



高温合金不同脉宽超快激光作用下多脉冲去除阈值

高 云¹, 杨泽南², 宋成伟³, 张远航³, 张 健³, 张清华³, 刘民才³, 李亚国¹

(1. 成都精密光学工程研究中心, 成都 610041; 2. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095; 3. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 实验研究了激光脉冲宽度和脉冲个数对镍基高温合金材料去除阈值的影响, 分别在 290 fs, 1 ps 和 7 ps 脉宽的激光下, 使用 1, 10, 50, 100, 300, 500 和 1000 个不同能量的激光脉冲辐照高温合金样品表面。实验结果表明, 烧蚀坑尺寸会随脉冲数的增加而增加, 而脉冲宽度的增加会加大脉冲个数对烧蚀坑直径的影响。通过烧蚀坑直径的平方值与激光脉冲能量之间存在的对数关系, 得到了不同脉冲宽度下镍基高温合金的多脉冲材料阈值。3 种不同脉宽下的高温合金多脉冲去除阈值都存在显著的累积效应。根据去除阈值计算得到 290 fs, 1 ps 和 7 ps 脉宽下的累积效应系数分别为 0.88, 0.86 和 0.78。

关键词: 超快激光; 高温合金; 多脉冲烧蚀; 去除阈值; 累积效应

中图分类号: V261.8

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210341

Multi-pulses ablation threshold of Ni-based superalloy irradiated by ultrafast laser with different pulse duration

Gao Yun¹, Yang Zenan², Song Chengwei³, Zhang Yuanhang³, Zhang Jian³,
Zhang Qinghua³, Liu Mincai³, Li Yaguo¹

(1. Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China;

2. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The effects of the laser pulse duration and the number of pulses on the ablation threshold of Ni-based superalloy were experimentally investigated. In this experiment, Ni-based superalloy samples were irradiated by 1, 10, 50, 100, 300, 500 and 1000 laser pulses with different pulse duration, respectively, and pulse duration 290 fs, 1 ps and 7 ps were explored. The diameter of ablation holes expands with the increase of laser pulse and the effect of pulse number on the diameter of ablation holes increases with the pulse duration from the experiments. By analyzing the relationship between the diameter of ablation holes and laser pulse energy, multi-pulse ablation threshold of Ni-based superalloy irradiated by ultrafast laser with different pulse duration can be obtained. No matter what the pulse duration of the laser was, the incubation effects of multi-pulse irradiation on the surface of the superalloy were significant. And the incubation coefficient for the thresholds calculated by diameter respectively in 290 fs, 1 ps, and 7 ps is fitted to be 0.88, 0.86 and 0.78.

Key words: ultrafast laser, superalloy, multi-pulses irradiation, ablation threshold, incubation effects

高温合金是制造航空发动机涡轮叶片材料, 由于涡轮叶片长期工作在高温环境中, 其表面通常会进行微孔加工, 从而提供高温保护^[1-2]。采用传统的长脉冲激光进行微孔加工, 通常会出现重铸层和微裂纹等激光诱导缺陷, 这些缺陷会对高温部件的疲劳时间产生不利影响^[3-4]。相比传统的长脉冲激光加工, 超快激光加工有很大的优势。因为超快激光具有超短脉冲宽度、极高峰值强度和极小热影响区域的特点, 可以实现对材料的高效率、高质量的加工^[5-8]。

* 收稿日期: 2021-08-04; 修订日期: 2022-01-11

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金项目(CX2019025); 中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金项目(LFRC-PD012)

联系方式: 高 云, 2273792187@qq.com。

通信作者: 李亚国, yargolee@163.com。

关于超快激光在高温合金上的微孔加工工艺已有研究,但只有少数报道中能加工出较高质量的微孔^[9-11]。为了利用超快激光在高温合金上得到更高质量的微孔,需要了解高温合金在超快激光作用下的材料去除特性。目前,已有大量文献报道了超快激光对纯金属和部分常见合金作用的材料去除特性研究,如铜、铁、不锈钢和钛合金等^[12-15]。S. E. Kirkwood 等人在中心波长为 800 nm、脉宽为 130 fs 的激光下,对金属铜的烧蚀特性进行了研究,并根据烧蚀坑直径的平方值与激光能量成对数关系,得出金属铜的单脉冲去除阈值为 $(1.06 \pm 0.12) \text{ J/cm}^2$ ^[12]。F. D. Niso 研究了 650 fs 和 10 ps 的高频率超快激光下不锈钢的材料去除特性,对多脉冲的材料去除阈值进行了估算,并进一步分析了重复频率对累积效应的影响;结果表明,当重复频率低于 600 kHz 时,累积效应会降低,而在较高的重复频率下,不管脉冲持续时间长短,累积效应都很明显^[14]。

