圆柱铁氧体微裂纹的激光扫描热成像检测

王晓娜,姚行洲,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:针对用激光局部加热试样引起的横向热流检测裂纹,对低热导率材料表面的微小裂纹成像信噪比较低的问题,提出基于相邻热信号比较的圆柱铁氧体表面微裂纹检测算法。基于几何模型重构运动的圆周表面各点热信号,以激光扫描方向相邻点热信号的欧氏距离作为特征进行成像。仿真分析确定热信号裁剪区间、参考信号位置等算法参数。对 6 个具有 5~35 μm 宽度自然裂纹的样品进行实验,结果表明,在线激光 2.66 mm/s 的扫描速度下,裂纹成像信噪比相比常规方法提高 1~2 倍,可清晰成像出裂纹的形状。

关键词:激光热成像; 相邻点热信号; 欧氏距离; 裂纹检测; 圆柱铁氧体

中图分类号:TN249　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201847.1106005

Detection of microcrack in cylinder ferrite components based on scanning laser thermography

Wang Xiaona, Yao Xingzhou, Hou Dexin, Ye Shuliang

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

Abstract: Aiming at laser heating the specimen locally to detect cracks, and the signal-to-noise ratios fell when surface cracks in material with low thermal conductivity were imaged, a detection algorithm of surface microcrack which compared the adjacent thermal signals in cylinder ferrite components was proposed. The thermal signal at each position on moving cylinder was reconstructed based on geometric model, then the Euclidean distance along the laser scanning direction was used as a feature to image. The relative algorithm parameters about cutting area of thermal signal and the position of reference signal were confirmed by simulation analysis. The specimen were test, which had 5-35 μm wide crack on 6 cylinder ferrite surface. The results show that this approach can enhance the signal-to-noise ratio by 1 to 2 times compared with conventional approach at the line-laser scanning speed of 2.66 mm/s, and it can image the shape of cracks evidently.

Key words: laser thermography; adjacent thermal signal; Euclidean distance; crack detection; cylinder ferrite

收稿日期:2018-06-08; **修订日期**:2018-07-14

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ470767)

作者简介:王晓娜(1975-),女,副教授,硕士,主要从事几何精密测量与光电检测技术方面的研究。Email:wangxn@cjlu.edu.cn

0 引 言

裂纹是材料结构最主要的危害类型之一。材料表面的裂纹在早期尺寸相对较小,将其及早检出,防止裂纹进一步发展,可以有效避免重大的经济损失[1-2]。而微小裂纹的检测一般对激励和观测有较高的要求,同时要求裂纹成像具有较高的信噪比。激光热成像对裂纹检测的灵敏度较高,能远距离检测,激光能量密度和位置可以精确控制,可对 1 μm 宽[3]、10 μm 深[4]的裂纹形状清晰直观地成像。其在航空材料和导弹表面疲劳裂纹检测[5]、铁轨表面疲劳裂纹检测[4]、半导体芯片裂纹检测[6]等领域有较好的应用。

激光扫描热成像相对于脉冲激光热成像[7]和锁相激光热成像[8]检测速度更快,但信噪比更低,其检测结果易受到划痕、试样表面物性参数不均匀等因素的干扰。1967 年 Kubiak[5]研究了激光扫描热成像的检测系统,认为裂纹在激光的扫描路径上时会引起温度的异常升高,根据激光所在位置的温度对裂纹进行成像。Gruss C[9]等人推导了飞点相机模型中半无限深裂纹表面热响应的解析模型,通过表面温度曲线对裂纹进行检测。Hermosillalara S[10]等人使用主成分分析来分离热效应和光效应来提高裂纹的识别率。Li T[7,11]采用不同时刻试样表面温度的空间分布求二阶空间导数叠加来提取裂纹,同年,他利用扫描光源检测铁块表面的裂纹,认为裂纹表面的发射率相比非裂纹区域的发射率更高,从而引起扫描路径上的温度异常升高,可通过最高温温度提取来识别裂纹。德国的 Schlichting J[4]提出了对热序列所有帧进行一维空间导数计算,然后提取试样表面各个位置最大幅值的数据对裂纹进行成像。S.Lugin[12]等人提出了利用横向热流来检测试样内部的隐裂,通过最高温作为裂纹提取的特征,利用参考时间点和初始时刻温度归一化的方法抑制表面发射率不均匀和初始温度不同。王晓宁[13-14]等提出了延时对称点温差的方法检测铁氧体表面裂纹。以上研究方法都只对空间上各点,某一时刻的温度值进行特征提取,没有充分利用热序列的冗余信息,易受到激励的干扰和噪声的影响,且其裂纹成像算法都针对平面试样,而圆柱在热图像中非线性成像,造成试样表面在扫描运动的过程中温升信息提取困难。现有的研究大部分都是检测金属试样,材料的热导率较好,检测灵敏度高。而铁氧体的热导率相对较低,造成检测灵敏度下降。

