

文章编号 1004-924X(2009)07-1502-05

半透明材料涂层的红外检测

李艳红¹, 赵跃进¹, 张存林²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100086; 2. 首都师范大学 物理系, 北京 100048)

摘要: 为了能快速、大面积检测不同基底材料上半透明材料涂层的厚度, 研究了主动式红外热成像技术测量涂层厚度的方法。用脉冲可见光热源激励涂层试件表面, 红外热像仪实时监控表面脉冲激励前后温度的变化。由于半透明的涂层材料吸收可见光能量不满足面吸收的条件, 对其表面进行了喷涂黑漆处理。比较喷漆前后的对数温度时间变化曲线和微分对数温度时间变化曲线, 并根据喷漆后的二阶微分曲线的峰值时间来测量涂层厚度。实验结果显示: 半透明涂层材料表面处理后满足红外测量要求, 厚度范围在 0.8~1.7 mm 的涂层, 测量精度达 0.09 mm, 表明红外检测方法可以非接触、快速、大面积、定量地进行半透明材料涂层厚度的测量。

关键词: 半透明涂层; 红外检测

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Infrared testing for translucent material coating

LI Yan-hong¹, ZHAO Yue-jin¹, ZHANG Cun-lin²

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100086, China;

2. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to measure the coating thicknesses on various substrate materials at a high speed and a large area, an active infrared thermographic technique was presented. A light pulse was used to heat to the surface of the coating and an infrared camera was utilized to capture the surface temperature change on real time. For a translucent coating, visible light could not be absorbed well on the surface, so a water-soluble black paint was painted on the surface of the coating. Compared with the differential $\ln T - \ln t$ curves without painting the coating, the thickness of the painted coating can be measured according to the peak time of second differential $\ln T - \ln t$ curves. Experiment results indicate that the translucent coating after painting satisfies infrared testing requirements, and the measurement precision is 0.09 mm for the thickness ranges of 0.8—1.7 mm. These data show that the infrared testing can be used in measurement of the coating thickness at high speeds, large areas, noncontact and quantification.

Key words: translucent coating; infrared testing

收稿日期: 2008-07-15; 修订日期: 2008-10-19.

基金项目: 国防科技工业技术基础“十一五”规划重点项目 (No. Z032006A003)

1 引言

涂层的厚度不但是表征涂层本身几何尺寸的一个参量,而且对涂层的性能及寿命均有很大的影响,因此成为涂层质量评价中至关重要的参数之一。目前常用的涂覆层无损测厚方法包括磁性测厚法、涡流测厚法和超声测厚法。磁性测厚法仅适用导磁性材料上的非导磁层厚度的测量;涡流测厚法仅适用导电金属上的非导电层厚度的测量,对于非导电材料基体不适用;超声测厚法需要耦合剂,是接触性测量,有可能对涂覆层表面造成损害^[1-2]。红外热波无损检测技术可单向、不接触地对涂层厚度进行测量,同时直观快速显示出内部缺陷,不受基底材料的影响。红外热波无损检测技术根据时序关系对涂层厚度的测量基于脉冲能量积累在表面后的一维热传导过程^[3-5],要求涂层与基底材料的热扩散率不同,涂层内部相对均匀;而可见光透明涂层对脉冲激励热量的透射作用不满足一维热传导模型。国外有文献报道,半透明涂层对可见光的透射性能随涂层厚度指数变化;通过检测被调制黑体源加热的涂层发现,涂层对中段红外热像仪完全透明,而长波段红外热像仪可以观察到涂层加热冷却的过程,建议用长波段红外热像仪进行检测^[6]。实验室采用红外热像仪工作波段为 $8\sim 9\ \mu\text{m}$,为长波段,初步检测效果不佳。因此,本文从热传导模型角度出发,针对半透明涂层进行表面处理,对处理前后的涂层进行红外检测,对比结果表明,表面处理后的半透明涂层,可采用红外热波无损检测技术进行厚度测量。

2 红外检测方法

热脉冲激励后的表面温度与加热前的温度差随时间的变化经对数的对数温度,再微分的一阶、二阶对数温度随时间的变化曲线如图1所示^[7]。

对于表面红外发射率高的材料,脉冲能量表面吸收形成表面热源,再在内部以热波形式传播,对应图中所示的对数温度变化曲线,开始温度随时间线性变化,直线斜率为 -0.5 ^[8];但对于半透明的材料,表面吸收的可见光能量少,红外辐射能量低,初始脉冲能量可能不会积累在试件表面而

