

复合材料缺陷的红外热波无损检测

陈桂才¹ 吴东流¹ 程茶园¹ 郭广平²

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 北京航空材料研究院,北京 100095)

摘 要 简述了红外热波无损检测的原理,并利用红外热波无损检测系统对铝蜂窝夹芯结构复合材料和泡沫夹芯结构复合材料的胶接界面脱粘缺陷进行了检测。结果表明,该方法检测此类缺陷快速、高效、直观。引入界面层的概念,建立了此类复合材料缺陷红外热波检测的数学分析模型,利用该模型简单方便地对热像图进行了理论分析。

关键词 复合材料,红外热波,无损检测,热图分析

Non-destructive Evaluations of Composite Debonding Flaws by Infrared Thermal Wave

Chen Guicai¹ Wu Dongliu¹ Cheng Chayuan¹ Guo Guangping²

(1 Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Institute of Aeronautical materials, Beijing 100095)

Abstract Principle of infrared thermal wave non-destructive evaluations (NDE) is presented. Debonding flaws of aluminum honeycomb core composites and foam core composites are inspected by an infrared thermal wave imaging system. The results show that the NDE method is rapid, effective and intuitive for detection of debonding flaws in these composites. A mathematic model is founded to analyze thermograms of composites debonding flaws. It is simple and useful to analyze the results with this model theoretically.

Key words Composites, Infrared thermal wave, NDE, Thermography

1 引言

复合材料界面结合状况是影响复合材料性能的重要因素^[1, 2]。复合材料界面发生脱粘,将影响复合材料力学性能的传递性,造成应力集中,界面脱粘处成为裂纹源,发生裂纹萌生和失稳扩展,最终导致整个材料断裂破坏^[3]。同时界面层对发挥材料功能传递、阻挡、吸收、散射等作用有较大影响。因此检测复合材料及其制件的界面结合状况极为重要,尤

其是航天复合材料产品制件,若发生力学或功能破坏,将带来不可估量的损失。

复合材料的无损检测技术发展很快,除了超声、射线、磁粉、涡流和渗透五大常规检测方法外,红外热波无损检测技术是无损检测中的一门新技术,从上世纪60年代国外迅速发展起来,但真正成熟和广泛应用还是近十年的事情。而国内近几年该方面的研究发展也较快,但主要用在电力诊断、工业生产在

收稿日期:2003-05-13;修回日期:2003-06-06

陈桂才,1976年出生,工程师,主要从事激光、红外无损检测的研究工作
宇航材料工艺 2004年 第1期

线监测及实验室研究等领域^[4],航天材料产品的红外热波无损检测应用尚属空白。本文结合航天产品广泛应用的铝蜂窝夹芯结构复合材料和泡沫夹芯结构复合材料对红外热波无损检测应用进行了初步研究、分析。

2 红外热波无损检测的原理及特点

温度超过绝对零度(-273)的物体都辐射热。红外热成像是借助于物体的热辐射以得到其热图的一项技术。如图1所示,目标物体的热辐射穿过空气被热像仪接收,热像仪是一种光电设备,热像仪有物镜,它使热辐射聚焦到热辐射传感器(此元件称为红外探测器)上,红外探测器再把入射的辐射转换成电信号,进而被处理成可见图像,即热图。



图1 热图形成示意图

Fig.1 The schematic of the process of thermograms forming

热像仪所接收到的热辐射,除来自目标物体表面的热辐射外,还有周围环境的反射辐射及目标物体与热像仪之间的大气辐射三部分组成,可将辐射关系转换为热值关系式:

$$I = \frac{I_0 - (1 - \epsilon) I_b - (1 - \tau) I_{atm}}{\tau} \quad (1)$$

式中: I_0 为测出的目标物体热值; I_b 为目标物体表面温度下被标定的热值; I_{atm} 为大气温度的热值; I 为目标物体温度下被标定的热值; τ 为大气透射率; ϵ 为目标物体表面发射率。被标定的热值与相应的温度关系为:

$$I = \frac{R}{F\epsilon^{B/T} - 1} \quad (2)$$

式中: R 、 B 、 F 分别为依赖热像仪光圈、滤光镜和仪器类型而标定的仪器常数。

由式(1)、式(2)可计算出二维表面温度场。红外热波无损检测是探测器将接收到的目标物体表面热辐射能转化为数字信息储存在热图像中。若物体存在缺陷,则物体缺陷部分的热行为发生改变,反映到物体表面是异常的温度分布或热流分布。热图显示出这种异常的分布,通过热图分析,可判读缺陷的大小、形状和分布等信息^[5]。

红外热波无损检测具有非接触、实时、高效、直观的特点,分为主动式(有源红外)检测法和被动式(无源红外)检测法两种^[6]。主动式采用外部热源加热检测试样,再利用检测仪器接收试样表面的热辐射,并转化成热图进行检测。其中主动式又分为注入热流面与检测面同面和注入热流面与检测面异面检测法两种^[7];被动式是靠试样本身热辐射进行检测。本实验采用主动式同面检测法。

3 实验

3.1 材料

实验所用的复合材料分为两种:一种是铝蜂窝夹芯结构复合材料,蜂窝芯规格0.03 mm ×6 mm ×8 mm,碳/环氧(碳纤维增强环氧树脂复合材料)板蒙皮厚1.5 mm;另一种是泡沫夹芯结构复合材料,泡沫夹芯厚20 mm,碳/环氧板蒙皮厚0.8 mm。蒙皮脱粘人工缺陷采用贴聚四氟膜的方法制作。铝蜂窝夹芯结构复合材料缺陷为15 mm和20 mm的圆形缺陷;泡沫夹芯结构复合材料缺陷为40 mm ×40 mm的方形缺陷。

3.2 仪器设备与试验过程

实验用AGEMA900型红外热像仪,采用主动式闪光灯加载进行红外热波无损检测研究。红外系统的温度分辨率为0.08(30时),测温范围:-30~1500。检测设备系统示意图如图2所示。

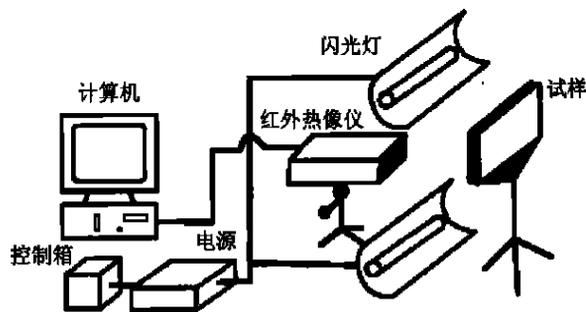


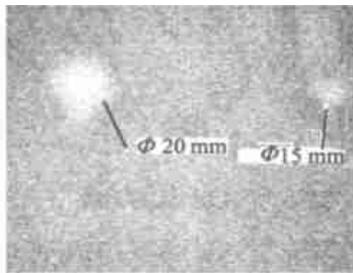
图2 红外热波检测系统

Fig.2 A chart of infrared thermal wave NDE systems

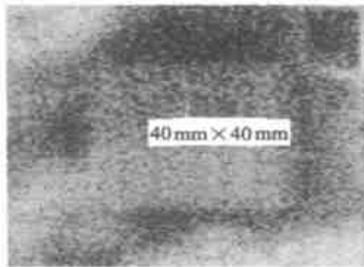
检测过程首先将试样固定在夹具上,红外热像仪镜头距离试样1 m,根据试样表面温度、温度范围、环境温度等相应调整检测灵敏度及温度上下限,检测环境温度(20 ±1)。闪光灯瞬间触发加热后,立即进行红外图像的采集和处理,存储记录试样缺陷的红外图像,并进行分析。

4 结果与讨论

两种材料人工缺陷试样的红外热波检测图像如图3所示。图3(a)为停止加热20 s时的蜂窝结构复合材料红外热图,图3(b)为停止加热12 s时的泡沫夹芯复合材料红外热图。可以明显看出15 mm和20 mm及40 mm×40 mm三种尺寸的缺陷,缺陷区温度高,表现在热图上与背景颜色对比为高亮度。缺陷的形状、尺寸、分布清晰直观。



(a) 铝蜂窝夹芯结构复合材料



(b) 泡沫夹芯结构复合材料

图3 复合材料红外热像图

Fig. 3 Infrared thermograms of composites

对于平板试样,在平板内的热传导特性可认为是各向同性,又由于试样表面积远远大于试样厚度,因此,可简化为多层平板热传导问题^[8]来分析试样表面的红外热像图。数学模型如图4所示,试样蒙皮厚 h_1 ,导热率 λ_1 ;考虑到界面处缺陷的存在以及从蒙皮到芯层的过渡层与两侧的材料热性能不同,因此抽象出厚 h_2 的界面层,热导率 λ_2 ,界面层缺陷区域的热导率为 λ_f ;下面的芯层、下界面层和下蒙皮层假设材料均匀不存在缺陷,因此,可以将这三层假设为一个厚 h_3 的第三层,而不影响定性分析,热导率为 λ_3 。闪光灯曝光,从试样表面注入热流密度 Q , Q 一部分被试样反射回来 Q_{out} ,一部分与试样表面发生热交换,传递给试样表面热流密度 Q_{in} (可用牛顿冷却定律求得),这里有:

$$Q = Q_{in} + Q_{out} \quad (3)$$

宇航材料工艺 2004年 第1期

试样表面交换来的热流密度 Q_{in} 随后开始向试样内部传导,经过蒙皮、界面层及第三层传导损失一部分热流密度 Q_b (或 Q_f), Q_b 和 Q_f 分别为非缺陷区和缺陷区对应的试样板部分传导的热流密度(如图4)。

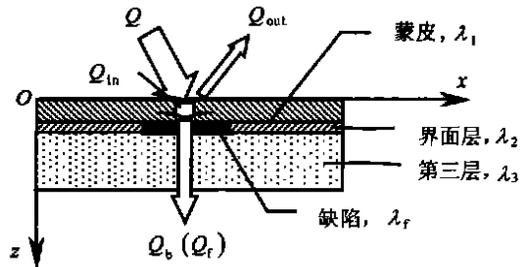


图4 热传导示意图

Fig. 4 A schematic of heat exchange

由于板壁边缘散失的热量可以忽略,理论等温面与平板壁平行,平板试样面积为定值,因此经过每层传导损失的热流密度可用傅立叶定律计算^[7,8]:

$$dQ = - \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

再根据多层平板热传导理论加和性原理,可求得通过试样传导损失热流密度为:

$$Q_b = \frac{T}{\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3}} \quad (5)$$

$$Q_f = \frac{T}{\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_f} + \frac{h_3}{\lambda_3}} \quad (6)$$

T 为图4模型总厚度范围内的温度差。设其它因素造成上表面热流密度损失为 Q_{loss} ,则非缺陷区对应试样表面(热图背景区)残存的热流密度 Q_{rb} 近似为:

$$Q_{rb} = Q_{in} - Q_b - Q_{loss} \quad (7)$$

而缺陷区对应的试样表面(热图缺陷区)残存的热流密度 Q_{rf} 近似为:

$$Q_{rf} = Q_{in} - Q_f - Q_{loss} \quad (8)$$

由于缺陷的存在,使复合材料界面的连续性遭到破坏,该处界面的热传导性下降甚至丧失,使 $\lambda_f \ll \lambda_2$,即热阻显著增大,则根据式(5)和式(6), $Q_f < Q_b$;因此, $Q_{rf} > Q_{rb}$,即造成热堆积。由试样表面热流密度的分布,根据式(4)即可求得试样表面各点的温度值($z=0$ 处)。发生热堆积部分导致试样表面该区域温度升高,因此在热图上出现亮区域,亮度区域的尺寸和分布与缺陷的尺寸和分布相对应,因此得到

