

基于激光热成像的金属近表面无损缺陷检测

Laser Thermography-based Near-surface Nondestructive Defect Detection Technology for Metals

供稿|徐霞¹, 朱子鸣², 延贵民², 周东东² / XU Xia¹, ZHU Ziming², YAN Guimin², ZHOU Dongdong²

内容导读

金属近表面缺陷难以直接观测,在应力或腐蚀作用下会扩展并导致构件失效,危害重大。因此,发展快速无损的金属近表面缺陷检测技术至关重要。激光热成像技术作为一种高效、非接触且操作简便的红外检测方法,具有重要研究价值。本文采用激光热成像技术结合 COMSOL 仿真,研究金属近表面缺陷的无损检测方法,旨在实现缺陷的定性与定量检测。通过建立仿真模型,分析了缺陷参数和激励参数对热传导的影响机制,并针对红外图像特点,对比了不同滤波方法的效果,提出采用模糊 C 均值聚类算法提取缺陷完整区域,有助于对缺陷进行定量评估,还提出采用最小二乘法建立缺陷深度预测模型,能较好地反映缺陷深度与温度之间的关系。

金属材料作为工业生产不可或缺的原材料,在石油化工、航空航天、电力、船舶、汽车、核工业及轻工业等众多领域均有广泛应用^[1]。随着各行业的发展,金属材料的质量与产量越发受到人们的关注。金属材料近表面的状况可直接影响其性能,进而关系到设备能否安全、稳定且长期地运行。当前,我国多数工厂和企业金属材料近表面缺陷检测方面仍依赖人工离线探伤,对于低合格率及需要运行维护的金属制品或设备,人工离线探伤虽能及时发现其近表面缺陷,筛选出合格的产品或设备,从而满足企业的生产需求,有效杜绝安全隐患。但随着待检测产品数量的不断增加,人工检测暴露出

了诸多问题。例如,由于人的主观因素,如检测人员素质、经验等,导致漏检、误检率高,以及检测效率低下。因此,亟需开发替代人工离线探伤的高效、准确的金属材料近表面缺陷检测方法。

红外热成像无损检测技术自问世以来一直是检测金属材料近表面缺陷的主要方法之一。目前常用的红外热成像无损检测技术通常为主动红外热成像法^[2-3],其通过使用外热源对结构表面加热,在热源激励下形成向试件内部进行传输的热波。如果金属材料结构内部存在损伤(如裂纹、孔洞等),则会影响热波传输过程,继而会使试件表面温度分布发生变化。通过红外热像仪检测试件表面温度的分

布,采用不均匀的温度场分布热谱图可以分辨试件内部是否存在损伤,以及损伤的分布情况^[4]。

在主动加热无损检测技术中加热源的选择有多种,常用的如卤素灯加热、激光加热、涡流加热、超声波加热,激光主动加热技术是一种潜在和有吸引力的空间热通量模拟技术^[5-6],目前,国内对激光的研究多集中在切割物体、物体的加热成形等方面。激光加热的特点是速率快、受热空间强度分布均匀和响应快速,并且激光加热与传统热激励相比具有许多优势,如作为主动热源,激光由于其平行性好,可以实现远距离加热,而且激光作为一种单色性良好的电磁波有助于红外热像仪的数据采集,且激光功率集中,可有效提高能量的利用效率。国内学者对红外热成像无损检测技术做了大量研究,如分别对脉冲激励和锁相激励手段的红外热波成像技术^[7]、缺陷的深度检测以及边缘识别工作^[8]、激光扫描红外无损检测系统、激光扫描红外热波成像的温度场模型等^[9]进行了研究。

Grice等^[10]针对闭合、倾斜的裂纹缺陷进行了研究,利用激光束作为激励源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。后来,他们又提出了利用激光点或激光线加热物体表面,再通过单个红外探测器检测激光点或激光线附近物体的表面温度,再逐步扫描,多次检测物体不同空间,以此达到检测目的。之后,又提出了探测器垂直扫描与聚焦激光束扫描同步的方式,这使得系统可以捕捉到亚毫秒级范围内的快速热现象,同时能够以等同于探测器场速率的速度在整个垂直扫描线上采集数据。Burrows等^[11]针对激光点激励情况下裂纹开口大小、裂纹长度对检测结果的影响进行研究,并对比研究了激光点激励与热超声激励方式在裂纹缺陷检测方面的效果差异。Montinaro等^[12]针对激光点激励的纤维金属层压板复合材料缺陷检测进行研究;Fedala等^[13]研究了激光锁相热成像技术,并用其定性评估了金属物体中的表面裂纹。为了更好地识别和定位开放裂纹缺陷,提出了对幅值图像进行拉普拉斯算子图像处理的方法^[14]。

