



·激光的热和力学效应·

激光辐照下预加载 CFRC 层合板断裂行为实验研究

韩永超, 韦成华, 张冉, 王家伟, 吕玉伟

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

摘要: 针对激光与机械载荷联合作用下碳纤维/环氧树脂增强复合材料 (CFRC) 层合板失效时间的预测需求, 实验研究了不同激光功率密度 (70~210 W/cm²)、不同预应力水平 (拉伸强度的 50% 和 70%)、不同光斑尺寸 (拉伸试件宽度的 70% 和 100%) 下 2 mm 厚层合板的失效机理, 获取了不同影响因素对断裂时间的影响规律。结果表明: 预加载层合板失效机制为迎光面环氧树脂基底材料热解、纤维氧化断裂, 背光面剩余结构偏脆性断裂; 在预应力一定条件下, 试件断裂时间与辐照激光功率密度成指数规律; 预应力水平对断裂时间影响显著。

关键词: 激光辐照; 预加载; CFRC 层合板; 断裂

中图分类号: TN246

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210329

Experimental study on fracture behavior of preloaded CFRC laminate under laser irradiation

Han Yongchao, Wei Chenghua, Zhang Ran, Wang Jiawei, Lü Yuwei

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

Abstract: To predict the failure time of carbon fiber/ epoxy resin reinforced composite laminates under the combined action of laser and mechanical load, different laser power density (70–210 W/cm²), different pre-stress levels (50% and 70% of tensile strength) were studied experimentally. The failure mechanism of 2 mm laminates under different spot sizes (70% and 100% of the width of tensile specimens) was obtained, and the influence rule of different influencing factors on fracture time was obtained. The results show that the failure mechanism of pre-loaded laminates is the pyrolysis of the substrate material of epoxy resin, the oxidation fracture of the fiber and the brittle fracture of the residual structure of the back surface. Under certain pre-stress conditions, the fracture time and the irradiated laser power density are exponential. The pre-stress level has a significant effect on the fracture time.

Key words: laser; preloaded; CFRC laminate; fracture

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, 在交通运输、军事和航空航天等领域得到广泛的应用, 如美国 F-35 战机所使用的碳纤维复合材料占到整个机体材料的 1/4。激光在发明之初, 就因其高亮度、高能量以及单色性好的特点, 被应用于材料的加工、检测、考核等领域, 因此开展对激光与碳纤维复合材料相互作用过程的研究成为新的方向。其中, 激光对复合材料的作用过程和机理已经备受学者关注的重点, 主要表现在烧蚀的热过程研究, 即烧蚀效应现象实验研究^[1-7]、烧蚀过程与效应机理分析及数值建模^[8-19]等。譬如, Kibler 开展了连续波 CO₂ 激光辐照参数、试样厚度及铺层方式等对碳纤维环氧树脂复合材料烧蚀效应研究^[1]。郭亚林等^[2]分析了入射激光的辐照时间、强度和光斑直径对碳纤维增强有机硅改性环氧树脂复合材料质量烧蚀率的影响规律, 认为辐照时间对质量烧蚀率影响很小, 但质量烧蚀率随激光强度和光斑直径增大而增大。陈博等^[3-4]分析了峰值功率密度、辐照时间、重复频率和脉冲宽度等参数对碳纤维增强环氧树脂基复合材料烧蚀规律的影响, 认为热烧蚀率随峰值功率密度和重复频率提高而增大, 随辐照时间增加而减小, 并最终均趋于稳定, 而增加脉冲宽度会降低碳纤维损伤的功率密度阈值。黄永光等^[5]通过研究了连续 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, 认为材料烧蚀质量与激光辐照能量成正比关系。李雅娣等^[6]认为碳纤维/环氧树脂复合

* 收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-12-26
联系方式: 韩永超, 526702348@qq.com。
通信作者: 韦成华, weichenghua@nint.ac.cn。

