

长波红外激光目标仿真中拖尾现象的消除方法

黄战华, 陈勃昊, 刘 堃, 蔡怀宇, 张尹馨

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 目标仿真是一种能够降低武器测试时间与成本的技术。使用长波红外激光器投射光斑到屏幕上进行目标仿真时, 往往会在屏幕上产生拖尾现象, 使点状目标难以在屏幕上保持原有形状, 严重干扰对目标的精确识别, 降低测试精度。通过理论分析了激光功率、激光斑移动速度以及屏幕材料等因素对拖尾的影响, 并通过系列的对比实验进行验证。首先, 在相同的激光斑移动速度下, 激光功率越高, 拖尾现象越明显; 其次, 在激光功率相同的条件下, 激光斑移动速度越慢, 拖尾现象越明显; 最后, 不同的材料对 10.6 μm 激光的吸收能力有很大的差别, 散热性能越差, 拖尾现象越明显。结果证明: 采用根据激光斑移动速度实时调节激光功率以及使用适当热物理性质的屏幕材料的方法, 可以有效消除和减轻拖尾现象。

关键词: 拖尾现象; 长波红外激光; 激光辐照; 红外目标仿真

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0704004

Elimination of trailing in long-wave infrared laser target simulation

Huang Zhanhua, Chen Bohao, Liu Kun, Cai Huaiyu, Zhang Yinxin

(Collage of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Target simulation is a technology that can save time and cost of weapon testing. When long-wave infrared laser was used to project light spot on the spherical screen for target simulation, a trailing of the laser spot in the moving path will be generated. Such trailing makes it difficult to keep the dot target in its original shape. So the trailing interferes with the accuracy of the target identification. The influences of laser power, laser spot movement speed and screen material on the trailing were investigated by theoretical analysis and a series of experiments. Firstly, the higher the laser power was, the more obvious the tailing phenomenon was under the same laser spot moving speed. Secondly, the slower the laser spot moving speed was, the more obvious the tailing phenomenon was under the same laser power conditions. Finally, different materials had great differences in the absorption capacity of 10.6 μm laser. The worse the heat dissipation was under the same laser power conditions, the more obvious the tailing phenomenon was. The results show that the trailing phenomenon of temperature rise can be effectively eliminate and reduced by adjusting the laser power in real time according to the moving speed of the laser spot and using suitable materials for the screen. And the tailing phenomenon is effectively eliminated and reduced.

Key words: trailing; long-wave infrared laser; laser irradiation; infrared target simulation

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61475113)

作者简介: 黄战华(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电信息处理方面的研究。Email: zhanhua@tju.edu.cn

0 引言

目标仿真技术对火炮的响应速度与命中效果等性能的测试具有重要意义。该技术通常由专门的计算机软件根据模拟目标的设定运动参数计算目标在各时刻的位置坐标,并控制目标光斑生成装置将表征模拟目标的激光束投射到屏幕上对应的位置。屏幕上目标光斑的移动速度代表了模拟目标的运动位置和速度,因此通过对屏幕上的光斑进行探测、识别和跟踪,就可以完成对探测装置各种性能指标的仿真测试。由于模拟目标如固定翼飞机的引擎及其机身与空气摩擦生热所发出的辐射多处于长波红外波段(8~14 μm),因此目前多使用该波段内较为成熟的 CO₂ 激光器(波长 10.6 μm)来模拟长波红外目标。测试过程中,光斑扫描过的屏幕材料会因吸收激光的能量而发热,材料辐射出的红外光波段与模拟目标光斑的反射光波长重叠。当 CO₂ 激光束关闭或者移开时,原照射处仍然可以探测到红外光。主要表现为脉冲照射光斑的“余辉”现象与运动光斑的“拖尾”现象,探测器探测到的目标光斑不再是干净的圆形光斑,而是带着一个“尾巴”,如图 1 所示,拖尾宽度沿光斑运动的反方向由粗到细变化,强度也逐渐降低。该现象会使探测器无法精确捕捉目标光斑并定位,给武器测试造成干扰,因此有必要对光斑拖尾进行研究并予以消除。目前,激光辐照热效应领域的研究多数是关于激光对红外探测器的干扰或是对某种材料的损伤^[1-5],但鲜有针对长波红外激光造成的温升拖尾现象的消除方法研究。



