

文章编号: 0258-7025(2008)12-2042-05

# Nd:YAG 连续激光烧蚀碳纤维复合材料的过程观测

黄永光<sup>1</sup> 刘世炳<sup>1</sup> 龙连春<sup>2</sup> 田建东<sup>3</sup> 阳志光<sup>3</sup>

(北京工业大学<sup>1</sup> 激光工程研究院,<sup>2</sup> 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)  
<sup>3</sup> 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076

**摘要** 通过 Nd:YAG 激光辐照碳纤维/环氧树脂复合材料过程的高速摄像观测,得到了不同辐照功率密度下烧蚀过程中的主要现象。发现在低功率密度(50 W/cm<sup>2</sup>)下,主要是表面烧蚀机制,不会发生燃烧现象,在长时间辐照下,由于表层附近出现轻微的聚合物焦化解,表面层出现粉末状和漂絮状的碳粉缓缓弥散空气中;在中等功率密度(300 W/cm<sup>2</sup>)下,体烧蚀机制占主要地位,内层分解气体喷出,在空气中点燃引起表面燃烧,主要燃烧表面聚合物;在高功率密度(4500 W/cm<sup>2</sup>)下是以表面烧蚀为主的质量迁移机制,在极短的时间(0.001 s)内表面层被破坏,瞬间燃烧,光斑中心出现喷射式的气化等离子体现象,并出现逐层烧蚀和各向异性热传导引起的烧蚀区形貌变形等现象。

**关键词** 激光技术;激光烧蚀;高速摄像;碳纤维/环氧树脂复合材料

中图分类号 TN 249;TB 332 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083512.2042

## Observation on the Process of Continuous-Wave Nd:YAG Laser Ablation on Carbon Fiber Composite Material

Huang Yongguang<sup>1</sup> Liu Shibing<sup>1</sup> Long Lianchun<sup>2</sup> Tian Jiandong<sup>3</sup> Yang Zhiguang<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Laser Engineering, <sup>2</sup>College of Mechanical Engineering and Applied Electronic Technique, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)  
<sup>3</sup>China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

**Abstract** The phenomena in ablation process of Nd:YAG laser irradiating carbon fibers reinforced epoxy resins composites under different intensities were observed by high-speed camera. Below low intensity (50 W/cm<sup>2</sup>), composite material laser ablation is dominated by surface ablation mechanism rather than burning, and the surface slight decomposing leads to form carbon powder or flocs which slowly disperse into the air under long time irradiation; At middle intensity of 300 W/cm<sup>2</sup> composite material laser ablation is dominated by volume ablation mechanism, inner decomposition gases spill into the air and ignite surface combustion; At high intensity 4500 W/cm<sup>2</sup> the main mechanism of the mass ablation is surface ablation, surface layer is damaged and instantaneously burns in a very short time (0.001 s), jet of plasma forms in the center of laser spot, anisotropic heat conduction causes layered ablation and deforms the ablation zone appearance.

**Key words** laser technique; laser ablation; high speed camera; carbon fibers reinforced epoxy resins composites

## 1 引言

碳纤维增强平板材料是一种很好的结构材料,被广泛用于航天器的结构件,由于其良好的比刚度、比强度、成熟的工艺以及合理的价格,已经在体育用品、微电子、交通运输、化工、机械、建筑等各个领

域得到广泛的使用,其中碳纤维/环氧树脂复合材料的应用最广。激光烧蚀一直是激光应用的一个重要研究领域<sup>[1~3]</sup>。弄清激光辐照下碳纤维复合材料性能的宏、微观演化规律,把握激光烧蚀机制,准确模拟材料的烧蚀破坏过程,既具有重要的基础研究意

收稿日期:2007-12-07;收到修改稿日期:2008-04-23

作者简介:黄永光(1981—),男,福建人,博士研究生,主要从事激光破坏机制方面的研究。

E-mail: yghuang@emails.bjut.edu.cn

导师简介:刘世炳(1957—),男,江西人,研究员,主要从事超短脉冲强激光与等离子体的相互作用、激光材料破坏机制以及激光微加工技术与应用等方面的研究。E-mail: sbliu@bjut.edu.cn

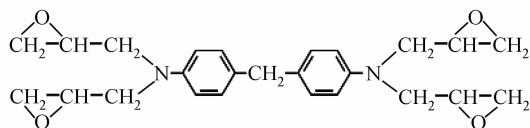
义,也有重要的应用价值。国内外学者对碳纤维复合材料的激光烧蚀破坏和基于烧蚀的激光加工已开展了一定的研究。C. T. Pan 等<sup>[4]</sup>考察激光辐照碳纤维复合材料的热影响区,发现热影响区的形状取决于激光扫描的方向和纤维编织的走向;J. Mathew 等<sup>[5]</sup>考察了 Nd:YAG 脉冲激光参数对碳纤维复合材料的切割质量的影响,并得出了经验预测模型;黄国君等<sup>[6]</sup>对激光-载荷联合作用下碳纤维/环氧树脂板的断裂阈值进行了研究,结合显微观测确定了三种断裂模式:热应力、热减薄和热击穿模式,并建立了断裂临界条件下热-力和几何参数与材料性能的关系;T. Young 等<sup>[7]</sup>研究了单脉冲和多脉冲 Nd:YAG 激光钻孔下的孔形状及形貌,发现激光钻微孔前后碳纤维复合材料强度和硬度发生了重大的变化,从热-力耦合的角度进行了激光对复合材料功能失效的研究;W. S. O. Rodden 等<sup>[8]</sup>研究了长脉冲(0.1 ms)的 Nd:YAG 激光钻削 2 mm 厚的碳纤维/环氧树脂复合层板,发现孔的形状由圆变成椭圆且在层间的分界面处孔的形状不连续,并指出了前者是由于碳纤维的热传导系数远远大于环氧树脂的热传导系数;后者是因为每层的碳纤维方向不同,导致层间的孔形不连续;Q. Bénard 等<sup>[9]</sup>利用准分子激光对碳纤维/环氧树脂板材进行了表面处理,研究其表面的粘附性能,对表面粗糙度、润湿性进行了研究;郭亚林等<sup>[10]</sup>研究了激光参数对碳纤维复合材料质量烧蚀率的影响,结果表明激光辐照时间对该复合材料的质量烧蚀率的影响不大,而该复合材料的质量烧蚀率随入射激光强度和光斑直径的增大而增大;K. T. Voisey 等<sup>[11]</sup>用 Nd:YAG 脉冲激光进行碳纤维复合材料打孔,发现孔周围的碳纤维在末端出现的径向膨胀高达 60%,他们通过预热办法减小激光诱导的纤维膨胀。

材料的激光烧蚀是指材料在激光辐照下,由于各种机制引起的质量迁移、消蚀或散失等现象<sup>[12]</sup>。不同波段的激光辐照存在着不同的烧蚀机制,紫外激光辐照碳纤维/树脂复合材料存在光解化学反应,而红外激光烧蚀的本质是由于热效应。航空航天领域的防热复合材料气体动力学烧蚀等的研究为复合材料的激光烧蚀提供了许多值得借鉴的经验,对于这种由于升温引起的热烧蚀可以分为表面烧蚀和体积烧蚀,表面烧蚀(又称为线烧蚀)指发生在结构表面的烧蚀,主要包括表面材料与环境气流的热化学反应、材料的熔化、蒸发(升华)、高速粒子撞击(侵蚀)以及机械剥蚀引起的质量损失;体积烧蚀指结构

内部材料在较低温度(相对于表面烧蚀而言)下因热化学反应(热解反应和热氧化反应)导致的质量损失。这两种烧蚀过程相互耦合,并没有明确的分界,均包含多种复杂的质量能量的传递过程,还没有包含两种烧蚀过程的统一的物理-数学模型,目前被广泛采用的方法,是针对两种不同烧蚀过程各自的特点,建立不同的烧蚀模型进行分析<sup>[13]</sup>。对于热效应引起的激光烧蚀在这些模型中引入激光热源项就可以研究激光辐照下的烧蚀问题。本文利用高速摄像的方法,研究了近红外连续激光辐照碳纤维/环氧树脂复合材料引起的热烧蚀现象,预测了不同功率密度下存在的不同体烧蚀和表面烧蚀的竞争行为。

## 2 实验材料与方法

实验材料是一种碳纤维缠绕型网格复合材料 T300-AG80。根据测量的物理性能数据,该材料密度为 1.535~1.565 g/cm<sup>3</sup>,比热容为 1.707 J/(g·°C),材料中高强型碳纤维牌号为 T300,其热导率是各向异性的,轴向为 84 W/(m·K),径向为 8.4 W/(m·K);主体树脂为环氧树脂:4,4-二氨基二苯甲烷四缩水甘油胺(AG-80),结构式为:



实验采用 Nd:YAG 连续输出的激光器(德国 HASS/MOTOMAN),波长为 1064 nm,最大输出功率为 1000 W,通过光纤输出圆形光斑,配六轴机械手,激光器内部有快门、功率监视器等,通过计算机控制出光时间。激光辐照光斑大小的调整需要利用机械手控制聚焦物镜和复合材料平板样品表面的距离得以实现;直径大于 2 mm 的光斑可以利用激光辐照金属板得到斑点的大小进行调节,而小于 2 mm 的光斑通过光束光斑质量诊断仪获得;利用不同的功率密度和不同光斑大小的激光辐照复合材料,使用彩色高速摄像机(美国 Phontron Fastcam 1024R2)进行同步观测,实验装置示意图如图 1 所示。

## 3 实验结果与讨论

T300/AG80 材料对 1064 nm 激光的吸收率非常高,吸收率大于 90%,在激光辐照材料瞬间高速摄像机可以采集到激光辐照瞬间在复合材料上的光斑,通过光斑上以及附近材料的变化过程,可以得到其烧蚀机制。

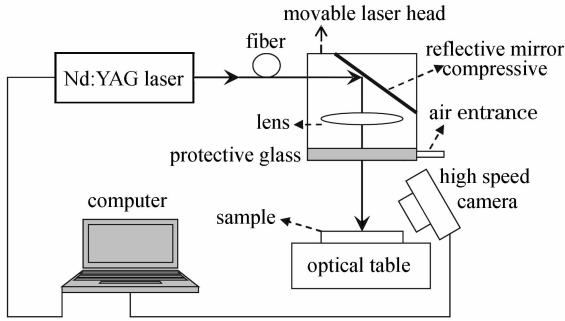


图 1 激光辐照碳纤维复合材料实验系统  
Fig.1 Experimental system for laser irradiating carbon fiber/epoxy composites

观察辐照光斑半径为 10 mm, 辐照时间为 8 s, 功率密度为  $50 \text{ W/cm}^2$  下复合材料的烧蚀过程, 发现它并不燃烧, 而且产生的是黑色的浓烟 (如图 2 (b)), 随着时间的累积形成碳黑漂絮, 慢慢弥散到空气中。在这个过程中, 变化主要发生在材料表面层, 激光辐照区表面层附近的聚合物在激光热源的作用下发生了软化、熔融并出现缓慢的表层热解, 热解形成的不饱和碳氢分子经过聚合、脱氢, 形成了碳或者炭黑, 在复合材料表面可以看到熔融焦化的聚合物析出覆盖住原来的碳纤维编织结构, 而黑烟是热分解产物产生的高分子量产物遇冷空气时凝聚形成焦油微滴, 其弥散速度很慢, 漂浮空中形成空气污染。可见, 在该功率密度下激光使得表面树脂分解

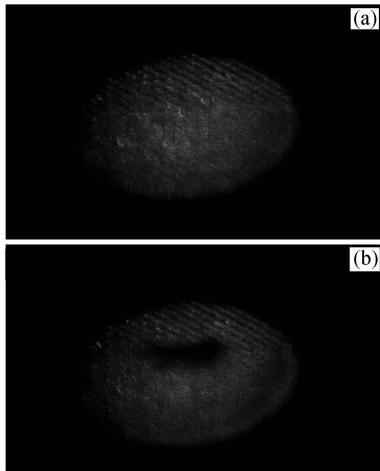


图 2 激光烧蚀复合材料辐照光斑附近黑烟形成过程的部分高速摄像图 (辐照光斑半径 10 mm, 辐照时间 8 s, 功率密度  $50 \text{ W/cm}^2$ )。 (a) 辐照开始; (b) 辐照时间为 3.25 s

Fig.2 High speed camera pictures of laser ablating carbon/epoxy composites (laser spot radius: 10 mm; acting time: 8 s; intensity:  $50 \text{ W/cm}^2$ ). (a) irradiation began; (b) acting time 3.25 s

形成炭黑或者碳粉是其质量烧蚀的主要原因。

激光功率密度为  $300 \text{ W/cm}^2$  下复合材料烧蚀过程, 与低功率密度  $50 \text{ W/cm}^2$  下的烧蚀过程有很大的区别, 发现激光辐照开始的瞬间出现亮斑 (如图 3 (a)), 表面层吸收激光能量开始焦化, 同时出现轻微的表面松动或者膨胀 (如图 3 (b), 辐照时间 0.2 s), 接着表面出现白烟并上升 (如图 3 (c), 辐照时间 0.27 s), 随后可以看到其中一部分白烟和中心附近的分解产物从中心附近被迅速吹到边缘 (如图 3 (d), 辐照时间 0.4 s), 首先出现了一块明显的破坏

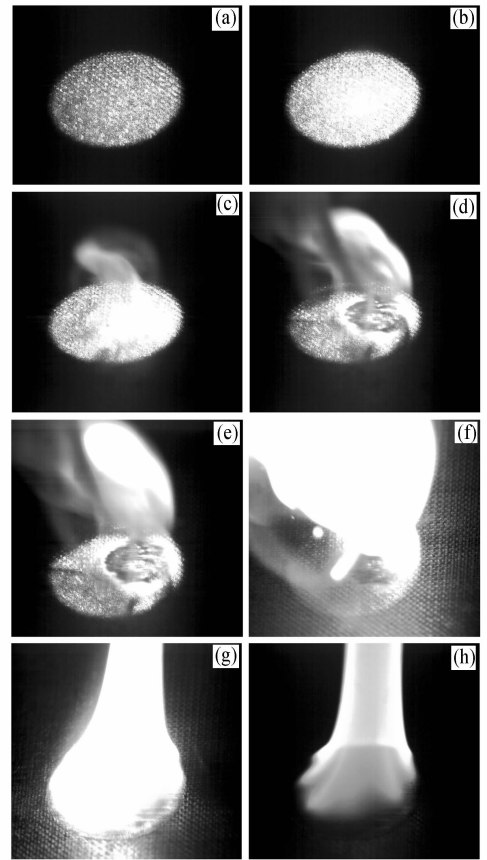


图 3 激光烧蚀复合材料辐照光斑附近的形貌变化过程的部分高速摄像图 (辐照光斑半径为 10 mm, 辐照时间为 4 s, 功率密度为  $300 \text{ W/cm}^2$ )。 (a) 辐照开始; (b) 辐照 0.20 s; (c) 辐照 0.27 s; (d) 辐照 0.40 s; (e) 辐照 0.45 s; (f) 辐照 1.37 s; (g) 辐照 4 s; (h) 停止辐照后 0.17 s

Fig.3 High speed camera pictures of laser ablating carbon/epoxy composites (laser spot radius: 10 mm; acting time: 4 s; intensity:  $300 \text{ W/cm}^2$ ). (a) irradiation began; (b) acting time: 0.20 s; (c) acting time: 0.27 s; (d) acting time: 0.40 s; (e) acting time: 0.45 s; (f) acting time: 1.37 s; (g) acting time: 4 s; (h) 0.17 s after irradiation stop

区,主要是因为材料中含有可以热解的环氧树脂和其他有机物质,热解气体不断增多使得内部的压力增大,当压力到达冲开孔隙和表面聚合物的凝结力时,气体从内层喷出,与表层上面飘的白烟混合在一起,此时存在着气相反应诱导过程和气相的扩散过程之间的竞争,由于此时激光光强导致的热分解速度比气体热扩散速度快,这种易燃气体在表面的含量比较多,而且空气中有足够的氧气,当达到足够温度时,首先在空气中点燃了混合气体(如图 3(e),辐照时间 0.45 s),引起了有焰燃烧现象,由于燃烧的诱发作用,表面的“白色”物质在随后的激光辐照时间内不断燃烧减少,表面层被严重破坏(如图 3(f),辐照时间 1.37 s),直到激光辐照 4 s(如图 3(g))之后,燃烧依然只出现在激光辐照区,而在激光辐照区之外物质的表面结构几乎没有被破坏,在辐照停止后,材料继续缓慢燃烧(图 3(h),辐照停止 0.17 s),在激光辐照停止 0.75 s 后,材料燃烧完全熄灭。在这种烧蚀情况下,复合材料发生的基于热效应的化学分解反应扮演着重要的角色,是主要的质量烧蚀原因。

在相对高功率密度下,烧蚀斑的形状发生了很大的变化,图 4(a)为激光辐照开始时的形貌,在辐照的瞬间,表面就被破坏了,在 0.003 s 时表面层内部已经红亮,表面已经被破坏,在 0.005 s 时辐照区上方的气体被点燃(如图 4(b)),点燃的气体与下方喷出的气体连接形成大的燃烧区(如图 4(c)),从图 4(d)已经可以看出光斑辐照区的表层烧蚀殆尽,由于该复合材料是多层板结构,其第二层开始被辐照,随后燃烧区域的面积减小,以喷射的模式向外喷出内层物质(如图 4(e)),如果功率密度越高喷出的速度越快,由于这种喷射引起的质量迁移比较多,比前面的气化要大得多,在烧蚀足够时间后,可以看到穿孔现象。而另外一个值得关注的问题就是热传导过程,由于碳纤维的径向和轴向的热传导系数不同,而且主要成分碳纤维和环氧树脂的热物性差别很大,因此复合材料在激光辐照下表现出了各向异性的烧蚀特征,在这个过程中烧蚀斑的面积变化很大(图 4(f)),可以看出烧蚀区的面积已经比激光光斑的面积大了很多,而且烧蚀区是椭圆形状的,椭圆的长轴对应于烧蚀表面下一层碳纤维的轴向,这种情形主要是由于材料热导率沿着纤维轴方向大很多,热分布在这个方向出现的焦化解范围大,而随后燃烧区域才扩散到其边缘。可见高功率下,表面碳纤维气化和热传导引起的化学反应如焦化解在烧蚀过

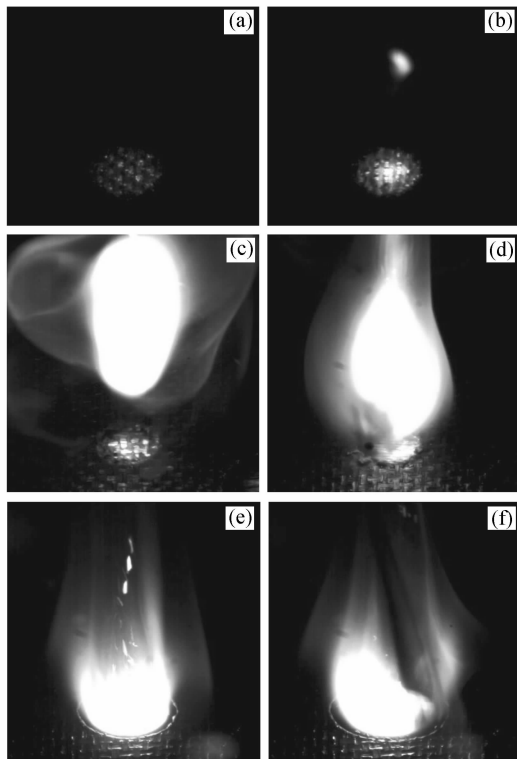


图 4 激光烧蚀复合材料喷射与烧蚀区变化的部分高速摄像图(辐照光斑半径为 2 mm,辐照时间为 0.5 s,功率密度为 4500 W/cm<sup>2</sup>)。(a) 辐照开始;(b) 辐照 0.005 s;(c) 辐照 0.011 s;(d) 辐照 0.026 s;(e) 辐照 0.227 s;(f) 辐照 0.461 s

