应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究

罗曦 张昊春 汤欣卓 唐邱宇 王海翔

Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs

LUO Xi, ZHANG Haochun, TANG Xinzhuo, TANG Qiuyu, WANG Haixiang

引用本文:
罗曦, 张昊春, 汤欣卓, 等. 高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 515-521. DOI: 10.5768/JAO202546.0311005
LUO Xi, ZHANG Haochun, TANG Xinzhuo, et al. Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 515-521. DOI: 10.5768/JAO202546.0311005

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311005

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光供能无人机的一种优化跟踪算法

Optimal tracking algorithm for laser powered unmanned aerial vehicles

应用光学. 2020, 41(1): 194-201 https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107002

基于MIMO的无人机斜程激光通信性能分析

Laser communication performance of UAV slant based on MIMO

应用光学. 2022, 43(5): 1030-1036 https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508006

单目视觉融合激光投射的无人机障碍探测方法

Obstacles detection method for UAV based on monocular vision and laser projection

应用光学. 2023, 44(1): 202-210 https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107002

无人机载光电载荷自主侦察的参数计算与分析

Parameter calculation and analysis of autonomous reconnaissance for UAV-borne photoelectric payload

应用光学. 2024, 45(5): 930-936 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501007

基于二维多物理场的激光毁伤过程仿真

Two-dimensional multiphysics field simulation of laser damage

应用光学. 2024, 45(5): 1056-1063 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0507001

激光辐照下卫星筒体部分多物理建模及毁伤效应分析

Multi-physical modeling and damage effect analysisof satellite cylinders under laser irradiation

应用光学. 2021, 42(3): 542-549 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307003

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0515-07
引用格式: 罗曦, 张昊春, 汤欣卓, 等. 高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 515-521.
LUO Xi, ZHANG Haochun, TANG Xinzhuo, et al. Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 515-521.

在线阅读

高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究

罗 曦, 张昊春, 汤欣卓, 唐邱宇, 王海翔
(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 高能激光武器作为新型定向能武器, 在反无人机作战中展现出响应速度快、作战效费比高等显著优势。以小型四旋翼无人机为典型研究对象, 开展高能激光毁伤效能的建模仿真与量化分析。系统梳理了高能激光反无人机技术的研究现状, 建立了包含激光大气传输、辐照响应计算、激光毁伤程度评估等模块的毁伤模型, 并基于无人机系统易损性分析, 识别出关键毁伤部位, 构建了热力场耦合的激光毁伤评估模型, 最后通过数值仿真获得了不同作战参数下的毁伤效能数据。仿真结果表明: 毁伤时间与作战距离和高能激光功率密切相关, 毁伤时间随作战距离的减少和功率密度的增加而增加。

关键词: 激光; 无人机; 效能分析; 塑料蒙皮; 毁伤; 易损性
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.5768/JAO202546.0311005

Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs

LUO Xi, ZHANG Haochun, TANG Xinzhuo, TANG Qiuyu, WANG Haixiang
(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: As a new type of directed-energy weapon, high-energy laser (HEL) systems demonstrate significant advantages in counter-unmanned aerial vehicle (C-UAV) operations, including rapid response and high cost-effectiveness. Taking the small quadcopter as a typical research subject to conduct modeling, simulation, and quantitative analysis of HEL damage effects. Firstly, the research status of C-UAV technologies was systematically reviewed. Subsequently, a damage assessment model was established, incorporating key modules such as laser atmospheric transmission, irradiation response calculation, and damage degree evaluation. Through vulnerability analysis of UAV systems, critical damage components were identified, enabling the development of a thermo-mechanical coupled laser damage assessment model. Finally, numerical simulations were performed to evaluate damage effectiveness under various operational parameters. The simulation results demonstrate that the damage time exhibits strong correlations with both engagement distance and laser power density. Specifically, the damage time increases with reduced operational range and increased power density.

