

# 复合材料胶接缺陷的红外热像检测

黄松岭 李路明 杨海青 施克仁

( 清华大学机械工程系 北京 100084 )

**文 摘** 简要介绍了红外热像的检测原理,并用红外热像方法对铝蜂窝铝蒙皮复合材料较易出现的胶接缺陷进行检测,结果表明红外热像方法是检测复合材料胶接缺陷的快速、有效方法。不同性质缺陷的最佳检测时间不同,对于铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料蒙皮的各种脱粘缺陷,检测速度都高于每分钟两屏。实现被检工件快速、方便、自动化的加热方式,加热源和热像头的同步自动扫查以及智能化地识别各种缺陷是今后红外热像检测发展的重要方向。

**关键词** 复合材料,无损检测,红外热像

## Evaluation of Composites Bonding Defects by Infrared Imaging Testing

Huang Songling Li Luming Yang Haiqing Shi Keren

( Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University Beijing 100084 )

**Abstract** Principle of infrared imaging testing is briefly presented and bonding defects of honeycomb aluminum composites are inspected by infrared imaging technique. Testing results show that infrared imaging is a rapid, effective testing method for detection of bonding defects in composite materials. The optimal testing time for different defects is different, and the testing speed is higher than two screens per minute for all bonding defects of honeycomb aluminum composites. A rapid automatic heating mode, a automatic synchronous scanning of heating source and infrared detector, and a intelligent defect identification system will be the important developing aspects of infrared imaging testing technique.

**Key words** Composites, NDT, Infrared imaging

### 1 引言

由于复合材料制造过程中,较难对各种工艺参数进行精确控制,造成复合材料质量不稳定,离散性大,并且在使用过程中,静载荷、机械损伤、疲劳、蠕变、过热等原因也会引起复合材料破坏,因此有必要在生产和使用过程中对复合材料进行无损检测<sup>[1]</sup>。

通常应用于复合材料的无损检测技术包括:超声方法、声发射检测、射线检测方法、表面渗透方法

和红外热像方法等。

声发射检测时必须把材料结构置于一定的载荷环境中,这对于某些成品构件和装配好的产品来说是不现实的,而且其检测结果多数是获得与强度有关的定性数据<sup>[2]</sup>。表面渗透只能发现表面开口缺陷,无法检测复合材料的分层缺陷。超声和 X 射线检测是两种重要的复合材料无损检测技术<sup>[3]</sup>,超声方法,特别是超声 C 扫描能可靠地检出复合材料中

收稿日期:2002-02-28;修回日期:2002-07-22

黄松岭,1970年出生,博士后,主要从事复合材料的无损检测与无损评估、漏磁检测技术的研究工作

的分层、疏松、孔隙等大部分危害性缺陷<sup>[4~6]</sup>,但检测效率较低。X射线检测能发现材料厚度或密度1%~2%变化的缺陷,但对于复合材料较易出现的分层缺陷不敏感。基于温度场分布原理的红外热像检测技术,因其具有非接触、可大面积扫描、快速等特点,将成为复合材料结构无损检测的高效、快速方法。

## 2 红外热像检测原理

任何物体,只要其温度高于绝对零度,都从表面发出与温度有关的热辐射能。红外热像检测的基本原理<sup>[7]</sup>是利用被检物体的不连续性缺陷对热传导性能的影响,进而反映在物体表面温度的差别上,即物体表面的局部区域产生温度梯度,导致物体表面红外辐射能力发生差异,检测出这种差异,就可以推断物体内部是否存在缺陷。具体检测方法分为以下两种:(1)有源红外检测法又称主动红外检测法,其特征是利用外部热源向被检测工件注入热量,再借助检测设备测得工件表面各处热辐射分布来判断缺陷的方法;(2)无源红外检测法又称被动红外检测法,其特征是利用工件本身热辐射的一种测量方法,无任何加热源。

