

红外快速缺陷检测的数值模拟

孙春庆, 时 彧*

(湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了定量研究红外无损检测中缺陷深度和形状的问题, 首先对带有内部缺陷的平板试件建立了热传导的物理和数学模型, 并对不同深度缺陷的情况进行了仿真分析和理论计算, 得出了缺陷深度的理论计算方法; 然后在已知缺陷深度的情况下利用 ANSYS 对内部具有不规则缺陷的试件进行了仿真试验, 并采用共轭梯度法来定量计算内部缺陷的形状。研究结果表明, 该研究为红外无损检测的定量研究提供了理论依据。

关键词: 红外无损检测; 定量计算; 仿真分析; ANSYS

中图分类号: TH878; TN219

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)03-0314-03

Numerical simulation of infrared fast defects detection

SUN Chun-qing, SHI Yu

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the problem of defect depth and shape of infrared nondestructive testing, firstly, heat transfer physical and mathematical model of flat specimens with internal defects was established, simulation analysis and theoretical calculation at different defect depth was carried out, and theoretical calculation methods of defect depth were obtained. Then, simulation experiment on test piece with internal irregular defects was made by applying software of ANSYS under the condition of certain defect depth, quantitative calculation of internal defects in shape was adopted by using conjugate gradient method. Research results show that this research provides theoretical basis for the quantitative study of infrared nondestructive testing.

Key words: infrared nondestructive testing; quantitative calculation; simulation analysis; ANSYS

0 引 言

红外缺陷检测是利用有缺陷部分和无缺陷部分的热物理性质不同, 导致试件表面温度场分布不均, 从而来判断缺陷情况的方法。其观测面积大且不需接触被测试件, 因而不存在热接触和热平衡带来的缺点和应用范围的限制。但是由于红外线在固态中穿透能力很低, 故仅凭借表面温度场的分布往往只能定性出内部是否存在缺陷, 无法对缺陷的具体信息进行定量的判断^[1-2]。所以只能够在已知表面温度场的情况下, 通过求解导热反问题来定量的研究内部缺陷的情况。近年

来许多学者进行了大量的研究, 提出了 LM 法、共轭梯度法、边界单元法等, 用来求解导热反问题。

针对含内部缺陷的长方体试件, 本研究利用三维热传导方程建立了传热模型, 并计算了内部缺陷深度对于表面温度场的影响。利用有限元软件 ANSYS 对试件进行了三维热传导仿真, 并结合共轭梯度法对内部缺陷边界进行反复迭代来获得新的表面温度场^[3]。通过表面温度场的比较来定量的计算和分析内部缺陷的具体情况。

收稿日期: 2010-10-15

作者简介: 孙春庆(1984-), 男, 湖南湘潭人, 主要从事红外无损检测方面的研究. E-mail: 13207299@qq.com

通信联系人: 时 彧, 男, 教授, 硕士生导师. E-mail: mailsy@163.com

1 计算缺陷深度的方法

内部存在缺陷的长方体试件如图 1 所示,除缺陷处以外,假设试件的其它部分各向同性,且不含内部热源。除上下两个表面外其他侧面均设为绝热。根据以上条件建立试件的热传导的方程^[4]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

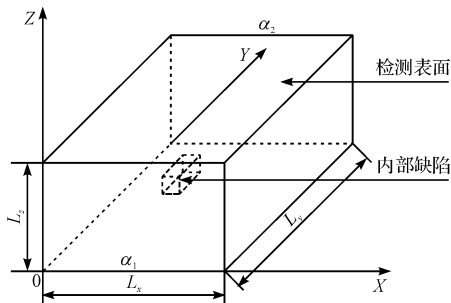


图 1 缺陷试件示意图

对于缺陷试件而言,式(1)中有、无缺陷处的试件密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ,试件比热容为 C_1 和 C_2 ,导热率为 k_1 和 k_2 , T 表示对应的各节点温度, t 为时间参数。

为了求解缺陷深度,如图 2 所示,对于式(1)可仅考虑其沿 z 轴方向的一维热传导,则式(1)可简化为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