Key words: laser; drone; performance analysis; plastic skin; damage; vulnerability

收稿日期: 2024-08-15; **修回日期:** 2025-04-24
基金项目: 国家自然科学基金 (51776050)
作者简介: 罗曦 (1999—), 女, 硕士, 主要从事激光应用技术研究。E-mail: 1754254987@qq.com
通信作者: 张昊春 (1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电对抗、工程热力学、核反应堆数值模拟、空间/深海核动力、可再生能源开发与利用研究。E-mail: hczh@vip.sina.com

引言

随着无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术发展的日新月异,无人机因结构简单、成本低、机动性好、便于隐藏等优点被广泛使用在现代战争中。在当前的俄乌冲突中,无人机系统已成为双方战场态势感知和实施精确打击的核心装备,被广泛应用于战术侦察和对地攻击任务,是有史以来使用无人机数量最多、规模最大的一场战争。据报道,俄乌战场前线轻小型、微型无人机使用频次已达月均 6～7 万架次。双方在战争中充分利用无人机小巧、灵活、成本低等优点,大量使用各种无人机,并在实战中取得显著效果。除俄乌冲突外,在纳卡冲突中阿塞拜疆曾凭借土耳其 Bayraktar TB2 和以色列 Harop 自杀式无人机,摧毁亚美尼亚大量坦克、防空系统和炮兵,成为战争胜负的关键因素。在埃塞俄比亚内战、也门内战、中东地区袭击中也都出现了无人机的身影,通过俄乌对抗中对无人机的大量使用,使各国对无人机的关注度达到了顶峰。

与传统武器相比,无人机具有低成本、高效能,可执行高风险任务,技术扩展性强等优点,各国对反无人机武器也展开了大量研究。在众多反无人机手段中,高能激光反无人机技术因其高精度、快速度、高效费比等优点脱颖而出。鉴于高能激光武器系统在打击无人机目标时表现出的瞬时毁伤特性、复杂动态响应机制以及高昂的试验成本等因素,传统实验方法难以全面评估其毁伤效能。因此,本文采用数值模拟方法构建高能激光毁伤无人机模型,为毁伤效能评估提供有效的量化分析手段。关于高能激光毁伤效能的评估已有几十年的发展历史,如王伯雄等人[1]建立了海洋环境下高能激光对无人机的毁伤评估模型,考虑了无人机不同材料阈值,讨论了不同能见度环境下高能激光对无人机的毁伤概率。徐粲然等人[2]利用蒙特卡洛法对万瓦级高能激光的打击误差进行了仿真。梁巍巍等人[3]分析了高能激光的毁伤机理和打击流程,并在此基础上建立了高能激光对无人机的毁伤模型。李振华[4]分析了高能激光视角下无人机存在的缺点,提出了高能激光反无人机的发展方向。赵杨等人[5]就激光辐照材料烧蚀特性进行了数值仿真。张昊春等人[6]考虑了材料导热率变化及融化潜热的影响,通过建立多物理场仿真模型对高能激光打击过程进行仿真。宋乃秋等人[7]考虑了材料表面状态对激光辐照效果的影响,并考虑了切向气流影响,建立了稳态和非稳态模型,并进行了仿真。本研究通过梳理高能激光打击无人机流程,分析无人机对激光的易损性,从而找出关键打击部件,并在此基础上,参考大气传输模型、激光辐照模型等,建立高能激光打击无人机毁伤评估模型,综合考虑武器参数,目标无人机结构、材料、距离、可见度、作战环境等进行激光对无人机的毁伤仿真,讨论不同参数下高能激光对无人机目标的打击效果,从而实现高能激光对无人机毁伤的有效评估,评估结果可为新型高能激光武器的研发提供参考。

1 高能激光打击无人机流程分析

高能激光毁伤无人机的基本原理在于利用高能激光束对目标进行打击,通过聚焦和放大激光能量,使其达到足够的功率密度,从而对目标造成破坏或摧毁。高能激光具有速度快、精度高、抗干扰能力强等优点,因此在反无人机领域具有广泛的应用前景。高能激光系统主要是由高能激光器、精密瞄准跟踪系统、指挥控制系统和光束控制发射系统组成[8]。高能激光器是系统的核心,是实现打击效果的基础。其主要打击模式是:由远程侦察雷达或其他侦察系统捕获可疑目标,将目标位置、结构、速度等信息传给指挥控制系统,指挥控制系统根据来袭目标信息特征进行威胁评估,根据目标对激光的易损性程度选取优先打击点,引导精密瞄准跟踪系统对打击点进行跟瞄并锁定,在合适的时间指挥控制系统对高能激光器发出攻击指令,由光束控制系统使激光辐照到目标表面,激光能量在目标打击点上不断累积扩散,超过打击点目标阈值后将其破坏或摧毁。