在工程应用中,有源红外检测法使用较广泛。当均匀热流加到平板表面时,基于平板内的热各向同性,三维的热传导问题可以简化成二维问题,二维的傅立叶热传导定律为:

$$K_x(y) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K_y(z) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, $K_x$ 、 $K_y$ 分别为热流方向和其垂直平面的热导率, $\rho$ 是材料密度, $C_p$ 是材料的比热容, $T$ 为温度, $t$ 为时间。图1是注入热流在工件中传导的示意图。

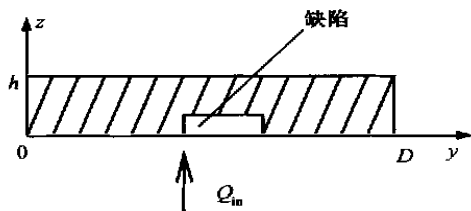


图1 热传导示意图

Fig. 1 A sketch map of heat conduction

由于边界面积相对于上下表面要小得多,因此可以假设  $y$  坐标在  $O$  和  $D$  处的边界条件为  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

输入热流为

$$Q_{in} = - K_x(0) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (2)$$

上边界可以采用以牛顿冷却公式为基础的第三类边界条件描述:

$$- K_x \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = (T_h - T_a) \quad (3)$$

式中, $K_x$ 是工件与周围环境的换热系数, $T_h$ 为工件上表面的温度, $T_a$ 是周围环境空气的温度。根据公式(1)和上述边界条件就可以解出工件内的热流密度,从而得到工件表面各点温度值,从工件表面的温度分布就可以得到工件中缺陷的分布。

## 3 实验方法

### 3.1 红外检测系统

实验所用的红外无损检测系统如图2所示。红外探测器采用日本生产的705MK2远红外摄像头;热像仪是美国制造的,型号为TVS-2100;测温范围为-40~900;分辨率为 $\pm 0.01$ ;图像采集与处理系统是自编软件。

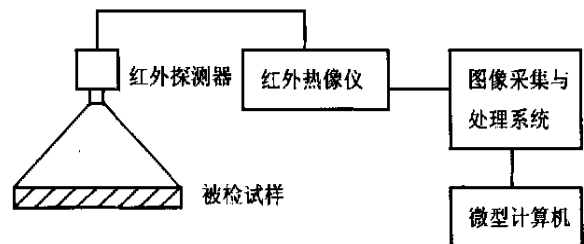


图2 红外检测系统框图

Fig. 2 A block diagram of an infrared testing system

### 3.2 被检测试样

采用在航空工业中大量使用的铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料样品作为被检测材料。试样长450 mm、宽350 mm,蒙皮厚0.5 mm,蜂窝边长5 mm,蜂窝高25 mm,蜂窝壁厚0.1 mm。针对铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料较易出现的蒙皮与蜂窝芯之间的脱粘现象,制作了4种模拟脱粘的人工缺陷。这四个缺陷都是采用直径为16 mm、厚度为20  $\mu$ m的聚四氟薄片夹在蒙皮和蜂窝芯之间制成,1<sup>#</sup>试样缺陷为去掉胶膜并将蜂窝芯去掉2 mm,然后垫上聚四氟薄片;2<sup>#</sup>试样缺陷为在胶膜和蒙皮之间垫上聚四氟薄片;3<sup>#</sup>试样缺陷为在胶膜和蜂窝芯之间垫上聚四氟薄

片;4<sup>#</sup>试样缺陷为将蜂窝芯下压 2 mm,然后垫上聚四氟薄片。这些人工缺陷的间距为 100 mm,1<sup>#</sup>试样缺陷距试样左边缘 100 mm,4<sup>#</sup>试样缺陷距试样右边缘为 50 mm,四个人工缺陷距试样下边缘为 100 mm。

### 3.3 检测过程

用功率为 1 kW 的电加热毯均匀加热被检试样缺陷面 30 s,然后把被检试样放到夹持装置上,试样距红外摄像头距离为 1.5 m,根据被测试样材料和表面状况调整红外发射率(对于铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料,选择红外发射率大于 0.33),并根据试样表面温度和温度范围相应调整检测灵敏度、温度上下限。随试样温度的下降,相应调整检测温度范围和显示模式,存储记录下试样缺陷的红外图像。整个实验在室内进行,环境温度为 23 。

