

纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究

韩丰明^{1,2} 徐世珍^{1*} 宋文亮^{1,2} 向霞¹ 刘春明¹ 苗心向² 袁晓东²

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054

摘要 针对激光驱动惯性约束聚变(LICF)装置中靶室常用的几种铝合金和不锈钢材料,采用波长为1064 nm、脉宽为8 ns的基频激光进行烧蚀实验,研究了不同激光能量密度下其质量损失同辐照激光脉冲数的关系,测试了烧蚀深度随激光能量密度增长的关系。研究表明,铝合金在激光能量密度大于1.0 J/cm²时有明显烧蚀,激光通量为1.2~5.2 J/cm²时,质量烧蚀速率增长缓慢,平均质量烧蚀速率为2.31±0.89 μg/cm²/shot。铝合金的烧蚀深度随激光能量密度增加而增加,不锈钢的烧蚀深度先增加而后呈下降趋势;铝合金的烧蚀深度明显高于不锈钢的烧蚀深度。基于材料对激光的吸收率明显的不同,分析了其烧蚀机理。该研究对LICF靶室材料的选取及金属的激光打孔、切割等加工有一定的参考意义。

关键词 激光技术; 激光烧蚀; 铝合金; 不锈钢; 烧蚀速率; 烧蚀深度

中图分类号 O434

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0203005

Study of Nanosecond Laser Ablation on Aluminum and Stainless Steel Targets

Han Fengming^{1,2} Xu Shizhen¹ Song Wenliang^{1,2} Xiang Xia¹ Liu Chunming¹
Miao Xinxiang² Yuan Xiaodong²

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China,

Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Nanosecond laser damage of several aluminum and stainless steel are investigated, which materials are commonly used in the target chamber of laser drive inertial confinement fusion (LICF) device. The experimental data on mass removal and ablation depth during 1064 nm, 8 ns fundamental frequency laser ablation are measured. The results show that the aluminum is ablated obviously when the laser fluence is greater than 1.0 J/cm². The ablation rate of aluminum increased slowly, which has an average value of 2.31±0.89 μg/cm²/shot under laser fluence of 1.2~5.2 J/cm². Furthermore, the ablation depth of aluminum increases with the increase of laser fluence, while that of stainless steel increases at first and then decreases. Aluminum alloy's ablation depth is significantly higher than that of stainless steel. The ablation mechanism is discussed. The 1064 nm laser absorption of stainless steel is much higher than that of aluminum, which effects the laser energy deposition processes. This study is very helpful to LICF target chamber materials' selection and laser drilling or cutting of the metals.

Key words laser technique; laser ablation; aluminum alloy; stainless steel; ablation rate; ablation depth

OCIS codes 140.3440; 350.1820; 350.3850

1 引言

激光驱动惯性约束核聚变(LICF)装置在激光打靶的时候,靶室会受到激光束、中子束、X射线、离子束、γ

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(61178018)

作者简介: 韩丰明(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: fengming.han2013@gmail.com

导师简介: 徐世珍(1979—),女,博士,副教授,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: xusz@uestc.edu.cn(通信联系人)

射线、 α 射线、碎片等的辐照或撞击,进而被激发或烧蚀,烧蚀产物会沉积在终端光学组件的屏蔽片上,使屏蔽片在后续激光的作用下发生损伤^[1],最终降低了整个激光装置的输出功率。为了装置的安全、稳定、高效、经济运行,需要对其粒子束辐照进行研究^[2-5]。美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光装置(LMJ)均可能采用间接驱动方式进行激光惯性约束聚变中心点火,因此对靶室材料的激光辐照效应也不容忽视。本文主要探索未转换的基频光(1064 nm)对常用靶室材料(铝合金和不锈钢)的强激光烧蚀作用,拟对靶室材料的选取提供一定的参考。

