

文章编号 1004-924X(2019)01-0164-08

飞秒激光抛光 CVD 金刚石涂层表面

马玉平*, 张 遥, 魏 超, 李 翔

(安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了实现降低金刚石涂层粗糙度的目的, 本文研究了飞秒激光功率, 重复频率以及扫描速度对金刚石涂层表面粗糙度的影响, 试验之后利用白光干涉仪检测抛光区域形貌以及粗糙度。试验结果表明: 粗糙度随着功率的降低而减小, 当功率降至 100 mw 以下时抛光后的粗糙度会随着功率的降低而略微的提高; 重复频率对抛光后的粗糙度无显著影响; 粗糙度随扫描速度的增大而减小, 当扫描速度增加到 1.6 mm/s 之后, 粗糙度会出现略微的升高。在功率 100 mw, 重复频率 1 KHz, 扫描速度 1.6 mm/s 的条件下, 得到的粗糙度最低, 约为 0.14 μm , 局部区域粗糙度可降至 100 nm 以下, 并且抛光的区域相对于未抛光区域更具有致密性, 基本上满足金刚石涂层低摩擦表面的要求。

关键词: 飞秒激光; 金刚石涂层; 粗糙度; 致密性

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20192701.0164

Surface polishing of CVD diamond coating by femtosecond laser

MA Yu-ping*, ZHANG Yao, WEI Chao, LI Xiang

(School of Mechanical and Electrical Engineer Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

* Corresponding author, E-mail: wxlmy@163.com

Abstract: In this study, the effects of femtosecond laser power, repetitive frequency, and scanning speed on diamond roughness were examined for the purpose of diamond coating surface Ra improvements. The morphology and roughness of fs-laser polished regions were analyzed with white-light interferometry. The experimental results showed that the diamond coating roughness decreased if the laser power decreased, and when the laser power was less than 100 mW, the roughness increased slightly with the reduced power. The laser repetitive frequency did not exhibit deteriorative effects on the roughness. The roughness decreased with decreasing scanning speed; however, a slight increase in the surface roughness was observed when the scanning velocity increased to 1.6 mm/s. Finally, under the conditions of 100 mW laser power, 1 KHz repetition rate, and 1.6 mm/s scanning speed, a minimum surface roughness of approximately 0.14 μm was obtained, reaching as low as 100 nm in certain local areas. Furthermore, the polished region had a higher compactness compared to the unpolished areas, and it met the requirements for low friction diamond coatings.

Key words: femtosecond laser; diamond coating; roughness; compactness

收稿日期: 2018-05-02; 修订日期: 2018-07-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51375011); 安徽省自然科学基金资助项目(No. 1208085ME63); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(No. KJ2015A050, No. KJ2015A013)

1 引 言

金刚石具有高硬度、低摩擦系数、高耐磨性以及很好的化学稳定性等优良性能,由它加工出的试样表面比较光滑,具有较高的表面质量^[1-2]。但是涂层表面一般比较粗糙,颗粒在 $8\ \mu\text{m}$ 以上,对其摩擦学性能产生不利影响,严重制约了硬质合金金刚石涂层刀具在超精密加工领域的应用。因此,获得一个摩擦系数低的表面涂层是尤为必要的。由于金刚石硬度很高,因此传统的机械抛光法并不能实现所要达到的抛光效果。激光抛光相对于传统的机械抛光具有很多的优势,其主要优点为:能对选定的小区域抛光,也可以在选定区域内大面积抛光。其抛光本质是利用激光强大的瞬时功率将金刚石颗粒的棱角磨平。国外学者 Hu 等研究了微晶金刚石、纳米晶金刚石和聚晶金刚石三种刀具切削铝基复合材料的切削加工试验,发现激光抛光与磨削相比可以使刀具的几何形状具有很高的柔性^[3]。飞秒激光的脉冲宽度极其微短,因此飞秒激光加工相对于普通激光加工具有无热影响区、无融化区、无冲击波和裂纹等优点,广泛应用于机械,电子,医疗等很多领域上的精密加工^[4]。飞秒激光对金刚石涂层进行抛光可以实现精准的定向抛光且抛光后的效果也是其他方法不可比拟的,所以选择飞秒激光抛光是一个非常具有前景的方法^[5]。国内外对超短脉冲激光加工也开展了不少的研究,科研人员利用飞秒激光在硅表面诱导微纳结构^[6],以及通过功率变化发现激光照射下的材料特性发生改变^[7]。在粗糙度方面,天津大学的研究团队^[8]利用纳秒激光对 316L 不锈钢进行抛光,成功的将表面粗糙度由 $123\ \text{nm}$ 降至 $80\ \text{nm}$ 。北航的研究者^[9]利用超声波与飞秒激光共同作用也成功的降低了硬质合金表面粗糙度。飞秒激光参数的不同都会对抛光产生一定的影响^[10-12],本文主要以飞秒激光的激光功率、重复频率、光源移动速度 3 个参数的变化对金刚石涂层表面粗糙度的影响进行了研究,并分析不同参数对粗糙度变化的原因。

