

文章编号: 0258-7025(2009)06-1489-04

# 碳纤维基体涂层质量的红外热波检测研究

李艳红<sup>1</sup> 赵跃进<sup>1</sup> 冯立春<sup>2</sup> 张存林<sup>2</sup> 武 颂<sup>3</sup> 朱军辉<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学光电学院, 北京 100081; <sup>2</sup> 首都师范大学物理系, 北京 100048)  
<sup>3</sup> 航天材料及工艺研究所, 北京 100076

**摘要** 碳纤维材料上涂层的应用使得常规无损检测技术难以实现涂层的厚度测量和缺陷检测。提出红外热波无损检测技术对涂层厚度及内部缺陷进行检测。红外热波无损检测技术主动对被检测样件进行热激励,热波在均匀试样中传播,遇到界面后热传导发生变化,通过红外热像仪连续监测的降温曲线的变化找到热传导时间来测量涂层厚度。涂层下的缺陷热属性差异对表面温场产生热图异常,从而进行内部缺陷检测。实验结果表明,对涂层厚度在 0.35~2 mm 的碳纤维基底涂层样件可用红外热波无损技术进行涂层厚度和缺陷检测,涂层厚度检测精度为 0.1 mm。红外热波检测技术可以实现涂层厚度测量和涂层下缺陷的检测。

**关键词** 无损检测; 红外热波; 涂层; 厚度

中图分类号 TN219 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1489

## Quality Evaluation of Carbon Fiber Floor Coating with Infrared Thermal Wave Nondestructive Test

Li Yanhong<sup>1</sup> Zhao Yuejin<sup>1</sup> Feng Lichun<sup>2</sup> Zhang Cunlin<sup>2</sup> Wu Song<sup>3</sup> Zhu Junhui<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> School of Optoelectron, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)  
(<sup>3</sup> Spaceflight Material and Technology Research Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract** The traditional nondestructive technique can not realize the coatings quality evaluation on carbon fiber floors. Infrared thermal wave nondestructive technique was proposed to fulfill the coating thickness measurement and defects detection. The Infrared thermal wave nondestructive technique heats the sample actively, and uses an infrared camera to sequentially detect the surface temperature change. The thermal wave in the sample will change the conduction process once meeting the interface. Then the thickness can be measured based on the temperature break time. On the other hand, the thermal images captured by the focal plane infrared camera will display different depth information with interior defects. Coating thickness measurement samples were designed for each has three different thickness steps. The results show that in the range of 0.35~2 mm, the infrared thermal wave nondestructive measurement can realize the thickness measurement with error less than 0.1 mm and defects detection.

**Key words** nondestructive test; infrared thermal wave; coating; thickness

## 1 引 言

随着碳纤维复合材料越来越多地用于航空、航天等领域,对涂敷在其表面的涂层的质量评估也成了无损检测面临的新问题。现有的涂层厚度测量方

法有机械量具测量、显微镜测量等检测方法,还有超声、涡流等无损检测方法。涡流技术是一种成熟的镀层厚度测量技术,但无法检测涂层内部质量,并且只适用于导电材料,难以用于非金属材料表面的涂

收稿日期: 2008-11-10; 收到修改稿日期: 2008-12-30

基金项目: 国防“十一五”规划重点项目(Z032006A003)资助课题。

作者简介: 李艳红(1981—),女,博士研究生,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: lianhongg@126.com

导师简介: 赵跃进(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光电仪器、图像处理、微电子机械系统技术和太赫兹成像技术等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