本文将激光热成像技术应用于金属近表面缺陷的定性定量检测研究。利用COMSOL软件建立了金属近表面缺陷的仿真模型,研究各类缺陷参数、

激励参数对热传导的影响机制。对不同类型试件展开主动热成像实验,针对红外图像分辨率低、不均匀等缺点,对红外图像用不同滤波方法处理后进行图像质量评价,通过模糊C均值聚类算法,实现金属近表面缺陷大小的识别,以此来实现金属近表面缺陷的在线检测。

激光加热仿真研究

为了明晰主动加热背景下被检测金属样品的温度变化趋势,以及缺陷尺寸、位置、激光功率等参数对温度场分布的影响,本文采用COMSOL Multiphysics 6.0多物理场仿真软件建立了金属材料的三维热传导动态仿真模型,模拟不同激光热源激励参数对金属材料不同缺陷检测的过程。采用圆形光斑激光对金属材料模型表面进行一段时间激励、仿真并分析不同深度的表面及近表面缺陷对热传导产生的影响。对不同尺寸和埋藏深度(距表面距离)分层缺陷的检测进行仿真研究。

仿真模型构建与参数设计

采用激光作为激励源检测含缺陷的金属样品,为了探究激光激励红外检测方法的可行性和实效性,需建立激光主动加热的温度场模型。激励金属样品模型分为两个过程:(1)激光源强制对流样品换热,即通过设置好的功率和光斑直径直射样品,与样品固体域的交界面为耦合面;(2)样品内部热传导换热,即样品内部注入热量后向周围热量传递。利用仿真软件建立两种含缺陷的金属样品模型,分别是长方形槽缺陷和圆形槽缺陷,见图1。缺陷分布在一长方形槽试件上,以样品的长为 x 轴,正方向向右,宽为 y 轴,正方向向内,建立直角坐标系。样品的尺寸为 $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,改变缺陷的长度、厚度和距离激光中心的位置。长方形槽试件缺陷尺寸为 $40\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,距离激光中心 10 mm 。圆形槽试件缺陷的半径为 5 mm ,圆心处距离激光中心 10 mm 。

激光热激励可分为连续波激光和脉冲激光,一种是时间轴上连续的热激励,另一种是不连续的热激励。采用激光热激励可以通过试件表面温度分布确定缺陷的位置,并且连续波激光热激励可提供稳

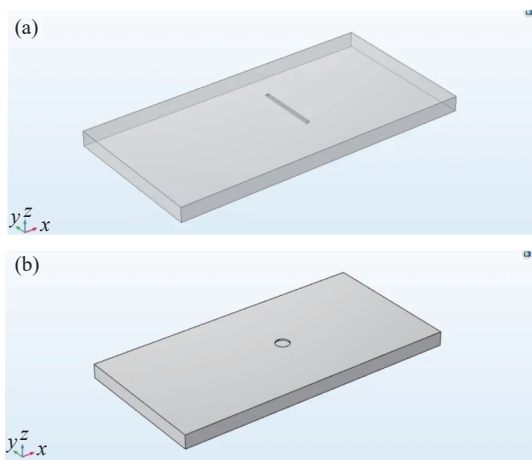


图1 包含缺陷的金属样品模型示意图: (a) 长方形槽; (b) 圆形槽

定的热激励, 便于观察过程性的温度变化。所以本实验选取连续波激光, 激光功率为 400 W, 光斑直径定值为 55 mm, 位置位于中心点 (0, 0, 0), 设置加热时间为 15 s。使用 COMSOL 内置的材料库中的金属材料, 并将查阅到的金属材料的热物性参数添加到材料设置中, 金属材料的热物性参数见表 1。将固体外部材料设置为空气, 设定固体表面和空气间有热量交换。初始温度为室温 20 °C。

表1 金属材料的热物性参数

材料	密度/ (kg/m ³)	比热容/ [J/(kg·K)]	导热系数/ [W/(m·K)]	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ m ² /s)
1Cr13	7700	460	25	11.0
空气	1.205	1005	259	21.4

