

# 激光冲击强化对纳秒激光辐照铝合金诱致污染物产生规律的影响

李养帅<sup>1</sup>, 张军勇<sup>1\*</sup>, 朱健强<sup>1\*\*</sup>, 李畅<sup>1,2</sup>, 张文武<sup>3</sup>, 秦秀<sup>3</sup>, 庞向阳<sup>1</sup>, 孙明营<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

**摘要** 为了降低铝合金因激光辐照而产生颗粒污染物的几率,研究了激光冲击强化对纳秒激光辐照 5052 铝合金诱致污染物产生规律的影响。首先采用不同功率密度的纳秒激光对 5052 铝合金试样进行冲击强化,而后采用纳秒激光对激光冲击强化后的 5052 铝合金试样进行辐照-洁净度测试,最后对比分析激光冲击强化前后 5052 铝合金试样表面硬度、形貌、粗糙度及因激光辐照诱致污染物产生规律的变化。研究表明:激光冲击强化在提高 5052 铝合金表面强度的同时,对抑制低通量激光辐照(不高于  $0.65 \text{ J/cm}^2$ )导致的污染物产生同样是有有效的;对于粗糙度 Ra 为 1.6 的 5052 铝合金表面,经聚焦光斑直径为 2.2 mm 的高斯脉冲激光(光斑搭接率为 50%,波长为 532 nm,脉冲宽度为 14 ns,功率密度为  $0.75 \sim 1.88 \text{ GW/cm}^2$ )冲击强化后,低通量激光辐照阶段,激光诱致污染物(粒径为  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ )数量降低 25%~50%。研究结果为 5052 铝合金因激光辐照,尤其是低通量激光辐照而产生污染物的控制提供了一种新的方法。

**关键词** 激光技术; 激光冲击强化; 洁净控制; 铝合金; 激光辐照; 颗粒污染物

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1802010

## 1 引言

随着惯性约束聚变(ICF)技术的发展,对激光驱动器的输出能力要求不断提升,污染导致的光学元件损伤逐渐成为限制激光驱动器高效输出的重要瓶颈,因此,实现激光驱动器的洁净度控制显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。研究发现,激光驱动器光学元件表面的污染物主要是以有机物、金属和矿物质为主的 3 类颗粒物,颗粒污染物形成的方式主要包括激光辐照光学元器件表面产生的微颗粒、装配过程中环境引入的颗粒及元器件摩擦产生的颗粒物<sup>[3]</sup>。微米和亚微米级的颗粒污染物沉积在光学元件表面,不但会降低光学元件的透过率,严重时会造成光学元件因局部光强增强而损坏,因此实现微米级和亚微米级颗粒物的洁净度控制显得尤为关键。金属(支撑光学

元件)管壁吸附和激光辐照诱致的金属颗粒喷溅,是微米级和亚微米级颗粒污染物产生的重要来源之一<sup>[1-4]</sup>。目前常用的控制手段主要有对金属管壁进行机械抛光、微弧氧化、阳极氧化黑化、硬质阳极氧化和表面微织构等<sup>[5-6]</sup>,其中机械抛光造成不必要的杂散光往返传播,影响光束质量;微弧氧化处理工艺复杂,加工复杂,不适用于大面积的零件;阳极氧化黑化和硬质阳极氧化虽然可以提高金属管壁的耐磨性和耐腐蚀性,但是会降低金属的抗激光损伤阈值。因此,探求更为有效的实现金属管壁洁净度控制的方法显得十分迫切。

激光冲击强化(LSP)技术是 20 世纪 70 年代随着高功率短脉冲激光器的问世而发展起来的一种新的表面强化技术。它利用具有 ns 量级脉冲宽度、GW 量级高功率的激光辐射靶材表面,使表面的吸

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020101)、中国科学院青年创新促进会(2018282)

通信作者: \*zhangiy829@siom.ac.cn; \*\*jqzhu@siom.ac.cn

收层气化产生高温高压等离子体,并在约束层的作用下形成向靶材内部传播、应力高达 GPa 量级的应力波,迫使靶材表面产生塑性变形,引起微结构和应力改变,从而提高材料的抗疲劳、耐磨损和抗应力腐蚀等性能<sup>[7-10]</sup>。LSP 技术广泛应用于航空工业,在汽车制造、医疗卫生、核废料处理和船舶制造等行业亦有重要应用前景<sup>[11-14]</sup>,但鲜有在洁净度控制领域的研究。本文以 5052 铝合金为例,开展 LSP 对纳秒激光辐照铝合金诱致污染物产生规律的影响研究,为铝合金因激光辐照而产生污染物的控制提供新的方法。

