

文章编号 1004-924X(2011)02-0482-05

切向空气气流对激光烧蚀碳纤维复合材料过程的影响

陈敏孙, 江厚满

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:研究了靶材表面存在和不存在切向空气气流时, 975 nm 连续激光对碳纤维增强树脂基复合材料的辐照效应。两种情况下靶材的动态响应过程明显不同, 没有切向气流时, 激光辐照 1.28 s 后, 向外喷出的热分解产物在空气中燃烧, 出现火焰同时伴有浓烟; 有切向气流时, 没有观察到带火焰和浓烟的燃烧现象, 而是在激光辐照后的瞬间, 激光作用区出现灼烧状亮斑, 并间歇有少许颗粒向外喷出。分析认为, 向外溢出的树脂基热分解产物会抑制氧气向靶材表面扩散, 从而对碳纤维具有保护作用; 切向气流的加载不仅会破坏热分解产物对碳纤维的保护作用, 还会促使氧气到达碳纤维表面, 进而导致碳纤维在较低的温度(约 850 °C)发生氧化烧蚀。

关键词:激光辐照; 碳纤维复合材料; 切向气流; 氧化烧蚀

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0482

Influence of tangential airflows on process of laser ablating carbon-fiber composites

CHEN Min-sun, JIANG Hou-man

(College of Opto-electronic Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An experiment of 975 nm continuous wave laser irradiating carbon-fiber reinforced resin composites was studied, while the front surface of a target was with and without tangential airflow loadings. The results show that the dynamic responses are obviously different for two different cases. While the front surface of the target is without tangential airflow loading, the ejected inner pyrolysis products ignite surface combustion which is accompanied by dense smoke and flame after laser irradiation for 1.28 s. While the front surface of the target is with tangential airflow loading, there is not obvious combustion flame, but a burn-like bright spot is in the laser-irradiated zone and a little particles spill into the air intermittently. Analysis indicates that the out overflows of pyrolysis products will inhibit the diffusion of oxygen to the target surface, which has a protective effect on the carbon fiber. The presence of tangential airflow not only undermine the protective effect of pyrolysis products on the carbon fiber, but also promote the diffusion of oxygen to the surface. Therefore, the loading of tangential airflow will result in the carbon fiber suffered from oxidative ablation at the low temperature (850 °C).

Key words: laser irradiation; carbon-fiber composite; tangential airflow; oxidative ablation

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 国防科技基础研究基金资助项目

1 引言

自1960年Maiman研制出世界上第一台红宝石激光器后,激光作为一种以光速传播的定向集中的能量束引起了学者们广泛的关注,各种新型激光器层出不穷,如气体激光器、液体激光器、固体激光器、准分子激光器和半导体激光器等。由于激光具有亮度高、方向性好和发散角小等特点,已被广泛应用于信息、医学、工业和军事等领域^[1-2]。碳纤维复合材料具有比强度和比刚度高、成型工艺简单、材料性能可设计等优点,在飞行器上得到广泛的运用^[3-4]。因此,研究碳纤维复合材料在激光作用下的损伤规律具有一定的理论与现实意义。

在空气自然对流环境下,激光对碳纤维复合材料的辐照效应已有广泛研究^[5-9],但其更重要的应用是对高速运动靶目标的破坏。激光对高速运动靶目标的破坏涉及气流换热动力学,问题可以等效为靶目标静止不动,而靶表面有切向强迫气流流过。当靶材表面存在切向强迫气流时,激光辐照效应可能不同,阈值参数也可能变化。切向强迫气流作用下,激光对钢、铁和铝等典型金属材料的辐照效应已有广泛研究^[10-12],而对复合材料的辐照效应研究尚少^[13]。因此,开展切向强迫气流作用下激光对碳纤维复合材料的辐照效应研究有一定的意义。

据此,本文开展了靶材表面存在和不存在切向空气气流时,975 nm连续激光对碳纤维增强树脂基复合材料辐照效应的实验研究,重点考察了切向空气气流对激光烧蚀碳纤维复合材料过程的影响。

2 实验结果及分析

实验采用975 nm连续波激光器,激光功率密度为 110 W/cm^2 ,光斑直径约20 mm,靶材厚度为2 mm,气流速度约30 m/s。图1给出的是激光辐照碳纤维复合材料实验装置示意图,其中,摄像机的帧频是25 frame/s。

