

文章编号:1001-5078(2025)04-0546-08

· 激光应用技术 ·

反无人激光武器毁伤效能研究

周德元, 李杰, 李立功

(中国华阴兵器试验中心, 陕西 渭南 714200)

摘要: 中高能激光武器已经逐步实战化应用于反无人作战, 其毁伤机理和作战效能的研究愈发重要。基于反无人试验的相关数据, 对激光武器打击类“郊狼”无人机的毁伤效果进行了分析; 根据激光武器的特性和毁伤机理, 建立了激光武器辐照强度的计算公式和郊狼无人机的三维温度场仿真计算模型, 采用有限元瞬态热分析法得到了激光武器辐照郊狼无人机不同部位的温度分布云图和温度随时间变化的对比曲线, 对激光热烧蚀毁伤郊狼无人机的碳纤维壳体进行了深入研究分析, 给出了毁伤阈值; 最后通过试验结果与仿真结果对比分析, 验证了激光武器毁伤郊狼无人机热烧蚀模型的准确性, 并对反无人激光武器的毁伤威力及未来发展给出了相关建议, 为后续激光武器装备的实战化考核、打击方法以及激光防护提供了重要参考。

关键词: 反无人技术; 激光武器; 激光烧蚀; 毁伤

中图分类号: TJ95; V279 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.010

Anti-unmanned laser weapon damage effectiveness study

ZHOU De-yuan, LI Jie, LI Li-gong

(China Huayin Arms Test Center, Weinan 714200, China)

Abstract: Medium-to-high-energy laser weapons are increasingly being applied to counter unmanned systems, and the study of their damage mechanism and combat effectiveness has become more and more important. First of all, based on the relevant data of unmanned and anti-unmanned system test, the damage effect of laser weapon striking coyote UAV is analyzed. Then, according to the characteristics and damage mechanism of laser weapon, the formula for calculating the irradiation intensity of laser weapon and the three-dimensional temperature field simulation and calculation model of coyote UAV are established, and finite element transient thermal analysis is used to obtain the temperature distribution cloud diagrams of different parts of coyote UAV irradiated by laser weapon and the temperature dependence of coyote UAV with temperature. Further, an in-depth study and analysis of laser thermal ablation destroying the carbon fiber shell of the coyote UAV is carried out, and the damage threshold is given. Finally, the accuracy of the thermal ablation model of laser weapon destroying coyote UAV is verified by comparing and analyzing the experimental results with the simulation results, and relevant suggestions are given for the destructive power and future development of the anti-unmanned laser weapon. This study offers valuable insights for assessing the combat effectiveness of laser weapons and equipment, refining striking methods, and developing laser protection measures.

Keywords: anti-unmanned technology; laser weapons; laser ablation; destruction

1 引言

近年来, 无人机小型化、集群化与智能化技术发

展迅速, 加之其成本低廉, 操作简单, 受到各国军队的高度重视, 在纳卡冲突、俄乌战争中无人机大量参

与作战,取得了丰硕的战果,已成为空袭作战不可替代的一环。

在应对无人机蜂群威胁时,传统的防空体系受到武器系统自身条件的限制,对目标拦截数量及有效拦截时间极大降低,在抗击作战过程中面临看不见、探不到、打不着和耗不起的尴尬局面,难以对“低慢小”无人机实施有效防御。而响应速度快,打击精度高,杀伤成本低的高能激光武器在反无人对抗中已经由概念走向实战。

从试验结果来看,激光武器能够对树脂类旋翼无人机进行有效的打击毁伤,而对碳纤维复合材料类无人机毁伤效果不明显。因此,开展激光武器毁伤无人机机理及毁伤效能的研究有助于反无人激光武器打法、战法的改进,提升激光武器的杀伤威力,充分发挥其作战效能。当前,朱孟真等^[1]对战术激光武器反无人发展现状和关键技术进行了分析吴非^[2]采用有限元法就强激光对火箭的热力效应进行了研究;赵杨等^[3]对激光武器辐照材料表面的热烧蚀特性进行了数值仿真,提出了毁伤概率的评估模型;李清源^[4]对激光武器毁伤无人机的热力破坏效应进行了研究;宋乃秋等^[5]对高能激光武器的毁伤机理进行了仿真建模;徐斌等^[6]对强激光武器辐照弹道导弹温度场进行了数值模拟;陈博等^[7]研究了激光作用下碳纤维/环氧树脂复合材料的热损伤规律。

本文基于反无人试验中激光武器毁伤郊狼无人机的现状,建立了郊狼无人机三维热分析模型和激光辐照强度计算公式,通过仿真方法分析了激光毁伤郊狼无人机的机理,得到了毁伤阈值;并将仿真结果与试验结果进行了对比,验证了仿真模型的准确性的同时,对激光武器装备体系适用性进行了评估分析,为后续反无人激光武器装备的实战化考核、打击方法、激光防护以及激光武器数字化试验提供了重要参考。

