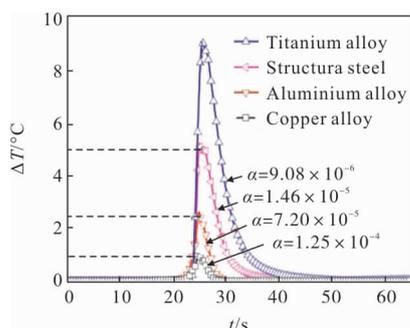


图 9 不同材料表面温差图

Fig.9 $\Delta T-t$ curves of different materials

成像无损检测适用于检测热扩散系数较小的材料的缺陷。为找出不同材料热扩散系数和表面最大温差的拟合关系,需对参数数值进行转换,表 2 给出了各组仿真数据与标准值之间的转换关系。

表 2 不同材料缺陷与标准缺陷参数转换表

Tab.2 Conversion relation between different material defects and standard defects

Material	Thermal diffusion coefficient		Surface maximum temperature difference	
	Original value	Conversion value (x)	Original value	Conversion value (y)
Structural steel	1.46×10^{-5}	1	5.22	1
Titanium alloy	9.08×10^{-6}	0.621 9	9.09	1.741 4
Aluminum alloy	7.206×10^{-5}	4.931 5	2.61	0.5
Copper alloy	1.25×10^{-4}	8.561 6	0.98	0.187 7

对表 2 中的数据进行拟合,得到如图 10 所示的曲线,其关系式为:

$$y=10.71e^{-\frac{4.63\times 10^{-4}}{x}}-0.064x+0.75 \quad (4)$$

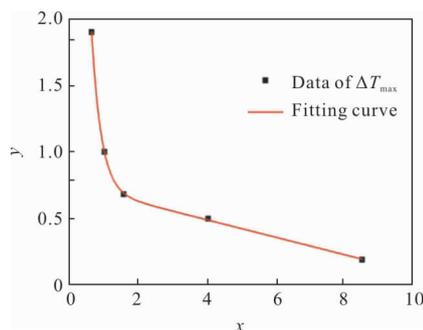


图 10 不同材料表面最大温差拟合曲线图

Fig.10 $y-x$ fitting curve for different materials

3.2 缺陷大小的影响

缺陷的大小和深度是评估零部件损伤程度的重要参数,对于零部件的剩余寿命和可靠性也具有十分重要的意义。设定检测参数:结构钢材材料,激光扫描功率 200 W,扫描速度 20 mm/s,利用样品第二行缺陷对缺陷大小的影响进行分析。为表现温升全过程,从激光扫描至缺陷中心处 3 s 前分别采集 $\Delta h=1\text{ mm}$, $D=10、15、20、30\text{ mm}$ 缺陷中心温度数据得到表面温度和表面温差曲线如图 11、12 所示。

从图 11、12 中可以看出,缺陷处的温升明显高于无缺陷区域, ΔT_{max} 分别为 3.84、4.39、5.24、6.67 $^{\circ}\text{C}$, 缺陷尺寸越大,则最大温差也随之增加,同时温差存在的时间也越长,有利于对缺陷的检测。同时,可以看出不同尺寸大小的缺陷的最大温升基本是在同一时间达到最高值,即激光束位于缺陷中心处时,但温差并不是在同一时间达到,随着缺陷大小的增大,达到最大温差的时间越迟。分析这一现象,主要是由于缺陷处的热传导受到缺陷的阻碍,在冷却过程中温

