

文章编号: 1672-8785(2013)04-0043-04

红外定量检测缺陷的热传导理论分析模型

戴文远 李常有

(东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 在红外定量检测缺陷领域, 现有的理论方法大多是通过规则模型对缺陷进行模拟, 再基于图像比较法或对图像求一次、二次导数得到被检测缺陷的尺寸的。这些方法都会带来较大的误差。本文利用颗粒理论, 首次将颗粒之间的热传导问题应用于缺陷的定量检测中。针对一种模拟的缺陷建立了热传导方程, 为红外定量检测缺陷提出了一种新的思路。

关键词: 无损检测技术; 热传导; 颗粒理论

中图分类号: TG115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.04.09

Heat Conduction Model for Quantitative Infrared Detection of Defects

DAI Wen-yuan, LI Chang-you

(College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In the field of infrared quantitative defect detection, the current theoretical methods simulate the defects mostly by using a rule model and then obtain the size of the detected defect by using an image comparison method or the first and second derivative of the image. All of these methods may bring about a large data error. The heat conduction among particles based on the particle theory is applied in quantitative defect detection for the first time. According to a simulated defect, the heat conduction equation is established. It provides a new idea for the quantitative infrared defect detection.

Key words: non-destructive testing technology; heat conduction; partical theory

0 引言

在机器不断运行过程中, 由于承受外载、疲劳等原因, 机器零部件的内部和外部都会产生裂纹。这种裂纹会影响机器的运行精度, 严重的还会造成生产上的安全事故, 甚至会危及人们的生命。红外检测由于能够在不破坏或不改变被检测物体(形状、结构、技术状态及其使用性能)的情况下对待测物体表面及内部缺陷的大小、

类型、位置进行检测, 因此, 近年来得到了快速发展。红外检测还具有无需耦合、快速实时、检测面积大、检测距离远、灵敏精确、成像直观、信息丰富、简便经济等特性, 特别是对于高温、高压、带电、高速运转的测试目标, 可在近距离内得到待测目标整个表面的温度场图像, 因而已受到国内外学者的普遍关注。在工程实践中, 现有的定量检测方法主要基于两种理论。一种是图像比较法, 将得到的检测试件的热谱图

收稿日期: 2013-03-11

作者简介: 戴文远(1988-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事基于红外热图像的故障诊断研究。

E-mail: 15640398847@163.com

转化为二维坐标平面内的温度曲线图, 将获得的待测试件的温度曲线图与标准试件的温度曲线图进行比较, 通过比较二者之间的差异来检测缺陷。由于这种方法需要选择参考区域进行比对, 而参考区域的选择又会因人而异, 故增加了检测的随机误差。另一种方法是图像求导法, 对获得的待测试件缺陷部分温度随时间变化的曲线求一次或二次导, 通过已建立的极值与时间关系式检测缺陷。由于对温度曲线求极值往往会受到周围环境因素的影响, 从而带来了检测误差。对于现有检测理论的误差与局限性, 戴文远^[1]已作了具体介绍。在检测待测试件时, 人们常采用光源对待测试件进行加热的有源检测方法(以排除环境温度的影响因素), 因此利用热传导理论进行缺陷检测可避免在红外缺陷检测中带来不必要的误差。

1 缺陷检测的热传导理论方程

1.1 颗粒热传导理论

模拟缺陷的模型尺寸如图 2 所示, 圆弧的半径都是 40 mm。将该待测试件看作由上下两个大颗粒组成, 上面为颗粒 1, 下面为颗粒 2。根据颗粒理论, 颗粒集合中的一个任意形状的颗粒 i , 其温度 T 的变化规律满足热传导方程^[2]

$$\rho^i c^i T^i - (k_1 T_1^i)_1 - (k_2 T_2^i)_2 - (k_3 T_3^i)_3 - \rho^i q^i = 0 \quad (1)$$

相应的边界条件为

$$\partial P^1 : T = \bar{T}$$

$$\partial P^2 : k_1 T_1^i n_1 + k_2 T_2^i n_2 + k_3 T_3^i n_3 = q''$$

$$\partial P^3 : k_1 T_1^i n_1 + k_2 T_2^i n_2 + k_3 T_3^i n_3 = -\beta(T - T_a)$$

式中 ρ^i 表示颗粒本身的密度, c^i 表示材料的比热容, q^i 为颗粒内部的热源密度, n_1 、 n_2 、 n_3 为边界外法线方向余弦。边界条件 $\bar{T}$ 是在颗粒边界上给定的温度, q'' 是边界上给定的热流密度, β 为换热系数, k 为热传导系数。在自然对流条件下, T_a 为外界环境温度; 在强迫对流条件下, T_a 为边界层的绝热壁温度。

