

表面质量控制及检测

超硬织构化刀具高速切削钛合金试验研究

苏永生¹, 李亮², 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, 南京 210016)

摘要: **目的** 研究高速切削钛合金过程中表面织构对刀具切削性能的影响。**方法** 通过开展常规(无织构)和织构化聚晶金刚石(PCD)刀具高速切削钛合金试验,分析不同条件下切削力、摩擦系数、切削粘结的变化。**结果** 增加切削速度能够有效降低 PCD 刀具的切削力和摩擦系数。当切削速度为 16.485~175.84 m/min 时,相对于无织构刀具,织构化刀具的干切削性能在总体上表现最佳,且织构化刀具在干切削时的进给抗力、主切削力和摩擦系数最大分别降低了约 71.75 N、39.95 N、0.13。**结论** 高速切削可以显著降低刀-屑界面的切削力、摩擦系数。织构化 PCD 刀具在低速下的干切削性能明显优于常规刀具,且优于低温润滑条件时的减摩效果。

关键词: 高速切削; 超硬刀具; 织构化; 切削性能; 干切削

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0249-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.039

Super-hard Textured Tools in High Speed Machining Test of Titanium Alloy

SU Yong-sheng¹, LI Liang², WANG Jian-bin¹, WANG Gang¹

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

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of surface texture on tool machinability during high speed cutting of titanium alloy. Changes of cutting force, friction coefficient and cutting adhesion under different conditions were analyzed by performing high speed cutting test of titanium alloy with conventional tools (un-textured tools) and textured polycrystalline diamond (PCD) tools. Cutting force and friction coefficient of PCD tools could be effectively reduced by increasing cutting speed. When the cutting speed ranged from 16.485 m/min to 175.84 m/min, compared with un-textured tools, textured tools exhibited the best dry machinability as a whole. Moreover, axial thrust force, main cutting force and friction coefficient of the textured tools could be reduced by up to 71.75 N, 39.95 N and 0.13. High speed machining can significantly reduce cutting force and friction coefficient of tool-chip interface. Compared with conventional tools, textured PCD tools can exhibit better dry machinability at low speed obviously, and have better anti-friction effect than that under the condition of low-temperature lubrication.

KEY WORDS: high speed cutting; superhard tools; texturing; machinability; dry machining

收稿日期: 2017-10-23; 修订日期: 2017-11-09

Received: 2017-10-23; Revised: 2017-11-09

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2016A060); 国家自然科学基金(51375236); 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)

Fund: Support by Research Foundation of Education Department of Anhui Province, China (KJ2016A060), National Natural Science Foundation of China (51375236), Key Research and Development Plan of Anhui Province, Granted (1704a0902056) and Scientific Research Foundation for the Introduction of Talents of Anhui Polytechnic University (2016YQQ001)

作者简介: 苏永生(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事刀具摩擦磨损、激光加工及表面织构学研究。

Biography: SU Yong-sheng (1982—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: tool wear, laser machining, surface texture.

高速切削加工技术能够获得更高的切削效率、更低的切削力,并能较好地降低因切削热而产生的热变形。然而,高速切削过程中,刀-屑摩擦界面的高温、高压及高频冲击对刀具性能提出了更加严格的要求和考验,现有刀具在加工不同类型的难加工材料时,其使用寿命和切削效率很低^[1-4]。刀具表面因剧烈切削摩擦而导致的磨损是制约高速切削应用的关键因素,也是限制切削速度进一步提高的关键技术瓶颈。

目前,解决现有刀具磨损的途径包括^[5-7]:(1)表面涂层技术,采用具有良好耐磨性能和高硬度的硬涂层(如 TiC、TiN 等),或刀具表面镀有 MoS₂ 和 WS₂ 软涂层;(2)冷却润滑技术,如应用液氮、干冰、微量润滑等;(3)切削参数和刀具结构参数优化;(4)开发新型高性能刀具。近年来,仿生摩擦学研究发现自然界中一些动植物体表的非光滑形态表面可以实现良好的减摩、抗粘结和抗磨损性能^[8-11],这为高速切削加工过程中的刀-屑界面摩擦学性能的改善和刀具磨损的延缓提供了一条新思路,并已逐渐成为高速切削刀具技术研究的一个新热点。