由于纳秒脉冲激光在激光加工^[6-7]、脉冲激光沉积(PLD)^[8]、激光诱导击穿光谱(LIBS)^[9]、纳米颗粒的制备^[10]等方面有广泛的应用,纳秒激光的烧蚀一直是人们研究的热点之一。特别在铝合金的烧蚀方面,实验研究和理论研究报道也较多^[11-16],但是不锈钢的纳秒激光烧蚀报道较少。过去几十年中,在大量实验和理论研究的基础之上,人们对纳秒激光脉冲烧蚀机制已经有了较为清晰的认识。通常来讲,脉冲激光烧蚀金属及类金属材料时,材料去除主要有4种机制,即正常的蒸发、液态材料移除,正常的沸腾和相爆炸^[14-19]。当激光作用于材料时,材料表面被快速加热、熔化,并且能达到或超过沸点的过热状态,材料从靶材表面蒸发出去。若脉冲能量足够强,材料近表面区域将爆炸性地转化为气态材料和细小材料液滴的混合物,并脱离材料表面,形成相爆炸烧蚀。

本文从研究纳秒激光烧蚀导致材料的质量损失出发,测试了铝合金(AI5083、AI5657和 AI5052)及不锈钢409的质量烧蚀速率同激光能量密度、激光脉冲数的关系;分析了其烧蚀斑形貌,并测试了烧蚀深度同激光能量密度的关系;最后对其烧蚀机制进行了分析讨论。

2 激光烧蚀实验

实验装置示意图如图1所示,主要由激光器、分光劈板、聚焦透镜、三维移动样品台;能量卡计、准直光源、显微物镜、电荷耦合器件(CCD)及显示器等几部分组成。激光器采用调Q的脉冲Nd:YAG激光器,波长为1064 nm、脉宽8 ns、频率5 Hz。经透镜($f=100$ cm)聚焦到样品表面,其焦斑面积约 3.14 mm²。用分析天平(精确到微克)测量样品在激光烧蚀前后的质量。采用Nikon E600W型光学显微镜,及KEYENCE VHX-2000数字显微镜对样片表面进行显微形貌观测和分析。通过Nikon E600W型光学显微镜样品台调焦刻度来测量烧蚀深度。

实验采用的铝合金和不锈钢均为 10 mm \times 10 mm \times 1 mm的方形样片,其材料型号为AI5052、AI5083、AI5657、及不锈钢409,其化学成分如表1、表2所示,部分物理属性如表3所示。样片置于三维移动的样品台上,辐照激光能量密度为 $0.7\sim 5.8$ J/cm²。一定激光能量密度下,每辐照100个脉冲测量一次质量损失。

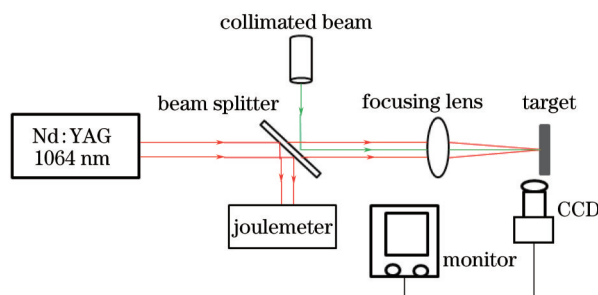


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

表1 不同型号铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of different types of aluminum alloys (mass fraction, %)

No.	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
5052	0.1	0.25	0.4	0.1	2.2~2.8	0.1	0.15~0.35	/	Balance
5083	0.1	0.4	0.4	0.4~1.0	4.0~4.9	0.25	0.05~0.25	0.15	Balance
5657	0.1	0.08	0.1	0.03	0.6~1.0	0.03	/	/	Balance

表2 不锈钢409的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of stainless steel 409 (mass fraction, %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Nb	N	Fe
0.01	0.3	0.023	0.001	0.41	11	0.25	0.17	0.15	0.012	Balance

表3 材料的部分物理参数^[6]

