复合材料学报 第26卷 第1期 2月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 1 February 2009

文章编号：1000-3851(2009)01-0118-05

Nd:YAG 激光辐照碳纤维复合材料的质量烧蚀

黄永光[1]，刘世炳*[1]，龙连春[2]，田建东[3]，阳志光[3]
（1. 北京工业大学 激光工程研究院，北京 100022；2. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院，北京 100022；3. 中国运载火箭技术研究院，北京 100076）

摘　要： 通过实验研究了连续 Nd:YAG 激光辐照下碳纤维环氧树脂复合材料的质量烧蚀规律。结果表明：当激光功率密度大于 10 kW/cm^2 时，材料烧蚀质量与激光辐照能量成正比关系；在同样激光辐照能量下，半径为 0.65 mm的激光辐照引起的复合材料的质量烧蚀率比半径为 5.5 mm 的激光辐照的结果大一倍；激光功率在燃烧阈值附近时，燃烧现象引起质量烧蚀率的波动。

关键词： 质量烧蚀率、碳纤维、环氧树脂、烧蚀、燃烧、复合材料
中图分类号： TN249；TB332　　**文献标志码：** A

Mass ablation characteristics of carbon fiber composite irradiated by Nd:YAG laser

HUANG Yongguang[1], LIU Shibing*[1], LONG Lianchun[2], Tian Jiandong[3], YANG Zhiguang[3]
(1. National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. College of Mechanical Engineering and Applied Electronic Technique, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The material mass ablative law of the carbon fiber epoxy composite irradiated by continuous wave Nd:YAG laser was researched by experiment. The results indicate that the composite ablative mass is directly proportional to the laser radiation energy when the laser radiation intensity is greater than 10 kW/cm^2; with the same laser energy radiation, the mass ablative rate at high intensity of 0.65 mm laser spot radius is nearly twice that at low intensity of 5.5 mm laser radius; combustion phenomena cause the mass ablative rate to fluctuate when the irradiation laser power is near the composite burning threshold.

Keywords: mass ablative rate; carbon fiber; epoxy resin; ablation; burning; composites

碳纤维/环氧树脂复合材料具有比强度、比模量高，密度小，结构尺寸稳定，耐热，耐低温以及材料性能可设计性等优点，而且碳纤维复合材料既可以作为结构材料承载重荷又可以作为功能材料发挥作用，已经成为空间制品的首选材料[1-2]。复合材料的抗烧蚀性能是其重要性质，国内外学者对此进行了许多相关的研究，在复合材料空气动力学烧蚀、气体动力学烧蚀、热动能系统烧蚀以及工艺烧蚀等领域开展了广泛的研究[3-5]，激光烧蚀也开展了一些研究[6-9]，但是高功率下的烧蚀研究报道相对较少。

激光烧蚀指激光照射下材料表面层因为各种机制引起的质量迁移、消蚀或散失现象[10]，它与激光参数（如波长、辐照功率密度、辐照时间、辐照光斑大小），材料自身的特性（包括材料的组成成分和编织结构等）以及激光辐照下质量的烧蚀过程、烧蚀方式和烧蚀环境等都有密切关系。而碳纤维/环氧树脂复合材料的基体树脂是高分子有机化合物，升温后会发生热分解反应，较高温度下会发生氧化反应，起火燃烧变成碳化合物；而碳纤维在高温下则可能气化。复合材料的烧蚀可能涉及升华、化学反应、焦化碳化、剥蚀等各种机制，这样使得能量耦合和质量迁移问题变得相当复杂。郭亚林等考察了激光参数对烧蚀质量的影响，发现激光辐照时间对复合材料质量烧蚀率的影响不大，而其质量烧蚀率随入射激光强度和光斑直径的增大而增大[11]。这

收稿日期： 2008-01-02；**收修改稿日期：** 2008-04-14
通讯作者： 刘世炳，研究员，主要研究方向为激光等离子体，激光微加工　E-mail：sbliu@bjut.edu.cn

些相互影响规律在一定的功率范围内是可以成立的，但是由于不同烧蚀功率密度范围内存在的主要烧蚀机制有所不同，因此需要考察不同功率密度下的烧蚀过程以及引起质量迁移的原因。

