

薄壁材料的热图无损检测术*

黄 毅 林雪荣 徐 军

(中国科学院金属研究所, 辽宁, 沈阳, 110015)

摘要——研究了红外热成象技术用于近表面缺陷的探测, 给出了对两种薄壁材料中缺陷的探测结果。

关键词——红外热成象, 无损检测, 薄壁材料。

1. 引 言

红外热成象技术的应用越来越广泛, 对于各种材料的表面或近表皮下缺陷的探测尤为敏感^[1~3], 为此, 我们应用二维热流模式, 实验研究了红外热成象技术探测表皮下缺陷的可行性, 结果表明, 这种与图象处理结合的红外热成象技术, 在无损检测领域内具有很大潜力。

2. 近表面缺陷探测的机理

在热无损检测中, 考虑的重要问题是对受检目标给予一个表面的热激发, 然后观察热量在材料里的转移过程。由于内部缺陷的存在, 将产生热流的不均匀。

通过一个包含近表面缺陷平板的热流的变化, 取决于这个缺陷的位置、走向、几何尺寸和缺陷材料的性能。图1是缺陷示意图。在厚度为 D 的平板内有一厚度为 h 的缺陷, w 是其直径或宽度, 缺陷到平板表面的距离为 d 。当一个均匀的热流 Q 值被提供到 Y 等于零的表面时, 基于平板内的热等向性, 三维的热传导问题可以简化为二维问题。二维的傅里叶热传导定律为:

$$K_e(Y) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y(x, y) \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (1)$$

式(1)中, 对热等向材料的热导率 $K_e = K_y = \lambda$; ρ 是材料密度; C_p 为材料的等容比热。

由于各边界的表面积相对于热传导的上、下表面积要小得多。因此绝热的边界条件假设, 在 X 坐标为0和 L 处, $\partial T / \partial x = 0$ 。

输入的热流为

本文1988年7月19日收到, 修改稿1989年9月1日收到。

* 国家自然科学基金资助课题。

$$Q_{in} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (y=0); \quad (2)$$

通过厚度为 h 的缺陷的热流密度为

$$q_d = \frac{Q_d}{A_d} = \frac{\lambda_d}{h} (T_1 - T_0); \quad (3)$$

式(3)中, λ_d 为缺陷材料的热导率.

在平板的前表面, 允许有热量传导到空气中, 故有

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=D} - \alpha_0 (T_{Y=D} - T_\infty) = 0. \quad (4)$$

式中 α_0 是空气与样品表面的对流换热系数.

在平板内的缺陷与平板之间的边界线上的热阻被视为可变的, 好的界面的热阻可以忽略, 而坏的界面有热阻, 其变化从小的有限值到无限值, 这种变化取决于不同潜在缺陷的特性, 采用有限元方法可以解这类边界问题^[4].

