

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.001

微织构车刀制备与SUS304钢高速微车削试验*

于占江, 蔡倩倩, 王星星, 许金凯, 于化东

(长春理工大学 吉林省精密微制造、检测及装备重点实验室, 长春 130022)

摘要: 针对高速微切削过程中微型车刀表面摩擦磨损严重的问题, 利用表面非光滑微织构减摩擦减阻原理, 在高速微切削用车刀表面利用激光加工技术制备了微槽、微坑织构, 研究了激光加工参数与微织构形貌之间的关系; 分析了微织构的摩擦学特性; 利用自行研制的高速微车削单元进行微织构刀具及无织构刀具的高速微切削SUS304不锈钢的对比试验, 从切削力、切削温度、刀屑接触状态、切屑形态以及已加工表面粗糙度对微织构车刀性能进行评价。结果表明: 微槽、微坑织构均可以有效降低刀具表面摩擦因数; 在高速微切削过程中可以减小切削力、切削温度, 降低刀屑接触长度, 改善切屑形态, 尤其是微坑织构可明显改善表面质量, 可以应用到SUS304不锈钢的高速微加工。

关键词: 微织构; SUS304; 高速切削; 微车削; 车刀

中图分类号: TG506

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0001-07

Preparation of Micro-textured Turning Tools and High Speed Micro Turning Test of SUS304 Steel

YU Zhan-jiang, CAI Qian-qian, WANG Xing-xing, XU Jin-kai, YU Hua-dong

(Precision Micro Manufacturing, Measurement and Equipment Key Laboratory of Jilin Province, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: In terms of the serious tool wear during the micro cutting process, micro-pit and micro groove were manufactured by laser on turning tool for high speed micro turning based on the theory of anti-friction and anti-drag of non-smooth micro texture. Relationship between laser processing parameters and morphology of micro-texture were researched and characteristics of friction were also analyzed. Contrast cutting tests of 304 stainless steel with micro-texture and untextured tool were implemented using self-developed high speed micro-cutting unit. Micro-texture performance was evaluated from the cutting force, cutting temperature and tool-chip contact status, chip morphology and machined surface roughness. Experimental results show that micro groove and micro pit can effectively decrease the surface friction coefficient, reduce cutting force, cutting temperature and tool-chip contact length, and improve chip shape. Especially, micro pits structure can obviously improve the surface quality, which can be applied in SUS304 high-speed cutting.

Keywords: micro texture; SUS304; high speed cutting; micro-turning; turning tool

0 引言

非光滑表面微织构在材料表面的应用已被证明在抗磨减阻^[1-2], 抗粘附^[3], 提高表面耐磨性和承载性能方面有积极作用。通过在刀具表面合理

布置微织构, 在传统切削过程中可以降低切削力和切削热^[4-5], 减少积屑瘤粘附^[6], 从而降低刀具磨损, 提高刀具耐用度^[7]。

目前研究大多集中于传统切削试验, 主轴转

收稿日期: 2016-06-07; 修回日期: 2016-11-23; 基金项目: *国家自然科学基金(51275056); 长春理工大学青年基金(000552)

通讯作者: 于化东(1961—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 精密超精密加工、微细切削加工与微机械制造; Tel: (0431) 85583355;

E-mail: yuhd@cust.edu.cn

网络出版日期: 2016-12-12 09:18; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161212.0918.006.html>

引文格式: 于占江, 蔡倩倩, 王星星, 等. 微织构车刀制备与SUS304钢高速微车削试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 1-7. YU Z J, CAI Q Q, WANG X X, et al. Preparation of micro-textured turning tools and high speed micro turning test of SUS304 steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 1-7.

