

激光复合损伤机理与效应研究

程 勇,朱孟真,马云峰,魏靖松,刘 旭,丁方正,谭朝勇,陈 霞,郭延龙,初 华

(武汉军械士官学校 光电技术研究所,湖北 武汉 430075)

摘 要: 达到或者超过 100 kW 的激光输出是激光武器用于反导反卫等战略防御的终极发展目标。基于激光武器发展目标与最新动向,提出了多模式激光复合损伤新思路,即采用不同波长、连续与脉冲、频率变化的激光,同时或交替作用在同一靶材上,获得更好的损伤效果。构建了脉冲/连续激光复合损伤物理模型,并用有限元法进行了仿真模拟,使用 2 kW 连续激光器与 10 J 长脉冲激光器开展了损伤对比实验。模拟和实验结果表明,脉冲激光烧蚀金属靶材效果优于连续激光;在两种激光复合或交替作用下出现“非线性雪崩烧蚀”效应,复合烧蚀效果明显优于脉冲激光,烧蚀质量是脉冲激光的 13 倍。这一效应,为战术激光武器向“合束多模式同轴输出”新体制发展提供了基础。

关键词: 激光武器; 激光烧蚀; 复合损伤; 有限元法

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1105005

Mechanism and effects of complex laser ablation

Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng, Wei Jingsong, Liu Xu, Ding Fangzheng, Tan Chaoyong,
Chen Xia, Guo Yanlong, Chu Hua

(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China)

Abstract: For antimissile, antisatellite, or such kind of strategic defense application, laser weapon is expected to emit 100 kW power or higher level. By considering the development and its object of laser weapon, a new damnification method using multi-mode laser was presented. Using the lasers, different in wavelength, pulsed and continuous wave, frequency verified, focused on target commutatively or synchronously to get more effective result. A complex damnification model was conceived and simulated by using finite element method. A 2 kW continuous wave laser and a long pulse width laser were used in the damage comparison experiments. Both the simulation and experiments results indicate that pulsed laser is better than continuous in metal ablation, furthermore, complex laser is much better. Comparing with pulsed laser, complex laser inspires "nonlinear avalanche ablation" effect, which makes the ablated metal 13 times more than using pulsed laser. This "nonlinear avalanche ablation" effect makes a base for "multi-mode coaxial combined" laser weapon.

Key words: laser weapon; laser ablation; complex damnification; finite element method

收稿日期:2016-03-05; 修订日期:2016-04-08

基金项目:国防探索基金(7131029);国防预研基金(0225)

作者简介:程勇(1961-),男,教授,博士,主要从事固体激光技术与工程方面的研究。Email: gdyjs@263.net

0 引言

从 1960 年梅曼发明激光器以来,激光武器具有的一系列潜在优势,引起了世界军事领域的广泛关注与倾力研究,发展大于 100 kW 激光器摧毁 100 km 以外战略目标是激光武器领域军事家、科学家与工程师们追求的目标。研究表明,高能激光距离武器级实际应用还有不少问题,但它是定向能武器家族中发展最活跃、最成熟和最有前途的新概念武器之一,也是未来应对海陆空天新威胁(包括高超声速/高动态变轨飞行、高精度远程打击等)的有效手段。根据情报信息与需求分析认为,激光武器研究与发展呈现如下动向:①从战略威慑向战术应用发展,即从用于 100 km 以外反导反卫防御应用的 MW 量级化学激光,向几十 kW 小型机动固体激光毁伤 10 km 以内防空反导反无人机等战术应用发展^[1-2]。②从高功率单路激光向多光束激光合成技术路线发展,即多光束相干或非相干合成是高能高亮度激光武器战术应用的有效途径^[3-6]。③从陆基/海基向空基/天基发展^[4,7]。④从线性损伤向复合损伤模式发展,即发展多波长/连续/脉冲激光“合束多模式同轴输出”新概念。

