

超硬刀具激光表面织构化及织构形貌控制

苏永生^{1,2}, 李亮², 高洪¹, 王建彬¹, 王刚¹

¹安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000;

²南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 利用光纤激光器在超硬刀具表面开展了微沟槽加工试验,研究了激光工艺参数对微沟槽表面形貌的影响。研究表明,通过激光工艺参数的优化,能够获得尺寸均匀、形貌良好的微沟槽阵列,实现了对超硬刀具表面微沟槽形貌的有效控制。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 超硬刀具; 微沟槽; 优化; 形貌控制

中图分类号 TN249; TG506 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121408

Laser Surface Texturing of Super-Hard Cutting Tools and Control of Texture Morphology

Su Yongsheng^{1,2}, Li Liang², Gao Hong¹, Wang Jianbin¹, Wang Gang¹

¹ School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China;

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract The experiment of micro-groove processing on super-hard cutting tool surfaces by using fiber lasers is carried out, and the effects of laser process parameters on micro-groove surface morphologies are studied. The study results show that the micro-groove arrays with a uniform size and a good morphology can be obtained after the optimization of laser process parameters, and the effective control to the micro-groove surface morphologies of super-hard cutting tools can be realized.

Key words laser technique; fiber lasers; super-hard cutting tools; micro-grooves; optimization; morphology control

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390; 000.2658

1 引言

在高速切削难加工材料的过程中,刀具表面严重的摩擦磨损会降低加工精度、表面质量和刀具耐用度,制约了切削效率的进一步提高。聚晶金刚石(PCD)材料具有低摩擦系数、高耐磨性和优异的导热性能,因此PCD刀具被广泛应用于各种金属及非金属材料的高速切削。

已有研究表明,织构化表面具有减摩、抗黏附、抗磨损及减振等摩擦学性能^[1-7]。近年来,表面织构技术得到了国内外学者的广泛关注和研究,已经广泛应用于活塞环-缸套、机械密封、滑动轴承、模具、刀具等领域

收稿日期: 2017-09-16; **收到修改稿日期:** 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(51375236)、安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2016A060)、安徽省重点研究与开发计划(1704a0902056)、安徽工程大学引进人才科研启动基金(2016YQQ001)

作者简介: 苏永生(1982—),男,博士研究生,主要从事刀具摩擦磨损、激光加工及表面织构学等方面的研究。

E-mail: sysh@ahpu.edu.cn

导师简介: 李亮(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事高速、高效切削加工方面的研究。

E-mail: liliang@nuaa.edu.cn(通信联系人)

中^[8-11]。在刀具中引入表面织构可减少摩擦,这为刀-屑界面摩擦学特性的“主动调控”提供了一条途径,成为高速切削刀具技术的研究热点之一。

国内外关于表面织构的研究涉及的形状有方形凸起、方形凹坑、圆形凹坑、椭圆形沟槽、波纹沟槽、直线沟槽、角槽、交叉沟槽、人字形沟槽、平行沟槽(沟槽方向与滑动摩擦方向平行)及横向沟槽(沟槽方向与滑动摩擦方向垂直)等^[12-24]。研究表明,表面织构的特征参数会对摩擦学性能产生重要影响,因此在摩擦副表面加工出具有不同特征参数的微结构,并实现可控加工,对研究表面织构参数对摩擦学性能的影响及优化具有重要意义。

目前,常用的表面织构技术包括电火花加工、电解加工、激光加工等。近年来,光纤激光器^[25-27]由于具有效率高、稳定性好、光束质量优、功率密度大和热影响区温度低等优点,被广泛应用于激光加工领域。然而,利用光纤激光器在PCD刀具表面开展微结构加工及其形貌优化控制的研究鲜有报道。本文利用光纤激光器在PCD刀具表面开展了织构化研究,通过优化激光工艺参数,实现了不同形状沟槽结构的可控加工,为研究表面织构特征参数对刀-屑界面摩擦学性能的影响提供了参考。

2 试验方法与设备

选择PCD刀具为试样,采用光纤激光器开展试样表面的微沟槽激光加工,研究激光器工艺参数对微沟槽尺寸与形貌质量的影响。选取的光纤激光器脉冲宽度为固定值(100 ns)。刀具表面微沟槽阵列的宽度和间距如图1所示。