2 激光武器毁伤无人机机理及概况

2.1 激光武器毁伤无人机机理分析

2.1.1 激光武器作战流程

在反无人试验中,激光武器主要是利用高能激光束通过热烧蚀来毁伤无人机,图1所示的是反无人试验中激光武器作战过程示意图,从图中可以看出激光武器的核心部件主要是高能激光器、精确瞄准跟踪系统和光束控制系统。

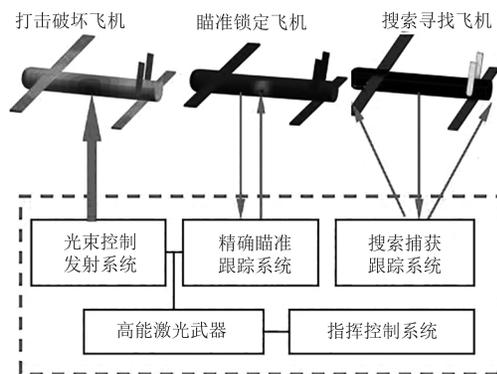


图1 反无人激光武器作战过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the operational process of anti-unmanned laser weapons

2.1.2 激光武器毁伤无人机机理分析

激光武器在打击无人机时,其对无人机的毁伤效应主要包括热烧蚀破坏效应、力学破坏效应(激波破坏)以及辐射破坏效应。激光武器摧毁无人机时,主要是通过高质量激光束与无人机表面发生复杂的物理化学反应,使无人机辐照部位的材料特性和结构状态发生变化。激光武器毁伤无人机的主要形式为加热、升温、膨胀、熔融、汽化、击穿、飞散、喷溅、破裂、剥落、热爆炸以及辐射导致飞机内部电子元件失效等,会对无人机产生极为有效的杀伤破坏力。可见,激光武器打击无人机是一种热毁伤过程,要对无人机造成毁伤,必须使激光辐照到无人机上,并且要保持一定的时间(数秒量级),以沉积足够的能量,表1所示的是激光武器在不同功率密度条件下与无人机发生的物理过程。

表1 不同激光功率密度毁伤无人机发生的物理过程

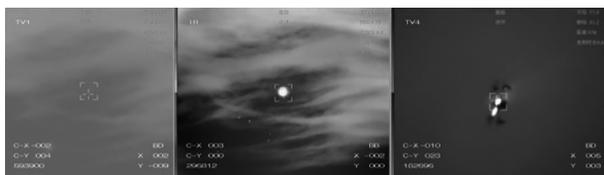
Tab. 1 Physical processes occurring at different laser power densities to destroy drones

激光功率密度/(W·cm ⁻¹)	物理过程
10 ³ ~ 10 ⁴	不同激光功率密度毁伤无人机发生的物理过程加热
10 ⁴ ~ 10 ⁶	融化
10 ⁶ ~ 10 ⁸	汽化
10 ⁸ ~ 10 ¹⁰	电离

2.2 反无人试验激光武器毁伤无人机概况

在反无人试验中,主要利用激光武器对各型旋翼和固定翼无人机进行打击毁伤,其中激光武器功率密度为20 kW。旋翼无人机为树脂材料,郊狼无人机材料为T300碳纤维/914环氧树脂,图2

所示的是激光打击旋翼无人机和郊狼无人机毁伤过程。



(a)激光武器毁伤大疆御3过程



(b)激光武器毁伤郊狼无人机过程

图 2 激光武器毁伤无人机过程

Fig. 2 Process of destruction of a drone by a laser weapon

图 3 所示的是激光毁伤旋翼无人机和郊狼无人机效果图,从图中看出激光武器在打击大疆御 3 树脂类旋翼无人机时,毁伤效果良好,能够让其彻底报废,无法再复飞继续执行作战任务;而在摧毁郊狼无人机时,由于其结构为碳纤维复合材料,具有高热传导系数、低热膨胀系数及耐高温属性,现有激光武器无法对其进行有效的摧毁。



图 3 激光毁伤无人机效果图

Fig. 3 Laser-destroying drone effect

基于试验中激光武器毁伤各类无人机结果的分析,初步判断反无人试验中现有激光武器对郊狼无人机无法进行有效的打击毁伤,下文将利用数字化仿真分析方法对反无人试验中激光武器打击郊狼无人机的过程及结果进行仿真验证,探究激光武器毁伤机理,确定郊狼无人机毁伤阈值,以便让激光武器的杀伤威力及作战效能最大化发挥。

