

激光作用下低慢小目标尼龙材料温度场分析

韩晓飞, 蒙文, 李云霞, 李达
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 针对激光对低慢小目标材料的毁伤问题, 采用有限元方法, 建立激光辐照平板表面激发瞬态温度场的三维模型, 对激光烧蚀尼龙材料的温度场变化进行数值模拟。得到了不同时刻材料表面温度场和烧蚀场分布, 研究了辐照时间对材料损伤和烧蚀过程的影响, 并进一步讨论了光束分布形式、光斑半径对温度场的影响。

关键词: 激光辐照; 材料损伤; 有限元法; 温度场; 尼龙66

中图分类号: V271.4; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0084-04

Numerical Simulation on Temperature Fields of Nylon Materials of Slow Small Target Irradiated by Laser Beam

HAN Xiaofei, MENG Wen, LI Yunxia, LI Da
(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To study the damage to composite material of low, slow, and small target caused by laser irradiation, a model of three-dimensional transient temperature fields of the irradiated surface was investigated by using a finite element method, and numerical simulation was performed on temperature fields of nylon materials irradiated by a laser beam. The distribution of temperature field and ablation field at different time was obtained. The effect of irradiation time on material damage and ablation process was also analyzed. Furthermore, the influence of the beam distribution and spot radius to temperature fields was discussed.

Key words: laser irradiation; material damage; finite element method; temperature field; nylon 66

0 引言

尼龙66伞布,是由一种高密度、高强度抗断裂的尼龙纤维材料织成,进口双面硅胶涂层,零透气性,抗紫外线辐射,耐磨性好,现已被广泛用于滑翔伞、三角翼、空中舞星、风帆、飞艇、特技风筝上,是低慢小目标的重要制作材料之一。研究激光对尼龙纤维材料的毁伤作用,对激光防御低慢小目标有着重要意义。

目前,激光对应用于航空、航天的碳纤维/环氧树脂等复合材料的温度场分布,热应力分析已有很多研究。文献[1]通过对复合材料与高能激光的耦合规律与现象的实验研究,确定了树脂基复合材料的损伤形式;文献[2]研究了靶材表面存在和不存在切向空气流时,975 nm连续激光对碳纤维增强树脂基复合材料的辐照效应;文献[3]对T300/AG80碳纤维复合材料层合板在激光辐照下的应变变化情况进行了测试;

文献[4]对复合材料T300/FAG80试件在室温及激光辐照下的力学性能进行了测试,得到材料的纵横向有效弹性模量以及拉压破坏强度,并分析激光参数对于材料力学性能的影响;文献[5]研究了复合材料板在不同温度环境下的温度残余应力分布情况,对静态应力及疲劳应力进行了评估。但现有文献对于激光烧蚀尼龙纤维材料的研究还少有涉及。

本文针对目前在低慢小目标上广泛使用的尼龙材料,利用有限元软件ANSYS的APDL语言,编制参数化程序,对激光辐照条件下尼龙材料的温度场变化进行数值模拟,为激光防御低慢小目标提供理论支持。

1 理论模型

1.1 热传导理论

激光对材料的烧蚀是一个瞬态热分析过程,激光可等效为表面热流源: $k \frac{\partial T}{\partial n} = -\beta I$ 。其中: k 为热导率; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为烧蚀面的法向温度梯度; β 为材料吸收率; I 为作用面上激光强度。

对均匀各向异性的材料,其热传导方程表示为^[6]

$$\rho c \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} \right) \quad (1)$$

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。其边界条件为^[7]: $\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} |_{\Gamma} = q; T = T(x,y,z,t); \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} |_{\bar{\Gamma}} = \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} |_{\bar{\Gamma}} = \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} |_{\bar{\Gamma}} = 0$ 。

1.2 模型建立

为简化分析模型,做如下假设:

- 1) 材料在发生相变前,材料密度和比热容变化较小,假设材料密度和比热容在固态时为常数;
- 2) 材料发生相变的部分,认为材料发生退移;
- 3) 温度较低条件下,认为材料不发生燃烧现象,不考虑材料燃烧放热;
- 4) 暂不考虑空气气流对材料的空气对流影响。

1.3 有限元分析

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

$$[C] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} = \{Q\} \quad (2)$$

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。

2 温度场计算与分析

2.1 材料参数

分析中以准平面各向同性的尼龙 66(聚酰胺 66)材料为研究对象,表 1 为常温条件下尼龙 66 的材料属性。激光辐照平面是一个表面积为 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 、厚度为 1 mm 的尼龙纤维平面,材料初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 1 常温下材料参数

Table 1 Material parameters at normal 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 /($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率 k /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	焓 /($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
尼龙 66	1.15	1.67	4390.3	8.37	0.25	45.68
材料	熔点/分解温度 / $^\circ\text{C}$	自燃温度 / $^\circ\text{C}$	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa		
尼龙 66	259	>300	>450	83	2.9	

2.2 温度场计算

由于模型具有对称性,对模型的 1/4 进行分析,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 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ^[8]。

