

文章编号: 1001 - 2486(2011)02 - 0023 - 05

切向空气气流对激光辐照碳纤维复合材料的影响*

陈敏孙, 江厚满, 刘泽金

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 实验研究了靶材表面存在和不存在切向空气气流时, 975nm 连续激光对碳纤维增强树脂基复合材料的辐照效应, 发现切向气流的加载有利于激光对碳纤维复合材料的破坏。从理论上对激光辐照下碳纤维复合材料的破坏机理进行了初步分析, 基于碳的氧化特性和氧化反应机理, 推导了碳纤维的氧化速率方程。采用改进的光滑粒子方法, 对激光辐照下复合材料树脂基热解时的 3 维温度场模型进行数值求解, 从数值上模拟了激光对碳纤维复合材料的破坏效应, 模拟结果与实验结果一致。

关键词: 激光辐照; 碳纤维复合材料; 切向气流; 氧化速率; 破坏

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Influence of Tangential Airflow on Laser Irradiating Carbon-Fiber Composite

CHEN Min-sun, JIANG Hou-man, LIU Ze-jin

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

Abstract: The experiment of 975nm continuous wave laser irradiating carbon-fiber reinforced resin composite was studied, while the front surface of the target was provided with and without tangential airflow. Analysis indicates that the loading of tangential airflow can enhance the damage effect of laser on carbon-fiber composite. The failure mechanism of carbon-fiber composite irradiated by laser is preliminarily studied in theory. Based on the oxidation characteristics and the oxidation reaction mechanism of carbon, the oxidation rate equation of carbon-fiber was obtained. The three-dimensional temperature field model of thermally decomposing resin composite irradiated by laser was solved using modified smoothed particle hydrodynamics, the failure mechanism of carbon-fiber composite irradiated by laser was numerical simulated. Simulation results proved to be consistent with experimental results.

Key words: laser irradiation; carbon-fiber composite; tangential airflow; oxidation rate; damage

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马上引起了广泛的关注, 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]。当靶材表面存在切向强迫空气气流时, 激光辐照效应可能不同, 阈值参数也可能变化。因此, 开展在切向强迫气流作用下, 激光对碳纤维复合材料的辐照效应的研究有一定的意义。

据此, 本文开展了靶材表面存在和不存在切向空气气流时, 975nm 连续激光对碳纤维增强树

脂基复合材料破坏效应的实验研究, 并从理论和数值上对破坏机理进行分析。

1 实验结果及分析

实验中采用波长为 975nm 连续波激光器, 激光功率密度为 $110\text{W}/\text{cm}^2$, 光斑直径约 20mm, 靶材厚度为 2mm, 气流速度约 30m/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 帧/s。

图 2 给出的是碳纤维增强树脂基复合材料在 975nm 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 30s, (b) 对应的是有气流时激光辐照 56s。从图中可以看出, 没有气流时, 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 1.5mm。

* 收稿日期: 2010 - 11 - 05

作者简介: 陈敏孙(1981—), 男, 博士生。

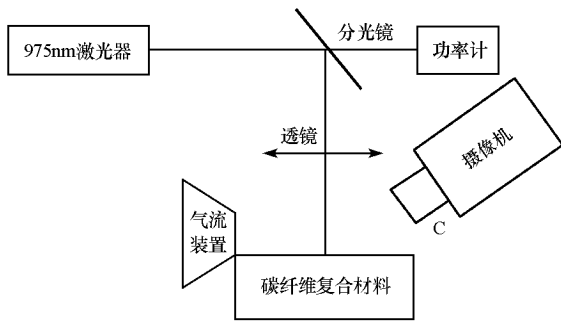
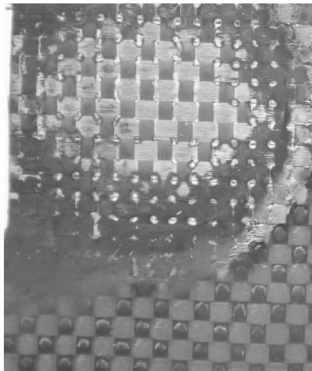
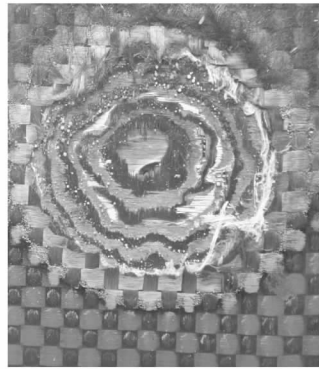


