

文章编号 1004-924X(2017)02-0351-07

切向气流作用下激光辐照对尼龙材料的热烧蚀规律

蒙文¹, 张文杰^{2*}, 李云霞¹, 方英武¹, 韩晓飞¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077;

2. 中国人民解放军 95007 部队, 广东广州 510400)

摘要:为了研究切向气流对激光毁伤低慢小目标的影响, 采用仿真分析和实验相结合的方法研究了在激光辐照典型低慢小目标材料尼龙 66 过程中切向气流对激光烧蚀作用的影响。建立了激光烧蚀尼龙的简化物理模型, 利用红外热像仪分别研究了 1.5 s 和 4 s 两个时刻激光辐照下尼龙材料的温度场分布和烧蚀形貌, 并与无气流条件下的结果进行对比。实验表明, 切向气流对激光烧蚀尼龙材料过程的影响主要分两个阶段, 在辐照前段切向气流减缓了激光辐照下尼龙 66 材料的温升, 抑制了激光对尼龙材料的烧蚀作用; 但随着温度的升高, 热分解产物增多使激光屏蔽作用增强, 切向气流减轻了目标材料表面热分解产物对激光的衰减, 并为尼龙材料的氧化烧蚀提供更多氧气, 促进了烧蚀作用。最后对切向气流下激光烧蚀尼龙的过程进行了 ANSYS 仿真, 实验结果和仿真结果基本一致, 从而验证了理论的可靠性。

关键词:激光烧蚀; 激光辐照; 热烧蚀; 尼龙 66; 切向气流; ANSYS 仿真

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172402.0351

Thermal ablation law of laser irradiation on nylon materials under tangential airflow

MENG Wen¹, ZHANG Wen-jie^{2*}, LI Yun-xia¹, FANG Ying-wu¹, HAN Xiao-fei¹

(1. *Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;*

2. *Unit 95007 of Chinese People's Liberation Army, Guangzhou 510400, China)*

* *Corresponding author, E-mail: kdyzwxj2015@163.com*

Abstract: To study the influence of tangential flow on laser damage of slow small targets, a research on the effect of tangential airflow on laser ablation in the process of laser irradiation on a typical low slow small target material of nylon 66 was achieved experimentally and in simulation. The physical model of laser ablation on nylon 66 was established. Based on the model, the temperature field distribution and ablation morphology of nylon materials for 4 s and 1.5 s laser irradiation with and without tangential airflow recorded by a thermal infrared imager were analyzed. The experimental results show that the effect of tangential airflow on the process of laser ablation of nylon 66 is divided into two main stages; in the irradiation early stage, the tangential airflow slows down the thermal increase of nylon 66 materials under laser irradiation, thus restraining the laser ablation of nylon material;

收稿日期: 2016-06-21; 修订日期: 2016-08-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61471387); 陕西省科技计划项目资助课题 (No. 2013K07-17)

However, with the rise of temperature, the increase of the thermal decomposition products leads to laser shielding effect enhancement, thus the tangential flow reduces the attenuation of thermal decomposition products on the surface of target materials to laser and can provide more oxygen for ablation of nylon material. Finally, the process of laser ablation on nylon was simulated by ANSYS. The simulation results are in good agreement with the experimental results, which verifies the reliability of the theory.

Key words: laser ablation; laser irradiation; thermal ablation; nylon 66; tangential airflow; ANSYS-simulation

1 引言

近年来,随着低慢小目标对重大活动、重点区域威胁的日益突出,低慢小目标的防御成为空防安保的一项重要任务。激光作为一种新的防御手段,具有速度快、作战效费比高、摧坚能力强、拦截概率高等其它常规武器不可比拟的优势,因此成为世界各国军事研究和发展的重点。

