

文章编号:1001-5078(2024)10-1600-07

· 红外技术及应用 ·

金属增材制造内部缺陷激光热波检测方法研究

张鸿博¹, 李亨涛¹, 刘 琰¹, 张震宇², 裴翠祥², 陈振茂²

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学航天航空学院, 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室,
陕西省无损检测与结构完整性评价工程中心, 陕西 西安 710049)

摘要:金属增材制造是近年来发展迅速的一种高效材料加工技术,为了保障构筑件的质量和可靠性,应避免其内部形成对结构力学性能有显著影响的缺陷。本文研究了激光红外热成像检测技术在金属增材制造亚表面缺陷检测上的应用。首先,基于有限元仿真结果,研究了激光红外热成像检测对不同深度和尺寸的金属亚表面缺陷检测的可靠性,进一步地,考虑了粗糙表面对检测的影响,并对比验证了常用红外热成像序列处理算法的噪声干扰抑制性能;最后,对加工有人工内部缺陷的选择性激光熔融试件进行了实验验证。仿真和实验结果表明,激光红外热成像检测可以可靠地检出宽深比大于1的金属增材制造内部亚表面缺陷,通过常用的热成像序列预处理方法,可以有效地抑制粗糙表面干扰造成的空间噪声,此外,由于激光红外热成像检测技术具备高效、非接触以及可视化的优势,有望成为金属增材制造在线监测的可靠技术。

关键词:金属增材制造;激光红外热成像;无损检测

中图分类号:TN219;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.014

Study on laser infrared thermography for detecting subsurface defects in metal additive manufacturing

ZHANG Hong-bo¹, LI Heng-tao¹, LIU Yan¹, ZHANG Zhen-yu², PEI Cui-xiang²,
CHEN Zhen-mao²

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710049, China;

2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, State Key Laboratory of Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an 710049, China)

Abstract: Metal additive manufacturing is a rapidly developing high-efficiency material processing technology in recent years. In order to ensure the quality and reliability of fabricated parts, the formation of defects within them that have a significant impact on the mechanical properties of the structure should be avoided. In this paper, the application of laser infrared thermography for detecting subsurface defects in metal additive manufacturing is investigated. Firstly, based on finite element simulation results, the reliability of laser infrared thermography for detecting subsurface defects of different depths and sizes in metal additive manufacturing is studied. Furthermore, the influence of rough surfaces on

基金项目:中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性科技专项项目(No. 2023ZZ11);国家自然科学基金项目(No. 12072255);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(No. 2024JC-YBQN-0545)资助。

作者简介:张鸿博(1973-),男,教授级高级工程师,主要从事石油管材及装备无损检测方面的研究工作。E-mail: zhang-hongbo002@cnpc.com.cn

通讯作者:裴翠祥(1984-),男,副教授,研究方向—结构无损检测与评价。E-mail: pei.cx@xjtu.edu.cn

收稿日期:2024-06-25

detection is taken into account, and the noise suppression performance of commonly used infrared thermography sequence processing algorithms is comparatively verified. Finally, Experimental validation of the processing of selective laser melting specimens with artificial internal defects is carried out. The simulation and experimental results demonstrate that laser infrared thermography can reliably detect the internal sub-surface defects of metal additive manufacturing with a width-to-depth ratio greater than 1 and the spatial noise caused by rough surface interference can be effectively suppressed by the commonly used pre-processing method of thermography sequences. In addition, laser infrared thermography inspection is expected to be a reliable technology for online monitoring of metal additive manufacturing due to its advantages of high efficiency, non-contact and visualization.

Keywords: metal additive manufacturing; laser infrared thermography; nondestructive testing

1 引言

随着工业 4.0 时代的到来,金属增材制造技术在近年来得到了迅速的发展,与传统的材料制造加工技术不同,金属增材制造具备高效、快速和高材料利用率的优势,具备高复杂度、高性能零部件的制造能力,目前已经被广泛应用于航空航天、船舶制造、化工等高端制造业。金属增材制造过程是一个固-液-气的三相耦合过程,在这个复杂的过程中,由于存在材料的凝固收缩、溶解度变化以及热应力等因素的影响,可能会在构件内部产生如裂纹、孔隙、空腔、分层等缺陷^[1]。为了保障构件的质量和服役性能,应尽量避免制造过程中形成上述缺陷,因此,对构件内部的缺陷进行检测是非常必要的。

