

复合激光时序加载对毁伤效能的影响

肖婧^{1,2*}, 任钢¹, 夏惠军¹, 张茂¹, 彭杰¹

¹西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;

²四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 复合使用连续激光与脉冲激光对金属靶材的烧蚀效果优于单一连续激光或脉冲激光。为了给连续激光与脉冲激光复合作用模式的参数选择提供依据,采用试验研究与仿真研究相结合的手段,探究了复合激光时序加载对毁伤效能的影响,结果表明:在施加连续激光的过程中施加脉冲激光的毁伤效果最好;复合激光能显著缩短毁伤时间、增大烧蚀范围,且预热时间越长,造成的毁伤范围越大;复合激光中长脉冲激光能量过大将造成激光能量浪费,合理选择参数,实现连续激光的功率与长脉冲激光的能量匹配至关重要。

关键词 激光光学; 激光损伤; 激光烧蚀; 复合激光; 加载时序; 能量配比

中图分类号 TJ951

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102009

Influence of Irradiation Time Sequence of Combined Laser on Damage Effectiveness

Xiao Jing^{1,2*}, Ren Gang¹, Xia Huijun¹, Zhang Mao¹, Peng Jie¹

¹Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China;

²College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract The ablation effect of the combined continuous wave (CW) and pulsed lasers on metal targets is better than that of single CW or pulsed lasers. To optimize the parameter selection of the combined action of CW and pulsed lasers, both the experimental and simulation methods are used to study the influence of irradiation time sequence on damage effectiveness of the combined lasers. The results denote that the combined laser brings the best damage effectiveness when the pulsed laser irradiates during CW laser irradiation. The combined laser considerably reduces the damage time and increases the ablation range. Furthermore, the longer the preheating time, the larger the damage range. In case of the combined lasers, wastage of laser energy is observed if the energy of the long laser pulse becomes considerably high. Therefore, it is essential to select reasonable parameters for energy matching of CW laser power and long pulsed laser.

Key words laser optics; laser damage; laser ablation; combined laser; irradiation time sequence; energy ratio

OCIS codes 140.3330; 350.1820; 350.5340; 350.3850

1 引言

根据激光武器已公开的技术路线可知,国际上普遍采用的是连续激光工作制式,如美国雷神公司的“LaWS”系统、洛马公司的区域防御反弹药(ADAM)系统,以及德国莱茵金属公司的“天空卫士”^[1-2]。连续体制的激光武器在作战使用上存在作战时间长、供电消耗大和功率密度低等问题^[3],而复

合使用连续激光(CW laser)与脉冲激光(简称复合激光)极有可能成为提高现有激光武器毁伤效能、实现快速毁伤的重要手段。

近年来,已有多家研究机构和高校针对复合激光的作用效能展开了研究。1998年,曾交龙等^[4]开展了复合激光对GaAs材料破坏的测试试验,得到了不同连续激光功率预热情况下脉冲激光的损伤阈值。同时,试验结果还表明:脉冲激光的损伤阈值随连续激光功率的增大而减小。2010年,石岩等^[5]采用匹配有适当脉冲激光的连续激光进行双光束激光

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-25; 录用日期: 2019-07-11

* E-mail: xxjjowen@163.com

焊接,结果表明:复合激光可使较低功率的连续激光实现较深的焊接。2012到2013年,肖婧等^[6-7]采用有限元法计算了连续与脉冲激光复合作用下铝合金的温度场和应力场,仿真分析了时间配比和光斑比对复合激光作用效能的影响。2016年,程勇等^[3,8]采用复合激光烧蚀钢板,试验结果表明:复合激光的烧蚀效果约是脉冲激光烧蚀效果的13倍。2018年,李超等^[9]仿真计算了连续/脉冲复合激光光束对铝靶材的热作用特性,结果表明:与连续激光相比,脉冲激光的延时对复合激光作用铝靶材的温度-时间演化有着更为显著的影响。目前,从试验角度研究复合激光时间比对毁伤效能影响的文章尚未见报道。

