

脉冲涡流热成像裂纹检测机理仿真分析

左宪章, 常 东, 钱苏敏, 费骏轟, 张 韬
(军械工程学院电气工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:脉冲涡流热成像技术由于在导电材料缺陷检测中的优势而成为无损检测的热点。本文运用电磁感应原理及热传导理论, 建立感应加热数学模型, 利用有限元法分析电磁激励热成像检测缺陷的机理。利用 COMSOL 有限元软件建模分析了导磁材料和非导磁材料中两种基本裂纹 slot 和 notch 附近涡流场和温度场的分布情况, 通过分析裂纹附近涡流密度大小和温度场的变化曲线, 指出检测导磁和非导磁材料裂纹的最佳观测时间以及温度响应, 为下一步的裂纹定量检测提供理论指导。

关键词:脉冲涡流热成像; 感应加热; 裂纹检测; 仿真分析

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.008

Simulation analysis of crack detecting mechanism using pulsed eddy current thermography

ZUO Xian-zhang, CHANG Dong, QIAN Su-min, FEI Jun-biao, ZHANG Tao

(Department of Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Pulsed eddy current thermography has great advantages in defect detection in conductive materials. In this paper, a mathematical model of induction heating is established with the electromagnetic induction and heat transfer theory. The finite elements method is used to analyze the mechanism of crack detection using electromagnetic stimulated thermography. The distribution of eddy current and temperature field near the crack slot and notch are simulated with COMSOL in magnetic and non-magnetic materials respectively. Through the analysis of eddy current density near the crack and temperature curve, the best observed time and temperature response of crack detecting in magnetic and non-magnetic materials are found. That provides theoretical guidance for the quantitative detection of cracks in the next step.

Key words: pulsed eddy current thermography; induction heating; crack detection; simulation analysis

1 引言

热成像无损检测是一种建立在温度场基础上的检测物体质量、内部状态、结构及缺陷的一种方法。与常规无损检测方法相比,它具有非接触测量、灵敏度高、反应速度快、信号处理速度快、检测面积大、直观和准确等特点,非常适合现场、外场以及在线在役检测。

热成像检测按检测方式分为主动式和被动式两大类。被动式通过检测试件的红外辐射来提取目标信息;主动式检测基于热传导理论,利用外部热激励

作用在试件上引起的温度图检测目标。主动式热成像热激励方式包括闪光灯、超声波、激光、太赫兹波、热风、电磁、机械振动等。由于电磁感应加热具有加热效率高、速度快、成本低、便于控制、精度高、试件表面无特殊要求等优点,涡流激励热成像^[1-4]成为导电材料无损检测的新方法受到广泛关注。

脉冲涡流热成像检测原理如图1所示^[5]:根据

作者简介:左宪章(1963-),男,硕士,教授,研究方向为无损检测。

收稿日期:2012-01-12

电磁感应定律,当感应线圈中通入交变电流时,在置于线圈附近的导体中会产生感生涡流,当试件中存在缺陷时,涡流将被迫绕过缺陷,导致部分区域涡流密度增大或减小。根据焦耳定律,导体产生热量将出现不均匀分布,利用红外设备记录下试件表面温度分布图像,可分析获得试件的特性。

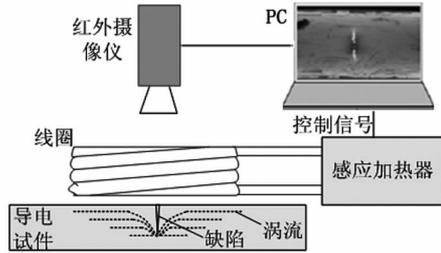


图1 脉冲涡流热成像检测原理示意图

目前国内外多利用脉冲涡流热成像进行实际的缺陷检测定性研究^[6-9],而对于其检测裂纹机理及其定量检测研究较少,本文通过建立脉冲涡流感应加热的数学模型,利用有限元分析研究脉冲涡流热成像检测裂纹缺陷的机理,为今后的定量识别缺陷打下基础。

2 感应热成像数学模型

脉冲涡流热成像检测过程包含三个物理过程:电感线圈在导体内产生感应涡流;涡流效应产生热及热扩散。利用热像仪检测导体表面热场分布并传送到计算机进行缺陷识别,根据检测过程建立涡流场-温度场耦合数学模型,求解导体中温度场的分布情况,实现缺陷检测的机理。

2.1 涡流场

根据电磁感应定律,在通有交变电流的导线附近会产生交变磁场,置于磁场中的导体内将产生感应涡流。因此可以将研究场域分为涡流区和非涡流区,涡流区为被测导体区,非涡流区为感应线圈和空气区域。由 Maxwell 方程组有:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \bar{J}_s + \bar{J}_e + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2)$$

