

表面微沟槽车刀的切削试验与性能分析^{*}

符永宏, 肖开龙, 华希俊, 袁志超, 杨烨刚

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 采用二极管泵浦 ND:YAG 激光器, 在 YG6X 硬质合金刀片上加工出具有一定尺寸和分布的凹槽结构, 并以此刀片对 6061-T6 铝合金棒料进行切削加工对比试验。结果表明: 与无织构刀具相比, 较优参数的凹槽结构刀具的主切削力 F_z 的波动幅度减小, 峰值切削力的均方根值和均值分别减小了约 10% 和 9%。且凹槽间距越小, F_z 越小, 稳定性越好。采用光学显微镜对切削后的刀片进行检测, 发现适当的凹槽几何参数能提高刀具的切削性能。凹槽间距和凹槽方向对织构刀具的抗粘性能有较大的影响, 凹槽间距越小, 凹槽方向与切屑流向的夹角越大, 切屑与刀具的粘结程度越轻。不恰当的凹槽间距和方向, 不仅不会提高刀具的性能, 反而会显著增大刀具的磨损。

关键词: 微沟槽; 车刀; 减摩; 抗粘

中图分类号: TG506; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)06-0106-06

Cutting Trial and Performance Analysis of Surface Micro-grooves Turning Tools

FU Yong-hong, XIAO Kai-long, HUA Xi-jun, YUAN Zhi-chao, YANG Ye-gang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu)

Abstract: Groove textures of proper size and arrangement were made by diode-pumped ND:YAG laser on YG6X cemented carbide tools, which were used to turn 6061-T6 aluminum alloy bar to conduct the cutting comparative tests. It is found that, compared with the un-textured tools, the main cutting force F_z of better textured tools fluctuates within a small range, and the mean square value and average value of F_z are reduced about 10% and 9%, respectively. The smaller the groove distance is, the smaller the F_z is, and the better the stability gets. The profiles of the rake face of the tools after cutting are measured by an optical microscope, and it is found that proper groove parameters can improve the cutting performance. The space between two grooves and the groove direction has a great impact on anti-adhesion property of textured tools. With the smaller distance and the larger angle between the grooves and the chip flow direction, better anti-adhesion performance will be achieved. Inappropriate distance and direction of the micro-grooves tools can not improve the performance of the tool, but significantly reduce the tool's life.

Key words: micro-grooves; turning tool; anti-friction; anti-adhesion

0 引 言

切削金属时, 刀具与工件之间的相互作用, 使工件局部表面产生剧烈的塑性变形, 刀具与工件、刀具与切屑间产生高的接触压力、高的温度和崭新的接触面, 引起刀具磨损, 同时影响加工质量、

加工效率和加工成本。而刀具涂层可以有效地改善上述问题, 提高刀具的切削性能。但随着研究的不断深入, 开发一种新的涂层材料变得越来越困难。因此, 有学者提出从刀具表面形态角度进行研究^[1-2], 即在刀具表面加工具有一定尺寸和排

收稿日期: 2013-08-24; **修回日期:** 2013-10-25; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51175233); 2012 年国家重大科技成果转化项目(20604033); 江苏省高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-39); 高等学校博士学科点专项科研基金(20113227110016)

作者简介: 符永宏(1965—), 男(汉), 江苏南通人, 教授, 博士; **研究方向:** 表面润滑理论和激光应用技术

网络出版日期: 2013-11-07 14:58; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131107.1458.013.html>

引文格式: 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.

列的形貌,以此来改善刀屑间的摩擦状态。

在切削过程中,切削液具备润滑和冷却功能,但在一般工况下,切削液难以进入实际刀—屑面间,实现其润滑功能。为此,有学者提出在前刀面上加工微织构并在其中填充固体或液体润滑剂,以改善刀屑间的润滑^[3-6]。微织构技术与微量润滑技术在刀具行业的应用目前备受关注,并已取得较好效果^[7-9]。此外,表面涂层技术与微织构技术的结合,能延长刀具使用寿命^[2,10]。

刀具表面的微织构尺度,主要有微纳织构和微织构,其中微织构的减摩抗粘效果优于微纳织构^[9,11]。刀具表面微织构形貌,主要有凹坑、凸点和凹槽,其中凹槽和凸点效果相对较好^[9]。关于凹槽织构的研究,主要集中在凹槽间距和凹槽方向方面。Sugihara^[12]等研究了铣削条件下,凹槽间距对切削力和刀具粘结性能的影响,Chang W L^[13]等通过微铣削试验,发现凹槽方向垂直于主切削刃的织构铣刀切削性能最好。

