

纳秒激光辐照铝合金诱致颗粒物产生规律

李畅^{1,2}, 庞向阳^{1*}, 孙明营^{1**}, 刘文凤^{1,2}, 乔战峰¹, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 颗粒污染物是高功率激光装置光学元件损伤的诱因之一,掌握污染物产生规律是解决污染诱致损伤问题的基础。针对本色氧化工艺处理前后的 5052 铝合金样品,研究了激光辐照样品诱致亚微米和微米尺寸气溶胶颗粒的产生规律,分析了激光能量密度、脉冲数目、激光光斑直径、表面粗糙度等参数对颗粒物数量的影响。结果表明:颗粒物数量和激光光斑面积呈正相关;激光能量密度低于烧蚀阈值时,颗粒物产生于第一个脉冲辐照过程,高于烧蚀阈值时,表面颗粒物数量随着激光能量密度增加而逐渐增加;随着激光脉冲数目的增加,本色氧化 5052 样品产生颗粒物的数量逐渐增加,而 5052 样品产生颗粒物的数量变化不明显。两种不同表面工艺样品产生颗粒物的规律存在较大差别;低于烧蚀阈值时,两种样品产生的颗粒物数量相当;在烧蚀阈值附近时,颗粒物数量存在陡增现象;高于烧蚀阈值时,本色氧化 5052 样品产生的颗粒物数量显著多于 5052 样品。研究结果为高功率激光装置中铝合金表面处理和洁净控制提供了参考依据。

关键词 激光光学; 颗粒污染物; 洁净控制; 激光辐照; 铝合金; 激光诱致损伤

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1402015

1 引言

随着激光驱动惯性约束核聚变研究的不断推进,高功率激光驱动器输出的激光能量越来越高,光学元件的激光损伤已经成为限制激光驱动器输出能力的重要因素^[1-3],而颗粒污染物是诱致激光损伤的重要因素之一^[4]。在高功率激光系统中,激光在光学元件表面发生多次残余反射,这些反射光在经过光学透镜元件时,会产生大量的杂散光聚焦点,即鬼点^[5]。鬼点具有较高的能量密度,机械构件表面受到鬼点辐射后易生成颗粒物,颗粒物扩散到光路中就会形成大量的气溶胶,气溶胶污染物沉积到光学元件表面并在激光作用下使光学元件发生损伤^[6-9]。同时,由于高通量激光系统中使用了大量的多孔结构化学膜,微米和亚微米尺寸的颗粒污染物会填充化学膜的空隙,降低化学膜的透过率,这会进一步增强杂散光强度,形成恶性循环,最终导致严重的激光损伤问题^[10-11]。因此,研究高功率激光系统中微米

和亚微米尺寸颗粒污染物的产生规律和抑制方法,对于提高系统的负载能力具有重要意义。

根据激光能量密度的范围,激光辐照金属表面产生的颗粒物可分为两种类型。第一种类型颗粒物的产生条件是激光能量密度低于材料的激光烧蚀阈值。在此情况下,由于范德瓦耳斯力和静电力,金属表面上的小颗粒很难去除,激光能量会使材料表面快速热膨胀,引起颗粒喷射,这就是激光清洗效应^[12-14]。Zhang 等^[15]研究了溶胶-凝胶 SiO₂ 膜表面污染物的去除方法,结果发现激光清洗去除颗粒物的效率可达 90% 以上。第二种类型颗粒物产生的条件为激光能量密度超过材料的烧蚀阈值。在此情况下,一般先发生材料的熔融气化,之后产生相爆炸,这个过程中材料的烧蚀主要为沸腾和喷溅,产生的喷溅物的尺寸多为微米尺度^[16-17]。苗心向等^[18]研究了高功率激光装置中主要颗粒物的种类和占比,并发现光学元件表面颗粒物的激光清洗阈值为 10.9 J/cm²,烧蚀阈值为 14.6 J/cm²。de Bleiner

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-02-10; 录用日期: 2021-03-01

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020202)、中国科学院青年创新促进会项目(N2018282)

通信作者: *xiangyangpang@siom.ac.cn; **sunmy@siom.ac.cn

等^[19]研究了激光烧蚀产生的颗粒物的粒径与羽流膨胀时间之间的关系,结果发现,颗粒物的凝结发生在膨胀羽流内部,冷凝发生在羽状尾部,烧蚀产生的蒸气在冷凝区的停留时间会影响颗粒物的平均粒径以及尺寸分布。然而,在高功率激光装置中,金属表面的激光辐照通量范围较大,覆盖了激光烧蚀阈值,且目前针对上述两种类型激光辐照产生的颗粒物的对比研究还鲜见报道。鉴于此,本文以高功率激光装置中广泛使用的支撑材料铝合金为研究对象,分析了跨域烧蚀阈值通量的纳秒激光辐照金属后颗粒物的产生规律,深入探究激光参数和金属构件表面处理工艺对颗粒物产生数量的影响,以寻求高功率激光装置中的洁净控制方法,为控制激光装置的在线洁净度和提高激光系统的负载能力提供重要的原理性基础。

2 实验装置和样品

2.1 实验装置与测试方法

为了研究激光与材料表面相互作用产生颗粒物的规律,建立了如图 1 所示的实验装置。纳秒激光器输出的激光脉冲依次经过楔板、透镜,然后通过腔

体前方的窗口玻璃辐照金属样品表面,入射角为 0° 。楔板用于取样,监测激光能量;透镜用于会聚激光,以获得高能量密度的激光。腔体侧边进气孔持续通入洁净的氮气,将样品表面受激光辐照产生的颗粒物带走,然后通过腔体后方的排气孔排出腔体。由于腔体排气孔排出来的气体流速很快,因此将排出气体分为两部分:一部分直接排入周围大气环境,另一部分通入激光尘埃粒子计数器,对激光辐照产生的颗粒进行测量。纳秒激光波长为 1064 nm ,脉宽为 8 ns ,脉冲能量范围为 $0\sim 150\text{ mJ}$,脉冲时间波形为高斯型,重复频率为 $1\sim 10\text{ Hz}$ 。

激光尘埃粒子计数器的基本工作原理:对吸入的气体发射激光,气体内的颗粒物表面积越大,散射的激光强度就越大,通过传感器收集到的光信号强度的大小确定颗粒物的粒径和数量。将采集的数据按 $0.3\ \mu\text{m}$ ($d \leq 0.3\ \mu\text{m}$)、 $0.5\ \mu\text{m}$ ($0.3\ \mu\text{m} < d \leq 0.5\ \mu\text{m}$)、 $1\ \mu\text{m}$ ($0.5\ \mu\text{m} < d \leq 1\ \mu\text{m}$)、 $3\ \mu\text{m}$ ($1\ \mu\text{m} < d \leq 3\ \mu\text{m}$) 进行分类统计,其中 d 是颗粒物的粒径;每分钟输出一次不同粒径的颗粒物数量,为 1 min 内采集颗粒物数量的总和。