其中, \bar{H} 为磁场强度; \bar{D} 为电位移矢量; \bar{E} 为电场强度; \bar{B} 为磁感应强度; \bar{J} 为总电流密度; \bar{J}_s 为外部电流密度; \bar{J}_e 为感应电流密度。

又由媒质本构关系式:

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad (3)$$

$$\bar{J}_e = \sigma \bar{E} \quad (4)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (5)$$

其中, ε 为介电常数; μ 为磁导率; σ 为电导率(S/

m)。为了使电场和磁场变量分离,使问题简化便于求解偏微分方程,引入修正矢量磁势 \bar{A} :

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (6)$$

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (7)$$

由矢量运算,对式(1)和式(2)化简得涡流场的控制方程为:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} = \bar{J}_s \quad (8)$$

脉冲涡流感应加热激励信号为高频脉冲电流信号,根据傅里叶级数,脉冲信号可展开为奇次谐波的叠加,因此脉冲电流激励的涡流场为时谐场。涡流场控制方程用复矢量表示为:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) + j\omega\sigma \bar{A} - \omega^2 \varepsilon \bar{A} = \bar{J}_s \quad (9)$$

设置边界条件:导体区域为连续,空气为磁绝缘,感应线圈为表面电流。利用有限元法求解导体中感应涡流的分布。当导体中存在缺陷时,缺陷处的电导率、磁导率发生改变,使导体的感应涡流分布发生改变。

2.2 温度场

涡流场求得的感生电流产生焦耳热作为内热源来加热工件,因此导体内的涡流分布和热传导决定了导体内的温度分布。由于涡流为瞬态信号,且由于集肤效应,在导体中非均匀分布,因而感应加热过程属于具有不均匀内热源的非稳态导热过程,建立的方程是随时间变化的瞬态方程,温度场控制方程可由能量守恒定律和傅里叶定律建立。

利用焦耳定律耦合涡流场跟温度场,工件中由感应涡流产生的发热功率(内热源密度或强度)用 Q 表示:

$$Q = \frac{1}{\sigma} |J_e|^2 = \frac{1}{\sigma} |\sigma E|^2 \quad (10)$$

由傅里叶定律可知,单位面积内的热传导功率(热流强度) q 与温度降落成正比:

$$q = -k \nabla T \quad (11)$$

式中, k 为热传导系数(W/(m·°C)); T 为温度场分布函数。

工件中每一点的温度是不稳定的,单位体积内内能的变化为: $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ 。

由能量守恒定律可知感应加热的三维热传导方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T = Q \quad (12)$$

式中, ρ 为材料密度 (kg/m^3); C_p 为材料比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); k 为热传导系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)。

其微分形式可写为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

由于检测时加热时间短,一般为几百毫秒,所以导体属性为常数,热传导的对流和辐射可忽略不计。导体表面边界条件设置为:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (14)$$

初始条件设为 $T = T_0 = 293 \text{ K}$ 。

3 仿真模型

利用有限元分析软件 COMSOL3. 5a 分别计算导磁材料和非导磁材料的涡流场和温度场,获取感应加热裂纹附近的温度分布情况,为裂纹的检测提供理论指导。

分别以尺寸为 $50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的钢板和铝板为研究对象,如图 2 所示。在导体表面有两类人工加工的裂纹,裂纹宽均为 0.1 mm , slot 型裂纹深度方向贯穿导体,长为 15 mm ; notch 型裂纹长度方向贯穿导体,深为 1 mm 。感应线圈简化为一垂直于裂纹的长直导线,半径 1.75 mm ,距离待测板 0.5 mm 。激励脉冲电流频率为 256 kHz ,幅值 350 A ,加热 200 ms ,冷却 300 ms ,观察导体温度变化情况。

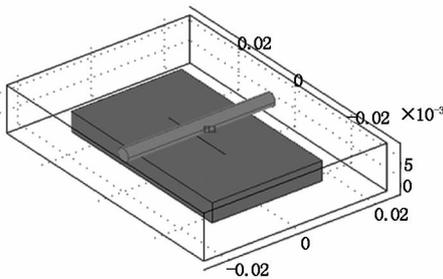


图 2 脉冲涡流热成像仿真模型

仿真分析中导体的电磁和热参数设置如表 1 所示。由法拉第电磁感应定律,对于深度无限的平面导体,其涡流密度的分布随着距离导体表面的距离呈指数规律衰减,涡流密度衰减到其表面值 $1/e$ 时的透入深度为标准透入深度,也称为集肤深度,由计算公式

