

红外热成像无损检测缺陷的一种新方法

梅林* 王裕文 薛锦

(西安交通大学机械工程学院, 陕西, 西安, 710049)

摘要 通过脉冲加热阶段的红外无损检测一维理论模型, 提出了一种评估缺陷深度信息的新算法, 并给出了有限元模拟检测结果, 分析了缺陷大小及脉冲加热时间对检测结果的影响, 分析表明, 该方法具有较高的检测精度
关键词 红外热成像, 无损检测, 数学模型, 有限元

A NEW METHOD TO EVALUATE THE SUBSURFACE DEFECT BY THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING

MEILIN WANG YU-WEN XUE JIN

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A new method was presented to evaluate the depth of subsurface defect by using the 1-D theoretical model of infrared NDT during pulsed heating and the simulation test results of finite elements were given. The influences of defect size and heating time were analyzed by simulating the process of thermal NDT. The results show that this new method has better precision than other methods

Key words infrared thermography, nondestructive testing, mathematical model, finite element

引言

红外热成像无损检测作为一种非接触的检测手段, 广泛应用于航空航天、机械、医疗、石化等领域与常规五大无损检测手段相比, 它具有快速、无需耦合、大面积检测等特点。自 80 年代后期以来, 随着计算机数字信号处理技术的发展, 红外无损检测已成功用于金属、合金、塑料、陶瓷以及复合材料的无损检测中。但是红外热像法无损检测也存在一些亟待解决的问题, 如红外热图中缺陷的定量化理解等。可喜的是, 现代计算机技术以及数字信号处理技术的迅猛发展, 为研究红外热像法无损检测提供了良好的手段。

1 内部含缺陷物体的一维非稳态传热模型

考查有限厚度大平板第二类边界条件下的一维非稳态导热问题, 如图 1(a) 所示的大平板 ($0 \leq z \leq L$), 初始温度为环境温度 T_a , 时间 $t > 0$ 时, $z = 0$ 处的边界受到恒热流 q 的作用, $z = L$ 处的边界绝热。设该平板的导热系数为 λ , 导温系数为 a 。其数学表

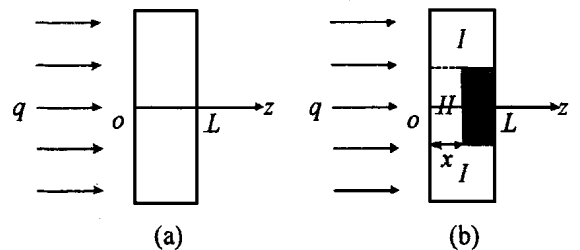


图 1 有限厚度大平板第二类边界条件下的一维非稳态导热

(a) 无缺陷平板 (b) 有缺陷平板

Fig. 1 1-D transient heat conduction model of finite thickness slab under Neumann boundary condition

(a) non-defect slab (b) defect slab

达式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q,$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0, \quad T \Big|_{t=0} = T_a$$

利用拉普拉斯变换法, 得到无缺陷平板加热表面处 ($z = 0$) 的温度随时间变化的关系 $T_s(t)$ ^[1]:

$$T_s(t) - T_a = \frac{qL}{\lambda} \left[\frac{at}{L^2} + \dots \right]$$

* 复旦大学计算机博士后

稿件收到日期 1999-05-10, 修改稿收到日期 2000-02-01

Received 1999-05-10, revised 2000-02-01

$$\frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a t}{L^2}\right) \quad (1)$$

对于有缺陷平板,如图 1(b)所示,缺陷距加热表面的深度为 x ,若只考虑一维导热的影响,则导热问题分为无缺陷部分(区域I)的导热和有缺陷部分(区域II)的导热.区域I 导热问题的解即为式(1),区域II 由于缺陷的存在使得该部位的有效厚度为 x ,则此时区域II 对应的加热表面($z=0$)温度随时间的变化的关系 $T_d(t)$ 为

$$T_d(t) - T_a = \frac{qL}{\lambda} \left[\frac{at}{x^2} + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a t}{x^2}\right) \right] \quad (2)$$