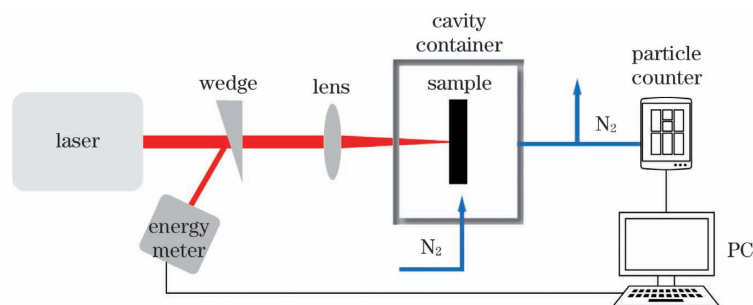


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

导管内气体的标况流量与流速之间的关系为

$$Q_0 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \quad (1)$$

式中: Q_0 、 P_0 、 T_0 分别为气体的标况流量、标况压力和标况温度; D 为气管的内直径; v 表示气体流速; P 和 T 表示工况压力和工况温度。在本次实验中,工况压力为 0.2 MPa ,工况温度为 293 K ,气管的内直径为 6 mm ,腔体进气口处的气体流速为 15.8 L/min ,粒子计数器中的气体流速为 5 L/min 。由(1)式计算可得腔体进气孔处气体的标况流量为 $0.0832\text{ L}^3/\text{min}$,粒子计数器的进气标况流量为 $0.0263\text{ L}^3/\text{min}$ 。假设激光辐照产生的颗粒物在氮气中均匀分布,则计算可得单次激光辐照产生的颗粒物数量是粒子计数器测得数据的 3.16 倍。实验

测得洁净氮气中 $0.3\ \mu\text{m}$ 颗粒物的数量为 $0\sim 30$ 个,一次较大能量的激光脉冲可以使样品产生近万个 $0.3\ \mu\text{m}$ 颗粒物,在洁净的高速氮气气流作用下,只需要 $3\sim 7\text{ s}$ 就可以将腔体内 $0.3\ \mu\text{m}$ 颗粒物降到 30 以下。粒子计数器的采样周期为 60 s ,激光辐照时间不超过 50 s 就可以确保一次激光辐照过程中腔体内的颗粒物全部排出,保证实验测量的准确性。

2.2 实验样品

5052 铝合金是高功率激光装置中常用的金属构件材料,本次实验选择 5052 铝合金及本色氧化 5052 铝合金(5052NA)作为研究对象。

5052 铝合金属于 Al-Mg 系合金,具有良好的成形加工性能。这种合金的强度较高,特别是具有很高的抗疲劳强度、塑性以及优良的耐蚀性和焊接

性,是应用最广的一种防锈铝合金。其熔点范围为 $607\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,热膨胀系数为 $23.8\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,密度为 $2.72\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 。

将铝合金制品作为阳极置于电解质溶液中,通电后利用电解作用使铝合金表面形成氧化铝薄膜,这一过程称为铝合金的阳极氧化处理。其中,不添加染色材料来改变氧化膜颜色的阳极氧化过程称为本色氧化。铝合金本色氧化形成的氧化膜厚度为 $5\sim 30\text{ }\mu\text{m}$,为双膜层结构,靠近金属侧为膜层薄而

致密的阻碍层,外侧为小而致密的柱状结构多孔层,膜表面高低起伏不平,含有大量几百纳米高且厚而致密的颗粒群^[20-22]。

在光学显微镜下观察未经过激光辐照的 5052 样品和 5052NA 样品,表面形貌如图 2 所示。未经阳极氧化处理的 5052 铝合金基体表面凹凸不平,存在明显的加工划痕,划痕的深度一般在几十到几百微米之间;5052NA 表面的氧化膜覆盖在基体表面,掩盖了机加工的抛光痕迹,但存在明显的孔洞结构。

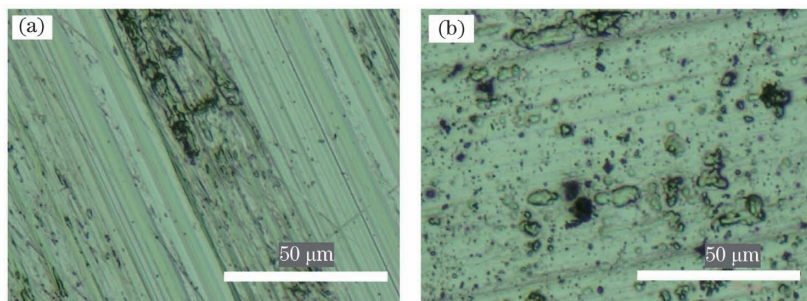


图 2 5052 和 5052NA 样品的表面形貌。(a)5052 样品;(b)5052NA 样品

Fig. 2 Surface images of experimental samples 5052 and 5052NA. (a) Sample 5052; (b) sample 5052NA

3 实验结果

实验中用重复频率为 2 Hz 的纳秒激光辐照样品 40 s ,当样品表面开始出现损伤点时,将对应的能量密度值作为金属表面的激光烧蚀阈值,即烧蚀阈值(F_{th})。通过测量可得 5052 样品的烧蚀阈值为 1.7 J/cm^2 ,5052NA 样品的烧蚀阈值为 1.3 J/cm^2 。除了研究激光重复频率影响的实验,其余实验均采用 2 Hz 的激光重复频率。

采用激光光斑直径为 2 mm 、能量密度为

2.8 J/cm^2 的纳秒激光辐照样品,然后在光学显微镜下观察样品的损伤形貌,如图 3 所示。图 3(a)所示为 5052 样品表面的损伤点,其边缘更加规整,呈类椭圆状,长轴为 $839\text{ }\mu\text{m}$,短轴为 $729\text{ }\mu\text{m}$;图 3(d)所示为 5052NA 样品的表面损伤点,其边缘犬牙交错,不光滑,最长处的轴径为 $984\text{ }\mu\text{m}$,最短处的轴径为 $775\text{ }\mu\text{m}$,损伤面积更大。对比图 3(b)和图 3(e)可以发现,两种样品的表面损伤形貌均凹凸不平,存在大量的颗粒群,但 5052NA 样品表面的颗粒群分布更为集中,呈区域、块状分布。在图 3(c)