材料 CFRC 层压板的激光烧蚀主要经历树脂基体燃烧、纤维分层、纤维气化及样品穿孔几个过程。陈敏孙等 [7] 研究了不同气流条件下碳纤维环氧树脂复合材料的激光效应实验,认为切向气流一方面可减弱热解气体对入射激光的屏蔽作用,另一方面对样品有冷却作用,但空气流的加载有助于纤维氧化烧蚀。在碳纤维层合板结构损伤方面,研究工作主要集中于材料激光辐照损伤的响应结果,数值模拟中更多的是以常规的材料实验获得的高温物性参数作为基础,公开的文献报道比较少。万红等 [20] 重点研究了三种复合材料的激光损伤形式,仅定性地给出不同损伤形式下力学性能的变化。陈明等 [21] 用失效时间来描述激光功率密度和预应力共同作用下复合材料的力学响应,未能反映激光损伤后的材料力学特性变化。陈博等 [22] 侧重研究了重频激光-载荷联合作用下复合材料的失效规律,王家伟等 [23] 研究了不同加载条件下碳纤维层合板在激光辐照厚度方向的温度分布,结合测试得到了碳纤维层合板拉伸强度的温度相关性参数建立残余拉伸强度预报模型, Liu 等人 [24] 研究了 CFRC 层合板在连续激光辐照下的热机械响应,并用实验结果建立了数值模型预测了层合板开裂时间。

现有研究对于碳纤维复合材料常温性能关注较多,而高温性能研究较少,尤其是如热-力联合加载条件下多物理场耦合的复合材料辐照损伤机理等问题需做更深入的研究。为此,本文开展了预加应力比 0.5 和 0.7 条件下、功率密度在 $70\sim 210\text{ W/cm}^2$ 的连续激光辐照 2 mm 厚碳纤维/环氧树脂增强复合材料 (CFRC) 层合板损伤实验,获取了试件前后表面温升、断裂时间等效应规律,分析了激光功率密度对断裂时间的影响规律,同时将辐照损伤试件进行显微 CT 扫描,进一步从微观角度验证了 CFRC 层合板的逐层失效模式,研究成果可为揭示有预加载条件下碳纤维复合材料层合板辐照损伤机理以及碳纤维复合材料激光切割技术提供一定的理论和现实指导意义。

1 样品制备与实验方法

1.1 样品制备

实验试件材料为碳纤维/环氧树脂复合材料 (CFRC) 层合板,增强纤维为 T700 碳纤维布,厚度 0.125 mm,环氧树脂牌号 E44,采用 $[0^\circ/90^\circ]$ 正交铺层方式模压而成,碳纤维体积分数为 65%,密度 1.576 g/cm^3 。拉伸试件尺寸为 $250\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。试件两端粘接金属加强片以增大摩擦,避免高载荷条件下试件打滑。

1.2 实验方法

激光辐照预加载碳纤维/环氧树脂复合材料层合板实验系统如图 1 所示。

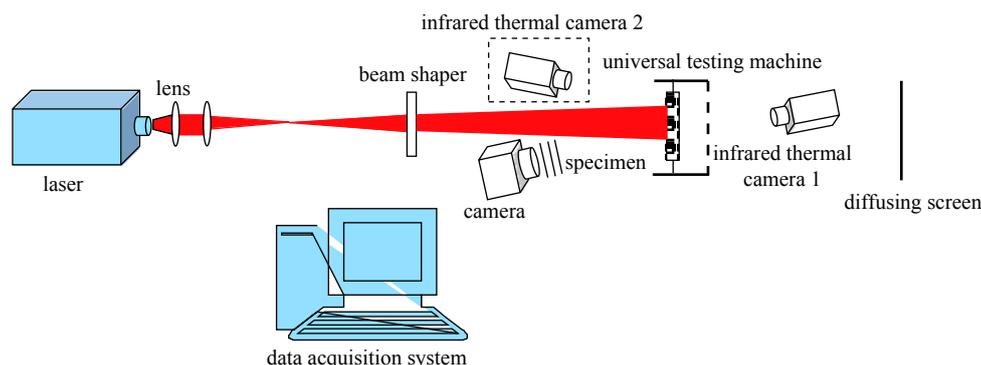


Fig. 1 Experimental system of laser irradiation pre-loaded composite materials

图 1 激光辐照预加载复合材料实验系统示意图

如图 1 所示,激光输出后经过整形元件成为分布相对均匀方形光斑,激光器波长为 $1.1\ \mu\text{m}$,光斑尺寸为 $1.4\text{ cm}\times 1.4\text{ cm}$ 。实验中采用红外热像仪记录试件前、后表面温度,以高速相机记录试件在激光辐照和发生断裂时的实验现象。电子万能试验机最大载荷为 50 kN,加载精度为 0.1%。激光光斑分布及在试件上的辐照区域示意图如图 2 所示。

