

# 激光与光电子学进展

## 飞秒激光刻蚀纳米金刚石涂层材料去除率的研究

韩源, 马玉平\*, 王海航, 武晓龙, 魏超, 张遥

安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 通过改变飞秒激光的重复频率、聚焦光斑的能流密度及扫描速度,研究了不同的激光加工参数对纳米金刚石涂层表面去除率的影响规律。利用白光干涉仪的观测结果,结合数值拟合的方法,建立了材料去除率函数模型。试验结果分析表明:在不同的重复频率下,涂层表面单位时间内累积的激光能量保持稳定,材料的去除率无明显变化;聚焦光斑的能流密度越大,刻蚀强度越大,材料的去除率越大;不同激光扫描速度下的加工结果不同,材料的去除率随扫描速度的增大呈先增大后减小的变化趋势。

**关键词** 激光光学; 超快光学; 飞秒激光; 刻蚀; 纳米金刚石涂层; 材料去除率

中图分类号 TB332

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1114001

### Material Removal Rate of Nano-Diamond Coating Ablated by Femtosecond Laser

Han Yuan, Ma Yuping\*, Wang Haihang, Wu Xiaolong, Wei Chao, Zhang Yao

College of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

**Abstract** By changing the repetition rate, energy-flux density of focusing spot and scanning speed of a femtosecond laser, the effect of laser processing parameters on the removal rate of a diamond coating was investigated. Based on the observation results by the white-light interferometer combined with the numerical fitting method, the material removal rate function model was established. The analysis of experimental results shows that the accumulated laser energy within the coating surface per unit time remained stable at different repetition rates, and the material removal rate did not change significantly. The ablation intensity as well as the material removal rate raises with the increase of energy-flux density of focusing spot. The processing results under different laser scanning speeds are different, and the material removal rates exhibit a variance trend of first increasing and then decreasing with the increase of scanning speed.

**Key words** laser optics; ultrafast optics; femtosecond laser; ablation; nano-crystalline diamond coating; material removal rate

**OCIS codes** 140.7090; 160.4236; 220.1920; 080.2720

## 1 引言

飞秒激光的脉冲宽度极窄,在脉冲能量相对较

低的情况下可以获得极高的峰值密度,且在飞秒激光加工过程中热影响区几乎可以忽略不计<sup>[1-4]</sup>。因此,近年来飞秒激光在微纳加工领域中的应用越来越

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 安徽省自然科学基金(1208085ME63, 1908085ME129)、安徽省教育厅自然科学基金(KJ2015A050, KJ2015A013)

\*E-mail: jessymayp@ahjzu.edu.cn

越广泛<sup>[5-8]</sup>。金刚石具有高硬度、高耐磨性、小摩擦系数等优点,因此是制备微型刀具或涂层刀具的理想材料,金刚石刀具加工出的零件表面较光洁,具有较高的表面质量。直接沉积在衬底表面的金刚石涂层往往比较粗糙,这对其后续的切削应用会产生不利影响,从而制约金刚石涂层刀具在超精密加工领域中的应用<sup>[9]</sup>。利用飞秒激光抛光金刚石涂层,不仅具有效率高、加工质量好的优点,而且由于飞秒激光超高的空间分辨率,加工过程具有较好的灵活性<sup>[10-12]</sup>。

国外关于飞秒激光刻蚀金刚石涂层的研究较早。1992年,研究者利用波长为 620 nm、脉宽为 190 fs 的飞秒激光刻蚀金刚石涂层,测量和分析了金刚石临界熔点以上时的液态碳的光学性质<sup>[13]</sup>。Dong 等<sup>[14]</sup>利用脉宽分别为 40 fs 和 5 ns 的激光脉冲,通过钎焊加工了不锈钢基体上的金刚石阵列,试验结果表明,由于飞秒激光对热的抑制作用,相比纳秒激光加工金刚石,飞秒激光的阈值更低。熊彪等<sup>[15-16]</sup>采用脉宽分别为 250 fs 和 100 fs 的飞秒激光加工单晶和多晶金刚石,通过对金刚石表面质量的检测和加工区域形貌的分析,研究了激光的光斑重叠率、输出功率以及扫描次数对金刚石表面形貌、烧蚀深度和宽度的影响。燕山大学的研究团队利用飞秒激光直写技术,制备出具有复杂形状和超高切削性能的纳米孪晶立方氮化硼超硬刀具<sup>[17]</sup>。随着近年来飞秒激光刻蚀金刚石研究的深入和金刚石涂层刀具的广泛应用,研究飞秒激光加工参数对金刚石表面的影响规律具有深远意义。

本文建立了飞秒激光刻蚀纳米金刚石涂层材料

的去除率函数模型,研究了激光重复频率、聚焦光斑的能流密度和扫描速度等参数对涂层表面材料去除率的影响,探析了不同工艺参数下的材料去除机理。

## 2 飞秒激光刻蚀纳米金刚石涂层试验研究

### 2.1 试验材料

金刚石涂层样品衬底为 YG6 硬质合金,利用偏压热丝化学气相沉积(HFCVD)法在衬底表面沉积一层纳米金刚石涂层,涂层厚度为 15 μm。如图 1(a)所示,样品整体几何尺寸为 16 mm×16 mm×4 mm。金刚石涂层在扫描电镜(SEM)下的微观形貌如图 1(b)所示,金刚石晶粒为纳米级的球形晶粒,直径在 200 nm 左右。