关于超快激光对高温合金的材料去除特性的相关研究并不多,且大多是在单一脉宽下的去除阈值探究^[16-18]。Q. Feng 等人利用波长为 780 nm、脉宽为 150 fs、频率为 1 kHz 的飞秒激光测定了单晶高温合金单脉冲去除阈值为 $(332 \pm 14) \text{ mJ/cm}^2$ ^[16]。N. G. Semaltianos 等人研究了中心波长为 775 nm、脉宽为 180 fs、频率为 1 kHz 的飞秒激光作用下的镍基高温合金(C263)的烧蚀特性。并根据实验,测量了单脉冲去除阈值为 $(0.26 \pm 0.03) \text{ J/cm}^2$, 累积参数 $\zeta = 0.72 \pm 0.03$ ^[17]。

本文主要探究了超快激光脉宽和脉冲数对高温合金去除阈值的影响。利用中心波长为 $(1028 \pm 5) \text{ nm}$ 、重复频率为 100 Hz 的超快激光,分别探究了 290 fs, 1 ps 和 7 ps 脉宽下,高温合金在 1, 10, 50, 100, 300, 500 和 1000 个激光脉冲作用后的去除特性。分析了激光脉宽和脉冲数对样品表面在激光脉冲辐照后产生的烧蚀坑大小的影响。并根据烧蚀坑直径的平方值和脉冲能量之间的存在对数关系,计算了高温合金在不同脉宽下的多脉冲去除阈值。并根据脉冲个数和去除阈值的关系,获得了不同脉宽下的累积效应系数。

1 实 验

1.1 样品准备

实验中使用的合金样品尺寸为 $15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 样品的各元素组成如表 1 所示。

为了更好地观察超短脉冲激光在样品表面上形成的烧蚀坑形貌,使用粒径为 $9 \mu\text{m}$ 的金刚石研磨膏对合金样品表面进行磨抛。由光学粗糙度仪(Nano Cam SQ, 4D Technology, USA)测得磨抛后的样品表面粗糙度 R_a 从 282.25 nm 降到了 43.84 nm , 如图 1 所示。

1.2 实验装置和方法

实验中使用二极管泵浦 Yb:KGW 超快激光器(PHAROS, Light Conversion, Lithuania)产生的超快激光对合金样品进行加工。该激光器可以输出脉宽在 $290 \sim 10\,000 \text{ fs}$ 内

表 1 实验中使用的合金样品的元素组成

Table 1 Elemental composition of Ni-based superalloy sample

element	atom fraction/%
Ni	50.08
C	24.68
Al	8.76
Co	7.45
Cr	3.83
Si	3.04
O	1.58
Mo	0.58

