

# 激光与光电子学进展

## 激光红外无损检测 TC4 钛合金时激光激励时间对缺陷温阻效应的影响

王涛<sup>1</sup>, 刘明明<sup>1</sup>, 王浩<sup>2\*</sup>, 吴易泽<sup>1</sup>, 朱磊<sup>1</sup>, 王长宏<sup>1</sup>, 谢继昌<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

<sup>2</sup>中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300;

<sup>3</sup>贡比涅技术大学, 贡比涅 60200, 法国

**摘要** 针对红外热成像无损检测系统存在温度误差较大和精度较差等问题, 提出一种基于无损检测仿真模型的检测方法。选取相同实验环境下激励点处和缺陷中心处等多个表面温度值作为参考量, 用来对仿真模型进行修改和校正。首先改变激光激励时间来分析激励点两侧区域的温度变化趋势, 揭示缺陷对试件温度场的影响规律; 然后对比激励点两侧区域的温度值, 分析缺陷的温阻效应; 最后采用数据拟合的方法得到激励时间与测温点最大温差值的拟合曲线及函数关系, 定量分析激励时间与测温点最大温差值的数量关系。结果表明, 基于无损检测仿真模型的检测方法对零件缺陷的检测效果显著, 可以解决测温误差较大和精度较差的问题, 对零件缺陷具有良好的检测能力。

**关键词** 激光光学; 红外热成像; 激光; 无损检测; 仿真模型; 激励时间; 温阻效应

中图分类号 V267+.45

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314010

## Influence of Laser Excitation Time on Thermal Resistance Effect of TC4 Titanium Alloy in Laser Infrared Nondestructive Testing

Wang Tao<sup>1</sup>, Liu Mingming<sup>1</sup>, Wang Hao<sup>2\*</sup>, Wu Yize<sup>1</sup>, Zhu Lei<sup>1</sup>,  
Wang Changhong<sup>1</sup>, Xie Jichang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

<sup>2</sup>Engineering technology training center of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

<sup>3</sup>Université de Technologie de Compiègne, Compiègne 60200, France

**Abstract** Aiming at the problems of large temperature error and poor accuracy in infrared thermal imaging nondestructive testing system, a detection method based on nondestructive testing simulation model is proposed. Several surface temperatures at the excitation point and defect center in the same experimental environment are selected as reference values to modify and correct the simulation model. First, the temperature variation trend of both sides of the excitation point is analyzed by changing the laser excitation time to reveal the influence of defects on the temperature field of the specimen. Then, the temperature resistance effect of the defect is analyzed by comparing the temperature values of the regions on both sides of the excitation point. Finally, the fitting curve and function relationship between the excitation time and the maximum temperature difference of the temperature measuring point are obtained by using the method of data fitting. The quantitative relationship between the excitation time and the

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-08-05

基金项目: 天津市教委科研计划(2019KJ119)

通信作者: hbgdwh@vip.126.com

maximum temperature difference of the temperature measuring point is analyzed quantitatively. The results show that the detection method based on the simulation model of nondestructive testing has a remarkable effect on the detection of parts defects, it can solve the problems of large temperature measurement error and poor accuracy, and has a good ability to detect parts defects.

**Key words** laser optics; infrared thermal imaging; laser; nondestructive testing; simulation model; heating time; temperature resistance effect

**OCIS codes** 140.6810; 110.3080; 160.3900; 330.1710

## 1 引言

航空航天领域所用的发动机等零部件内部缺陷细小且难以发现,若缺陷零件继续作业会导致缺陷进一步扩展,最终发生断裂失效<sup>[1-2]</sup>。通常使用超声、射线、渗透、红外和涡流等无损检测手段对零件进行定期检测<sup>[3-5]</sup>。红外热成像无损检测技术具有无需接触、无污染和可在线检测等优点<sup>[6-7]</sup>,激光红外热成像无损检测技术具有高能量密度和可对微小区域输入高强度能量的特有优势,还能够远距离检测材料的微小缺陷,达到快速检测的目的<sup>[8]</sup>。早在上世纪八九十年代,Grice等<sup>[9]</sup>对闭合和倾斜的缺陷进行研究,利用激光束作为激励源对试件进行检测,并推导出了裂纹缺陷附近物体表面的温度场分布公式,指出缺陷会阻碍能量的传播。González等<sup>[10]</sup>使用飞点激光对试件表面进行快速加热,并对现有热成像系统进行升级,提高了无损检测技术的检测效率。Myrach等<sup>[11]</sup>分析工艺参数对热成像检测效果的影响,发现应用特定组合的工艺参数可以提高激光激励热成像无损检测技术的灵敏度。Qiu等<sup>[12]</sup>采用基于有限元的数值方法来模拟激光点源产生的热流,在时间域和空间域进行实验来验证仿真方法的可行性。Salazar等<sup>[13]</sup>采用静态激光点激励可以确定试件中的裂纹宽度,分析试件中的温度场分布,总结出评估裂纹宽度的具体方法。Boué等<sup>[14]</sup>提出了一种扫描厘米级裂纹的方法,利用移动的激光来研究开口裂纹的温阻效应。