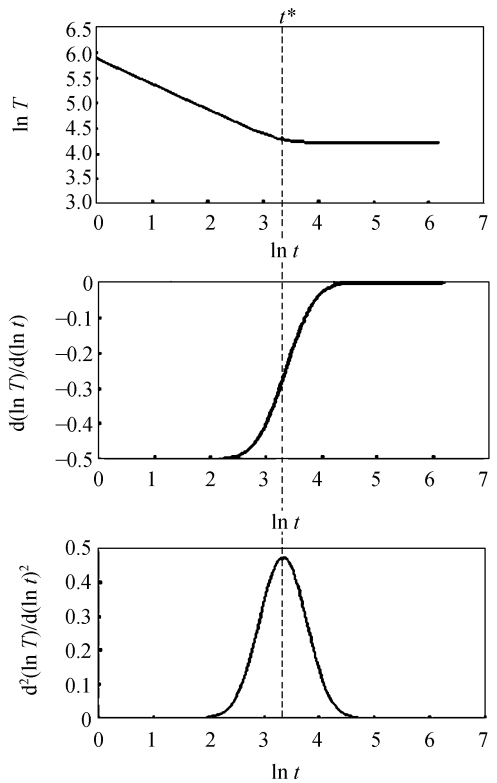


图1 对数降温曲线及微分曲线

Fig. 1 $\ln T - \ln t$ curves and differential curves

导致涂层热量的体吸收,不满足表面吸收脉冲能量的热传导模型的条件。

热传导至两种材料的交界面后,对数温度随时间的变化规律开始发生变化,如图1中 t^* 时间后的变化曲线。即时间 t^* 为热传导至某种材料底部的时间。对应微分对数温度曲线中,该时间为二阶微分对数温度曲线的拐点,二阶微分对数温度曲线的峰值点。而根据二阶微分对数温度曲线的峰值点能更灵敏地测量到时间 t^* 。相同厚度、不同材料的涂层对应的二阶微分曲线开始的峰值点可能为正峰值,也可能为负峰值;峰值点的时间会有差别。而相同材料,不同厚度的涂层其二阶对数变化规律一致,峰值点的时间先后与涂层薄厚对应,从而可进行涂层厚度测量。

3 实验

3.1 半透明涂层试件

应用红外热波无损检测技术对表面发射率低的材料,如抛光铝板,进行内部缺陷检测时,通常要进行表面处理。直接的处理方法有表面喷涂一

层黑色水溶性漆^[9]。对于涂层检测来讲,涂层的厚度一般在微米量级或毫米量级,涂层厚度本身比较薄,但喷涂的黑漆厚度仅几个微米,且能有效地增加表面可见光的吸收和提高表面的红外辐射。本文对涂层喷涂黑漆前后的测试数据做了比较。

半透明黄色涂层试件五块,其中一块涂层部分脱落,露出铝基底。先用千分尺测量基底厚度,再测量涂层加基底的厚度,减去基底的厚度得到涂层的厚度。经多次点测量,得到五块试件的涂层标称厚度分别为 0.8、1.1、1.4、1.7、1.66 mm。

3.2 喷漆前的涂层检测

首先设置实验条件,实验选用 FLIR 红外热像仪,热像仪波段为 8~9 μm;采集频率设为 60 Hz,采集时间设为 30 s。

图 2 是五个厚度涂层的对数温度曲线。曲线右上方是涂层表面在第 0.83 s 的热图,每个厚度的方框代表 23 pixel×23 pixel 大小的点,曲线即为该方框内像素点平均值的对数温度变化曲线。对数温度曲线的前端接近线性段的斜率为 -0.19,远远偏离 -0.5。从图 2 中知道,涂层厚度越厚,其温度越高。较薄厚度的涂层较早开始与其它厚度涂层偏离。