为探究时间配比参数对复合激光毁伤效能的影响,本文以铝合金为研究对象,通过试验研究了连续激光、脉冲激光及复合激光的毁伤效能,并重点研究了连续激光与脉冲激光在不同时序加载时的毁伤效能,试验结果表明:复合激光能显著缩短毁伤时间、增大烧蚀范围。同时,本试验还采用ANSYS生死单元技术建立了仿真模型,研究分析了复合激光的烧蚀机理,仿真结果与试验结果相

吻合,仿真结果表明:除加载时序匹配以外,连续激光的功率与长脉冲激光的能量匹配非常重要。本文研究内容对复合激光加载时序的选择具有一定的参考意义。

2 试验研究

2.1 试验装置

复合激光毁伤试验装置如图1所示。脉冲激光波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,脉宽为 $1\ \text{ms}$ (半峰全宽),能量为 $400\ \text{J}$ 。连续(CW)激光波长为 $1.08\ \mu\text{m}$,功率为 $1000\ \text{W}$ 。脉冲激光经透镜聚焦后垂直作用于靶材上,连续激光入射光路与脉冲激光呈较小的夹角,经透镜聚焦后作用于靶材同一位置。靶材为 $1\ \text{mm}$ 厚的7075铝合金板。采用光束质量分析仪测量靶材前表面上连续激光和脉冲激光的光斑尺寸,测得连续激光的光斑直径为 $2.8\ \text{mm}$,脉冲激光的光斑直径为 $16.5\ \text{mm}$ 。采用KMGA740-L0点温仪测量激光作用过程中靶材前表面激光辐照中心点的温度变化情况,并利用摄像机拍摄激光毁伤过程。根据摄像机图像中漫反射板上是否出现激光来判断靶材是否被击穿,并获取击穿时间。

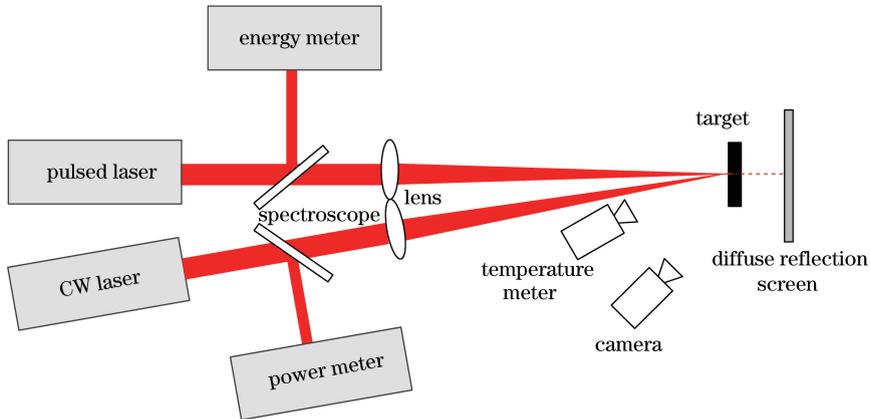


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

2.2 单独使用连续激光的毁伤试验

单独将功率为 $1000\ \text{W}$ 的连续激光作用于铝合金板上,直到在漫反射屏上观察到激光光斑时关闭激光,此时,靶材被击穿。单独使用连续激光的击穿时间为 $17\ \text{s}$ 。图2为铝合金前表面和后表面的毁伤情况,可观察到激光烧蚀引起的穿孔和激光熔化软化引起的鼓包区域。图中击穿小孔的直径为 $1.6\ \text{mm}$,小于光斑直径,而熔化软化引起的鼓包区域直径约为 $1\ \text{cm}$,其原因是铝合金的热

导率较高,吸收的激光能量部分向周围传递,增大了热作用范围。

采用点温仪测量激光辐照下温度,测温结果如图3所示。在连续激光作用下,前 $1\ \text{s}$ 内升温曲线光滑,此阶段激光加热、熔化铝合金靶材,在摄像机视频中未发现激光烧蚀现象; $1\ \text{s}$ 后升温曲线波动上升,此阶段可观察到冒烟、飞溅等现象,即发生了激光烧蚀,此后温度上升缓慢;连续激光作用 $17\ \text{s}$ 后,铝合金板被击穿。