上述研究使用了激光热成像无损检测方法并建立了仿真模型,优化工艺参数后分析其对检测效果的影响,但是研究过程中仿真模型误差较大,没有定量地分析各主要参数对检测效果的影响。激光热激励时间 $t_0$ 在激光系统中可以随时调节,掌握激光热激励时间对缺陷检测效果的影响规律可以提高激光热成像技术的检测能力。本文利用缺陷对热量传播的阻碍效应来研究激励时间对缺陷检测效果的影响。本文第一部分是建立误差较小的仿真模型,设置合适的激励时间参数来提高系统对缺陷的检测能力;本文第二部分是基于热像图通过实验与仿真结合的方法来评估试件表面缺陷孔的温阻效应,定量分析激励时间与缺陷周围区域温度的函数关系,为以后定量检测工艺参数及缺陷参数对温度场的影响打下基础。

## 2 激光热成像无损检测仿真模型

### 2.1 实验原理

激光热成像无损检测技术的基本原理如图1所示。TC4钛合金材料具有热各向同性,对试件表面进行激光热激励,发现加热初期热量在径向上呈对称的半球形分布,当热量传播到缺陷处时,缺陷会对热量的传播产生阻碍,从而引起试件表面温度场的变化,表现形式为激励点两侧区域的温度产生差异,这种差异可以被热像仪探测到,从而揭示缺陷的存在,这种效应称为温阻效应<sup>[15-16]</sup>。通过观察在相同的

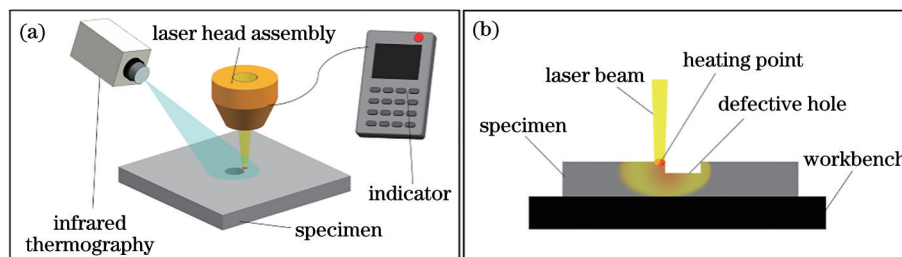


图1 激光红外热成像检测的实验示意图。(a)激光红外热成像试验系统;(b)激光激励原理

Fig. 1 Experimental schematic of laser infrared thermal imaging detection. (a) Laser infrared thermal imaging test system; (b) laser excitation principle

测温距离和冷却时间下激励点两侧的温度差异以及温度变化速率,可以判断是否产生温阻效应。使用热成像仪对试件表面的红外辐射能量进行探测,将探测到的热辐射量进行精确量化以生成肉眼可识别的红外图像,通过红外图像的色差可以得出试件的缺陷信息,使试件的缺陷检测结果直观准确。

### 2.2 仿真模型的构建

大量试验性实验的消耗时间和成本较高,当手动拍摄热成像图时,容易出现较大误差,而有限元方法为检测零件缺陷提供了有效工具。采用有限

元方法来建立试件的三维传热仿真模型,利用仿真结果来确定最佳的激励时间参数以确定激光功率范围,能够避免对实验试件造成损伤,从而达到减少实验次数的目的。仿真几何模型如图 2(a)所示,试件的长度为 100 mm,宽度为 75 mm,厚度为 5 mm,使用平底孔来模拟真实的缺陷<sup>[17-20]</sup>,缺陷中心位于试件中央,缺陷深度  $h$  为 2 mm,平底孔缺陷的直径  $d$  为 20 mm。

选择 TC4 钛合金作为试件材料,按照试件参数来设置模型属性,如表 1 所示。

表 1 TC4 材料的属性

Table 1 TC4 material properties

Parameter	Specific heat capacity / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Density / (kg·m <sup>-3</sup> )	Thermal conductivity / (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Thermal expansion coefficient / (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
Value	710	4940	7.5	7.06

为了简化模型并同时保持模型的可表征性,本文进行了如下假设。

- 1) 材料是各向同性的。
- 2) 不考虑周围的气相和等离子体。
- 3) 对于热学问题,边界条件考虑了激光源、对流和辐射损失。

固体传热过程遵循能量守恒方程,表达式为

$$Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (1)$$

式中: $Q$ 表示热源; $\rho$ 表示材料密度; $c_p$ 表示比热容; $T$ 表示瞬时温度; $t$ 表示传热时间,包括激光加热时间和冷却时间; $\mathbf{u}$ 表示速度矢量; $k$ 表示导热系数。

使用飞点激光进行热激励,激光光束在  $(x, y)$  点处的辐照度  $I(x, y, t)$  可表示为

$$I(x, y, t) = \frac{2 \times p}{\pi \times r^2} \exp \left[ -2 \frac{(x - a - v \times t_0)^2 + (y - b)^2}{r^2} \right], \quad (2)$$

式中: $p$ 表示激光功率; $r$ 表示激光光斑直径; $(a, b)$ 表示激光激励位置; $v$ 表示激光移动速度,本次仿真设置激光移动速度为 0; $t_0$ 为激光激励时间。

