# 无人机用航空铝合金材料激光毁伤特性 缩比实验研究

## 刘坤<sup>1</sup>,张庆霞<sup>1</sup>,孙淑伟<sup>1</sup>,白懿心<sup>2</sup>,汤伟<sup>3</sup>,郑长彬<sup>3</sup>

(1.中国人民解放军 32178 部队,北京 100012; 2.西南技术工程研究所,重庆 400039; 3.中国科学 院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,长春 130033)

摘要:目的 通过开展激光对无人机用航空铝合金材料的缩比毁伤实验,为研究激光对无人机的毁伤特性及 规律奠定基础,为激光武器的战技指标论证提供科学可靠的参考数据。方法 采用缩比模型法,利用激光对 航空铝靶板进行毁伤实验,记录烧穿时间、光斑直径、激光功率等参数,并通过等效性修正实验对毁伤规 律进行分析。结果 毁伤缩比实验中,随着尺度律 cp的增加,航空铝板的平均击穿时间逐渐延长,击穿所需 的激光能量密度基本符合线性增加规律。修正实验中,随着航空铝板厚度的增加,击穿时间逐渐延长,实 验拟合曲线与理论曲线具有较好的一致性。结论 通过缩比实验与修正实验,可建立激光对航空铝合金材料 的毁伤模型公式,根据激光参数推算毁伤阈值及击穿时间。

关键词: 铝合金; 激光辐照; 激光毁伤; 尺度律; 等效缩比模型; 无人机
中图分类号: TN249
文献标识码: A
文章编号: 1672-9242(2022)12-0066-07
DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.12.011

## Equivalent-scale Experiment on Damage of Aviation Aluminium Alloy for UAV by Laser Irradiation

LIU Kun<sup>1</sup>, ZHANG Qing-xia<sup>1</sup>, SUN Shu-wei<sup>1</sup>, BAI Yi-xin<sup>2</sup>, TANG Wei<sup>3</sup>, ZHENG Chang-bin<sup>3</sup>

(1. Unit 32178 of the PLA, Beijing 100012, China; 2. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 3. Sate Key laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

**ABSTRACT:** The work aims to carry out equivalent-scale experiments of laser irradiation on aviation aluminum alloy materials for UAV, lay a foundation for the damage characteristics and laws of laser irradiation on UAV, and provide scientific and reliable reference data for demonstration of tactic indexes of high-power laser weapons. The equivalent-scale model method was used to conduct damage experiment on the aviation aluminum target by laser irradiation. Parameters such as breakthrough time, spot diameter and laser power were recorded, and the damage law was analyzed through the correction experiment. In the equivalent-scale experiments, with the increase of scaling law C<sub>P</sub>, the average breakthrough time of aviation aluminum plate gradually increased, and the laser energy density required for breakthrough

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2021-12-01

Received: 2021-11-10; Revised: 2021-12-01

作者简介:刘坤(1986—),男,博士,工程师,主要研究方向为新材料应用。

Biography: LIU kun (1986-), Male, Doctor, Engineer, Research focus: application of new materials.

**引文格式:** 刘坤, 张庆霞, 孙淑伟, 等. 无人机用航空铝合金材料激光毁伤特性缩比实验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 066-072. LIU Kun, ZHANG Qing-xia, SUN Shu-wei, et al. Equivalent-scale Experiment on Damage of Aviation Aluminium Alloy for UAV by Laser Irradiation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 066-072.

basically conformed to the law of linear increase. In the correction experiments, the breakthrough time increased gradually with the increase of aviation aluminum alloy plate thickness, and the experimental fitting curve was in good agreement with the theoretical curve. Through the equivalent-scale experiments and correction experiments, the damage model formula of aviation aluminum alloy by high-power laser can be established, and the damage threshold and breakthrough time can be calculated according to the laser parameters.