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (15)$$

分别计算得出,钢板和铝板中涡流集肤深度为 0.016 mm 和 0.16 mm 。

表 1 仿真中导体的电磁和热参数

参数	钢	铝
电导率 $\sigma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	4.0319×10^6	3.7736×10^7
相对磁导率 μ_r	2000	1
温度系数 α/K^{-1}	1.23×10^{-5}	2.31×10^{-5}
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7850	2700
比热 $C_p/(\text{J} \cdot \text{kgK}^{-1})$	475	897
热传导系数 $k/(\text{W} \cdot \text{mK}^{-1})$	44.5	237

4 裂纹特性

4.1 裂纹周围涡流场分布

分别对带两类裂纹的钢板和铝板施加脉冲激励感应加热 200 ms ,其结果如图 3 所示。图中流线表示涡流密度分布,可以发现,当导体中存在裂纹缺陷时,在 slot 裂纹的尖端和 notch 底部涡流密度变大。由于裂纹处电阻率远大于试件本身,使涡流回路绕过裂纹流动,其示意图如图 4 所示。

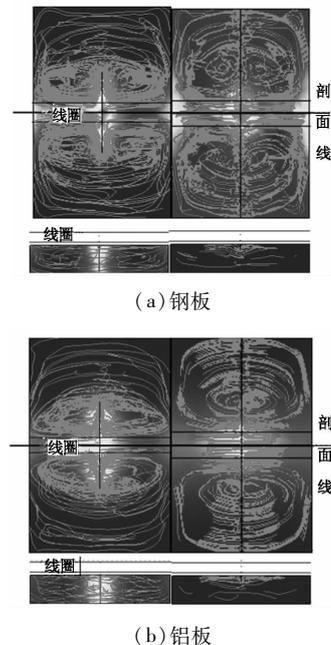


图 3 裂纹附近涡流密度分布

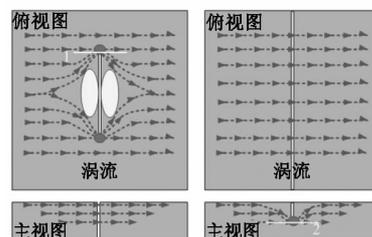
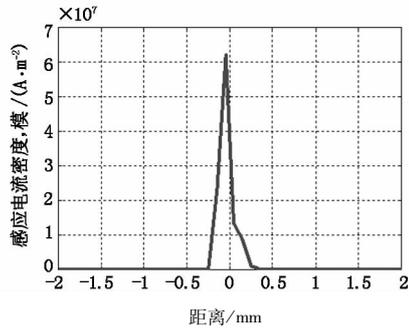


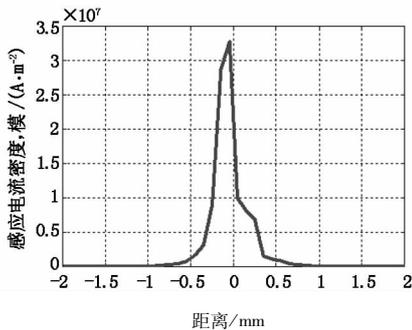
图 4 缺陷附近涡流密度分布示意图

分别沿路径 1 测量钢板和铝板试件表面过 slot 裂纹尖端的涡流密度模值,如图 5 所示,在裂纹尖端处涡流密度相对于无缺陷处有显著增加,钢板表面缺陷处的涡流密度模值约为铝板的 2 倍。同样沿路

径 2 测量钢板和铝板试件过 notch 裂纹底部的涡流密度模值,如图 6 所示,在裂纹附近涡流密度模值明显高于无缺陷区域,钢试件的幅值远大于铝试件。这是由于在导磁材料钢板中,由于相对磁导率较高涡流渗透深度较小,涡流基本上分布于导体表面,而非导磁材料的相对磁导率低涡流渗透深度较大。