激光武器(包括激光推进、空间碎片激光清扫、激光对抗等)的研究,本质上是高功率/高能激光经远距离传输到靶目标的损伤机理与效应的研究。这是一个非常复杂的过程,单一特性的激光与靶材相互作用的线性损伤机理已有较多报道^[8-12],激光烧蚀效应受控于激光功率密度,当激光功率密度达到 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$,出现熔化或气化,增大到 10^7 W/cm^2 以上时,会产生等离子体;烧蚀速率与激光波长和脉宽有关;长脉冲大能量激光更有利提高金属靶烧蚀速率;脉冲等离子体力学效应有利于提高烧蚀速率。国防科技大学焦路光^[13-14]等研究了组合激光(连续和脉冲激光)作用于靶材的升温特性。温州大学冯爱新^[15]等研究了不同波长脉冲激光对多晶硅损伤特性。然而,有关激光多模式复合损伤(热效应和力学效应)的研究鲜有报道。

对于一个需要打击的目标,其靶材特性往往是未知的,采用一个既定参数激光(波长、功率/能量、重复频率、脉宽…)去应对未知的不同目标,其打击

效果往往是难以预料或无效的。现有大量报道是高功率连续激光辐照目标持续数秒钟后热熔损伤,若应对旋转飞行的目标,连续激光难以烧蚀同一位置,需要采用高能长脉冲激光“打孔”模式毁伤。

但是,采用多模式激光(即不同波长、连续与脉冲复合、频率变化等)同时或交替作用在同一靶材上,这类多模式激光复合损伤比单一模式激光对金属靶材的烧蚀损伤效果更好。文中基于现有条件对连续激光、长脉冲激光、连续/长脉冲复合激光对金属靶材的损伤效果进行了研究,理论和实验研究表明:连续/长脉冲复合激光对金属靶材的烧蚀效果远远好于单一连续激光和脉冲激光。

1 复合损伤物理模型

复合激光损伤,既有连续激光的热烧蚀效应^[9],又有脉冲激光的力学效应^[16],两种效应相互交叠,产生更高的损伤效果。

单一的连续或者脉冲激光作用在金属靶材上,会被靶材反射和吸收,其吸收率与入射激光参数、环境参数和靶材参数有关^[17]。随着入射激光的能量密度的升高,靶材温度会逐渐升高,依次达到熔点、沸点继而等离子化,而各物理形态间的转变没有明确的界限,它们共同存在,相互影响。

在辐照过程中,靶材表面会因各种物理效应引起质量迁移或消蚀,这种现象称为激光烧蚀。对于激光武器,笔者不关注烧蚀后靶材形态,更关注如何获得更大的烧蚀质量。下面对连续激光、脉冲激光、复合激光烧蚀模型进行对比分析。

1.1 连续激光烧蚀模型

连续激光与金属靶材烧蚀模型如图 1 所示。靶材主要在连续激光的热效应下加热,由光斑中心向

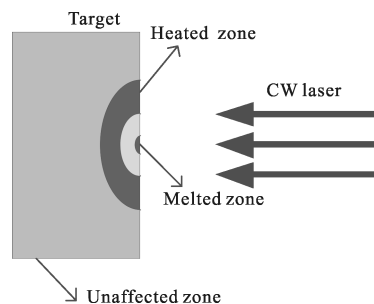


图 1 连续激光与靶材烧蚀模型

Fig.1 Ablation model of continuous laser

外扩散形成熔化区与加热区,连续激光一般功率密度较低,不易产生形变或者质量消散,这是因为靶材热传导损耗较大。若要使靶材熔化,则需要更多的能量注入,同时需要一定的时间积累。

计算连续激光对靶材的作用时,假定激光垂直入射于金属靶面($z=0$ 面),考虑到金属吸收层很薄,激光入射造成的体热源简化为面热源,表面吸收率用 A 表示。靶材内部的温度场 T 可由热传导方程描述:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

式中: ρ 、 c 、 k 分别为靶材的密度、比热容和热导率; ∇ 为梯度算子。边界条件分为光斑区域的加热和非光斑区域跟空气的对流:

光斑区域

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = A I_0 \quad t > 0 \quad (2a)$$

非光斑区域

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_f (T - T_0) \quad t > 0 \quad (2b)$$

式中: I_0 为激光功率密度; n 为界面法向单位向量; h_f 为对流换热系数; T_0 为环境温度。

假定激光为高斯分布:

$$I_0 = \frac{P}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a^2}\right) \quad (3)$$

式中: P 为激光功率; a 为激光作用在靶材上的半径; x 、 y 为以激光中心为原点的坐标。

吸收率 A 不是定值,由 Hagen-Rubens 公式:

$$A = 2 \sqrt{\frac{cR}{\lambda_0}} \quad (4)$$

式中: c 为光速; R 为电阻率; λ_0 为波长。激光辐照条件下,一般认为 R 是温度 T 的线性增长函数:

$$R(T_2) = [1 + \beta(T_2 - T_1)]R(T_1) \quad (5)$$

β 可由光学手册查阅得到。

根据公式(1)~(5)进行有限元模拟,靶材圆盘半径设为 50 mm,激光功率 2 000 W,靶面上激光光斑半径 1 mm,光场呈高斯分布。环境温度 298 K,铁板表面与空气的对流散热系数 20 W/(m²·K)。其他相关参数见表 1。

根据参考文献[17],铁的吸收率 A_{iron} 随温度的变化可以近似地由如下函数表示:

表 1 铁板相关参数

Tab.1 Parameters of iron

Material	Density /kg·m ⁻³	Thermal capacity / J·(kg·K) ⁻¹	Heat conduction / W·(m·K) ⁻¹	Melting point / K	Latent heat of fusion / J·kg ⁻¹	Boiling point / K
Fe	7 860	448	82	1 812	269 550	3 160

$$A_{\text{iron}} = \begin{cases} \frac{3.19T}{10\,000} & 0 < T < 1\,100 \text{ K} \\ 34.76\% & T \geq 1\,100 \text{ K} \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 为靶材的开氏温度。

金属熔化时相变吸热,将材料的潜在热量定义到熔中,使用公式(7)计算材料焓值并输入 ANSYS 材料属性。

$$H = \int \rho C(T) dT \quad (7)$$

式中: ρ 为铁的密度; $C(T)$ 为铁的热容。近似认为铁从 1 800 K 开始熔化,1 812 K 完全相变完成。文中不考虑气化阶段相变,输入焓值与温度曲线见图 2。

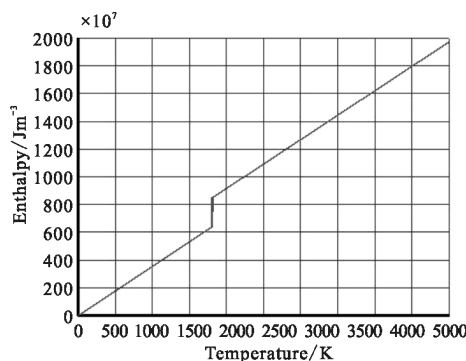


图 2 铁的焓-温度曲线

Fig.2 Enthalpic chart of iron

采用 ANSYS 软件模拟 Fe 的温度变化如图 3、图 4 所示。

超过熔点部分形成熔池,温度继续升高,溶液表面可能会在径向拉力的作用下向外流动;温度继续升高,当有汽化作用时,蒸汽压力迫使下方或周围溶液沿着熔池边缘或气化壁壁喷溅出来,形成靶材烧蚀区域。由图 3 可知,经过 10 s 的照射后,光斑外较大区域都存在不同程度的温升,这说明激光能量在靶材内存在显著的扩散。由图 4 可知,铁板的中心温度初始上升较快,但由于热传导、热对流、热辐射效应的存在,热量难以聚集,向外扩散,导致了中心温度上升变缓,在第 10 s 时,光斑中心温度为 1 680 K,