层无损检测,虽然碳纤维材料具有一定的弱导电性,但导电性不均匀,无法建立平衡基准,因此还不适用于特种涂层涂覆质量的无损检测工作<sup>[1]</sup>。超声检测技术在单边厚度测量上是一种常规无损检测技术。但是,超声波方法为接触式测量方法,测量过程中需要在涂层上施加液体耦合剂,有可能对多孔性涂层表面产生污染,降低涂层使用性能和寿命<sup>[2]</sup>。红外热波无损检测技术不同于常规的红外检测技术,已在多个国家的航天航空等行业展开应用及研究<sup>[3~5]</sup>,其中美国 TWI 公司将其用于热障涂层的检测<sup>[6]</sup>,肯塔基州立大学对不锈钢基底保护涂层的热成像检测,直观有效地检测了薄涂层、涂层裂缝、抗腐蚀涂层上的涂层破裂等问题<sup>[7]</sup>。

本文采用红外热波无损检测技术对碳纤维基底涂层厚度及内部缺陷进行检测研究。

## 2 红外热波无损检测技术

红外热波无损检测系统装置由热激励系统、热像仪和计算机组成。热激励系统由两电容电源、闪光灯和防光泄露遮罩组成,脉冲闪光灯最大能量可达 9.6 kJ。脉冲触发形式有两种:计算机触发和人工触发。红外热像仪选用瑞典 ThermoCAM™ SC3000,制冷型量子阱红外光子探测器,探测波长为 8~9 μm,温度灵敏度为 0.02 °C<sup>[8]</sup>。

高能量可见光脉冲对检测物表面进行热激励,红外热像仪实时记录表面温场变化,被检测物表面下的不均匀性,包括缺陷或材料界面都将影响表面降温变化,由此,通过计算机得到的信号分析降温曲线过程的偏离就可判定导致异常的特征<sup>[9]</sup>。

涂层的厚度一般在 0.1~3 mm 之间,且与基底存在界面,因此红外热成像技术的检测结果可直观快速、大面积检测涂层的均匀性及内部缺陷,同时可进行定量测厚。

理论上,热传导在涂层基底的界面的偏离时间与到涂层厚度的平方成线性关系,且过原点。因此,知道了一个厚度点的偏离时间,就可得到比例系数,从而进行厚度测量,计算公式为<sup>[10]</sup>

$$t \propto d^2, \quad (1)$$

即

$$\frac{t_r}{t} = \frac{d_r^2}{d^2} \longrightarrow d = \sqrt{\frac{t}{t_r}} d_r, \quad (2)$$

式中  $t_r$ ,  $d_r$  为标定区域的曲线偏离时间和涂层厚度,  $t$ ,  $d$  为待测涂层区域的曲线偏离时间和涂层厚度。

## 3 碳纤维基底涂层试件

按照某类型部件的实际涂覆工艺将涂层涂敷在碳纤维复合材料上,制作了 5 块分别包括不同厚度台阶(每块试样包含 3 个厚度台阶)的对比厚度试件。由于产品涂覆过程是分时分阶段施工,涂层内树脂固化过程中会产生一定的微量气孔,进行厚度加工时会在表面显现出来。使用千分尺测量得到涂层厚度的标称值,厚度范围为 0.35~2 mm。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 单点标定测量

图 1 右上方所示为 3# 试件热图,试件分 3 个厚度,热图中灰度各不相同,厚度越薄,灰度越亮。对数温度时间变化曲线中给出三个厚度区域的对数温度变换曲线,其中作为参考的曲线是一组试件中涂层最厚的区域,从而得到各厚度区域与参考涂层的偏离时间。选取涂层厚度位于 0.35~2 mm 范围中间的 1 mm 厚的涂层为标定涂层厚度,其偏离时间为 0.58 s,代入(2)式得

$$\frac{0.580}{t} = \frac{1^2}{d^2}, \quad (3)$$

$$d = \sqrt{\frac{1^2}{0.580} t} = \sqrt{1.7241t},$$

得到厚度平方与时间的关系式,代入其他涂层区域的偏离时间计算出厚度,如表 1 所示。

表 1 涂层厚度测量值表

Table 1 Coating thickness measurement

Area	Nominal thickness $d$ /mm	Measurement value $d_t$ /mm	Error $ d_t - d $ /mm
1#	0.35	0.34	0.01
2#	0.4	0.38	0.02
3#	0.5	0.49	0.01
4#	0.75	0.64	0.11
2#	0.85	0.88	0.03
1#	0.9	0.88	0.02
5#	0.96	0.83	0.13
3#	1.0	1.05	0.05
4#	1.25	1.14	0.11
1#	1.4	1.39	0.01
2#	1.4	1.42	0.02
3#	1.5	1.41	0.09
5#	1.5	1.42	0.08
5#	1.9	2	0.01
4#	2	1.84	0.06