3 反无人激光武器毁伤无人机仿真研究

在反无人试验中,激光武器辐照郊狼无人机表面时,激光束会与郊狼无人机表面发生复杂的物理化学反应,导致郊狼无人机表面的温度持续升高,当温度达到碳纤维复合材料的熔点时,材料表面就会熔化,随着激光武器持续的照射,郊狼无人机表面熔

化深度会不断加深,在更高功率密度下甚至会产生汽化烧蚀现象。

3.1 反无人激光武器数学模型建立

在对反无人试验中激光武器打击郊狼无人机进行激光热烧蚀仿真时,采用的是热分析和加热熔融材料这一思路,郊狼无人机有限元计算模型及激光武器热-力毁伤郊狼无人机过程如图 4 所示。

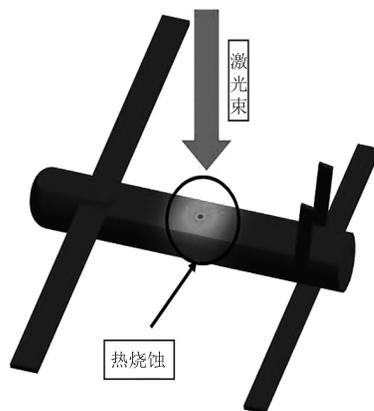


图 4 反无人激光武器毁伤无人机热烧蚀过程

Fig. 4 Thermal ablation process of unmanned laser weapons destroying drones

高能激光束入射到郊狼无人机表面激光功率密度:

$$q = (1 - R)q_{\text{inc}} \quad (1)$$

式中, R 为郊狼无人机材料的反射率; q_{inc} 为入射到表面激光的功率密度。此时郊狼无人机激光束入射表面内部的温度场 T 可由导热方程描述:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (1 - R)aq_{\text{inc}} \exp(1 - z) + Q \quad (2)$$

式中, a 为郊狼无人机表面材料的吸收系数; Q 为无人机外部其他热源; z 为激光方向深度; k 为郊狼无人机材料热导率; ρ 为无人机材料密度; c 为郊狼无人机比热容;等号右边第 2 项是激光束深层吸收的体热源。

将上式转化成柱坐标系下的热传导方程的一般形式为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(x, r, \theta, T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

高能激光入射初始条件:

$$T(x, r, \theta, 0) = T_0 \quad (4)$$

当激光武器的激光束辐照郊狼无人机表面时,无人机表面上激光能量密度 e (kJ/cm^2) 超过某个阈值

e_{th} 时,无人机表面失效(融化、汽化、穿孔、破裂等):

$$e = \frac{E}{A} = \frac{P\tau}{A} \geq e_{th} \quad (5)$$

式中, E 为激光束总能量(kJ); P 表示激光束总功率; τ 为激光束照射时间。当郊狼无人机在激光束辐照下,郊狼无人机表面温度与环境温度有较大的温差,考虑郊狼无人机表面会向周围环境辐射热量,此处定义边界条件:

$$Q = \sigma \varepsilon FA(T_s^4 - T_a^4) \quad (6)$$

式中, σ 是玻尔兹曼常数; ε 表示郊狼无人机表面的辐射率,其值恒小于1,与材料种类及表面状态有关; F 是郊狼无人机辐射面的形状系数; A 为高能激光束照射郊狼无人机的面积; T_s 是无人机的表面温度; T_a 是环境温度。

3.2 高能激光武器热毁伤郊狼无人机仿真过程

3.2.1 郊狼无人机有限元计算模型

激光武器毁伤郊狼无人机的有限元计算模型如图5所示。

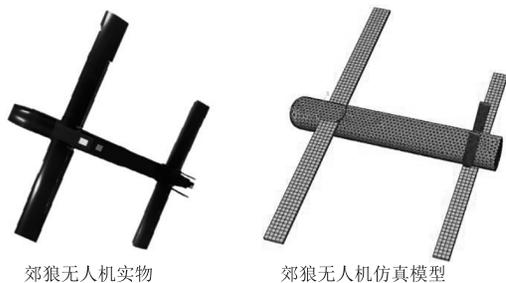


图5 郊狼无人机有限元计算模型

Fig. 5 Coyote UAV finite element computational modeling

对郊狼无人机进行激光热烧蚀仿真分析时,采用瞬态热分析法,为了能够精确有效的模拟激光的光斑以及热量传导,郊狼无人机划分的网格如表2所示。

表2 郊狼无人机网格特性

Tab. 2 Coyote UAV grid characteristics

部件/数量	网格类型	网格数量
机翼/尾翼	SOLID70	32456
机身/机头	SOLID70	65348

3.2.2 郊狼无人机材料参数设置

研究激光武器热毁伤郊狼无人机时,将郊狼无人机的机翼、尾翼、垂尾以及机身的材料全部定义为T300碳纤维/914环氧树脂复合材料,材料热力学参数如表3所示。

对郊狼无人机进行激光热烧蚀仿真时,由于采

用的是各项异性碳纤维复合材料,因此对机翼、尾翼、垂尾以及机身进行铺层分析,铺层采用[0/45/-45/90/0]的对称铺层方式,每层厚度0.2 mm,总共10层,总厚2 mm,具体铺层方式如图6所示。