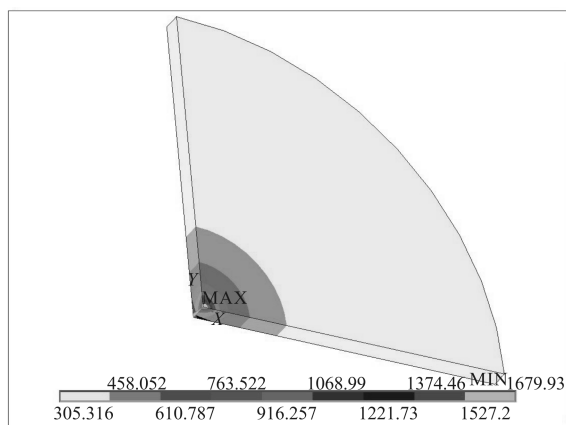


图 3 连续激光加热 10 s 温度分布图

Fig.3 Temperature distribution of target after 10 s irradiation with continuous laser

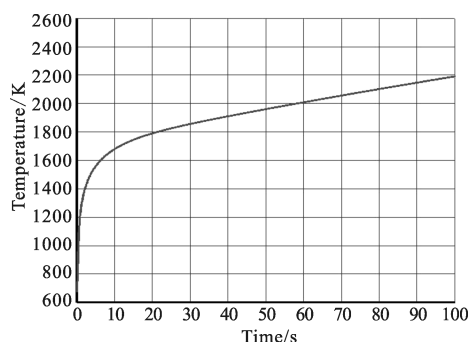


图 4 连续激光加热中心点温度变化曲线

Fig.4 Center temperature variation at the continuous laser irradiation

未达到 Fe 的熔点,直到约 25 s 之后,光斑中心温度为 1 825 K,略高于 Fe 的熔点。

1.2 脉冲激光烧蚀模型

脉冲激光与金属靶材烧蚀模型如图 5 所示。脉冲激光持续时间较短,脉冲能量瞬间作用在光斑大小的金属靶材上,能量密度很高,产生的热量来不及扩散,主要集中在光斑区域。

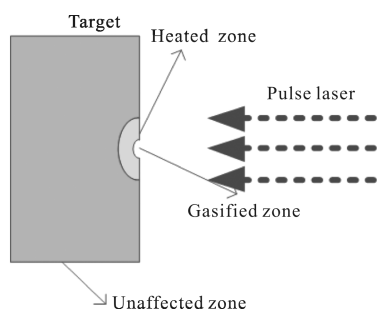


图 5 脉冲激光与靶材烧蚀模型

Fig.5 Ablation model of pulse laser and target

此时激光对靶材除了有热效应作用外,还有较强的力学效应:脉冲激光高的能量密度产生高温高压蒸汽,后续激光被靶物质蒸汽或环境气体吸收形成等离子体,金属蒸气或等离子体的流体力学运动构成了脉冲激光对靶的力学效应。

考虑到上述力学效应,烧蚀产物(液滴、气体、等离子体)将很快喷出并分散,不影响后续激光入射,即可采用完全喷射模型描述这类过程^[10]。

仍然采用有限元法对长脉冲激光与金属靶材作用过程进行模拟。激光能量 10 J,脉宽 0.5 ms,靶面光斑半径 0.85 mm,光场呈高斯分布,其他参数的设定与连续激光相同,模拟一个脉冲作用下 Fe 的温度变化,结果如图 6 所示。

