

# 激光加工硬质合金刀具表面微织构的试验研究

苏永生 李亮 何宁 赵威

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 表面微织构刀具对改善刀-工摩擦接触状态、刀具磨损及抗黏附性方面具有积极作用。利用光纤激光器,在硬质合金刀具前刀面上进行了微沟槽和微圆坑织构的加工对比试验,分析了平均输出功率、脉冲频率和离焦量等不同工艺参数对微织构的形貌和质量的影响。试验结果表明:随着平均输出功率和脉冲频率的增加,微沟槽宽度和微圆坑直径分别表现出增大和减小的趋势;采用较大的脉冲频率、平均输出功率能够改善微织构的形貌和质量;当负离焦量在 $-1\sim-1.4$  mm 范围时,在沟槽底部获得了更加均匀光滑的形貌。

**关键词** 激光技术;硬质合金刀具;微织构;工艺参数

**中图分类号** TN249; TG506

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201441.0603002

## Experimental Research on Laser Machining of Surface Micro-Textures of Carbide Cutting Tool

Su Yongsheng Li Liang He Ning Zhao Wei

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

**Abstract** Cutting tools with surface micro-textures have positive effects on reducing friction, improving the wear resistance and anti-adhesion. The comparative trials are carried out in fiber laser machining of micro-grooves and micro-holes on the rake face of cemented carbide cutting tool. The effects of various processing parameters on topography and quality of micro-textures are analyzed, such as average output power, pulse repetition rate, defocusing distance. The experimental results show that the width of micro-grooves and the diameter of micro-holes have an increasing and a decreasing tendency with the increase of the average output power and the pulse repetition rate respectively. Furthermore, the morphologies of micro-textures can be improved by the larger average output power and the pulse repetition rate. It is observed that bottom morphologies of the micro-grooves is more uniform and smoother when the defocusing distance ranges from  $-1\sim-1.4$  mm.

**Key words** laser technique; cemented carbide tool; micro-texture; processing parameters

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 350.3390

## 1 引 言

在切削加工过程中,刀具快速磨损是制约难加工材料(如钛合金、高温合金等)高效精密加工的关键问题,如何降低刀具磨损,提高加工效率与精度,改善工件的表面质量具有重大的意义和迫切性<sup>[1-2]</sup>。仿生学和摩擦学的研究表明,非光滑形态的表面具有减摩、抗黏附和耐磨等功能<sup>[3-11]</sup>,这一

发现为切削加工的减摩研究提供了新的思路和方法。由于不同尺寸和形状的表面织构对改善摩擦磨损性能具有不同的效果,因此对微织构形貌和质量的研究具有重要意义。

表面织构的加工方法主要包括电火花加工、光刻加工、电解加工、激光加工等。激光加工技术由于具有能量密度高、可控性好、速度快、精度高的良好

**收稿日期:** 2013-10-12; **收到修改稿日期:** 2013-12-03

**基金项目:** 国家自然科学基金(51375236)

**作者简介:** 苏永生(1982—),男,博士研究生,主要从事高速切削过程中刀具摩擦磨损及刀具表面结构等方面的研究。

E-mail: sysh8584@nuaa.edu.cn

**导师简介:** 李亮(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事高速、高效切割加工等方面的研究。

E-mail: liliang@nuaa.edu.cn

特点,在生产实践和科学研究中得到了广泛应用。Stournara 等<sup>[12]</sup>对二氧化碳激光器切削铝合金 AA5083 的质量进行了研究,发现激光功率和切削速度对切削质量具有重要影响。Vincent 等<sup>[13]</sup>在非均匀材料上用激光加工出了不同织构的表面。杨继宏<sup>[14]</sup>用 YAG 激光器在碳钢上进行了激光打微孔实验,研究了加工打微孔作用机理及其工艺。辛凤兰<sup>[15]</sup>采用研制的激光器对低碳钢和高温合金进行了激光打孔工艺的研究,获得了较好的孔型质量。姜梦华等<sup>[16]</sup>对无锥度直孔的激光加工进行了研究。袁根福等<sup>[17]</sup>系统研究了激光加工大理石时,工艺参数对铣削量和铣削面质量的影响规律。

