

表面处理工艺对铝合金抗激光损伤能力的影响

时 双^{1,3} 孙明莹^{1,2*} 郝艳飞¹ 张 燕¹ 庞向阳¹ 章亚男³ 刘志刚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电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

³上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

摘要 研究了表面处理工艺对铝合金表面抗激光损伤能力的影响。结果表明,在相同纳秒激光脉冲辐照下,与机械抛光相比,化学镀镍、阳极氧化黑和硬质阳极氧化处理的表面损伤阈值较低,而钝化和微弧氧化的损伤阈值较高;相同处理工艺但不同参数对应的损伤阈值不同。通过比较不同工艺表面的相关物理参数,对损伤阈值、形貌和规律进行了分析。结果表明,钝化更适用于高功率激光装置中铝合金表面的处理。

关键词 激光技术; 表面处理工艺; 激光损伤; 损伤阈值; 损伤形貌

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1202001

Effect of Surface Treatment Technology on Laser Damage Resistance of Aluminium Alloy

Shi Shuang^{1,3} Sun Mingying^{1,2} Hao Yanfei¹ Zhang Yan¹ Pang Xiangyang¹
Zhang Yanan³ Liu Zhigang¹

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

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

³School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract The effect of surface treatment technology on laser damage resistance of aluminum alloy is studied. Results show that, under the same nanosecond laser irradiation, the laser-induced damage threshold of nickel-plated metal surface, black anode oxidated surface, or hard anode oxidated surface is lower, while that of inactivated or micro arc oxidized surface is higher, if compared with that of mechanically polished surface; surfaces treated by the same treatment process but with different parameters have different damage thresholds. With the comparison among the relevant physical parameters of different technologies, the damage thresholds, morphologies, and patterns are analyzed and the results indicate that the inactivation technology is more suitable for the aluminum alloy surface treatment in high power laser facility.

Key words laser technique; surface treatment technology; laser-induced damage; damage threshold; damage morphology

OCIS codes 140.3330;140.3440;160.3900;350.1820

收稿日期: 2016-06-22; 收到修改稿日期: 2016-07-20

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室开放研究基金(SKL2014KF05)

作者简介: 时 双(1989—),女,硕士研究生,主要从事惯性约束聚变装置中洁净控制方面的研究。

E-mail: 18321732296@163.com

导师简介: 刘志刚(1976—),男,博士,研究员,主要从事惯性约束聚变装置的总体结构设计方面的研究。

E-mail: lzg_siom@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: sunmy@siom.ac.cn

1 引 言

在惯性约束聚变的高功率激光驱动器装置中,光学元器件的负载能力是影响激光驱动器输出能量提高的重要因素。而影响元器件负载能力的主要因素是光学元件的损伤,其中金属污染物最易诱导光学元件损伤^[1-2]。金属污染物的主要来源包括机械摩擦产生的金属碎屑和激光辐照产生的烧蚀喷溅物。高功率激光系统中光学元件数量众多,不可避免地存在杂散光或者鬼像。金属的损伤阈值比较低,杂散光和鬼像等照射在金属腔内壁或支撑金属件的表面,当激光能量密度大于损伤阈值时,会烧蚀喷溅出金属液滴或碎屑。这些金属液滴或碎屑附着在光学元件的表面,导致了表面膜状或颗粒污染。在较低通量的激光辐照下,金属污染物也能够吸收足够的能量,诱致光学元件表面损伤^[3-10],从而降低光学元件的寿命。因此,避免金属污染物的产生是高功率激光系统高性能运行的重要保障。目前,国内外的高功率激光装置主要是通过通过对杂散光进行弱化和吸收,使得辐照在金属表面的激光通量低于损伤阈值,从而防护金属表面。但是,提高金属表面的激光损伤阈值(LIDT)也是避免产生金属污染的重要途径。

关于纳秒激光诱导金属的抗激光损伤特性,已有相关研究报道。常浩等^[11]研究了激光烧蚀铝过程中靶材的吸收系数、热导率、电导率、密度和反射率等参数随温度的变化。韩李明等^[12]研究了在不同激光能量密度下,铝合金质量损失与辐照激光脉冲数的关系。高功率激光装置中金属表面需要经过进一步处理才能适用于工程应用,不同表面处理工艺处理后的金属表面具有不同的材料特性,激光辐照下的抗激光损伤特性也不相同。本文针对工程中常用的一种铝合金——防锈铝,研究了其表面经过不同加工工艺处理后激光损伤特性的差异。对金属机械件在激光辐照下的损伤阈值进行了实验研究,探究了不同表面处理工艺处理后的铝合金的抗激光损伤能力,获得了有利于减少金属溅射污染物的金属表面处理工艺。研究结果为实际高功率激光驱动器工程应用中金属件的表面处理方式提供了一定参考。