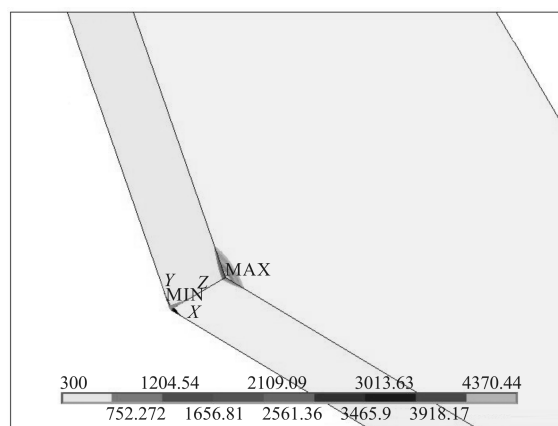


图 6 脉冲激光辐照后靶材温度分布图

Fig.6 Temperature distribution of target after pulsed laser irradiation

由于脉冲激光的峰值功率很高,高于 10^6 W/cm^2 量级,脉冲激光作用下,激光能量快速聚集,光斑辐照位置的靶材热量来不及与周围靶材有效传递,仅有极小区域存在温升,所以温升极快,如图 7 所示,短时间内就使靶材温度超过熔点。

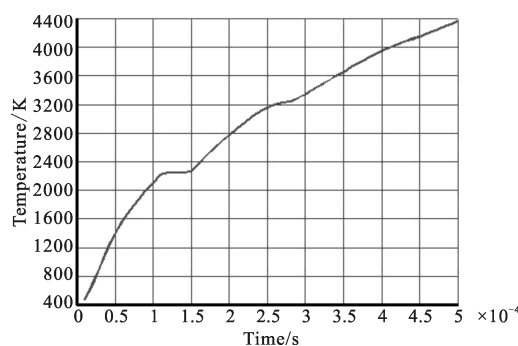


图 7 脉冲激光辐照靶材中心点温度变化曲线

Fig.7 Temperature variation at the pulsed laser irradiation center

假设温度高于熔点的区域被全部剥离, 模拟计算可得, 熔融区域半径 0.35 mm, 深度 0.75 mm。截面近似按圆柱计算, 烧蚀靶材的体积为:

$$V = \pi \times (0.35)^2 \times 0.75 \text{ mm}^3 = 0.288 \text{ mm}^3$$

$$m = \rho V = 2.27 \times 10^{-3} \text{ g}$$

1.3 复合激光烧蚀模型

复合激光与金属靶材烧蚀模型如图 8 所示。当脉冲激光先到达靶材, 可快速提高靶材表面吸收率, 最高可达到 70%^[17], 提高了激光的利用率, 即提高了有效功率密度, 加剧了靶材的温度升高, 扩大了熔池和气化区域。

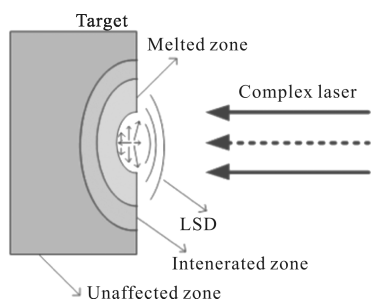


图 8 复合激光与靶材烧蚀模型

Fig.8 Ablation model of complex laser and target

当连续激光先到达靶材, 预加热使靶材温度升高, 此时靶材的杨氏模量、屈服强度不断降低, 破坏强度下降, 材料表面对激光的吸收系数也随之增高。随后脉冲激光作用靶材时, 叠加的高功率密度激光形成高温高压蒸汽和等离子体, 高温高压蒸汽和等离子体产生巨大的力学效应使部分尚未熔化的金属也会脱离靶材, 从而使剥离温度小于熔点^[19]。复合损伤造成更大更深的烧蚀孔, 若获得同样的烧蚀效果, 相应所需的激光功率大大降低。

采用 1.1 所述连续激光先辐照 5 s, 然后将脉冲激光照射到靶面同一位置, 采用 ANSYS 软件模拟结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 靶材的熔融区域比图 5 有了较大的增加, 这是由于吸收系数的增加, 脉冲能量得到了更充分的吸收。