图1 激光辐照碳纤维复合材料实验装置示意图
Fig.1 Sketch map of experimental setup for laser irradiating carbon fiber composite



(a) Without airflow (30s)



(b) With airflow (56s)

图2 碳纤维增强树脂基复合材料的破坏形貌
Fig.2 Damage morphologies of carbon-fiber reinforced resin composite

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, 向外溢出的树脂基热解气体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保护作用。此时, 只有当激光作用区温度达到碳的气化温度 3300℃后, 热解碳和碳纤维才发生气化烧蚀。当靶材表面存在切向空气气流时, 气流不仅会破坏树脂热解气体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。

2 碳纤维氧化速率方程

当碳纤维复合材料表面存在较高速度的切向空气气流时, 可以认为氧气的扩散速率远大于 C - O₂ 反应速率, 即热解碳和碳纤维的氧化速率受 C - O₂ 反应控制。由于在反应中固体物质的浓度不变, 因此, 固体物质的浓度通常不出现在反应速率表达式中^[12]。据此, 对于 C - O₂ 反应, 假设反应对氧气为一级反应时, 反应速率为^[13-14]

$$r = KC_{O_2} \quad (1)$$

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, 激光辐照后的瞬间有少许白烟从激光作用区冒出, 随即变浓、变黄, 并在激光作用区出现红色斑点, 随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; 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, 并间歇有少许白烟和火星向外喷出。

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℃左右开始氧化, 生成 CO 或 CO₂^[10-11],

式中: r 为 C - O₂ 反应速率 (mol/m²/s); K 为氧化反应的反应速率常数; C_{O_2} 为 C - O₂ 反应界面处氧气的浓度 (mol/m³)。反应速率常数 K 可表示成 Arrhenius 形式^[14-15]

$$K = k_p \exp(-E_r/RT) \quad (2)$$

式中: k_0 为常数 (m/s); E_r 为反应活化能 (J/mol); k_0 和 E_r 的值均可通过实验测得。

可以认为反应界面处的氧气浓度 C_{O_2} 与气流中的氧浓度 C_0 一样, 而 C_0 满足

$$C_0 = \chi C_T \quad (3)$$

式中: χ 为气流中氧气的摩尔分数; C_T 为气流中气相的总浓度 (mol/m³)。 C_T 可用理想气态方程描述

$$C_T = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

式中: P 为气流压强 (Pa); R 为气体常数 (J/mol/K); T 为绝对温度 (K)。

将式(2)~(4)代入式(1), 可得 C - O₂ 反应速率为

$$r = \frac{k_0 \chi P}{RT} \exp\left(\frac{-E_r}{RT}\right) \quad (5)$$

由于氧气的消耗量与碳的消耗量成正比,因此,单位时间内、单位反应界面上消耗的碳的质量满足^[12-13]

$$\frac{dm_c}{dt} = \sigma M_C r \quad (6)$$

式中: σ 为系数($1 \leq \sigma \leq 2$); M_C 为碳的摩尔质量(kg/mol)。

3 数值模拟结果

3.1 控制方程

描述激光辐照下树脂基复合材料内部温度场 T 的三维偏微分方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (h_g - \bar{h}) \frac{\partial \rho}{\partial t} + (f_g \rho_g v_{gz}) \frac{\partial h_g}{\partial z} + q_{laser} \quad (7)$$

