

单晶金刚石飞秒激光加工的烧蚀阈值实验

陈根余^{1,2*}, 朱智超^{1,2}, 殷赳^{1,2}, 熊彪^{1,2}, 金梦奇^{1,2}

¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082;

²湖南大学激光研究所, 湖南长沙 410082

摘要 采用不同功率的飞秒激光对单晶金刚石分别进行了单脉冲分离烧蚀实验和多脉冲累积烧蚀实验, 计算得到了单晶金刚石材料的单脉冲烧蚀阈值和多脉冲累积烧蚀阈值, 并研究了多脉冲作用下单晶金刚石烧蚀阈值的变化。结果表明: 单晶金刚石的飞秒激光单脉冲烧蚀阈值为 8.80 J/cm^2 ; 随着有效脉冲数增加, 烧蚀阈值逐渐减小; 当有效脉冲数小于 124 时, 烧蚀阈值随有效脉冲数的增加而急剧减小; 当有效脉冲数增加到 486 后, 烧蚀阈值减小的趋势趋于平缓。有效脉冲数 486、激光平均功率 10.7 W 是最优的激光加工工艺参数。

关键词 激光技术; 激光器与激光光学; 激光烧蚀; 飞秒激光; 单晶金刚石; 烧蚀阈值

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402001

Experiment on Ablation Threshold of Single Crystal Diamond Produced by Femtosecond Laser Processing

Chen Genyu^{1,2*}, Zhu Zhichao^{1,2}, Yin Jiu^{1,2}, Xiong Biao^{1,2}, Jin Mengqi^{1,2}

¹State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

²Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract Single-pulse separated ablation and multi-pulse cumulative ablation experiments are performed on single crystal diamond by femtosecond laser with different powers. The single-pulse ablation threshold and multi-pulse cumulative ablation threshold of single-crystal diamond materials are calculated, and the variation characteristics of ablation threshold of single-crystal diamond at multi-pulse are studied. The results show that the threshold of femtosecond laser ablation of single crystal diamond is 8.80 J/cm^2 . The ablation threshold of single crystal diamond materials decreases with the increase of effective pulse number. When the effective pulse number is less than 124, the ablation threshold decreases sharply with the increase of the effective pulse number. When the effective pulse number increases to 486, the decreasing trend of ablation threshold tends to be gentle. The optimum laser processing parameters are as follows: the effective pulse number is 486, and the laser average power is 10.7 W .

Key words laser technique; lasers and laser optics; laser ablation; femtosecond laser; single crystal diamond; ablation threshold

OCIS codes 140.3390; 310.3840; 350.3390

1 引 言

金刚石是目前硬度最高的材料, 具有良好的物理性能和化学稳定性。随着生产与技术的发展, 其在航空航天、光学仪器、精密切削工具、电子元件、医疗设备及民用工业等领域中的应用十分广泛^[1-2]。

激光加工作为一种非接触式的加工方法, 能够

有效避免力的直接作用和硬接触, 是一种非常有效的金刚石加工方法。飞秒激光具有脉宽超短、峰值能量极高等特性, 这使得其能够有效克服长脉冲激光加工的热影响, 在高熔点和超硬材料的精密加工上更具优势^[3-5]。因此, 研究飞秒激光加工单晶金刚石的烧蚀阈值以及飞秒激光与单晶金刚石的作用机理具有重要意义。

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2018-12-13; 录用日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51675172)、湖南省研究生科研创新项目(CX2017B082)

* E-mail: hdgychen@163.com

国外很早就有基于飞秒激光烧蚀加工金刚石的相关研究报道; Shirk 等^[6]采用飞秒激光与纳秒激光对金刚石进行烧蚀加工, 并认为, 与纳秒等长脉冲激光相比, 飞秒超短脉冲激光更具优势^[4]; Jeschke 等^[7]采用分子动力学模拟方法描述了飞秒激光烧蚀金刚石的晶格形变和熔化过程, 建立了金刚石和石墨的飞秒激光烧蚀理论模型, 并计算了烧蚀阈值与激光脉宽之间的关系^[8]; Odake 等^[9]分别对多晶金刚石、单晶金刚石进行了激光切割实验, 得出了多晶金刚石因热导率相对较低, 烧蚀阈值更低, 更容易被刻蚀的结论^[2]。在国内, 黄建衡等^[8]采用飞秒激光对多晶金刚石进行了加工, 研究了脉冲能量、扫描次数等工艺参数对多晶金刚石的影响; 董志伟等^[10]通过实验研究了纳秒激光与飞秒激光烧蚀加工金刚石的差异, 实验结果表明飞秒激光加工的金刚石具有更高的表面质量, 但其并未对飞秒激光加工金刚石的机理进行深入研究^[8]。