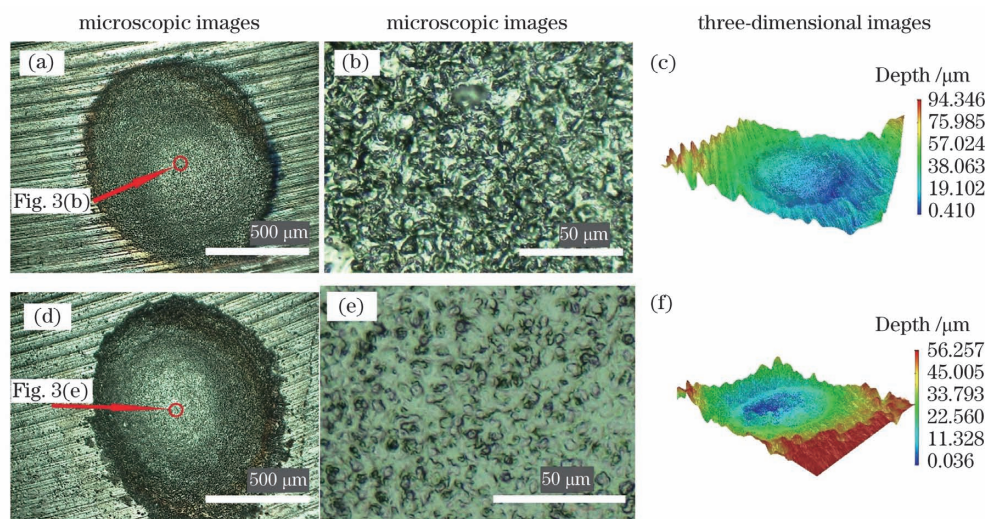


图 3 实验样品的损伤图像。(a)~(c)5052 样品;(d)~(f)5052NA 样品

Fig. 3 Damage images of experimental samples. (a)~(c) Sample 5052; (d)~(f) sample 5052NA

和图 3(f) 所示的三维损伤图像中可以发现, 5052 样品上损伤点的深度约为 $45 \mu\text{m}$, 5052NA 样品上损伤点的深度约为 $35 \mu\text{m}$ 。

激光辐照诱致颗粒物产生与激光参数、样品参数均密切相关, 因此, 本课题组研究了激光能量密度、激光脉冲数目、辐照面积、表面粗糙度等参数对颗粒物产生的影响规律。

3.1 激光能量密度的影响

不同激光能量密度下, 两种样品的颗粒物产生数据如图 4 所示, 图中两段竖直实线分别表示两种样品

的烧蚀阈值, 实验选取了 $0 \sim 3 \text{ J}/\text{cm}^2$ 区间内的若干个能量密度值, 对所有数据点拟合就可以得到颗粒物变化曲线。采用高通量辐照样品时, 即激光能量密度高于烧蚀阈值 ($F > F_{\text{th}}$) 时, 5052NA 样品在烧蚀阈值附近产生的颗粒物数量会飞跃式增加, 且颗粒物粒径越小, 增加的效果越明显; 随着激光能量密度不断增加, $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物数量的增长速度开始放慢, 呈平稳缓慢上升的趋势, 而大粒径颗粒物数量的增长速度依然很快。5052 样品不同粒径的颗粒物数量的增加趋势均为比较缓慢, 不存在颗粒物数量的跃变。

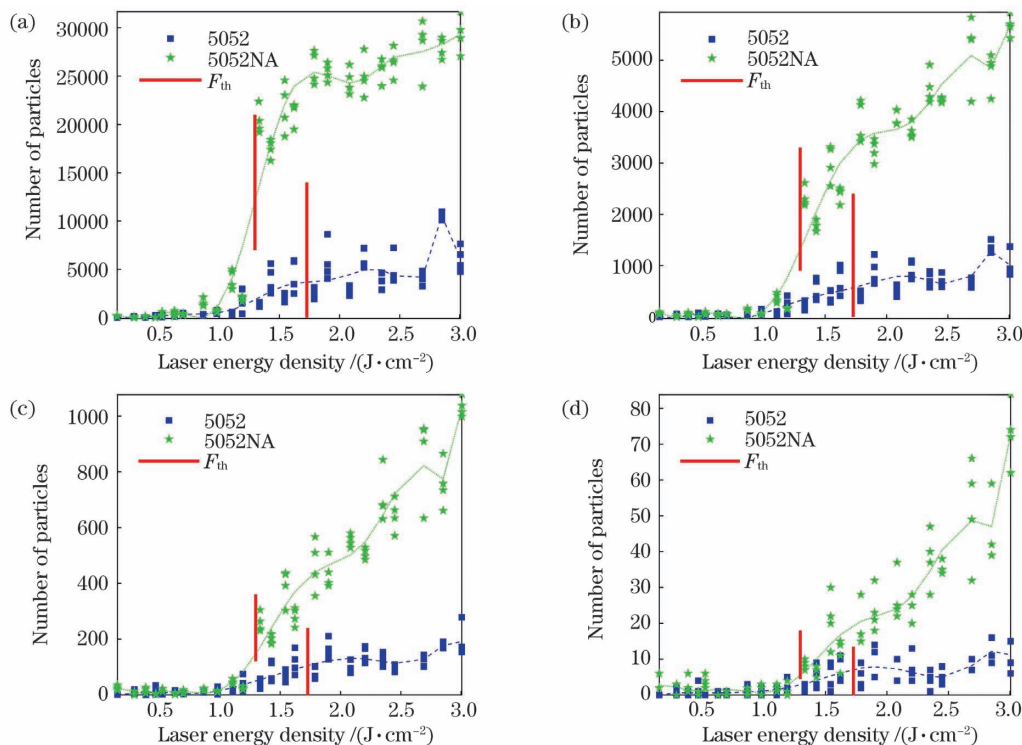


图 4 本色氧化工艺对 5052 样品产生颗粒物的影响。(a) $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物; (b) $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒物; (c) $1 \mu\text{m}$ 颗粒物; (d) $3 \mu\text{m}$ 颗粒物

Fig. 4 Effect of natural anodizing on particle pollutants produced by sample 5052. (a) $0.3 \mu\text{m}$ particles; (b) $0.5 \mu\text{m}$ particles; (c) $1 \mu\text{m}$ particles; (d) $3 \mu\text{m}$ particles

$0.3 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒物占颗粒物总数的绝大部分, 且大粒径颗粒物的产生规律类似, 在之后的数据统计图中, 不再加入颗粒物数量较少的 $1 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数据; 而当 $0.3 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒物的产生规律相似时, 舍去 $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒物的数据。

