

文章编号: 1001-3806(2016)04-0550-05

紫外激光加工陶瓷刀具表面微结构的实验研究

刘泽宇, 魏昕*, 谢小柱, 华显刚, 洪继伟

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 为了得到紫外激光在陶瓷刀具表面加工微结构的过程中, 激光能量密度、扫描速率、扫描次数和频率对微沟槽尺寸的影响规律, 采用单因素实验方法进行了紫外激光加工陶瓷刀具的工艺实验, 确定了使用 355nm 波长紫外激光器在陶瓷刀具表面加工微结构的合理参量。结果表明, 在陶瓷刀具上加工出合适微结构, 可提高陶瓷刀具性能并延长寿命。

关键词: 激光技术; 紫外激光; 微结构; 微结构尺寸; 影响规律; 陶瓷刀具

中图分类号: TG665; TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.020

Experimental study about micro texture on ceramic tool surface processed by UV laser

LIU Zeyu, WEI Xin, XIE Xiaozhu, HUA Xiangang, HONG Jiwei

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Tool surface with micro texture has good effect of anti-friction, increases adhesion resistance and abrasion resistance of the tool, and prolongs its life. Laser processing technology had obvious advantages in the preparation of micro texture on tool surface. The ideal surface micro texture of a tool can be obtained by laser processing technology under the reasonable processing conditions. In order to find the effects of laser energy density, frequency, laser beam scanning speed and scanning times on the dimension of tool surface micro groove, experiments were carried out under the condition of single factor of UV laser. The experiment at the preparation of micro texture on ceramic tool surface with 355nm wavelength UV laser was carried out. The reasonable condition parameters were determined. The study has guiding significance for working out suitable micro textures and improving the performance of ceramic tools.

Key words: laser technique; UV laser; micro-textures; micro-texture size; influence law; ceramic tool

引言

切削过程中刀具在切削区域与工件和切屑发生剧烈摩擦, 产生较高的切削温度, 这将影响到刀具的耐磨性能, 从而降低刀具的使用寿命。尤其在高速切削难加工材料, 如高强度钢、钛合金、高温合金等的过程中, 刀具所处切削环境更为复杂和恶劣, 极大缩短了刀具的使用寿命, 因此提高其加工效率对于生产制造具有极其重要的意义^[1]。目前众多学者的研究表明, 具有

一定非光滑特征的微观表面形貌的摩擦阻力比光滑的表面更小, 这给研究刀具的减摩带来了新的突破。

国内外学者在刀具上加工出不同形貌微结构或纳结构, 制备出自润滑刀具, 并进行切削实验与无结构刀具进行对比, 验证了微结构的存在能够实现良好的减摩作用, 提高刀具抗黏附性和耐磨性, 从而延长刀具的使用寿命^[2-5]。

目前广泛应用的加工表面微结构的技术主要包括激光加工技术、电子束加工技术、纳米压痕、深刻电铸模造技术、微细电火花加工技术、分子自组装、微车削技术等。在刀具表面加工微结构的主要技术方法有光刻技术^[6]、电火花加工技术^[7]和激光加工技术^[8-9]。其中, 激光加工的功率密度高、穿透力大, 几乎可以加工所有的材料, 尤其是传统的加工方法难以加工的材料和工件。此外采用非接触式加工, 加工速度快、热影响区域小、易实现自动化, 可以做到非常精细的细微加工。紫外激光在加工过程中直接破坏材料表面的分子键, 使分子脱离物体, 不会产生高的热量, 热影响区较小, 属于“冷”加工, 被广泛应用于精细加工^[10-11]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175092; 50675038); 广东省科技计划项目促进科技服务业发展专项计划资助项目(2010A040203002); 省部产学研结合科技创新平台资助项目(2011A091000002); 广东省自然科学基金资助项目(S2013010014070); 广东省普通高校特色创新(自然科学类)资助项目

作者简介: 刘泽宇(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: weixin@gdut.edu.cn

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-05-28

ZHOU 等人^[12]使用 355nm 紫外激光对 Al₂O₃ 陶瓷进行了抛光工艺的研究,验证了紫外激光加工陶瓷材料可以获得较好的效果,并确定了最优的工艺参量范围。但由于不同材料对激光吸收率差异,使用相同激光器和相同的加工参量获得的微结构形貌也会有很大差别。因此,研究紫外激光加工陶瓷刀具表面微结构的加工工艺,对研究陶瓷刀具表面微结构的作用机理有重要意义。