表面对环境辐射的热损失可表示为

$$q_r = \epsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4), \quad (3)$$

式中: $q_r$ 表示辐射的热损失; $\epsilon$ 表示金属表面的发射

率; $\sigma$ 表示表面的温度导数; $T_{\text{amb}}$ 表示环境温度。

四周对流散热(垂直壁面)可表示为

$$q_c = h_{\text{c-side}} (T_{\text{amb}} - T), \quad (4)$$

式中: $q_c$ 表示对流散热量; $h_{\text{c-side}}$ 表示外部自然对流换热系数(垂直壁面),可表示为

$$h_{\text{c-side}} = \begin{cases} \frac{k_a}{L_h} \cdot \left\{ 0.68 + \frac{0.67 R_{\text{al}}^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492 k_a}{\mu_a \cdot C_{p-a}} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \right\}, & R_{\text{al}} \leq 10^9 \\ \frac{k_a}{L_h} \cdot \left\{ 0.825 + \frac{0.387 R_{\text{al}}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492 k_a}{\mu_a \cdot C_{p-a}} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2, & R_{\text{al}} > 10^9 \end{cases}, \quad (5)$$

式中： $k_a$ 表示空气导热系数； $L_a$ 表示立壁高度； $R_{al}$ 表示瑞利数； $\mu_a$ 表示空气的运动粘度； $C_{p-a}$ 表示空气恒压热容。

在该模型中，瑞利数  $R_{al}$  定义为

$$R_{al} = \frac{g\beta_a\rho_a C_{p-a} |T_{sur} - T_{amb}| L_h^3}{\mu_a \cdot \alpha_a}, \quad (6)$$

式中： $g$ 表示重力加速度； $\beta_a$ 表示空气热膨胀系数； $\rho_a$ 表示空气密度； $T_{sur}$ 表示 TC4 钛合金表面温度； $\alpha_a$ 表示空气热扩散系数。

上表面对流散热可表示为

$$q_s = h_{c-surface} (T_{amb} - T), \quad (7)$$

式中： $q_s$ 表示上表面对流散热量； $h_{c-surface}$ 表示外部自然约定的对流换热系数(上表面)，可表示为

$$h_{c-surface} = \begin{cases} \frac{k_a}{L} \cdot 0.54 R_{al}^{1/4}, & T > T_{amb}, 10^4 \leq R_{al} \leq 10^7 \\ \frac{k_a}{L} \cdot 0.15 R_{al}^{1/3}, & T > T_{amb}, 10^7 \leq R_{al} \leq 10^{11}, \\ \frac{k_a}{L} \cdot 0.27 R_{al}^{1/4}, & T \leq T_{amb}, 10^5 \leq R_{al} \leq 10^{10} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $L$ 表示特征长度，定义为试件的长度。

模型为主动式红外热成像模型，该模型在仿真模拟的过程中不存在内热源，模型传热方式为试件表面的热辐射、热对流和热传导。模型的计算时长为 0~30 s，时间步长为 1 s。利用后处理模块对仿真模型进行处理，可以直接提供对应时间节点的试件表面温度值。

### 2.3 模型的验证

为了验证模型的有效性，制作与仿真模型相同的实物试件。首先使用细砂纸将试件表面处理干净，可以去除表面油污和氧化膜。试件表面的粗糙度较大，

表面的反射率有差异，直接使用热成像仪拍摄可以观察到同等温度场下红外热成像图的颜色差异。为了减小相同温度下热成像图中不同区域的颜色对比度，在试件表面均匀喷涂一层白色薄膜(反差增强剂)<sup>[21]</sup>，使试件表面的发射率趋于相同，便于热成像仪观察试件表面的温度场分布。喷涂薄膜的厚度为 25~45  $\mu\text{m}$ ，这不会影响试件的温度场分布和热传导。

搭建的实验平台如图 2(b)所示。采用锐科 RFL-C1000 型激光器进行无损检测实验，其光斑直径为 2~3 mm，输出激光功率为 0~1000 W。采用海康威视的 H10 手持式红外热像仪进行成像，测温精度为  $\pm 2^\circ\text{C}$ ，测温范围为  $-20\sim 350^\circ\text{C}$ ，热成像仪的红外光谱感光范围为 8~14  $\mu\text{m}$ 。调整热成像仪位置使试件可以充满整个视场，红外热成像仪的镜头垂直于被检测试件平面。激光具有能量集中的优势，当光斑距离缺陷较近时，温阻效应较为明显。使激励点的位置与平底孔边缘之间的距离为 1 mm，因为光斑的半径为 1 mm，这可以避免光斑照射到缺陷区域。设置一组参数进行实验，当激光功率参数为 100 W 和激励时间  $t_0$  为 4 s 时，在激励点位置处出现损伤，拍摄的热成像图片如图 3 所示，损伤形貌在图中已标出。当激励时间较长时，激励点的温度过高会影响 TC4 钛合金的材料性能，损伤形貌较大且不可恢复；当激光功率不变和激励时间为 3 s 时，激励点的温度最高可达  $407^\circ\text{C}$ 。TC4 钛合金的相变温度为  $885^\circ\text{C}$ <sup>[22]</sup>，所以激励点的温度不会影响 TC4 钛合金的工作性能，也不会产生相变。从图 3 可以明显观察到，激励点两侧的温度场分布存在差异，当冷却时间为 4 s 时，试件的温度场分布开始出现不均匀的现象，在 4~16 s 的冷却时间内可以观察到不均匀温度场的扩散过程。

