

# 激光辐照下二维编织碳纤维/环氧树脂复合材料的烧蚀特征

张家雷<sup>\*1</sup>, 王伟平<sup>1</sup>, 刘仓理<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

**摘要:** 开展了光纤激光对二维编织碳纤维/环氧复合材料的烧蚀试验研究, 获得了不同入射热流条件下编织复合材料的烧蚀特征, 分析了激光烧蚀机制。结合非接触测温和接触测温两种方法开展试验, 采用高温红外热像仪测试了复合材料前表面的瞬态温度场演变过程, 通过热电偶获得了复合材料后表面的温升数据。试验结果表明, 当入射激光功率密度在  $10^2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  量级时, 二维编织碳纤维/环氧树脂复合材料的环氧树脂发生了明显的质量迁移, 而碳纤维形貌变化不大; 在强激光辐照过程中, 二维编织碳纤维/环氧树脂复合材料的前后表面温差较大, 前表面最高温度接近  $2000^\circ\text{C}$ , 而后表面最高温度在  $200\sim500^\circ\text{C}$  之间。

**关键词:** 激光; 烧蚀; 热流; 温度场; 编织复合材料

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2017)03-0494-07

## Ablation characteristics of 2D braided carbon fiber/epoxy composites under laser irradiation

ZHANG Jialei<sup>\*1</sup>, WANG Weiping<sup>1</sup>, LIU Cangli<sup>2</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Ablation behaviors of 2D braided carbon fiber/epoxy composite irradiated by fiber laser were investigated. Ablation characteristics of braided composites under different thermal flux conditions were obtained and the laser ablation mechanism was analyzed. Combined with non-contact temperature measurement and contact temperature measurement, the transient temperature field evolution of the surface of the composite was measured by the high temperature infrared camera, while the temperature history of back surface was obtained by thermocouple. The experiment results show that when the level of incident laser power density is  $10^2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , the epoxy resin of the 2D braided composites has obvious mass transfer, but the morphology of the carbon fiber is not changed. Meanwhile under high-energy laser irradiation, the temperature difference between the front and back surface of 2D braided carbon fiber/epoxy composites is very large. The maximum temperature of the front surface is close to  $2000^\circ\text{C}$ , and the maximum temperature of the back surface is between  $200\sim500^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** laser; ablation; thermal flux; temperature field; braided composites

编织复合材料由编织制品与基体材料组成, 具有耐冲击、抗疲劳和耐烧蚀等优点, 在航空航天等高技术领域应用广泛。与传统复合材料层合板相比,

二维编织复合材料加强了纤维之间的连接, 使得整体性能得到大幅优化。迄今为止, 编织复合材料的性能研究已有不少工作, 包括弹性性能<sup>[1]</sup>、冲击压缩

性能<sup>[2]</sup>和湿热性能<sup>[3]</sup>等研究,但烧蚀性能和热力学行为研究还比较少。特别是,编织复合材料可用于飞行器隔热部件,其烧蚀性能对隔热结构设计至关重要。相比乙炔氧等传统加热方法,激光辐照<sup>[4]</sup>能够提供精确可测的外热流,已经成为材料燃烧和烧蚀研究的新型试验手段<sup>[5-6]</sup>。目前,国内外学者已经将强激光辐照用于碳纤维层合板的烧蚀性能研究,用于揭示复合材料烧蚀机制,相关工作包括激光与复合材料的耦合规律<sup>[7]</sup>、激光对复合材料的烧蚀试验<sup>[8-11]</sup>以及理论建模<sup>[12-15]</sup>等。

激光辐照下复合材料的烧蚀过程包含了热学、化学和力学响应,涉及到材料对激光能量的吸收和反射,相关过程非常复杂。同时,复合材料烧蚀主要是发生在激光辐照区域,该区域材料发生了剧烈的化学反应和明显的热力学损伤。但是,国内学者主要还是通过热电偶测试复合材料内部和后表面的温度,对激光辐照下复合材料前表面瞬态温度变化过程和烧蚀演化规律研究较少,缺少相关试验数据。

