

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0657-04

# 材料内部热阻热容型缺陷的红外检测模拟研究

王艳武, 杨立, 孙丰瑞

(海军工程大学船舶与动力学院 405 教研室, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**在数值传热学的基础上,从理论上对材料内部热阻性、热容性两类缺陷的平板进行了二维温度场的数值模拟,并根据模拟的温度场,对缺陷进行了模拟再现研究。研究表明,通过红外温度检测及模拟温度场,可以有效地检测内部缺陷的性质及大小,从而预防和避免事故发生。

**关键词:**热阻缺陷;热容缺陷;数值传热;红外无损检测

**中图分类号:** TN219

**文献标识码:** A

## Numerical Simulation Research of Infrared Nondestructive Testing on the Resistive and Capacitive Defects Inside Material

WANG Yan-wu, YANG Li, SUN Feng-ru

(Faculty 405, College of Naval Architecture and Power, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Based on the numerical heat transfer, a numerical simulation on the two dimension temperature distribution of a plane with two kind of defects had been done, and studied the reconstruction of defect according to the simulated temperature distribution theoretically. The result showed that the size and character of the defect was obtained through infrared temperature testing and simulated temperature distribution, and the accidents were avoided.

**Key words:** resistive defect; capacitive defect; numerical heat transfer; infrared nondestructive testing

### 1 前言

近年来,灾难性的桥梁断裂、大坝塌方、房屋倒塌及玻璃幕墙破损等建筑事故时有发生,对社会及人民生活都造成很大损失。红外无损检测技术,是防止这类事故的重要手段,并可以将传统的计划维修转变为视情维修,大大节约维修保养经费。

红外无损检测也称为热无损检测 (TNDT),它是建立在传热学理论上的一种方法。由于检测面积大,速度快,检测范围广,对检测物体无任何影响,所以红外无损检测在材料缺陷检测中应用越来越广泛。但是将红外无损检测技术应用于土木工程材料的检测,我国是从上世纪 90 年代初开始,一些研究机构将红外热像诊断技术和土木工程结合起来,在建筑物热耗散、建筑材料缺陷探测及建筑墙壁施工

质量等方面进行研究。上海同济大学混凝土材料研究国家重点实验室的杜红绣、张雄等人,在红外热像用于混凝土和水泥砂浆等材料的火灾损伤的检测与评定等方面做了大量细致的工作<sup>[1]</sup>;清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室的孙格靓与王厚亮等人,在碳纤维增强混凝土构建的内部缺陷的红外检测等方面作了详细的研究<sup>[2]</sup>;北京航空航天大学机械工程及自动化学院王永茂等人,对利用红外检测技术对材料内部缺陷大小和深度的测量进行了研究<sup>[3]</sup>;德国的 Ch Maierhofer 等人也利用红外热像图技术对混凝土及复合材料结构进行了研究<sup>[4]</sup>。

作者简介:王艳武(1977-),男,博士研究生,主要从事红外无损检测研究工作。E-mail: wangyanwu2@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2006-02-20

本文针对混凝土及复合有机玻璃内部缺陷,建立了数学模型。并对热阻型和热容型缺陷利用 MATLAB 进行了二维温度场的模拟计算,并根据计算的温度场,对缺陷的大小进行了模拟再现,从理论上分析了不同类型材料内部缺陷的红外无损检测的可行性,对下一步进行红外无损检测反问题研究具有重要的理论意义。

## 2 数学模型的建立<sup>[5-7]</sup>

图 1 所示是一个含有矩形缺陷的平板材料,其长为  $L_1$ , 高为  $L_2$ ; 矩形缺陷的长、高分别为  $L_3$ 、 $L_4$ 。考虑到缺陷对热流传递的影响,对平板进行二维温度场的模拟计算。根据热力学第一定律和傅里叶定律,假设物体是均匀的,各向同性,可以建立导热方程:

$$\frac{\partial t}{\partial t} = \nabla^2 t + \frac{q_v}{c} \quad (1)$$

式中,  $\nabla^2$  称为拉普拉斯算子;  $\rho c$  称为热扩散率或导温系数;  $\lambda$  是平板的导热率。

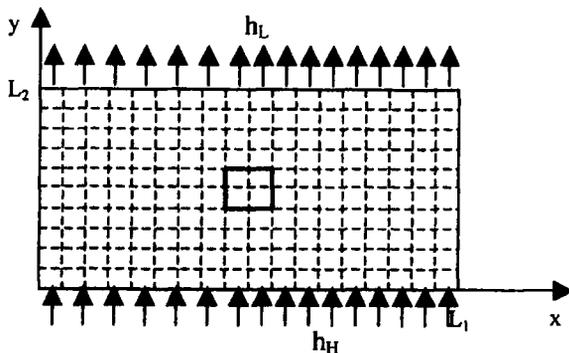


图 1 存在矩形缺陷的二维导热

Fig 1 two dimensional heat transfer with rectangle defect

假设物体无内热源,最后达到稳定,则由 (1) 式可得:

$$\left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

为了获得物体的温度分布,对 (2) 式进行数值计算求解,还需要确定初始边界条件:

$$\frac{\partial t}{\partial y} + h_H (t - t_H) = 0, \quad - \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$y = 0, 0 \leq x \leq L_1$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} + h_L (t - t_L) = 0, \quad - \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$y = L_2, 0 \leq x \leq L_1$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0, \quad x = 0, x = L_1, \quad \forall y \quad (5)$$

其中,  $h_H$ 、 $h_L$ 、 $t_H$ 、 $t_L$  都为常数。式 (2) ~ (5) 为求解该物体温度分布的数学模型。对于内部缺陷部位,由于热流连续,则在交界处有:

$$\frac{\partial t_a}{\partial n_a} = - \frac{\partial t_b}{\partial n_b}, \quad t_a = t_b \quad (6)$$

式中,  $\lambda_b$  表示缺陷的导热率;  $a$ 、 $b$  分别表示平板和缺陷。

式 (2) ~ (6) 是该平板物体理论上的分析式,为了进一步进行数值求解,利用有限差分法 (FDM) 进行代数化处理,对任意中间点温度设为  $t_{i,j}$ , 式 (2) 转换为差分代数方程为:

$$\frac{t_{i+1,j} - 2t_{i,j} + t_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{t_{i,j+1} - 2t_{i,j} + t_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

进一步化简后有:

$$2 \left( \frac{-y}{x} + \frac{-x}{y} \right) t_{i,j} - \frac{-y}{x} t_{i+1,j} - \frac{-y}{x} t_{i-1,j} - \frac{-x}{y} t_{i,j+1} - \frac{-x}{y} t_{i,j-1} = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

将平板划分为  $m \times n$  个节点,可以将缺陷与平板的交界划分在节点边界上,如图 1 所示,则求解平板的温度场分布,转化为求解一系列代数方程,式 (8) 结合节点的划分,可以将平板温度分布转化为求解如下方程:

$$[A][T] = [B] \quad (9)$$

式中,  $A$  为  $m \times n$  阶系数矩阵;  $T$  为所求节点的温度矩阵;  $B$  为常数矩阵。

## 3 温度场数值模拟分析

依据上述数学模型,可以对缺陷平板进行二维温度场的模拟计算。针对模型最后形式为矩阵运算,本文选择以矩阵为基本单元 MATLAB 进行数值计算,可以快速简洁地得到计算结果。

### 3.1 热阻型缺陷 (resistive defect) 的分析计算

若缺陷不同于平板本身的材料,其导热性就不同。当缺陷的导热率小于平板本身的导热率时,可以将缺陷看作是在热流中放置的一个阻碍热流传递的热阻,此类缺陷可以称为热阻型缺陷<sup>[8]</sup>。假设平板是混凝土 ( $\rho = 2250 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 1.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ), 中间缺陷为聚苯乙烯 ( $\rho = 14.7 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0.041 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ )。图 2 是热阻型缺陷平板的温度分布图,

图 3是沿热流传递方向温度分布的平面图,每条温度线是按 y方向的步长间隔计算得出的。从数值仿真计算的结果分析,当缺陷材料的导热率小于母体本身材料的导热率时,缺陷阻碍热流的传递,在缺陷前端,热量堆积,温度高于处于同一高度其它部位的温度;而在缺陷后端,形成如同真空的下陷区域,直接导致处于同一高度其它部位的温度高于该处温度。即由于热阻型缺陷的存在,在热量导入的面形成热量堆积,缺陷正面温度高于周围区域,而在相反面,温度低于周围区域。