2 实验样品与过程

2.1 实验样品

实验中所用的金属材料是防锈铝,是一种铝合金。表面处理工艺包括阳极氧化黑、硬质阳极氧化、钝化、化学镀镍、微弧氧化以及不同表面粗糙度的机械抛光。经过不同表面处理工艺处理后的金属样品表面形貌如图 1 所示,其中所有图的比例尺相同,在图 1(a)中给出。其中图 1(d)所示是仅经过机械抛光,不经过其他处理工艺的铝合金表面。

阳极氧化黑是在普通阳极氧化的过程中增加了黑色染料,阳极氧化膜的微观结构呈蜂窝状。硬质阳极氧化是一种特殊的阳极氧化,硬质阳极氧化膜的硬度比普通阳极氧化要高,大约为 1176~1740 HV。钝化促使金属表面形成的氧分子结构钝化膜覆盖性良好、膜层致密、性能稳定。化学镀镍是在金属表层镀上镍膜,镍的熔点是 1453 °C,比铝合金的熔点 650 °C 高,但比氧化铝的熔点 2050 °C 低很多,且硬度较小,在 400~700 HV 之间。微弧氧化是指依靠弧光放电产生的瞬时高温高压作用,在合金表面生长出以基体金属氧化物为主的陶瓷膜层,厚度不一样的氧化膜粗糙度也不一样。

由图 1 可知,经过不同表面处理工艺的金属表面形貌各异。经过阳极氧化黑处理的表面有很多微孔结构,孔隙率较高,易吸附微粒。硬质阳极氧化的表面较平整。钝化的表面呈现出许多杂乱无章的线条,这是钝化腐蚀表面的结果。化学镀镍的表面光亮度高,孔隙率低。微弧氧化的表面硬度非常高,达到 1000~2000 HV,致密性非常好,但表面凹凸不平,比较粗糙。不同形貌和特性的金属表面呈现出不同的抗激光损伤特性。

各种金属表面加工工艺处理后的铝合金的物理参数如表 1 所示。利用 X 射线荧光光谱分析仪(XRF)对金属表面的元素进行分析,几种金属的测量结果如图 2 所示。可以看出,经过阳极氧化黑处理的表面所含最多的元素是铝(Al),其次是硫(S),Al 是金属表面氧化层的主要元素,S 是黑色染料成分;钝化和微弧氧化表面的主要元素都是 Al;化学镀镍的表面含镍(Ni)元素最多。金属表面的元素种类影响着金属的物理化学性质,进而影响表面的抗激光损伤性能。

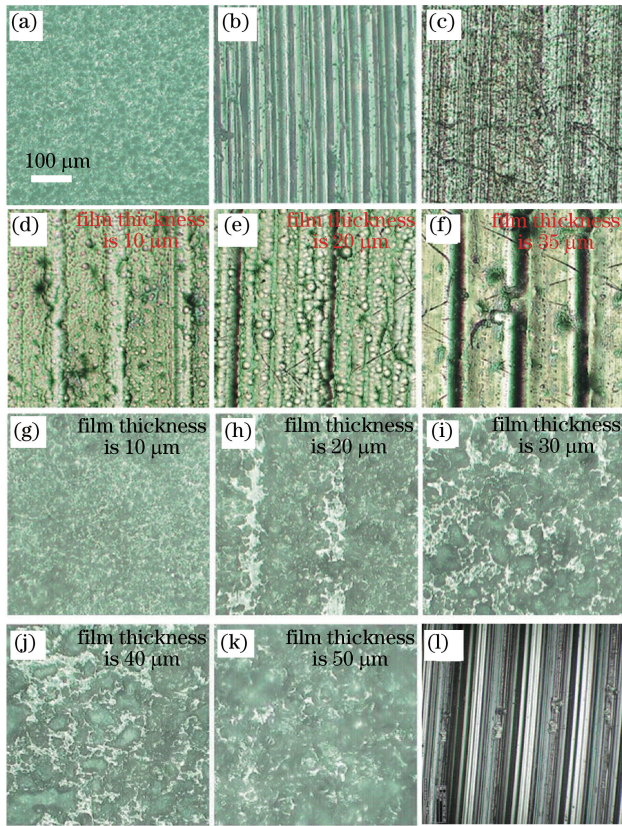


图 1 经过不同表面处理工艺处理后的待测样品的表面形貌。(a) 阳极氧化黑；(b) 硬质阳极氧化；(c) 钝化；(d)(e)(f) 化学镀镍；(g)(h)(i)(j)(k) 微弧氧化；(l) 机械抛光

