

## 热障涂层厚度激光透射法红外热波检测技术研究

李永君,肖俊峰,朱立春,张 炯,高斯峰,唐文书,南 晴

(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

**摘 要:** 在传热学的基础上建立涂层试样的一维热传导模型,确立了涂层厚度与表面温度差值-帧数直线的斜率、截距以及涂层热扩散率之间的定量关系。以不同厚度的热障涂层试样为例,采用新型脉冲激光透射法激励,对热像仪采集到的不同激励功率下涂层表面温度差值-帧数曲线线性拟合,求得拟合直线的斜率和截距值,最后计算得到热障涂层厚度值,结果表明:激光透射法红外热波检测技术能很好地应用于热障涂层厚度的快速、精确、非接触检测。

**关键词:** 红外热波; 热障涂层; 厚度; 脉冲激光; 透射法

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0704003

## Research on detection of thickness of thermal barrier coating by laser transmission infrared thermal wave method

Li Yongjun, Xiao Junfeng, Zhu Lichun, Zhang Jiong, Gao Sifeng, Tang Wenshu, Nan Qing

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** On the basis of the heat transfer, a one-dimensional heat conduction model was proposed. The quantitative relationship among the thickness of coating, thermal diffusivity, the slope and intercept of the surface temperature difference-frames line was established. The thermal barrier coating specimens with different thickness were used. Transmission infrared thermal wave method excited by pulse laser was adopted and thermal imager was used to collect coating surface temperature-frames curve fitting. The slope and intercept of the temperature difference-frames line were obtained by linear fitting and the thickness of coating was calculated finally. The results show that it is fairly feasible to utilize laser transmission infrared thermal wave method in rapid, non-contact and accurate measurement of thermal barrier coating thickness.

**Key words:** infrared thermal wave; thermal barrier coating; thickness; pulse laser; transmission

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(51501151); 华能集团总部科技项目(HNKJ15-H05)

作者简介: 李永君(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光与红外检测技术方面的研究。Email: lee19870914@163.com

通讯作者: 肖俊峰(1974-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事汽轮机及燃气轮机相关技术方面的研究。Email: xiaojunfeng@tpri.com.cn

## 0 引言

热障涂层是目前最为先进的高温防护涂层之一,被广泛应用于燃气轮机热通道部件表面防护中。其中厚度是表征涂层质量的关键技术指标,它关系到涂层使用寿命、结合强度和制造成本等的评估和计算<sup>[1-2]</sup>。

目前,热障涂层厚度检测方法包括有损和无损两种,有损检测具有破坏性,且检测数据较片面<sup>[3]</sup>。无损检测主要有涡流法、超声波法和红外法等。涡流法原理为提高效应,受粘结层特性影响较大<sup>[4]</sup>;超声波法需提取频谱极值,干扰因素较多,检测误差较大<sup>[5]</sup>。另外,上述两种方法均不适合非接触快速检测。

红外热波技术对涂层厚度检测具有非接触、快速、观测面积大、准确率高等优势,非常适合外场在线检测<sup>[6-8]</sup>。涂层厚度红外热波检测一般采用反射法涂层侧热激励,但由于热障涂层陶瓷层具有半透明性,采用可见光或激光激励时热吸收效果较差,涂层表面需喷涂水溶性黑漆,漆层厚度带来检测误差,同时在役部件涂层存在漆污染风险<sup>[9-10]</sup>。另外涂层侧激励对于燃机过渡段、火焰筒等内腔涂层,存在尺寸限制,难以实施。基体侧闪光灯透射法激励热障涂层厚度检测可克服上述反射法缺点<sup>[11]</sup>,但当涂层基体合金为导热性差的高温合金且厚度较大时,闪光灯能量密度较低,能量穿透时间较长,闪光灯透射法激励难以实施。脉冲激光具有能量密度高、非接触、方向性强等优点<sup>[12-14]</sup>。文中利用新型高能量密度脉冲激光透射法激励,通过理论分析和实验验证相结合的方法,对高温合金基体上热障涂层厚度进行检测研究,探索其技术可行性。

## 1 实验设备及试样设计

检测系统装置如图 1 所示,采用脉冲激光激励,为半导体泵浦固体激光器,最大功率为 100 W,光斑直径 5 mm,脉冲宽度为 1 ms-5 s 可调,波长 1 064 nm;采用日本 NEC 公司 R300 型非制冷红外热像仪采集温度信息,响应波段为 8-14 μm,采集帧频为 8.5 Hz,热灵敏度为 50 mK;采用日本电子株式会社 JSM-6360 型扫描电子显微镜观察涂层厚度;涂层试样为双层热障涂层结构,均采用大气等离子喷涂制备,里

