

气流环境中碳纤维/环氧树脂复合材料烧蚀羽烟对激光透射率的影响

彭国良 张相华 高银军 刘卫平

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

摘要 研究了气流环境下碳纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀羽烟对透射率的影响。由射流理论得到光学路径长度关系式,由碳纤维/环氧树脂复合材料的激光烧蚀模拟得到羽烟密度及速度关系式,进而利用 Lambert-Beer 定律得到了羽烟透射率的计算模型。利用模型计算了激光辐照过程中的羽烟透射率,并与实验结果进行比较,验证了模型的合理性。进一步计算了外部参数对激光透射率的影响,计算结果表明,激光辐照开始后,热解区域在表面,烟气易于逸出,透射率快速下降到最低值,随后热解区域内移,由于材料渗透率较低,烟气逸出困难,透射率逐渐回升;激光功率密度越大,最小透射率越低,辐照期间的平均透射率越低;气流速度较大时,整个辐照期间的透射率都较高;总功率一定时,光斑半径越大,最小透射率越高,辐照期间的平均透射率越低。

关键词 激光技术;羽烟;激光辐照;碳纤维/环氧树脂复合材料;透射率;气流

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0206004

Influence of Error from Plume on Transmittivity During Laser Irradiating Carbon/Epoxy Composites in Gas Flow

Peng Guoliang Zhang Xianghua Gao Yinjun Liu Weiping

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

Abstract The influence of plume on transmittivity during laser irradiating carbon/epoxy composites in gas flow is researched. A calculated model for transmittivity of plume is given by using Lambert-Beer theory. In the model, the length of optical paths is calculated by jet theory, density and velocity of plume can be got from the simulation of laser ablating carbon/epoxy composites. The plume transmittivity during laser irradiating is computed by the model. The result is compared with the experiment, and it is confirmed that the model is reasonable. The influence of extrinsic parameters on laser transmittivity is calculated. The results indicate that when laser irradiation begins, thermal decomposition zone is on the material surface and it is easy for plume escaping from the zone, and transmittivity decreases to minimum value quickly. Then thermal decomposition zone moves to the interior and it is difficult for plume escaping from the zone because of low permeability, and transmittivity increases slowly. Higher laser intense decreases the minimum transmittivity and average transmittivity of the whole irradiation time; higher flow velocity can increase the transmittivity of the whole irradiation time; when total laser power is constant, bigger spot size can increase the minimum transmittivity and decrease average transmittivity of the whole irradiation time.

Key words laser technique; plume; laser irradiate; carbon/epoxy composite; transmittivity; gas flow

OCIS codes 140.3295; 140.3330; 140.3425

收稿日期: 2014-08-07; 收到修改稿日期: 2014-09-02

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1102)

作者简介: 彭国良(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光辐照效应的数值模拟方面的研究。

E-mail: pg102@163.com

1 引 言

碳纤维/环氧树脂复合材料因其优异的性能在航天、航空领域得到了广泛的应用。随着高能激光技术的发展,碳纤维/环氧树脂复合材料的激光烧蚀破坏效应研究也受到了人们的关注^[1-3]。在激光烧蚀树脂基复合材料过程中,由于树脂基体热解会产生大量羽烟,羽烟对入射激光有屏蔽作用,使得到的靶功率密度降低。在真实烧蚀环境中,一般有切向气流存在,气流使得激光路径上有羽烟部分的长度减少。羽烟对激光透射率的影响究竟有多大是复合材料激光效应研究中的重要问题。由于羽烟的生成及凝聚非常复杂,以往的研究中侧重研究烟雾本身的性质^[4-5]、激光波长^[6]等对透射率的影响,研究方法上以实验为主。对于碳纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀过程中产生的羽烟对透射率的影响,一般简单地假设其没有影响^[7],具体的定量研究未见诸报道。本文通过碳纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀热解的计算,研究流场中碳纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀羽烟对透射率的影响。