借鉴仿生摩擦学研究,国内外专家和学者开展了大量的结构化刀具切削性能研究。现有结构化刀具研究^[12-16]的刀具材料主要有硬质合金和陶瓷刀具,且以前者为主。工件材料涉及 45#钢、铝合金和钛合金,前两种研究的最多。本文选择 PCD 刀具材料,开展高速切削条件下常规刀具(无织构)和结构化刀具高速切削钛合金材料的切削力、摩擦系数和抗切屑粘结性能研究。

1 试验方法与设备

本试验采取正交车削方式进行,试验中涉及无织构 PCD 刀具和结构化 PCD 刀具,刀具前角 4°,后角 11°。工件材料选择外径为 50 mm、厚度 2 mm 的 Ti6Al4V 钛合金圆管。切削参数包括:切削速度 16.485、56.52、87.92、125.6、175.84 m/min,进给量 0.19 mm/r,切削深度 2 mm。润滑条件包括干切削(无润滑介质参与)和低温微量润滑(CMQL)。切削力测量及信号处理设备包括 Kistler 9257B 测力仪和 Kistler 5070 电荷放大器。采用光纤激光器(YLP-1/100/20)在 PCD 刀具前刀面制备横向微沟槽(微沟槽阵列分布方向垂直于切屑流动方向)。

2 结果分析与讨论

2.1 不同条件下结构化刀具切削力变化分析

图 1 为不同条件下无织构和结构化超硬 PCD 刀具切削钛合金的切削力变化曲线。从图 1 可清楚地看出,在切削速度从 16.485 m/min 增加到 175.84 m/min 的过程中,无论是在干切削还是低温微量润滑条件下,无织

构和结构化超硬 PCD 刀具的进给抗力 F_x 和主切削力 F_z 均表现出逐步减小的变化趋势。试验结果表明,增大切削速度能够明显降低刀具表面的切削力大小。

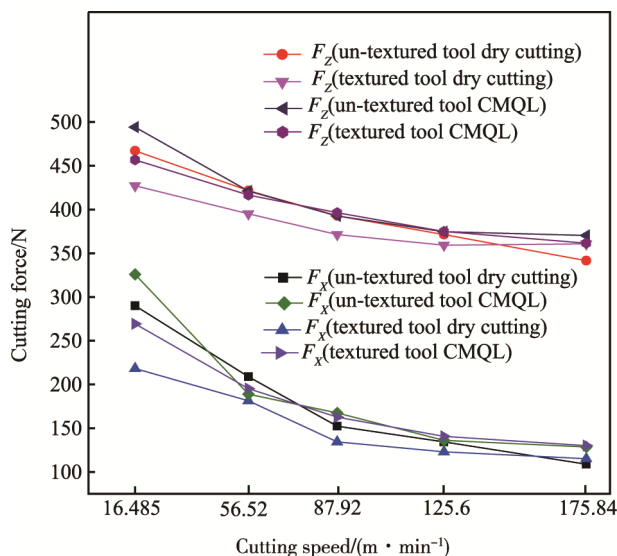


图 1 不同条件下的无织构刀具和结构化刀具切削力变化曲线

Fig.1 Variation curves of cutting force of un-textured and textured tools under different conditions

当切削速度在 16.485~125.6 m/min 范围变化时,在干切削条件下,切削速度相同时,结构化超硬 PCD 刀具的进给抗力和主切削力均小于无织构刀具。在微量润滑条件下,切削速度相同时,无织构和结构化 PCD 刀具对应的进给抗力和主切削力非常相近,相对无织构刀具,微结构化刀具对降低切削力的效果不佳。总体来说,切削速度较低时,结构化超硬 PCD 刀具在干切削条件下的切削力最小。