2 飞秒激光与材料作用原理及模型

2.1 飞秒激光去除材料的物理过程

飞秒激光去除材料的本质首先是通过雪崩电离或者多光子电离形成自由电子,如图 1 和图 2 所示。

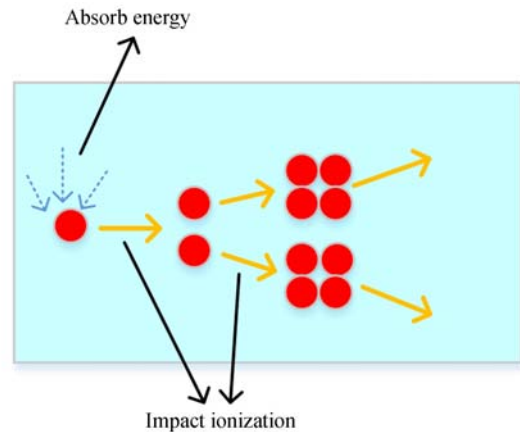


图 1 雪崩电离示意图

Fig. 1 Avalanche ionization diagram

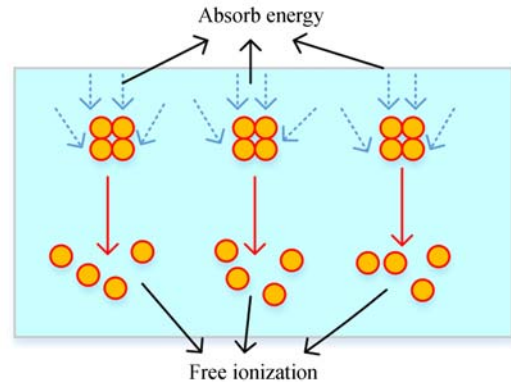


图 2 多光子电离示意图

Fig. 2 Multiphoton ionization diagram

其雪崩电离是在激光强度低于 $10^{12}\ \text{w}/\text{cm}^2$ 的情况下部分游离的电子吸收能量进行碰撞产生自由电子,而在激光强度高于 $10^{12}\ \text{w}/\text{cm}^2$ 的情况下原子场内的电子吸收能量直接电离产生自由电子。其次通过产生的自由电子与声子的耦合加热晶格,最后通过强烈的晶格加热导致相爆炸发生,从而导致材料的去除,以上过程发生在极短的时间内,所以其过程的热影响区极小^[13]。

2.2 飞秒激光与材料热传导公式模型

激光对材料的刻蚀机理主要是包含多光子吸

收诱导的材料晶相结构转变及伴随高温高压产生的等离子扩散和纳米粒子喷发。当激光在材料表面运动时,其激光与材料的能量传递方程为^[14]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c_p v \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \omega(x, y, z, t), \quad (1)$$

式中: k 为热导率; t 为时间变量; ω 为热源单位时间里加热速率; T 为温度; v 为激光扫描速度。

当激光作用材料表面时,其激光热源是高斯面热源,高斯面轮廓决定了飞秒激光作用区域的温度与压力分布,作用区域的温度及压力场分布则影响着等离子体扩散和纳米粒子喷发,方程式(2)所示^[15]:

$$\omega(x, y, z, t) = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi}} \frac{(1-R)J}{t_p \delta} \cdot \exp \left[-\frac{x}{\delta} - 4 \ln 2 \cdot \left(\frac{t}{t_p} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中: J 为激光强度; R 为材料反射率; t_p 为飞秒激光脉宽; δ 为激光脉冲渗透深度。