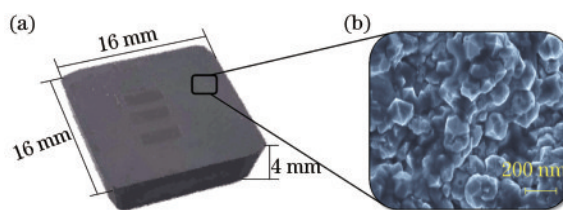


图 1 金刚石涂层样品。(a) 沉积纳米金刚石涂层后的硬质合金;(b) 涂层表面的 SEM 形貌

Fig. 1 Diamond coating samples. (a) Cemented carbide sample after deposition of nano-crystalline diamond coating; (b) SEM image of coating surface

### 2.2 试验装置与方法

图 2(a)所示为飞秒加工系统示意图,激光器采用的是美国 Coherent 公司的掺钛蓝宝石飞秒激光器,飞秒激光器的中心波长  $\lambda$  为 800 nm,脉冲宽度  $t_p$

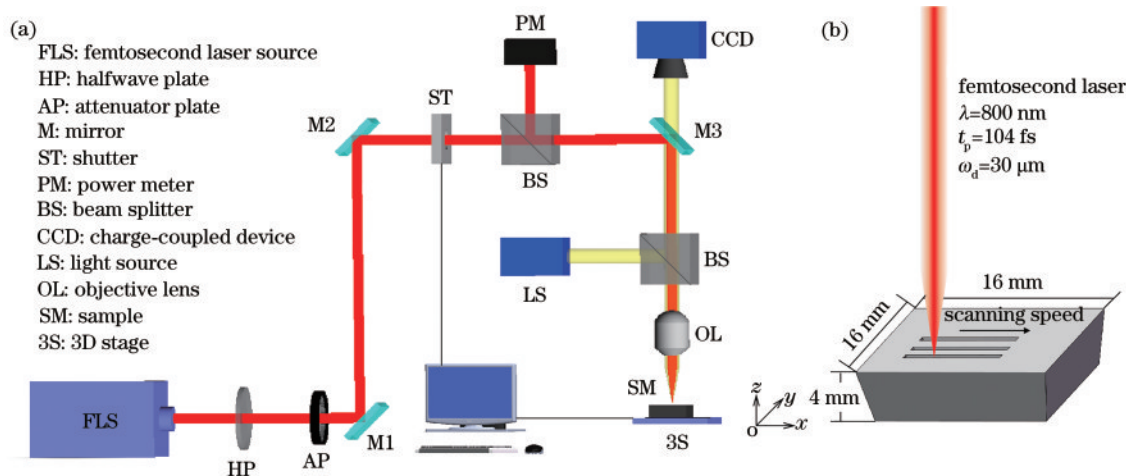


图 2 飞秒激光刻蚀纳米金刚石涂层示意图。(a) 飞秒加工系统的示意图;(b) 激光扫描金刚石涂层的示意图

Fig. 2 Schematic of femtosecond laser ablation of nano-crystalline diamond coating. (a) Schematic of femtosecond processing system; (b) schematic of laser scanning of nano-crystalline diamond coating

为 104 fs。飞秒激光脉冲从飞秒激光器出射后依次经过半波片、衰减片、爬高反射镜组和快门,进入共聚焦显微加工系统,经物镜聚焦后垂直照射到金刚石涂层表面,光斑直径  $\omega_d$  为 30  $\mu\text{m}$ 。共聚焦显微加工系统由照明光源、分光镜和显微物镜等构成。在试验过程中,使用功率计和电荷耦合器件摄像机 (CCD) 实时观察激光功率和刻蚀情况。显微镜所用的物镜为 8 $\times$  物镜,通过加工程序控制平台移动以实现刻蚀,三维平台的移动精度为 0.1  $\mu\text{m}$ 。图 2(b) 所示为激光扫描金刚石涂层示意图。

通过控制激光重复频率 (100~10 kHz)、聚焦光斑的能流密度 (14.2~42.5 J/cm<sup>2</sup>) 和激光扫描速度 (0.1~2 mm/s) 三种参数,对金刚石涂层表面进行刻蚀。将激光处理后的试样放到丙酮溶液中清洗,清除样品表面残留的污物。再利用美国 Bruker 公司的 ContourGT-K 白光干涉仪对涂层表面作用区域的刻蚀深度和宽度进行检测,研究不同参数对金刚石涂层表面材料去除率的影响及其变化规律。

