

聚晶金刚石表面微结构的激光加工实验

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 表面微结构刀具对改善刀-工摩擦接触状态、刀具磨损及抗黏附性方面具有积极作用。在聚晶金刚石刀具表面,利用光纤激光器进行了不同形状的微结构加工,并分析了扫描速度、脉冲频率和平均输出功率等不同工艺参数对微沟槽形貌和质量的影响。实验结果表明:随着平均输出功率和脉冲频率的增加,微沟槽宽度和深度分别表现出增大和减小的趋势;采用较小的扫描速度和较大的平均输出功率能够降低沟槽侧壁粗糙度,改善微沟槽的形貌质量。

关键词 激光器;聚晶金刚石;微沟槽;工艺参数

中图分类号 TN249; TG506 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0803004

Experiment of Laser Machining of Micro-Structures on the Surface of Polycrystalline Diamond

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-structures have positive effects on reducing friction, improving the wear resistance and anti-adhesion. Micro-structures of different shapes are fabricated using a fiber laser on the surface of polycrystalline diamond tool. The effects of various processing parameters on topography and quality of micro-grooves are analyzed, such as scanning speed, pulse repetition rate, average output power, etc. The experimental results show that the width and depth of micro-grooves have an increasing and a decreasing tendency with the increase of the average output power and the pulse repetition rate respectively. Furthermore, the surface roughness of micro-grooves sidewall and topography quality of micro-grooves can be improved by the higher average output power and the lower scanning speed.

Key words lasers; polycrystalline diamond; micro-groove; processing parameter

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390; 000.2658

1 引 言

与常规切削加工相比,高速切削加工在提高生产率、减少热变形和切削力方面具有显著的优越性,但是对于钛合金、高温合金、超高强度钢等难加工材料,现有刀具材料的刀具耐用度和切削生产率很低^[1-7]。研究表明,刀具快速磨损是制约难加工材料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^[8-9]。目前高速切削通常使用的刀具材料有超细硬质合金、先进涂层硬质合金、陶瓷以及聚晶金刚石(PCD)和聚晶立方氮化硼(PCBN)等。PCD刀具由于摩擦系数低,耐磨性极强,有良好的导热性,特别适合于有色金属、复合材料的高速精密切削。但是在切削某些类型的难加工材料时,如铝基 SiC

收稿日期: 2014-02-21; 收到修改稿日期: 2014-03-17

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、高效切削加工等方面的研究。

E-mail: liliang@nuaa.edu.cn

复合材料时,在 SiC 颗粒的高速强力划擦下,即使 PCD 刀具的寿命也不高。

仿生学和摩擦学研究发现,非光滑形态的表面具有减摩、抗黏附和耐磨等功能^[10-15],这一发现为解决高速切削难加工材料时的刀具快速磨损问题提供了一条新的发展途径。现有研究表明微结构刀具在切削韧性金属材料时,有良好的减摩效果,然而不同形状的微结构对减摩效果有不同的影响,因此研究不同工艺参数对微结构形貌的影响,为进一步优化微结构参数提供科学依据。

表面微结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、精度高的良好特点,在生产实践和科学研究中得到了广泛应用。目前采用激光加工的材料主要有铝合金、碳钢、高温合金、硬质合金、铸铁等^[16-19],研究的微结构形状多为微孔,对在具有硬度高、抗压强度高、导热性及耐磨性好等特性的聚晶金刚石材料上进行激光加工微结构的报道还不多。此外,将不同形貌的微结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外的研究中还处于初步阶段^[20-26]。

与传统的 CO₂ 激光器和固态激光器相比,光纤激光器结构简单、体积小、集成度高、使用灵活方便、故障少、抗振动和抗灰尘性能好,同时具有转换效率高、稳定性高、运行寿命长、光束质量好、光斑直径小,高功率密度和低热影响区等优点。在微结构加工方面,由于脉冲重复频率高,输出稳定功率,能够实现高速激光标刻,精确控制光斑大小、形状。与固体激光器相比,光纤激光器在参数调整方面具有很大的灵活性,可以通过参数的调整优化加工出更好的质量。

