

# 基于高斯脉冲的激光刻蚀 CVD 金刚石研究

陈妮, 闫博, 李振军, 李亮, 何宁\*

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

**摘要** 构建了高斯脉冲激光线刻蚀能量密度分布模型,研究了激光功率和脉冲数对化学气相沉积(CVD)金刚石表面上的点/线尺寸的影响规律,得到了能量在材料表面的扩散机理及刻蚀面组分,并在此基础上进行了激光面刻蚀。结果表明:高斯单脉冲激光作用下刻蚀轮廓近似为高斯曲面,间接证明了激光束在材料表面作用的能量呈高斯分布,且刻蚀面由金刚石、石墨和杂化物质构成,CVD 金刚石表面的脉冲点刻蚀深度和宽度都随着激光功率和脉冲数的增大而增大。激光功率对 CVD 金刚石表面线刻蚀程度的影响较大,当功率值增大 12 W 时,刻蚀宽度和侧面扫入深度分别增大 23.32  $\mu\text{m}$  和 346.04  $\mu\text{m}$ ;激光扫描速度则对 CVD 金刚石表面线刻蚀程度的影响相对较小,当扫描速度增大 49.8 mm/s 时,刻蚀宽度和侧面扫入深度分别减小了 6.35  $\mu\text{m}$  和 70  $\mu\text{m}$ 。在功率为 3 W、扫描速度为 50 mm/s 和扫描间距为 2  $\mu\text{m}$  的条件下进行了激光面刻蚀,刻蚀深度为 9.71  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度为 1.10  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 激光技术; 纳秒激光加工; 金刚石; 高斯脉冲; 点/线刻蚀

中图分类号 TG70

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1202007

## Gaussian Pulsed Laser Etching of CVD Diamonds

Chen Ni, Yan Bo, Li Zhenjun, Li Liang, He Ning\*

*College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*

**Abstract** The Gaussian pulsed laser line etching energy density distribution model is constructed, and the effects of laser power and number of pulses on the point/line size of diamond surface produced by chemical vapor deposition (CVD) are studied. The diffusion mechanism of energy on material surfaces and the compositions of etched surfaces are obtained. On this basis, the laser surface etching is conducted. The results show that the etching profile is approximately a Gaussian one under the action of single Gaussian pulse, which indirectly proves that the energy of laser beam acting on the material surface shows a Gaussian distribution and the etching surface is composed of diamond, graphite and hybrid materials. Moreover, both the pulse point etching depth and width increase as laser power and number of pulses increase. The laser power has a great influence on the line etching degree of the CVD diamond surface. When the power value increases by 12 W, the etching width and side sweep depth increase by 23.32  $\mu\text{m}$  and 346.04  $\mu\text{m}$ , respectively. In contrast, the laser scanning speed has a relatively small influence on the line etching degree of the CVD diamond surface. When the scanning speed increases by 49.8  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , the etching width and side sweep depth decrease by 6.35  $\mu\text{m}$  and 70  $\mu\text{m}$ , respectively. The etching results under the conditions of power of 3 W, scanning speed of 50  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  and scanning spacing of 2  $\mu\text{m}$  indicate that the etching depth is 9.71  $\mu\text{m}$  and the surface roughness is 1.10  $\mu\text{m}$ .

**Key words** laser technique; nanosecond laser processing; diamonds; Gaussian pulse; point/line etching

**OCIS codes** 140.3390; 140.3330; 140.3450; 140.7300

## 1 引言

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition,

CVD) 金刚石具有很多优良的性能,极高的硬度和耐磨性及良好的化学惰性和导热率等使其在精密刀具制造领域得到广泛应用,其诸多优良特性决定了

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-07-02; 录用日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51905270, U1601204)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20180435)

\*E-mail: drnhe@nuaa.edu.cn

它不易切割、抛光和微结构化等<sup>[1-4]</sup>。目前,加工 CVD 金刚石的方法主要有机械化学研磨、电火花线切割加工、激光加工以及离子束加工等<sup>[5-13]</sup>。电火花线切割加工(WEDM)是一种利用电性能来生产微细工具的方法<sup>[5]</sup>,然而由于 CVD 金刚石的导电性差,最终的加工质量难以保证。离子束加工也可用来加工金刚石,具有很高的效率,但是其设备昂贵而未能广泛应用<sup>[6]</sup>。Shrestha 等<sup>[7]</sup>采用精密磨削法制备了 CVD 金刚石微细工具,但其加工效率低下。激光加工具有精确的方向性、可定位以及低热影响区等优点,被认为是用于加工金刚石的最重要方法之一<sup>[8-10]</sup>。Eberle 等<sup>[11]</sup>通过比较聚晶金刚石复合材料和硬质合金的吸收特性和表面粗糙度,对绿光及红外波长的皮秒和纳秒激光进行了比较研究,确定了纳秒激光通过石墨化机制进行烧蚀。Chen 等<sup>[12-3]</sup>利用纳秒激光加工 CVD 金刚石,初步验证了纳秒激光可通过热效应将 CVD 金刚石转变为石墨层,便于后续机械加工去除,但未实现可控石墨化,还需要进行进一步研究。