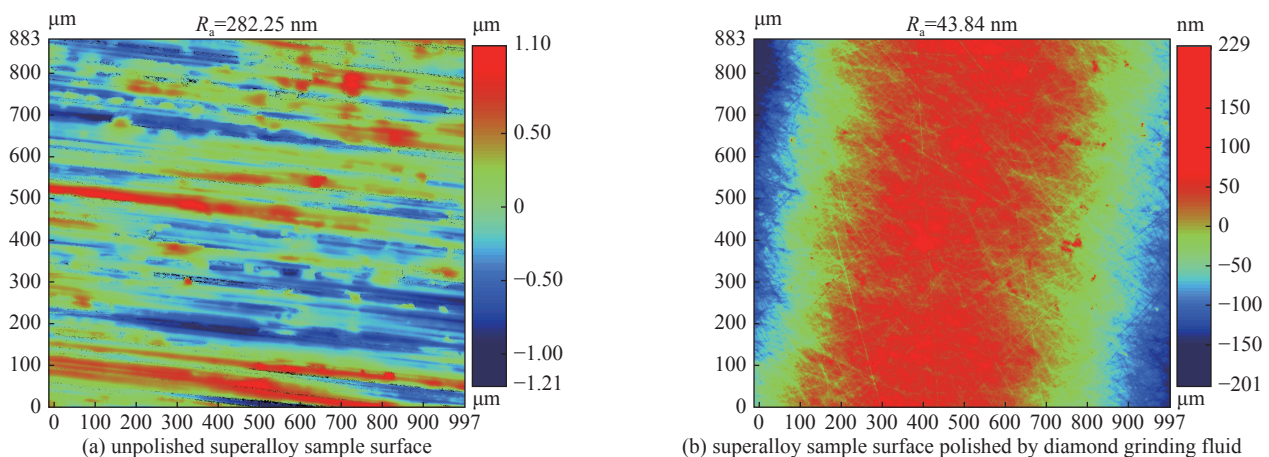


Fig. 1 Surface roughness test results of superalloy samples

图 1 高温合金样品表面磨抛前后的粗糙度测试结果

可调, 频率在 0.001~200 kHz 内可调, 中心波长为 (1028 ± 5) nm 的超短脉冲激光, 最大输出功率为 20 W。实验中使用的激光脉冲频率为 100 Hz, 实验装置如图 2 所示。从超快激光器输出的线偏振激光, 经过放大倍数为 3× 的扩束镜 (Edmund, USA) 放大后进入扫描振镜系统 (Scanlab, Germany), 振镜系统所使用场镜是焦距为 163.5 mm 的 F- θ 镜。放置在扫描振镜系统入口前的光阑 ($\phi=8$ mm) 是用于除去光束传播过程中产生的杂散光。高温合金样品置于激光焦点处, 由三维位移平台控制, 焦点处的光斑半径理论计算值约 16 μm 。超快激光器、光学机械开关和扫描振镜系统均由电脑控制软件操控。

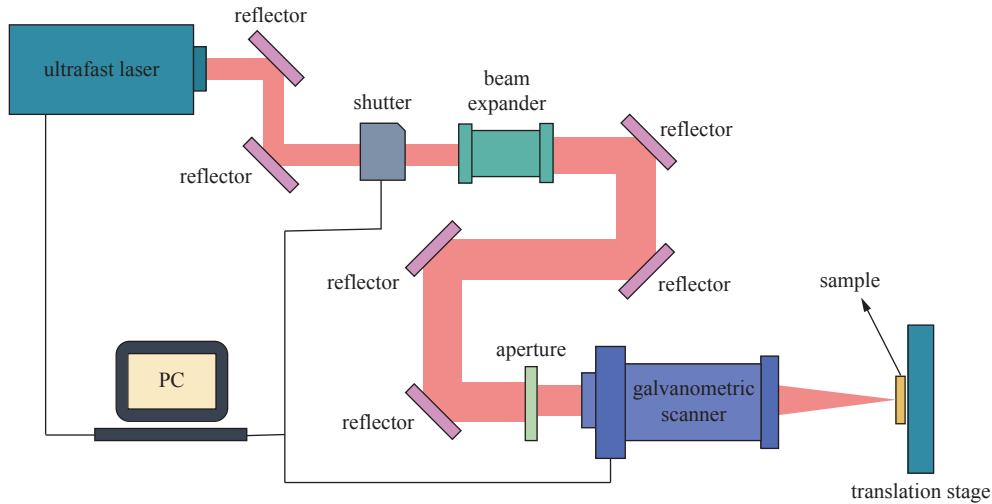


Fig. 2 Schematic diagram of ultrashort pulse laser processing system

图 2 超快脉冲激光加工系统示意图

为了探究超快激光的脉宽、能量和脉冲数对高温合金去除阈值的影响, 实验中使用光学机械开关 (Thorlabs, USA) 控制加工的脉冲数量。本实验中的变量是脉冲宽度 (290, 1000, 7000 fs)、脉冲能量 (1.91, 3.80, 5.90, 9.42, 16.08, 26.65 μJ) 和脉冲个数 (1, 10, 50, 100, 300, 500, 1000), 根据这些参数利用上述的超短脉冲加工系统进行了全因素实验。实验后, 使用 150 倍的激光共聚焦显微镜 (Keyence, Japan) 观察高温合金样品表面的烧蚀坑形貌, 并以最大内接圆的直径来标定烧蚀坑的大小。