本文采用高能光纤激光器作为辐照光源,试验研究了激光辐照下二维编织碳纤维/环氧树脂复合材料的烧蚀特征,重点关注不同入射热流密度下材料烧蚀形貌,并通过非接触和接触测温两种方法测试了复合材料前表面瞬态温度场以及后表面温升情况。相关工作将为深入研究编织复合材料的烧蚀机制提供参考。

## 1 试验样品及激光光源

试验样品为 $\pm 45^\circ$ 编织角(纤维束与编织方向的夹角)的二维编织复合材料平板,经纱方向与纬纱方向正交,层数为5层。平板厚度为2.75 mm。碳纤维型号为T300,基体材料为环氧树脂,即碳纤维/环氧编织复合材料。环氧树脂与碳纤维的质量分数分别为40%和60%。制作工艺主要是:先将碳纤维束按照规定的编织角进行编织,再灌入环氧树脂,进行热压形成单层板;接着,根据需要将单层板在高温下热压形成规定层数的多层板。该工艺制作的编织复合材料具有较好的平整度,性能也更趋优良和稳定。

高能激光器包括固体激光、化学激光、气体激光和光纤激光等多种类型。近年来,光纤激光器硬件水平快速提升,输出功率已经能够满足部分机械切割要求。本次试验的激光辐照光源选用波长1 070 nm的光纤激光器,光斑尺寸为 $\varnothing 12$  mm,输出模式为连续波。试验前需要确定入射到材料表面的热流密度空

间分布情况,这里采用CCD光束功率测试仪测试了激光束光强的空间分布,如图1所示。左边和下边两条曲线是光束截面的空间分布情况。可见,激光束能量分布在中心处接近平顶分布,边缘处通过一定斜率下降。因此,当激光束辐照在复合材料表面时,辐照区域的热流密度分布可视为平顶分布,这样获得的烧蚀试验结果容易比较。

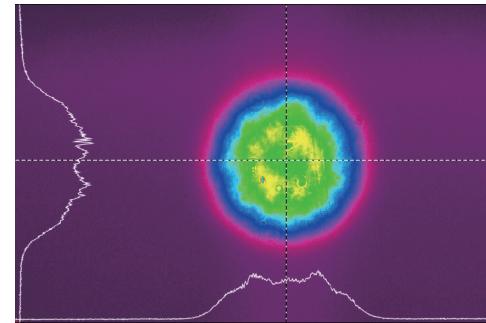


图1 激光束光强空间分布

Fig. 1 laser beam intensity distribution

## 2 结果与讨论

试验光路布局如图2所示。激光束辐照在编织复合材料表面,后表面温度测试通过热电偶这种接触测温实现,前表面由于存在辐射热流并且温度较高,可通过高温红外热像仪来测温。另外,为了使得出光和测温同时进行,采用同步机将红外热像仪和测温系统连接到激光器触发端口,这样获得的温度历程数据更加准确。

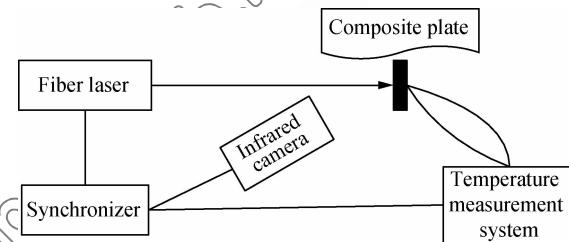


图2 试验光路布局图

Fig. 2 laser setups for irradiation test

通过改变激光辐照功率,试验研究了不同热流水平条件下二维编织复合材料的烧蚀行为。激光输出总功率分别为300 W、400 W和500 W,对应的激光功率密度(以下表示为 $I_0$ )分别为 $265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $353 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,辐照时间为10 s。

激光辐照后二维编织复合材料平板的宏观烧蚀形貌如图3所示。可见,材料烧蚀区域主要集中在激光辐照部位,周围和边缘形貌变化较小。这主要

是由于复合材料的热导率较低,辐照时间较短,周围影响较小。随着激光功率密度的提高,材料烧蚀面积逐步增大。碳纤维束形貌变化较小,而环氧树脂发生了明显的质量迁移,同时材料表面的上部有浓烟留下的痕迹。另外,通过观测发现,激光功率密度为  $265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  和  $353 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,材料后表面没有明显变化;激光功率密度为  $442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,后表面环氧树脂有焦化现象。