### 2.3 材料去除机理和材料去除率模型的建立

利用飞秒激光刻蚀涂层材料,材料表面会反射一部分热辐射,其余的热辐射则透过材料表面进入材料内部,逐渐被材料吸收,未被完全吸收的热辐射将穿透材料,形成透射。对于具有一定体积和形状的材料而言,热辐射在材料中的传播具有一定的穿透深度,即材料的热穿透深度。如果金刚石涂层的厚度大于自身热穿透深度,可以利用飞秒激光实现涂层的选择性精细加工,且对涂层基体没有影响。材料的热穿透深度  $l_{th}^{[18]}$  可以简单表示为

$$l_{th} = \sqrt{\frac{kt_p}{\rho c}}, \quad (1)$$

式中:  $k$ 、 $\rho$  和  $c$  分别为材料的热传导系数、密度和比热容。

由于飞秒激光的脉冲宽度很窄,金刚石涂层在飞秒激光的作用下,可认为不向晶格传递能量,晶格温度保持不变。但热作用不可避免,涂层内部发生多光子电离和自由电子加热的现象。激光脉冲通过多光子在表面和底层激发电子,最初形成的电子在几个飞秒时间内获得较高动能,具有一定动能的自由电子可以在材料中扩散至一定的深度,引起强烈电离,使材料电离成稠密的等离子体<sup>[19]</sup>,多光子电离使材料在短时间内获得大量高温自由电子。小体积内的温度突然升高会产生高压或冲击波,使一些表面喷出的物质在周围区域聚集,随着入射激

光能量的增加,沸腾区面积和喷出的物质数量均增加,并伴随等离子体的产生,激光-等离子体的相互作用会导致相变,进而材料被去除。

飞秒激光刻蚀金刚石涂层具有明确的烧蚀阈值,在材料处理的过程中,可以快速有效地完成局部的能量沉积,如果能量沉积达到一定的数值,当实际能流密度大于阈值能量密度时,就会产生烧蚀现象,材料结构发生永久性的改变。因此,判断飞秒激光实际能流密度和烧蚀阈值的关系十分重要。飞秒激光脉冲能量呈高斯分布,一个脉冲内不同位置处的能流  $F$  可表示为

$$F = F_0 \exp\left(-\frac{8r^2}{\omega_d^2}\right), \quad (2)$$

式中:  $F_0$  为峰值能流;  $r$  为所测位置到光斑中心的距离。多脉冲烧蚀的能流密度  $F_{th}(N)$  与单脉冲相比具有累积效应<sup>[20]</sup>,表达式为

$$F_{th}(N) = F \cdot N^{S-1}, \quad (3)$$

式中:  $N$  是脉冲数;  $S$  是累积因子。在刻蚀金刚石涂层的扫描路径上,实际能流密度  $F_a^{[21]}$  可以表示为

$$F_a = \frac{8P}{\pi f \omega_d^2}, \quad (4)$$

式中:  $P$  为激光功率;  $f$  为激光的重复频率。

研究表明,激光的烧蚀阈值取决于施加在同一光斑上的激光脉冲数<sup>[22]</sup>。光斑重叠率  $\phi$  被定义为沿直线扫描方向两个相邻脉冲之间重叠区域的长度  $d$  和光斑直径  $\omega_d$  的比值,在同一时间内,激光的光斑重叠率越大,单位刻蚀区域的激光脉冲数量越多,因此脉冲的重叠率可以影响激光的烧蚀阈值。图 3 为光斑重叠率的示意图,因为飞秒激光脉冲的持续时间远小于相邻脉冲的间隔,所以两个相邻脉冲的时间间隔可以近似为重复频率的倒数:

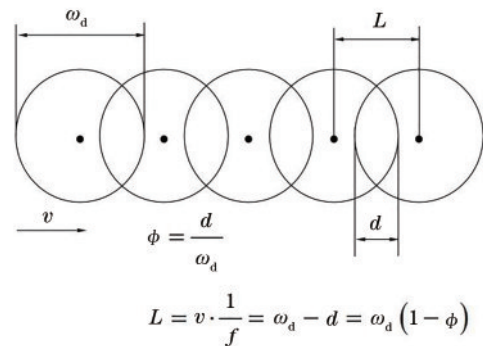


图 3 光斑重叠率的示意图

Fig. 3 Schematic of spot overlapping rate

$$v \cdot \frac{1}{f} = \omega_d (1 - \phi), \quad (5)$$

式中:  $v$  为激光的扫描速度;  $\phi$  为光斑重叠率。

由(5)式, 可得光斑重叠率为

$$\phi = \left( 1 - \frac{v}{\omega_d f} \right) \times 100\%。 \quad (6)$$

由(6)式可知, 扫描速度和激光重复频率可以影响激光烧蚀阈值。在激光加工过程中, 通过优化激光参数来获得所需的材料去除效果是一个复杂的过程, 因此本试验通过改变重复频率、能流密度和扫描速度, 研究飞秒激光各参数对纳米金刚石涂层材料去除率的影响。

本文将材料去除率定义为单位时间内材料被去除的体积。参考图 2 设置的坐标系, 以激光刻蚀金刚石涂层截面烧蚀坑的最左端为坐标原点, 刻蚀宽度方向为横轴  $y$ , 刻蚀深度方向为纵轴  $z$ 。由于烧蚀坑在  $y$  轴下侧, 在测量刻蚀深度时, 读出的数值为

负, 需取所测值的绝对值。通过描点的方法, 针对激光刻蚀金刚石涂层的切口形貌, 在直角坐标系下拟合函数。将拟合出的函数在刻蚀宽度  $a$  上进行积分, 得出刻蚀截面的面积, 利用该面积与激光扫描速度的乘积, 可以计算得到金刚石薄膜在单位时间内的去除体积, 即材料去除率, 表达式为

$$R = v \int_0^a [0 - f(y)] dy, \quad (7)$$

式中:  $R$  为材料去除率;  $a$  为烧蚀沟槽的宽度;  $f(y)$  为切口形貌的拟合函数。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 激光重复频率对材料去除率的影响