层粘结层成分为 Ni-22Cr-9Al-37Co-0.5Y,表层陶瓷层成分为 7-8 wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 稳定 ZrO<sub>2</sub>,基体合金为 K438 镍基等轴高温合金,厚度为 15 mm,如图 2 所示,试样 1、试样 2 和试样 3 的粘结层设计厚度相同,均为 150 μm,陶瓷层设计厚度相差较大,分别为 150、200、400 μm。

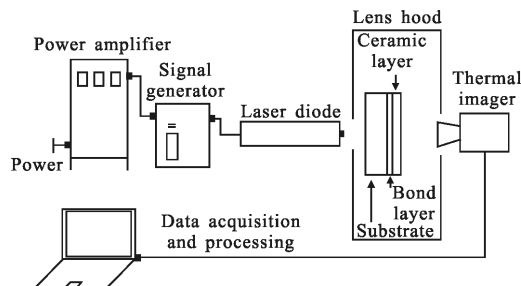


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental installation picture

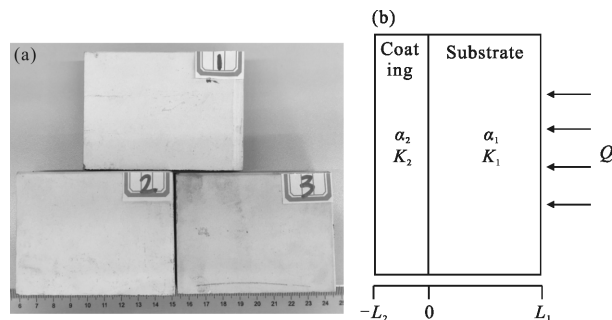


图 2 (a) 热障涂层试样 (b) 涂层结构传热示意图<sup>[11]</sup>

Fig.2 (a) Thermal barrier coating sample (b) Schematic diagram of heat transfer across the coating<sup>[11]</sup>

## 2 涂层厚度透射法检测传热分析

涂层材料传热是典型的平板共轭热扩散问题,热波从基体侧入射,如图 2 所示<sup>[11]</sup>。

利用下述方程式对该传热问题进行求解,求解过程不考虑试样辐射热损失。同时,由于 3 个试样粘结层厚度相近,且粘结层成分与基体合金成分相近,二者导热特性相差不大<sup>[15]</sup>,故假设粘结层和基体为一整体,只分析不同厚度陶瓷层的传热特性。

基体和涂层传热控制方程为公式(1)和(2):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial X^2}, 0 \leq X \leq L_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial X^2}, -L_2 \leq X \leq 0 \quad (2)$$

基体侧、涂层侧以及基体/涂层界面边界方程为公式(3)~(6):

$$\frac{\partial T_1(L_1, t)}{\partial X} = -\frac{Q}{K_1}, X=L_1, t>0 \quad (3)$$

$$K_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial X} = K_2 \frac{\partial T_2(0, t)}{\partial X} \quad (4)$$

$$T_1(0, t) = T_2(0, t) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_2(-L_2, t)}{\partial X} = 0, X=-L_2, t>0 \quad (6)$$

求解结果方程如公式(7)~(10)所示:

$$T_2(-L_2, t) = f(\alpha_1, \alpha_2, K_1, K_2, L_1, L_2, t) + C_2 L_2^2 - D_2 L_2 + E_2 t \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{Q\alpha_1}{2(K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2)} \quad (8)$$

$$D_2 = \frac{-L_2 Q \alpha_1}{(K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2)} \quad (9)$$

$$E_2 = \frac{Q\alpha_1 \alpha_2}{(K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2)} \quad (10)$$

式中:  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为基体和涂层材料的热扩散率;  $T_1$  和  $T_2$  分别为基体和涂层的温度;  $L_1$  和  $L_2$  分别为基体和涂层的厚度;  $t$  为时间;  $K_1$  和  $K_2$  分别为基体和涂层的热传导系数;  $Q$  为热激励能量;  $\lambda_n$  为特征值;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $E_1$  和  $E_2$  均为常数。