同样的, 若认为温度高于熔点区域全部被剥离, 熔融区域半径 0.85 mm, 深度 0.74 mm, 体积为:

$$V = \pi \times (0.85)^2 \times 0.74 \text{ mm}^3 = 1.68 \text{ mm}^3$$

烧蚀质量 $m = 1.32 \times 10^{-2} \text{ g}$, 是脉冲激光烧蚀质量的 5.8 倍。

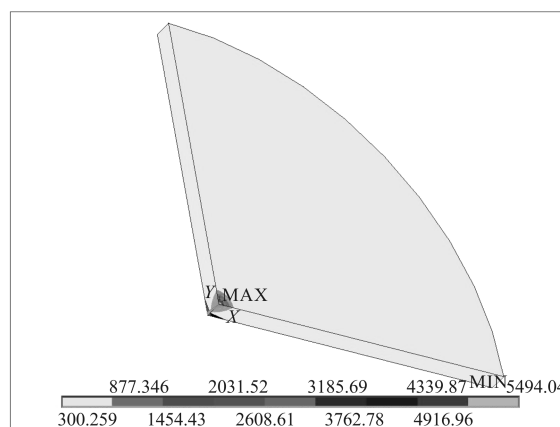


图 9 复合激光辐照靶材后温度分布图

Fig.9 Temperature dispersion of target after complex laser irradiation

由于高温高压金属蒸汽及等离子体的力学作用, 以及由于温升导致 Fe 的破坏强度下降, 实际剥离温度会小于熔点。设定不同剥离温度时的剥离质量如图 10 所示, 从图中可以看出, 由于剥离温度的减小, 出现了“非线性雪崩烧蚀”效应, 剥离质量迅速增大。

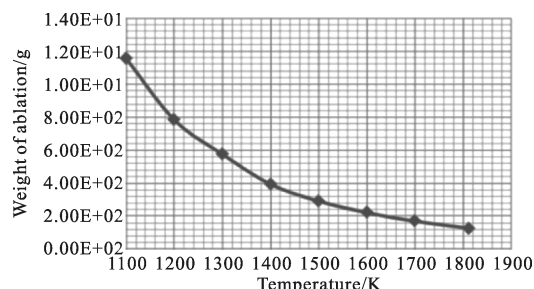


图 10 不同剥离温度点时的剥离质量

Fig.10 Ablation mass at different ablation temperatures

当选定剥离温度为 1500 K 时, 剥离区域半径 1.13 mm, 深度 0.92 mm, 体积达到 3.69 mm³, 烧蚀质量 2.90×10⁻² g, 是脉冲烧蚀质量的 12.8 倍。

以上的模拟分析表明, 采用连续激光辐照时, 激光的能量多耗散在整块靶材的温升过程中, 而光斑中心温度上升较慢, 烧蚀效果较差; 采用脉冲激光时, 光斑中心能量集中, 有明显的烧蚀效果, 但烧蚀范围仅限于光斑中心区域; 当采用 2 种激光复合作用时, 由于连续激光和脉冲激光损伤效应相互作用, 使烧蚀效果得到加强。

2 实验及结果分析

为了验证理论模型与模拟结果, 搭建了烧蚀

实验平台。图 11 是实验装置的示意图。连续激光器和脉冲激光器各自通过 1 m 焦距的透镜，由不同的路径聚焦在靶材的同一位置上。其中在连续激光器的光路中添加了平面反射镜，平面反射镜靠近脉冲激光器放置，经过它的连续激光近似垂直入射靶材表面，使连续与脉冲激光的入射条件近似相同。

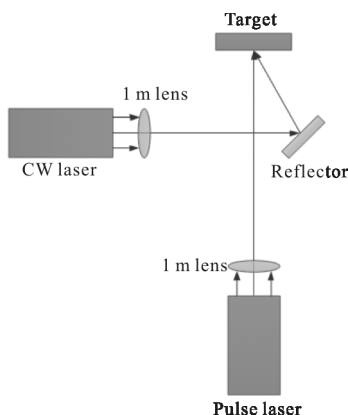


图 11 实验装置示意图

Fig.11 Scheme of experiment set

连续激光器是最大输出功率达 2 000 W 的碟片激光器，波长 1.030 μm；脉冲激光器为 Nd:YAG 固体激光器，波长 1.064 μm，脉宽 0.5 ms，脉冲能量最大 10 J，重复频率 1~20 Hz。