当聚焦光斑的能流密度分别为  $14.2 \text{ J/cm}^2$  和  $56.6 \text{ J/cm}^2$ , 扫描速度为  $1 \text{ mm/s}$  时, 选择  $100 \text{ Hz}$ 、 $500 \text{ Hz}$ 、 $1 \text{ kHz}$  和  $10 \text{ kHz}$  的重复频率对纳米金刚石涂层进行刻蚀, 白光干涉仪扫描的形貌如图 4 所示。

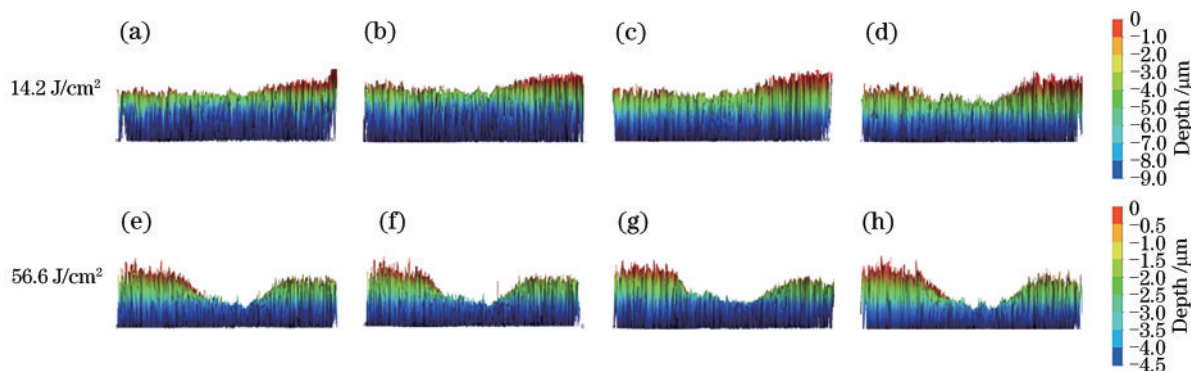


图 4 不同重复频率下的涂层截面形貌。(a)(e) 100 Hz; (b)(f) 500 Hz; (c)(g) 1 kHz; (d)(h) 10 kHz

Fig.4 Cross-sectional coating morphologies under different repetition rates. (a)(e) 100 Hz; (b)(f) 500 Hz; (c)(g) 1 kHz; (d)(h) 10 kHz

对应的刻蚀宽度及深度如表 1 所示。

表 1 不同重复频率下的刻蚀宽度和深度

Table 1 Ablation widths and depths under different repetition rates

Repetition rate / Hz	Energy flux density of $14.2 \text{ J/cm}^2$		Energy flux density of $56.6 \text{ J/cm}^2$	
	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$
	100	114.8	2.09	120.3
500	113.7	2.10	121.1	2.96
$10^3$	114.4	2.13	119.0	3.01
$10^4$	113.5	2.25	119.5	3.08

由图 4 可以看出, 重复频率对刻蚀形貌的影响不大, 在重复频率由  $100 \text{ Hz}$  增至  $10 \text{ kHz}$  的过程中,

刻蚀宽度没有明显变化, 刻蚀深度小幅度增加, 烧蚀坑中央由均匀变得粗糙。表 1 中的数据印证了这样的结果, 不同重复频率下刻蚀宽度维持在稳定的数值, 刻蚀深度缓慢增加。当能流密度为  $14.2 \text{ J/cm}^2$  时, 刻蚀深度由  $2.09 \mu\text{m}$  增至  $2.25 \mu\text{m}$ ; 当能流密度为  $56.6 \text{ J/cm}^2$  时, 刻蚀深度由  $2.81 \mu\text{m}$  增至  $3.08 \mu\text{m}$ 。当重复频率增加时, 由于激光束呈高斯分布, 中央区域的烧蚀更为明显, 刻蚀深度也会相应加深。高重复频率 ( $> 200 \text{ kHz}$ ) 的飞秒激光与材料相互作用会产生热累积效应<sup>[23]</sup>, 其对飞秒激光诱导微纳结构的形貌产生很大影响, 相较于高重复频率下的热累积效应, 重复频率较低时的热累积现象不明显。这是由于低重复频率飞秒激光脉冲之间的时间间隔较长, 激光聚焦区域的温度在下一个脉冲到达材料