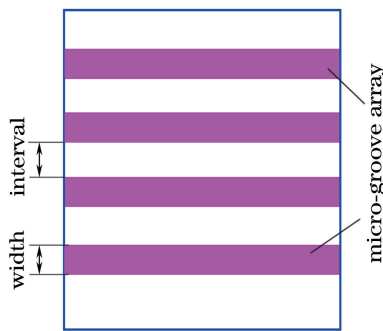


图1 刀具微沟槽示意图

Fig. 1 Schematic of micro-grooves of cutting tool

3 试验结果与分析

3.1 激光工艺参数对微沟槽形貌的影响

图2所示为不同加工参数下的微沟槽形貌,其中 v 为扫描速度, \bar{P} 为激光器平均输出功率, f 为脉冲频率。光纤激光器在加工过程中的重复打标次数均设置为50。图2(a)中沟槽深度和宽度分别约为 $34.6\ \mu\text{m}$ 和 $57.3\ \mu\text{m}$,图2(b)中沟槽深度和宽度分别约为 $14.6\ \mu\text{m}$ 和 $40.8\ \mu\text{m}$ 。可以看出,当其他工艺参数不变时,随着扫描速度的增大,微沟槽的尺寸均变小,且当扫描速度较低时,沟槽内壁较粗糙,局部区域出现堆积与凸起现象。当扫描速度较高时,沟槽内壁更加平整、光滑。

图2(c)中沟槽深度和宽度分别约为 $12.6\ \mu\text{m}$ 和 $38.8\ \mu\text{m}$,图2(d)中沟槽深度和宽度分别约为 $18.8\ \mu\text{m}$ 和 $51.9\ \mu\text{m}$,图2(e)中沟槽深度和宽度分别约为 $33.8\ \mu\text{m}$ 和 $51.2\ \mu\text{m}$,图2(f)中沟槽深度和宽度分别约为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $26.3\ \mu\text{m}$ 。可以看出,在相同条件下,随着激光器平均输出功率的增加,微沟槽尺寸明显增大;而随着脉冲频率的增加,沟槽尺寸急剧减小。

此外,光纤激光器扫描振镜的焦点与试样表面之间的距离即为离焦量 d_s 的大小,它对微沟槽尺寸和底部形貌质量有重要的影响^[28]。为了获得底部形貌深度均匀、光滑性较好的规则阵列,应该选择合适的负离焦量。

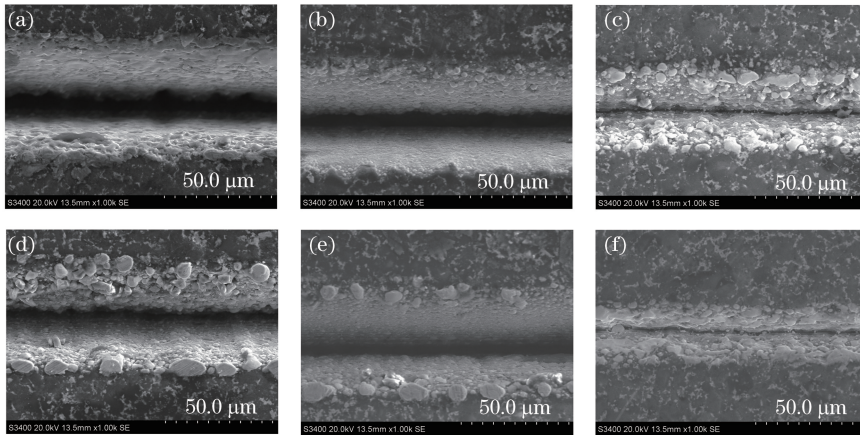


图 2 不同加工参数下的微沟槽形貌。(a) $v=1$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz;
 (b) $v=10$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz; (c) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=6$ W, $f=20$ kHz; (d) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=8$ W, $f=20$ kHz;
 (e) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz; (f) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=100$ kHz

Fig. 2 Morphologies of micro-grooves under different process parameters. (a) $v=1$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz;
 (b) $v=10$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz; (c) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=6$ W, $f=20$ kHz; (d) $v=5$ mm/s,
 $\bar{P}=8$ W, $f=20$ kHz; (e) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz; (f) $v=5$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=100$ kHz

