

圆柱面任意方向裂纹的双线阵激光热像检测

朱鑫浩, 侯德鑫, 叶树亮

(中国计量大学 工业与商贸计量技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 圆柱铁氧体磁芯为黑色柱体, 裂纹对比度不高, 传统机器视觉裂纹成像效果不佳。激光红外热成像技术根据试样表面的温度分布情况检出裂纹缺陷, 可用于解决低对比度微小裂纹的检测问题。常用的线激光、点激光在检测裂纹时, 平行于激光扫描方向裂纹往往因两侧热流较小而无法检出。双线阵激光热成像检测系统, 线阵激光错位排布, 营造多方向热流, 可实现任意方向裂纹检测。为验证双线阵激光对任意方向裂纹的检测可行性, 仿真模拟了 0° 、 45° 、 90° 裂纹的双线阵激光扫描过程。线阵激光由于各点光斑功率分布存在较大的非均匀性, 不同参数设计对裂纹检测效果影响大。因此, 优化点光斑半径、点光斑中心距、线阵激光错位间距、线阵激光间距、运动速度等设计参数实现裂纹检测信噪比提升。裂纹成像算法根据温度空间梯度成像裂纹, 由于光斑的非均匀性, 裂纹在两束激光间不同相对位置的梯度大小各不相同。算法选取裂纹在两束激光间具有较大相对梯度的位置, 通过多幅梯度图像融合, 实现任意方向裂纹检测。对 4 个具有水平、垂直、倾斜自然裂纹的铁氧体样品进行实验, 成像结果清晰直观地显示出所有裂纹。

关键词: 激光热成像; 双线阵激光; 任意方向裂纹; 参数优化

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200097

Dual linear array laser thermography detection of arbitrary direction cracks on cylindrical surface

Zhu Xinhao, Hou Dexin, Ye Shuliang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Cylinder ferrite magnetic core is a batch of black cylindrical samples and its crack contrast is low. The crack imaging result of traditional machine vision is not good. Laser infrared thermography detection technology relies on the sample surface temperature distribution to detect the crack defects, which solve the problem of low contrast micro crack detection. When the crack is detected by line laser or point laser, the cracks parallel to the laser scanning direction is hard to detect because of the small heat flow on both sides. Dual linear array laser thermography system with dislocation arrangement creates multi-direction heat flow, which can detect arbitrary direction cracks. In order to verify the feasibility of dual linear array laser to detect arbitrary direction cracks, simulation took the laser scanning process of 0° , 45° and 90° cracks. Linear array laser had great non-uniformity in the power distribution of each spot, so different parameter design had great influence on crack detection. Therefore, the design parameters such as spot radius, spot center distance, linear array laser dislocation distance, linear array laser distance, and motion velocity were optimized to improve the SNR in crack detection. Crack

收稿日期:2020-04-01; 修订日期:2020-07-15

基金项目:浙江省自然科学基金 (LY18F030011)

作者简介:朱鑫浩 (1996-), 男, 硕士生, 主要从事激光扫描热成像方面的研究工作。Email: zhuxinhao@yeah.net

导师简介:叶树亮 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要从事化工产品安全测试技术与仪器、工业零部件缺陷检测技术与设备、精密测量中部件信号处理与误差分析技术方面的研究工作。Email: itmt_paper@126.com

imaging algorithm generated cracks based on temperature spatial gradient. Due to the non-uniformity of the laser spots, the gradient of the crack at different relative positions between two laser beams was different. Algorithm selected the position of the cracks with large relative gradient between two laser beams. Through the fusion of multiple gradient images, crack imaging algorithm achieved arbitrary direction crack detection. The imaging algorithm was designed according to the crack spatial temperature gradient characteristics excited by dual linear array laser. Four cylinder ferrite samples with horizontal, vertical and inclined natural cracks were tested, and the imaging results showed all the cracks clearly and intuitively.

Key words: laser scanning thermography; dual linear array laser; arbitrary direction cracks; parameter optimization

0 引言

在生产过程中,由于加工工艺问题,材料表面易产生裂纹。裂纹将会影响材料的强度、特性以及寿命,造成安全隐患^[1]。激光热成像具有直观、高效、无污染、无耦合等优点,能检测微米级裂纹^[2-3],被广泛应用于化工、航天、核工业等行业。

激光热成像通过激光扫描激励样品表面,并用热像仪、计算机进行图像处理,根据热阻效应检出裂纹^[3]。不同激光功率分布对任意方向裂纹检测具有不同效果。王晓宁^[4]等人用点激光检测铁氧体表面裂纹时,她发现点光斑中心能量集中,平行激光扫描方向的裂纹信噪比低;J.Schlichting^[5]等人用“飞点”激光检测金属样品表面裂纹,通过空间一阶导数成像裂纹,但检测对象都为垂直激光扫描方向裂纹;Li Teng^[6]等人用线激光检测钛试件表面开口裂纹,相比点激光,裂纹成像信噪比显著提高,但激光线长方向热流均匀,平行线激光扫描方向裂纹无法检出;姚行洲^[7-8]等人用线激光检测圆柱铁氧体裂纹,相邻热信号法检测出轴向裂纹,但周向裂纹无法检出;西安交通大学 Pei C^[9-11]等人用 9×9 棋盘式点阵列激光检测金属表面裂纹,他们发现裂纹在点光斑中心、光斑间隙成像不连续。以上激光功率分布在任意方向裂纹检测上均存在不足。