高能激光系统的打击效果取决于激光束的功率密度、作用距离、作战环境和目标材料等。当激光束的功率密度足够高时,可以在极短的时间内将无人机蒙皮加热至熔化或汽化使其结构失效,从而实现硬毁伤打击效果。此外,高能激光系统还可以通过照射目标的传感器、光学设备等关键部位,使其失去作用,从而达到软毁伤的目的。

本文拟以无人机典型结构与工况为对象,针对实际高能激光对抗体系,系统开展高能激光对无

人机目标的毁伤建模与仿真。根据理论模型与数值仿真的分析结果，实现对高能激光毁伤效果的评估。模型主要包括作战环境参数设置模块、目标等效模块、激光大气传输模块、辐照响应计算模块和激光毁伤程度评估模块。仿真系统总体技术方案如图 1 所示。

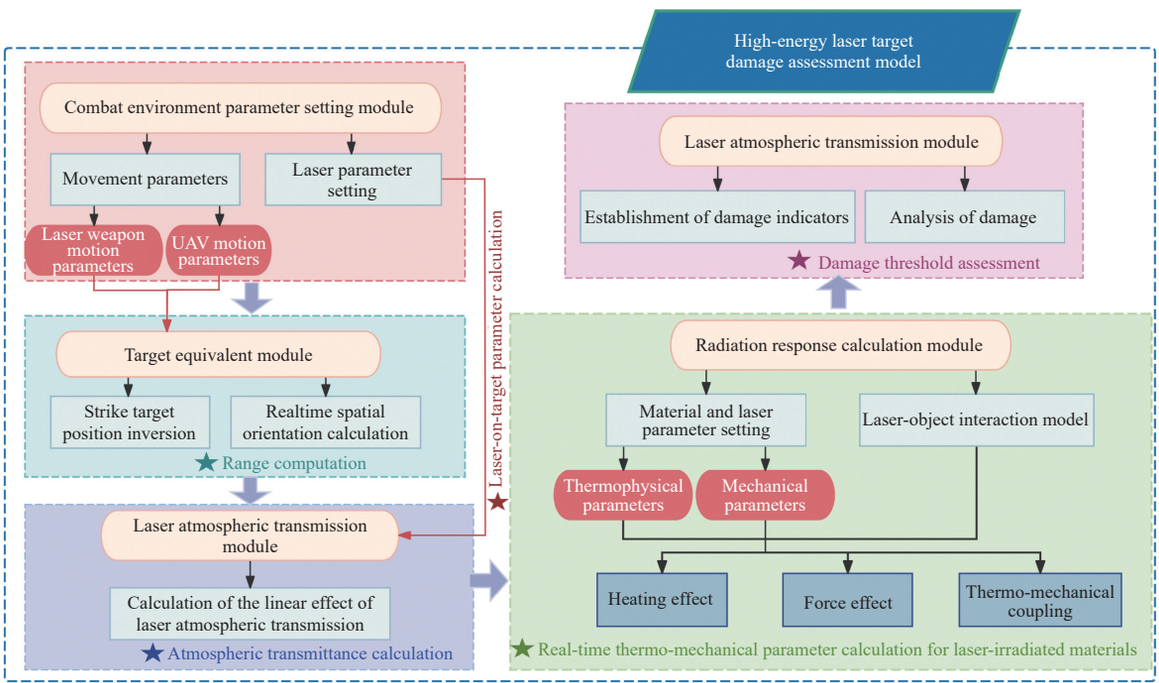

图 1　仿真系统整体技术方案

Fig. 1　Overall technical scheme of simulation system

2　无人机激光易损性分析及关键部件选取

目标易损性一般是指在对抗过程中，目标被发现、锁定并受到对方攻击后损伤的难易程度[9]。目标易损性分析是指对典型的，具有重要军事价值、重要经济价值的军用或民用目标，分析其结构特点及关键部件等，建立起目标等效打击模型，通过数值模拟等手段，掌握使关键部件失效的打击手段或毁伤距离等指标。本文主要研究无人机目标对激光的易损性，通过对无人机结构、材料等性质的分析，选取激光武器对无人机的最佳打击点。以大疆 Air3 无人机为例，其结构如图 2 所示，性能如表 1 所示。

图 2　大疆 Air3 无人机结构图[10]

Fig. 2　Structure of DJI Air3 drone

表 1　大疆 Air3 性能指标

Table 1　DJI Air3 performance indicators

No.	DJI Air3 performance indicators	Value
1	Max flight speed/km·h^{-1}	72
2	Max flight altitude/m	500