本文采用 20 W 的光纤激光器,在 PCD 刀具表面进行激光加工微结构实验研究,为后续研究提供工艺参数优化支撑,主要研究了扫描速度、脉冲频率和平均输出功率等工艺参数对微沟槽形貌和质量的影响。

2 实 验

实验系统由光纤激光器(YLP-1/100/20)、扫描振镜、扫描场镜、计算机、控制卡(SCAPS controller USC-1)及工作平台等组成,其中扫描场镜的焦距为 100 mm,扫描幅面范围为 50 mm×50 mm,图 1 为实验设备。实验材料为聚晶金刚石(CTB010),主要

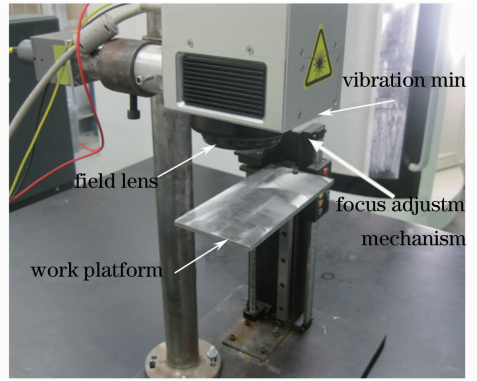


图 1 激光加工微结构实验设备

Fig.1 Experiment setup of laser machining of micro-structure

成分是 10%(质量分数)的 Co 结合剂和 90% 的金刚石粉末,加工后先用金相砂纸打磨,去除微结构边缘毛刺,然后用超声波在丙酮溶液中清洗 10 min,进行污物去除清理。采用三维数字显微镜(Leica DVM5000)和扫描电子显微镜(S-3400N)对微结构进行形貌测量和分析。

在激光加工中,材料上表面与聚焦透镜焦点之间的距离称为离焦量 d 。焦点在材料上表面之上所形成的离焦量称为正离焦[图 2(c)],焦点在材料上表面之下所形成的离焦量称为负离焦[图 2(a)]。一定范围内的离焦量可以使光斑能量的分布相对均匀,可以获得相对均匀的功率密度分布,此外,采用负离焦加工时,刀具材料内部的功率密度比刀具表面的高,在同等条件下,较高的激光束功率密度能使加工过程中产生更多的蒸汽相物质,产生的蒸汽压力越大,高压蒸汽带走的液相物质就越多,加工出的微结构深度更深^[27]。为得到较大深度和均匀的功率密度分布,采用负离焦方式进行激光加工实验。

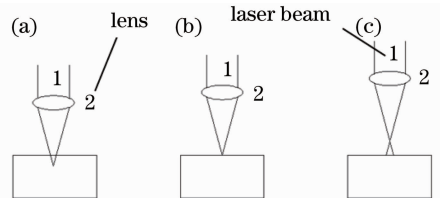


图 2 不同离焦量示意图。(a) $d < 0$;
(b) $d = 0$; (c) $d > 0$

Fig.2 Schematic of different defocusing distances.

(a) $d < 0$; (b) $d = 0$; (c) $d > 0$

3 结果分析与讨论

3.1 扫描速度对微结构的影响

在 PCD 刀具前刀面上,用激光加工出微沟槽阵

列。为考察扫描速度对微沟槽形貌影响,取平均输出功率,脉冲频率和重复打标次数分别为 10 W、20 kHz和 50 次,扫描速度分别取 1、5、10 mm/s。由图 3 可以看出,在其他参数不变的条件下,随着扫描速度的增加,沟槽的深度和宽度均出现减小趋势,其中沟槽宽度随速度增大而降低的幅度不大。从微沟槽的扫描电镜(SEM)形貌(图 4)可以看出,当扫描速度为 1 mm/s 和 5 mm/s 时,两沟槽的宽度变化较小,扫描速度为 1 mm/s 时沟槽侧壁的形貌相对光滑,粗糙度较低,形貌质量整体上优于扫描速度为 5 mm/s 的沟槽侧壁形貌质量。