式中: ρ 为部分分解材料的密度; c_p 为定压比热容; k 为导热系数; h_g 为热分解气体热函; f_g 为热分解气体体积分数; ρ_g 为热分解气体密度; v_{gz} 为热分解气体沿激光加载方向的速度; q_{laser} 为激光热源项; $\bar{h} = \frac{\rho_v h_v - (\rho_c h_c + \eta \rho_g h_g)}{\rho_v - (\rho_c + \eta \rho_g)}$,其中, ρ_v 为初始材料密度, ρ_c 为炭化物密度, h_v 为初始材料热函, h_c 为炭化物热函, η 为表征炭化物疏松度的常数。

在热分解气体的运动是一维(沿激光辐照方向, z 方向)和热分解气体与它们所流过的炭化物达到热平衡的假设下^[16-17], $f_g \rho_g v_{gz}$ 满足

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial (f_g \rho_g v_{gz})}{\partial z} \quad (8)$$

$$f_g \rho_g v_{gz} = - \int_z^{z_b} \frac{\partial \rho}{\partial t} dz' \quad (9)$$

式(9)中 z_b 为后表面坐标。

热重分析曲线表明,树脂基复合材料热分解时通常存在多个明显的失重阶段^[8,18],因此,选择阿伦纽斯形式的多步分解模型来描述热分解反应^[19]。材料密度随时间的变化率为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \left[\frac{m_{0,1}}{m_0} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m_1}{m_{0,1}} \right) + \frac{m_{0,2}}{m_0} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m_2}{m_{0,2}} \right) + \dots + \frac{m_{0,i}}{m_0} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m_i}{m_{0,i}} \right) \right] \quad (10)$$

式中: ρ_0 为材料的初始密度; m_0 为初始时刻材料的质量; $m_{0,i}$ 为第 i 步反应时的初始质量; m_i 为第

i 步反应时的质量;质量分数($m_i/m_{0,i}$)的变化率为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (m_i/m_{0,i})}{\partial t} \\ &= -B_i \left(\frac{m_i - m_{r,i}}{m_{0,i}} \right)^{n_i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $m_{r,i}$ 为第 i 步反应的残余或最终质量; B_i 为第 i 步反应的指数前因子; E_i 为第 i 步反应的活化能; n_i 为第 i 步反应的反应级数; R 为气体常数。

在热分解气体对表面热交换的影响包含在对流换热的情况下,描述激光辐照面的边界条件为

$$\begin{aligned} I_{surf} = q_{cond} + \frac{d}{ds} \left(\frac{\partial m_{ev}}{\partial t} \right) H_{ev} \\ + h_{conv} (T_0 - T_r) + \sigma \xi (T_0^4 - T_f^4) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: q_{cond} 表示热传导; $\partial m_{ev}/\partial t$ 为表面材料氧化或气化烧蚀率; ds 为表面面积元; H_{ev} 为表面材料烧蚀热; h_{conv} 为对流换热系数; T_r 为恢复温度; T_0 为前表面温度; T_f 为外界环境温度; I_{surf} 为材料对激光的表面吸收(体吸收时 $I_{surf} = 0$); σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数; ξ 为材料表面发射率。

对流换热系数 h_{conv} 与气流的运动状态、速度、黏度、热物性以及靶材表面大小、形状和位置有关。设靶面为 xy 面,气流沿 x 方向流过平面靶,在忽略气流可压缩性的近似条件下,边界层理论给出了层流和湍流边界层对流换热系数的近似解^[20]分别为

$$h_{conv} = \begin{cases} 0.662 \frac{\lambda}{d} Re_d^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{层流} \\ 0.036 \frac{\lambda}{d} Re_d^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{湍流} \end{cases} \quad (13)$$

式中: d 为靶长; λ 为气流的导热系数; $Re_d = d \rho v_d / \mu$,为 d 处气流的雷诺数,其中, ρ 、 μ 和 v_d 分别为气流密度、动力黏度和 d 处气流的速度; $Pr = \nu / a$,为气流的普朗特数,其中, ν 为运动黏度, a 为导热系数。