虽然激光加工技术相对于其他技术来说,在加工 CVD 金刚石方面有很多优势,但是目前还存在很多欠缺,例如其加工精度很难达到磨削水准,激光处理后的微铣刀需要再进行精密刃磨以达到制备要求,而且激光加工 CVD 金刚石的表面形貌会影响后续精密刃磨的效率及质量<sup>[14]</sup>,因此,对激光辐照 CVD 金刚石的去除机理研究很有必要。

本文旨在探究 CVD 金刚石的纳秒激光刻蚀现象以及其能量扩散机理,进而为 CVD 金刚石表面精密加工的预处理以及微刻蚀需求提供优化方案。首先基于脉冲激光的高斯能量分布,构建了其线刻蚀能量密度模型,分析了 CVD 金刚石样品表面的点刻蚀现象,再由点到线,考虑扫描速度以及激光功

率两个主要影响参数,探究它们对线刻蚀的扫描深度及刻蚀宽度的影响规律,揭示了激光能量在加工中的作用机理及其刻蚀面组分,并在此基础上进行了激光面刻蚀。

## 2 试验设备及方法

### 2.1 试验设备

试验中采用 8 mm×5 mm×0.4 mm 多晶 CVD 金刚石,其表面经打磨处理,粗糙度值为 0.66 μm,导热率为 1500 W/mK。纳秒激光加工 CVD 金刚石的装置示意图如图 1 所示,激光器是型号为 YLP-1/100/20 的脉冲掺镱激光器,主要性能参数如表 1 所示,其中 X、Y 轴方向的工件移动平台精度为 1 μm,型号为 FL-1064-F100-D50 的激光聚焦透镜搭建在 Z 轴方向的滚珠丝杠上,其移动精度为 2 μm,这样就实现了样品的精准移动。通过改变激光焦点相对于工件表面的离焦量,同时利用 CCD 显微镜,可实时观测激光在工件表面的光斑形态和加工过程。

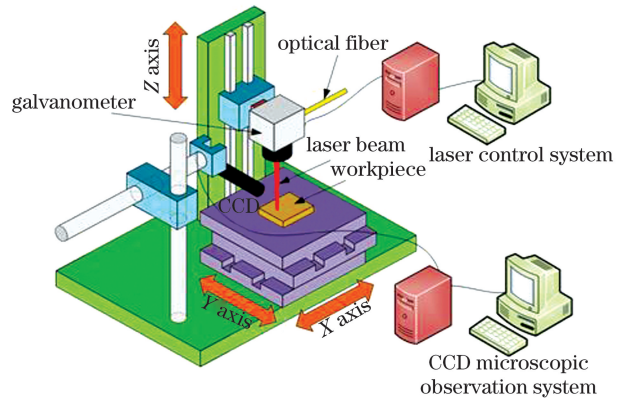


图 1 纳秒激光加工 CVD 金刚石的装置示意图

Fig. 1 Schematic of device for nanosecond laser processing of CVD diamonds

表 1 脉冲掺镱光纤激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of pulsed Ytterbium-doped fiber laser

Parameter	Pulse duration/ ns	Repetition rate/ kHz	Beam quality factor	Wavelength/ nm	Average power /W	Focus radius/ μm
Value	100	20-200	1.5	1064	2-20	20

### 2.2 试验过程及试验方法

前期试验发现,在激光功率为 3 W 时,单脉冲作用于工件表面 15 次后才会出现刻蚀现象。为了更好地研究激光单脉冲数以及功率对工件表面刻蚀的影响规律,选取的点刻蚀试验参数如表 2 所示。

表 2 激光点刻蚀试验参数

Table 2 Experimental parameters of laser point etching

No.	Number of pulses	Power /W
1	25	3, 4, 5, 7
2	20, 50, 100, 200	3

从作用于工件表面的脉冲能量变化角度来研究激光线刻蚀,扫描速度和激光功率是两个非常重要的影响参数,因此保持激光频率 20 kHz 不变,分别通过改变扫描速度和激光功率来调节作用在工件表面的脉冲光斑重叠情况以及单脉冲能量,其线刻蚀试验参数如表 3 所示,参数是依据前期试验以及实际加工需要进行选择的。

表 3 激光线刻蚀试验参数

Table 3 Experimental parameters of laser line etching

No.	Scanning speed / (mm · s <sup>-1</sup> )	Power / W
3	0.2, 20.0, 50.0	4
4	20	3, 7, 15

最后基于以上激光点/线刻蚀对 CVD 金刚石表面的影响规律,选择影响最小的激光参数对 CVD

金刚石表面进行面刻蚀,并观察表面形貌和去除深度。本文使用 S-3400 扫描电子显微镜对纳秒激光加工后的 CVD 金刚石表面形貌进行了观测分析,使用 S neox 三维光学轮廓仪对激光刻蚀的 CVD 金刚石凹坑形貌信息进行了采集,通过划线提取对应的轮廓线。在所有观察检测前,利用超声清洗机对加工后的金刚石工件进行清洗,以去除石墨,便于更好地观察表面形貌。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 单脉冲刻蚀