表3 郊狼无人机材料热学参数

Tab. 3 Thermal parameters of Coyote UAV materials

材料	导热系数 $k/$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	比热 $c/$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	熔点 $T_m/^\circ C$
T300	84	795	1.76	2000

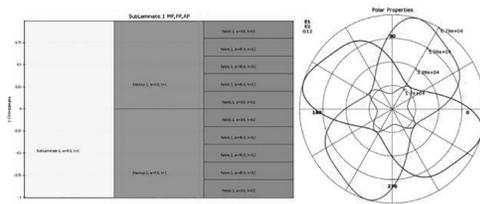


图6 郊狼无人机碳纤维铺层参数

Fig. 6 Coyote UAV carbon fiber layup parameters

3.2.3 边界条件及分析设置

采用瞬态热烧蚀法对郊狼无人机的毁伤情况进行仿真分析,将激光武器的功率密度转化为输入热流,在激光辐照面上加载热流密度载荷;反无人试验中,由于激光武器的辐照,郊狼无人机激光辐照面的温度远高于环境温度,因此同时施加了热辐射边界条件。

其中郊狼无人机表面的初温和环境温度均设置为22 °C,激光功率为20 kW,持续时间60 s,光斑尺寸为10 cm。

3.3 激光武器毁伤郊狼无人机结果分析

3.3.1 仿真结果分析

图7所示的是激光武器光束辐照到机身中段时机身的温度分布云图,从图中可以看出最高温度为301.1 °C。

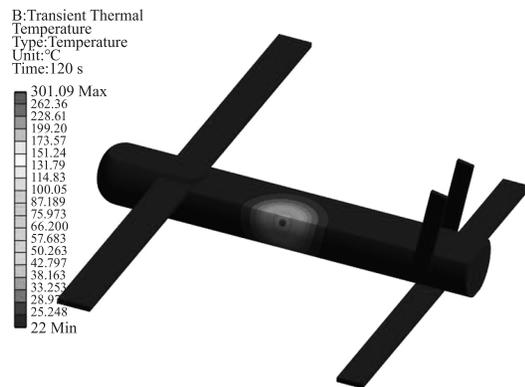


图7 激光打击60 s时无人机温度场分布

Fig. 7 UAV temperature distribution at 60 s of laser strike

图 8 所示的是当激光武器辐照无人机时,无人机表面的温度变化曲线,从图中可以看出郊狼无人机表面的温度曲线斜率逐渐减小,说明激光照射下无人机温度增加速度随着时间推移而减缓,这时郊狼无人机表面温度升高导致温度梯度下降,从而使温升曲线中出现短暂的“平缓”段,温度继续升高直到达到热平衡时趋于稳定。

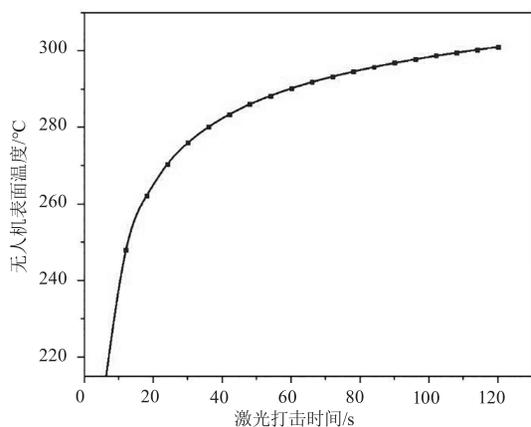


图 8 激光毁伤无人机表面温度变化曲线

Fig. 8 Surface temperature variation curves for laser-damaged UAVs

图 9 所示的是激光武器打击郊狼无人机时的等温图和能量分布图,从图中看出激光武器在打击郊狼无人机时,能量主要集中在光斑半径内,温度升高的区域也在光斑半径内,热量横向扩散较少,主要在纵向进行扩散。

通过以上分析可以看出,激光武器在持续打击郊狼无人机后,郊狼无人机表面连续吸收激光能量后引起内部热传导,导致内部出现温度梯度,当温度达到郊狼无人机机身表面的熔点时,能量持续升高,机身表面就会熔化甚至气化。从以上分析可以得到当激光光斑直径为 10 cm,打击功率为 20 kW 时,激光持续出光 60 s 照射到机身上时,其最高温度为 301.1 °C,并没有达到碳纤维的熔点;结合本次反无人试验中激光武器打击郊狼无人机的相关数据,可以断定飞机机身的局部烧蚀是由于机身在强激光照射下达到了碳纤维复合材料中树脂和表层玻璃纤维的熔点所引起的。在强激光辐照下,郊狼无人机表面壳体内部形成了由于激光熔化、汽化引起的质量迁移,和由激光维持的燃烧波与爆轰波,郊狼无人机机身表面及内部产生了较高的燃烧压力和温度,熔融状态的树脂和玻璃纤维烧蚀物产生剧烈的喷溅现象,与试验现象一致,如图 10 所示。