将图 4 中低能量密度下的数据放大, 如图 5 所示。采用低通量辐照样品时, 即激光能量密度低于烧蚀阈值 ($F < F_{\text{th}}$) 时, 在 $0 \sim 0.8 \text{ J}/\text{cm}^2$ 区间, 5052 和 5052NA 样品产生的颗粒物数量均维持在极低的

水平, $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物数量随着激光能量密度的增加缓慢增大, 而 $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒物数量基本不变; 5052 样品产生的颗粒物总量与 5052NA 样品基本相同。激光能量密度在 $0.8 \sim 1.1 \text{ J}/\text{cm}^2$ 区间时, 两种样品的颗粒物产生数量均随着激光能量密度的提高而增加, 5052NA 样品的颗粒物数量增加得更快。这是因为当激光能量密度高于 $0.8 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时, 激光的冲击力和材料表面的热应力已经足够将吸附的部分颗粒物激发出来, 激光能量密度越大, 激发的颗粒物越多。

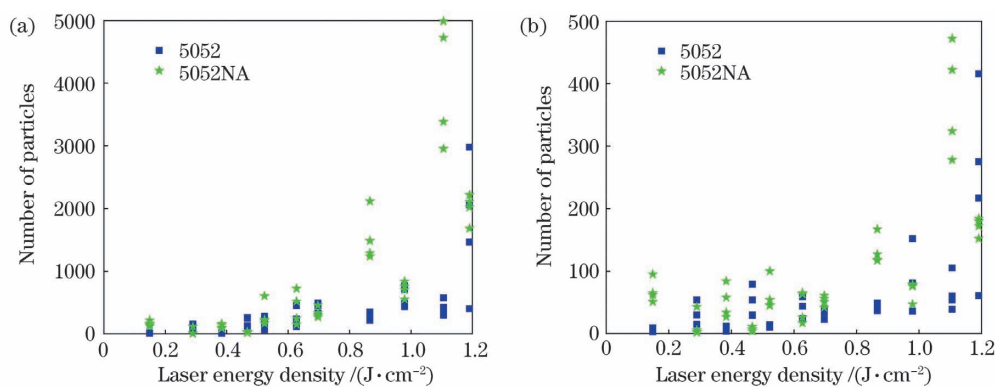


图 5 小激光能量密度下本色氧化对 5052 样品产生颗粒物的影响。(a) $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒; (b) $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒
Fig. 5 Effect of natural anodizing on particle pollutants produced by sample 5052 at low laser energy density.

(a) $0.3 \mu\text{m}$ particles; (b) $0.5 \mu\text{m}$ particles

3.2 激光脉冲数目的影响

延长激光辐射时间,单位时间的激光脉冲数目不变,激光脉冲总数增加;提高激光重复频率,单位时间的激光脉冲数目增加,材料表面的热应力变化更频繁。针对低于和高于烧蚀阈值的激光通量辐照两种情况(一组激光能量密度为 0.6 J/cm^2 ,光斑直径为 6 mm ;另一组激光能量密度为 2.2 J/cm^2 ,光斑直径为 2 mm),研究辐照时间与颗粒物产生的关系。每次改变激光辐照时间的实验,都在同一样品的 8 个不同点上进行。对关注粒径颗粒物数量的测量值求平均值,并将平均值作为最终的结果。改变激光辐射时间时更换样品上辐照点的位置。

图 6 给出了激光能量密度为 0.6 J/cm^2 和光斑直径为 6 mm 的情况下 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的产生情况,主要观察激光辐照时间对金属表面颗粒物清洗效果的影响。由图 6(a)可以看出,在该激光能量密度下,对于前 2 s 内的 4 个脉冲,两个样品的颗粒物

产生数量相差无几。在图 6(b)中,与激光辐照 2 s 产生的颗粒物数量相比,激光在不同位置辐照 10~40 s 5052 样品产生的颗粒物数量略微增加,而 5052NA 样品产生的颗粒物数量出现了小幅下降;与 5052 样品相比,5052NA 样品产生的颗粒污染物更少。这说明金属氧化膜层吸附的颗粒物更难被激光清洗下来,或者说金属氧化膜表面吸附的颗粒物更少,绝大部分颗粒物在激光辐照 2 s 左右就基本被清除,增加激光辐照时间,产生的颗粒物总量变化不大。

图 7 给出了激光能量密度为 2.2 J/cm^2 和光斑直径为 2 mm 情况下 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的产生情况。激光能量密度为 2.2 J/cm^2 ,高于样品的烧蚀阈值,不仅会清除金属表面的附着污染物,还会使金属表面发生烧蚀,喷溅出新的金属颗粒物。烧蚀产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物数量如图 7 所示。

由图 7(a)可以发现,对于前 2 s 的 4 个脉冲,5052NA 样品的颗粒物产生数量随着脉冲数量的增

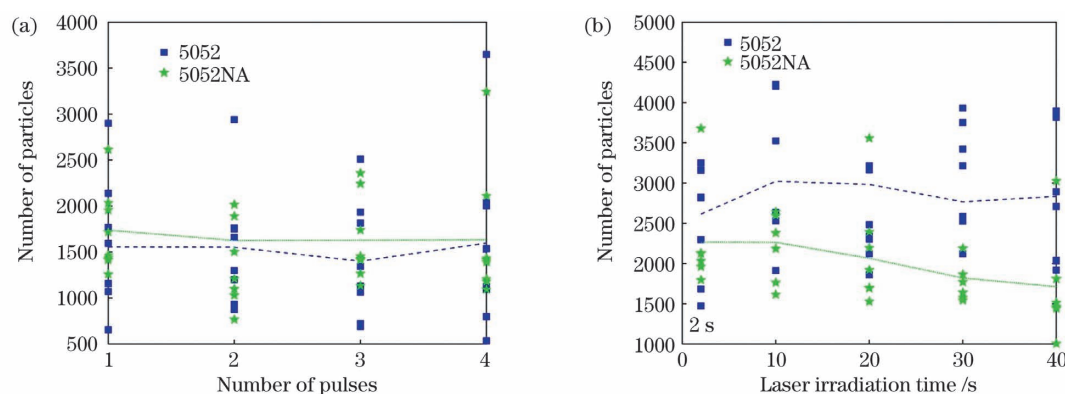


图 6 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的产生情况(激光能量密度为 0.6 J/cm^2 ,光斑直径为 6 mm)。(a)不同激光脉冲数目下颗粒物的数量; (b)不同激光辐照时间下颗粒物的数量