综上所述,尽管对不同类型的微织构及其加工研究已经不少,然而将不同形貌的微织构应用到切削刀具表面上,在高速切削过程中用来改善刀-工切削区的摩擦性能方面在国内的研究中还不多<sup>[18-20]</sup>,国外对表面织构刀具的研究也尚处于发展阶

段<sup>[21-24]</sup>。由于表面微织构能够提高刀具耐磨性、抗黏结性、减少摩擦,因此研究不同工艺参数对微织构的尺寸和形貌质量的影响,为进一步优化织构参数提供科学依据具有重要实际意义。与传统的 CO<sub>2</sub> 和 YAG 激光打标机相比,光纤激光打标机具有转换效率高、光束质量好、光斑直径小、稳定性高、体积更小等优点,标记精细度更高,具有明显的优势。采用光纤激光打标机在 YG8 硬质合金刀具上进行微沟槽和微圆坑加工试验,主要研究了脉冲频率、平均输出功率和离焦量对微织构形貌和质量的影响。

## 2 试 验

试验系统由光纤激光器、扫描振镜、扫描场镜、计算机、控制卡及工作平台等组成(图 1)。其中 YLP 光纤激光器性能参数见表 1,扫描场镜的焦距为 100 mm,扫描幅面范围为 50 mm×50 mm。

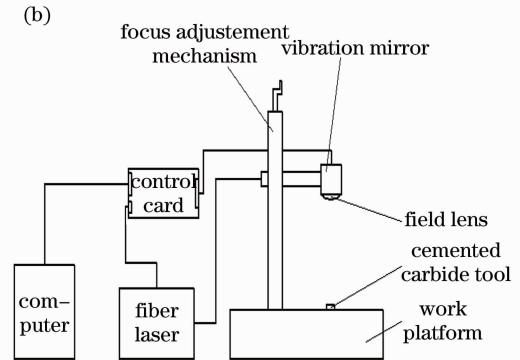
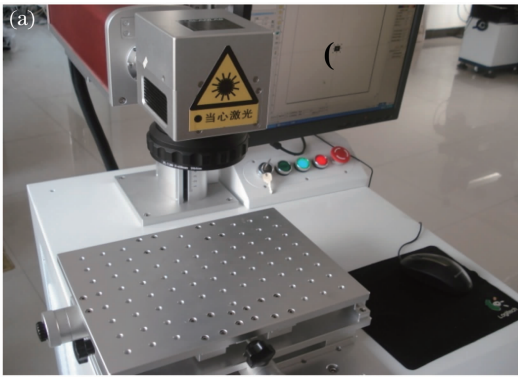


图 1 激光加工微织构试验。(a) 试验设备;(b) 系统示意图

Fig. 1 Experiment of laser machining of micro-textures.

表 1 光纤激光器主要性能参数

Table 1 Key performance parameters of fiber laser

Parameters	YLP-1/100/20
Mode of operation	pulsed
Energy per pulse (PRR: 20 kHz) /mJ	1
Polarization	Random
Center emission wavelength /nm	1055~1070
Pulse duration /ns	100
Pulse repetition rate /kHz	20~200
Nominal average output power /W	20

试验制备微织构的材料为硬质合金刀具,主要成分是 92% 的碳化钨和 8% 的 Co,采用 Leica DVM5000 三维数字显微镜对微织构三维形貌进行测量。由于加工过程中激光束产生的瞬间高温将使试样材料迅速熔融并汽化,加工后试样表面又急剧冷却,使得一部分熔融材料在微织构表面堆积形成

(a) Experimental setup; (b) schematic diagram of system

毛刺。为确保微织构三维形貌测量的精度,减少误差,先用金相砂纸打磨,去除凸缘毛刺,然后用超声波在丙酮溶液中清洗 10 min,进行污物去除清理。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 微织构加工的形貌及稳定性分析

采用光纤激光器在硬质合金刀具前刀面上加工出圆坑和沟槽两种微织构,其扫描电子显微镜下的表面形貌如图 2 所示。从图 2 可以看出,圆坑和沟槽形状上端大下端小,呈现倒锥状。