Table 3 Some physical parameters of the material^[6]

No.	Conductive coefficient /($W/m \cdot K$)	Density /(g/cm^3)	Specific heat /($J/kg \cdot K$)	Melting point / $^{\circ}C$	Latent heat of fusion /(J/kg)	Gasification latent heat /(J/kg)
Al5083	201	2.68	900	660	3.9×10^5	1.13×10^7
Stainless steel 409	16	7.74	468	1427	2.47×10^5	6.95×10^6

3 结果与讨论

3.1 质量烧蚀速率

利用分析天平称重的方法,研究了不同激光能量密度作用下,激光烧蚀质量损失同激光作用脉冲数之间的关系,如图2所示。可以看出,3种铝合金材料在不同激光通量下质量损失与脉冲数增加呈线性增加;3种铝合金材料的质量损失呈相同趋势且无明显区别。在能量密度较低时,不锈钢的质量损失明显高于铝合金。

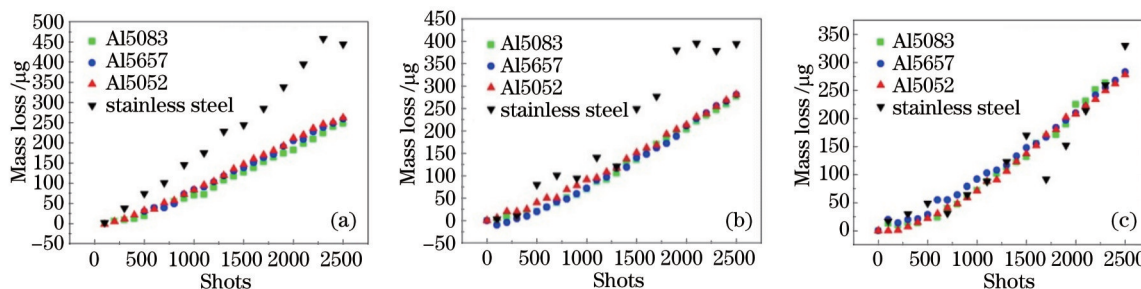


图2 不同激光能量密度下,不同样品质量损失和辐照激光脉冲数的关系。(a) $3.12 J/cm^2$; (b) $4.25 J/cm^2$; (c) $5.21 J/cm^2$

Fig.2 Mass loss of the samples versus irradiated laser pulses number with different laser fluences.

(a) $3.12 J/cm^2$; (b) $4.25 J/cm^2$; (c) $5.21 J/cm^2$

对不同激光能量密度下,500个脉冲作用后的质量损失($3.14 mm^2$)进行了平均处理,得到了单个脉冲及单位面积上的质量损失速率,如图3所示。随激光能量密度增加,铝合金的质量损失速率呈增长趋势;而不锈钢的质量损失速率则先增加后降低。3种铝合金的烧蚀速率相差不大;铝合金在激光通量大于 $1.0 J/cm^2$ 时均有明显烧蚀,激光能量密度为 $1.2 \sim 5.2 J/cm^2$ 时,质量损失随激光能量密度增长缓慢,其平均质量损失速率为 $2.31 \pm 0.89 \mu g/cm^2$ 。在较低通量时($1 \sim 4 J/cm^2$),不锈钢的质量损失速率明显高于铝合金;而在较高通量时($>4 J/cm^2$),不锈钢的质量损失速率低于铝合金。在激光作用下,金属表面会在过热情况下出现熔融或氧

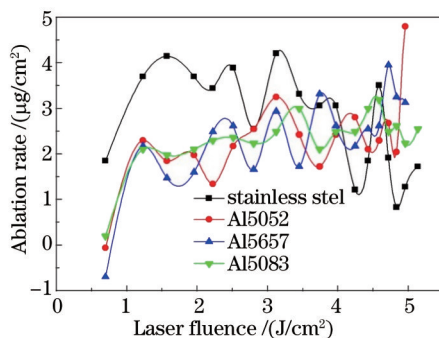


图3 不锈钢和铝合金质量烧蚀速率(单位: $\mu g/cm^2$)和激光能量密度的关系

Fig.3 Ablation rate (unit: $\mu g/cm^2$ /shot) of aluminum alloy and stainless steel versus incident laser fluence