高能激光武器对无人机系统的毁伤机理主要基于对关键易损部位的精确打击，通过热-力耦合效应导致目标功能性失效，例如激光辐射无人机蒙皮，使得机身结构力学破坏或高温致使机身融化，进而改变无人机的气动光学特性，使无人机失去平衡，丧失作战能力；或激光辐射电池舱盖、油箱外壳等，不止会因为壳体材料受到力学破坏或热破坏而结构失效，还有可能壳体材料受激光辐射迅速升温，并将高温传递给紧贴壳体的电池或燃油等易燃易爆物质，进一步发生爆炸来达到毁伤无人机的目的。根据大疆 Air3 无人机结构，拆分各部位所对应材料如表 2 所示。

由表 2 可知，大疆 Air3 无人机机身蒙皮选用碳纤维、工程塑料（PC+ABS）、薄铝板等材料，电池舱盖蒙皮选用阻燃型工程塑料（PC+ABS）。对

于碳纤维和工程塑料，当激光辐照其表面时，材料迅速升温，由于其熔点均较低，很快就会融化，甚至气化造成材料喷涌而出，材料会由热破坏进一步演变为力破坏，使得无人机机身结构力学受到破坏，进而影响无人机性能，使其丧失作战能力；对于电池舱盖的蒙皮材料来说，结构受损不止影响无人机性能，高温也会传递给电池引起燃烧、爆炸，或触发电池保护系统强制降落；对于卡扣、支架等位置，材料为铝合金，根据常规金属铝的性质，当激光辐照其表面时，表面迅速升温，会进一步发生融化，气化，穿孔，断裂等现象，进而使得无人机被毁伤。

表 2 大疆 Air3 采用材料及组成

Table 2 Materials and composition of DJI Air3

No.	Component	Material type
1	Fuselage	Carbon fiber, ABS+PC blend, 6061-T6 aluminum alloy
2	Propellers	PC, glass-fiber reinforced PC (PC+GF), carbon fiber, 6061 aluminum alloy
3	Rotor guards	Polypropylene (PP)
4	Support legs & landing gear	Carbon fiber, PC, GF-reinforced PA (Nylon)
5	Motor casing	Aluminum alloy (A380)
6	Battery housing	Flame-retardant PC/ABS blend
5	Gimbal	Silicone, rubber, 6061-T6 aluminum

基于工程塑料（PC/ABS）的低熔点性和电池舱盖的功能关键性，同时由于电池舱盖材料单一，纯 PC/ABS 无碳纤维混杂，激光易损性高且仿真可靠性强，并且毁伤可视性强，熔融喷溅现象明显，便于效果评估，因此选取优先打击部位为电池舱盖蒙皮（flame-retardant PC/ABS）。主体材料选取阻燃工程塑料（flame-retardant PC/ABS），根据热力学破坏原理，选取高能激光打击无人机塑料蒙皮的毁伤效果指标为其结构力学是否破坏。

3 毁伤评估仿真模型建立

高能激光在大气中传播时，会受到大气耗散、大气湍流等线性及非线性效应影响，进而造成激光到靶功率降低。当激光辐照到目标表面时，目标材料温度升高，在材料内部形成非均匀温度场和应力场，使得目标材料被破坏。

3.1 激光大气传输耗散模型

激光因为以光速传播，可以做到指哪打哪，在打击过程中大气环境是影响激光毁伤效果的重要因素，高能激光在大气中传输时会发生一系列线性及非线性效应。线性效应主要为大气分子对激光的散射和吸收，受大气中气溶胶类型影响，如海洋环境和沙漠环境大气分子组成不同，其对激光的散射和吸收效应也不相同。非线性效应主要包括大气湍流、热晕、光束扩展等，由于相干合成技术及自适应光学技术的发展，大部分非线性效应的影响被大大衰减，同时为了简化模型，这里不考虑大气传输过程中的非线性衰减。

对于大气吸收等线性传输效应，通过式（1）进行计算[11-12]：

$$P=\frac{4P_0\tau\left(1-R_{\mathrm{eff}}\right)i_{\mathrm{t}}}{\pi\theta^2L^2} \tag{1}$$