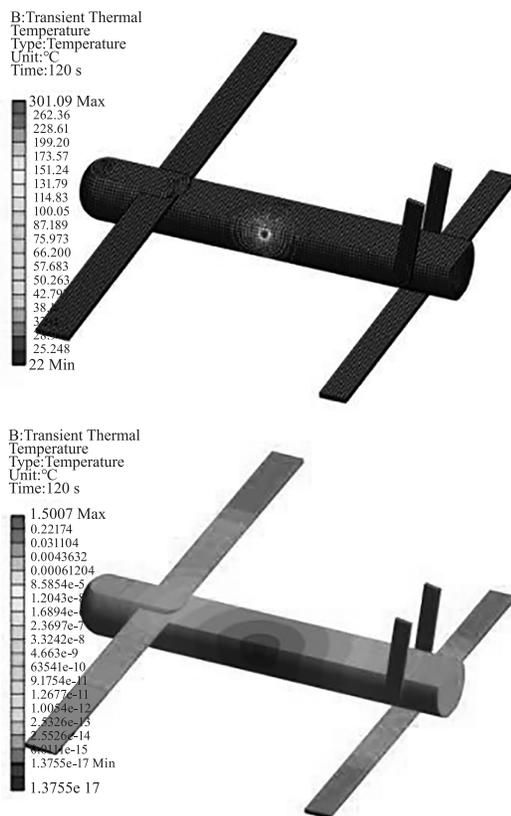


图 9 激光打击无人机表面热流变化情况

Fig. 9 Changes in heat flow on the surface of a laser-strike drone

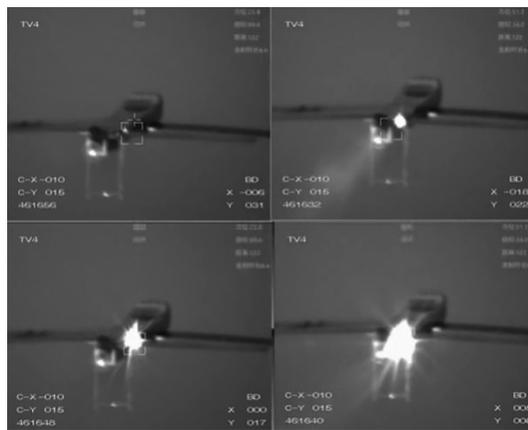


图 10 激光武器毁伤郊狼无人机时产生的喷溅现象

Fig. 10 Splash from a laser weapon destroying a Coyote drone

综上,在反无人试验中,该型激光武器不能击穿或者燃烧郊狼无人机,但当郊狼无人机机身某点受到激光武器稳定且长时间(数十秒)辐照时,能够熔化甚至气化郊狼无人机碳纤维复合材料蒙皮中的树脂和玻璃纤维成分。经过仿真计算可知,在现有反无人装备条件下,如果将郊狼无人机碳纤维机身熔化甚至气化,激光武器功率需要增加到 66.7 kW 左右。

为了考察激光武器对郊狼无人机不同部位打击毁伤的效果,对郊狼无人机机头、机翼、尾翼以及垂

尾部分进行多工况激光热毁伤分析,图 11 所示的郊狼无人机的不同部位整体的温度分布图。

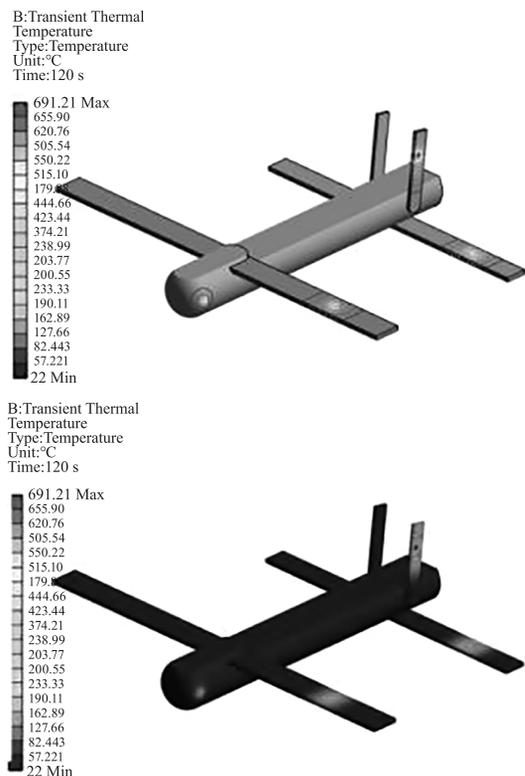


图 11 激光毁伤郊狼无人机不同部位的温度分布图

Fig. 11 Temperature distribution of different parts of a laser-damaged Coyote drone