1 试样准备和加工设备

1.1 微结构设计

刀具表面微结构的存在可以提高刀具磨损性能和切削性能,同时对刀具应力集中情况有很大改善。表面微结构形貌设计是研究微结构刀具的一个重要内容。目前国内外学者针对微结构形貌设计的研究包括很多方面,如微结构间距、微结构深度和宽度、微结构形状等。微结构设计主要包括以下 3 个方面:微结构尺寸设计、微结构截面形状设计、微结构形状设计。

微结构尺寸设计是包括微结构沟槽的深度和宽度或微坑的直径和深度,微结构沟槽的间距或微坑表面占有率,以及微结构在刀具表面上的具体位置等。目前学者们针对微结构的尺寸优劣还没有一个统一的评价标准,一般根据材料和加工方式的不同,结合微结构对刀具性能的影响,通过实验和仿真分析决定微结构的尺寸。作者所在课题组经过试验研究,设计加工微沟槽,微沟槽深度 10μm,宽度 25μm,间距 50μm。图 1 为使用激光共聚焦(3-D 测量)显微镜观测,放大 400 倍和放大 1000 倍的陶瓷刀具表面微沟槽形貌图。实验条件为:激光能量密度 50J/cm²,扫描速率 50mm/s,扫描次数 1 次,频率 50kHz。

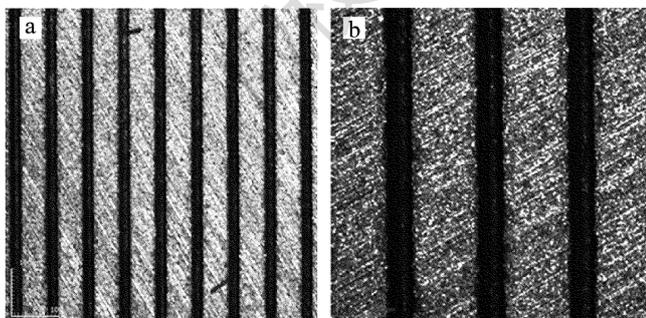


Fig. 1 Morphology of micro grooves on ceramic tool surface
a—400× b—1000×

微结构截面形状不仅影响加工方法和加工成本,还影响着微结构刀具的应力集中情况,目前主要有矩形和三角形(V形)两种。WU, QI 等人^[13-14]通过有限元软件对两种截面形状的应力集中情况进行了分析:当微结构截面形状为三角形(V形)时刀具切削刃上

的应力集中现象明显好于截面形状为矩形的微结构刀具。因此结合加工设备,本文中设计的微结构陶瓷刀具表面结构的截面形状为三角形(V形),使用 355nm 波长激光在陶瓷刀具表面加工微结构,并使用激光共聚焦观测微结构截面形状,如图 2 所示。沟槽宽度 26μm,沟槽深度 17μm,相邻沟槽间距 49μm。实验条件为:激光能量密度 50J/cm²,扫描速率 50mm/s,扫描次数 1 次,频率 50kHz。

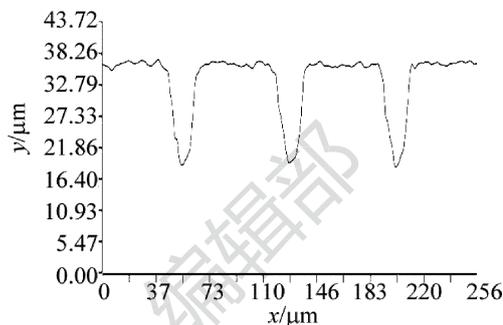


Fig. 2 Cross section shape of micro grooves with laser processing

微结构形状设计是指微结构整体形状的设计,需要考虑到切屑流动方向,刀具与切屑接触长度接触面积,以及受力时刀具应力集中情况。目前国内外学者设计出的微结构形状主要包括平行微结构、垂直微结构、交叉微结构、椭圆微结构、凹坑微结构等^[13-16]。具体形状如图 3 所示,垂直微结构是指沟槽方向与切削过程切屑流动方向垂直,平行微结构是指沟槽方向与切削过程切屑流动方向平行。其中本文中的设计加工出图 3b 交叉微结构和图 3c 垂直微结构,微结构深度 25μm,深度 15μm,间距 50μm。

