

红外无损检测的理论分析和计算

陈 珏 郜光宁

(东南大学电子工程系, 江苏, 南京, 210018)

摘要——介绍了红外无损检测的原理, 根据导热微分方程和样品的初始条件及边界条件, 利用数值法计算有缺陷区和无缺陷区的样品表面的温度差, 并给出了内部有缺陷的混凝土样品的表面温度差与样品缺陷深度, 以及热流注入时间之间关系的计算结果.

关键词——红外检测, 缺陷, 温度差.

1. 引 言

为了全面了解红外无损检测的理论依据^[1]必须分析与之相联系的热传导问题. 当一个样品的几何尺寸、热物理特性参量、测量条件(如加热、环境温度、边界条件、初始条件)、内部缺陷的位置和形态都确定后, 我们可以借助于数学模型计算表面的温度变化.

本文采用双面法, 在样品的一侧注入一恒定热流, 根据传热学理论计算对应的另一侧面上有缺陷区与无缺陷区的温度差. 从理论上分析了红外无损检测的依据.

2. 物 理 模 型

图 1 是无限大平板状样品. 初始瞬时让它置于温度为 T_A 的环境中; 沿 x 方向板厚为 l , 样品下表面处 $x=0$; 上表面处 $x=l$. 在离样品下表面 $x=l_1$ 处有一厚度为 l_2 的缺陷. 若在样品底部注入一均匀热流, 并向内部扩散. 当样品内部有缺陷存在时, 由于缺陷区域和本底材料的热传导性能不同, 那么它们在平板状样品的上表面处的温度就有差异. 如果能检测出缺陷处与材料本底在表面的温度差, 就可以发现缺陷所在.

为分析简单起见, 我们将样品分成两个区域^[2], 即不包含缺陷的区域 I 和包含缺陷的区域 II.

如果在某一瞬时 t , 没有缺陷的区域表面温度为 $T_{IS}(t)$, 有缺陷区域的表面温度为 $T_{IIS}(t)$, 那么这两个区域的温度差 $\Delta T_s = T_{IS}(t) - T_{IIS}(t)$. 假设:

(1) 只考虑沿样品厚度方向的一维传导, 忽略样品上下左右向周围热交换对样品内温度

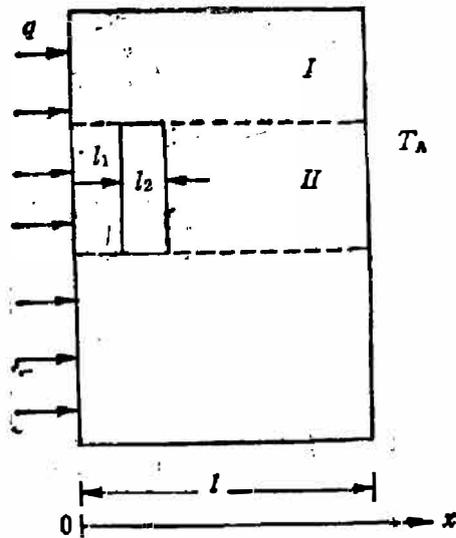


图 1 样品的物理模型

Fig. 1 Physical model of the specimen.

的影响。

(2) 忽略本底材料与缺陷内含物之间的接触热阻以及内含物中的气体的对流、热辐射热交换。

(3) 样品两个表面的热转换系数 h 是相等的。

在考虑一维传导时，有缺陷区域与无缺陷区域的温度分布是无联系的。所以可以分别予以计算。

3. 数学分析

3.1 导热方程和定解条件

如果所给样品的本底材料的热导率为 k ，热扩散系数为 α ，根据上面假设的物理模型及假设条件就可以列出以下非稳态一维偏微分方程及定解条件^[3]：

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, & (0 \leq x \leq l, t > 0); & (1) \\ \text{初始条件: } T(x, 0) = \phi(x); & (2) \\ \text{边界条件: } T(0, t) = \mu_1(t); & (3) \\ & T(l, t) = \mu_2(t); & (4) \end{cases}$$