图 12 所示的是激光束在辐照郊狼无人机机头、机翼和垂尾时的温度对比情况,从图中可以看出加载相同的激光能量、相同的激光光斑直径以及相同的辐照时间,郊狼无人机不同部位吸收的激光能量不同,激光烧蚀表面温度以及内部的温度梯度也不相同。垂尾激光烧蚀温度最高、机翼激光烧蚀温度次之、机头激光烧蚀温度最低;其中垂尾最高温度为 691.2 °C、机翼最高温度为 425.7 °C、机头最高温度为 305.4 °C。

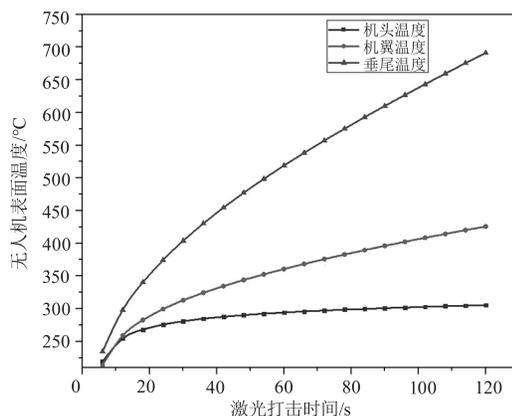


图 12 激光毁伤郊狼无人机不同部位温度对比图

Fig. 12 Comparison of temperatures in different parts of a laser-damaged Coyote drone

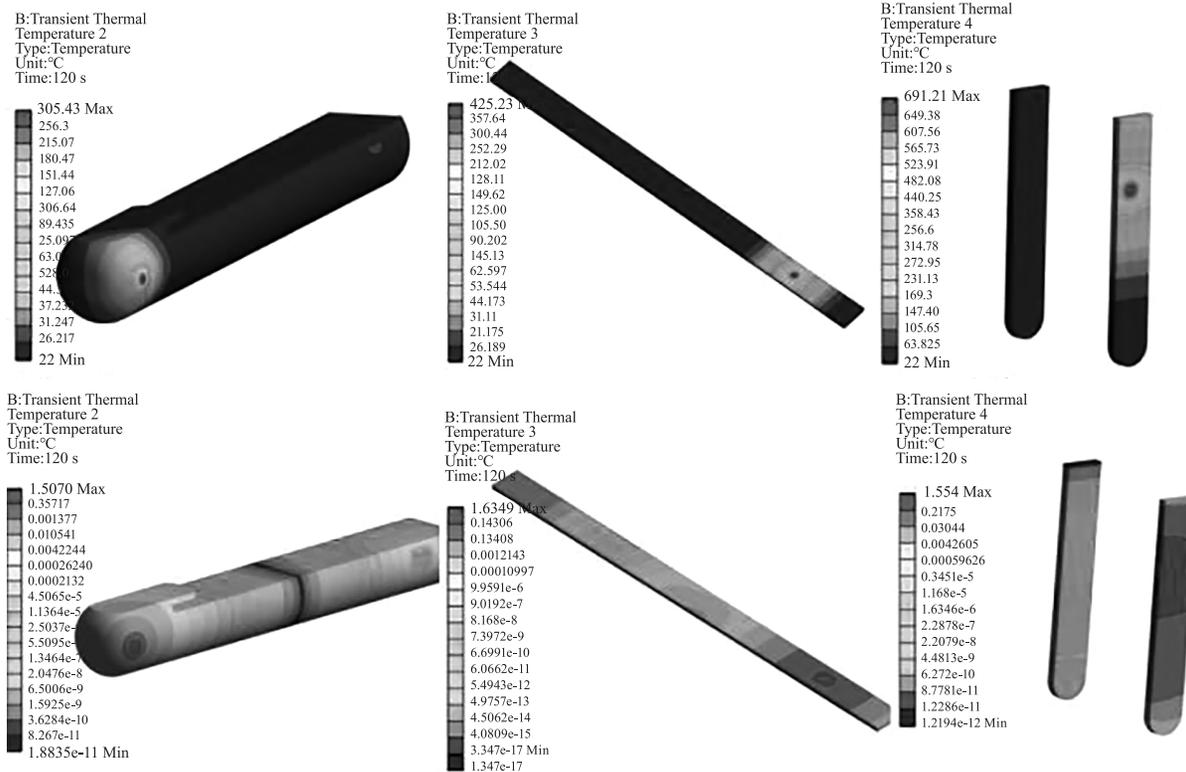


图 13 激光辐照郊狼无人机不同部位热烧蚀效果对比

Fig. 13 Comparison of thermal ablation effects on different parts of laser irradiated Coyote UAVs