时已经下降到环境温度,这种不明显的热累积效应也会导致刻蚀深度随重复频率的增大而略微加深。

利用表 1 中的数据,结合材料去除率数学模型,得到不同重复频率下的材料去除率,曲线如图 5 所示。

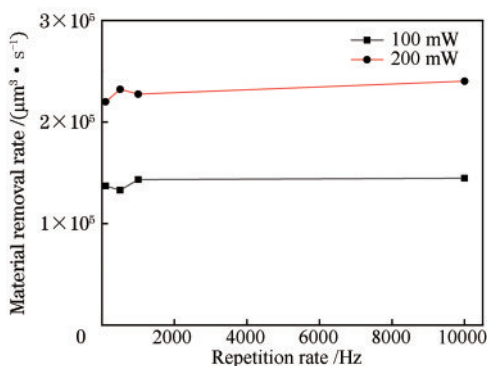


图 5 不同重复频率下的材料去除率

Fig. 5 Material removal rates under different repetition rates

随着飞秒激光重复频率的增加,刻蚀深度小幅度增加,但从图 5 可以看出,重复频率对材料去除率的整体影响不大,材料去除率维持在较稳定的水

平。当能流密度为 14.2 J/cm<sup>2</sup>时,材料去除率约为 1.4 × 10<sup>5</sup> μm<sup>3</sup>/s;当能流密度为 56.6 J/cm<sup>2</sup>时,材料去除率约为 2.25 × 10<sup>5</sup> μm<sup>3</sup>/s。材料吸收激光的能量存在差异,重复频率较低时,单脉冲能量高,单位面积内的有效脉冲少。随着重复频率的增大,单脉冲的能量不断降低,但单位面积内的有效脉冲数增多,可形成动态的烧蚀平衡,这种现象使材料在单位时间内吸收的能量保持稳定,所以激光的重复频率对材料去除率的影响较小。

### 3.2 聚焦光斑的能流密度对材料去除率的影响

当激光重复频率为 1 kHz,扫描速度为 1 mm/s 时,选择 14.2, 19.8, 22.7, 28.3, 34.0, 42.5 J/cm<sup>2</sup> 的能流密度对纳米金刚石涂层进行刻蚀。由(4)式可以计算得到聚焦光斑能流密度和激光输出功率的关系,结果如表 2 所示。

利用不同能流密度的飞秒激光刻蚀金刚石涂层,白光干涉仪扫描的形貌图如图 6 所示。

对应的刻蚀宽度及深度如表 3 所示。

表 2 不同聚焦光斑能流密度下的激光输出功率

Table 2 Laser output powers under different energy-flux densities of focusing spot

Energy flux density / (J · cm <sup>-2</sup> )	14.2	19.8	22.7	28.3	34.0	42.5
Power / mW	50	70	80	100	120	150

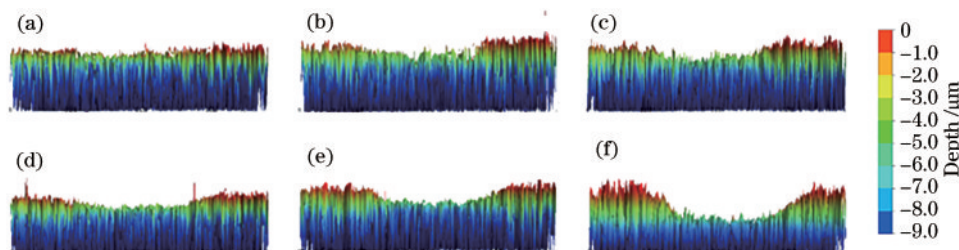


图 6 不同聚焦光斑能流密度下的涂层截面烧蚀形貌。(a) 14.2 J/cm<sup>2</sup>; (b) 19.8 J/cm<sup>2</sup>; (c) 22.7 J/cm<sup>2</sup>; (d) 28.3 J/cm<sup>2</sup>; (e) 34.0 J/cm<sup>2</sup>; (f) 42.5 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 6 Cross-sectional coating ablation morphologies under different energy-flux densities of focusing spot.

(a) 14.2 J/cm<sup>2</sup>; (b) 19.8 J/cm<sup>2</sup>; (c) 22.7 J/cm<sup>2</sup>; (d) 28.3 J/cm<sup>2</sup>; (e) 34.0 J/cm<sup>2</sup>; (f) 42.5 J/cm<sup>2</sup>

表 3 不同聚焦光斑能流密度下的刻蚀宽度和深度

Table 3 Ablation widths and depths under different energy-flux densities of focusing spot

Energy flux density / (J · cm <sup>-2</sup> )	14.2	19.8	22.7	28.3	34.0	42.5
Width / μm	101.9	104.9	110.6	114.1	122.4	128.2
Depth / μm	1.36	1.64	1.78	3.21	3.78	4.32

从图 6 可以看出,随着能流密度的增大,刻蚀区域的面积增加,刻蚀区域与周围的界限越来越明显,呈现出越来越深的烧蚀坑。由表 3 得知,刻蚀宽度和刻蚀深度随着能流密度的增加而显著增加,当能流密度增至 42.5 J/cm<sup>2</sup>时,材料的刻蚀宽度和

深度分别为 128.2 μm 和 4.32 μm,明显高于其他能流密度下的刻蚀结果。当聚焦光斑能流密度较低(14.2~22.7 J/cm<sup>2</sup>)时,在激光扫描路径上,材料累积的能量低,导致单位时间内达到烧蚀阈值的金刚石体积小,因此刻蚀宽度和深度较小。此时材料去