式中：P 为目标接收功率；P_0 为激光武器功率；L 为高能激光作用距离，$L=\sqrt{L_x{}^2+L_y{}^2+L_z{}^2}$，$L_x$，$L_y$，$L_z$ 为相对距离，下标 x、y、z 表示参数的坐标方向；R_{eff} 为目标表面反射率；i_{t} 为激光发射系统透过率；θ 为激光散射角；τ 为激光透过率[13]，其表达式为

$$\tau=\exp\left[-\frac{3.912}{V}\left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{\varepsilon}L\right] \tag{2}$$

式中：V 表示能见度；λ 为激光波长；指数 ε 按式（3）计算[13]：

$$\varepsilon=\begin{cases}1.6, & V>20\ \mathrm{km}\\ 1.3, & 6\ \mathrm{km}<V\leqslant 20\ \mathrm{km}\\ 0.585V^{1/3}, & V\leqslant 6\ \mathrm{km}\end{cases} \tag{3}$$

3.2 激光辐照模型

激光辐照目标时，能量沉积会引发复杂的热-力耦合效应，实现对目标的毁伤，激光辐照无人机示意图如图 3 所示。

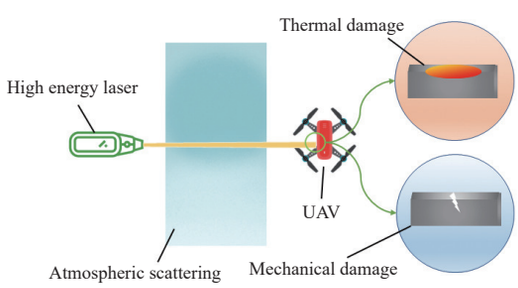

图 3 激光辐照无人机示意图

Fig. 3 Laser irradiation on UAVs

3.2.1 激光辐照目标温度场模型

激光辐照材料的三维热传导方程为

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla^2T=\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2} \tag{4}$$

式中：T 为材料温度（K）；t 为时间（s）；α 为材料的热扩散系数，定义为 $\alpha=\dfrac{\kappa}{\rho c}$，其中 κ（W/(m·K)）为热

导率, ρ(kg/m^3)为密度, c(J/(kg·K))为比热容。

当$\frac{2\sqrt{\alpha t}}{\delta}\leqslant 0.2$时($\delta$为壁厚), 可简化为$z$方向一维热传导[14]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}-\frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t}=0 \tag{5}$$

初始和边界条件为

$$\begin{cases} T(z,0)=T_0 \\ -\kappa\left.\dfrac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0}=Aq_{\mathrm{inc}}(x,y) \\ \kappa\left.\dfrac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=\delta}=0 \end{cases} \tag{6}$$

式中: T_0为初始温度(K); q_{inc}为入射激光功率密度(W/m^2); A为材料表面吸收率。

忽略辐射换热以及对流换热, 当热扩散深度大于壁厚($\sqrt{\alpha t}\gg\delta$)时, 温度分布为

$$T(x,y,\mathrm{z},t)=T_0+Aq_{\mathrm{inc}}(x,y)\frac{\delta}{\kappa}\left\{\frac{\alpha t}{\delta^2}+\left[\frac{3(\delta-z)^2-\delta^2}{6\delta^2}\right]\right\} \tag{7}$$

3.2.2　激光辐照目标应力场模型

假设应力沿壁厚均匀分布, 忽略弯曲效应, 薄壁圆筒在内压作用下的应力解为

$$\begin{cases} \sigma_\theta=\dfrac{pD}{2\delta}\ (\text{环向应力}) \\ \sigma_r=p\ (\text{径向应力}) \\ \sigma_z=\dfrac{pD}{4\delta}\ (\text{轴向应力}) \end{cases} \tag{8}$$

式中: p(Pa)为内压; D(m)为圆筒中径, $D=r_{\mathrm{w}}+r_{\mathrm{n}}$, r_{n}为圆筒内径, r_{w}为圆筒外径; σ(Pa)为应力, σ下标表示方向(θ代表环向, r代表径向, z代表轴向)。本研究针对小型无人机电池舱盖的典型结构——薄壁圆筒形壳体, 由于激光辐照区域尺寸远大于壁厚, 可简化为轴对称模型, 在无外部机械载荷, 仅考虑稳态温度场, 材料各向同性, 服从热弹性理论, 温度沿壁厚方向呈对数分布(一维热传导解)时, 热应力沿壁厚的分布可以表示为[5, 15]