文中针对圆柱铁氧体表面微裂纹检测问题,提出了相邻热信号比较的方法。仿真分析了裂纹成像算法中的相关参数。将该算法与提取激光所在位置温度特征的方法进行对比,并在实验中结合主观评价和信噪比评价的方法对检测结果进行评价,验证了算法的有效性。

1 检测原理

1.1 激光扫描热成像圆柱检测系统

激光扫描热成像检测圆柱试样的系统结构如图1 所示。线激光平行于圆柱母线加热被测试样表面,同时试样和激光之间发生相对运动,热像仪同步记录试样表面的温度的变化情况。由于激光在裂纹的一侧进行激励时,裂纹能够反射热波[15],同时当激光扫描到裂纹时,裂纹相比非裂纹区对激光能量的吸收率[3]更好,从而导致在激光扫描过程中,裂纹或裂纹附近温度的变化异常。算法根据该原理进行特征提取,对裂纹进行成像。

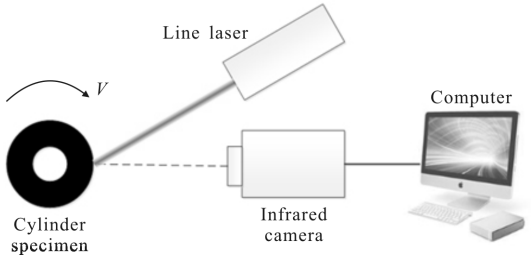

图 1 系统结构图

Fig.1 System structure

1.2 裂纹对其两侧热信号的影响

由于解析模型较难表达各种情况下的热信号,即试样表面任意一点温度随时间变化的曲线,采用 MATLAB 软件有限元仿真来进行裂纹对热信号的影响分析。当被测试样表面曲率不大时,可将圆柱问题简化为平面问题。仿真中将 30 W 线激光一维扫描热激励 32 mm×20 mm×4 mm 的试样表面,忽略表面对流换热。线激光的有效线宽为 0.5 mm,扫描速度为 2.66 mm/s,热像仪采样率 200 Hz。试样的密度为 4 900 kg/m^3、导热系数为 3.5 W/(m·K)、比热容

620/(kg·K)。裂纹宽度为 2 μm,深度 600 μm,其形状基本与激光扫描方向垂直。裂纹两侧的热信号如图 2 所示,其中裂纹左侧为扫描上游,以激光经过待比较点的时间为参考时间对热信号进行时间同步。

由于裂纹阻碍热流的横向传播,使其两侧的热信号产生差异,当激光未扫描到裂纹位置时,激光的热量在裂纹左侧积聚,因此裂纹左侧的点比裂纹右侧的点在温升阶段温度更高;当激光经过裂纹后,裂纹左侧的点在冷却阶段温度更低。

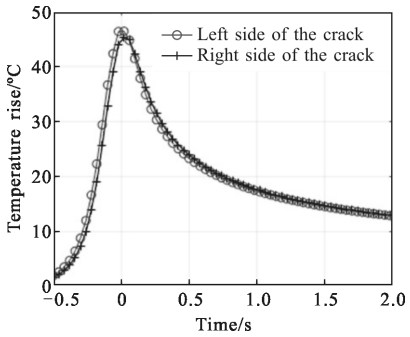

图 2 裂纹两侧点热信号对比

Fig.2 Comparison of thermal signal between left and right side of the crack

2 算法描述

常规的裂纹特征提取最高温升特征、提取方法取 0 时刻位置的温度特征、0 时刻超前或延时后的温度特征,对裂纹进行成像。裂纹的成像结果易受到采样帧频低、热像仪的随机噪声、试样表面发射率变化等因素的影响,信噪比相对较低。为了提高裂纹检测信噪比,算法利用了温升和冷却阶段的冗余信息,根据试样表面整个温升曲线进行裂纹判断。

2.1 相邻热信号比较的裂纹成像算法

算法主要分为两步,通过数据重构从热图中提取出运动的圆柱试样表面各点热信号,然后对相邻的两个热信号进行相似度比较,将试样表面不同位置相似度比较的结果映射成为裂纹成像图。算法的详细步骤如下。