Fig. 1 Surface morphologies of samples after treatments with different techniques. (a) Black anode oxidation; (b) hard anode oxidation; (c) inactivation; (d)(e)(f) electroless nickel plating; (g)(h)(i)(j)(k) micro arc oxidation; (l) mechanical polishing

表 1 经过不同表面处理的铝合金的物理参数

Table 1 Physical parameters of aluminum alloys after different surface treatments

Technology	Melting point / °C	Hardness / HV
Aluminium oxide	2050	—
Aluminum	660	60-150
Electroless nickel plating	1453	400-700
Micro arc oxidation	2035	1000-2000
Black anode oxidation	—	196-490
Hard anode oxidation	—	1176-1740

2.2 实验装置和测试方法

采用纳秒激光器进行金属表面抗激光损伤特性测试,激光波长是 1064 nm,脉宽是 6 ns,脉冲能量范围是 30~300 mJ,光束直径是 6 mm,脉冲波形是高斯型,重复频率是 1~10 Hz。实验光路如图 3(a)所示,激光器输出的激光束依次经过楔板、透镜、取样镜后辐照在金属样品表面,入射角为 90°。楔板用于取样以监测激光脉冲能量,电荷耦合器件(CCD)用于监测样品等效位置处的光斑形状和尺寸,焦距为 157 cm 的透镜用于聚焦光束以获得较高的能量密度。金属样品放置在透镜焦点附近,CCD 获得的焦点附近激光光束能量分布如图 3(b)所示,激光脉冲空间能量分布呈高斯型,辐照在样品表面的光斑直径约为 500 μm。

