

文章编号: 1672-8785(2013)07-0020-05

对试件内部缺陷进行红外检测的热传导理论模型

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: 在红外定量缺陷检测领域, 现有的理论方法大多会带来较大的误差。另外, 利用热传导方法检测缺陷的理论也仅仅停留在对表面缺陷的检测上。在表面缺陷检测的热传导理论的基础上, 提出了试件内部缺陷检测的热传导理论模型。

关键词: 无损检测技术; 热传导; 内部缺陷

中图分类号: TG115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.07.05

Theoretical Model of Heat Conduction for Infrared Detection of Internal Defects in Specimen

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 existing theoretical methods may bring about greater errors. In addition, the theory which uses the heat conduction method to detect defects is only limited to the detection of surface defects. On the basis of the heat conduction theory for surface defect detection, a heat conduction theoretical model for detecting internal defects in specimens is proposed.

Key words: non-destructive testing technology; heat conduction; internal defect

0 引言

在机器不断运行的过程中, 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。这种裂纹不仅会影响机器的运行精度, 严重的话还会造成生产上的安全事故, 甚至会危及人们的生命。红外检测作为一门新兴的无损检测技术, 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) 的情况下对待测试件表面及内部缺陷的大小、类型、位置进行检测。因此近几年得到了快速发展。

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: 把检测试件的热谱图转化为二维坐标的温度曲线图, 通过比较检测试件的温度曲线与标准试件的温度曲线之间的差异来检测缺陷。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, 因而会增加检测的随机误差; 另一种方法是图像求导法, 对待测试件的缺陷部分温度随时间变化曲线求一次或二次导, 通过已建立的极值与时间的关系式检测缺陷。该方法在对温度曲线求极值时往往会受到周围环境因素的

收稿日期: 2013-04-27

作者简介: 戴文远 (1988-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于红外热图像的故障诊断。

E-mail: 15640398847@163.com

影响, 从而带来检测误差。参考文献 [1] 对现有检测理论的误差与局限性作了具体介绍。为了排除环境温度的影响, 在检测待测试件时常用光源对待测试件进行加热。为了避免在红外缺陷检测中产生不必要的误差, 利用热传导理论进行缺陷检测不失为一种好方法^[2]。

1 热传导理论方程

1.1 检测试件表面缺陷的热传导理论方程

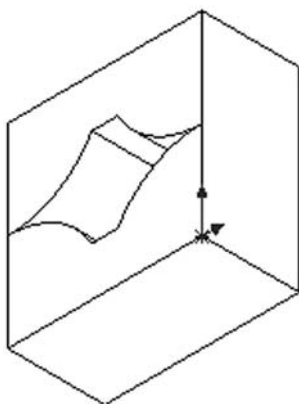


图1 缺陷模型

缺陷模型如图1所示。为避免三维热扩散所带来的影响, 采用热传导模式对待测试件进行检测^[3]。待测试件的具体尺寸如图2所示。圆弧的半径都为40 mm, 厚度为40 mm, 横截面的边长为80 mm。

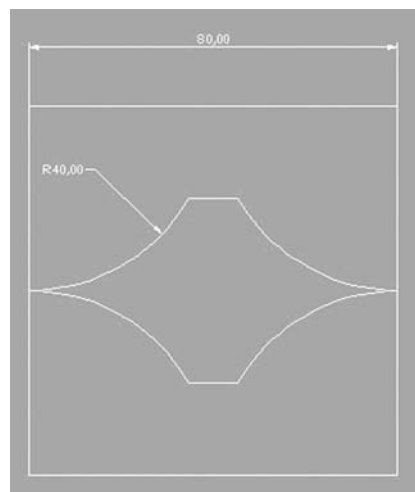
把待测试件看作由上下两个大颗粒组成。上面为颗粒1, 下面为颗粒2。根据颗粒理论及实际的缺陷模型, 得^[2]:

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

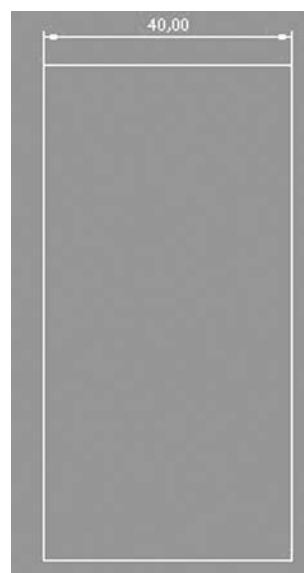
$$\frac{1}{h^{12}} = R_{12} \quad (2)$$

式中, ρ^1 表示材料1的密度, c^1 表示材料1的比热, v^1 表示材料1的体积, T^1 表示颗粒1的平均温度, 由红外热像仪测得颗粒1的表面温度并取其平均值近似得出。 T^2 表示颗粒2的平均温度, h^{12} 表示物体之间的接触热导, R_{12} 为1、2之间的接触热阻, q^1 表示材料1获得的热量。试验中常采用9.6 kJ的高能闪光灯加热^[4], 因此可认为颗粒2任意一点处的温度均为

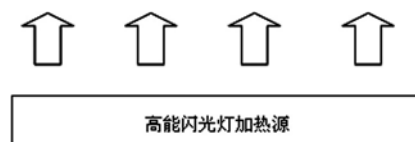
同一值。由式(1)可求出 h^{12} , 通过式(2)可求出 R_{12} , 而 R_{12} 又是缺陷尺寸的函数, 具体关系见文献^[2], 于是可求得缺陷的具体数值。



(a)



(b)



(c)

图2 待测试件的具体尺寸

1.2 试件内部缺陷检测的热传导理论方程

基于表面缺陷模型,在检测试件前后各加一块尺寸为 $80 \times 80 \times 20$ mm 的平板,构成内部缺陷模型。为便于分析,把整个试件分为 4 部分。缺陷部分仍分为颗粒 1、颗粒 2 和前、后无缺陷的平板。具体模型的分割情况如图 3 所示。

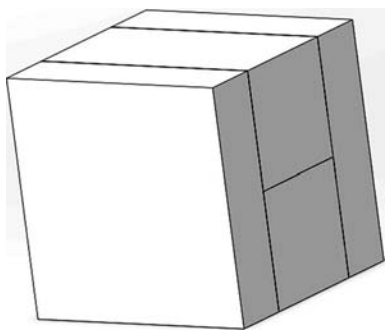


图 3 模型分割

颗粒 1 不仅得到颗粒 2 传来的热量,而且还有前后面的完好平板传输的热量,因此颗粒 1 得到的热量有两部分来源。

$$Q = Q_T \times 2 + q^1 \quad (3)$$

式中, q^1 表示通过颗粒 2 作用获得的热量, Q_T 表示前面或后面完好平板向其传输的热量。

根据关系式

$$Q = cm(T^1 - T^E) \quad (4)$$

式中 c 表示颗粒 1 的比热容, m 表示颗粒 1 的质量, T^1 表示颗粒 1 的平均温度(由红外热像仪测得), T^E 表示环境温度。只要求出 Q_T 的大小,就可以利用表面缺陷的热传导理论方程求得缺陷的大小。

1.2.1 用拉普拉斯变换法求解温度场

如图 4 所示,在 $0 \leq x \leq l$ 中,初始温度场均为 t_1 。当 $t > 0$ 时, $x=0$ 边界上的热流为零,而 $x=l$ 边界上则维持固定温度 T_b 。

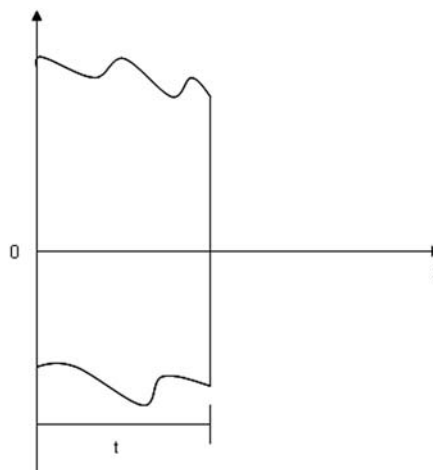


图 4 y 和 z 向无限长的物体

根据

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 < x < l)$$

初始条件是 $t = 0$, $T = t_1$; 边界条件是 $t > 0$, $x=0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$; $x=l$, $T = T_b$ 通过拉氏变换后,上述方程和条件变为

$$\frac{d^2 \bar{T}}{dx^2} - \frac{s}{a} \bar{T} = 0 \quad (0 < x < l)$$

式中考虑了初始条件, $t=0$, $T = t_1$ 。边界条件为 $t > 0$, $x=0$, $\frac{d\bar{T}}{dx} = 0$; $x=l$, $\bar{T} = T_b/s$ 。满足上述条件的解是

$$\bar{T} = \frac{T_b}{s} \frac{ch\sqrt{\frac{s}{a}}x}{ch\sqrt{\frac{s}{a}}l}$$

令 $q^2 = \frac{s}{a}$, $q = \sqrt{\frac{s}{a}}$, 将 $\bar{T}$ 展为级数,并对其进行逆变换,得到最终关系式^[5]:

$$T = T_b \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l-x}{s\sqrt{at}} + T_b \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{at}} \quad (5)$$

