

铝蜂窝胶接缺陷的红外热波无损检测

蒋淑芳, 沈京玲, 杨党纲¹⁾, 金万平²⁾, 张存林, 徐可北¹⁾, 李艳红, 张小川, 陈继华

(首都师范大学 物理系, 北京 100037)

摘要:蒙皮与蜂窝之间的脱粘缺陷使铝蜂窝夹心复合板的强度大大降低, 严重影响金属蜂窝胶接产品的应用, 必须对其进行严格的无损检测。用红外热波技术对铝蜂窝夹层胶接结构进行检测, 结果表明, 该技术可对试件夹层胶接质量和蜂窝结构作快速有效直观的检测。

关键词:红外热波检测; 铝蜂窝结构; 复合材料; 脱粘

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)01-0023-03

Infrared Thermal Wave Nondestructive Testing of Aluminum Honeycomb Composite for Bonding Defects

JIANG Shu-fang, SHEN Jing-ling, YANG Dang-gang¹⁾, JIN Wan-ping²⁾, ZHANG Cun-lin, XU Ke-bei¹⁾,

LI Yan-hong, ZHANG Xiao-chuan, CHEN Ji-hua

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: Since the disbond in aluminum honeycomb composite reduce the intensity of composite boards and affect their application, it is necessary to detect the defects timely. The aluminum honeycomb composite was inspected by infrared wave nondestructive testing. It was shown by experimental results that the technique was effective for rapid and intuitive testing of the bonding quality and structure of an aluminum honeycomb composite test piece.

Keywords: Infrared thermal wave testing; Aluminum honeycomb structure; Composite; Disbond

铝蜂窝夹心板板芯采用金属铝箔制成六角形蜂巢, 两面用合金铝板。其结构采用工字梁原理, 能够保证在足够的承载能力下, 将自身的重量减轻, 还可以分散承担来自各方的压力, 因具有强度高、刚性好、寿命长、吸音、隔热、具有光滑的气动表面、耐疲劳和不易变形等突出的综合功能而被广泛应用于航空航天以及列车、船舶、建筑装饰、体育用品、赛车和轻体房屋等领域。但在制造过程中, 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; 在使用过程中, 静载荷、机械损伤、疲劳、蠕变和过热等原因也会引起破坏^[1]。与金属材料不同的是, 复合材料在断裂或损坏之前几乎没有什么先

兆, 其破坏具有突然性, 往往对结构造成致命威胁, 形成安全隐患^[2]。因此, 复合材料结构件生产和使用过程中的无损检测十分重要。

金属蜂窝胶接产品中的缺陷主要分两类, ① 在其预处理和胶接加工过程中产生的缺陷, 主要有蜂窝变形、蜂窝压皱和节点分离等。② 金属蒙皮与蜂窝在胶接过程中产生的缺陷, 如脱粘等^[3]。铝蒙皮蜂窝结构复合材料作为航空工业的一种重要材料, 如果蒙皮与蜂窝之间有脱粘情况发生, 其强度将大大降低, 严重影响航空飞行器的安全^[4]。试验表明, 红外热波无损检测技术可对铝蜂窝复合材料试件夹层胶接情况作快速有效的检测。

1 红外热波无损检测技术原理

与传统的被动式红外热成像检测不同, 热波检测技术采用了主动式控制热激励的方法, 用各种加热技术激励试件表面下的缺陷。不同材料表面及表

收稿日期: 2004-11-04

基金项目: 国家 863 高科技发展计划 (2003AA333090); 211 工程资助项目

1) 北京航空材料研究院, 北京 100095

2) 北京维泰凯信新技术有限公司, 北京 100083

面下的物理特性将影响热波的传输,以某种方式在材料表面的温度场变化上反映出来。温度场变化导致材料表面红外辐射能力的差异,红外辐射载有材料的特征信息,利用红外热成像技术记录材料表面的红外辐射并将人眼不可见的红外辐射转化成可见的温度图像。通过控制热激励方法和记录材料表面的温场变化,可以获取材料的均匀性信息及其表面下的结构信息,达到检测目的^[5]。