KEY WORDS: aluminum alloy; laser irradiation; laser damage; scale law; equivalent-scale model; UAV

无人机正重塑未来作战模式,在侦察、打击等方 面对军事目标带来极大的威胁,无人机与反无人机作 战逐渐成为未来作战的重点<sup>[1-2]</sup>。战术激光武器是利 用激光束来毁伤战术目标的定向能武器,是目前反无 人机的一个较为有力的手段<sup>[3-6]</sup>。因此,激光对无人 机材料的毁伤研究成为重点方向,但是此类毁伤实验 对激光设备、实验场地等条件具有较高要求,原尺寸 实验开展较为困难,建立科学合理的尺度律<sup>[7-8]</sup>,并 由此进行缩比实验研究具有重要意义。

飞行器的机体结构受到气动加热和气动力环境 的影响,其热学和力学响应是决定飞行器设计的重 要指标<sup>[9]</sup>。陈发良等<sup>[10]</sup>对结构的力学响应、断裂失 效等问题的尺度律进行了述评和总结,并对热传导、 热力耦合响应、结构弹塑性屈曲等问题的尺度律进 行了理论探讨。Zdenek 等<sup>[11]</sup>综述了结构破坏的尺度 律和尺寸效应的研究进展,重点分析了准脆性材料, 并采用内聚裂纹模型、非局域化有限元模型和离散 元模型等对尺寸效应进行了模化。王玉恒等[12-13]针 对连续波激光辐照充压圆柱壳体的热力效应问题, 建立了不同缩比率的近几何相似模型,并探讨了同一 加载条件下缩比模型的相似性规律。黄晨光等[14-15] 对弹性薄板在长脉冲激光诱导的热冲击下的响应进 行了简单的分析。张榕京等[16]研究了准静态热弹性 薄板的主控无量纲参量问题。焦路光等[17]建立了自 然对流情形下激光辐照液体贮箱的理论模型,通过 方程分析法导出了该问题的尺度律,提出了激光辐 照液体贮箱的缩比方法。贺敏波等[18]基于热力解耦 的热弹性模型,采用常用假设,通过方程分析法, 导出了激光辐照下高反射镜热变形问题的尺度律。 激光毁伤的尺度律及缩比实验研究主要集中于理论 探讨及针对特定目标的设计与实验,缺乏系统性及 应用的通用性。

航空铝材料广泛用于无人机的蒙皮和支撑结构,激光对其毁伤效能将直接影响其反无人机作战能力<sup>[19-24]</sup>。本文结合典型激光与无人机交汇场景,针 对航空铝材料进行等效激光辐照模拟实验,采用尺度 律进行方案设计,通过缩比实验及修正实验,开展激 光对航空铝合金材料的毁伤缩比实验研究,并为激光 对其他无人机用材料的毁伤效能评估提供方法参考。

#### 1 实验

#### 1.1 理论分析

本文利用方程分析的方法研究激光辐照下目标 靶材热响应的尺度律,参照相似第三定律(Π定理), 将模型实验结果整理成相似准则间的函数关系式,再 将此函数关系推广到原型上<sup>[10-11,25-27]</sup>。在此过程中, 注意以下3个方面的问题:只有同类的物理现象之间 才能讨论相似问题;与现象有关的物理量要一一对应 成比例;对于非稳态问题,要求在相应的时刻各物理 量的空间分布相似。

在求解温度场时,使用准静态假设,认为激光能 量主要被靶材表面吸收,基底的吸收可以忽略。因此, 仅考虑靶材内部的热传导方程,将靶材表面对激光的 吸收作为表面热源。基于以上假设,激光辐照下靶材 热响应控制方程和定解条件如下所述。

热传导方程:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = 0 \tag{1}$$

初始条件:

$$T|_{t=0} = 300 \text{ K}$$
 (2)

边界条件:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Sigma_1} = \alpha I - hT \tag{3}$$

$$k\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Sigma_2} = -hT\tag{4}$$

式中: $\rho$ 、*C*、*k*、*h*、*a*分别为靶材的密度、热容、 热传导系数、表面传热系数和光吸收率,给定材料以 上参数不随尺度律发生变化;*T*为温度场;*t*为时间; *n*为激光入射平面法向坐标;*I*为入射激光功率密度;  $\Sigma_1$ 为激光辐照面; $\Sigma_2$ 为非激光辐照面。

为推导相似指标式,设原型变量 y 为 y<sub>1</sub>,缩比模 型变量 y 为 y<sub>2</sub>,相似倍数为 c<sub>v</sub>,则:

$$c_y y_1 = y_2 \tag{5}$$

设位移和坐标的标识为L,对于缩比模型显然有 $0 < c_L < 1$ 。

对缩比模型对应的公式(1)进行相似变换,得:

$$\rho C \frac{c_T \partial T_1}{c_t \partial t_1} - k \frac{c_T}{c_L^2} \nabla^2 T_1 = 0$$
(6)