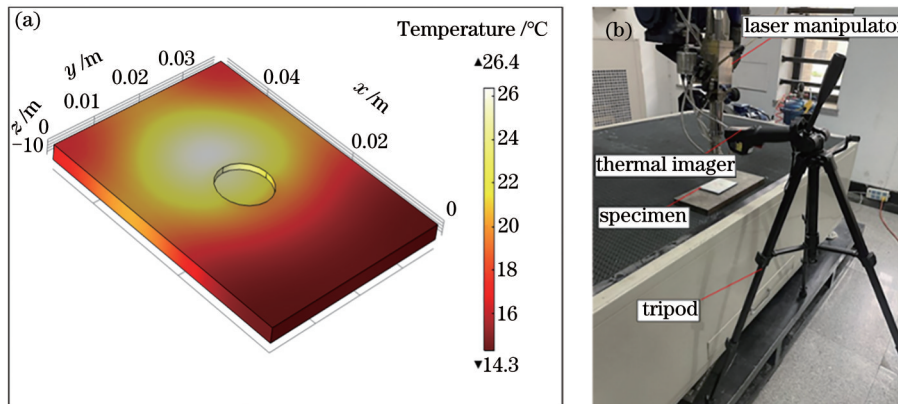


图 2 实验几何模型和实验平台。(a)几何模型及其温度场分布；(b)实验平台

Fig. 2 Experimental geometric model and experimental platform. (a) Geometric model and its temperature field distribution; (b) experimental platform

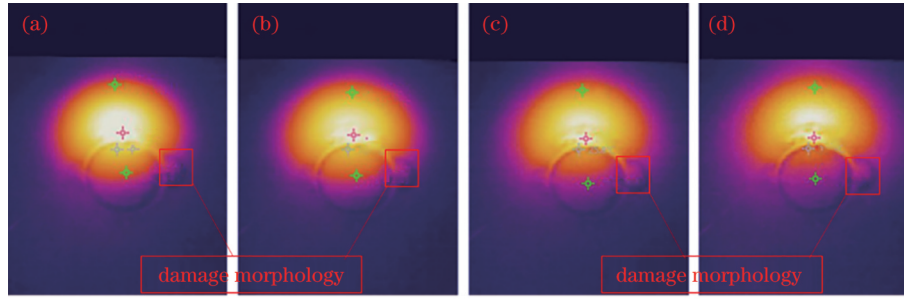


图 3 试样激光激励点区域在不同冷却时间下的红外热成像图。(a) 4 s; (b) 8 s; (c) 12 s; (d) 16 s

Fig. 3 Infrared thermal images of laser excitation point region of sample under different cooling time. (a) 4 s; (b) 8 s; (c) 12 s; (d) 16 s

根据实验结果可知,修正仿真模型的激光辐照度为  $0.36I(x, y, t)$ ,环境温度对实验结果的影响较大,测量本次实验的环境温度为  $16\text{ }^\circ\text{C}$ ,其余环境参数,如空气湿度等对试件温度场的影响较小,造成的系统误差可以忽略不计。为了减小模型误差,在模型中添加缺陷孔壁,用来对流散热和缺陷孔上表面散热进行修正。

缺陷孔壁内部自然对流散热的表达式为

$$q_d = h_{c\text{-defect}}(T_{\text{amb}} - T), \quad (9)$$

其中  $h_{c\text{-defect}}$  可表示为

$$h_{c\text{-defect}} = \frac{k_a}{h} \times \frac{R_{\text{al}}}{128} \quad (10)$$