$$\begin{cases} \sigma_{\theta t}=\dfrac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_{\mathrm{w}}}{r_{\mathrm{n}}}}\left[\ln\dfrac{r_{\mathrm{w}}}{r}+\dfrac{r_{\mathrm{n}}^2}{r_{\mathrm{w}}^2-r_{\mathrm{n}}^2}\left(1+\dfrac{r_{\mathrm{w}}^2}{r'^2}\right)\ln\dfrac{r_{\mathrm{w}}}{r_{\mathrm{n}}}-1\right] \\ \sigma_{rt}=\dfrac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_{\mathrm{w}}}{r_{\mathrm{n}}}}\left[2\ln\dfrac{r_{\mathrm{w}}}{r}+2\dfrac{r_{\mathrm{w}}^2}{r_{\mathrm{w}}^2-r_{\mathrm{n}}^2}\ln\dfrac{r_{\mathrm{w}}}{r_{\mathrm{n}}}-1\right] \\ \sigma_{zt}=\dfrac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_{\mathrm{w}}}{r_{\mathrm{n}}}}\left[\ln\dfrac{r_{\mathrm{w}}}{r}+\dfrac{r_{\mathrm{n}}^2}{r_{\mathrm{w}}^2-r_{\mathrm{n}}^2}\left(1-\dfrac{r_{\mathrm{w}}^2}{r'^2}\right)\ln\dfrac{r_{\mathrm{w}}}{r_{\mathrm{n}}}\right] \end{cases} \tag{9}$$

式中: E为弹性模量; μ为泊松比; r(m)为所求位置处半径; ΔT(K)为内外壁面温差。其边界条件为: 内表面受均匀热应力p, 外表面自由。

4　仿真分析

以美50 kW“定向能-机动近程防空”项目为例。“定向能-机动近程防空系统”(DE M-SHORAD)包括50 kW高能激光器、光束定向器、光电/红外目标捕获和跟踪系统、Ku720多任务雷达, 激光器为IPG公司50 kW多模光纤激光器, 发射激光波长为1 064 nm, 发射口径为25 cm, 光学系统瞄准精度小于5 μrad。激光器配装在“斯特赖克”轮式装甲车后部, 用于近程机动防空, 拦截火箭弹、火炮、迫击炮以及无人机, 为前线作战部队提供防护。捕获和跟踪传感器包括红外宽视场目标捕获组件和红外窄视场目标跟踪器, 红外宽视场用于目标捕获, 红外窄视场用于高精度跟踪。

根据大疆Air3无人机指标参数, 设置目标在x、y、z轴的初速度为(0.05, 0, 0)km/s, 在x、y、z轴的加速度为(0, 0, 0)km/s^2。激光武器保持静止, 打击部位为无人机电池舱盖, 材料设定为阻燃工程塑料, 查阅资料其参数见表3。

表3　阻燃工程塑料材料参数

Table 3　Material parameters of flame-retardant PC/ABS engineering plastic

Parameter	Value	Parameter	Value
Melting point/℃	280	Density/(g/cm^3)	1.2
Thermal conductivity/(W/m·K)	0.18	Specific heat capacity/(J/g·℃)	1.5
Ratio	0.37	Yield strength/MPa	62

激光大气透过率是衡量激光在大气传输过程中能量衰减的重要参数, 受传输距离和大气能见度影响。根据激光大气传输模型进行仿真, 图4的仿真结果显示了3种不同能见度(2 km、10 km、30 km)下透过率随距离的变化趋势。能见度越高, 大气中气溶胶和颗粒物的散射越弱, 大气透过率越大, 激光能量衰减越慢。传输距离增加, 透过率呈指数衰减, 这一现象符合比尔-朗伯定律, 即激光强度随传输距离呈指数衰减。

根据对目标材料的设定, 通过激光辐照模型进行实时仿真, 从力毁伤的角度判断实时热力参数与材料毁伤阈值的关系, 进而判断是否破坏目标, 电池舱盖材料(阻燃工程塑料蒙皮)所受总应力超过屈服极限时会导致永久塑性变形, 安全性能已

无法保证。可能引发舱盖密封结构完整性破坏，导致环境防护功能丧失；机械开合机构功能障碍，影响电池系统的可维护性；结构刚度退化，可能诱发飞行中的气动颤振；温度升高导致内部电池爆炸。因此，从材料力学角度而言，选取激光武器是否有效毁伤无人机电池舱盖的指标为其阻燃工程塑料材料所受总应力是否超过材料屈服极限。