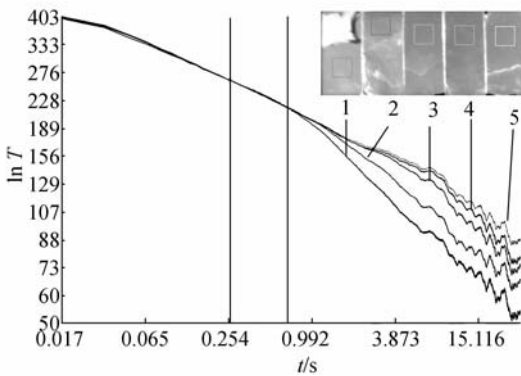


图 2 喷漆前的对数降温曲线

Fig. 2 $\ln T - \ln t$ curves before painting

一阶微分曲线如图 3 所示。

二阶微分曲线如图 4 所示。

从直接测量的结果可以看出,二阶微分变化曲线开始的峰值点并不能明显地判断出涂层的厚度,而且曲线的峰不尖锐,初步判定为涂层材料本身的半透明性引起的。

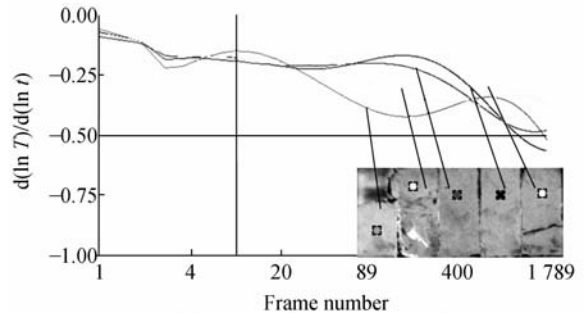


图 3 一阶微分对数降温曲线

Fig. 3 First order differential $\ln T - \ln t$ curves

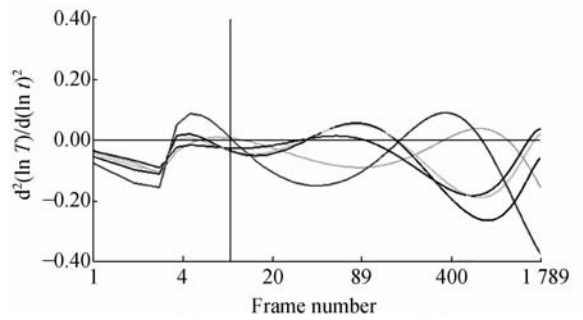


图 4 二阶微分对数降温曲线

Fig. 4 Second order differential $\ln T - \ln t$ curves

3.3 喷漆后的涂层检测

再次实验得到如下结果。图 5 为对数温度曲线。同样,选择每个厚度涂层上 23 pixel×23 pixel 大小点的平均。此时,曲线前端线性部分的斜率为 -0.52,而且,各个厚度涂层的曲线明显比未喷漆时的曲线光滑,噪声减小。

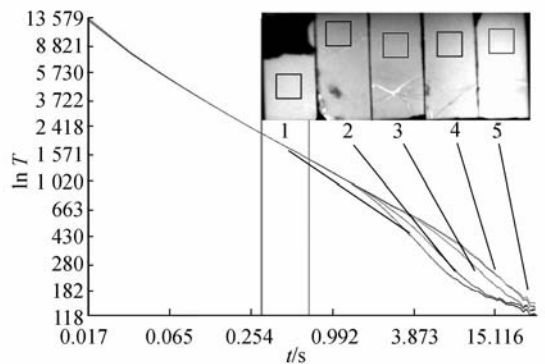


图 5 喷漆后的对数降温曲线

Fig. 5 $\ln T - \ln t$ curves after painting

同样,一阶微分曲线如图 6 所示。

二阶微分曲线如图 7 所示,曲线在第二帧出

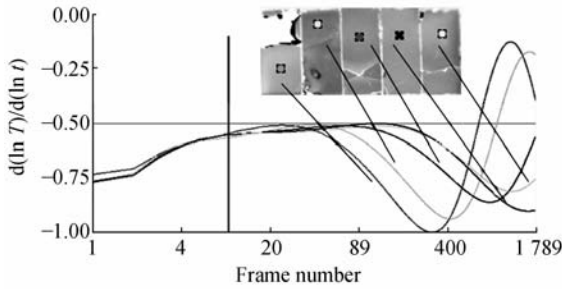


图 6 一阶微分对数降温曲线

Fig. 6 First order differential $\ln T - \ln t$ curves

现的小峰是由喷涂黑漆引起的, 曲线开始出现的峰值为负峰, 负峰值所在的时间分别为 2.85、3.817、6.983、11.533、11.233 s, 分别对应于一阶微分曲线的拐点。

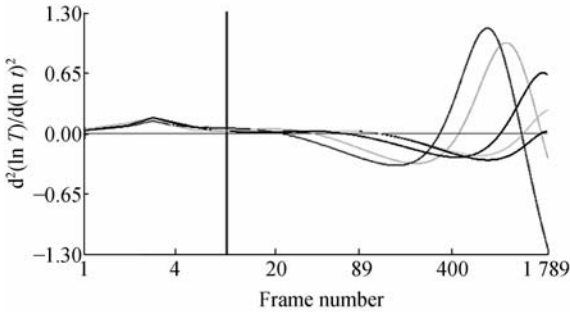


图 7 二阶微分对数降温曲线

Fig. 7 Second order differential $\ln T - \ln t$ curves

将涂层上每点的二阶微分对数温度曲线的负峰值点的时间进行伪彩色显示, 不同时间对应不同颜色, 如图 8 所示。从图中时间的先后可清楚看出对应涂层的厚度大小。



图 8 二阶微分曲线峰值时间分布图

Fig. 8 Peak time distribution

3.4 涂层厚度测量结果

根据时间与厚度平方成正比的关系^[10], 在未知涂层材料热扩散率的前提下, 选用其中涂层厚度最大的 1.7 mm 涂层作为标件, 由厚度和对应二阶微分曲线的峰值时间, 计算出比例系数, 再计算出其它涂层厚度。多次测量结果见表 1, 测量精度达 0.09 mm。