目前,工业上通常采用射线检测(RT)、超声检测(UT)、涡流检测(ET)等方法对增材制造构件进行无损地事后检测,但上述方法对复杂结构件的检测能力有限,并且无法在加工过程中实时指导和调整工艺参数,从而消除已产生的缺陷或避免后续缺陷的形成,提高零部件的成型质量,降低生产成本^[2]。由于金属增材制造过程具有高温、高动态变化以及粗糙表面等特性,这对常规无损检测技术提出了新的挑战。

激光红外热成像检测是一种新型的无损检测技术,目前已经被广泛应用于复合材料内部缺陷、金属材料表面裂纹等缺陷检测^[3-4]。但是,针对激光红外热成像检测用于金属增材制造过程在线监测的研究尚处于起步阶段。Herzer 等人采用线激光扫描的热激励方式对激光粉末床增材制造过程中产生的亚表面缺陷进行检测,验证了激光红外热成像检测方法的可行性^[5]。Bartlett 等人的研究表明红外热成像检测对选区激光熔融(SLM)金属增材制造过程中形成的 500 μm 以上的未熔融分层缺陷具备极高的检出概率^[6]。上述文献表明,基于激光红外热成像

技术的金属增材制造过程在线检测具备非接触、高效快速、可视化以及易于实现自动化的优势。但目前国内针对金属增材制造亚表面缺陷的激光红外热成像检测方法研究较少,且尚未有文献讨论金属表面粗糙度对激光红外热成像检测的影响。

基于上述问题,本文对激光红外热成像在金属亚表面缺陷检测方面展开了研究。首先,基于有限元仿真结果,研究了激光红外热成像检测技术对不同深度和尺寸的内部缺陷的检测性能。进一步地,考虑了金属粗糙表面干扰对检测效果的影响,并对比分析了常用的红外热成像序列处理算法(PCA、TSR、PPT)对热异常区域的特征提取性能以及对粗糙表面干扰引起的空间噪声的抑制作用。最后,对加工有不同尺寸和深度的人工亚表面缺陷的选择性激光熔融(SLM)金属增材制造试件进行了实验验证。

2 金属增材制造亚表面缺陷激光红外热成像检测原理和有限元仿真

2.1 激光红外热成像检测原理及仿真方法

针对材料内部缺陷检测,激光红外热成像检测方法的原理示意图如图 1 所示,其采用激光作为红外热成像检测的主动热激励源。

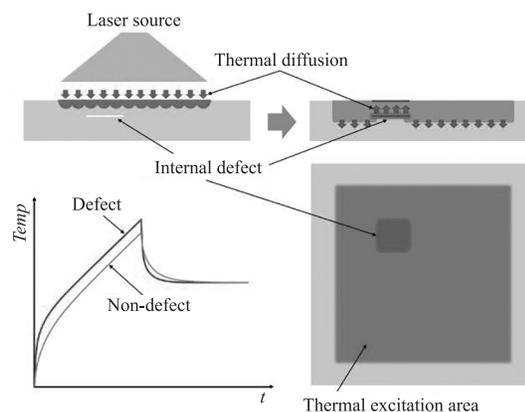


图 1 激光红外热成像内部缺陷检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser infrared thermography for internal defect detection

当激光束照射到被测试件表面时,热波会沿着试件的表面和深度方向持续传播,若被测物内部存在缺陷,其热导率往往异于被测物本身,从而影响热波的正常扩散,在缺陷位置形成温度异常。对于金属增材制造过程中产生的分层、空腔等内部缺陷,其热物理参数通常被认为与空气相同,因此热导率远远小于金属材料,在试件被加热和降温的过程中,缺陷位置在红外热像仪中表现为异常的温升。

对于主动式红外热成像检测,其内热源的热流密度通常视为0,且对于常见金属材料,可将其视为各向同性材料,因此,热波在其内部的传播规律可由以下热传导方程表示:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中, k, ρ, c 分别为材料的热导率($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)、密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)和比热容($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$); T 为温度场(K)。此外,还需指定方程的初始条件和边界条件。其初始条件如下:

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (2)$$

通过在被测物的一个表面上施加热载荷来模拟激光对材料的热激励效果,并且忽略热激励过程中的对流换热,对于热激励表面,其边界条件可以通过第二类边界条件给出:

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_x + \frac{\partial T}{\partial y}n_y + \frac{\partial T}{\partial z}n_z\right)\Big|_{\Gamma_s} = q_s(x, y, t) \quad (3)$$

对于其他非激励表面,视为绝热边界,即:

$$q|_{\Gamma_0} = 0 \quad (4)$$

式中, n_x, n_y, n_z 分别为 x, y, z 平面上的法向量; Γ_s 和 Γ_0 分别为热激励面和非热激励面; q 为热流密度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

对于实验中所采用的高斯平顶光束,可将其视为多束高斯子光束的叠加,其空间分布可表示为^[7]:

$$f(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2}{r^2}\right) \quad (5)$$

式中, x_i 和 y_j 分别为子光束中心的横纵坐标, r 为高斯光斑的半径,定义为最大光强的 $1/e^2$,则作用于热激励面的热流密度可进一步被表示为:

$$q_s = A \cdot I_0 \cdot f(x, y) \cdot g(t) \quad (6)$$

式中, A 为材料表面吸收率; I_0 为激光功率密度; $G(t)$ 为热激励信号的时间函数。

在金属增材制造过程中,构件表面具备一定的粗糙度,这可能会对红外热成像检测造成一定的影响,因此本文将对有限元模型进行粗糙表面建模。我们采用以下指数型自相关函数来指定随机高斯曲面,并利用快速傅里叶变换的方法进行随机粗糙表面的生成^[8]:

$$R(x, y) = R_q^2 \exp\left[-2.3 \sqrt{\left(\frac{x}{\beta_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\beta_y}\right)^2}\right] \quad (7)$$

式中, R_q 为均方根粗糙度; β_x 和 β_y 分别为 x, y 方向的自相关长度。

有限元模型如图2所示,其主体材料为钢,缺陷处被设定为空气,具体参数如表1所示,模型的长宽 $L = 12 \text{ mm}$,高 $H = 4 \text{ mm}$,缺陷的厚度 $h = 0.1 \text{ mm}$ 。在仿真计算中,激光热激励以热流密度的形式作用于被侧面,其余面为绝热边界,即热流密度为 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。热激励信号为方波,脉宽为 5 s ,激光能量密度为 2×10^5 ,材料热吸收率为 0.2 。模型的计算时间步为 0.05 s ,温度场输出时间间隔为 0.2 s ,总计算时间为 5 s 。

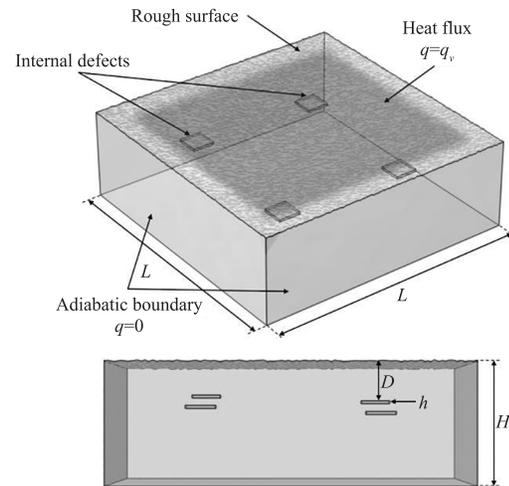


图2 三维有限元仿真模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D FEM simulation model

表1 有限元模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of the FEM

Parameters	Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat capacity/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Model	14.6	8027	450
Defect	0.0257	1.205	1013

2.2 有限元仿真结果

首先考虑在无粗糙表面干扰的情况下,激光红

外热成像检测对金属材料内部不同尺寸和深度的缺陷的检出情况。图3为不同深度(0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm)和尺寸(0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm)的方形缺陷在热激励初期的仿真温度场。不难发现,随着缺陷尺寸和深度的不断增大,缺陷处的热异常信号变得越来越微弱。缺陷的出现阻碍了热波的正常传播,一部分能量被缺陷吸收,而另一部能量则被反射到材料表面,形成温度积聚。当缺陷尺寸较小时,被反射的热波能量较小,因此在表面难以形成对比度强烈的热异常部位;此外,热波在传播的过程中能量呈指数衰减规律,因此当缺陷深度较深时,缺陷处的热异常信号也会变得非常微弱。通常,在实验中,当亚表面缺陷的尺寸和深度的比值(宽深比)大于1时,则认为缺陷可以被可靠的检出,而当宽深比小于等于1时,需要根据缺陷处的热对比度来进行判断。如图3的第二行所示,当缺陷处于较浅深度时,即使宽深比为1,也能有效识别较小尺寸的缺陷,但随着缺陷深度的不断增大,即使较大尺寸的缺陷,也很难被检出。

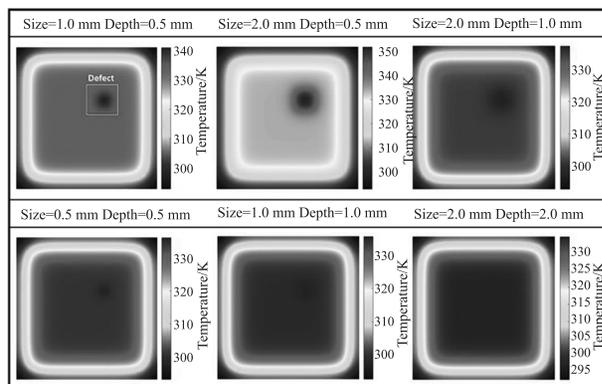


图3 不同深度和尺寸缺陷在热激励初期 ($t = 0.2 \text{ s}$) 的有限元仿真温度场

Fig. 3 FEM simulation temperature field of defects with different depth and size at the initial stage of thermal excitation ($t = 0.2 \text{ s}$)

通常,由于热成像序列是高冗余度的数据,因此会采用一系列的预处理方法,对序列进行压缩或特征提取,从而获得更高信噪比的检测结果。常见的红外热成像序列预处理算法有PCA、PPT和TSR^[9-11],其中PCA通常对整个加热降温序列进行处理,PPT对加热序列进行处理,而TSR则针对降温序列,利用上述算法对仿真热成像序列进行预处理,结果如图4所示。对于无粗糙表面干扰影响的红外热成像序列,不同的预处理算法并没有显著差

异,且均能有效提升缺陷信号的信噪比。但是对于宽深比小于1且深度较深的缺陷,由于其热异常信号过于微弱,上述常见的预处理算法并不能有效将其与热激励信号分离。

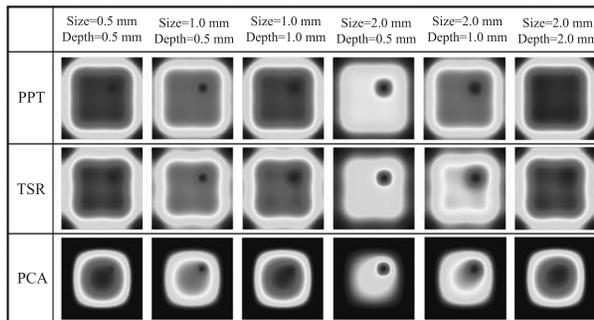


图4 不同深度和尺寸缺陷的仿真热成像序列处理结果

Fig. 4 FEM simulation thermography sequence processing results of defects with different depth and size

在实验中,红外热像仪会受到环境及传感器噪声的干扰,当缺陷处的热对比度小于红外热像仪的可探测最小温差时,则可以认为缺陷无法被可靠检出,目前,常用噪声等效温差(NETD)来评价红外热像仪的最小可探测温差。利用上述仿真结果中缺陷和非缺陷位置温差信号的最大值(峰值温差)作为指标,如图5所示,不同尺寸下的缺陷宽深比-峰值温差曲线如图6所示,峰值温差随宽深比的增加呈指数变化趋势。但在实际红外热成像检测中,由于无法保证理想的检测环境,且金属增材制造过程的检测工况恶劣,实际的红外热像仪最小可探测温差可能远远高于NETD。通常认为,当温度对比度大于约 $0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,缺陷的检出概率(POD)可达90%^[12]。

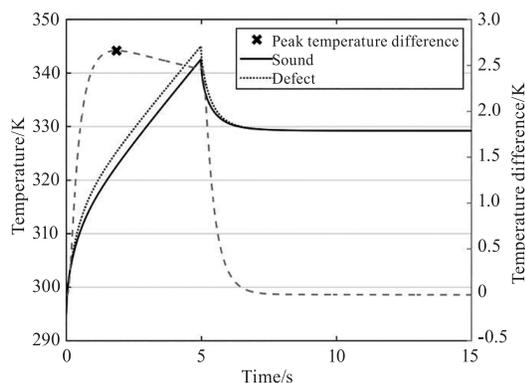


图5 时域温度信号与峰值温度差

Fig. 5 Time domain temperature difference signal and peak temperature difference

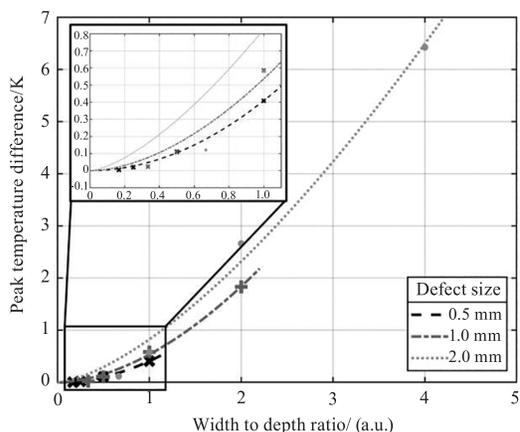


图 6 不同尺寸亚表面缺陷的宽深比与峰值温度差变化关系

Fig. 6 Width-depth ratio-peak temperature difference curves of subsurface defects at different sizes

在金属增材制造过程中,试件表面存在一定的粗糙度,且无法通过打磨等方法避免其对检测方法的干扰,这也是金属增材制造在线检测的挑战之一。因此,本文考虑了粗糙表面对红外热成像检测的影响。在模型中引入了粗糙度约为 $5 \mu\text{m}$ 的呈高斯随机分布的粗糙表面,不同深度和尺寸的缺陷在粗糙表面干扰下,红外热成像检测的有限元仿真结果如图 7 所示(以第一排第二列为例,第一排从左到右分别为 0.2 mm 和 0.4 mm 的缺陷,第二排从左到右分别为 0.6 mm 和 0.8 mm 的缺陷,其尺寸均为 1.0 mm)。对于尺寸较小,深度较深的亚表面缺陷,其热异常信号本身就非常细微,受到粗糙表面引起的表面不均匀温度场干扰后,在原始红外热成像序列中变得难以识别。利用上述红外热成像序列压缩和特征提取算法对具备粗糙表面干扰的温度序列进行处理,结果如 8 所示。其中 PPT 和 TSR 算法对粗糙表面干扰的抑制效果较好,PPT 算法采用快速傅里叶变换计算每个像素点处温度信号的相频曲线,该算法可以有效地将表面干扰等噪声分解到高频分量下,并利用低频分量下的相位值进行重构,从而得到高信噪比的缺陷特征。TSR 方法则对降温序列的每个像素点处的温度信号进行多项式拟合,并利用多项式系数进行重构,由于降温阶段受表面干扰的影响较小,因此 TSR 的处理结果同样具备较高的信噪比,但由于缺陷在降温阶段受横向热扩散的影响较大,缺陷的形状特征无法得到有效的表征。

有限元仿真结果表明,金属增材制造粗糙表面干扰对激光红外热成像检测具有一定的影响,对于

原始热成像序列,粗糙的表面状态会引起不均匀热背景噪声,但这是一种具备空间分布规律的噪声,在时域上有着固定模式,和热噪声或传感器噪声不同,它的空间位置相对固定,并不会随着采集过程在温度场中呈现随机变化,通过常用的红外热成像序列预处理方法,可以有效消除粗糙表面对缺陷识别的影响,提高检测信噪比。