除机理主要为库伦爆炸<sup>[24]</sup>。在飞秒激光的作用下,产生了电荷不平衡的电子-空穴对激发轨迹,涂层表面的静电场变得不稳定,如果电场强度超过靶原子的结合能,就会发生库伦爆炸,刻蚀区域的正常熔化和汽化会去除小部分质量。随着能流密度的增加,激光功率密度增加,此时刻蚀强度变强,导致刻蚀深度和刻蚀宽度明显增加。在较高能流密度下,相爆炸和汽化的作用占主导地位<sup>[25]</sup>,当达到热力学稳定性极限和接近临界温度时,激光辐照的区域进入相图亚稳区,当液体温度达到临界点时,过热的液体转变为液体和蒸汽的混合物并以相当快的速度蒸发,在蒸发去除少量材料后,相爆炸继续进行热蒸发,导致材料大量去除和纳米尺度结构的破坏。

利用表 3 中的数据,结合材料去除率数学模型,得到不同能流密度下的材料去除率,曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,随着能流密度的增加,材料去除率增大,且增速逐渐加快。当能流密度增至 42.5 J/cm<sup>2</sup> 时,金刚石涂层的材料去除率为 3.99 × 10<sup>5</sup> μm<sup>3</sup>/s。

表 4 不同扫描速度下的光斑重叠率

Table 4 Spot overlapping rates under different scanning speeds

Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	0.1	0.3	0.5	1.0	1.3	1.5	1.7	2.0
Spot overlapping rate / %	99.7	99.0	98.3	96.7	95.7	95.0	94.3	93.3

不同扫描速度下的金刚石涂层白光干涉仪扫描形貌图如图 8 所示。

对应的刻蚀宽度及深度如表 5 所示。

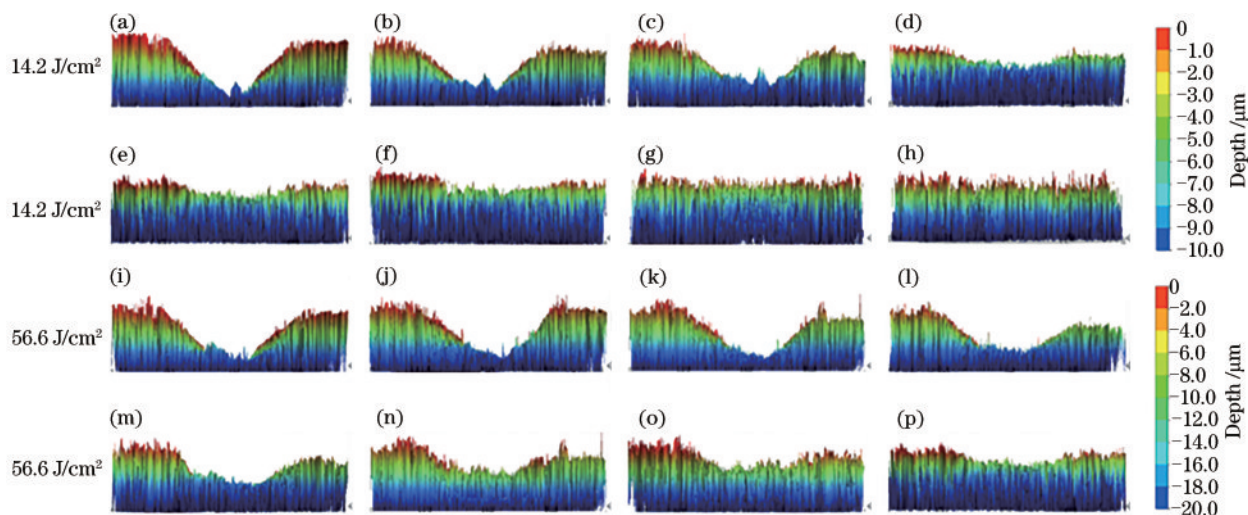


图 8 不同扫描速度下的涂层截面烧蚀形貌。(a)(i)0.1 mm/s; (b)(j) 0.3 mm/s; (c)(k) 0.5 mm/s; (d)(l) 1.0 mm/s; (e)(m) 1.3 mm/s; (f)(n) 1.5 mm/s; (g)(o) 1.7 mm/s; (h)(p) 2.0 mm/s

Fig. 8 Cross-sectional coating ablation morphologies under different scanning speeds. (a)(i)0.1 mm/s; (b)(j) 0.3 mm/s; (c)(k) 0.5 mm/s; (d)(l) 1.0 mm/s; (e)(m) 1.3 mm/s; (f)(n) 1.5 mm/s; (g)(o) 1.7 mm/s; (h)(p) 2.0 mm/s

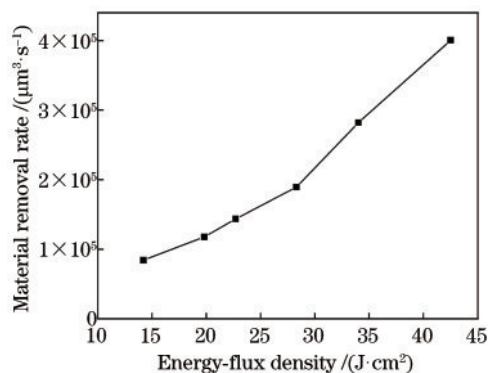


图 7 不同能流密度下的材料去除率

Fig. 7 Material removal rates under different energy-flux densities

### 3.3 激光扫描速度对材料去除率的影响

当聚焦光斑的能流密度分别为 14.2 J/cm<sup>2</sup> 和 56.6 J/cm<sup>2</sup>, 重复频率为 1 kHz 时, 选择 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0 mm/s 的扫描速度对纳米金刚石涂层进行刻蚀。由(6)式可知, 扫描速度可以影响光斑重叠率, 不同扫描速度下的光斑重叠率如表 4 所示。