2 计算方法

2.1 羽烟的消光表征

羽烟中激光的传输特性可用 Lambert-Beer 定律计算^[8]:

$$I = I_0 \exp(-\rho\alpha L), \tag{1}$$

式中 ρ 为羽烟的密度, α 为羽烟的吸收系数, L 为光学路径长度。由(1)式得到羽烟中激光透射率为

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\rho\alpha L), \tag{2}$$

当气流速度较大时,羽烟的消光性较弱,这时(2)式可简化为

$$T = \exp(-\rho\alpha L) \approx 1 - \rho\alpha L. \tag{3}$$

羽烟的吸收系数由羽烟颗粒的成分、颗粒大小等因素决定。对碳纤维/环氧树脂激光烧蚀产生的羽烟颗粒,可以认为其成分及初始大小是一定的。大颗粒由初始颗粒凝聚而成,气流速度较大时,羽烟颗粒来不及凝聚导致颗粒直径较小。实验表明^[8],气流速度较大时,羽烟的吸收系数基本不变。因此,气流速度较大时,羽烟中的激光透射率由羽烟密度及光学路径长度决定。

2.2 羽烟的光学路径长度

激光辐照碳纤维/环氧树脂材料时,表面不断有羽烟逸出,羽烟速度可认为垂直于材料表面。在切向气流作用下,羽烟的轨迹可用射流理论计算。射流外边界轨迹方程^[9]:

$$\frac{z_0}{RD} = 2.63 \left(\frac{x}{RD} \right)^{0.28}, \tag{4}$$

$$R = \frac{u_0}{u_s}$$

式中 u_0 为射流速度, u_s 为横流速度, D 为出口直径, $x \in [0, D]$, z_0 为射流外边界高度。

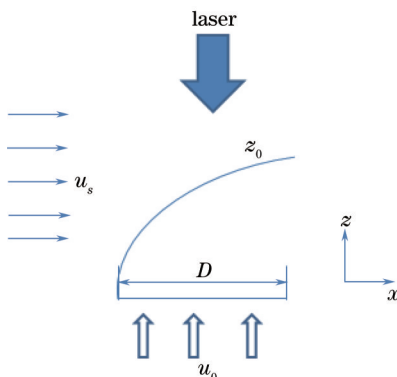


图1 羽烟中的光学路径示意图
Fig.1 Sketch of optical path in plume

故:

$$L = z_0 = \frac{2.63D^{0.72}u_0^{0.72}x^{0.28}}{u_s^{0.72}}, \quad (5)$$

对圆形光斑,平均光学路径为

$$\bar{L} = \frac{\int L ds}{S} = \frac{2.63D^{0.72}u_0^{0.72}}{u_s^{0.72}} \frac{\int x^{0.28} ds}{0.25\pi D^2} = \frac{2.63u_0^{0.72}}{u_s^{0.72}} g(D), \quad (6)$$

对均匀光斑:

$$g(D) = \frac{4D^{0.72} \int x^{0.28} ds}{\pi D^2}, \quad (7)$$

高斯光斑:

$$g(D) = \frac{4D^{0.72} \int \exp\left[-\frac{4(x^2 + y^2)}{D^2}\right] x^{0.28} ds}{\pi D^2}. \quad (8)$$

利用数值积分方法计算了高斯光斑与均匀光斑 $g(D)$ 的值随 D 的变化,如图 2 所示。由图可知,在常见激光光斑直径下, $g(D)$ 可近似认为与 D 成正比,即:

$$g(D) \propto D. \quad (9)$$

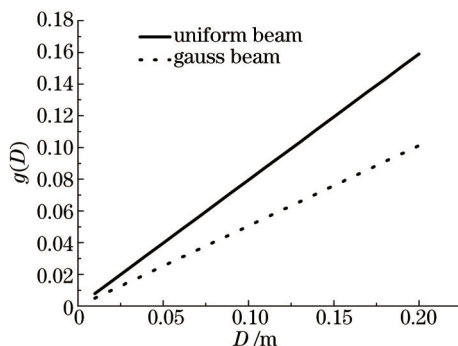


图 2 $g(D)$ 的值随光斑直径的变化

Fig.2 Value of $g(D)$ versus spot diameter

2.3 羽烟密度及速度

碳纤维/环氧树脂在激光辐照过程中热解,热解气体中携带有羽烟颗粒,羽烟速度可以认为等于热解气体速度。羽烟的产量可以用发烟系数来表征,发烟系数定义为

$$\varepsilon = \frac{m_s}{\Delta m}, \quad (10)$$

式中 m_s 为羽烟质量, Δm 为材料的质量损失。另一方面,热解气体的质量与材料的质量损失成正比。假设发烟系数在激光辐照过程中是常数,则材料表面的羽烟密度正比于热解气体密度。

综合以上分析,透射率可以表示为

$$T = 1 - cD\rho_g \frac{u_g^{0.72}}{u_0^{0.72}}, \quad (11)$$

式中 c 为常数,可通过实验结果进行拟合, ρ_g 为材料表面热解气体密度, u_g 为材料表面热解气体速度。表面热解气体密度及速度可通过激光辐照碳纤维/环氧树脂过程的模拟可到,具体可参见文献[10]。环氧树脂的热解参数来自文献[7],其他参数与文献[10]的参数相同。

3 结果与讨论

为验证模型的合理性,将实验结果与模型预测结果进行了比对。实验条件为:激光器总功率 2000 W,波长 1.06 μm ,光斑直径 25 mm,气流速度 19.6 m/s,辐照时间 5 s,材料尺寸 100 mm \times 100 mm \times 1 mm。

图3给出了透射率随辐照时间变化的测量结果与计算结果。由图3可见,模拟结果与实验结果吻合较好,表明计算模型能描述实际物理过程。在激光辐照开始时,表面的树脂开始热解,羽烟开始生成,透射率开始下降;随后表面温度进一步升高,热解加剧,表面羽烟产量逐渐达到峰值,透射率也达到最低值;表面树脂热解完以后,热解区域内移,但内部热解产物逸出表面只能通过渗流方式,较为缓慢,而且热解区域越深,渗透到表面的速度越慢,在图中反映为透射率逐步回升。

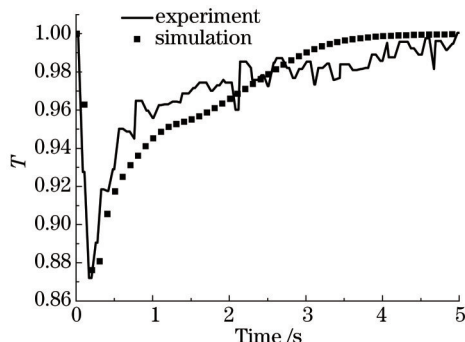


图3 实验及计算的透射率随辐照时间的变化

Fig.3 Transmittivity of experiment and simulation versus irradiating time

图4给出了风速为19.6 m/s、光斑直径为25 mm时,不同激光功率密度下羽烟透射率随辐照时间的变化。由图4可知,激光功率密度较大时,透射率更快地达到最低值,透射率的最低值越小。这是由于功率密度越大,表面升温速率越高,导致热解反应更剧烈,即在较短时间内完成热解,导致材料表面瞬间的羽烟流量增加,进而导致透射率更低。图5给出了5 s平均透射率随激光功率密度的变化。由图可知,平均透射率随激光功率密度的增加缓慢下降。由内部热解逸出到材料表面的羽烟流量主要由材料的渗透率控制,故激光辐照1 s后不同功率密度下的羽烟透射率差异较小,进而导致平均透射率变化较缓慢。

