

基于涡流热成像的铁磁材料近表面微裂纹检测

闫会朋, 杨正伟, 田 干, 明安波, 张 炜

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 采用涡流热成像技术, 对铁磁材料近表面微裂纹进行了检测研究。提出了平行激励热传导方式检测近表面微裂纹的检测方法; 数值计算模拟了涡流激励下裂纹处的生热过程, 分析了裂纹处的温度分布及其对检测结果的影响; 采用平行激励方式对含近表面微裂纹的铁磁材料进行了检测实验, 通过提取试件表面温度分布数据, 获取其变化速率曲线, 实现了对裂纹的检测和识别。结果表明: 涡流热成像平行激励方式能够准确地检测到铁磁材料近表面的微裂纹缺陷; 选择适当的涡流激励时间有助于提高裂纹处与非裂纹处温度对比, 增强检测效果。该方法的研究为近表面微裂纹的检测和定量识别奠定了基础。

关键词: 涡流热成像; 铁磁材料; 近表面微裂纹; 平行激励

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0317001

Micro crack detection near surface of ferromagnetic materials based on eddy current thermography

Yan Huipeng, Yang Zhengwei, Tian Gan, Ming Anbo, Zhang Wei

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Eddy current thermography technique was adopted to detect micro cracks near surface of ferromagnetic materials. The method of parallel excitation and heat conduction was put forward to detect micro cracks near surface. The process of heating in cracks using eddy current thermography was simulated by numerical calculation. The temperature distribution around the crack and the influence on the detection results were analyzed. The parallel excitation was adopted for the detection test. The surface temperature distribution curve of the specimen was extracted, and the slope curve was got by differential. Finally, the detection and recognition on cracks were realized. The results show that the parallel excitation method of eddy current thermography can have an efficient detection on micro cracks near surface of ferromagnetic materials, and appropriate excitation time can contribute to the rise of the temperature contrast and the enhancement of the testing effect. All the above researches lay a foundation for the detection and quantitative identification of micro cracks near surface.

Key words: eddy current thermography; ferromagnetic materials; micro crack near surface; parallel excitation

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51575516); 陕西省自然科学基金研究计划((2016JM6075); 航空科学基金(201509U8004))

作者简介: 闫会朋(1991-), 男, 博士, 主要从事飞行器推进系统检测与故障诊断方面的研究。Email: yanhuipeng104125@163.com

通讯作者: 杨正伟(1982-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事飞行器推进系统检测与故障诊断方面的研究。

Email: yangzhengwei1136@163.com

0 引言

铁磁材料具有诸多优点,在航空航天领域得到了广泛的应用。但在实际制造和使用过程中,由于环境和应力的作用,铁磁材料表面或者内部会产生不同程度的裂纹等损伤,这些裂纹的存在将大大降低结构使用的可靠性和安全性,因此发展快速、高效的无损检测技术已成为亟需解决的关键技术之一^[1-2]。

目前发展较为成熟的无损检测技术在铁磁材料裂纹检测中具有独特的优势,同时也存在一定的局限性^[3-7]。而近年来出现的涡流热成像无损检测技术,具有非接触测量、灵敏度高、反应速度快、信号处理速度快、检测面积大、直观准确等特点,特别适合检测铁磁材料表面及近表面的裂纹损伤,引起国内外的广泛关注。英国纽卡斯尔大学开发的涡流脉冲热成像系统已成功应用到金属材料中对于裂纹的检测^[8]。德国 MTU Aero Engines 公司将涡流热成像检测技术应用于金属压缩机叶片的表面裂纹的检测中^[9]。四川大学的冷春虎对曲面裂纹进行了检测分析,探索了表面温度分布随深度的变化规律^[10]。军械工程学院的左宪章研究了裂纹方向对脉冲涡流激励热成像的影响,得出在铁磁材料中,具有各种方向角的裂纹都可以检测到^[11]。中国计量学院的孙晓莹研究了平行激励下脉冲涡流热成像的温度响应规律,发现平行激励下的铁磁性材料试样表现出裂纹尖端发热和边缘发热两种现象^[12]。虽然涡流热成像技术在铁磁材料裂纹检测中得到了很好的应用,然而,对于近表面微裂纹,即体积深度比 $k < 2$,且裂纹宽度很小的裂纹 ($k = l/d$, l 为裂纹张开的宽度, d 为裂纹与表面的距离),在检测过程中其信息很容易被背景噪声所淹没,即裂纹处与非裂纹处温差由于横向热传递变得很微弱,在实际检测过程中很难在热成像原始数据中直观观察出来。因此,探索新的近表面微裂纹涡流热成像检测方法,对于拓展涡流热成像检测应用范围和检测能力具有重要意义。