针对任意方向裂纹检测不足,王晓宁^[5]等人深入研究了提高点激光热成像信噪比的多项关键技术,她提出的对称点温差算法有效解决了平行点激光运动方向裂纹信噪比低的问题;S.Hermosilla^[12]等人采用“飞点”相机,通过主成分分析法提高了“飞点”激光在恶劣工况的检测能力;姚行洲^[9]等人研究了线激光系统各参数对成像信噪比的影响,并采用 BPNN 成像算法进一步提高了线激光裂纹成像信噪比;许颖^[13]等人针对水平与垂直裂纹分别采用了线激光垂直扫描与线

激光水平扫描;王晓娜^[14]等人采用线激光正交扫描,解决了线激光无法检出平行扫描方向裂纹的问题;西安交通大学 Pei C^[9-11]等人通过改进激光传输组件、聚光组件以及光斑排布,有效改善了激光的激励效果,提高了成像信噪比。通过光斑设计的改进,他们发现密集激光可以增强裂纹成像。同时,小波变换、神经网络等算法的应用,进一步提高了裂纹成像信噪比。

文中采用双线阵激光功率分布设计,构筑任意方向热流,实现任意方向裂纹检测。文中通过数值仿真,验证了双线阵激光检测任意方向裂纹的可行性,并研究了双线阵激光激励参数、运动参数的优化,从而获得高信噪比裂纹成像图。另外,文中据此设计,提出了一套基于双线阵激光的任意方向裂纹成像算法。最终,文中将该检测方法用于真实铁氧体裂纹检测,成像结果清晰、直观地显示出任意方向裂纹。

1 双线阵激光检测系统和检测方法

1.1 检测系统基本结构

双线阵激光检测圆柱铁氧体柱面裂纹的系统结构如图 1(a)所示,该系统主要有热像仪、线阵激光、柱体转动机构、计算机四部分构成。热像仪垂直位于圆柱铁氧体上方,两束线阵激光位于热像仪视场两侧。检测时,样品旋转,激光持续激励样品表面,热像

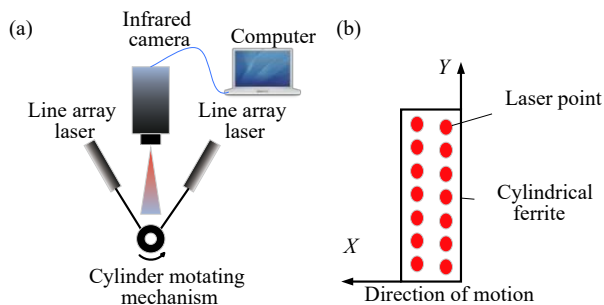


图 1 (a) 系统结构图; (b) 双线阵激光示意图

Fig.1 (a) System structure; (b) Dual linear array laser schematic diagram

仪记录两束光斑之间的温度数据。计算机通过相应信号提取算法,实现圆柱铁氧体表面裂纹检出。

1.2 任意方向裂纹检测原理

试样表面存在裂纹时,裂纹会阻碍不平行裂纹方向热流,导致样品表面温度梯度发生变化。线阵激光能打断激光线长方向热流的均匀性,因此,具备任意方向裂纹的检测能力。当有裂纹经过线阵激光时,裂纹会阻挡激光点热流。由此,热量在裂纹两端积聚,导致裂纹处或裂纹附近产生较大温度梯度。但线阵激光存在光斑中心掩盖裂纹特征和光斑间隙激励不足的问题,导致裂纹漏检或成像不连续。为解决以上

不足,文中采用两束错位排布的线阵激光,如图 1(b)所示。该设计目的在于两束激光检测得到互补的裂纹片段,尽可能弥补线阵激光所带来的裂纹漏检或成像不连续。同时,两束激光间可以产生不同方向热流,使得任意方向裂纹检测效果不同。

1.3 双线阵激光检测仿真实验

1.3.1 仿真模型

为简化模型、减少计算量,文中建立了长 6.3 mm,宽 6 mm,厚 7 mm 的均值平板数值仿真模型,相关材料参数如表 1 所示。仿真样品裂纹深 2 mm,宽 1 μm,存在 0°、45°、90°不同方向裂纹,如图 2(a)所示。

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameter

Material	Thermal conductivity/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Density/kg·m ⁻³	Specific heat capacity/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Ferrite	3.5	4900	620
Aluminum	217	2700	897
Air	0.024	1.29	1030

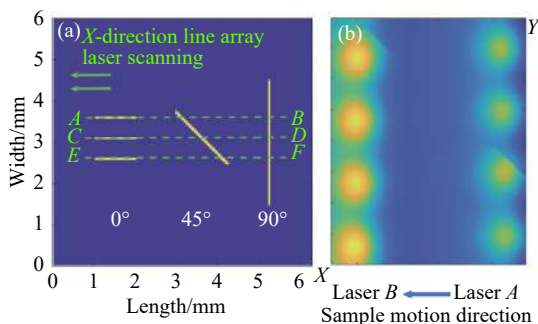


图 2 (a) 仿真模型, (b) 表面温度分布

Fig.2 (a) Simulation model, (b) Surface temperature distribution

均质各向同性材料的非稳态三维热传导方程描述为:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ρ 、 c 、 λ 、 τ 分别为微元体的密度、比热容、导热系数和时间。其温度边界条件表示为:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{dt}{dx} = 0, x = 0 \text{ 或 } L_x \\ -\lambda \frac{dt}{dy} = 0, y = 0 \text{ 或 } L_y \\ -\lambda \frac{dt}{dz} = \begin{cases} q, \tau \leq t_0 \\ 0, \tau > t_0 \end{cases}, z = 0 \\ -\lambda \frac{dt}{dx} = 0, z = L_z \\ t(x, y, z) = 0, \tau = 0 \end{cases} \quad (2)$$