图 13 所示的是激光束在辐照郊狼无人机不同部位的热烧蚀效果对比情况,从图中可以看出在同等条件下激光热烧蚀垂尾和机翼效果最明显,激光热烧蚀机头时效果比较差,这是由于机头及机身表面为半球形或者圆弧形而机翼垂尾表面近似平面,曲率不同,从而影响激光能量的吸收及沉积。

因此在后续反无人激光武器装备考核以及实战中,应该聚焦目标,持续打击无人机的机翼或垂尾部分,这样毁伤效果更明显,能够最大程度的发挥激光武器的作战效能。激光武器毁伤郊狼无人机不同部位的最高温度及毁伤效果对比如表 4 所示。

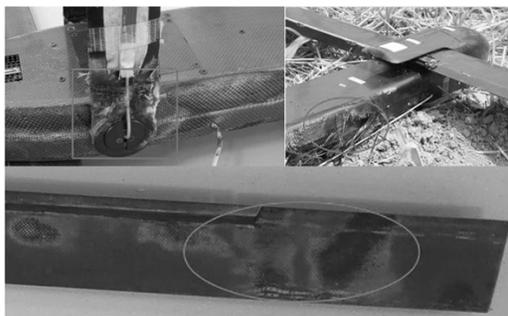
表 4 激光武器打击无人机不同部位毁伤分析

Tab. 4 Laser weapon attack UAV different parts damage analysis

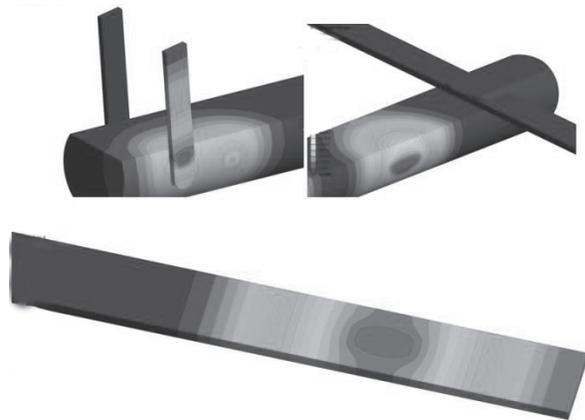
无人机零部件	机头/机身	机翼/尾翼	垂尾
激光烧蚀温度	305.4 °C	425.7 °C	691.2 °C
激光毁伤效果	一般	良好	优

3.3.2 仿真与试验结果对比

图 14 所示的是激光武器毁伤郊狼无人机仿真与试验对比。



(a)激光武器毁伤无人机不同部位试验结果对比



(b)激光武器毁伤无人机不同部位仿真结果对比

图 14 激光武器毁伤郊狼无人机试验及仿真结果对比

Fig. 14 Comparison of test and simulation results of laser weapon damage to UAV

其中,图 14(a)所示的是反无人试验中激光武

器毁伤郊狼无人机不同部位的试验结果,从毁伤图片中可以看出,垂尾部位明显有热烧蚀熔化现象,而机身相对激光热烧蚀毁伤效果不明显;图 14(b)所示的是激光武器毁伤郊狼无人机的仿真结果,通过仿真结果和试验结果对比,试验毁伤效果与仿真结果及趋势较为一致,说明仿真方法合理。从图中可以看出激光辐照郊狼无人机垂尾及机翼部位的热烧蚀毁伤效果要强于激光辐照机身和机头部位,从而可以推断反无人试验中激光武器打击郊狼无人机的垂尾和机翼的毁伤效能要大于打击机身和机头部位。

4 结语

4.1 结论

本文基于反无人试验中激光武器打击郊狼无人机的现状,首先推导了激光武器辐照强度的计算公式;接着建立了郊狼无人机的三维温度场仿真计算模型,并采用有限元法对激光热烧蚀无人机进行了仿真分析;最后通过仿真模拟以及仿真与实验结果对比,得到以下结论:

(1) 现有反无人试验中,激光武器打击郊狼无人机不同部位时,垂尾激光热烧蚀温度最高、机翼激光热烧蚀温度次之、机头及机身激光热烧蚀温度最低;实战中激光武器打击郊狼无人机机翼和垂尾的毁伤效能大于打击机身和机头部位;其中垂尾最高温度为 691.2 °C、机翼最高温度为 425.7 °C、机头机身最高温度为 305.4 °C;

