

红外无损检测中的缺陷显示度

陈珏 郜光宁

(东南大学电子工程系, 江苏, 南京, 210018)

根据二维热传导方程计算了塑料、二氧化硅及锰钢的缺陷显示度, 分析了缺陷显示度与延迟时间、缺陷大小以及缺陷离表面距离之间的关系。

关键词: 红外无损检测, 缺陷, 显示度。

在红外无损检测过程中, 有缺陷区与无缺陷区的表面温度差 ΔT 以及最佳延迟时间 τ 是两个重要的量。为了减小温度读数的误差以及周围环境发射对分辨缺陷能力的影响, 采用缺陷显示度 $A = \Delta T/T$ (T 表示缺陷中心的表面温度) 作为检测缺陷的标准更为合适^[1]。

显示度不仅与延迟时间有关, 还与缺陷大小以及缺陷离表面的距离有关。本文采用双面法, 根据二维导热方程对所给样品的缺陷显示度进行分析。

1 二维导热模型计算实例

对包含有缺陷的样品进行二维热传导分析时, 可用非稳态方程描述样品的热分布情况:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (1)$$

根据文献[2]所列的边界条件, 用追赶法和高斯消元法^[3]求解。假设方程组是 n 元的代数方程, 用矩阵形式可以表示为 $[S][T] = [D]$; 其中 $[S]$ 是系数矩阵, T 是未知变量的列向量, D 是常数向量。系数矩阵在主对角线及相邻位置上元素不为零, 即:

$$S = \begin{bmatrix} B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & \vdots & A_{n-1} & B_{n-1} & C_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & \vdots & 0 & A_n & B_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

用高斯消元法求解时, 先解出 T_n , 然后求 $T_{n-1}, T_{n-2}, T_{n-3}, \dots, T_2, T_1$ 。新的系数矩阵元素为 $A'_i = 0, B'_i = B_i - C_{i-1} \frac{A_i}{B_{i-1}}, C'_i = C_i, D'_i = D_i - D_{i-1} \frac{A_i}{B_{i-1}}$; (3)

方程的解为: $T_n = \frac{D'_n}{B'_n}$, $T_i = \frac{D'_i - C'_i T_{i+1}}{B'_i}$.

我们对包含有缺陷的塑料、二氧化硅、锰钢三种材料利用双面法进行了理论计算. 得出了不同延迟时间、不同缺陷尺寸时上表面的温度分布. 假设材料长 10 cm, 宽 2 cm, 用 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 的正方形网格将其划分, 计算结果绘于图 1~6. 其中 d 为缺陷厚度, W 为缺陷宽度, l 为缺陷离上表面距离. 所用材料热物理特性见表 1.

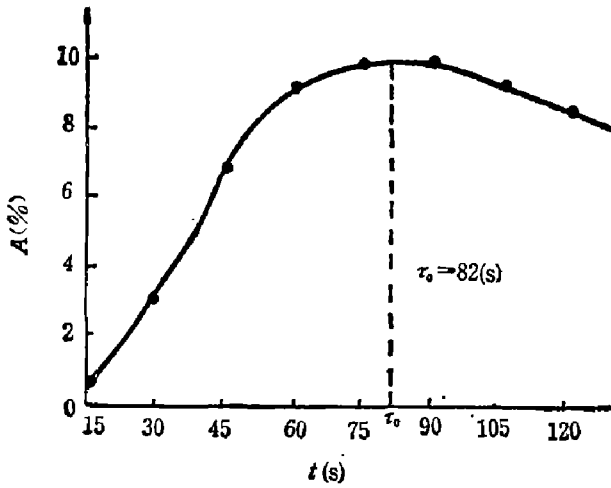


图 1 二氧化硅缺陷显示度 A 与延迟时间 t 的关系 ($l=9 \text{ mm}$, $d=2 \text{ mm}$, $W=10 \text{ mm}$)

Fig. 1 The defect revealability A in SiO_2 versus delay time t

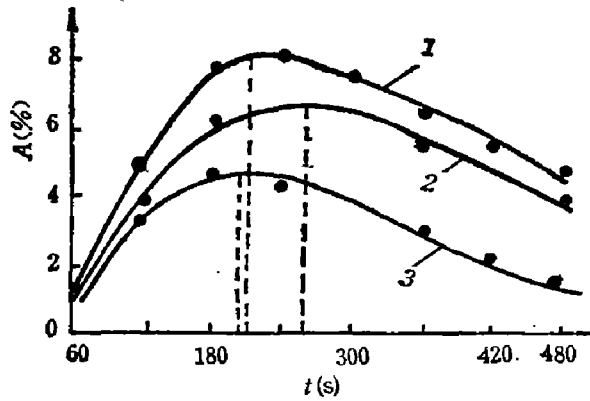


图 2 塑料的缺陷显示度 A 与延迟时间 t 的关系

- 1— $l=9 \text{ mm}$, $d=2 \text{ mm}$, $W=10 \text{ mm}$;
- 2— $l=11 \text{ mm}$, $d=2 \text{ mm}$, $W=10 \text{ mm}$;
- 3— $l=9 \text{ mm}$, $d=2 \text{ mm}$, $W=8 \text{ mm}$