激光辐照前后的微观形貌对比如图 4 所示,图 4(a)~4(c) 分别为辐照前样品、光斑中心区域样品和光斑边缘区域样品。通过比较可以发现,激光辐照前,材料表面为碳纤维和环氧树脂的混合体,环氧树脂填充在纤维之间;激光辐照后,光斑中心区域为碳纤维单丝和微小的碳颗粒;在光斑边缘区域,存在熔化后重新聚积的胶体。

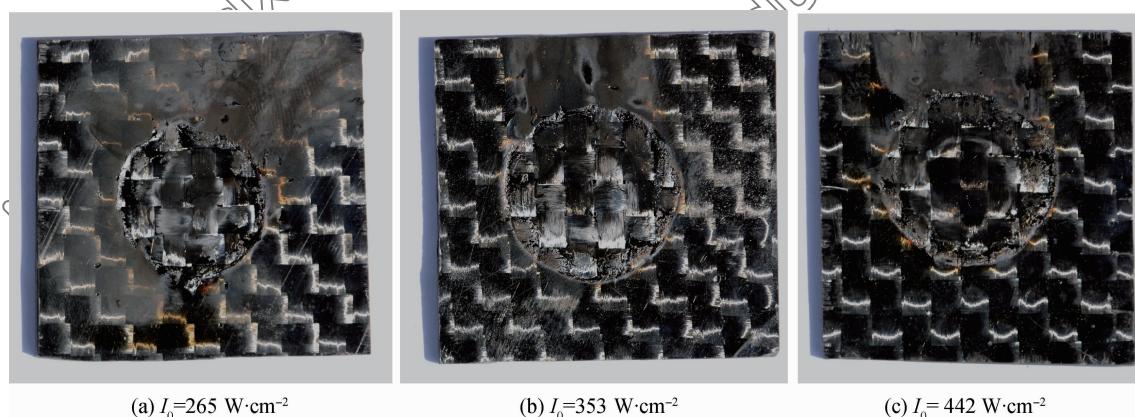


图 3 不同功率激光辐照后二维编织碳纤维/环氧复合材料板宏观烧蚀形貌

Fig. 3 Macroscopic ablation morphology of 2D braided carbon fiber/epoxy composites after laser irradiation with different power density

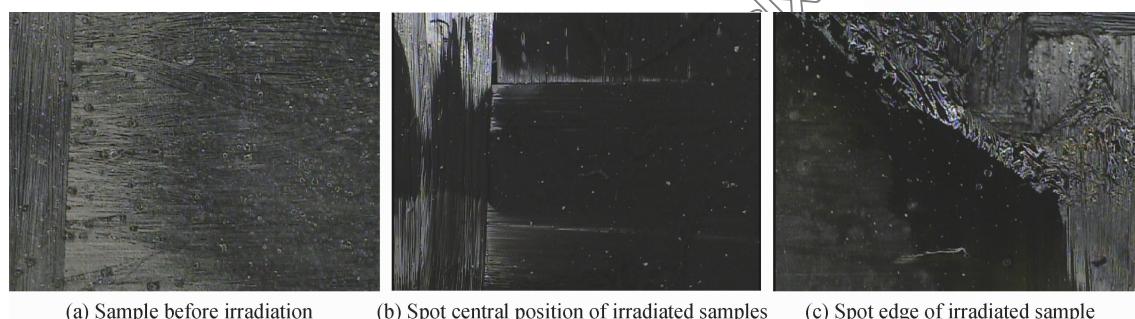


图 4 激光辐照前后二维编织碳纤维/环氧复合材料板微观形貌对比

Fig. 4 Comparison of micro morphology of 2D braided carbon fiber/epoxy composites before and after laser irradiation