图 1 红外相机拍摄的拖尾现象

Fig.1 Trailing phenomenon of infrared cameras

为探究如何消除拖尾现象,文中以 CO₂ 激光器为光源,分别采集了不同激光功率、不同光斑移动速度和不同屏幕材料下的拖尾图像,分析了这三种因素对拖尾长度与亮度的影响,并提出消除拖尾现象的方法。

1 目标仿真光斑温升拖尾理论分析

理想情况下,激光辐照到屏幕表面时,一部分能量被反射或散射,其余能量被屏幕材料吸收并转化为热能,导致激光斑覆盖区域温度升高。光斑在屏幕上移动时,相当于一个移动的热源,移动路径上的任意一点从光斑进入到离开过程中会吸收激光能量,同时辐射与激光器输出波长相近的红外光。若材料吸收热量速度大于材料散热速度,当材料温度升到探测器探测阈值以上时,就能够观察到激光光斑移动路径上的拖尾现象。

为分析影响拖尾长度和强度的主要因素,对屏幕材料在激光辐照下的温升过程进行适当的简化。简化条件如下:

(1) 假设环境温度始终不变;

(2) 认为光斑的能量分布是均匀的,且激光功率密度保持恒定;

(3) 不考虑激光辐照时热量的传播深度,将传热过程视为一维传热,材料吸收的能量取决于光谱吸收比^[6];

(4) 屏幕的尺寸远大于光斑尺寸,可将其视为无限大的物体。

基于上述四项简化条件,一维热传导方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\delta T}{\delta t} = 0 \quad (1)$$

边界条件^[7]为:

$$z=0, -K \frac{\delta T}{\delta t} = \alpha I \quad (2)$$

$$z=\infty, t=0, T=0 \quad (3)$$

屏幕材料表面的温升为:

$$T(0, t) = \frac{2\alpha I}{K} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad (4)$$

式中: α 为屏幕材料的光谱吸收比; I 为辐照到屏幕上的激光功率密度; a 为屏幕材料的热扩散率,且 $a=K/\rho C$, ρ 为材料密度, C 为恒压比热容; K 为材料热导率。

由此可见,影响温升拖尾的主要因素为:材料的热物理性质、激光功率密度 I 和辐照时间 t 。其中,材料自身的热物理性质对温升的影响很大,这主要是由于,金属通常具有较高的反射率,即光谱吸收比很

低,且常见金属的密度较大,热导率高,从而在其他条件相同时,其温升较小;而不透明的非金属材料通常有较高的光谱吸收比,能够将大部分来自激光的能量转化为热能,其温升较大。此外,激光功率密度 I 越高,激光辐照时间 t 越长,则温升越强烈。

2 拖尾产生的机理研究

目标仿真光斑拖尾现象的全面研究十分复杂,文中仅对激光功率密度、辐照时间和屏幕材料的热物性三个主要因素进行研究。结合屏幕材料温升理论分析,针对以上三个参数设计实验。在实验中,通过调节激光器输出功率来改变激光功率密度,通过调节激光斑在屏幕上的移动速度来改变辐照时间,并通过更换不同的屏幕材料来改变材料的热物性。