文中通过提出涡流热成像平行激励热传导检测方法,借助理论分析、数值仿真和实验相结合的方法,对铁磁材料近表面微裂纹进行检测研究,验证其检测的可行性和有效性,并分析涡流激励时间对检

测效果的影响规律。

1 涡流热成像技术的检测原理

涡流热成像技术是通过在线圈上加载一定频率的交变电流,根据电磁感应原理,就会在导电试件表面感应出涡流,从而在试件表面产生热量。涡流或热量在传递的过程中,遇到裂纹等缺陷时,会导致涡流的聚集和热量的反射,从而使裂纹处及相邻区域的温度明显升高,其对应表面温度场的变化可用红外热像仪观察和记录。其检测原理如图 1 所示。

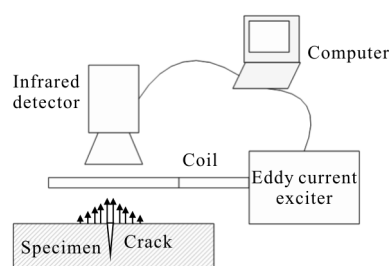


图 1 涡流热成像基本原理示意图

Fig.1 Basic principle of eddy current thermography

1.1 涡流激励下试件表面生热

根据 Maxwell 方程组,可推导出涡流场的控制方程为:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

式中: μ 为被测材料的磁导率; ε 为介电常数; σ 为电导率; \mathbf{A} 为矢量磁势; \mathbf{J}_s 为外部电流密度。

涡流在试件表面聚集,其密度随着深度按指数规律衰减,这一现象被称为集肤效应。涡流透入的深度称为集肤深度,集肤深度与激励电流频率 f 和材料属性有关,其公式可表示为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} \quad (2)$$

由焦耳定律可知,产生的涡流会在材料内部由电能转化为热量。

$$Q = \frac{1}{\sigma} |\mathbf{J}_s|^2 = \frac{1}{\sigma} |\sigma \mathbf{E}|^2 \quad (3)$$

式中: Q 为产生的热量; E 为电场密度。

1.2 损伤处热流的传导

铁磁性材料由于相对磁导率较大,其集肤深度很小,当激励频率为 100 kHz 时约为 0.045 mm,可以

忽略不计,因此针对超出集肤深度的内部裂纹,铁磁性材料的涡流热成像检测可以视为表面加热。当缺陷体积深度比大于 2 时,横向热传递导致的“模糊效应”对纵向热传递影响较小,可以忽略不计,从而其热传导微分方程可简化为一维模型:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T}{t} \quad (4)$$

式中: T 为温度; x 为横坐标; t 为时间; α 为热扩散率。

Parker 等人^[13]通过简化 Carslaw 和 Jaeger^[14]提出的一维解析模型得到反射模式下无缺陷区域的温度变化为:

$$T^{\text{refl}}(t) = \frac{Q}{\rho C_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \alpha t\right) \right] \quad (5)$$

式中: Q 为表面施加的热量; L 为试件的厚度; ρ 、 C_p 、 α 分别为材料的密度、热容量和热扩散系数。

缺陷区域的温度变化 T_d^{refl} 可以表示为:

$$T_d^{\text{refl}}(t) = \frac{Q}{\rho C_p L_r} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L_r^2} \alpha t\right) \right] \quad (6)$$

式中: L_r 为缺陷区域的剩余厚度,小于试件的整体厚度 L 。由此可知,缺陷区域的温度会高于无缺陷区域的温度。因此,缺陷区域在热图像上会显示为“亮点”。

2 数值仿真研究

由上述分析可知,涡流激励下裂纹处生热实际上是电磁场与温度场耦合的过程,采用解析法难以求解,而数值分析方法为解决这类复杂问题提供了有效手段,有限元法是数值计算方法在工程分析领域应用较为广泛的一种计算方法。因此本节运用有限元的数值建模和分析方法,对铁磁材料近表面微裂纹的涡流热成像检测过程进行数值分析,探求平行激励热传导方式检测近表面微裂纹的可行性。