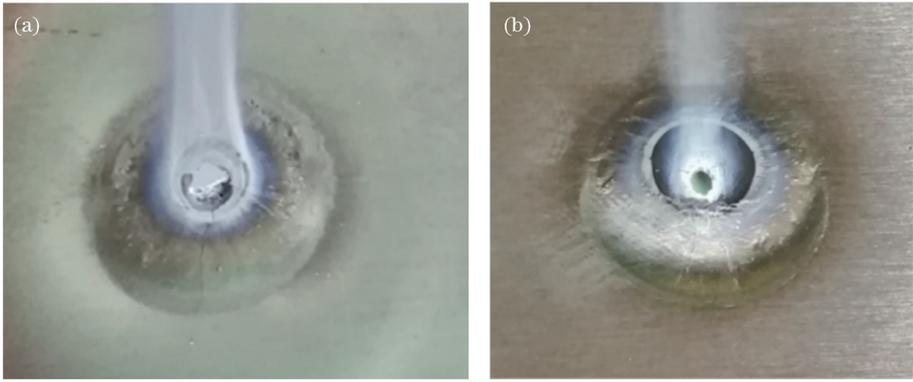


图 2 连续激光烧蚀铝合金板后的形貌。(a)前表面;(b)后表面

Fig. 2 Ablation morphologies of aluminum alloy plate irradiated by CW laser. (a) Front surface; (b) rear surface

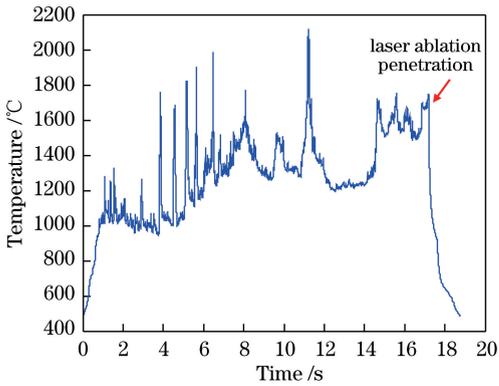


图 3 连续激光作用时的测温结果

Fig. 3 Temperature measurement result at CW laser irradiation

2.3 单独使用脉冲激光的毁伤试验

单独使用脉冲激光作用于铝合金板上,其中脉冲个数为 1,脉冲能量为 400 J,单个脉冲无法击穿 1 mm 厚铝合金板。图 4 为铝合金前表面的毁伤情况,可观察到毫秒脉冲激光造成的靶材表层材料的熔化、气化,气化物向外膨胀的反冲力可使熔化物发生喷溅。图 5 为点温仪的测温结果,图中温度由 A