3.2 激光工艺参数优化及微沟槽形貌的可控加工

为获得分布规则、形貌良好的微沟槽,选用如下优化参数: $v=2$ mm/s, $\bar{P}=12$ W, $f=20$ kHz, $d_s=-0.6$ mm,激光器重复打标 50 次。

在相同的优化工艺参数下,分别在 7 把 PCD 刀具试样表面开展微沟槽的激光加工试验,获得的部分刀具表面微沟槽扫描电镜(SEM)形貌如图 3(a)~(d)所示,其中图 3(c)和图 3(d)微沟槽底部光学形貌分别对应图 3(e)和图 3(f)。

由图 3 可知,采用优化后的工艺参数获得的微沟槽阵列表面更加光滑,具有良好的规则性,其整体形貌质量明显优于图 2 中的。

对比分析了 7 把 PCD 刀具试样表面的微沟槽深度、宽度和间距的变化趋势。在相同工艺参数条件下,PCD 刀具试样 1~7 表面的微沟槽最小深度和最大深度分别为 $53.426 \mu\text{m}$ 和 $56.100 \mu\text{m}$,平均深度约为 $54.740 \mu\text{m}$,如图 4 所示;最小宽度和最大宽度分别为 $56.212 \mu\text{m}$ 和 $60.369 \mu\text{m}$,平均宽度约为 $57.980 \mu\text{m}$,如图 5 所示;最小间距和最大间距分别为 $83.900 \mu\text{m}$ 和 $86.668 \mu\text{m}$,平均间距约为 $85.210 \mu\text{m}$,如图 6 所示。

由图 4~6 可知,激光工艺参数优化后,能够在 PCD 刀具表面制备出具有 consistency 尺寸的规则微沟槽阵列结构。

选择 $v=5$ mm/s, $\bar{P}=10$ W, $f=20$ kHz, $d_s=-0.8$ mm,激光器重复打标 50 次。图 7 所示为工艺参数优化后的不同类型微沟槽形貌。由图 7 可知,在上述优化的工艺参数下,能够在 PCD 刀具表面获得不同类型的优质微沟槽阵列结构。

3.3 讨论与分析

刀具表面激光加工微结构的过程主要是用激光束加热工件材料,高蒸汽压力将熔化的材料带走,从而形成不同形貌的微结构。不同激光工艺参数对微结构的形貌具有不同的影响,要想获得高质量的微结构,需要合理优化其相关工艺参数。

在激光加工同一材料的过程中,保持激光器其他工艺参数不变,扫描速度越小,激光束作用于被加工材料的时间就越长,加工试样表面获得的激光束能量就越多,被去除的材料越多,形成的微结构尺寸越大;反之,微结构尺寸越小。过低的扫描速度易导致被加工区域产生过烧现象,热影响区域变大,微结构切口区域粗糙,表面形貌质量差;过高的扫描速度也易导致较差的表面形貌质量。

此外,单点脉冲能量 E 与峰值功率 P 、平均输出功率 \bar{P} 、脉冲宽度 $\Delta\tau$ 和脉冲频率 f 存在下列关系:

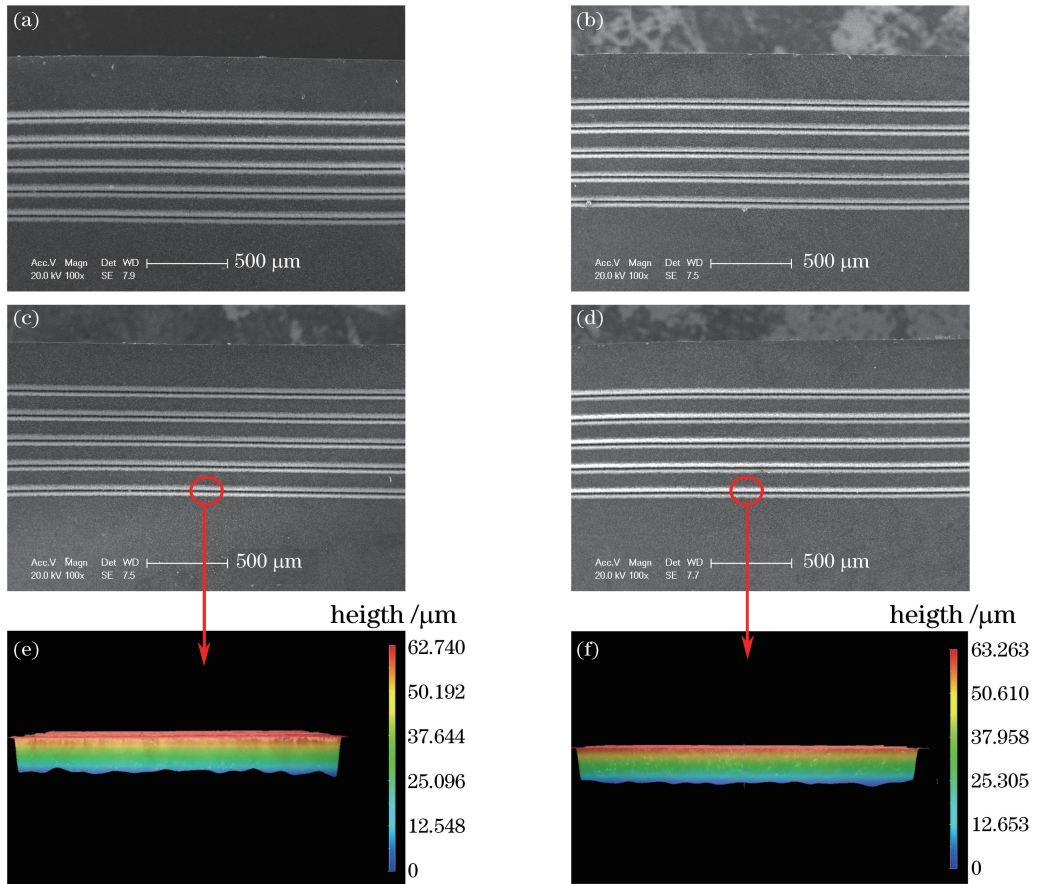


图3 工艺参数优化后的微沟槽形貌。(a)试样1;(b)试样2;(c)试样3;(d)试样4;(e)试样3的沟槽底部;(f)试样4的沟槽底部
Fig. 3 Morphologies of micro-grooves after optimization of process parameters. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4; (e) groove bottom of sample 3; (f) groove bottom of sample 4

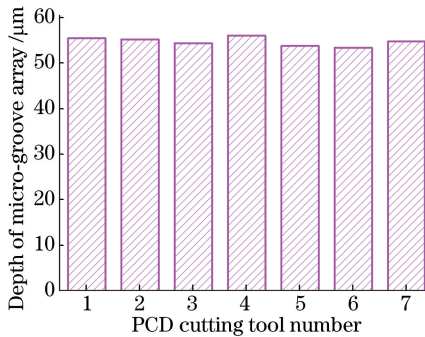


图4 参数优化后的微沟槽阵列深度

Fig. 4 Depths of micro-groove arrays after optimization of parameters

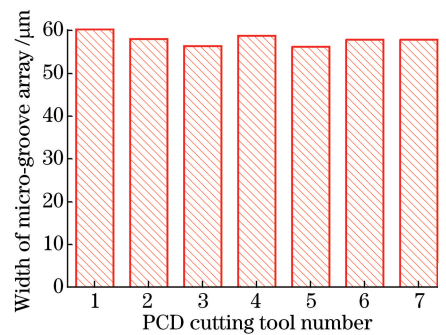


图5 参数优化后的微沟槽阵列宽度

Fig. 5 Widths of micro-groove arrays after optimization of parameters

$$E = P \cdot \Delta\tau = \bar{P} / f. \quad (1)$$

激光斑点上的功率密度 P' 与光斑直径 d 、单点脉冲能量 E 和脉冲宽度 $\Delta\tau$ 存在以下关系^[29]:

$$P' = 4E / \pi \cdot d^2 \cdot \Delta\tau. \quad (2)$$

由(1)、(2)式可知,在相同离焦量条件下,当 f 和 $\Delta\tau$ 保持不变时,随着 \bar{P} 的增大, E 和 P' 增大,蒸汽压力增大,更多液相物质被带走,表面微沟槽的深度和宽度变大,微结构的尺寸变大。同样,当其他工艺参数均不变时,随着 f 的增大, E 和 P' 减小,蒸汽压力减小,带走的液相物质变少,微沟槽的尺寸减小。

但是,过度增加平均输出功率将使激光束能量增大,导致被加工的微结构在表面局部区域发生崩塌,出

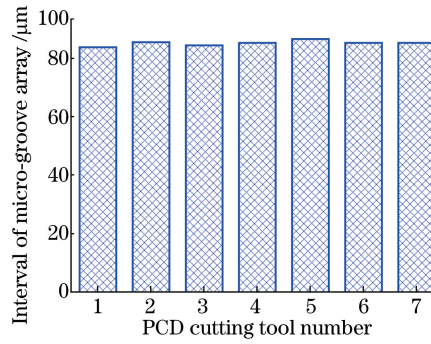


图 6 参数优化后的微沟槽阵列间距

Fig. 6 Intervals of micro-groove arrays after optimization of parameters

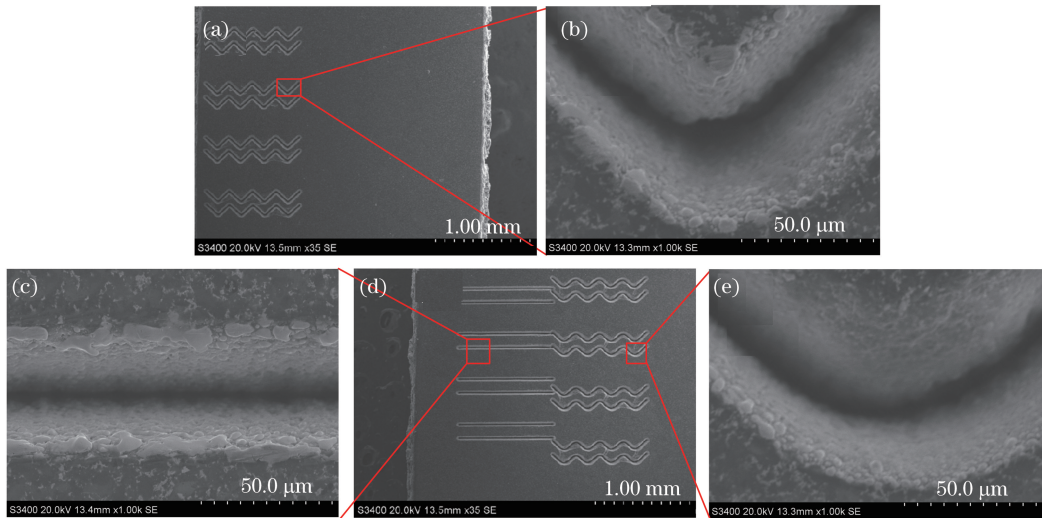


图 7 工艺参数优化后的不同类型微沟槽 SEM 形貌。(a)折线沟槽;(b)图 7(a)局部放大图;

(c)图 7(d)中直线沟槽放大图;(d)直线沟槽及波纹沟槽;(e)图 7(d)中波纹沟槽放大图

Fig. 7 SEM topographies of different types of micro-grooves after optimization of parameters. (a) Broken-line grooves;

(b) partially enlarged drawing of Fig. 7(a); (c) enlarged drawing of straight-line groove of Fig. 7(d);

(d) straight-line grooves and ripple grooves; (e) enlarged drawing of ripple groove of Fig. 7(d)

现不规则的缺口,致使微结构阵列表面粗糙,尺寸一致性差。同理,当脉冲频率过大时,激光束功率密度显著减小,不能产生较大的蒸汽压力,微结构尺寸过小,同样影响了刀具表面微结构的形貌质量。

4 结 论

研究了工艺参数对 PCD 刀具表面微沟槽织构化的影响,得到以下结论。

1) 在 PCD 刀具激光织构化过程中,采用较低的扫描速度、脉冲频率或较高的平均输出功率,都会增大微沟槽的宽度和深度,而未经优化的工艺参数均会导致表面微沟槽形貌质量变差。

2) 当扫描速度为 2 mm/s、平均输出功率为 12 W、脉冲频率为 20 kHz、离焦量为 -0.6 mm、重复打标次数为 50 时,在 PCD 刀具表面获得了表面光滑、形貌良好的规则微沟槽阵列结构,且多次试验中沟槽尺寸均保持良好的 consistency。