2.1 建模与求解

建立含近表面微裂纹的铁磁性试件检测模型如图 2 所示,在距离裂纹 3 mm 处施加由矩形线圈产生的平行激励,由于该模型具有对称性,因此截取一个截面(图 3)进行二维模型仿真。被检试件取宽 50 mm,高 5 mm 的钢板,距离钢板中央 18 mm 处有一宽为 1 mm,高为 4 mm 的裂纹,裂纹距离试件表面 1 mm,即该裂纹体积深度比为 1,为近表面微裂纹,

矩形线圈半径为 2 mm,提离为 1 mm。线圈加载频率为 200 kHz、大小为 400 A 的交变电流。

钢板的主要物理参数为:热传导系数 $44.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,电导率为 $4.0319 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,相对磁导率为 200,温度系数为 $1.23 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比热为 $475 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

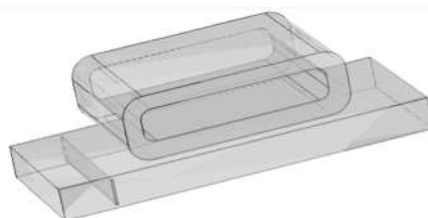


图 2 含近表面微裂纹的铁磁性试件检测模型

Fig.2 Detection model of ferromagnetic specimen containing

micro crack near surface



图 3 二维截面

Fig.3 Two-dimensional cross section

2.2 结果分析

图 4 所示为近表面微裂纹检测仿真结果。从图中可以看出,当在试件表面施加平行激励开始,由于裂纹处距离线圈有一定距离,未对试件表面温度场产生影响,温度场基本呈左右对称分布,随着激励时

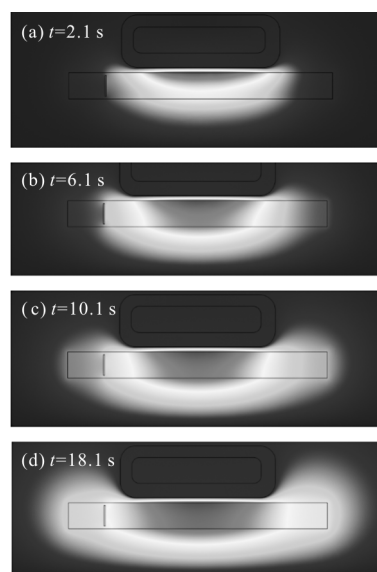


图 4 近表面微裂纹检测仿真结果

Fig.4 Simulation results for micro crack detection near surface

间的增长,由于热传导的作用,热量逐渐扩散到裂纹处,由于裂纹处空气热导率较低,使热量在裂纹处受到阻隔,当加热时间达到 10.1 s 时,左右两侧温度场呈现明显不同,且裂纹左侧温度明显低于右侧温度,形成较大的温度梯度,可明显观察到裂纹的存在。为更好地说明仿真结果,现提取不同激励时间下表面线温曲线,并求取各曲线斜率分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出,由于裂纹的存在,温度场发生较大变化,在裂纹处存在较大突变,且随着加热时间的增长,这种变化更加剧烈,这是由于随着涡流加热和热传导的进行,热量不断被裂纹阻隔,导致一侧热量不断聚集形成高温,另一侧只有较少热量到达形成低温,从而形成较大的温度梯度,可以直观地从热图像中分辨出裂纹的存在。