考虑到计算精度以及计算效率, 网格形状是自

由四面体, 网格尺寸为细化, 试件网格划分结果见图 2。

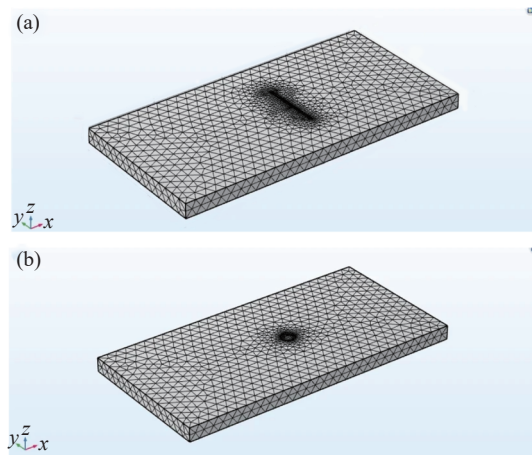


图2 网格划分结果: (a) 长方形槽; (b) 圆形槽

仿真结果

为了研究裂纹深度对激光加热后金属材料表面温度场分布的影响, 本文分别研究了不同深度变化 (0.5、1.0、1.5、2.0 mm) 对温度场分布的影响。仿真得到的不同裂纹深度的温度场分布见图 3。由图 3 可知, 裂纹几何尺寸对热传导具有明显影响。当裂纹深度较浅时, 热传导现象相对不明显。相反, 随着裂纹深度的增大, 裂纹区域汇集了更多的热量, 热量明显向裂纹位置迁移。这是由于位置更深的裂纹提供了更大的热流通道, 促使局部温度上升。这种热传导变化使裂纹与周边形成了显著的温度差异。综上可知, 裂纹深度与该处的温度场分布

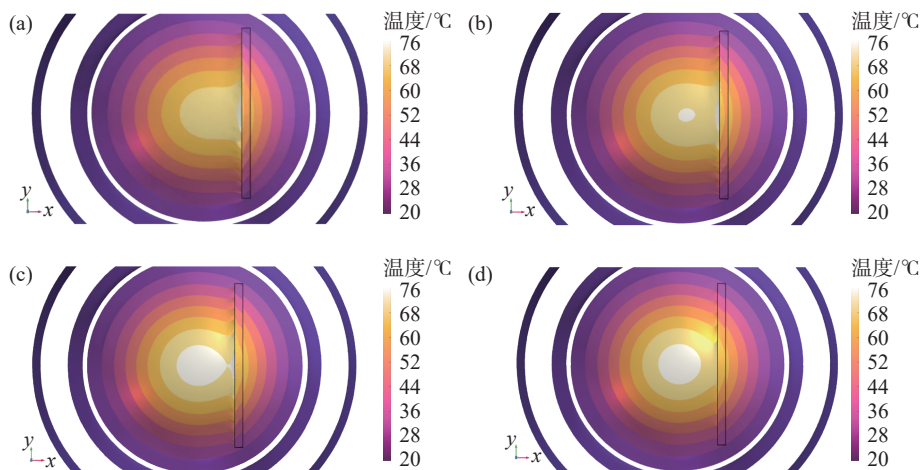


图3 长方形槽试件不同缺陷深度金属材料等温面: (a) 2.0 mm; (b) 1.5 mm; (c) 1.0 mm; (d) 0.5 mm

呈正相关性,即裂纹位置越浅温度越低,裂纹位置越深温度越高。

为了研究不同缺陷类型对激光加热后金属材料表面温度场分布的影响,对圆形槽试件也做了如下仿真,分别研究了深度为 0.5、1.0、1.5、2.0 mm 的

深度变化对温度场分布的影响。仿真得到的不同深度的温度场分布见图 4。由图 4 可知,随着裂纹位置深度的增加,会导致裂纹附近的温度梯度变化更集中,且温度更高区域向缺陷处移动,温度变化趋势与长方形槽时间的仿真结果保持一致。