Fig. 4 High speed camera pictures of laser ablating carbon/epoxy composites (laser spot radius: 2 mm; acting time: 0.5 s; intensity: 4500 W/cm<sup>2</sup>). (a) irradiation began; (b) acting time: 0.005 s; (c) acting time: 0.011 s; (d) acting time: 0.026 s; (e) acting time: 0.227 s; (f) acting time: 0.461 s

程中都扮演着重要的角色。

## 4 结 论

由以上分析可知,碳纤维/环氧树脂复合材料对 Nd:YAG 激光的辐照是表面层吸收,不同功率密度下引发烧蚀的主要原因略有不同,这种差异根源于材料本身存在的多种组分截然不同的热物理化学特性。随着辐照激光功率密度从低到高依次出现的主要烧蚀现象为:1) 表面树脂焦化生成炭黑粉末的激光表面烧蚀现象;2) 材料内层热分解树脂材料的激光体烧蚀现象;3) 表面喷射式气化燃烧的激光表面烧蚀现象,而且在某一功率密度下,往往伴随着多种烧蚀机制,这些烧蚀现象的阈值现在还没有很好的

确定标准和方法。此外,激光烧蚀中的树脂分解规律、燃烧现象对材料烧蚀的影响以及树脂基、固化剂和碳纤维之间的热过程、生热放热反应等将是下一阶段的工作。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Yannan, Zhu Jinrong, Yang Bo *et al.*. Method of impulse measurement for laser-ablated target [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):417~421  
杨雁南,朱金荣,杨波等.用于测量激光烧蚀下靶材获得冲量的方法[J].*中国激光*,2007,**34**(3):417~421
- 2 Godai Miyaji, Kenzo Miyazaki. Nanostructure formation process in low-fluence femtosecond-laser ablation of thin film surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.):201~203
- 3 Chen Hongxin, Jia Tianqing, Huang Min *et al.*. Visible-infrared femtosecond laser-induced optical breakdown of 6H SiC [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):467~470  
陈洪新,贾天卿,黄敏等.飞秒激光的波长对SiC材料烧蚀的影响[J].*光学学报*,2006,**26**(3):467~470
- 4 C. T. Pan, H. Hocheng. The anisotropic heat-affected zone in the laser grooving of fiber-reinforced composite material [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1996, **62**:54~60
- 5 J. Mathew, G. L. Goswami, N. Ramakrishnan *et al.*. Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1999, **89-90**:198~203
- 6 Huang Guojun, Yang Zhixing, Duan Zhuping. Investigation on the fracture threshold of woven carbon-fiber/epoxy plates under mechanical loading and heating by incident laser beams [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(6):677~681  
黄国君,杨治星,段祝平.激光-载荷耦合作用下碳纤维/环氧树脂板的断裂阈值研究[J].*强激光与粒子束*,1999,**11**(6):677~681
- 7 T. Young, D. O' Driscoll. Impact of Nd-YAG laser drilled holes on the strength and stiffness of laminar flow carbon fibre reinforced composite panels [J]. *Composites; Part A*, 2002, **33**:1~9
- 8 W. S. O. Rodden, S. S. Kudesia, D. P. Hand *et al.*. A comprehensive study of the long pulse Nd:YAG laser drilling of multi-layer carbon fibre composites [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**:319~328
- 9 Q. Bénard, M. Fois, M. Grisel *et al.*. Surface treatment of carbon/epoxy and glass/epoxy composites with an excimer laser beam [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2006, **26**:543~549
- 10 Guo Yalin, Liang Guozheng, Qiu Zheming *et al.*. Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, **23**(5):84~88  
郭亚林,梁国正,丘哲明等.激光参数对碳纤维复合材料质量烧蚀率的影响[J].*复合材料学报*,2006,**23**(5):84~88
- 11 K. T. Voisey, S. Fouquet, D. Roy *et al.*. Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**:1185~1197
- 12 Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu *et al.*. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 65~70  
孙承伟,陆启生,范正修等.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002.65~70
- 13 Yi Fajun, Liang Jun, Meng Songhe *et al.*. Study on ablation mechanism and models of heatshield composites [J]. *Journal of Rocket Technology*, 2000, **23**(3):49~57  
易法军,梁军,孟松鹤等.防热复合材料的烧蚀机理与模型研究[J].*固体火箭技术*,2000,**23**(3):49~57