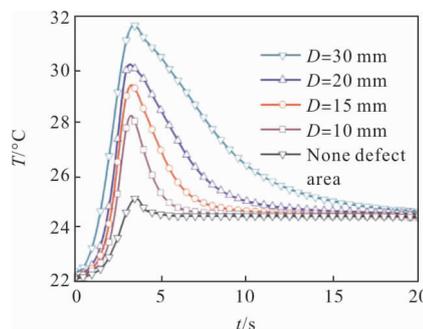


图 11 不同缺陷大小表面温度图

Fig.11 $T-t$ curves for different defect diameters

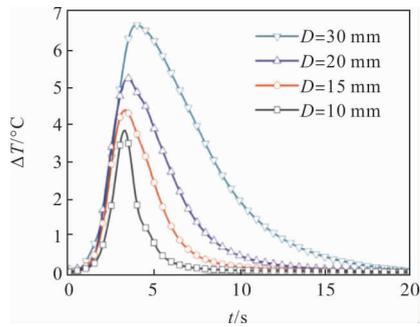


图 12 不同缺陷大小表面温差图

Fig.12 $\Delta T-t$ curves for different defect diameters

度下降速度明显低于无缺陷区域，导致最大温差时刻和最大温升时刻不同步，且缺陷越大，这种现象越明显。对于 $D=10$ mm 的缺陷，其 ΔT_{\max} 为 3.84 °C，比一般热像仪的分辨率 0.1 °C 还要高出许多，这表明在当前设置的检测参数下， ΔT_{\max} 还有十分充足的下降空间，即对于直径更小的缺陷也可以被检测到。表 3 给出了各组仿真数据与标准值之间的转换关系。

表 3 不同大小缺陷与标准缺陷参数转换表

Tab.3 Conversion relation between different defect diameters and standard defect

Defect diameters		Surface maximum temperature difference	
Original value	Conversion value (x)	Original value	Conversion value (y)
20	1	5.224	1
10	0.5	3.899	0.746 4
15	0.75	4.522	0.865 6
30	1.5	6.635	1.270 1

对表 3 中的数据进行拟合，得到如图 13 所示的曲线，其关系式为：

$$y=1.459-1.448e^{-0.794x} \quad (5)$$

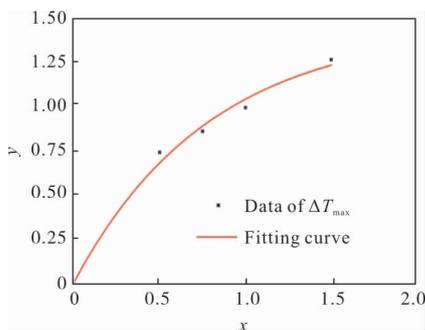


图 13 不同缺陷大小表面最大温差拟合曲线图

Fig.13 $y-x$ fitting curve for different defect diameters

3.3 缺陷深度的影响

设定检测参数：结构钢材料，激光扫描功率 200 W，扫描速度 20 mm/s，利用样品第一行缺陷对缺陷深度的影响进行分析。为表现温升全过程，从激光扫描至缺陷中心处 3 s 前分别采集 $D=20$ mm， $\Delta h=0.5$ 、1、2、3 mm 缺陷中心温度数据得到表面温度和表面温差曲线如图 14、15 所示。