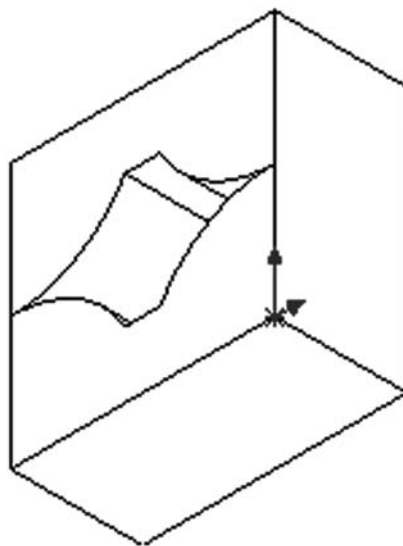
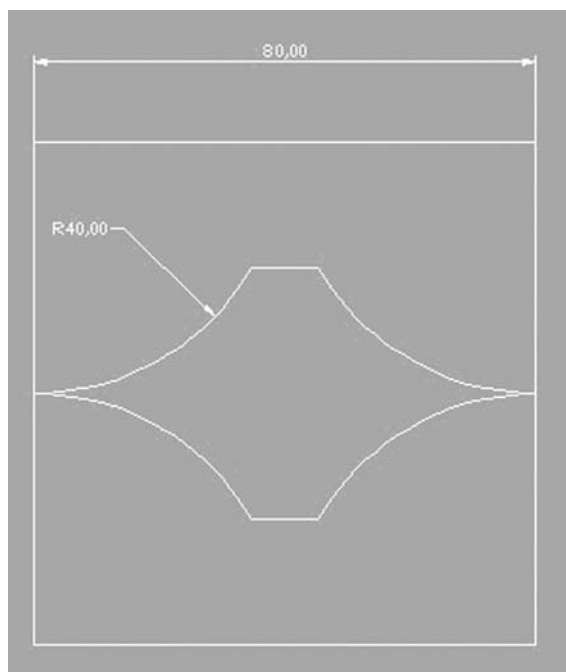
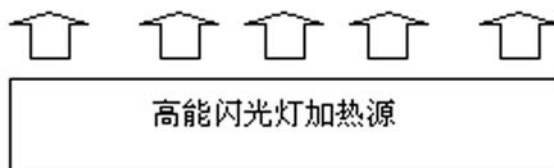


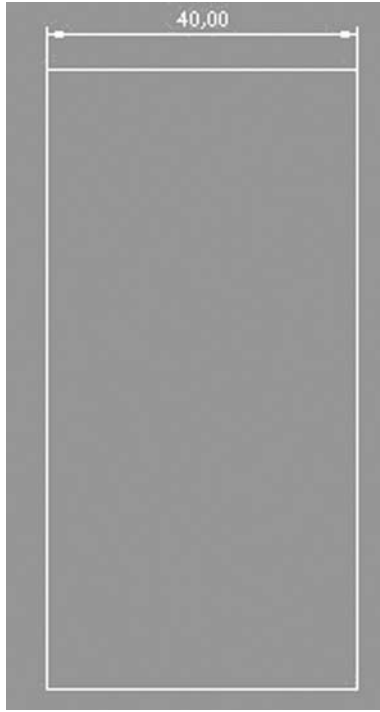
图 1 模拟缺陷图



(a)



(b)



(c)

图2 模拟缺陷的尺寸图

1.2 缺陷检测理论方程

在进行缺陷检测的时候, 试件本身不存在热源, 所以将试件看成两个大颗粒时, 这两个颗粒无内热源, 故 $q^i=0$ ^[3]。于是方程 (1) 简化为

$$\rho^i c^i v^i T^i - (k_1 T_1^i)_1 - (k_2 T_2^i)_2 - (k_3 T_3^i)_3 = 0 \quad (2)$$

对式 (2) 进行积分

$$\rho^i c^i v^i T^i = \int_{\partial P} k_1 T_1^i n_1 + k_2 T_2^i n_2 + k_3 T_3^i n_3 d\alpha = q$$

由于无内热源, 故颗粒热量的变化皆来自于与边界的交换, q 即为与边界进行交换的总热量, v^i 为大颗粒的体积, $\int_{\partial P}$ 表示在颗粒边界上的积分。针对大颗粒 1

$$\rho^1 c^1 v^1 T^1 = \int_{\partial P} k_1 T_1^1 n_1 + k_2 T_2^1 n_2 + k_3 T_3^1 n_3 d\alpha = q^1 \quad (3)$$

q^1 与 1 材料的属性、两接触颗粒温差的关系

$$q^1 = h^{12}(T^2 - T^1)$$

h^{12} 表示 1、2 之间的接触热导, T^1 、 T^2 代表颗粒 1、2 的温度。于是有方程

$$\rho^1 c^1 v^1 T^1 = h^{12}(T^2 - T^1)$$

又

$$\frac{1}{h_{12}} = R_{12}$$

对于两接触颗粒表面均为光滑面的理想情况

$$\bar{R} = 2\tilde{k}\left(\frac{3F_n r_e}{4E_e}\right)^{1/3}$$

$\bar{R}$ 为接触面为光滑表面时接触对的理想宏观热阻; F_n 表示颗粒之间接触正压力的大小; $\tilde{k}$ 为接触对的有效热传导系数; r_e 表示有效半径; E_e 表示有效弹性模量^[4]。这些等效参数与接触颗粒的属性有如下关系:

$$\tilde{k} = 2k_1 k_2 (k_1 + k_2)^{-1}$$

$$r_e = r_1 r_2 (r_1 + r_2)^{-1}$$

$$E_0 = (E_1^{-1}(1 - v_1^2) + E_2^{-1}(1 - v_2^2))^{-1}$$

E 为材料的弹性模量, v 为泊松比。

$$F_n = -k_n \delta^{3/2} - \gamma_n v_n$$

v_n 表示两接触面之间的相对速度, 此时 $v_n=0$; γ_n 为法向阻尼系数。

$$\delta = r_1 + r_2 - d$$

δ 在颗粒热传导方程表示两颗粒接触时的重叠部分, r_1 、 r_2 表示两颗粒的半径, d 表示两颗粒之间的中心距。由于红外缺陷检测需要对试件进行加热, 试件受热后会发生膨胀, 经过试件内部的相互作用, 可近似认为两颗粒接触时的重叠部分为

$$\delta = (1 + \alpha)(r_1 + r_2) - (r_1 + r_2)$$

式中 α 为材料的热膨胀系数。试件由于受热膨胀作用, 产生温度应力, 在此处表现为法向接触正压力^[5]。在有源检测中, 我们常用 9.6 kJ 的高能闪光灯作为热源^[6], 采用传导模式对待测试件进行加热^[7]。因此可近似认为颗粒 2 的温度瞬间升为温度 T^2 , 通过红外测温仪测出颗粒 1 的温度分布并求出平均温度记为 T^1 。根据

$q^1 = c_1 m_1 (T_1 - T_{\text{环}})$, 可求出颗粒 1 的总热量。然后由方程

$$\rho^1 c^1 v^1 T^1 = h^{12} (T^2 - T^1)$$

$$\frac{1}{h_{12}} = R_{12}$$

可反求出 r_1 、 r_2 , 也就得出了缺陷的尺寸。

2 总结

在工程实践中, 传统的红外检测缺陷理论不能达到满意的精度。红外检测技术以热辐射为基础, 因此热传导理论不容忽视。由于所要检测的缺陷都是未知的、不规则的、复杂的^[8], 因此我们需要通过模拟更多种类的缺陷来建立与实际情况相对应的热传导理论方程。本文将颗粒之间的热传导问题应用于缺陷的定量检测, 具有一定的实践性。

参考文献

- [1] 戴文远. 基于红外热图像故障诊断方法综述 [J]. *红外*, 2013, 2(34): 16-21.
- [2] Incropera F P, DeWitt D P, Bergamn T L, et al. *Fundermentals of Heat and Mass Transfer* [M]. New York: John Wiley and Sons, 2007.
- [3] M. N. zisik. *热传导* [M]. 俞昌铭译. 高等教育出版社, 1983.
- [4] 周强. 基于离散元方法的颗粒材料热传导研究 [D]. 大连理工大学, 2011.
- [5] 王润富, 陈国荣. *温度场与温度应力* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 霍雁, 张存林. 碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外检测 [J]. *北京航空航天大学物理学报*, 2012, 61(14): 1-6.
- [7] Montanini R, Freni F. Non-destructive Evaluation of Thick Glass Fiber-reinforced Composites by Means of Optically Excited Lock-in Thermography [J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(11): 2075-2082.
- [8] Wally G, Oswald-Tranta B. The Influence of Crack Shapes and Geometries on the Result of the Thermo-inductive Crack Detection [C]. *Conference on Thermosense XXIX. SPIE-INT SOC Optical Engineering*, 2007: 54111.

(上接第 27 页)

的传感器芯片、光学系统以及数据处理电路。成像实验结果表明, 该相机可以成功获取清晰的紫外目标图像, 能够实现对紫外信号的实时监测。在探测距离为 50 m 时, 其紫外辐射灵敏度可达 10^{-16} W/cm^2 。此外, 相机充电一次能持续工作 6 h 以上, 适用于高压电力设备表面的电晕、电弧、局部放电的检测与定位。

参考文献

- [1] 李尔宁, 刘延冰, 沈悦. 电晕放电若干特性的探讨 [J]. *高压电器*, 1998, 6: 16-21.
- [2] 刘军, 李自田, 姚鸣晖, 等. 紫外相机在电晕检测中的应用研究 [J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(7): 1313-1315.
- [3] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响 [J]. *高电压技术*, 2009, 35(4): 872-876.
- [4] 傅中, 陈仕修, 陈伟, 等. 电晕放电中光谱特性的分析及实验程序设计 [J]. *高电压技术*, 2007, 33(7): 92-94.
- [5] 张海峰, 庞其昌, 陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测 [J]. *电测与仪表*, 2006, 43(2): 6-8.
- [6] Razeghi M, Rogalski A. Semiconductor Ultraviolet Detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79: 7433-7473.
- [7] Monroy E, Omnes F, Calle F. Wide-bandgap Semiconductor Ultraviolet Photodetectors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18: 33-51.