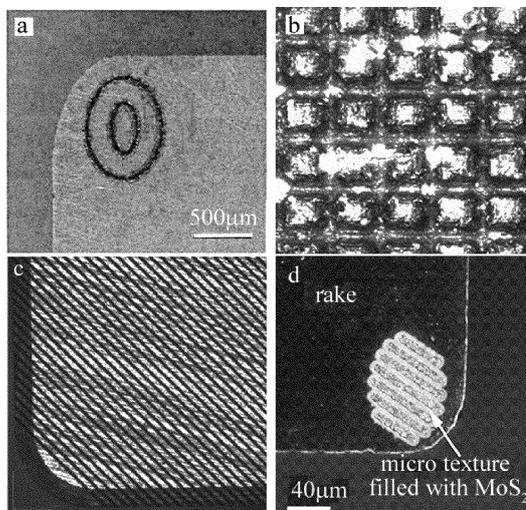


Fig. 3 Shape of surface micro texture
a—elliptical micro texture^[13] b—crossed micro texture c—vertical micro texture d—parallel micro texture^[15]

1.2 加工设备

本文中所采用设备是半导体端面抽运 355nm 紫外激光器,激光器包括运动控制平台、工作台和激光

头;激光器控制面板和工控机软件界面。激光器波长355nm,脉宽55ns,线宽15 μm ~35 μm ,频率0kHz~100kHz。通过激光器控制面板可以调节激光能量密度,通过工控机软件可以调节激光扫描次数,扫描速率和频率。

1.3 实验条件

实验中所选用的陶瓷刀具型号为ISO SNGN 120708。陶瓷刀具材料的组成成分为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 。实验前,首先对陶瓷刀具进行超声波清洗,去除刀具材料表面的油渍、污垢和灰尘。激光加工后对刀具进行超声波清洗,去除毛刺或熔渣。加工后采用奥林巴斯OLS4000激光共聚焦显微镜,进行微结构的形貌观测。利用激光共聚焦显微镜可以对微结构深度、宽度和间距精确的测量分析。

2 实验结果与分析

2.1 激光能量密度对微沟槽尺寸的影响

激光能量密度对加工出的微沟槽尺寸影响较大,表面微结构的形貌,如图4所示。实验条件为:扫描速率60mm/s,扫描次数1次,频率30kHz。

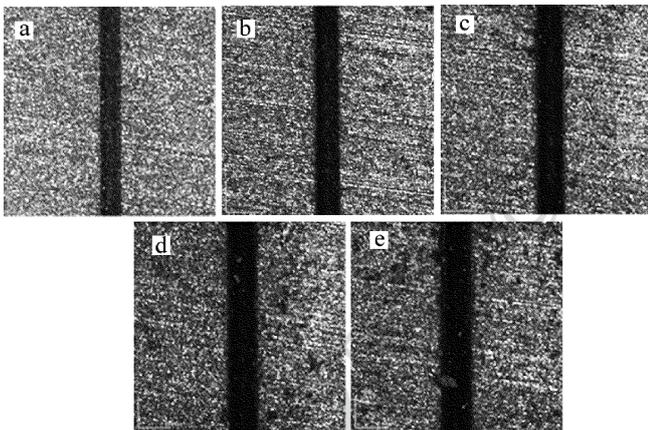


Fig. 4 Morphology of etching grooves at different laser energy densities a—20J/cm² b—30J/cm² c—40J/cm² d—50J/cm² e—60J/cm²

当激光能量密度较小时,微沟槽的宽度和深度较小,沟槽边缘形貌较好,没有明显凸起的熔融物,此时激光能量达不到材料烧蚀阈值,材料表面变化以加热融化作用为主,因此产生的微沟槽宽度和深度较小,没有产生很多熔渣,加工后微沟槽边缘形貌较好。随着激光能量密度的提高,作用在陶瓷刀具表面单位面积的能量增加,使得材料汽化,微沟槽的深度和宽度逐渐增加。能量密度继续升高,刀具表面材料汽化产生的熔渣增多,微沟槽边缘逐渐产生明显的凸起熔融物。当激光能量密度为60J/cm²时,陶瓷刀具材料表面烧蚀严重,微沟槽边缘有较高的凸起熔渣,加工的微沟槽形貌较差。