激光辐照下复合材料前表面的瞬态温度场和烧蚀过程观测对机制研究非常重要,理论模型需要通过前表面温度数据来验证和完善。

图 5 给出了激光辐照阶段以及结束后编织复合材料平板前表面瞬态温度场的演变过程。激光功率

从烧蚀形貌来看,编织复合材料的烧蚀模式主要是形成烧蚀层、热分解层和原始材料层,碳纤维物理变化不明显,环氧树脂基体发生了明显的烧蚀。环氧树脂常温下处于玻璃态,高温下会发生熔化。在激光加热作用下,树脂基体首先熔融挥发,随辐照时间的延长,挥发物或分解产物不充分燃烧,并产生浓烟。碳纤维没有发生明显变化,主要是由于激光辐照功率密度不高,在  $10^2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  入射热流量级,碳纤维难以达到升华温度(约为  $3316^\circ\text{C}$ );另外,环氧树脂热分解形成了浓烟,减弱了碳纤维与氧气的化学反应。与层合板的试验结果对比可见,复合材料层合板的碳纤维会发生鼓包和脱层现象<sup>[9-15]</sup>,而编织复合材料没有明显的脱层现象,这表明编织复合材料整体性更好。

密度为  $265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,辐照时间为 10 s,记录时间为 20 s。可见,在激光辐照下,复合材料前表面温度迅速升高,在辐照时间 0.5 s 时,环氧树脂开始热分解,有少量气体溢出,前表面最高温度就达到了  $440^\circ\text{C}$ ;当辐照时间 1.0 s 时,前表面温度达到了

740℃, 环氧树脂烧蚀变得明显, 有高温气体溢出; 当辐照时间大于 2.5 s 后, 前表面温度接近 1 600℃, 开始进入稳定烧蚀状态, 气体溢出加剧, 材料表面发亮。当辐照时间由 5 s 增加到 10 s 的过程中, 前表面最高温度缓慢上升, 溢出的气体向四周扩散, 高温影响区域也不断扩大。由于激光辐照热流与辐射换热、对流换热以及化学反应热达到了动态平衡, 前表面温度变化不大。在激光辐照结束时刻, 前表面最

高温度达到最大值, 约为 1 720℃。当激光辐照结束后, 前表面温度迅速下降。在辐照结束 2 s 后, 前表面最高温度下降到 620℃, 这主要是由于辐射换热和对流换热造成的。同时, 当激光辐照结束后, 材料板温度逐渐趋于一致, 气体溢出效应迅速减弱。当时间为 20 s 时, 前表面温度下降到 260℃左右, 前表面温差变得较小。通过试验还发现, 编织纤维束温度更高, 环氧树脂堆积处温度较低。

