

# 激光作用下环氧/硅树脂复合涂层的 1.3 $\mu\text{m}$ 反射特性研究

吴丽雄<sup>1,2</sup> 叶锡生<sup>2</sup> 王立君<sup>2</sup> 吴耀军<sup>2,3</sup> 刘卫平<sup>2</sup> 刘泽金<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

<sup>2</sup> 西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

<sup>3</sup> 清华大学工程物理系, 北京 100084

**摘要** 利用共轭反射计装置,开展了真空环境中激光作用下环氧/硅树脂双层结构复合涂层的1.3  $\mu\text{m}$ 反射特性研究,测量得到了涂层反射率随样品背表面温度的变化曲线。通过有限元分析和界面热阻修正得到了反射率随涂层温度的变化关系,探讨了反射率随温度的变化机理。研究结果表明,红外连续激光损伤环氧/硅树脂复合涂层,主要表现为底漆热解引发的鼓包分层和面漆热解导致的烧蚀变色;常温下涂层对1.3  $\mu\text{m}$ 激光的反射率约为0.80,激光辐照初始时变化不明显,鼓包前后出现波动,测量区涂层鼓包、烧蚀后反射率显著下降,最终保持在一个相对较低值;反射率变化与涂层热解过程、损伤方式密切相关,涂层对1.3  $\mu\text{m}$ 激光的反射率变化存在3个特征温度,分别对应底漆热解、面漆热解和表面状态趋于稳定时的温度。

**关键词** 激光光学;反射率;共轭反射计;复合涂层;热解

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0814002

## Reflectance of Epoxy/Organsilicone Composite Coating at 1.3 $\mu\text{m}$ under Laser Irradiation

Wu Lixiong<sup>1,2</sup> Ye Xisheng<sup>2</sup> Wang Lijun<sup>2</sup> Wu Yaojun<sup>2,3</sup> Liu Weiping<sup>2</sup> Liu Zejin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

<sup>3</sup> Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Experimental research on 1.3  $\mu\text{m}$  reflectance of epoxy/organsilicone two-layer composite coating under infrared continuous-wave (CW) laser irradiation in vacuum is carried out. An experimental system for laser irradiation and reflectance measurement is set up with conjugated reflectometer. Results of signal detection theory (SDT) analysis indicate that heat deposition generated by laser makes pyrogenation of epoxy primer which leads to form and burst of bubbles and thermal ablation of topcoat. Heat transfer within coating-metal structure is simulated by finite element analysis procedure with interface thermal resistance modification, and the temperature-dependent reflectance is presented. Investigation results show that the change of reflectance is related to the modes of damage and processes of decomposition. 1.3  $\mu\text{m}$  reflectance of epoxy/organsilicone coating is about 0.80 at room temperature, changes slightly at the very beginning of laser irradiation, decreases remarkably while bubbles burst and thermal ablation occurs, and finally maintains a rather low level. There are three characteristic temperatures of reflectance evolution, the decomposition temperature of epoxy primer, the decomposition temperature of organsilicone topcoat, and the decomposition temperature when the reaction ends and the surface tends to be steady.

**Key words** laser optics; reflectance; conjugated reflectometer; composite coating; pyrogenation

**OCIS codes** 140.3325; 140.3330; 140.6810; 160.4890; 350.3450

**收稿日期**: 2010-12-07; **收到修改稿日期**: 2011-03-23

**基金项目**: 国防预研基金(51311020301)和激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKL1002)资助课题。

**作者简介**: 吴丽雄(1980—),女,助理研究员,博士研究生,主要从事激光辐照效应方面的研究。

E-mail: wlx97zju@163.com

**导师简介**: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zevinliu@vip.sina.com

## 1 引言

激光照射到材料表面后,将发生反射、透射和吸收,被吸收的能量与入射能量的比值通常被定义为能量耦合系数。能量耦合系数反映了材料对激光的吸收特性,是开展激光辐照效应机理研究和数值计算的基本物理量。对于不透明材料,可通过反射率测量间接获得能量耦合系数。因此,在激光与物质相互作用研究中,材料反射特性及相关测试方法研究一直备受关注。