本文所用的激光器光束是典型的高斯光束,以光束聚焦处中心为原点建立笛卡儿直角坐标系, $z$ 轴沿光束传播方向。高斯光束在光束传播方向上的场分布遵循基尔霍夫公式<sup>[15]</sup>,可表示为

$$E(x, y, z) = \frac{A_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \exp\left\{-i\left\{k\left[z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right] - \arctan\frac{z}{f}\right\}\right\}, \quad (1)$$

式中: $A_0$ 为光束中心处的能量强度振幅,它受激光功率的调控; $w(z)$ 是沿光束传播方向 $z$ 点处光束截面上的光斑半径; $k$ 是波数; $R(z)$ 是 $z$ 点处光束截面上的曲率半径; $f$ 是高斯光束共焦参数; $(x, y, z)$ 为点坐标。

当激光作用在平面上时,激光的能量密度 $I$ 正比于激光场分布 $E$ 的平方,则有

$$I(x, y) = \frac{C}{w_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w_0^2}\right], \quad (2)$$

式中: $C$ 为常数因子; $w_0$ 为 $z=0$ 处的光斑半径。激光聚焦时最终能量密度与平均激光功率 $P$ 有关:

$$I(x, y) = \frac{2P}{\pi w_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w_0^2}\right]. \quad (3)$$

则每个脉冲光斑在任意点的总能量密度为

$$Q_1(x, y) = tI(x, y), \quad (4)$$

式中: $t$ 为每个脉冲的持续时间。本试验加工采用的是脉宽为 1064 nm 的纳秒激光,单光子能量较低,激光加工金刚石可以看作是单纯的热引导过程,即激光能量以热流的形式作用到工件表面,辐照区的温度瞬间增大。结合以上高斯单脉冲能量分布,利用 Ansys APDL 建立三维瞬态温度场的有限元仿真模型,在 Solid70 单元外添加一层 SURF152 单元,通过输入面的放射率、Stefan-Boltzmann 常数和形状系数来生成表面辐射传导矩阵。在仿真过程中,采用映射网格划分,划分精度为 1.5  $\mu\text{m}$ ,初始温

度设置为 20  $^\circ\text{C}$ ,热辐射发散系数和热对流系数分别设置为 0.9 和 20。利用 Table 函数将高斯脉冲热流密度加载到单元节点上,当一个脉冲结束时,根据不同单元的当前温度进行材料改性或者去除该单元,并通过移除上一步的热流密度来进行冷却,直到下一个脉冲的加载。其中,在执行 EKILL 命令后,程序会自动给单元刚度矩阵乘以一个很小的系数(默认为  $1.0 \times 10^{-6}$ ),以实现单元的去除。在荷载向量中,一旦某一单元被去除,其相关的阻尼和载荷等参数都会重置为 0,以此来模拟单元的去除。

在单脉冲能量 0.2 mJ 的辐照下,一个脉冲过后,表面光斑中心位置的温度高达 9513  $^\circ\text{C}$ ,并且随着远离光斑中心而迅速减小。当超过 20  $\mu\text{m}$ (聚焦光斑直径)时,温度就降到 1206  $^\circ\text{C}$ 以下,依然可以继续诱导石墨化,如图 2 (a)所示;温度在垂直方向上的递减更快,在距离表面 5  $\mu\text{m}$ 处温度低于 1206  $^\circ\text{C}$ ,如图 2 (b)所示;在经过一个脉间时间 ( $1 \times 10^{-5}$  s) 的冷却后,表面光斑中心的温度迅速降低至 20.19  $^\circ\text{C}$ 。

激光功率对刻蚀表面形貌的影响如图 3 所示。激光照射后,照射区域产生变质层,使用超声清洗去除变质层<sup>[16]</sup>,并通过拉曼光谱来确定超声波清洗后的过渡层[图 3(d)点 1]和原始 CVD 金刚石表面[图 3(d)点 2]的成分。拉曼光谱图如图 4 所示,原始表面和清洗后的过渡层在 D 区 1332  $\text{cm}^{-1}$ 处都存在