## 2 基本原理和实验

### 2.1 试样制备和激光冲击强化实验

试样材料为高功率激光驱动器常用的支撑材料 5052 铝合金,几何尺寸为直径  $\Phi 50$  mm $\times$ 5 mm,精车成型,表面粗糙度  $R_a$  为 1.6。LSP 前后均对试样进行洁净清洗工作。首先,采用蘸有酒精溶液(纯度为 99.97%)的百洁布进行粗擦拭,主要去除肉眼可见油污和大颗粒污染物;其次,采用酒精溶液(纯度为 99.97%)进行超声波清洗,清洗时间为 15 min;最后,在百级洁净环境中使用洁净氮气(纯度为 99.99%)吹扫。LSP 过程如图 1 所示。固体纳秒激光器产生一定脉冲频率和波长的激光,激光经透镜聚焦在吸收层表面形成具有一定功率密度和大小的光斑,光斑能量被吸收层吸收,产生激光等离子冲击波,冲击波经约束层约束,冲击作用增强,最终强化试样。试样固定夹持在二维工作平台上,通过工作平台的移动,实现激光光斑搭接,最终实现对试样全表面进行 LSP。

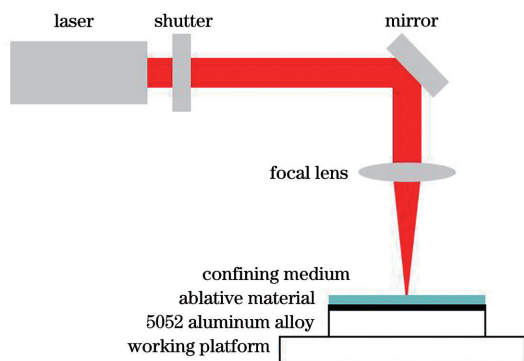


图 1 LSP 示意图

Fig. 1 Schematic of LSP

实验是在中国科学院宁波材料技术与工程研究所的 LSP 实验机上进行的,分别采用 3 种功率密度的激光进行 LSP,具体为 0.75, 1.12, 1.88 GW/cm<sup>2</sup>。

具体激光冲击强化参数:激光波长为 532 nm,脉宽为 14 ns,聚焦冲击光斑直径  $\varphi$  为 2.2 mm;单次单面冲击,光斑搭接率为 50%;吸收层为厚度为 0.18 mm 的 3M 黑色电气绝缘胶带,约束层为厚度为 2 mm 的水溶液。

### 2.2 纳秒激光辐照 5052 铝合金诱致颗粒污染物产生实验

实验测试系统如图 2 所示,由纳秒激光器(波长为 1064 nm,脉宽为 8 ns,高斯脉冲,重复频率为 1~10 Hz,脉冲能量为 0~150 mJ)、分光楔板、聚焦透镜、能量卡计、密闭腔体、粒子计数器及计算机组成。

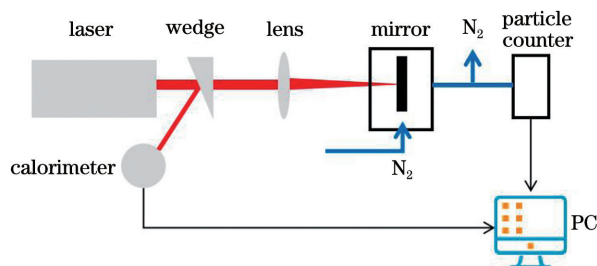


图 2 5052 铝合金激光辐照实验

Fig. 2 Laser irradiation experiment of 5052 aluminum alloy

激光器输出的激光脉冲依次经过分光楔板、聚焦透镜和密闭腔体的窗口玻璃,最终照射到固定在密闭腔体内的 5052 铝合金试样上,致使 5052 铝合金表面产生微米级和亚微米级颗粒污染物。其中,为防止反射光对激光器的影响,实验中聚焦光束与试样表面法线保持一定倾角(非 90°垂直入射)。密闭腔体持续通入一定流量洁净氮气,将 5052 铝合金因激光辐照而产生的颗粒物从密闭腔体内带出。使用粒子计数器在氮气出口处进行分流采样测量,最终测量结果作为当前状态下洁净度水平(或激光诱致污染物产生水平),结果送入计算机显示和保存。分光楔板进行能量分光取样,根据分光比例测算最终激光器输出能量,并将结果输入计算机进行显示和保存。