速较低,进给量与切深较大^[8]。高速微切削与传统切削不同之处,在于高速微切削时高主轴转速、微切深,刀屑和刀工之间的接触时间大幅度减小,形成了“以车代磨”或“以铣代磨”^[9]。加工过程中,切削热更多地被切屑带走,实现可代替磨削的加工质量,但随之而来的是刀具磨损的急剧加剧^[10]。尽管高速微切削可以达到更高的去除效率和更好的表面质量,被广泛应用于航天航空、微电子、生物医疗等领域中的微小型结构件的精密超精密加工,但目前的刀具的耐用度仍然制约着高速微切削技术的发展。

文中在高速微切削用微型车刀表面利用激光加工技术制备了微槽、微坑非光滑织构,研究激光加工参数与微织构形貌之间的关系,并分析微织构的摩擦学特性;利用自行研制的高速微车削单元进行微织构刀具对SUS304不锈钢的高速微切削试验,从切削力、切削温度、刀具磨损、切屑形态以及已加工表面粗糙度对微织构车刀高速微切削性能进行评价。

1 微织构车刀制备

1.1 微织构几何参数

试验采用无涂层微粒子硬质合金刀具,材料的主要成分是WC-Co,其中WC质量分数是92%,Co质量分数是8%,刀具几何角度:刀具前角 0° ,后角 7° ,刀尖角是 80° ,刀尖半径 0.1 mm ,在前刀面上距离刀尖 $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 范围内制备微织构。为对比织构性能,统一确定微织构尺寸大小是宽 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、深 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、中心距为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的槽型阵列结构和直径 $\Phi 50\text{ }\mu\text{m}$ 、深度 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、中心距 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的表面微坑阵列结构,分布形式分别为微坑阵列织构、平行于主切削刃微槽(微槽1#)、垂直于主切削刃微槽(微槽2#)和与主切削刃成 45° 微槽(微槽3#)。

1.2 微织构激光加工

采用HAN'S LASER光纤式激光打标机(波长 $1\text{ }064\text{ nm}$)对刀具表面微织构进行多组加工试验,分析试验参数对微织构形貌的影响,寻找出最优的微织构工艺参数,加工参数主要包括激光功率、打标速度和打标次数。选择激光功率 P 为6、7、8、9和 10 W ,打标速度 V 为100、200、300、400和 500 mm/s ,打标次数 N 分别为5、10、15、20和25次。

试验中将激光功率作为研究变量,打标速度取 $V=300\text{ mm/s}$ 、打标次数取10次,分别使用激光能量为6、7、8、9和 10 W 的功率进行微槽织构的加工,最后获得功率和槽宽 d 、槽深 h 、脊宽 L 的尺寸关系如图1所示。

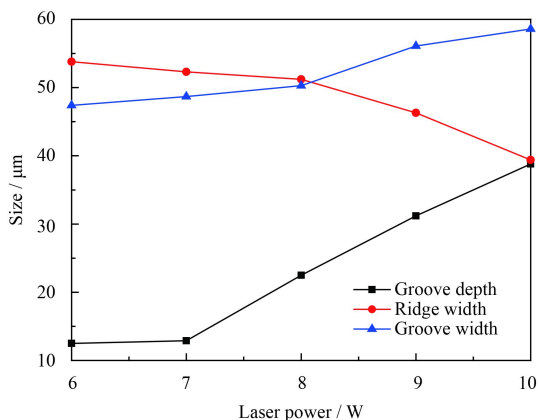


图1 激光功率与微槽尺寸的关系

Fig.1 Relationship between laser power and groove size

由图可以看出,随着激光功率的增大,槽宽呈增大的趋势,槽深也不断增大,脊宽呈减小的趋势。当激光功率增大时,单点激光的中心能量较高,激光对硬质合金的烧蚀程度较大。单点激光沿着斑点半径方向从内向外激光能量逐渐降低,但由于激光功率的增大,激光斑点烧蚀半径也变大导致槽宽增大、脊宽减小,当能量过大会使槽间的脊宽无法成型。同样由于激光斑点能量的增大也使织构在深度方向上烧蚀的程度增大。

将激光的功率固定为 $P=8\text{ W}$,打标次数取10次,分别采用100、200、300、400和 500 mm/s 的打标速度对刀具表面进行微加工,获得打标速度与槽宽、槽深和脊宽尺寸关系曲线如图2所示。