将式(2)带入式(1),便可得到在高斯面热源下飞秒激光与材料作用的温度场分布。由上式也可得出,激光强度与扫描速度是影响飞秒激光加工的主要因素。

3 试验装置与方法

本试验飞秒激光为掺钛蓝宝石飞秒激光系统,其主要固定参数为:波长 800 nm,脉宽 104 fs,激光焦点直径为 30 μm 。通过衰减片和半波片共同作用来调节激光束能量^[16]。激光束通过透镜聚焦以 0° 入射角度垂直照射到三维移动平台上的金刚石涂层试样表面。飞秒激光加工系统工作过程中工作平台保持固定,以光源的移动速度作为试验中激光的扫描速度。选取 3 个硬质合金 (10×10×5 mm),利用热丝化学气相沉积在试样表面沉积纳米金刚石涂层,其中反应气体丙酮、氢气、氩气的流量分别为 50 ml/min、250 ml/min、250 ml/min,反应压力为 1.8 KPa,偏流为 2.0 A,沉积时间为 7 h。之后通过白光干涉仪(White Light Interferometer)检测沉积表面形貌,发现衬底表面沉积了厚度约 5~6 μm 的金刚石涂层,如图 3 所示。通过测量得出初始粗糙度为 0.568 6 μm 。经测验,沉积获得的金刚石涂层摩擦

系数低、应力低、附着力强,其硬度、力学性能、光电学性能等完全接近天然金刚石,是一种很好的表面抗磨损的涂层^[17]。

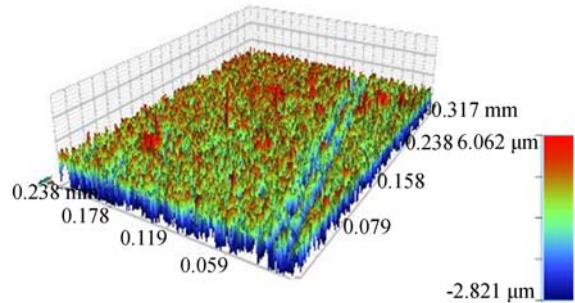


图 3 白光干涉仪下金刚石涂层初始的表面形貌
Fig. 3 Initial surface morphology of diamond coatings under white light interferometer

试验之前用丙酮溶液对样品清洗 2 min。本次实验主要是通过变换激光光源移动速度 (0.1~2 mm/s),激光功率 (50~150 mW) 以及重复频率 (100 Hz~100 KHz) 3 种激光基本参数对金刚石涂层进行抛光试验,试验后利用白光干涉仪对槽体的抛光深度以及粗糙度进行检测。白光干涉仪的基本原理是利用光在不同的平面反射形成干涉条纹来进行分析,高度的测量范围为 1 nm~200 μm ,其精度之高是其它测量方法不可比拟的。本次实验系统主要包括飞秒激光光源、光学平台及光学元件、三维移动平台以及金刚石涂层试样,实验系统示意图如图 4 所示^[18]。

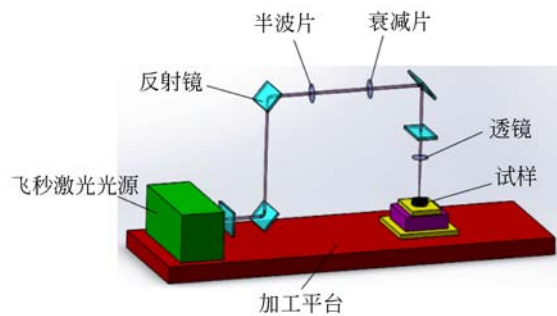


图 4 飞秒激光加工平台示意图
Fig. 4 Femtosecond laser processing platform diagram

4 试验结果分析

4.1 激光输出功率对试验的影响

选择 150 mW、120 mW、100 mW、80 mW、70 mW、50 mW 6 种不同的激光输出功率作为本

次试验的输出功率。在光源移动速度 1 mm/s,重复频率 1 KHz,波长 800 nm,脉宽 104 fs 的条件下,试验结果的三维形貌如下图 5 所示:

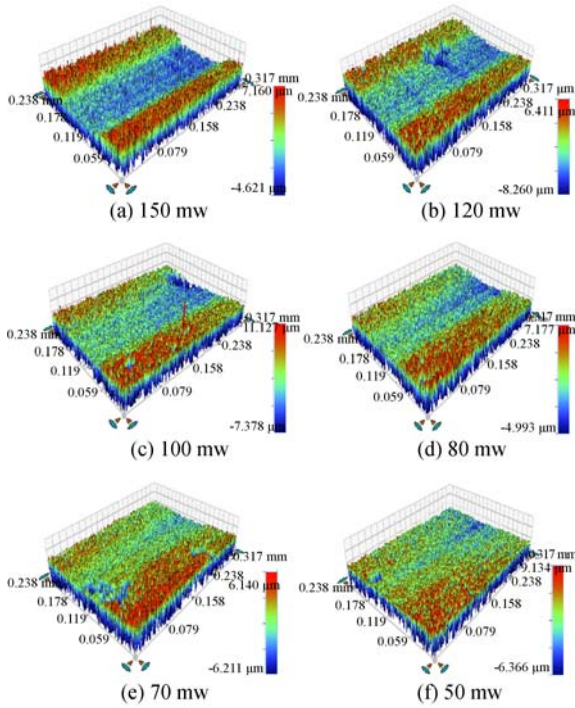


图 5 不同功率下的三维形貌图

Fig. 5 Three-dimensional shape at different power

通过观察得出不同功率下抛光槽的深度和粗糙度如表 1 所示。从表 1 可以看出抛光槽体深度随着功率的减小而减小,当功率为 80 mW 时抛光深度为 1.36 μm ,继续减小功率时抛光的深度逐渐趋于稳定。这是因为当激光功率减小到一定程度时,由于能量比较低导致金刚石颗粒凸起的棱角没有被完全的烧蚀。所以抛光的槽体深度在功

表 1 抛光深度和粗糙度测量的结果

Tab. 1 Effect of laser power on polishing depth and roughness results (μm)

激光功率/mW	抛光深度	粗糙度
150	4.53	0.862 2
120	3.73	0.381 9
100	2.7	0.352 3
80	1.36	0.421 3
70	1.42	0.420 6
50	1.15	0.443 1
0	/	0.568 69

率低于 80 mW 之后将保持稳定。当激光能量为 150 mW 时,抛光后槽体粗糙度会增高达到 0.862 2 μm ,这是因为当激光能量较大时,由于激光束能量呈高斯分布焦点中心温度最高所以会产生烧蚀不均匀的现象,这种烧蚀不均匀导致抛光区域的表面微观不平整度升高。当依次减小功率时,这种烧蚀不均匀现象也随之消失,所以粗糙度会不断减小。当功率减小至 100 mW 以下时激光在单位面积聚集的能量低于材料的烧蚀阈值,金刚石颗粒的棱角没有被激光去除,因此粗糙度反而会随着功率的减小而升高。通过数值拟合的方法对以上粗糙度与功率的关系进行数值的二次拟合。

设:

$$y = C + Bx + Ax^2, \quad (3)$$

其中: y 代表粗糙度, x 代表激光的输出功率, A, B, C 为常数:

$$A^T A X = A^T Y, \quad (4)$$

其中: A^T 为拟合矩阵转置, A 为拟合矩阵, X 为拟合函数的常数, Y 为粗糙度。

其中 $A^T =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 50 & 70 & 80 & 100 & 120 & 150 \\ 0 & 2\ 500 & 4\ 900 & 6\ 400 & 10\ 000 & 14\ 400 & 22\ 500 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 50 & 2\ 500 \\ 1 & 70 & 4\ 900 \\ 1 & 80 & 6\ 400 \\ 1 & 100 & 10\ 000 \\ 1 & 120 & 14\ 400 \\ 1 & 150 & 22\ 500 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} C \\ B \\ A \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 0.568\ 69 \\ 0.443\ 1 \\ 0.420\ 6 \\ 0.421\ 3 \\ 0.352\ 3 \\ 0.381\ 9 \\ 0.862\ 2 \end{bmatrix}$$