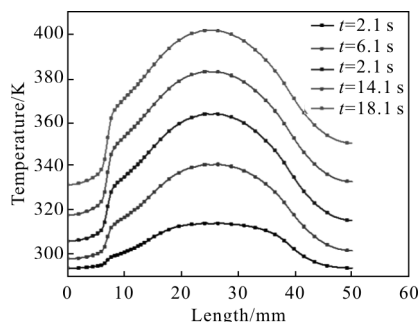


图 5 不同激励时间下表面线温曲线

Fig.5 Surface line temperature curve in different excitation time

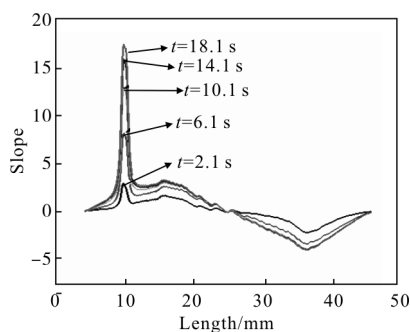


图 6 不同激励时间下线温曲线斜率

Fig.6 Slope of line temperature curves in different excitation time

3 试验与结果分析

3.1 试验概述

试验借助于军械工程学院的涡流热成像实验设备进行,如图 7 所示。实验设备由涡流热激励装置,红外热像仪和计算机软件系统三部分组成。涡流激励装置的最大输出功率为 5 kW,由 10%~100%无极可调,振荡功率约为 1 MHz,额定输入电流为 27 A,采

用循环水冷却装置进行冷却。红外热像仪型号为美国 FLIR 公司生产的 SC3×5 A315 热像仪,该热像仪工作波段为 7.5~13 μm,环境温度为 30 ℃时温度灵敏度小于 0.05 ℃,可提供 320 pixel×240 pixel 像素的图像。红外图像的最大采集频率为 60Hz。计算机软件系统为上海共跃电子有限公司开发的 BM_IR 在线式红外监测软件,以此进行现场处理和后期图像分析。

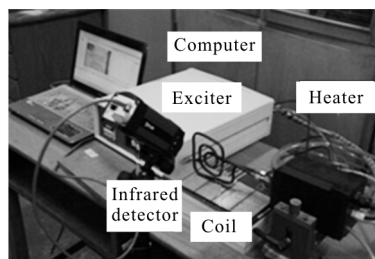


图 7 涡流热成像检测系统

Fig.7 Eddy current thermography detection system

试件由铁磁性材料制作而成,长 210 mm,宽 135 mm,厚 3 mm,在试件背面人工加工矩形裂纹,裂纹的大小为 120 mm×1 mm×2 mm,则裂纹的体积深度比为 1,如图 8 所示,圆圈位置即为被检裂纹所处位置。

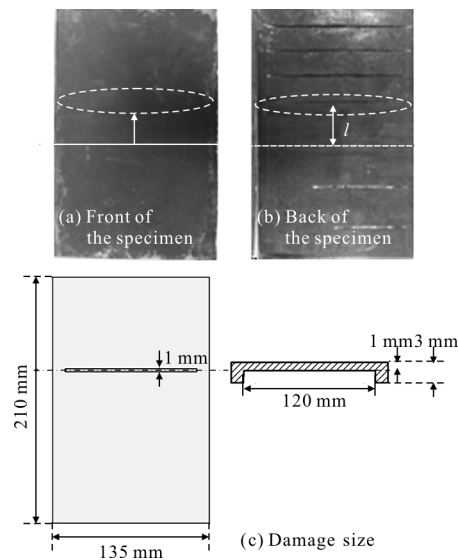


图 8 被检试件

Fig.8 Detected specimen

试验前先进行热像仪的温度标定和焦距设置,使热像仪现场均匀。热像仪镜头离试件的距离在 11~45 cm 之间,使被测物体图像显示清晰。放置感应线圈于试件正面,使线圈与裂纹方向平行,与裂纹距离为 1(图中白色虚线即为线圈与裂纹的相对位置与方向),线圈提高为 1 mm。打开离心泵,使得冷却水

在线圈内循环冷却。调节涡流激励装置的涡流加载时间为 30 s,功率调节至 94%。热像仪的采集频率为 60 Hz,采集时间为 50 s。设置好后,便可启动涡流装置和热像仪采集装置开始实验。