从图 8 可以看出, 随着扫描速度的增加, 烧蚀坑的面积逐渐减小。当能流密度为 14.2 J/cm<sup>2</sup>, 扫描速度较低(0.1~0.5 mm/s)时, 烧蚀坑底部有明显

的波浪形状。这是由于激光扫描的速度跟不上材料烧蚀的速度,有效光斑的面积较大,产生过熔现象,过高的光斑重叠率使得涂层表面聚集着过多的激光能量,烧蚀的形貌特征较明显,边缘不平整。当扫描速度增至 2 mm/s 时,光斑重叠率为 93.3%,烧蚀坑底部的波浪状消失,加工质量较好,加工区域形貌和未加工区域无明显界限。

由表 5 可以得出,当能流密度为 14.2 J/cm<sup>2</sup> 和 56.6 J/cm<sup>2</sup> 时,刻蚀宽度随着扫描速度的变化幅度不大。这是由于激光束的能量呈高斯分布,当扫描速度变化时,激光的能量密度不会改变,因此涂层

截面烧蚀坑的宽度不会变化。当扫描速度较低时,激光的光斑重叠率较大,在扫描相同路程的情况下激光辐照到涂层表面的脉冲数量较多,相同面积内累计的能量在涂层内部传导的深度较深,导致刻蚀深度较深。扫描速度的增加会使飞秒激光刻蚀金刚石涂层表面温度升高,加速金刚石涂层表面的石墨气化,石墨气化会吸收部分能量,并电离形成致密的等离子体,等离子体在薄膜表面具有屏蔽作用<sup>[26-27]</sup>;随着等离子体浓度的上升,等离子体的屏蔽作用导致材料对脉冲的吸收率降低,所以随着扫描速度的增加,材料的刻蚀深度呈减小趋势。

表 5 不同扫描速度下的刻蚀宽度和深度

Table 5 Ablation widths and depths under different scanning speeds

Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	Energy flux density of 14.2 J/cm <sup>2</sup>		Energy flux density of 56.6 J/cm <sup>2</sup>	
	Width / μm	Depth / μm	Width / μm	Depth / μm
0.1	116.6	9.80	127.2	17.7
0.3	114.8	8.29	128.6	15.46
0.5	115.2	5.03	128.3	14.51
1.0	118.1	2.24	126.3	10.03
1.3	118.0	1.53	127.5	7.59
1.5	117.4	1.08	125.9	5.93
1.7	115.9	0.95	128.6	5.37
2.0	116.5	0.81	128.4	4.68

由表 3 可以得出,当能流密度为 56.6 J/cm<sup>2</sup>,扫描速度为 0.1 mm/s 和 0.3 mm/s 时,金刚石涂层的刻蚀深度大于 15 μm,激光已经穿透涂层刻蚀到基底,因此这两次的刻蚀结果对材料去除率的计算是无效的。利用表 5 中的有效数据,结合材料去除率数学模型,得到不同扫描速度下的材料去除率,曲线如图 9 所示。

大。当能流密度为 14.2 J/cm<sup>2</sup> 和 56.6 J/cm<sup>2</sup>,速度为 1 mm/s 时,材料去除率分别为 3.25×10<sup>5</sup> μm<sup>3</sup>/s 和 1.7×10<sup>5</sup> μm<sup>3</sup>/s,高于其他扫描速度时的结果。由图 9 得出,随着扫描速度的增大,材料去除率呈先增大后减小的趋势,在速度为 1 mm/s 时去除效果最好。

### 4 结 论

采用单因素变量试验法,研究了飞秒激光的重复频率、聚焦光斑的能流密度和扫描速度对金刚石薄膜表面材料去除率的影响。当聚焦光斑的能流密度和扫描速度一定时,由于烧蚀平衡,不同重复频率下金刚石薄膜的烧蚀宽度和烧蚀深度的变化不明显,材料的去除率趋于稳定。当飞秒激光重复频率和扫描速度一定时,随着聚焦光斑能流密度的增大,飞秒激光的刻蚀强度增大,刻蚀宽度和烧蚀深度明显增大,材料去除率也有所提高,且增速变快。当聚焦光斑的能流密度和重复频率一定时,随着扫描速度的增大,光斑重叠率减小,激光能量密度没有变化,所以刻蚀宽度的变化不大。由于光斑重叠率的减小和等离子体的屏蔽作用,薄膜的刻蚀