2 实验结果和分析

2.1 激光脉宽、能量和脉冲个数对烧蚀坑形貌的影响

在不同脉宽、脉冲能量和脉冲数的脉冲激光辐照下, 高温合金样品表面会产生不同尺寸的烧蚀坑。图 3 是脉冲宽度为 290 fs、脉冲数为 100 时, 不同脉冲能量的激光辐照后的部分烧蚀坑形貌。从图 3 可以看出, 脉冲能量的增加会使烧蚀坑直径变大。图 3(c) 的烧蚀坑中心出现了不规则凸起结构, 是由相爆炸引起的^[19-20]。

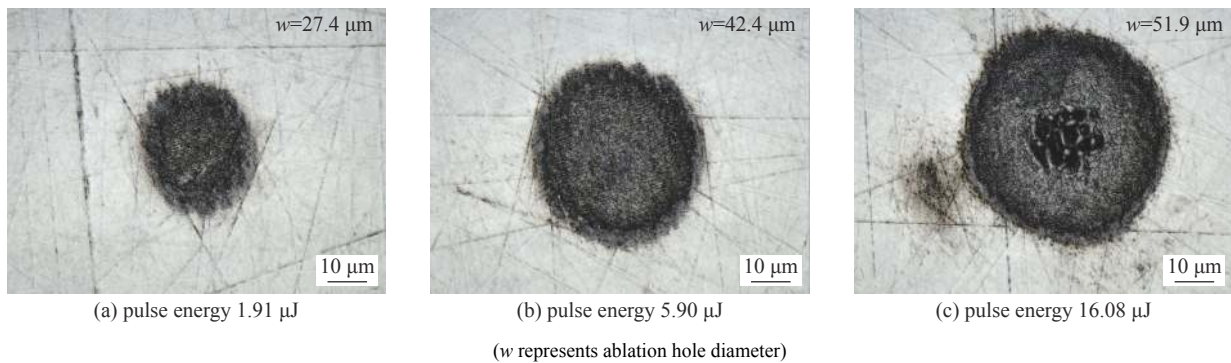


Fig. 3 Morphologies of ablation holes irradiated by 100 laser pulses with a pulse width 290 fs at different pulse energy

图 3 脉宽为 290 fs 时, 100 个不同脉冲能量的激光脉冲辐照后的烧蚀坑形貌

为了进一步探究脉宽和脉冲个数对烧蚀坑大小的影响, 绘制了不同脉宽和脉冲数下, 高温合金表面的烧蚀坑直径与激光脉冲能量的关系, 如图 4 所示。当脉冲个数和脉宽一定, 脉冲能量低于 5.90 μJ 时, 烧蚀坑直径随脉冲能量变化的幅度较大; 脉冲能量超过 5.90 μJ 时, 烧蚀坑直径随脉冲能量变化的幅度逐渐减小。当脉冲能量和脉宽

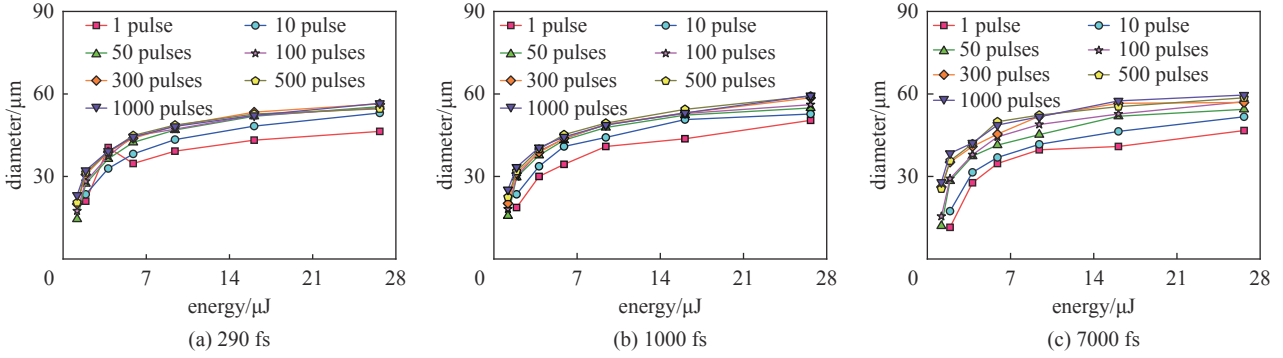


Fig. 4 Curves of ablation hole diameter vs laser energy for the superalloy surface after the irradiation of ultrafast laser with different pulse duration
图 4 高温合金表面在不同脉宽的超快激光作用下形成的烧蚀坑直径与激光能量的关系曲线