化,对激光造成了反射、散射等,对后续激光能量传输和沉积造成了一定的影响,从而也会对金属的烧蚀深度随脉冲数增加,及烧蚀速率同激光能量的关系的稳定性造成影响。

3.2 烧蚀形貌

铝合金 5083、5052、5657 的烧蚀形貌相差不大,图 4 给出了铝合金 5083 烧蚀形貌的三维图像,图中展示了 1/4 个烧蚀坑的显微形貌图:其激光能量密度分别为 1.23、2.51、3.12、4.96 J/cm²,辐照脉冲数为 500 个。

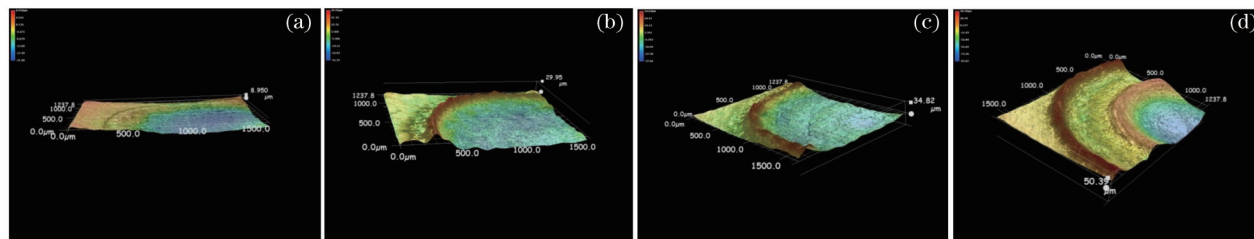


图 4 Al5083 烧蚀坑形貌三维图像。(a) 1.23 J/cm²; (b) 2.51 J/cm²; (c) 3.12 J/cm²; (d) 4.96 J/cm²

Fig.4 Three-dimensional images of ablation crater in Al5083. (a) 1.23 J/cm²; (b) 2.51 J/cm²; (c) 3.12 J/cm²; (d) 4.96 J/cm²

由图 4 可见,随着作用激光通量的增加,铝合金 5083 的烧蚀逐渐增强,深度不断加深,烧蚀坑面积几乎没有扩大。形貌由最初的平缓变成有明显烧蚀坑,并且形成波浪状,这是基于激光的冲击效应,材料表面快速地吸收激光脉冲能量造成热膨胀和巨大的应力梯度,熔融材料迅速蒸发,及高温等离子体膨胀的对材料的反冲压力等,使样品变形,形成波浪状烧蚀坑形貌。烧蚀压力的大小与入射激光的强度、波长、脉冲持续时间和靶材料性质有关。文献[21]推导出烧蚀压力的定标关系 $P_m = 0.43M^{7/16} I^{3/4} \lambda^{1/4} Z^{3/8} \tau^{1/8} (Z+f)^{3/16}$ Pa。激光功率密度在 10⁸ W/cm² 量级时,产生的烧蚀压力约在 10³ MPa 量级。而在室温时,铝合金 5083 的抗拉强度为 315 MPa,屈服强度为 230 MPa;不锈钢 409 最大抗拉强度为 427 MPa,屈服度为 238 MPa。而随着温度升高,材料的抗拉强度和屈服度就有较大幅度的下降。所以,气化烧蚀压力对材料的变形和坑的形状有很大影响。由于实验采用的激光束的光强在空间近高斯分布,中心具有更高的能量,光束能量与激光辐照产生的等离子体等耦合增强,更加剧了中心的能量沉积。随着激光能量的增加,烧蚀中心区域呈凹陷烧蚀深坑。