根据式(5),该平面中任意一点 x 的温度都可求出。缺陷部分的截面如图 5 所示。由于中间缺陷的存在,导致颗粒 1 与前、后平板接触的部分发生热传递。发生热传递的接触面积为图 5 中颗粒 1 的面积。

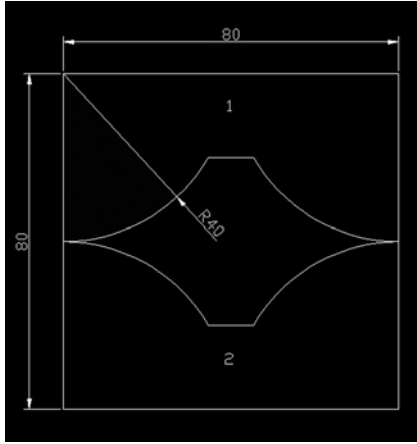


图 5 缺陷截面示意图

1.2.1 求任意 y 值的 y 截面的温度场分布

先对颗粒 1 截面建立坐标系 XOY , 如图 6 所示。

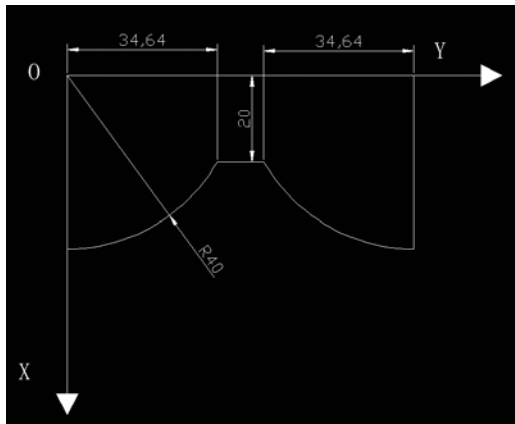


图 6 颗粒 1 截面

利用式 (5), 令 $x=0$, 可求得温度 $T_{x=0}$, 从而可求出 T_b 。也就是说在已知边界温度的情况下, 可以求出该平面的温度分布, 即得到任意 x 处的温度值。设垂直于纸面向外为 Z 轴, 通过红外热像仪得到任意 y 截面与 ZOY 平面交线上的温度 (该温度为同一数值)。红外热像仪测得的正是 y 截面 $x=0$ 处的温度, 因此可得出该截面温度场的分布情况。由 $T_{x=0}$ 得出的 T_b 记为 T_b^0 , 则 y 截面的温度场为

$$T = T_b^0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l-x}{s\sqrt{at}} + T_b^0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{at}} \quad (6)$$

同理, 可求得前后部分与之相应的温度场:

$$T_F = T_{bF}^0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l-x}{s\sqrt{at}} + T_{bF}^0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{at}} \quad (7)$$

$$T_B = T_{bB}^0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l-x}{s\sqrt{at}} + T_{bB}^0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erf} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{at}} \quad (8)$$

把 XOY 平面分成无数个小微单元, 每个单元的截面面积为 $dxdy$ 。将小微单元的长度 40 考虑进去, 则得到小微单元的体积 $40dxdy$ 。与其相对应完好部分的小微单元的体积为 $2 \times 20dxdy$ 。

根据式 (1) 和式 (2), 有:

$$Q^M = \frac{1}{R_{12}}(T_F - T) + \frac{1}{R_{12}}(T_B - T) \quad (9)$$

式中, Q^M 表示颗粒 1 小微单元得到的由前后面板传来的热量, R_{12} 表示接触热阻, 该接触为平面接触, 根据接触热阻计算公式 [6], 图 7 所示的接触热阻为

$$R_c = \frac{1}{4a\lambda_s} \mu(a/b) \\ u(a/b) \approx (1 - a/b)^{1.5}$$

a 为接触区半径, 单位为 mm, b 为圆盘模型半径, 单位为 mm, λ_1 为构件 1 的热导率, 单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$, λ_2 为构件 2 的热导率, 单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。此处可认为 $a/b=1$