### 4 结果与讨论

试样红外热像检测结果示于表 1 和图 3~图 5。

表 1 实验结果

Tab. 1 Testing results

试样	采样时间 <i>t</i> / min	温度分辨率 SN/	缺陷温差 $T_M$ /	缺陷比温差 $T_M / T_b$
1 <sup>#</sup>	0.5	0.10	11.90	0.2801
	4.8	0.06	14.80	0.3634
	10.8	0.15	17.85	0.4509
	14.4	0.21	16.80	0.4747
	16.4	0.10	15.10	0.4569
2 <sup>#</sup>	0.5	0.10	2.70	0.0636
	4.8	0.06	6.80	0.1670
	10.8	0.15	11.40	0.2880
	14.4	0.21	10.29	0.2908
	16.4	0.10	9.60	0.2905
3 <sup>#</sup>	0.5	0.10	7.80	0.1836
	4.8	0.06	8.50	0.2087
	10.8	0.15	9.30	0.2349
	14.4	0.21	9.87	0.2789
	16.4	0.10	9.60	0.2905
4 <sup>#</sup>	0.5	0.10	5.10	0.1201
	4.8	0.06	7.80	0.1915
	10.8	0.15	9.45	0.2387
	14.4	0.21	8.40	0.2374
	16.4	0.10	7.30	0.2209

表 1 中采样时间指试样停止加热到采集红外图像的时间。对缺陷的检测灵敏度在于缺陷温差  $T_M$  和缺陷比温差  $T_M / T_b$ ,  $T_b$  指试样无缺陷处温度值,  $T_M$  和  $T_M / T_b$  越大,缺陷越明显。

图 3 显示 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 试样在停止加热后大约 11 min 时  $T_M$  达到最大值,检测灵敏度最高;3<sup>#</sup> 试样缺陷的最佳检测时间在试样停止加热后大约 14 min。从图 4 可看出,缺陷的最佳检测时间比图 3 的略长。

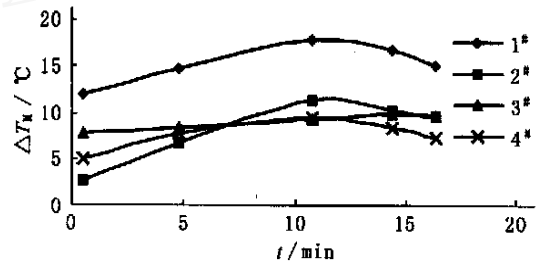


图 3  $T_M$  随时间变化曲线

Fig. 3 Defect differential temperature curves versus time

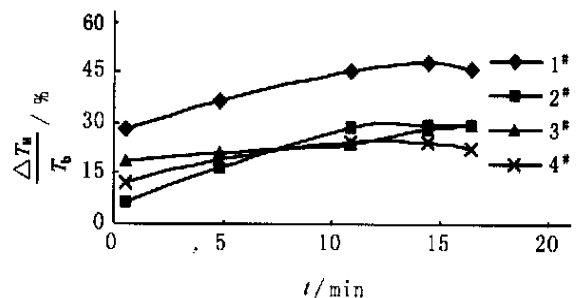
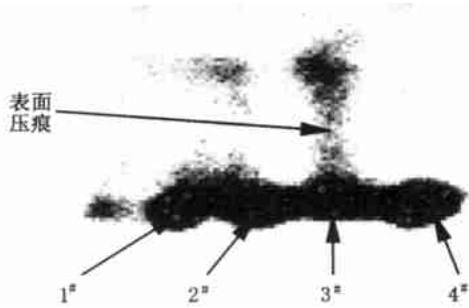