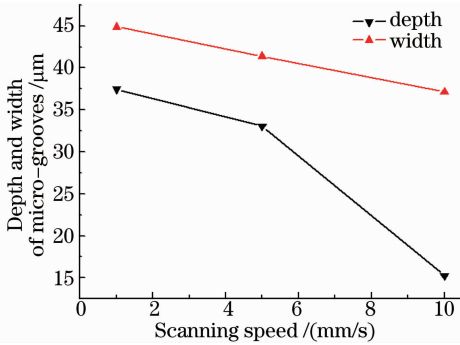


图 3 不同扫描速度下沟槽深度和宽度变化曲线
Fig. 3 Change curves of depth and width of micro-grooves under different scanning speeds

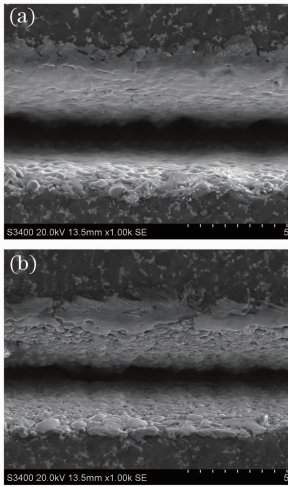


图 4 微沟槽在不同扫描速度下扫描电镜形貌。
(a) $v=1$ mm/s; (b) $v=5$ mm/s

Fig. 4 SEM morphologies of micro-grooves under different scanning speeds. (a) $v=1$ mm/s; (b) $v=5$ mm/s

3.2 脉冲频率对微结构的影响

图 5 为不同脉冲频率下沟槽深度和宽度变化曲线,其平均输出功率,扫描速度和重复打标次数分别为 10 W、5 mm/s 和 50 次,脉冲频率分别取 20、60、100 kHz。由图 5 可以看出,微沟槽的深度和宽度

随着脉冲频率的增加,减小的幅度较大。图 6 为沟槽在不同脉冲频率下扫描电镜形貌,从图中可以看出脉冲频率为 60 kHz 时沟槽的宽度和深度比脉冲频率为 20 kHz 时明显减小。

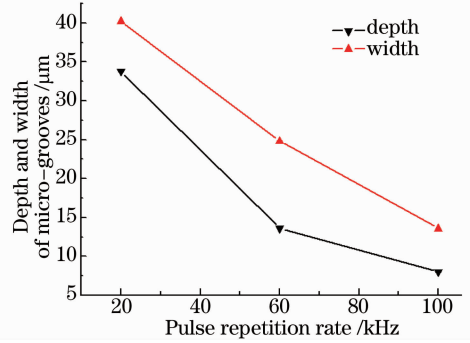


图 5 不同脉冲频率下沟槽深度和宽度变化曲线
Fig. 5 Change curves of depth and width of micro-grooves under different pulse repetition rates

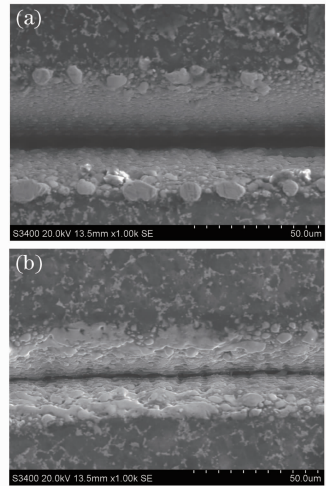


图 6 微沟槽在不同脉冲频率下扫描电镜形貌。
(a) $f=20$ kHz; (b) $f=60$ kHz

Fig. 6 SEM morphologies of micro-grooves under different pulse repetition rates. (a) $f=20$ kHz; (b) $f=60$ kHz

3.3 平均输出功率对微结构的影响

图 7 为不同平均输出功率下沟槽深度和宽度变化曲线,平均输出功率分别取 6、8、10 W。扫描速度,脉冲频率和重复打标次数分别取 5 mm/s、20 kHz和 50 次。从图 7 中可以看出,随着平均输出功率的增加,微沟槽深度和宽度均表现出增加趋势。图 8 为沟槽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 6 W 增大到 10 W 时沟槽的宽度和深度均明显增大,沟槽侧壁上去除的材料更多,侧壁的表面粗糙度有所降低。