式中:  $c_T$ 为温度 T 对应的相似倍率;  $c_t$ 为时间 t对应的相似倍率;  $c_L$ 为位移和坐标对应的相似倍率。

为保证在引入相似倍率情况下,式(6)仍然成 立,则各物理量相似倍率需满足以下关系:

$$\frac{c_t}{c_L^2} = 1 \tag{7}$$

对式(3)进行相似变换:

$$-k\frac{c_T}{c_L}\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Sigma_1} = ac_I I - hc_T T$$
(8)

式中: c<sub>1</sub>为功率密度 I 对应的相似倍率。

为保证在引入相似倍率情况下,式(8)仍然成 立,则各物理量相似倍率需满足以下关系:

$$\frac{c_T}{c_L} = c_I \tag{9}$$

$$\frac{c_T}{c_L} = c_T \tag{10}$$

根据式(5)推导结论,0<*c*<sub>L</sub><1,则式(10)不成立。然而,根据该相似指标的由来,可以得出只有环境换热系数*h*=0时,以上尺度律关系式可成立。一般而言,当靶材的温升不是太高,且没有高速气流流过靶材表面时,假设换热系数*h*=0不会引入较

大误差。

对于连续激光,多采用高斯分布热源功率密度模型,则功率密度为:

$$I = \frac{P}{\pi R_0^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R_0^2}\right)$$
(11)

式中: *P* 为激光功率; *R*<sub>0</sub> 为激光光斑半径。 对式(11)进行相似变换:

$$I_{1} = \frac{P}{\pi R_{10}^{2}} \exp\left(-\frac{x_{1}^{2} + y_{1}^{2}}{R_{10}^{2}}\right)$$
$$I_{2} = \frac{c_{P} P_{1}}{\pi c_{L}^{2} R_{10}^{2}} \exp\left(-\frac{c_{L}^{2} x_{1}^{2} + c_{L}^{2} y_{1}^{2}}{c_{L}^{2} R_{10}^{2}}\right) = \frac{c_{P}}{c_{L}^{2}} I_{1}$$
(12)

式中:  $c_P$ 为激光功率对应的相似倍率。 结合式(9)得:

$$c_P = c_T c_L \tag{13}$$

综合式(7)、(9)、(13)得几何近似下的缩比率为:

$$c_t = c_L^2 , \quad \frac{c_T}{c_L} = c_I , \quad c_P = c_T c_L$$
 (14)

本文重点考虑在激光功率缩比实验中靶材的热 响应,故设温度场相似系数为1,则缩放模型与原型 之间相应参量的缩比率见表1。

表 1 激光辐照下靶材热响应的缩比率 Tab.1 Scaling ratio of thermal response of target under laser irradiation

物理量	激光功率	光斑尺寸	功率密度	厚度	时间	温度
尺度律	$C_P$	$\mathcal{C}_P$	$1/c_P$	$c_P$	$c_P^2$	1

### 1.2 方法

针对激光武器打击无人机典型场景,设计的激光 参数包括:激光波长为(1.06±0.02)μm,激光采用连 续波体制,激光功率为 33 kW,激光传输距离为 3 km, 激光光斑直径为 200~300 mm,打击目标为无人机航 空铝合金结构件。通过开展航空铝材料激光辐照等效 缩比实验,基于激光辐照下目标靶材热响应的尺度 律,采用一种基于不同厚度等效模拟实验的数据修 正,在满足激光功率缩比率 *c*<sub>P</sub>的前提下,获得厚度 与烧穿时间的对应关系,修正试件厚度改变对实验结 果造成的影响,建立激光对航空铝合金材料的毁伤模 型公式。

实验光源为近红外光纤激光器,由山东海富光子 生产,输出中心波长约为 1.08 μm,连续波体制。实 验中用到 2 台激光器,最大激光功率分别为 2.0 kW 和 3.5 kW,且连续可调。毁伤评估测量实验系统主 要包括烧穿时间测量模块、毁伤在线监视模块、温 度测量模块、光束控制模块和激光功率在线监视模 块。利用烧穿时间测量模块计算烧穿时间,利用热 像仪测量表面温度变化,利用毁伤在线监视模块记 录动态毁伤过程,利用光束控制模块确定控制到靶 光斑直径,利用激光功率计及其配属模块,可实时 在线监视激光功率的变化过程。