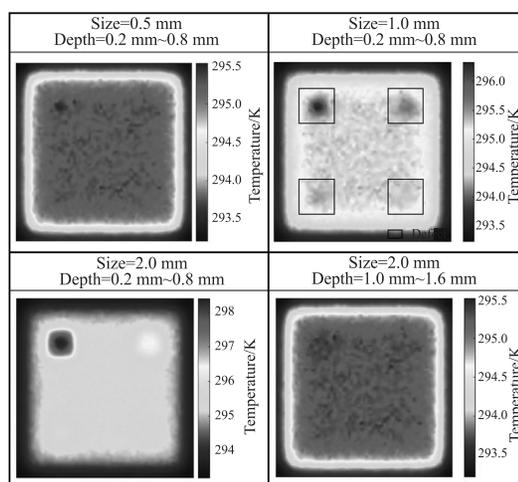


图 7 考虑粗糙表面干扰的有限元仿真温度场
Fig. 7 FEM simulation temperature field considering rough surface interference

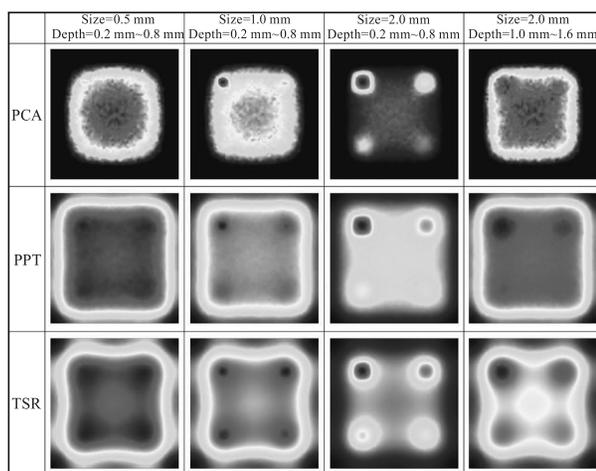


图 8 考虑粗糙表面干扰的仿真热成像序列处理结果
Fig. 8 FEM simulation thermography sequence processing results considering rough surface interference

3 金属增材制造亚表面缺陷激光红外检测实验验证

3.1 实验设备与试件

实验设备如图 9(a) 所示,采用一台制冷型红外热像仪进行温度场采集,其噪声等效温差 $\text{NETD} \leq 25 \text{ mk}$,温度场采集帧率为 50 Hz 。采用光纤耦合连续波激光器对试件表面进行热激励,其最大功率为 400 W ,通过整形透镜组将一束准直激光束整形为

较大面积的平顶高斯光斑,实现高效热激励,实验同样采用方波信号作为热激励波形,脉冲宽度 5 s。试件采用选择性激光熔融(SLM)技术打印,如图 9(b)所示,试件的厚度为 15 mm,内部设有厚度约为 1 mm,尺寸为 2~8 mm 的圆形人工亚表面缺陷,深度从左到右三列依次为 1.2 mm、1.5 mm 和 1.8 mm。

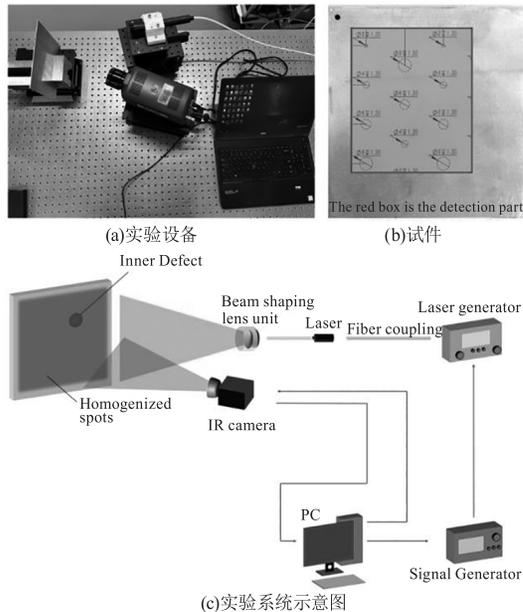


图9 实验设备与试件示意图

Fig.9 Schematic diagram of experimental setup and specimen

3.2 实验结果

实验结果如图 10 所示,实际检测中存在不均匀热背景等因素,会对红外热成像检测造成一定影响,通过背景差分的方法,可以有效去初始因素的干扰,并在未经处理的原始结果中也能检出大部分缺陷。进一步地,分别采用 PPT、TSR 和 PPT 算法对原始热成像序列进行处理,实验与仿真结果类似,TSR 和 PPT 均可以有效消除粗糙表面干扰,获取高信噪比的检测结果,其中,TSR 方法具备最高的信噪比,并且能够检出所有缺陷,PPT 方法通过相位重构的方式消除了大部分的噪声干扰,同样能够检出所有缺陷,但缺陷处的对比度较弱,而 PCA 方法虽然无法有效消除粗糙表面引起的噪声干扰,但也能稳定地提取缺陷特征。