红外热波无损检测技术的理论基础是热传导方程,由热传导方程结合媒介边界条件可得到温度到达峰值的时间 t_{peak} 与缺陷深度 d 之间的关系

$$t_{\text{peak}} = \frac{2d^2}{\alpha}$$

对特定的媒介物质,一般情况下,热扩散系数 α 可视为一常数, α 值越大的物体对外界热环境的改变反应越快。 t_{peak} 可从缺陷区域的温度-时间图上找到。

2 试验

2.1 试验设备

试验使用脉冲加热红外热成像无损检测系统,该系统由脉冲热源、红外热像仪和专用软件三部分组成。脉冲热源用 EchoTherm 热激励系统,热源由两个高能量的闪光灯组成,用于瞬时加热被测试件,在试件中形成热传导过程。红外热像仪是 ThermoCAM™ SC3000,该热像仪采用尖端的制冷型量子阱红外光电探测器技术,工作波段为 $8\sim 9\ \mu\text{m}$,提供分辨率为 320×240 像素的图像和精确的温度测量能力。热像仪用于记录热脉冲作用后试件表面的温度场变化过程,并送给专用软件进行处理。从处理后的红外热图像可确定试件内部是否有缺陷并可测量缺陷的大小和深度。

2.2 试件

试件外形尺寸为 $225\ \text{mm}\times 170\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$ (芯高),上蒙皮厚 $0.3\ \text{mm}$,下蒙皮厚 $0.4\ \text{mm}$,蜂窝是边长 $4\ \text{mm}$ 的正六边形结构,蜂窝壁厚 $0.04\ \text{mm}$ (图 1)。

针对铝蒙皮铝蜂窝复合材料在蒙皮与蜂窝胶接

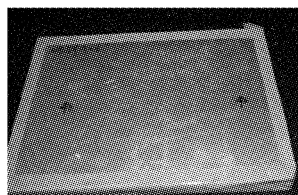


图 1 铝蜂窝铝蒙皮复合材料试件

过程中易产生的脱粘缺陷,采用厚度为 $15\ \mu\text{m}$ 的两层圆形聚四氟乙烯薄片夹在蒙皮和蜂窝芯之间制成四个模拟脱粘的人工缺陷,从左至右按 1~4 编号,其直径依次为 $13.8, 19.5, 13.8$ 和 $6.4\ \text{mm}$ 。1 号缺陷是在蜂窝夹心压塌 $0.5\ \text{mm}$ 后在上蒙皮和蜂窝之间去除胶膜加上两层聚四氟乙烯薄片,2~4 号缺陷都是在蒙皮和胶膜之间垫上两层聚四氟乙烯薄片。不同材料的热学参数见表 1。

表 1 材料的热学参数

材 料	热导率 $\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$	密度 g/cm^3	热容量 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{K}$	热扩散率 cm^2/s
铝	2.26	2.698	2.484 0	9.10×10^{-1}
空 气	2.51×10^{-4}	0.001	0.001 3	1.94×10^{-1}
聚四氟乙烯	2.51×10^{-3}	2.170	2.180 0	1.15×10^{-3}

2.3 试验过程

为提高试件表面的红外发射率,提高闪光灯的加热效率,得到信噪比较高的试验结果,通常在反射率高的试件表面(如铝等)涂一层黑漆或镀膜来减少发射损失,提高检测效率^[6]。

在室温下进行试验,首先进行热像仪的温度标定和设置。将试件固定在闪光灯罩内,红外热像仪镜头离试件的距离是 $45\ \text{cm}$,调整镜头焦距,根据被测样件的导热特性和试验所要达到的目的选择合适的试验条件,闪光灯能量约 $3.7\ \text{kJ}$,采样频率为 $60\ \text{Hz}$,一般导热快的试件相应的探测时间短,因为铝的传热性很好,探测时间取 $10\ \text{s}$ 。通过计算机控制闪光灯工作,加热试件表面,同时红外热像仪实时记录试件表面温度场,计算机软件自动对实时图像信号进行处理和分析,得到试件的红外热像序列图。通过试验所得的原始热图序列可以看到模拟脱粘缺陷在前几帧就显现出来了,随着时间的变化,不同深度和性质的缺陷显现过程清晰可见。对试件的原始热图作一阶微分、二阶微分、高通滤波、中值滤波和均值滤波等图像处理以得到试件的最佳数字图。检测过程中获得的红外热像图为定量分析缺陷提供了丰富的信息。

图 2 是在试件的原始热图序列中选取的比较清晰的一帧。利用设备的软件功能还可实现缺陷尺寸和深度的测量,由于三维热扩散的影响,测得的缺陷尺寸比实际尺寸要大一些;而蜂窝材料的脱粘缺陷一般都发生在蒙皮与蜂窝夹心之间,所以其深度信息并不重要。