实验中纳秒脉冲激光的能量分布呈高斯型,因此根据能量密度与光束截面半径以及烧蚀轮廓直径之间的关系^[13]可以推导出如下关系

$$D^2 = 2\omega_0^2 (\ln F - \ln F_{th}), \quad (1)$$

式中 D 是烧蚀坑直径; ω_0 是光束半径; F 是激光峰值能量密度,即激光通量; F_{th} 是损伤阈值能量密度。由

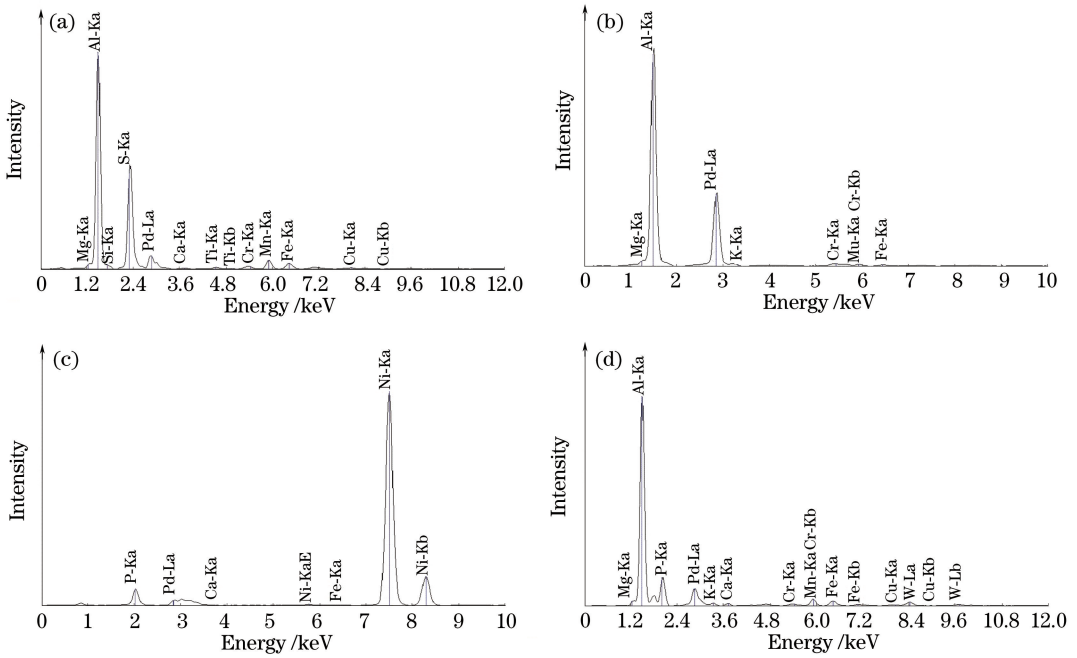


图 2 XRF 测量的表面元素分析。(a) 阳极氧化黑；(b) 钝化；(c) 化学镀镍, 10 μm ；(d) 微弧氧化, 10 μm
 Fig. 2 Surface elemental analysis by XRF. (a) Black anode oxidation; (b) inactivation;
 (c) electroless nickel plating, 10 μm ; (d) micro arc oxidation, 10 μm

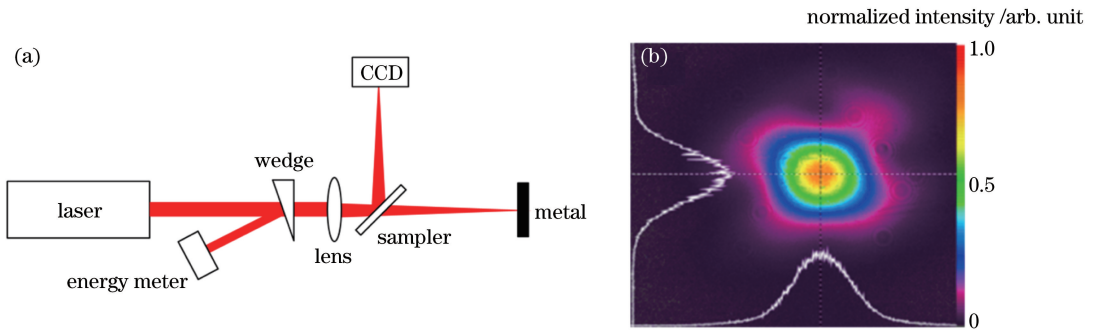


图 3 (a) 实验装置图；(b) 焦斑能量分布
 Fig. 3 (a) Experimental setup; (b) energy distribution at focal spot

(1)式可知,烧蚀坑直径的平方与激光峰值能量密度的对数呈线性关系,激光能量密度越大,烧蚀尺寸越大。因此,单激光脉冲作用下烧蚀直径 D 为 0 时,对应的能量密度值为金属表面的激光烧蚀阈值,即损伤阈值。

实验中,采用一对一的方式使激光脉冲作用在金属样品表面,即每一个能量密度对应 10 个测试点,每个点辐照一个激光脉冲。利用高精度光学显微镜对损伤测试的样品表面烧蚀光斑进行观察分析,测量烧蚀斑的直径。

3 实验结果与分析

3.1 金属材料损伤阈值的测量

首先测试了经过机械抛光后具有不同表面粗糙度的铝合金表面在激光辐照下的损伤阈值,如图 4 所示。可以看出,不同粗糙度对应的表面损伤阈值变化不大,均在 3.18 J/cm^2 左右。这表明不同粗糙度的机械抛光表面对纳秒激光的吸收特性基本相同,且不同周期的表面波纹对正入射激光的损伤阈值影响不大。通过比较图 4(a)和 4(b)可以发现,表面粗糙度 R_a 对损伤点尺寸随激光通量的变化趋势的影响很小。当 $R_a = 0.2$ 时,损伤点尺寸略大于其他表面粗糙度,但当 R_a 大于 0.2 时,在相同激光通量辐照下,表面损伤光斑尺寸

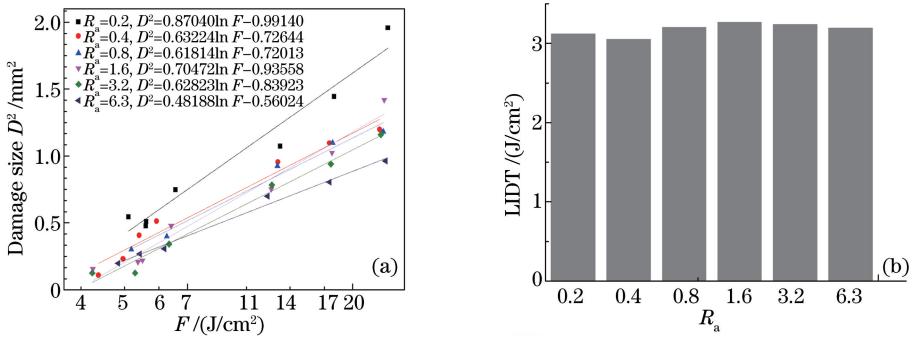


图 4 (a) 激光损伤尺寸与能量密度的关系; (b) 不同 R_a 下的激光损伤阈值

Fig. 4 (a) Relationship between laser-induced damage size and laser fluence; (b) laser-induced damage thresholds under different R_a