本文基于超短脉冲飞秒激光与金刚石材料的烧蚀作用机理, 通过面积推算法, 计算了飞秒激光烧蚀单晶金刚石的单脉冲及多脉冲烧蚀阈值, 探究了多脉冲作用下单晶金刚石烧蚀阈值的变化特点, 得到了飞秒烧蚀加工单晶金刚石的最优加工工艺参数, 得出飞秒激光脉冲烧蚀金刚石材料可以分为弱烧蚀和强烧蚀两个阶段的结论, 为飞秒激光加工单晶金刚石提供了参考。

2 烧蚀阈值实验方案

2.1 烧蚀阈值的计算原理

烧蚀阈值是一个与激光类型、材料种类等有关的固有参数。由于面积推算法测量烧蚀阈值时更加方便, 且测量误差较小, 因此本实验采用面积推算法来测定单晶金刚石材料的烧蚀阈值^[11-16]。

飞秒激光的单脉冲能量服从高斯分布, 如图 1 所示。激光能量密度 $\varphi(r)$ 与光束截面半径的关系为^[11]

$$\varphi(r) = \varphi_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (1)$$

式中: φ_0 为激光光束的峰值能量密度; r 为到光束中心的距离; ω_0 为激光光斑的半径。

可以得到激光单脉冲能量为

$$E_p = \int_0^{+\infty} 2\pi r \varphi(r) dr = \int_0^{+\infty} \varphi_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) 2\pi r dr = \frac{\pi\omega_0^2}{2} \varphi_0, \quad (2)$$

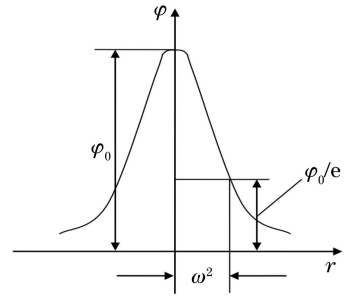


图 1 高斯光束的能量密度分布图

因此得到激光单脉冲能量与中心能量密度的关系为

$$\varphi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}. \quad (3)$$

而激光平均功率和单脉冲能量之间的关系为

$$E_p = \frac{P_{\text{avg}}}{f}, \quad (4)$$

式中: P_{avg} 为激光的平均功率; f 为激光的重复频率。

由此可以得到:

$$\varphi_0 = \frac{2P_{\text{avg}}}{f\pi\omega_0^2}. \quad (5)$$

假设激光单脉冲有效烧蚀作用区域的直径为 D , 激光有效烧蚀区域边缘处的激光光束能量密度为 φ_h , 则 φ_h 就是实现该材料烧蚀去除的最小的激光光束能量密度, 即材料的烧蚀阈值。

在本实验, 脉冲激光的能量呈高斯分布, 其能量分布满足如下关系:

$$\varphi_h = \varphi_0 \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right), \quad (6)$$

由此得到

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_h}\right). \quad (7)$$

将(5)式和(6)式代入(7)式, 整理后得到

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left(\ln P_{\text{avg}} + \ln \frac{2}{\pi f \omega_0^2 \varphi_h} \right). \quad (8)$$

(8)式是一条斜率大小为 $2\omega_0^2$, 关于 D^2 和 $\ln P_{\text{avg}}$ 的直线。

由材料烧蚀阈值的定义可知, 单脉冲烧蚀凹坑直径为零的激光能量密度为材料的烧蚀阈值^[11]。根据实验测量不同激光功率对应的单脉冲烧蚀凹坑的直径, 采用直线拟合的方法, 通过数学推算可获得被烧蚀材料的烧蚀阈值。

2.2 实验材料与方法

2.2.1 实验材料

本实验选用的单晶金刚石的物理性能见表 1^[17]。该单晶金刚石中因有镍、锰等元素而呈黄色。

表 1 单晶金刚石的物理性能

Table 1 Physical properties of monocrystal diamond

Property	Value
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	20
Density $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	3.515
Constant pressure specific heat capacity $/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.827
Thermal diffusivity $\alpha / (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.114
Melting point or decomposition point $/^\circ\text{C}$	3700-4000
Refractive index	2.417
Absorption rate (laser with a wavelength of 1064 nm)	0.25