激光防御低慢小目标主要通过高功率激光对目标搭载的各种光电设备进行激光干扰破坏或者直接对目标材料进行热毁伤来实现。因此,热烧蚀破坏是激光对目标毁伤的重要破坏效应之一。外界环境因素(如气流、温度、压力等)以及目标本身特性(如表面状况、飞行速度、高度等)会影响激光对目标的毁伤效果。其中,由于低慢小目标在空中快速飞行,气流毫无疑问成为影响激光对低慢小目标毁伤效应的重要因素之一。张健、黄晨光利用有限元法分析了在亚音速条件下运动目标在激光辐照全过程中温度场和热应力场的分布和变化规律,证明高速流场会导致明显的冷却效应^[1]。郑艳丽、陈敏孙等人在无气流、有空气流、有氮气流 3 种条件下对金属材料温升模拟以及玻璃纤维复合材料的激光辐照效应进行了研究^[2-4]。杜太焦等人利用 matlab 建立了高速目标温升效应物理模型,证明了气流在一定程度上减弱了激光辐照下材料的温升效应^[5]。

尼龙 66 伞布是一种制作低慢小目标的重要材料。该材料由高密度、高强度抗断裂的尼龙纤维($[-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}]_n-$)材料织成,具有零透气性、抗紫外线辐射、耐磨性能好等特点。目前,还没有人从整体上研究气流对激光辐照尼龙材料烧蚀效应的影响。本文利用红外热像仪研究了切向气流作用下激光辐照尼龙材料的烧蚀规律,并与无气流条件下的激光辐照效应进行对比,得到了

切向气流作用于激光烧蚀尼龙材料过程的影响规律。最后对切向气流作用下的烧蚀过程进行了 ANSYS 仿真,仿真结果与实验结果基本吻合。本研究为切向气流作用下激光防御低慢小目标的研究奠定了基础。

2 理论物理模型

连续激光对材料的烧蚀是一个瞬态热分析过程。当激光束垂直辐照材料,入射光束为高斯光束时,使用平面坐标系建立空间轴对称模型,如图 1 所示。将激光等效为高斯分布表面热流源^[6], 即有:

$$Q(x, y, t) = P(1-R)/(\pi r^2) e^{-(x^2+y^2)/r^2}, \quad (1)$$

其中: $P[1 - R]$ 是真正被尼龙材料吸收的激光功率, $\exp[-(x^2 + y^2)/r^2]$ 代表热源的空间高斯分布, R 为材料对激光的反射率, r 为光斑半径。

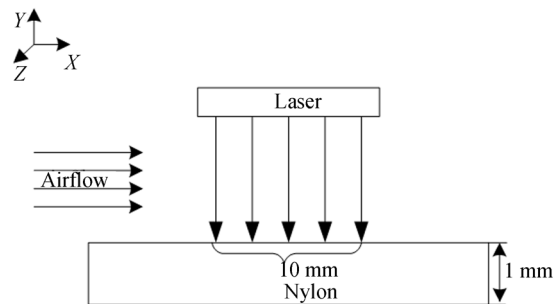


图 1 激光烧蚀尼龙的简化物理模型

Fig. 1 Simplified physical model of laser ablation on nylon

对均匀各向同性的材料,其热传导方程为:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right), \quad (2)$$

式中: $T(x, y, z, t)$ 表示材料在 t 时刻的温度场分布; ρ, c, k_x, k_y, k_z 分别表示材料的密度、比热和热传导系数。对流和热传导系数与气流的运动状态、速度、黏度、热物性及靶材的尺寸、形状、位置等因素有关。

尼龙材料发生烧蚀后产生的烟幕对激光强度的衰减为:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-M_c C b), \quad (3)$$

式中: M_c 是消光系数; C 是烟幕颗粒浓度; b 是激光穿透烟幕长度。

激光能量吸收系数为:

$$\beta = 1 - \exp(-b M_c C). \quad (4)$$

考虑辐照过程中的对流和辐射, 边界条件为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon \delta (T^4 - T_\infty^4) + h(T - T_\infty), \quad (5)$$

