

利用红外热成像技术检测金属内部近表缺陷*

薛书文 宗明成 丁铁英 汤慧君
(北方交通大学物理系, 北京, 100044)

TG115.28

摘要 介绍了利用脉冲式加热红外热成像无损检测技术定量检测金属内部近表缺陷大小及深度的方法, 并给出了实验结果及分析。

关键词 红外热成像, 无损检测, 金属

内部近表缺陷

引言

红外热成像无损检测技术是一门新兴的学科, 它因具有无损、非接触、快速实时、大面积、远距离检测等优点而迅速发展^[1,3]。金属材料探伤是无损检测工作的重要内容之一, 所以探讨金属试件内部缺陷的红外无损检测方法有着重要的意义。

本文介绍利用脉冲加热红外热成像无损检测技术对金属材料进行探伤的结果。实验结果表明, 该技术可以对金属材料进行定量化、非接触、快速无损探伤。不但可以定量测定金属材料内部缺陷的大小和方位, 而且可以定量测量内部缺陷的大小及深度。文中介绍了利用脉冲加热红外热成像技术定量化测量金属材料内部缺陷大小和深度的方法, 并给出了部分实验结果。

1 实验系统

图1是我们自行研制的脉冲加热红外热成像无损检测系统^[2], 该系统主要由脉冲热源, 红外热像仪和专用软件三部分组成。脉冲热源用于瞬时加热被测试件, 在试件中造成热传导过程由两个大功率氙灯提供的热脉冲功率值在兆瓦以上。红外热像仪用于记录热脉冲作用

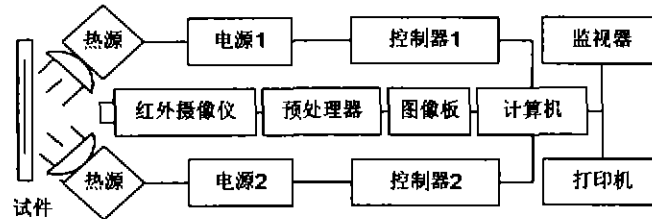


图1 实验系统方框图
Fig. 1 Block diagram of experimental system

* 国家自然科学基金(编号 59575077)资助项目
稿件收到日期 1997-10-13, 修改稿收到日期 1998-04-21

后试过程,件表面的温度场变化过程,主要技术指标为,视场角为 $7^{\circ} \times 7^{\circ}$;工作距离为 $0.4\text{m} \sim \infty$;测温范围为室温 $\sim 1500^{\circ}\text{C}$;空间分辨率为 1.2mrad ;温度分辨率为 0.1°C ;工作波段为 $8 \sim 12\mu\text{m}$ (HgCdTe探测器);图像(64×64 像素)采集速度为每秒25帧.专用软件用于处理接受到的红外热图像,从而差别被测试件的内部缺陷,并定量测量缺陷的大小和深度.我们以钢试件为例进行实验研究.

2 实验研究

2.1 试件

实验中采用的试件是厚金属平板,平板中的缺陷是人工制作的平底圆孔.试件有A、B两种型号(见图2和图3),A型中缺陷直径 D 均为 10mm ,缺陷距表面的深度 l 由大到小分别为 1.8mm 、 1.3mm 、 1.1mm 、 0.8mm .B型中缺陷距表面的深度 l 均为 1.1mm ,缺陷直径 D 分别为 10mm 、 8mm 、 6mm .

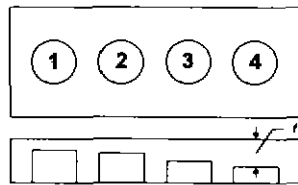


图2 A型试件示意图
Fig. 2 Schematic diagram of test-piece A

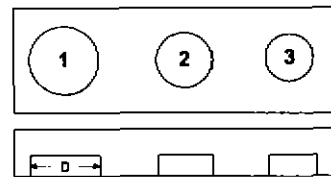


图3 B型试件示意图
Fig. 3 Schematic diagram of test-piece B

2.2 缺陷大小的测量

检测中获得的红外热图像为定量分析缺陷大小及深度提供了丰富的信息.图4是对试件进行脉冲加热后记录下来的红外热图像时间序列.从中可以看到缺陷图像随时间的延长逐渐变弱变模糊.由于热的横行扩散作用,使缺陷边缘变得模糊不清,所以红外热像不能直接反映缺陷的真实大小.我们在大量实验的基础上探索出一种有效测量材料内部缺陷大小的方法.

缺陷的每幅红外热成像反映了缺陷对应表面的温度场分布.图5是沿缺陷热像直径的温度分布曲线,横轴代表像素,纵轴代表缺陷对应表面的相对温度(即相对无缺陷部位对应表面温度的差值), ΔT_m 是极大值,在实验中发现缺陷的边缘部位落在第 n_1 和 n_2 的像素点,也就是说 Δn ($\Delta n = n_2 - n_1$)个像素才代表缺陷的真实大小,同时还发现 n_1 、 n_2 点对应的 ΔT 的值非常接近 $\Delta T_m/e$.假设每个像素代表的实际大小为 L ,缺陷的大小可按式计算:

$$D = \Delta n \cdot L = (n_2 - n_1) \cdot L \quad (1)$$

图6和图7是利用该方法得到的A、B型试件缺陷直径测量值 D 随时间 t 的变化曲线.