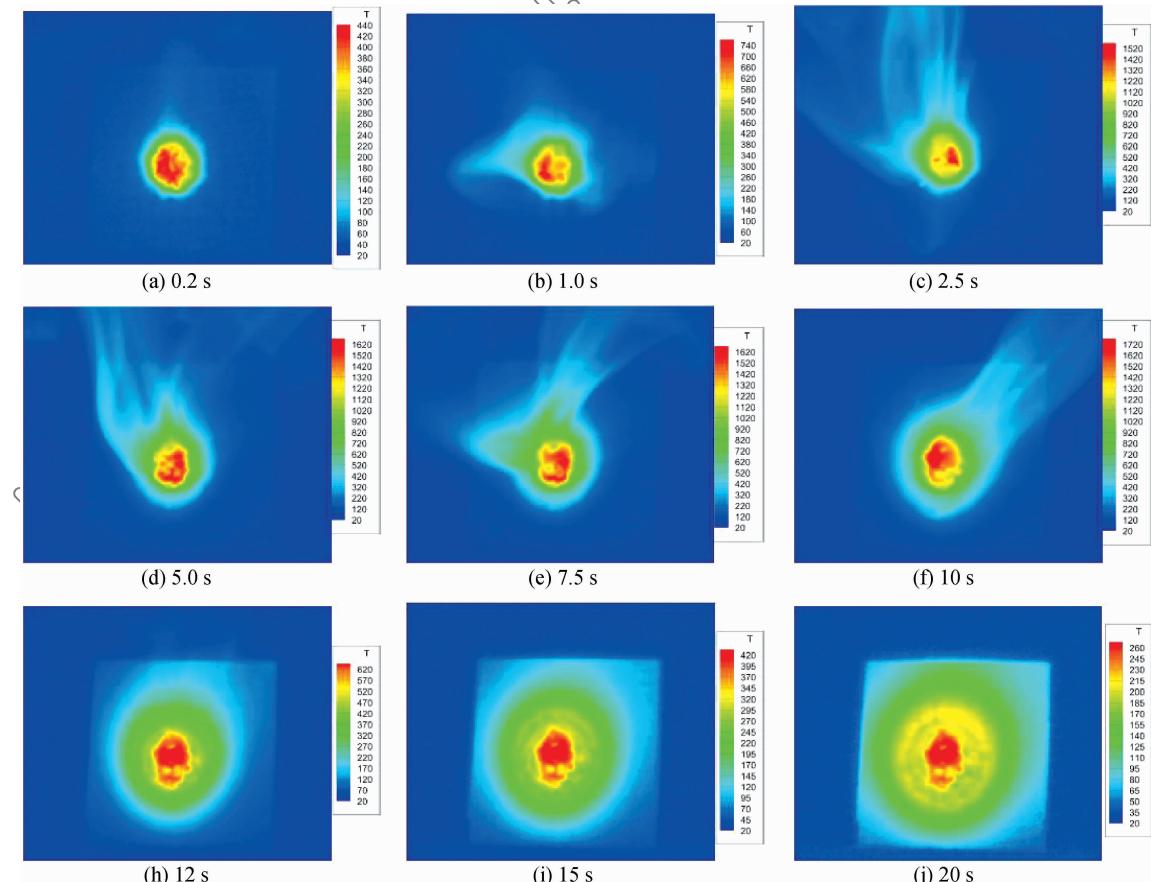


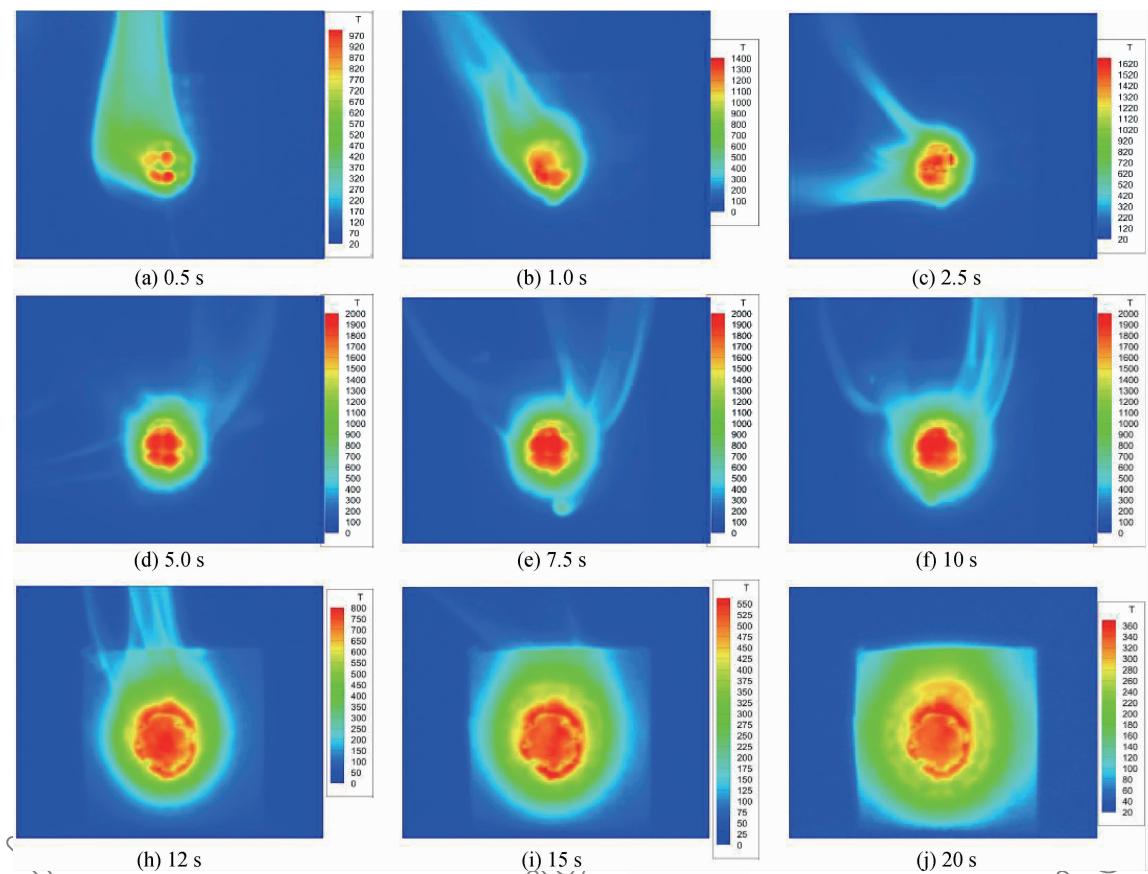
图 5 不同时刻二维编织碳纤维/环氧复合材料板前表面温度场变化 (功率  $I_0 = 265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 辐照时间  $t = 10 \text{ s}$ )