为优化设计车刀表面微织构几何参数,文中主要研究了在车削条件下,微凹槽间距和方向对切削力、粘结性能的影响及其作用机理。

1 试验部分

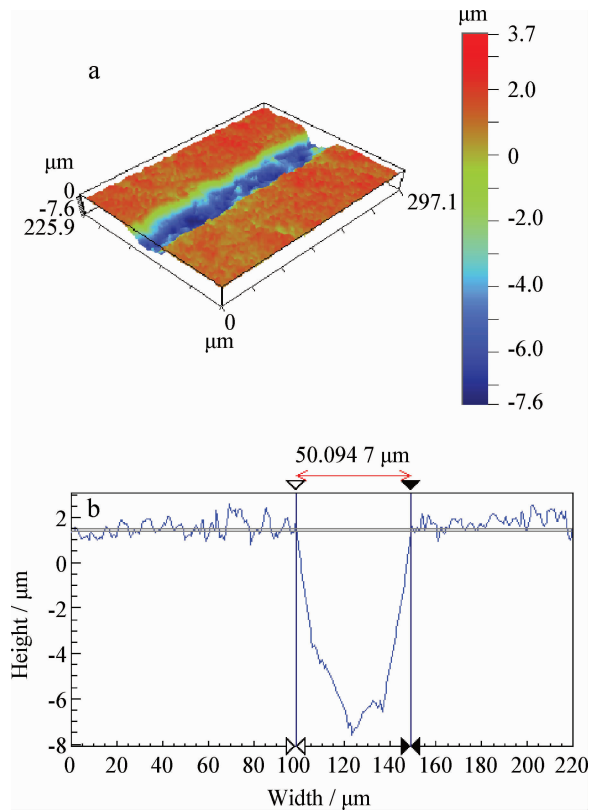
1.1 微织构刀具的制备

采用二极管泵浦 ND: YAG 激光器,在硬质合金刀片上加工出具有一定尺寸和分布的凹槽。激光加工工艺参数为:激光波长 532 nm,离焦量 0 mm,泵浦电流 18 A,扫描速度 8 mm/s,辅助气体为 N₂,压力为 0.15 MPa。加工出的单个凹槽形貌,如图 1 所示。凹槽宽度约为 50 μm,深度约 8 μm。刀片采用无涂层刀片,其前角 0°,后角 7°,刃倾角 0°,主偏角 90°,刀尖半径为 0.4 mm。微织构加工后的刀片,其具体织构参数如表 1 所示。

1.2 切削试验

工件为 Φ 30 mm 的 6061-T6 铝合金棒料,抗拉强度 310 MPa,屈服强度 275 MPa,硬度 95 HB,材料相对较软,易与刀面形成粘结。切削加工采用德国 Spinder 公司的 SB-CNC 超精密数控机床,刀架上安装瑞士 Kistler9293A 三向动态压电式测力仪和相应的数据采集与分析装置,可对切削力进行在线测量,采样频率设置为 5 000 Hz。固定背吃刀量 0.4 mm,进给率 0.2 mm/r,切削速度 250 m/min。切削液为煤油,共走刀 5 次

(300 mm),每次走刀方案:浇注切削液—切削 30 mm—停车—停止切削液—切削 30 mm—停车。为了保证棒料悬伸对切削力振动影响的一致性,每次装夹棒料时保证悬深为 80 mm。采用光学显微镜对磨损后的表面进行检测。



(a) 3D graph (b) Cross section

图 1 微凹槽的形貌

Fig. 1 Morphologies of the micro-groove

表 1 刀具的织构参数

Table 1 Parameters of the textured tools

No.	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
Distance between grooves /μm	0	80	100	150	100	100
Angle between groove and main cutting edge/(°)	0	0	0	0	30	60

2 结果与讨论

2.1 凹槽间距对织构刀具切削性能的影响

在力的测量过程中,由于振动,所采集的瞬时力有正有负,采用平均力不能较好地对实际力进行评估,所以文中采用峰值切削力均值与均方根

值综合分析评价实际切削力的大小。图 2 和图 3 分别为进给力 F_x 、背向力 F_y 和主切削力 F_z 随织构间距的增大而变化的情况(T-1~T-4),其中 d 代表干切削, w 代表湿切削,每点所示的切削力是在切削速度 250 m/min,切削长度 30 mm 下测量出的。