首先在常温下对同批次试件进行力学性能测试,得到试件的平均拉伸强度极限为 $\sigma_b=1100\text{ MPa}$ 。按照设定的预应力比 $\eta=\sigma/\sigma_b$ 和试件截面积 s ,计算需施加的拉力 $F=\sigma_b s \eta$ 。电子万能试验机采用 2 mm/min 速率加载至拉力 F 并保持稳定,按照设定激光功率密度 P 持续辐照至试件断裂。每种实验条件下重复 3 发次。

2 结果与讨论

2.1 预加载条件下激光辐照复合材料失效机制

常温下 CFRC 层合板力学性能测试拉伸试件断口形状如图 3 所示,断口形状呈脆性断裂的整齐状,损伤时直

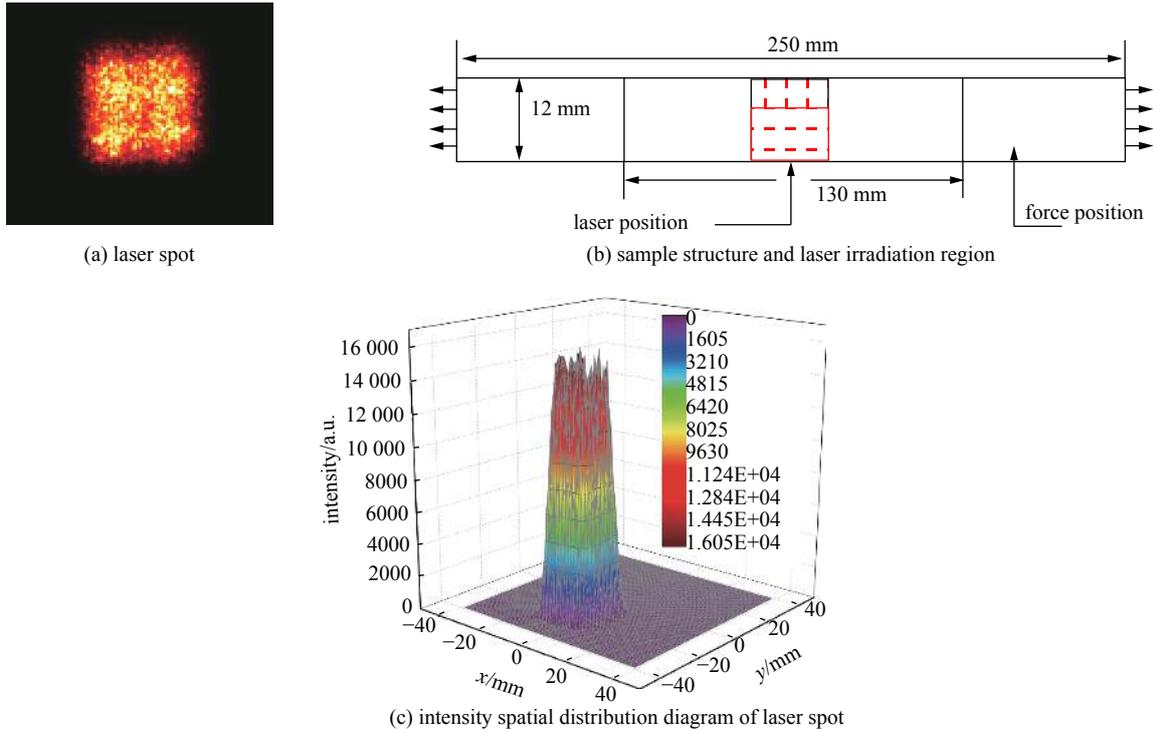


Fig. 2 A schematic diagram of laser spot distribution and irradiated area

图 2 激光光斑分布与辐照区域示意图

接断裂, 纤维丝无明显凸起。激光辐照下拉伸试件断裂后典型损伤形貌如图 4 所示。

图 4(a) 为试件断裂后在拉伸试验机上的形貌, 激光辐照方向从左向右, 图 4(b) 为断裂试件下半部分的形貌特征。从图 4(a) 可以看出, 试件受热面烧蚀严重, 环氧树脂基底基本上完全热解, 试件发生层裂损伤, 碳纤维丝烧蚀断裂并凸向激光入射方向, 对入射激光能量起到部分阻挡作用; 随着辐照持续, 试件逐层渐进损伤, 剩余结构承载真应力持续上升, 且随温度升高强度极限下降, 当实际承受载荷达到拉伸断裂强度时直接拉断失效, 此时该部分断口与单纯力学拉伸复合材料试样断裂失效相似, 碳纤维布基本上保持层状结构, 如图 4(b) 右侧部分, 该部分层合板结构完整纤维丝和树脂结构保持完整, 并无明显烧蚀现象, 类似于图 3 单纯力学拉伸试验损伤模式的断口形貌特征。