1 实验材料与设备

实验使用了两种板厚的碳纤维/环氧树脂复合材料，进行了多次辐照实验，每次辐照用的激光参数见表 1。

实验光源为 Nd:YAG 连续波固体激光器(德国 HASS/MOTOMAN)，波长为 1.064 μm，最大输出功率 1000 W，利用光纤输出，激光器可以设置和监测激光输出功率；光斑直径利用光束光斑质量诊断仪(德国 Prometer UFF 100)进行测量；材料烧蚀过程利用高速摄像机(美国 PHOTRON Fastcam 1024R2)进行拍摄；烧蚀后样片的表面形貌利用金相显微镜进行分析；烧蚀引起的质量迁移使用电子天平进行称量，电子天平精度为 10^{-4} g。

实验材料是一种表面正交编织内部碳纤维缠绕的复合材料平板，材料中高强型碳纤维基本物理性能参数见表 2。

表 1 碳纤维环氧树脂复合材料的 Nd:YAG 激光辐照实验参数

Table 1 Experimental parameters of the carbon fiber epoxy composite irradiated by Nd:YAG laser

Sample number	Irradiation parameters			Sample number	Irradiation parameters		
	Laser power/W	Irradiation time/s	Spot radius/mm		Laser power/W	Irradiation time/s	Spot radius/mm
1(A)	147	1	0.56	30(A)	300	1	8.00
2(A)	294	1	0.79	31(A)	310	1	8.00
3(A)	529	1	1.06	32(A)	320	1	8.00
4(A)	784	1	1.29	33(A)	330	1	8.00
5(A)	475	1	5.50	34(A)	350	1	8.00
6(A)	475	2	5.50	1(B)	147	1	0.56
7(A)	475	3	5.50	2(B)	294	1	0.79
8(A)	475	4	5.50	3(B)	529	1	1.06
9(A)	475	5	5.50	4(B)	784	1	1.29
10(A)	155	1	0.65	5(B)	155	1	0.65
11(A)	155	2	0.65	6(B)	155	2	0.65
12(A)	155	3	0.65	7(B)	155	3	0.65
13(A)	155	4	0.65	8(B)	155	4	0.65
14(A)	310	1	0.65	9(B)	310	1	0.65
15(A)	310	2	0.65	10(B)	310	2	0.65
16(A)	310	3	0.65	11(B)	310	3	0.65
17(A)	310	4	0.65	12(B)	310	4	0.65
18(A)	465	1	0.65	13(B)	465	1	0.65
19(A)	465	2	0.65	14(B)	465	2	0.65
20(A)	465	3	0.65	15(B)	465	3	0.65
21(A)	465	4	0.65	16(B)	465	4	0.65
22(A)	620	1	0.65	17(B)	620	1	0.65
23(A)	620	2	0.65	18(B)	620	2	0.65
24(A)	620	3	0.65	19(B)	620	3	0.65
25(A)	620	4	0.65	20(B)	620	4	0.65
26(A)	775	1	0.65	21(B)	775	1	0.65
27(A)	775	2	0.65	22(B)	775	2	0.65
28(A)	775	3	0.65	23(B)	775	3	0.65
29(A)	775	4	0.65	24(B)	775	4	0.65

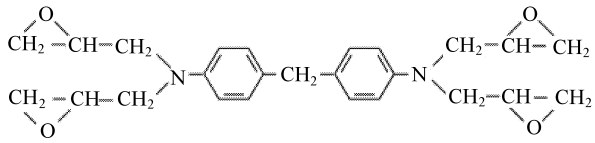
Note: (A)—thin sheet (depth: 2 mm); (B)—thick sheet (depth: 4 mm).

表 2　碳纤维材料的主要物理性能参数

Table 2　Properties of the carbon fiber materials

Properties	Value
Fiber diameter/μm	7.6
Density/(g·cm^{-3})	1.77
Specific heat/(J·(g·℃)$^{-1}$)	0.92
Thermal conductivity/(W·(m·K)$^{-1}$)	Axial 84, radial 8.4
Thermal expansion coefficient/10^{-6}℃$^{-1}$	Axial −0.3, radial 3.1

树脂基体是复合材料主要组分之一，起着传递载荷和均衡载荷的作用。主体树脂为环氧树脂：4，4-二氨基二苯甲烷四缩水甘油胺，结构式为



一般情况下，其环氧值 0.85 当量/100 g，黏度约 3.5 Pa·s(50℃±5℃)，由于其四官能团的高度交联而具有良好的耐热性能。

烧蚀质量指在辐照时间内产生的前后质量差；质量烧蚀率指复合材料辐照前后的质量差与辐照时间的比值；烧蚀斑是指由于激光辐照下，由于各种机制引起材料表面破坏变化的区域，其不同于光斑，可能与光斑大小一致，也可能比光斑面积大，需要根据具体的情况予以判断。