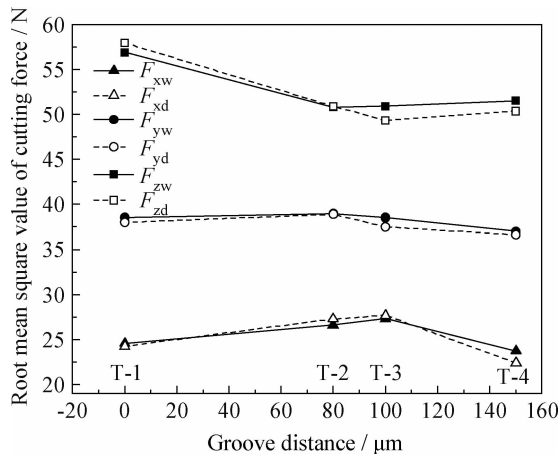


图 2 峰值切削力均方根值随凹槽间距的变化

Fig. 2 Effects of groove distance on root mean square value of the cutting force

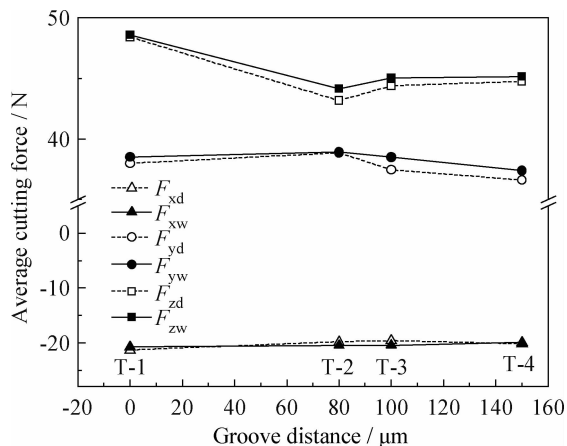


图 3 峰值切削力均值随凹槽间距的变化

Fig. 3 Effect of groove distance on the average cutting force

从图 2 和图 3 中可以看出,就主切削力 F_z 而言,与无织构刀具相比,织构刀具的峰值切削力的均方根值减少了约 10%;织构刀具的峰值切削力的均值减少了约 9%。总的来说,主切削力都呈现先减小后增大的趋势。就背向力 F_y 而言,其峰值切削力的均值和均方根值都出现了一定的波动,但变化较小,这是由于刀具零前角和零刃倾角所致。就进给力 F_x 而言,其均方根值出现了先

增加后减少的趋势,但其均值基本不发生变化,因此总的来说,进给力呈现先增加后减少的趋势,其与 F_z 的变化相反,这可能是由于进给力 F_x 受热影响的作用大于微织构的减摩作用所致。

图 4 为切削速度 250 m/min,切削长度 30 mm,湿切削条件下主切削力 F_z 的均方根值及其波动幅度。从图中可以看出:微织构刀具 T-2~T-4 的 F_z 的大小和波动幅度相对于无织构刀具出现了一定程度的减小。而微织构刀具 T-5~T-6 的 F_z 的大小和波动幅度由于受凹槽方向的影响相对于无织构刀具出现了一定程度的增加。一般认为,力的振动与机床的振动、刀具与切屑及刀具与工件间的摩擦状态有关^[6],由于机床振动是固定的,因此从 F_z 的波动幅度可以推断出 T-2 和 T-3 刀的摩擦状况最好,其次依次为 T-4、T-1、T-5 和 T-6。