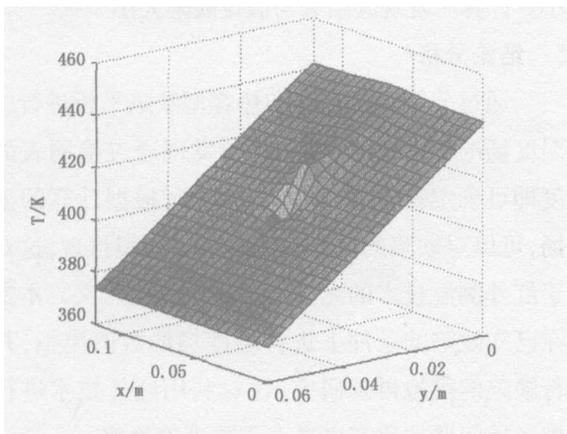


图 2 热阻型缺陷温度分布

Fig 2 distribution of temperature with thermal resistance defect

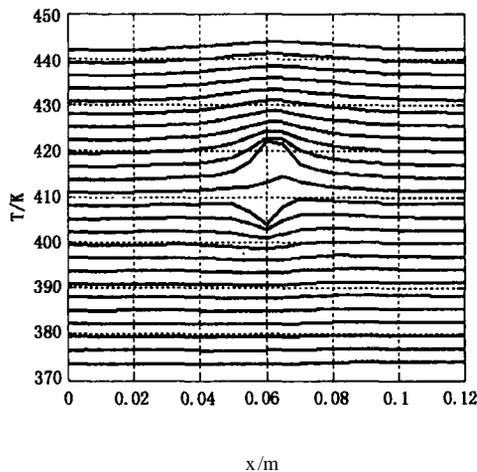


图 3 热阻型缺陷温度在 x 方向的分布

Fig 3 distribution of temperature on x coordinate with resistance defect

### 3.2 热容型缺陷 (capacitive defect)的分析计算

相对于热阻型缺陷,可以定义热容型缺陷。即当缺陷导热率大于平板本身的导热率时,可以把缺陷看作是一个热泵,在缺陷处加速了热流的流动。假设平板是有机树脂玻璃 ( $\rho = 1165kg/m^3$ ,  $\lambda =$

$0.19W/(m \cdot K)$ ),缺陷为石英玻璃 ( $\rho = 2250kg/m^3$ ,  $\lambda = 0.78W/(m \cdot K)$ )。图 4是相同大小的热容型缺陷平板的温度分布图,图 5是沿热流传递方向温度分布的平面图,每条温度线也是按 y方向的步长间隔计算得出的。从图 4分析,缺陷导热率大于平板自身导热率时,如同在平板热流中加入一个热泵,加速了热流的流动,在缺陷前端形成一凹陷区域,而在后端则由于导热率下降,形成了热流的堆积。从图 5分析来看,在平板与缺陷的交界处,温度变化明显要剧烈,温度分布向缺陷集中。

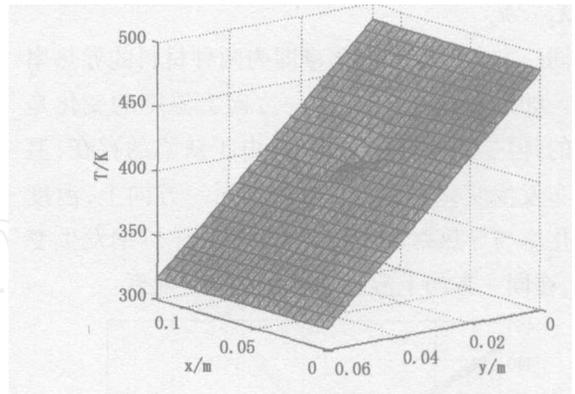


图 4 热容型缺陷温度分布

Fig 4 distribution of temperature with thermal capacitive defect

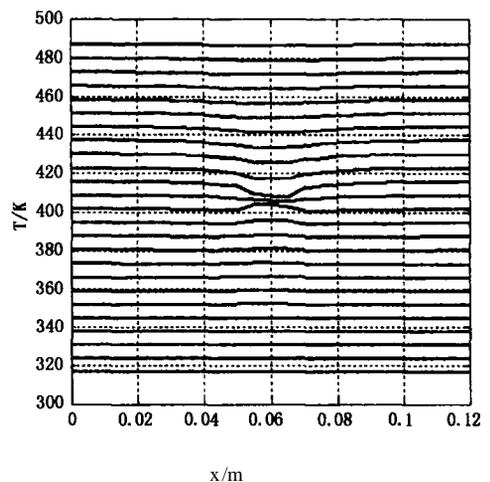


图 5 热容型缺陷温度在 x 方向的分布

Fig 5 distribution of temperature on x coordinate with capacitive defect

### 3.3 计算结果比较分析

从计算结果分析,温度分布面应该是无缺陷时平板温度分布,由于缺陷的存在,影响了局部温度的分布。热阻型缺陷导致了温度以缺陷为中心,向周围发散,使缺陷正面的温度高于周围区域,而在背面温度低于周围区域;而热容型缺陷则导致温度向缺