L 为样品几何尺寸; q 为激光功率密度 (高斯分布); t_0 为激励时间。

图 2(b) 为激光激励下的样品表面温度分布图,图 2(a) 中的 AB 、 CD 、 EF 3 行分别位于图 2(b) 激光 A 光斑间隙、光斑中心与间隙中点、光斑中心。激光静止,样品自右向左运动,空间分辨率 50 μm。相邻激光点的圆心距为 2 mm,半径为 0.7 mm,各点功率为 1 W,功率分布呈高斯分布。两束激光间距 4.5 mm,光斑中心相互错开 0.4 mm,激光与样品的相对速度为 3 mm/s。在温度图中,完整裂纹不能直接观察到。

1.3.2 裂纹梯度成像

图 3(a)、(b) 为与水平方向呈 0°、45°、90°的三条裂纹经过 X 方向单束线阵激光 (激光 A) 一维扫描后, X 、 Y 梯度成像结果。图中, X 梯度检测到 45°、90°裂纹,而 Y 梯度检测到 0°、45°裂纹。 Y 梯度图中位于光斑间隙、光斑中心的 0°裂纹发生了漏检。图 4(a) 为单束线阵激光激励,直线 AB (光斑间隙)、 CD (光斑中心与间隙中点)、 EF (光斑中心) 上各点的 X 、 Y 温度梯度曲线。从图中可以看到,0°裂纹光斑中心 (AB - Y) 以及光斑间隙 (EF - Y) 的 Y 梯度明显小于光斑中心与间隙中点 (CD - Y) 的 Y 梯度。这是因为光斑中心掩盖裂纹特征、光斑间隙激励不足导致的裂纹梯度下降。

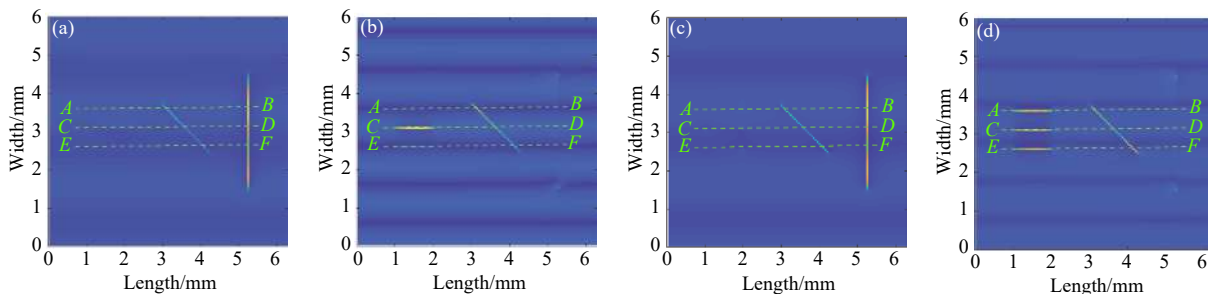


图 3 (a) 线阵激光 X 梯度成像图; (b) 线阵激光 Y 梯度成像图; (c) 双线阵激光 X 梯度成像图, (d) 双线阵激光 Y 梯度成像图

Fig.3 (a) Line array laser X gradient; (b) Line array laser Y gradient; (c) Dual linear array laser X gradient; (d) Dual linear array laser Y gradient