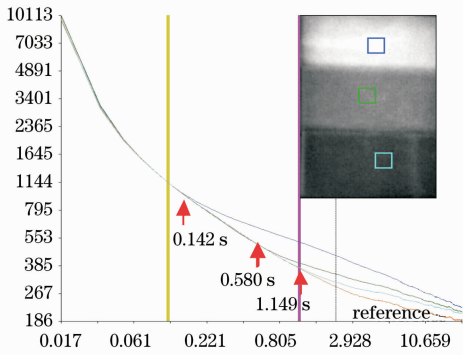


图 1 3# 厚度涂层的检测

Fig. 1 3# coating thickness detection

单点标定测量的结果,发现个别误差较大。同时多次实验发现,若被选取的标定点的误差较大,给实验结果带来较大的误差。

因此,采取多点为标定的厚度测量方法。

### 4.2 多点标定测量

选取一组涂层厚度和偏离时间建立厚度与时间的关系,从而减小单个读数计算引起的误差。选取多个涂层厚度标定时,多个涂层试件上出现的厚度仅选一次。由实验结果,根据厚度的平方与偏离时间的数据关系,得到厚度的平方与偏离时间的关系式为

$$d^2 = 1.9041 \times t + 0.0924, \quad (4)$$

利用标定曲线(4)式,再次测量各涂层厚度见表 2 所示。

表 2 第二次厚度测量值

Table 2 Second thickness measurement

Area	Nominal thickness	Measurement	Error
	$d / \text{mm}$	value $d_t / \text{mm}$	$ d_t - d  / \text{mm}$
1#	0.35	0.41	0.06
3#	0.5	0.51	0.01
4#	0.75	0.72	0.03
2#	0.85	0.88	0.03
1#	0.9	0.83	0.07
5#	0.96	0.91	0.05
3#	1.0	1.06	0.06
4#	1.25	1.17	0.08
1#	1.4	1.4	0.0
2#	1.4	1.46	0.06
3#	1.5	1.48	0.02
5#	1.5	1.53	0.03
5#	1.9	1.89	0.01

多组实验结果表明,精确标定对比试样上涂层厚度和准确制定“厚度标定曲线”后,涂层厚度测量的精度可以控制在 0.1 mm 之内。

### 4.3 内部缺陷检测

图 2 为试件在  $t=0.3 \text{ s}$  时的热图,从图中可以看出,较薄涂层下可见灰度较暗孔洞缺陷。其他显亮的点是涂层加工制造过程中带来的气孔,空气孔的热导能力较差,故在热图中显亮。随着时间增加,热在试件内三维扩散,气孔缺陷在热图中不再显现。

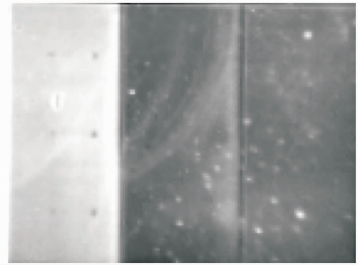


图 2  $t=0.3 \text{ s}$  时的热图

Fig. 2 Coating thermograph at 0.3 s

图 3 所示为 1# 试件在厚度为 0.9 mm 和 1.4 mm 的涂层下人工设计直径为 2 mm, 4 mm, 6 mm 的孔洞缺陷。厚度较薄的涂层下缺陷最先显现,厚度较厚的涂层下缺陷晚出现。从缺陷区域与其他区域的辐射亮度分布对照可以得到缺陷的尺寸,见图中所示直径为 6 mm 的孔洞上沿  $x$  轴线上的像素强度分布,曲线的波谷对应缺陷点,即缺陷位置强度较小,图像灰度较暗。