其中: n 为法向量, ϵ 代表材料表面的发射率, σ 为斯特潘波尔兹曼常数, T 为环境温度, T_∞ 为材料温度, h 为对流换热系数。这里 ϵ 取 $0.9^{[8]}$ 。

根据亚音速风洞实验得出的经验公式^[9], 对流换热系数为:

$$h = 0.08 Ma^{0.8}. \quad (6)$$

初始时刻目标的温度为环境温度, 即:

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0. \quad (7)$$

激光与复合材料相互作用的过程中, 根据能量守恒原理, 有限元热平衡方程为:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\}, \quad (8)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数; $[C]$ 为比热矩阵; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的倒数; $\{Q\}$ 为节点热流率向量。

表 1 常温下尼龙材料的性能参数

Tab. 1 Material parameters of nylon at room temperature

材料	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比热 C /($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	熔融热 ΔH /($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)	熔融熵 ΔS /($\text{J}/\text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率 k /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	熔 /($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
尼龙 66	1.15	1.67	4390.3	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	

3 实验材料和实验设备

实验装置如图 2 所示。实验材料选取由尼龙纤维 ($[-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}]_n$), 正交编制成纤维网

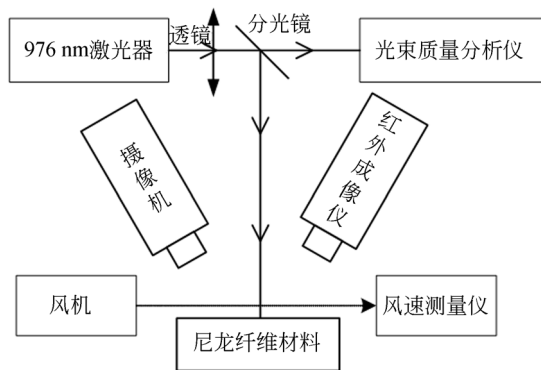


图 2 激光烧蚀尼龙实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental devices for laser ablation on nylon

格, 尼龙纤维的直径为 0.5 mm , 共两层, 厚度为 1 mm 。常温条件下尼龙材料的性能参数如表 1 所示^[10]。实验在风速为 100 m/s 的情况下进行, 选用波长为 976 nm 、输出功率密度为 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 的激光器作为光源, 材料的初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 采用红外热像仪检测尼龙材料的烧蚀温度。激光光束质量采用光束质量检测仪进行检测, 结果如图 3 所示。

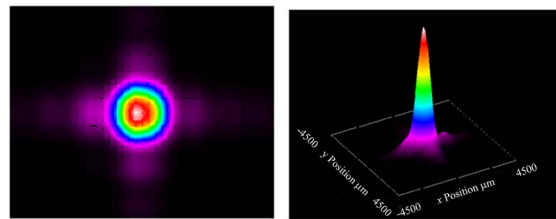


图 3 光束质量分析仪测得的光斑图像

Fig. 3 Spot image measured by beam quality analyzer

4 实验结果与分析

实验分别在有切向气流和无气流两种情况下进行了激光烧蚀尼龙材料的实验,采用风速测量仪测定切向风速,有切向气流时待到风速稳定在 100 m/s 时激光开始照射尼龙,分别利用红外热

像仪和摄像机记录实验过程中两种情况下不同时刻尼龙材料的温度变化以及材料的熔融烧蚀情况,测得两种情况下辐照开始至融穿 4 s 时刻激光辐照尼龙材料的温度场分布,如图 4 所示。尼龙材料烧蚀形貌如图 5 所示,光斑中心的温度场变化拟合曲线如图 6 所示。