国内外有很多关于利用积分球法测量材料反射率的研究报道<sup>[1~6]</sup>。国外有一些关于采用共轭法研究材料反射特性的文献<sup>[7~11]</sup>,但国内还未见到这方面的公开报道。到目前为止,国内外对材料反射特性的研究较多集中在金属材料方面<sup>[2~5,9,12,13]</sup>,而对复合材料、涂层材料反射特性的研究则相对较少<sup>[6,8~11,14,15]</sup>。

反射率除了与材料的基本物质结构有关外,还与材料的温度、表面状态等有关。研究反射率随温度的变化特性,需要加热样品使其处于不同的温度状态;较高功率密度的激光辐照还可能导致材料熔化、烧蚀,进而对测量系统造成污染。椭球法利用椭球/半椭球曲面共轭特性测量材料反射率,测量时内

壁与样品分开,适合于对样品进行常规加热和激光加热;同时,探测光在内壁只经过单次镜面反射,更适合用于烧蚀过程中材料反射率的在线测量。

环氧/硅树脂复合涂层是一种性能比较优异的热控涂层,研究其反射特性对其应用有重要意义。本文利用基于椭球法建立的共轭反射计装置<sup>[16]</sup>,研究了真空环境下红外连续激光作用过程中环氧/硅树脂复合涂层的  $1.3\ \mu\text{m}$  反射特性。利用有限元分析方法计算了样品的温度分布,得到了反射率随涂层温度的变化关系,并结合热分析结果分析了反射率变化的原因。

## 2 实验方法

样品由  $40\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$  的 LY-12 硬铝喷涂底漆/面漆双层结构的复合涂层制成。底漆采用环氧涂料,厚约  $100\ \mu\text{m}$ ;面漆以有机硅树脂为粘结剂、氧化锌为颜料,厚度  $170\ \mu\text{m}$  左右。实验光路如图 1 所示,实验真空度在  $10^{-3}\ \text{Pa}$  量级。考虑到常温状态下涂层对  $1.3\ \mu\text{m}$  激光的吸收率较低,利用中红外(MIR)激光对样品进行同步辅助加热,样品在该波段具有较高的吸收率且反射率随温度变化不明显。

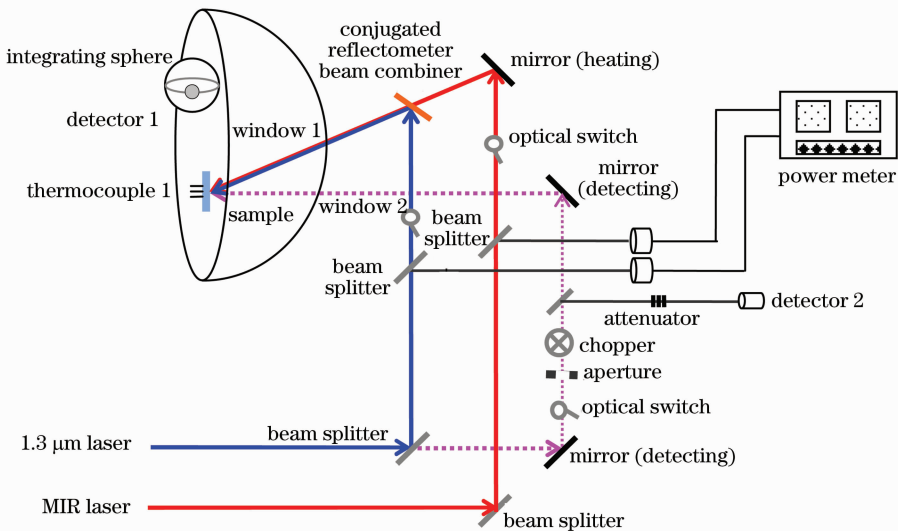


图 1 反射率测量实验光路示意图

Fig. 1 Experimental setup for reflectance measurement in vacuum

光路中采用的共轭反射计,其主体是一个内壁具有较高镜面反射率的半椭球壳体。实验时,将待测样品和探测组件分别放在半椭球的两个焦点上。波长  $1.3\ \mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光经分束镜分为两束,一束用于加热样品,一束作为探测光。 $1.3\ \mu\text{m}$  加热光和中红外激光经过合束后从光窗 1

入射辐照到样品表面,探测光以约  $15^\circ$  的入射角从光窗 2 照射至样品。实验过程中,利用调制盘对探测光进行调制,以区分同种波长的探测光和加热光。靶面加热光功率采用功率计监测,入射探测光和样品反射光的强度则采用相同型号的快响应红外探测器测量。

当入射激光功率波动较小时,可认为光路分束比不变,待测样品反射率  $\rho_s$  的计算式为

$$\rho_s = \rho_r \frac{\phi_{d,s} \phi_{m,r}}{\phi_{m,s} \phi_{d,r}}, \quad (1)$$

式中  $\rho_r$  为标准板反射率,  $\phi_{d,r}$  和  $\phi_{m,r}$  分别为对标准板测量时探测器 1 和 2 测量的光通量,  $\phi_{d,s}$  和  $\phi_{m,s}$  为对待测样品进行测量时探测器 1 和 2 测量的光通量。

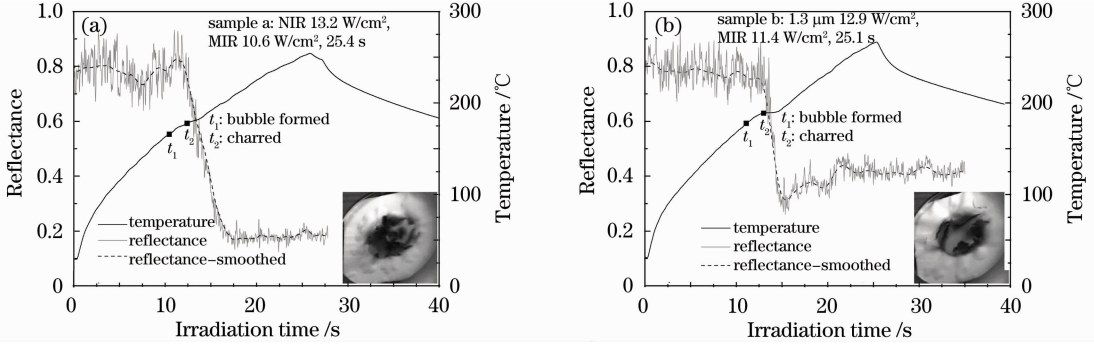


图 2  $1.3 \mu\text{m}$  激光反射率和背表面中心点温度测量结果。(a) 样品 a; (b) 样品 b

Fig. 2  $1.3 \mu\text{m}$  reflectance and temperature of center of the rear surface. (a) Sample a; (b) sample b

根据 CCD 的图像记录,真空环境中激光损伤环氧/硅树脂复合涂层,宏观上依次表现为涂层鼓包、分层和烧蚀,烧蚀产物呈灰色至黑色。样品 a 在发生较大面积鼓包后,出现了涂层破裂和烧蚀。样品 b 则是在形成较大面积鼓包前出现涂层破裂,并且在烧蚀过程中伴随着剧烈喷溅、部分底漆暴露,其损伤程度较样品 a 严重。

分析实验现象和反射率测量结果,认为激光作用过程中涂层的  $1.3 \mu\text{m}$  反射率变化可大致分为 4 个阶段:1) 常温下反射率约为 0.80,激光刚辐照时反射率变化不明显;2) 鼓包前后反射率出现波动,这主要与涂层内部有机物热解产生气体有关,激光在界面处多次反射可能导致吸收增强、反射率减小;3) 探测区域涂层鼓包、烧蚀后,反射率显著下降,说明了烧蚀产物反射率较低;4) 发生大面积烧蚀后,样品 a 表面状态趋于稳定,反射率保持在 0.18 左右;样品 b 反射率最低降至约 0.30,随着烧蚀物的喷溅脱

### 3 反射率测量结果和分析

实验测量采用对  $1.3 \mu\text{m}$  激光反射率为 0.982 的标准白板作为参考。图 2 给出了两组典型的反射率和样品背表面中心点温度随激光辐照时间变化的测量结果。图 2 中标记了观察到涂层鼓包、烧蚀现象的起始时刻,给出了两束加热光的平均功率密度和辐照时间以及激光停止作用时 CCD 拍摄的样品照片。

落,反射率出现回升并最终保持在 0.40 左右。

上述结果表明,涂层反射率变化与其损伤方式有关,辐照过程中伴随着剧烈喷溅、烧蚀产物脱落时反射率最终值高于烧蚀产物残留在涂层表面时的,也就是说,底漆热解反应产物的反射率比面漆烧蚀产物的高。

### 4 反射率变化物理过程的模拟分析

把样品分成面漆、底漆和金属基底 3 层,并将各层视为均匀介质,建立双层涂层-金属结构的激光辐照模型。假设初始时刻  $t=0$  时,试样温度等于环境温度  $T_0$ ,加热激光沿  $z$  方向垂直辐照于涂层表面,不考虑涂层热解,温度分布采用热传导方程描述为

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T_i), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

边界条件为

$$\begin{cases} -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \sum_{\lambda} (1 - R_{\lambda}) I_{\lambda}(x, y; t) - q_1, & (z = 0) \\ -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\frac{1}{R_{C1,2}(t)} (T_2 - T_1) = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, & (z = l_1) \\ -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\frac{1}{R_{C2,3}(t)} (T_3 - T_2) = k_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, & (z = l_2) \\ -k_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = -q_3. & (z = l_3) \end{cases} \quad (3)$$

(2)式和(3)式中,下标  $i = 1, 2, 3$  分别表示面漆、底漆和基底,  $z = 0$  表示样品前表面,  $z = l_i$  表示各层背表面;  $\rho_i$  表示材料密度,  $c_{pi}$  为材料热容,  $k_i$  为材料热导率;  $R_{C1,2}, R_{C2,3}$  为界面热阻;  $R_\lambda$  为涂层对激光的反射率,  $I_\lambda$  为加载激光的光强分布,  $q_i = \epsilon_i \sigma (T_i^4 - T_0^4)$

表示表面辐射热流,  $\epsilon_i$  为表面发射率,  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数; 物理量全部采用国际标准单位。

发生热分解时,若不考虑涂层内部热解气体累积及热化学膨胀,底漆、面漆的温度分布可用含热分解过程的热传输方程描述<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - c_{pg} \dot{m}_g \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial \rho}{\partial t} (Q_d + h_c - h_g) \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = -A \rho_0 \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \\ \frac{\partial \dot{m}_g}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\rho$  为涂层密度,  $Q_d$  为分解热,  $\dot{m}_g$  表示热解气体质量通量,  $h_c$  和  $h_g$  分别为涂层和热解气体的焓;  $\rho_0$  和  $\rho_i$  分别为涂层的初始密度和不可分解物的密度,  $A$  为频率因子,  $n$  为反应级数,  $E_a$  为反应活化能,  $R$  为气体常数。

#### 4.1 涂层材料参数

涂层发射率取常温状态测量值 0.87, 面漆、底漆的密度和热导率采用文献数据<sup>[18,19]</sup> 根据复合材料混合定则计算得到:  $\rho_1 = 2.1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho_2 = 1.3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $k_{1,x} = k_{1,y} = 0.19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_{1,z} = 0.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_2 = 0.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。基底材料有关参数来源于软件数据库, 涂层反射率

$R_\lambda$  采用实测结果。

底漆、面漆的热分解温度、分解热以及热容等参数通过热分析获取。采用美国 TA 公司的 SDT Q600 型同步热分析仪, 在流速 100 ml/min 的  $N_2$  气氛下对底漆和面漆进行测试, 测试温度范围从室温到 1100  $^\circ\text{C}$ , 温升速率有 3 种, 分别为 10, 20 和 30  $^\circ\text{C}/\text{min}$ 。图 3 为升温速率 20  $^\circ\text{C}/\text{min}$  时面漆和底漆的差热-热重-微分热重 (DSC-TG-DTG) 曲线。通过热分析得到面漆、底漆的热分解温度和分解热, 如表 1 所示。表中  $T_i$  和  $T_p$  分别表示分解反应的起始温度和峰值温度, 分解热  $Q_d$  为正表示放热过程。

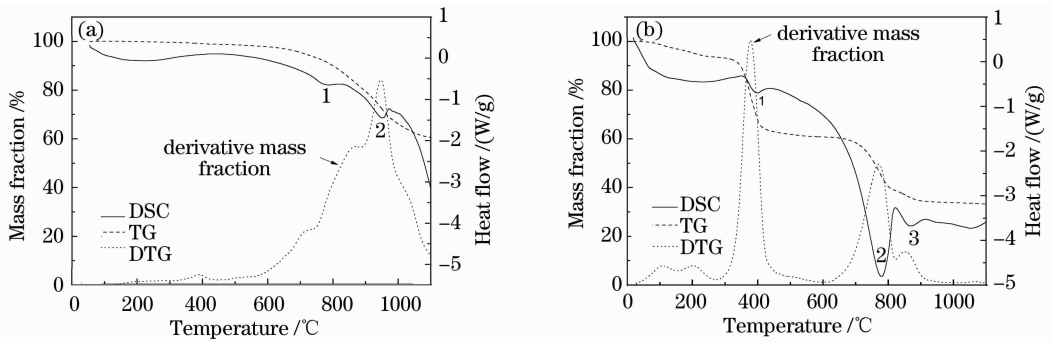


图 3 DSC-TG-DTG 曲线。(a)有机硅树脂面漆; (b)环氧底漆

Fig. 3 DSC-TG-DTG curves under  $N_2$  atmosphere. (a) Organosilicone topcoat; (b) epoxy primer

表 1 热分解温度和分解热

Table 1 Thermal decomposition temperature and heat of decomposition

Sample	Process 1			Process 2			Process 3		
	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$Q_d/(\text{J/g})$	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$Q_d/(\text{J/g})$	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$Q_d/(\text{J/g})$
Organosilicone topcoat	722	773	30.0	892	947	46.8	—	—	—
Epoxy primer	365	394	29.8	695	775	456.4	827	864	42.9

由表 1 可知,面漆在扫描温区主要有 2 个热分解反应过程,反应的起始温度分别为 722  $^\circ\text{C}$  和 892  $^\circ\text{C}$ ; 底漆则出现了 3 个热解过程,起始温度分别为

365  $^\circ\text{C}$ , 695  $^\circ\text{C}$  和 827  $^\circ\text{C}$ 。底漆的前 2 个热解过程的起始温度低于面漆的第 1 个热解过程,第 3 个热解过程的起始温度也低于面漆的第 2 个热解过程。

#### 4.2 反射率随涂层温度变化

利用有限元分析方法计算激光辐照过程中样品的温度场分布。计算时不考虑热解、烧蚀引起的质量损失,靶面激光光斑采用高斯分布:

$$I(x, y) = I_0 \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right), \quad (5)$$

式中  $I_0$  为峰值功率密度,  $r_0$  为光斑半径。

图 4 给出了样品 a 各层表面中心点温升的计算结果和背表面中心点温升的测量结果,在图中对底漆热解峰值温度、面漆热解起始温度以及观察到涂层鼓包、烧蚀的时刻进行了标记,计算时采用的界面热阻修正范围是  $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。图 5 为通过反演得到的反射率随前表面温度变化结果。

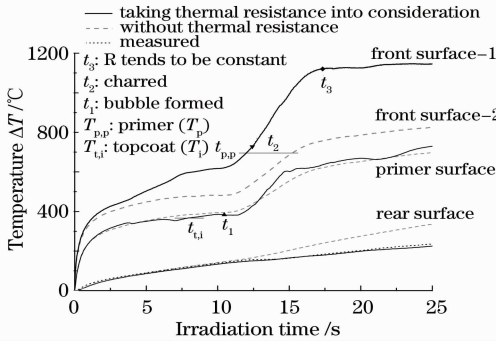


图 4 各层表面中心温升计算与背表面中心温度实测结果  
Fig. 4 Calculated temperature rise for center of each layer surface and the measured temperature of rear surface's center

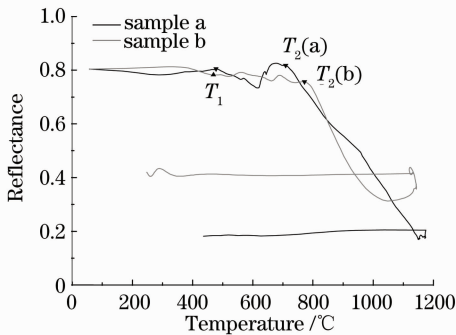


图 5 反射率随前表面温度变化结果

Fig. 5 Temperature-dependent reflectance

根据图 4 的计算结果,底漆将先于面漆发生热分解,热解产生的气体可能会导致涂层鼓包,造成漆层分离、层间界面热阻改变。从背表面温升曲线可以看出,底漆热解前,计算结果与测量结果吻合得较好,若不考虑界面热阻,后续计算结果将明显偏离测量值。由修正后的温升曲线可知,激光辐照前 2 s 内前表面温升率达  $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ ,之后温升变得相对平

缓;涂层鼓包分层后,面漆与底漆之间传热减少,前表面温升率显著提高。实验观察到的涂层鼓包时间  $t_1$  约为 10.45 s,比计算得到的底漆达到热解峰值温度的时间滞后约 2.50 s;引入界面热阻修正后,烧蚀时刻涂层表面温度与面漆热解起始温度比较接近,这表明计算结果与实际情况相符。

从图 5 可知,温度低于  $T_1 \approx 470 \text{ }^\circ\text{C}$  时,底漆尚未开始热解,涂层对  $1.3 \text{ } \mu\text{m}$  激光反射率的变化不显著;温度介于  $T_1$  与  $T_2$  之间时,反射率出现较大的起伏,这主要与底漆热解有关,样品 a, b 的第二特征温度分别为  $T_2(a) \approx 710 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $T_2(b) \approx 770 \text{ }^\circ\text{C}$ ;温度超过  $T_2$  后,由于涂层鼓包、面漆热解和烧蚀,反射率显著下降;温度超过  $T_3$  后,材料组成和表面状态相对稳定,反射率趋于某个较低值;辐照过程中伴有剧烈喷溅现象的样品 b,其反射率在  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  附近出现反弹,这主要与烧蚀物脱落、暴露出底漆热解产物有关。从降温段曲线可以看出,反应产物对  $1.3 \text{ } \mu\text{m}$  激光的反射率对温度变化不敏感。

## 5 结 论

真空环境下红外连续激光辐照环氧/硅树脂复合涂层以热效应为主,损伤主要表现为底漆热解引发的鼓包分层和面漆热解导致的烧蚀变色。常温下涂层对  $1.3 \text{ } \mu\text{m}$  激光的反射率约为 0.80,激光刚开始辐照时反射率变化不明显,涂层鼓包前后反射率波动较大,测量区域涂层鼓包、烧蚀后反射率显著下降,最终保持在一个较低值。反射率变化与热解过程及损伤方式密切相关,反应产物对  $1.3 \text{ } \mu\text{m}$  激光的反射率对温度变化不敏感,底漆热解产物的反射率高于面漆烧蚀产物。涂层对  $1.3 \text{ } \mu\text{m}$  激光的反射率变化存在 3 个特征温度,即底漆开始热解时的面漆温度  $T_1 \approx 470 \text{ }^\circ\text{C}$ 、面漆热解温度  $T_2(a) \approx 710 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $T_2(b) \approx 770 \text{ }^\circ\text{C}$ 、表面状态趋于稳定时的前表面温度  $T_3$ 。

获取反射率随涂层温度的变化规律,对分析涂层的激光能量耦合物理机制具有重要意义。通过计算样品的温度分布可以反演获得反射率随涂层温度的变化关系,但此法对背表面温度测量、物理模型和材料参数等的准确性提出了较高要求。双层结构复合涂层的激光烧蚀过程极为复杂,损伤与样品均匀性、靶面光斑强度分布有关,鼓包过程涉及到热化学和气动力学,烧蚀过程还伴有质量损失等现象。所以,还有必要通过更深层的机理研究进一步完善涂层金属结构激光辐照模型。