对于不锈钢,其烧蚀形貌与铝合金有较大的不同,如图 5 所示,是铝合金 5083 和不锈钢在激光能量密度为 5.2 J/cm² 时的烧蚀形貌对比。

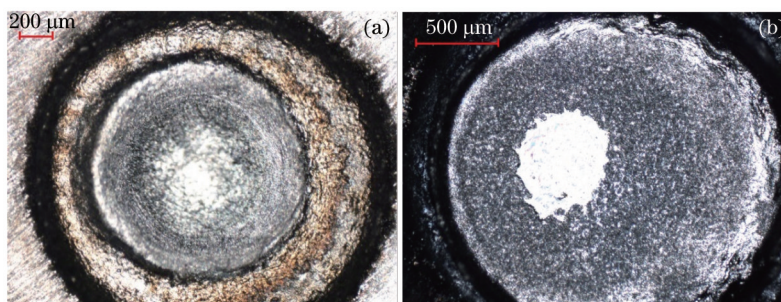


图 5 相同功率密度下烧蚀形貌对比。(a) 铝合金 5083; (b) 不锈钢 409

Fig.5 Images of ablation crater under the same laser power density. (a) Aluminium alloy 5083; (b) stainless steel 409

图 6 为不锈钢烧蚀坑三维形貌随激光能量密度增加的变化情况,由图像来看,不锈钢烧蚀坑的底部平坦,没有明显的凹陷,且形貌无波浪状。在激光通量增加到 5.14 J/cm² 不锈钢底部有液态物产生,如图 6(d) 所示,这可能由于不锈钢在激光作用下达到熔点,熔化后产物凝聚在烧蚀坑底部所致。

3.3 烧蚀深度

利用 Nikon E600W 型光学显微镜直接观测各激光能量密度作用下,作用 500 发次后的烧蚀坑中心深度,其结果如图 7 所示。在测试时,首先在样品完好表面聚焦并记录其位置,然后缓慢聚焦到中心底部并记录其高度位置,最终获得坑中心深度,重复测量多次,取其平均值。3 种铝合金烧蚀深度相差不大,图 7 给出了铝合金 5083 的测试结果。随着激光通量的增加,在激光通量 1~3 J/cm² 时,铝合金 5083 的烧蚀深度较为稳定,维持在 20~30 μm;在大于 3 J/cm² 后,烧蚀深度迅速增大,由于发生相爆炸。而不锈钢的烧蚀深度随激光

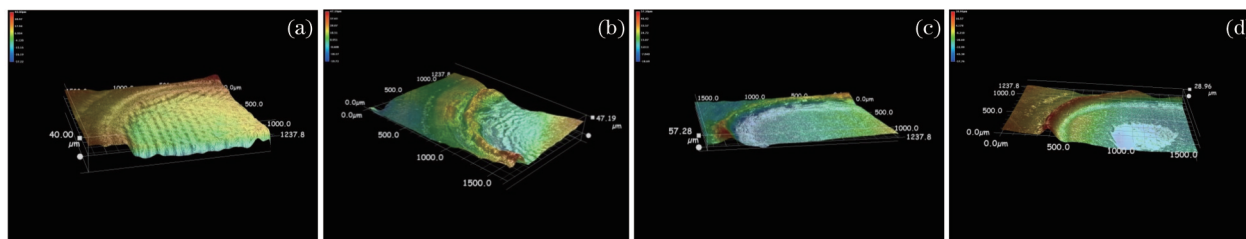


图6 不锈钢在不同激光能量密度下的烧蚀坑形貌图。(a) 0.7 J/cm²; (b) 1.57 J/cm²; (c) 4.59 J/cm²; (d) 5.21 J/cm²