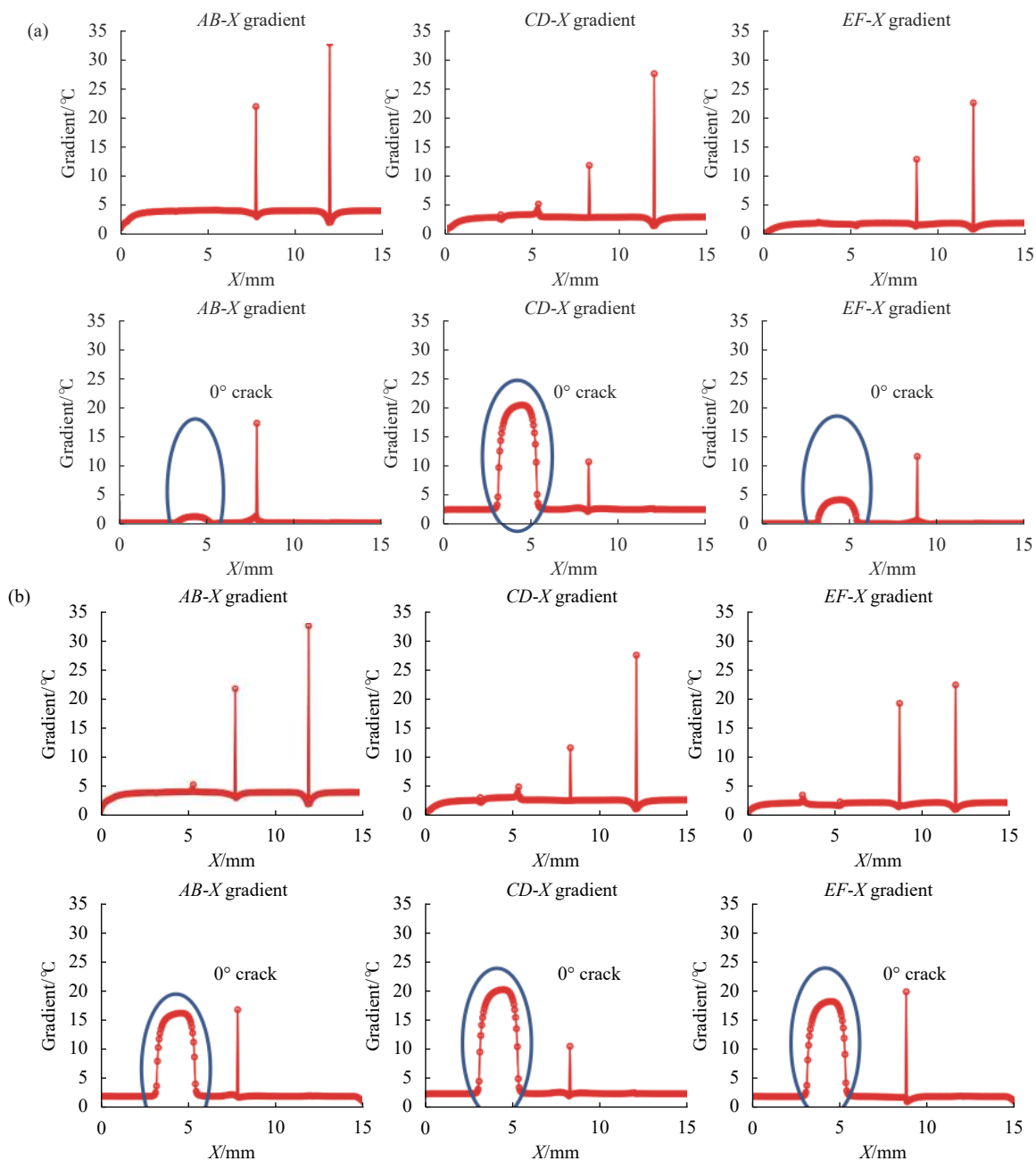


图 4 (a) 线阵激光直线 AB、CD、EF 温度梯度; (b) 双线阵激光直线 AB、CD、EF 温度梯度

Fig.4 (a) Line array laser AB, CD, EF temperature gradient; (b) Dual linear array laser AB, CD, EF temperature gradient

双线阵激光检测效果如图 3(c)、(d) 所示, 三种裂纹能在 X 、 Y 梯度图中分别成像, 并且 0° 裂纹在光斑中心 (AB - Y)、光斑间隙 (EF - Y) 的梯度都得到了有效提高, 如图 4(b) 所示。

2 系统参数优化设计

双线阵激光所产生的热流环境复杂, 系统参数对裂纹检测带来不确定性影响。此节研究了系统各参数对裂纹检测的影响, 通过仿真结果确定优化系统的相应参数, 从而提升了裂纹成像信噪比。

$$SNR = \frac{\mu_s}{\sigma_N} \quad (3)$$

信噪比采用主动热成像领域 R. Hidalgo-Gato^[15] 等人提出的评价方式, 缺陷区域与非缺陷区域的平均幅值之差 μ_s 除以非缺陷区域的标准差 σ_N , 如公式 (3)

所示。

2.1 激光激励条件优化

2.1.1 点光斑半径

当点光斑功率一定时, 点光斑的半径越小, 能量越集中, 裂纹热阻效应越明显, 裂纹更易检出^[11]。对于线阵激光, 光斑越密集, 裂纹成像也就越清晰完整。由于线阵激光为非均匀激光, 梯度图存在如图 5(a)、(b) 所示的条纹状干扰。过小的光斑半径导致光斑中心能量集中, 背景非均匀性增强, 裂纹对比度降低, 且样品有烧蚀风险。综上, 过大过小的点光斑都会造成不利影响。图 5(c)、(d) 为 0.4~0.9 mm 半径点光斑与背景梯度的幅值关系, 光斑半径越小, 梯度起伏越大, 背景非均匀性越强。裂纹梯度一般在 5°C 以上, 为保证裂纹良好的对比度, 背景最大梯度不能超过 5°C 。由此, 激光半径折衷设计在 0.6~0.7 mm。