式中 $\mu_1(t)$ 、 $\mu_2(t)$ 分别为第一类、第二类边界条件。初始条件 $\phi(x)$ 为空间座标的函数。

3.2 数值法

数值法是把给定点上的有限差分去近似代替非稳态偏微分方程。把求解偏微分方程的问题转化为求解有关区域内选定节点上的温度的大型联立方程，使计算得以简化。

利用有限差分法求解一维非稳态导热方程(1)时，必须把所研究的样品沿 x 方向和时间范围内各自等分成许多细小的片段(见图 2)。

图 2 中 Δx 为距离步长； Δt 为时间步长。图中任一节点 i 处的温度 $T(x, t)$ 可以表示为

$$T(x, t) = T(i\Delta x, n\Delta t) = T_i^n; \quad (5)$$

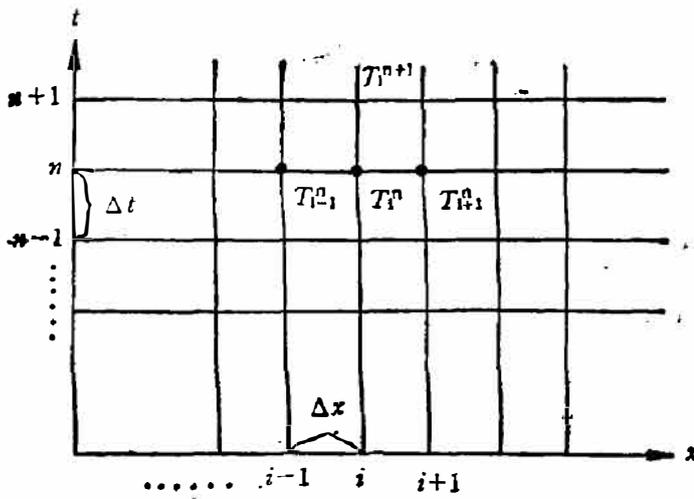


图 2 区域(x, t)中步长为 Δx, Δt 的网格

Fig. 2 The grids of dimension step Δx and time step Δt in the range (x, t).

为了得到稳定的解, 使用完全隐式差分格式将导热方程 (1) 应用于节点 i , 则方程 (1) 可以写为

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^{n+1} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^n; \quad (6)$$

式 (6) 中, 左边按中心差分格式可以写为

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^{n+1} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2}; \quad (7)$$

式 (6) 中, 右边用向前差分可表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}; \quad (8)$$

这样, 一维不稳态导热方程的差分形式为

$$\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}. \quad (9)$$

从式 (1)、(2)、(3)、(4)、(9) 可得图 2 中第 i 节点的方程和边界条件:

$$\begin{cases} T_{i-1}^{n+1} - \left(2 + \frac{1}{f}\right) T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1} = -\frac{1}{f} T_i^n, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} T_i^n = \phi(i\Delta x); \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_1^n = \mu_1(n\Delta t), \quad n=0, 1, 2, \dots; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} T_N^n = \mu_2(n\Delta t), \quad i=2, 3, 4, \dots N. \end{cases} \quad (13)$$

如果已知 n 时刻的样品内部某一位置的温度 T_i , 联立方程 (10)、(11)、(12)、(13), 不难求出第 $(n+1)$ 时刻的温度值。由此可利用离散化的初始条件式 (11) ($n=0$) 和边界条件式 (12)、(13) 组成联立方程。在进行数值计算时, 我们取了下列边界条件:

$$\begin{cases} x=0, T=T_0, \\ x=l, k \frac{\partial T}{\partial x} + h(T-T_A) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

式 (14) 中, T_0 为底面加热温度。为了讨论方便, 引入无量纲量:

$$\begin{cases} \theta = \frac{T - T_A}{T_0 - T_A}, \\ \bar{x} = \frac{x}{l}, F_0 = \frac{\alpha t}{l^2}; \end{cases} \quad (15)$$

则, 导热方程和边界条件式 (10~13) 变为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial \theta}{\partial F_0}, \\ F_0 = 0, \theta = 0, \\ \bar{x} = 0, \theta = 1, \\ \bar{x} = 1, \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = -B\theta. \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中,毕奥数

$$B_i = \frac{hl}{k}; \quad (17)$$

将式(16)用完全隐式差分法离散化得:

$$\begin{cases} \theta_{i-1}^{n+1} - \left(2 + \frac{1}{f}\right)\theta_i^{n+1} + \theta_{i+1}^{n+1} = -\frac{1}{f}\theta_i^n; \\ \bar{x}=0, \theta=1; \\ \bar{x}=1, \theta^{n+1} - \left(1 + B_i \frac{\Delta x}{l} + \frac{1}{2f}\right)\theta_{N+1}^{n+1} = -\frac{\theta_{N+1}^n}{2f}; \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中,

$$f = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} = \frac{k \Delta t}{\rho C_p (\Delta x)^2}; \quad (19)$$

其中, ρ 为密度; C_p 为比热.

联立求解方程组(18),就可求得不同时刻沿 x 方向的温度分布.