图 4 脉冲激光作用后铝合金板的烧蚀形貌

Fig. 4 Ablation morphology of aluminum alloy plate irradiated by pulsed laser

点上升至 B 点所用时间为 2.8 ms,与图 6 脉冲激光的波形历时一致。

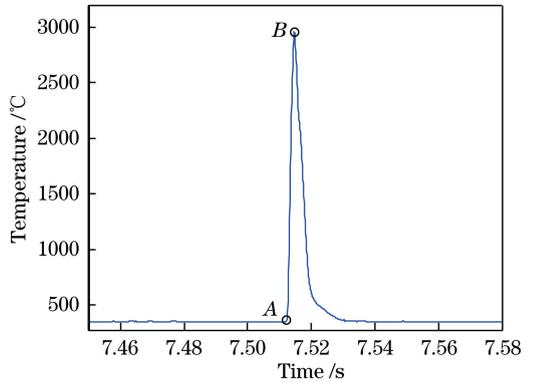


图 5 脉冲激光作用时的测温结果

Fig. 5 Temperature measurement result at pulsed laser irradiation

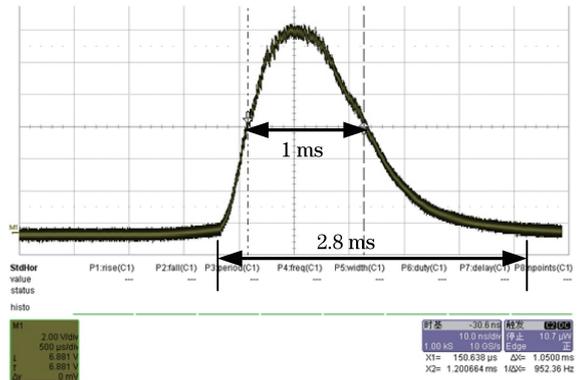


图 6 脉冲激光波形(半峰全宽为 1 ms)

Fig. 6 Pulse laser waveform with full width at half maximum of 1 ms

2.4 复合激光的毁伤试验

本试验主要是为了验证复合激光对靶材毁伤效能的提升情况及不同加载时序对毁伤效能的影响。试验靶材为 1 mm 厚的航空铝板,连续激光功率为 1000 W,脉冲激光能量为 400 J。连续激光作用时

间控制在 10 s, 脉冲激光在不同时刻注入, 如图 7 所示。研究延时 τ 分别为 -2, 2, 5, 8, 10, 20 s 时, 铝合金板的毁伤程度。

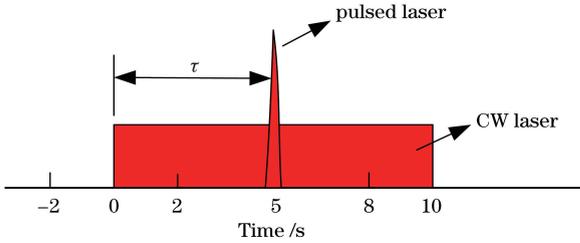


图 7 复合激光的时序加载关系

Fig. 7 Irradiation time sequence of combined laser

图 8 为不同时序加载时铝合金表面的毁伤形貌, 由图可知: 1) 在复合激光作用下, 铝合金靶材均能被击穿; 2) 当延时 $\tau > 0$ 时, 靶材均在脉冲激光作用时被立刻击穿, 且穿孔直径随延时 τ 的增加而增大。

当脉冲激光先于连续激光被施加时 (τ 为

-2 s), 脉冲激光先在铝合金上造成预损伤, 此时再施加连续激光, 可提高铝合金对后续连续激光的吸收率, 使得连续激光的击穿时间由单独使用连续激光时的 17 s 缩短至 9 s。当脉冲激光在连续激光作用过程中被施加时 (τ 为 2, 5, 8, 10 s), 连续激光先使铝合金靶材热软化、熔化和局部烧蚀, 此时施加脉冲激光, 脉冲激光的力学效应会瞬间造成融化物飞溅, 进而击穿靶材; 延时越大, 连续激光热软化、熔化区域越大, 施加脉冲激光后造成的穿孔直径也就越大。当脉冲激光在连续激光作用后被施加时 (τ 为 20 s), 连续激光造成的温度场已逐渐冷却, 此时追加脉冲激光, 造成的毁伤效果有限。

由上述对比分析可知: 1) 在施加连续激光的过程中施加脉冲激光的毁伤效果最好; 2) 复合激光能显著缩短毁伤时间、增大烧蚀范围, 且预热时间越长, 造成的毁伤范围越大。