图 3 是微圆坑织构深度和直径随扫描次数的变化趋势图。在刀具前刀面上用光纤激光器加工出两组圆坑阵列,两组阵列的平均输出功率、扫描速度和脉冲频率均分别为 4 W、5 mm/s、20 kHz,两组阵列的扫描次数分别取 400 和 200。

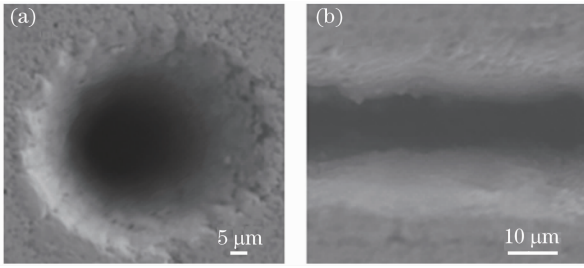


图2 微织构扫描电镜形貌。(a) 微圆坑;(b) 微沟槽  
Fig. 2 Scanning electron microscope morphologies of micro-textures. (a) Micro-hole; (b) micro-groove

由图3可以看出,在其它参数不变的情况下,随着扫描次数的增加,圆坑的深度明显增大,但是其直径变化不大。测量结果表明,扫描次数为400时,加工出的一组微圆坑阵列的深度和直径的平均值分别为19.80 μm和51.05 μm。扫描次数为200时,微圆坑阵列的深度和直径的平均值分别为15.84 μm和51.15 μm。同一条件下,在试样不同位置处激光加工出的圆坑阵列的深度和直径变化不大,说明加工出的微织构尺寸大小的稳定性和均匀性较好。

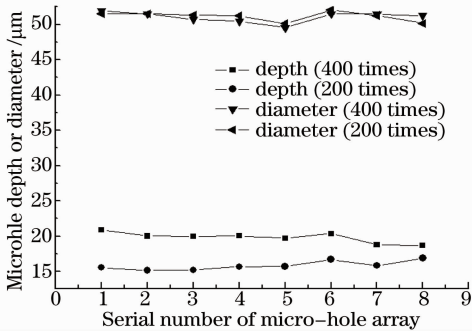


图3 不同扫描次数下圆坑阵列深度和直径变化曲线  
Fig. 3 Depth and diameter of micro-hole array versus scanning times

### 3.2 脉冲频率对微织构形貌的影响

图4为微沟槽宽度和微圆坑直径随着脉冲频率的变化趋势图。两种微织构激光加工的平均输出功率 $P$ 取5 W,扫描速度取1 mm/s,脉冲频率 $f$ 分别取20、50、80、110、140 kHz,加工微沟槽和微圆坑的扫描次数分别取100和50。由变化曲线可以看出,微沟槽的宽度随着脉冲频率的增加而减小。同样随着频率增加,微圆坑的直径也随之减小。这说明可以通过调节脉冲频率的大小来优化激光加工出的沟槽宽度和圆坑直径大小。图5为沟槽微织构在不同脉冲频率下扫描电镜(SEM)形貌,从图5可以看出当脉冲频率从20 kHz增大到100 kHz时沟槽表面和侧壁的变得更加平整,表面粗糙度明显降低。因此一定条件下,随着频率的增加,试样的形貌质量可

以得到较大改善<sup>[25-26]</sup>。

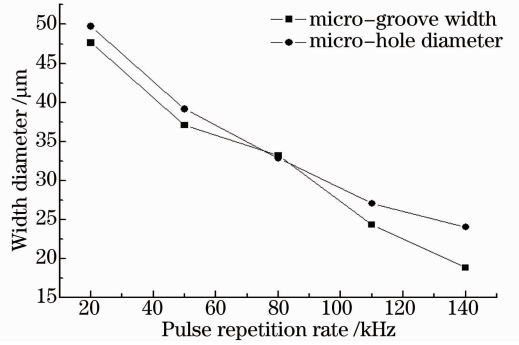


图4 不同脉冲频率下沟槽宽度和圆坑直径变化曲线  
Fig. 4 Width of micro-grooves and diameter of micro-holes versus pulse repetition rate