Fig. 3 Damage outlines of CFRC laminate after mechanical tensile test

图 3 单纯力学拉伸试件典型损伤形貌

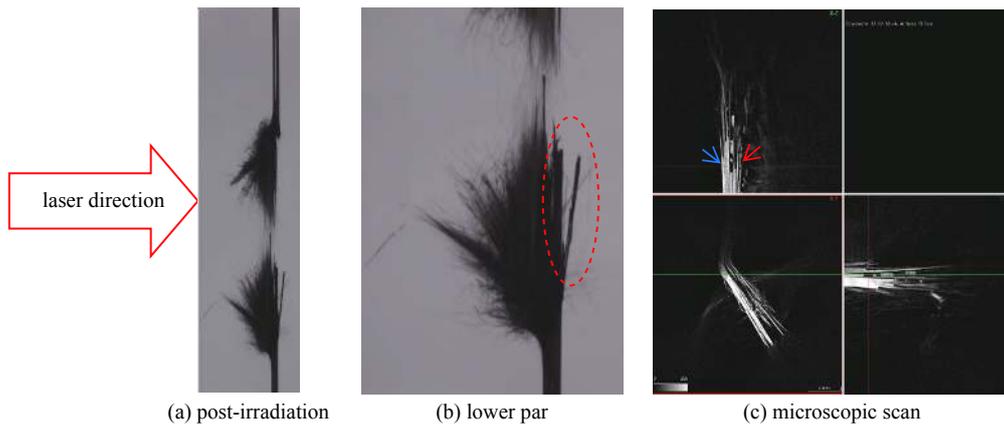


Fig. 4 Damage outlines of CFRC laminate after laser irradiation

图 4 实验后拉伸试件典型损伤形貌

在线获得辐照过程中试件逐层渐进损伤形貌图难度较大,为了更好地从机理上验证预加载条件下激光辐照CFRC层合板失效机制,本文利用显微CT扫描仪对辐照后的失效试件进行微观扫描,获得其失效形貌如图4(c)所示,图中分别显示了试件 $x-z$, $x-y$, $z-y$ 面的微观形貌(比例尺为4 mm),在 $x-z$ 面中左侧蓝色箭头所指部分CFRC层合板为背光面,失效形式为达到强度极限后的脆性断裂,层合板结构较为完整层间无明显层裂,环氧树脂基体无明显热解。红色箭头所指部分为迎光面,可以看出烧蚀后的纤维丝凸出明显,该部分失效形式为基体热解后纤维丝烧蚀断裂,层合板结构损伤严重,层间分裂较多、层间空隙明显。

同时,热像仪采集到的试件不同功率密度下前后表面多次实验取均值后的典型升温历程如图5所示,CFRC层合板结构因材料传热特性导致的前后表面存在较大的温度梯度,激光功率密度越高试件前表面升温越快,烧蚀现象更明显,前后表面温度梯度也越大,这也说明了CFRC层合板结构试件激光辐照下逐层的失效模式。