缺陷孔上表面散热的区域为缺陷上表面区域。散热公式与(7)式和(8)式相同。

修正后仿真模型的误差值由原来的 10% 降低至 5%,误差曲线如图 4 所示,绘制校正模型前的温

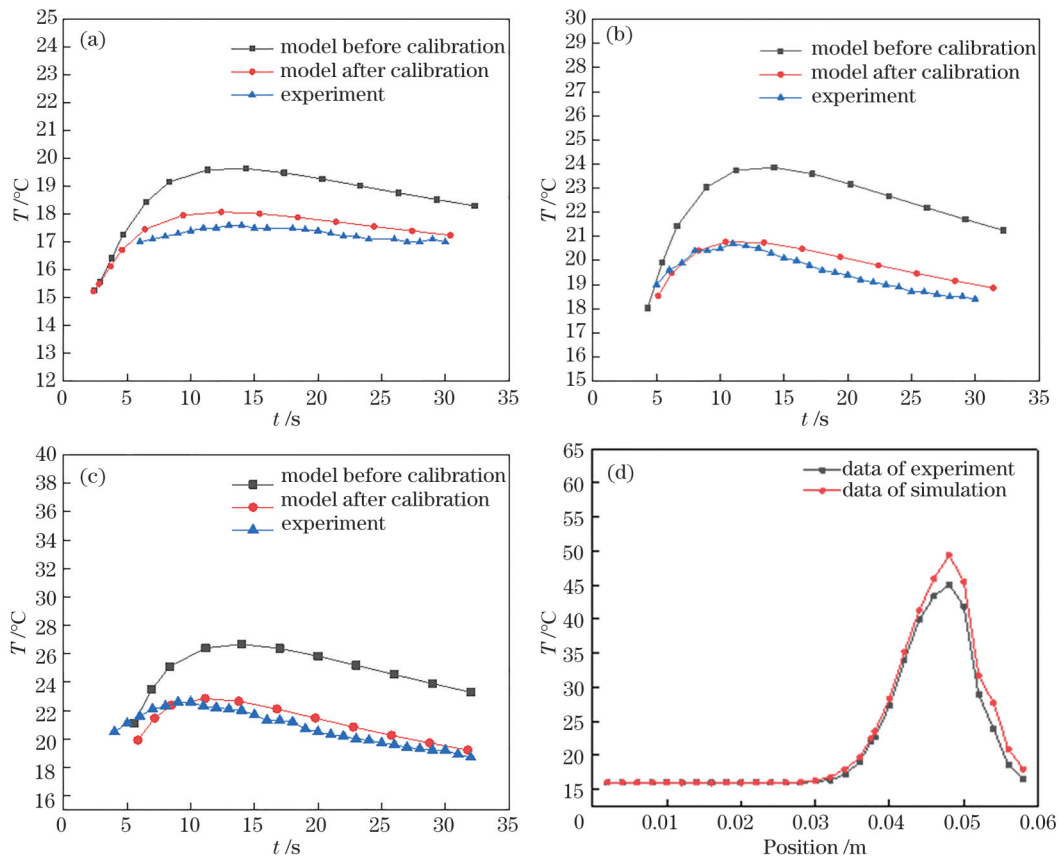


图 4 模型在不同激励时间下的温度曲线及激励点与缺陷中心点连线上各点的温度。(a)激励时间为 1 s; (b)激励时间为 2 s; (c)激励时间为 3 s; (d)激励点与缺陷中心点连线上各点温度的分布

Fig. 4 Temperature curves of model under different excitation time and temperature of each point on line between excitation point and defect center point. (a) Excitation time is 1 s; (b) excitation time is 2 s; (c) excitation time is 3 s; (d) temperature distribution of each point on line between excitation point and defect center point

度图、校正模型后的温度图和实际温度图,其中图 4(a)的激励时间为 1 s,图 4(b)的激励时间为 2 s,图 4(c)的激励时间为 3 s,测温点为不同时间下的缺陷中心点。以实际测量结果为基准,观察到校正模型前的温度误差较大,误差值约为 10%;校正模型后的温度误差较小,误差值约为 5%,误差在红外热成像仪的测温精度范围内。当冷却时间为 8 s 时,激励点与缺陷中心点的连线上各点温度的分布如图 4(d)所示。因为当冷却时间为 8 s 时,温度差异较大,所以缺陷检测效果较好。由于试验样件的缺陷区域较大,所

以试验样件的温阻效应较差。但激励点右侧存在缺陷,可以观察到激励点右侧区域的温度下降速率更快。综上所述,实验数据与仿真数据具有一定的相关性。

不同时间下激励点处和缺陷中心处的温度对比如图 5 所示,图 5(a)为激励点的温度对比,图 5(b)为缺陷中心点的温度对比。从图 5 可以看到,仿真曲线和实验曲线的下降趋势一致,误差在红外热成像仪的精度范围内。因此,仿真模型的有效性得到验证,后续基于该模型进行仿真分析,结果可靠。