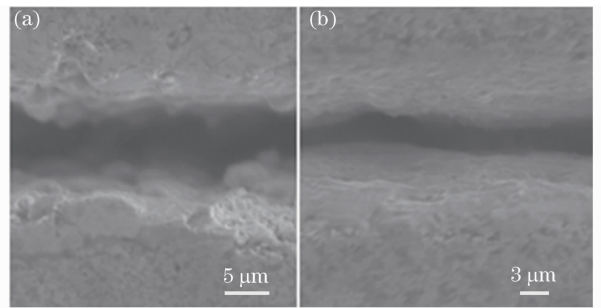


图5 微织构在不同脉冲频率下扫描电镜形貌。  
(a) 20 kHz; (b) 100 kHz

Fig. 5 Scanning electron microscope morphologies of micro-grooves under different pulse repetition rates. (a) 20 kHz; (b) 100 kHz

微织构宽度和直径是由一组脉冲中单个脉冲能量、宽度决定的。在本次试验中,脉冲宽度保持不变。此外,激光束在加工区域的直径、散焦面的形状以及试样的固定和装夹误差对其也有影响。单点脉冲能量 $E$ 与峰值功率 $P(\tau)$ 、平均输出功率 $\bar{P}$ 、脉冲宽度 $\Delta\tau$ 、脉冲周期 $T$ 、脉冲频率 $f$ 关系为

$$E = P(\tau)\Delta\tau = \bar{P}T = \frac{\bar{P}}{f}, \quad (1)$$

由(1)式可以看出,在脉冲宽度和平均输出功率一定时,随着脉冲频率的增加,脉冲的峰值功率降低。因此在其他参数不变时,微沟槽宽度和微圆坑直径随着脉冲频率的增大而减小。此外,在其他条件一定时,激光的脉冲个数随着脉冲频率的增大而增加。因此在不影响材料加工的同时,增加脉冲频率可以增加加工区域的脉冲个数,从而改善加工形貌和质量[图5(b)]。

### 3.3 平均输出功率对微织构形貌的影响

图6为不同平均输出功率下沟槽宽度和圆坑直径变化曲线。两种微织构激光加工的平均输出功率

$P$  均分别取 7、9、11、13、15 W, 微沟槽的扫描速度、脉冲频率和扫描次数分别取 0.5 mm/s, 170 kHz, 100; 微圆坑的扫描速度、脉冲频率和扫描次数分别取 1 mm/s, 120 kHz, 20。从图 6 可以看出, 随着平均输出功率的增加, 微沟槽宽度和微圆坑直径均表现出增加趋势。图 7 为沟槽微织构在不同平均输出功率下扫描电镜形貌, 从图中可以看出当平均输出功率从 7 W 增大到 11 W 时, 沟槽的宽度明显增大, 沟槽侧壁上去除的材料更多, 侧壁的形貌质量有所改善。

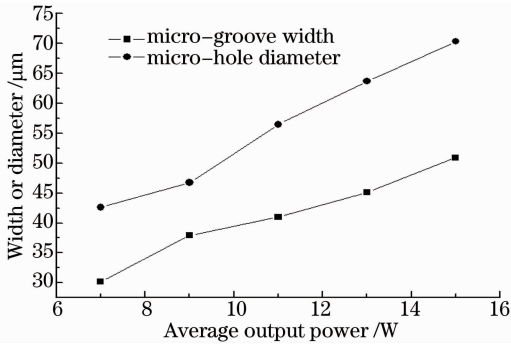


图 6 不同平均输出功率下沟槽宽度和圆坑直径变化曲线

Fig. 6 Width of micro-grooves and diameter of micro-holes versus different average output powers

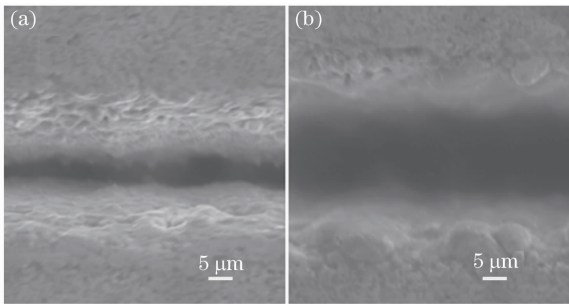
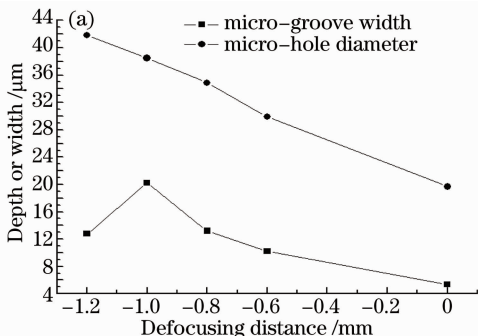