Fig. 6 Particle pollutants produced under laser energy of 0.6 J/cm^2 and spot diameter of 6 mm . (a) Numbers of particle pollutants generated under different laser pulse numbers; (b) numbers of particle pollutants generated under different laser irradiation time

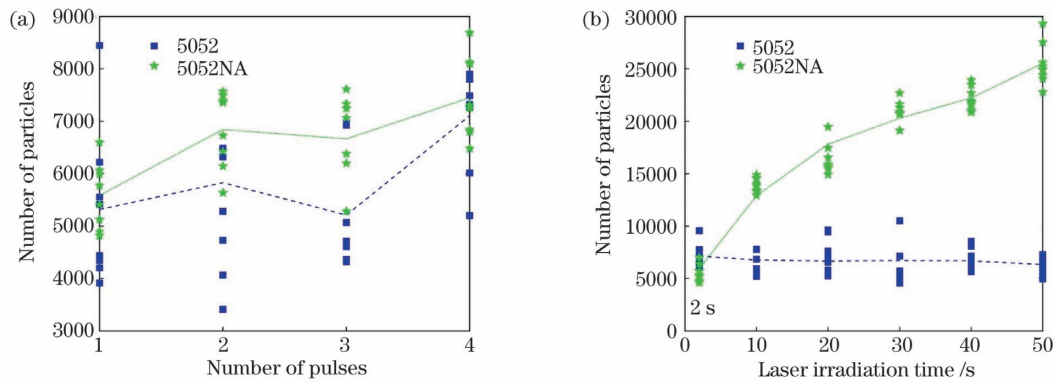


图 7 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的产生情况(激光能量密度为 $2.2 \text{ J}/\text{cm}^2$, 光斑直径为 2 mm)。 (a) 不同激光脉冲数目下颗粒物的数量; (b) 不同激光辐照时间下颗粒物的数量

Fig. 7 Particle pollutants produced under laser energy density of $2.2 \text{ J}/\text{cm}^2$ and spot diameter of 2 mm . (a) Numbers of particle pollutants generated under different laser pulse numbers; (b) numbers of particle pollutants generated under different laser irradiation time

加而增加,而 5052 样品颗粒物数量随着脉冲数量的增加而上下波动。由图 7(b)可以看出,随着激光辐照时间延长,5052 样品产生的颗粒物数量没有显著区别,而 5052NA 样品产生的颗粒物数量会随着激光辐照时间的延长而不断增加。这说明,激光在 5052 样品表面产生损伤点之后,材料表面产生高温、高密度且迅速向外膨胀的等离子体,等离子体在膨胀过程中会持续吸收入射激光的能量,阻碍激光到达材料表面,这种等离子体屏蔽效应会抑制激光持续产生更多颗粒物;5052NA 样品表面氧化膜的激光烧蚀阈值更低,且氧化膜上的损伤点并不会显著抑制颗粒物的继续产生,直至激光击穿整层氧

化膜。

在两组不同激光能量密度辐照实验中,5052NA 样品产生的不同粒径颗粒物的数量和占比情况如表 1 所示。可以看出:在高通量激光辐照下产生的颗粒物中,85% 的颗粒物的粒径小于 $0.3 \mu\text{m}$,13% 的颗粒物的粒径在 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间,但粒径大于 $0.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物数量极少,不到 2%。相比于低通量激光产生的不同粒径颗粒物的占比,高通量激光辐射产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的占比下降, $0.5 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 颗粒物的占比增多,这说明高通量激光在金属表面烧蚀喷溅出来的颗粒物中有许多大粒径颗粒物。

表 1 5052NA 样品产生的不同粒径颗粒物的数量和比例

Table 1 Number and proportion of particles with different sizes generated by 5052NA sample

Energy density / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Number(proportion)			
	$0.3 \mu\text{m}$	$0.5 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m}$
0.6	2023(89.20%)	213(9.40%)	30(1.32%)	2(0.08%)
2.2	17447(85.11%)	2665(13.00%)	370(1.81%)	17(0.08%)

通过改变激光的重复频率,可以提高单位时间内的激光脉冲数目。图 8 为两种样品在 1, 2, 5, 10 Hz 激光重复频率下的颗粒物产生情况,实线为样品烧蚀阈值 F_{th} 。

由图 8(a)可以看出,在不同的激光重复频率下,5052 样品产生的颗粒物数量的分布区间类似,10 Hz 激光重复频率下产生的颗粒物数量略多于其他激光重复频率下产生的。由图 8(b)可以看出,5052NA 样品的颗粒物产生数量与激光重复频率有着密切的关系,激光的重复频率越大,产生的颗粒物数量越多,此时激光的重复频率已经是影响颗粒物

产生数量的重要因素。

增加激光的辐照时间和重复频率都可以提高样品点接收到的激光脉冲数量,将图 8 中激光能量密度为 $2.2 \text{ J}/\text{cm}^2$ 产生的颗粒物数据和图 7 中的颗粒物数据整合在图 9 中,探究激光脉冲数目与颗粒物数量的关系。图 9(a)、(b)分别为 5052 和 5052NA 样品在不同脉冲数目下产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量。激光重复频率带来的激光脉冲数目变化对颗粒物产生的影响:两种样品颗粒物数量的增长大致为一条直线。激光辐照时间带来的激光脉冲数目变化对颗粒物产生的影响:5052 样品产生的颗粒物数量

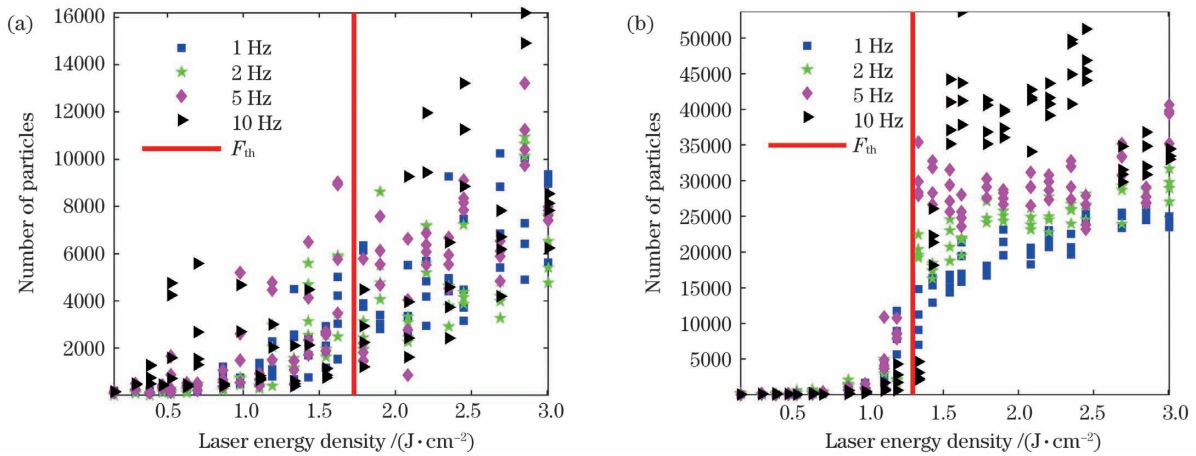


图 8 不同激光重复频率下产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量。(a) 5052 样品;(b) 5052NA 样品