Fig. 2 The defect revealability A in plastic versus delay time t

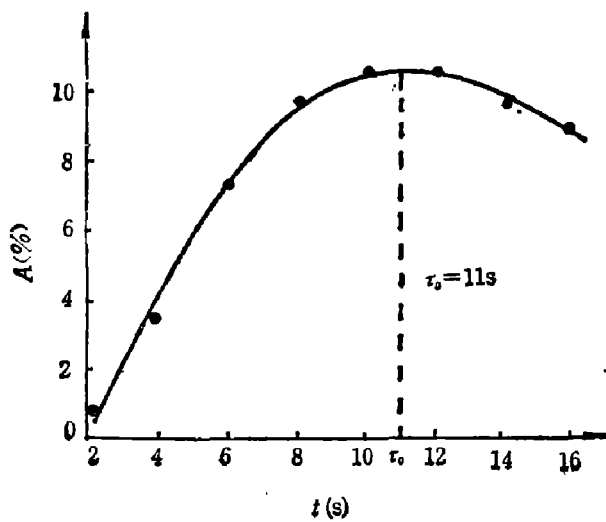


图 3 锰钢的缺陷显示度 A 与延迟时间 t 的关系 ($l=9 \text{ mm}$, $d=2 \text{ mm}$, $W=10 \text{ mm}$)

Fig. 3 The defect revealability A in manganese steel versus delay time t

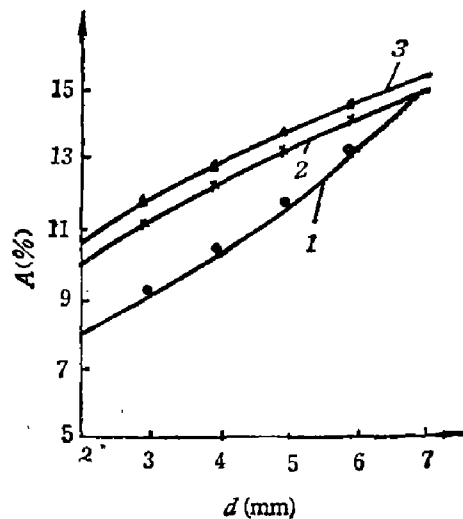


图 4 三种不同材料的缺陷显示度 A 与缺陷厚度 d 的关系 ($l=9 \text{ mm}$, $W=10 \text{ mm}$)