在进行 ANSYS 分析时,材料焓的算式为^[9]

$$H(T) = \begin{cases} \rho C_s T, & T_0 < T < T_i \\ \rho C_s (T_i - T_0) + \rho C^* (T - T_i), & T_i < T < T_l \\ \rho C_s (T_i - T_0) + \rho C^* (T_i - T_l) + \rho C_l (T - T_l), & T > T_l \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C^* = \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{L}{T_l - T_i}$, 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。

2.3 温度场分析

2.3.1 辐照时间对温度场的影响

使用波长为 $1.06 \text{ } \mu\text{m}$ 、功率密度为 100 W/cm^2 、光斑半径为 1 cm 的高斯分布光束照射尼龙材料,不同时刻材料温度场分布的数值模拟结果如图 1 所示。图 2 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。

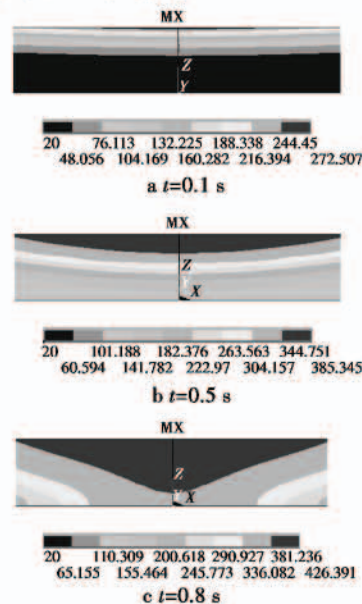


图 1 不同时刻的温度场分布图

Fig. 1 The temperature field at different time

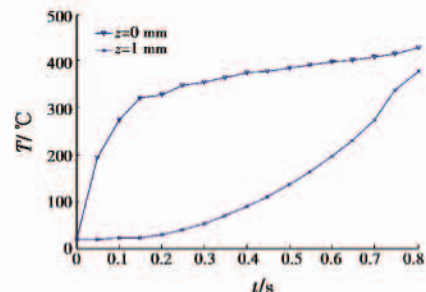


图 2 材料上、下表面中心点随时间变化的温度曲线

Fig. 2 The variation of the center point's temperature

从图 1、图 2 中可以看出,样品上表面大约在 0.1 s 左右温度达到熔点温度,样品开始发生相变,升温曲线变缓,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(如图 3 所

示), $t=0.4\text{ s}$ 时, 熔融分解现象扩散到 $z=0.3\text{ mm}$ 处; $t=0.6\text{ s}$ 时, 熔融分解现象扩散到 $z=0.6\text{ mm}$ 处; $t=0.8\text{ s}$ 时, 材料已经完全熔穿。通过对比不同时刻材料熔融分解的位置, 可以看出, 随着辐照时间的增加, 熔融分解现象向材料内部的扩散速率逐渐变大, 直至将材料熔穿。

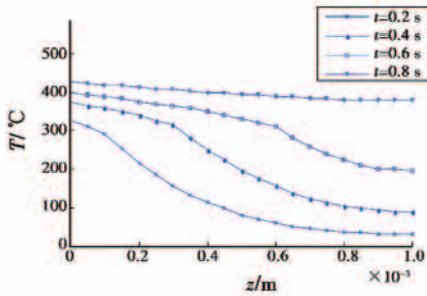


图 3 光斑中心线上不同时刻温度曲线
Fig. 3 The temperature profiles along the spot center line at different time

2.3.2 激光光束分布形式对温度场的影响

激光光强分布对目标表面横向温升和纵深破坏都将产生影响。图 4 为相同功率密度条件下, 高斯分布和均匀分布的光束在不同时刻沿材料表面温度分布曲线。从温度分布曲线可以看出: 均匀分布激光光束照射条件下, 整个光斑照射区域温度较高, 在光斑边缘处温度迅速降低; 而高斯分布激光光束照射条件下, 整个辐照区域温度变化较大, 光斑中心区域的温升最高。相同条件下, 高斯光束照射区域光斑中心温度较均匀分布照射区域光斑温度高, 材料中心区域首先达到熔融分解温度, 随着辐照时间增加, 熔融分解区域由光斑中心向光斑边缘和材料内部扩散; 而均匀光束照射区域, 光斑照射区域温度变化一致, 同时达到熔融分解温度, 随着辐照时间增加, 熔融分解区域几乎不向光斑外缘扩散, 只向材料内部扩散。这种现象主要是由于高斯分布激光能量集中在光斑中心附近, 且尼龙材料的导热系数较小, 热量在材料内部传递较慢所致, 因而高斯分布光束光斑中心吸收的能量更多, 温升更明显。

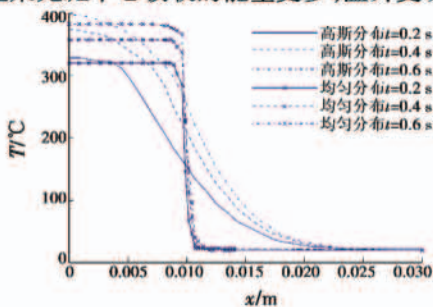


图 4 不同光束沿材料表面温度分布曲线
Fig. 4 The material surface temperature profiles of different beam distributions