图 7 微织构在不同平均输出功率下扫描电镜形貌。

(a) 7 W; (b) 11 W

Fig. 7 Scanning electron microscope morphologies of micro-grooves under different average output powers. (a) 7 W; (b) 11 W



激光加工微沟槽和微圆坑时, 作用在刀具前刀面上的能量密度是一个至关重要的参数。由于激光斑点上的功率密度  $P_1$  由下式决定<sup>[27]</sup>

$$P_1 = \frac{4E}{\pi d^2 t_p}, \quad (2)$$

式中  $P_1$  激光斑点上的功率密度,  $E$  激光能量,  $d$  光斑直径,  $t_p$  脉冲宽度。由(1)式和(2)式可以看出, 在脉冲宽度和脉冲频率一定时, 随着平均输出功率的增加, 单脉冲能量变大, 从而激光束功率密度变大。在其他参数不变时, 较高的激光束功率密度能使加工微织构过程中产生过多的蒸汽相物质, 产生的硬质合金材料的蒸汽压力越大, 高压蒸汽带走的液相物质就越多, 沟槽宽度和圆坑直径越大。因此, 当要求加工的微织构宽度或直径较大时, 激光的脉冲能量应该增大, 材料的导热性越好、熔点越高、硬度越高时, 脉冲的能量也应该越大。但是, 过大的脉冲能量会使圆坑的锥度和直径变大, 刀具表面的圆坑入口处产生较大的破坏, 这样影响了织构的质量和形貌。所以, 应该选择合适的工艺参数保证在刀具表面加工出最佳的沟槽和圆坑质量。

### 3.4 离焦量对微织构形貌的影响

图 8(a) 为沟槽深度和宽度分别随离焦量的变化曲线图。微沟槽激光加工的平均输出功率  $P$  取 5 W, 扫描速度、脉冲频率和扫描次数分别取 1 mm/s, 50 kHz, 100, 激光束焦点离刀具表面的距离(离焦量)分别取 0、-0.6、-0.8、-1、-1.2 mm。

图 8(b) 为微圆坑深度和直径分别随离焦量的变化曲线图。微圆坑加工的平均输出功率  $P$  取 10 W, 扫描速度、脉冲频率和扫描次数分别取 1 mm/s, 120 kHz, 20, 焦点离刀具表面的离焦量分别取 0、-0.6、-0.8、-1、-1.2 mm。

从图 8 可以看出, 随着离焦量的增加, 微沟槽的宽度和微圆坑直径均随着离焦量向刀具表面下方增

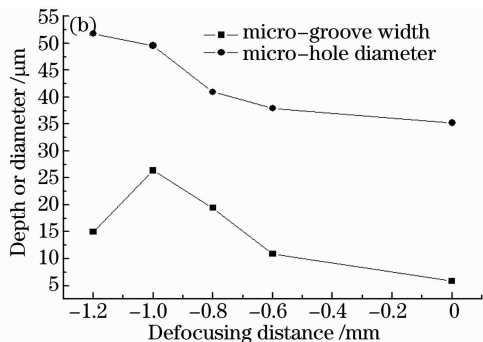


图 8 不同离焦量下沟槽和圆坑尺寸大小变化曲线

Fig. 8 Dimensions of micro-grooves and micro-holes versus defocusing distance



大表现出增加趋势。沟槽和圆坑深度随着离焦量增大而增大,当离焦量为 $-1\text{ mm}$ 时候,两者达到最大深度。此时,沟槽达到最大深度 $20.254\ \mu\text{m}$ ,圆坑的最大深度为 $26.385\ \mu\text{m}$ 。离焦量继续增加时,两者深度开始下降,这说明过分增大离焦量会导致沟槽和圆坑深度的下降。