一定时, 烧蚀坑直径在前 100 个脉冲内随脉冲个数变化的幅度较大; 当脉冲个数超过 100 时, 烧蚀坑直径随脉冲个数变化的幅度逐渐减小。由图 4 可以看出, 脉冲宽度的增加会加大脉冲个数对烧蚀坑直径的影响, 当脉冲宽度由 290 fs 变化到 7000 fs 时, 烧蚀坑直径随脉冲个数的变化范围增大大约 50%。

2.2 去除阈值

实验中使用的激光器所输出的激光束是高斯光束, 其束腰位置沿传播方向横截面的能量分布表达式为^[21]

$$F(r) = F_0^{\text{pk}} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

$$F_0^{\text{pk}} = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2} \quad (2)$$

式中: ω_0 是按照光强降为光强峰值的 $1/e^2$ 定义的光斑半径; E_p 是激光的单脉冲能量; F_0^{pk} 是峰值能量密度。

由高斯型激光束作用后的烧蚀坑直径与去除阈值的关系为^[21]

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln(E_p/E_{\text{th}}) = 2\omega_0^2 \ln(F_0^{\text{pk}}/F_{\text{th}}) \quad (3)$$

式中: D 是烧蚀坑直径; E_{th} , F_{th} 是材料的去除阈值。

根据式(3)中烧蚀坑直径的平方值和脉冲能量之间的关系, 利用最小二乘法对实验结果进行曲线拟合, 其结果如图 5 所示。结合式(3)和图 5, 得到 ω_0 约为 21 μm , 比理论计算值 16 μm 稍大。

根据图 5 和式(3)可以获得不同脉宽激光作用下的高温合金的多脉冲去除阈值, 如表 2 所示。在 290, 1000 和

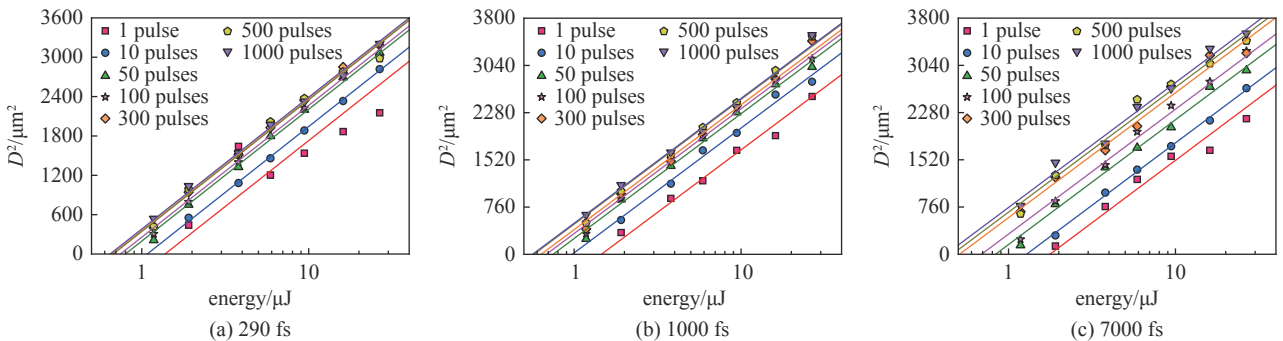


Fig. 5 Curves of square of ablation hole diameter vs laser energy for the superalloy surface irradiated by ultrafast laser with different pulse duration
图 5 高温合金表面在不同脉宽的超快激光作用下形成的烧蚀坑直径的平方值与激光能量的关系曲线

表 2 不同脉宽的脉冲激光作用下的高温合金的多脉冲去除阈值

Table 2 Multi-pulse ablation thresholds of Ni-based superalloy irradiated by ultrafast lasers with different pulse durations

pulse duration/fs	material removal threshold/(J·cm ⁻²)						
	1	10	50	100	300	500	1000
290	0.101	0.079	0.058	0.054	0.049	0.049	0.047
1000	0.106	0.071	0.055	0.050	0.046	0.042	0.042
7000	0.129	0.094	0.061	0.050	0.037	0.034	0.031

7000 fs 脉宽的激光辐照下, 高温合金的去除阈值均随脉冲个数的增加而减小。在前 100 个脉冲内, 高温合金的去除阈值随脉冲个数增加的变化幅度较大, 下降了约 50%。当激光脉冲数超过 100 个脉冲后, 高温合金的去除阈值随脉冲数增加的变化幅度很小, 趋于稳定值。该稳定值和激光脉宽有关, 290, 1000 和 7000 fs 分别对应 0.047, 0.042 和 0.031 J/cm²。