陷中心集中,对于两个边界面的影响与热阻型缺陷相反。因此通过监测材料表面温度,就可以初步判断缺陷的类型。

#### 4 缺陷大小的模拟再现

通过上述的仿真计算,可以初步确定缺陷的类型。但是在实际工程中,仅仅确定缺陷的类型还是不够的,还需要确定缺陷的大小。从计算结果分析来看,由于缺陷的存在,平板温度分布均出现跳跃。分析(6)式,当方向相同时有:

$$\frac{-a}{b} = \frac{\partial t_b}{\partial t_a} \quad (9)$$

即在同一方向温度的变化量即为两种材料的导热率之比。如果没有缺陷,在同一方向上温度的变化是相同的,但是从计算结果来看,由于缺陷的存在,温度分布发生变化,根据(9)式,在同一方向上,温度的变化率与导热率成反比,当材料的导热率发生变化时,在同一方向上温度分布线会发生跳跃。

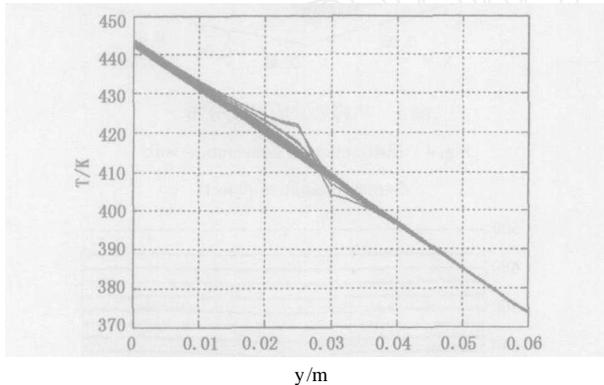


图 6 热阻型缺陷温度在 y 方向的分布

Fig 6 distribution of temperature on y coordinate plan with resistance defect

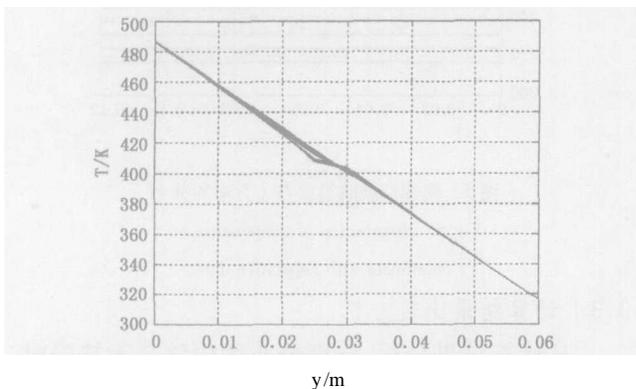


图 7 热容型缺陷温度在 y 方向的分布

Fig 7 distribution of temperature on y coordinate with capacitive defect

图 3和图 5是平板在 x 方向按节点计算的温度

分布,通过模拟计算,根据斜率变化的大小,可进一步确定缺陷在 x 方向上的具体位置。即通过对图 3、图 5 的分析,可以确定缺陷在 x 方向的中心在 0.06 处,左右两边的边界在 0.055 和 0.065 处,可以确定缺陷在 x 方向长 0.01。根据上述分析,图 6 和图 7 是平板在 y 方向按节点计算的温度分布,从图上很直观地发现斜率拐点的位置,起始位置在 0.025 和 0.03 处,即缺陷在 y 方向宽 0.005。确定了缺陷的几何尺寸后,可以结合温度分布图,计算缺陷的大小。计算后发现其结果与假设缺陷大小一致。

#### 5 结论分析

通过分别对热阻型和热容型缺陷平板进行二维温度场的数值模拟计算,分析发现通过检测表面温度即可确定材料内部缺陷的类型;根据计算的温度场,可以对缺陷的位置及大小进行模拟再现,这对基于红外测温技术的无损检测具有重要意义。本文是在已知缺陷的条件下进行温度场的数值模拟,并进行缺陷的模拟再现研究,这对利用红外技术进行温度场反问题的研究也具有重要理论价值。

#### 参考文献:

- [1] 杜红秀,等. 混凝土火灾损伤的红外热像检测与评估 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(9): 1078 - 1082
- [2] 孙格靓,王厚亮. 碳纤维增强混凝土构建的内部缺陷红外热像技术检测 [J]. 炭素技术, 2000, 04: 47 - 53
- [3] 王永茂,等. 红外检测中缺陷大小和深度的测量 [J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 404 - 406
- [4] Ch Maierhofer, et al Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region [J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43: 271 - 278
- [5] 俞昌铭. 热传导及数值分析 [M]. 北京:清华大学出版社. 1982
- [6] 贾力,等. 高等传热学 [M]. 北京:高等教育出版社. 2003
- [7] 杨世铭,陶文铨. 热传学 [M]. 北京:高等教育出版社. 1998
- [8] S Sahnoun, S Belattar Thermal non destructive testing study of a circular defect in plane structure [J]. British Journal of NDT, 2003, 8(08): 115 - 121.