用三对角系数矩阵可把联立方程组表示为:

$$[A][\theta]^{n+1} = [F]^n; \quad (20)$$

或

$$\begin{bmatrix} 1, & 0, & 0, & 0 \dots 0, & 0 \\ 1, & -\left(2 + \frac{1}{f}\right), & 1, & 0 \dots 0, & 0 \\ 0, & 1, & -\left(2 + \frac{1}{f}\right), & 1 \dots 0, & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1, & -\left(1 + B_i \frac{\Delta x}{l} + \frac{1}{2f}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \\ \theta_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{f}\theta_2 \\ -\frac{1}{f}\theta_3 \\ \vdots \\ -\frac{1}{f}\theta_N \\ -\frac{1}{2f}\theta_{N+1} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

利用高斯消元法求解三对角线矩阵方程. 根据标准程序^[4], 利用计算机求得不同时刻沿 x 方向的温度分布, 最终求得样品上表面 $x=l$ 处的温度值. 由于有缺陷区与无缺陷区的热物理参量 k, ρ, c_p 不同, 因而这两个区域的 f, B_i 值就不同, 从而区域 I、II 内的表面温度也就不同, 分别为 T_{IS}, T_{IIS} . 由此可得其温差为 $\Delta T_s = T_{IS}(t) - T_{IIS}(t)$.

4. 实例分析

有一厚度 $l=1\text{cm}$ 的无限大混凝土平板, 离下表面 $l_1=0.7\text{cm}$ (或 $l_1=0.9\text{cm}$)处有一缺

陷,其厚度 $l_2=0.03\text{cm}$,将样品置于 20°C 的环境温度下,在底部加一温度为 60°C 的恒定热源,可以利用数值法计算样品上表面的温度差异.表 1 给出了混凝土与缺陷内含物(空气)的热特性参数.

表 1 热特性参数

Table 1 The thermophysical properties of the materials under investigation.

材料	参 数		
	$C_p(\text{J/g}\cdot^\circ\text{C})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{W/cm}\cdot^\circ\text{C})$
混凝土	0.84	2.4	1.54×10^{-2}
空气	1.005	1.093×10^{-3}	2.83×10^{-4}

利用数值法对式(21)表示的三对角系数矩阵进行计算,分别求出有缺陷区与无缺陷区的样品上表面的温度:

(1) 将无缺陷区中的混凝土的热物理参量代入式(17)、(19)就可求得相应的 $B_{i1}(h=0.00001\text{W/mm}^2\cdot\text{c})$ 和 f_1 .

(2) 在分析有缺陷区域时,可以把这个区域看作由三个平板组成:

第一层: $m=1, 0 \leq x < l_1;$

第二层: $m=2, l_1 \leq x < l_2;$

第三层: $m=3, l_2 \leq x < l.$

第一层、第三层中的材料为混凝土本底材料,其 f 值和 B_i 可以用 f_1, B_{i1} 代入.第二层为缺陷区,其内含物为空气,用相应的 f_2, B_{i2} 代入,计算时用空气的热特性参量代入.

把表 1 中相应数值代入式(21),利用计算机可求得样品上表面 $x=l$ 处,有缺陷处与无缺陷区的温度差.

在计算时我们取步长 $\Delta x=0.01$ (即 $N=100$),计算所得结果绘于图 3、图 4、图 5.

利用非稳态加热方法进行红外无损检测

时,在热注入后出现的最大温差所需的时间是一个很重要的量.根据加热时间和加热结束后至测量时的延迟时间可以控制热注入样品的深度.为了得到最大的表面温差,必须选择最佳加热时间和延迟时间.图 3 从理论上给出了在同一材料中不同缺陷的大小和深度所对应的不同最佳加热时间.由图 4 所示曲线可以看到,随着缺陷在材料内深度的增加,表面温差逐渐减小,这是缺陷上方的材料将热量扩散,从而使表面温度降低的缘故,由图 5 可见,缺陷深的表面温差小;缺陷厚的表面温差大,并易于检测.

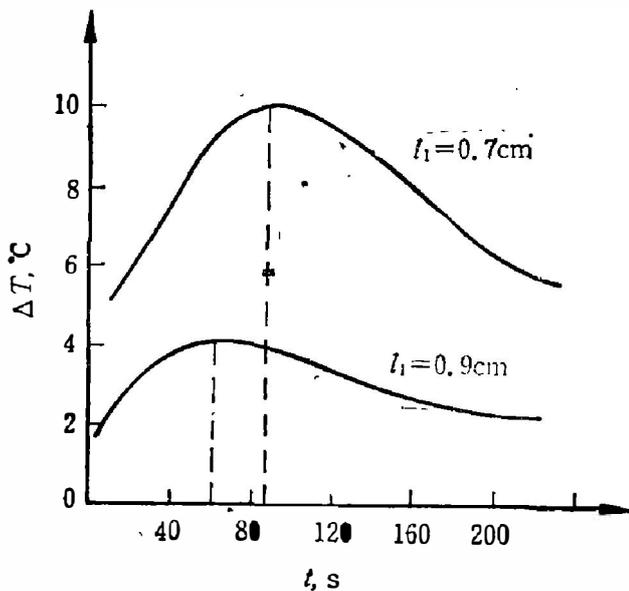


图 3 不同深度缺陷的最佳加热时间

Fig. 3 The surface temperature difference vs heating time with different depth of defect.