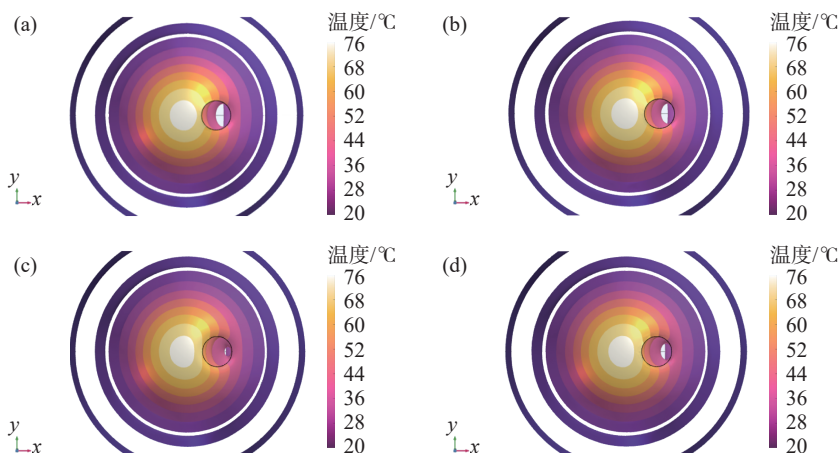


图 4 圆形槽试件不同缺陷深度金属材料等温面: (a) 2.0 mm; (b) 1.5 mm; (c) 1.0 mm; (d) 0.5 mm

近表面缺陷检测实验

实验装置搭建

为了实现金属材料缺陷检测和定量研究的目标,搭建了一套基于激光红外热成像技术的表面及近表面缺陷检测系统。该系统可以通过对物体表面进行高精度的热成像来检测金属材料中的缺陷,并且可以定量地测量裂纹的尺寸和位置。图 5 为激光激励热成像系统,该系统由红外热像仪、激光器、光斑镜头、水冷机组组成。感应加热系统的主要设备是半导体激光器,该设备可以产生的激光功率为



图 5 激光激励热成像系统

0~350 W,激光束加热试件表面在试件中实现热量传递。实验中采用红外热像仪的分辨率为 640 像素×480 像素,测温范围为-20~200 °C。

实验过程

为了研究金属材料中不同种类缺陷检测效果,通过制作人工缺陷的方法加工不同的金属试件。金属试件材质为 Q235,背部圆形孔缺陷的试件规格为 140 mm×140 mm×5 mm。为了进行缺陷定量计算,每块试件加工直径相同(8 mm)但深度不同的圆形孔 9 个,深度分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 和 1.0 mm。圆形孔试件实物图及示意图见图 6。

将激光功率作为变量,对圆形孔试件展开激光加热温度分布研究。通过改变激光功率,探究当缺陷为圆形时,对金属材料表面温度的影响。实验过程中,采用上述实验设备,所有试验的激励参数均设置为:激光功率 80~100 W,加热时间 0~10 s。得到的功率为 80 W 实验结果见图 7。经 80 W 激光光源加热 10 s 后,激光激励方法能够较好地呈现缺陷所在位置,缺陷距离背部表面越近越能看到明显的温度差,即温度变化与非缺陷项区域相比也更明显。