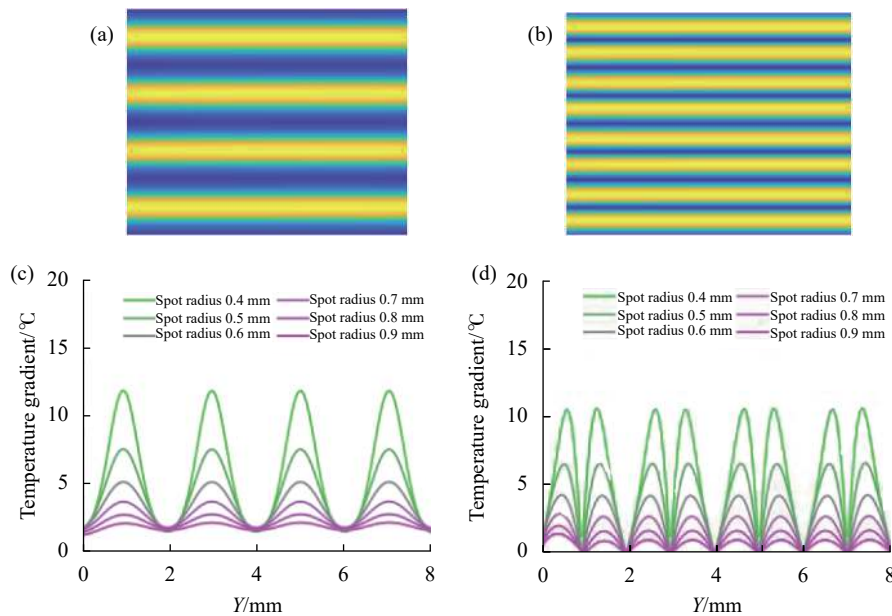


图 5 (a) X 梯度背景非均匀性; (b) Y 梯度背景非均匀性; (c) 点光斑半径与 X 梯度幅值关系; (d) 点光斑半径与 Y 梯度幅值关系

Fig.5 (a) X gradient background heterogeneity; (b) Y gradient background heterogeneity; (c) Relationship between spot radius and X gradient amplitude; (d) Relationship between spot radius and Y gradient amplitude

2.1.2 相邻激光点中心距

相邻激光点中心距影响成像裂纹梯度幅值, 过小的间距热流相互干扰, 检测效果接近线激光, 平行扫描方向裂纹漏检。而过大的点光斑中心距使得两个点光斑连线的中间区域激励不足, 容易导致裂纹漏检或成像不连续。2.1.1 节设计中, 激光引起的最大梯度变化在 5°C 左右, 因而, 梯度幅值大于 10°C 的裂纹

较易检出。图 6(a) 为半径 0.7 mm 相邻点光斑中心距与裂纹平均梯度值关系。 90° 裂纹梯度幅值在维持在 10°C 以上, 受激光点中心距影响较小, 而 0° 裂纹受激光点中心距影响较大。当点光斑中心距在 1.5 mm 以内, 光斑之间热流相互干扰, 0° 裂纹梯度幅值较低, 裂纹易漏检; 当激光点距离在 2~3 mm 以上, 裂纹梯度幅值较高, 相邻光斑热流干扰较少; 当激光间距超过

3 mm, 此时只有一个光斑的热流有效, 0°、90°裂纹梯度都不再明显变化, 但点光斑连线的中间区域开始出现激励不足。为保证良好的裂纹成像质量且任意方

向裂纹不被漏检, 0.7 mm 半径点激光中心距可设计在 2~3 mm。

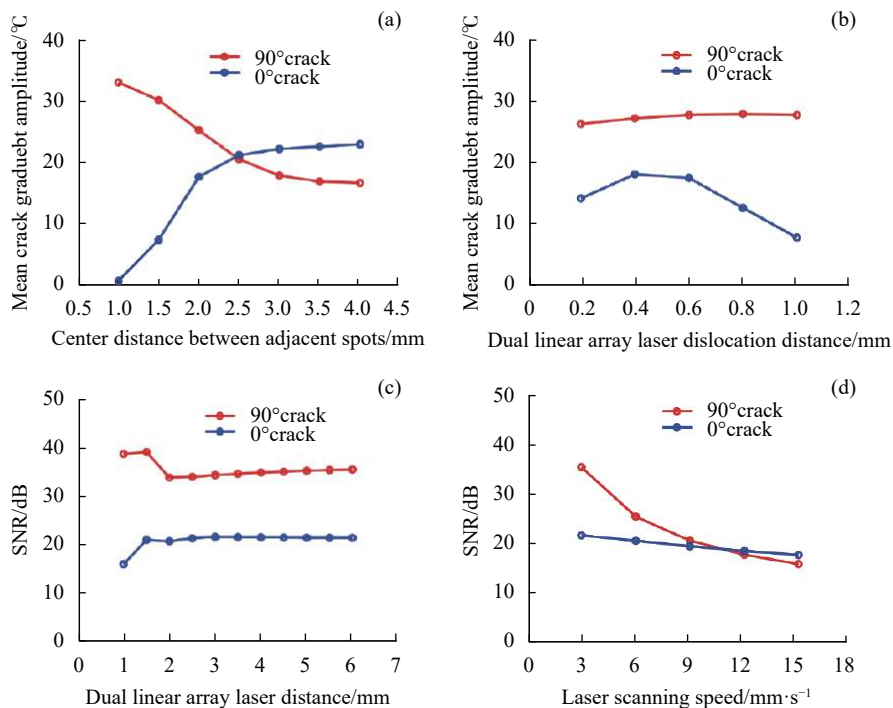


图 6 (a) 光斑中心距与裂纹梯度值关系; (b) 错位间距与裂纹梯度值关系; (c) 激光间距与裂纹信噪比关系; (d) 扫描速度与裂纹信噪比关系
Fig.6 (a) Relationship between center distance and crack gradient; (b) Relationship between dislocation distance and crack gradient; (c) Relationship between laser spacing and crack SNR; (d) Relationship between scanning speed and crack SNR

2.1.3 双线阵激光错位间距

双线阵激光错位使得两束激光拥有不同的检测效果, 裂纹梯度幅值发生变化。若错位太少, 两束激光不能得到互补的成像效果, 裂纹成像漏检或不连续; 若完全错开, 不能避免光斑中心能量集中引起的裂纹漏检或不连续。图 6(b) 为双线阵激光错位间距与裂纹梯度幅值关系。90°裂纹梯度维持在 26 °C 左右, 裂纹梯度幅值受激光错位间距影响小, 在任意激光错位间距下都能良好成像。而 0°裂纹在激光错位间距 0.3~0.7 mm 时, 裂纹梯度幅值相对较高, 因此, 错位间距设计在 0.3~0.7 mm。