(1) 数据重构。如图 3 所示将热图像坐标系 $T_{raw}(\tau,\mu,\gamma)$中的热序列重构为试样坐标系中试样表面所有位置的温升曲线 $T_{re}(t,x,y)$,因为试样在运动的过程中,任一时刻只有一部分区域在热像仪视野中,同时圆柱在热图像中非线性成像。试样表面任意一点的位置热信号提取如公式(1)~(3)所示。以激光经过待测点的时间为热信号的参考时间(0 时刻),首先根据圆柱扫描运动的线速度 v_x 固定这一先验知识,确定任意时刻 τ 线激光所在位置 x,其中 τ_0 为试样开始运动到待测区域的时刻。然后试样 y 方向温度和热图 γ 方向温度对应。最后确定热信号不同时刻温度。L 为试样在时间间隔 Δt 内实际运动过的距离,且需在热像仪视野感兴趣区域范围内。

$$x=v_x(\tau-\tau_0) \tag{1}$$

$$y=\gamma \tag{2}$$

$$t=\frac{L}{v_x}+\tau \tag{3}$$

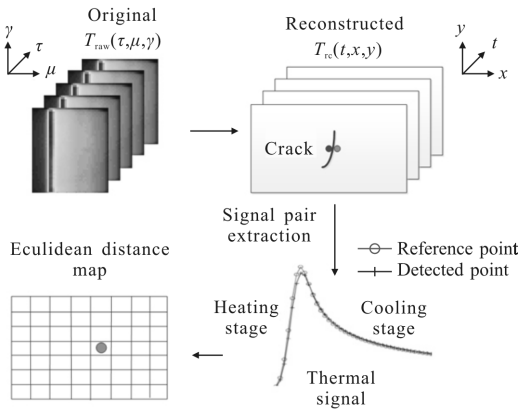

图 3 热图像裂纹检测算法示意图

Fig.3 Sketch of the algorithm used for thermographic crack detection

由于圆柱试样表面在热图像中非线性成像,如图 4 所示,需将圆柱的检测问题转化为平面的检测

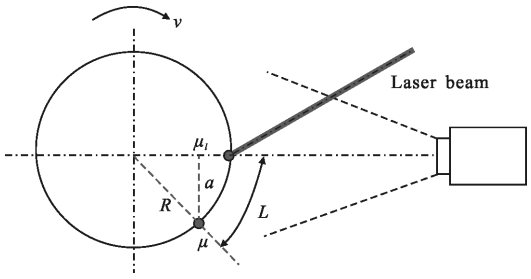

图 4 圆柱扫描的热信号提取

Fig.4 Thermal signal extraction of cylinder scanning

问题。其中 α 和 L 分别为热信号冷却阶段在热图中和实际中运动过的距离。μ 和 μ_l 分别为试样表面待测点某时刻在热图中的位置和线激光所在位置,两

者相减得到 α。热信号的时间轴 t 的提取如公式(4)所示：

$$t=\frac{L}{v_x}+\tau=\frac{R\cdot\arcsin\left(\frac{\mu-\mu_1}{R}\right)}{v_x}+\tau \tag{4}$$

通过该计算可得到重构后热信号各个时刻的温度值在原始热图中位置和和时刻。由于计算得到的 t 和 x 为浮点数,需对原始热序列进行线性插值,提高精度。

(2) 相邻热信号比较。选取沿扫描方向上与待测点邻近的点作为参考点,提取这两点热信号。由于热信号在数据重构时已完成了时间同步，因此可采用欧氏距离对相邻热信号进行相似度比较如公式(5)所示：

$$\mathrm{dist}(s_1,s_2)=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(s_1(i)-s_2(i))^2} \tag{5}$$

2.2 算法参数的确定

比较试样表面热信号的相似度前需要对热信号进行时间同步、信号裁剪和热信号参考点的选取。时间同步在数据重构阶段已完成，后两者的参数通过仿真确定如下所示。

(1) 热信号裁剪区间的确定。热信号在不同时段信噪比不同，对信号幅值较小区段进行相似度比较意义较小,因此需对热信号进行裁剪,选取区段。从图 5 可得,线激光经该位置前 0.5 s 到经过该位置后 1.0 s 热信号裂纹两侧热信号均有一定差异性，可选取该区段的热信号进行比较。实验中可根据实验条件中的噪声水平适当选取区段。