通过回放摄像机纪录的靶材动态响应过程发现,没有切向气流时,激光开始辐照的瞬间出现亮斑(如图2(a)),随即有少许白烟从激光作用区冒

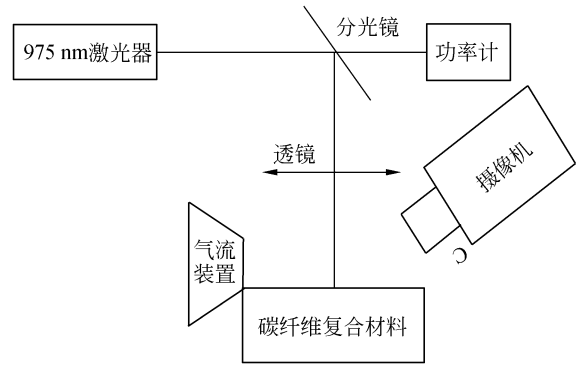
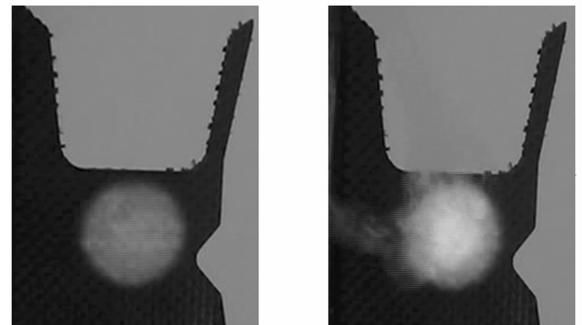


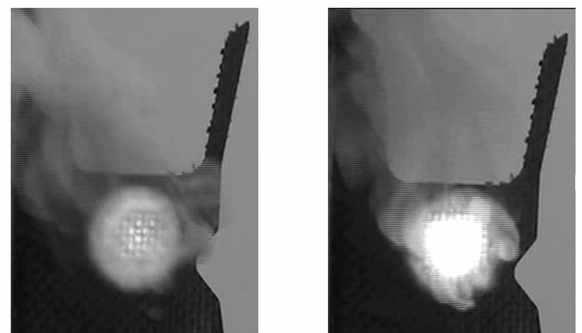
图1 激光辐照碳纤维复合材料实验装置示意图
Fig. 1 Sketch map of experimental setup for laser irradiating carbon fiber composite

出(如图2(b)),随后变浓,并在激光作用区出现亮斑(如图2(c)),激光辐照1.28 s后,向外喷出的热解产物在空气中燃烧,出现火焰同时伴有浓烟(如图2(d)),这一过程持续了较长的时间,在激光辐照18 s后,靶材后表面也出现火焰(如图2(f)),激光停止辐照后,材料继续缓慢燃烧。



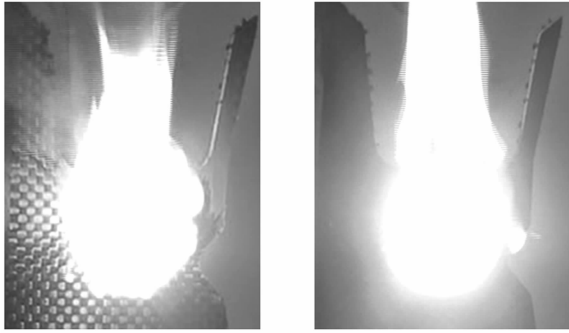
(a)开始辐照
(a)Irradiation began

(b)辐照0.28 s
(b)Irradiation for 0.28 s



(c)辐照0.6 s
(c)Irradiation for 0.6 s

(d)辐照1.28 s
(d)Irradiation for 1.28 s

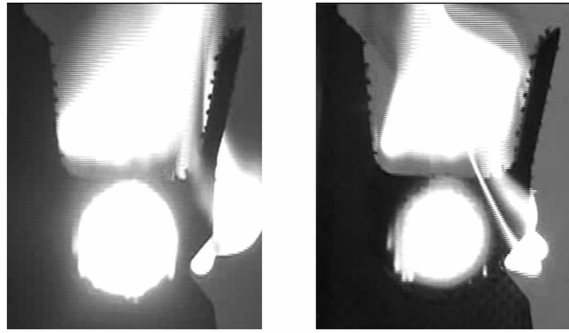


(e) 辐照 1.6 s

(f) 辐照 18 s

(e) Irradiation for 1.6 s

(f) Irradiation for 18.0 s



(g) 停止辐照

(h) 停止辐照后 1.0 s

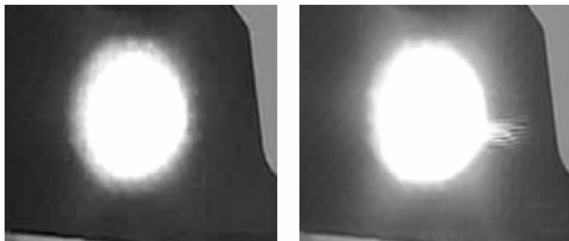
(g) Irradiation stopped

(h) After irradiation stop by 1.0 s

图 2 无切向气流时碳纤维复合材料的部分摄像图
Fig. 2 Pictures of laser irradiating carbon/epoxy composites without tangential airflow