Fig.6 Images of ablation crater in stainless steel under different laser fluences. (a) 0.7 J/cm²; (b) 1.57 J/cm²; (c) 4.59 J/cm²; (d) 5.21 J/cm²

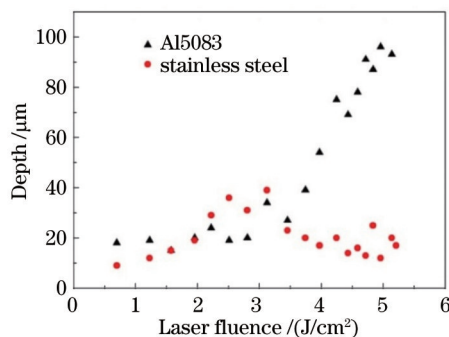


图7 不锈钢和铝合金(Al5083)烧蚀深度(500个脉冲)随激光能量密度的关系

Fig.7 Ablation depth (500 pulses) of aluminum alloy and stainless steel versus incident laser fluence

能量密度的增加则先逐渐增加而后又逐渐减少。

3.4 分析讨论

关于纳秒激光脉冲对材料的烧蚀,不同激光能量密度下有不同的烧蚀机制。一般有3个阶段:熔融气化、相爆炸、等离子体屏蔽等。激光能量较低时,一般发生熔融气化等。对于相爆炸的研究较多^[13-19],相爆炸以沸腾和喷溅的形式造成材料的烧蚀,其烧蚀速率较第一阶段快得多,常伴随微米尺度的喷溅物。而后由于激光等离子屏蔽作用将阻碍激光能量进一步沉积到金属等材料里面,这样一来,其烧蚀速率及烧蚀深度可能会降低。由于不同金属对不同波长激光的吸收率不同,而激光波长^[15]、激光辐照过程(比如双脉冲激光辐照)^[17],及烧蚀环境(水浴或真空)^[13]等也会影响激光能量的沉积过程,从而影响到烧蚀的速率及烧蚀深度等。为此,主要分析铝合金和不锈钢对 1064 nm 激光的吸收率及其对烧蚀特性的影响。

金属电阻率对激光的吸收有重要的贡献,随着温度的增加,金属的电阻率变大,对激光的吸收也会增强。金属熔化时,电阻率会突跃增加,导致在熔点处吸收率的陡升。通常用 Hagen-Rubens 公式计算激光吸收率随电阻率的关系,对于 1064 nm 的 Nd:YAG 激光,金属的吸收率^[6-7]:

$$A(T)_{\text{YAG}} = 354.67 \sqrt{\rho(T)}, \quad (1)$$

式中 A 表示吸收率, $\rho(T)$ 表示金属电阻率(单位为 $\Omega \cdot \text{m}$),它是随温度变化的函数。电阻率随温度的变化如下:

$$\rho(T) = 10^{-8}(a + bT), \quad (2)$$

对于铝合金^[7],

$$\rho(T) = 10^{-8}[-1.0 + 1.25 \times 10^{-2}(T + 273)], 0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 660 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

$$\rho(T) = 10^{-8}[10.7 + 1.45 \times 10^{-2}(T + 273)], 660 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

对于不锈钢,

$$\rho(T) = 10^{-8}[60 + 5 \times 10^{-4}(T + 273)], 0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 1427 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

根据(1)~(5)式,得到铝合金和不锈钢对 1064 nm 的 Nd:YAG 激光吸收率和温度之间的关系,如图 8 所示。金属材料受到激光辐照时,金属表面吸收激光能量并转变为热量,然后通过热传递将热量向材料内部转移,使材料温度上升,当材料的激光辐照区域温度持续升高,直至达到熔点,材料将发生熔融,温度继续升高,进而产生气化,并伴随向外喷溅物质。从图 8 可以看出,不锈钢比铝合金具有更高的吸收率,导致不锈钢能吸收更多的激光能量。根据表 3,不锈钢的比热容小于铝合金,而且其熔化潜热和气化潜热又低于铝合