#### 2 结果及分析

#### 2.1 航空铝板毁伤缩比实验分析

基于缩比模型的缩比率设置(表 1),设置航空 铝合金材料激光辐照等效缩比实验参数见表 2,不同 尺度律下实验航空铝板实物见图 1。



图 1 不同尺度律下航空铝板实物 Fig.1 Photos of aviation aluminum alloy plates under different scale laws

Tab.2 Experimental parameters of equivalent reduction of aluminum alloy						
尺度律 c <sub>P</sub>	激光功率 P/W	光斑直径 D/mm	到靶功率密度 <i>I</i> /(kW·cm <sup>-2</sup> )	靶材尺寸/(mm×mm×mm)		
1	3 300	20	1.05	100×100×3		
0.9	2 970	18	1.167	90×90×2.7		
0.8	2 640	16	1.313	80×80×2.4		
0.7	2 310	14	1.5	70×70×2.1		
0.6	1 980	12	1.75	60×60×1.8		
0.5	1 650	10	2.1	50×50×1.5		
0.4	1 320	8	2.63	40×40×1.2		
0.3	990	6	3.5	30×30×0.9		
0.2	660	4	5.25	20×20×0.6		
0.1	330	2	10.5	10×10×0.3		

表 2 铝合金等效缩比实验参数

注: 原型试件尺度律为 10 ( 激光功率为 33 kW, 到靶光斑为 20 cm )。

实验以击穿样品所需的激光能量密度 *E* 作为毁伤阈值。不同尺度律下,航空铝板辐射毁伤等效性实验结果如图 2 所示,实物毁伤效果如图 3 所示。

由图 2 中可以看到,随着尺度律 *c<sub>p</sub>* 的增加,航 空铝板的击穿时间(平均值)逐渐增大,利用最小二 乘法进行线性拟合,基本符合线性增加规律。与理论 曲线不同的是,实验拟合曲线的斜率略小,且未过原 点,分析原因主要是由于环境条件未进行等效模拟所 致。以热对流为例,*c<sub>p</sub>* 值越大,等效模拟热对流值应 相应越大,但实验中环境条件相同,即 *c<sub>p</sub>*=0.1 时,等 效模拟热对流值要小于实验条件下热对流值,从而造 成实验中击穿 *c<sub>p</sub>*=0.1 时所需的损伤阈值要大于理论 值。此外,同一尺度律 *c<sub>p</sub>*、不同测试样品的损伤阈值 具有一定的差异性,分析认为这主要是由于材料个体 的差异性导致的。









图 3 不同尺度律航空铝板的毁伤结果 Fig.3 Damage results of aviation aluminum alloy plates with different scale law

#### 2.2 航空铝板毁伤等效性修正实验分析

通过尺寸律分析表明,可通过缩放激光功率密 度、效应物尺寸厚度和响应时间来获得超出现有实验 条件的原型实验数据,然而尺度律的推导引入了许多 假设和近似,将引起实验结果偏差。主要偏差来源包 括热耦合特性偏差、热传导系数、热对流系数、热辐 射系数等非线性项的忽略,以及缩比条件下测量不确 定度增加等。因此,需要通过大量的实验结果来完成 对等效缩比模型的修正。

设计激光辐照等效模拟实验时,缩比相似性条件 意味着厚度 h 等尺寸参数也必须按照 cp 缩比率来缩 比,这对于薄壁壳体存在一定的困难,限制了缩比率 的范围。同时,激光的功率和光斑直径也必须满足缩 比条件。这 2 点往往会受到实验条件的限制而难以实现。例如,为满足激光功率提高 10 倍(大功率激光 器难以获得)的要求,则靶材厚度要缩小 90%,烧蚀时间要缩小 99%。假设原型靶材厚度为 5 mm,烧穿时间为 2 s,则缩比条件下,缩比模型的靶材厚度为 0.5 mm,烧蚀时间为 0.02 s。可以看出,缩比情况下,材料的加工和测量精度要求明显提高,增加了实验难度,且难以完成多种缩比率 *c*<sub>P</sub>下的等效模拟实验,增大了实验外推结果(超出现有实验条件的原型实验数据)的不确定度。

为解决以上问题,本文提出了一种基于不同厚度 等效模拟实验的修正模型,可大大增加缩比率 *c<sub>P</sub>*的 实验个数,降低实验外推结果的不确定度。毁伤等效 性修正实验主要建立试样靶材厚度 *h* 与样品击穿时 间 *t* 的对应关系,来修正激光毁伤等效性实验数据, 进而获得原型样品激光毁伤阈值。