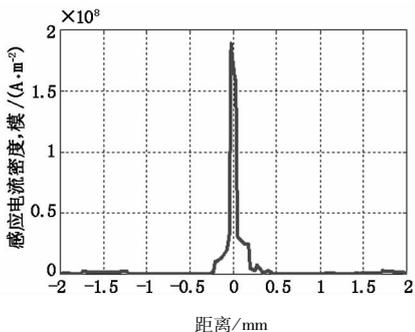


(a) 钢板

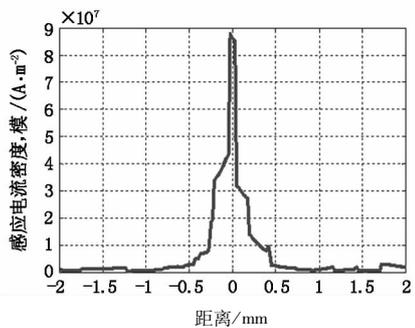


(b) 铝板

图 5 裂纹 slot 尖端处感应电流模



(a) 钢板



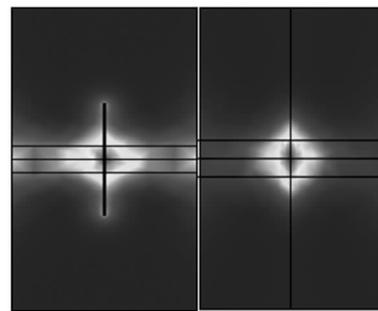
(b) 铝板

图 6 裂纹 notch 底端处感应电流模

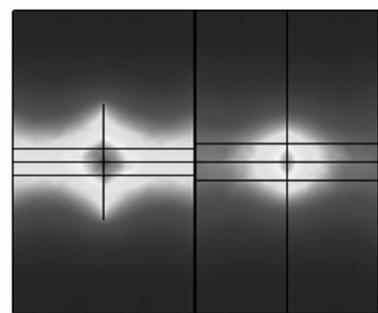
4.2 温度场分布

感应加热导体对电磁能量的吸收有两种方式:涡流损耗和磁滞损耗。非磁性材料多为涡流引起的焦耳热加热;铁磁性材料中由于磁滞效应的存在将产生磁滞生热,涡流生热和磁滞生热同时存在,但磁滞生热产生热量占总热量的比例很低且随着激励频率的升高逐渐趋向于零^[10]。对于脉冲涡流感应加热,激励频率一般在 50 kHz ~ 1 MHz,磁滞生热可忽略不计,仅考虑涡流加热。

如图 7 所示,分别为钢板和铝板试件加热 200 ms 时表面温度分布图像。对比分析温度分布可以发现,导体在感应线圈作用下被加热,由于邻近效应,感应线圈下方的导体温度升高最大。在涡流密度较大的裂纹尖端和底部温度升高较大,温度异常区域指明缺陷的存在,对两种不同材料和不同类型的裂纹缺陷温度响应也各不相同。



(a) 钢板



(b) 铝板

图 7 导体加热 200 ms 后温度分布

分别对 slot 裂纹的尖端和边沿中点、notch 裂纹的底部和边沿中点四点分析整个过程中的温度变化情况,同时以距离对应点 5 mm 方向平行于感应线圈处为参考点,将裂纹处温度曲线与参考点差分,如图 8 所示。在加热的 200 ms 内铝板和钢板的温度都在升高,停止施加激励后试件温度迅速降低。观

察裂纹相对于试件的温度变化差分曲线,铝板上裂纹处温升短暂的快速增加后逐渐趋于饱和,钢板上裂纹处的温升一直增大,因此对于导磁材料和非导磁材料的最佳检测时间不一样。

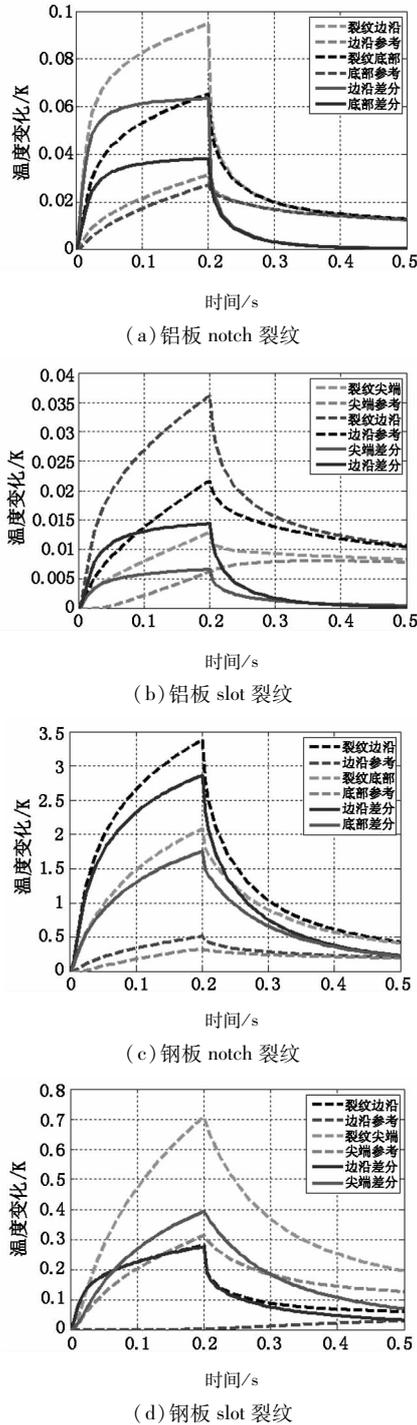


图8 导体加热过程温度变化曲线

分别对铝板和钢板上不同裂纹的温升差分曲线进行归一化处理,如图9所示。图9(a)为两类裂纹在铝板上的情况,裂纹处与试件其他地方的温差在100 ms左右即达到最大值,后一段时间趋于平稳,冷却阶段温差下降很快,几十毫秒内即趋近于零。