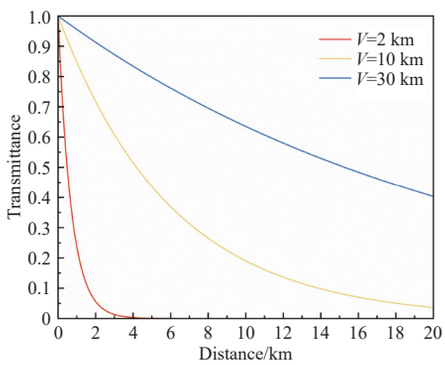

图 4 1.064 μm 激光大气透过率随距离变化曲线

Fig. 4 Curves of 1.064 μm laser atmospheric transmittance with distance

当大气能见度为 15 km，无人机在 500 m 高空，距离激光武器分别为 15 km、20 km 时，受美 50 kW “定向能-机动近程防空系统”打击，无人机应力曲线如图 5 所示。距离为 15 km 时，约 2.9 s 工程塑料蒙皮所受总应力大于材料屈服极限，实现结构失效；距离为 20 km 时，工程塑料蒙皮结构失效出现在 7.2 s 左右。由于大气中气溶胶粒子对高能激光的吸收和散射作用随着距离的增加而增加，导致打击距离越远，大气衰减越严重，激光的上靶功率密度越低，所需毁伤时间也越长，这一现象本质是能量传输效率与环境物理限制的共同结果，突破需依赖光学技术的进步。

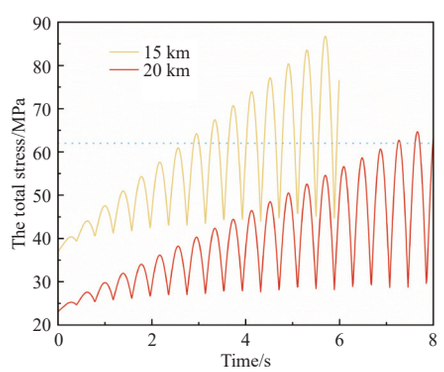

图 5 工程塑料蒙皮所受总应力曲线

Fig. 5 Total stress curves of engineering plastic skin of UAVs

如图 6 所示，当改变激光武器功率时，在其他条件与前述仿真工况保持一致时，在距离为 15 km 时将高能激光功率调整为 60 kW，毁伤时间缩短为 2.1 s 左右。由于功率提升可指数级增加能量沉积速率并压制热损失，减少大气中气溶胶分子对激光的吸收和散射，克服激光等离子体效应等，所以提高激光功率能够显著缩短毁伤时间。

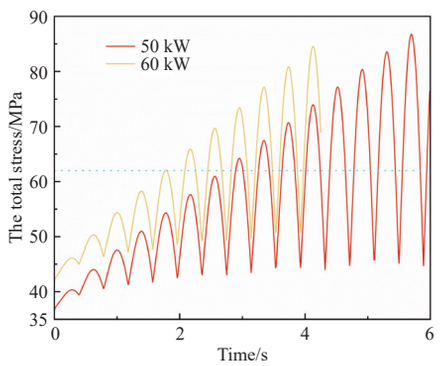

图 6 工程塑料蒙皮所受总应力曲线

Fig. 6 Total stress curves of engineering plastic skin of UAVs

5 结论

本研究通过系统分析高能激光打击无人机的毁伤机理，建立了完整的毁伤评估模型。首先基于无人机结构特性识别了关键易损部件，进而耦合激光大气传输模型与目标辐照效应模型，构建了多物理场耦合的毁伤评估框架。通过数值仿真方法，定量研究了不同作战参数（功率、距离）对毁伤效能的影响规律。仿真结果表明：作战距离与毁伤时间正相关，距离增加导致的能量密度衰减和大气衰减效应使毁伤时间增长；激光功率与毁伤时间呈负相关，功率提升通过增强能量沉积速率和抑制热损失机制，可使毁伤时间缩短。本模型为定向能武器作战运用提供了理论支撑。后续研究将聚焦于集群目标协同打击策略优化和高能激光干扰方式分析。

参考文献：

[1] 王柏雄, 宗思光, 张鑫. 舰载激光武器打击无人机蜂群毁伤特性研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(2): 256-261.
WANG Baixiong, ZONG Siguang, ZHANG Xin. Research on characterization of UAV swarm damages with shipborne laser weapons[J]. Laser & Infrared, 2024,

54(2): 256-261.