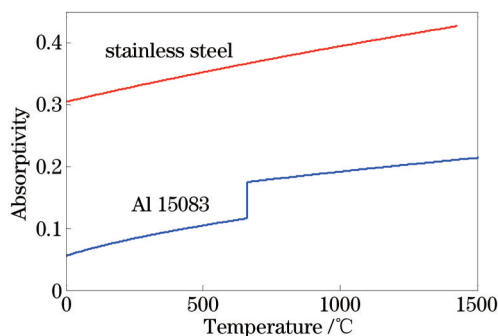


图8 不锈钢和铝合金5083的吸收率与温度的关系

Fig.8 Absorptivity of stainless steel and Al 5083 as a function of temperature

金,这使不锈钢的温度升高快于铝合金,而且不锈钢密度大于铝合金,所以导致在激光通量为 $1\sim 4\text{ J/cm}^2$,即在激光峰值功率密度为 $1.25\times 10^8\sim 5\times 10^8\text{ W/cm}^2$ 时,不锈钢的质量烧蚀速率大于铝合金。

铝合金的热传导系数 $201\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 远大于不锈钢 $16\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ^[16],所以在吸收激光能量后,向材料内部热传递时,铝合金更能将激光能量扩散开,这就导致铝合金具有比不锈钢更深的烧蚀深度,烧蚀形貌和激光能量的分布吻合较好(高斯型)。而不锈钢由于热传导系数低,所以热量主要集中在激光的中心区域,扩散较小,所以烧蚀坑形貌较扁平。

随着激光通量的增加或者发次的提高,材料温度不断升高,铝合金在 $660\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时达到熔点,吸收率突变升高。而铝合金的烧蚀坑为中心凹陷,这就更利于激光的多次反射,增大了激光的吸收率。由图6可见,铝合金烧蚀发生相爆炸的激光能量密度比不锈钢的要高。在激光能量密度大于 3.0 J/cm^2 (激光功率密度约大于 $4\times 10^8\text{ W/cm}^2$)后,相爆炸作用导致铝合金烧蚀深度迅速增大,该结果与文献[17]报道的相吻合。由于不锈钢对 1064 nm 的激光吸收率比铝合金的大得多,随激光能量的增加,金属表面及近表面空气层将吸收激光能量产生大量的等离子体,由于等离子屏蔽作用,阻碍了激光能量的沉积,使得质量烧蚀率及烧蚀深度在激光通量较大时又呈下降趋势。在激光能量较弱的情况下,等离子体屏蔽效应较弱,但是随着激光能量的增大,等离子体屏蔽效应越来越明显。由于纳秒激光烧蚀是基于对激光的热吸收和热效应为主,材料的热物理性能及机械力学性能也会对烧蚀速率和形貌等造成影响。

4 结 论

研究了 1064 nm 的Nd:YAG纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性。由于铝合金和不锈钢对激光的吸收率不同,及其材料物理性质不同,表现出了相同激光能量密度下,不同的质量烧蚀速率和烧蚀深度,其烧蚀形貌也不尽相同。铝合金的烧蚀坑中心凹陷,且中心区域微观形貌成网状结构。不锈钢的烧蚀坑整体较为平坦,底部有熔化的不锈钢凝聚。在一定的激光能量密度作用下,质量烧蚀速率随激光发次增加成线性增长。铝合金在激光通量大于 3.0 J/cm^2 时,由于相爆炸作用导致铝合金烧蚀深度迅速增大。而在较高激光能量密度下,由于等离子屏蔽作用,阻碍了激光能量的沉积,使得不锈钢的质量烧蚀率及烧蚀深度在激光通量较大时复又成下降趋势。该研究有利于加深对金属材料的纳秒激光烧蚀特性的认识,而且对LICF靶室材料的选取及金属的激光打孔、切割等加工有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Latkowski J F. Chamber design for the laser inertial fusion energy (LIFE) engine[J]. Fusion Science and Technology, 2011, 60(1): 54-60.
- 2 Eder D C, Anderson A T, Braun D G, *et al.*. Ablation of NIF targets and diagnostic components by high-power lasers and X rays from high-temperature plasmas[C]. High Power Laser Ablation, International Society for Optics and Photonics, 2000: 86-96.
- 3 Anderson A T, Peterson P F. Experimental methods for measuring X-ray ablation response of surfaces[J]. Experimental Heat Transfer an International Journal, 1997, 10(1): 51-65.
- 4 Schirrmann D, Bianchi L, Courchinoux R, *et al.*. LMJ target area design and engineering physics inside the LMJ target chamber[C]. Third