由热扩散深度公式可知, 热在厚度 $\delta$ 内传播的等效距离相等, 即:

$$\frac{2(\kappa_0 t_0)^{\frac{1}{2}}}{\delta_0} = \frac{2(\kappa_1 t_1)^{\frac{1}{2}}}{\delta_1}$$
(15)

式中: κ 为热扩散率, t 为辐照时间。经推导, 得:

$$\Pi = \frac{t_1}{t_0} = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2 = c_P^2 \tag{16}$$

即不同厚度下,烧蚀(击穿)时间 *t* 应与尺度律 *c*<sub>P</sub>的平方成正比。

基于上述关系,笔者提出了强激光辐照等效模拟 修正模型:在满足激光功率缩比 cp 前提下,放宽试 件尺寸(主要为厚度)的缩比率,重新定义满足加工 条件的缩比尺寸,并建立不同厚度试件的等效实验, 获得厚度与烧穿时间的对应关系,修正试件厚度改变 (不满足原型缩比率)对实验结果造成的影响。例如, 原型靶材厚度为 50 mm, 同样建立满足激光功率缩小 90%的等效实验,试件靶材厚度取 5 mm,这样可以 建立缩比率 cp在 0.01~0.1 内的缩比实验,此时试件 靶材对应的厚度为 0.5~5 mm, 通过机械加工的方法 容易获得。基于上述缩比实验,获得了 50 mm 厚试 件的毁伤数据,非原型靶材 5 mm 厚的实验数据,下 一步进行不同厚度试件的修正实验,即选定 cp=0.1 时,激光功率和光斑大小不变,开展 0.5~5 mm 厚度 样品(长×宽不变)的烧穿时间实验,获取靶材厚度 h 与烧穿时间 t 的关系, 最后完成缩比率在 0.01~0.1 内 所有实验数据的修正,外推获得原型试件的毁伤阈值。 基于此模型,设定毁伤等效性修正实验的参数见表3。

表 3	航空铝板毁伤等效性修正实验参数
Tab 3 Experimental parameters of	damage equivalence correction of aviation aluminum allow plates

Tuese Enperimental parameters et aumuge equivalence contention of a matterin anot prates								
激光功率 P/kW	光斑直径 D/mm	到靶功率密度 I/(kW·cm <sup>-2</sup> )	靶材尺寸/(mm×mm×mm)					
1.538	9.8	2.04	50×50×5.0					
1.538	9.8	2.04	50×50×4.5					
1.538	9.8	2.04	50×50×4.0					
1.538	9.8	2.04	50×50×3.5					
1.538	9.8	2.04	50×50×3.0					
1.538	9.8	2.04	50×50×2.5					
1.538	9.8	2.04	50×50×2.0					
1.538	9.8	2.04	50×50×1.5					
1.538	9.8	2.04	50×50×1.0					
1.538	9.8	2.04	50×50×0.5					
	激光功率 P/kW 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538 1.538	激光功率 P/kW         光斑直径 D/mm           1.538         9.8	次光斑直径D/mm到靶功率密度 $I/(kW \cdot cm^{-2})$ 1.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.041.5389.82.04					

航空铝板激光毁伤等效性修正实验结果如图 4 所示,实物毁伤效果如图 5 所示。对比拟合曲线可以 发现,随着航空铝板厚度的增加,击穿时间 *t*逐渐增 大,且 2 条曲线的一致性较好,曲线开口方向相同, 进一步验证了试件厚度 *h* 与击穿时间 *t* 的关系,证明 了提出的毁伤等效性修正方法的正确性。另外,纵向 对比实验数据发现,实验测得击穿时间比理论值略 大,且同一规格样品的击穿时间具有一定的差异性, 这与前述毁伤等效性实验结果相同。

#### 2.3 航空铝板毁伤模型公式分析

基于航空铝板的毁伤实验数据的拟合曲线(图 2),建立了尺度律 *c<sub>P</sub>*与实验样品毁伤阈值 *E* 的模型 公式:







图 5 不同厚度航空铝板的毁伤结果 Fig.5 Damage results of aviation aluminum alloy plates with different thickness

 $E = 62.3c_P + 15.7\tag{17}$ 

基于毁伤等效性修正实验数据的拟合曲线(图 4),建立修正模型公式为:

 $t = 14.1686c_{P0}^2 + 35.7716c_{P0} - 3.2181$  (18) 对模型公式进行修正后,可得本项目原型实验样

品的等效毁伤阈值计算公式:

 $E = 1.813c_P + 0.436 \tag{19}$ 

由此可得,针对 1.0 m×1.0 m×5 mm 航空铝板在 激光功率为 33 kW,光斑直径为 200 mm 时, *c<sub>P</sub>* 值为 10,其毁伤阈值为 18.6 kJ/cm<sup>2</sup>,推算击穿时间 *t* 为 176.6 s。

#### 3 结论

 1)随着尺度律 c<sub>P</sub>的增加,航空铝板的击穿时间 (平均值)逐渐增大,利用最小二乘法进行线性拟合, 基本符合线性增加规律。

2)修正实验中,随着航空铝板厚度的增加,击 穿时间逐渐增大,实验拟合曲线与理论曲线具有较好 的一致性。

3)通过缩比实验与修正实验,可建立激光对航 空铝合金材料的毁伤模型公式,根据激光参数推算毁 伤阈值及击穿时间。

#### 参考文献:

- 陈小双, 翟为刚, 赵万里. 美国及中国军用无人机的新 发展与性能分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(7): 26-28.
   CHEN Xiao-shuang, ZHAI Wei-gang, ZHAO Wan-li. New Development and Performance Analysis of US and Chinese Military UAV[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(7): 26-28.
- [2] 陈达,陈晓薇,林幼贤,等. 基于 LabVIEW 和 Arduino 的无人机辐射监测系统设计与实现[J]. 装备环境工程, 2020, 17(3): 93-99.

CHEN Da, CHEN Xiao-wei, LIN You-xian, et al. Design and Implementation of UAV Radiation Monitoring System Based on LabVIEW and Arduino[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(3): 93-99.

- [3] CELIK H, ADANA S, YAHSI E. Military Applications of the Laser Weapons in the Future Battlefield[C]//Laser Technology for Defense and Security IX. Baltimore: SPIE, 2013.
- [4] KIEL D H. Is this the Time for a High-Energy Laser Weapon Program?[J]. Optical Engineering, 2012, 52: 021008.
- [5] PERRAM G, MARCINIAK M, GODA M. High-Energy Laser Weapons: Technology Overview[C]//Proceedings Volume 5414, Laser Technologies for Defense and Security. [s. 1.]: SPIE, 2004.
- [6] EXTANCE A. Military Technology: Laser Weapons Get Real[J]. Nature, 2015, 521(7553): 408-410.
- [7] LATHAM W P, BERAUN J E. Laser Effects Research and Modeling to Support High-Energy Laser Systems[C]//Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. Orlando: SPIE, 2001.
- [8] 孙承纬. 强激光与物质相互作用及破坏机理[Z]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1989: 224-251.
   SUN Cheng-wei. High Intensity Laser Beam Interaction with Materials and Failure Mechanism[Z]. Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics, 1989: 224-251.
- [9] 时圣波, 唐硕, 梁军. 临近空间飞行器防隔热/承载一体化热结构设计及力/热行为[J]. 装备环境工程, 2020, 17(1): 36-42.
  SHI Sheng-bo, TANG Shuo, LIANG Jun. Design and Thermomechanical Behavior of Full-Composite Structurally Integrated Thermal Protection Structure for near Space Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(1): 36-42.
- [10] 陈发良,余同希.结构热力响应及失效的尺度律[J].固体力学学报,1997,18(1):25-37.
  CHEN Fa-liang, YU Tong-xi. Scaling Laws for Structural thermal-Dynamic Response and Failure[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1997, 18(1): 25-37.
- [11] BAZ'ANT Z P, CHEN Er-ping. Scaling of Structural Failure[J]. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(10): 593-627.
- [12] 王玉恒, 刘峰. 强激光辐照充压圆柱壳体热力效应的 相似性数值模拟(I)[J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 62-63.
   WANG Yu-heng, LIU Feng. Numerical Simulation on Similarity of Thermal-Mechanical Effects of Cylindrical

Shells Subjected to Inner Pressure and Irradiated by Intense Laser(I)[J]. Laser Journal, 2008, 29(5): 62-63.