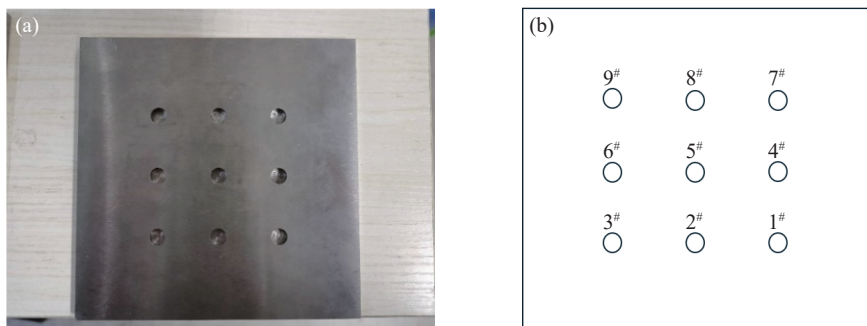


图6 圆形孔试件: (a) 试件实物图; (b) 试件示意图

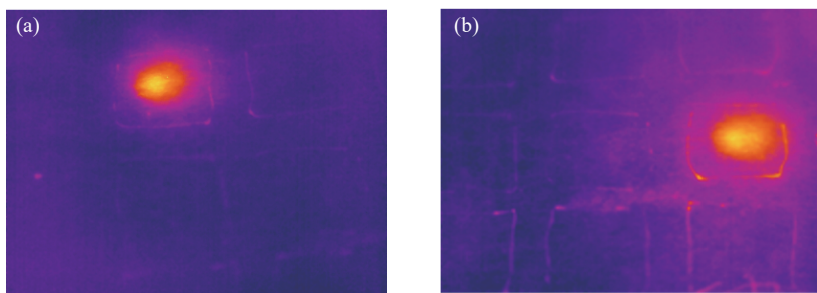


图7 不同深度缺陷金属材料表面温度场分布: (a) 0.4 mm; (b) 0.5 mm

实验结果分析与讨论

采用红外相机图像采集得到的是伪彩色呈现的红外图像,受外界环境及相机自身暗电流的影响,原始红外图像中存在一些图像质量问题,如缺陷区域模糊不清、视觉辨识度较低。当存在激励参数设置不当、缺陷深度较深、缺陷尺寸较小或试件表面形态复杂等时,通过热成像技术得到的红外图像往往会比较模糊,缺陷区域的特征不显著,信噪比不理想,以至于很难从视觉上把缺陷从周围的背景噪声中识别出来,进而严重影响对金属表面缺陷的识别与定位。因此本节首先对红外图像进行预处理,然后对缺陷区域进行识别,最终可得到缺陷的大小与位置信息。

红外图像滤波处理

红外图像增强旨在对热图像中的特定特征(如边缘、轮廓以及对比度等)开展调整与锐化操作,使得图像更契合人眼观察的需求,同时也便于计算机进行后续处理。它属于基础性的图像数据处理方法,但该方法未必能增加热图像所蕴含的信息,在某些情形下,甚至可能造成部分信息的损失。尽管如此,经红外图像增强处理后的热图像,提升了识别特定信息的能力,进而使图像中人们感兴趣的区

域得以突出显示。在实际应用场景中,常见的红外图像增强方法丰富多样,具体包含直方图均衡化、限制对比度自适应均衡化、中值滤波、均值滤波及高斯滤波等。这些方法各自具备独特的优势与适用场景,能够满足不同情况下对红外图像增强的需求。图8(a)为红外相机采集到的原始图像,图8(b)、图8(c)、图8(d)分别为中值滤波、高斯滤波、均值滤波的处理结果。

依靠肉眼观察红外图像增强后的效果会受人为主观因素的影响,这使得分析结果可能存在一定误差。为了提高分析结果的准确度,引入了峰值信噪比(PSNR)指标,运用该指标对经过增强处理的金属材料表面红外图像展开峰值信噪比分析,具体公式如式(1)所示:

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \lg\left(\frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{\text{MSE}}}\right) \quad (1)$$

式中: MSE 为输出图像与参考图像之间的均方根(噪声); MAX_I 为图像像素最大值(热信号)。3种滤波方法的峰值信噪比结果见表2,由表2可知,中值滤波的处理效果优于高斯滤波、均值滤波方法。