3.2 数值计算

采用改进的光滑粒子方法(modified smoothed particle hydrodynamics)^[21]对控制方程进行离散化,并用Fortran语言完成程序编制。计算区域为 $3.0\text{cm} \times 3.0\text{cm} \times 0.2\text{cm}$,激光辐照中心与坐标中心重合($1.5\text{cm}, 1.5\text{cm}, 0.0\text{cm}$),光斑直径取 2.0cm ,粒子数分布为 $20 \times 20 \times 20$,其他参数取值见表1。

表1 数值计算中物理量取值

Tab.1 Value of physical quantities under numerical simulation

参数		参数值	
氧化参数	k_0 (m/s)	0.53×10^{10}	
	E_r (kJ/mol)	255	
	σ	1.1	
	χ	0.21	
n_i	$i = 1$	3.2	
	$i = 2$	2.8	
	$\ln B_i$ (s^{-1})	$i = 1$	24.8
		$i = 2$	38.8
热分解参数	E_i/R (K^{-1})	$i = 1$	16 170
		$i = 2$	27 936
	$m_{0,i}/m_0$	$i = 1$	0.23
		$i = 2$	0.77
$m_{r,i}/m_0$	$i = 1$	0.0	
	$i = 2$	0.69	
热物性参数	ρ_0 (g/cm^3)	1.55	
	ρ_c (g/cm^3)	1.07	
	C_{p0} (J/g/K)	1.71	
	C_{pc} (J/g/K)	1.91	
	k_x (W/cm/K)	0.504	
	k_y (W/cm/K)	0.504	
	k_z (W/cm/K)	0.0504	

在数值模拟中,对于靶材表面没有切向空气气流的情况,考虑到热分解气体对热解碳和碳纤维的保护作用,只有当激光作用区温度达到碳的气化温度 3300℃后,热解碳和碳纤维才发生气化烧蚀;而当靶材表面存在切向气流时,认为热解碳和碳纤维在较低的温度会发生氧化烧蚀,并用前文推导的氧化速率方程描述表面材料的氧化烧蚀。

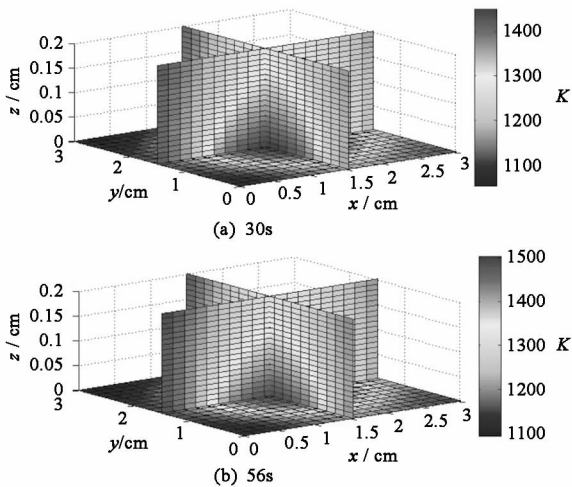


图3 无气流时的温度场分布

Fig.3 Temperature field distribution without airflow

图3给出的是靶材前表面没有切向空气气流时,平面 $(x, 1.5, z)$ 、 $(1.5, y, z)$ 和 $(x, y, 0)$ 组成的

数值模拟温度分布。从图3(a)可以看出,激光辐照30s时,靶材前表面的温度不超过1500K,并未达到碳纤维的气化烧蚀温度3300℃,这与实验结果一致,初步说明文中对靶材表面不存在切向空气气流时,激光对碳纤维复合材料破坏机理的理论分析是合理的。为了与有切向气流时激光辐照56s时的实验结果进行对比,数值计算了没有切向气流时,激光辐照56s时的温度分布,从图3(b)不难看出,靶材前表面的最高温度仍未达到碳纤维的气化烧蚀温度3300℃。