实验中激光器的工作频率为 2 Hz,输出能量从 7~50 mJ 依次递增(折合聚焦面能量密度为 0.15~1 J/cm<sup>2</sup>),铝合金试样表面聚焦激光光斑直径  $\varphi$  为 2.5 mm,对每个能量点进行 3 次辐照测试(不同位置),每个位置辐照周期为 40 s,粒子计数器采样周期为 1 min,3 次实验数据求平均值。当粒子计数器显示颗粒数激增时,即判断此能量点为 5052 铝合金烧蚀阈值(或抗激光损伤阈值),停止测试。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 激光冲击强化对 5052 铝合金机械性能的影响

表 1 为不同功率密度 LSP 下 5052 铝合金的性能,图 3 为 5052 铝合金冲击强化表面宏观和微观形貌。从表 1 和图 3 可以看出:对 5052 铝合金进行表面激光冲击强化后,铝合金表面硬度有了大幅提升,提升幅度为 14%~20%,说明 LSP 用于提升铝合金表面强度是有效的;但是粗糙度会有一定程度的上

升,是宏观和微观综合作用的结果。冲击强化后的表面宏观形貌如图 3(b)所示,宏观表现为表面出现肉眼可见凹凸结构,主要与光斑形状、光斑搭接率及 LSP 功率密度有关,后续可以通过对 LSP 参数进行优化来改进;冲击强化后的表面微观形貌如图 3(d)所示,表面出现大量形状不规则的凹坑,主要是 LSP 时激光等离子体爆炸产生的冲击波面不是均匀一致的,各点强度具有随机性,后续可以通过改善光斑搭接率、增加冲击强化次数改善凹坑结构。

表 1 不同功率密度激光冲击强化下 5052 铝合金的性能

Table 1 Properties of 5052 aluminum alloy after LSP with different power density

Sample number		1#	2#	3#
Power density / (GW·cm <sup>-2</sup> )		0.75	1.12	1.88
Roughness (Ra)	Before LSP	1.118	1.416	1.575
	After LSP	5.990	5.937	6.816
Hardness (HB)	Before LSP	70.98	70.18	67.92
	After LSP	83.84	80.46	79.62

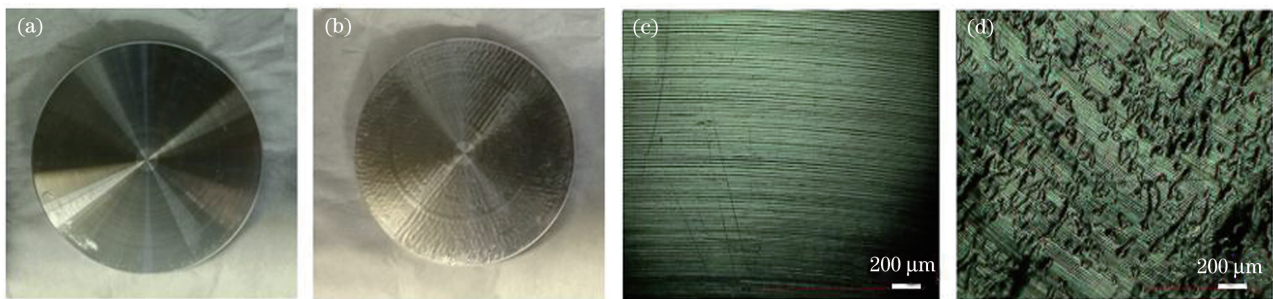


图 3 5052 铝合金冲击强化表面宏观和微观形貌。(a)LSP 前的宏观形貌;(b)LSP 后的宏观形貌;(c)LSP 前的微观形貌;(d)LSP 后的微观形貌

Fig. 3 Macroscopic and microscopic surface morphology of 5052 aluminum alloy before and after LSP. (a) Macroscopic morphology before LSP; (b) macroscopic morphology after LSP; (c) microscopic morphology before LSP; (d) microscopic morphology after LSP