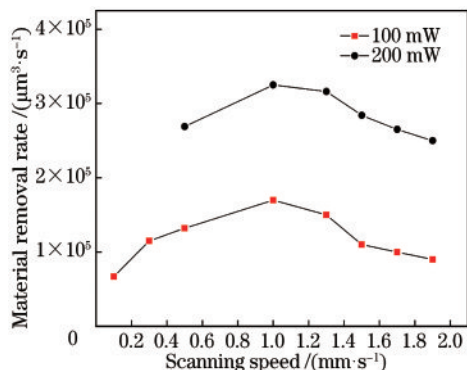


图 9 不同扫描速度下的材料去除率

Fig. 9 Material removal rates under different scanning speeds

材料去除率的计算需要用切口形貌的面积与扫描速度,当速度为 1 mm/s 时,烧蚀区域的面积不是最大,但面积和速度的乘积较大,故材料去除率较

深度明显减小。随着扫描速度的增加,单位时间内材料去除体积先增大后减小,在速度为 1 mm/s 时,材料去除率最大。

### 参 考 文 献

- [1] Yang J J. Femtosecond laser “cold” micro-machining and its advanced applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(3): 42-52, 57.  
杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(I)[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(3): 42-52, 57.
- [2] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1200001.  
朱晓农, 包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1200001.
- [3] Niu J, Liu B W, Song H Y, et al. Femtosecond chirped-pulse amplifier system based on spectrum control and dispersion optimization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0101006.  
牛佳, 刘博文, 宋寰宇, 等. 基于光谱控制与色散优化的飞秒啁啾脉冲放大系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0101006.
- [4] Huang J, Lu J Q, Yang H, et al. Quantitative analysis on coal calorific value using nanosecond, femtosecond, and dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 193002.  
黄剑, 卢景琦, 杨欢, 等. 基于纳秒和飞秒及双脉冲激光诱导击穿光谱的燃煤热值定量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 193002.
- [5] Zhang W, Feng Q, Cheng G H, et al. Femtosecond laser-induced ablation regimes and thresholds in a nickel-based superalloy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1232001.  
张伟, 冯强, 程光华, 等. 飞秒激光对镍基合金的损伤机制和阈值行为[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1232001.
- [6] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, et al. Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.  
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [7] Sciti D, Trucchi D M, Bellucci A, et al. Effect of surface texturing by femtosecond laser on tantalum carbide ceramics for solar receiver applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 161: 1-6.
- [8] Luo F F, Ong W, Guan Y C, et al. Study of micro/nanostructures formed by a nanosecond laser in gaseous environments for stainless steel surface coloring [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 328: 405-409.
- [9] Wu M T, Guo B, Zhao Q L, et al. The influence of the ionization regime on femtosecond laser beam machining mono-crystalline diamond [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 34-39.
- [10] Abdelmalek A, Sotillo B, Bedrane Z, et al. Origin of femtosecond laser induced periodic nanostructure on diamond [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(10): 105105.
- [11] Wei C, Ma Y P, Han Y, et al. Femtosecond laser processing of ultrahard materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190003.  
魏超, 马玉平, 韩源, 等. 飞秒激光加工超硬材料的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190003.
- [12] Ma Y P, Zhang Y, Wei C, et al. Surface polishing of CVD diamond coating by femtosecond laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 164-171.  
马玉平, 张遥, 魏超, 等. 飞秒激光抛光 CVD 金刚石涂层表面[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 164-171.
- [13] Reitze D H, Ahn H, Downer M C, et al. Optical properties of liquid carbon measured by femtosecond spectroscopy[J]. *Physical Review B*, 1992, 45(6): 2677-2693.
- [14] 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.
- [15] 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试验研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(2): 270-277.
- [16] 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.
- [17] Chen J Y, Jin T Y, Tian Y J, et al. Development of an ultrahard nanotwinned cBN micro tool for cutting hardened steel[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(6): 876-881.
- [18] Corkum P B, Brunel F, Sherman N K, et al. Thermal response of metals to ultrashort-pulse laser excitation [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(25): 2886-2889.
- [19] Bulgakova N M, Burakov I M, Meshcheryakov Y P, et al. Theoretical models and qualitative interpretations of fs laser material processing [J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2007, 2(1): 76-86.
- [20] Chen J Y, Li Z Y, Wang H D, et al. Femtosecond laser ablation of nano twinned diamond[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(3): 78-82.
- 陈俊云, 李召阳, 王海东, 等. 飞秒激光烧蚀纳米孪晶金刚石的研究[J]. 制造技术与机床, 2019(3): 78-82.
- [21] Sedao X, Lenci M, Rudenko A, et al. Influence of pulse repetition rate on morphology and material removal rate of ultrafast laser ablated metallic surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 116: 68-74.
- [22] Ogawa Y, Ota M, Nakamoto K, et al. A study on machining of binder-less polycrystalline diamond by femtosecond pulsed laser for fabrication of micro milling tools [J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 245-248.
- [23] Plech A, Kotaidis V, Lorenc M, et al. Femtosecond laser near-field ablation from gold nanoparticles [J]. Nature Physics, 2006, 2(1): 44-47.
- [24] Pecholt B, Vendan M, Dong Y Y, et al. Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(3/4): 239-250.
- [25] von der Linde D, Tinten K S. The physical mechanisms of short-pulse laser ablation [J]. Applied Surface Science, 2000, 154/155: 1-10.
- [26] Kim B, Iida R, Doan H D, et al. Mechanism of TCO thin film removal process using near-infrared ns pulse laser: plasma shielding effect on irradiation direction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 77-85.
- [27] Mishra S, Yadava V. Laser Beam MicroMachining (LBMM) : a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73: 89-122.