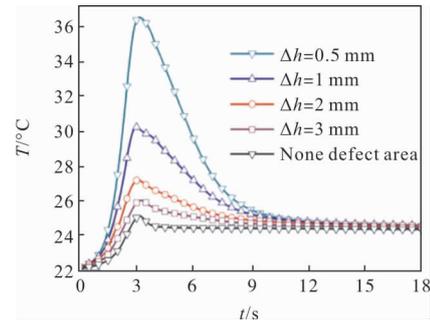


图 14 不同缺陷深度表面温度图

Fig.14 $T-t$ curves for different defect depths

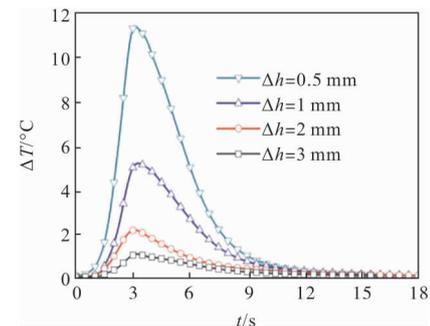


图 15 不同缺陷深度表面温差图

Fig.15 $\Delta T-t$ curves for different defect depths

从图 14、15 中可以简单地得出结论：缺陷深度越浅，则表面最大温差越大，缺陷越容易被检测到。但需要特别关注的是， $\Delta h=3$ mm 的缺陷温升曲线与无缺陷区域温升区域十分接近，其 ΔT_{\max} 只有 0.805 °C，这说明 3 mm 的缺陷深度已经接近当前设置的检测参数下的检测极限；而对于 $\Delta h=0.5$ mm 的缺陷，其表面最大温差 ΔT_{\max} 接近 12 °C，随着缺陷深度的增加， ΔT_{\max} 下降速度很快，说明激光扫描热成像无损检测技术对于缺陷深度十分敏感，缺陷深度的轻微改变，对表面最大温差 ΔT_{\max} 的影响十分明显，因此，该技术只适用于检测浅表面缺陷。同时，在温差图中可以看出缺陷最大温差达到时刻没有区别，这说明在 3.2 节中出现最大温升时刻和最大温差时刻分离

的原因主要是因为横向热传导。表 4 给出了各组仿真数据与标准值之间的转换关系。

表 4 不同缺陷深度与标准缺陷参数转换表
Tab.4 Conversion relation between different defect depths and standard defect

Defect diameters		Surface maximum temperature difference	
Original value	Conversion value (x)	Original value	Conversion value (y)
1	1	5.224	1
0.5	0.5	11.476	2.196 8
2	2	2.281	0.436 6
3	3	1.105	0.211 5

对表 4 中的数据进行拟合,得到如图 16 所示的曲线,其关系式为:

$$y=0.105+4.328e^{-\frac{x}{0.675}} \quad (6)$$

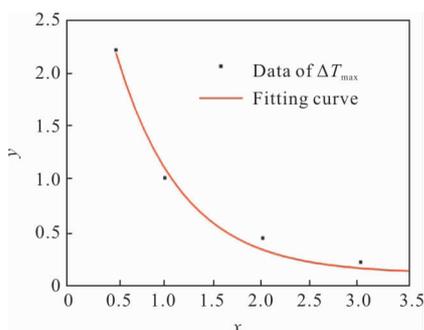


图 16 不同深度缺陷表面最大温差拟合曲线图

Fig.16 $y-x$ fitting curve for different defect depths

3.4 激光扫描速度的影响

激光扫描速度是激光扫描热成像无损检测系统中唯一可调节的参数,掌握激光扫描速度对缺陷检测的影响规律,对于提高激光扫描热成像的检测能力具有重要意义。设定检测参数:结构钢材料,激光扫描功率 200 W, $\Delta h=1$ mm, $D=20$ mm,激光扫描速度分别为 4、8、16、32、48 mm/s,得到表面温度和表面温差曲线如图 17、18 所示。

从图中可以看出,随着激光扫描速度的增加,样品表面温升和表面最大温差呈下降趋势,这是由于样品表面吸收的热量与线激光的扫描速度直接相关,扫描速度快,吸收的能量少,扫描速度慢,则吸收的能量多。因此提高激光扫描速度不利于缺陷

的检测,但值得注意的是,提高激光扫描速度可以大幅提高检测的效率。当激光扫描速度从 4 mm/s 提高到 8 mm/s 时,表面最大温差从 5.224 °C 降低到了 3.556 °C,降低了 1.668 °C,降低速率 0.47 °C/(mm·s),较为明显;但激光扫描速度从 16 mm/s 提高到 48 mm/s 时,表面最大温差从 2.113 °C 降低到 0.762 °C,降低了 1.351 °C,降低速率 0.04 °C/(mm·s),提高扫描速度对温差的影响已显著降低。因此,在表面最大温差满足检测需求的前提下,可以增大激光扫描速度以提升检测效率。