3) 当扫描速度为 5 mm/s、平均输出功率为 10 W、脉冲频率为 20 kHz、离焦量为 -0.8 mm、重复打标次数为 50 时,在不同 PCD 刀具试样表面同样获得了形貌良好的规则直线、波纹及折线沟槽阵列。

要保证超硬刀具表面织构形貌的质量,需要不断优化光纤激光器的工艺参数,以实现刀具表面微结构尺寸和形貌的有效控制。

参 考 文 献

- [1] Dai Z D, Tong J, Ren L Q. Researches and developments of biomimetics in tribology[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(22): 2681-2689.
- [2] Zhang H, Guo D J, Dai Z D. Progress on gecko-inspired micro/nano-adhesion arrays[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18): 1843-1850.
- [3] Tian Ximei. Biological coupling and bionic anti-wear properties of typical molluscan shells [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
田喜梅. 典型贝类壳体生物耦合特性及其仿生耐磨研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [4] Xing Y Q, Deng J X, Wu Z, *et al.* Effect of regular surface textures generated by laser on tribological behavior of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ ceramic[J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 823-832.
- [5] Wu Z, Deng J X, Zhang H, *et al.* Tribological behavior of textured cemented carbide filled with solid lubricants in dry sliding with titanium alloys[J]. Wear, 2012, 292/293: 135-143.
- [6] 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.
- [7] Mo J L, Wang Z G, Chen G X, *et al.* The effect of groove-textured surface on friction and wear and friction-induced vibration and noise[J]. Wear, 2013, 301(1/2): 671-681.
- [8] Tomanik E. Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes[J]. Tribology International, 2008, 41(11): 1032-1038.
- [9] Ibatan T, Uddin M S, Chowdhury M A K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 272: 102-120.
- [10] Jia Z X, Li J Q, Liu L J, *et al.* Performance enhancements of high-pressure die-casting die processed by biomimetic laser-remelting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5/6/7/8): 421-429.
- [11] Yang Y F, Su Y S, Li L, *et al.* Performance of cemented carbide tools with microgrooves in Ti-6Al-4V titanium alloy cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9/10/11/12): 1731-1738.
- [12] Obikawa T, Kamio A, Takaoka H, *et al.* Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(12): 966-972.
- [13] Yu H, Deng H, Huang W, *et al.* The effect of dimple shapes on friction of parallel surfaces[J]. Journal of Engineering Tribology, 2011, 225(8): 693-703.
- [14] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S, *et al.* Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact[J]. Wear, 2003, 254(3): 356-363.
- [15] Deng J X, Wu Z, Lian Y S, *et al.* Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 30(1): 164-172.
- [16] Xing Y Q, Deng J X, Feng X T, *et al.* Effect of laser surface texturing on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ ceramic sliding against steel under dry friction[J]. Materials & Design, 2013, 52: 234-245.
- [17] 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.
- [18] Vladescu S C, Olver A V, Pegg I G, *et al.* The effects of surface texture in reciprocating contacts-An experimental study[J]. Tribology International, 2015, 82: 28-42.
- [19] Arulkirubakaran D, Senthilkumar V, Kumawat V. Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: An experimental and numerical approach[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 54: 165-177.
- [20] Kawasegia 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.
- [21] Enomoto T, Sugihara T, Yukinaga S, *et al.* Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 571-574.
- [22] Enomoto T, Sugihara T. Improvement of anti-adhesive properties of cutting tool by nano/micro textures and its

- mechanism[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 19: 100-105.
- [23] Chang W L, Sun J, Luo X C, *et al.* Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear[J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 2433-2437.
- [24] Sugihara T, Enomoto T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(2): 229-237.
- [25] Li Pingxue, Zhang Yue. Review of 980 nm Yb-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070004.
李平雪, 张月. 980 nm 掺镱光纤激光器综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070004.
- [26] Hu Zhitao, He Bing, Zhou Jun, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080002.
胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080002.
- [27] Liu Jiang, Tan Fangzhou, Liu Chen, *et al.* Progress on high-power ultrashort-pulsed thulium-doped fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(2): 0201003.
刘江, 谭方舟, 刘晨, 等. 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201003.
- [28] Su Y S, Li L, He N, *et al.* Experimental study of fiber laser surface texturing of polycrystalline diamond tools[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 45: 117-124.
- [29] Zhou Bingkun. *Laser principle* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980.
周炳琨. *激光原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.