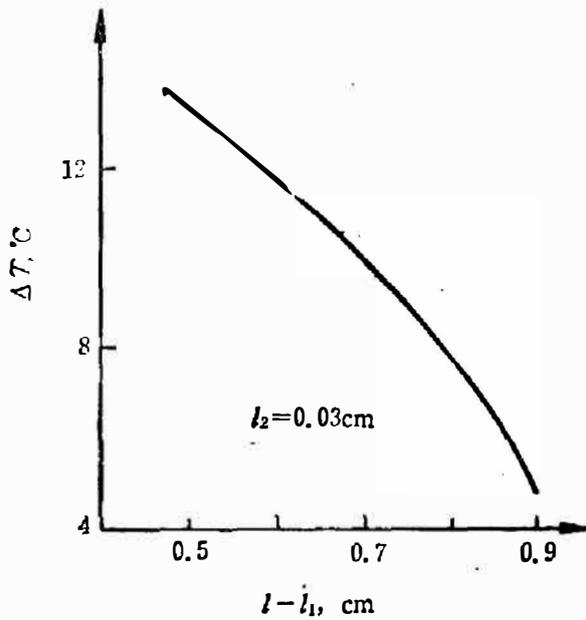


图 4 有缺陷区与无缺陷区表面温差和缺陷深度之间的关系

Fig. 4 The surface temperature difference versus defect depth.

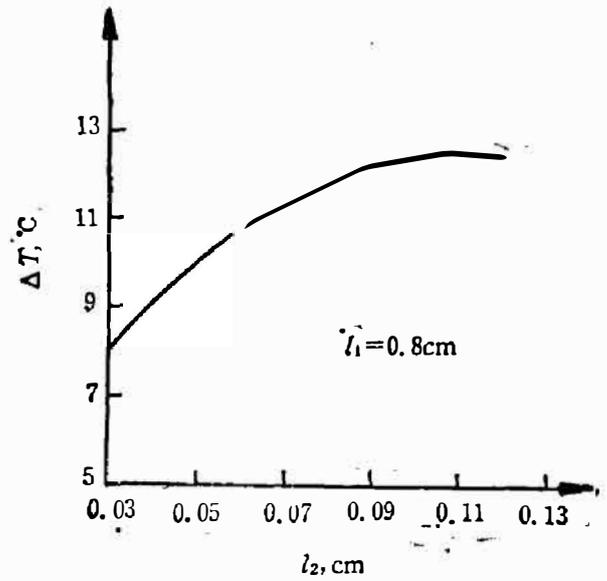


图 5 表面温差与缺陷厚度之间的关系

Fig. 5 The surface temperature difference versus defect thickness.

5. 结 束 语

以上是以一维热传导模型为基础, 从理论上分析了利用双面法进行红外无损检测的依据。如果样品在另外两个方向的尺寸比样品厚度(x 方向)的尺寸大得多时, 采用一维温度场分布不会引起很大的误差, 而又能使问题得以简化。当样品厚度足以与另外两个方向的尺寸相比较时, 显然这种模型会引起较大误差, 那就得引入三维热传导模型。

参 考 文 献

- [1] 王康印, 红外检测, 北京: 国防工业出版社, 1986, P. 8~9.
- [2] Williams. J. H. Jr. S. Hossein Mansouri et al., *British Journal of NDT*, 22(1980), 5:113~115.
- [3] 俞昌铭, 热传导及其数值分析, 北京: 清华大学出版社, 1983, P. 394, P. 440~442.
- [4] 杨世铭, 传热学, 北京: 高等教学出版社, 1987, P. 59.

THEORETICAL ANALYSIS AND COMPUTATION OF INFRARED NONDESTRUCTIVE TESTING

CHEN JUE GAO GUANGNING

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, 210018, Nanjing, Jiangsu, China)

ABSTRACT

The paper describes the fundamental principles of infrared nondestructive testing. The surface temperature difference between the flawed and the unflawed regions is calculated by heat conduction equation, the initial condition and the boundary conditions of the specimen through numerical computation. The results of the surface temperature difference, which depends on the flaw depth, size and the injection time of heat flux in the concrete specimen containing the delamination, are given.