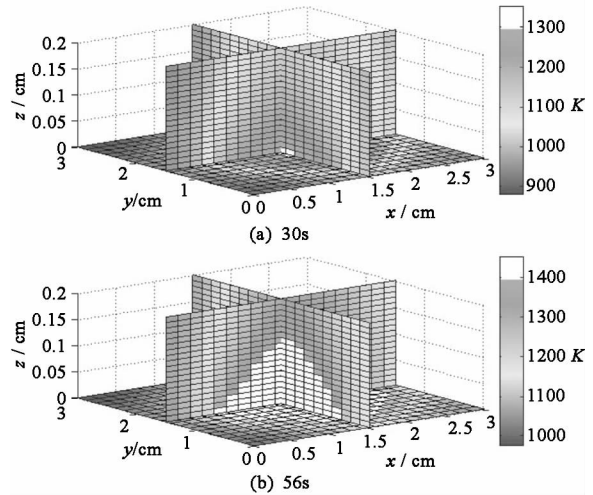


图4 有气流时的温度场分布

Fig.4 Temperature field distribution with airflow

图4给出的是靶材前表面有切向空气气流时,平面 $(x, 1.5, z)$ 、 $(1.5, y, z)$ 和 $(x, y, 0)$ 组成的数值模拟温度分布,其中,白色表示已烧蚀。将56s时的数值模拟烧蚀形貌与实验结果对比,不难发现两者符合得很好。说明文中对靶材表面存在切向空气气流时,激光对碳纤维复合材料破坏机理的理论分析是合理的。对比图4(a)和3(a),可明显看出,有气流时,激光辐照30s时靶材已发生烧蚀,表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。

4 结论

开展了靶材表面存在和不存在切向气流时,975nm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。分析认为,没有切向空气气流时,向外溢出的树脂基体热解气体会抑制氧气向靶材表面扩散,从而对碳纤维具有保护作用,只有当激光作用区温度达到碳的气化温度3300℃后,碳纤维才发生气化烧蚀;切向空气气流的加载不仅会破坏热分解气体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

较低的温度下发生氧化烧蚀。

基于碳的氧化特性和氧化反应机理,推导了碳纤维的氧化速率方程。采用改进的光滑粒子方法对激光辐照下碳纤维复合材料的破坏效应进行了数值模拟,模拟结果与实验结果一致。分析表明:文中推导的碳纤维氧化速率方程是合理的;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。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 田玉冰,檀慧明,明智辉,等.四程抽运 Yb:YAG 薄片激光器[J].光学精密工程,2008,16(3):386-391.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [10] 徐先锋,肖鹏,陈浩,等.碳纤维的氧化特性及抗氧化改性处理方法研究[C]//北京:北京国际材料周暨中国材料研讨会,2006.
- [11] 黄希祜.钢铁冶金原理[M].北京:冶金工业出版社,1990:227-258.
- [12] 孙康.宏观反应动力学及其解析方法[M].冶金工业出版社,1998.
- [13] 魏玺.3DC/SiC 复合材料氧化机理分析及氧化动力学模型[D].西安:西北工业大学,2004.
- [14] Bacos M P, Cochon J L, Dorvaux J M, et al. C/C Composite Oxidation Model II. Oxidation Experimental Investigations [J]. Carbon, 2000, 38: 93-103.
- [15] 傅献彩,沈文霞,姚天扬.物理化学(下册)[M].高等教育出版社,第四版,1990.
- [16] Torre L, Kenny J M, Maffezzoli A M. Degradation Behaviour of a Composite Material for Thermal Protection Systems Part II: Process Simulation[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 3145-3149.
- [17] Henderson J B, Wiebelt J A, Tant M R. A Model for the Thermal Response of Polymer Composite Materials with Experimental Verification [J]. Journal of Composite Materials, 1985, 19: 579-595.
- [18] Torre L, Kenny J M, Maffezzoli A M. Degradation Behaviour of a Composite Material for Thermal Protection Systems Part I: Experimental Characterization [J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 3137-3143.
- [19] Nelson J B. Determination of Kinetic Parameters of Six Ablation Polymers by Thermogravimetric Analysis [J]. NASA TN-3919, 1967: 13-19.
- [20] 郑亚,陈军,鞠玉涛,等.固体火箭发动机传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [21] Zhang G M, Batra R C. Modified Smoothed Particle Hydrodynamics Method and Its Application to Transient Problems [J]. Computational Mechanics, 2004 (34): 137-146.