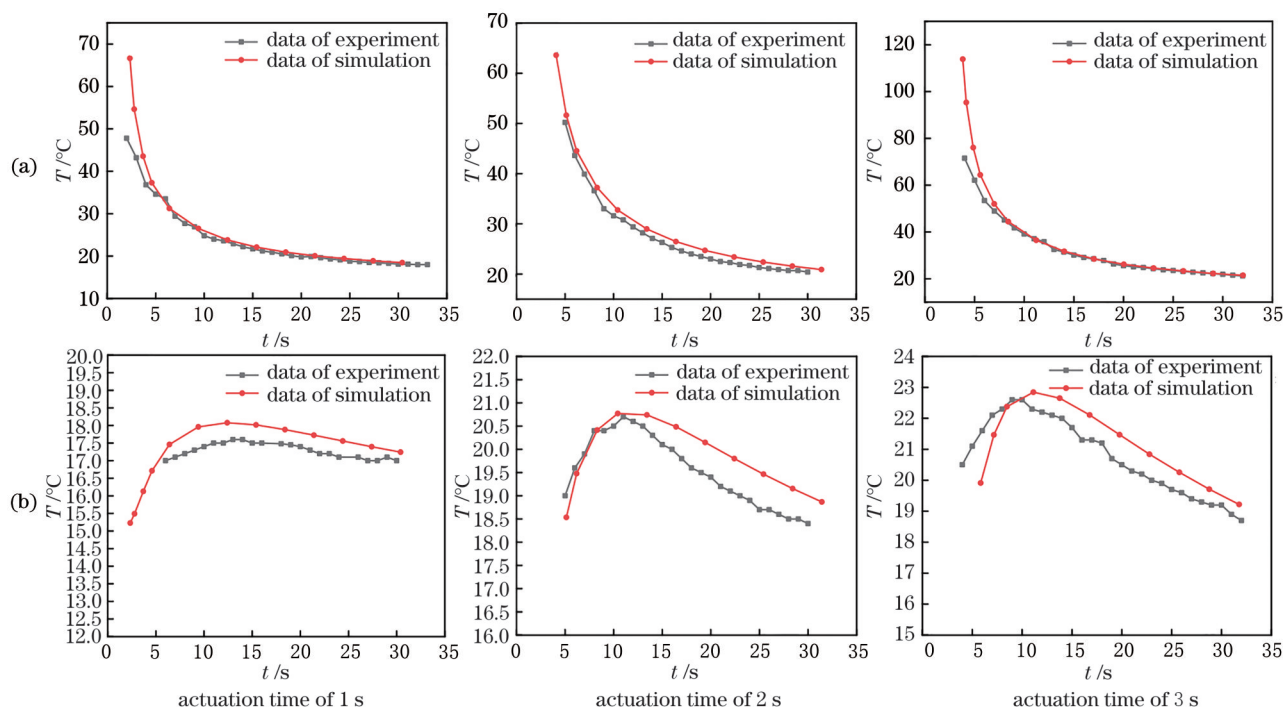


图 5 不同位置处的仿真结果与实验结果对比图。(a)激励点温度对比图;(b)缺陷中心点温度对比图

Fig. 5 Comparison diagram of simulation results and experimental results at different locations. (a) Temperature contrast diagram of excitation point; (b) temperature contrast diagram of defect center point

### 3 激光激励时间的影响

第 2 节已经验证仿真模型具有有效性,为此建立新的试件几何模型以研究激光激励时间对零件缺陷检测效果及缺陷温阻效应的影响。仿真几何模型如图 6(a)所示,实验选取的试件材料为 TC4 钛合金,试件的长度和宽度均为 50 mm,厚度为 5 mm,使用平底孔来模拟真实的缺陷,缺陷中心位于试件中央,缺陷深度  $h$  为 4 mm,平底孔缺陷的直径  $d$  为 6 mm。在缺陷中心和激励点的连线上选取 A 点和 B 点来放置点探针,用来测温。A 点位于正常区域,与激励点的距离为 7 mm。B 点位于缺陷的另一侧区域,与激励点的距离同样为 7 mm。测量试件表

面的温度,检测缺陷的依据是正常区域和缺陷另一侧区域的表面温度存在差异,当二者表面温度差异较大时,热成像仪所采集到的红外热成像图片的颜色对比较为明显,能够实现对缺陷区域的检测。因此,本文选取 A 点和 B 点温度差异的最大值  $\Delta T_{\max}$  作为评估检测效果的重要参数,重点研究  $\Delta T_{\max}$  的变化趋势以找出激励时间  $t_0$  和  $\Delta T_{\max}$  的关系。

本次实验的环境温度为 14 °C,设定的激光功率  $p=100$  W,激光热激励时间  $t_0$  分别为 4, 3, 2, 1 s,采集 A 点和 B 点的表面温度值,试件表面的温度曲线如图 6 所示,图 6(b)为 A 点的温度曲线,图 6(c)为 B 点的温度曲线,图 6(d)为 A 点和 B 点表面的温差曲线。激励点两侧的温度分布不均匀现象明显,表

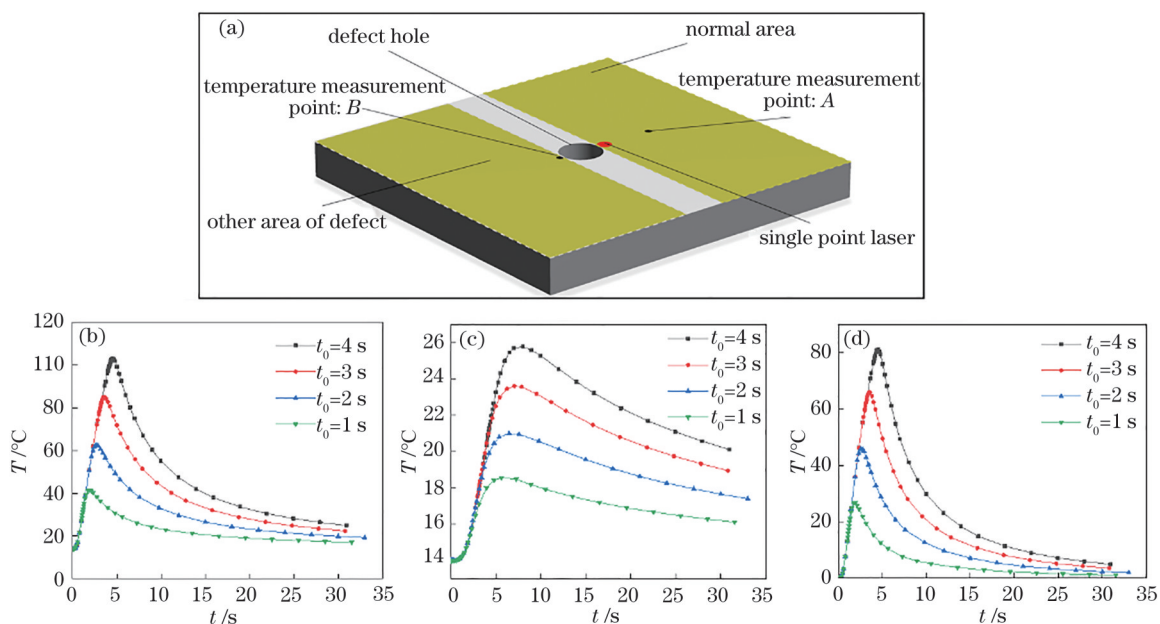


图 6 仿真模型和表面温度曲线。(a)仿真模型;(b)A点的温度曲线;(c)B点的温度曲线;(d)表面温差曲线  
 Fig. 6 Simulation model and surface temperature curve. (a) Simulation model; (b) temperature curves at point A; (c) temperature curves at point B; (d) surface temperature difference curves