图3所示的热波图像。至于图3(b)热图背景区出现不均匀性(少数高温亮区域)现象,是由于该试样蒙皮较薄,表面温度场受蒙皮及界面胶层的不均匀性影响较大所致。

5 结论

(1) 采用有源红外热波无损检测方法检测铝蜂窝蒙皮结构或泡沫夹芯蒙皮结构复合材料的界面脱粘缺陷是可行的,检测效果清晰直观,缺陷评判准确可靠;检测速度快、效率高;检测结果可保存在计算机磁盘中,便于以后的分析处理。

(2) 引入多层平板热传导理论,通过抽象界面层的概念,建立了此类复合材料界面脱粘缺陷红外热波无损检测的理论数学模型,借助该模型可简单方便地分析检测热图。

参考文献

1 陈桂才. 三维编织碳/环氧复合材料的制备及体外吸湿行为的研究. 天津:天津大学硕士学位论文, 2002

2 王善元,张汝光. 纤维增强复合材料. 上海:中国纺织大学出版社, 1998: 92

3 王震鸣,杜善义,张恒等. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价第二册. 黑龙江:哈尔滨工业大学出版社, 1998: 120

4 王昌长,李福琪. 电气设备的在线监测与故障诊断. 北京:清华大学出版社, 1996: 5

5 曾令可. 红外热像仪技术无损检测机理仿真研究. 激光与红外, 1996; 26 (2): 4

6 Jones T, Berger H. Thermographic detection of impact damage in graphite-epoxy composites. Materials Evaluation, 1992; 50 (12): 1 446

7 Inagaki T, Ishii T, Iwamoto T. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography. NDT and E International, 1999; 32 (5): 247

8 赵文,王晓红,唐继国等. 化工原理. 山东:石油大学出版社, 2001: 73

(编辑 任涛)

(上接第49页)

单个导电粒子体积 V_0 为:

$$V_0 = \frac{D^3}{6} \quad (1)$$

其中 D 为导电粒子直径。

单位体积涂层中所含导电粒子数 n 为:

$$n = \frac{f}{V_0} \quad (2)$$

则颗粒间距: $d = \frac{1}{\sqrt[3]{n}} - D$ (3)

将式(1)、式(2)代入式(3),即得出导电粒子间距计算公式如下:

$$d = \left[\frac{D^3}{6f} \right]^{1/3} - D \quad (4)$$

由以上公式可见,导电粒子粒径越小,间隙宽度也越小,从而形成连续导电通路的可能性越大,涂层导电性越好。这从微观方面解释了为什么在导电填料体积分数相同时,镍粉涂层比二硼化锆涂层具有更好的导电性。

4 结论

在基体树脂确定的情况下,涂层表面电阻率的变化主要取决于导电填料的种类和用量。不同导电填料混入绝缘性聚合物中,涂层的表面电阻率随导

电填料体积分数的变化规律大致相同。总体来讲,随导电填料体积分数的增加,表面电阻率下降。但不同导电填料,使涂层体系表面电阻率减小的幅度不同,这与导电粒子大小及本身的导电性有关。

添加型防静电涂层导电通路的形成,是导电粒子直接接触和隧道效应综合作用的结果。对常规导电粒子,粒径越细小,所得涂层导电性越好。

参考文献

1 刘国杰主编. 现代涂料工艺新技术. 中国轻工业出版社, 2000: 265 ~ 285

2 中国标准化出版社第二编辑室. 涂料与颜料标准汇编. 中国标准化出版社, 1997: 671 ~ 673

3 章明秋,曾汉民. 导电高分子复合材料. 工程塑料应用, 1991; 19(2): 50

4 江家清. 高分子导电材料的新进展. 材料导报, 1992; 6(6): 54

5 Moffatt Dawne M, Runt James P, Arvind Halliyal. Metal oxide-polymer thermistors. J. of Mat. Sci., 1989; 24(2): 609

6 汤浩,陈欣方,罗云霞. 复合型导电高分子材料导电机理研究及电阻率计算. 高分子材料科学与工程, 1996; 12 (2): 1

(编辑 马晓艳)