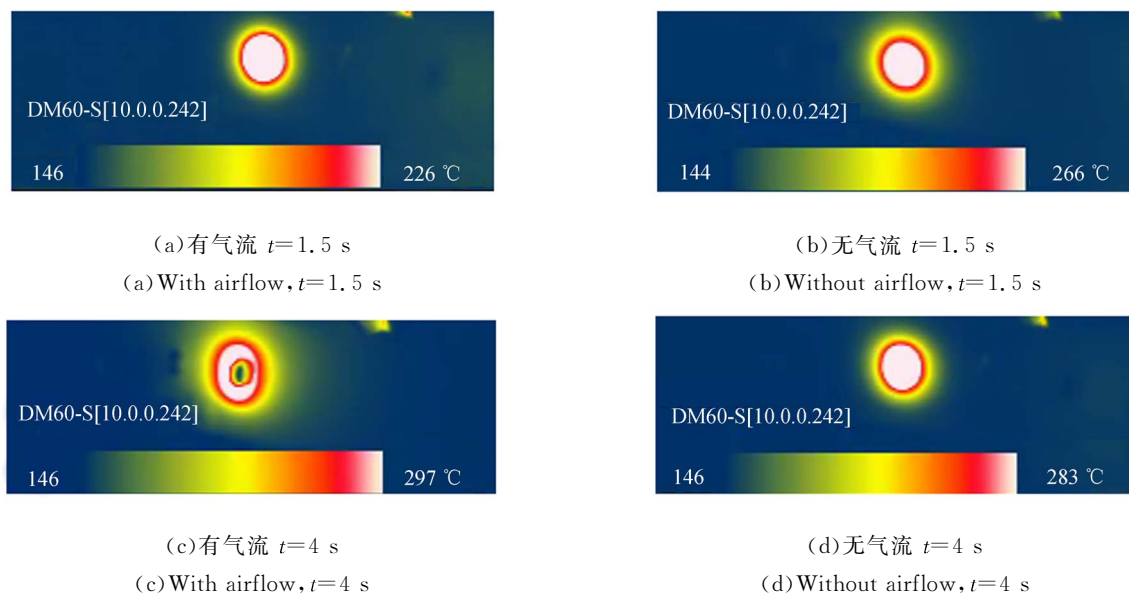


图 4 有无切向气流情况下不同时刻尼龙材料的温度场分布

Fig. 4 Temperature field distributions of nylon material with and without tangential flow at different moments

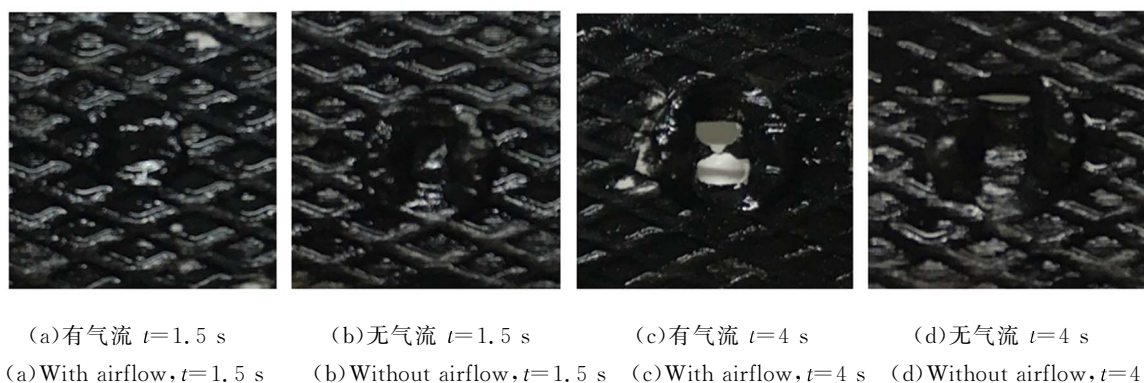


图 5 有无切向气流情况下不同时刻尼龙材料的烧蚀形貌

Fig. 5 Ablation morphologies of nylon material with and without tangential flow at different moments

根据摄像机以及红外热像仪在不同时刻对材料表面状况和温度的记录可知,辐照开始后 1.5 s 时两种情况下材料的温度及表面状况(见图 4(a)和 4(b)及图 5(a)和 5(b)),无切向气流条件下温度如图 4(b)所示,尼龙材料已经开始熔融(见图 5

(b))。而切向气流作用下的尼龙材料温度分布如图 4(a)所示,还未达到熔点,此时材料的表面状况如图 5(a)所示,切向气流抑制了材料的升温。随着激光的持续辐照,熔融之后 4 s 时刻的温度分布及表况如图 4(c)和 4(d)及图 5(c)和

5(d)所示,可以发现在切向气流作用下材料的温度如图 4(c)所示,明显高于无切向气流(图 4(d))的情况,切向气流条件下材料表面的熔融程度(图 5(c))高于无切向气流条件的情况(图 5(d))。实验观察可以发现,在无切向气流时辐照区域发生熔融后开始产生少量白色烟雾,并且随着熔融加剧烟雾逐渐增多;而有切向气流条件下烟雾被气流带走未观察到明显烟雾,材料烧蚀热分解产物会吸收入射激光并对入射激光产生散射和反射的作用,从而影响入射激光对材料的辐照,切向气流会增加材料与空气的对流换热。

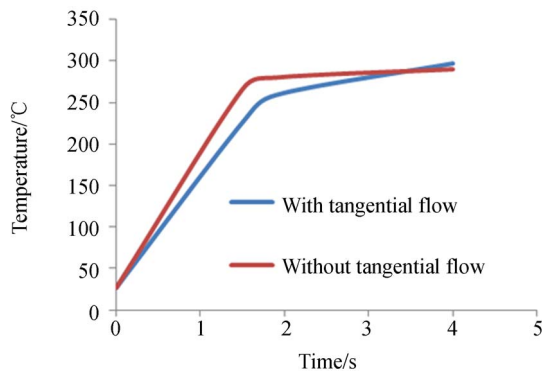


图 6 有无切向气流下光斑中心的温度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of temperature of speckle center with and without tangential flow

由图 6 可以观察到光斑中心处的温升状况。无切向气流时,在尼龙材料未达到熔点之前温升速度较快,材料光斑中心到达熔点后温升速度逐渐减缓,主要由于尼龙材料发生熔融需要吸收大量的热量;而常见的金属材料发生熔融后材料的温升速度加快主要是由于金属材料对光的反射率较高,熔融表面对激光的反射率降低,吸收率增加,能量耦合率增大。尼龙材料是非金属材料且黑色尼龙材料对光的反射率较低,因此受熔融表面吸收率变化的影响较小。在 100 m/s 的切向气流下,尼龙材料开始阶段的温升速度低于无切向气流条件下的温升,到达熔点时间较无切向气流晚,开始熔融一段时间后,切向气流条件下材料的温升速度高于无气流干扰的情况,并且在一段时间后超过无切向气流条件下尼龙材料的温度,由此可见,切向气流对激光辐照尼龙材料的影响主要分为抑制温升和促进烧蚀两个阶段。

5 实验与仿真结果对比

激光辐照材料是一个复杂的过程,涉及热学、流体力学以及弹塑性力学方面的内容,尤其是材料在高温时一些热力学参数不断变化难以确定,所以这里在仿真过程中进一步简化模型,忽略了材料氧化作用对温度场的影响,在熔融状态之前温度动态范围内假设尼龙材料的密度、比热容、弹性模量、热膨胀系数不发生变化,材料尺寸大于光斑半径,即激光能量加载区域尺度远大于材料的热响应尺度。激光在不同的阶段使采用分段加载的方式。

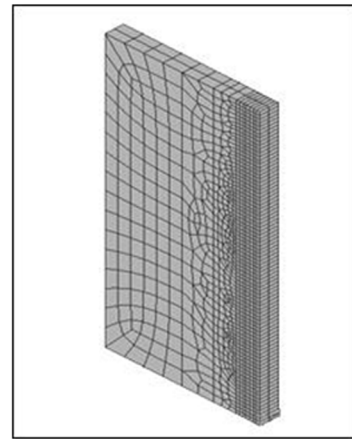
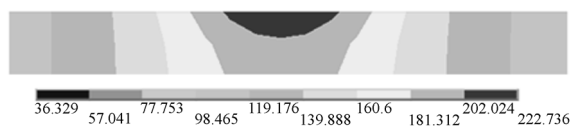


图 7 激光辐照尼龙的有限元分析模型

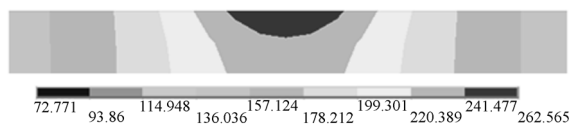
Fig. 7 Finite element analysis model of laser irradiation on nylon

通过 ANSYS 软件进行仿真分析,采用三维八节点热分析 SOLID70 单元数值模拟材料的三维辐照温度场,网格单元尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,在激光辐照范围内采用高密度的网格划分,如图 7 所示。利用表 1 参数^[2],将激光作为高斯热源加载到尼龙材料上进行瞬态分析,由于分析模型关于 x 轴对称,因此只取一半进行分析即可。

对切向气流条件下的激光辐照尼龙材料响应过程进行数值模拟发现,在材料到达熔融温度前,有切向气流情况下材料的温升明显慢于无切向气流的情况。由图可以看出,在有 100 m/s 的切向气流下材料到达熔点需要的时间为 1.9 s,而无切向气流情况只需要 1.5 s,其原因主要是切向气流下材料与空气的对流换热系数增大,增加了热量的流失,减缓了材料的温升。

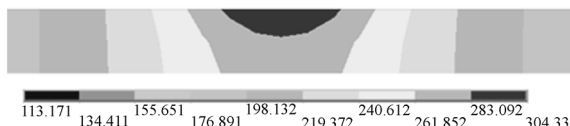


(a)有切向气流
(a)With tangential flow

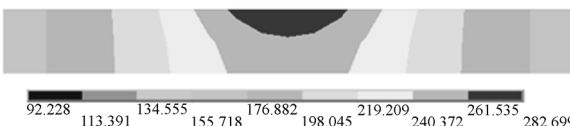


(b)无切向气流
(b)Without tangential flow
图 8 1.5 s 时刻的温度场分布

Fig. 8 Temperature field distribution at 1.5 s



(a)有切向气流
(a)With tangential flow



(b)无切向气流
(b)Without tangential flow
图 9 4 s 时刻的温度场分布

Fig. 9 Temperature field distribution at 4 s

由图 9 的仿真结果可以看出,熔融部分是一个规则的圆形,4 s 时尼龙材料已经发生熔融变化,在 100 m/s 的切向气流作用下材料的温升较快,而无切向气流情况下材料的温升较有切向气流慢。这主要是由于在无切向气流作用下材料熔融产生部分热分解产物以及烟雾,阻挡了激光对材料的辐照,在此阶段热分解产物以及烟雾对激光的阻挡起主导作用,超过了切向气流增大换热对材料温升的影响。此外,切向气流为尼龙材料的氧化分

解提供了充足的氧气,促进了尼龙材料的氧化分解。

实验与仿真结果基本吻合,但也存在一定的差异。对比实验与仿真结果可知,在切向气流条件下 1.5 s 和 4 s 时刻及无气流条件下相同时刻的温度分布的实验结果均低于仿真结果,其原因主要是实验过程中尼龙 66 材料对激光的吸收率不足 100% 造成的。观察实验过程中靶材熔池形状为不规则近似椭圆形,而仿真过程中熔池形状为规则的圆形,这是由于实验所用尼龙材料中存在杂质,并且尼龙纤维的编织方向对激光吸收效率不同造成材料对激光吸收的各向异性,而仿真过程中理想模型为各向同性的材料。

此外,实验过程中材料的氧化分解产热、空气与材料气动生热、材料对不同波长激光的吸收系数不同以及仿真过程中忽略了温度的变化对于材料各项参数的影响,这些因素也导致实验与仿真结果存在差异。

6 结 论

本文通过分析实验及仿真数据发现,切向气流对激光辐照目标材料烧蚀过程的影响大致可分为两个阶段:第一阶段,辐照开始目标材料未发生熔融现象和热分解,切向气流对激光的辐照烧蚀效应起抑制作用。此阶段切向气流由于促进了目标材料与空气的热对流,从而减缓了材料的温升,对比无切向气流而言,目标温升速度较慢,需要较长时间达到熔融温度;第二阶段,激光对目标烧蚀开始一段时间后,由于烧蚀作用产生的热分解产物阻挡了激光对目标材料的照射,目标区域吸收到的激光能量减少,相对于有切向气流条件下的辐照损伤而言,熔融速率减缓,需要较长时间完成目标材料的烧蚀穿透。此时,切向气流增强了辐照损伤效果,加速了激光对目标材料的毁伤。

综上所述,在 100 m/s 的切向气流下激光对尼龙材料的烧蚀作用缩短了熔穿的时间,起到了促进作用。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 陈敏孙,江厚满,刘泽金,等.切向空气气流对激光辐照碳纤维复合材料的影响[J].国防科技大学学报,2011,33(2):23-27.
CHEN M S,JIANG H M,LIU Z J, *et al.*. Influence of tangential airflows on process of laser ablating carbon-fiber composites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,33(2):23-27. (in Chinese)
- [3] 陈敏孙,江厚满,焦路光,等.切向气流作用下玻璃纤维复合材料的激光辐照效应[J].强激光与粒子束,2013,25(5):1075-1080.
CHEN M S,JIANG H M,JIAO L G, *et al.*. Laser irradiation effects on glass fiber composite subjected to tangential gas flow[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013,25(5):1075-1080. (in Chinese)
- [4] 郑艳丽,杜太焦,束庆邦,等.不同气流环境下激光辐照金属材料升温的数值模拟[J].强激光与粒子束,2010,22(11):2531-2534.
ZHENG Y L,DU T J,SHU Q B, *et al.*. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiated by high-power laser beam in different airflow [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11):2531-2534. (in Chinese)
- [5] 杜太焦,束庆邦,陈志华,等.高速目标激光辐照升温效应仿真研究[J].计算机仿真,2010,27(4):271-274.
DU T J,SHU Q B,CHEN ZH H, *et al.*. Study on the simulation of heating effects of high speed target laser[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(4): 271-274. (in Chinese)
- [6] 贺鹏飞,钱江佐.激光作用下复合材料损伤的数值模拟[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(7) 1046-1050.
HE P F,QIAN J Z. Numerical simulation for damage of composite materials due to laser strike[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2012,40(7):1046-1050. (in Chinese)
- [7] 中岳国,吕绪良,王占锋,等.烟幕颗粒对不同激光束的相对消光系数理论和实验[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2010,11(2):158-161.
SHEN Y G,LÜ X L,WANG ZH F, *et al.*. Theoretical and experimental study on relative extinction coefficient of smoke particles to laser beams with different wave-lengths[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010,11(2):158-161. (in Chinese)
- [8] 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].中国激光,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 Lasers*, 2013,6(3):332-342. (in Chinese)
- [9] 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 J L,LIU G D,WANG W P, *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. (in Chinese)
- [10] 韩晓飞,蒙文,李云霞,等.激光辐照下尼龙材料的热烧蚀规律[J].光学精密工程,2014,22(8):2014-2019.
HAN X F, MENG W,LI Y X, *et al.*. Thermal ablation law of nylon materials under laser irradiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2014-2019. (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



张文杰(1992—),男,山东济南人,硕士研究生,2014年于山东理工大学获得学士学位,主要研究方向为激光与物质相互作用。E-mail: kdyzjw2015@163.com