2.3.3 激光光斑半径对温度场的影响

为分析光斑半径对温度场的影响, 选取功率密度相同, 光斑半径分别为 0.5 cm 、 1 cm 和 1.5 cm 的 3 组高斯分布光束对目标材料进行照射。图 5 表示功率密度为 100 W/cm^2 的 3 组光束, 照射材料 0.4 s 后, 沿光斑中心线上温度变化曲线。从图中可以看出, 光斑半径越大的光束, 材料上表面光斑中心点温度更高, 材料更容易发生熔融分解, 材料纵向熔融分解深度更深。

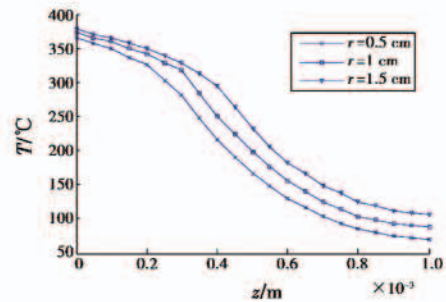


图 5 不同光斑半径光斑中心线上温度变化曲线
Fig. 5 The temperature profiles along the spot center line with different radius

3 结论

利用 ANSYS 软件对激光烧蚀尼龙材料的温度场变化进行数值模拟, 分析了辐照时间、光强分布和光斑半径对温度场分布和材料烧蚀过程的影响。数值结果表明: 使用功率密度为 100 W/cm^2 的高斯光束对 1 mm 厚尼龙材料目标照射, 随着辐照时间的增加, 熔融分解现象向材料内部的扩散速率逐渐变大; 在相同功率密度条件下, 均匀分布的光束相比高斯分布的光束对材料的烧蚀效果更明显, 材料熔穿所需时间更短; 照射目标材料的光束光斑半径越大, 材料中心点温度越高, 材料损伤深度越深。因此, 在利用激光对尼龙材料制作的低慢小目标进行防御的过程中, 选用光斑半径较大的高斯分布光束, 延长辐照时间, 对目标毁伤更有效。

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] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 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.
 [3] 朱凯, 龙连春, 陈明, 等. 复合材料层合板在激光辐照下的应变测试与分析 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23

- (12):3265-3269.
- [4] 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.
- [5] SHIMOKAWA T, KAKUTA Y, SAEKI D. Carbon plain-weave fabric low-temperature vacuum cure epoxy composite; Static and fatigue strength at room and high temperatures and practicality evaluation[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(18):245-265.
- [6] CHEN Yanbei, LU Jian, NI Xiaowu, et al. Plastic penetration during laser heating of a metal plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205:9-15.
- [7] 冯云松,李晓霞. 基于 ANSYS 的脉冲激光辐照石英玻璃的温度场数值模拟[J]. 物理实验, 2012, 32(2):35-38.
- [8] 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.
- [9] 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.
-
- (上接第 45 页)
- object tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5):564-575.
- [2] 左军毅,梁彦,赵春晖,等. Mean Shift 跟踪算法中尺度自适应策略的研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 9(13):1750-1757.
- [3] COLLINS R T. Mean Shift blob tracking through scale space [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, Wisconsin, USA, 2003:234-240.
- [4] 彭宁嵩,杨杰,刘志,等. Mean-Shift 跟踪算法中核函数窗宽的自动选取[J]. 软件学报, 2005, 16(9):1542-1550.
- [5] 林庆,陈远祥,王士同,等. 目标窗口尺寸自适应变化的 Mean-Shift 跟踪算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(12):3329-3332.
- [6] 蒋蔚. 粒子滤波改进算法研究与应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 田刚. 基于多特征融合的 Mean Shift 目标跟踪技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2011.
- [8] 赵高鹏,薄煜明. 基于自适应选择的金字塔均值漂移跟踪方法[J]. 光子学报, 2011, 40(1):154-160.
- [9] YANG Changjiang, RAMANI D, LARRY D. Efficient Mean-Shift tracking via a new similarity measure [C]//Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC, USA, 2005:176-183.
- [10] 林卉,梁亮,杜培军,等. 利用 Fourier-Mellin 变换的遥感图像自动配准[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(6):649-652.
- [11] 韩日升. 基于核的变尺度视频目标跟踪算法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
-
- (上接第 76 页)
- 识别技术[J]. 电子对抗, 2009(6):9-12.
- [8] 龚亮亮,罗景青. 一种基于脉冲样本图的雷达信号特征表述方式[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(2):83-85.
- [9] 邝平昌. 某系统雷达对抗侦察信号处理新技术研究[D]. 合肥:电子工程学院, 2010.
- [10] 孟祥豪. 基于脉冲样本图的雷达信号分选技术研究[D]. 合肥:电子工程学院, 2011.

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>