其中, 涂层表面温度  $T_2(-L_2, t)$  的表达式中  $f$  函数与加热功率无关, 因此, 采用两个不同功率下的  $T_2(-L_2, t)$  相减得:

$$\Delta T_2(-L_2, t) = \frac{(Q_1 - Q_2)\alpha_1 \alpha_2 t}{K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2} + \frac{(Q_1 - Q_2)\alpha_1 L_2^2}{2(K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2)} \quad (11)$$

其中:

$$\text{Slope} = \frac{(Q_1 - Q_2)\alpha_1 \alpha_2}{(K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2) * \text{frequency}} \quad (12)$$

$$\text{Intercept} = \frac{(Q_1 - Q_2)\alpha_1 L_2^2}{2(K_2 L_2 \alpha_1 + K_1 L_1 \alpha_2)} \quad (13)$$

$$\frac{\text{Slope}}{\text{Intercept}} = \frac{2\alpha_2}{L_2^2 * \text{frequency}} \quad (14)$$

由公式(14)推导得出, 两个不同功率下温度差直线的斜率和截距的比值只与涂层的厚度、热扩散率和采集频率有关。

### 3 实验检测结果分析

#### 3.1 涂层厚度红外热波检测结果

采用功率 50 W 和 90 W, 脉冲宽度均为 5 s 的激光分别对试样 1、试样 2 和试样 3 从基体侧进行照射, 利用热像仪采集涂层侧温度变化信息, 采集时间

为 8.5 s, 检测结果的部分热图如图 3~图 5 所示, 图中温度值为软件自动选取的区域最高温, 单位为  $^{\circ}\text{C}$ , 较亮的区域表示温度相对较高, 较暗的区域表示温度

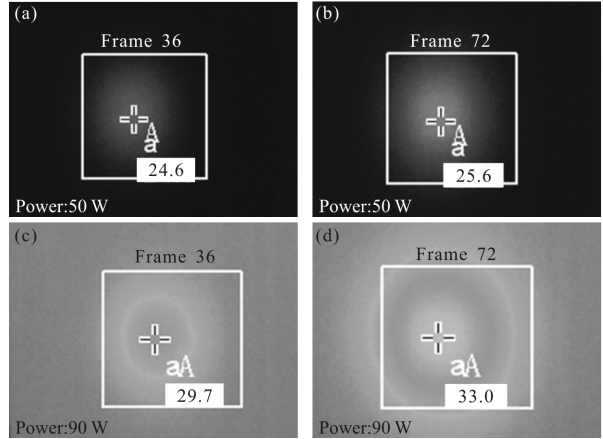


图 3 试样 1 热图序列

Fig.3 Thermal sequence images of sample 1

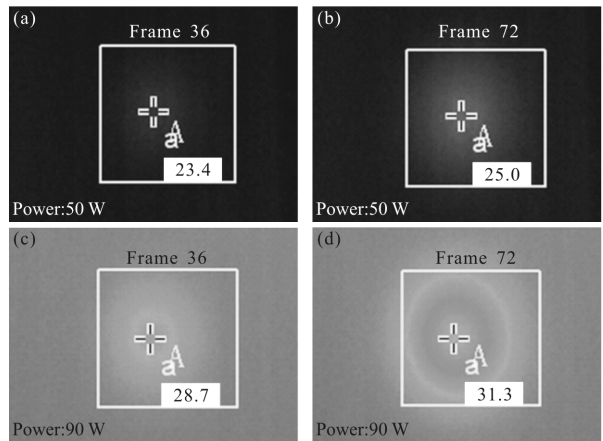


图 4 试样 2 热图序列

Fig.4 Thermal sequence images of sample 2

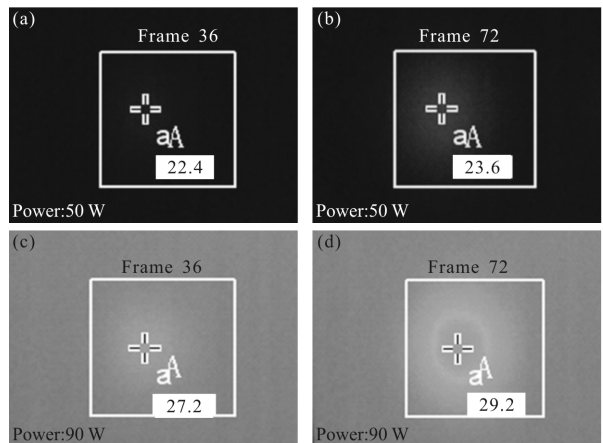


图 5 试样 3 热图序列

Fig.5 Thermal sequence images of sample 3

相对较低,试样 1、试样 2 和试样 3 的照射区最高温度随帧数变化曲线如图 6 所示。结果表明:随着帧数(即加热时间)增加,3 个试样表面温度均不断升高;同一试样,加热功率高的相同帧数时表面温度较高;同一加热功率,涂层薄的试样相同帧数时表面温度较高。