表 1 厚度测量结果

Tab. 1 Results of thickness measurement

No.	Thickness/mm			
1	0.85	0.98	1.32	1.68
2	0.67	0.80	1.17	1.5
3	0.77	0.92	1.27	1.55
4	0.91	1.06	1.33	1.58
5	0.79	0.96	1.35	1.58
6	0.81	0.99	1.29	1.52
7	0.82	1.00	1.32	1.63
8	0.84	1.01	1.37	1.66
9	0.81	1.09	1.35	1.55
10	0.77	0.92	1.38	1.60
均值	0.80	0.97	1.31	1.58

4 结 论

本文研究了用红外热波无损检测技术测量半透明涂层厚度的方法, 从一维热传导理论出发, 对厚度为 0.8~1.7 mm 内部均匀的半透明涂层进行表面处理, 使表面积累可见光的能量。利用对数温差的二阶微分曲线峰值的时间与涂层厚度的平方成比例的关系, 对半透明涂层表面处理前后进行对比, 结果表明, 对表面均匀喷黑漆后的涂层试件, 可从二阶微分曲线的峰值时间有效地进行涂层厚度的测量, 多次测量精度为 0.09 mm。给出了对数温差二阶微分对应峰值时间的伪彩色图像, 对涂层的厚度分布提供了直观的参考, 满足快速、大面积对涂层厚度检测的要求。

LI CH Q. Measurement of the thickness of non-ferromagnetic metal sheets by eddy current testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2005, 27 (9): 454-456, 471. (in Chinese)

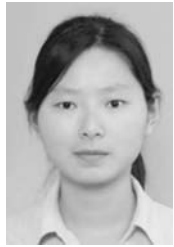
参考文献:

[1] 李长青. 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] 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.
- ZHU P, CAO Y SH. Ultrasonic nondestructive evaluation of coating performance [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2005, 23(4): 655-658. (in Chinese)
- [3] SHEPARD S M, AHMED T, RUBADEUX B A, *et al.*. Synthetic processing of pulsed thermographic data for inspection of turbine components [J]. *Insight*, 2001, 43(9): 587-589.
- [4] SHEPARD S M. Advances in pulsed thermography, Thermosense XX III [J]. *SPIE*, 2001, 4360: 511-515.
- [5] STEVEN S, JAMES L, DAVID W, *et al.*. Depth and spatial resolution enhancement using thermographic signal reconstruction [C]. *Proceedings of the 6th Far-East conference on NDT (FENDT'02)*, 2002: 279-284.
- [6] SHEPARD M S, HOU Y L, JAMES R L. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness [J]. *SPIE*, 2005, 5782: 407-410.
- [7] SHEPARD M S, HOU Y L, JAMES R L. Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(5): 051008.
- [8] SHEPARD S M, AHMED T, RUBADEUX B A, *et al.*. Synthetic process of pulsed thermographic data for inspection of turbine components [J]. *Insight*, 2001, 43(9): 587-589.
- [9] 李艳红, 金万平, 杨党纲, 等. 蜂窝结构的红外热波无损检测 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(4): 45-48.
- LI Y H, JIN W P, YANG D G, *et al.*. Thermal wave nondestructive testing of honeycomb structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 45-48. (in Chinese)
- [10] 李艳红, 赵跃进, 冯立春, 等. 基于脉冲位相的红外热波无损检测方法测量缺陷深度 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 55-58.
- LI Y H, ZHAO Y J, FENG L CH, *et al.*. Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 55-58. (in Chinese)

作者简介:



李艳红(1981—),女,湖北十堰人,博士研究生,2003年于首都师范大学获得理学硕士,主要研究方向为光电信息处理。E-mail: lianhongg@126.com



张存林(1962—),男,北京人,教授,博士生导师,1992年于北京理工大学获工学博士学位,研究方向为太赫兹及红外波谱与成像等。E-mail: cunlin_zhang@mail.cnu.edu.cn

导师简介:



赵跃进(1958—),男,河北涉县人,教授,博士生导师,1986和1990年分别于北京理工大学获工学硕士和工学博士学位,主要研究方向为数字电子稳像、THz成像技术、基于MEMS的红外成像技术、空间光学技术和智能光电仪器研制等。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn