

# 激光参数对 C/SiC 复合材料烧蚀热的影响

彭国良 张相华 王玉恒 闫辉 高银军 郑艳丽

(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)

**摘要** 复合材料的抗激光烧蚀性能一般用烧蚀单位质量所需的激光能量(即烧蚀热)表征,这种表征方式忽略了激光强度与稳定性的影响。以 C/SiC 复合材料为例,在材料表面热化学平衡分析的基础上,基于复合材料激光烧蚀效应数值模拟程序,计算了不同参数下激光辐照复合材料的烧蚀热,分析了强度、频率、占空比等激光参数对烧蚀效率的影响。研究表明,烧蚀热与占空比、激光强度有关,与重复频率关系不大。激光强度越大,烧蚀热越小;占空比减小,单位烧蚀质量所需的能量增大,即烧蚀热随占空比的减小而增大;在平均功率密度及占空比相同的前提下,不同重复频率对加热影响很小。对 C/SiC 复合材料的激光烧蚀,相同平均功率密度下,激光强度不稳定性越大,烧蚀热的期望值越小。

**关键词** 激光技术;烧蚀热;C/SiC 复合材料;激光参数;不稳定性

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1103010

## Effect of Laser Parameters on C/SiC Composites Material Ablation Heat

Peng Guoliang Zhang Xianghua Wang Yuheng Yan Hui Gao Yingjun Zheng Yanli

(State Key Laboratory Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** The ablation resistance of composite material is usually characterized by ablation heat that laser energy is consumed per unit ablation mass. Whereas the characterization ignores the effects of laser parameters. Taking C/SiC composite material as an example, by using a program for the numerical simulation of laser ablation of composite material, the ablation heat of C/SiC composite material is computed for different laser parameters. Effects of intensity, repetitive frequency and duty ratio are analyzed. The result indicates that ablation heat is mainly correlated with intensity and duty cycle of the irradiating laser beams. More intensive laser beam causes more severe ablation. Ablation of unit mass requires more than average incident energy if duty cycle of the laser pulses decreases. In addition, it is realized that the repetitive frequency rate of laser has minor effect on ablation as long as average beam intensity and duty cycle are fixed. For C/SiC material, introducing of some instabilities into laser beams would enhance the ablation process, which leads to low ablation heat.

**Key words** laser technique; ablation heat; C/SiC composite material; laser parameters; instability

**OCIS codes** 140.3295; 140.3330; 140.3425

## 1 引 言

由于 C/SiC 陶瓷基复合材料具有耐高温、抗烧蚀、易成型等特点,利用 C/SiC 陶瓷基复合材料制成的抗烧蚀隔热材料作为飞行器的保护层在其穿越大气层过程中发挥了重要作用,目前在航空航天领域已逐步得到应用。高能激光器的发展,使激光对

复合材料的辐照效应研究日益受到人们的关注<sup>[1-2]</sup>,C/SiC 陶瓷基复合材料相对金属材料具有更高的耐高温烧蚀特性,因此在抗激光防护技术领域也有着广阔的应用前景。由于复合材料的激光辐照效应涉及的物理过程较多,机理复杂<sup>[3]</sup>,研究者一般用烧蚀所需的激光能量密度来表征复合材料的抗

**收稿日期**: 2013-06-03; **收到修改稿日期**: 2013-09-05

**基金项目**: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1102)

**作者简介**: 彭国良(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光辐照效应的数值模拟工作方面的研究。

E-mail: pg102@163.com

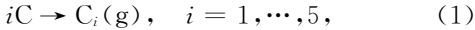
烧蚀性能<sup>[4-6]</sup>, 这种简单的描述虽然方便工程人员应用, 但对某些激光器而言, 其出光不稳定, 大气湍流也会导致到靶激光参数的变化, 而激光参数可能对复合材料的烧蚀性能有较大影响。本文利用自行开发的复合材料激光辐照效应模拟程序, 模拟了激光强度及稳定性对 C/SiC 陶瓷基复合材料烧蚀效率的影响。

## 2 计算方法

强激光作用下复合材料的烧蚀包括氧化烧蚀及相变烧蚀。已有研究表明<sup>[7]</sup>, 低风速下, 受限于氧气传质速率, 强激光作用下氧化烧蚀速率较慢, 可以忽略。本文主要考虑激光加热导致的热烧蚀。

### 2.1 热化学烧蚀

在高温下, 假设材料表面达到热化学平衡态, 则可以计算出各组分, 进而计算出升华温度及升华热, 计算方法可参考文献<sup>[8-9]</sup>。以碳为例, 考虑的化学反应为



求解的方程为

$$k_i(T) = P_{C_i}, \quad i = 1, \dots, 5, \quad (2)$$

$$\Delta G = \sum_{i=1}^5 P_{C_i} G_{C_i} - \sum_{i=1}^5 iP_{C_i} G_C = 0, \quad (3)$$

式中  $C_i$  为气态碳分子,  $k_i(T)$  为平衡常数,  $P_{C_i}$  为气态组分  $C_i$  的分压,  $G$  为自由能,  $T$  为温度。

SiC 基体在高温常压下会先液化, 液化温度为 3103 K, 相变焓为 65.25 kJ/mol。碳石墨纤维在高温常压下会直接气化, 生成物包括  $C_1 - C_5$ , 通过热平衡计算的升华温度为 3820 K, 各组分的质量分数为  $C_1:0.0094, C_2:0.0372, C_3:0.6607, C_4:0.0262, C_5:0.2665$ , 升华热为 253.5 kJ/mol。

### 2.2 控制方程

考虑材料的热物理性能随温度变化, 用热焓  $H$  来代替材料的温度:

$$H = \int_{T_r}^T \rho C_p dT', \quad (4)$$

式中  $T_r$  为材料初始参考温度,  $C_p$  为材料的比热容。

当表面发生烧蚀时烧蚀面后退, 其后退的速率为  $v(t) = \dot{s}(t)$ ,  $s(t)$  表示烧蚀深度。将坐标系变换为随烧蚀面移动的移动坐标系  $z = x_3 - s(t)$ ,  $x_3$  为沿厚度方向的固定坐标, 则表面烧蚀的热传导方程描述为<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + \dot{s} \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (5)$$

式中材料热扩散率  $\alpha = k/(\rho C_p)$ ; 右边第一项为材料中的热扩散项, 第二项为烧蚀面移动。

由于对流换热相对于激光能量很小, 故忽略对流换热的影响。边界条件为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha I - \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4), \quad (6)$$

式中  $n$  代表法向,  $\alpha$  为激光耦合系数,  $I$  为激光功率密度,  $\varepsilon$  为材料表面发射率,  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数,  $T_\infty$  为环境温度。对 C/SiC 复合材料, 试验测量给出的  $1.06 \mu\text{m}$  激光的反射率为 0.09, 对应的激光耦合系数为 0.91; 文献<sup>[11]</sup>给出的 C/SiC 复合材料表面发射率为 0.8。

### 2.3 材料参数

#### 2.3.1 密度

C/SiC 陶瓷基复合材料密度可用混合率表示为

$$\rho = \sum_{i=1}^2 \rho_i \varphi_i, \quad (7)$$

式中  $\varphi_1$  表示材料中碳纤维的体积分数,  $\varphi_2$  表示陶瓷基体的体积分数,  $\rho_1, \rho_2$  分别表示碳纤维和陶瓷基体的密度, 石墨密度为  $2620 \text{ kg/m}^3$ , 碳化硅密度为  $3160 \text{ kg/m}^3$ 。  $\varphi_i$  满足:

$$\sum_{i=1}^2 \varphi_i = 1 - \varphi_0, \quad (8)$$

式中  $\varphi_0$  是复合材料中孔隙的体积分数。试验给出 C/SiC 陶瓷基复合材料初始密度为  $1970 \text{ kg/m}^3$ 。

#### 2.3.2 热容

复合材料比热容  $c$  与材料各相的质量分数成正比:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^2 \rho_i c_i \varphi_i}{\rho}, \quad (9)$$

式中  $c_1, c_2$  分别表示碳纤维、碳化硅基体的热容。材料热容与温度的关系式可以由试验精确测定。图 1 分别给出了石墨、碳化硅的热容。结合激光烧蚀

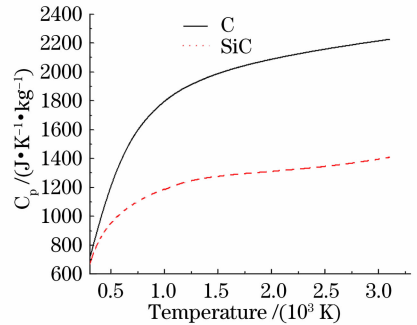


图 1 石墨及碳化硅的热容随温度的变化

Fig. 1 Variation of heat capacity of graphite and silicon carbide with temperature

过程中材料组分的变化可得到瞬时热容。

### 2.3.3 热导率

对于 C/SiC 复合材料,复合热导率  $\lambda_a$  可用并联模型表示:

$$\lambda_a = \sum_{i=1}^3 \varphi_i \lambda_i. \quad (10)$$

由于材料热导率与工艺关系较大,所以实际材料的热导率一般依靠试验测定。图 2 给出了 C/SiC 复合材料的热导率随温度的变化<sup>[12]</sup>。

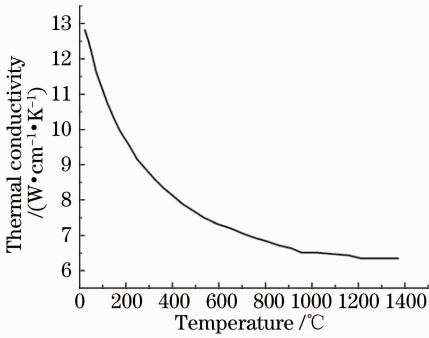


图 2 C/SiC 复合材料的热导率随温度的变化  
Fig. 2 Variation of thermal conductivity of C/SiC composite material with temperature

## 3 结果与讨论

### 3.1 模型的试验验证

为了验证数值模拟程序及所取的参数的正确性,用峰值功率密度  $3500 \text{ W/cm}^2$  的高斯连续激光对 6 mm 厚的 C/SiC 试样进行辐照试验,测量了试样的背表面温度及辐照结束时的烧蚀深度,烧蚀试样如图 3 所示。烧蚀深度的测量值(1.5 mm)与计算值(1.6 mm)符合较好。背表面温度的测量结果与计算结果如图 4 所示。由图可见,背表面温度计算值与试验结果符合较好,表明数值模拟程序及所取的参数是合理的。

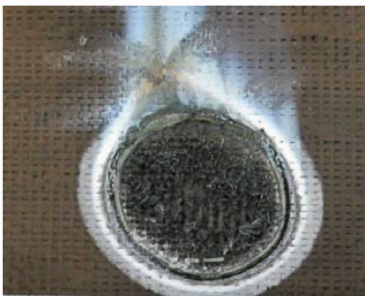


图 3 C/SiC 复合材料的激光烧蚀试验试样  
Fig. 3 Laser ablation experiment specimens of C/SiC composite material

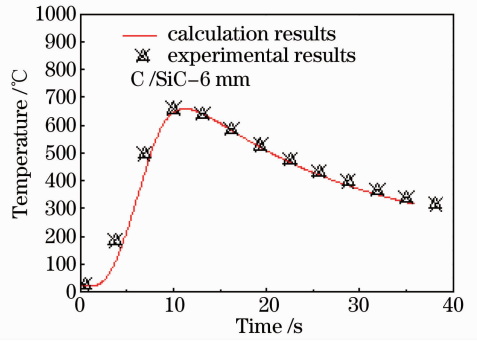


图 4 C/SiC 复合材料的激光烧蚀试验背表面温度的测量值及计算值

Fig. 4 Experimental results and the calculation results of rear surface temperature during the laser ablation experiment of C/SiC composite material

### 3.2 激光参数对烧蚀热的影响

由于横向热传导较弱,考虑一维情形。图 5 和图 6 给出了不同功率连续激光辐照下 C/SiC 复合材料的相变烧蚀质量随时间及功率密度的变化规律。由图 5 可以看出,激光加载下 C/SiC 复合材料的烧蚀质量随时间的变化基本呈线性关系。由图 6 可以看出,低功率密度下烧蚀速率极慢,功率密度越高,烧蚀速率越快。图 7 给出了烧蚀热随功率密度的变化,可以看出,功率密度越大,烧蚀热越小。由于 C/SiC 复合材料较高的相变温度,激光辐照后材料表面温度很高,辐射散热很强,净输入的热流密度  $q_s$  为

$$q_s = \alpha I - \varepsilon \sigma T_m^4, \quad (11)$$

能量效率  $\omega$  为

$$\omega = \frac{q_s}{I} = \alpha - \frac{\varepsilon \sigma T_m^4}{I}, \quad (12)$$

式中  $T_m$  为相变温度,对表面的 SiC 基体,当激光功率密度小于  $500 \text{ W/cm}^2$  时,材料吸收的激光能量小于相变时材料对外辐射能量,无法烧蚀;对碳纤维,

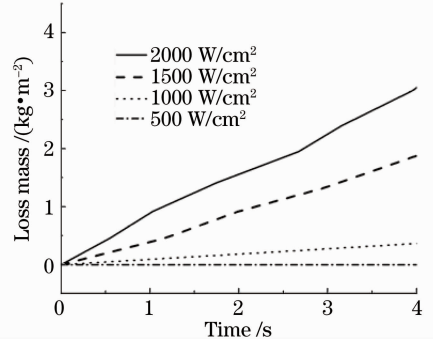


图 5 不同功率密度下 C/SiC 复合材料的激光烧蚀质量随时间的变化

Fig. 5 Variation of ablation mass of C/SiC composite material with time under different laser intensities

激光功率密度必须大于  $800 \text{ W/cm}^2$  以上才会发生相变烧蚀。由(9)式可看出,由于相变温度恒定,材料烧蚀时表面的辐射能为定值,激光功率密度越大,辐射的影响越小,能量效率越高,烧蚀热越小。

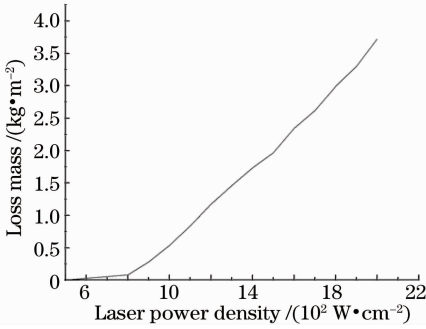


图 6 C/SiC 复合材料的激光辐照 5 s 时烧蚀质量随功率密度的变化

Fig. 6 Variation of ablation mass of C/SiC composite material with laser intensity when the irradiation time is 5 s

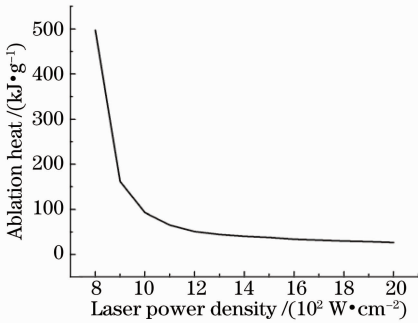


图 7 C/SiC 复合材料的烧蚀热随功率密度的变化

Fig. 7 Variation of ablation heat of C/SiC composite material with laser intensity

对于重频激光,图 8 给出了平均功率密度为  $2000 \text{ W/cm}^2$ ,重复频率为 20 Hz 时,不同占空比的

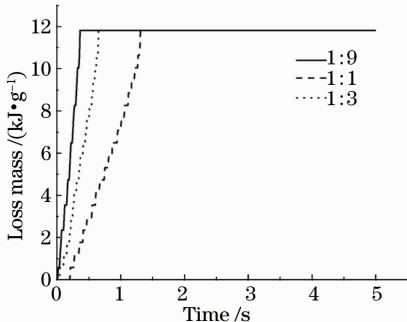


图 8 平均功率密度为  $2000 \text{ W/cm}^2$ ,重复频率为 20 Hz,不同占空比条件下 C/SiC 复合材料的烧蚀质量随辐照时间的变化

Fig. 8 Variation of ablation mass of C/SiC composite material with irradiation time under different duty cycles when average beam intensity is  $2000 \text{ W/cm}^2$  and repetition frequency is 20 Hz

相变烧蚀质量随时间的变化。烧蚀质量稳定表示试样已烧穿。由图可知,占空比越大,烧蚀速率越高,烧蚀效率也更高。

图 9 给出了平均功率密度为  $2000 \text{ W/cm}^2$ ,占空比为 1:1,不同重复频率条件下 C/SiC 复合材料的烧蚀质量随辐照时间的变化。由图可见,重复频率只对短时间段的烧蚀速率有影响,对整体的烧蚀速率影响很小。

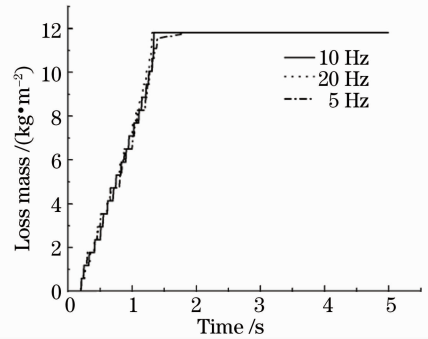


图 9 平均功率密度为  $2000 \text{ W/cm}^2$ ,占空比为 1:1,不同重复频率条件下 C/SiC 复合材料的烧蚀质量随辐照时间的变化

Fig. 9 Variation of ablation mass of C/SiC composite material with irradiation time under different repetition frequencies when average beam intensity is  $2000 \text{ W/cm}^2$  and duty cycle is 1:1

### 3.3 激光的不稳定对烧蚀热的影响

对某些激光器而言,由于大气的影 响,到靶的激光并不稳定,同一点激光强度随时间剧烈变化,这时不能简单将激光看作连续激光或重频激光。为了评估这种不稳定性对防护效果的影响,假设激光波形可描述为

$$I = I_0[1 + \alpha(t)], \alpha(t) \in (-\sigma, \sigma), \quad (13)$$

式中  $I_0$  表示平均功率密度,  $\alpha(t)$  为  $(-\sigma, \sigma)$  区间的随机变量,  $\sigma$  为激光的不稳定度。假设  $\alpha(t)$  为均匀分布的随机变量,图 10 给出了平均功率密度为  $2000 \text{ W/cm}^2$ ,激光辐照时间 2 s 时烧蚀热的均值及均方差随  $\sigma$  的变化。由图可知,到靶激光的不稳定会导致烧蚀热有较大的变化,但整体的趋势是  $\sigma$  越大,烧蚀热越小。净输入能量可表示为

$$\int_0^t (\alpha I - \epsilon \sigma T_w^4) dt = \int_0^t \alpha I dt - \int_0^t \epsilon \sigma T_w^4 dt, \quad (14)$$

对(14)式,由于平均功率密度相等,第一项的积分结果为定值;而对第二项,当材料输入的激光功率密度小于烧蚀时材料对外辐射功率密度时,表面温度会下降,并且输入的激光功率密度越小,表面温度下降

越多,从而辐射损失的能量越小,而当材料输入的激光功率密度大于烧蚀时材料对外辐射能量时,表面温度达到相变温度后却不会上升。显然,不稳定性

越大,材料输入的激光功率密度小于烧蚀时材料对外辐射功率密度的概率越大,第二项的积分结果的期望值变小,从而导致烧蚀热的期望值变小。

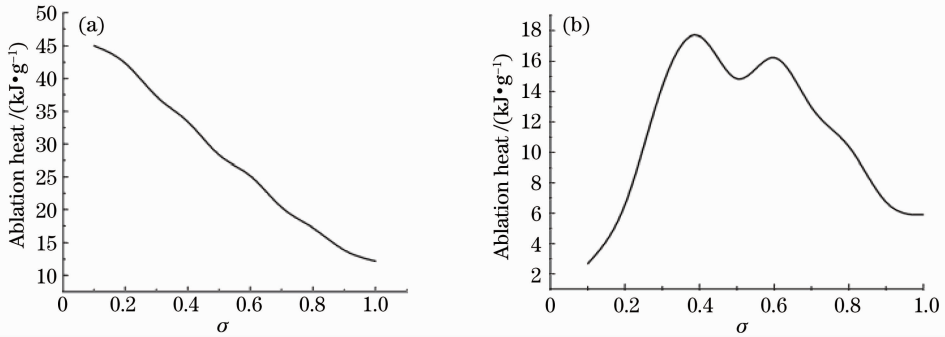


图 10 平均功率密度为 2000 W/cm<sup>2</sup> 时,C/SiC 复合材料的烧蚀热随激光不稳定度的变化。(a) 均值;(b) 均方差  
Fig. 10 Variation of ablation heat of C/SiC composite material with laser instability with average power density of 2000 W/cm<sup>2</sup>. (a) Mean value; (b) mean square error