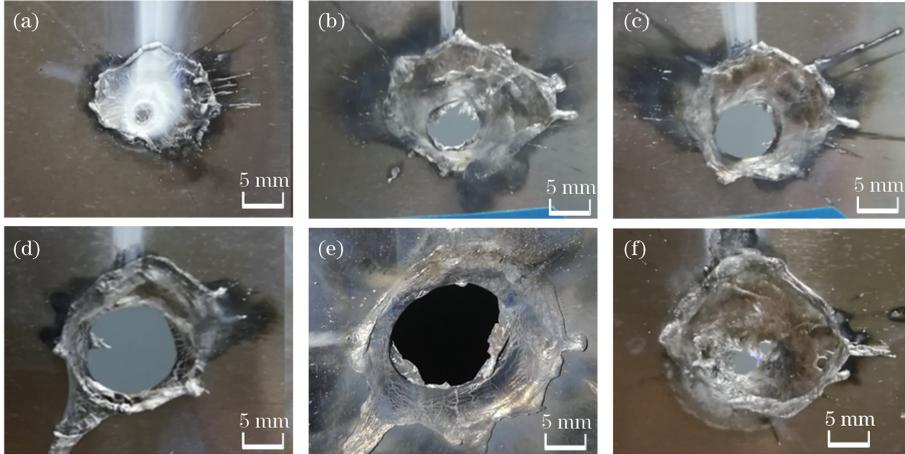


图 8 复合激光作用后铝合金板的烧蚀形貌。(a) $\tau = -2$ s, 穿孔直径 1.2 mm; (b) $\tau = 2$ s, 穿孔直径 5.4 mm; (c) $\tau = 5$ s, 穿孔直径 7 mm; (d) $\tau = 8$ s, 穿孔直径 9.4 mm; (e) $\tau = 10$ s, 穿孔直径 11 mm; (f) $\tau = 20$ s, 穿孔直径 2.3 mm

Fig. 8 Ablation morphologies of aluminum alloy plate irradiated by combined laser. (a) $\tau = -2$ s and ablation radius is 1.2 mm; (b) $\tau = 2$ s and ablation radius is 5.4 mm; (c) $\tau = 5$ s and ablation radius is 7 mm; (d) $\tau = 8$ s and ablation radius is 9.4 mm; (e) $\tau = 10$ s and ablation radius is 11 mm; (f) $\tau = 20$ s and ablation radius is 2.3 mm

图 9 为 $\tau = 2$ s 时点温仪的测温曲线, 图中温度由 A 点上升至 B 点所用时间为 1.9 ms, 明显少于单独使用长脉冲激光时的时间 2.8 ms, 这说明在脉冲激光作用结束前, 靶材已经被击穿。

3 仿真研究

3.1 仿真模型

假设连续激光和长脉冲激光均为高斯光束。记激光的功率为 P_0 , 半径为 R , 则激光的功率密度空间分布可表示为

$$P(r) = \frac{2P_0}{\pi R^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中 r 为光斑某点到光斑中心的距离。

把激光热源当成表面热源, 在 ANSYS 中采用热流密度 (heat flux) 来施加热流载荷。记铝合金板对 1064 nm 激光的吸收率为 $A(T)$, 那么热流密度加载的载荷应为

$$P(r, T) = \frac{2P_0 A(T)}{\pi R^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

式中 T 为温度。

靶材对激光的吸收率是一个重要参数, 吸收率的大小决定了激光能量的沉积速率。文献[10]给出了光洁铝板对 1064 nm 激光的吸收率 $A'(T)$, 表达式为

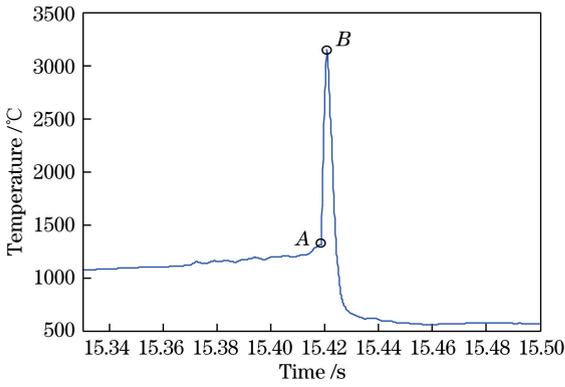


图 9 复合激光作用下的温升曲线($\tau=2\text{ s}$)

Fig. 9 Temperature measurement result at combined laser irradiation ($\tau=2\text{ s}$)

$$A'(T) =$$

$$\begin{cases} 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} T}, & 273\text{ K} \leq T < 933\text{ K} \\ 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} T}, & 933\text{ K} \leq T \end{cases} \quad (3)$$