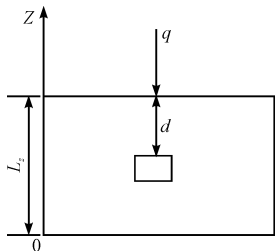


图 2 一维热传导示意图

结合热传导方程的边界条件,可解出与之相对应的无缺陷处以及有缺陷处温度随时间的变化关系为:

$$T(z, t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \rho C k t}} \exp\left(-\frac{\rho C z^2}{4 k t}\right) \quad (3)$$

$$T_d(L_z, t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi \rho C k t}} \cdot \exp\left[-\frac{\rho C (L_z)^2}{4 k t}\right] + \frac{2 I_0}{\sqrt{\pi \rho C k t}} \cdot \exp\left(-\frac{\rho C d^2}{4 k t}\right) \quad (4)$$

$$\Delta T = |T(L_z, t) - T_d(L_z, t)| = \frac{2 I_0}{\sqrt{\pi \rho C k t}} \exp\left(-\frac{\rho C d^2}{4 k t}\right) \quad (5)$$

式中: I_0 —试件单位面积吸收的热能。

令式(5)导数为零,求解并化简之后得出:

$$t = \frac{2 \rho C d^2}{k} \quad (6)$$

根据式(6)可知对应的缺陷深度为:

$$d = \sqrt{\frac{k t}{2 \rho C}} \quad (7)$$

式中: t —热流束加热试件时有缺陷处和无缺陷处温差最大值出现的时间。

在采用红外热像仪采集表面温度场随时间的变化情况时,在 t 时间附近应增大红外热像仪的采样频率,以便于达到更加精确的测量结果^[5-7]。

2 算例与分析

本研究选用碳素钢板作为试验材料。内部缺陷设为气孔,模拟试验的环境温度为 20 °C,加载热流率为 5 000 W/m²,钢板厚度为 50 mm,缺陷厚度为 20 mm。其他热物理参数如表 1 所示。

表 1 热物理特性参数

	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	$k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
碳素钢	7 840	465	51
缺陷	1.205	1 004	0.05

根据以上试验参数,本研究利用 ANSYS 软件对含缺陷的试件进行模拟试验,热激励强度设为 5 000 W/m²,可以得出缺陷在不同深度时表面温差最大值 ΔT 以及达到最大值所需的时间 t 。试验结果如表 2 所示。

表 2 试验结果

实验序号	缺陷深度/mm	表面温差/°C	时间/s
1	7.5	10.02	8.8
2	10	9.65	13.5
3	12.5	8.17	19.3
4	15	7.73	23.8
5	17.5	7.12	30.2

将表 2 中模拟试验得到的达到表面温差最大值 ΔT 的时间 t 代入式(7)中,通过反演计算可得出缺陷的深度。其反演计算结果如表 3 所示。

表 3 计算结果及相对误差

缺陷实际深度/mm	计算结果/mm	相对误差/(%)
7.5	7.9	5.33
10	9.7	3.0
12.5	11.6	7.2
15	12.9	14.0
17.5	14.6	16.6

通过以上的相对误差分析可以得出,在热激励强度为 5 000 W/m² 的情况下,缺陷深度探测的极限深度约为 12.5 mm 左右,在此深度附近的计算值与实际值

之间的误差能控制在 7.2% 左右。若要探测更大深度的缺陷情况需要加大热激励的强度,才能够得到较为精确的结果。

3 计算缺陷面积的方法

在实际的无损探伤过程中,不仅仅需要知道缺陷深度情况,通常还要求对损伤面积的大小进行评估。但是有缺陷的形状通常是不规则的,这给定量研究带来了很大的困难。基于导热反问题求缺陷边界形状很复杂,本研究先假设了缺陷边界的形状,利用有限元软件 ANSYS 求解出假设缺陷情况下试件表面温度场的分布,并与已知缺陷边界情况下的表面温度场分布进行比较。如果误差范围较大,则通过共轭梯度法不断迭代来修正缺陷边界的形状,之后再次求解比较,直到两者温度场分布情况符合误差范围为止^[8-10]。

设缺陷边界形状函数为 $f(\theta)$, 结合热传导方程式 (1) 可以求出表面温度分布 \vec{T}_i 。通过红外热像仪观测可以得到表面温度分布 \vec{Y}_i 。在本研究中 \vec{Y}_i 为已知缺陷情况下利用 ANSYS 求解得到,用来代替热像仪结果进行模拟计算。