2.2 不同条件下结构化刀具摩擦系数变化分析

图 2 为不同条件下的无织构和结构化超硬 PCD

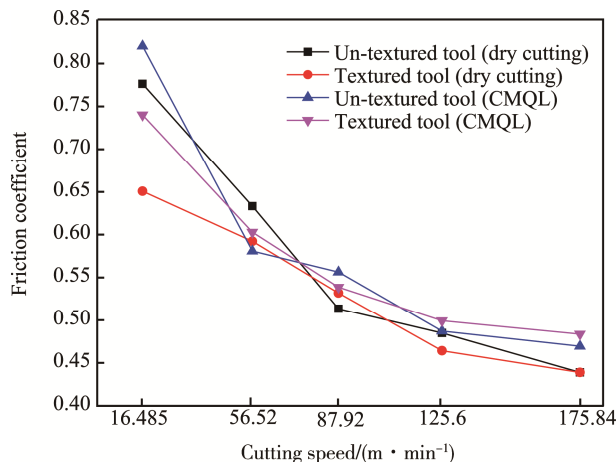


图 2 不同条件下的无织构刀具和结构化刀具摩擦系数变化曲线

Fig.2 Variation curves of friction coefficient of un-textured and textured tools under different conditions

刀具切削钛合金的摩擦系数变化曲线。从图 2 可看出, 整体上来说, 在干切削或低温微量润滑条件下, 无织构和织构化超硬 PCD 刀具的摩擦系数均随切削速度的增大而逐步降低。

试验结果发现, 增大切削速度能够有效降低刀-屑界面的摩擦系数。当切削速度为 16.485 m/min 时, 无论在干切削或低温微量润滑条件下, 表面织构对刀具的减摩效果均优于无织构刀具, 且织构化刀具干切削时的摩擦系数最小; 当切削速度在 56.52~175.84 m/min 范围变化时, 在相同切削速度和润滑条件下, 无织构和织构化刀具对应的摩擦系数差异不大, 且在这一速度变化区间内, 总体上织构化刀具干切削对摩擦系数的降低效果更好。

2.3 不同条件下超硬织构化刀具抗粘结性能分析

图 3 为干切削条件下(切削速度为 125.6 m/min), 超硬无织构 PCD 刀具切削钛合金后的前刀面扫描电镜形貌及 EDX 分析, 由此图可以看出, 靠近刀具主切削刃附近区域覆盖了一层较薄的粘结物区域。为确定粘结物的成分, 对粘结区域任意一点 A 进行 EDX 分析, 检测结果发现 A 点区域粘结物的主要元素为钛。根据试验条件可以基本判定, 粘结物来自钛合金切削过程中产生的切屑。因此, 在较高切削条件下, 刀具表面极易产生严重的钛合金切屑粘结物。

图 4 为在干切削条件下, 无织构和织构化超硬

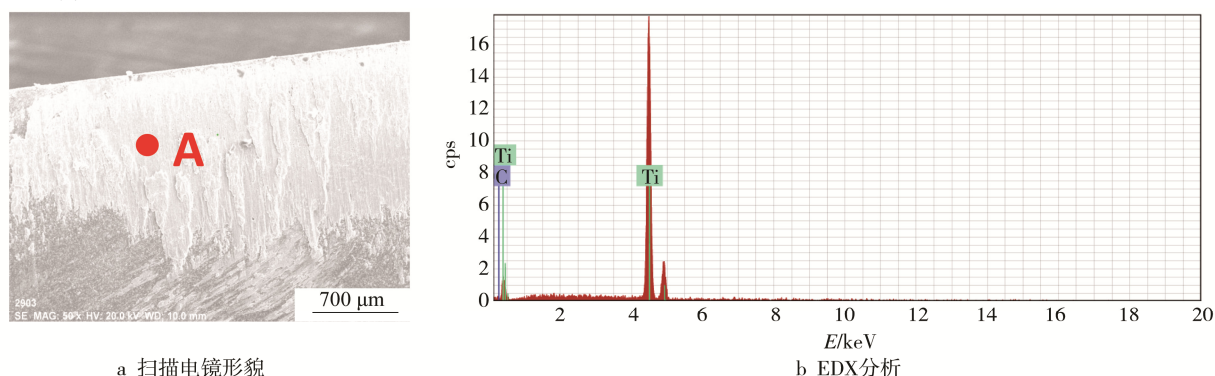


图 3 无织构 PCD 刀具切削钛合金后的扫描电镜形貌及 EDX 分析

Fig.3 SEM topography of un-textured PCD tool after cutting (a) SEM topography and (b) EDX composition analysis of A point