2.1 实验装置

实验光路示意图如图 2 所示。由 CO_2 激光器发出的 $10.6 \mu\text{m}$ 波长激光,经固定在二轴转台的平面镜反射到屏幕上,长波红外探测器负责采集屏幕上的光斑图像。实验使用的光源为 CO_2 射频激光器,其输出功率为 $0\sim 10 \text{ W}$,光腰直径(定义为光强下降为最大值 $1/e^2$ 处)为 2.4 mm ,全角发散角为 5.5 mrad 。PWM 功率调制的信号发生器频率为 $0\sim 20 \text{ kHz}$,占空比为 $0\sim 100\%$ 。二轴转台的转动速度在 $0.01\sim 90$ ($^\circ$)/s 之间可调。长波红外探测器的分辨率为 640×480 ,像元间距 $17 \mu\text{m}$,探测波长范围 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 。屏幕材料为某种有机材料,与武器测试现场所使用的球幕材料相符。屏幕与激光器的距离固定为 10 m ,与武器测试现场条件相同。

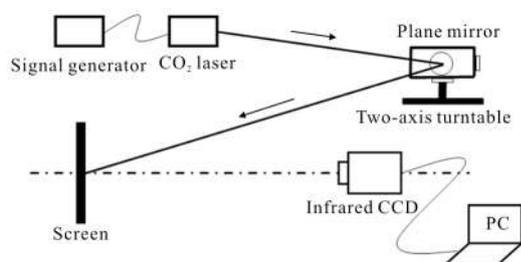


图 2 实验光路示意图

Fig.2 Schematic of experimental optical path

2.2 实验参数

在不同激光功率($0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4 \text{ W}$),不同

激光斑移动速度($1.4, 2.8, 4.2, 5.6, 7.0 \text{ mm/s}$)以及不同材料条件下,观察和探测长波红外激光斑温升拖尾的长度与亮度。

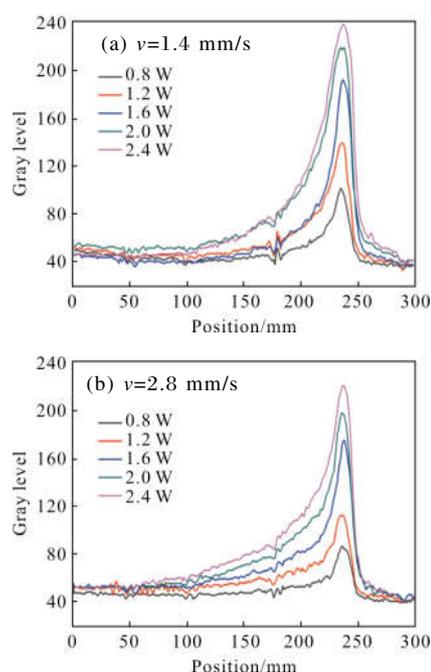
CO_2 激光光束通过二轴转台上的钼反射镜,把激光束投射到屏幕上。由计算机软件控制转台,使激光斑在屏幕上以不同的速度运动。采用长波红外摄像机对激光光斑进行成像探测,由图像采集卡进行红外图像采集并存储到计算机。

激光器输出稳定后,开始进行实验。每次驱动转台沿同一方向转动固定的角度,则激光光斑沿同一路径移动固定的长度,移动结束的同时关闭激光器,期间长波红外探测器每秒采集 5 帧图像,待屏幕上的拖尾全部冷却消失,再进行下一组实验。分别对不同激光斑移动速度和不同激光功率的组合进行实验,取每组实验中,光斑刚好停止移动时的图像,用 MATLAB 读取图像,保存光斑移动轨迹上与光斑中心位于同一行的一组灰度值。

2.3 激光功率对拖尾的影响

取相同激光斑移动速度,不同激光功率的 5 组数据进行分析,得到拖尾灰度与激光功率的关系如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,同样的光斑移动速度下,激光功率越大,则拖尾的亮度越高,长度也越长。这一变化趋势符合 2.1 节中对材料温升的理论分析:功