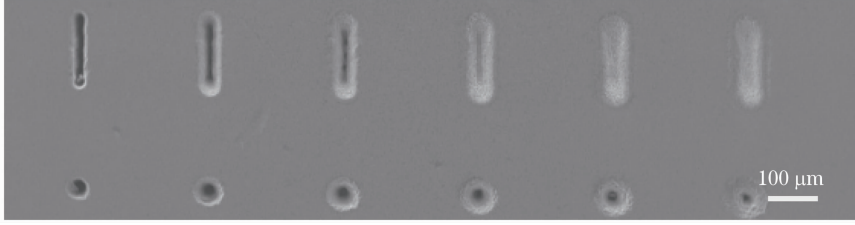


图9 不同负离焦量下的微结构形貌

Fig. 9 Scanning electron microscope morphologies of micro-textures under different defocusing distances

当其他工艺参数一定时,激光束的离焦量变化对微结构的深度、宽度、直径及形状有很重要的影响。当激光束焦点处在材料表面时,沟槽和圆坑的侧壁上吸收的能量少,一般只因热传导产生轻微熔化,且焦点处激光束的光斑直径最小,因此加工出的沟槽的宽度和圆坑直径最小。焦点处在材料表面以下时,随着离焦量的增大,激光束从上到下的能量密度逐渐增加,沟槽或圆坑内部的能量密度比刀具表面的高,因此加工出的结构深度更大。由于表面光斑直径随离焦量增加而增大<sup>[28]</sup>,因此刀具表面上加工出的沟槽宽度和圆坑直径在增加,且其形状是材料表面上端较下端大。然而,在负离焦方向过分增大离焦量会使得被加工处的能量密度下降很大,导致微沟槽和微圆坑的槽壁和圆坑壁上产生强烈的熔化,沟槽和圆坑深度上由于光线的散射而大大减少,

图9为不同负离焦量下的微结构(SEM)形貌,沟槽和圆坑结构离焦量的大小从左向右分别为0、 $-0.6$ 、 $-0.8$ 、 $-1.0$ 、 $-1.2$ 、 $-1.4\text{ mm}$ 。从图中可以看出当负离焦量从0增大到 $-1.4\text{ mm}$ 时沟槽的宽度和圆坑的直径均明显增大,两者深度逐渐减小。

因此降低了微沟槽和微圆坑深度。

图10为激光加工出的微沟槽底部随离焦量变化的形貌图。微沟槽加工的平均输出功率 $P$ 取 $10\text{ W}$ ,扫描速度、脉冲频率和扫描次数分别取 $2\text{ mm/s}$ , $50\text{ kHz}$ , $100$ ,离焦量分别取 $0$ 、 $-0.6$ 、 $-0.8$ 、 $-1$ 、 $-1.2$ 、 $-1.4\text{ mm}$ 。

从图10可以看出,在负离焦方向离焦量增大至 $-1\text{ mm}$ 时,沟槽深度达到最大,但是随着离焦量继续增大,沟槽的深度明显出现了减少趋势。在离焦量为 $0$ 、 $-0.6$ 、 $0.8\text{ mm}$ 时,其底部形貌高低不平,不同位置的深度不够均匀,沟槽的底部质量不够光滑。在离焦量为 $-1$ 、 $-1.2$ 、 $-1.4\text{ mm}$ 时,沟槽底部形貌在不同位置的深度较均匀和光滑,获得了较好的沟槽底部质量。一定的离焦量可以使光斑能量的分布相对均匀,同时也可以获得相对均匀的功率