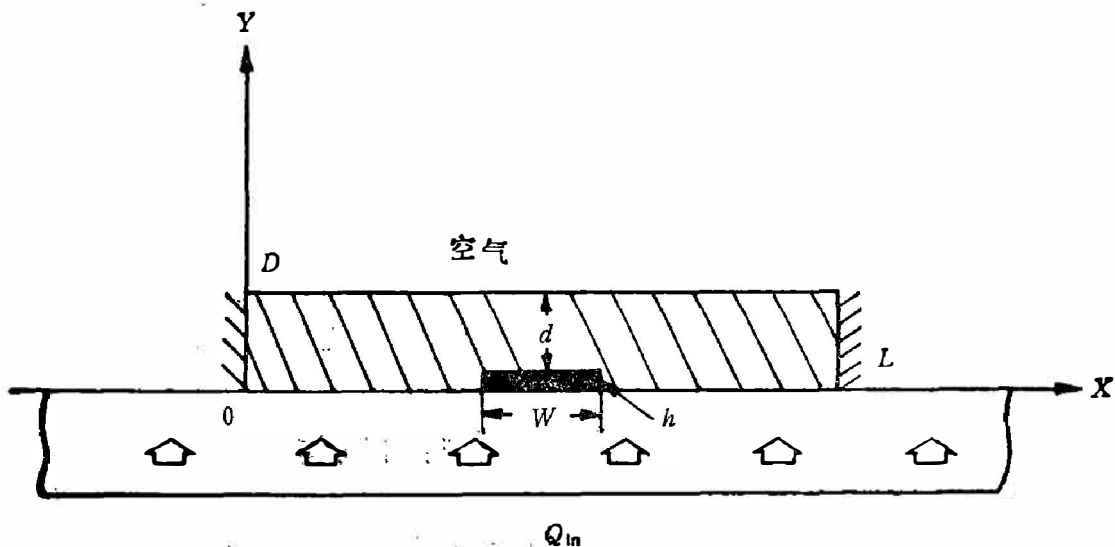


图1 样品的热传导方式

Fig 1. The heat conduction mode of the specimen.

因此, 在稳定的热传导过程中, 可以求得通过多层材料的热流密度为

$$q_n = \frac{Q_n}{A} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i}; \quad (5)$$

式(5)中, Q_n 是通过多层平板面积 A 传导的热流值, T_1 和 T_{n+1} 是一个多层平板最邻近的里边和最外边的温度值. $R_i = d_i / \lambda_i$, R_i 是第 i 层材料的热阻, d_i 是 i 层材料的厚度; λ_i 是 i 层材料的热导率.

存在于 i 层里的各种缺陷(如空洞, 脱粘层, 裂纹及夹杂等)将在一个多层平板的缺陷区域 A_d 处增加 i 层的热阻. 由于空气具有较低的热导率, 所以在缺陷区域的热阻 R_d 要比正常区域的热阻 R_i 大. 当有一均匀的热流从多层板的内部向外流动时, 则在缺陷区域的表皮温度要比正常区域的温度低. 因此, 采用红外热成像技术从存在缺陷的区域可获得低温热图^[5]. 但是, 实验证明: 由于有热波效应 (Thermal wavelength effect)^[6] 当近表面缺陷的直

径比它所在的深度小时,采用红外热成象技术,相对来说就不敏感;虽然有这种局限性,但由于这种技术是非接触测量,对高温或难于测试的目标的测量有独到之处,另外,热成象技术还可以用于大面积的快速检查。

3. 脱粘缺陷的定量评价

我们用人造脱粘缺陷研究了红外热成象技术对近表面多层平板内缺陷的分辨能力。用不锈钢作基板,用恒定的交流电加热,则有一均匀分布的热流在聚四氟乙烯薄膜下产生;因此,热传导则从包含薄膜缺陷的有机玻璃平板的底部向外表面传输。用 AGA780 红外热象仪测定有机玻璃表面的温度分布。图 2 是典型脱粘缺陷的红外热图象。



图 2 脱粘缺陷的典型热图

Fig. 2 The typical thermal image of the adhesive defect.

将厚度 $D=1\text{ mm}$ 的有机玻璃 PMMA 平板样品放置在 18°C 的环境温度下,内含 $h=3\ \mu\text{m}$ 厚的空气缺陷,不锈钢基板加热的温度为 32°C 。当加热时间达 $t=2.5\ \text{min}$ 时,测定了有机玻璃平板的正常区域和带缺陷区域的温度值,并按式(5)分别计算了正常部位和缺陷位置的热流密度 q 值,结果如表 1 所示。由表 1 可见,带缺陷部位的表面所测得的热流密度要小于正常表面的热流密度。故缺陷部位呈黑色低温热图。

表 1 带缺陷样品的热流密度计算值

Table 1 The calculated values of heat flux density for the flawed specimen.

参 数	d (mm)	λ (kcal/m·h·°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	q (kcal/m ² ·h)
无缺陷样品	1+ 0.003 填充	0.75	32	27.4	3458.6
有空气缺陷的样品	0.003 空气 +1	空气 0.02	32	26.8	1837.5

为了减小计算温度的误差和周围环境热发射对分辨缺陷的影响,采用最大温差比值 $M = \Delta T_m / T_{cp}$ 。此处 $\Delta T_m = T_n - T_i$ 是加热传导过程中样品正常区域与缺陷区域之间的最大温差,而 $T_{cp} = \frac{1}{2}(T_n + T_i)$ 是缺陷区域内高温和低温的平均值。图 3 是对缺陷所测得的温度随时间的变化曲线。对不同缺陷厚度的试验样品,在缺陷与非缺陷区域之间的最大温差 ΔT_m ,有一个最佳的加热时间 t 。实验结果表明,对多层材料里脱粘缺陷的探测,当使用最佳加热时间时,将会获得较高的分辨率。