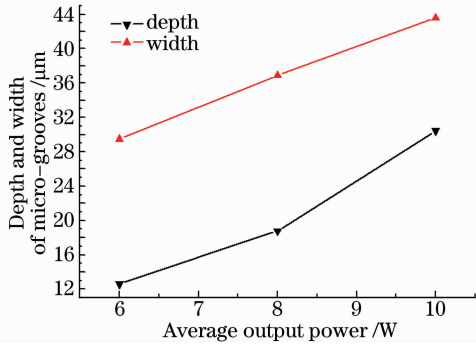


图 7 不同平均输出功率下沟槽深度和宽度变化曲线

Fig. 7 Change curves of depth and width of micro-grooves under different average output powers

3.4 不同形状的微结构

在聚晶金刚石刀具表面上,用光纤激光器加工出直线沟槽、波纹沟槽及曲线沟槽三种不同形状的微结构阵列,扫描速度、平均输出功率、脉冲频率及重复打标次数分别为 5 mm/s、10 W、20 kHz 和 50 次。从图9可以看出,采用光纤激光器选择适当

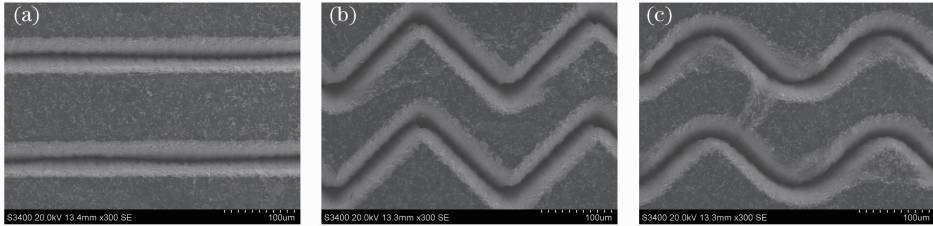


图 9 不同形状的微结构扫描电镜形貌。(a) 直线沟槽;(b) 波纹沟槽;(c) 曲线沟槽

Fig. 9 SEM morphologies of micro-structure with different shapes. (a) Linear groove; (b) wavy groove; (c) curve groove

3.5 讨论与分析

激光加工时,扫描速度的变化意味着激光与材料相互作用时间的变化,使得材料在单位面积上得到的激光能量发生改变。当其他参数不变时,扫描速度越快,激光照射材料的作用时间越短,材料在单位面积上得到的能量就越少。当扫描速度过低,激光照射材料的作用时间过长,影响范围过大,使得沟槽周围的材料也被熔化或汽化,导致沟槽较宽。当扫描速度过高时,则会使切口清渣不净,切口变得粗糙。

激光单点脉冲能量 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

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

实验中,激光的脉冲宽度为 100 ns,且整个实验过程保持不变。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,微沟槽宽度和深度随着脉冲频率的增大而减小(图 6)。

的工艺参数,在金刚石刀具表面可以加工出形状更规则的不同微结构阵列。

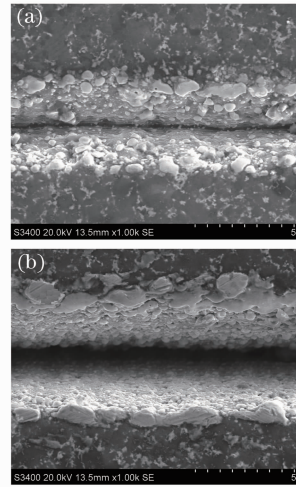


图 8 微沟槽在不同平均输出功率下扫描电镜形貌。

(a) $P=6\text{ W}$; (b) $P=10\text{ W}$

Fig. 8 SEM morphologies of micro-grooves under different average output powers. (a) $P=6\text{ W}$; (b) $P=10\text{ W}$

在 PCD 刀具表面上用激光加工微结构时,作用在刀具表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 表示为^[28]

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

式中 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过程中产生更多的蒸汽相物质,产生的蒸汽压力越大,高压蒸汽带走的液相物质就越多,沟槽宽度和深度就越大(图 8)。因此,当要求加工较大的微结构深度和宽度时,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。