$$\frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

故 $R_{12} = \frac{1}{4a\lambda_s}$ 。

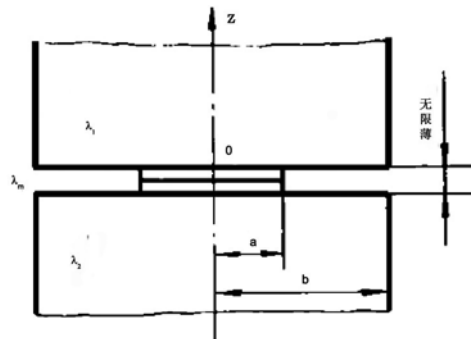


图 7 两物体接触模型

综合式 (6)、(7)、(8), 方程 (9) 只含有未知数 x 。沿 x 方向积分, 便得到在任意 y 截面上传递的总热量:

$$Q = \int_0^x \frac{1}{R_{12}}(T_F - T) + \frac{1}{R_{12}}(T_B - T)dx$$

根据 x 与 y 关系式的不同,

$$x = \sqrt{40^2 - y^2} \quad (0 \leq y < 34.64)$$

$$x = 20 \quad (34.64 \leq y < 45.36)$$

$$x = \sqrt{40^2 - (y - 80)^2} \quad (45.36 \leq y \leq 80)$$

可得出各自区域内任意截面传递总热量的表达式 Q_1 、 Q_2 及 Q_3 。每一个 y 值对应一个温度, y 值与温度的函数关系可通过红外热像仪测量得到。设红外热像仪得到的是温度关于 y 的函数: $T = G(y)$ 。再对 y 求积分:

$$Q_T = \int_0^{34.64} Q_1 dy + \int_{34.64}^{45.36} Q_2 dy + \int_{45.36}^{80} Q_3 dy$$

$Q_T \times 2$ 即为颗粒 1 接收的由前后面传入的总热量。根据式 (3) 可求得 q^1 , 得到 T^1 , 注意此处的 T_1 与式 (4) 中 T^1 不同, T_1 是无前后平板情况下 (表面缺陷) 的温度, T^1 是在前后两平板向颗粒 1 传递热量后的温度。利用试件表面缺陷的热传导理论方程, 可求得缺陷的尺寸, 即圆弧半径 $R=40$ mm。

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。红外检测技术由于以热

辐射为基础, 因此热传导理论不容忽视。本文是对表面缺陷检测热传导理论的进一步完善。在计算颗粒 1 的总热量时, 颗粒 1 的温度是根据颗粒 1 温度的平均值计算的, 因此会产生一定的误差。该处的温度计算有待进一步完善。由于要检测的缺陷往往是未知的、不规则的和复杂的^[7], 因此我们还要通过模拟大量不同的缺陷类型来建立与各自相适应的热传导理论方程。然后将各种方程加以汇总, 得出一个适合于任何情况的方程, 并建立一套缺陷定量检测的通用理论模型。

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, 34(2):16-21.
- [2] 戴文远. 红外定量检测缺陷的热传导理论分析模型 [J]. 红外, 2013, 34(4):43-46.
- [3] 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.
- [4] 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]. 北京航空航天大学学报, 2012, 61(14):1-6.
- [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] 赵宏林, 黄玉美, 盛伯浩. 接触热阻理论计算模型的探讨 [J]. 制造技术与机床, 1999, 9:23-24.
- [7] Wally G, Beate O T. the Influence of Crack Shapes and Geometries on the Result of the Thermoelectric Crack Detection[C]. Conference on Thermosense XXIX, SPIE-INT SOC Optical Engineering, 2007:54111.

新闻动态 News

美国罗彻斯特理工学院获资研制 航天任务用红外探测器

据 www.laserfocusworld.com 网站报道, 美国罗彻斯特理工学院 (RIT) 最近从美国航空航天局 (NASA) 获得了 110 万美元资助, 他们将研制一系列新的在硅片衬底上生长的大规格红

外探测器。这些探测器有朝一日可能会用来支撑 NASA 表征暗物质与暗能量以及寻找类似地球的系外行星的任务。

目前红外探测器阵列的标准规格为 1024×1024 元或 2048×2048 元, 而罗彻斯特理工学院这次研制的红外探测器将会达到 14000×14000 元的水平。

□ 岳桢干