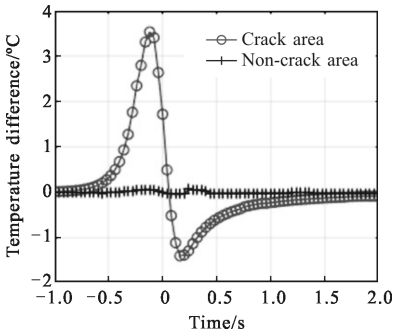

图 5 裂纹处与非裂纹处相邻热信号差值对比

Fig.5 Comparison of differential thermal signal of crack area and non-crack area

(2) 参考热信号位置确定。由于裂纹的尺寸小于热图像像素的最小尺寸，因此考虑两者相对位置最极端的情况，裂纹刚好位于两像素的边缘和刚好位于单个像素的中间。

若裂纹刚好位于热像仪的观测模型像素的中间，则裂纹两侧热信号在观测模型中差异最明显的位置可能并非沿扫描方向上相邻的两点，而是位于相隔一个像素点的位置。通过对比计算相邻像素的热信号欧氏距离和相隔一个像素的热信号欧氏距离验证猜想,分别如图 6 和图 7 所示。

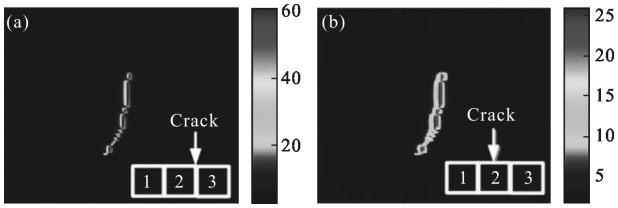

图 6 相邻像素的热信号欧氏距离

Fig.6 Euclidean distance of adjacent pixel thermal signal

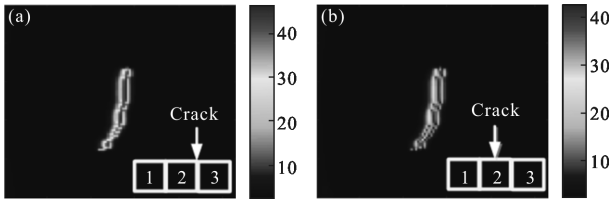

图 7 相隔一个像素的热信号欧氏距离

Fig.7 Euclidean distance of thermal signal separated by one pixel

从图 6 和图 7 的对比可知，若对相邻两点的热信号进行相似度比较,且裂纹刚好位于像素边缘,则根据相邻两点热信号计算欧氏距离，裂纹处成像幅值会更大;若裂纹位于像素中间,则相隔一个像素的热信号进行欧氏距离计算裂纹处的成像幅值更大。当裂纹成像效果不佳时,提升其信噪比更有意义。因此，参考热信号的位置选取与待测热信号相隔一个像素,在进行相似度比较效果更佳。

3 实验及结果

3.1 实验条件

实验对象为直径 19 mm 的圆柱铁氧体器件,密度为 4 900 kg/m^3、导热系数为 3.5 W/(m·K)、比热容 620 J/(kg·K)。其在生产过程中因材料、工艺等问题可能产生人眼难以发现的微小裂纹。图 8 为某样品外观及其在 40x 放大光学显微镜下观察到的微裂纹。

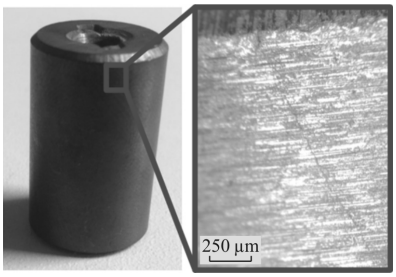

图 8 圆柱铁氧体表面微小裂纹

Fig.8 Surface microcrack in cylinder ferrite components

实验装置如图 9 所示。以波长为 980 nm 的 30 W 线激光对试样进行扫描加热，线光斑有效线宽为 0.5 mm。采用试样运动、激光静止的运动模式，试样自转的线速度为 2.66 mm/s，使得试样表面最高温升在 40 ℃左右。采用帧频为 200 Hz，空间分辨力为 50 μm 的 Flir A655SC 热像仪对试样表面的温度变化情况进行记录。在检测过程中，将数据从热图像坐标系转换为试样坐标系，同时通过试样底部夹持部位的标志物对裂纹相对位置进行定位，实验在密闭箱体内进行。