因为要对多层近表面缺陷的红外热成象探测确立一个可靠的参考,所以对包含缺陷的不同厚度 h 和深度 d 的人造缺陷样品进行了热成象研究。

最大温差比值 M 与样品缺陷厚度及缺陷深度的关系分别如图 4、图 5 所示。图 4 中曲线表明, M 值随着缺陷厚度的增加而上升; 图 5 中曲线表明, M 值随着缺陷深度 d 的增加而下降。

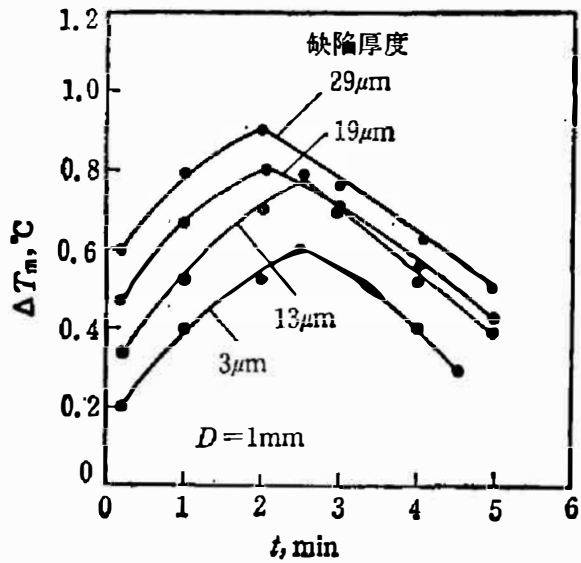


图 3 不同缺陷厚度的表面温差随时间的变化曲线
Fig. 3 The surface temperature difference ΔT vs time t for different defect thickness.

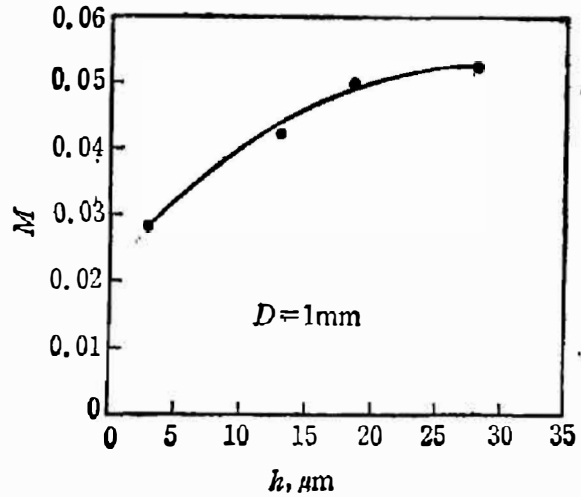


图 4 最大温差比值 M 随缺陷厚度 h 的变化曲线
Fig. 4 $M-h$ curve of the flawed specimen.

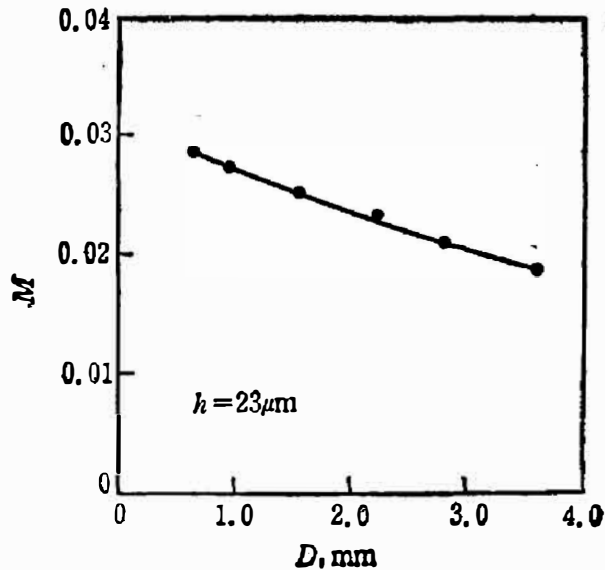


图 5 缺陷样品的 $M-D$ 曲线
Fig. 5 $M-D$ curve of the flawed specimen.