图9(b)为两类裂纹在钢板上的情况,在加热的200 ms内,裂纹处温差一直在增大,冷却阶段较长一段时间内仍有较大温差。因此,铝材料检测裂纹的最大温差为加热后的100 ms左右,钢材料的最大温差在200 ms左右,钢材料的最佳观测时间较长,铝材料在加热初期的一段时间里裂纹的检测灵敏度最高。

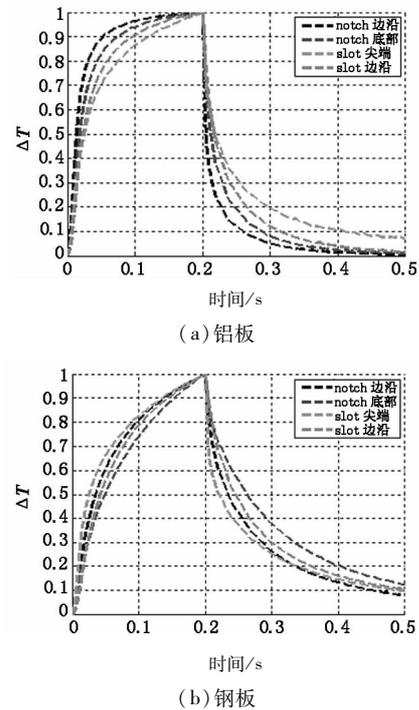


图9 归一化温度曲线

5 结论

通过建立脉冲涡流感应加热的数学模型,利用有限元法,分别对导磁材料和非导磁材料的两类裂纹感应加热后的涡流场和温度场的分布情况进行了仿真分析,明确了利用电磁激励热成像方法检测裂纹缺陷的机理。铝材料涡流渗透深度较大,传热性较好,裂纹处的最大温差出现的时间较早,钢材料的裂纹最大温差出现时间较晚,对不同材料的检测时间应合理选择。感应加热时,裂纹的尖端和底部感应电流密度增大,根据焦耳定律,导体被加热后,裂纹附近的温度将出现异常分布,因此分析温度响应即可实现裂纹的检测。后续研究中将着重研究热图特征量和裂纹尺寸间的定量关系,实现缺陷的定量识别。

参考文献:

- [1] Ch N Kiran Kumar, C V Krishnamurthy. Tone burst eddy-current thermo-graphy (TBET) [C]//Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 27, American Institute of Physics, 2008:544 - 551.

- [2] G Zenziger, J Bamberg, et al. Thermo-graphic crack detection by eddy current excitat-ion [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2007, 22(2 - 3) : 101 - 111.
- [3] G Y Tian, J Wilson, L Cheng, et al. Pulsed eddy current thermography and applications [M]. *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2011, 96 : 205 - 231.
- [4] Liu Guofei, Li Guohua. Numerical simulati-on of defect inspection using electromagne-tically stimulated thermography [J]. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*, 2011, 16(3) : 262 - 265.
- [5] John Wilson, Tian Guiyun, et al. Modelling and evaluation of eddy current stimulated thermogr-aphy [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2010, 25(3) : 205 - 218.
- [6] Suixian Yang, Gui Yun Tian, et al. Simulation of edge cracks using pulsed eddy current stimulated thermography [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2011, 133/011008 : 1 - 6.
- [7] John Wilson, Guiyun Tian, Ilham Mukriz, et al. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue [J]. *NDT & E International*, 2011, 44 : 505 - 512.
- [8] Ilham Zainal Abidin, Gui Yun Tian, et al. Quantitative evaluation of angular defects by pulsed eddy current thermography [J]. *NDT & E International*, 2010, 43 : 537 - 546.
- [9] Liang Cheng, Gui Yun Tian. Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current thermography [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(12) : 3261 - 3268.
- [10] Sree Harsha Pamidi. Induction assisted thermography for inspection of micro defects on sheet metals [D]. US : Clemson University, 2010 : 23 - 25.