令:

$$J[f(\theta)] = \sum_{i=1}^m [\vec{T}_i - \vec{Y}_i]^2 \quad (8)$$

通过计算使方程式 (8) 的值达到最小,则 $f(\theta)$ 为所求的缺陷边界形状函数。

利用共轭梯度法迭代求 $f(\theta)$ 的算法:

$$f^{n+1}(\theta) = f^n(\theta) - \beta^n f^n(\theta) \quad (9)$$

迭代步长为:

$$\beta^n = \frac{\sum_{i=1}^m (\vec{T}_i - \vec{Y}_i) \left[f^n \frac{\partial \vec{T}_i}{\partial f^n} \right]}{\sum_{i=1}^m \left[f^n \frac{\partial \vec{T}_i}{\partial f^n} \right]^2} \quad (10)$$

共轭系数为:

$$\gamma^n = \frac{\sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial \vec{T}_i}{\partial f^n} \right)^n \right]^2}{\sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial \vec{T}_i}{\partial f^n} \right)^{n-1} \right]^2} \quad (11)$$

初次迭代时设: $\gamma^0 = 0$

共轭搜索方向为:

$$f^n(\theta) = \left[\frac{\partial \vec{T}_i}{\partial f^n} \right]^n + \gamma^n f^{n-1}(\theta) \quad (12)$$

迭代终止条件:

$$J[f(\theta)] < \varepsilon \quad (13)$$

根据算例和表 1 所给的物理参数进行 ANSYS 仿真。内部缺陷形状设为一个不规则的多边形,通过 ANSYS 软件模拟热传导过程可以得到试件表面温度分布云图,将其结果离散并导出结点温度分布存入向量组 \vec{Y}_i , 作为模拟计算中的准确值。

表面温度场分布如图 3 所示,由图 3 可以看出内部存在缺陷时,试件表面温度场出现温度异常区域,且温差超过红外热像仪的温度分辨率。利用红外热像仪能够很直观地定性判断试件内部是否存在缺陷。

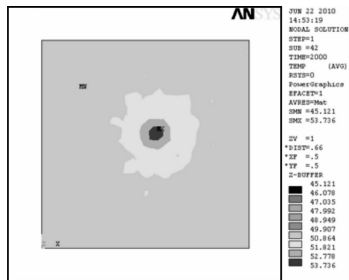


图 3 表面温度场分布

利用共轭梯度法对图 3 中的内部缺陷形状进行定量计算的过程如图 4 所示。图 4 中一共经过 5 次迭代,并且满足了所设定的迭代终止条件 $J[f(\theta)] < 1$ 。