4 结 论

1) 当扫描速度从 1 mm/s 增大到 5 mm/s 时,

两沟槽的宽度变化较小,扫描速度为 1 mm/s 时沟槽侧壁的形貌质量整体上优于扫描速度为 5 mm/s 的沟槽侧壁形貌质量。

2) 当脉冲频率从 20 kHz 增大到 100 kHz 时,微沟槽的深度和宽度减小的幅度较大。

3) 平均输出功率从 6 W 增大到 10 W 时,沟槽的宽度和深度均明显增大,沟槽侧壁上去除的材料更多,侧壁的表面粗糙度有所降低。

4) 对激光参数进行优化选择,在 PCD 刀具表面可以加工出形状更规则的不同微结构,如直线沟槽、波纹沟槽及曲线沟槽。

参 考 文 献

- Liu Zhanqiang, Ai Xing. Investigation of wear lifespan of cutting tools in high-speed machining[J]. *Tool Engineering*, 2001, 35(12): 3-7.
刘战强,艾兴. 高速切削刀具磨损寿命的研究[J]. *工具技术*, 2001, 35(12): 3-7.
- He Ning. Theoretical and Application Researches on High Efficiency Machining of Difficult-to-Machining Materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1996.
何宁. 难加工材料高效切削理论与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1996.
- Li Liang. Study on the Mechanism and Process of High Speed Milling of Titanium Alloys[D]. 2004.
李亮. 钛合金高速铣削机理及其工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- Su Yu, He Ning, Li Liang. Effect of refrigerated air cutting on tool wear in high-speed cutting of difficult-to-cut materials[J]. *Tribology*, 2010, 30(5): 485-490.
苏宇,何宁,李亮. 冷风切削对高速切削难加工材料刀具磨损的影响[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(5): 485-490.
- S T Lei, W J Liu. High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool[J]. *Int J Mach Tool Manu*, 2002, 42(6): 653-661.
- A Jawaid, S Koksai, S Sharif. Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy[J]. *Mater Process Technol*, 2001, 116(1): 2-9.
- Z G Wang, M Rahman, Y S Wong. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys [J]. *Wear*, 2005, 258(5-6): 752-758.
- 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.
- 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.
- Han Zhiwu, Ren Luquan, Liu Zubin. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth surface made by laser texturing[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.
- Ren Luquan, Yang Zhuoquan, 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.
- Z Burton, B Bhushan. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces [J]. *Ultramicroscopy*, 2006, 106(8-9): 709-719.
- Z Burton, B Bhushan. Hydrophobicity, adhesion, and friction properties of nanopatterned polymers and scale dependence for micro-and nanoelectromechanical systems[J]. *Nano Lett*, 2005, 5(8): 1607-1613.
- U Pettersson, S Jacobson. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts[J]. *Tribology International*, 2003, 36(11): 857-864.
- Han Zhongling, 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.
- A Stouraras, P Stavropoulos, K Salonitis, et al.. An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2009, 2(1): 61-69.
- Yang Jihong. Action Mechanism and Technics Study of Using Laser Drilling Microhole[D]. Tianjin: 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.
- Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Researches on laser milling horniness alloy[J]. *Appl Laser*, 2002, 22(2): 217-219.
袁根福,曾晓雁. 硬质合金激光铣削加工试验研究[J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 217-219.
- C Vincent, G Monteil, T Barriere, et al.. Laser machining in lamellar cast iron[J]. *International Journal of Material Forming*, 2008, 1(1): 575-578.
- J X Deng, Z Wu, Y S Lian, et al.. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes[J]. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2012, 30(1): 164-172.
- Z Wu, J X Deng, Y Chen, 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.
- 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.
- T Enomoto, T Sugihara, S Yukinaga, et al.. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 571-574.
- T Sugihara, T Enomoto. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(2): 229-237.
- N Kawasegi, H Sugimori, H Morimoto, et al.. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 248-254.
- S Lei, S Devarajan, Z Change. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel [J]. *J Mater Process Technol*, 2009, 209(3): 1612-1620.
- Guan Zhenzhong. Laser Processing Technology Handbook[M]. Beijing: Chinese Metrology Publishing House, 2007.
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- 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.

栏目编辑: 韩峰