(3)式中所描述的吸收率随温度的变化情况如图 10 所示。由于本试验采用的是铝合金板而非光洁铝板,采用(3)式的吸收率计算所得的前表面激光辐照中心点温度低于试验结果。因此,为减小仿真结果与试验结果的偏差,引入修正系数 K 对吸收率进行修正。修正系数 K 的表达式为

$$A(T) = K \times A'(T) \quad (4)$$

根据点温仪的测温结果,取铝合金的烧蚀温度为 $1000\text{ }^\circ\text{C}$,即开始发生激光烧蚀的温度 $1000\text{ }^\circ\text{C}$,采用 ANSYS“生死单元”仿真计算连续激光烧蚀过程的击穿时间和烧蚀半径。仿真计算所涉及 7075 铝合金的相关热物性参数如表 1 所示^[11]。仿真计

表 1 7075 铝合金的热物性参数

Table 1 Thermal parameters of 7075 aluminum alloy

Temperature / $^\circ\text{C}$	Specific heat capacity / $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Thermal conductivity / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Melting point / $^\circ\text{C}$	Ablation point / $^\circ\text{C}$
100	900	2775	142		
200	970	2750	175		
300	1020	2725	185	638	1000
400	1120	2700	193		
500	1320	2675	197		

采用该模型对长脉冲激光与铝合金作用过程进行模拟,选取的激光能量为 400 J ,脉宽为 1 ms ,光斑半径为 8.25 mm 。由于长脉冲激光的力学效应会造成熔化物喷溅,故而设置长脉冲激光作用时“杀死”单元的温度为熔化温度 911 K 。图 12 为一个脉

算中选用的连续激光功率为 1000 W ,光斑半径为 1.4 mm 。对比仿真结果与试验结果可知:当取 $K=2.41$ 时,烧穿时间为 17 s ,烧蚀半径为 0.7 mm ,与试验值符合较好。图 11 所示为连续激光作用下铝合金板的温度场。