3.2 结果分析

图 9 为平行激励下近表面微裂纹检测结果,图 10 为传统垂直激励下近表面微裂纹检测结果。

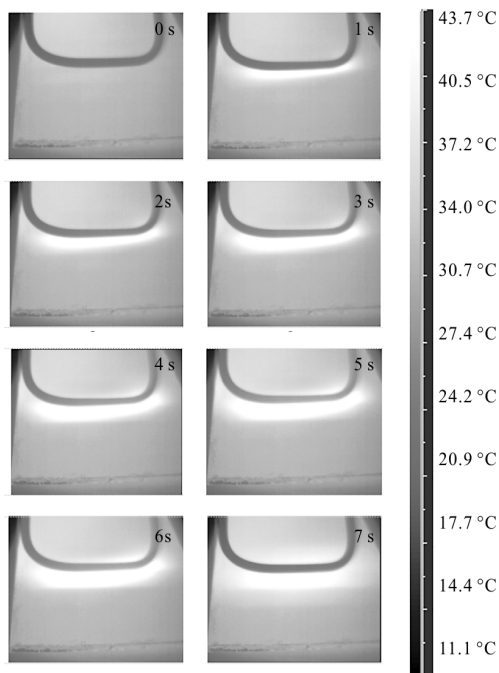


图 9 平行激励下近表面微裂纹检测结果

Fig.9 Detection results of micro crack near surface in parallel excitation

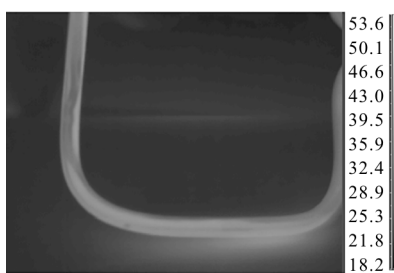


图 10 垂直激励下近表面微裂纹检测结果

Fig.10 Detection results of micro crack near surface in vertical excitation

由热图序列图 9 可以看出,开始时线圈在其正下方激励出椭圆形加热区,随着加热时间的增长,热量逐渐向远处进行传播,且中间区域传播快于两侧区域,加热 5 s 时,在热量传播前端出现一条明显的界线,温度场分布逐渐向两侧扩展,通过对比发现,

此界线确为裂纹所处位置,即热量的传播在裂纹处得到了阻隔,但加热时间达到 22 s 时,由于热传导的作用使温度分布逐渐均匀,裂纹位置显现逐渐模糊。而由图 10 可以看出,垂直激励模式下试件表面温度场变化较为均匀,未出现温度突变处,难以对近表面微裂纹缺陷进行检测。

为更好地分析平行激励下近表面微裂纹检测效果,现提取当激励时间为 6 s 时,试件表面检测区域中垂直于线圈方向 *a*、*b* 部位的线温曲线并求其斜率分别如图 11 和图 12 所示。从图中可以看出,温度由 *a*~*b* 逐渐降低,两侧变化较为缓慢,中间变化较为剧烈,且斜率最大处即为裂纹所在位置。因此在实际检测中,通过提取试件表面线温速率曲线即可准确判定裂纹所处位置,从而实现裂纹位置的定量识别。

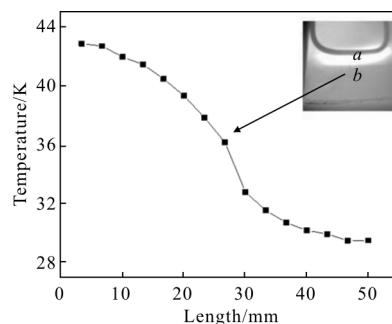


图 11 平行激励下试件表面线温图

Fig.11 Surface line temperature curve of specimen in parallel excitation

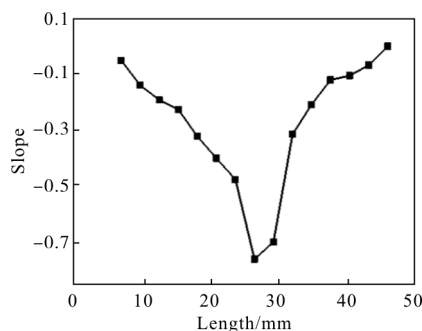


图 12 平行激励下表面线温速率图

Fig.12 Surface line-temperature slope in parallel excitation

4 结论

文中针对含近表面微裂纹的铁磁材料试件进行了涡流热成像检测,数值计算分析了涡流激励下裂纹处的生热过程,并制作试件进行了试验验证,得到的结论如下所述:

(1) 涡流热成像平行激励热传导方式可有效检测出铁磁材料近表面微裂纹, 被检试件表面温度场在裂纹处分层明显, 可以直观地看出。

(2) 通过分析试件表面线温曲线, 发现在一定范围内, 随着加热时间的增长, 裂纹处温差变化增大, 但加热一定时间后由于热传导作用, 裂纹信息逐渐被淹没, 因此选择适当的涡流激励时间 t 可增大裂纹处温度对比, 提高检测效果, 同时在时间 t 范围内, 随着加热时间的增长, 热量传播距离增大, 据此可扩大涡流热成像裂纹检测范围。

(3) 通过分析试件表面线温斜率曲线, 发现斜率最大处即为裂纹所处位置, 据此可以实现裂纹位置的准确识别。

综上所述, 该方法的研究弥补了涡流热成像难以检测出近表面微裂纹 (体积深度比小于 2) 的不足, 扩大了涡流热成像的应用范围, 对于涡流热成像的实际应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] Jiao Jingpin, Li Yongqiang, Du Li, et al. Study on the compound imaging method for crack detection in plate structure using array of Lamb waves [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 593–601. (in Chinese)
焦敬品, 李勇强, 杜礼, 等. 板结构裂纹兰姆波阵列复合成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 593–601.
- [2] Deng Rui, Chen Zhiyuan. Numerical investigation for ductile fracture of metal based on GTN model [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, 34 (2): 78–81. (in Chinese)
邓锐, 陈志远. 基于 GTN 模型对金属材料韧性断裂的模拟[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 78–81.
- [3] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, et al. Heating characteristics of metal plate crack in sonic IR imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (5): 1456–1461. (in Chinese)
冯辅周, 张超省, 闵庆旭, 等. 超声红外热像技术中金属平板裂纹的生热特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1456–1461.
- [4] Qin Lei, Liu Junyan, Gong Jinlong, et al. Testing surface crack defects of sheet metal with ultrasonic lock-in thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (5): 1123–1130. (in Chinese)
秦雷, 刘俊岩, 龚金龙, 等. 超声红外锁相热像技术检测金属板材表面裂纹 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1123–1130.
- [5] Zhou Deqiang, Wang Jun, Zhang Qiuju, et al. Research on sensing mechanism of ferromagnetic component flaw using pulsed eddy current testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(5): 989–995. (in Chinese)
周德强, 王俊, 张秋菊, 等. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 989–995.
- [6] Fu Jianjin, Lei Yinzhao. Study on sinusoidal eddy current test method for ferromagnetic plate parameters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 617–622. (in Chinese)
付剑津, 雷银照. 铁磁平板参数的正弦涡流检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 617–622.
- [7] Wang Xun, Jin Wanping, Zhang Cunlin, et al. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(10): 497–501.
- [8] Zainal Abidin I, Tian G Y, Wilson J, et al. Quantitative evaluation of angular defects by pulsed eddy current thermography [J]. *NDT and International*, 2010, 43 (7): 537–546.
- [9] Zenzinger G, Bamberg J, Satzger W, et al. Thermographic crack detection by eddy current excitation [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2007, 22(2–3): 101–111.
- [10] Liu F, Yang S, Leng C, et al. Simulation on quantitative analysis of crack inspection by using eddy current stimulated thermography [J]. *New Technology & Application, Far East Forum on Nondestructive Evaluation/testing*, 2013: 59–64.
- [11] Chang Dong, Zuo Xianzhang, Tian Guiyun, et al. Analysis of the crack orientation effect on pulsed eddy current stimulated thermography [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2013, 47(5): 779–785. (in Chinese)
常东, 左宪章, 田贵云, 等. 裂纹方向对脉冲涡流激励热成像的影响[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5): 779–785.
- [12] Sun Xiaoying, Hou Dexin, Ye Shuliang. Research on response of pulse eddy current thermography under parallel excitation [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(4): 393–399. (in Chinese)
孙晓莹, 侯德鑫, 叶树亮. 平行激励下脉冲涡流热成像响应规律的研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 393–399
- [13] Parker W J, Jenkins R J, Butler C P, et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(9): 1639–1684.
- [14] Carlaw H S, Jaeger J C. *Conduction of Heat in Solids* [M]. New York: Oxford University Press, 1959.