

文章编号 1004-924X(2014)08-2014-06

激光辐照下尼龙纤维材料的热烧蚀规律

蒙文, 韩晓飞*, 李云霞, 李达

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安710077)

摘要: 为了得到激光辐照下尼龙材料的烧蚀规律, 利用红外成像的方法分析了近红外连续激光辐照尼龙材料引起的热烧蚀现象。用摄像机和红外热像仪记录了尼龙材料在烧蚀过程中的主要现象和温度变化过程, 并对实验结果与 ANSYS 仿真结果进行了对比。使用波长为 976 nm, 输出功率密度为 1×10^5 W/m²、光斑高斯半径为 10 mm 的光束对尼龙材料进行照射的结果显示: 开始时尼龙材料温度迅速上升, 发生膨胀, 并逐渐熔融分解; 随着照射时间的增加, 尼龙材料温度变化变缓, 熔融部分向光斑边缘退化; 当达到一定温度时, 材料温度不再升高。由于受光束质量、材料性能不均匀、熔融部分向边缘退化等因素影响, 得到的实验烧蚀结果与理论烧蚀结果稍有差异, 但基本吻合, 验证了实验方法及 ANSYS 数值仿真方案的可行性。

关键词: 激光辐照; 激光烧蚀; 尼龙; 红外热像仪; ANSYS 仿真;

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2014

Thermal ablation law of nylon materials under laser irradiation

MENG Wen, HAN Xiao-fei*, LI Yun-xia, LI Da

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

* Corresponding author, E-mail: hanxiaofei_hxf@163.com

Abstract: To obtain the thermal ablation law of nylon materials under laser irradiation, the infrared imaging was used to explore thermal ablation phenomena of nylon materials under continuous infrared laser irradiation. A camera and an infrared thermal imager were used to record the main phenomena of laser ablation and its temperature field, and a comparison between experiment results and ANSYS simulation was performed. When the nylon was irradiated by using a 976 nm laser beam with an output power density of 1×10^5 W/m² and a spot semi-diameter of 10 mm, the experiments show that the temperature of nylon rises quickly at first, then expands, melts and decomposes. As time goes on, the temperature of nylon changes slowly, and the melted parts degenerate into the spot edge. When the temperature of nylon reaches certain value, it is no longer rise. Affected by beam quality, material heterogeneous, melted parts degenerated and so on, it indicates that the experimental ablation results and the theoretical results are slightly different, but basically acceptable, which verifies the feasibility of the proposed method and ANSYS simulation.

Key words: laser irradiation; laser ablation; nylon; infrared thermal imager; ANSYS simulation

收稿日期: 2013-09-25; 修订日期: 2013-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108086)

1 引言

尼龙66伞布是一种高密度、高强度抗断裂的尼龙纤维材料,由于具有零透气性,抗紫外线辐射,耐磨性能好等特点,而成为低慢小目标制作的重要材料之一。了解激光辐照下尼龙纤维材料性能的宏、微观演化规律,把握激光烧蚀机制,准确模拟尼龙材料的烧蚀破坏过程,对激光防御低慢小目标具有较高的理论价值和现实意义。

目前,关于碳纤维等复合材料的激光烧蚀破坏的研究已取得了很大的进展^[1-7]。陈敏孙和常新龙等人从理论方面推导分析了复合材料热分解的温度场模型,研究了激光烧蚀碳纤维复合材料的烧蚀规律^[3-4]。陈博、黄永光、郭亚林等人运用实验的方法,研究了不同条件下激光烧蚀复合材料的主要现象,分析了各个参数对复合材料烧蚀的影响,得到了材料的温度场变化和热烧蚀规

律^[5-7]。不过,目前还没有激光辐照下尼龙材料烧蚀规律的相关报道。

本文利用红外成像的方法研究了近红外连续激光辐照尼龙材料引起的热烧蚀现象,分析了烧蚀过程中材料的温度场变化,并与理论仿真结果对比,从而为研究激光辐照下尼龙材料的烧蚀规律奠定基础。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料和设备