- International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, International Society for Optics and Photonics, 1999: 710–717.
- 5 Marshall C D, Speth J A, Deloach L D, *et al.*. Penetrating radiation impact on NIF final optic components[C]. Second International Conference on Solid State Lasers for Application to ICF, International Society for Optics and Photonics, 1997: 343–363.
- 6 Xie J, Kar A, Rothenflue J A, *et al.*. Comparative studies of metal cutting with high-power lasers[C]. XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference, International Society for Optics and Photonics, 1997: 764–767.
- 7 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.
- 8 Abdellaoui N, Pillonnet A, Berndt J, *et al.*. Growth process of nanosized aluminum thin films by pulsed laser deposition for fluorescence enhancement[J]. Nanotechnology, 2015, 26(11): 115604.
- 9 Gao Xun, Shao Yan, Du Chuang, *et al.*. Pre-ablation laser parameters effect on the spectral enhancement of double pulsed laser induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0815003.
高 勋, 邵 妍, 杜 闯, 等. 预烧蚀激光参数对双脉冲激光诱导击穿光谱增强的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0815003.
- 10 Kumar B, Thareja R K. Synthesis of nanoparticles in laser ablation of aluminum in liquid[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(6): 064906.
- 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 Zhang Pengbo, Qin Ying. Two-dimensional numerical simulation of laser-ablation of aluminum material by nanosecond laser pulse[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 7121–7126.
张朋波, 秦 颖. 纳秒激光烧蚀铝材料的二维数值模拟[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7121–7126.
- 13 Mahdiah M H, Nikbakht M, Moghadam Z E, *et al.*. Crater geometry characterization of Al targets irradiated by single pulse and pulse trains of Nd:YAG laser in ambient air and water[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(6): 1778–1783.
- 14 Porneala C, Willis D A. Observation of nanosecond laser-induced phase explosion in aluminum[J]. Applied physics letters, 2006, 89(21): 211121.
- 15 Stafe M, Vladoiu I, Popescu I. Impact of the laser wavelength and fluence on the ablation rate of aluminium[J]. Open Physics, 2008, 6(2): 327–331.
- 16 Fang K F. Handbook of Engineering Materials[M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2002: 580–585.
- 17 Jafarabadi M A, Mahdiah M H. Investigation of phase explosion in aluminum induced by nanosecond double pulse technique[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 263–269.
- 18 Bulgakova N M, Bulgakov A V. Pulsed laser ablation of solids: Transition from normal vaporization to phase explosion[J]. Applied Physics A, 2001, 73(2): 199–208.
- 19 Kelly R, Miotello A. Comments on explosive mechanisms of laser sputtering[J]. Applied Surface Science, 1996, 96: 205–215.
- 20 Fishburn J M, Withford M J, Coutts D W, *et al.*. Method for determination of the volume of material ejected as molten droplets during visible nanosecond ablation[J]. Applied Optics, 2004, 43(35): 6473–6476.
- 21 Zhang J Q. Analytic research of laser-generated plasma parameters[J]. Chinese J Lasers, 1995, B4(4): 323, 332–342.

栏目编辑: 张浩佳