2　结果与讨论

图 1 是碳纤维复合材料烧蚀质量随辐照激光能量的变化规律，考察的辐照光斑半径 r 为 0.65 mm，从其线形规律可以看出，激光的烧蚀质量与激光的辐照能量呈线性关系。其质量烧蚀是由于材料吸收激光能量引起，热效应是质量迁移的根本原因，热效应引发树脂基的分解，高激光功率密度下会引起材料表面喷射式的烧蚀。设烧蚀热为 Q，$Q=E/M$，E 为辐照激光的能量，M 为烧蚀质量，实验得到功率密度大于 10 kW/cm^2 情况下烧蚀热约为 53 kJ/g。由图 2 中辐照光斑半径为 5.50 mm 的实验结果可以得到，功率密度为 500 W/cm^2 时材料的烧蚀热约为 105 kJ/g。

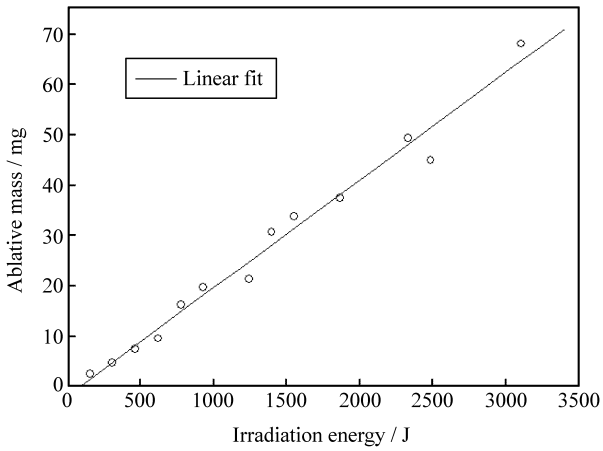


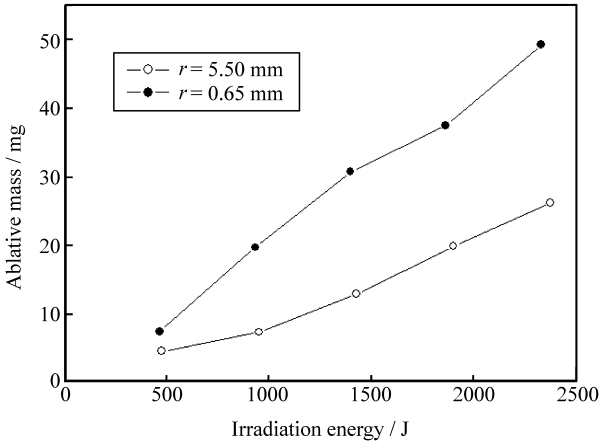
图 1　烧蚀质量随激光辐照能量的变化规律

(辐照光斑半径：0.65 mm)

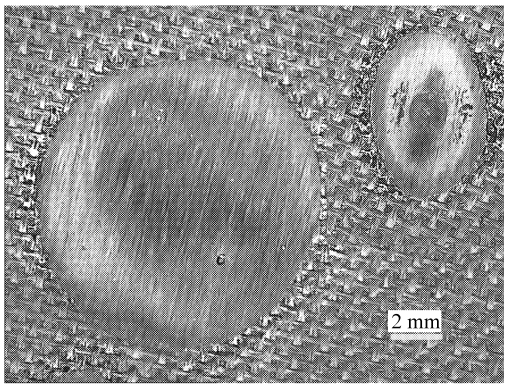
Fig. 1　Ablative mass of composite vs laser energy

(radius of the irradiation spot: 0.65 mm)

图 2 考察了辐照光斑大小不同引起的烧蚀质量随辐照能量的变化情况。从图 2(a)可以看到光斑半径为 0.65 mm 的激光辐照引起的质量烧蚀要比光斑半径为 5.50 mm 时大得多，这与其具体的烧蚀过程紧密相关。通过图 2(b)烧蚀后的烧蚀斑分析可以清楚地看到，低功率密度大光斑辐照得到的



(a) Ablative mass vs irradiation energy at different radius



(b) Ablation spot form at different laser radius: r = 5.50 mm, left side; r = 0.65 mm, right side