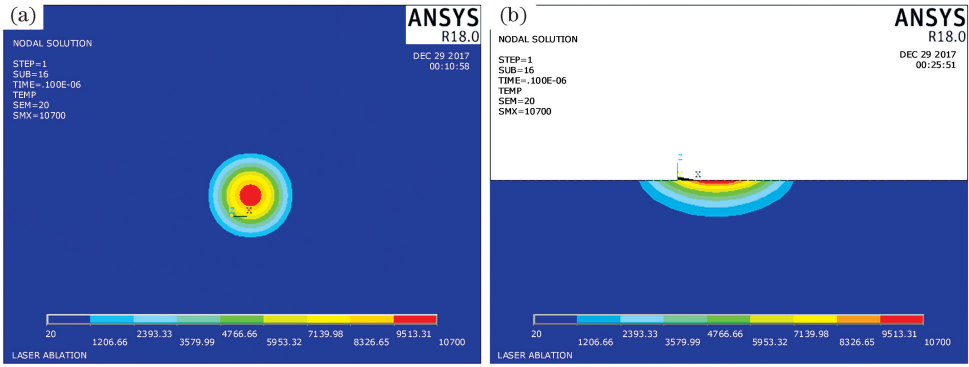


图 2 一个脉冲后的仿真温度云图。(a)水平方向;(b)垂直方向

Fig. 2 Simulation temperature cloud after single pulse. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

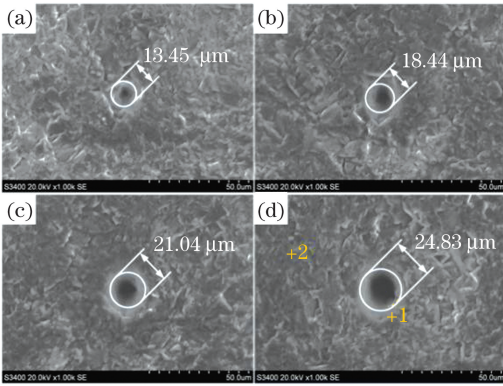


图 3 激光功率值对刻蚀表面凹坑形貌的影响。(a) 3 W; (b) 4 W; (c) 5 W; (d) 7 W

Fig. 3 Effect of laser power on etching surface pit morphology. (a) 3 W; (b) 4 W; (c) 5 W; (d) 7 W

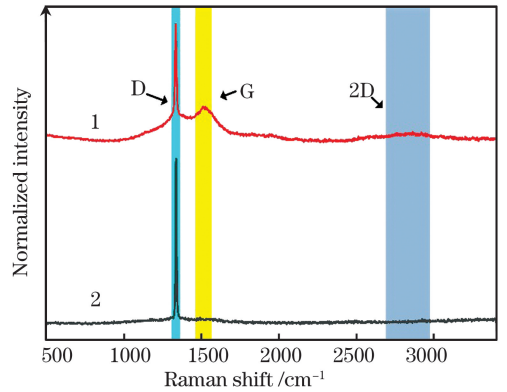


图 4 拉曼光谱图

Fig. 4 Raman spectra

非常明显的峰,表明金刚石成分很明显<sup>[17]</sup>;而在清洗后的过渡层的拉曼图(图 4 曲线 1)中,观察到了 G 区相对较弱的峰以及 2D 区微微凸起的峰,这表示还存在石墨和具有少量晶格缺陷的其他碳原子<sup>[18]</sup>,故过渡层是由金刚石、石墨和杂物质构成。

当激光功率增大时,CVD 金刚石表面的刻蚀凹坑直径增大,如图 3 所示。三维光学轮廓仪提取的

凹坑形貌如图 5(a)所示。采集的图 5(a)中虚线处的刻蚀凹坑的轮廓线如图 5(b)所示,其中  $L$  为虚线长度。可以明显看出拟合线与刻蚀凹坑轮廓线高度吻合,而且拟合后的拟合优度 R-square 值近似为 1,具有极高的可信度,表明激光单脉冲能量是呈高斯分布的,且激光作用后工件表面的凹坑轮廓曲线也近似为高斯分布曲线。对图 3 所示的 4 个刻蚀凹坑

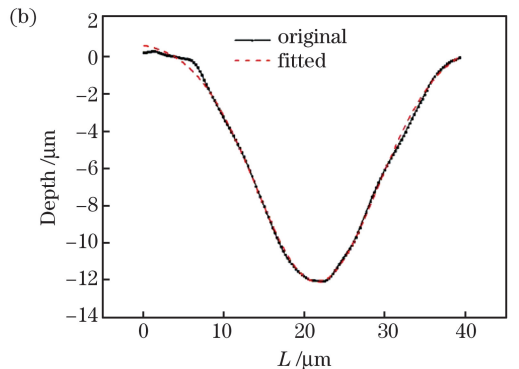
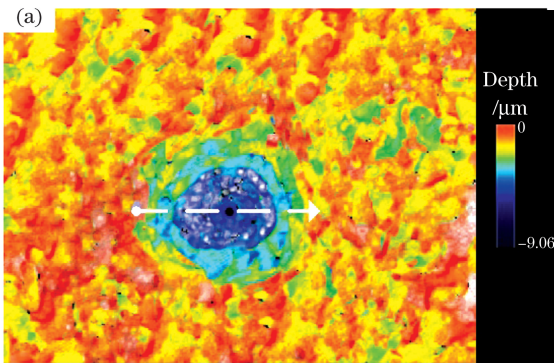