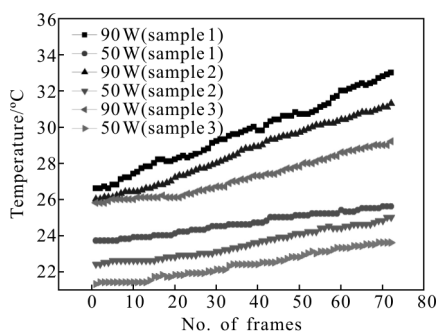


图 6 涂层试样温度-帧数曲线图

Fig.6 Temperature-frames curves on coating samples

### 3.2 涂层厚度扫描电镜检测结果

对 3 个试样激光照射区域纵向切割后制备扫描电镜试样进行厚度检测,如图 7 所示。由图 7 可知:3 个试样涂层厚度均较均匀, 粘结层/基体以及陶瓷

层/粘结层界面均结合良好。

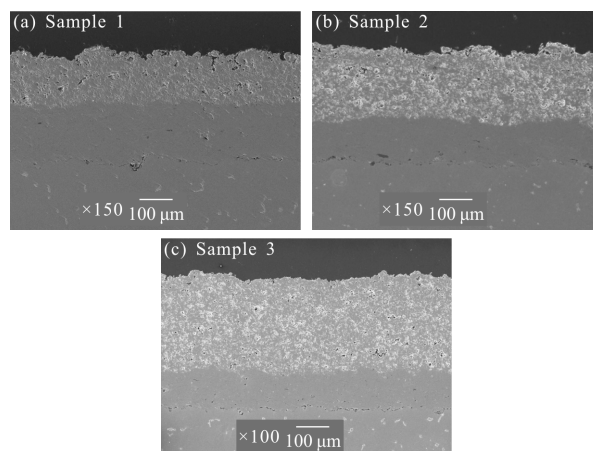


图 7 涂层扫描电镜图

Fig.7 SEM pictures of coating samples

对照射光斑直径 5 mm 区域内按顺序等距取 5 个位置进行涂层厚度测量,结果见表 1,试样 1、试样 2 和试样 3 陶瓷层厚度平均值分别为 163.55、208.91、441.10 μm,粘结层厚度平均值分别为 147.56、134.11、145.89 μm。3 个试样陶瓷层厚度相差较大,粘结层厚度接近,与实验设计相符。

表 1 涂层厚度扫描电镜测量值

Tab.1 Thickness measured by SEM on coating samples

Thickness/μm		Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Average value
Sample 1	Ceramic layer	162.62	166.98	150.78	171.34	166.04	163.55
	Bond layer	157.32	149.53	153.58	137.83	139.56	147.56
Sample 2	Ceramic layer	228.35	200.93	200.00	196.57	218.69	208.91
	Bond layer	127.45	146.14	137.41	128.69	130.87	134.11
Sample 3	Ceramic layer	435.34	428.74	449.02	451.85	440.53	441.10
	Bond layer	151.92	155.23	136.83	143.43	142.02	145.89

### 3.3 涂层厚度检测结果对比

图 8 为 3 个试样在加热功率分别为 90 和 50 W 的条件下温度差值随帧数增加的变化曲线,使用 Origin 8.0 软件进行数据点线性拟合,拟合方程式为  $Y=A+BX$ ,参数 A 为截距,B 为斜率,采用最小二乘法计算得到拟合直线的斜率和截距值,如表 2 所示,3 个试样拟合相关系数均大于 0.8,说明测量数据线性度较高。将陶瓷层热扩散率  $2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[11]</sup>代入公式(14),计算得到涂层厚度,如表 2 所示,结果表明:采用脉冲激光透射法激励红外热波检测试样 1、试样 2 和试样 3 涂层厚度相对误差均小于 10%,满足

