

# 飞秒激光加工 YG6 不同微织构表面浸润性研究

杨奇彪<sup>1\*\*</sup>, 陈中培<sup>1</sup>, 杨涛<sup>2</sup>, 张弘<sup>1</sup>, 娄德元<sup>1</sup>, 刘顿<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

<sup>2</sup>武汉交通职业学院船舶与航运学院, 湖北 武汉 430068

**摘要** 采用波长为 800 nm 的飞秒激光在硬质合金 YG6 表面加工出微凹坑形貌, 分别测量了微凹坑的形貌参数和表面接触角, 从而获得最佳加工参数, 分析了微凹坑形状、分布密度和单个面积对表面接触角的影响。基于 Wenzel 模型和 Cassie 模型的中间状态理论, 分析了微凹坑形状对表面接触角的影响机理。结果表明: 当平均功率低于 200 mW 时, 微凹坑表面形貌较好, 微凹坑深度与扫描次数呈线性关系; 微凹坑表面接触角随着微凹坑分布密度的增大而减小, 随着单个微凹坑面积的增大而增大。不同形状微凹坑的浸润性优劣顺序依次为正三角形、正方形、正六边形、圆形。

**关键词** 激光技术; 浸润性; 微织构; 飞秒激光; 硬质合金 YG6

**中图分类号** TG665; TB383

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.091404

## Surface Wettability of Different Micro-Textured YG6 Processed by Femtosecond Lasers

Yang Qibiao<sup>1\*\*</sup>, Chen Zhongpei<sup>1</sup>, Yang Tao<sup>2</sup>, Zhang Hong<sup>1</sup>, Lou Deyuan<sup>1</sup>, Liu Dun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;*

<sup>2</sup>*School of Naval Architecture and Navigation, Wuhan Technical College of Communications,  
Wuhan, Hubei 430068, China*

**Abstract** A femtosecond pulsed laser with wavelength of 800 nm is used to process micro-pits on the surface of cemented carbide YG6. The morphology parameters and surface contact angles of these micro-pits are measured to obtain the optimal processing parameters. The effects of micro-pit shape, distribution density and single micro-pit area on the surface contact angle are analyzed. Based on the middle state theory of Wenzel and Cassie models, the influence mechanism of micro-pit shape on surface contact angle is analyzed. The results show that the micro-pit surface morphology is relatively good and there exists a linear relationship between the micro-pit depth and number of scanning when the average power is lower than 200 mW. The micro-pit surface contact angle decreases with the increase of micro-pit density and increases with the increase of single micro-pit area. The shapes of micro-pits in the order of excellence of surface wettability are as follows: regular triangle, regular square, regular hexagon and circle.

**Key words** laser technique; wettability; micro texture; femtosecond laser; cemented carbide YG6

**OCIS codes** 140.3390; 140.7090; 220.4000

## 1 引言

钨钴(WC-Co)类硬质合金是近年来应用最广的硬质合金之一, 碳化钨(WC)具有很高的硬度, 钴(Co)具有优良的韧塑性, 因此 WC-Co 类硬质合金具有优良的综合性能, 是目前硬质合金研究的热

点之一<sup>[1-3]</sup>。在高速切削加工过程中, 硬质合金刀具磨损较快, 其中切削高温和剧烈摩擦是刀具寿命的主要影响因素<sup>[4-5]</sup>。研发新型刀具材料和涂层不仅成本昂贵而且周期较长, 为了减少加工磨损, 改善刀-屑界面润滑状态成为一种更为经济有效的解决办法。

刀具表面微织构是在刀具表面或涂层表面特定

**收稿日期:** 2018-03-07; **修回日期:** 2018-03-26; **录用日期:** 2018-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51505135)、国家科技支撑计划(2015BAF20B03)、湖北省教育厅项目(B2016051)、武汉青年科技项目(2016070204010123)

\* **E-mail:** liudun98@163.com; \*\* **E-mail:** yangqibiao@mail.hbut.edu.cn

位置加工出微米级拓扑形状以减缓刀具磨损<sup>[6]</sup>。在刀具前刀面上加工出合金的微结构,促使冷却润滑介质可以在刀-屑界面的摩擦力下继续存留在微结构中,从而形成稳定的边界润滑层,提高表面润滑承载能力<sup>[7-10]</sup>。其中,表面微观结构与切削液浸润性关系的研究对高性能刀具的制备具有重要意义,已经成为国内外研究的热点之一<sup>[11-16]</sup>。

目前,激光加工技术是应用较为广泛的表面改性技术之一<sup>[17-18]</sup>,区别于长脉冲激光烧蚀,飞秒激光具有极短的脉宽和极高的峰值功率,实际加工中产生较少的热量,可以实现冷加工<sup>[19-20]</sup>。因此,飞秒激光在微结构精密加工领域中拥有巨大优势。本文采用飞秒激光在硬质合金 YG6 表面加工出微凹坑,分析了最佳加工参数以及微凹坑的形状、分布密度和单个微凹坑面积对表面接触角的影响,并研究了不同形状微凹坑的浸润性机理。

## 2 实验方案

实验采用的 WC-Co 类硬质合金 YG6 的样品规格为  $60\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,化学成分(质量分数)为  $\omega_{\text{WC}} = 94\%$ ,  $\omega_{\text{Co}} = 6\%$ ,密度为  $14.6 \sim 15.0\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,热导率为  $75.55\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,硬度(HRA)为 89.5,抗弯强度为  $1.42\text{ GPa}$ <sup>[21]</sup>。实验前对样品表面进行预处理,采用 400 目( $38\text{ }\mu\text{m}$ )的金刚石砂轮磨削表面以去除毛刺,用绒布抛光机抛

光表面至粗糙度  $R_a = 0.2$ ,将样品放入乙醇溶液中用超声波清洗后冷风吹干。采用美国 Coherent 公司 Libra-HE 型飞秒激光系统(加工示意图如图 1 所示),波长  $\lambda = 800\text{ nm}$ ,脉宽  $t_p = 100\text{ fs}$ ,重复频率  $R = 10\text{ kHz}$ ,光路中加入  $5\text{ mm}$  的光阑以提高光斑圆度,聚焦光斑直径  $D \approx 30\text{ }\mu\text{m}$ ,加工速度  $v = 100\text{ mm/s}$ ,光斑搭接率为  $66.7\%$ 。在激光加工过程中为了避免 YG6 表面与空气发生反应,将 YG6 样品放入真空箱中,在纯度(质量分数)为  $99.999\%$  的氦气氛围中进行加工。

预处理后的原始表面记为  $A_0$ ,实验加工的表面微凹坑形状为正方形、圆形、正三角形和正六边形,分别记为  $A_1 \sim A_4$ ,表面基本结构如图 2 所示,单个微凹坑虚线框为该表面的面积单元。首先运用不同功率的激光加工出正六边形微凹坑,采用光学显微镜观察表面形貌,以确定最佳功率参数;对正六边形微凹坑进行不同次数的扫描,采用德国 Bruker 公司 Contour GT-K0 型表面轮廓仪测量微凹坑的深度;在  $A_1 \sim A_4$  合金表面扫描出  $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的块阵列,将扫描后的样品放入乙醇溶液中用超声波清洗后吹干,采用宁波 MAIST Vision 公司 A-300 型接触角测量仪测量表面接触角,采集数据时在同一扫描区域内取三个位置,量取  $3\text{ }\mu\text{L}$  水以测量表面接触角,取这三处接触角的测量平均值作为最终结果,原始表面  $A_0$  的接触角  $\theta'_c = 79.3^\circ$ 。

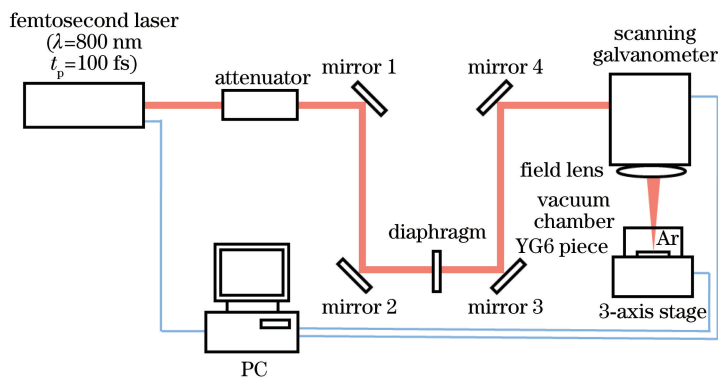


图 1 飞秒激光加工示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser processing

## 3 实验结果及分析

### 3.1 平均功率对微凹坑形貌的影响

图 3 所示为平均功率  $P$  为  $200 \sim 800\text{ mW}$  时正六边形微凹坑的表面形貌。可以看出:当  $P = 200\text{ mW}$  时,正六边形微凹坑具有明显的外轮廓,凹坑内深度均匀,周围无熔融物飞溅堆积;当  $P$  为

$400\text{ mW}$  和  $600\text{ mW}$  时,微凹坑烧蚀区域明显增大,轮廓开始出现崩边并且出现少量热影响区,微凹坑内各点的深度不一致;当  $P = 800\text{ mW}$  时,微凹坑形貌较差,轮廓的崩边现象严重,出现大量热影响区,微凹坑周围出现黑色熔融堆积物。结果表明:平均功率低于  $200\text{ mW}$  时,微凹坑表面形貌较好,基本无热影响区;平均功率高于  $200\text{ mW}$  时,微凹坑边

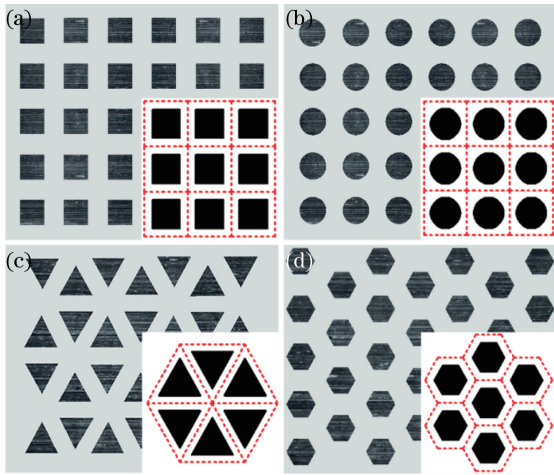


图2 表面基本结构。(a)  $A_1$ ; (b)  $A_2$ ; (c)  $A_3$ ; (d)  $A_4$   
 Fig. 2 Basic surface structures.  
 (a)  $A_1$ ; (b)  $A_2$ ; (c)  $A_3$ ; (d)  $A_4$

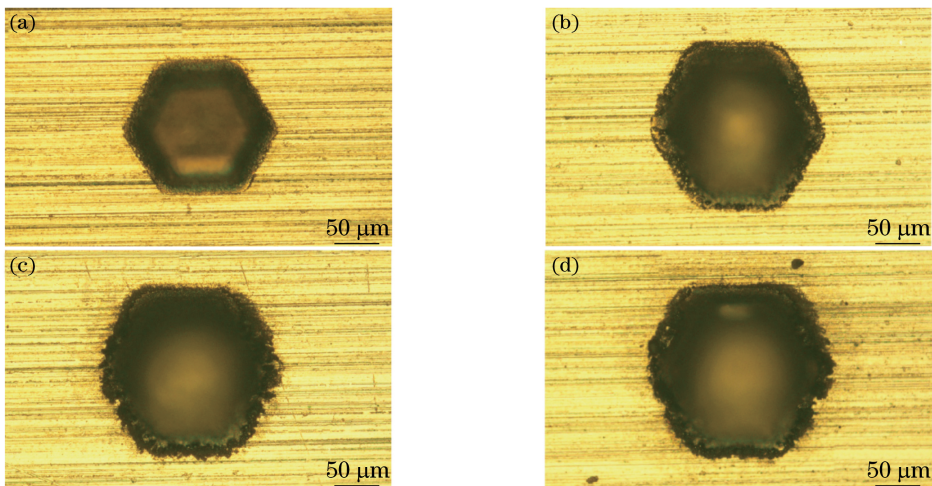


图3 不同功率下微凹坑的表面形貌。(a)  $P=200$  mW; (b)  $P=400$  mW; (c)  $P=600$  mW; (d)  $P=800$  mW  
 Fig. 3 Surface morphologies of micro-pits under different laser powers. (a)  $P=200$  mW;  
 (b)  $P=400$  mW; (c)  $P=600$  mW; (d)  $P=800$  mW

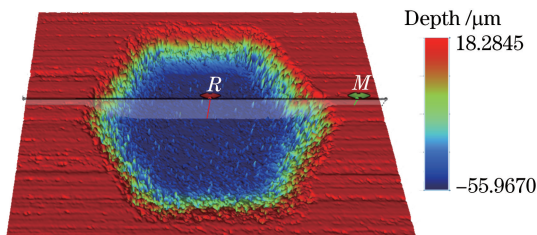


图4  $t=10$ 时  $A_4$  表面微凹坑的三维形貌  
 Fig. 4 Three-dimensional morphology of micro-pits on  
 $A_4$  surface when  $t=10$

### 3.3 微凹坑分布密度对表面接触角的影响

图6所示为不同形状微凹坑表面接触角随分布密度的变化趋势,平均功率  $P=200$  mW,扫描次数  $t=10$ ,  $A_1 \sim A_4$  表面单个微凹坑面积  $S =$

缘出现崩边和重铸现象。考虑到提高加工效率,这里选取  $P=200$  mW。

### 3.2 扫描次数对微凹坑深度的影响

图4所示为  $A_4$  表面扫描次数  $t=10$  次时的微凹坑三维形貌图。可以看出,微凹坑内深度均匀,  $R$  点和  $M$  点之间的高度差  $d_z = 23.56 \mu\text{m}$ 。图5所示为  $A_4$  表面微凹坑深度随扫描次数的变化趋势,平均功率  $P=200$  mW,扫描速度  $v=100$  mm/s,扫描次数  $t$  为  $1 \sim 10$ 。通过线性拟合数据可以得到

$$H = 2.38t, \quad (1)$$

式中  $H$  为微凹坑深度。在相同加工条件下测得  $A_1 \sim A_3$  表面微凹坑深度符合(1)式,这说明在该条件下加工不同形状的微凹坑,每次激光扫描所去除的材料厚度基本相同。

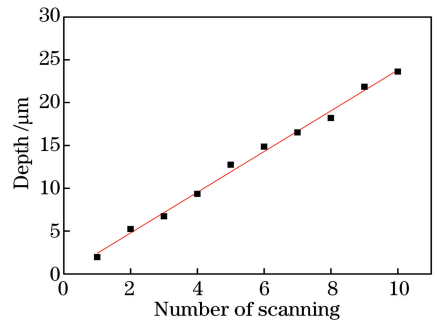


图5  $A_4$  表面微凹坑深度与扫描次数间的关系  
 Fig. 5 Depth of micro-pit on  $A_4$  surface  
 versus number of scanning

$0.02 \text{ mm}^2$ ,形貌参数如表1所示。微凹坑分布密度为该表面单个微凹坑与面积单元的面积比值,通过

改变各表面面积单元的大小得到微凹坑的不同分布密度,分布密度的范围为5%~40%。

由图6可知, $A_1 \sim A_4$ 表面接触角随微凹坑分布密度的增大而减小,这是因为单个微凹坑面积不变,分布密度增大,单位面积内微凹坑数目越多,越有利于液体储存;当微凹坑表面的粗糙度增大时,固-液接触面积增大,因此接触角减小,亲水性增大。可以看出,微凹坑分布密度小于5%时, $A_1 \sim A_4$ 表面的接触角基本与原始表面相同;微凹坑分布密度为5%~25%时,微凹坑表面 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_4$ 接触角基本相同,且大于 $A_3$ 表面接触角;分布密度大于25%时, $A_1 \sim A_4$ 各表面浸润性出现较大差异,优劣顺序依次为正三角形、正方形、正六边形、圆形。

表1  $S=0.02 \text{ mm}^2$  时微凹坑表面形貌参数

Table 1 Parameters of micro-pit surface morphologies at  $S=0.02 \text{ mm}^2$

Micro-pit surface	Micro-pit shape	Micro-pit size / $\mu\text{m}$	Micro-pit depth / $\mu\text{m}$
$A_1$	Square	141	24
$A_2$	Circle	80	24
$A_3$	Regular triangle	215	24
$A_4$	Regular hexagon	88	24

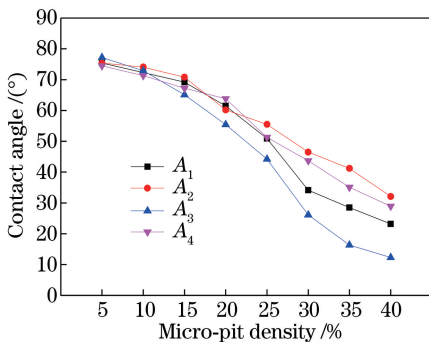


图6  $S=0.02 \text{ mm}^2$  时不同形状微凹坑表面接触角与分布密度间的关系

Fig. 6 Surface contact angle versus distribution density for micro-pits with different shapes at  $S=0.02 \text{ mm}^2$

### 3.4 单个微凹坑面积对表面接触角的影响

图7所示为不同形状微凹坑表面接触角随单个微凹坑面积的变化趋势,平均功率  $P=200 \text{ mW}$ ,扫描次数  $t=10$ ,单个微凹坑面积  $S$  为  $0.02 \sim 0.24 \text{ mm}^2$ ,通过改变微凹坑单元尺寸使得微凹坑分布密度始终保持在30%。可以看出:在微凹坑分布密度相同的情况下,不同形状微凹坑表面亲水性的优劣顺序为  $A_3$ 、 $A_1$ 、 $A_4$ 、 $A_2$ ,与3.3节的结果基本一

致;随着单个微凹坑面积  $S$  的增大,各表面接触角均迅速增大后趋于平缓,最终趋于原始表面接触角,且不同表面接触角之间的差距逐渐变小。

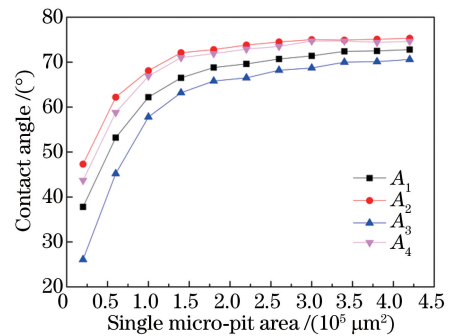


图7 不同形状微凹坑表面接触角与单个微凹坑面积间的关系

Fig. 7 Surface contact angle versus single micro-pit area for micro-pits with different shapes

### 3.5 微凹坑形状对表面接触角的影响机理分析

在平整光滑的表面,材料的本征接触角  $\theta_e$  可由 Young 方程得出:

$$\cos \theta_e = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}, \quad (2)$$

式中  $\gamma_{SV}$  为固-气界面表面张力;  $\gamma_{SL}$  为固-液界面表面张力;  $\gamma_{LV}$  为液-气界面表面张力。一般结合以下三种接触角模型来探究微结构形貌与表面接触角间的关系。

1) Wenzel 模型。Wenzel<sup>[22]</sup>认为,表观接触角和本征接触角之间的差异取决于实际表面粗糙度,液体完全浸润表面的凹槽结构的实际表面凹凸不平,导致固-液真实接触面积增大,固-液和固-气界面能增加,从而引起接触角的变化;并提出了全湿模型,当表面达到平衡时,表观接触角  $\theta_r^w$  与本征接触角  $\theta_e$  的关系为

$$\cos \theta_r^w = r' \cos \theta_e, \quad (3)$$

式中  $r'$  为粗糙度率,即为粗糙表面的实际接触面积与表观接触面积的比值。

2) Cassie 模型。Cassie<sup>[23]</sup>认为,表面结构不均匀性导致表面自由能不同,并提出了复合接触角的概念;认为截留气体占据了粗糙峰,液滴不能浸润其中,提出了全不湿模型。Cassie 模型中表观接触角  $\theta_r^c$  与本征接触角  $\theta_e$  的关系为

$$\cos \theta_r^c = \varphi_s (\cos \theta_e + 1) - 1, \quad (4)$$

式中  $\varphi_s$  为表面固体面积占总面积的百分比。

3) 程师等<sup>[24]</sup>针对实际情况中粗糙表面凹坑内既有截留气体也有浸润液体的情况,提出了一种介于 Wenzel 模型和 Cassie 模型中间状态的模型,圆

形微凹坑表面的表观接触角  $\theta_r$  与本征接触角  $\theta_e$  的关系为

$$\cos \theta_r = \left( \varphi_s + \frac{2\pi r''x}{b^2} \right) \cos \theta_e + \varphi_s - 1, \quad (5)$$

式中  $r''$  为圆形微凹坑半径;  $b$  为相邻圆的间距;  $x$  为微凹坑浸润深度。

实际情况中微凹坑浸润模型为 Wenzel 模型和 Cassie 模型的中间状态, 因此(5)式的推导方法同样适用于规则微凹坑表面。从热力学角度考虑, 当三相接触线有  $ds$  移动时, 所需要的能量为

$$dG = \gamma \theta_r ds + f_s (\sigma_{SL} - \sigma_{SG}) ds + (1 - f_s) \gamma ds + \frac{Cx}{S_0} (\sigma_{SL} - \sigma_{SG}) ds, \quad (6)$$

式中  $\gamma$  为液-气界面能;  $\sigma_{SL}$  为固-液界面能;  $\sigma_{SG}$  为固-气界面能;  $C$  为面积单元内微凹坑的周长;  $S_0$  为面积单元的面积。由 Young 接触角公式可知, 当系统处于平衡态时, 则有  $\lim_{ds \rightarrow 0} \frac{dG}{ds} = 0$ , 可得到规则微凹坑表面表观接触角  $\theta_r$  与本征接触角  $\theta_e$  的关系:

$$\cos \theta_r = \left( \varphi_s + \frac{Cx}{S_0} \right) \cos \theta_e + \varphi_s - 1. \quad (7)$$

当  $A_1 \sim A_4$  表面扫描次数和单个微凹坑面积相同时, 可认为浸润深度  $x$  相同, 微凹坑分布密度相同,  $A_1 \sim A_4$  表面的本征接触角即为原始表面  $A_0$  的接触角。将 3.3 节和 3.4 节的微凹坑参数代入各表面单个微凹坑周长公式  $C_1 = 4l_1, C_2 = 2\pi r_2, C_3 = 3l_3, C_4 = 6l_4$ , 结果得  $C_3 > C_1 > C_4 > C_2$ 。由于  $\theta_r < 90^\circ$ , 故  $\theta_{r3} < \theta_{r1} < \theta_{r4} < \theta_{r2}$ , 这与 3.3 和 3.4 节中不同形状微凹坑浸润性优劣顺序一致。

## 4 结 论

利用飞秒激光在 WC-Co 类硬质合金 YG6 表面加工出 4 种形状的微结构, 分析了微凹坑分布密度和单个微凹坑面积对表面浸润性的影响, 得到如下结论。

1) 当激光平均功率  $P$  低于 200 mW 时, 加工的微凹坑轮廓明显, 无崩边, 基本无热影响区, 凹坑深度均匀。在  $P=200$  mW,  $v=100$  mm/s 条件下, 每次扫描所去除的材料厚度基本相同。

2) 随着微凹坑分布密度的增加, 微凹坑表面接触角减小, 亲水性提高。当微凹坑分布密度为 30% 时, 随着单个微凹坑面积的增加, 表面接触角表现出增大的趋势, 亲水性减弱。

3) 当微凹坑分布密度和单个微凹坑面积相同

时, 不同形状微凹坑的浸润性优劣顺序依次为正三角形、正方形、正六边形、圆形。通过建立模型分析, 发现水滴在微凹坑表面处于 Wenzel 模型和 Cassie 模型的中间状态, 将微凹坑参数代入模型, 得到  $A_1 \sim A_4$  表面接触角关系为  $\theta_{r3} < \theta_{r1} < \theta_{r4} < \theta_{r2}$ 。

4) 所得到的最佳加工参数为  $P=200$  mW, 扫描次数  $t=10$ , 飞秒激光加工微结构表面效率约为  $0.6$  min/mm<sup>2</sup>。

后续将进一步考虑使用价格较低的皮秒和纳秒激光器进行加工, 以降低批量生产高性能刀具的成本。

## 参 考 文 献

- [1] Upadhyaya A, Sarathy D, Wagner G. Advances in sintering of hard metals [J]. *Materials & Design*, 2001, 22(6): 499-506.
- [2] Engqvist H, Jacobson S, Axén N. A model for the hardness of cemented carbides [J]. *Wear*, 2002, 252(5/6): 384-393.
- [3] Li Y S, Deng J X, Zhang H, *et al.* Oxidation resistance of cemented carbide tools [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009, 37(2): 34-37. 李友生, 邓建新, 张辉, 等. 硬质合金刀具材料的抗氧化性能研究 [J]. *材料工程*, 2009, 37(2): 34-37.
- [4] Hao X Q, Song X L, Li L. Development and perspective of surface texturing tools [J]. *Surface Technology*, 2016, 45(9): 170-181. 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面结构化刀具的研究现状与进展 [J]. *表面技术*, 2016, 45(9): 170-181.
- [5] Wang Z, Li L, Qi B Y, *et al.* Effect of micro-texture on surface frictional properties of cemented carbide [J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(1): 13-16. 王震, 李亮, 戚宝运, 等. 微结构对硬质合金表面摩擦性能的影响 [J]. *工具技术*, 2011, 45(1): 13-16.
- [6] Obikawa T, Kamio A, Takaoka H, *et al.* Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting [J]. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 2011, 51(12): 966-972.
- [7] Pettersson U, Jacobson S. Textured surfaces in sliding boundary lubricated contacts-mechanisms, possibilities and limitations [J]. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 2007, 1(4): 181-189.
- [8] Borghi A, Gualtieri E, Marchetto D, *et al.* Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications [J]. *Wear*, 2008, 265(7/8): 1046-1051.
- [9] Meng F M, Zhou R, Davis T, *et al.* Study on effect

- of dimples on friction of parallel surfaces under different sliding conditions [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(9): 2863-2875.
- [10] Wu Z, Deng J X, Xing Y Q, *et al.* Effect of surface texturing on friction properties of WC/Co cemented carbide[J]. *Materials & Design*, 2012, 41: 142-149.
- [11] Sugihara T, Enomoto T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface—Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4): 425-429.
- [12] Kawasegi N, Sugimori H, Morimoto H, *et al.* Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior[J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 248-254.
- [13] Chen Y K, Melvin L S, Rodriguez S, *et al.* Capillary driven flow in micro scale surface structures [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86 (4/5/6): 1317-1320.
- [14] Zhang J X, Yao Z H, Hao P F, *et al.* Study of preparation and dynamic hydrophobicity of superhydrophobic surfaces with micro-nano textures [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(3): 322-330.  
张静娴, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 复合超疏水表面制备及其上液滴运动特性研究 [J]. *应用数学和力学*, 2014, 35(3): 322-330.
- [15] Xiong Q Y, Dong L, Jiao Y L, *et al.* Wettability of surfaces with different surface microstructures textured by laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(20): 206101.  
熊其玉, 董磊, 焦云龙, 等. 应用激光蚀刻不同微织构表面的润湿性 [J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 206101.
- [16] Yang Q B, Xiao C G, Chen Z P, *et al.* Surface wettability of laser-induced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tools[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101401.  
杨奇彪, 肖晨光, 陈中培, 等. 激光诱导氧化铝陶瓷刀具的表面浸润性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101401.
- [17] Feng A X, Yang R, Shi F, *et al.* Wettability of laser micro-textured carbide surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(2): 305-308.  
冯爱新, 杨润, 施芬, 等. 激光微织构硬质合金表面润湿性 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(2): 305-308.
- [18] Long J Y, Fan P X, Gong D W, *et al.* Ultrafast laser fabricated bio-inspired surfaces with special wettability [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0800001.  
龙江游, 范培迅, 龚鼎为, 等. 超快激光制备具有特殊浸润性的仿生表面 [J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0800001.
- [19] Gu L, Sun H L, Yu K, *et al.* Research progress of micro-nanofabrication by femtosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 14-18.  
顾理, 孙会来, 于楷, 等. 飞秒激光微加工的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(1): 14-18.
- [20] He F, Cheng Y. Femtosecond laser micromachining: Frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 595-622.  
何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿 [J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 595-622.
- [21] Lu J Z, Sun J N. Metal cutting theory and cutting tools[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 29-33.  
陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 29-33.
- [22] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [23] Cassie A B D. Contact angles [J]. *Discussions of the Faraday Society*, 1948, 3: 11-16.
- [24] Cheng S, Dong Y K, Zhang X J. Study of the influence of apparent contact angle on regular rough surface considering liquid wetting properties [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2007, 26(7): 822-827.  
程帅, 董云开, 张向军. 规则粗糙固体表面液体浸润性对表观接触角影响的研究 [J]. *机械科学与技术*, 2007, 26(7): 822-827.