基本一致。

对不同表面处理工艺处理后的金属表面进行损伤阈值测试。各种表面处理工艺处理后的样品的损伤点直径与激光能量密度的关系如图 5(a)~(c)所示。基于这些数据,计算得到对应不同表面处理工艺的损伤阈值,如图 5(d)所示。不同厚度化学镀镍的金属表面损伤阈值在 $1.9 \sim 2.4 \text{ J}/\text{cm}^2$ 之间;阳极氧化黑的表面损伤阈值为 $2.26 \text{ J}/\text{cm}^2$;硬质阳极氧化的表面损伤阈值为 $2.34 \text{ J}/\text{cm}^2$;钝化的表面损伤阈值为 $3.67 \text{ J}/\text{cm}^2$;微弧氧化表面的不同厚度氧化层的损伤阈值有少许差异,在 $3.52 \sim 4.22 \text{ J}/\text{cm}^2$ 之间。

当激光通量高于损伤阈值时,损伤点尺寸与激光通量的关系是表征金属表面激光损伤性能重要的参量。由图 5(a)~(c)可知,在相同激光通量(高于损伤阈值)辐照下,厚度为 $10 \mu\text{m}$ 的化学镀镍、 $20 \mu\text{m}$ 的阳极氧化黑和厚度为 $10 \mu\text{m}$ 的微弧氧化对应的损伤点尺寸均比其他处理工艺大,但表面损伤点尺寸与损伤阈值不存在密切联系。由图 5(d)拟合得到的化学镀镍表面的损伤阈值与镍层厚度的关系可知,当激光通量大于损伤阈值时,损伤点尺寸随着镍层厚度的增加而剧烈变化。厚度为 $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的化学镀镍的表面损伤点

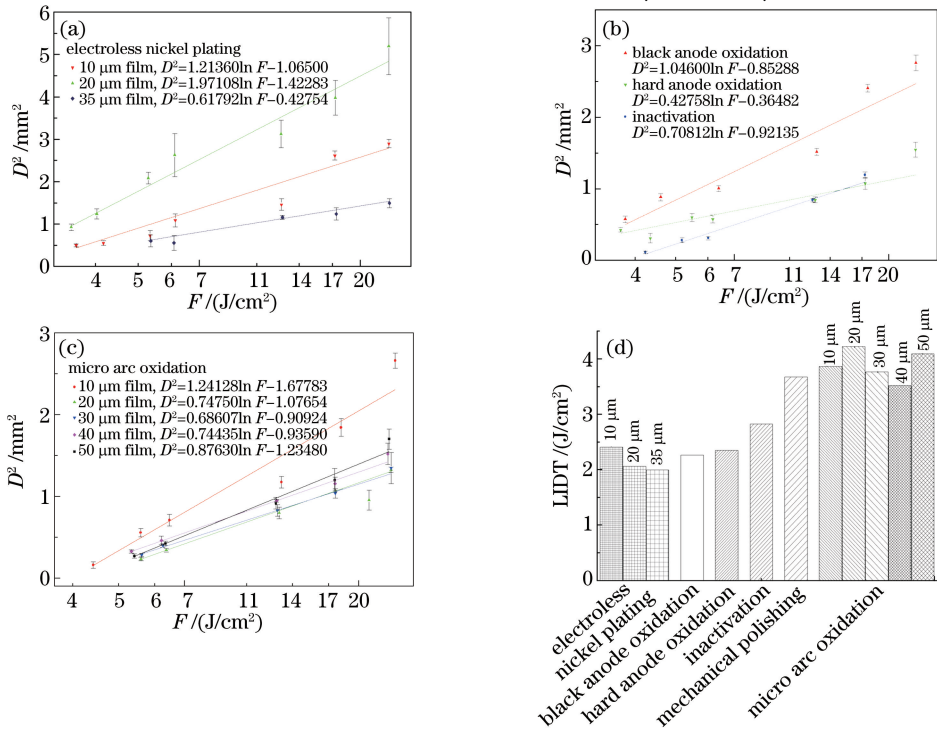


图 5 不同表面处理工艺对应的 (a)(b)(c) 激光损伤尺寸和能量密度的关系与 (d) 激光损伤阈值

Fig. 5 (a)(b)(c) Relationships between laser-induced damage size and laser fluence, and (d) laser-induced damage thresholds under different surface treatment technologies