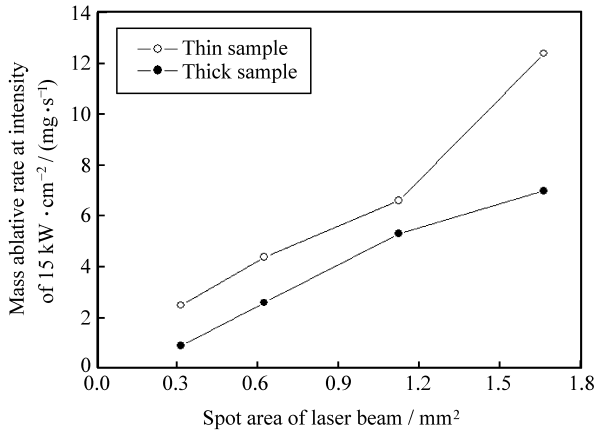
图 2　不同大小的光斑引起的烧蚀质量随激光辐照能量的变化

Fig. 2　Ablative mass vs irradiation energy at different laser spot radius and the ablation spot form

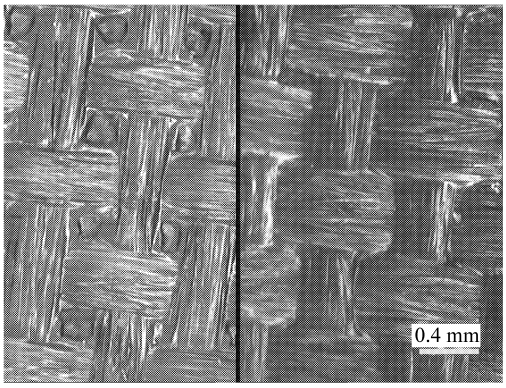
烧蚀斑与光斑大小一样，烧蚀集中在光照区，主要在表面层发生了焦化等反应；在激光能量相同的情况下，小光斑的激光辐照功率密度很高，使得激光辐照中心的材料表面出现喷射式燃烧，辐照区温度非常高，在极短时间通过热传导就可以使光斑边缘的树脂材料达到焦化温度，同时材料内部一定深度的树脂也会发生热分解，由于碳纤维热传导系数为各向异性，因而得到椭圆形的烧蚀斑。

图 3 是两块均为表面正交编织结构的平板(材料主要成分相同，杂质略有区别，两块板厚度也略有不同，简称薄板和厚板)在相同的激光功率密度(15 kW/cm^2)下得到不同的光斑面积对质量烧蚀率的影响。该功率密度下，烧蚀斑比光斑大很多，热传导引起焦化和分解气体范围扩大导致的质量烧蚀占了很大一部分。两种板材的烧蚀率出现了很大的差异，薄板的质量烧蚀率几乎比厚板大 1 倍，其原因主要来自两方面：(1) 表面碳纤维编织结构上的差异，图 3(b)显示薄板(左边)、厚板(右边)之间有不同的编织间距大小或者称之为孔隙，可以看出厚板的孔隙比薄板小很多，孔隙大小对分解气体扩散溢出材料以及体烧蚀过程产生重要的影响；(2) 掺杂不同可能引起烧蚀率的不同，与薄板烧蚀后的烧蚀板(图 3(c)左边)相比厚板烧蚀后析出银白色物质(图 3(c)右边)，这种杂质改善了厚板的抗烧蚀性能，因此减小了质量烧蚀率。此外，平板厚度也可能影响质量烧蚀率，这个问题有待进一步研究和分析。

图 4 是烧蚀质量随功率的变化规律，此时激光光斑半径 8 mm，烧蚀斑与激光光斑大致相同，考察了 1 s 时间内的现象，发现激光功率为 300 W 时引起的质量烧蚀率要比 310 W 和 320 W 时的高一些，该差异源于是否存在燃烧过程。功率为 300 W 时，1 s 时间内没有出现燃烧现象，而在功率310 W 的时候，在将到 1 s 时出现了燃烧现象，分解出来的气体吸收了激光能量用于维持燃烧，这样激光能量达到复合材料的量就减少了，使得进一步分解气体的速度降低，导致烧蚀质量的减少；随后，功率为 330 W 时由于燃烧时间更早引起的烧蚀质量的进一步减少，而在这个过程中燃烧的时间是一个不确定的值，因此在这附近的烧蚀质量出现不稳定现象，这属于正常现象。随着激光功率的提高，烧蚀质量进一步提高。

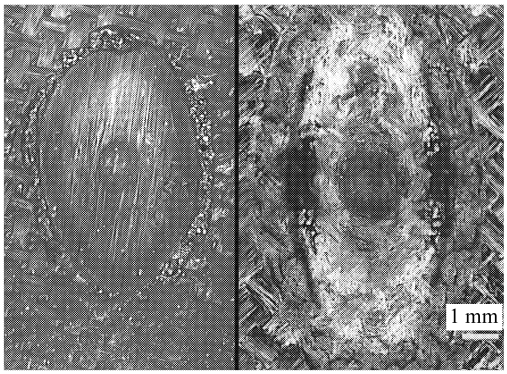


(a) Mass ablative rate



Thin sheet　　Thick sheet

(b) Surface mesh character before ablation



Thin sheet　　Thick sheet

(c) Surface character after laser ablation

图 3　入射激光光斑面积对碳纤维复合材料的质量烧蚀率的影响(薄厚对比)