Fig. 5 Temperature field variation of the front surface of 2D braided carbon fiber/epoxy composites at different time  
(Laser power density  $I_0 = 265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , Irradiation time  $t = 10 \text{ s}$ )

增加入射激光功率密度, 研究了编织复合材料平板前表面瞬态温度场的变化过程。当激光功率密度为  $442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 辐照时间为 10 s, 复合材料平板前表面温度场的变化过程如图 6 所示。可见, 随着激光功率密度提高, 复合材料前表面温升速率加快, 并迅速达到稳定烧蚀状态。在辐照时间 0.2 s 时, 前表面最高温度达到了 970℃, 并有大量气体溢出, 环氧树脂开始烧蚀。当辐照时间大于 1.0 s 后, 前表面温度接近 1 400℃。当辐照时间大于 2.5 s 后, 前表面温度达到 1 600℃以上, 达到动态能量平衡阶

段。在激光辐照结束时刻, 前表面最高温度接近 2 000℃。相比图 5 可见, 随着激光功率提高, 前表面稳态烧蚀时刻的最高温度增大, 烧蚀区域也增大。当激光辐照结束后, 前表面温度迅速下降, 溢出气体也减小。当时间为 20 s 时, 前表面温度下降到 360℃左右, 较上面工况稍高。

编织复合材料前表面最高温度-时间曲线如图 7 所示, 激光功率密度分别为  $265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  和  $442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 温度采样率为 4 次/秒。可见, 激光辐照下复合材料前表面温度迅速升高, 在 1 500~

图 6 不同时刻二维编织碳纤维/环氧复合材料板前表面温度场变化(功率  $I_0=442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 辐照时间  $t=10 \text{ s}$ )Fig. 6 Temperature field variation of the front surface of 2D braided carbon fiber/epoxy composites at different time (Laser power density  $I_0=442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , Irradiation time  $t=10 \text{ s}$ )

2 000℃温度范围内复合材料表面发生烧蚀。当激光功率密度  $265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 烧蚀阶段的最高温度有抖动的现象; 当激光功率密度  $442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 烧蚀阶段的最高温度抖动现象减弱。该温度抖动主要是烧蚀动态变化造成的, 特别是分解气体释放过程不规律, 影响了红外热像仪的测试。当激光辐照结束后, 复合材料前表面温度迅速下降, 该阶段的温度曲

线非常光滑。

复合材料后表面中心点温度如图 8 所示, 激光功率密度分别为  $265 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  和  $442 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。可见, 当激光辐照约  $1.5 \text{ s}$  后, 复合材料后表面才开始明显升温。激光辐照结束后( $10 \text{ s}$  以后), 由于热扩散作用, 复合材料后表面温度仍然在快速上升。直到约  $15 \text{ s}$  之后, 复合材料后表面温度才开始下降, 并且下