## 参 考 文 献

- 1 D. Bergstrom, A. Kaplan, J. Powell *et al.*. Laser absorptance measurements in opaque solids [C]. Proc. of 10th Nordic Laser Materials Processing Conference, 2005, 91~115
- 2 D. Bergstrom, J. Powell, A. Kaplan. The absorptance of steels to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(11): 5017~5028
- 3 D. Bergstrom, J. Powell, A. Kaplan. The absorptance of non-ferrous alloys to Nd:YAG and Nd:YLF laser light at room temperature [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **48**(8): 1290~1301
- 4 Jiao Luguang, Zhao Guomin. Temperature dependence of reflectivity of 45# steel at the wavelength of 1.319  $\mu\text{m}$  [J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(6): 983~987  
焦路光, 赵国民. 1.319  $\mu\text{m}$ 处45#钢反射率随温度变化的实验研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(6): 983~987
- 5 Zhang Yongqiang, Wang Guibing. Point measurement of absorptivity of 30CrMnSiA steel at different temperature in atmosphere [J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(4): 517~519  
张永强, 王贵兵. 大气环境中不同温度30CrMnSiA钢吸收率的点测量[J]. *激光技术*, 2010, **34**(4): 517~519
- 6 Zhang Yongqiang, Wang Guibing, Tang Xiaosong *et al.*. Ablation threshold measurement and absorption characteristic analysis of two fiber reinforced composites irradiated by CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 199~202  
张永强, 王贵兵, 唐小松等. 两种纤维增强复合材料连续激光烧蚀阈值测量及吸收特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 199~202
- 7 John T. Neu. Measurement of hemispherical directional reflectance in the infrared [C]. *SPIE*, 1993, **1995**: 101~120
- 8 R. K. Freeman, F. A. Rigby, S. E. Doerr *et al.*. Reflectance of laser damaged spacecraft thermal control materials [C]. *SPIE*, 1998, **3343**: 983~994
- 9 R. K. Freeman, F. A. Rigby. Temperature-dependent reflectance of plated metals and composite materials under laser irradiation [J]. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, **14**(3): 305~312
- 10 L. S. Andrew, F. S. Donald, E. C. Russel *et al.*. Temperature effects on reflectance and emittance measurements of martin black and enhanced martin blacks surfaces [C]. *SPIE*, 1996, **2864**: 387~405
- 11 Z. Zhang, M. F. Modest. Temperature-dependent absorptance of ceramics for Nd:YAG and CO<sub>2</sub> laser processing applications [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 1998, **120**(2): 322~327
- 12 Huang Yanlu, Yang Fuhua, Liang Gongying *et al.*. Using in-situ technique to determine laser absorptivity of Al-alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 449~453  
黄延禄, 杨福华, 梁工英等. 用原位法测定铝合金对激光的吸收率[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 449~453
- 13 Cui Chunyang, Wu Wei, Yu Gang *et al.*. On laser absorptivity of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 977~980  
崔春阳, 吴伟, 虞钢等. 球墨铸铁材料对激光的吸收率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 977~980
- 14 Wu Lixiong, Ye Xisheng, Liu Zejin. Investigation of infrared CW laser damage mechanism on polyurethane-based black paint [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302002  
吴丽雄, 叶锡生, 刘泽金. 聚氨酯黑漆的红外激光损伤机理研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302002
- 15 Zou Jieshu, Zhu Qunzhi, Li Yongguang *et al.*. Experimental study of the reflectance for architectural energy saving coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 480~484  
邹捷书, 朱群志, 李永光等. 一种建筑节能涂料反射特性的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 480~484
- 16 Wu Lixiong, Wang Lijun, Lin Xinwei *et al.*. Design and analysis of conjugated reflectometer for reflectance measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(12): 2521~2529  
吴丽雄, 王立君, 林新伟等. 用于材料反射率测量的共轭反射计设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(12): 2521~2529
- 17 J. B. Henderson, J. A. Wiebelt, M. R. Tant. A model for the thermal response of polymer composite materials with experimental verification [J]. *J. Composite Materials*, 1985, **19**(6): 579~595
- 18 Min Guirong, Guo Shun. *Spacecraft Thermal Control* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 95~96, 476~516  
闵桂荣, 郭舜. *航天器热控制*[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 95~96, 476~516
- 19 Yao Yunbin, Xie Tao, Gao Yingmin. *Handbook of Physical Chemistry* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985. 716~718  
姚允斌, 解涛, 高英敏. *物理化学手册*[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 716~718