Fig. 8 Number of $0.3 \mu\text{m}$ particle pollutants generated under different laser repetition frequencies. (a) Sample 5052; (b) sample 5052NA

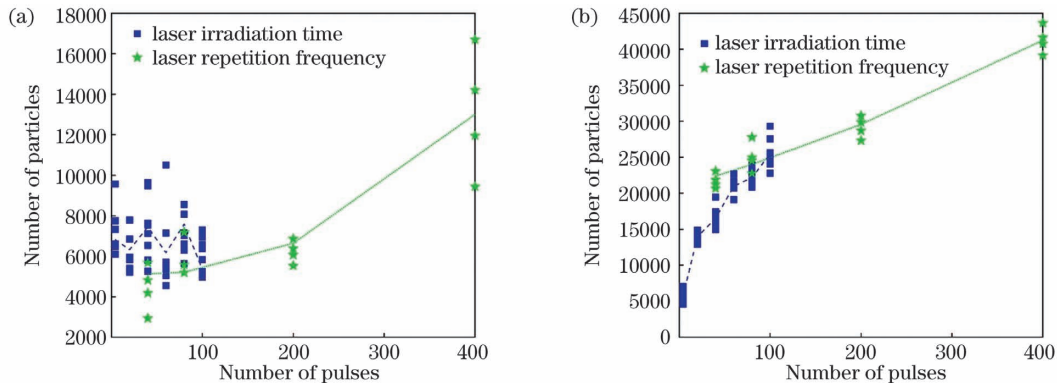


图 9 不同脉冲数目下产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量。(a) 5052 样品;(b) 5052NA 样品

Fig. 9 Number of particles pollutants generated under different numbers of pulses. (a) Sample 5052; (b) sample 5052NA

在 7000 左右上下波动,而 5052NA 样品产生的颗粒物数目呈现快速增长的趋势。

3.3 激光光斑直径的影响

为了探究激光光斑面积和颗粒物产生数量的关系,本课题组设置了两组实验对照,一组激光光斑直径为 6 mm,另一组激光光斑直径为 2 mm。实验结

果如图 10 所示。

在图 10(a)中可以看出,5052 样品在 6 mm 和 2 mm 光斑直径下产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量存在很大差距,前者为后者的 7~40 倍。在图 10(b)中可以看出,在 6 mm 和 2 mm 光斑直径下,5052NA 样品产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量之比为 3~16,激光光

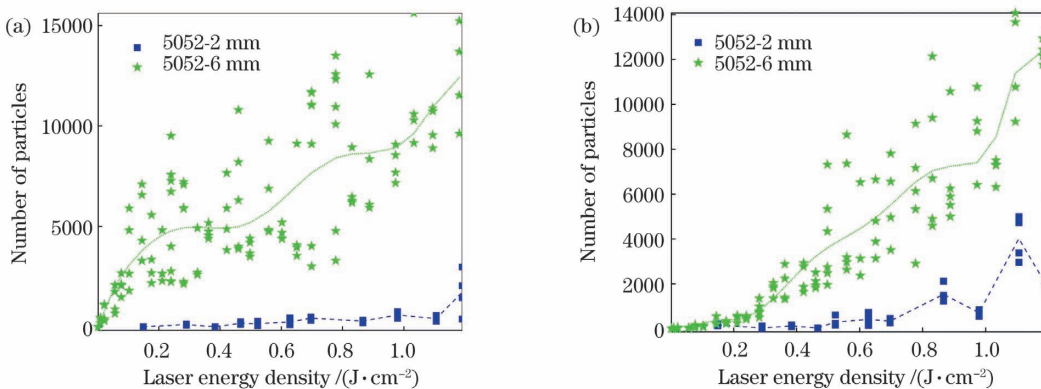


图 10 不同激光光斑直径下产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量。(a) 5052 样品;(b) 5052NA 样品

Fig. 10 Number of particles pollutants generated under different laser spot diameters. (a) Sample 5052; (b) sample 5052NA

斑面积之比为 9, 颗粒物数量和激光光斑面积之间存在明显的正比关系。对比后可以发现, 在相同的激光能量密度下, 5052NA 样品颗粒物的产生数量和激光光斑面积成正比关系, 5052 样品在两种光斑面积下产生的颗粒物数量之比明显大于激光光斑面积之比, 大尺寸光斑在相同面积下产生的颗粒物数量更多。

3.4 表面粗糙度的影响

样品的表面粗糙度越大, 表面微小峰谷的不平

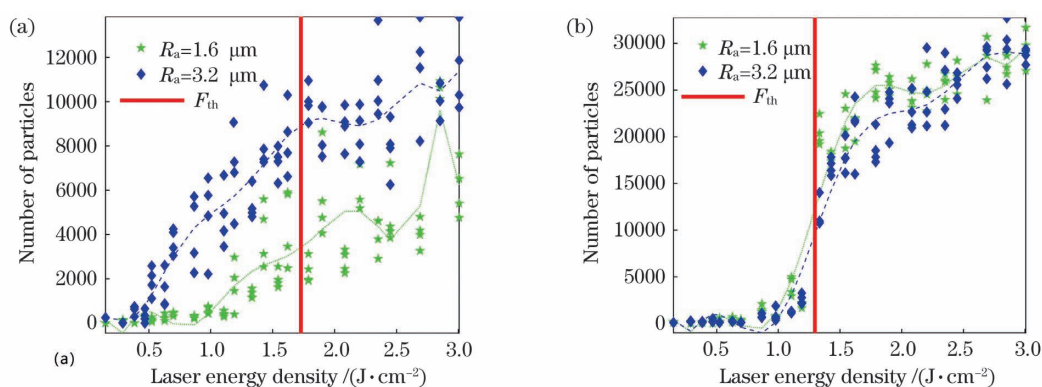


图 11 不同表面粗糙度样品产生的 $0.3 \mu\text{m}$ 颗粒物的数量。(a) 5052 样品; (b) 5052NA 样品

Fig. 11 Number of particles pollutants generated by samples with different surface roughness values. (a) Sample 5052; (b) sample 5052NA