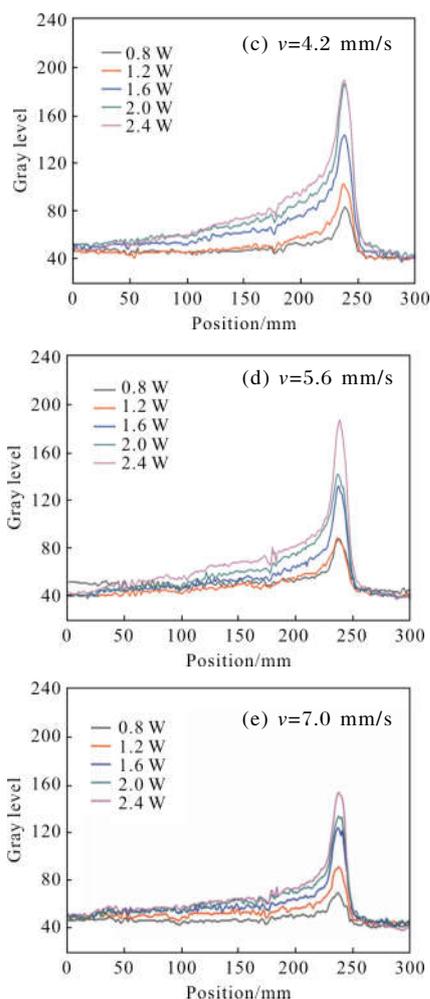


图 3 拖尾灰度与激光功率关系图

Fig.3 Laser power versus trailing's gray scale

率高,则材料温升速度快、幅度大,导致拖尾亮度高,且恢复到室温所需要的时间也 longer,所以拖尾长度也较大。

2.4 激光斑移动速度对拖尾的影响

取相同激光功率,且不同激光斑移动速度的 5 组数据进行分析,得到拖尾灰度与光斑移动速度的关系如图 4 所示。

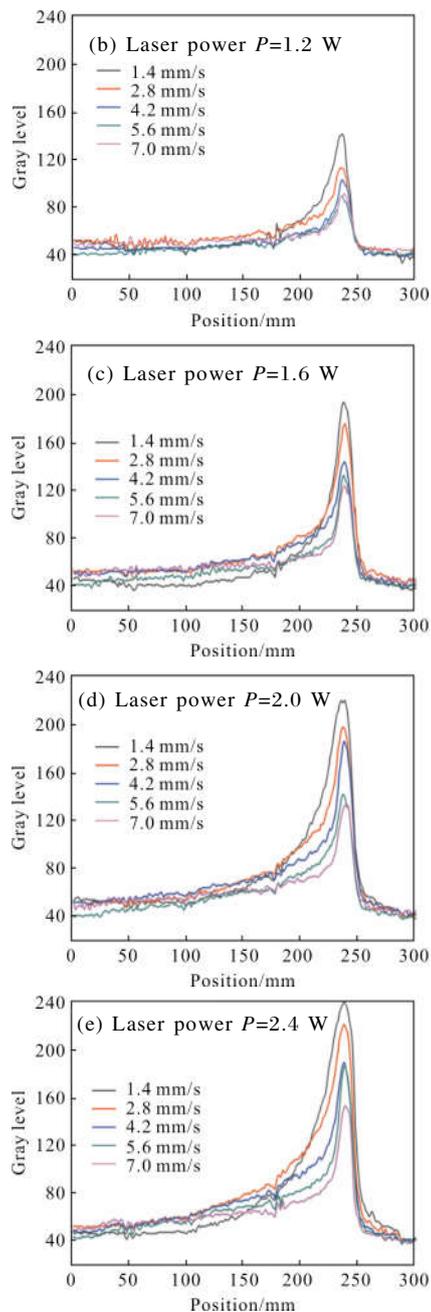
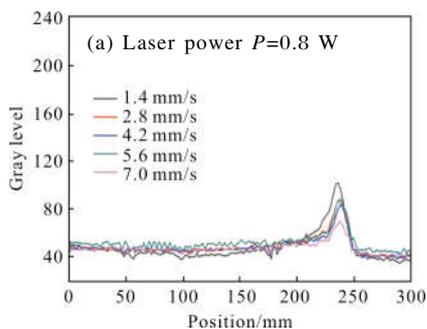