由图6(●; $D = 10\text{mm}$, $l = 1.1\text{mm}$;□; $D = 8\text{mm}$, $l = 1.1\text{mm}$;△; $D = 6\text{mm}$, $l = 1.1\text{mm}$)可见:(1)随缺陷直径减小,测量值随时间的波动幅度减小,在 $D = 6\text{mm}$ 时趋于水平;(2)随缺陷直径减小,测量值的误差与非金属材料相比较小^[4].当 $D = 6\text{mm}$ 时,测量值与实际值基本吻合.但是我们在实验中发现,当缺陷较小时,红外热图像的对比度比较低,而且持续时间也很短,这是不利的一面.对大缺陷来说,虽然红外热图像的对比度较高,但测量值随时间波

动幅度较大,只有在一定时间范围内测量误差较小.

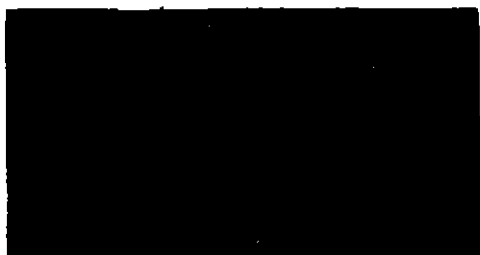


图4 缺陷的红外热成像时间序列
Fig. 4 Time sequence of thermal images of defects

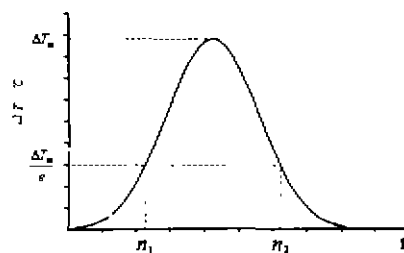


图5 缺陷横向热分布曲线
Fig. 5 Temperature distribution through the center of the defect

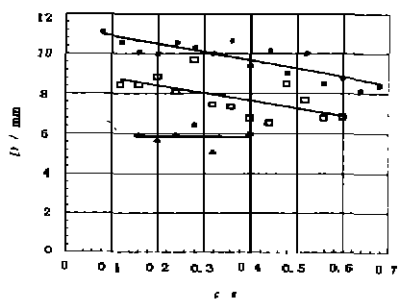


图6 缺陷深度相同大小不同的 $D-t$ 图
Fig. 6 $D-t$ diagram of defects with different diameter at the same depth

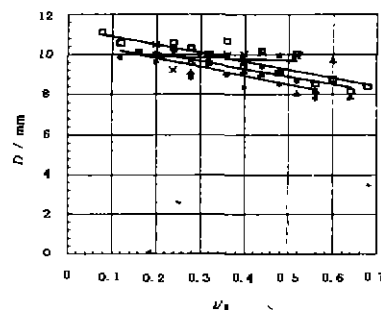


图7 缺陷大小相同深度不同的 $D-t$ 图
Fig. 7 Diagram of defects with the same diameters at different depths

由图7(●; $D = 10\text{mm}$, $l = 0.8\text{mm}$; □; $D = 10\text{mm}$, $l = 1.1\text{mm}$; △; $D = 10\text{mm}$, $l = 1.3\text{mm}$; ·; $D = 10\text{mm}$, $l = 1.8\text{mm}$) 可见:(1) 随缺陷深度增加, D 随时间的变化幅度减小. 当 $l = 1.8\text{mm}$ 时, $D-t$ 曲线几乎与横轴平行;(2) 随缺陷深度的减小, 由测量时间(即在热脉冲作用后的某时刻)选择的不同而带来的误差增大, 对深度小于 1.8mm 的缺陷, 在 $0.1 \sim 0.4\text{s}$ 内进行估测, 误差一般不超过 10% , 对于深度大于 1.8mm 的缺陷测量误差很小.

值得注意的是: 精确测量深度小的缺陷要比精确测量深度较大的缺陷困难一些. 热脉冲作用试件表面后, 对于深度小的缺陷热能集于很小的体积内, 缺陷对应部位的温度迅速升高, 这样在缺陷边缘部位形成了较大的温度梯度, 使得缺陷边缘的热流量增大, 从而测量值 D 随时间迅速减小, 若测量时间选择不恰当就会造成较大的误差. 而对于较深的缺陷, 由于“集热”体积较大, 缺陷边缘部位形成的温度梯度较小, 因此测量值 D 随时间的变化缓慢, 测量结果受测量时间选择的影响较小, 因此定量测量就容易一些.

由于热能的横向扩散, 红外热像的对比度随时间而降低, 所以估测缺陷大小应在热脉冲作用后的较短时间内进行, 以保证测量结果的精度.