#### 3.2 激光冲击强化对纳秒激光辐照铝合金诱致污染物产生规律的影响

图 4 为激光清洗和激光烧蚀的原理示意图<sup>[15]</sup>。低通量激光即激光能量密度低于烧蚀阈值( $F < F_{th}$ )的激光,主要表现为激光的清洗作用,一方面在

材料表面发生力学共振现象,使表面碎裂脱落;另一方面使表面污染层受热膨胀,克服基体对污染粒子的吸附力而蒸发、气化,脱离物体表面。高通量激光即激光能量密度高于烧蚀阈值( $F > F_{th}$ )的激光,主要表现为激光的烧蚀作用,金属材料表面吸收激光

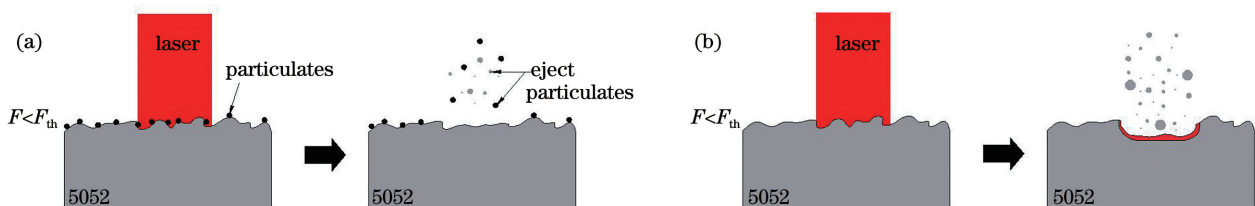


图 4 不同激光能量密度对材料表面的损伤作用<sup>[15]</sup>。(a)激光清洗;(b)激光烧蚀

Fig. 4 Damage effect of different laser energy density on the material surface<sup>[15]</sup>. (a) Laser cleaning; (b) laser ablation



能量导致温度急剧升高,被熔化并达到过热状态,此时材料表面产生较大的蒸汽压力,蒸汽压力将金属熔化物从熔池中排出,形成飞溅的金属颗粒物,冷凝后形成大粒径的颗粒污染物。

以 2# 试样为例,分别对 LSP 前后的 2# 试样进行激光辐照实验,洁净检测对象为纳秒激光辐照产生的较容易检测到且数量变化明显的  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  尺寸颗粒物。对实验结果进行指数拟合,实验结果如图 5 所示。随着激光辐照强度的增加,无论 LSP 与否,5052 铝合金产生的颗粒数均会先缓慢增加,而后迅速增加;当激光辐照能量密度不超过  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,5052 铝合金产生的颗粒数随着辐照能量密度的增加缓慢增加,但是由于激光功率密度低于铝合金损伤阈值,这一阶段主要是铝合金表面颗粒物脱吸附的过程,具体为铝合金表面吸附的污染物会吸热膨胀,然后脱吸附变为颗粒污染物,激光辐照只表现为激光清洗作用<sup>[15-16]</sup>,如图 6(c)所示。同时,从图 5 也可以发现,当激光辐照能量密度为  $0.15 \sim 0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,LSP 后的试样表面产生的颗粒数较未 LSP 时下降  $25\% \sim 50\%$ ,说明采用 LSP 技术后,纳秒激光诱致铝合金污染物的产生能力下降,LSP 技术对洁净度控制是有效的,具体原因参照图 3(c)、(d)。由于 LSP,铝合金表面出现凹坑微结构,对颗粒物的吸附能力增强,一旦激光能量密度超过一定阈值时,表面脱吸附过程加剧,如图 5 中激光能量密度为  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  和  $0.71 \text{ J}/\text{cm}^2$  两点所

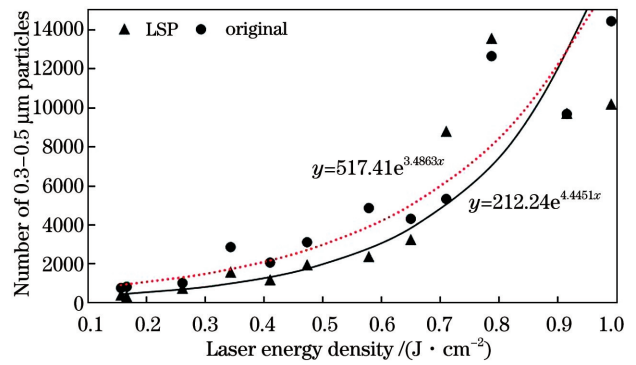


图 5 LSP 前后  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  颗粒数随激光辐照能量密度的变化