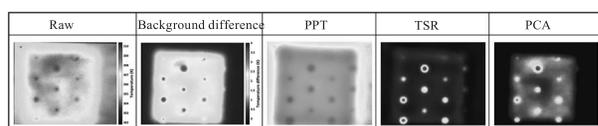


图10 金属增材制造试件激光红外热成像检测结果

Fig.10 Laser infrared thermography testing results of metal additive manufacturing specimen

4 结论

本文对金属增材制造过程中亚表面缺陷的激光红外热成像检测方法进行了研究,建立了有限元仿真模型,分析了激光红外热成像对不同深度和尺寸的亚表面缺陷的检测性能,并考虑了粗糙表面对检测的影响,以及常见的三种红外热成像序列预处理方法(PCA、PPT、TSR)对空间噪声的抑制能力,最后,对预制了人工亚表面缺陷的选择性激光熔融试件进行了实验验证。仿真和实验结果表明,激光红外热成像检测方法适用于金属增材制造过程的在线缺陷检测,能可靠的检测宽深比大于 1 的亚表面缺陷。由于激光红外热成像检测具备非接触式、远距离以及可视化的优势,并且易于集成入现有的智能制造系统,因此有望成为金属增材制造过程在线自动化监测的可靠无损检测方法。

参考文献:

- [1] Chen Zekun, Jiang Jiayi, Wang Yujia, et al. Defects, microstructures and mechanical properties of materials fabricated by metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(12): 3190-3205. (in Chinese)
陈泽坤, 蒋佳希, 王宇嘉, 等. 金属增材制造中的缺陷、组织形貌和成形材料力学性能[J]. 力学学报, 2021, 53(12): 3190-3205.
- [2] Guo Zhengya, Xiong Zhenhua. Defect detection technology in metal additive manufacturing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(5): 49-57. (in Chinese)
郭政亚, 熊振华. 金属增材制造缺陷检测技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(5): 49-57.
- [3] Wang Z, Pei C X, Zhang Z Y, et al. Quantitative test of delamination defects in CFRP with surface interference by laser thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 136: 105046.
- [4] Wang R B, Pei C X, Xia R C, et al. A portable fiber laser thermography system with beam homogenizing for CFRP inspection [J]. NDT & E International, 2021, 124: 102550.
- [5] Herzer F, Abraham F, Tammer C, et al. Detection of defects in solidified layers within laser-based powder bed fusion using active thermography[J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 518-523.
- [6] Bartlett J L, Meim F M, Murty Y V, et al. In situ defect detection in selective laser melting via full-field infrared

- thermography [J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 595 – 605.
- [7] Pei Cuixiang, Chen Zhenwei, Wang Zhi, et al. Study on new beam homogenization laser infrared thermography system and applications [J]. Laser & Infrared, 2023, 53 (10): 1485 – 1491. (in Chinese)
裴翠祥, 陈振伟, 王志, 等. 新型光束匀化激光红外热成像检测系统及应用[J]. 激光与红外, 2023, 53 (10): 1485 – 1491.
- [8] Wu J. Simulation of rough surfaces with FFT[J]. Tribology International, 2000, 33(1): 47 – 58.
- [9] Rajic N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures [J]. Composite Structures, 2002, 58(4): 521 – 528.
- [10] Shepard S M, Lhota J R, Rubadeux B A, et al. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences [J]. Optical Engineering, 2003, 42 (5): 1337 – 1342.
- [11] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(5): 2694 – 2698.
- [12] Moskovchenko A, Švantner M, Vavilov V, et al. Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography [J]. NDT & E International, 2022, 130: 102673.