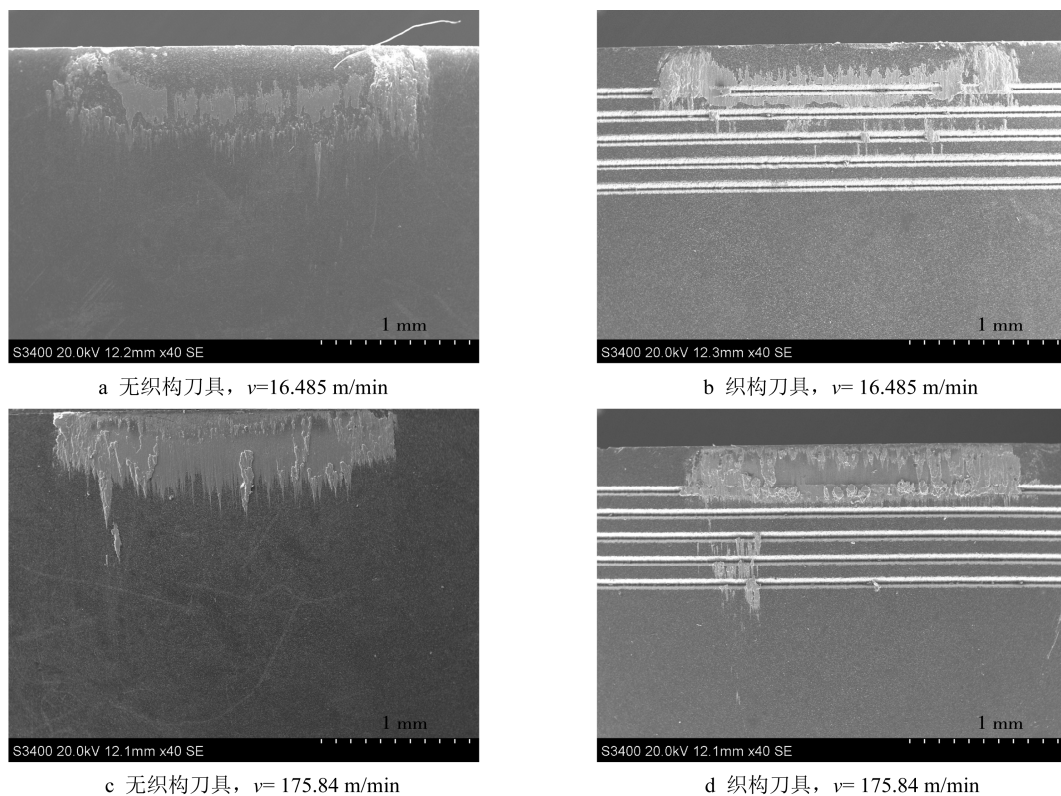


图 4 无织构和织构刀具在干切削条件下的扫描电镜形貌

Fig.4 SEM morphology of un-textured(a,c) and textured(b,d) PCD tools under dry machining conditions

PCD 刀具切削钛合金后, 两种类型刀具前刀面的扫描电镜形貌。从图 4 可清楚地看出, 当切削速度为 16.485 m/min 时, 在刀-屑接触长度方向上, 无织构和织构化刀具前刀面的切屑粘结物的长度相近。刀具表面微沟槽的存在对降低切屑粘结物的效果有限。当切削速度为 175.84 m/min 时, 无织构和织构化刀具前刀面沿刀-屑接触长度方向上的切屑粘结物长度相差较大, 刀具表面微沟槽的存在能够显著降低切屑粘结物区域大小, 有效改善了刀具表面粘结物状况。