使用激光共聚焦显微镜测量微沟槽的深度和宽度,绘制微沟槽的几何尺寸随激光能量密度的变化曲线,如图5所示。实验条件为:扫描速率60mm/s,扫描次数1次,频率30kHz。

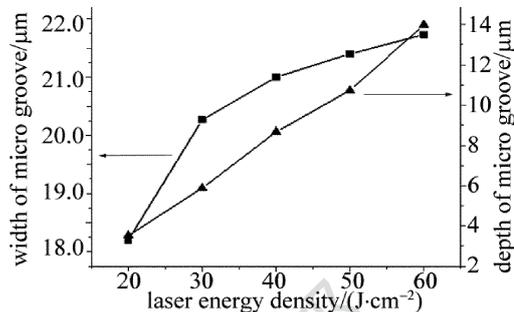


Fig. 5 Effect of laser energy density on the size of micro grooves

可以看出,微沟槽深度和宽度随激光能量密度的增加而增大。其中,微沟槽宽度受激光光斑直径的影响,增大到一定值后趋于稳定;微沟槽深度随激光能量密度的增大线性增加。

2.2 扫描速率对微沟槽尺寸的影响

选用不同的激光扫描速率,其余加工参量不变,在陶瓷刀具表面进行微结构的加工,如图6所示。实验条件为:激光能量密度50J/cm²,扫描次数1次,重复频率30kHz。随着扫描速率的增加,微沟槽的宽度基本不变,微沟槽深度逐渐降低。激光扫描速率较低时,辐照区域材料接收到的脉冲个数过多,较大的激光能量使得刀具材料发生剧烈的融化和汽化现象,能够获得较大的沟槽深度。但较短时间内紫外激光加工后的陶瓷表面因严重烧蚀而产生了烧蚀物,使得微沟槽底部形貌较差,也在沟槽表面形成较高的余高,严重影响了表面微结构的表面质量。激光扫描速率增大,激光能量适中,微沟槽深度降低,沟槽宽度受激光光斑直径影响变化不大。当扫描速率过快时,辐照区域材料接收到的脉冲个数过少,材料不能得到充分加工,微沟槽的深度过小。

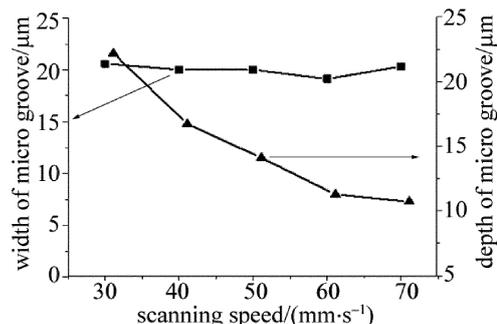


Fig. 6 Effect of laser scanning speed on the size of micro grooves

作者所在的课题组在陶瓷刀具表面进行了微结构的加工,如图7所示。实验条件为:激光能量密度50J/cm²,激光扫描速率20mm/s,扫描次数1次,频率

30kHz。使用扫描电子显微镜对加工后形貌进行观察。可以很明显地看出微沟槽烧蚀严重,沟槽两侧产生很多烧蚀物,不但影响微沟槽尺寸的测量,还严重影响微结构加工质量及微结构的作用效果。

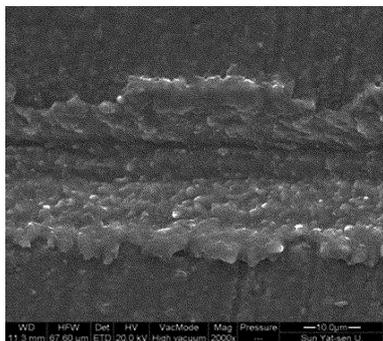


Fig. 7 Ablation on ceramic tool material after laser processing

2.3 扫描次数对微沟槽尺寸的影响

扫描次数分别为 1 次 ~ 5 次时,在陶瓷刀具表面进行微结构的加工。观察不同激光能量密度下表面微结构的形貌、表面微沟槽的深度和宽度,其变化规律如图 8 所示。实验条件为:激光能量密度 $50\text{J}/\text{cm}^2$,激光扫描速率 $60\text{mm}/\text{s}$,频率 30kHz 。