图 4 拖尾灰度与光斑移动速度关系图

Fig.4 Spot's moving speed versus trailing's gray scale

从图 4 中可以看出,同样的激光功率下,激光斑移动速度越快,则拖尾的亮度越小,长度也越短。这一变化趋势同样符合 2.1 节中对材料温升的理论分析:激光斑移动速度越快,激光对屏幕材料表面的辐照时间就越短,材料的温升就越小,拖尾效应相对不明显。但在激光斑移动速度较慢时,可能会出现拖尾亮度高但长度短的现象。图 4(e)中,激光斑移动速度为 1.4 mm/s 时,拖尾反而比移动速度 2.8 mm/s 时

更短,这是因为在该速度下,虽然激光作为热源持续对途经的材料表面加热,但激光斑后方的材料有足够的时间散热,使温度降低到室温。

2.5 材料热物理性质对拖尾的影响

分别在聚氯乙烯塑料 (PVC)、聚苯乙烯泡沫 (EPS)、茶纸板、木板以及表面涂漆的铝合金上进行实验,控制激光功率为 2.0 W,分别在光斑移动速度为 2.8 mm/s 和 5.6 mm/s 的条件下进行实验,得到拖尾灰度与屏幕材料的关系如图 5 所示。

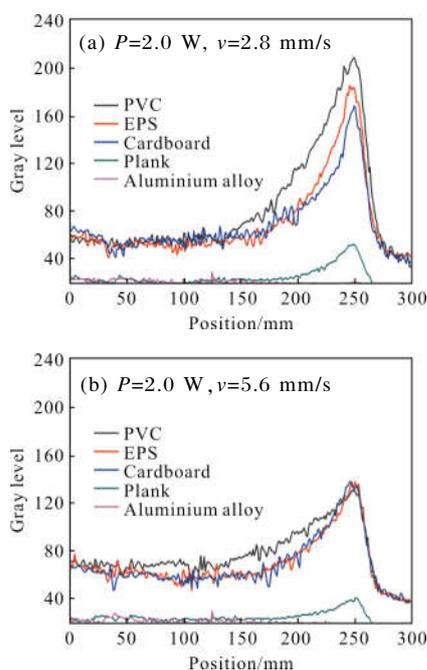


图 5 拖尾灰度与屏幕材料关系图

Fig.5 Material of screen versus trailing's gray scale

从图 5 可以看出,在实验设置的条件下,聚氯乙烯塑料的温升拖尾要强于聚苯乙烯泡沫,后者又略强于茶纸板,木板的拖尾则要弱得多,铝合金材料几乎完全没有拖尾现象。结合公式(4)可知,选取热导率高、比热容大、密度高的材料有利于减轻拖尾效应,金属材料即使在激光功率很高,光斑速度较慢的情况下也能快速将热量以热传导的方式传递出去,保持与环境相近的温度,是理想的消除长波红外激光辐照造成的温升拖尾现象的屏幕材料。

3 温升拖尾现象的消除

在实际的目标仿真过程中,激光斑的移动速度

表征模拟目标的飞行速度,不能通过增加移动速度的方式来消除拖尾。结合公式(4)以及实验结果,可以根据激光斑的移动速度实时调节激光功率,使屏幕材料温升最小的同时,屏幕上的光斑强度尽可能高,以达到良好的目标仿真效果。具体来说,就是当光斑移动速度较慢时,降低激光功率;而光斑移动速度较快时,则可以适当提升激光功率。使用木板作为屏幕材料,对这一方法进行验证,结果如图 6 所示。