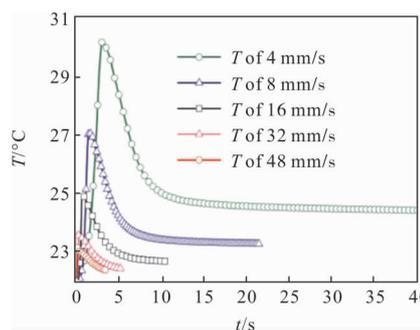


图 17 不同激光扫描速度表面温度图

Fig.17 $T-t$ curves for different laser scanning speeds

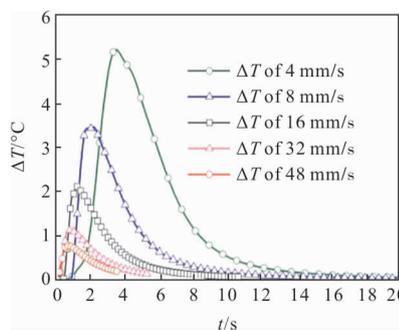


图 18 不同激光扫描速度表面温差图

Fig.18 $\Delta T-t$ curves for different laser scanning speeds

此外,从图 17、18 中可以看出,当激光扫描速度较低时,缺陷处温升在激光到达前已经上升,热传导方式为二维热传导;但随着速度的提高,温升过程越来越短,当速度达到 48 mm/s 时,温升过程几乎是瞬间完成的,此时样品内部的二维热传导将退化成只沿样品深度方向的一维热传导,因此可将闪光灯激励中基于一维热传导取得的成果进行应用。表 5 给出了各组仿真数据与标准值之间的转换关系。

表 5 不同激光扫描速度与标准缺陷参数转换表

Tab.5 Conversion relation between different laser scanning speeds and standard defect

Laser scanning power		Surface maximum temperature difference	
Original value	Conversion value(x)	Original value	Conversion value (y)
4	1	5.224	1
8	2	3.556	0.680 7
16	4	2.113	0.404 8
32	8	1.123	0.215 0
48	12	0.762	0.145 9

对表 5 中的数据进行拟合,得到如图 19 所示的曲线,其关系式为:

$$y=0.166+1.475e^{\frac{-x}{1.783}} \quad (7)$$

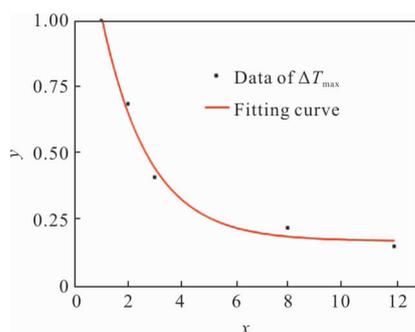


图 19 不同激光扫描速度缺陷表面最大温差拟合曲线图

Fig.19 y-x fitting curve for different laser scanning speeds

3.5 激光扫描功率的影响

激光扫描功率直接决定了系统的热激励强度和可检测的深度范围,但在系统建成后,功率是固定不可调的,因此,研究激光扫描功率对检测效果的影响,为功率选择提供理论依据。设定检测参数:结构钢材料,ΔT=1 mm,D=20 mm,激光扫描功率分别为 100、200、400、600 W,得到表面温度和表面温差曲线如图 20、21 所示。

从图 20、21 中可得,表面最大温差分别为 2.612、5.224、10.446、15.668 °C,则表面最大温差与线激光扫描的功率成正比,线激光扫描功率越大,缺陷检测越容易。在不同的线激光扫描功率下,表面温度差从出现到最大,再到消失的时间基本相同,这意

味着改进线激光扫描功率不能增加缺陷的可检测时间。此外,热通量密度和激光功率同步增加,如果热流密度过高,会对被检样品造成二次损伤。因此,在选择激光功率时,还需充分考虑样品的材料。表 6 给出了各组仿真数据与标准值之间的转换关系。

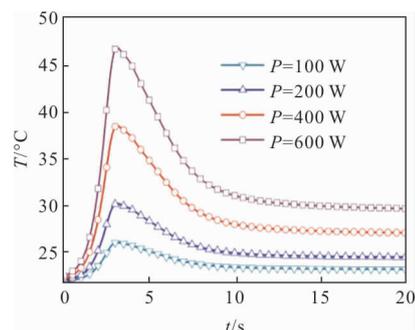


图 20 不同激光扫描功率表面温度图

Fig.20 T-t curves for different laser scanning powers

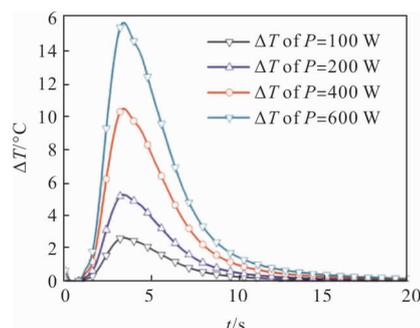


图 21 不同激光扫描功率表面温差图

Fig.21 ΔT-t curves for different laser scanning powers

表 6 不同激光扫描功率与标准缺陷参数转换表

Tab.6 Conversion relation between different laser scanning powers and standard defect