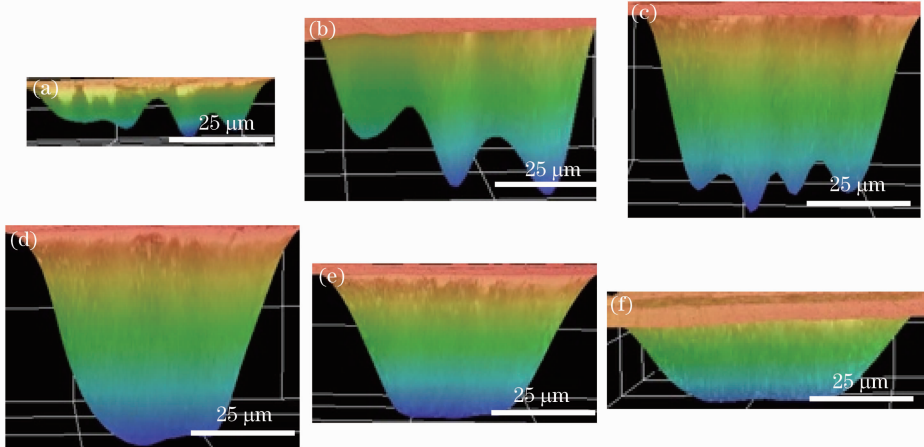


图10 微沟槽底部随离焦量变化的形貌图。(a) 聚焦; (b)  $-0.6\text{ mm}$ ; (c)  $-0.8\text{ mm}$ ; (d)  $-1\text{ mm}$ ; (e)  $-1.2\text{ mm}$ ; (f)  $-1.4\text{ mm}$

Fig. 10 Morphology of micro-grooves bottom under different defocusing distances. (a) Focus; (b)  $-0.6\text{ mm}$ ; (c)  $-0.8\text{ mm}$ ; (d)  $-1\text{ mm}$ ; (e)  $-1.2\text{ mm}$ ; (f)  $-1.4\text{ mm}$

密度分布。尽管正负离焦量相等时,相应焦面上的功率密度近似相等,然而,两种离焦方式下获得的微织构形状不同。负离焦时,沟槽或圆坑内部的功率密度比刀具表面的高,因此加工出的织构深度更大。因此,采用负离焦方式在硬质合金刀具表面加工微沟槽时,在一定的范围内增大离焦量可以使沟槽底部深度更加均匀,获得光滑的沟槽形貌和质量。

## 4 结 论

1) 扫描次数为 400 和 200 时,加工出的圆坑阵列深度和直径的平均值前者分别为  $19.80\ \mu\text{m}$  和  $51.05\ \mu\text{m}$ ,后者分别为  $15.84\ \mu\text{m}$  和  $51.15\ \mu\text{m}$ 。结果表明同一条件下,在试样不同位置处用光纤激光器加工出的圆坑阵列深度和直径变化不大,加工的稳定性和均匀性较好。

2) 随着平均输出功率的增加,微沟槽宽度和微圆坑直径均表现出增加趋势;随着脉冲频率的增加,微沟槽宽度和微圆坑直径均表现出减少趋势。

3) 在负离焦方向上,沟槽宽度和圆坑直径随着离焦量的增大表现出增大趋势,在焦点附近,其宽度和直径达到最小;随着离焦量增大,沟槽和圆坑的深度也逐渐增大,在离焦量为  $-1\ \text{mm}$  时达到最大,继续增大离焦量,深度开始下降。

4) 工艺参数对微织构的形貌和质量影响较大,采用较大的脉冲频率和平均输出功率能够改善微织构的形貌和质量;离焦量对微沟槽底部形貌和质量影响较大,当离焦量在  $-1\sim-1.4\ \text{mm}$  范围内时,在沟槽底部获得了深度更加均匀和光滑的形貌和质量。

## 参 考 文 献

- 1 Herbert Schulz, Eberhard Abele, He Ning. The High Speed Machining—Fundamentals and Applications [M]. Beijing: Sciences Press, 2010.  
舒尔茨,阿贝尔,何宁. 高速加工理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 2 He Ning. High Speed Cutting Technology [M]. Shanghai: Shanghai scientific and Technical Publishers, 2012.  
何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- 3 Han Zhiwu, Ren Luquan, Liu Zubin. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289—293.  
韩志武,任露泉,刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 289—293.
- 4 Ren Luquan, Yang Zhuojuan, Han Zhiwu. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144—147.  
任露泉,杨卓娟,韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 144—147.