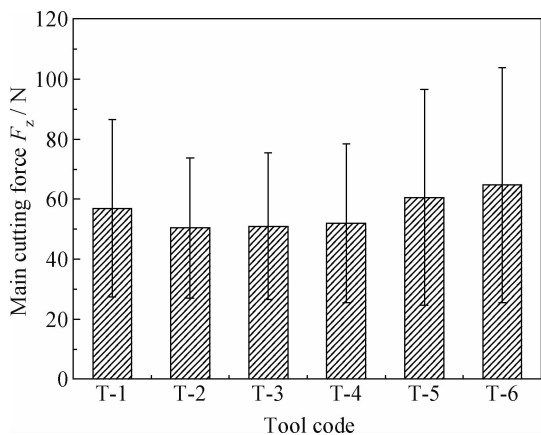


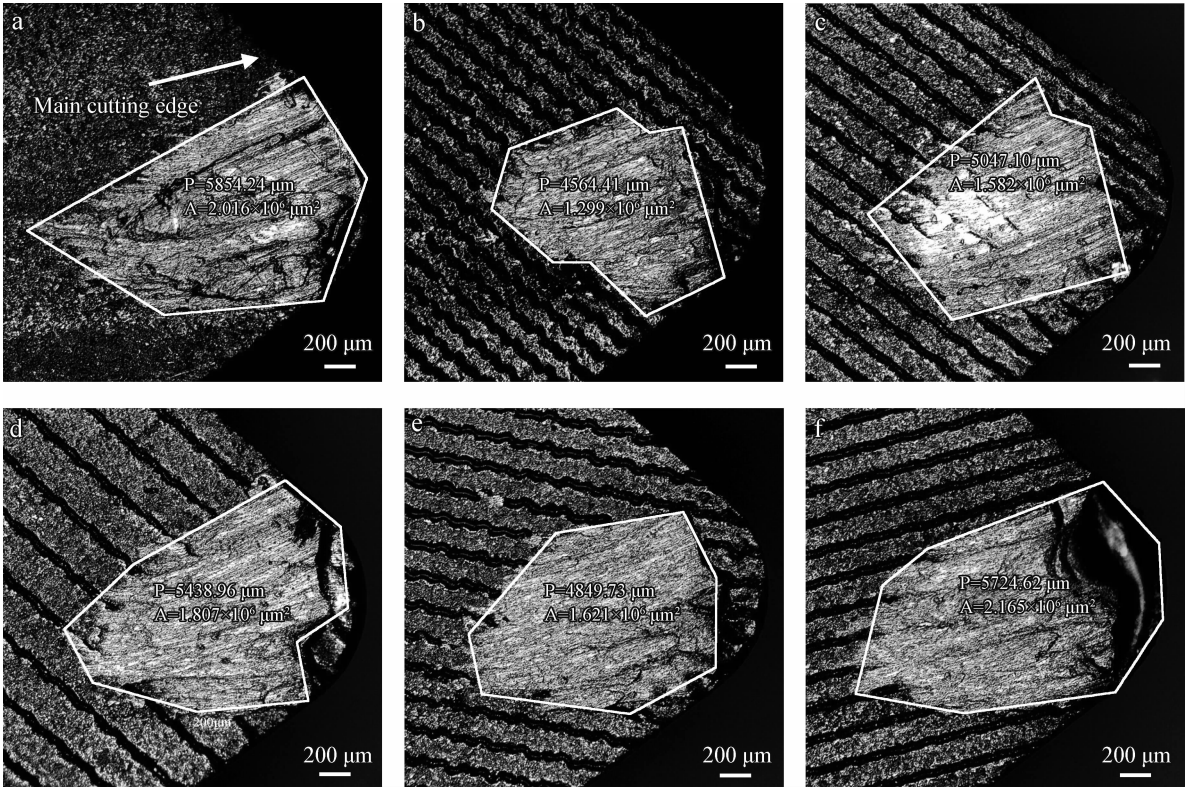
图 4 主切削力的均方根值及其波动情况

Fig. 4 Root mean square values and fluctuation of the main cutting force

图 5 为经过 5 次走刀后,刀具前刀面的粘结图。其中,白色线框圈出的为粘结区域,A 是粘结面积,具体数值见图 6, P 是周长。从总体上看,刀片都出现了一定程度的粘结,且粘结严重区域都出现在离刀尖一段距离的区域,这是由于切削时最高温度就出现在此位置,较高的温度使切屑底部软化严重,剪切强度减小,从而更易在此处粘结。从图 5 和图 6 中可以看出,T-1、T-4 和 T-6 刀具的粘结较为严重,且 T-1 和 T-6 刀尖处出现了一定程度的塌陷。T-2、T-3 和 T-5 刀的粘结面积相对较少,且与图 4 中相对较小的主切削力和波动幅度相对应,说明利用主切削力可以对切削过程进行较好的评价。进一步的观察还发