Fig. 5 Curve of number of  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  particles with different laser energy density before and after LSP

示,在  $0.71 \text{ J}/\text{cm}^2$  辐照能量密度下,激光辐照经 LSP 技术处理过的铝合金表面时,产生的颗粒数反而超过未做表面处理的铝合金表面产生的颗粒数。

从图 5 也可以发现,当激光辐照能量密度超过  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  后,随着激光辐照功率密度的提升,经过 LSP 后的铝合金和未强化的铝合金产生的颗粒数均剧增,并且逐渐靠近,是因为当激光能量密度超过  $0.71 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,激光辐照由激光清洗作用逐渐变成激光烧蚀作用,如图 6(a)和图 6(b)所示,产生大量的颗粒物。虽然 LSP 后铝合金表面粗糙度会有一些的变化,但是材料的损伤阈值基本是不变的,与文献[6]研究结论相同,因此同等激光辐照条件下产生的颗粒物数目基本相同。

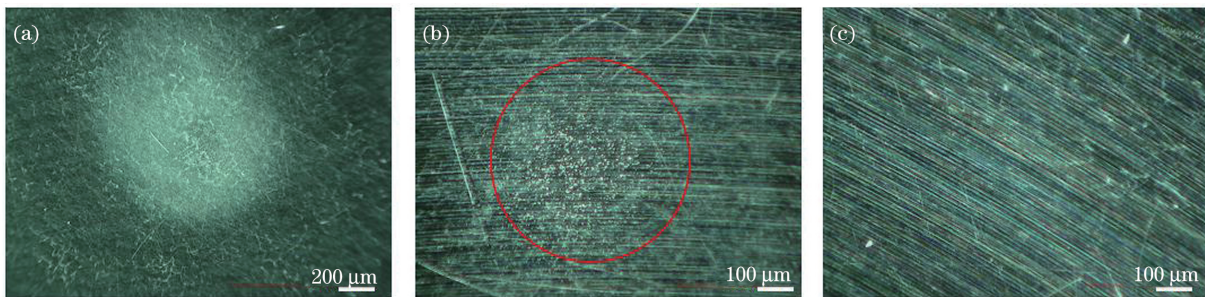


图 6 激光烧蚀和激光清洗。(a)激光烧蚀;(b)激光烧蚀放大;(c)激光清洗

Fig. 6 Laser ablation and laser cleaning. (a) Laser ablation; (b) enlarged laser ablation; (c) laser cleaning

### 3.3 激光冲击强化功率对铝合金激光诱致污染物产生的影响

采用 3 种功率密度激光光束分别对 1#、2# 和 3# 铝合金试样进行 LSP,三种功率密度记为 A、B 和 C,分别为  $0.75 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 、 $1.12 \text{ GW}/\text{cm}^2$  和  $1.88 \text{ GW}/\text{cm}^2$ ,然后进行纳秒激光辐照诱致污染物产生实验。对实验结果进行指数拟合,如图 7 所示。对于 5052 铝合金,3 种功率密度 LSP 后,激光辐照

诱致污染物的产生情况曲线基本一致,随着激光辐照能量密度提升,产生的颗粒物数量逐渐增加,当辐照能量密度超过  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,颗粒物数量增加速度加剧。

基本可以判断,辐照能量密度低于  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,激光辐照表现为激光清洗,因此随着激光辐照能量密度的增加,激光诱致颗粒物的数目缓慢增加。当激光辐照能量密度低于  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,3 个试样

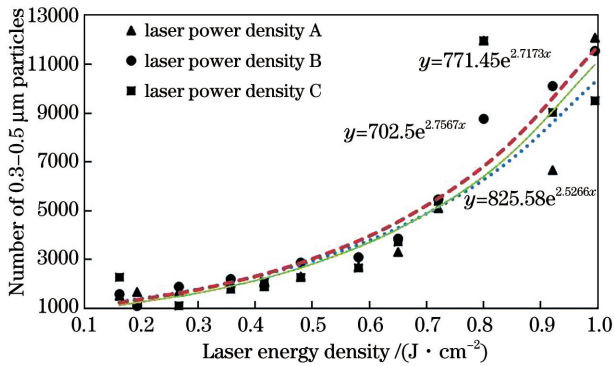


图 7 0.3~0.5  $\mu\text{m}$  颗粒数随激光辐照能量密度的变化

Fig. 7 Curve of number of 0.3–0.5  $\mu\text{m}$  particles with different laser energy density