2.2.2 实验方法

为确保飞秒烧蚀实验过程中入射角度及离焦量不变,以及方便夹具装夹,本实验对颗粒状单晶金刚石进行镶样处理,处理后的效果如图 2 所示。在进行单晶金刚石的单脉冲烧蚀实验之前,为降低粉尘

等对观察效果的影响,需将镶块放置在超声波中使用无水乙醇清洗 5 min,以彻底清除干净金刚石表面的污物,然后将金刚石样件进行干燥处理^[4]。



图 2 镶样后的金刚石样品

Fig. 2 Diamond sample after inlaying

采用视频显微镜确定金刚石上表面激光光斑的位置,然后通过位移加工平台将其移动至指定加工区域,实验装置如图 3 所示。按照预设的激光扫描路径及扫描速度,依次改变激光的平均功率和加工位置,在单晶金刚石上完成相应的烧蚀实验,然后通过超景深三维显微镜对烧蚀结果进行观察。

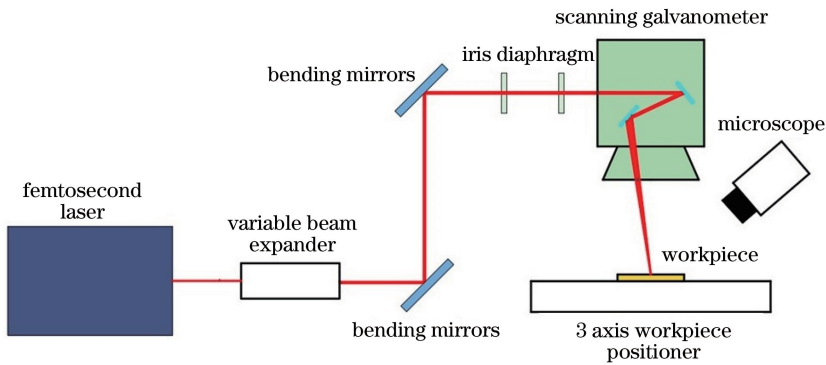


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental device

3 实验结果及分析

3.1 单晶金刚石飞秒激光单脉冲烧蚀阈值实验

基于前期的理论计算可知,要实现激光脉冲分离,激光扫描速度必须要大于 5.25 m/s。因此,为了更好地观察激光脉冲的分离,以及获得更好的测量效果,在单脉冲分离烧蚀实验中将激光扫描速度设置为 10 m/s,固定飞秒激光器的脉宽为 250 fs,重复频率为 175 kHz,将激光平均功率 P_{avg} 由 11.1 W 增加至 30.8 W,在金刚石镶块上进行不同激光平均功率下的单脉冲分离烧蚀实验。表 2 为实验采用的激光平均功率及其对数。

图 4 为不同激光平均功率下金刚石单脉冲分离烧蚀效果,图中的编号与表 2 中的编号相对应。由图 4 可知,当固定激光脉冲宽度、重复频率和扫描

表 2 实验中采用的激光平均功率及其对数

Table 2 Average power and its logarithm used in experiment

Number	P_{avg}/W	$\ln(P_{avg}/\text{W})$	Number	P_{avg}/W	$\ln(P_{avg}/\text{W})$
0	11.1	2.41	8	20.7	3.03
1	12.3	2.51	9	22.3	3.10
2	13.4	2.60	10	23.4	3.15
3	15.0	2.71	11	25.0	3.22
4	16.1	2.78	12	26.5	3.28
5	17.3	2.85	13	28.1	3.34
6	18.0	2.89	14	29.4	3.38
7	20.0	3.00	15	30.8	3.43

速度时,在不同的激光平均功率下,单晶金刚石表面最左边区域的烧蚀痕迹不明显,从左至右烧蚀凹坑逐渐变大,图片下方烧蚀凹坑较为密集的原因是振镜初启动时有一个加速过程,导致下方的烧蚀现象较为明显。当激光能量密度超过单晶金刚石材料的

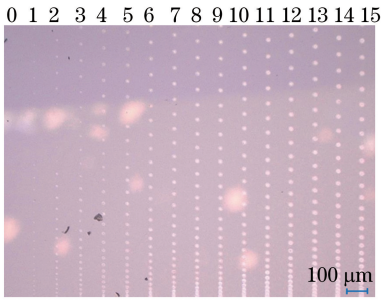


图 4 不同激光功率下的单脉冲烧蚀凹坑形貌
Fig. 4 Morphology of single pulse ablation pits obtained at different laser powers

烧蚀阈值时,就会在金刚石上表面产生纳米级深度的激光烧蚀凹坑,随着激光平均功率增大,激光单脉冲能量变大,单脉冲烧蚀凹坑孔径增大。

激光光斑半径的理论计算公式为^[18-20]

$$\omega_0 = \frac{M^2 \lambda s}{\pi \omega_s}, \quad (9)$$

式中: s 为目标焦距; λ 为激光波长; ω_s 为入射激光光斑的半径; M^2 为表征真实激光束和衍射限制高斯光束之间差异的一个参数。

在本实验中,代入数据 $s=160 \text{ mm}$, $\lambda=1.03 \text{ μm}$, $\omega_s=2.60 \text{ mm}$, $M^2=1.18$,求得 $\omega_0=22.2 \text{ μm}$ 。

对飞秒激光烧蚀实验测试数据进行整理计算,拟合出了激光烧蚀凹坑直径的平方 D^2 与激光平均功率对数 $\ln P_{\text{avg}}$ 的关系曲线,如图 5 所示。其中的 R^2 表示数据的符合程度,说明拟合结果准确,直线斜率 k 与 ω_0 符合 $k=2\omega_0^2$ 的关系,因此通过计算可获得激光光斑的半径 $\omega_0=21.0 \text{ μm}$ 。

通过分析可知,激光光斑半径的理论计算结果与实验所得结果一致。

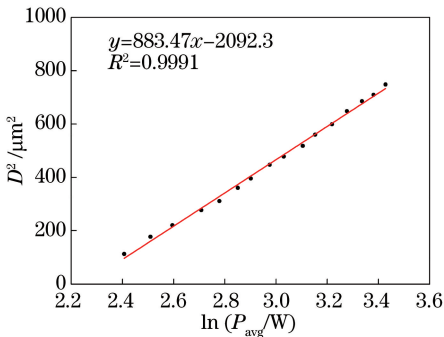


图 5 $\ln P_{\text{avg}}$ 与 D^2 间的关系

Fig. 5 Relationship between $\ln P_{\text{avg}}$ and D^2

根据激光烧蚀阈值的定义,由(8)式采用面积外推法可以计算得到 $D=0$ 时 $P_{\text{avg}}=10.68 \text{ W}$,此为单晶金刚石激光功率的阈值,最终可计算得到单晶金刚石的飞秒激光烧蚀阈值 $\varphi_h=8.80 \text{ J/cm}^2$ 。

3.2 多脉冲作用下单晶金刚石烧蚀阈值的变化规律

在实际的激光烧蚀过程中并不是使用单脉冲的加工方法,而是采用激光多脉冲的加工方法。当脉冲激光在被烧蚀材料表面进行扫描划线时,由于激光扫描速度未能达到脉冲分离的速度,因此在激光扫描轨迹上光斑将会出现重叠区域,在同一地方会受到多个激光脉冲的共同作用,导致被烧蚀区域形成了激光脉冲的累加,形成能量累积,即激光脉冲能量累积效应。激光脉冲累积效应对实际烧蚀效果具有重要影响。为了能够更加具体地量化脉冲累积效应下的激光脉冲数量,引入有效脉冲数的概念,定义有效脉冲数为加工区域内的平均累积脉冲数。当脉冲激光在进行划线扫描烧蚀时,假设激光焦点在材料表面的移动速度固定,与激光焦点静止烧蚀过程中累积的能量相等。有效脉冲数 N 与重复扫描次数 K 、激光光束半径 ω_0 、激光扫描速度 v 、重复频率 f 的关系如下

$$N = K \frac{2\omega_0}{v} f. \quad (10)$$

由(10)式可知,有效脉冲数由激光重复频率、扫描次数和扫描速度决定。本实验所使用的激光器的重复频率 $f=175 \text{ kHz}$,且激光光束的半径 ω_0 固定不变,所以脉冲激光的有效脉冲数主要取决于激光重复扫描次数 K 和扫描速度 v 。因此,在本实验中,固定激光重复频率 $f=175 \text{ kHz}$,扫描速度 $v=2 \text{ m/s}$,将激光扫描次数依次设置为 1, 8, 32, 125, 250, 500 次,采用不同平均功率的激光对单晶金刚石进行划线烧蚀实验,依次获得了不同有效脉冲数下烧蚀微槽宽度的平方 B^2 与激光平均功率的对数 $\ln P_{\text{avg}}$ 之间的关系,然后对不同有效脉冲数下的关系曲线进行线性拟合,线性拟合后的直线与横坐标轴的交点为该有效脉冲数下阈值功率的对数,该点的激光能量密度即为其在有效脉冲数下的多脉冲烧蚀阈值。实验数据如表 3 所示。

表 3 实验数据

Table 3 Experimental data

Number	Effective pulse number	Laser scan times	Average laser power /W
1	4	1	10,13.4,17.3
2	31	8	7.7,10.7,15.0
3	124	32	5.3,8.8,12.3
4	486	125	4.6,8.8,10.7
5	972	250	4.6,6.5,8.8
6	1943	500	3.8,5.7,7.7

固定激光扫描速度、重复频率时,在不同的有效脉冲数下依次改变激光平均功率,进行扫描划线烧蚀实验,如图 6 所示为使用超景深显微镜观察到的金刚石烧蚀微槽的表面形貌。可知:在不同的有效

脉冲数和激光平均功率下,金刚石表面的材料被烧蚀去除,形成了较为明显的烧蚀微槽;在相同的有效脉冲数下,随着激光平均功率增大,金刚石烧蚀微槽的宽度逐渐增大。

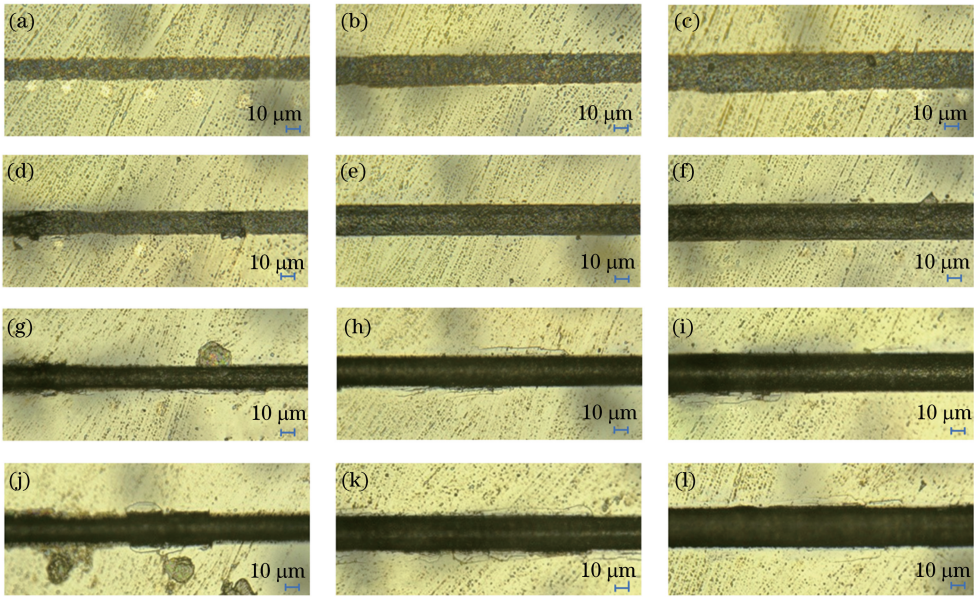


图 6 不同有效脉冲数和激光平均功率下得到的金刚石烧蚀槽的微观形貌。(a) $N=31, P_{avg}=7.7\text{ W}$; (b) $N=31, P_{avg}=10.7\text{ W}$; (c) $N=31, P_{avg}=15\text{ W}$; (d) $N=124, P_{avg}=5.3\text{ W}$; (e) $N=124, P_{avg}=8.8\text{ W}$; (f) $N=124, P_{avg}=12.3\text{ W}$; (g) $N=486, P_{avg}=4.6\text{ W}$; (h) $N=486, P_{avg}=8.8\text{ W}$; (i) $N=486, P_{avg}=10.7\text{ W}$; (j) $N=972, P_{avg}=4.6\text{ W}$; (k) $N=972, P_{avg}=6.5\text{ W}$; (l) $N=972, P_{avg}=8.8\text{ W}$

Fig. 6 Microscopic morphology of diamond ablated trough obtained at different effective pulse numbers and average laser powers. (a) $N=31, P_{avg}=7.7\text{ W}$; (b) $N=31, P_{avg}=10.7\text{ W}$; (c) $N=31, P_{avg}=15\text{ W}$; (d) $N=124, P_{avg}=5.3\text{ W}$; (e) $N=124, P_{avg}=8.8\text{ W}$; (f) $N=124, P_{avg}=12.3\text{ W}$; (g) $N=486, P_{avg}=4.6\text{ W}$; (h) $N=486, P_{avg}=8.8\text{ W}$; (i) $N=486, P_{avg}=10.7\text{ W}$; (j) $N=972, P_{avg}=4.6\text{ W}$; (k) $N=972, P_{avg}=6.5\text{ W}$; (l) $N=972, P_{avg}=8.8\text{ W}$

实验后,采用超景深显微镜对各组烧蚀槽的宽度进行测量,同样采用直线拟合的方法拟合出不同的有效脉冲数下 B^2 与 $\ln P_{avg}$ 的关系曲线,如图 7 所示,因此可以获取不同有效脉冲数下的阈值功率,从而计算出对应的有效脉冲数下单晶金刚石多脉冲烧

蚀阈值。

同理,根据激光烧蚀阈值的定义,依次计算出不同有效脉冲数下的阈值功率 P_{avg} ,然后分别计算出不同激光脉冲数下单晶金刚石材料的烧蚀阈值,如表 4 所示。

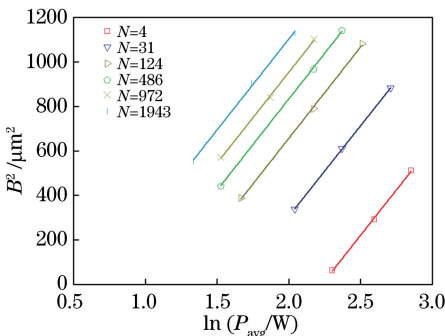


图 7 不同的有效脉冲数下 B^2 与 $\ln P_{avg}$ 的关系
Fig. 7 Relationship between B^2 and $\ln P_{avg}$ obtained at different effective pulse numbers

表 4 不同脉冲数下单晶金刚石材料的烧蚀阈值

Table 4 Ablation threshold of single crystal diamond obtained at different pulse numbers

Number	1	2	3	4	5	6
Effective pulse number	1	31	124	486	972	1943
Ablation threshold / $(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	8.80	4.53	2.94	2.35	2.04	1.70

进一步拟合出单晶金刚石飞秒激光烧蚀阈值与激光有效脉冲数的关系,如图 8 所示。

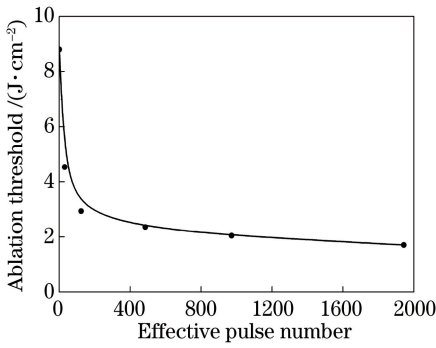


图 8 烧蚀阈值随有效激光脉冲数的变化

Fig. 8 Change of ablation threshold varying with effective pulse number

由图 8 可以看出:随着作用在单晶金刚石上的有效脉冲数增加,烧蚀阈值逐渐减小;当有效脉冲数

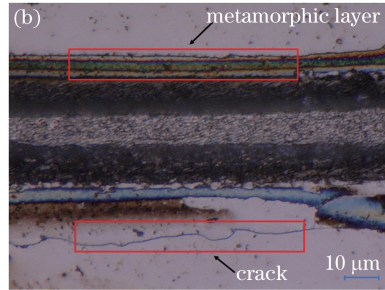
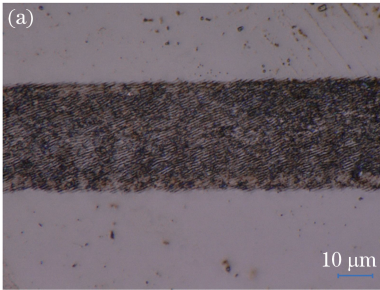


图 9 金刚石在不同烧蚀阶段的烧蚀效果。(a)弱烧蚀, $N=31, P_{avg}=10.7\text{ W}$; (b)强烧蚀, $N=972, P_{avg}=6.5\text{ W}$