现,T-2、T-3 和 T-5 刀尖处基本没有积屑瘤产生,这对提高切削过程的稳定性与加工精度都是大有裨益的。此外,微凹槽出现了堵塞,为了减轻或避免切屑填充微凹槽,一方面可以减小凹槽间距,适当增加凹槽宽度。另一方面可以开发出一种从微凹槽中向刀屑接触面间注射高压切削液的装置。

从不同的润滑工况进行分析,如图 2 和图 3 中所示,干切削条件下的切削力与湿切削条件下的切削力相比,切削力大小变化不大,说明此试验工况下浇注切削液的方式没能起到较好的润滑和冷却效果,需要进一步改进;同时也充分说明凹槽组织形态自身的减摩抗粘功能。



(a) T-1 (b) T-2 (c) T-3 (d) T-4 (e) T-5 (f) T-6

图 5 切削后 300 mm 刀具前刀面的粘结形貌

Fig. 5 Adhesion morphologies of rake face after cutting for 300 mm

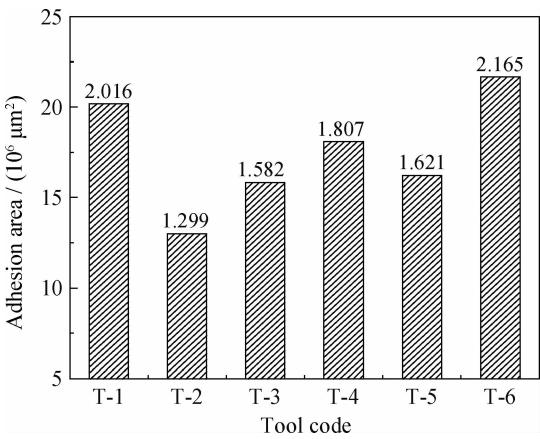


图 6 切削后 300 mm 刀具前刀面的粘结面积

Fig. 6 Adhere areas of tools after cutting for 300 mm

从图 4、图 5 和图 6 中还可以看出,就组织刀

具而言,随着凹槽间距的增大,粘结面积、主切削力 F_z 的大小及其波动幅度都出现了一定程度的增加,Sugihara 等在铣刀试验中也有类似的发现^[12]。探究凹槽减摩抗粘的原因,首先是凹槽间距越大,刀屑实际接触长度越大,产生的切削热越多,润滑液更难渗透到实际接触面间,摩擦更加剧烈,从而使 F_z 和粘结面积越大,稳定性也越差。其次,凹槽的置入使刀屑间的接触为间断接触,凹槽间距越小,刀屑间实际接触时间就越小,减少了切削热的产生,增加了冷却的时间,从而使 F_z 和粘结减小。

2.2 凹槽方向对织构刀具切削性能的影响

选择 T-3、T-5 和 T-6 织构间距相同、而织构方向不同的刀片,进行单一因素比较。由于所

有的加工试样固定且只改变了刀具前刀面的表面形态,因此,切削力的变化说明槽向对刀屑间的摩擦有一定的影响。图 4 为湿切削条件下织构刀具主切削力 F_z 的变化,其中 T-3 刀的主切削力 F_z 的大小和波动最小,其次依次为 T-5 和 T-6 刀。

从图 5 中的粘结磨痕方向来看,切屑流向与主切削刃约成 60° 夹角。其中,T-3 粘结程度最轻,T-5 次之,而 T-6 刀出现了大面积的粘结且刀尖已严重破损,说明凹槽方向对刀具粘结性能影响显著。

对切屑底部受力状况进行分析可知,切屑在刀具前刀面上流出时,受到前刀面的挤压和摩擦作用,在切屑底部形成一层较薄的“滞留层”。“滞留层”内变形剧烈,晶粒拉长,并趋向与前刀面平行,形成纤维层^[14],纤维方向平行于切屑流向。纤维组织的出现,使金属材料的力学性能呈现方向性。即平行纤维方向(纵向)比垂直纤维方向(横向)的塑性和韧性要高,如图 7 所示。