图 5 刻蚀凹坑的形貌。(a)光学形貌;(b)轮廓线的高斯拟合

Fig. 5 Morphology of etching pit. (a) Optical morphology; (b) Gaussian fitting of profile

的轮廓线进行提取拟合,不同激光功率下的刻蚀轮廓的高斯拟合结果如表 4 所示。由表 4 可知,拟合后的 R-square 值都大于等于 0.97,具有很高的可信度,且单脉冲刻蚀凹坑的深度和宽度都随着激光功率的增大而增大。

当激光脉冲数增加时,表面的刻蚀凹坑直径增大。同理,进行相同的高斯拟合处理,得到不同单脉冲数下的刻蚀轮廓的高斯拟合结果,如表 5 所示,拟合结果依然具有很高的可信度(R-square 值都大于等于 0.97),激光脉冲数具有与激光功率相同的影响规律。

表 4 不同激光功率下的刻蚀轮廓的高斯拟合结果

Table 4 Gaussian fitting results of etching profiles under different laser powers

Power /W	Depth / $\mu\text{m}$	Width / $\mu\text{m}$	R-square
3	-5.19	10.38	0.97
4	-9.97	18.34	0.99
5	-16.11	32.08	0.98
7	-19.29	38.04	0.97

表 5 不同单脉冲数下的刻蚀轮廓的高斯拟合结果

Table 5 Gaussian fitting results of etching profiles under different numbers of pulses

Number of pulses	Depth / $\mu\text{m}$	Width / $\mu\text{m}$	R-square
25	-5.19	10.38	0.97
50	-8.11	15.14	0.99
100	-10.34	22.46	0.97
200	-15.40	31.02	0.99

### 3.2 线刻蚀

#### 3.2.1 扫描速度对 CVD 金刚石线刻蚀的影响

相邻激光脉冲之间的间距  $d$  是由扫描速度  $v$  和脉冲周期  $T$  决定的,即

$$d = vT. \quad (5)$$

本试验保持激光频率 20 kHz 不变,因此相邻激光脉冲之间的间距  $d$  只跟扫描速度  $v$  有关。则 CVD 金刚石表面任意一点的脉冲光斑能量密度  $Q_2$  为

$$Q_2(x, y) = Q_1(x - md, y), \quad (6)$$

式中: $m$  为扫描速度方向上的脉冲光斑个数。相邻脉冲间距的改变不仅会影响相邻脉冲的重叠面积,还会影响脉冲的重叠个数。激光线刻蚀时扫描速度对脉冲光斑重叠的影响如图 6 所示。图 6(a)中的光斑最大重叠长度  $d_1$  大于图 6(b)中的  $d_1$ ,因此图 6(a)中左边第一个脉冲光斑和相邻右边三个脉冲光

斑都有重叠,而图 6(b)中左边第一个脉冲光斑和相邻右边两个脉冲光斑有重叠。由扫描速度引起的脉冲重叠差异现象最终会导致 CVD 金刚石表面同一位置处叠加作用激光能量的差异,即激光扫描速度越小,同一位置处的激光能量越大,进而引起激光刻蚀表面形貌的差异。因此,CVD 金刚石表面任意一点处的总能量密度  $Q_3$  为

$$Q_3(x, y) = \sum_{m=0}^h Q_2(x, y) = \sum_{m=0}^h Q_1(x - md, y), \quad (7)$$

式中: $h$  为扫描速度方向上的光斑重叠个数。

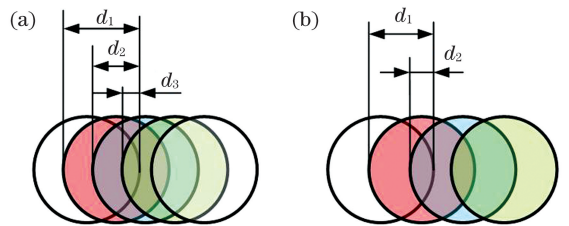


图 6 激光线刻蚀时扫描速度对脉冲光斑重叠的影响。

(a)较小扫描速度;(b)较大扫描速度

Fig. 6 Effect of scanning speed on pulse spot overlapping during laser line etching. (a) Relatively small scanning speed; (b) relatively large scanning speed

若保持其他因素不变,CVD 金刚石表面的激光刻蚀能量密度就可以看作是变量激光功率  $W$  和扫描速率  $V$  的函数:

$$Q_1(x, y, z) = f(W, V). \quad (8)$$

由(8)式模拟出的 CVD 金刚石表面的激光线刻蚀能量密度模型如图 7 所示,可以看出,激光功率  $W$  和扫描速率  $V$  的改变会影响沟槽刻蚀深度以及形貌。