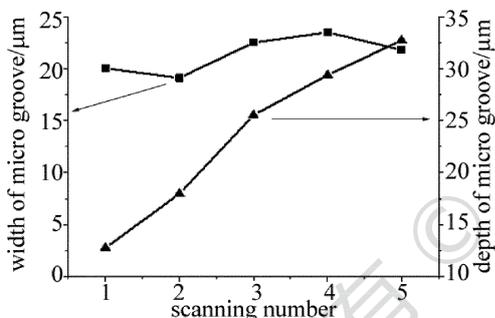


Fig. 8 Effect of laser scanning times on the size of micro grooves

随着扫描次数的增加,微沟槽的深度增加,宽度变化不大。这是由于微沟槽宽度主要受激光光斑直径影响,随着扫描次数增加,在原有加工沟槽上再次加工,汽化或融化刀具材料冷凝后再次被加工,沟槽深度增加。

图 9a 所示为扫描 1 次微沟槽形貌,可以看出此时沟槽边缘和底部形貌较好,沟槽宽度适中,加工质量较

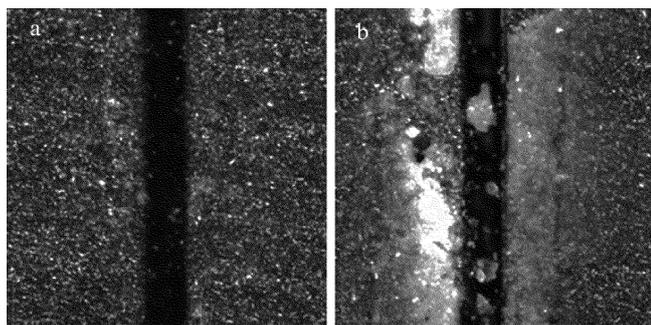


Fig. 9 Morphology of micro grooves after laser scanning repeatedly
a—1 time of scanning b—5 times of scanning

好。当扫描次数为 5 次时,微沟槽截面如图 9b 所示,微沟槽底部已经被严重破坏,沟槽两侧热影响区较大,沟槽边缘也产生大量重铸结构。这是因为激光多次扫描后微沟槽深度增加,汽化或熔融的材料不能溅射出来,另一方面是由于熔融物冷却凝结后被再加工,再次加工时材料表面凸凹不平,不同区域激光能量不同,整体加工质量较差。因此激光多次扫描后造成微沟槽边缘形貌很差。实验条件为:激光能量密度 $50\text{J}/\text{cm}^2$,激光扫描速率 $60\text{mm}/\text{s}$,频率 30kHz 。

2.4 激光频率对微沟槽尺寸的影响

研究不同激光能量密度对微沟槽尺寸的影响,只改变激光重复频率在陶瓷刀具表面进行微结构的加工。使用激光共聚焦显微镜检测不同激光能量密度下表面微沟槽的深度和宽度,其变化规律如图 10 所示。实验条件为:能量密度 $50\text{J}/\text{cm}^2$,扫描速率 $60\text{mm}/\text{s}$,扫描次数 1 次。

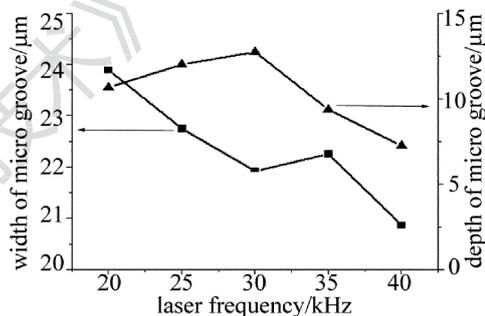


Fig. 10 Effect of laser frequency on the size of micro grooves

当激光重复频率在 $20\text{kHz} \sim 30\text{kHz}$ 之间时,微沟槽的宽度随着激光重复频率的增加而减小,微沟槽的深度随着激光重复频率的增加逐渐增大。当激光重复频率在 $30\text{kHz} \sim 40\text{kHz}$ 之间时,微沟槽的宽度和深度随着激光重复频率的增加急速减小。可以看出,激光重复频率的增加对微沟槽尺寸的影响很大,沟槽的宽度主要受激光光斑直径大小的限制,所在频率增加时虽然宽度降低,但在接近光斑直径时趋于稳定。激光重复频率在 $20\text{kHz} \sim 30\text{kHz}$ 之间时,随着重复频率的增加,加工区域内接收到的激光能量迅速增加,材料被快速的去除,加快了材料去除率和增大了溅射高度,微沟槽深度增加。当激光重复频率在 $30\text{kHz} \sim 40\text{kHz}$ 之间时材料重铸现象明显,而且较高的重复频率会降低脉冲峰值功率,使得微结构宽度减小。