Laser scanning power		Surface maximum temperature difference	
Original value	Conversion value	Original value	Conversion value
200	1	5.224	1
100	0.5	2.612	0.5
400	2	10.446	2
600	3	15.668	3

对表 6 中的数据进行拟合,得到如图 22 所示的曲线,其关系式为:

$$y=x \quad (8)$$

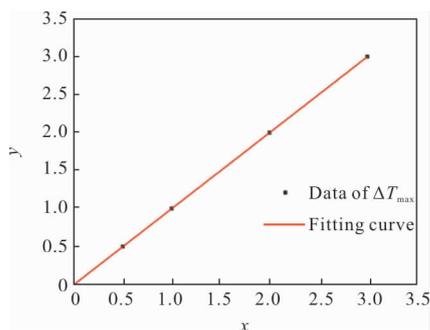


图 22 不同激光扫描功率缺陷表面最大温差拟合曲线图

Fig.22 $y-x$ fitting curve for different laser scanning powers

4 激光扫描热成像技术检测参数控制策略

前述拟合出了表面最大温差和样品材料、缺陷大小、缺陷深度、激光扫描速度和激光扫描功率的关系式,为得到检测参数控制策略奠定了基础,该策略可分为两步:

(1) 根据样品特征快速评估其表面最大温差

对待检样品来说,其样品材料 α_1 、缺陷大小 D_1 、缺陷深度 Δh_1 是确定的,系统的激光扫描功率 P_1 也是确定的,综合考虑公式(4)~(6)、(8)并设样品材料、缺陷大小、缺陷深度和激光扫描功率对最大温差影响的权系数分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 ,则可以快速评估出待检样品在激光扫描速度 v_0 时的表面最大温差 ΔT_{\max} 。

$$\Delta T_{\max} = 5.224 \times \left[\lambda_1 \left(10.71 e^{\frac{-\frac{\alpha_1}{\alpha_0}}{4.63 \times 10^{-6}}} - 0.064 \frac{\alpha_1}{\alpha_0} + 0.75 \right) \right] \times \left[\lambda_2 \left(1.459 - 1.448 e^{-0.794 \frac{D_1}{D_0}} \right) \right] \times \left[\lambda_3 \left(0.105 + 4.328 e^{\frac{-\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}}{0.675}} \right) \right] \times \left(\lambda_4 \cdot \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (9)$$

(2) 根据检测需求,设置激光扫描速度

将(1)中评估出的表面最大温差 ΔT_{\max} 与检测期望激励产生的表面最大温差 ΔT_{\max} 进行对比,再根据公式(7)激光扫描速度和表面最大温差的关系式,并设激光扫描速度对最大温差影响的权系数为 λ_5 ,即可获得满足检测需求的激光扫描速度 v_1 。

$$\frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max}} = \lambda_5 \left(0.166 + 1.475 e^{\frac{-v_1}{v_0} \cdot \frac{1.783}{1.783}} \right) \quad (10)$$

$$v_1 = -1.783 v_0 \cdot \ln \left(\frac{\frac{\Delta T_{\max 1}}{\lambda_5 \cdot \Delta T_{\max}} - 0.166}{1.475} \right) \quad (11)$$

5 结论

文中对激光扫描热成像无损检测原理进行了分析,建立了有限元仿真模型对关键参数的影响进行了探究,拟合出了各参数和表面最大温差的关系并最终给出了检测参数控制策略,结论如下:

(1) 仿真结果表明,表面最大温差 ΔT_{\max} 均大于 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,能完全满足红外热像仪的灵敏度要求,证明激光扫描热成像无损检测技术是检测样品内部缺陷的一种有效手段,且检测效率很高,通常只需几秒钟即可完成。