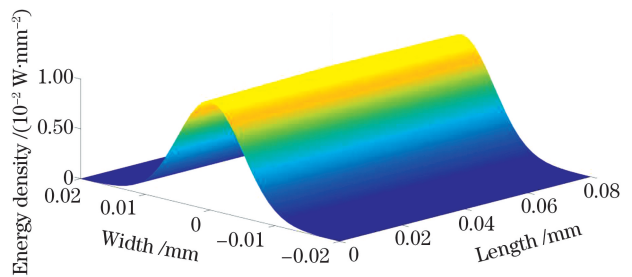


图 7 激光线刻蚀能量密度模型

Fig. 7 Laser line etching energy density model

不同激光扫描速度下的线刻蚀宽度和侧面刻蚀深度如图 8 所示。当只改变激光扫描速度时,扫描速度越大,线刻蚀宽度和侧表面扫入深度越小。当采用的扫描速度较大时,刻蚀宽度可以小于聚焦光

斑直径( $20\ \mu\text{m}$ ),如图 8(a)所示。在扫描速度为  $50\ \text{mm/s}$  时,刻蚀宽度只有  $15.26\ \mu\text{m}$ ,当扫描速度从  $50\ \text{mm/s}$  减小到  $0.2\ \text{mm/s}$  时,实际刻蚀宽度从  $15.26\ \mu\text{m}$  增加到了  $21.61\ \mu\text{m}$ ,增加了 1.4 倍,能量模型的宽度也增加了 1.4 倍;当扫描速度从  $20\ \text{mm/s}$  减小到  $0.2\ \text{mm/s}$  时,实际刻蚀宽度从  $20\ \mu\text{m}$  增加到了  $21.61\ \mu\text{m}$ ,增加了 1.3 倍,能量模型的宽度也增加了 1.3 倍。由此可以看出,构建的线刻蚀能量模型可以很好地预测实际线刻蚀宽度随扫描速度的变化趋势。从图 8 材料侧表面刻蚀划痕

可以看出,扫描速度对侧表面扫入深度的影响程度大于其对刻蚀宽度的影响。当扫描速度为  $50\ \text{mm/s}$  时,侧面激光刻蚀深度为  $12\ \mu\text{m}$ ,十分接近加工表面的去除深度;而当扫描速度为  $0.2\ \text{mm/s}$  时,侧面刻蚀深度达到了  $82\ \mu\text{m}$ ,远大于加工面上的刻蚀深度,这是由激光直接作用于侧表面引起的,因此在加工对侧面要求较高的工件时,应注意对材料侧表面的保护,选用较大扫描速度或者优化加工工艺,例如适当倾斜工件以减少和避免激光加工过程中该类破坏的影响。

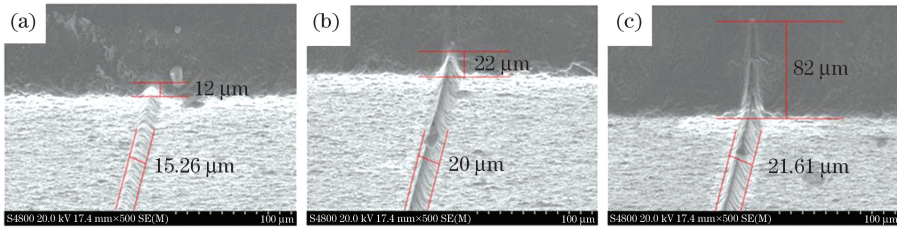


图 8 不同激光扫描速度下的线刻蚀宽度和侧面刻蚀深度。(a)  $50\ \text{mm/s}$ ; (b)  $20\ \text{mm/s}$ ; (c)  $0.2\ \text{mm/s}$

Fig. 8 Line etching widths and side etching depths under different laser scanning speeds. (a)  $50\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $20\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $0.2\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

### 3.2.2 激光功率对 CVD 金刚石线刻蚀的影响

激光功率对线刻蚀宽度和侧表面线刻蚀扫入深度的影响分别如图 9、10 所示。当脉冲光斑直径和扫描速度一定时,CVD 金刚石线刻蚀的宽度和侧表面扫入深度都会随着激光功率的增加而增加。当激光功率较小时,刻蚀宽度可以小于聚焦光斑直径( $20\ \mu\text{m}$ ),如图 9(a)所示,在功率为  $3\ \text{W}$  时,刻蚀宽度只有  $15.46\ \mu\text{m}$ ;随着激光功率的增大,实际刻蚀宽度可以明显大于光斑直径,如图 9(c)所示,在激光功率为  $15\ \text{W}$  时,实际刻蚀宽度为  $38.78\ \mu\text{m}$ ,近似为光斑直径的 2 倍。当激光功率从  $3\ \text{W}$  增加到  $15\ \text{W}$  时,实际刻蚀宽度从  $15.46\ \mu\text{m}$  增加到了  $38.78\ \mu\text{m}$ ,增加了 5 倍,而线刻蚀模型增加了