Fig. 9 Ablation effect of diamond in different stages. (a) Weak ablation, $N=31, P_{avg}=10.7\text{ W}$;

(b) strong ablation, $N=972, P_{avg}=6.5\text{ W}$

当作用在金刚石上的激光功率密度较低时,激光脉冲能量仅能够使金刚石处于弱烧蚀阶段,此时金刚石材料中会存在一些碰撞束缚电子的自由电子,一部分自由电子产生逆向韧致辐射后成为雪崩电离的种子电子,另一部分自由电子吸收激光能量后动能增加,当增加的动能大于束缚电子的电离势能后,就会不断碰撞分子或离子产生大量的较低动能的自由电子,形成雪崩电离,此时金刚石的烧蚀机理以雪崩电离为主^[22]。在该阶段,金刚石烧蚀微槽的深度较浅,飞秒激光烧蚀去除的效率较低,激光烧蚀区域的反作用力较小,故金刚石在弱烧蚀阶段不会产生烧蚀裂纹,烧蚀直线槽的边缘很整齐,如图 9(a)所示。

随着激光功率密度增大,激光脉冲能量增加,弱烧蚀逐渐转变为强烧蚀。此时因光子通量远大于电子数密度,金刚石材料中的电子将大量吸收多光子而电离形成自由电子,此时金刚石的烧蚀机理以多光子电离为主^[22]。金刚石烧蚀区域的颜色不断加深,逐渐变黑,说明此时激光烧蚀区域的组织已经发

生改变,形成变质层。特别是当脉冲激光能量过高时,容易在激光烧蚀区域形成烧蚀潜热,造成应力集中,使烧蚀微槽边缘出现大量裂纹和不规则的缺口,激光烧蚀微槽边缘的完整性较差,激光烧蚀区域因残余热应力而产生裂纹,导致金刚石材料发生不规则的去除,使得烧蚀微槽表面粗糙,如图 9(b)所示。实验结果表明,当有效脉冲数为 486,激光平均功率为 10.7 W 时,能够得到最佳的烧蚀效果。

激光脉冲烧蚀金刚石材料可以分别为弱烧蚀和强烧蚀两个阶段,如图 9 所示,不同阶段金刚石材料烧蚀去除的机制不同。

生改变,形成变质层。特别是当脉冲激光能量过高时,容易在激光烧蚀区域形成烧蚀潜热,造成应力集中,使烧蚀微槽边缘出现大量裂纹和不规则的缺口,激光烧蚀微槽边缘的完整性较差,激光烧蚀区域因残余热应力而产生裂纹,导致金刚石材料发生不规则的去除,使得烧蚀微槽表面粗糙,如图 9(b)所示。实验结果表明,当有效脉冲数为 486,激光平均功率为 10.7 W 时,能够得到最佳的烧蚀效果。

4 结 论

采用不同能量密度的飞秒激光对单晶金刚石分别进行单脉冲分离烧蚀实验和多脉冲累积烧蚀实验,得到了单晶金刚石的单脉冲烧蚀阈值及多脉冲累积烧蚀阈值,以及在多脉冲作用下单晶金刚石烧蚀阈值的变化特点,这对于其他材料在飞秒激光作用下的烧蚀阈值研究具有一定的借鉴意义。实验得到了飞秒激光加工单晶金刚石的最优激光工艺参数,可避免单晶金刚石加工过程中出现的裂纹、变质层等缺陷,获得良好的加工质量,这对单晶金刚石的