尺寸大于厚度为 $35\ \mu\text{m}$ 的镍层,而厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 时镍层的损伤点尺寸最大,这可能与镍层的激光能量吸收和热扩散等过程密切相关。对于微弧氧化,表面氧化层厚度大于 $10\ \mu\text{m}$ 时,相同通量的激光脉冲诱致的表面损伤点尺寸相同,而当表面氧化层厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 时,损伤点尺寸较大。这表明,厚度大于 $10\ \mu\text{m}$ 的微弧氧化层激光损伤性能趋于稳定。

3.2 表面损伤形貌

当入射激光能量密度约为 $24\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,经过不同表面处理工艺的金属表面在激光烧蚀下表层均发生了变化,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,化学镀镍的表面损伤最为严重,镀镍膜较厚表面的膜层发生破裂并且有可能脱落,镀镍膜较薄表面的膜层脱落后基底很容易产生损伤。其次是氧化黑,表面微孔结构很容易吸收激光能量,表面损伤较严重,可以很明显地观察到与光斑形状相似的烧蚀斑。硬质阳极氧化的表面损伤阈值较低,与氧化黑的表面损伤阈值差不多,但损伤形貌没有氧化黑的表面那么严重。而经过微弧氧化的金属表面,当氧化膜层厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 时,膜层被烧蚀去除,铝合金基底出现损伤;当氧化膜层厚度较大时,铝合金基底没有损伤,氧化膜层厚度为 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 时对应的损伤形貌之间并没有明显区别。钝化的表面在激光覆盖部分也发生了烧蚀损伤,有效的烧蚀斑尺寸明显小于其他金属表面。

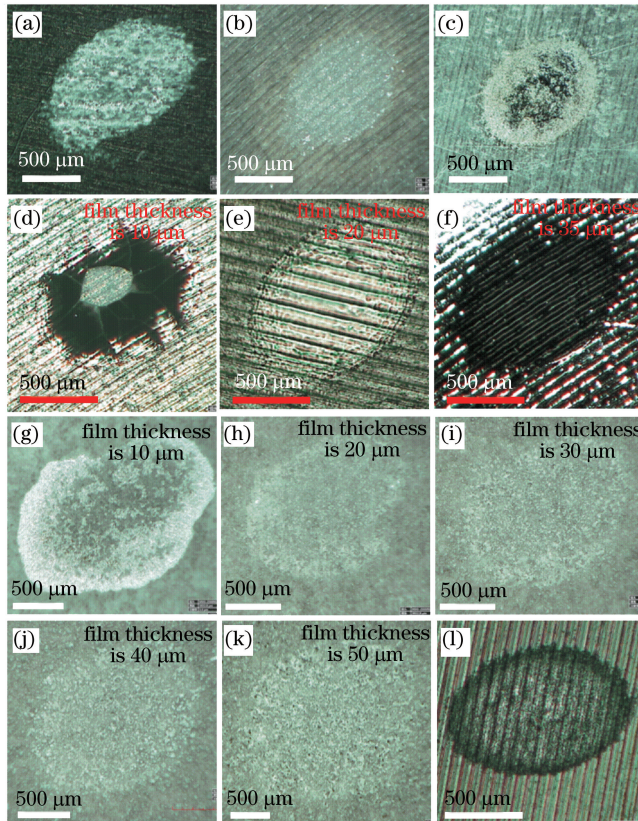


图 6 不同表面处理工艺对应的金属损伤形貌。

(a) 阳极氧化黑; (b) 硬质阳极氧化; (c) 钝化; (d)(e)(f) 化学镀镍; (g)(h)(i)(j)(k) 微弧氧化; (l) 机械抛光

Fig. 6 Laser-induced damage morphologies of metals after different surface treatment technologies.