通过 MATLAB 软件计算得出:

$$X = \begin{bmatrix} 0.6102 \\ -0.007\ 522 \\ 5.71E-5 \end{bmatrix}.$$

所以式(3)拟合的二次函数解析式如下所示:

$$y = 0.610\ 2 - 0.007\ 522x + 0.000\ 057\ 1x^2.$$

(5)

通过式(5)推出在 $x=65.8$ 时, y 取最小值约为 0.37。即当激光功率为 65.8 mW 时,抛光的粗糙度最小约为 0.37 μm 。但试验发现激光功率为 100 mW 时抛光的粗糙度比拟合出来的曲线最低值更低,所以选择 100 mW 的激光功率作为最

佳抛光功率。

4.2 重复频率对试验的影响

选择 100 Hz、500 Hz、1 KHz、10 KHz、100 KHz 5 种不同重复频率作为本次试验中变化参数,在光源扫描速度为 1 mm/s,波长 800 nm,脉宽 104 fs,功率 100 mW 的条件下,试验结果的三维形貌如图 6 所示。

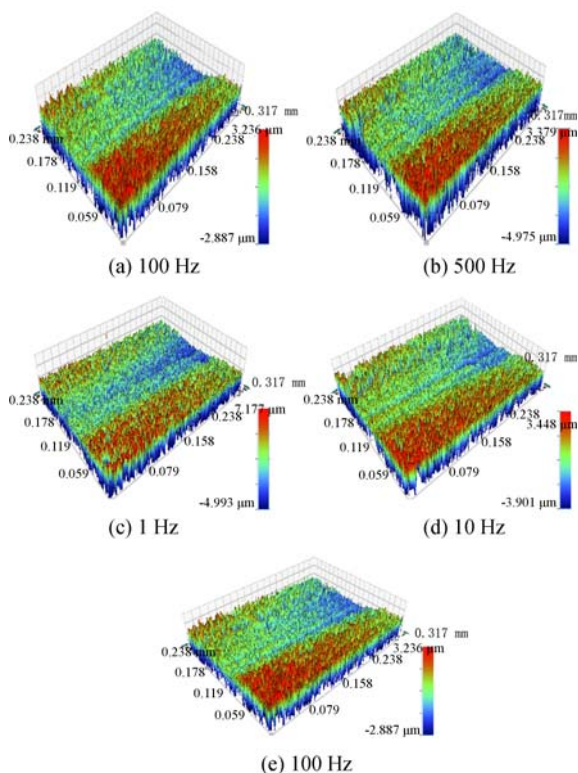


图 6 不同重复频率下的三维形貌图

Fig. 6 Three-dimensional shape at different repetition rates

通过白光干涉仪观察得出重复频率对抛光深度和粗糙度变化的结果如表 2 所示。

表 2 抛光深度和粗糙度测量的结果

Tab. 2 Effect of repetition frequency on polishing depth and roughness results (μm)

重复频率/Hz	抛光深度	粗糙度
100	2.1	0.400 7
500	2.32	0.397
1K	2.7	0.352 3
10K	2.39	0.462
100K	2.34	0.357

通过表 2 发现抛光深度与粗糙度在不同的重复频率影响下变化并不是太大,其抛光的深度在 2.1~2.7 μm 之间,粗糙度在 0.35~0.4 μm 之间浮动,总体趋势相对比较稳定。这是由于当扫描速度与激光功率不变时,重复频率降低导致单脉冲能量越高,但其激光焦点搭接率会随之降低。而当重复频率升高时,虽然单脉冲能量降低,但焦点搭接率会随着重复频率的升高而增加,因此形成了一种动态的烧蚀平衡,另外当脉冲次数增加到一定程度后,由于内壁的反射和折射使材料的吸收力减少,所以造成加工趋向于稳定,从而造成烧蚀的深度以及烧蚀后的粗糙度无明显变化。

4.3 光源移动速度对实验的影响

选择 0.1 mm/s、0.5 mm/s、1.0 mm/s、1.2 mm/s、1.6 mm/s、2.0 mm/s 6 种不同的移动速度作为本次试验光源移动速度,在激光功率 100 mW,重复频率 1 KHz,波长 800 nm,脉宽 104 fs 的条件下,观察其三维形貌如图 7 所示。