实验试样由尼龙纤维($[-NH-(CH_2)_5-CO]_n-$)正交编制成纤维网格,尼龙纤维直径为0.5 mm,共两层,厚度为1 mm。表1给出了常温条件下,尼龙材料的性能参数^[8]。实验选用波长976 nm的激光器作为光源,用红外热像仪检测尼龙材料的烧蚀温度。

表1 常温下材料性能参数

Tab.1 Material parameters of nylon at room temperature

材料	密度 ρ /($g \cdot cm^{-3}$)	比热 C /($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)	熔融热 ΔH /($J \cdot mol^{-1}$)	熔融熵 ΔS /($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)	热导率 k /($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	焓 /($J \cdot g^{-1}$)
尼龙66	1.15	1.67	4 390.3	8.37	0.25	45.68
材料	熔点 /°C	分解温度 /°C	自燃温度 /°C	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	
尼龙66	259	>300	>450	83	2.9	

2.2 实验方法

图1是激光辐照尼龙纤维材料的实验装置示意图^[8]。实验过程中,通过电流控制激光的输出

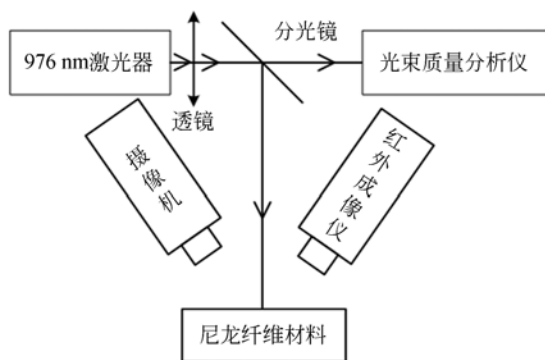


图1 激光辐照尼龙纤维材料实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental devices for laser irradiation nylon material

功率,末端利用光纤输出;分光镜放置在透镜之后,与光束质量分析仪和靶样品前表面的距离相同,以确保光束到达光束质量分析仪和靶表面的光斑一致。通过光束质量分析仪(美国Thorlabs公司BP-109-IR)测得光斑半径和光强分布,用摄像机拍摄并记录实验现象,同时采用红外热像仪(浙江大力DM60-S)测量辐照区的温度,并与ANSYS仿真结果进行对比。

3 实验结果与分析

根据图1搭建实验装置,首先使用光束质量分析仪测量光束,如图2所示。光束分布形式近似为高斯分布,通过光束质量分析仪测得到达靶材表面的光斑的高斯半径为10 mm。

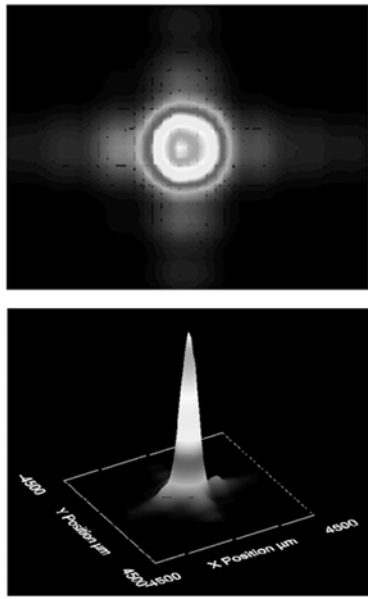


图 2 光束质量分析仪测得的光斑图像

Fig. 2 Light spot image captured by beam quality analyzer

用该光束辐照尼龙材料,图 3 给出了激光照射过程中,不同时刻尼龙材料烧蚀形貌的可见光图像。从图 3 可以看出,激光开始照射时,材料表面瞬间出现亮斑(见图 3(a));随着照射时间的增加,材料表面层吸收能量开始焦化,表面出现轻微的松动或者膨胀(见图 3(b));接着光斑中心附近发生分解,并有少量白烟出现(见图 3(c));随后分解部分从中心向边缘不断扩散,直至与光斑高斯半径大小一致(见图 3(d))。

图 4 表示了不同辐照时间下,尼龙材料的温度场分布。辐照开始时,尼龙材料的温度不断上升;当温度到达 260 °C 左右时,尼龙材料开始熔融分解,材料吸收大量的能量,温度变化变缓。随着照射时间的增加,尼龙温度继续升高,当温度达到 354 °C 时,温度不再升高,且温度场向光斑边缘扩散。由于尼龙材料的热传导系数较小,烧蚀区主要集中在光斑照射区域内。