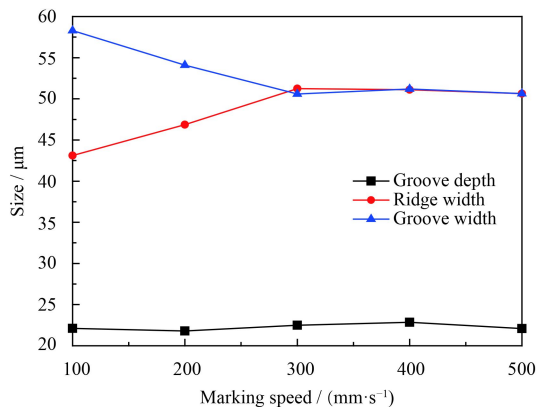


图2 打标速度与微槽尺寸的关系

Fig.2 Relationship between marking speed and groove size

由于激光是脉冲发射, 激光斑点的移动速度会影响斑点与斑点之间的叠印, 进而影响激光斑点的疏密程度。当激光斑点在移动的过程中, 移动速度越快, 激光加工出来的形貌越接近理想形貌的边界。光斑移动速度低于 300 mm/s 时, 光斑会出现较大叠加区域, 产生局部熔化, 使得槽宽增大, 脊宽减小, 深度方向无显著变化, 且会局部严重烧蚀, 不能得到理想形貌。打标速度在 300 mm/s 以上, 槽宽和脊宽基本保持稳定的状况。

将激光功率 P 固定为 8 W, 打标速度 V 为 300 mm/s, 打标次数设置成 5、10、15、20 和 25 次, 对刀具表面进行微槽成型, 所得的槽宽、槽深、脊宽与打标次数之间的关系曲线如图 3 所示。

随着打标次数的增多, 深度不断增大, 槽宽和脊宽基本保持不变。深度方向上尺寸的不断增大是因为激光加工的不断重复扫描使得刀具材料被一层一层的熔化和汽化。由于不断循环打标引起槽内金属不断飞溅, 致使加工后的槽内形成大量的凸缘毛刺。当打标次数继续增多时的重复激光能量使织构区域温度升高, 金属材料熔化, 槽

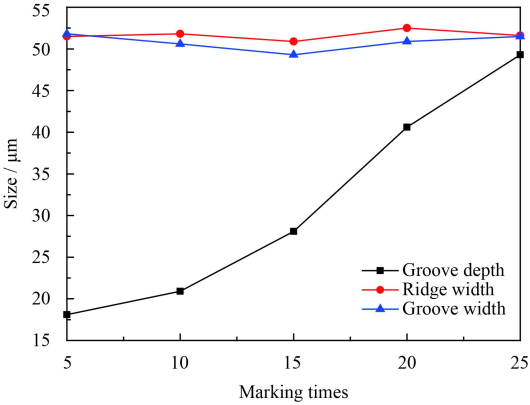


图 3 打标次数与微槽尺寸的关系

Fig.3 Relationship between marking times and groove size

宽变大, 深度增加, 脊宽减小; 甚至出现槽壁的严重烧蚀, 无法形成微槽结构。

最终选择功率 8 W、打标速度 300 mm/s、打标次数 20 次, 实现了硬质合金刀具表面微槽织构的精密加工, 得到槽宽 50.51 μm , 脊宽 50.01 μm 的微槽织构, 直径为 46.92 μm 的微坑阵列。通过扫描电子显微镜所测得的微织构形貌如图 4 所示。