加工及单晶金刚石进一步的扩展应用具有重要意义。此外,探讨了飞秒激光加工金刚石的机理,为飞秒激光加工单晶金刚石的研究提供了一定参考。

参 考 文 献

- [1] Zhou X, Wang J H, Xiong L W, *et al.* Research progress on preparation of single-crystal diamond[J]. Cemented Carbide, 2012, 29(3): 182-189.
周祥, 汪建华, 熊礼威, 等. 单晶金刚石制备研究进展[J]. 硬质合金, 2012, 29(3): 182-189.
- [2] Zhou X. An experimental study of dressing electroplated diamond wheels with pulsed ultraviolet laser[D]. Changsha: Hunan University, 2017: 28-29.
周旭. 脉冲紫外激光修整电镀金刚石砂轮实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 28-29.
- [3] Zhang D M, Li Z H, Yu B M, *et al.* Target ablation characteristics during pulsed laser deposition of thin films[J]. Science in China, 2001, 31(8): 743-753.
张端明, 李智华, 郁伯铭, 等. 脉冲激光制备薄膜材料的机理[J]. 中国科学 A 辑, 2001, 31(8): 743-753.
- [4] Xiong B, Chen G Y, Yin J, *et al.* Experimental research on conical array of single crystal diamond based on femtosecond laser[J]. Applied Laser, 2018, 38(2): 270-277.
熊彪, 陈根余, 殷赳, 等. 飞秒激光加工单晶金刚石锥形阵列的实验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 270-277.
- [5] Zhang Y J, Song H Y, Liu H Y, *et al.* Fabrication of millimeter-scaled holes by femtosecond laser filamentation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402012.
张艳杰, 宋海英, 刘海云, 等. 飞秒激光成丝制备毫米级深孔[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402012.
- [6] Shirk M D, Molian P A, Malshe A P. Ultrashort pulsed laser ablation of diamond[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(2): 64-70.
- [7] Jeschke H O, Garcia M E. Theoretical description of the ultrafast ablation of diamond and graphite: dependence of thresholds on pulse duration [J]. Applied Surface Science, 2002, 197/198: 107-113.
- [8] Huang J H, Liang G W, Li J, *et al.* Femtosecond laser processing of polycrystalline diamond microstructure array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302007.
黄建衡, 梁国文, 李冀, 等. 飞秒激光制备多晶金刚石微结构阵列 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302007.
- [9] Odake S, Ohfujii H, Okuchi T, *et al.* Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamond: a comparative study with single crystal diamond [J]. Diamond and Related Materials, 2009, 18(5/6/7/8): 877-880.
- [10] Dong Z W, Zhang W B, Zheng L W, *et al.* Processing of diamond applying femtosecond and nanosecond laser pulses [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 893-896.
董志伟, 张伟斌, 郑立威, 等. 利用飞秒激光和纳秒激光脉冲加工金刚石 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 893-896.
- [11] Huang K. Interacting process and microstructure machining on metal materials by nanosecond laser ablation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
黄楷. 纳秒激光与金属材料相互作用过程及微结构加工研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [12] Stenzel E, Gogoll S, Sils J, *et al.* Laser damage of alkaline-earth fluorides at 248 nm and the influence of polishing grades[J]. Applied Surface Science, 1997, 109/110: 162-167.
- [13] Lenzner M, Krüger J, Sartania S, *et al.* Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. Physical Review Letters, 1998, 80(18): 4076-4079.
- [14] Guo B, Zhao Q L, Yu X. Surface micro-structuring of coarse-grained diamond wheels by nanosecond pulsed laser for improving grinding performance[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(10): 2025-2030.
- [15] Guo B, Zhao Q L, Fang X Y. Precision grinding of optical glass with laser micro-structured coarse-grained diamond wheels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(5): 1045-1051.
- [16] Chen A M, He X M, Fei D H, *et al.* Theoretical study on femtosecond laser heating of two-layer metal films[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051402.
陈安民, 何喜明, 费德厚, 等. 飞秒激光加热双层金属薄膜的理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051402.
- [17] Chen G Y. The research on mechanism and technology for laser truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels by acoustic-optic Q-switched Nd:YAG pulsed laser [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
陈根余. 声光调 Q Nd:YAG 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮机理及技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [18] Wang W J, Mei X S, Jiang G D, *et al.* Effect of two typical focus positions on microstructure shape and morphology in femtosecond laser multi-pulse ablation of metals [J]. Applied Surface Science, 2008, 255

- (5): 2303-2311.
- [19] Szameit A, Dreisow F, Pertsch T, *et al.* Control of directional evanescent coupling in fs laser written waveguides[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1579-1587.
- [20] Will M, Nolte S, Chichkov B N, *et al.* Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(21): 4360-4364.
- [21] Guo T Y, Zhang L M, Ren Y Y, *et al.* Femtosecond laser ablation on CaF_2 crystal surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126017.
- 郭太勇, 张立木, 任莹莹, 等. 飞秒激光烧蚀氟化钙晶体表面研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (1): 0126017.
- [22] Zheng B X, Jiang G D, Wang W J, *et al.* Ablation characteristics and interaction mechanism of ultra-fast pulse laser-induced damage in titanium alloy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(12): 21-28.
- 郑卜祥, 姜歌东, 王文君, 等. 超快脉冲激光对钛合金的烧蚀特性与作用机理 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(12): 21-28.