(2) 激光武器在毁伤郊狼无人机时,能量主要集中在光斑半径内,温度升高的区域也在光斑半径内,热量横向扩散较少,主要在纵向进行扩散;

(3) 当激光武器功率增加到 66.7 kW,持续打击 60 s 后,郊狼无人机表面的温度可达到 2000 °C,达到碳纤维材料的熔点,能够彻底摧毁郊狼无人机;

(4) 激光武器散射角对激光强度的影响大于作战距离对激光强度的影响;散射角越小,激光光斑半径也越小,辐照单位面积内能量密度越大,毁伤效果越明显。

4.2 反无人激光武器实战打击方法及未来发展建议

4.2.1 反无人激光武器在实战中打击方法建议

激光武器作为反无人硬杀伤环节,是抵御蜂群无人机攻击关键的一环。基于现有激光武器装备,根据反无人试验相关数据以及激光武器打击郊狼无

人机所暴露的问题,结合激光热烧蚀郊狼无人机的仿真结果,在未来反无人激光武器实战中,打法上应该聚焦激光的光束、对准无人机的垂尾或者机翼,尽可能控制光束晃动,减小激光辐照无人机的散射角度,在可控的范围内缩短打击距离以减小激光衰减,持续性长时间辐照无人机表面以沉积足以造成无人机毁伤所需要的能量,这样激光毁伤威力最大,毁伤效能也能更大化发挥。

4.2.2 反无人激光武器未来发展建议

根据反无人试验相关数据以及激光武器打击郊狼无人机所暴露的问题,结合激光热烧蚀郊狼无人机的仿真结果,在反无人激光武器未来的发展中,提出以下几点建议:

(1)目前反无人激光武器功率为 20 kW,在保证激光武器系统机动性和灵活性的基础上,应持续增强激光武器的功率、提高单次持续发射时间、缩短准备间隔时间,实现对蜂群无人机持久性拦截毁伤,以达到远端聚能、定点狙杀、迅速致瘫的作战效果;

(2)提高激光武器的瞄准精度和光束的稳定性,使其能够在动态对抗环境下精准的辐照无人机,让无人机吸收足够的能量以达到彻底毁伤的作战目的;

(3)为了对抗蜂群无人机的攻击,反无人激光武器应该集预警探测、跟踪瞄准、打击毁伤技术于一体,并结合人工智能技术能够对无人机进行自动识别、分类、追踪、瞄准及打击,以提高系统作战效率。

4.3 不足及后续计划

(1)在仿真激光武器对无人机的毁伤效能时,并未考虑热晕效应、湍流效应的影响造成激光能量衰减及光斑畸变等因素;

(2)没有对不同光斑半径、不同作战距离工况下激光打击无人机的毁伤效能进行研究分析;

(3)没有对激光武器毁伤无人机的效能进行系统完整的评估,也并未给出毁伤概率,下一步将结合跟踪瞄准系统,完成激光武器作战过程的全链路仿真分析,对激光武器装备的相关试验及作战效能评估具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] Zhu Mengzheng, Chen Xia. Analysis of the current status and key technologies of the anti-unmanned development of tactical laser weapons [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 1-13. (in Chinese)
朱孟真, 陈霞. 战术激光武器反无人发展现状和关键技术分析 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 1-13.
- [2] Wu Fei. Analysis of structural thermal effects under strong laser irradiation [J]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
吴非. 强激光辐照下结构热力效应分析 [J]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [3] Li Qingyuan. Destructive effect of strong laser on aircraft [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2012. (in Chinese)
李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [4] Zhao Yang, Zhang Haochun, Li Yao, et al. Numerical simulation of ablation characteristics of laser irradiated materials [J]. Journal of Chemical Engineering, 2014, 65(S1): 426-432. (in Chinese)
赵杨, 张昊春, 李垚, 等. 激光辐照材料烧蚀特性的数值仿真 [J]. 化工学报, 2014, 65(S1): 426-432.
- [5] Song Naiqiu, Zhang Haochun. Multi-physics field modeling of destruction mechanism of high-energy laser weapons [J]. Journal of Chemical Engineering, 2016, 67(S1): 359-365. (in Chinese)
宋乃秋, 张昊春. 高能激光武器毁伤机理多物理场建模 [J]. 化工学报, 2016, 67(S1): 359-365.
- [6] Xu Bin, Zhao Xuanke. Numerical simulation of irradiated ballistic temperature field of intense laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1526-1530. (in Chinese)
徐斌, 赵选科. 强激光武器辐照弹道温度场数值模拟 [J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1526-1530.
- [7] Chen bo, Wan Hong. Thermal damage law of carbon fiber/epoxy composites under heavy frequency laser [J]. Intense Laser and Particle Beam, 2008, 20(4): 547-552. (in Chinese)
陈博, 万红. 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): 547-552.