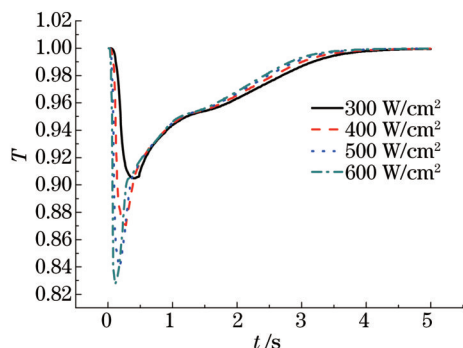


图4 不同功率密度下透射率随辐照时间的变化

Fig.4 Variation of transmittivity versus irradiating time with different laser power densities

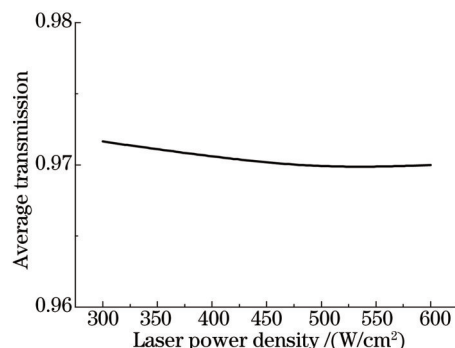


图5 平均透射率随激光功率密度的变化

Fig.5 Variation of average transmittivity versus laser power density

图6给出了功率密度为400 W/cm²、光斑直径为25 mm时,不同气流速度下透射率随辐照时间的变化。图7为辐照时间内的平均透射率随气流速度的变化。由图可见,气流速度越大,透射率越高。这是由于气流速度较大时,羽烟的高度被压制,激光路径变短,使得羽烟对激光的吸收变弱。

图8给出了总功率为2000 W、风速为19.6 m/s时,不同光斑直径羽烟透射率随辐照时间的变化。图9为辐照时间内平均透射率随光斑直径的变化。由图可知,光斑直径较大时,达到最小透射率所需时间较长,最小透射率较大;辐照前期,光斑直径越大,透射率越大,辐照后期,光斑直径越大,透射率越小,但整个辐照期内平均透射率随光斑直径增大而降低。在总功率一定时,光斑直径对羽烟透射率的影响来自两个方面:1) 光斑直径大会导致激光功率密度降低,由上文的分析可知,功率密度低会导致辐照前期透射率高,但对辐照后期影响较小;2) 光斑直径增大会导致光斑范围内羽烟的平均光学路径增加,导致羽烟透射率降低。最终的透射率由这两个因素共同决定。

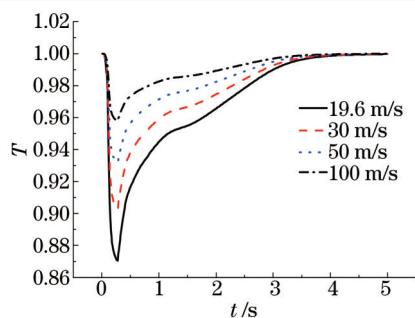


图 6 不同气流速度下透射率随辐照时间的变化

Fig.6 Variation of transmittivity versus irradiating time with different flow velocity

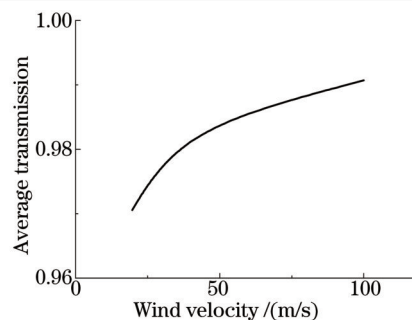


图 7 平均透射率随气流速度的变化

Fig.7 Variation average transmittivity versus flow velocity

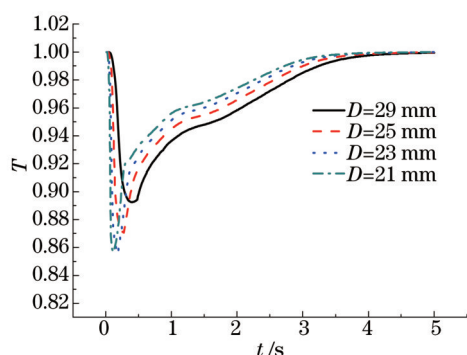


图 8 总功率一定时,不同光斑直径下透射率随辐照时间的变化

Fig.8 Variation of transmittivity versus irradiating time, with different spot diameters and constant total power