Fig. 3　Mass ablative rate at different sizes of the laser irradiation spot (compare thin with thick samples)

3　结　论

(1) 红外激光辐照碳纤维/环氧树脂复合材料的烧蚀是基于激光的辐照热效应，材料烧蚀率与材料吸收的激光辐照能量在一定范围内呈正比关系。

(2) 在同样激光辐照能量下，半径为 0.65 mm

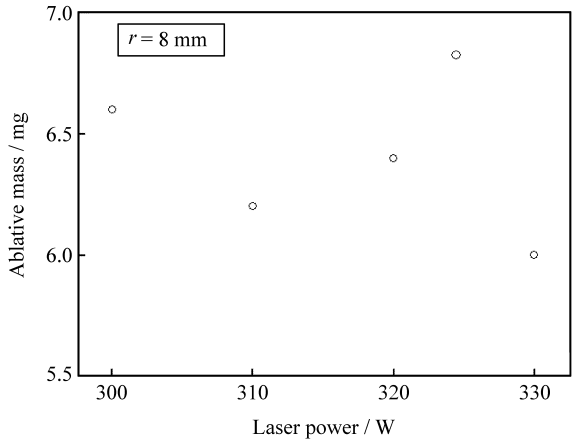


图 4　复合材料烧蚀质量随激光功率的变化

Fig. 4　Ablative mass vs laser power near the turning point of burning and unburning

的大功率激光辐照引起的复合材料的质量烧蚀率比半径为 5.50 mm 的小功率激光的辐照结果大一倍。该现象的产生是由于两者质量烧蚀过程不大一样，大光斑低功率下主要是化学分解气体和表面焦化引起的质量烧蚀；而在小光斑大功率密度下主要是表面烧蚀引起的质量迁移，喷射式燃烧引起表面层不断被破坏并形成明显的烧蚀孔。

（3）表面编织结构与材料杂质可能用于提高抗烧蚀性能，对该方面还有待进一步的研究。

（4）激光辐照下引起燃烧时，热解气体吸收激光能量，导致激光能量用于热解过程形成质量迁移的部分减少，从而使得材料质量烧蚀率在光致材料的燃烧阈值功率附近出现波动。

参考文献：

[1] Bakey A A. Dutton S, Kelly D. Composite materials for aircraft structures [M]. 2nd ed. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 63-64.

[2] McCarty J E. Design and cost viability of composites in commercial aircraft [J]. Composites, 1993, 24(4): 361-365.

[3] Dimitrienko Y I. Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperature Ⅰ: Materials [J]. Composites Part A, 1997, 28(5): 453-461.

[4] Henderson J B, Wiecek T E. A mathematical to predict the thermal response of decomposing, expanding polymer composites [J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(4): 373-393.

[5] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报，2007，24(1)：1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12

[6] Chen J K, Perea A, Allahdadi F A. Laser effects on the dynamic response of laminated composites [J]. J Compos Eng, 1995, 5(9): 1135-1147.

[7] 王贵兵，刘仓理，芳纶纤维复合材料对激光的吸收特性研究[J]. 强激光与粒子束，2003，15(11)：1065-1067.
Wang Guibing, Liu Cangli. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyarylamide fiber irradiated by high power laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(11): 1065-1067.

[8] 王贵兵，刘仓理. 凯芙拉环氧复合材料烧蚀阈值实验研究[J]. 激光技术，2003，27(5)：457-459.
Wang Guibing, Liu Cangli. Experimental research of the ablation threshold of Kevlar/epoxy [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 457-459.

[9] 刘淑英. YAG 连续激光对玻璃钢材料的破坏效应 [J]. 红外与激光工程，1999，28(6)：52-57.
Liu Shuying. Research of destructive effect produced by YAG continuous laser acting on fiberglass material [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(6): 52-57.

[10] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京：国防工业出版社，2002：65-70.
Sun Chengwei. Effects of laser irradiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 65-70.

[11] 郭亚林，梁国正，丘哲明，邓　杰. 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.
Guo Yalin, Liang Guozheng, Qiu Zheming, Deng Jie. Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(5): 84-88.