2.3 缺陷深度的测量

由一维理论模型可知缺陷的深度 l 与峰值时间 t_{\max} 有密切关系^[2], t_{\max} 是 ΔT 达到最大值时对应的的时间, 它们的关系为

$$t_{\max} = \frac{2l^2}{\alpha}, \quad (2)$$

式(2)中 l 为缺陷深度, α 为材料的热扩散系数, 且 $\alpha = k/\rho c$, k 为导热系数, c 为比热容, ρ 为密度. 对于钢件, $c = 465.0 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $k = 49.8 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $\rho = 7840 \text{ kg/cm}^3$.

根据缺陷红外热像时间序列测出峰值时间 t_{\max} , 然后按式(2)可得到缺陷深度计算公式:

$$l = \sqrt{\frac{\alpha t_{\max}}{2}}. \quad (3)$$

图 8(●: $D = 6 \text{ mm}$, $l = 1.1 \text{ mm}$; □: $D = 10 \text{ mm}$, $l = 1.3 \text{ mm}$; △: $D = 8 \text{ mm}$, $l = 1.2 \text{ mm}$) 是实验中测得的缺陷对应表面温差 ΔT 随时间 t 的变化曲线, 由此可测出每个缺陷对应的峰时间 t_{\max} , 再由式(3)得到该缺陷距表面的深度 l . 缺陷深度的检测结果及绝对误差见表 1.

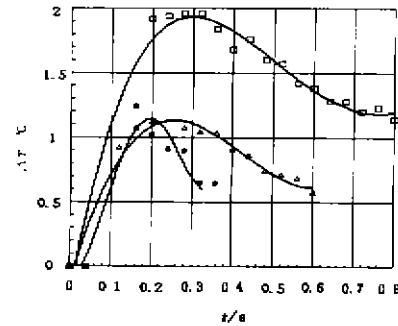


图 8 缺陷的 $\Delta T-t$ 曲线
Fig. 8 Temperature difference vs. time of the defects

表 1 缺陷深度检测结果

Table 1 Testing results of defect depths

缺 陷	实际值/mm	测量值/mm	误差/(%)
缺陷($D=10 \text{ mm}$, $l=1.3 \text{ mm}$)	1.3	1.38	6
缺陷($D=8 \text{ mm}$, $l=1.2 \text{ mm}$)	1.2	1.28	7
缺陷($D=6 \text{ mm}$, $l=1.1 \text{ mm}$)	1.1	1.21	10

从图 8 中可见, 在热脉冲作用后的短时间内 ΔT 随时间变化很快, 并在 t_{\max} 秒达到最大值, 此后 ΔT 随时间缓慢减小. 另外从表 1 中我们也可看到, 对于直径小于 6 mm 的缺陷利用以上方法所得的测量误差已达到 10% . 而且随缺陷直径的减小测量误差有增大趋势, 但是从检测结果来看, 对金属进行检测要比对金属检测的精度高^[4]. 所以以上方法更适用于金属内部较大面积 ($D > 6 \text{ mm}$) 缺陷的定量探伤分析. 对于面积较小 ($D < 6 \text{ mm}$) 的缺陷, 由于红外热像的对比度很低, 不宜用此方法进行定量分析.

3 结论

(1) 在测量近表小缺陷 (l 小于 1.8 mm) 的大小时, 时间应尽量选择在 $0.1 \sim 0.4 \text{ s}$ 之间进行, 此时的测量效果比较好. 对于较大深度的缺陷, 只要红外热像图像清晰, 所得测量结果还是比较满意的.

(2) 对小缺陷进行定量分析需对结果进行修正.

(3) 对深度小的缺陷进行大小的测量要比对深度较大的缺陷困难一些.

(4)由于热扩散,测量缺陷的深度应尽量选择热脉冲作用后的短时间进行,这样才能保证红外热图像的清晰度,以减少误差.

(5)在测量近表缺陷的深度时,当缺陷的直径大于6mm时,应用文中的方法可得到满意的测量结果.当缺陷的直径小于6mm时,该方法已不适用.

以上的分析结果是对导热性能较好的钢件测量得出的,但其测量方法对于其它导热性能类似的金属材料也是适用的.

REFERENCES

- 1 ZONG Ming-Cheng. *J. of Northern Jiaotong University*, (宗明成. 北方交通大学学报), 1993, 17(4): 427~430
- 2 Zong Ming-Cheng. *SPIE*, 2899: 654~659
- 3 ZONG Ming-Cheng. *Laser & Infrared*, (宗明成. 激光与红外), 1996, (2): 85~87
- 4 XUE Shu-Wen. *Infrared Technology*, (薛书文. 红外技术), 1997, 19(5): 40~44

PULSED-VIDEO IR THERMOGRAPHY TESTING OF SUBSURFACE DEFECTS IN METAL*

XUE Shu-Wen ZONG Ming-Cheng DING Tie-Ying TANG Hui-Jun

(Department of Physics, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The method to quantitatively detect the sizes and depths of subsurface defects in metal material was introduced by using pulsed-heating infrared thermography non-destructive testing technology. Some experimental results were given and analyzed.

Key words pulsed-video IR thermography, nondestructive testing, metal.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1997-10-13, revised 1998-04-21