- [13] 丁升, 王建国, 王玉恒, 等. 激光辐照热力耦合问题的 相似性[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(9): 1331-1334.
   DING Sheng, WANG Jian-guo, WANG Yu-heng, et al. Similarity of Thermo-Mechanical Effect Induced by High Energy Laser Beam[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(9): 1331-1334.
- [14] 黄晨光. 激光辐照下几种金属材料的动态力学性质和 结构热-力耦合的变形与破坏[D]. 北京:中国科学院力 学研究所, 1996.
  HUANG Chen-guang. Dynamics Behaviors of Metals and Thermo-Mechanical Coupling Deformation and Failure of Structures[D]. Beijing: Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [15] 黄晨光,陈思颖,段祝平. 激光辐照下充压圆筒变形的 相似律问题[J]. 强激光与粒子束,2004,16(8):962-966.
  HUANG Chen-guang, CHEN Si-ying, DUAN Zhu-ping. Similarity Criterion about Deformation and Failure of Pressurized Cylinder Subjected to Laser Irradiation[J].
  High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(8): 962-966.
- [16] 张榕京. 连续激光辐照下受载结构的热-力耦合破坏研究[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 2000.
   ZHANG Rong-jing. Thermo-Mechanical Failure of Pre-Loaded Structure Irradiated by CW Laser Beam[D].
   Beijing: Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [17] 焦路光,赵国民,王嘉睿,等. 自然对流情形下激光辐照液体贮箱的尺度律[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9):
   26-31.

JIAO Lu-guang, ZHAO Guo-min, WANG Jia-rui, et al. Scaling Law of Natural Convection in a Liquid Tank Irradiated by Laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(9): 26-31.

- [18] 贺敏波, 江厚满. 激光辐照下高反射镜热变形问题的 尺度律[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2043-2046. HE Min-bo, JIANG Hou-man. Scaling Law in Thermal Deformation of High Reflecting Mirror under Laser Irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2043-2046.
- [19] 余天宇, 戴峰泽, 张永康, 等. 平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 31-37.

YU Tian-yu, DAI Feng-ze, ZHANG Yong-kang, et al. Simulation and Experimental Study on Residual Stress Field of 2024 Aluminum Alloy Induced by Flat-Top Laser Beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 31-37.

[20] 朱然,张永康,孙桂芳,等. 三维平顶光束激光冲击
 2024 铝合金的残余应力场数值模拟[J]. 中国激光,017,44(8):139-144.

ZHU Ran, ZHANG Yong-kang, SUN Gui-fang, et al. Numerical Simulation of Residual Stress Fields in Three-Dimensional Flattened Laser Shocking of 2024 Aluminum Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 139-144.

- [21] MIRZADEH H, et al. Simple Physically-Based Constitutive Equations for Hot Deformation of 2024 and 7075 Aluminum Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1614-1618.
- [22] 张卫文,张文飞,罗江勇,等. 7075/6009 铝合金复合材 料热压缩变形的本构方程[J]. 机械工程材料, 2011, 35(8): 93-96.
  ZHANG Wei-wen, ZHANG Wen-fei, LUO Jiang-yong, et al. Constitutive Equation of 7075/6009 Aluminium Composite during Hot Compression[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(8): 93-96.
- [23] 程文礼,邱启艳,赵彬. 无人机结构复合材料应用进展
   [J]. 航空制造技术, 2012, 55(18): 88-91.
   CHENG Wen-li, QIU Qi-yan, ZHAO Bin. Application
   Progress of Composites for UAV[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(18): 88-91.
- [24] 潘荣华, 宋国栋, 杨学永. 无人机复合材料结构和制造 工艺[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S1): 119-122.
   PAN Rong-hua, SONG Guo-dong, YANG Xue-yong.

Composite Material Structure and Manufacturing Processes of UAV[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S1): 119-122.

- [25] 徐挺. 相似理论与模型实验[M]. 北京: 中国农业机械 出版社, 1982.
   XU Ting. Similarity Theory and Model Test[M]. Beijing: China Agricultural Machinery Press, 1982.
- [26] HORAK J, HEUNOSKE D, LUECK M, et al. Numerical Modeling and Characterization of the Laser–Matter Interaction during High-Power Continuous Wave Laser Perforation of Thin Metal Plates[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S2): S28003.
- [27] OSTERHOLZ J, HEUNOSKE D, HORAK J, et al. Experimental Characterization of Energy Transfer from Large-Diameter Kilowatt Continuous-Wave Laser Beams to Metal Samples[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(1): 012011.

责任编辑:刘世忠