由表 2 可知, 脉宽也影响高温合金的去除阈值。当脉冲数低于 100 时, 脉宽越小, 去除阈值越低。从双温方程理论出发, 脉宽越窄, 电子温度会在极短的时间内升高, 并且在短时间内将能量耦合到晶格中, 使材料更容易发生相变。当脉冲数高于 100 时, 脉宽越宽, 高温合金去除阈值反而更小。皮秒量级的激光脉冲与高温合金样品的作用时间更长, 根据双温方程理论, 电子和晶格的耦合时间更长, 随脉冲数的增加, 晶格温度逐渐累积上升, 从而使脉宽越宽的多脉冲作用下的材料去除阈值更小^[22-23]。

2.3 累积效应

去除阈值随脉冲数在前 100 个脉冲内的变化非常大, 然后在随后的激光脉冲中变小, 当脉冲数达到一定值时 (≥ 500), 阈值几乎保持不变, 这种变化可以用累积效应来描述。累积效应描述为^[14, 24]

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{\xi-1} \quad (4)$$

式中: N 是脉冲数; ξ 是累积效应系数; $F_{th}(1)$ 是单脉冲下的去除阈值; $F_{th}(N)$ 是 N 个脉冲下的去除阈值。式(4)也可以写成

$$\ln(NF_{th}(N)/F_{th}(1)) = \xi \ln(N) \quad (5)$$

根据式(4)、式(5)对表 2 中的计算结果进行曲线拟合, 得到高温合金去除阈值和脉冲个数的关系曲线图, 如图 6 所示。

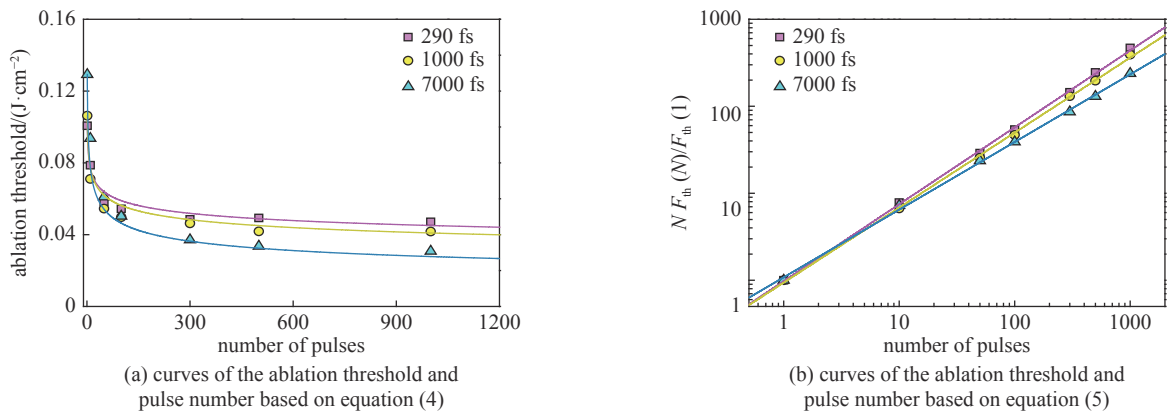


Fig. 6 Curves of the ablation threshold vs number of pulses

图 6 不同脉宽下的高温合金去除阈值和脉冲数的关系曲线

从图 6(a)中可以看出, 脉宽越宽高温合金随脉冲数变化的去除阈值趋于稳定值的速度越慢。当脉冲数增加到一定数值 (≥ 500) 时, 脉宽越宽对应的高温合金的去除阈值越低。因为脉宽变宽后, 单个激光脉冲与高温合金样品表面的作用时间加长, 使得高温合金在多个脉冲连续作用下更容易发生热量累积。根据图 6(b)可以得到不同脉宽对应的高温合金多脉冲去除阈值的累积效应系数值, 如表 3 所示。