4. 固体火箭药柱缺陷的无损与检测

小型固体火箭药柱的包覆层是由石墨和橡胶复合而成, 药柱包覆层中可能出现脱粘、气孔、裂纹等缺陷, 它们均为近表面的缺陷。我们在样品与石墨橡胶复合层之间人为地制造了尺寸为 $50 \times 100 \text{ mm}^2$, $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 和 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 的脱粘层。样品在低温水浴箱内保存 4 小时, 然后横置于一转台上观察其热象。在屏幕上可以见到明显的脱粘低温热像。在这种

条件下,样品的正常部位与脱粘层之间的温差为 0.5°C , 全部人造缺陷均被显示出来。对药柱热成象评价时间可延伸到 25 min, 当 $\Delta T > 0.06^{\circ}\text{C}$ 时, 缺陷的轮廓仍清晰可见。

30余件固体火箭药柱用红外热像进行检查, 其典型的结果如图 6 所示。图 6 中, A 和 B 是脱粘缺陷的热图和断口平面图, 其近表面缺陷的尺寸是 77.3mm^2 , 在石墨橡胶层里有一厚度为 $1\mu\text{m}$ 的裂纹平面, 裂纹平面到药柱体的距离仅 0.15mm , 它的红外热图是一种脱粘型的低温大黑斑。图 6 中 C 和 D 是在石墨橡胶壳层内包含有孔洞的热图和断口图。黑斑的灰度与在石墨橡胶壳层内孔洞的尺寸和深度有关。在石墨橡胶壳层内孔洞直径大于 1mm 时可以探测到。

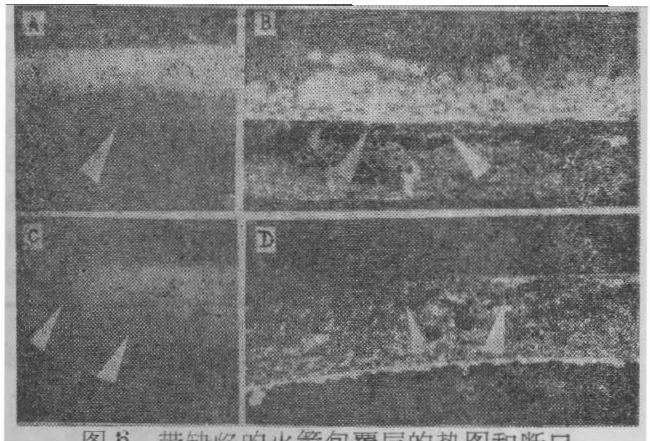


图 6 带缺陷的火箭覆盖层的热图和断口

Fig. 6 Typical thermograms and fractographs of flawed SFR casing.

5. 用热图检查非晶态膜片的脱粘界面

Li—Fe—Al 快速冷凝制成的非晶态薄带材料, 可以用作高效率、小体积的变压器铁芯材料。但必须有多层次的薄带材压接在一起, 以减少漏磁。薄带材之间压接质量的好坏将直接影响产品性能。常规的无损检测方法对薄层材料的压接质量十分难于评价。

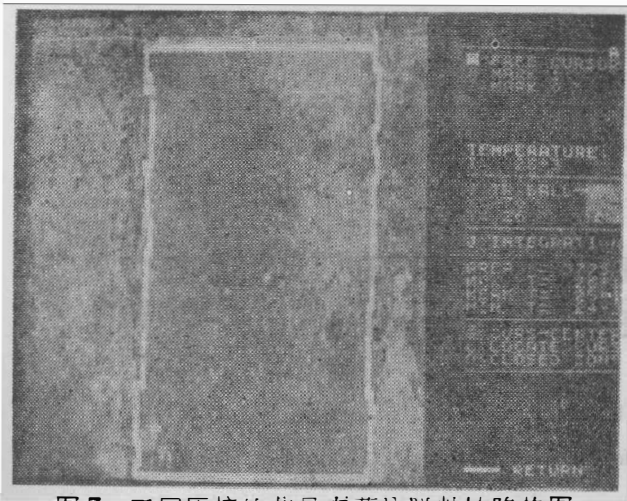


图 7 二层压接的非晶态薄片脱粘缺陷热图

Fig. 7 A typical thermogram of the adhesive defect of thin-walled amorphous alloy.