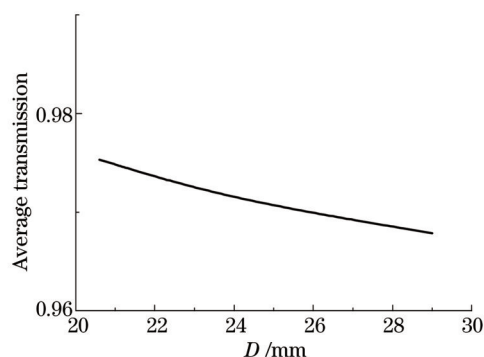


图 9 平均透射率随光斑直径的变化

Fig.9 Variation of average transmittivity versus spot diameter

4 结 论

激光辐照碳纤维/环氧树脂复合材料过程中产生的羽烟会影响到靶激光功率密度。以 Lambert-Beer 定律为基础,利用射流理论和激光辐照碳纤维/环氧树脂复合材料的热烧蚀模型,提出了气流环境下计算羽烟透射率的模型,并利用实验结果验证了模型的合理性。进一步分析了激光功率密度、切向气流速度和光斑大小等外部因素对羽烟透射率的影响。激光功率密度通过材料表面的羽烟浓度和速度来影响透射率,切向气流速度及光斑大小通过羽烟的光学路径影响透射率。

参 考 文 献

- 1 Chang Xinlong, Li Zhengliang. Analysis of carbon/epoxy laminates ablation subject to laser irradiation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1691-1695.
常新龙, 李正亮. 碳纤维/环氧树脂层合板的激光烧蚀特性分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1691-1695.
- 2 Li Yadi, Wu Ping. The tests of carbon fiber/epoxy laminated composites under continuous laser irradiation[J]. Fiber Composites, 2010, 21(2): 21-24.
李雅娣, 吴平. 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.
- 3 Chen Minsun, Jiang Houman. Influence of tangential airflows on process of laser ablating carbon-fiber composites[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 482-486.
陈敏孙, 江厚满. 切向空气气流对激光烧蚀碳纤维复合材料过程的影响[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 482-486.
- 4 Chen Shengshi, Ning Zili. Laser transmittance measurement technology on plume from solid-propellant engine[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5): 864-868.
陈胜石, 宁子立. 固体发动机羽烟的激光透射率测试[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 864-868.
- 5 Yang Libo, Sun Mei. Study on laser transmittances of charge plumes[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(6):

45-47.

杨立波, 孙 美. 装药排气羽烟激光透射率研究[J]. 火炸药学报, 2006, 29(6): 45-47.

6 Zhao Jianhua, Yuan Hongyong, Fan Weicheng, *et al.*. Multi-wavelength attenuation properties of fire smokes[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 21(3): 221-224.

赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 火灾烟雾的多波长衰减特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(3): 221-224.

7 Chen Minsun. Research on the Laser Irradiation Effects on Fiber Reinforced Resin Composites Subjected to Tangential Gas Flow [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

陈敏孙. 切向气流作用下激光对纤维增强树脂基复合材料的辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.

8 Liao guangxuan, Wang xishi, Qin Jun, *et al.*. Experimental Diagnosis Method of Thermal Disaster[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.

廖光宣, 王喜世, 秦 俊, 等. 热灾害实验诊断方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.

9 Yu Changshao. Turbulent Jet[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993.

余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高教出版社, 1993.

10 Peng Guoliang, Yan Hui, Liu Feng. Numerical simulation of laser ablation of fiber-reinforced composite material[J]. Chinese Optics, 2013, 6(2): 216-222.

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.

栏目编辑: 张浩佳