明缺陷对温度场的影响较大。红外热成像图的颜色对比明显,表明激光红外热成像无损检测系统可以对缺陷进行有效检测。

当激光刚开始激励时,试件的热传导速率相同,单位时间内输入试件的热量相同,所以出现温度曲线重合的现象。由于缺陷的温阻效应,B点的温度停留在初始值并保持 2 s,但 A 点的温度值上升,说明缺陷的存在会阻碍热量的传导。2 s 后 B 点的温度开始上升,但是温度上升速率低于 A 点。A 点出现最高温度值的时间为 4 s,B 点出现最高温度值的时间为 8 s,说明缺陷不仅会降低传递的热量,还会降低热传导速率。缺陷的存在会导致温阻效应,原因是当试件进行平面一维热传导时,在试件内部还进行着三维热传导,能量经过缺陷区域后会持续对缺陷另一侧区域进行热量传导,所以温度继续升高;缺陷区域主要为空气,空气的导热系数为 0.023 W/(m·K),低于 TC4 钛合金的导热系数,所以产生温阻效应。

在实验设置的激励时间参数中,当激励时间  $t_0$  为 1 s 或 2 s 时,仿真图像上呈现明显颜色差异的时间较短;当  $t_0$  为 3 s 时,测温点的温度差异较大,无损检测效果最好,TC4 钛合金试件几乎无损伤,验证红外热成像无损检测方法在检测零件缺陷方面具有一定的可行性;当激励时间  $t_0$  为 4 s 时,激励点温度过高,长时间激励会对试件造成损伤。因此,当

选择激励时间时,还需充分考虑检测试件的材料特性,然后确定激励时间参数。

当激励时间  $t_0$  为 4, 3, 2, 1 s 时, A 点和 B 点的  $\Delta T_{\max}$  值分别为 81.122, 65.952, 45.936, 26.696 °C。当激励时间  $t_0$  为 3 s 时,缺陷温阻效应明显,所以设置  $t_0=3$  s 和  $\Delta T_{\max}=65.952$  °C 为标准值,对数据进行归一化处理,各组仿真数据与标准值之间的转换关系如表 2 所示。定量表达激励时间  $t_0$  与  $\Delta T_{\max}$  的关系,分析激励时间对检测效果及缺陷温阻效应的影响。

表 2 不同激励时间与标准缺陷参数的转换关系  
 Table 2 Conversion relationship between different excitation time and standard defect parameters

Heating time /s		Maximum temperature difference /°C	
Original value	Conversion value ( $x'$ )	Original value	Conversion value ( $y'$ )
4	1.33	81.122	1.2300
3	1.00	65.952	1.0000
2	0.67	45.936	0.6965
1	0.33	26.696	0.4047

对表 2 数据进行拟合,得到的拟合曲线如图 7 所示。从图 7 可以看到,温度升高后,试件的导热系数略有减少,所以测温点的最大温差值  $\Delta T_{\max}$  变化为非线性变化,拟合曲线的相关系数为 0.998,说明数

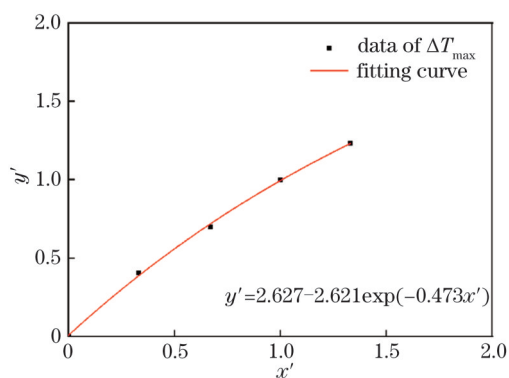


图 7 激励时间与最大温差的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of excitation time and maximum temperature difference

据拟合度较好。

在相同的实验条件下,对测量的实验温度数据进行验证,当激励时间  $t_0$  分别为 1, 2, 3, 4 s 时, A 点与 B 点的  $\Delta T_{\max}$  值分别为 30.5, 46.8, 63.6, 78.5  $^{\circ}\text{C}$ , 将其代入函数关系中,得到红外热成像仪的精度为  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,该误差在允许范围内,可以验证激励时间与  $\Delta T_{\max}$  函数关系的正确性。

## 4 结 论

本文首先建立新型有限元仿真模型,然后通过实验来修正模型的激光辐照度等因素,用来验证仿真模型的有效性。修正后仿真模型的温度值与实验数据相比,误差在 5% 以内,提高了激光红外热成像无损检测系统对零件缺陷的检测精度。最后利用有限元模型来研究不同激励时间下激励点两侧区域的温度场变化,结果表明预制缺陷孔对缺陷试件的温度场变化会产生较大的影响,缺陷的温阻效应明显,缺陷不仅会减少传递的热量,还会降低热传导速率。