2.5 倍;当激光功率从  $7\ \text{W}$  增加到  $15\ \text{W}$  时,实际刻蚀宽度从  $28.98\ \mu\text{m}$  增加到了  $38.78\ \mu\text{m}$ ,增加了 2.3 倍,而线刻蚀模型增加了 1.9 倍。因此,激光功率对扫描速度的影响不能简单地根据线刻蚀能量模型来进行预测,应该从表面吸收进行进一步研究。从图 10 材料侧表面刻蚀划痕可以看出,激光功率对侧表面扫入深度的影响程度明显大于其对刻蚀宽度的影响,当用小激光功率值  $3\ \text{W}$  加工时,在扫入加工面时侧面激光刻蚀深度为  $15.46\ \mu\text{m}$ ,接近加工表面的去除深度;而当用较大激光功率值  $15\ \text{W}$  时,侧面刻蚀深度为  $361.50\ \mu\text{m}$ ,远远大于加工面上的刻蚀深度,因此在进行激光线刻蚀时,依然要注意保护材料侧表面。

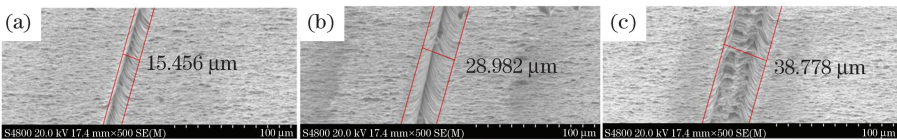


图 9 激光功率对线刻蚀宽度的影响。(a)  $3\ \text{W}$ ; (b)  $7\ \text{W}$ ; (c)  $15\ \text{W}$

Fig. 9 Effect of laser power on line etching width. (a)  $3\ \text{W}$ ; (b)  $7\ \text{W}$ ; (c)  $15\ \text{W}$

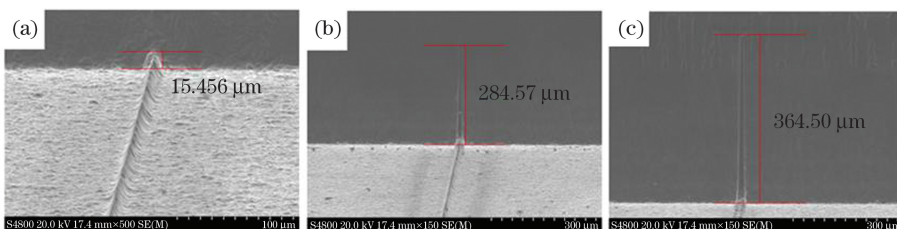


图 10 激光功率对侧表面线刻蚀扫入深度的影响。(a)  $3\ \text{W}$ ; (b)  $7\ \text{W}$ ; (c)  $15\ \text{W}$

Fig. 10 Effect of laser power on side surface line etching depth. (a)  $3\ \text{W}$ ; (b)  $7\ \text{W}$ ; (c)  $15\ \text{W}$

### 3.3 面刻蚀

基于以上关于 CVD 金刚石表面点/线刻蚀的研究,综合选取对 CVD 金刚石表面形貌影响最小的激光参数值:功率 3 W,扫描速度 50 mm/s,扫描间距 2  $\mu\text{m}$ 。在这些参数下对 CVD 金刚石表面进行面加工,得到了图 11 所示的表面形貌图,可以看见表面密布凹坑,这很好地反映了激光加工过程,即面刻蚀是由单脉冲点刻蚀堆积出来的,其中表面粗糙度为 1.10  $\mu\text{m}$ ,刻蚀深度为 9.71  $\mu\text{m}$ 。

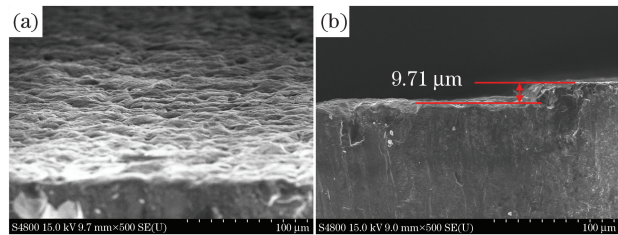


图 11 CVD 金刚石表面激光面刻蚀 SEM 图。(a) 表面;  
(b) 侧表面

Fig. 11 SEM image of laser etched CVD diamond surface.  
(a) Surface; (b) side surface

## 4 结 论

基于高斯脉冲纳秒激光,构建了其线刻蚀能量密度模型,并针对 CVD 金刚石材料进行了单脉冲点/线刻蚀试验研究,获得了激光能量在材料中的扩散机理及其刻蚀面组分,并在此基础上进行了激光面刻蚀。主要结论如下:

1) CVD 金刚石表面点刻蚀的深度和宽度都随着激光功率和脉冲数的增大而增大。通过对其组分进行分析,发现刻蚀面由金刚石、石墨和杂质物质构成,同时利用三维形貌轮廓仪观察单脉冲作用下的刻蚀轮廓并对其深度进行高斯拟合,发现拟合参数大于 0.97,表明刻蚀轮廓深度曲线符合高斯分布曲线,间接证明激光单脉冲能量符合高斯分布。