[2] 徐粲然, 孙世岩, 佘博, 等. 万瓦级舰载激光武器反无人机作战效力研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 129-134.
XU Canran, SUN Shiyan, SHE Bo, et al. Research on combat effectiveness of ten-kilowatt shipborne laser weapon against UAV[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(12): 129-134.

[3] 梁巍巍, 陈前荣, 王彦斌, 等. 战术激光武器对无人机毁伤效果仿真分析研究[J/OL]. 光学与光电技术, 2024: 1-10. (2024-04-30). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXGD20240426007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
LIANG Weiwei, CHEN Qianrong, WANG Yanbin, et al. Simulation analysis of damage effect of tactical laser weapons on UAV[J/OL].Optics & Optoelectronic Technology, 2024: 1-10. (2024-04-30). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GXGD20240426007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[4] 李振华. 激光武器在无人机反制中的发展趋势[J]. 武警学院学报, 2021, 37(10): 34-38.
LI Zhenhua. Development trend of laser weapons in UAV countermeasures[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2021, 37(10): 34-38.

[5] 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(增刊 1): 426-432.
ZHAO Yang, ZHANG Haochun, LI Yao, et al. Numerical simulation of ablation characteristics of laser irradiated materials[J]. CIESC Journal, 2014, 65(S1): 426-432.

[6] 张昊春, 宋乃秋, 戴赞恩, 等. 高能激光武器目标打击的多物理场系统仿真[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 526-532.
ZHANG Haochun, SONG Naiqiu, DAI Zanen, et al. Multiple physical fields system simulation for high energy laser weapon target attacking[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 526-532.

[7] 宋乃秋, 张昊春, 马超, 等. 高能激光武器毁伤机理多物理场建模[J]. 化工学报, 2016, 67(增刊 1): 359-365.
SONG Naiqiu, ZHANG Haochun, MA Chao, et al. Multi-physical field modeling of damage mechanism of high energy laser weapon[J]. CIESC Journal, 2016, 67(S1): 359-365.

[8] 程立, 童忠诚. 海基激光武器的作战应用及其对抗措施[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(2): 8-10.
CHENG Li, TONG Zhongcheng. Battle application and countermeasures of sea-based laser weapon[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(2): 8-10.

[9] 赵晨钟, 梁争峰, 陈进. 从飞机易损性分析杀伤战斗部的发展[J]. 飞航导弹, 2014(2): 90-92.
ZHAO Chenzhong, LIANG Zhengfeng, CHEN Jin. Analysis of the development of killing warhead from aircraft vulnerability[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(2): 90-92.

[10] DJI 大疆创新. DJI air3 技术支持[EB/OL]. (2023-07-25)[2025-04-22]. https://www.dji.com/cn/support/product/air-3.
DJI innovate. DJI air3 technical support[EB/OL]. (2023-07-25)[2025-04-22].https://www.dji.com/cn/support/product/air-3.

[11] 高文静, 罗振莹, 白云塔, 等. 激光远场效能模拟计算及评估研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1336-1339.
GAO Wenjing, LUO Zhenying, BAI Yunta, et al. Simulation caculation and evaluation of laser far-forth efficiency[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1336-1339.

[12] 王海先, 叶艾. 大气衰减系数对激光测距能力影响的研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(6): 116-119.
WANG Haixian, YE Ai. The influence of the coefficient of atmospheric attenuation to the capability of laser ranging[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(6): 116-119.

[13] 杨剑波, 宗思光, 陈利斐. 舰载激光武器对典型无人机蜂群目标毁伤距离研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(5): 745-751.
YANG Jianbo, ZONG Siguang, CHEN Lifei. Research on destruction distance of shipborne laser weapon to typical UAV swarm target[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(5): 745-751.

[14] LI Z G, ZHANG H C, LUO X, et al. Transient study on heat transfer and flow performance of alkali metal heat pipe in space nuclear powered heat pipe radiator[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2024, 109: 109511.

[15] 宋乃秋. 高能激光武器多物理场仿真建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
SONG Naiqiu. Multi-physical field simulation modeling of high energy laser weapon[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.