工程应用需求<sup>[16]</sup>。

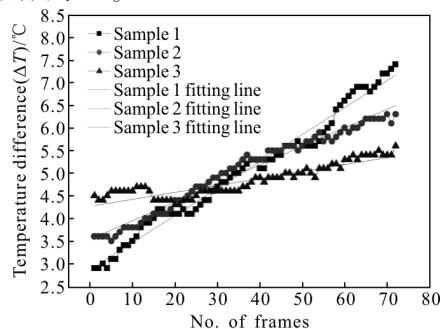


图 8 涂层试样不同加热功率下温度差值-帧数曲线

Fig.8 Temperature difference-frames curves of coating samples under different power values

表 2 涂层厚度测量值对比

Tab.2 Comparison of thickness measured on coating samples

Sample	Slope /°C	Intercept	Fitting index	Thickness measured by thermography / $\mu\text{m}$	Thickness measured by SEM / $\mu\text{m}$	Relative error
1	0.059	2.872	0.980 65	168.24	163.55	2.87%
2	0.041	3.538	0.973 05	225.30	208.91	7.85%
3	0.015	4.269	0.823 84	409.16	441.10	7.24%

#### 4 结 论

文中利用新型的脉冲激光透射法激励红外热波检测技术,通过理论分析和实验验证相结合的方法,对高温合金基体上热障涂层陶瓷层厚度进行检测,检测结果与实际厚度对比,相对误差小于 10%,满足工程应用需求。可见利用激光透射法激励红外热波检测热障涂层厚度技术可行,具有非接触、无需表面处理、设备轻巧便携、检测数据准确可靠等优点,适用于现场在役检测,具有巨大的应用价值和推广前景。

#### 参考文献:

[1] Lu Z, Myoung S W, Kim E H, et al. Microstructure evolution and thermal durability with coating thickness in APS thermal barrier coatings [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2014, 1(1): 35–43.

[2] Fang Xufei, Zhang Guobing, Feng Xue. Performance of TBCs system due to the different thickness of top ceramic layer [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(2): 2840–2846.

[3] Moskal G, Witala B, Rozmyslowska A. Metallographic preparation of the conventional and new TBC layers [J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2009, 39(1): 53–60.

[4] Li Yong, Chen Zhenmao, Mao Ying, et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique [J]. *NDT & E International*, 2012, 50(1): 29–35.

[5] Ma Zhiyuan, Zhao Yang, Luo Zhongbing, et al. Ultrasonic characterization of thermally grown oxide in thermal barrier coating by reflection coefficient amplitude spectrum [J].

*Ultrasonics*, 2014, 54(4): 1005–1009.

[6] Zhang Jinyu, Meng Xiangbing, Yang Zhengwei, et al. Numerical simulation and analysis of lock-in thermography for thickness measurement of coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 6–11. (in Chinese)

[7] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Quantitative identification of coating thickness and debonding defects of TBC by pulse technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2050–2056. (in Chinese)

[8] Hong Wenqing, Yao Libin, Ji Rongbin, et al. A super-frame processing method for infrared image based on accumulation of different integration time frame [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1490–1501. (in Chinese)

[9] Zhao Shibin, Wang Huaming, Wu Naiming, et al. Nondestructive testing of the fatigue properties of air plasma sprayed thermal barrier coatings by pulsed thermography [J]. *Thermal Methods*, 2015, 51(7): 445–456.

[10] Shepard Steven M, Hou Yulin, Lhota James R, et al. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness [C]//Proceedings of the SPIE, 2005, 5782(1): 407–410.

[11] Kumar M Mahesh, Vikrant K S, Swamy M, et al. Theoretical estimation of thickness variation in thermal barrier coatings by using pulse phase thermograph [C]//11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, 2012, 6(1): 11–14.

[12] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517–519. (in Chinese)

[13] Guo Xiantao, Huang Teng, Sheng Yueqian. Self-calibration of terrestrial laser scanner based on stochastic inner constraint information of estimated parameters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1319–1327. (in Chinese)

[14] Dong Lei, Liu Xinyue, Chen Hao. Properties of pulse single-frequency laser and extra-cavity double frequency green laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 800–806. (in Chinese)

[15] Grzgorz Ptaszek, Cawley Peter, Almond Darryl, et al. Artificial disbands for calibration of transient thermography inspection of thermal barrier coatings systems [J]. *NDT & E International*, 2012, 45(1): 71–78.

[16] Zhao Y, Ma Zhenyue, Lin Li, et al. A method for ultrasonic characterization of density, thickness and velocity of homogeneous coating [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 675(677): 1217–1220.