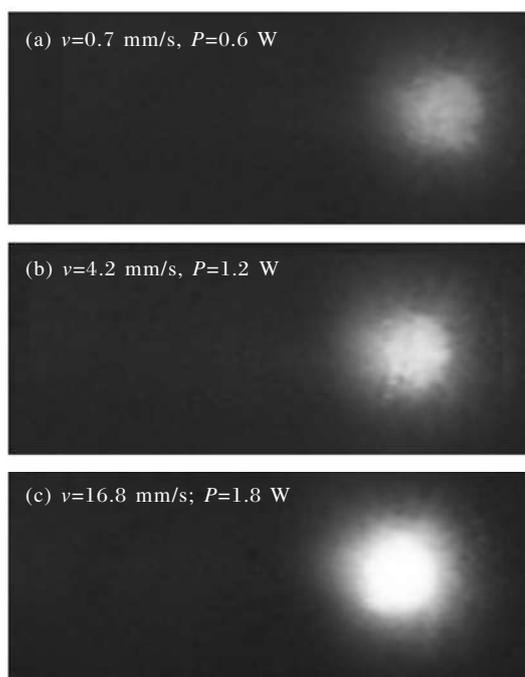


图 6 木板拖尾消除实验

Fig.6 Trailing elimination experiments of wood

图 6 中三种移动速度下的实验均在良好地观测到光斑的同时消除了温升拖尾现象,证实了根据激光斑移动速度实时调节激光功率这一方法的可行性。在实际的目标仿真过程中,可以先测试不同的激光斑移动速度与激光的组合以完成标定。

使用表面涂漆的铝合金作为屏幕材料,采取同样的方法进行实验,结果如图 7 所示。



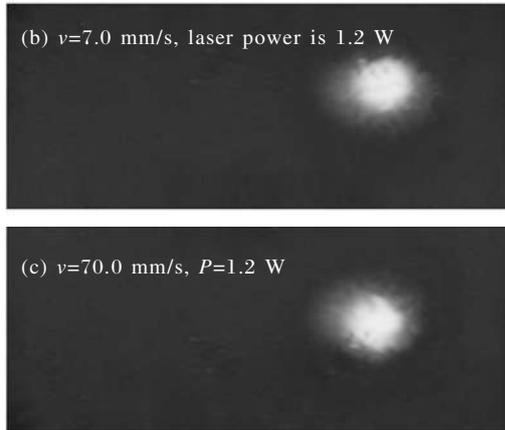


图 7 金属拖尾消除实验

Fig.7 Trailing elimination experiments of metal

图 7 中,在不同速度下,激光器以相同功率辐照屏幕时,均能保证光斑亮度在探测器阈值内且不产生拖尾。可见,根据目标仿真的具体条件选用适合的材料(如导热率高的金属)也是消除温升拖尾现象的有效方法。

4 结 论

长波红外激光目标仿真中,可能会产生影响测试精度的拖尾现象。实验结果表明:在相同的激光斑移动速度下,激光功率越高,拖尾现象就越明显;在激光功率相同的条件下,激光斑移动速度越慢,拖尾现象越明显;不同的材料对 10.6 μm 激光的吸收能力有很大的差别,选用某些特定的材料能够有效抑制温升拖尾现象。提出并验证了消除温升拖尾的方

法,即根据激光斑移动速度实时调节激光功率,以及使用热物理性质更加适合的屏幕材料。

参考文献:

- [1] Li X L, Niu C H, Ma M Y, et al. Research on the thermal damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6 μm wavelength [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(1): 6-9. (in Chinese)
- [2] Jiang N, Zhang C, Niu Y X, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1004-1007. (in Chinese)
- [3] Li X B, Wang H J, Yuan X D, et al. Effects of CO₂ laser irradiation on surface morphology and stress distribution of fused silica [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 49-53. (in Chinese)
- [4] Song H W, Huang C G. Progress in thermal-mechanical effects induced by laser [J]. *Advances in Mechanics*, 2016, 46: 435-477. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] Xu P. Research on thermal effect of laser irradiated optical materials based on the finite element method [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [7] Wang S W, Li Y, Guo L H, et al. Analysis on the disturbance of CO₂ laser to long-wave infrared HgCdTe detector [J]. *J Infrared Millim Wares*, 2010, 29(2): 102-104. (in Chinese)