- 1—塑料; 2— SiO_2 ; 3—锰钢

Fig. 4 The defect revealability A versus defect thickness

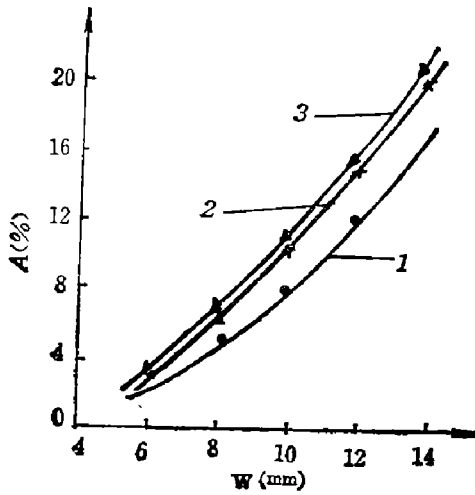


图5 三种不同材料的缺陷显示度 A 与缺陷宽度 W 的关系

1—塑料; 2— SiO_2 ; 3—锰钢

Fig. 5 The defect revealability A versus defect width

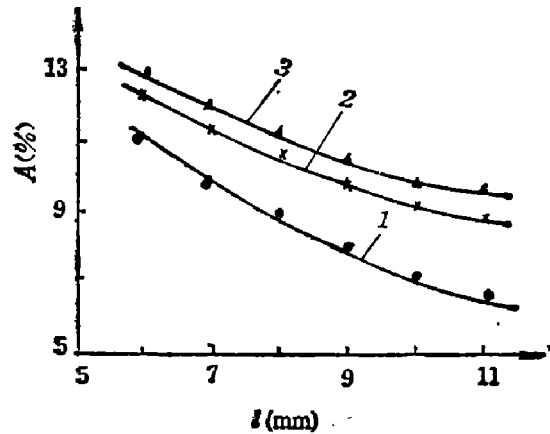


图6 三种不同材料的缺陷显示度 A 与缺陷深度 l 的关系

1—塑料 2— SiO_2 , 3—锰钢

Fig. 6 The defect revealability A versus defect depth

表1 热物理特性参数

Table 1 The thermophysical properties of the materials under investigation

材 料	参 数	
	$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$	$\alpha(\text{m}^2/\text{s})$
空气(缺陷内含物)	0.27	2.36×10^{-5}
塑 料	0.2	2.54×10^{-7}
二氧化硅	1.4	8.31×10^{-7}
锰 钢	22	6.73×10^{-6}

2 结 果 分 析

2.1 显示度 A 与延迟时间 t 的关系

图1~3表明存在一个最佳延迟时间 τ_0 。对于不同材料,随着热导率 k 的增加,最佳延迟时间将减小。金属锰钢比塑料的 τ_0 小得多,这是因为对于相同的缺陷结构参数,随着本底材料热导率增加,热阻减小,热流传导加快,因此达到表面最大温差所需要的时间就减少。所以检测金属类热导率较高的材料时,应在很短的时间内观察缺陷。

此外,随着热导率比 k_a/k_p 减小(下标 a 和 p 分别表示缺陷和本底材料),缺陷显示度增加。比较图1~3中所示曲线可知,当缺陷大小相同时,在相同的延迟时间下,金属的缺陷显示度较非金属为大。实验检测证明,缺陷的比热和密度对显示度没有明显的影响,主要影响来自于热导率^[4]。

图2、6所示的曲线表明,当缺陷大小不变时,随着缺陷深度的增加(图6中曲线1、2),显示度下降,最佳延迟时间拉长。当缺陷宽度增加(曲线1、3)而其它条件不变时,底部均匀注入热流会使热阻变小,因而显示度减小,但这时延迟时间的减小并不显著。由此可见,延迟

时间受缺陷深度的影响比缺陷大小的影响更为敏感。

2.2 显示度 A 与缺陷厚度 d 的关系

这里只讨论最佳延迟时间下的缺陷显示度与缺陷厚度的关系。显示度随着缺陷厚度的增加而增加(见图4), 其原因是由于当 d 增加时, 缺陷区的热阻增加, 有缺陷区与无缺陷区的表面温差也就大。但不同材料的显示度 A 随缺陷厚度 d 的变化率不一样。如图4所示, 热导率较大的锰钢的 A 值随 d 的变化较其它热导率低的非金属材料的变化更为缓慢。这是由于缺陷厚度的增加使缺陷区热阻增加。但锰钢的热导率较其它两种材料为大, 使缺陷上下方的本底区热阻与其它两种相比更小一些, 在缺陷厚度增加不大时, 后一个因素起主导作用。

2.3 显示度 A 与缺陷宽度 W 的关系

缺陷显示度随宽度 W 的增加而增大。在二维模型下, W 增加大时会使缺陷热阻增大, 因而缺陷部分的表面温度更低, ΔT 就更大。这种情况随热导率增加更为显著。因此图5中金属较非金属的 ΔT 随 W 变化更为显著。

2.4 显示度 A 与缺陷深度 l 的关系

显示度 A 随着缺陷深度增加而减小(见图6), 因而离检测面愈近的缺陷愈容易检测到。所以在利用双面法检测时, 总是选取离缺陷面较近的那一面作为检测面, 其背面作为加热面, 以利于获得较高的缺陷显示度。

参 考 文 献

- 1 Vavilov V P. *British Journal of NDT*, 1980; **22**(6): 175~183
- 2 陈珏. 激光与红外, 1990; **20**(3): 41~45
- 3 俞昌铭. 热传导及其数值分析, 北京: 清华大出版学社, 1982; 224~253
- 4 Rapopor D A. *The SOV. J of NDT*, 1978; **14**(8): 747~755

THE DEFECT REVEALABILITY FOR INFRARED NONDESTRUCTIVE TESTING

CHEN JUE, GAO GUANGNING

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

The defect revealabilities of plastic, silica and manganese steel are calculated by the equations of the two-dimensional heat conduction. The defect revealabilities versus delay time, defect size and depth are analyzed.

Key words: infrared nondestructive testing, defects, revealability.