产生的颗粒数增长曲线基本相同,即 5052 铝合金经 3 种功率密度 LSP 后,在同种能量密度激光辐照下

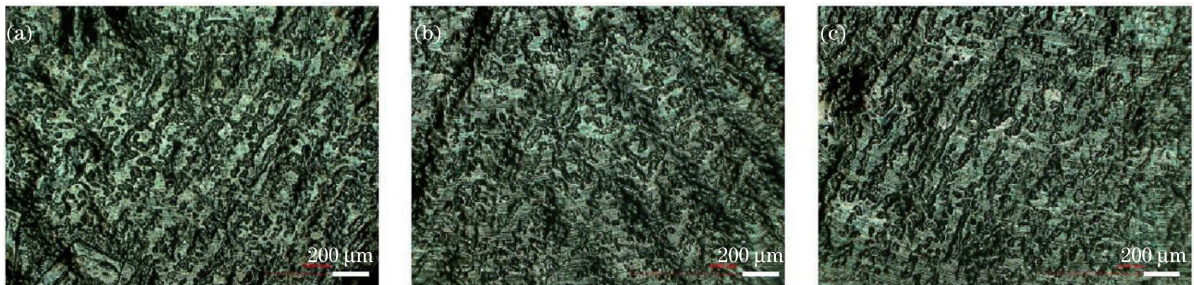


图 8 三种功率密度 LSP 下 5052 铝合微观表面形貌。(a)0.75  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ; (b)1.12  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ; (c)1.88  $\text{GW}/\text{cm}^2$

Fig. 8 Micro surface morphology of 5052 aluminum alloy after LSP at three laser power density. (a) 0.75  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ; (b) 1.12  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ; (c) 1.88  $\text{GW}/\text{cm}^2$

## 4 结 论

LSP 在提高 5052 铝合金强度的同时,使得 5052 铝合金表面产生微凹坑结构,而正是微凹坑结构的存在,使得铝合金表面对微米级和亚微米级颗粒污染物的吸附能力增强,进而降低了铝合金在低能量密度激光辐照下产生污染物的概率。LSP 技术适用于低能量激光洁净应用场景,如激光驱动器低通量运行、航空航天激光器洁净环境保持及一些特殊应用场合。为进一步降低铝合金在低能量密度激光辐照下污染物产生的概率,可以通过进一步优化激光冲击强化参数(如功率密度、光斑形状、光斑搭接率、激光冲击强化次数等)来改善铝合金表面微结构形态和分布,或者对铝合金进行表面微织构。此外,需要注意的是,铝合金材料抗激光损伤阈值或激光烧蚀阈值是材料本身性质决定的,与 LSP 无关,因此对高能密度激光辐照应用场景的洁净度控制,可以考虑通过更换其他高损伤阈值金属材料或非金属材料实现。

产生的颗粒数基本相同。图 8 为 3 个试样 LSP 后的微观形貌,经 3 种功率密度 LSP 后,试样表面产生的微结构密度、分布和形状大致相同,因此冲击强化对颗粒物的吸附能力也基本相当。最终 3 个试样在“激光清洗”阶段(低于  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$ ),经同种能量密度激光辐照后所产生的颗粒数基本相同。

当激光辐照能量密度超过  $0.65 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,污染物产生的机理从解吸附转变为激光烧蚀,因此这一阶段,随着激光辐照能量密度的增加,颗粒物产生的数量激增。在 3 种激光功率密度冲击强化下,虽然试样粗糙度有所改变,但 3 个试样经强化后的粗糙度差别不大,并且材料的抗激光损伤阈值与粗糙度关系不大,因此最终 3 个试样在激光烧蚀阶段产生的颗粒数基本相同。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y S. Cleanliness control technology of high-power laser systems [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 1-7.  
李养帅. 高功率激光装置的洁净控制技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 1-7.
- [2] Spaeth M L, Manes K R, Honig J. Cleanliness for the NIF 1 $\omega$  laser amplifiers[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 250-264.
- [3] Miao X X, Yuan X D, Lü H B, et al. Experimental study of laser-induced damage of optical components surface owing to particle contamination in high power laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0602001.  
苗心向, 袁晓东, 吕海兵, 等. 激光装置污染物诱导光学元件表面损伤实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602001.
- [4] Chen J X, Si H, Chen W Y. Molecular dynamics study of oil detachment from an amorphous silica surface in water medium [J]. Applied Surface Science, 2015, 353: 670-678.