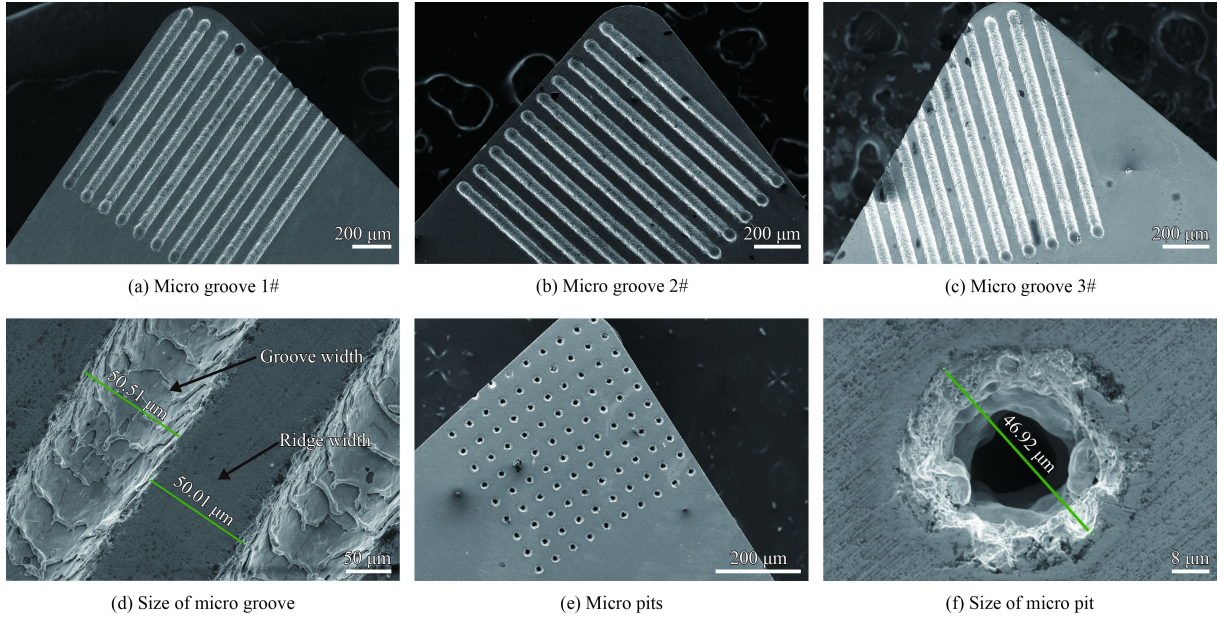


图 4 激光加工后的微型车刀前刀面微织构形貌

Fig.4 Micro texture morphologies on rake face of micro turning tools after laser machining

2 微织构摩擦学测试

使用 RTEC 微摩擦仪测试微织构刀具表面摩擦学性能, 参数见表 1。上试样为钢球, 滑动方向设置为与主切削刃垂直方向, 采用不同载荷与滑动速率, 测定无织构和微织构表面平均摩擦因数。

微织构刀具表面的平均摩擦因数都有一定程度的下降, 如图 5 所示。微坑阵列和平行于主切削刃微槽织构基本相当, 平均摩擦因数为 0.09, 其次是垂直于主切削刃的微槽织构, 减摩特性最差的是与主切削刃成 45° 的微槽结构。

表 1 微型车刀前刀面摩擦因数测试参数

Table 1 Parameters of friction coefficient test on rake face of micro turning tools

Group	Load, F_n / N	Velocity / (mm·s ⁻¹)
1	0.25	1
2	0.25	2
3	0.5	1
4	0.5	2

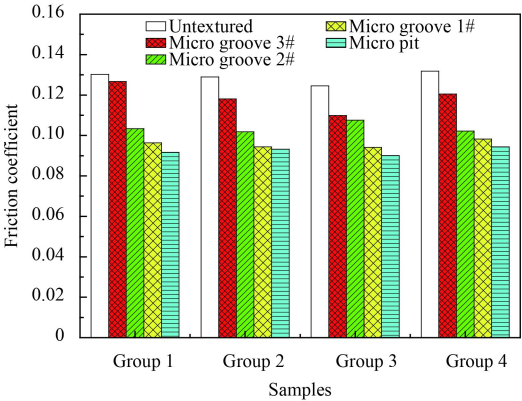


图 5 微织构刀具表面的平均摩擦因数

Fig.5 Average friction coefficient of micro texture tools

3 微织构车刀高速微切削试验

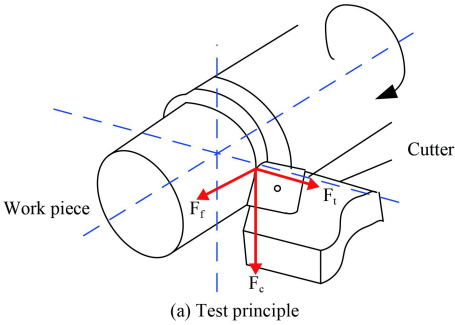
3.1 试验装置及原理

被加工材料选用SUS 304不锈钢，工件直径为 6 mm，切削长度为10 mm，对不锈钢进行干式高速微切削。试验设备采用自行研发的高速微车削单元，在切削过程中，采用Kisler9256C力测试仪和FLIR红外测温仪分别实时监测刀具切削力和切削温度，在切削完成后，采用激光共聚焦显微镜对刀具进行刀屑接触区域、切屑进行测量，采用Mahr粗糙度测量仪测量已加工表面粗糙度 R_a 。实验原理和装置分别如图6(a)(b)所示。

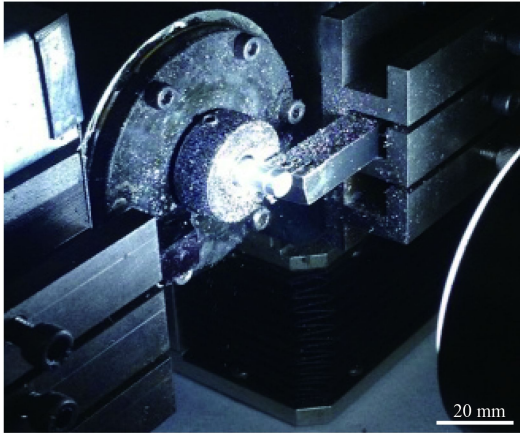
3.2 切削力测试

通过测力仪软件对数据采集和处理，并对力信号滤波和均值处理，得到平均主切削力的大小。不同表面织构刀具在干切削条件下切削深度 $a_p=0.04$ mm，进给量 $f=10$ mm/min，主轴转速 V 为 6 000、9 000、12 000和15 000 r/min时的平均主切削力 F_c 如图7所示。

4种微织构刀具中，其中微坑阵列结构平行于和垂直于主切削刃的微槽结构降低切削力作用较为显著；与主切削刃成45°的微槽结构对主切削力



(a) Test principle



(b) High speed micro cutting unit

图 6 SUS304高速微切削原理及试验装置

Fig.6 Principle and device of high speed micro cutting for SUS304 stainless steel

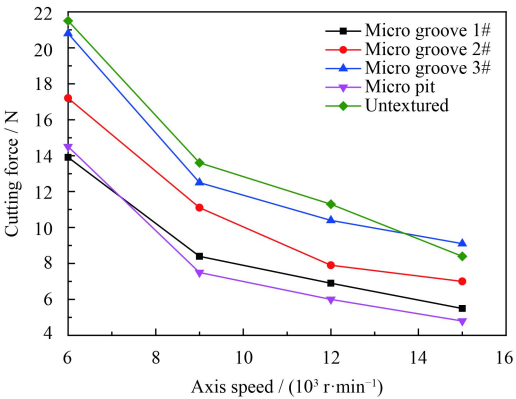


图 7 不同织构刀具的主切削力

Fig.7 Cutting forces of tools with different texture

的降低并不明显，甚至在高切削速度下主切削力反而增大。切削力下降率最明显的是微坑阵列织构和槽平行于主切削刃织构，主切削力平均下降率分别为41.82%和36.72%。

3.3 切削温度测试

采用红外测温仪检测刀屑接触区域平均温度，不同织构刀具在 $a_p=0.04$ mm， $f=10$ mm/min， $V=12$ 000 r/min时的切削温度如图8所示。

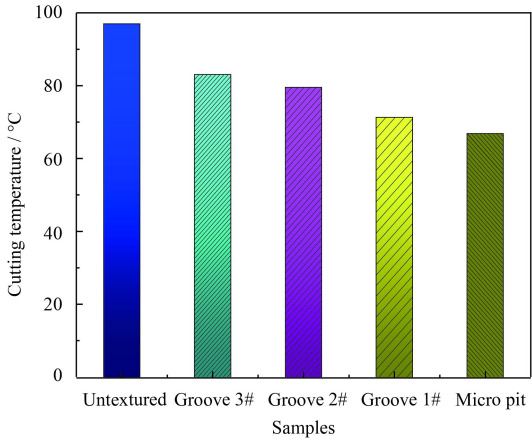


图 8 不同织构刀具的切削温度

Fig.8 Cutting temperature of tools with different texture

高速微切削时, 随着切削速度的增加, 切削温度会有一定程度的降低。高速微切削过程中, 95%以上的切削热由切屑带走, 切削温度随主轴转速升高而降低^[8]。由图8可知, 微坑织构刀具的切削温度为66.8 °C, 降低最为明显, 比无织构刀具降低31.1%; 其次是平行于主切削刃的微槽结构刀具, 最高温度是71.3 °C, 相对于无织构刀具降低了26.5%。

3.4 前刀面刀屑接触区

无织构刀具的前刀面刀屑接触区在主切削刃靠近刀尖处有剧烈的磨损, 刀屑接触长度和宽度在主轴转速6 000 r/min时最大, 分别达到260 μm和75 μm。无织构和微织构刀具均呈现随主轴转速的提高而接触长度和宽度降低(如图9、图10所示)。微坑织构和平行于主切削刃的微槽织构很大程度的降低了刀屑接触长度和宽度; 垂直于主切削刃微槽织构和与主切削刃成45°微槽织构也一定程度的减小了刀屑接触区长度, 但效果并不明显。

在刀屑接触区内, 微织构刀面磨损形式主要有刀尖磨损、前刀面月牙洼磨损和微崩刃, 且磨损区主要集中于主切削刃靠近刀尖处, 如图11所示。微槽织构刀具存在主切削刃轻度磨损, 织构有轻微剥落现象, 与主切削成45°的微槽织构刀具具有崩刃现象, 不能有效保护刀尖。微孔织构刀具仅在微孔周围存在部分磨损, 这说明刀尖所受应力集中转移至表面微孔织构周围, 从而降低了微车刀刀尖部位的磨损, 间接验证了其良好的减摩断屑的能力。

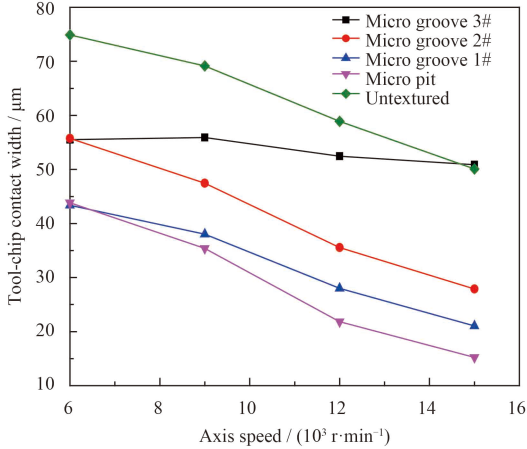


图 9 不同织构刀具的刀屑接触宽度

Fig.9 Tool-chip contact width of tools with different texture

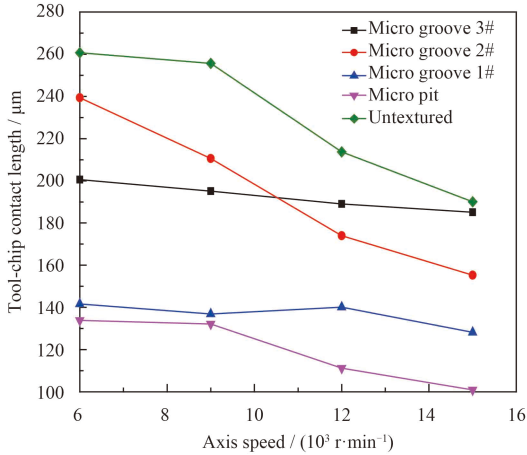


图 10 不同织构刀具的刀屑接触长度

Fig.10 Tool-chip contact length of tools with different texture patterns

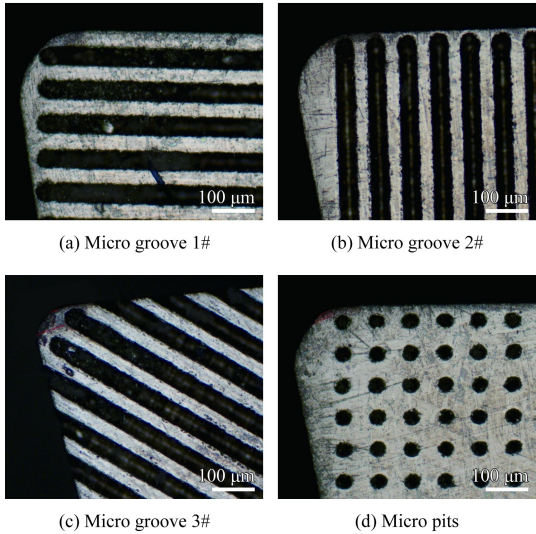


图 11 在 $a_p=0.04$ mm, $f=10$ mm/min, $n=15\,000$ r/min条件下微织构刀具切削后形貌

Fig.11 Tool-tip images after micro cutting when a_p is 0.04 mm, f is 10 mm/min and n is 15 000 r/min