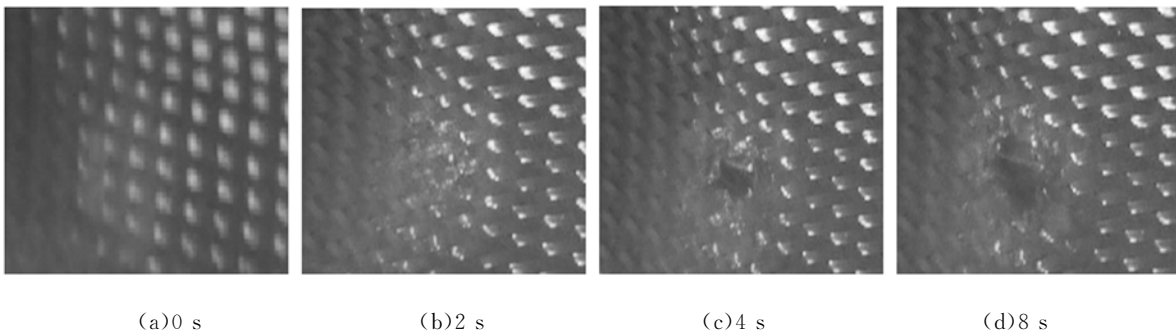


图 3 不同辐照时间尼龙材料的激光烧蚀形貌

Fig. 3 Ablation morphologies of nylon at different irradiation time

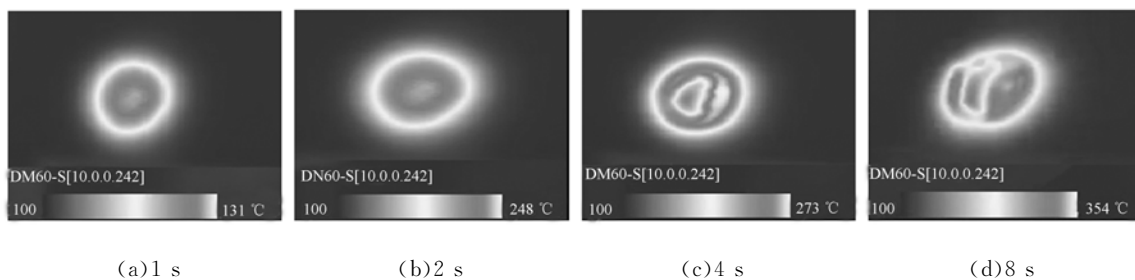


图 4 不同辐照时间尼龙材料的温度场分布

Fig. 4 Distributions of temperature field of nylon at different irradiation time

4 实验结果与仿真结果对比

为简化模型,仿真过程中首先对激光烧蚀过程作如下假设:激光能量加载区域尺度远大于材料的热响应尺度;材料密度和比热容在固态时变化较小,近似为常数;材料熔穿部分会发生材料退移;材料对激光能量的吸收效率为 100%;温度较低条件下,不考虑材料燃烧放热;不考虑空气对流

$$H(T) = \begin{cases} \rho C_s T, & T_0 < T < T_s \\ \rho C_s (T_s - T_0) + \rho C^* (T - T_s), & T_s < T < T_1 \\ \rho C_s (T_s - T_0) + \rho C^* (T_1 - T_s) + \rho C_l (T - T_1), & T_1 < T \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C^* = \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{L}{T_1 - T_s}$, C_s 为固体比热容, C_l 为液态比热容, L 为单位质量的潜热。

使用波长为 976 nm,光斑中心处的功率密度为 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,光斑半径为 10 mm 的高斯分布

对材料温度场的影响^[9]。

通过有限元软件 ANSYS 的 APDL(ANSYS Parametric Design Language)语言编制参数化程序,用三维八节点 SOLID 70 热分析单元模拟材料的三维辐照温度场,网格单元尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ^[10]。利用表 1 参数对实验进行数值仿真。在进行 ANSYS 分析时,按照式(1)计算材料焓^[11]。

光束照射尼龙材料,不同时刻材料温度场分布的数值模拟结果如图 5 所示。图 6 所示为样品上表面($z=0 \text{ mm}$)和下表面($z=1 \text{ mm}$)中心点随时间变化的温度曲线。