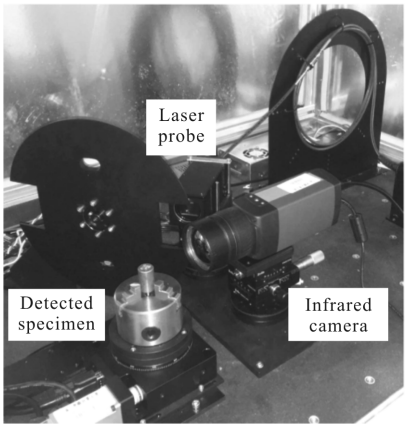

图 9 激光热成像检测系统

Fig.9 Laser thermography detection system

3.2 成像信噪比评价

为了定量评价裂纹检测算法，借助主动热成像领域中 Hidalgogato R[16]等采用的信噪比来评价缺陷检测效果的好坏，裂纹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 得到信噪比 SNR，如公式(6)所示：

$$\mathrm{SNR}=\frac{\mu_S}{\sigma_N} \tag{6}$$

而在激光扫描热成像领域对裂纹进行成像时，在扫描方向上裂纹与非裂纹之间存在过渡区域。裂纹选取的区域大小不同，有可能造成信噪比的不同，同时，差分后的裂纹特征图裂纹幅值可正可负。因此将求裂纹区域的平均值改进为先求扫描方向上的裂纹最大幅值，再求这些裂纹最大幅值的平均值。改进后的信噪比信号部分评价如公式(7)~(8)所示：

$$\alpha_s(y)=\max(|T_S(x)-\mu_N|) \tag{7}$$

$$\mu_S=\overline{\alpha_s(y)} \tag{8}$$

式中：x 为平行于扫描方向的坐标；y 为垂直于扫描方向的坐标；T_S 为裂纹区域在扫描方向上的特征幅值；μ_N 为非裂纹区域的平均值。该方法忽略裂纹与非裂纹之间的过渡区域，同时综合评价裂纹各个区域是否能很好地成像。

3.3 实验结果与讨论

对平均宽度为 5~35 μm 的自然裂纹检测结果如图 10 所示，其中第 1 列为常规方法 DLPT，第 2 列为文中方法。常规方法 DLPT 求每帧热图激光所在位置的温度，再对其特征图求 x 方向上的一阶空间导数。裂纹成像图的信噪比评价见图的左下角。

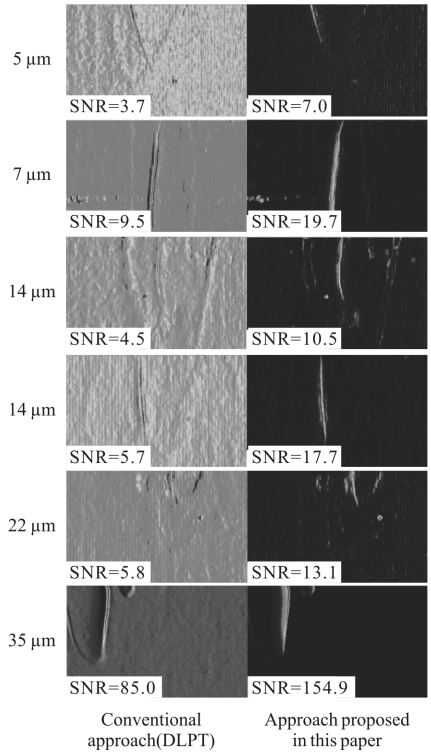

图 10 文中方法与常规方法成像结果对比

Fig.10 Comparison between the conventional approach and the approach proposed in this paper

裂纹成像结果表明，相邻热信号比较的方法与常规方法 DLPT 相比,信噪比可提升大约 1~2 倍。两种方法都可以检测出宽度为 5 μm 以上的圆柱铁氧体表面裂纹。但常规方法较难区分出裂纹与非裂纹，而文中方法可以清晰地成像出裂纹的形状。

从总体上看,裂纹越宽,裂纹成像方法得到的信噪比越高，但裂纹成像方法的信噪比可能还与裂纹的形状、深度、裂纹深度方向与表面的夹角有关[17]。如图 10 中的 7 μm 宽的裂纹信噪比相比 14 μm 和 22 μm 宽的裂纹信噪比更好。

常规方法 DLPT 在非裂纹区域伪显示较明显。当试样表面存在污痕或记号笔标记，激光扫描到该位置时会造成温度的异常升高，与裂纹附近区域相似。当裂纹检测图信噪比较低时,易误判为裂纹。相邻热信号比较的方法也存在伪显示的情况，但其还利用了激光经过前后的温度变化信息，受伪显示的影响相对较小。