(a) Black anode oxidation; (b) hard anode oxidation; (c) inactivation; (d)(e)(f) electroless nickel plating;

(g)(h)(i)(j)(k) micro arc oxidation; (l) mechanical polishing

3.3 实验结果分析与结论

金属材料受到激光辐照后,表面吸收激光能量并将其转换为热量,随后通过热传导将热量扩散到材料内部,使得材料内部的温度升高,达到材料熔点发生熔融,如果继续吸收激光能量,材料会产生气化。金属材料表面经过不同工艺的表面处理之后,金属表面的物理性质发生了变化,例如熔点和硬度等,且对激光的吸收率以及热传导率都会发生变化,从而影响了热量的吸收与传递,造成表面的激光损伤阈值和损伤特性发生了

变化。

铝合金的阳极氧化黑、硬质阳极氧化、微弧氧化以及钝化处理都是在合金表面形成一层氧化铝膜,不同的是氧化膜层的硬度、厚度、致密性及其他性质。其中,阳极氧化黑表面比较疏松,有很多微孔结构,不易反射激光,吸收能量较多,容易发生损伤,且微孔结构会吸附污染颗粒不利于污染物的控制。硬质阳极氧化是一种特殊的阳极氧化,它生成的氧化膜约有 50%(体积分数)渗透在铝合金内部,另外 50%附着在铝合金表面,膜层比普通阳极氧化的表面膜层厚,且膜层的孔隙率较低,吸收能量较少,表面硬度和耐磨性较好。所以硬质阳极氧化的表面损伤阈值稍高于阳极氧化黑。但是,这两种阳极氧化的损伤阈值都略低于机械抛光的铝合金的损伤阈值,这两种加工工艺不适用于高功率激光工程中使用的金属件。微弧氧化的表面是一层陶瓷氧化膜,硬度非常高,致密性非常好,熔点(2035℃)较高,所以激光辐照后其吸收的能量较少,不易产生熔融烧蚀,其抗溅射能力较强,损伤阈值高。钝化的表面形成氧分子结构钝化膜,膜层致密、性能稳定,故其损伤阈值较高,抗溅射能力较强。微弧氧化和钝化处理的表面损伤阈值均大于机械抛光表面。化学镀镍的表面是镍膜,镍的熔点比氧化铝低很多,且硬度较低,在 400~700 HV 之间。金属镍表面对 1064 nm 激光的吸收率为 14.88%,而铝合金的只有 5.88%^[14];镍的比热容为 444 J/(kg·K),小于铝的 899 J/(kg·K);镍的热扩散系数为 $23 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,小于铝的 $38 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以在相同能量激光脉冲辐照下,表面镍膜吸收的能量较多,局部温度较高,更容易产生熔融烧蚀,故化学镀镍表面损伤阈值较低。而不同表面粗糙度的机械抛光样品,在相同激光辐照下损伤阈值相差不大,说明粗糙度对金属表面的激光损伤性能影响不大。这是因为光斑直径为 500 μm,而不同粗糙度表面的轮廓高度的算术平均值偏差仅在 0.2~6.3 μm 之间,所以当入射角度为 90°时,表面轮廓高度对激光调制作用的影响不明显。另外,不同表面粗糙度的抛光对铝合金表面材料特性的改变基本相同,抛光处理后的合金对激光的吸收特性基本不变,所以表面粗糙度对铝合金表面损伤阈值的影响较小。由以上分析可知,表面涂层的物理特性,例如致密性、硬度、熔点、吸收系数、比热容和热扩散系数等,均对激光损伤阈值有一定影响,不同表面处理工艺的铝合金表面激光损伤阈值存在较大差异。

对于相同加工工艺,表面膜层厚度不同,损伤阈值也会有一些差异。从图 5(d)可以看出,镀镍层损伤阈值随着厚度的增加而略微下降。因为镍对激光的吸收系数比铝合金高,所以相同能量密度时,镍层越厚,吸收的能量越高,合金越容易损伤。从图 5(a)可知,化学镀镍的表面损伤点尺寸与镍层厚度紧密相关。镍层厚度不同,对激光能量的吸收率就不同,且镍层和铝合金基底之间的热扩散也不同,形成了不同的温度场分布,从而产生了不同尺寸的损伤点。不同厚度氧化层的微弧氧化表面损伤阈值相差不大,而且并无明显规律。表面氧化层的厚度影响着表面对激光能量的吸收和热扩散过程,厚度较小时激光可能透过氧化层到达铝合金基底,同时诱致氧化层和铝合金基底的损伤,如图 6(g)中微弧氧化 10 μm 的损伤形貌所示。氧化层中的热量扩散受到膜层厚度和铝合金基底的影响,损伤横向尺寸较大。当厚度较大时,激光被氧化层完全吸收,激光能量无法到达铝合金基底,能量沉积后的热扩散过程与铝合金基底无关,损伤特性只取决于氧化层性质,所以损伤点尺寸和损伤形貌等规律基本相同,如图 5、6 所示。因此,当表面氧化层厚度为 20 μm 时,金属表面同时具有较高的损伤阈值和较好的激光损伤特性,从而具有较强的抗激光烧蚀溅射能力。总之,相同工艺的不同参数对损伤阈值的影响较小,但高于损伤阈值的激光通量辐照对激光损伤规律会产生较大的影响。