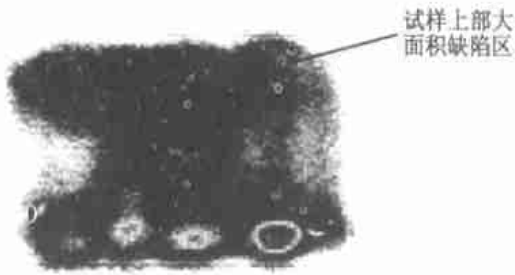
图 4  $T_M / T_b$  随时间变化曲线

Fig. 4 Defect relative differential temperature curves versus time

从图 5 (a) 中可以明显看到试样下部存在一排孔状异常区,说明这些地方传热不良,存在蒙皮脱粘缺陷,即四个人工缺陷,说明采用红外热像方法检测铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料脱粘缺陷的检测速度比较快,最低可以达到 0.5 min 检测一屏,每屏的检测面积大小根据实际情况设置,在本实验中一屏可检测面积为 450 mm × 350 mm 的区域。图 5 (a) 中 3<sup>#</sup> 试样缺陷上部有加工造成的轻微表面压痕;图 5 (b) 的上部是另一种较大面积的缺陷,在实验过程中也可以被检测出来。



(a) 停止加热 0.5 min 时的图像



(b) 停止加热 10.8 min 时的图像

图 5 铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料热像图

Fig. 5 Infrared images of honeycomb aluminum composites

## 5 结论

对铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料最易出现的蒙皮脱粘缺陷红外热像实验表明,采用本方法可以有效地检出此类缺陷,并且检测速度快、造成温差的方式

简单、缺陷位置和大小显示直观,同时检测结果易保存至计算机磁盘,以备进一步数据处理。环境温度、缺陷位置和缺陷性质都影响缺陷的最佳检测时间,但对于本实验中的铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料的各种脱粘缺陷,检测速度都高于每分钟两屏。

在红外热像检测中,实现被检工件快速、方便、自动化的加热方式,加热源和热像头的同步自动扫描以及智能化地识别各种缺陷是今后发展的重要方向。

## 参考文献

- 1 陈积懋,余南廷编著. 胶接结构与复合材料的无损检测. 国防工业出版社,1984:1~10
- 2 陈积懋. 复合材料无损评定技术. 无损检测,1991;(13):24~30
- 3 Chern E James. Concept of non-destructive evaluation. Materials Evaluation,1991;(9):1228
- 4 刘松平,郭恩明. 复合材料无损检测技术的现状与展望. 航空制造技术,2001;(3):30~32
- 5 刘松平,郭恩明,张谦琳等. 复合材料深度方向超声 C 扫描检测技术. 无损检测,2001;(1):13~15
- 6 魏勤,尤建飞,彭如海等. 超声 C 扫描成像系统在铝基复合材料无损检测中的应用. 华东船舶工业学院学报,2000;(2):31~34
- 7 朱建堂. 激光、红外和微波无损检测技术的应用与发展. 无损检测,1997;(11):314~316

(编辑 李洪泉)

(上接第 18 页)

26 Mohan R V, Ngo N D, Tamma K K. On a pure finite-element-based methodology for resin transfer mold filling simulations. Polymer Engineering and Science, 1999;39(1):26~43

27 Schmidt F M, Lafleur P, Berthet F, Devos P. Numerical simulation of resin transfer molding using linear boundary element method. Polymer Composites,1999;20(6):725~732

28 Shipeng Li, Raymond Gauvin. Numerical analysis of the resin flow in resin transfer molding. Journal of Reinforced Plastics and Composites,1991;10:314~327

29 Lam C, Joshi Sunil C, Liu X L. Numerical simulation of

the mould-filling process in resin-transfer moulding. Composites Science and Technology, 2000;60:845~855

30 Moon Koo Kang, Woo Il Lee. A flow-front refinement technique for the numerical simulation of the resin-transfer molding process. Composites science and Technology, 1999;59:1663~1674

31 Joshi S C, Lam Y C, Liu X L. Mass conservation in numerical simulation of resin flow. Composites: Part A, 2000;31:1061~1068

(编辑 马晓艳)