常规方法 DLPT 在裂纹附近有可能成像出两个裂纹的形状，而文中方法相邻热信号的比较只有一个特征,更加形象直观。

激光扫描线速度提升使得试样表面的最高温升下降,同时产生运动模糊现象,使得检测的灵敏度下降。当线激光的扫描线速度为 5.32 mm/s 时,采用两种算法对裂纹成像的信噪比如表 1 所示。

表 1 扫描速度 5.32 mm/s 时的裂纹成像信噪比

Tab.1 SNR of crack imaging at scanning speed of 5.32 mm/s

Width of natural crack/μm	Conventional approach (DLPT)	Approach proposed in this paper
5	3.4	6.0
7	11.6	19.5
14	4.6	8.6
14	5.2	8.5
22	7.3	11.8
35	99.7	143.1

从表 1 中可以看出,当扫描速度提升时,采用相邻热信号比较的方法相比常规方法依旧能够有效提升裂纹成像的信噪比。

4 结 论

为了提高激光扫描热成像检测圆柱铁氧体表面微小裂纹的成像信噪比，提出了数据重构和相邻热信号比较的方法对圆柱表面微裂纹进行成像。并将该方法与常规基于温度特征的方法进行对比分析。结论如下：

(1) 相邻热信号比较的方法相比基于提取激光位置温度特征的方法,在线激光 2.66 mm/s 的扫描速度下,可提升信噪比约 1~2 倍,可对圆柱铁氧体表面裂纹形状进行清晰直观的成像。

(2) 虽然铁氧体材料热导率比铁、铜、铝等金属材料低 1~2 个数量级，但采用相邻热信号比较的方法可以检测出宽度为 5 μm 的裂纹,激光扫描热成像可以用来检测热导率一般的非金属材料表面裂纹。

参考文献：

[1] Yan Huipeng, Yang Zhengwei, Tian Gan, et al. Micro crack detection near surface of ferromagnetic materials based on eddy current thermography [J]. ***Infrared and 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.

[2] Nan Gangyang, Wang Qiwu, Zhang Zhenzhen, et al. Rail steel flaw inspection based on laser ultrasonic method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(1): 0106006. (in Chinese)
南钢洋, 王启武, 张振振, 等. 基于激光超声方法的钢轨缺陷检测(英文)[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0106006.

[3] 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.

[4] Schlichting J, Ziegler M, Maierhofer C, et al. Flying laser spot thermography for the fast detection of surface breaking cracks [C]//18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012.

[5] Kubiak E J. Infrared detection of fatigue cracks and other near-surface defects[J]. ***Applied Optics***, 1968, 7(7): 1743-1748.

[6] An Y K, Yang J, Hwang S, et al. Line laser lock-in thermography for instantaneous imaging of cracks in semiconductor chips [J]. ***Optics & Lasers in Engineering***, 2015, 73(1): 128-136.

[7] 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.

[8] Fedala Y, Streza M, Sepulveda F, et al. Infrared lock-in thermography crack localization on metallic surfaces for industrial diagnosis [J]. ***Journal of Nondestructive Evaluation***, 2013, 33(3): 970-972.

[9] Gruss C, Balageas D. Theoretical and experimental applications of the flying spot camera [C]//Conference on Quantitative Infrared Thermography, 1992.

[10] Hermosillalara 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.

[11] 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.

[12] Lugin S. Detection of hidden defects by lateral thermal flows [J]. ***NDT & E International***, 2013, 56(2): 48-55.

[13] Wang Xiaoning, Hou Dexin, Ye Shuliang. Crack detection of ferrite based on laser spot thermography [J]. ***Laser & Infrared***. 2015, 45(11): 1298-1303. (in Chinese)
王晓宁, 侯德鑫, 叶树亮. 基于激光热成像的铁氧体裂纹检测[J]. 激光与红外, 2015, 45(11): 1298-1303.

[14] Wang Xiaona, Wang Xiaoning, Hou Dexin, et al. Surface crack imaging based on delayed temperature difference at symmetric points by laser spot thermography [J]. ***Instrumentation***, 2014, 1(2): 30-37.

[15] Wang Y Q, Kuo P K, Favro L D, et al. Flying laser spot thermal wave IR imaging of horizontal and vertical cracks [J]. ***Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation***, 1990, 9: 511-516.

[16] Hidalgogato 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, 3(4): 20-26.

[17] Schlichting J, Maierhofer C, Kreutzbruck M. Defect sizing by local excitation thermography [J]. ***Quantitative Infrared Thermography Journal***, 2011, 8(1): 51-63.