有切向气流时,靶材的动态响应与没有气流时明显不同,激光开始辐照的瞬间出现白炽亮斑(如图 3(a)),随后白炽亮斑变亮、呈灼烧状(如图 3(b)),并间歇有少许颗粒向外喷出(如图 3(c)),激光停止辐照后,激光作用区仍呈白炽状。

图 4 给出的是碳纤维增强树脂基复合材料在 975 nm 连续激光辐照下的破坏形貌,其中,(a)对应的是无气流时激光辐照 30 s,(b)对应的是有气流时激光辐照 56 s。从图 4 中可以看出,没有气

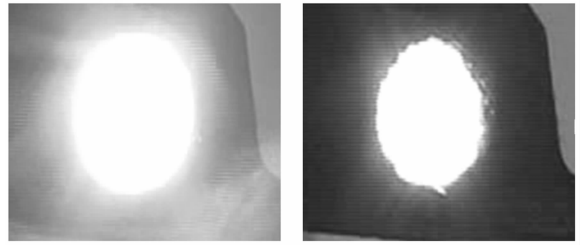


(a) 开始辐照

(b) 辐照 1.2 s

(a) Irradiation began

(b) Irradiation for 1.2 s

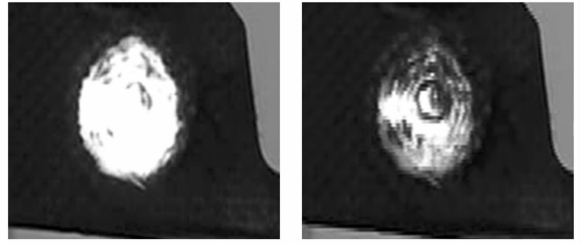


(c) 辐照 26.0 s

(d) 停止辐照

(c) Irradiation for 26.0 s

(d) Irradiation stopped



(e) 停止辐照后 0.48 s

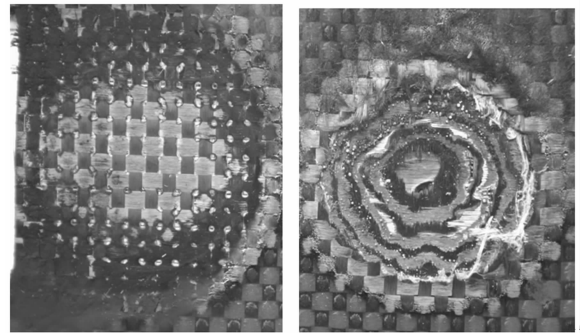
(f) 停止辐照后 1.0 s

(e) After irradiation stop by 0.48 s

(f) After irradiation stop by 1.0 s

图 3 有切向气流时碳纤维复合材料的部分摄像图
Fig. 3 Pictures of laser irradiating carbon/epoxy composites with tangential airflow

流时,激光辐照区只发生了树脂基体的热解反应,碳纤维并未破坏;而有气流时,出现了明显的烧蚀坑,最大烧蚀深度约 1.5 mm。



(a) 无气流(30 s)

(b) 有气流(56 s)

(a) Without airflow(30 s)

(b) With airflow(56 s)

图 4 碳纤维增强树脂基复合材料的破坏形貌

Fig. 4 Damage morphologies of carbon-fiber reinforced resin composites

碳纤维的主要成分是碳,所以其氧化特性主要取决于碳的氧化特性。研究表明,碳在空气中加热到 400 °C 左右开始氧化,生成 CO 或

CO₂^[14],树脂基热解碳的氧化起始温度约450℃,碳纤维的氧化起始温度约850℃^[8]。因此,结合靶材的动态响应过程分析认为,当靶材表面没有切向气流时,向外溢出的树脂基体热解产物会抑制氧气向靶材表面扩散,进而抑制热解碳和碳纤维发生氧化烧蚀,从而对热解碳和碳纤维具有一定的保护作用,此时,认为只有当激光作用区温度达到碳的气化温度材表面3300℃后,热解碳和碳纤维才发生汽化烧蚀;当靶材表面存在切向空气气流时,气流的加载不仅会破坏热解产物对热解碳和碳纤维的保护作用,还会促使氧气到达靶材表面,进而导致热解碳和碳纤维在较低的温度发生氧化烧蚀。初步分析认为,切向空气气流的加载有利于激光对碳纤维复合材料的破坏。

3 结 论

开展了靶材表面存在和不存在切向空气气流时,975 nm连续激光对碳纤维增强树脂基复合材料辐照效应的实验研究。两种情况下靶材的动

态响应过程明显不同。没有切向气流时,激光开始辐照的瞬间出现亮斑,随即有少许白烟从激光作用区冒出,接着变浓,并在激光作用区出现斑点;激光辐照1.28 s后,向外喷出的热分解产物在空气中燃烧,出现火焰同时伴有浓烟;激光停止辐照后,材料继续缓慢燃烧。有切向气流时,并没有观察到带火焰和浓烟的燃烧现象,而是在激光作用区出现灼烧状亮斑,并间歇有少许颗粒向外喷出;分析认为,向外溢出的树脂基热解产物会抑制氧气向靶材表面扩散,从而对碳纤维具有保护作用。切向气流的加载不仅会破坏热解产物对碳纤维的保护作用,还会促使氧气到达碳纤维表面,进而导致碳纤维在较低的温度(约850℃)发生氧化烧蚀。