3.5 切屑形态分析

无织构微型车刀在高速微切削过程中,生成的切屑以带状卷曲形切屑为主,而微织构刀具生成的切屑以节片形式切屑为主,伴随有少量的单元切屑,如图12所示,更利于快速流屑,以及提高刀具表面散热及抗黏附能力。并且微孔尺寸与在高速微切削过程中产生的切屑尺度相当,也起到了一定的断屑容屑的作用。

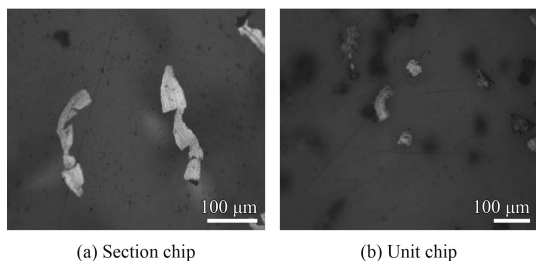


图 12 微织构刀具生成的切屑

Fig.12 Cutting chip of tools with different texture

3.6 已加工表面粗糙度测量

如图13所示,平行于主切削刃的槽和微坑阵列结构对粗糙度有较好改善作用,平行于主切削刃微槽和微坑织构加工后的表面粗糙度平均下降率分别为8.32%和9.92%,而其他两种微结构刀具加工出的工件相对于无织构刀具并无明显改善作用,甚至还会出现表面粗糙度值会略大于无织构刀具。

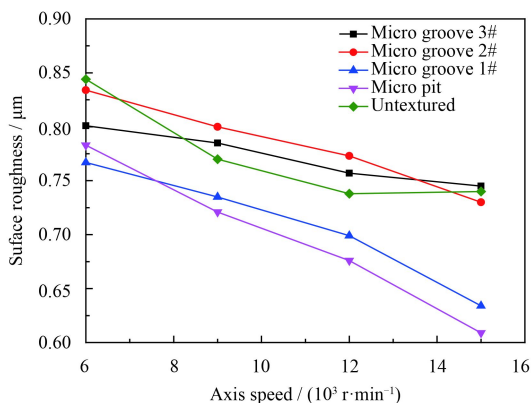


图 13 不同织构刀具加工后的表面粗糙度

Fig.13 Roughness of machined surface for tools with different texture

4 试验结果讨论

微织构的存在减小了刀具前刀面和切屑之间的接触面积,使刀具和切屑之间的摩擦减小,同时增大了刀具与冷却介质的接触面积,降低了切

削温度。微织构在切削中起到了断屑槽的功能,改变了切屑的流出形态及流屑方向,促进排屑顺畅,带走更多的切削热,降低了刀具表面粘结,减少了刀具产生积屑瘤的几率,进而减小主切削力。

微切屑在流出的过程中,受到前刀面和刃圆的挤压和摩擦,进入切屑的晶粒被拉长、变形,形成纤维层,其纤维化方向接近平行于切屑流出方向。微织构的方向与流出方向一致时,极易形成切屑的堆积粘结^[10],因此与主切削刃成45°的微槽和垂直于切削刃的微槽织构刀屑接触长度和宽度较大,表面抗粘结的性能最差。微坑织构具有各向同性,微坑周围各方向受力均匀,表现出的最佳的抗粘减摩效果。

在加工表面质量方面,刃圆半径的影响较大^[8]。在考虑刀具刃口钝圆半径的微切削中,如图14所示,在刀刃前方分离点A以上材料由于塑性变形流入切屑中,而A点以下部分材料将被压入工件成为已加工表面。由于刀具刃口钝圆的存在,同时微切屑尺寸较小,刃口圆弧使得切屑卷曲的程度不可忽略。通过简化的微切削受力模型分析^[11],切削合力 F_r 、主切削力 F_z 、轴向力 F_y 随刃口钝圆半径的减小而减小,同时也会减小后刀面与工件的接触长度,有利于获得高质量的加工表面。