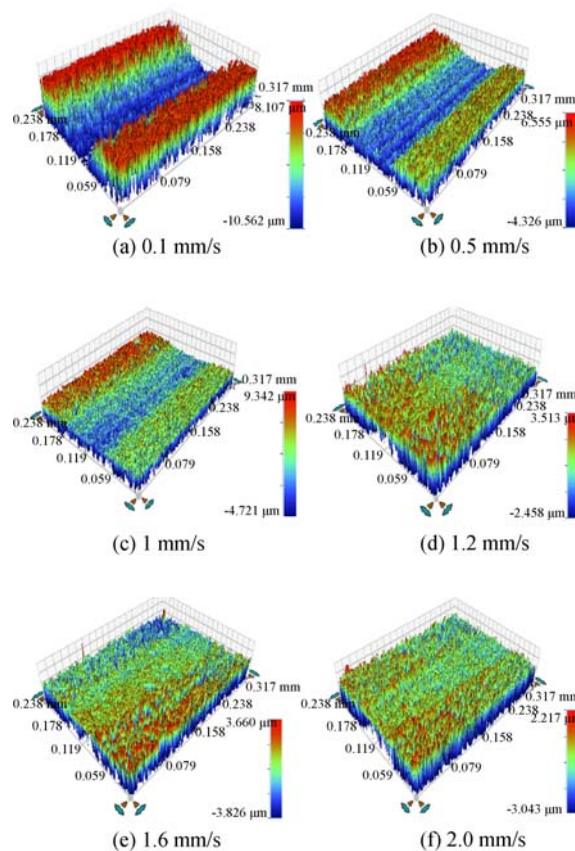


图 7 不同扫描速度下的三维形貌图

Fig. 7 Three-dimensional shape at different scanning speed

试验后得出扫描速度对抛光的深度与粗糙度结果的影响如表 3 所示。

表 3 抛光深度和粗糙度测量的结果

Tab.3 Effect of repetition frequency on polishing depth and roughness results (μm)

扫描速度/mm	抛光深度	粗糙度
0.1	13.17	1.693 32
0.5	5.29	1.029 33
1	4	0.886 67
1.2	1.6	0.217
1.6	1.0	0.149
2.0	0.81	0.160

通过表 3 可以看出当扫描速度为 0.1 mm/s 时,抛光的深度和抛光区域的粗糙度最高,这是因为当扫描速度过低时,激光在材料表面聚集的能量较高,所以在材料表面刻蚀出深度较大的槽体,而飞秒激光热源为高斯面热源,焦点中心温度最高,在扫描速度较低的情况下激光焦点处的烧蚀最为严重,而其他区域则影响不大,进而导致材料表面烧蚀极不均匀,从而造成粗糙度升高。依次增加扫描速度时,由于材料表面聚集的能量减小,所以抛光深度和粗糙度也明显降低,当速度增大到 1.6 mm/s 之后,抛光深度将趋向于稳定,而粗糙度却略微提升,当扫描速度达到 2.0 mm/s 时,材料表面单位面积聚集的能量较少,导致金刚石涂层表面没有被完全烧蚀,所以粗糙度相对于扫描速度在 1.6 mm/s 时略微提升。通过表 3 分析得出当实验扫描速度在 1.6 mm/s 时粗糙度最低为 0.149 μm 。

南京航空航天大学的卢文壮等人^[2]利用传统机械研磨法抛光单晶蓝宝石,经过 3 min 的研磨,平均材料去除率为 0.397 $\mu\text{m}^3/\text{min}$,粗糙度降低至 0.354 μm ,虽然在效率上有很明显优势,但是在抛光效果及精度上达不到精密加工所需的要求。国外 S ROY 等人^[19]利用机械抛光法经过 35 h 将金刚石涂层表面粗糙度从 2.22 μm 降至 0.66 μm ,然后利用化学机械法再次经过 35 h 对其进行二次精抛光将金刚石涂层表面粗糙度从 0.66 μm 降至 0.175 μm ,虽然在粗糙度上有了很大程度地改善,但是存在抛光时间长(约 70 h),

效率低等问题,且抛光的精度仍不及飞秒激光抛光效果。对比上述研究者的实验结果,不难发现利用飞秒激光对金刚石涂层进行抛光具有其他方法不可比拟的优势和具有广阔的应用前景。