2.1.4 双线阵激光间距

双线阵激光间距过近, 易相互干扰, 产生斜向热流, 影响裂纹成像信噪比, 因此需要保证足够的间距, 但同时激光又不能超出热像仪视场。图 6(c) 为双线阵激光间距与裂纹成像信噪比关系, 当激光间距大于 2 mm, 信噪比不再发生变化, 两束激光不会产生相互

影响。因此, 热像仪在选型时, 视场宽度至少大于 4 mm (保证两束激光完全进入视场)。

2.2 运动参数优化

激光扫描速度设置与温升需求、热像仪采样帧频、样品导热系数等有关。一方面, 热像仪采样帧频有限, 运动速度过高, 不易捕捉裂纹温升变化, 并带来运动模糊, 裂纹检测灵敏度下降。另一方面, 激光运动速度过慢, 激光易烧蚀样品表面; 运动速度过快, 激光激励不充分。

图 6(d) 为双线阵激光扫描速度与 X、Y 梯度裂纹成像信噪比关系, 扫描速度越快, 成像信噪比越低。非制冷型热像仪帧频在窗口模式下可以达到 200 Hz, 同时为获得良好成像信噪比, 双线阵激光运动速度设置 3~6 mm/s 为宜。当扫描速度在 3 mm/s 时, 激光引起样品温升 80 °C 左右, 对于铁氧体、金属样品也不易发生烧蚀。

3 任意方向裂纹成像算法

双线阵激光检测系统仅记录两束激光间温度数据,如图 2(b)所示,由于两束激光的检测效果不同,数据采用两束激光各自附近的 X 、 Y 梯度。整个检测平面的梯度图通过两束激光间某个特定位置所有时刻的梯度数据拼接而成,而不同方向梯度的最佳特征提取位置不同。最终检测结果由激光 A 附近 X 、 Y 梯度图以及激光 B 附近 X 、 Y 梯度图融合而成。由于 X 、 Y 梯度幅值、两束激光引起的梯度幅值变化均存在差异,不能直接进行图像融合。针对以上问题,文中研

究了样品在激光间不同相对位置 X 、 Y 梯度变化以及图像融合算法。

3.1 梯度与激光相对位置

图 7 为样品运动在两束激光间不同相对位置时的梯度大小关系,尽可能选择能准确区分裂纹与背景的最佳相对位置。文中选择样品运动至距离激光 1 光斑中心 0.6、3.8 mm 各时刻的 X 梯度数据作为检测数据,距离激光 1 光斑中心 1、4 mm 各时刻的 Y 梯度数据作为检测数据。通过图像拼接、时间同步和背景差分成像,成像出 4 幅具有不同裂纹片段的裂纹图,如图 8(a)~(d)所示。