图 5 为在 CMQL 切削条件下, 无织构和织构化刀具切削钛合金后, 两种类型刀具前刀面的切屑粘结

分布情况。从图 5 可清楚地看出, 在 CMQL 条件下, 当切削速度为 16.485 m/min 时, 在刀-屑接触长度方向上, 无织构和织构化刀具前刀面的切屑粘结物的长度差距较小, 这与上述图 4a 和 b 的情况类似, 说明刀具表面微沟槽对降低切屑粘结物的效果不大。当切削速度增大到 175.84 m/min 时, 无织构刀具表面靠近主切削刃附近区域覆盖一层切屑粘结物层, 无织构刀具表面切屑粘结物层的范围明显比织构化刀具表面的切屑粘结层大, 在刀-屑接触长度方向的切屑粘结物的长度也更长。试验结果表明, 在低温微量润滑条件下高速切削时, 织构化刀具抗切屑粘结的效果优于无织构刀具。

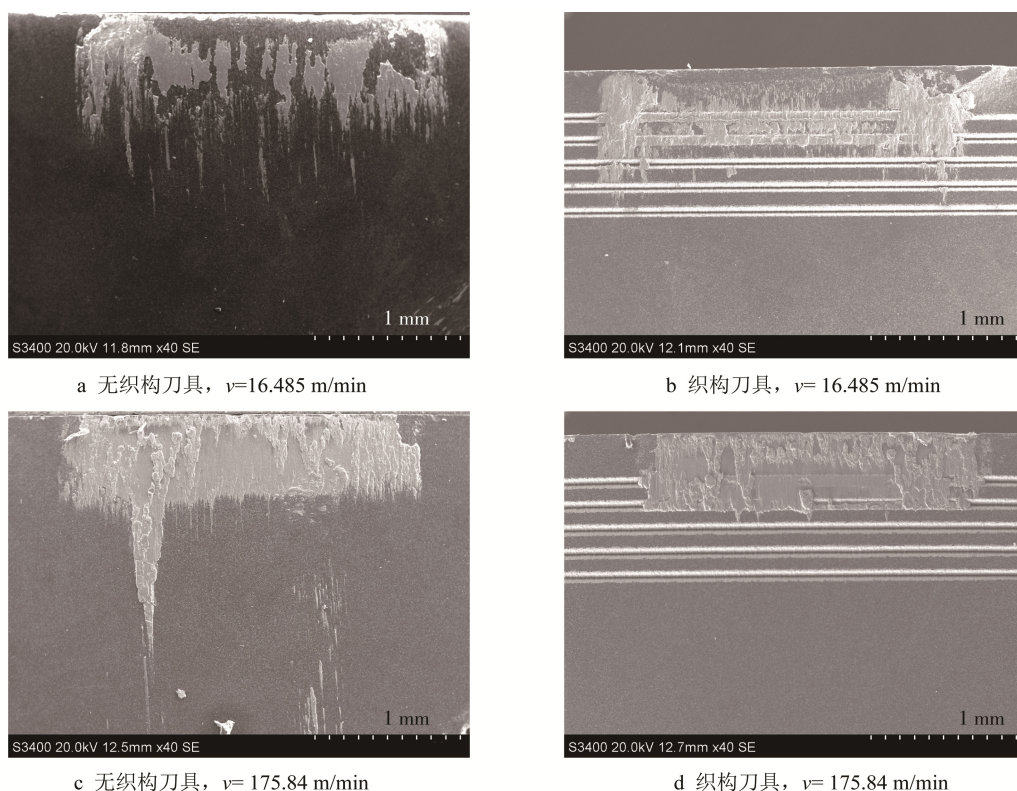


图 5 无织构和织构刀具在低温微量润滑切削条件下的扫描电镜形貌

Fig.5 SEM morphology of un-textured (a,c) and textured (b,d) PCD tools under CMQL conditions

2.4 讨论与分析

2.4.1 刀-屑接触长度的影响

超硬织构化 PCD 刀具正交切削钛合金时, 由于 PCD 刀具前刀面制备有微沟槽阵列, 假设单个沟槽宽度大小为 D , 刀-屑实际摩擦区域有 N 个沟槽, 刀-屑名义接触长度为 L_1 , 则刀-屑实际接触长度 L_2 可用公式 (1) 表示:

$$L_2 = L_1 - N \cdot D \quad (1)$$

由公式 (1) 可知, PCD 刀具表面微沟槽的存在降低了刀-屑接触长度。由于在刀具切削过程中, 切削力大小与刀-屑接触长度成线性关系^[17-18], 因此与无织构刀具相比, 表面织构降低了 PCD 刀具实际刀-