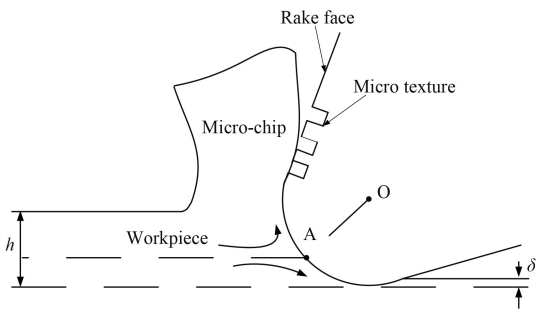


图 14 考虑刃口钝圆半径的微切屑形成

Fig.14 Micro chip forming with considering cutting edge radius

基于上述分析,刀具表面微织构对于高速微切削性能的影响是多方面的,微织构的存在减小了刀屑真实接触长度和宽度,减小了前刀面的摩擦力,同时降低了刃口及刀尖部位的应力集中,提高了刀刃锋利度;降低了刀尖部位的切削热和切削力,减缓切削刃磨损^[12]。尤其对于微孔织构车刀,具有良好的容屑排屑及减摩性能,可以有效提高加工表面质量。

5 结 论

(1) 刀具表面微织构激光加工过程中,通过优化激光功率、打标速度和打标次数,制备出宽为50.51 μm ,脊宽50.01 μm 的微槽,和直径为46.92 μm 的微孔。

(2) 4种微织构均可以有效降低平均摩擦因数,微坑阵列和平行于主切削刃微槽织构基本相当,平均摩擦因数为0.09,其次是垂直于主切削刃的微槽织构,减摩最差的是与主切削刃成45°的微槽结构。

(3) 通过硬质合金微织构刀具对SUS304不锈钢的高速微切削试验,结果表明在刀具表面置入微结构有助于降低切削力、切削温度、减少刀屑接触,改善已加工表面粗糙度。尤其是微坑织构和平行于主切削刃的微槽织构的改善效果较优。

参考文献

- [1] 王洪涛,朱华.圆环形微凹坑织构表面的摩擦性能[J].润滑与密封,2015,40(1): 49-53.
WANG H T, ZHU H. Tribology properties of textured surface with ring-shape pits[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(1): 49-53 (in Chinese).
- [2] 项欣,陈平,李俊玲,等.圆凹坑织构对线接触摩擦副摩擦学性能的影响[J].中国表面工程,2015,28(4): 33-38.
XIANG X, CHEN P, LI J L, et al. Influence of dimple texture on tribological behavior of line contact friction pairs[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 33-38 (in Chinese).
- [3] SHUTING L, SASIKUMAR D, ZENG H C. A study of micro pool lubricated cutting tool in machining of mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 1612-1620.
- [4] 吴泽,邓建新,邢佑强,等.椭圆状微织构自润滑车刀切削性能试验[J].农业机械学报,2012,43(7): 228-234.
WU Z, DENG J X, XING Y Q, et al. Cutting performance of self-lubricating turning tools with elliptical micro-textures[J].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 228-234 (in Chinese).

- [5] XIE J, LUO M J, WU K K, et al. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 73: 25-26.
- [6] JOHANNES K, DANIEL B, JENS G, et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 62-70.
- [7] NORITAKA K, HIROSHI S, HIDEKI M, et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior[J]. Precision Engineering, 2009(33): 248-254.
- [8] 艾兴.高速切削加工技术[M].北京:国防工业出版社,2004.
AI X. High speed machining technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [9] WIT G, JOEL R, KRZYSZTOF Z. Determination of friction in metal cutting with tool wear and flank face effects[J]. Wear, 2014, 317: 8-16.
- [10] 符永宏,肖开龙,华希俊,等.表面微沟槽车刀的切削试验与性能分析[J].中国表面工程,2013,26(6): 106-111.
FU Y H, XIAO K L, HUA X J, et al. Cutting trial and performance analysis of surface micro-grooves turning tools[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6): 106-111 (in Chinese).
- [11] 李晓舟,于化东,许金凯,等.微切削加工中切削力的理论与实验[J].光学精密工程,2009,17(5): 1086-1091.
LI X Z, YU H D, XU J K, et al. Theory and experiments of cutting forces in micro-cutting process[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1086-1091 (in Chinese).
- [12] 于占江,王雯,张超楠,等.微型车刀微孔织构及高速微车削实验[J].润滑与密封,2016,41(2): 18-22.
YU Z J, WANG W, ZHANG C N, et al. Design of micro hole texture tool and experimental study on high speed micro-turning[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(2): 18-22 (in Chinese).

(责任编辑:陈茜)