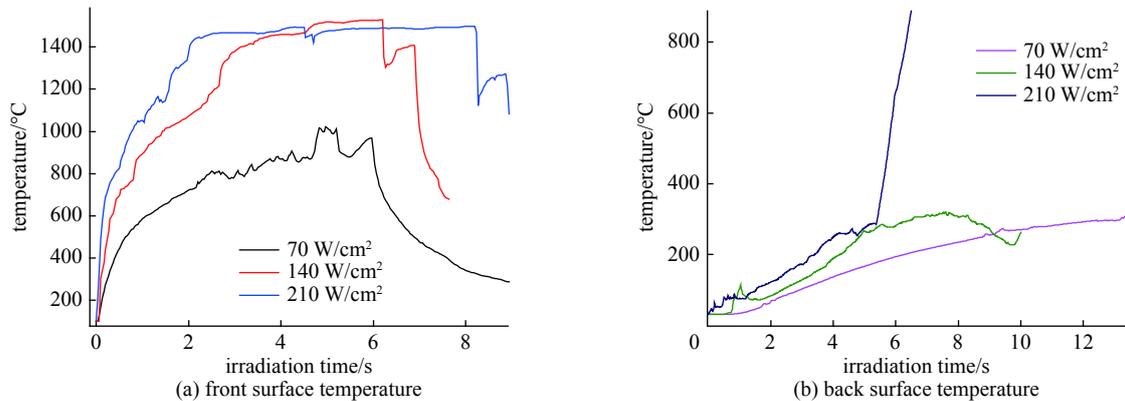


Fig.5 Front/back surface temperature rise progress of CFPR under different power densities

图5 不同功率密度下试件前后表面辐照升温历程

2.2 激光功率密度和预应力水平对复合材料断裂时间的影响

采用激光功率密度 70, 140 和 210 W/cm², 预应力 550 MPa 和 770 MPa 作为加载条件开展辐照实验, 不同参数下试件断裂时间如图 6 所示, 实验中若试件发生完全断裂无法再承受载荷即认为试件失效, 断裂时间即为激光开始辐照到试件失效的时间历程。

如图 6 所示, 随激光功率密度增加, 试件断裂时间呈下降趋势, 但当功率密度达到一定限度后再明显增加功率密度, 试件激光烧蚀损伤失效的时间变化不会较低功率密度时有很明显的减少, 因为高功率密度辐照 CFRC 层合板时环氧树脂迅速热解, 试件迎光面快速升温, 碳纤维丝烧蚀凸出严重, 对层合板后部区域激光的有效吸收产生一定的屏蔽作用, 故而高功率密度辐照下试件损伤断裂时间会呈现下降趋势但下降速率减小。当预应力水平比 η 从 0.5 增大到 0.7 (预应力从 550 MPa 增大到 770 MPa) 时, 相同激光功率密度下试件断裂时间明显缩短, 表明预应力水平对断裂时间影响显著。

2.3 光斑尺寸对复合材料断裂时间的影响

为了研究局部激光辐照对复合材料断裂时间的影响, 实验中通过水平偏转激光入射角度实现完全辐照(样品被辐照宽度 100%)和局部辐照(样品被辐照宽度 70%)两种情况, 局部辐照时通过入射激光角度调节使部分入射光被石墨板吸收从而实现对试件的部分辐照。定义激光辐照宽度方向尺寸与试件宽度方向的尺寸之比为比例半径 R , 预应力水平设置为 550 MPa, 激光功率密度 70, 140 和 210 W/cm², 实验结果如图 7 所示。