3.5 实验结果分析与讨论

图 12 为激光清洗和激光烧蚀原理示意图。低通量激光(激光能量密度低于烧蚀阈值)主要表现为激光的清洗作用, 它可在材料表面产生力学共振现象, 使材料表面碎裂脱落, 同时使表面污染物受热膨胀, 克服基体对污染粒子的吸附而蒸发、气化, 脱离物体表面。高通量激光(激光能量密度高于烧蚀阈值)主要表现为激光的损伤作用, 金属材料表面吸收激光能量后温度急剧升高, 材料被熔化并达到过热状态, 此时材料表面会产生较大的蒸气压力将金属熔融

物从熔池中排出, 形成飞溅的金属颗粒物, 飞溅的金属颗粒物冷凝后就会形成大粒径的颗粒污染物。低通量激光产生颗粒物的规律: 在低于 0.8 J/cm^2 的小能量密度激光的辐照下, 5052 和 5052NA 样品表面吸附的小粒径颗粒不易被激发, 产生的颗粒物数量极少; 当激光能量密度高于 0.8 J/cm^2 时, 5052NA 样品产生的颗粒物数量快速增加, 在烧蚀阈值附近发生颗粒物数量的飞跃式增加。提高激光辐照时间和激光重复频率, 本质上都是提高激光辐照的脉冲数量, 两种样品的绝大多

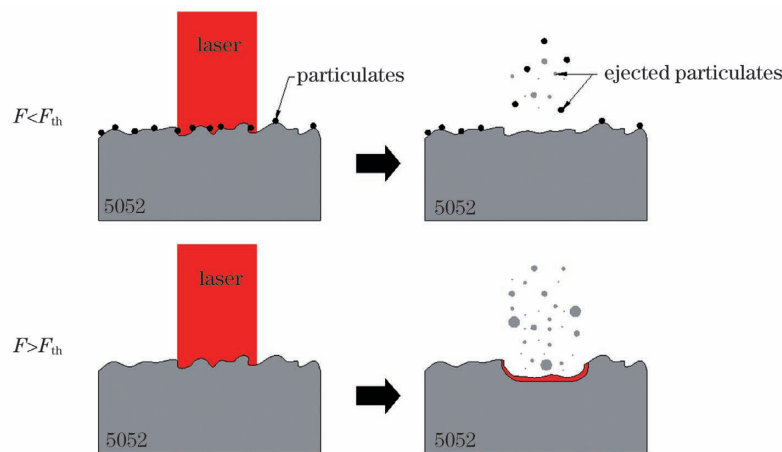


图 12 不同能量密度的激光对材料表面的损伤作用

Fig. 12 Damage effect of laser with different energy densities on material surface

数颗粒物都是产生于第一发激光脉冲,故脉冲数目的变化对颗粒物产生数量的影响不大;增大激光光斑面积可以显著增加颗粒物产生数量。

高通量激光产生颗粒物的规律:激光能量密度是决定颗粒物产生数量的最主要因素;激光辐照后,5052 样品表面产生的等离子体会阻止激光对材料内部的进一步损伤,而 5052NA 样品表面氧化膜层产生的等离子体屏障作用并不明显,故增加激光辐照时间或激光重复频率会显著增加颗粒物数量。

材料表面的不平整会引起光场的局部增强。表面粗糙度 $R_a=3.2\ \mu\text{m}$ 的 5052 样品,其表面的微小峰谷的不平度更大,产生的颗粒物数量更多,在更小的激光能量密度下就能激发出大量颗粒物;5052NA 样品的表面粗糙度对颗粒物产生数量的影响不大,这可能与其表面氧化膜的结构有关。

4 结 论

在低通量激光下,可采用大光斑尺寸激光对金属进行颗粒物产生的预处理,该处理过程可作为激光系统金属表面上线前的清洗工艺;在高通量激光下,本色氧化样品比未处理样品表面产生的颗粒物更多,这与本色氧化工艺有关。因此,建议对不同工艺处理的铝合金表面进行深入研究,同时进行杂散光防护。表面粗糙度会影响颗粒物的产生,应综合考虑成本和洁净控制要求,选择合适的表面粗糙度等级。后续将进一步研究其他种类常用材料的颗粒物产生规律,例如不锈钢、防护玻璃等,并探究不同表面处理工艺对颗粒物产生规律的影响。

参 考 文 献

- [1] Zhang X C, Jiang Y, Qiu R, et al. Concentric ring damage on the front surface of fused silica induced by a nanosecond laser[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(12): 4811-4817.
- [2] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [3] Jiang Y, Zhang Y H, Liu X Y, et al. Bulk damage growth characteristics of K9 glass induced by nanosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1614003.
蒋勇,张远恒,刘欣宇,等.纳秒激光诱导 K9 光学元件体损伤增长特性[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1614003.
- [4] Bude J, Carr C W, Miller P E, et al. Particle damage sources for fused silica optics and their mitigation on high energy laser systems[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11414-11435.
- [5] Chen J X, Qin J B, Lu L H, et al. Study on laser-stricken damage to alumina ceramic layer of different surface roughness[J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102723.
- [6] Zhu D Y, Li P, Chai X X, et al. General design and experiment for separated final optics assembly on high energy laser system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106213.
- [7] Ling X L, Liu S H, Liu X F. Defect induced thermal-plasma coupling damage in optical films under nanosecond pulse laser irradiation[J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(12): 125707.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Sun S W, Qi N J, Kong Y, et al. Three-dimensional stress fields of laser damaged fused silica[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0101001
孙劲伟,齐乃杰,孔艳,等.熔石英玻璃激光损伤的三维应力场研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 010100
- [11] Cao Z, He H B, Hu G H, et al. Time-resolved investigation of multiple-pulse laser-induced bulk damage in fused silica[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0803001.
曹珍,贺洪波,胡国行,等.多脉冲激光诱导熔石英体损伤的时间分辨研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0803001.
- [12] Zhou R, Hong M H. Laser cleaning of contaminated substrate surfaces [M] // Sugioka K. *Handbook of laser micro- and nano-engineering*. Cham: Springer, 2020: 1-46.
- [13] Kumar A, Biswas D J. Particulate size and shape effects in laser cleaning of heavy metal oxide loose contamination off clad surface [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 286-293.
- [14] Sugathan B, Nilaya J P, Pillai V P M, et al. Studies on surface pitting during laser assisted removal of