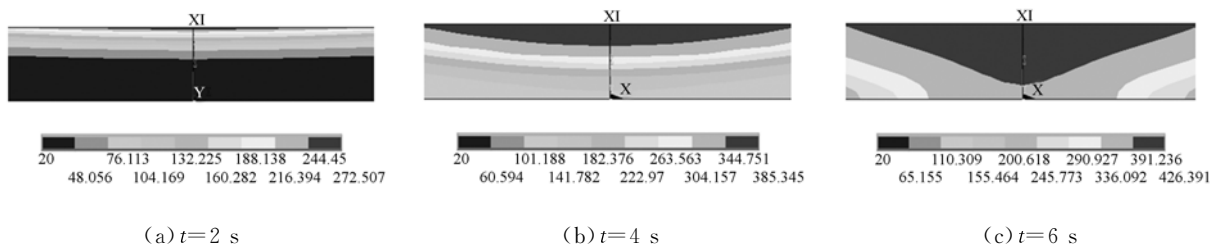


图 5 不同时刻的温度场分布图

Fig. 5 Distributions of temperature fields at different time

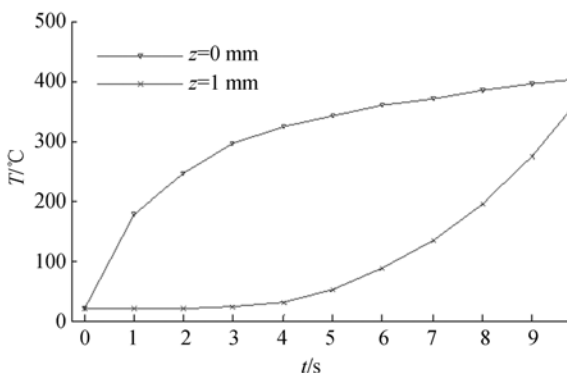


图 6 材料上、下表面中心点随时间变化的温度曲线

Fig. 6 Variation of center point's temperature with time

从图 4、图 5 可以看出,大约在 2 s 左右样品上表面的温度达到熔点温度,样品开始发生相变,

温升曲线变缓,这是由于尼龙材料熔融和分解需要吸收大量的热,导致样品的温度变化变缓。随着辐照时间的增加,材料发生熔融和分解的位置向下表面移动。当 $t=8 \text{ s}$ 时,材料已经完全熔穿。整个仿真过程中,激光烧蚀形状是一个规则的圆形。

由图 3、图 4 的实验结果可知,材料的烧蚀形状不是规则的圆形,而在仿真过程中其烧蚀形状是一个规则的圆形。这是由于仿真过程中,设定材料的性质是各向同性的均匀材料,材料在各个方向上对能量的吸收和传导是一样的,因而烧蚀区域是规则的圆形。而在实际实验中,尼龙材料中尼龙纤维的编织方向,材料存在一定的杂质以及不同纤维的编织方向对激光的吸收效率等情况

都会导致材料的各向异性,使各个方向上材料对激光能量的吸收和热传导状况不同,导致烧蚀形状与仿真结果存在差异。再者,在激光烧蚀过程中,尼龙材料的熔融部分向边缘退化,也会影响材料对激光能量的吸收和热传导。激光光束本身并不是严格的高斯光束,因此照射在材料表面的能量分布也不是严格的高斯分布,在各个方向上照射能量的差异也是导致烧蚀区域与数值仿真不同的原因之一。

图 7 给出的是实验中材料中心点温度随时间的变化曲线和仿真结果的对比。从图 7 可以看出,辐照开始时,实验结果与仿真结果的温度变化曲线基本一致;辐照一段时间后(辐照 2 s 后),由于材料到达熔融分解温度,尼龙材料融化分解,并向边缘退化,导致光斑中心温度比理论值略低,