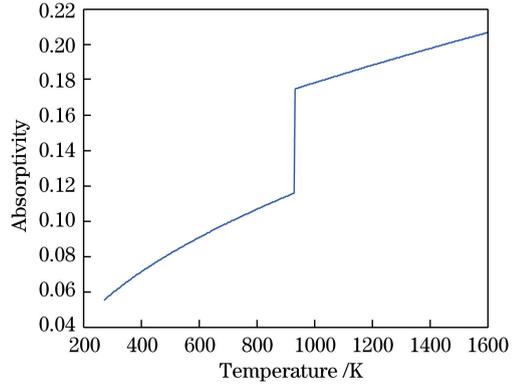


图 10 光洁铝板对 1064 nm 激光的吸收率理论值

Fig. 10 Theoretical value of absorptivity of aluminium sheet at 1064 nm

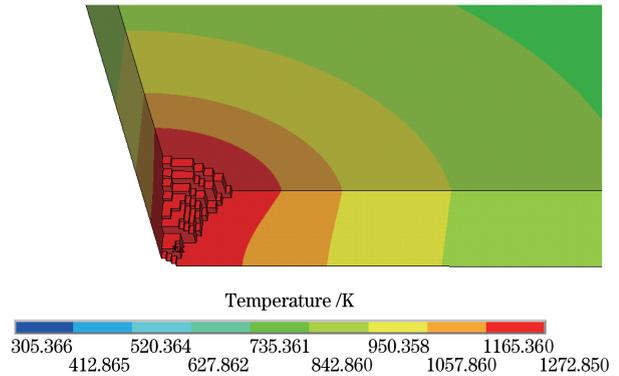


图 11 连续激光烧蚀铝合金的仿真结果

Fig. 11 Ablation simulation of aluminum alloy irradiated by CW laser

冲作用后的烧蚀形貌,靶材表面烧蚀半径为 6.56 mm ,靶材未被击穿。

3.2 复合激光烧蚀模型的验证

由 2.4 节复合激光的毁伤试验研究可知:1) 铝合金靶材在脉冲激光作用结束前被击穿,脉冲激光

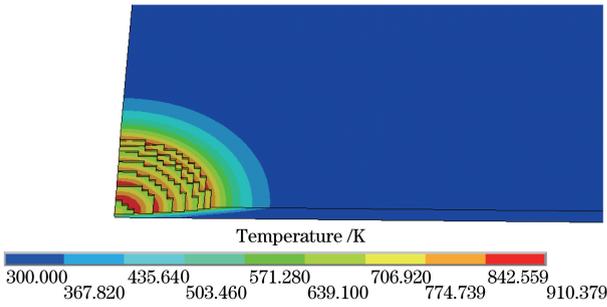


图 12 脉冲激光烧蚀铝合金的仿真结果

Fig. 12 Ablation simulation of aluminum alloy irradiated by pulsed laser

的能量仅有一部分能被有效吸收;2) 高峰值功率的脉冲激光将使靶材气化,会影响后续脉冲激光的有效入射。以上结果导致实际作用在铝合金板上的脉冲激光能量少于入射脉冲激光能量。本节将通过对比分析仿真结果与试验结果来确定有效入射在靶材表面的脉冲激光能量。

选用的连续激光功率为 1000 W,光斑直径为 2.8 mm,脉冲激光脉宽为 1 ms,光斑直径为 16.5 mm,延时分别为 2,5,8 s;改变脉冲激光能量,仿真计算复合激光的烧蚀半径。图 13 为延时为 2 s 时复合激光的烧蚀形貌。

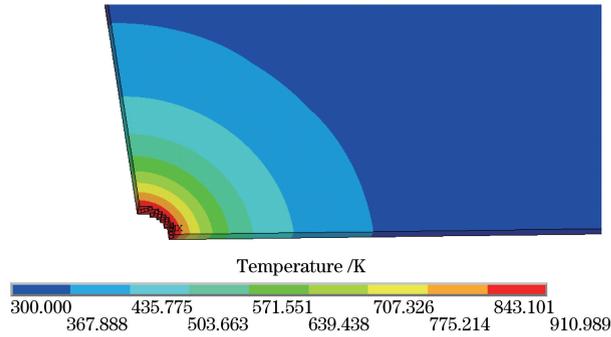


图 13 复合激光烧蚀铝合金板的仿真结果

Fig. 13 Ablation simulation of aluminum alloy irradiated by combined laser

表 2 列出了复合激光在不同延时和不同脉冲能量下的烧蚀半径。当延时 $\tau = 2$ s,入射在靶材上的脉冲激光能量为 13 J 时,烧蚀半径的仿真结果与试验结果一致;当延时 $\tau = 5$ s,入射在靶材上的脉冲激光能量为 10 J 时,烧蚀半径的仿真结果与试验结果一致;当延时 $\tau = 8$ s,入射在靶材上的脉冲激光能量为 15 J 时,烧蚀半径仿真结果与试验结果一致。该结论表明:1) 大部分长脉冲激光能量会因靶材击穿而透射,或因靶材气化而被屏蔽,仅有少部分能有效入射在靶材上,进而被靶材吸收,有效入射的激光能量为 10~15 J;2) 对于复合激光,长脉冲激光能量过

大将造成激光能量浪费,合理选择参数,实现连续激光的功率与长脉冲激光的能量匹配至关重要。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

Delay time / s	Experimental ablation radius /mm	Simulation results	
		Pulsed laser energy /J	Simulation ablation radius /mm
2	2.7	400	8.5
		200	8.3
		50	5.5
		15	3
		13	2.7
		10	2.5
5	3.5	15	4.1
		13	3.9
		10	3.5
8	4.7	15	4.7
		10	4.1

3.3 加载时序对毁伤效能影响的仿真研究

有效入射的长脉冲激光能量取为 13 J,仿真研究加载时序对毁伤效能的影响。图 14 为不同加载时序下烧蚀半径的仿真结果和试验结果。图中烧蚀半径随延迟时间的延长而增大。