(2) 仿真结果表明,材料的热扩散率越小,缺陷直径越大,缺陷深度越浅,线激光扫描速度越慢,线激光功率越高,激光扫描热成像对缺陷的检测效果越好,缺陷的大小和深度均对激光扫描热成像的检测效果具有直接影响,相比之下缺陷的大小影响更小,小缺陷也能有很好的检测效果,但缺陷的深度对其影响很大,激光扫描热成像技术只适用于检测浅表面缺陷。

(3) 激光扫描热成像技术中各参数对表面最大温差的影响很大且关系十分复杂,针对样品特征设置合理检测参数对缺陷的检出十分关键,可首先利用拟合关系快速评估出表面最大温差,而后通过设置合理的激光扫描速度控制表面最大温差,满足检测需求。

参考文献:

[1] Zhou Y, Cai J. Infrared thermal wave nondestructive testing technology and its application[C]// International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology, 2016.

[2] Yan Huipeng, Yang Zhengwei, Tian Gan, et al. Micro crack detection near surface of ferromagnetic materials based on eddy current thermography [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0317001. (in Chinese) 闫会朋, 杨正伟, 田干, 等. 基于涡流热成像的铁磁材料近表面微裂纹检测 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(3): 0317001.

[3] Palumbo D, Tamborrino R, Galietti U, et al. Ultrasonic

- analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints [J]. *NDT&E International*, 2016, 78: 1-9. (in Chinese)
- [4] Feng Fuzhou, Min Qingxu, Zhu Junzhen, et al. Heating characteristics of metal fatigue crack in ultrasonic IR lockin thermography[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0704004. (in Chinese)
冯辅周, 闵庆旭, 朱俊臻, 等. 超声红外锁相热像中金属疲劳裂纹的生热特性 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0704004.
- [5] Maldague X P V. Introduction to NDT by active infrared thermography [J]. *Materials Evaluation*, 2002, 60(9): 1060-1073.
- [6] Sakagami T, Kubo S. Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3-5): 211-218.
- [7] Chen D, Zhang C, Feng L, et al. Ultrasonic infrared thermal wave technology and its applications in nondestructive evaluation [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 457(1): 1011-1030. (in Chinese)
- [8] Yan Huipeng Yang Zhengwei Tian Gan, et al. Analysis of influencing factors of geometry size in crack inspection using eddy current thermography[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7): 1610-1617. (in Chinese)
闫会朋, 杨正伟, 田干, 等. 涡流热成像裂纹检测中的形状大小影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1610-1617.
- [9] 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.
- [10] Jiang Haijun, Chen Li. Application of laser scanning infrared thermography for measuring film thickness [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(12): 1144-1148. (in Chinese)
江海军, 陈力. 激光扫描红外热波成像在膜厚测量中的应用[J]. 红外技术, 2017, 39(12): 1144-1148.
- [11] Li T, Almond D P, Rees D A S, et al. Crack imaging by pulsed laser spot thermography [C]//Journal of Physics Conference Series, 2010: 012072.
- [12] Abidin I Z, Tian G Y, Wilson J, et al. Quantitative evaluation of angular defects by pulsed eddy current thermography [J]. *NDT & E International*, 2010, 43(7): 537-546.
- [13] Cheng L, Tian G Y. Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current thermography [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(12): 3261-3268.
- [14] Jin Guofeng, Zhang Wei, Yang Zhengwei, et al. Application of ultrasonic infrared thermal wave technique in detection and recognition of interface kissing damage [J]. *Journal of Sichuan University*, 2013, 45(2): 167-175. (in Chinese)
金国锋, 张炜, 杨正伟, 等. 界面贴合型缺陷的超声红外热波检测与识别[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(2): 167-175.
- [15] Gui Jinbin. Studies of high-power laser heat effect simulation and laser beam description [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
桂进斌. 强激光热作用数值计算及光束参数表述的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [16] 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.
- [17] Dodd C V, Pate J R, Deeds W E. Eddy-current inversion of flaw data from flat-bottomed holes [J]. *NDT & E International*, 1989, 30(3): 305-312.
- [18] Liu J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes [J]. *Optics Letters*, 1982, 7(5): 196.