2 缺陷深度检测的算法

由式(2)可见,如果给定材料及热流密度 q ,则缺陷区的表面温度 T_d 是缺陷的深度 x 和时间 t 的函数.而红外热像法缺陷深度检测就是由一系列的 $T_d(t_1)$ 、 $T_d(t_2)$ 、 $T_d(t_3)$... $T_d(t_m)$ 来反求出缺陷的深度信息.文献[3]、[5]中介绍的方法都是利用脉冲加热的冷却阶段,利用温度差来量化研究缺陷的深度检测,我们注意到,在脉冲加热阶段,有缺陷区和无缺陷区的温度也存在较明显的差异.因此提出了红外无损检测缺陷深度量化检测的新算法:

(1) 当 $t > 0$ 时,恒定热流 q 加热,同时用热象仪记录材料表面的温度响应 T_1 、 T_2 、 T_3 ... T_m ;

(2) 利用式(2)有

$$\sum_{i=1}^m \left\{ T_a + \frac{qx}{\lambda} \left[\frac{at_i}{x^2} + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a t_i}{x^2}\right) \right] \right\} = \sum_{i=1}^m T_i \quad (3)$$

(3) 式(3)左边是 x 的函数,记为 $f(x)$,解非线性方程

$$f(x) - \sum_{i=1}^m T_i = 0 \quad (4)$$

即可求得缺陷的深度 x .

3 红外无损检测过程的有限元仿真模拟

红外无损检测柱坐标模型如图 2 所示,试样厚度为 L ,半径为 R ,导热系数为 λ ,密度为 ρ ,比热容为 C ,试样与周围空气的换热系数为 α .内部距加热表面 l 处有一圆盘状缺陷,半径为 r_d ,厚度为 d ,导热系数为 λ_d ,密度为 ρ_d ,比热容为 C_d ,初始温度为环境温度 T_a ,当时间 $t > 0$ 时, $z=0$ 处的边界受到恒热流 q 的作用, $r=R$ 处边界绝热.由于温度分布具有轴对称性,故柱坐标的数学表达式为:

$$\begin{aligned} \text{无缺陷区: } \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\lambda}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \\ \text{有缺陷区: } \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\lambda_d}{\rho_d C_d} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \\ T(r, z) \Big|_{r=0} &= T_a, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \\ &= q - \alpha(T - T_a), \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} &= \alpha(T - T_a), \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{缺陷边界}} &= \lambda_d \frac{\partial T}{\partial n}. \end{aligned}$$

其中,脉冲热流 $q(t)$ 的表达式为:

$$q(t) = \begin{cases} q_{max}, & \text{如 } t \leq t_h \\ 0, & \text{如 } t > t_h \end{cases}$$

式中 q_{max} 为脉冲加热强度, t_h 为脉冲加热时间.

由上述数学模型,在 Matlab 下编制了有限元模拟程序,可以很好地模拟不同深度缺陷及考虑了对流换热等各种复杂条件下的红外无损检测过程.

4 模拟检测结果与分析

4.1 模拟检测结果

选择钢($C=0.5\%$)及铝作为实验材料,在其一侧钻一系列大小、深度不等的平底孔,另一侧用恒定热流加热.用空气来模拟缺陷.其各自的热物理性质见表 1.

表 1 实验用材料的热物理性质

Table 1 Thermal properties of test materials			
材料	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C(\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda(\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C})$
钢($C=0.5\%$)	7840	465	49.8
铝	2710	902	236
空气(缺陷)	1.205	1005	0.0259

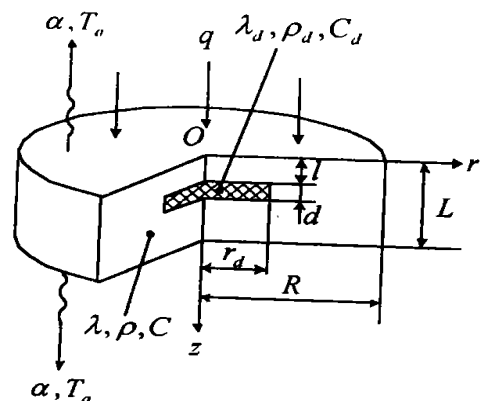


图 2 红外无损检测的柱坐标模型
Fig. 1 Thermal NDT cylindrical model

表 2 缺陷深度模拟检测结果

Table 2 Simulation result of defect depth testing

实际深度(mm)	0.5	0.8	1	1.2	1.6	2	3	5	6	
钢	检测值(mm)	0.5005	0.8004	1.005	1.208	1.599	2.039	2.909	4.98	5.98
	误差(%)	0.1	0.05	0.5	0.67	0.06	1.95	3.03	0.4	0.33
铝	检测值(mm)	0.5276	0.8354	1.038	1.24	1.669	2.082	3.079	5.093	6.08
	误差(%)	5.52	4.43	3.8	3.3	4.3	4.1	2.63	1.86	1.3