4.4 抛光区域与未抛光区域的表面形貌

通过以上试验分析得出在激光功率为 100 mW,重复频率 1 KHz,扫描速度 1.6 mm/s 时抛光后的金刚石涂层表面粗糙度最低。将未抛光区域与抛光区域相比较,如图 8 所示,发现抛光区域的粗糙度有了明显降低,局部区域的粗糙度甚至可以降至 100 nm 以下,而且抛光后的区域表层更具有致密性,这是由于当激光束与金刚石涂层相互作用时,飞秒激光极高的瞬时功率导致金刚石涂层凸起的棱角直接被汽化烧蚀,而焦点附近区域的温度低于焦点中心温度,所以导致金刚石涂层熔化,并在冷却过程中再重新形成一种更致密的金刚石涂层薄膜。这种致密的涂层不但有较小的粗糙度而且更具有耐磨性,能对刀具起到很好的保护作用,从而延长刀具的使用寿命。

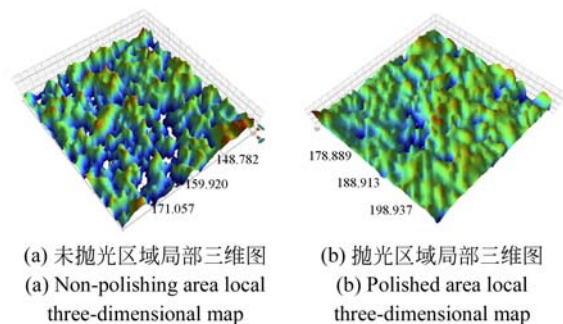


图 8 未抛光区域与抛光区域对比图

Fig. 8 Unpolished and polished areas

5 结 论

本文为了降低金刚石涂层表面粗糙度,通过改变飞秒激光参数来研究不同加工参数对金刚石涂层粗糙度的影响,试验之后利用白光干涉仪对抛光区域进行检测。试验结果表明:粗糙度随着功率的降低而减小,当减小到 100 mW 之后粗糙度随之升高;重复频率对粗糙度无显影响;扫描速度对粗糙度影响很大,随着扫描速度的增加粗糙度随之降低,在扫描速度达到 1.6 mm/s 时之后粗糙度略微升高。综上所述:在功率 100 mW,重

复频率 1 KHz,扫描速度 1.6 mm/s 时抛光的粗糙度最低约为 $0.149 \mu\text{m}$,并且抛光后的区域相对于未抛光区域更具有致密性,基本上有效的实现

了对金刚石涂层的抛光也满足了涂层表面低摩擦的要求。研究结果将进一步拓展硬质合金衬底金刚石涂层刀具在精密加工领域中的应用。

参考文献:

- [1] 马玉平,王金龙. $\text{W}_{18}\text{Cr}_4\text{V}$ 高速钢衬底 CVD 金刚石涂层沉积技术研究[J]. 人工晶体学报,2015,44(4):1041-1045.
MA Y P,WANG J L. Research on deposition technology of CVD diamond coating on $\text{W}_{18}\text{Cr}_4\text{V}$ high-speed steel substrate [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(4): 1041-1045. (in Chinese)
- [2] 卢文壮,杨斌,冯伟,等. 应用 CVD 金刚石涂层工具研磨单晶蓝宝石[J]. 光学精密工程,2016,24(3):540-546.
LU W ZH, YANG B, FENG W, *et al.*. Lapping of sapphire wafers by CVD diamond coated tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (3) :540-546. (in Chinese)
- [3] HU J, CHOU Y K, THOMPSON, *et al.*. Characterizations of nano-crystalline diamond coating cutting tools[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202/4-7:1113-1117.
- [4] 曹国凤. 激光技工[M]. 北京:化学工业出版社,2015.
CAO G F. *Laser mechanic*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [5] SANGUK PARK, YUNSEOK KIM, JOONHO YOU, *et al.*. Damage-free cutting of chemically strengthened glass by creation of sub-surface cracks using femtosecond laser pulses[J]. *Manufacturing Technology*, 2017, 66(1): 535-538.
- [6] 张成云,刘海英,满文庆,等. 飞秒激光正交线扫描诱导表面微纳结构[J]. 光学精密工程,2017,25(12):3063-3069.
ZHANG CH Y, LIU H Y, MAN W Q, *et al.*. Femtosecond laser induced surface micro-and nano-structures by orthogonal scanning processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 3063-3069. (in Chinese)
- [7] 杨成娟,梅雪松,王文君,等. 皮秒激光功率变化对激光诱导晶体硅变化的影响[J]. 红外与激光工程,2016,45(1):106006-0106006.
YANG CH J, MEI X S, WANG W J, *et al.*. Influence of laser power variation on laser-induced changes of crystalline silicon[J]. *Infrared and laser engineering*, 2016, 45 (1) :106006-0106006. (in Chinese)
- [8] 张峰烈,傅星,刘春阳. 纳秒脉冲激光对 316L 不锈钢微抛光效果的影响[J]. 纳米技术与精密工程,2011,9(4): 370-376.
ZHANG F L, FU X, LIU C Y. Influences of nanosecond pulsed laser on parameters in micro-polishing of stainless steel316L[J]. *Nanotechnology and precision Engineering*, 2011, 9(4): 370-376. (in Chinese)
- [9] WANG H P, GUAN Y C, ZHENG H Y. Smooth polishing of femtosecond laser induced craters on cemented carbide by ultrasonic vibration method[J]. *Applied Surface Science*, 2017,426(7): 399-405.
- [10] YOSHINORI OGAWA, MICHIHARU OTA, KAZUO NAKAMOTO, *et al.*. A study on machining of binder-less polycrystalline diamond by femtosecond pulsed laser for fabrication of micro milling tools [J]. *Manufacturing Technology*, 2016, 65(1): 245-248.
- [11] NAOKI YASUMARU, KENZO MIYAZAKI, JUNSUKE KIUCHI. Control of tribological properties of diamond-like carbon films with femtosecond-laser-induced nanostructuring [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(8): 2364-2368.
- [12] LI R, NIE W J, LU Q M, *et al.*. Femtosecond-laser-written superficial cladding waveguides in Nd:CaF₂ crystal [J]. *Optics&Laser Technology*, 2017, 92: 163-167.
- [13] 虞刚,虞和济. 激光制造工艺学[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
YU G, YU H J. *Laser Manufacturing technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 姚燕生,袁珠珠,王园园,等. 氮化硅陶瓷水下激光与超声复合加工方法及其机理研究[J]. 机械工程学报,2017,53(7): 207-216.
YAO Y S, YUAN Z Z, WANG Y Y, *et al.*. Research on ultrasonic-laser machining underwater and its mechanism for silicon nitride Ceramics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53 (7): 207-216. (in Chinese)
- [15] 马维刚,王海东,张兴,等. 飞秒脉冲激光加热金属薄膜的理论和实验研究[J]. 物理学报,2011,60(6): 421-427.

- MA W G, WANG H D, ZHANG X, *et al.*. Theoretical and experimental study of femtosecond pulse laser heating on thin metal film[J]. *Journal of Physics*, 2011, 60(6): 421-427. (in Chinese)
- [16] 吴东江, 姚龙元, 马广义, 等. 偏振态飞秒激光加工石英玻璃表面质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(2): 31-37.
- WU D J, YAO L Y, MA G Y, *et al.*. Influence of polarization state on the surface quality of femtosecond laser ablation quartz glass[J]. *Strong laser and particle beam*, 2014, 26(2): 31-37. (in Chinese)
- [17] 石玉龙. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- SHI Y L. *Thin film technology and film materials* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [18] 赵清亮, 姜涛, 董志伟, 等. 飞秒激光加工 SiC 的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 172-177.
- ZHAO Q L, JIANG T, DONG ZH W, *et al.*. Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 172-177. (in Chinese)
- [19] ROY S, BALLA VK, MALLIK AK, *et al.*. A comprehensive study of mechanical and chemo-mechanical polishing of CVD diamond[J]. *Science Direct*, 2018, 5(3): 9846-9854.

作者简介:



马玉平(1975—),男,博士,山东宁阳人,副教授,2002年于河南理工大学获得硕士学位,2007年于上海交通大学获得博士学位,主要从事精密与特种加工方面的研究。E-mail: wxlmy@163.com