脉冲激光器输出激光经 1 m 聚焦透镜聚焦至靶材上，远场光斑直径 1.7 mm。连续激光器经 1 m 聚焦透镜，再由平面反射镜反射聚焦至靶材上，在靶材上的光斑直径为 2 mm。连续激光与脉冲激光聚焦光斑中心重合，靶材为 3 mm 厚铁板。

2.1 连续激光对金属靶材的损伤

单独用连续激光器对靶材照射 10 s，然后移开铁板，发现表面有灼烧痕迹，如图 12 所示，但未见靶材明显剥离的现象，说明连续激光 10 s 内没有对靶材形成有效烧蚀，与仿真结果相同。

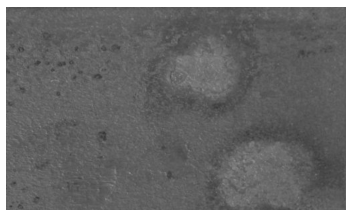


图 12 连续激光烧蚀靶材效果

Fig.12 Metal ablated with continuous laser

2.2 脉冲激光对金属靶材的损伤

用脉冲激光器单独对靶材进行照射。由于实验中被剥离的靶材不会完全喷溅出去，往往附着在激光烧蚀的空洞周围，因此，采用击穿靶材，测量孔洞直径，计算烧蚀质量的方法间接计量烧蚀情况。经过多次实验，确认 4 个脉冲可将 3 mm 厚铁板击穿，小孔平均直径为 0.8 mm，如图 13 所示。

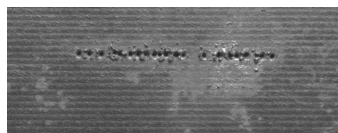


图 13 脉冲激光烧蚀靶材效果

Fig.13 Metal ablated with pulsed laser

经计算，平均每个脉冲可以烧蚀 $2.79 \times 10^{-3} \text{g}$ 靶材。

2.3 脉冲/连续复合毁伤实验

用连续激光器单独照射靶材 5 s，紧接着采用脉冲激光照射该位置。实验状态和实验结果分别如图 14、15 所示，反复多次实验后，确认 3 个脉冲即可将靶材击穿，多次测量形成的小孔直径平均值为 2.5 mm。



图 14 复合激光烧蚀铁板瞬间

Fig.14 Ablate moment of complex laser act on iron target

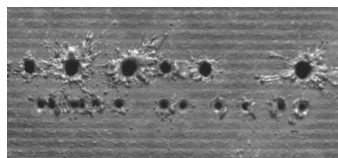


图 15 复合激光烧蚀与脉冲激光烧蚀结果对比。上面一排为复合激光烧蚀效果，下面一排为脉冲激光烧蚀效果

Fig.15 Ablate comparison of complex laser and pulsed laser.Holes in upper line are ablated by complex laser while lower by pulsed laser

经计算，平均每脉冲可以烧蚀 $3.63 \times 10^{-2} \text{g}$ 靶材。与单纯采用脉冲激光烧蚀的效果进行比较，烧蚀掉的靶材质量是其 13 倍，高于模拟计算中剥离温度选取熔点得到的 5.7 倍。对比图 10 的模拟分析，此时的剥

离质量与选取剥离温度 1 500 K 时的剥离质量接近。这就说明了由于复合烧蚀过程中产生的力学效应使低于熔点的靶材被剥离,增强了激光烧蚀效果,获得了远高于单独脉冲激光或连续激光的烧蚀效果。