用红外热成象检查薄带压接缺陷的关键在于: 要有均匀高效的红外辐射源, 受检面非晶态带材比辐射率要保持一致。因此在做红外成象检查前, 观察面的非晶态带材表面要涂上高比辐射率的极薄涂料, 用 TP-1000 型黑体风机作为均匀的加热源。样品制备: 采用 0.05mm 厚的非晶态带材制成二层和三层的压接片。样品尺寸为 $40 \times 20 \times 0.1$ 或 $40 \times 20 \times 0.15(\text{mm}^3)$, 图 7 是二层非晶态压接片脱粘缺陷的红外热图。表 2 给出四个典型样品的计算数据。表 2 中, A 为 Pericolor

1000 图像处理系统计算出的全样品面积; T_{max} 为样品正常区最高温度, A_d 为脱粘面积, $T_{d,m}$ 为样品脱粘区温度; $A_d/A(\%)$ 为脱粘区域所占面积百分数值。

6. 结 论

红外热成象技术对于薄壁材料的浅表层缺陷的无损探伤是一项有价值的技术。这项技

表 2 非晶态薄层样品粘结缺陷无损检测结果

Table 2 The NDT results of the adhesive defect of the amorphous alloy specimen.

样 品	图号	$A(\text{mm}^2)$	$T_{\text{max}}(^{\circ}\text{C})$	$A_d(\text{mm}^2)$	$T_{\text{dm}}(^{\circ}\text{C})$	$A_d/A(\%)$
A (2层)	7228	797.9	26.1	244.3	25.3	30.6
B (2层)	7234	800.0	27.5	147.1	26.3	18.4
C (3层)	7238	811.2	26.5	315.8	25.9	38.9(1层)
C (3层)	7238	811.2	26.5	114.6	25.7	14.1(次层)
D (3层)	7241	721.6	26.3	163.0	25.4	22.6(1层)
D (3层)	7241	721.6	26.3	117.9	25.3	16.3(次层)

术主要具有与目标非接触、测量迅速、灵敏度高和探测缺陷图象识别直观性好等优点。

实验结果表明,在薄壁材料里可探测缺陷的最大温差比值 M 随着缺陷厚度的增大而增加,随着缺陷深度的增加而下降。对于缺陷的红外热图显示存在一个最佳加热时间。

对药柱包覆层缺陷和非晶态薄带压接脱粘的探测结果表明,红外热图无损检测技术对于薄壁材料缺陷探测具有很大的潜力。

致谢——作者们感谢沈阳新光机械厂,中国科学院金属研究所非晶态课题组的同志们在样品提供和现场试验条件上的准备上给予的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Williams R. S. and Reifsnider K. L., *Materials Evaluation*, **35** (1977), 8; 50.
- [2] Kubiak E. J., *Applied Optics*, **7** (1968), 9; 1743.
- [3] Huang Y. et al., *Materials Evaluation*, **42** (1984), 8; 1020.
- [4] 李守新、黄毅、师昌绪, *金属学报*, **21** (1985), 1: 7.
- [5] 林雪荣、徐军、黄毅, *无损检测*, **9** (1987), 1: 5.
- [6] Casslaw H. S. and Jaeger T. C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press (1959), UK.

THERMOGRAPHIC NONDESTRUCTIVE TESTING OF THIN-WALLED MATERIALS*

HUANG YI, LIN XUERONG, XU JIN

(Institute of Metal Research, Academia Sinica, 110015, Shenyang, Liaoning, China)

ABSTRACT

The thermographic method as a nondestructive testing for the detection of subsurface defects is investigated. Results are given for the evaluation of defects in a series of thin-walled materials.

* Project supported by the Chinese National Natural Sciences Fund.