如图 7 所示, 试件断裂时间随比例半径减小而增加, 增加幅度随激光功率密度增大而降低, 210 W/cm² 功率密度下断裂时间接近, 从机理上讲在预加载水平一定的情况下, 增加激光功率密度会加快环氧树脂基体热解, 加速碳纤维丝的烧蚀从而导致试件断裂时间缩短, 但是迎光面烧蚀后的碳纤维丝会向激光入射方向凸出影响 CFRC 层合板对激光的吸收效率, 所以当激光功率到达一定程度后再显著增加激光的功率密度其吸收效率也不会成比例增加, 且在定预加载条件下高功率密度辐照时激光烧蚀效应占主导作用, 比例半径的区别对试件断裂时间的影响不会特别明显。由此可见, 提高激光功率密度或增大光斑比例半径均可以缩短试件断裂时间。本文实验结果为近似均匀光斑辐照试件得到的结论, 但当应用到高斯分布光斑总功率一定时, 峰值功率密度与光斑半径平方成反比, 即功率密度与比例半径是相互竞争的两个因素, 存在最优靶面光斑参数获得最短断裂时间。

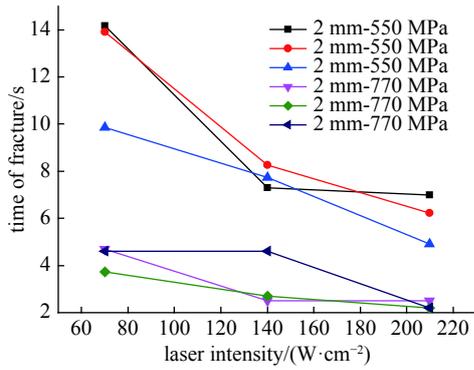


Fig. 6 Relationship between time to fracture and pre-stain under different laser intensity
图 6 预应力对断裂时间的影响规律

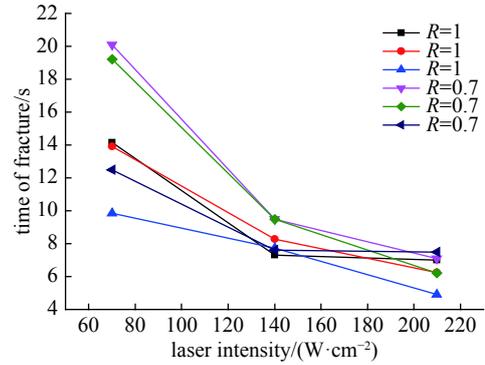


Fig. 7 Effect of proportional radius on fracture time
图 7 比例半径对断裂时间的影响规律

3 结论

由于碳纤维/环氧树脂增强复合材料层合板厚度方向导热性能较差,连续激光辐照下前后表面存在较大温度梯度,因此预加载层合板失效机制为迎光面环氧树脂基底材料热解、纤维氧化断裂,背光面剩余结构偏脆性断裂。随激光功率密度增加,试件断裂时间呈下降趋势,但下降速率减小。预应力水平对断裂时间影响显著。

参考文献:

- [1] Kibler K G, Carter H G, Eisenmann J R. Response of graphite composites to laser radiation[R]. Texas: Materials Research Laboratory, 1977.
- [2] 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 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)
- [3] 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): 547-552. (Chen Bo, Wan Hong, Mu Jingyang, et al. Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composite irradiated by repetition frequency laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 547-552)
- [4] 穆景阳, 万红, 白书欣. 长脉冲激光辐照下环氧树脂的热烧蚀规律[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 36-40. (Mu Jingyang, Wan Hong, Bai Shuxin. Thermal ablation law of cured epoxy under long pulse laser irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 36-40)
- [5] 黄永光, 刘世炳, 龙连春, 等. Nd: YAG激光辐照碳纤维复合材料的质量烧蚀[J]. 复合材料学报, 2009, 26(1): 118-122. (Huang Yongguang, Liu Shibing, Long Lianchun, et al. Mass ablation characteristics of carbon fiber composite irradiated by Nd: YAG laser[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(1): 118-122)
- [6] 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, 27(2): 21-24. (Li Yadi, Wu Ping, Ma Ximei, et al. The tests of carbon fiber/epoxy laminated composites under continuous laser irradiation[J]. Fiber Composites, 2010, 27(2): 21-24)
- [7] 陈敏孙, 江厚满, 焦路光, 等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料在切向气流和激光作用下的损伤[J]. 复合材料学报, 2013, 30(3): 56-62. (Chen Minsun, Jiang Houman, Jiao Luguang, et al. Damage of carbon fiber reinforced resin matrix composite subjected to laser and tangential gas flow loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(3): 56-62)
- [8] 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. (Yi Fajun, Liang Jun, Meng Songhe, et al. Study on ablation mechanism and models of heatshield composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2000, 23(3): 49-57)
- [9] Wei Chenghua, Ma Zhiliang, Zhu Yongxiang, et al. Laser ablation properties of glass fiber reinforced epoxy composite under obliquely impinging air jet[C]. Proceedings of SPIE 11046, Fifth International Symposium on Laser Interaction with Matter. 2019.
- [10] Han J C, He X D, Du S Y. Oxidation and ablation of 3D carbon-carbon composite at up to 3000°C[J]. Carbon, 1995, 33(4): 473-478.
- [11] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 激光辐照下复合材料树脂基热分解3维温度场模型[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 642-646. (Chen Minsun, Jiang Houman, Liu Zejin. Three-dimensional temperature field model of thermally decomposing resin composite irradiated by laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 642-646)
- [12] 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 Jialei, Liu Guodong, Wang Weiping, 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)
- [13] 彭国良, 闫辉, 刘峰, 等. 纤维增强复合材料激光烧蚀效应的数值模拟[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 216-222. (Peng Guoliang, Yan Hui, Liu Feng, et al. Numerical simulation of laser ablation of fiber-reinforced composite materials[J]. Chinese Optics, 2013, 6(2): 216-222)
- [14] 杨德军, 李旭东. 防热复合材料高温炭化烧蚀过程的数值分析[J]. 功能材料, 2013, 44(4): 544-547. (Yang Dejun, Li Xudong. Numerical simulation of high-temperature carbonized ablation processes for thermal protective composites[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(4): 544-547)
- [15] 贺敏波, 马志亮, 韦成华, 等. 热解对碳纤维/环氧复合材料激光烧蚀的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, 45: 0306001. (He Minbo, Ma Zhiliang, Wei

- Chenghua, et al. Influence of pyrolysis on the laser ablation of carbon-fiber/epoxy composite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45: 0306001)
- [16] 张杰, 孙冰. 基于热解动力学的绝热材料烧蚀研究[J]. *固体火箭技术*, 2010, 33(4): 454-458. (Zhang Jie, Sun Bing. Research on ablation of insulation Material based on pyrolysis dynamics[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(4): 454-458)
- [17] 杨德军, 李旭东. 碳化烧蚀材料内部热响应的数值分析[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(2): 139-141. (Yang Dejun, Li Xudong. Numerical analysis of internal thermal response for carbonized ablation materials[J]. *New Chemical Materials*, 2014, 42(2): 139-141)
- [18] 彭国良, 杜太焦, 刘峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. *中国激光*, 2014, 41: 0203001. (Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, et al. Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass fiber/epoxy composites[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41: 0203001)
- [19] 余晓京. 富氧环境下绝热层烧蚀模型研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004. (Yu Xiaojing. Study of ablation model in oxygen-riched condition[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004)
- [20] 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 Hong, Hu Kaiwei, Mu Jingyang, 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)
- [21] 陈明, 龙连春, 刘世炳, 等. 激光辐照与拉伸预应力作用下复合材料试件的破坏研究[J]. *应用力学学报*, 2010, 27(2): 412-417. (Chen Ming, Long Lianchun, Liu Shibing, et al. Destruction of composite material under tensile pre-stressing and laser irradiation[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2010, 27(2): 412-417)
- [22] 陈博, 万红, 穆景阳, 等. 重频激光-载荷联合作用下碳纤维/环氧树脂复合材料失效规律[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2011(6): 20-23. (Chen Bo, Wan Hong, Mu Jingyang, et al. Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composites under mechanical loading and irradiating by repetition frequency laser[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2011(6): 20-23)
- [23] Wang Jiawei, Zhu Yongxiang, Wei Chenghua, et al. Tensile strength prediction of orthogonal CFRP under high intensity CW laser irradiation[J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 105304.
- [24] Liu Yanchi, Wu Chenwu, Huang Yihui, et al. Interlaminar damage of carbon fiber reinforced polymer composite laminate under continuous wave laser irradiation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 91-101.