屑接触长度, 并在一定程度上降低了切削力和摩擦系数的大小。

2.4.2 表面织构分布位置的影响

如图 6 所示, 国内外研究发现, 当刀具织构是横向沟槽时, 切削垂直于沟槽方向, 沟槽能够将沿着切屑流动方向的粘结区分离开, 这样能够阻止切屑粘结物的沉淀和不断增长, 切屑不容易塞满沟槽^[12]。此外, 从图 6 可以看出, 刀具表面的微沟槽阵列能够充当储存一部分钛合金切屑的作用。因此, 当 PCD 刀具表面制备有垂直于切屑流动方向的横向沟槽阵列时, 能够降低刀具表面切屑粘结区域, 提高刀具的抗粘结性能, 从而有效改善刀-屑界面的摩擦状况。

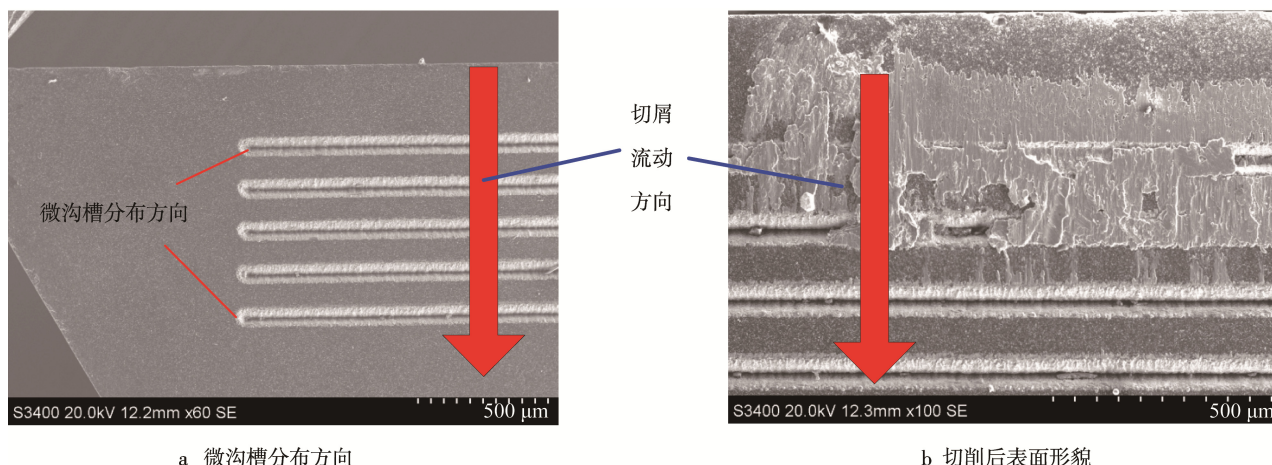


图 6 PCD 刀具表面织构分布扫描电镜形貌

Fig.6 SEM topography of surface texture distribution of PCD tools: (a) distribution direction of micro-grooves, (b) surface topography after cutting

2.4.3 润滑粘结层的影响

在 PCD 刀具高速切削钛合金的过程中, 由于刀-屑界面的剧烈摩擦, 在刀-屑摩擦区域产生较高的温度, 有利于 PCD 刀具中的碳和钛合金工件材料中的钛发生反应形成具有较好润滑性能的 TiC 粘结层, 该粘结层在一定程度上能够有效阻止 PCD 刀具表面的材料进入切削的钛合金材料^[1,19], 有助于降低刀-屑界面的摩擦, 降低切削力。上述试验发现, 织构化 PCD 刀具在低速干切削条件下的减摩效果明显优于相同条件下的无织构刀具; 而在低温微量润滑条件下, 相对于无织构刀具, 织构化 PCD 刀具基本没有明显的减摩效果。这可能是因为低温润滑条件降低了刀-屑摩擦区域的摩擦温度, 不利于 TiC 粘结层的稳定和持续形成。所以, 相对于无织构刀具, 织构化 PCD 刀具在低温润滑条件下的减摩效果弱于干切削条件下的减摩效果。