有限元模拟时,环境温度 $T_a = 0$, $q = 60000$ W/m^2 , 加热时间 $t_h = 1.6s$, 分别取 $t = 0.16, 0.32, 0.48, \dots, 1.6s$ 时, 缺陷中心对应的表面温度 ($r = 0, z = 0$ 处) 代入式(4) 即得缺陷的深度 x , 其结果见表 2

由表 2 可见, 用加热阶段的数据来反求缺陷的深度信息, 误差较小, 最小误差可达到 0.1% 以下。

4.2 缺陷大小对检测结果的影响

以钢为例, 固定缺陷深度 $l = 1mm$, 改变缺陷关系 r_d 时的深度检测结果见表 3

表 3 缺陷大小不同时的模拟深度检测结果

Table 3 Simulation result of defect depth testing under different defect size condition

缺陷半径(mm)	30	10	5	1
检测值(mm)	1.001	1.057	1.474	4.347
误差(%)	0.1	5.7	47.4	334.7

从表 3 中可见, 随着缺陷半径的减小, 检测的误差增大, 这是由于本算法是基于二维传热模型的, 没有考虑三维传热的影响, 因此, 在缺陷足够小时, 三维传热的影响不可忽视, 从而造成了较大的误差。同时也说明, 本算法对大缺陷的检测精度比较高。

4.3 加热时间对检测结果的影响

以钢为例, 固定缺陷深度 $l = 1mm$, 改变加热时间 t_h 时的深度检测结果见表 4

表 4 加热时间不同时的模拟深度检测结果

Table 4 Simulation result of defect depth testing under different heating time condition

加热时间(s)	0.8	1.6	3.2	4.8	6.4
检测值(mm)	0.995	0.998	1	1.003	1.008
误差(%)	0.5	0.2	0	0.3	0.8

随着加热时间的增加, 检测的误差先是减小, 然

后增大, 由于加热初期温度变换不明显, 因此, 采用短时间的数据进行计算会带来较大误差; 而加热时间过长, 使得三维传热的影响变得明显, 也会造成较大的误差。因此, 应针对不同的材料选择适宜的加热规范。

5 结语

本文提出了基于加热阶段数据处理的红外无损检测缺陷深度检测的新算法, 有限元模拟分析表明, 本算法检测结果可靠, 误差较小, 尤其适合于大缺陷的检测。要做到更精确的检测, 还需从三维传热的逆问题入手, 找出适合于红外无损检测的新的数据处理方法。

REFERENCES

- [1] YANG Qiang-Sheng, PU Bao-Rong. *Advanced Heat Transfer*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press (杨强生, 浦保荣. 高等传热学. 上海: 上海交通大学出版社), 1996, 88—90
- [2] CHEN Jue, GAO Guang-Ning. Theoretical analysis and computation of infrared nondestructive testing, *Chin. J. Infrared Res* (陈珏, 郜光宁. 红外无损检测的理论分析和计算, 红外研究), 1990, 9(1): 51—56
- [3] XU E Shu-Wen, ZONG Ming-Cheng, et al. A new quantitative method to measure the depth of subsurface defect in metal material, *Journal of Northern Jiaotong University* (薛书文, 宗明成等. 金属内部近表面缺陷深度的定量化检测新方法. 北方交通大学学报), 1998, 22(1): 59—92
- [4] Vavilov V., Grinzato E., Bison P.G., et al. Surface transient temperature inversion for hidden corrosion characterization: theory and applications, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1996, 39(2): 355—371
- [5] Maldague X. *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. London: Springer-Verlag, 1993, 113—138