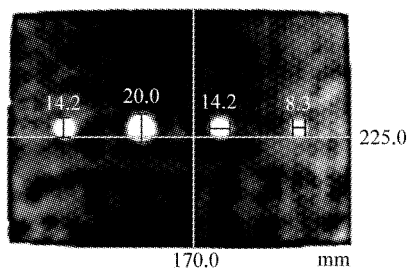


图 2 缺陷图像及其尺寸的测量

3 试验结果分析

聚四氟乙烯的热导率比铝小很多,热量在此受阻,反映在试件表面与缺陷对应的区域温度较高,在图 2 热图中呈亮色而显示出缺陷。图 2 经高通滤波处理的图像示于图 3。可见,除了四个缺陷的大小和位置外,试件的蜂窝结构也清晰可见。

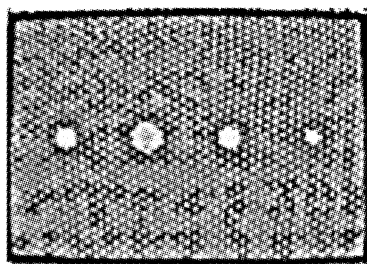


图 3 高通滤波后的热图像

(上接第 22 页)

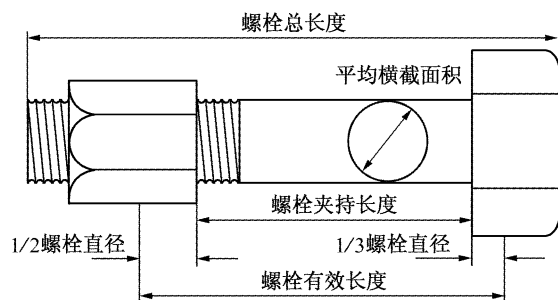


图 2 螺栓形状

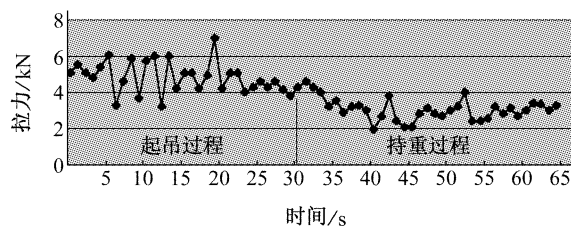


图 3 M24 mm×90 mm 螺栓拉力静载检测结果

现场应用表明,超声波螺栓应力检测仪可有效检测在弹性应力范围下,被显著拉伸且声传播性能良好的螺栓的应力状态,保障螺栓的安全使用。

4 结论

采用超声法也可检测铝蜂窝缺陷,但检测效率很低。用 X 射线法基本无法检测出该试件中设计的缺陷,这是因为铝蒙皮铝蜂窝中缺陷和本体对于射线的吸收差异太小。试验结果证明红外热波无损检测技术可对铝蜂窝复合材料试件夹层胶接情况和蜂窝结构进行快速有效的检测,保证铝蜂窝胶接产品的安全应用。

参考文献:

- [1] 陈积懋,余南廷. 胶接结构与复合材料的无损检测[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [2] 耿荣生. 飞机复合材料粘结质量评价的新方法研究[J]. 无损检测,2001,23(11):461—464.
- [3] 张 斌,陈积懋,王 珏. 金属蜂窝胶接结构冲击损伤的无损检测[A]. 21 世纪华人无损检测技术论坛论文集[C]. 珠海:知识产权出版社,2001.
- [4] 范 华,赵明涛,谭玉山. 电子散斑测量仪及其在无损检测中的应用[J]. 半导体光电,1998,19(1):31—34.
- [5] Wang Xun. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. USA: Wayne State Univ,2001.
- [6] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等. 红外与微光技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

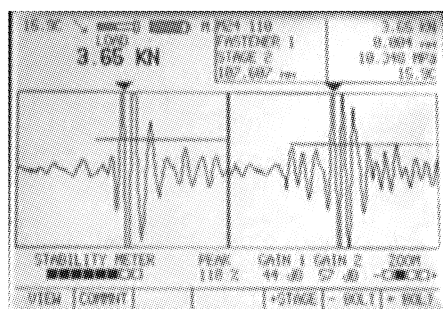


图 4 M24 mm×90 mm 螺栓拉力检测波形图

参考文献:

- [1] 冉启芳, 费星如. 超声波方法测量螺栓应力[J]. 固体力学学报, 1982, (1): 64—69.
- [2] 郑超祖. 超声波实验应力分析方法[J]. 无损检测, 1979, 1(1): 18—24.
- [3] Deputal J. Ultrasonic technique for measuring stress in screws[A]. Proc of Ninth World Conference on NDT [C]. Melbourne: 1979.
- [4] Stress Tel. Guide to Ultrasonic Inspection of Fasteners [Z]. Part No. 021—002—175 Rev. B.