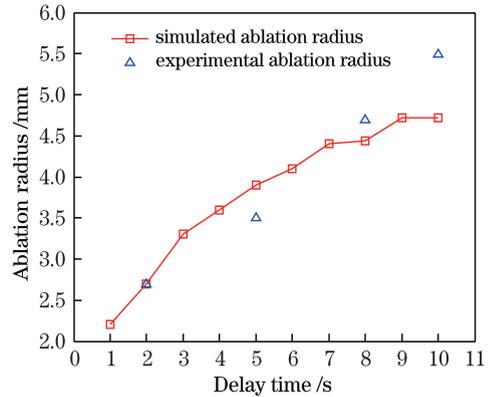


图 14 加载时序对烧蚀半径的影响

Fig. 14 Influence of irradiation time sequence on ablation radius

4 结 论

针对复合激光时序加载对其毁伤效能影响的问题,研制了复合激光毁伤效能试验装置,开展了单独使用连续激光、脉冲激光及复合激光烧蚀铝合金板的试验;并依据试验结果修正了仿真模型,采用该仿真模型验证了烧蚀半径会随加载时序的变化而变化。试验和仿真结果表明:与单独使用连续激光或脉冲激光相比,复合激光能显著提高毁伤效能,缩短

毁伤时间,增大毁伤面积;复合激光参数配比对其毁伤效能影响较大,合理选择配比参数可减少激光能量的浪费。

参 考 文 献

- [1] Gan Q J, Jiang B X, Zhang P D, *et al.* Research progress of high average power solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010003.
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010003.
- [2] Feng H L, Liu Y S, Han F, *et al.* Progress on development of US Naval shipborne laser weapons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020004.
冯寒亮, 刘彦升, 韩锋, 等. 美国海军舰载激光武器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020004.
- [3] Cheng Y, Guo Y L, Tang H, *et al.* Development trend of tactical laser weapons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 110004.
程勇, 郭延龙, 唐璜, 等. 战术激光武器的发展动向[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 110004.
- [4] Zeng J L, Lu Q S, Shu B H, *et al.* Combined damage effect of GaAs irradiated by 1.06 μm CW and pulsed laser [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1998, 10(2): 217-220.
曾交龙, 陆启生, 舒柏宏, 等. 1.06 μm 连续与脉冲激光对 GaAs 材料的联合破坏效应[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(2): 217-220.
- [5] Shi Y, Zhang H, Watanabe T, *et al.* CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 1132-1137.
石岩, 张宏, 渡部武弘, 等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 1132-1137.
- [6] Xiao J, He H X, Xia H J, *et al.* Temperature field simulation on aluminium alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1103002.
肖婧, 何衡湘, 夏惠军, 等. 长脉冲与连续激光联合辐照铝合金的温度场仿真[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1103002.
- [7] Xiao J, He H X, Xia H J. Stress simulation of aluminum alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0803009.
肖婧, 何衡湘, 夏惠军. 长脉冲与连续激光联合作用下铝合金的应力场仿真[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0803009.
- [8] Cheng Y, Zhu M Z, Ma Y F, *et al.* Mechanism and effects of complex laser ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 28-34.
程勇, 朱孟真, 马云峰, 等. 激光复合损伤机理与效应研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 28-34.
- [9] Li C, Gao X, Anliang Y Z, *et al.* Thermal properties of aluminum target irradiated by combined CW/pulsed laser beam [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2018, 41(2): 1-6.
李超, 高勋, 安良友志, 等. 连续/脉冲复合激光光束辐照铝靶材的热特性研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(2): 1-6.
- [10] Chen Y B. Temperature rise, stress, fluctuation of stress and evolution of plastic zone during laser heating of metal plate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
陈彦北. 金属板激光加热时的温升、应力、应力波动和塑性区演化[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [11] Shao Y K. Study on plasma-MIG hybrid weld process and properties of 7075 aluminum alloy welded joints [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018: 54.
邵盈恺. 7075 铝合金等离子-MIG 复合焊接工艺及接头性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2018: 54.