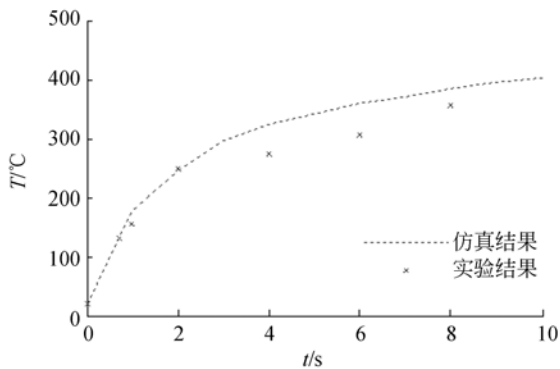


图 7 中心点温度的实验结果与仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of results between experiment and simulation

参考文献:

- [1] LACHAUD J, ASPA Y, GERARD L. Analytical modeling of the steady state ablation of a 3D C/C composite[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51:2614-2627.
- [2] 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)
- [3] 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.

且实验条件与 ANSYS 仿真的理想条件存在差异,材料对激光能量的吸收效率不是 100%,导致实验中的材料吸收能量略低于仿真过程中的能量,这也是导致实验结果与理论结果稍有不同的原因之一。

实验结果和仿真结果虽然存在差异,但是基本吻合,能正确反映烧蚀过程中材料的烧蚀状态和温度场变化。通过对比验证了实验方法及 ANSYS 数值仿真方案的可行性,从而为尼龙等非金属材料的仿真实验提供了准确的、可复现的仿真方法。

5 结 论

本文通过摄像机和红外热像仪观测尼龙材料的烧蚀过程,得到了波长为 976 nm、光斑中心功率密度为 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 、光斑高斯半径为 10 mm 的光束照射条件下,尼龙材料的温度场变化和烧蚀规律。将实验结果与 ANSYS 仿真结果对比发现:受光束质量、材料性能不均匀、熔融部分向边缘退化等因素的影响,理论烧蚀形状与实验烧蚀形状稍有差异。尼龙材料熔融分解前,温度场的理论仿真与实验结果一致;当尼龙材料发生熔融分解现象时,由于材料向边缘退化,导致实验值比理论值略低。实验验证了实验方法及 ANSYS 数值仿真方案的可行性。本研究为低慢小目标激光防御的理论研究提供了仿真依据。

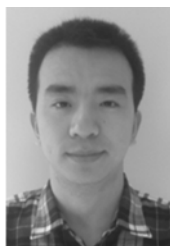
- CHEN M S, JIANG H M, LIU Z J. Three-dimensional temperature field model of thermally decomposing resin composite irradiated by laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 642-646. (in Chinese)
- [4] 常新龙,李正亮,胡波,等. 碳纤维/环氧树脂层合板的激光烧蚀特性分析[J]. *激光与红外工程*, 2011, 40(9):1691-1695.
- CHANG X L, LI ZH L, HU B, et al.. Analysis of carbon/epoxy laminates ablation subject to laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9):1691-1695. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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 composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(5):84-88. (in Chinese)
- [8] 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.
CHEN M S, JIANG H M. Influence of tangential airflows on process of laser ablating carbon-fiber composites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 482-486. (in Chinese)
- [9] 刘峰,彭国良,杜太焦,等. 切向气流对激光加热金属板非熔化穿孔效应的影响[J]. 中国光学, 2013, 6(3):332-342.
LIU F, PENG G L, DU T J, *et al.*. Influence of tangential airflows on burn-through effect with non-melting of metal heated by laser [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):332-342. (in Chinese)
- [10] 肖婧,何衡湘,夏惠军,等. 长脉冲与连续激光联合辐照铝合金的温度场仿真[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1103002-1-6.
XIAO J, HE H X, XIA H J, *et al.*. Temperature field simulation on aluminum alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, 39(11): 1103002-1-6. (in Chinese)
- [11] 李大为. 强激光对低慢小目标的热损伤效应研究[D]. 西安:空军工程大学, 2012.
LI D W. *Study on High Power Laser Damage about Low Slow Small Target* [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2012. (in Chinese)

作者简介:



蒙文(1966—),男,广西桂平人,副教授,硕士生导师,1989年于北京理工大学获得学士学位,1995年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事激光空间信息对抗技术的研究。E-mail: mengwen_mw@126.com



韩晓飞(1988—),男,山东平度人,硕士,2011年,2013年于空军工程大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为激光空间信息技术。E-mail: hanxiaofei_hxf@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)