模糊 C 均值聚类分割

通过仿真分析得知,经主动加热后缺陷处的温

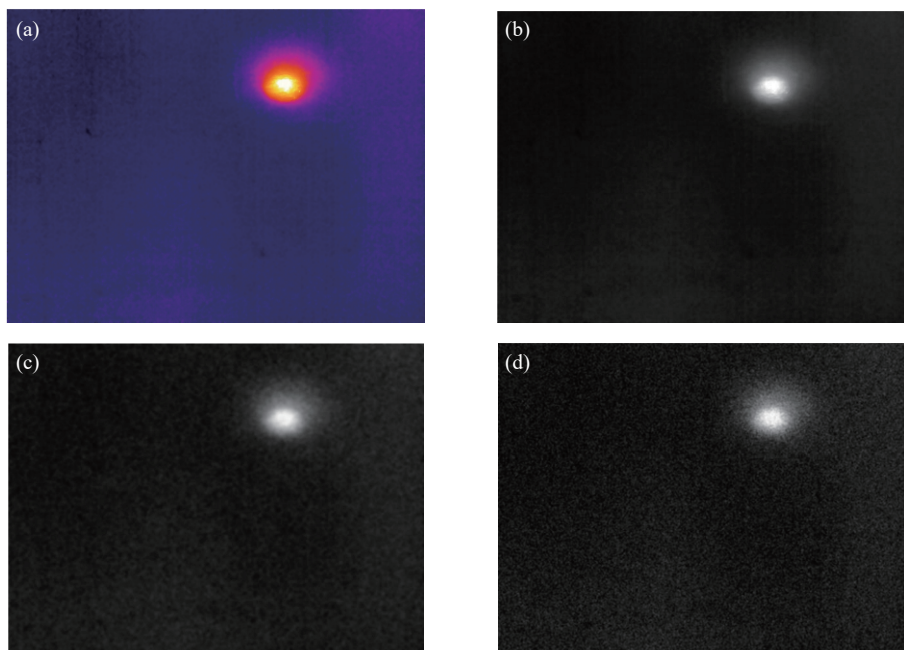


图 8 不同方法的滤波结果: (a) 原始图像; (b) 中值滤波; (c) 高斯滤波; (d) 均值滤波

表 2 3 种滤波方法的 PSNR 结果

方法	PSNR
中值滤波	44.4422
高斯滤波	43.2522
均值滤波	36.7174

度会升高,在实验结果中表现为红外图像的温度异常区域,即高亮位置,因此本节将使用区域分割算法将缺陷分割出来以便于定量计算。模糊 C 均值聚类算法是聚类分析领域常用的算法,模糊聚类分析法是借助模糊学理论来开展聚类分析工作,其对图像信息所存在的不确定性有着较好的描述能力,能够极大提升在红外图像中对缺陷进行分割的精准度。因此本文提出模糊 C 均值聚类算法对激光加热红外图像进行聚类分析。图 9 为模糊 C 均值聚类动态阈值分割结果图。从图 9 中可以看出,相较于传统的边缘检测算子,该方法能够更完整清晰地分割出图像中的缺陷区域,有助于更准确地分割缺陷,并进行缺陷面积的定量评估。

缺陷深度预测模型

由仿真结果可知,激光加热下的金属材料表面温度分布与缺陷自身参数密切相关。当试件表面存在裂纹缺陷时,由于空气介质的热阻效应,裂纹区



图 9 模糊 C 均值聚类动态阈值分割结果

域会形成热传导障碍,导致缺陷两侧出现明显的温度梯度,且这种温度分布特征会随缺陷埋藏深度的变化呈现规律性改变。因此,本节将建立缺陷深度预测数学模型。

以激光功率为 80 W 为例,通过红外图像分析软件得出图像各像素点的对应温度,并计算缺陷区域温度变量,温度值见表 3。从表 3 中可以看出,温度变量随着深度变化不呈明显的线性关系。因此采用最小二乘法对缺陷深度 x 随温度变量 y 进行二次、三次拟合。二次拟合曲线为: $y = 4.94x^2 - 19.06x + 18.23$; 三次拟合曲线为: $y = 8.81x^3 - 10.93x^2 - 10.58x + 16.95$ 。

表3 不同深度的缺陷处的温度变化

°C

0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm	0.7 mm	0.8 mm	0.9 mm	1.0 mm
14.30	13.71	10.98	9.34	9.04	8.23	5.30	4.63	4.52

在最小二乘法中,常用的拟合指标有均方误差(MSE)和相关系数(R^2)。均方误差通过计算预测值与真实值之间差值的平方的平均值,来量化模型预测结果的误差。它对预测值与真实值之间的每个误差都进行了平方处理,这使得较大的误差会被放大,从而更突出地显示出哪些点处的误差较大。在实际情况中, R^2 取值介于0到1之间, R^2 值越高的模型,其拟合效果相对更好,更能准确地描述数据的内在关系。对激光功率为800 W时的温度-深度模型的拟合结果进行评价,得出的评价结果见表4。可以看出,三次拟合效果优于二次拟合效果,因此在本文中采用三次拟合模型。

表4 拟合效果评价

拟合次数	均方误差, MSE	相关系数, R^2
二次	0.540	0.892
三次	0.533	0.893

绘制缺陷深度-温度三次拟合曲线,如图10所示。可以看出,在该模型中,各缺陷深度位置对应的温度值与表3数据大致吻合,由表4也可知相关系数接近0.9,虽存在一定偏差,但整体趋势上温度变化值随着缺陷深度的增加而减小,与仿真规律一致,较好地反映了缺陷深度与温度之间的关系。