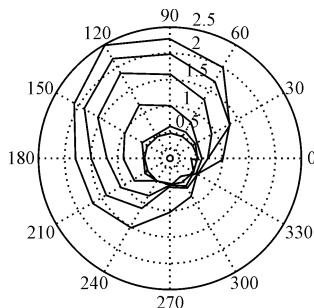


图 4 迭代过程

迭代终止之后的最终识别结果如图 5 所示,如果想要得到更高的识别精度,可以通过增加迭代次数和缩小迭代步长来实现,但是其缺点是需要消耗更长的计算时间。

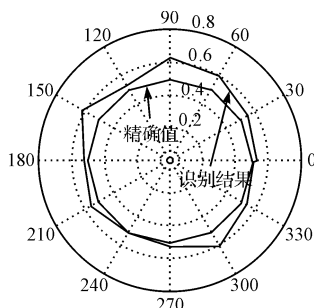


图 5 识别结果

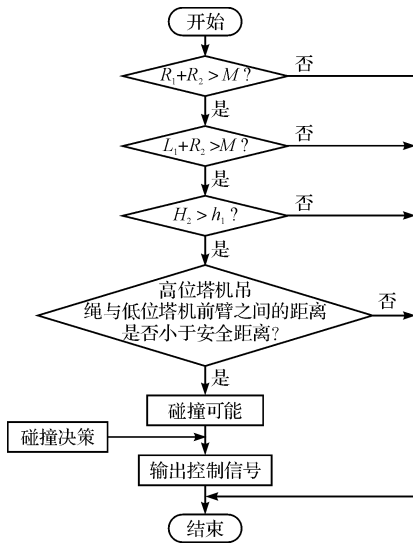


图6 防碰撞计算流程图

5 结束语

本研究针对塔机群交叉作业过程中存在的安全问题,提出了基于嵌入式 Linux 塔机群防碰撞技术的解决方案,并将无线通信技术引入到系统中,构建了分布式塔机群控制系统。通过对塔机间典型碰撞问题的分析,得出了一套完整可靠的防碰撞算法,可以有效地实现塔机间的安全作业。

研究表明,该研究为塔机群防碰撞控制系统的模型建立以及防碰撞算法的分析提供了一定的帮助,

在实际工程应用上具有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 门长根. 塔机常见事故的分析和预防[J]. 建筑安全, 2002(8):18-19.
- [2] 马燕明,朱冬梅,杨清泉,等. 塔机防碰撞及工作区域限制技术[J]. 建筑机械, 2004, 26(6):16-20.
- [3] SIVAKUMAR P L, VARGHESE K, BABU N R. Automated path planning of cooperative crane lifts using heuristic search [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE*, 2003, 17(3):197-207.
- [4] YAGBMOUR K. Building Embedded Linux Systems [M]. O'Reilly Media, Inc., 2003.
- [5] [美]PRICE R. 无线网络原理与应用 [M]. 冉晓旻, 王彬, 王锋, 译. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [6] GAST M S. 802.11 Wireless Network: The Definitive Guide [M]. 2nd ed. O'Reilly Media, Inc., 2005.
- [7] 杜春蕾. ARM 体系结构与编程 [M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [8] Atmel Corporation. AT91RM9200 Datasheet Version B [M]. Atmel Corporation, 2004.
- [9] 谢小光. 基于 GPRS 的塔机实时状态远程监控系统的研究 [D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院, 2009.
- [10] [作者不详]. USB Specification Rev2.0 [EB/OL]. [2001-03-01]. <http://www.usb.org>.
- [11] 韦东山. 嵌入式 Linux 应用开发完全手册 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2008. [编辑:李辉]

(上接第 316 页)

4 结束语

本研究在热传导理论模型的基础上,通过模拟试验从瞬态分析方面计算了缺陷深度及其对表面温度场的影响,同时根据表面温差最大值出现的时间,通过理论公式反演计算得出缺陷的深度,并进行了误差分析。通过有限元软件 ANSYS 得到表面温度场分布,并离散出结点温度,再利用共轭梯度法进行迭代,得出内部缺陷大小。通过模拟计算分析表明,此方法能够较为准确的估算出试件内部缺陷面积的大小。

参考文献 (References):

- [1] 薛书文,宗明成,丁铁英,等. 利用红外热成像技术检测金属内部近表缺陷 [J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(6):424-428.
- [2] 陈珏,郜光宁. 红外无损检测中的缺陷显示度 [J]. 红外与毫米波学报, 1991, 10(4):278-282.
- [3] 范春利,孙丰瑞,杨立,等. 基于红外测温的圆管内壁不

规则边界的识别算法研究 [J]. 热科学与技术, 2006, 5(2):111-117.

- [4] 范春利,孙丰瑞,杨立,等. 电气设备零件内部三维缺陷的定量红外识别算法研 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2):158-164.
- [5] ZONG M C, ZHANG J X, ZHAO Y. Pulsed-heating infrared thermography non-destructive testing technique [J]. *SPIE*, 1996(2899):654-649.
- [6] 赵元松,李大鹏. 基于有限元法的钢板焊缝缺陷红外无损检测 [J]. 机电工程, 2005, 22(12):39-42.
- [7] GUPTA R, TULI S. Electro-thermal modeling and analysis for estimation of defect parameters by stepped infrared thermography [J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8):11-19.
- [8] MALDAGUE X, GALMICHE F, ZIADI A. Advances in pulsed phase video thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002(43):175-181.
- [9] 张韵华. 数值计算方法和算法 [M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [10] 徐树方. 矩阵计算的理论与方法 [M]. 北京:北京大学出版社, 2002. [编辑:柴福莉]