- translucent ellipsoidal particulates from metallic substrates [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 24-29.
- [15] Zhang C L, Li X B, Wang Z G, et al. Laser cleaning techniques for removing surface particulate contaminants on sol-gel SiO₂ films [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(7): 074205.
- [16] Yuan B S, Wang D, Dong Y, et al. Experimental study of the morphological evolution of the millisecond-nanosecond combined-pulse laser ablation of aluminum alloy [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(20): 5743-5748.
- [17] Han F M, Xu S Z, Song W L, et al. Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0203005.
韩丰明, 徐世珍, 宋文亮, 等. 纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0203005.
- [18] 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.
- [19] de Bleiner D. Mathematical modelling of laser-induced particulate formation in direct solid microanalysis [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2005, 60(1): 49-64.
- [20] Yu M Q. Recently progress on surface treatment technology of aluminum and its alloys [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2008(6): 84-88, 95.
余美琼. 铝及铝合金表面处理技术新进展 [J]. *化学工程与装备*, 2008(6): 84-88, 95.
- [21] Wei X Y, Hui X G, Liang Z G. Introduction to micro-arc oxidation and anodizing processes on aluminum alloy surface [J]. *China Metal Bulletin*, 2017(9): 69-70.
魏向禹, 惠鑫刚, 梁智国. 铝合金表面微弧氧化与阳极氧化工艺介绍 [J]. *中国金属通报*, 2017(9): 69-70.
- [22] Sun X L, Zhao X, Jin Z Q, et al. Anticorrosion properties of aluminum oxide films prepared by anodic oxidation in oxalic acid electrolyte [J]. *Materials Protection*, 2018, 51(2): 5-8, 94.
孙晓麟, 赵霞, 金祖权, 等. 草酸阳极氧化法制备铝合金氧化膜及其防腐性能 [J]. *材料保护*, 2018, 51(2): 5-8, 94.

Particles Generation of Aluminum Alloy Induced by Nanosecond Laser

Li Chang^{1,2}, Pang Xiangyang^{1*}, Sun Mingying^{1**}, Liu Wenfeng^{1,2}, Qiao Zhanfeng¹,
Zhu Jianqiang¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective With the continuous advancement in laser-driven inertial confinement nuclear fusion research, laser damage to optical components caused by particle pollutants has become a bottleneck limiting the output capacity of high-power laser drivers. In a high-power laser system (HPLS), stray light and ghost spots can have a high energy density, and the surface of the mechanical components is easily exposed to stray light to produce metal particles, which diffuse into the optical path and result in a large number of aerosols. Aerosol pollutants can not only fill the gaps of the porous sol-gel coating on optical surfaces to reduce transmittance but also easily damage the optical element under laser irradiation. Therefore, suppressing particle pollutants is crucial to improve the output capacity of HPLSs. The aluminum alloy is commonly used as the mechanical component in high-power laser facilities; thus, we experimentally study the generation of aluminum alloy particles irradiated by a nanosecond laser in this article. The effects of laser parameters and sample surface treatments on particle generation are investigated in detail, and the suppression methods of particle generation are discussed to control online cleanliness in HPLSs.

Methods The nanosecond laser was passed through a window glass of the cavity to irradiate the surface of a metal sample with an incident angle of 0°. Clean nitrogen gas was continuously filled into the cavity through the gas inlet to

remove particles generated by the laser radiation to exit the cavity through the exhaust hole at the back of the cavity. Because of the rapid gas flow rate from the cavity vent hole, the exhaust gas was divided into two parts: one part was directly discharged into the surrounding atmosphere, and the other part was fed into a particle counter to measure the number of the particles with various sizes. Therefore, the number of particles produced by laser irradiation in the experiment was 3.16 times that of data directly measured using the particle counter. Micron and submicron aerosol particle generation rules were compared for 5052 aluminum alloy samples treated with and without natural anodizing process. The effects of laser energy density, irradiation time, laser repetition frequency, laser spot area, and sample surface roughness were analyzed on the generated particles.

Results and Discussions When the laser energy density was higher than the ablation threshold, the number of particles generated on the natural anodized sample dramatically increased with laser energy density. The smaller the particle size, the more significant the growth effect. With the increase in the laser energy density, the number of different-sized particles in the non-natural anodized sample linearly increased; there was no jump increase in the number of particles (Fig. 4). With a 0.6 J/cm^2 laser energy density, in the four pulses within the first 2 s, the number of particles of the two samples was almost the same, and the number of particles produced with the laser radiation time of 10–40 s was approximately same (Fig. 6). With a 2.2 J/cm^2 laser energy density, with the increase in laser radiation time, there was an insignificant change in the number of particles generated on the non-natural anodized sample, but the number of particles of natural anodized sample continued increasing (Fig. 7). Under different laser repetition frequencies, the non-natural anodized sample had a similar distribution range of particles quantity, and the number of particles produced at the repetition frequency of 10 Hz was just slightly more than that produced at lower repetition frequency. However, for the sample with natural anodizing, the greater the laser repetition frequency, the greater the number of particles (Fig. 8). The ratio of the number of $0.3 \mu\text{m}$ particles produced on the non-natural anodized sample with 6 mm and 2 mm spot diameters was in the range of 7–40. In two experiments of the natural anodized sample, the ratio of the number of $0.3 \mu\text{m}$ particles was in the range of 3–16 (Fig. 10). The non-natural anodized sample with a surface roughness of $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ produced considerably more particles than that with a roughness of $R_a = 1.6 \mu\text{m}$, especially at a smaller laser energy density (Fig. 11). However, the surface roughness of natural anodized sample had an insignificant effect on particle generation.

Conclusions When 5052 aluminum alloy samples treated with and without a natural anodizing process were irradiated with a laser energy density lower than 0.8 J/cm^2 , the number of particles was extremely small. With energy density higher than 0.8 J/cm^2 , the number of particles produced in the natural anodized sample rapidly increased; there was a jump increase near the ablation threshold. By increasing the laser spot area, the number of particles could be considerably increased, and the number of particles generated in the natural anodized sample was proportional to the spot area. When the laser energy density was higher than the surface ablation threshold, the laser energy density was the most essential factor determining the number of generated particles. The non-natural anodized sample with a surface roughness of $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ produced more particles than that with a roughness of $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ and could excite numerous particles with a smaller laser energy density. Therefore, laser beams with small energy density can be used in a laser cleaning process. The natural anodized surface produced more particles than the untreated surface. So, optimizing the surface treatment of aluminum alloys to suppress particle generation is meaningful. Surface roughness strongly affected particle generation; thus, the requirements on the cost and cleanness control should be comprehensively considered to select a suitable surface roughness level.

Key words laser optics; particle pollutants; clean control; laser irradiation; aluminum alloy; laser induced damage

OCIS codes 140.3330; 140.3440; 160.3900; 350.1820