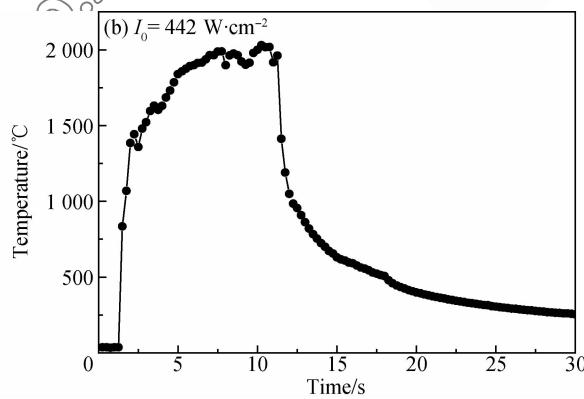
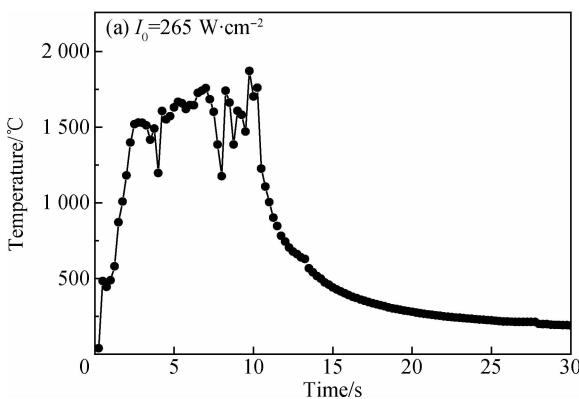


图 7 二维编织碳纤维/环氧复合材料前表面最高温度-时间曲线

Fig. 7 Maximum temperature-time curves of 2D braided carbon fiber/epoxy composites at front surface

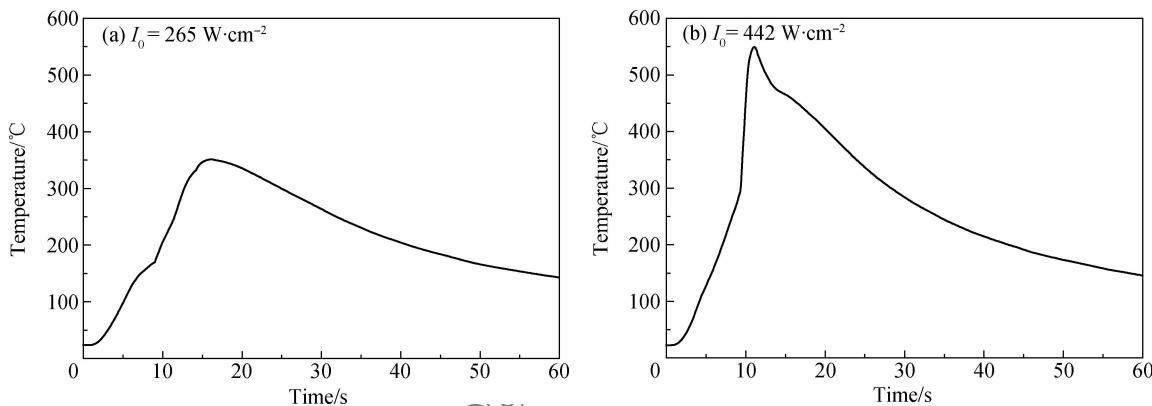


图 8 二维编织碳纤维/环氧复合材料后表面中心温度-时间曲线

Fig. 8 Maximum temperature-time curves of 2D braided carbon fiber/epoxy composites at rear surface

降速率并不快,这主要是由于前表面温度仍然比较高,前表面到后表面的热扩散效应依然明显。

综合图 7 和图 8 可见,由于复合材料热导率较低,在激光辐照过程中材料前后面温差非常大。这种温度差将导致材料内部热膨胀不均匀,热应力将使复合材料内部容易发生力学损伤。

### 3 结 论

(1)研究了光纤激光对二维编织碳纤维/环氧树脂复合材料的烧蚀特征,通过非接触测温和接触测温两种方法研究了编织复合材料的瞬态热响应。在激光辐照过程中,复合材料前表面迅速发生烧蚀,温度上升到接近 2 000°C,并伴有热解气体从试样内部溢出;复合材料后表面最高温度在 200~500°C 之间。