当激励时间  $t_0$  为 1 s 或 2 s 时,红外热成像图上呈现明显颜色差异的时间较短;当激励时间  $t_0$  为 3 s 时,激励点两侧的表面温差值较大,可以在较长时间内观察到颜色差异,缺陷温阻效应显著;当激励时间  $t_0$  为 4 s 时,激励时间过长,对 TC4 钛合金试件会造成损伤。研究发现,针对试件特征设置合理的检测参数对缺陷的检出十分关键,当激励时间  $t_0$  为 3 s 时,激光热成像的无损检测效果较好。最后拟合激励时间与测温点最大温差值的函数关系,为以后定量检测工艺参数及缺陷参数对温度场的影响打下基础。

## 参 考 文 献

[1] Boué C, Holé S. Comparison between multi-

frequency and multi-speed laser lock-in thermography methods for the evaluation of crack depths in metal [J]. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2020, 17(4): 223-234.

[2] Xiang M, Dong L H, Wang H D, et al. Research progress on ultrasonic infrared thermography nondestructive testing of fatigue cracks in metal [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 667-674.

向明,董丽虹,王海斗,等.金属结构疲劳裂纹超声红外无损检测研究现状[J].激光与红外,2018,48(6):667-674.

[3] Xu Y, Wang Q Y, Luo C C, et al. Chip crack imaging detection based on line laser phase-locked thermal imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061018.

许颖,王青原,罗聪聪,等.基于线激光锁相热成像的芯片裂纹成像检测[J].激光与光电子学进展,2020,57(6):061018.

[4] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041203.

杨连杰,李阳,孙俊杰,等.激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J].激光与光电子学进展,2019,56(4):041203.

[5] Ospennikova O G, Kudinov I I, Golovkov A N, et al. Research of defectoscopic properties of powder compositions for increasing efficiency and reliability of penetrant testing of complex shaped parts [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, 56(3): 291-297.

[6] Gu Y H, Zhang Z Z, Gao X H, et al. Application of nondestructive detection of aluminum using laser ultrasonic technology and EMAT method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504002.

谷艳红,张振振,高先和,等.激光超声结合电磁超声在铝板无损检测中的应用研究[J].中国激光,2020,47(5):0504002.

[7] Liu J Q, Zhang Z J, Lin Z Y, et al. Depth detection of material surface defects based on laser thermography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0411002.

刘佳琪,张志杰,林振钰,等.基于激光热成像的金属表面缺陷深度检测[J].激光与光电子学进展,2021,58(4):0411002.

[8] Wang B Z, Dong L H, Wang H D, et al. Research and application of laser infrared thermography in material defect detection [J]. Materials Reports, 2020,



- 34(5): 5127-5132.  
王博正, 董丽虹, 王海斗, 等. 激光红外热成像技术在材料缺陷检测中的研究和应用现状[J]. 材料导报, 2020, 34(5): 5127-5132.
- [9] Grice K R, Inglehart L J, Favro L D, et al. Thermal wave imaging of closed cracks in opaque solids[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(11): 6245-6255.
- [10] González J, Mendioroz A, Sommier A, et al. Fast sizing of the width of infinite vertical cracks using constant velocity flying-spot thermography[J]. NDT & E International, 2019, 103: 166-172.
- [11] Myrach P, Ziegler M, Maierhofer C, et al. Influence of the acquisition parameters on the performance of laser-thermography for crack detection in metallic components[C]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1581(1): 1624-1630.
- [12] Qiu J X, Pei C X, Liu H C, et al. Quantitative evaluation of surface crack depth with laser spot thermography[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 101: 80-85.
- [13] Salazar A, Mendioroz A, Oleaga A. Flying spot thermography: quantitative assessment of thermal diffusivity and crack width[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(13): 131101.
- [14] Boué C, Holé S. Open crack depth sizing by multi-speed continuous laser stimulated lock-in thermography [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(6): 065901.
- [15] Yang Z W, Xie X Y, Li Y, et al. Influence analysis of key parameters in laser scanning thermography nondestructive testing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 1105008.  
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): 1105008.
- [16] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214002.  
张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214002.
- [17] Jin G F, Zhang W, Shi J, 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.
- [18] Huang Y, Zhang Y, Liu G, et al. Ultimate strength assessment of hull structural plate with pitting corrosion damage under biaxial compression[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(17/18): 1503-1512.
- [19] National Technical Committee 56 on Non-destructive testing of Standardization Administration of China. Non-destructive testing: test method for fabricating and checking aluminum alloy ultrasonic standard reference blocks: GB/T 34363—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.  
全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测: 铝合金超声标准试块制作和校验方法: GB/T 34363—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] National Technical Committee 56 on Non-destructive testing of Standardization Administration of China. Non-destructive testing: practice for fabrication and control of steel reference blocks used in ultrasonic testing: GB/T 11259—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.  
全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测: 超声检测用钢参考试块的制作和控制方法: GB/T 11259—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [21] Wang L, Li X Q, Deng L F, et al. Research on the necessity of using contrast enhancer[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(20): 109-110.  
王磊, 李绪清, 邓云飞, 等. 使用反差增强剂的必要性探究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(20): 109-110.
- [22] Zhang C J. Effect of ingot composition on phase transformation point and forging microstructure of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(21): 152-154.  
张嫦娟. 铸锭成分对 TC4 钛合金相变点及锻造组织的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(21): 152-154.