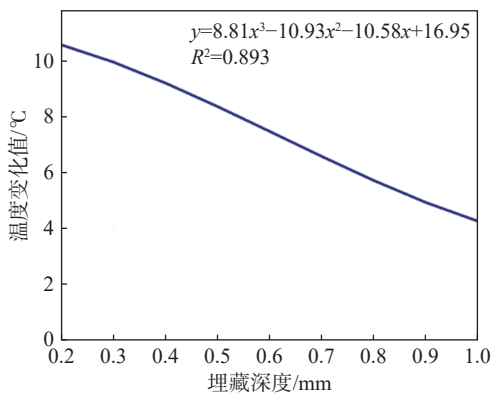


图10 激光功率为80 W时缺陷深度-温度拟合曲线图

结束语

(1) 通过 COMSOL Multiphysics 6.0 多物理场仿

真软件建立了金属材料的三维热传导动态仿真模型,模拟了激光热源激励方式对金属材料不同缺陷检测的过程,并研究了缺陷尺寸、位置、激光功率对温度场分布的影响,结果显示,裂纹深度与该处的温度梯度呈正相关性,即裂纹越浅温度越低、裂纹越深温度越高。

(2) 搭建了一套基于激光红外热成像技术的金属表面及近表面缺陷检测系统。该系统可以通过对物体表面进行高精度的热成像来检测金属材料中的缺陷,从而有助于为定量地测量裂纹的尺寸和位置提供数据。

(3) 研究了不同图像滤波方法和缺陷分割方法。通过对比中值滤波、高斯滤波、均值滤波对红外图像的处理结果,发现中值滤波的处理效果较好。提出采用模糊C均值聚类算法对红外图像进行聚类分析,该方法能够更完整清晰地分割出图像中的缺陷区域,有助于更准确地判断缺陷位置并进行面积定量评估。提出了基于最小二乘法的缺陷深度预测模型,较好地拟合了缺陷深度与温度之间的关系。

参考文献

- [1] 陈明文. 基于深度学习的金属表面缺陷检测方法研究与实现 [学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2023
- [2] 张凯. 基于激光扫描红外无损检测技术的裂纹缺陷检测 [学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2020
- [3] 吕中产. 主动红外无损检测中缺陷信号的提取和分析 [学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- [4] Yuan L H, Zhu X, Hong K. Detection of material surface cracks by infrared non-destructive testing // 11th International Conference on Prognostics and System Health Management. Jinan, 2020: 587
- [5] 李铭. 基于时域卷积网络的脉冲红外无损检测方法研究 [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021
- [6] 范驰骋. 基于主被动红外图像融合的激光芯片红外无损检测方法 [学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020
- [7] 王荣邦, 陈振伟, 裴翠祥, 等. 新型便携式双模激光红外无损检测系统在航空复合材料检测中的应用 // 中国力学大会. 西安, 2022: 746
- [8] 陈昊泽. 基于激光热成像的材料缺陷检测方法研究 [学位论文]. 太原: 中北大学, 2023
- [9] 刘颖韬, 郭广平, 曾智, 等. 红外热像无损检测技术的发展历

- 程、现状和趋势. 无损检测, 2017, 39(8): 63
- [10] Grice K R, Inglehart L J, Favro L D, et al. Thermal wave imaging of closed cracks in opaque solids. *J Appl Phys*, 1983, 54(11): 6245
- [11] Burrows S E, Rashed A, Almond D P, et al. Combined laser spot imaging thermography and ultrasonic measurements for crack detection. *Nondestruct Test Eval*, 2007, 22(2/3): 217
- [12] Montinaro N, Cerniglia D, Pitarresi G. Detection and characterisation of disbands on fibre metal laminate hybrid composites by flying laser spot thermography. *Composites B Eng*, 2017, 108: 164
- [13] Fedala Y, Streza M, Roger J P, et al. Open crack depth sizing by laser stimulated infrared lock-in thermography. *J Phys D Appl Phys*, 2014, 47(46): 465501
- [14] Liu L S, Mei H W, Guo C J, et al. Nondestructive testing of porcelain

post insulators using active infrared thermography // *Proceeding of 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*. Honolulu, 2017: 68

基金项目: 北京市科技“多光谱多信息融合的表面在线检测仪器开发及集成应用”计划资助项目 (Z221100005822012)。

作者简介: 徐霞 (1975—), 女, 现就职于中石化宁波镇海炼化有限公司, 主要从事计量技术、计量数据管理工作, 任工程师。通信地址: 浙江省宁波市镇海区蛟川街道镇海炼化 1 号门岗; E-mail: xuxia.zhlh@sinopec.com。