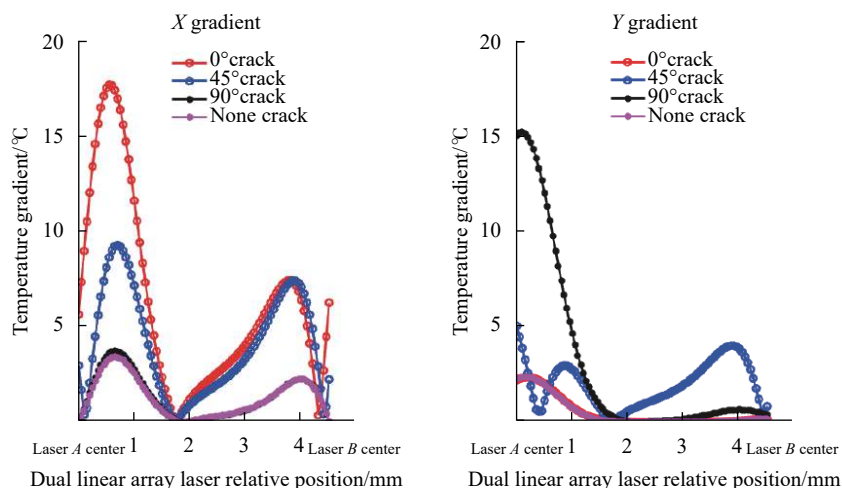


图 7 梯度与激光相对位置关系

Fig.7 Relationship between gradient and laser relative position

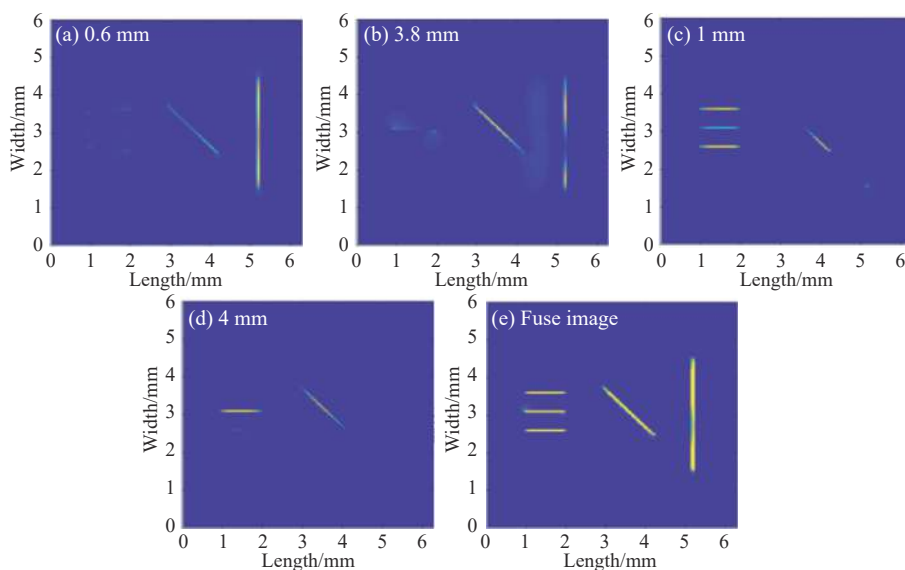


图 8 (a) 0.6 mm X 梯度图; (b) 3.8 mm X 梯度图; (c) 1 mm Y 梯度图; (d) 4 mm Y 梯度图; (e) 融合图

Fig.8 (a) 0.6 mm X gradient image; (b) 3.8 mm X gradient image; (c) 1 mm Y gradient image; (d) 4 mm Y gradient image; (e) fuse image

3.2 图像融合

对于一条任意方向裂纹,它在不同梯度提取时刻、不同梯度图中都只能成像部分裂纹,不利于裂纹识别,成像结果需要图像融合。图像叠加是常用的图像融合手段,但 4 幅梯度图幅值差异较大,直接叠加易导致裂纹缺失,背景噪声加重。因此,文中在图像叠加前,采用最大最小归一化。0°、45°、90°裂纹的融合成像效果如图 8(e) 所示。

4 实验及结果分析

4.1 实验装置

实验装置如图 9(a) 所示。检测时,样品在热像仪视场中心旋转,激光激励样品表面,热像仪记录其温度数据。该系统主要由自动化检测设备、线阵激光和热像仪三部分组成。自动化设备主要用于送样和样品旋转检测,样品转速为 3 mm/s,逆时针旋转。线阵激光波长为 915 nm,每束线阵激光具有 14 个点光斑,激光功率分布热图如图 9(b) 所示。各光斑点直径为 1.4 mm,圆心距为 2 mm,两束激光间距为 4 mm,各点光斑功率为 1 W,功率分布为高斯分布。热像仪为

FLIR A655SC,实验帧频为 200 Hz,测温灵敏度为 30 mk,分辨率为 120×640,空间分辨率为 50 μm。

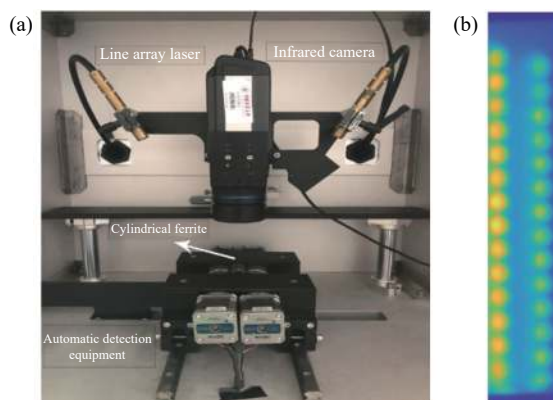


图 9 (a) 实验装置; (b) 激光功率分布热图

Fig.9 (a) Experimental device; (b) laser power distribution heat map

4.2 实验样品

圆柱铁氧体样品直径为 18.98 mm,高为 30.30 mm。为方便识别裂纹,文中在裂纹附近用黑色马克笔做了标记。图 10 展示了 40X 光学显微镜多角度拍照拼接得到的裂纹区域,裂纹均为自然裂纹,宽度范围在 10~60 μm。其中,样品 1、2 具有接近 0°、90°裂纹,而样品 3、4 具有不同倾斜程度的裂纹。

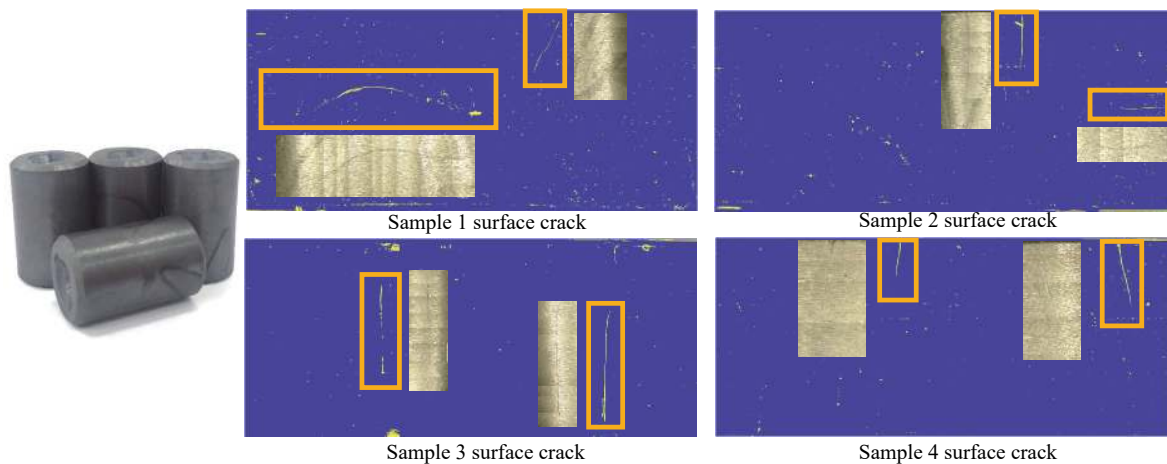


图 10 圆柱铁氧体实验结果

Fig.10 Experimental results of cylindrical ferrite

4.3 实验裂纹成像效果

实验方法与仿真一致,图 10 为 4 个实验样品的热成像结果和显微镜成像结果,水平、垂直、倾斜的自然裂纹都能检出,但部分裂纹片段成像不连续。整体成像背景噪声少,但部分区域存在条纹、随机噪声,