3 结 论

文中提出了一种用多模式激光对靶目标复合损伤的新方案。基于现有条件,构建了脉冲/连续激光复合损伤的物理模型,用 ANSYS 有限元分析方法对物理模型进行了数值模拟,并使用 2 kW 连续激光器以及 10 J/0.5 ms 脉冲激光器分别开展了连续、脉冲、连续/脉冲复合损伤的对比实验。经模拟和实验:2 kW 连续激光作用 3 mm 厚靶材 10 s,难以对靶材形成有效烧蚀;10 J/0.5 ms 的激光一个脉冲能够烧蚀靶材 2.79×10^{-3} g;在激光复合烧蚀作用下,每个脉冲能够烧蚀靶材 3.63×10^{-2} g,是单独脉冲激光烧蚀效果的约 13 倍。理论和实验结果表明,连续与脉冲激光复合作用于靶材时,彼此相互作用,所产生的烧蚀效果显著优于二者单独烧蚀靶材,该结果对于发展新型战术高能激光器具有重要的指导作用。

参 考 文 献:

- [1] 靖恒. 我国展示低空安保激光武器“低空卫士”: 5 秒命中击落 100% [EB/OL]. [2014-11-03] http://www.gaungcha.cn/military-affairs/2014_11_03_282284.shtml.
- [2] 丁宏. 波音公司研制紧凑型激光武器可为美军士兵带来革命性变化 [EB/OL]. [2015-07-06] <http://www.dsti.net/Information/News/95058>.
- [3] Rudolf Protz, Jürgen Zoz, Franz Gedek, et al. High-power beam combining-a step to a future laser weapon system[C]// SPIE, 2012, 8547: 854708-1-854708-10.
- [4] Remi Soulard, Mark N Quinn, Toshiki Tajima, et al. ICAN: A novel laser architecture for space debris removal[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 192-200.
- [5] Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun et al. Research progress of laser beam combining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2273-2279. (in Chinese)
- [6] Cheng Yong, Liu Xu, Wan Qiang et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid-state lasers based on corner cube [J]. *Optics Letters*, 2013, 38 (23): 5150-5152.
- [7] 美军拟 2023 年实现 C17 发射激光攻击导弹 [EB/OL]. <http://www.crntt.com/doc/10377/4/8/103774867.html>[2015-05-31].
- [8] Li Xinrong, Zhou Tianwen, Sun Qi. Ablation of metal target materials by long-pulse energy laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(1): 148-152. (in Chinese)
- [9] Xu Lijun, Zhang Xihe, Ni Xiaowu, et al. Temperature field of the CW-laser with different radius irradiating metal plate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S): 364-367. (in Chinese)
- [10] Zhang Kexing. Experimental investigation of laser ablation of LY12 aluminum alloy plates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1990, 2(2): 226-234. (in Chinese)
- [11] Sparks M. Theory of laser heating of solids: metals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(3): 837.
- [12] Wang Bo, Chen Donglin, Zhou Liucheng, et al. Central residual compressive stress drop on metal materials after laser induced shock wave[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3521-3526. (in Chinese)
- [13] Jiao Luguang, Zhao Guomin, Chen Minsun. Simulation of temperature rise of 45# steel target irradiated by combined laser in the two-dimensional cases [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 42-46. (in Chinese)
- [14] Jiao Luguang, Zhao Guomin, Chen Minsun. Investigation on the irradiation effects of Q235 steel targets by combined laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (5): 848-852. (in Chinese)
- [15] Feng Aixin, Zhuang Xuhua, Xue Wei, et al. Damage characteristics of polysilicon under wavelengths of 1 064 nm, 532 nm and 355 nm laser irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 461-465. (in Chinese)
- [16] Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu, et al. The preliminary study on mechanical behavior of high-power laser cleaning space debris [J]. *Applied Lasers*, 2004, 24(1): 24-26. (in Chinese)
- [17] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Xiuzheng, et al. Laser Irradiation Effects [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [18] Wu Yanmei, Li Junchang. On heat destruction simulation of high-energy laser weapon[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(2): 33-35. (in Chinese)
- [19] Yan Yixia, Chen Yuze, Chen Gang, et al. Numerical simulation on the failure of internally pressured cylindrical shell under laser irradiation[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(6): 487-492. (in Chinese)