- [5] Li Z Y, Sun M Y, Hao Y F, et al. Laser damage resistance of engineering ceramics[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10): 1014003.  
李兆岩, 孙明营, 郝艳飞, 等. 工程陶瓷表面抗激光损伤能力研究[J]. 光子学报, 2017, 46(10): 1014003.
- [6] Shi S, Sun M Y, Hao Y F, et al. Effect of surface treatment technology on laser damage resistance of aluminium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202001.  
时双, 孙明营, 郝艳飞, 等. 表面处理工艺对铝合金抗激光损伤能力的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202001.
- [7] Qiao H C, Zhao J B, Lu Y. Current status of laser-induced shock wave application technology [J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 1-6, 48.  
乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 激光诱导冲击波应用技术研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 1-6, 48.
- [8] Gao Y K, Jiang C Y. Review and prospect on laser shock peening [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 16-20.  
高玉魁, 蒋聪盈. 激光冲击强化研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 16-20.
- [9] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, et al. The application status and development of laser shock processing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(2): 6-12.  
吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 激光冲击强化技术的应用现状与发展[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 6-12.
- [10] Huang Z H, Liu H X, Shen Z B, et al. Process parameters analysis on surface texturing under laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0503004.  
黄志辉, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503004.
- [11] Qian X M, Jiang Y F, Guan H B, et al. Research and application of strengthening technology for fastening holes of aircraft structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(5): 749-753.  
钱晓明, 姜银方, 管海兵, 等. 飞机结构件紧固孔强化技术综述[J]. 机械强度, 2011, 33(5): 749-753.
- [12] Zou S K, Gong S L, Guo E M, et al. Laser peening of turbine engine integrally blade rotor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0601009.  
邹世坤, 巩水利, 郭恩明, 等. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601009.
- [13] Li Y H, He W F, Zhou L C. The strengthening mechanism of laser shock processing and its application on the aero-engine components [J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(1): 1-8.  
李应红, 何卫锋, 周留成. 激光冲击复合强化机理及在航空发动机部件上的应用研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(1): 1-8.
- [14] Liu Y P, Shi Z J, Zhao Y Z, et al. Cut-off value of detail fatigue rated strength of TC4 titanium alloy with compound strengthening treatment by laser shock peening and shot peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502006.  
刘亚鹏, 史志俊, 赵一昭, 等. 激光冲击与喷丸复合强化对 TC4 钛合金细节疲劳额定强度截止值  $DFR_{cutoff}$  的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502006.
- [15] Li C, Pang X Y, Sun M Y, et al. Particles generation of aluminum alloy induced by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402114.  
李畅, 庞向阳, 孙明营, 等. 纳秒激光辐照铝合金诱致颗粒物产生规律[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402114.
- [16] Jia B S, Qu H X, Tang H P, et al. Laser cleaning technology of oxide layer on titanium rolled plate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211401.  
贾宝申, 屈红星, 唐洪平, 等. 钛轧板表面氧化层激光清洗技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211401.

# Effect of Laser-Shock Processing on Generation of Contamination Induced by Nanosecond Laser Irradiation of Aluminum Alloy

Li Yangshuai<sup>1</sup>, Zhang Junyong<sup>1\*</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1\*\*</sup>, Li Chang<sup>1,2</sup>, Zhang Wenwu<sup>3</sup>,  
Qin Xiu<sup>3</sup>, Pang Xiangyang<sup>1</sup>, Sun Mingying<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China