部分马克笔标记也会在裂纹附近显现,一定程度影响了裂纹识别。

这是因为圆柱铁氧体表面较为粗糙,使得样品表面发射率有较大范围的变化,从而影响了成像。另一方面,热像仪景深、柱体轴向移动、激光功率分布、柱

体径向跳动等带来了一系列系统噪声。由此,该系统成像虽能检测任意方向裂纹,但整体抗噪声能力较弱,下一步将围绕如何提高裂纹成像质量展开工作。

5 结论

文中针对任意方向裂纹检测,设计了一套双线阵激光裂纹检测系统,研究了激光激励参数、运动参数对裂纹检测的影响,并开发了任意方向裂纹检测的成像算法,得出以下结论:

(1) 错位双线阵激光能检测任意方向裂纹,合理的激励条件、运动参数能有效提高裂纹成像信噪比以及成像完整度。对于线阵激光,点光斑半径应折衷设计在 0.6~0.7 mm,相应光斑中心距在 1.0~2.0 倍光斑直径。此双线阵激光在排布时,间距应大于 2 mm,光斑相互错开 0.3~0.7 mm,扫描速度 3~6 mm/s。

(2) 该成像算法只利用了多个不同激光相对位置所有时刻的梯度特征,并没有完全利用裂纹运动在两束激光不同相对位置的温度梯度特征。因此裂纹整体抗噪声能力差,成像表面粗糙的样品检测效果不佳。下一步拟利用裂纹运动在两束激光间的全部梯度特征区分裂纹与噪声,提高裂纹成像完整度以及信噪比。

参考文献:

- [1] Xing Bo, Yu Zujun, Xu Xining, et al. Rail defect monitoring based on laser Doppler frequency shift theory [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(06): 991-1000. (in Chinese)
邢博,余祖俊,许西宁,等.基于激光多普勒频移的钢轨缺陷监测[J]. *中国光学*, 2018, 11(06): 991-1000.
- [2] Wang Nichen. Research on detection of metal surface opening cracks based on laser scanning thermography and microthermography[C]//FAR EAST NDT, 2018: 450-455.(in Chinese)
王昵辰.金属表面开口裂纹的激光扫描和显微热成像检测研究[C]//远东无损检测新技术论坛, 2018: 450-455.
- [3] Wang Bozheng, Kang Jiajie, Dong Lihong, et al. Research progress on laser infrared thermography detecting material surface crack [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(10): 1165-1171. (in Chinese)
王博正,康嘉杰,董丽虹,等.激光红外热成像材料表面裂纹检测的研究进展[J]. *激光与红外*, 2019, 49(10): 1165-1171.
- [4] Wang Xiaoning. Key technologies in improving the SNR of the laser thermography detection[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2016.
王晓宁.激光热成像检测中信噪比改善若干关键技术[D].杭州:中国计量大学, 2016.
- [5] Schlichting J, Maierhofer C, Kreuzbruck M. Crack sizing by laser excited thermography [J]. *NDT & E International*, 2012, 45(1): 133-140.
- [6] Li T, Almond D P, Rees D A S. Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography [J]. *Measurement Science & Technology*, 2011, 22(3): 315-322.
- [7] Wang Xiaona, Yao Xingzhou, Hou Dexin, et al. Detection of microcrack in cylinder ferrite components based on scanning laser thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1106005. (in Chinese)
王晓娜,姚行洲,侯德鑫,等.圆柱铁氧体微裂纹的激光扫描热成像检测[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1106005.
- [8] Yao Xingzhou. Superficial crack detection of cylinder ferrite based on laser thermography[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2018.
姚行洲.基于激光热成像的圆柱铁氧体表面裂纹检测[D].杭州:中国计量大学, 2018.
- [9] Pei C, Qiu J, Liu H, et al. Simulation of surface cracks measurement in first walls by laser spot array thermography [J]. *Fusion Engineering & Design*, 2016, 109: 1237-1241.
- [10] Qiu J, Pei C, Liu H, et al. Remote inspection of surface cracks in metallic structures with fiber-guided laser array spots thermography [J]. *NDT & E International*, 2017, 92: 213-220.
- [11] Pei C, Qiu J, Liu H, et al. Detection of surface cracks by laser spot thermography at elevated temperature [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 1: 1-7.
- [12] Hermosilla-Lara S, Joubert P Y, Placko D. Identification of physical effects in flying spot photothermal non-destructive testing [J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2003, 24(3): 223-229.
- [13] Xu Ying, Wang Qingyuan, Luo Congcong, et al. Chip crack imaging detection based on line laser lock-in thermography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 1-14. (in Chinese)
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): 1-14.
- [14] Wang Xiaona, Zhang Yishu, Hou Dexin, et al. Detection of microcrack in inductor based on orthogonal scanning laser thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190522. (in Chinese)
王晓娜,张亦舒,侯德鑫,等.基于线激光正交扫描的电感微裂纹热成像检测[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 20190522.
- [15] Hidalgo R, Andrés J R, Lópezhiguera J M, et al. Quantification by signal to noise ratio of Active infrared thermography data processing techniques [J]. *Optics & Photonics Journal*, 2013, 03(4): 20-26.