(2)激光辐照对碳纤维和环氧树脂的影响不同:激光辐照过程中环氧树脂容易发生裂解、熔化和挥发等化学物理变化,而碳纤维变化较小。主要原因是:在功率密度  $10^2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  量级的激光辐照下,环氧树脂能够达到熔化和热解温度,而碳纤维达不到升华温度。

(3)二维编织碳纤维/环氧树脂复合材料是纤维与基体构成的混合体。当激光辐照导致树脂基体发生损伤后,编织之间的粘结作用减弱,这将会影响复合材料整体的力学性能。

### 参考文献:

- [1] BYUN J H. The analytical characterization of 2-D braided textile composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(5): 705-716.
- [2] 张超, 许希武, 郭树祥. 二维二轴  $1 \times 1$  编织复合材料细观结构模型及力学性能有限元分析[J]. 复合材料学报, 2011, 28(9): 1599-1602.

[3] 杨扬, 徐绯, 张岳青, 等. 二维平纹编织 C/SiC 复合材料的超高速碰撞实验[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 156-162.

ZHANG C, XU X W, GUO S X. Microstructure model and finite element analysis of mechanical properties of 2D  $1 \times 1$  biaxial braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(6): 215-222 (in Chinese).

[4] 杨扬, 徐绯, 张岳青, 等. 二维平纹编织 C/SiC 复合材料的超高速碰撞实验[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 156-162.

YANY Y, XU F, ZHANG Y Q, et al. Hypervelocity impact experiment on two-dimensional plain-woven C/SiC composites[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 156-162 (in Chinese).

[5] 孙承纬, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

SUN C W, LU Q S, FAN Z X, et al. Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002 (in Chinese).

[6] BOLEY C D, FOCHS S N, RUBENCHIK. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam[J]. Journal of Directed Energy, fall, 2008: 15-24.

[7] BOLEY C D, CUTTER K P, FOCHS S N. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(4): 043106-043106-5.

[8] 张永强, 王伟平, 唐小松, 等. 两种纤维增强复合材料与连续激光耦合规律[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(10): 1599-1602.

ZHANG Y Q, WANG W P, TANG X S, et al. Coupling rules of two fiber reinforced composites with continuous wave laser. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(10): 1599-1602 (in Chinese).

[9] 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 G B, LIU C L. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by high power laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(11): 1065-1067 (in Chinese).

[10] 李雅娣, 吴平, 马喜梅, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料层板连

- 续激光烧蚀试验研究[J]. 纤维复合材料, 2010, 21(2): 21-24.
- LI Y D, WU P, MA X M. The tests of carbon fiber/epoxy laminated composites under continuous laser irradiation[J]. Fiber Composites, 2010, 21(2): 21-24 (in Chinese).
- [10] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 切向气流对激光辐照树脂基复合材料的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2848-2852.
- CHEN M S, JIANG H M, LIU Z J. Effect of tangential airflow on resin composite irradiated by laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(12): 2848-2852 (in Chinese).
- [11] CHEN W W, WU X Q, HUANG C G. Ablation behaviors of carbon reinforced polymer composites by laser of different operation modes[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 23-28.
- [12] GRIFFIS C A, MASUMURA R A, CHANG C I. Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating[J]. Journal of Composite Materials, 1981, 15: 427-442.
- [13] CHEN J K, SUN C T, CHANG C I. Failure analysis of a graphite/epoxy laminate subjected to combined thermal and mechanical loading[J]. Journal of Composite Materials, 1985, 19: 408-423.
- [14] BAI Y, VALLEE T, KELLER T. Modeling of thermo-physical properties for FRP composites under elevated and high temperature[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(15-16): 3098-3109.
- [15] 张家雷, 刘国栋, 王伟平, 等. 激光对碳纤维增强复合材料的热烧蚀数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(8): 1888-1892.
- ZHANG J L, LIU G D, WANG W P. et al. Simulation to thermal ablation of carbon fiber reinforced composites under laser irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(8): 1888-1892 (in Chinese).