3 结论

1) 当切削速度在 16.485~175.84 m/min 范围逐步增大时, 无论是在干切削条件下, 还是在低温微量润滑条件下, 无织构和织构化超硬 PCD 刀具表面的切削力和摩擦系数均表现出逐步降低的趋势, 高速度切削可以有效改善切削性能。

2) 在干切削条件下, 当切削速度为 16.485~125.6 m/min 时, 织构化超硬 PCD 刀具的切削力均小于对应条件下的无织构刀具切削力, 且对降低切削力的效果最好。

3) 在干切削和低速条件下, 织构化超硬 PCD 刀具在降低刀-屑摩擦系数方面的效果优于无织构超硬 PCD 刀具。在 CMQL 条件下, 相对于无织构超硬 PCD, 织构化刀具在降低摩擦系数方面无明显改善效果。

4) 无论在干切削还是低温微量润滑条件下, 织构化超硬 PCD 刀具抗切屑粘结效果均优于无织构刀具。

参考文献:

- [1] 徐九华, 刘鹏, 傅玉灿. 超硬刀具高速切削钛合金研究进展[J]. 航空制造技术, 2011(14): 26-30.
XU Jiu-hua, LIU Peng, FU Yu-can. Advances in High Speed Machining of Titanium Alloys with Superhard Cutting Tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(14): 26-30.
- [2] WANG Z G, RAHMAN M, WONG Y S. Tool Wear Characteristics of Binderless CBN Tools Used in High-speed Milling of Titanium Alloys[J]. Wear, 2005, 258 (5-6): 752-758.
- [3] 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.
LIU Zhan-qiang, AI Xing. Investigation of Wear Lifespan of Cutting Tools in High-speed Machining[J]. Tool Engineering, 2001, 35(12): 3-7.
- [4] LEI S, LIU W J. High-speed Machining of Titanium Alloys Using the Driven Rotary Tool[J]. Inter J of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(6): 653-661.
- [5] 万熠, 刘战强, 赵军, 等. 先进切削刀具及未来趋势[J]. 航空制造技术, 2014, 456(12): 40-43.
WAN Yi, LIU Zhan-qiang, ZHAO Jun, et al. Advanced Cutting Tool and Future Development Trend[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 456(12): 40-43.
- [6] 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.
SCHULZ H, ABELE E, HE Ning. The High Speed Machining Fundamentals and Applications[M]. Beijing: Sciences Press, 2010.
- [7] 何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.

- He Ning. High Speed Cutting Technology[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2012.
- [8] DAI Z D, TONG J, REN L Q. Researches and Developments of Biomimetics in Tribology[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(22): 2681-2689.
- [9] 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.
- [10] 汤勇, 周明, 韩志武, 等. 表面功能结构制造研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 93-105.
- TANG Yong, ZHOU Ming, HAN Zhi-wu, et al. Recent Research on Manufacturing Technologies of Functional Surface Structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 93-105.
- [11] 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.
- TIAN Xi-mei. Biological Coupling and Bionic Anti-wear Properties of Typical Molluscan Shells[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [12] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Improving Anti-adhesion in Aluminum Alloy Cutting by Micro Stripe Texture[J]. Precision Engineering, 2012, 36(2): 229-237.
- [13] 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 & Manufacture, 2011, 51(12): 966-972.
- [14] 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.
- [15] DENG J X, LIAN Y S, WU Z, et al. Performance of Femtosecond Laser-textured Cutting Tools Deposited with WS₂ Solid Lubricant Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 222: 135-143.
- [16] WU Z, DENG J X, CHEN Y, et al. Performance of the Self-lubricating Textured Tools in Dry Cutting of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9-12): 943-951.
- [17] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- CHEN Ri-Yao. Principle of Metal Cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [18] SHAW M C. Metal Cutting Principles[M]. New York: Oxford University Press, 2005.
- [19] RAHMAN M, WONG Y S, ZAREENA A R. Machinability of Titanium Alloys[J]. JSME International Journal, 2003, 46(1): 107-115.