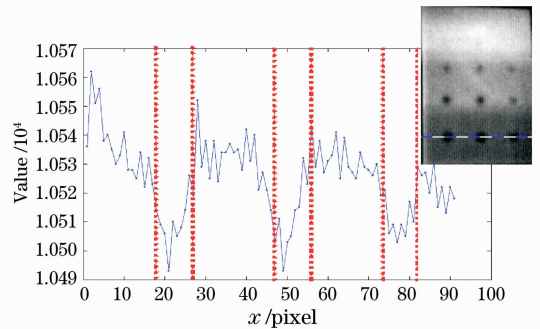


图 3 6 mm 孔洞上像素强度分布

Fig. 3 6 mm defects pixel value distribution

根据热图中某段长度与已知长度的对比,知道单个像素点所占空间大小,就可计算出缺陷尺寸。由于横向热扩散的影响,测量尺寸比实际尺寸偏大。三排缺陷红外测量直径平均值分别为 2.10 mm, 4.09 mm, 6.19 mm。

## 5 结 论

初步实验结果表明,红外热波无损检测技术可以定量涂层厚度测量和内部缺陷检测,从单个和多个试件进行标定的涂层测厚看出,多点标定的误差

较小,准确度高。

现在的航空航天领域很多部件是在非金属复合材料上实施涂敷层施工而成,红外热波无损检测技术作为一种新的涂层质量检测手段,具有其应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Li Changqing, Yaron Danon. Measurement of the thickness of nonferromagnetic metal sheets by eddy current testing [J]. *Nondestr. Test*, 2005, **27**(9): 454~456,471  
李长青, Yaron Danon. 非铁磁性金属薄层涡流测厚法[J]. 无损检测, 2005, **27**(9): 454~456,471
- 2 Zhu Ping, Cao Yongsheng. Ultrasonic NDE for coating property [J]. *J. Jiamusi University* (Natural Science Edition), 2005, **23**(4): 655~658  
朱 萍, 曹永胜. 涂层性能超声无损评价[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2005, **23**(4): 655~658
- 3 X. Maldague. Introduction to NDT by active infrared thermography[J]. *Materials, Evaluation*, 2002, **6**(9): 1060~1073
- 4 Xiaoyan Han, L. D. Favro, R. L. Thomas. Quantitative defect depth measurements for NDE of composites[C]. Proc. American Society for Composites, 1998. 1077~1081
- 5 Clemente Ibarra-Castanedo, Ermanno Grinzato, Sergio Marinetti *et al.*. Recent progresses in the inspection of aerospace components by infrared thermography [C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008
- 6 Steven M. Shepard, Yulin Hou, James R. Lhota *et al.*. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness [C]. *SPIE*, 2005, **5782**: 407~410
- 7 Mohammed Omar, Kozo Saito. IR Thermography for the nondestructive evaluation of the protective coating coverage on steel substrates [C]. Middle East Nondestructive Testing Conference, Manama, 2005
- 8 Li Yanhong, Zhang Cunlin, Jin Wanping *et al.*. IR thermal wave nondestructive inspection of carbon fiber composite material[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(4): 262~264  
李艳红, 张存林, 金万平等. 碳纤维复合材料的红外热波检测[J]. 激光与红外, 2005, **35**(4): 262~264
- 9 Steven Shepard, James Lhota, David Wang *et al.*. Depth and spatial resolution enhancement using thermographic signal reconstruction[C]. Proc. Far-East Conference on NDT, 2002, **10**: 279~284
- 10 Zhang Xiaochuan, Jin Wanping, Li Yanhong *et al.*. Measurement of thickness of glass fiber reinforced plastic flat bottom hole sample by infrared thermal NDT [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 16~18  
张小川, 金万平, 李艳红等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. 激光与红外, 2006, **36**(1): 16~18