## Abstract

**Objective** With developing inertial confinement fusion technology, the damage of optical elements due to pollution has gradually become a critical bottleneck, limiting the efficiency of laser drivers. The pollutants on the surface of optical components of laser drivers comprise three types of particles, namely organic matter, metals, and minerals. The formation modes of particle pollutants primarily include microparticles produced on the surface of optical components irradiated by laser, environmental particles introduced during assembly, and particles produced because of the friction of components. The deposition of micron-sized and submicron-sized particles on the surface of optical components can reduce the transmittance of optical components and damage optical components because of local light intensity enhancement. Therefore, it is critical to realize the clean control of micron and submicron particles. Metal (supporting optical element) wall adsorption and particle splashing induced by laser irradiation are important sources of micron and submicron particle pollutants. Currently, the commonly used control methods include mechanical polishing, micro-arc oxidation, black anodization, hard anodizing, and surface microtexture of the metal tube wall. However, most of these methods have problems and shortcomings. Therefore, an effective method to realize the cleanliness control of metal pipe wall pollutants must be explored. Laser-shock processing (LSP) is a new surface strengthening technology with many advantages and application scenarios. However, few studies have been conducted on cleaning control. Therefore, in this study, 5052 aluminum alloy is taken as an example to study the effect of LSP on generating pollutants induced via nanosecond laser irradiation of aluminum alloy to provide new research methods and useful guidance for controlling and generating pollutants due to laser irradiation of aluminum alloy.

**Methods** 5052 aluminum alloy was used in this study. First, 5052 aluminum alloy samples were shock-strengthened using a nanosecond laser with different power densities. The hardness and roughness were evaluated, and surface morphology was observed. Then, 5052 aluminum alloy samples after laser-shock strengthening and samples without laser-shock strengthening were irradiated using a nanosecond laser with different energy densities and cleanliness was evaluated. Finally, a comparative analysis of surface hardness, morphology, and roughness of 5052 aluminum alloy before and after LSP and changes in pollutants induced by laser irradiation were conducted. This study revealed the influence of LSP on the generation of pollutants induced by nanosecond laser irradiation of aluminum alloy.

**Results and Discussions** The surface hardness of 5052 aluminum alloy after laser-shock strengthening under experimental parameters has been considerably improved (14%–20%) (Table 1 and Fig. 3), indicating that laser-shock strengthening is effective for improving the surface strength of aluminum alloy. However, the roughness will increase to a certain extent because of the comprehensive macro and micro effects (Fig. 3). The number of particles produced by 5052 aluminum alloy increases slowly at first and then increases rapidly, irrespective of LSP (Fig. 5). The interaction between the laser and aluminum alloy includes laser cleaning and ablation (Fig. 4). When the energy density of laser irradiation is less than  $0.65 \text{ J/cm}^2$ , the number of particles produced by 5052 aluminum alloy increases slowly as the energy density increases, and laser irradiation only shows the effect of laser cleaning (Fig. 6). When the energy density of laser irradiation is less than  $0.71 \text{ J/cm}^2$ , the number of particles produced by 5052 aluminum alloy increases rapidly as the energy density increases, and laser irradiation shows the effect of laser ablation (Fig. 6). Although the roughness of the samples is changed, the roughness of the three samples after strengthening has slight differences and the surface microstructure remains the same (Fig. 8), and the roughness has

a negligible effect on the laser damage threshold of the materials. Therefore, the number of particles produced in the laser cleaning and ablation stages of the three samples is similar (Fig.7).

**Conclusions** LSP improves the strength of 5052 aluminum alloy, making the surface of 5052 aluminum alloy produce micro-pit structures, enhancing the adsorption capacity of micro-sized and submicron-sized particle pollutants on the surface. Thus, it reduces the probability of producing pollutants under low energy density laser irradiation. This technology is suitable for low energy laser cleanliness application scenarios, such as the low flux operation of laser drivers and clean environment maintenance of aerospace lasers. To further reduce the probability of aluminum alloy contamination under low energy density laser irradiation, the microstructure and distribution of the aluminum alloy surface can be improved by optimizing the laser impact strengthening parameters (such as power density, spot shape, spot overlap rate, laser impact strengthening times, etc.). Furthermore, the properties of the materials determine the laser damage or laser ablation thresholds of aluminum alloy materials and have nothing to do with laser impact strengthening. Therefore, the cleanliness control of high energy density laser irradiation application scenarios can be realized by replacing other high damage threshold metal or non-metallic materials.

**Key words** laser technique; laser-shock processing; cleanliness control; aluminum alloy; laser irradiation; particle contamination

**OCIS codes** 140.3390; 140.3440; 160.3900; 350.1820