4 结 论

在相同激光辐照下,研究了经过不同表面处理工艺的防锈铝的损伤阈值和形貌。其中钝化和微弧氧化的表面损伤阈值较高,处理后的表面均有致密的氧化膜层,硬度得到很大提高,抗激光损伤能力较强。但是,由于微弧氧化的处理工艺操作复杂、加工成本高,且不适于处理大面积的零件,所以建议选择钝化工艺来处理驱动器内的金属表面,避免杂散激光辐照金属内壁时产生金属污染物,保证较高的洁净度。后续还要对不同金属材料进行激光溅射实验,例如不锈钢、铜等,并比较各种常用材料的抗激光损伤能力以及激光烧蚀溅射特性。

参 考 文 献

- 1 Soileau M J. 40 year retrospective of fundamental mechanisms[C]. SPIE, 2008, 7132: 713201.
- 2 Manenkov A A. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: Understanding after 40-year research[C]. SPIE, 2008, 7132: 713202.
- 3 Miao Xinxiang, Cheng Xiaofeng, Yuan Xiaodong, *et al.* Laser-induced damage of fused silica initiated by Cu contamination particles on surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1740-1744.
苗心向, 程晓锋, 袁晓东, 等. 熔石英表面铜颗粒污染激光诱导损伤[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1740-1744.
- 4 Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Wang Haijun, *et al.* Experiment of laser induced damage threshold for fused silica initiated at thin film contamination of Cu on surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1483-1486.
苗心向, 袁晓东, 王海军, 等. 熔石英表面铜膜污染物诱导损伤实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1483-1486.
- 5 Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Wang Chengcheng, *et al.* Laser induced damage in fused silica contaminated by Al film [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1653-1656.
苗心向, 袁晓东, 王成程, 等. 表面 Al 膜污染物诱导熔石英表面损伤特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1653-1656.
- 6 Wang Libin, Ma Weixin, Ji Lailin, *et al.* Influence of metal particles on damage threshold of fused silica at 3ω [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502004.
王立斌, 马伟新, 季来林, 等. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502004.
- 7 Génin F Y, Michlitsch K, Furr J, *et al.* Laser-induced damage of fused silica at 355 and 1064 nm initiated at aluminum contamination particles on the surface[C]. SPIE, 1997, 2966: 126-138.
- 8 Génin F Y, Kozlowski M R, Brusasco R. Catastrophic failure of contaminated fused silica optics at 355 nm [C]. 2nd Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, Paris, 1997.
- 9 Génin F Y, Rubenchick A M, Burnham A K, *et al.* Thin film contamination effects on laser-induced damage of fused silica surfaces at 355 nm [C]. SPIE, 1999, 3492: 212-218.
- 10 Génin F Y, Feit M D, Kozlowski M R, *et al.* Rear-surface laser damage on 355-nm silica optics owing to Fresnel diffraction on front-surface contamination particles[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3654-3663.
- 11 Chang Hao, Jin Xing, Chen Zhaoyang. Study on optical and thermophysical properties of aluminum under nanosecond laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1114002.
常 浩, 金 星, 陈朝阳. 纳秒激光辐照下铝靶的光学与热物理性质研究[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1114002.
- 12 Han Fengming, Xu Shizhen, Song Wenliang, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets[J]. Chinese J 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.
- 13 An Liansheng. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 226-227.
安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 226-227.
- 14 Xie J, Kar A, Rothenflue J A, *et al.* Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO₂, Nd:YAG and chemical oxygen-iodine lasers[J]. Journal of Laser Applications, 1997, 9(2): 77-85.