2) CVD 金刚石表面的激光线刻蚀宽度和侧面扫入深度都随着扫描速度的增大而减小,构建的能量模型能精准地预测实际线刻蚀宽度随扫描速度的变化趋势。当扫描速度从 0.2 mm/s 增加到 50 mm/s 时,侧面扫入深度从 82  $\mu\text{m}$  减小到 12  $\mu\text{m}$ ,此深度远大于线刻蚀材料表面的去除深度,因此在加工对侧表面要求较高的工件时,扫描速度不宜过小并优化加工工艺。

3) CVD 金刚石表面的线刻蚀效果受激光功率的影响较大,刻蚀宽度和侧面扫入深度都随着激光

功率的增大而增大。构建的线刻蚀能量模型不能精准地预测实际线刻蚀宽度随激光功率的变化趋势,应该进一步考虑表面吸收的影响。在功率从 3 W 增加到 15 W 时,侧面扫入深度从 15.46  $\mu\text{m}$  增加到了 361.50  $\mu\text{m}$ ,考虑激光功率时依然要注意保护侧面。

4) 基于点/线刻蚀研究结论,综合选取对 CVD 金刚石表面形貌影响最小的激光参数值即功率 3 W、扫描速度 50 mm/s 和扫描间距 2  $\mu\text{m}$ ,在此条件下进行激光面刻蚀,刻蚀深度为 9.71  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度为 1.10  $\mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Bassett W A, Skalwold E A. Diamond cleavage: importance to high pressure research [J]. High Pressure Research, 2017, 37(1): 46-58.
- [2] Chen G Y, Zhu Z C, Yin J, et al. Experiment on ablation threshold of single crystal diamond produced by femtosecond laser processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0402001.  
陈根余, 朱智超, 殷赳, 等. 单晶金刚石飞秒激光加工的烧蚀阈值实验 [J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0402001.
- [3] Derry T E, van der Berg N, Makau N W. Diamond surfaces polished both mechanically and manually; an atomic force microscopy (AFM) study [J]. Diamond and Related Materials, 2008, 17(2): 127-136.
- [4] Ollison C D, Brown W D, Malshe A P, et al. A comparison of mechanical lapping versus chemical-assisted mechanical polishing and planarization of chemical vapor deposited (CVD) diamond [J]. Diamond and Related Materials, 1999, 8(6): 1083-1090.
- [5] Fonda P, Katahira K, Kobayashi Y, et al. WEDM condition parameter optimization for PCD microtool geometry fabrication process and quality improvement [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(9): 1011-1019.
- [6] Yang K H. Research on structure design and grinding research of diamond arc edge micro milling cutter [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.  
杨凯华. CVD 金刚石圆弧刃微铣刀的结构设计和刃磨研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [7] Shrestha R, Zhan Z B, He N, et al. Optimization of the grinding parameters for CVD diamond micro-tools [J]. Materials Science Forum, 2014, 800/801: 633-638.
- [8] Mouhamadali F, Equis S, Saeidi F, et al.

- Nanosecond pulsed laser-processing of CVD diamond [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105917.
- [9] Yang Z Q, Duan J, Chen H, et al. Chemically strengthened glass fabricated by picosecond Bessel beam cutting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102010.  
杨泽齐, 段军, 陈航, 等. 皮秒贝塞尔光束切割化学强化玻璃 [J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102010.
- [10] Qin X Y, Huang T, Xiao R S. Periodic microstructure on Ti surface induced by high-power green femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002006.  
秦晓阳, 黄婷, 肖荣诗. 高功率绿光飞秒激光诱导产生钛表面周期性微结构 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1002006.
- [11] Eberle G, Wegener K. Ablation study of WC and PCD composites using 10 picosecond and 1 nanosecond pulse durations at green and infrared wavelengths [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 951-962.
- [12] Chen N, Li Z J, Wu Y, et al. Investigating the ablation depth and surface roughness of laser-induced nano-ablation of CVD diamond material [J]. *Precision Engineering*, 2019, 57: 220-228.
- [13] Li Z J, Chen N, Li L, et al. Influence of the grain size of CVD diamond on the thermal conductivity, material removal depth and surface roughness in nanosecond laser machining [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(12): 20510-20520.
- [14] Ma L Z. Research on fabrication of CVD diamond micro milling tool with hybrid machining process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.  
马兰州. CVD 金刚石微铣刀的复合制备工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [15] Wang G W. Modeling and simulation of laser heat source based on energy distribution [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.  
王根旺. 基于能量分布的激光热源模型建立及其仿真应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [16] Hirai H, Hidai H, Matsusaka S, et al. Diamond slicing using ultrashort laser-induced graphitization and additional nanosecond laser illumination [J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 96: 126-133.
- [17] Stock F, Antoni F, Diebold L, et al. UV laser annealing of diamond-like carbon layers obtained by pulsed laser deposition for optical and photovoltaic applications [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 464: 562-566.
- [18] Hu A, Sanderson J, Zhou Y, et al. Formation of diamond-like carbon by fs laser irradiation of organic liquids [J]. *Diamond and Related Materials*, 2009, 18(5/6/7/8): 999-1001.