实验数据拟合得到, 脉宽为 290 fs 时, 累积效应系数为 0.88; 脉宽为 1000 fs 时, 累积效应系数为 0.86; 脉宽为 7000 fs 时, 累积效应系数为 0.78。累积效应系数趋近于 1, 累积效应越明显, 材料去除阈值随脉冲数的增加, 趋于稳定值的速度越快。由图 6(b)和表 3 的计算结果可以看出, 累积效应系数值与激光脉宽呈反比关系, 说明脉宽的增加会使去除阈值趋于稳定值的脉冲数增加。依据双温方程理论, 激光脉宽越宽, 电子温度吸收脉冲能量达到峰值的时间越长, 且晶格温度耦合电子温度并达到稳定的弛豫时间也越长, 因此在多个脉冲连续作用下, 脉宽越宽时, 材料去除阈值随脉冲数的变化趋势越缓慢^[25-26]。

表 3 不同脉宽下多脉冲去除阈值的累积效应系数
Table 3 Incubation coefficient values corresponding to different pulse durations

pulse duration/fs	incubation coefficient ξ
290	0.88
1000	0.86
7000	0.78

3 结 论

实验探究了高温合金在中心波长为 (1028 ± 5) nm、频率为 100 Hz, 不同脉宽的超快激光分别作用下的多脉冲去除阈值特性。分析了不同脉冲宽度、脉冲能量和脉冲个数的超快激光作用下, 高温合金表面烧蚀坑尺寸的变化规律。并根据烧蚀坑直径与激光脉冲能量之间存在的对数关系, 推算了高温合金在不同脉宽作用下的多脉冲去除阈值。

(1) 当脉冲个数和脉宽一定, 烧蚀坑直径随脉冲能量增加而增加, 但当脉冲能量超过 $5.90 \mu\text{J}$ 时, 烧蚀坑直径随脉冲能量变化的幅度逐渐减小。当脉冲能量和脉宽一定时, 烧蚀坑直径也随脉冲的增加而增加, 但当脉冲个数超过 100 时, 烧蚀坑直径随脉冲个数变化的幅度逐渐减小。脉冲宽度的增加会加大脉冲个数对烧蚀坑直径的影响, 当脉冲宽度由 290 fs 变化到 7000 fs 时, 烧蚀坑直径随脉冲个数的变化范围增大一倍。

(2) 根据高温合金表面的烧蚀坑直径和激光脉冲能量之间的对数关系, 得到了高温合金在不同脉宽下的多脉冲去除阈值。当脉宽为 290 fs 时, 在 1, 10, 50, 100, 300, 500 和 1000 个激光脉冲作用下的高温合金的去除阈值分别为 0.101, 0.079, 0.058, 0.054, 0.049, 0.049 和 0.047 J/cm^2 ; 当脉宽为 1000 fs 时, 去除阈值分别为 0.106, 0.071, 0.055, 0.050, 0.046, 0.042 和 0.042 J/cm^2 ; 当脉宽为 7000 fs 时, 去除阈值分别为 0.129, 0.094, 0.061, 0.050, 0.037, 0.034 和 0.031 J/cm^2 。

(3) 由于累积效应, 去除阈值会随脉冲数的增加而下降的幅度逐渐变小, 根据实验结果得到 290, 1000 和 7000 fs 脉宽下的累积效应系数分别为 0.88, 0.86 和 0.78。累积效应系数值随激光脉宽的增加而减小, 说明脉宽的增加会使去除阈值趋于稳定值的速度变慢。

参 考 文 献:

- [1] 周明, 杨青峰, 张洪玉. 航空涡轮叶片气膜冷却孔激光加工技术进展[J]. *中国基础科学*, 2016, 18(5): 35-42. (Zhou Ming, Yang Qingfeng, Zhang Hongyu. Advances in laser fabrication of the aeroengine blades' film cooling holes[J]. *China Basic Science*, 2016, 18(5): 35-42)
- [2] 张晓兵. 激光加工涡轮叶片气膜孔的现状和发展趋势[J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 227-229,246. (Zhang Xiaobing. The present state and perspective of laser drilling technology in turbine blades[J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 227-229,246)
- [3] Bandyopadhyay S, Sundar J K S, Sundararajan G, et al. Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd: YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 127(1): 83-95.
- [4] 刘丹, 孔德新, 苗在强, 等. 钛合金纳秒激光打孔数值模拟和实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 069001. (Liu Dan, Kong Dexin, Miao Zaiqiang, et al. Simulation and experimental investigation on nano-second pulsed laser drilling of titanium alloy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 069001)
- [5] Ancona A, Döring S, Jauregui C, et al. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3304-3306.
- [6] Zhang Wei, Cheng Guanghua, Feng Qiang, et al. Femtosecond laser machining characteristics in a single-crystal superalloy[J]. *Rare Metals*, 2011, 30(s1): 639-642.
- [7] Kerse C, Kalaycıoğlu H, Elahi P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [8] 纪亮, 张晓兵, 张伟, 等. DD6镍基单晶合金的纳秒及皮秒激光烧蚀和制孔研究[J]. *应用激光*, 2014, 34(6): 551-556. (Ji Liang, Zhang Xiaobing, Zhang Wei, et al. Laser-induced ablation and laser drilling of DD6 nickel-based single-crystal alloy by nanosecond and picosecond lasers[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(6): 551-556)
- [9] Petronić S, Milosavljević A, Radaković Z, et al. Analysis of geometrical characteristics of pulsed ND: YAG laser drilled holes in superalloy Nimonic 263 sheets[J]. *Tehnički Vjesnik*, 2010, 17(1): 61-66.
- [10] Das D K, Pollock T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(15/16): 5661-5668.
- [11] Weck A, Crawford T H R, Wilkinson D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. *Applied Physics A*, 2008, 90(3): 537-543.
- [12] Kirkwood S E, van Popta A C, Tsui Y Y, et al. Single and multiple shot near-infrared femtosecond laser pulse ablation thresholds of copper[J]. *Applied Physics A*, 2005, 81(4): 729-735.
- [13] Mannion P T, Magee J, Coyne E, et al. The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233(1/4): 275-287.
- [14] Di Niso F, Gaudiuso C, Sibillano T, et al. Influence of the repetition rate and pulse duration on the incubation effect in multiple-shots ultrafast laser ablation of steel[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 698-707.
- [15] Le Harzic R, Breitling D, Weikert M, et al. Ablation comparison with low and high energy densities for Cu and Al with ultra-short laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2005, 80(7): 1589-1593.
- [16] Feng Q, Picard Y N, Liu H, et al. Femtosecond laser micromachining of a single-crystal superalloy[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(5): 511-516.

- [17] Semaltianos N G, Perrie W, French P, et al. Femtosecond laser ablation characteristics of nickel-based superalloy C263[J]. *Applied Physics A*, 2009, 94(4): 999-1009.
- [18] Semaltianos N G, Perrie W, Cheng J, et al. Picosecond laser ablation of nickel-based superalloy C263[J]. *Applied Physics A*, 2010, 98(2): 345-355.
- [19] Miotello A, Kelly R. Laser-induced phase explosion: new physical problems when a condensed phase approaches the thermodynamic critical temperature[J]. *Applied Physics A*, 1999, 69(7): S67-S73.
- [20] 李莉, 张端明, 房然然, 等. 飞秒多脉冲激光烧蚀金属过程中的能量剩余现象[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(11): 1671-1676. (Li Li, Zhang Duanming, Fang Ranran, et al. Residual energy in femtosecond multipulse laser ablation of metal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1671-1676)
- [21] Byskov-Nielsen J, Savolainen J M, Christensen M S, et al. Ultra-short pulse laser ablation of metals: threshold fluence, incubation coefficient and ablation rates[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(1): 97-101.
- [22] 陈安民, 姜远飞, 刘航, 等. 双温方程用于飞秒激光烧蚀金属的模拟分析[J]. *激光与红外*, 2012, 42(8): 847-851. (Chen Anming, Jiang Yuanfei, Liu Hang, et al. Numerical simulation of femtosecond laser ablation by two-temperature model[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(8): 847-851)
- [23] 邓素辉, 陶向阳, 刘明萍, 等. 飞秒-纳秒脉冲激光烧蚀金属热效应分析[J]. *激光技术*, 2007, 31(1): 4-7. (Deng Suhui, Tao Xiangyang, Liu Mingping, et al. Thermal analysis of metal ablation by means of femtosecond-to-nanosecond laser pulses[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 4-7)
- [24] Ni Xiaocheng, Wang C Y, Yang Li, et al. Parametric study on femtosecond laser pulse ablation of Au films[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(3): 1616-1619.
- [25] 邵俊峰, 郭劲, 王挺峰. 飞秒双脉冲激光照射金属薄膜的热行为[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 091017. (Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng. Thermal behavior of metal thin film irradiated by femtosecond double-pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 091017)
- [26] Harilal S S, Diwakar P K, Hassanein A. Electron-ion relaxation time dependent signal enhancement in ultrafast double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103: 041102.