此外,由于图4(a)、(b)的辐照时间不一样,尚不能充分说明切向空气气流的加载有利于激光对碳纤维复合材料的破坏。因此,下一阶段的工作是从实验上进一步研究切向空气气流对激光破坏碳纤维复合材料的影响,并从理论和数值模拟方面对破坏机理进行分析。

参考文献:

- [1] 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.
SUN CH W, LU Q SH, FAN ZH X, et al.. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 田玉冰,檀慧明,田智辉,等.四程抽运 Yb: YAG 薄片激光器[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 386-391.
TIAN Y B, TAN H M, TIAN ZH H, et al.. Laser diode array pumped Yb: YAG thin disc laser with four-pass optical coupling system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 386-391. (in Chinese)
- [3] 孙德伟,张广玉,张其馨,等.石墨纤维增强铝基复合材料在空间遥感器镜筒结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 368-374.
SUN D W, ZHANG G Y, ZHANG Q X, et al.. Application of graphite fiber reinforced aluminum matrix composite to body tube structure in space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 368-374. (in Chinese)
- [4] 高巨龙,于锦生.复合材料发动机壳体在航天运载中的应用[J]. 纤维复合材料, 2005, 53(3): 53-55.
GAO J L, YU J SH. Application of composite motor case in space carrier rocket[J]. *Fiber Composites*, 2005, 53(3): 53-55. (in Chinese)
- [5] RODDEN W S O, KUDESIA S S, HAND D P, et al.. A comprehensive study of the long pulse Nd: YAG laser drilling of multi-layer carbon fiber composites [J]. *Opt Commun*, 2002, 210: 3-6.
- [6] 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.
GUO Y L, LIANG G ZH, QIU ZH M, et al.. Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composites [J]. *Acta Material Composite Sinica*, 2006, 23(5): 84-88. (in Chinese)
- [7] 万红,胡凯为,穆景阳,等.树脂基复合材料在连续激光作用下的损伤[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 6-10.
WAN H, HU K W, MU J Y, et al.. Damage analysis of fiber reinforced resin matrix composites irradiated by CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 6-10. (in Chinese)
- [8] 陈博,万红,穆景阳,等.重频激光作用下碳纤维/环

- 氧树脂复合材料热损伤规律[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 547-551.
- CHEN B, WAN H, MU J Y, *et al.*. Ablation mechanism of carbon fiber/epoxy composite irradiated by repetition frequency laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 547-551. (in Chinese)
- [9] 黄永光, 刘世炳, 龙连春, 等. Nd: YAG 连续激光烧蚀碳纤维复合材料的过程观察[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2042-2046.
- HUANG Y G, LIU SH B, LONG L CH, *et al.*. Observation on the process of continuous wave Nd: YAG laser ablation on carbon fiber composite material [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, 35(12): 2042-2046. (in Chinese)
- [10] 王伟平, 刘常龄, 王春彦, 等. 切向气流对激光加热材料的影响[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(3): 373-377.
- WANG W P, LIU CH L, WANG CH Y, *et al.*. Tangential airflow influence on laser heating materials[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(3): 373-377. (in Chinese)
- [11] 张健, 黄晨光. 外部流场对激光加热运动目标影响的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1817-1821.
- ZHANG J, HUANG CH G. Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1817-1821. (in Chinese)
- [12] BOLEY C, FOCHS S, RUBENCHIK A. Lethality effects of a high-power solid-state laser[R]. *Direct Energy Symposium*, 2007, UCRL-CONF-229010.
- [13] SEMAK V V, MILLER T F. Modeling of laser charring and material removal in fiberglass materials [J]. *Journal of Directed Energy*, 2006(2): 5-21.
- [14] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 227-258.
- HUANG X H. *Theory about Iron and Steel Metallurgy* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 227-258. (in Chinese)

作者简介:



陈敏孙(1981—), 男, 江西崇仁人, 博士研究生, 2004 年于华中师范大学获得学士学位, 2006 年于国防科学技术大学获得硕士学位, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: chenminsun@163.com

江厚满(1970—), 男, 安徽怀宁人, 博士后, 副教授, 1993 年、1996 年、1999 年于国防科技大学分别获得学士、硕士和博士学位, 主要从事激光与物质相互作用和光学系统杂散光方面的研究。E-mail: jhm3395@sina.com