3 小结

(1) 355nm 紫外激光加工陶瓷刀具表面微结构的过程中,微沟槽宽度主要受激光光斑直径影响,改变激光加工过程中某个条件,沟槽宽度会随着该条件的改变而改变,如激光能量密度的增加而增加,但最终趋于

25 μm 。

(2) 微沟槽深度受单位面积激光能量的影响较大,扫描速率降低、能量密度增加、合适的频率都会使刀具表面单位面积接收的激光能量增大,材料去除率增大,微沟槽深度增大。激光扫描次数增加,激光在加工后的微沟槽上再次加工,使得之前加工冷凝的刀具材料再次被汽化或者融化。微沟槽深度随扫描次数的增加而增大,但由于重铸现象比较明显,沟槽形貌质量较差。

(3) 随着激光能量密度的增加,微沟槽的宽度逐渐增加,微沟槽的宽度最终趋于 25 μm 。随着激光能量密度的增加,微沟槽的深度也逐渐增大,趋于线性变化。结合加工参量和微沟槽形貌质量,合理的激光能量密度范围为 40J/cm² ~ 50J/cm²。激光扫描速率增加,微沟槽的宽度基本不变。微沟槽的深度随着激光扫描速率的增加逐渐减小。合理的激光扫描速率范围为 40mm/s ~ 60mm/s。激光扫描次数增加,微沟槽的宽度有所波动,整体处于逐渐减小的趋势。微沟槽的深度随之逐渐增大,微沟槽的深度趋于线性增加。合理的激光扫描次数范围为 1 次 ~ 2 次。当激光重复频率在 20kHz ~ 30kHz 之间时,微沟槽的宽度随着激光重复频率的增加而减小,微沟槽的深度随着激光重复频率的增加逐渐增大。当激光重复频率在 30kHz ~ 40kHz 之间时,微沟槽的宽度和深度随着激光重复频率的增加急速减小。合理的激光重复频率范围为 20kHz ~ 30kHz。

参 考 文 献

[1] QI B Y, LI L, HE N, *et al.* Application of surface texture in tool anti-friction technology [J]. *Tool Engineering*, 2010, 44 (12): 3-6 (in Chinese).

[2] ENOMOTO T, SUGIHARA T. Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-/micro-textures[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 597-600.

[3] ENOMOTO T, SUGIHARA T. Improvement of anti-adhesive properties of cutting tool by nano/micro textures and its mechanism[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 11(19): 100-105.

[4] FENG X T. Cutting performance of surface texture ceramic tools[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014: 57-58 (in Chinese).

[5] WANG Zh. Study on friction of surface texturing tool[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 44-48 (in Chinese).

[6] TOSHIYUKI O, AKIHIRO K, HIDEIMITSU T, *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.

[7] ZHANG L X. Key technology study on high efficiency micro EDM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 4-5 (in Chinese).

[8] YANG Y, SU Y, LI L, *et al.* Performance of cemented carbide tools with microgrooves in Ti-6Al-4V titanium alloy cutting[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 76(9): 1731-1738.

[9] SU Y Sh, LI L, HE N, *et al.* Experimental research on laser machining of surface micro-textures of carbide cutting tool [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 66-72 (in Chinese).

[10] YU J, ZENG Zh J, ZHU S G, *et al.* Research on advantages processing of UV laser in fine technology [J]. *Infrared*, 2008, 29(6): 9-13 (in Chinese).

[11] QIN L. Research on micro machining technology of ultraviolet laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 6-7 (in Chinese).

[12] ZHOU M, WEI X, XIE X Zh, *et al.* Study on polishing process of Al2O3 ceramic with 355nm ultraviolet laser[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4): 556-560 (in Chinese).

[13] WU Z. Study on micro-texture self-lubricating and pulsating heat pipe self-cooling dry cutting tools [D]. Ji'nan: Shandong University, 2013: 29-30 (in Chinese).

[14] QI T. Study on the structure design of micro-textured self-lubricating tools [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012: 18-20 (in Chinese).

[15] WU Z, DENG J X, QI T, *et al.* Study on cutting performance with micro-texturing self-lubricated tools [J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(7): 18-22 (in Chinese).

[16] 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.