- 5 Cong Qian, Ren Luquan, Wu Liankui. Taxonomic research on geometric nonsmooth animal surface shapes[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 1992, 8(2): 7—12.  
丛茜,任露泉,吴连奎. 几何非光滑生物体表形态的分类学研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(2): 7—12.
- 6 Z Burton, B Bhushan. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces [J]. Ultramicroscopy, 2006, 106(8): 709—719.
- 7 Z Burton, B Bhushan. Hydrophobicity, adhesion, and friction properties of nanopatterned polymers and scale dependence for micro- and nanoelectromechanical systems [J]. Nano Letters, 2005, 5(8): 1607—1613.
- 8 Wang Jiadao, Chen Darong, Kong Xianmei. Study on lubrication of regular concave surface[J]. Tribology, 2003, 23(1): 52—55.  
汪家道,陈大融,孔宪梅. 规则凹坑表面形貌润滑研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 52—55.
- 9 A Ronen, I Etsion, Y Kligerman. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive component[J]. Trib Trans, 2001, 44(3): 359—366.
- 10 U Pettersson, S Jacobson. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts[J]. Tribology International, 2003, 36(11): 857—864.
- 11 Han Zhong ling, Wang Jiadao, Chen Darong. Drag reduction by dimples on surfaces in plane-plane contact lubrication [J]. Tribology, 2009, 29(1): 10—16.  
韩中领,汪家道,陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 10—16.
- 12 A Stournaras, P Stavropoulos, K Salonitis, et al.. An investigation of quality in CO<sub>2</sub> laser cutting of aluminum [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2009, 2(1): 61—69.
- 13 C Vincent, G Monteil, T Barrier e, et al.. Laser machining in lamellar cast iron[J]. Int J Mater Form, 2008, 1(1): 575—578.
- 14 Yang Jihong. Action Mechanism and Technics Study of Using Laser Drilling Microhole [D]. Tianjing: Tianjin University, 2008.  
杨继宏. 激光打微孔作用机理及工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- 15 Xin Fenglan. Research on the Laser Drilling of High Quality[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.  
辛凤兰. 高质量激光打孔技术的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- 16 Jiang Menghua, Li Qiang, Lei Hong, et al.. Study on producing non-tapered holes with adaptively collimating high peak power pulsed Nd: YAG laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003004.  
姜梦华,李强,雷旬,等. 高功率自准直脉冲 Nd: YAG 激光加工无锥度直孔研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003004.
- 17 Yuan Genfu, Zeng Yaoyan. Experimental study of laser milling on marble[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(3): 275—278.  
袁根福,曾晓雁. 大理石的激光铣削加工试验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 275—278.
- 18 Deng Jianxin, Wu Ze, Lian Yunsong, et al.. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes [J]. Int Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 30(1): 164—172.
- 19 Wu Ze, Deng Jianxin, Chen Yang, et al.. Performance of the self-lubricating textured tools in dry cutting of Ti-6Al-4V [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2012, 62(9-12): 943—951.
- 20 Qi Baoyun, Li Liang, He Ning, et al.. Experimental study on orthogonal cutting of Ti6Al4V with micro-textured tool [J]. Tribology, 2011, 31(4): 346—351.  
戚宝运,李亮,何宁,等. 微织构刀具正交切削 Ti6Al4V 的

- 试验研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(4): 346—351.
- 21 Toshiyuki Enomoto, Tatsuya Sugihara, Satoshi Yukinaga, *et al.*. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 571—574.
- 22 Tatsuya Sugihara, Toshiyuki Enomoto. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. Precision Engineering, 2012, 36(2): 229—237.
- 23 Noritaka Kawasegia, Hiroshi Sugimori, Hideki Morimoto, *et al.*. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 248—254.
- 24 Shuting Lei, Sasikumar Devarajan, Zenghu Chang. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1612—1620.
- 25 Yuan Genfu, Yao Yansheng, Chen Xuehui, *et al.*. Experimental study on the quality of material surface applied laser-chemical combined etching[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 281—283.
- 袁根福, 姚燕生, 陈雪辉, 等. 激光和化学复合刻蚀加工表面质量的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 281—283.
- 26 Li Xiangyou, Zen Xiaoyan. Kerf roughness and quality control of laser precision cutting[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(2): 176—180.
- 李祥友, 曾晓雁. 激光精密切割不锈钢模板割缝质量控制[J]. 中国激光, 2002, 29(2): 176—180.
- 27 Zhou Bingkun. Laser Principle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980.
- 周炳琨. 激光原理[M]. 北京: 北京国防工业出版社, 1980.
- 28 Guan Zhenzhong. Process Manual of Laser Machining [M]. Beijing: China Measuring Publishing House, 2007. 129—130.
- 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007. 129—130.

栏目编辑: 宋梅梅