## 4 结 论

通过热化学计算得到了 C/SiC 的烧蚀温度和烧蚀热,并利用热化学计算结果和激光辐照效应程序计算了激光参数(功率密度、占空比、重复频率等)对烧蚀效率的影响。分析结果表明,简单地用烧蚀热来表征耐高温材料的抗烧蚀性能并不恰当,不同激光参数得到的烧蚀热有很大区别。由于 C/SiC 材料较高的烧蚀温度,其表面的热辐射很强,因此激光密度越高,烧蚀效率越高,烧蚀热越低,功率密度小于某个阈值时,无法发生烧蚀。对于重频脉冲激光,积分功率密度相同时,占空比越大,烧蚀效率越高,即瞬时激光功率密度越高,烧蚀效率越高,重复频率对整体的烧蚀影响不大。对于不稳定激光,平均功率密度相同时,出光不稳定会导致烧蚀热有较大变化,而且整体的趋势是不稳定性越强,烧蚀热越小。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Jingchao, Zhang Yongzhong, Gong Xinyong, *et al.*. High-temperature tensile rupture life and fracture procedure of laser direct deposited Ti60 Alloy and TiCp/Ti60 composites [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103002.  
孙景超, 张永忠, 宫新勇, 等. 激光熔化沉积 Ti60 合金、TiCp/Ti60 复合材料的高温拉伸持久寿命及断裂过程[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103002.
- 2 Zhu Kai, Long Lianchun. Numerical simulation and experiment contrast about laminated plate under laser irradiation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103004.  
朱 凯, 龙连春. 激光辐照层合板的数值模拟与试验对比[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103004.
- 3 Tang Wenhui, Ran Xianwen. Numerical simulation of high intensity laser ablation of materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(1): 32-34.  
汤文辉, 冉宪文. 强激光对靶材烧蚀效应的数值模拟研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 32-34.

- 4 Zhang Yongqiang, Wang Guibing. 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. 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.
- 5 Chen Linzhu. Experiment Research to Laser Ablation of Honeycomb Sandwich Composite [M]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2010.  
陈林柱. 蜂窝夹层复合材料激光烧蚀实验研究[M]. 西安: 西北核技术研究所, 2010.
- 6 Wang Guibing, Liu Cangli. Experimental research of the ablation threshold of Kevlar/ epoxy[J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 457-459.  
王贵兵, 刘仓理. 凯芙拉环氧树脂复合材料烧蚀阈值实验研究[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 457-459.
- 7 Peng Guoliang, Wang Yuheng. Research to the effect of carbon-carbon composites oxidation on laser protection[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 148-151.  
彭国良, 王玉恒. C/C 复合材料的氧化对激光防护的影响研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 148-151.
- 8 Chen Siyuan, Jiang Guiqing. Passive oxidation mechanism and transition temperature of silicon carbide[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, (3): 21-24.  
陈思员, 姜贵庆. 碳化硅材料被动氧化机理及转换温度分析[J]. 宇航材料工艺, 2009, (3): 21-24.
- 9 M Balat, G Flamant, G Male, *et al.*. Active to passive transition in the oxidation of silicon carbide at high temperature and low pressure in molecular and atomic oxygen[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(3): 697-703.
- 10 J B Henderson. An Analytical and Experimental Study of the Pyrolysis of Composite Ablative Materials [D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1980.
- 11 Wu Wenming. Investigation of the Thermal Radiation Properties of C/SiC Composites [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.  
武文明. C/SiC 复合材料热辐射性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- 12 Li Hong. Thermophysical and Mechanical Properties of 2.5D C/SiC Composites [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.  
李 宏. 2.5 维 C/SiC 复合材料的热物理及力学性能[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

栏目编辑: 宋梅梅