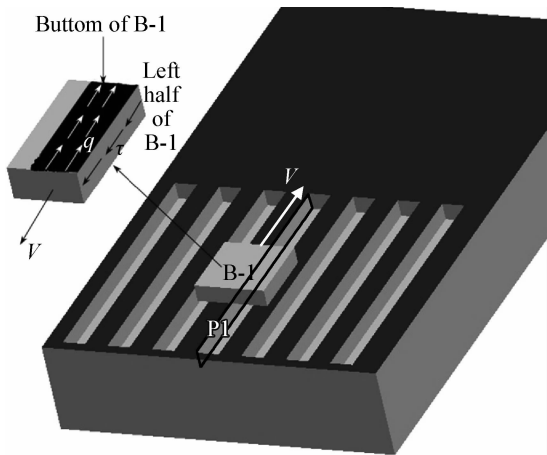


图 7 平行织构刀具方向上小物块的受力分析
Fig. 7 Force analysis of bits on horizontal textured tool

假设有一个正方体小块在平行于其速度方向的凹槽织构刀具上自由滑动。沿 $p1$ 面将小块分成两部分,对左半部分进行受力分析,具体受力如图 7 中左上所示(小块底部,黑色区域为刀屑实际接触部分,受摩擦力 q 作用,灰色区域为切屑与凹槽端口接触部分,不受摩擦),物块 B-1 在截面 $p1$ 上受到平行于速度方向(V)的剪切力 τ 作用。

同理,在前刀面加工垂直于速度方向(V)的凹槽时,具体如图 8 所示,物块 B-2 在截面 $p2$ 上受平行于速度方向的拉应力或压应力 σ 作用。依此类推,在刀具前刀面加工平行或垂直于切屑流

向的凹槽织构时,刀屑接触面间也有类似的受力情况。由于切屑底部纤维层呈方向性,抵抗平行于切屑流向(纤维方向)的拉或压应力 σ 的能力远优于抵抗平行于切屑流向的剪切应力 τ 的能力,所以更易在类似于图 7 中 $p1$ 截面上或实际接触面内发生断裂,这点可以从图 5 中得到证明,如前刀面上粘结材料的堆积一般是平行于切屑流向的山脉状而不是垂直于切屑流向的山脉状。因此,认为织构方向与切屑流向越趋于平行,摩擦粘结越严重。

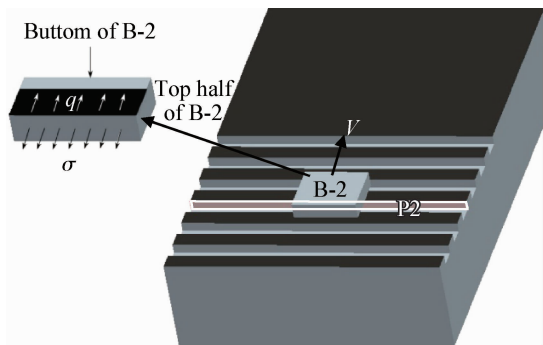
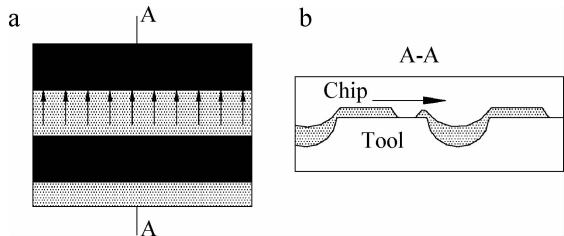


图 8 垂直织构刀具方向上小物块的受力分析
Fig. 8 Force analysis of bits on perpendicular textured tool

从切屑底层润滑进行分析,当凹槽垂直于切屑流向时,润滑液的流向如图 9(a)中的箭头所示,黑色为实际刀屑接触部分,点部分为润滑液,A-A 为截面。刀屑间有较大的相对运动时,如图 9(b)中的截面图所示,润滑液能随切屑流动而拖覆渗透到实际刀屑接触部分较深处;此外,由于刀屑间压力和温度较大,微凹槽中的润滑液由于力和热的作用而扩散到实际刀屑接触面间。当凹槽平行于切屑流向时,润滑液大部分随着切屑沿着槽向流出,而没有很好的起到润滑作用,只有少部分润滑液由于刀屑间挤压和液体热胀冷缩作用从凹



(a) Fluid flow direction on the tool-chip interface (b) Cross section of groove

图 9 垂直织构刀面的切削液流向和凹槽截面
Fig. 9 Cutting fluid flow direction of perpendicular textured tool and cross section of groove

槽中渗透到实际刀屑接触面间。因此,认为凹槽方向与切屑流向的夹角越趋近垂直时减摩抗粘效果越好。

T-3、T-5 和 T-6 刀的槽向与实际切屑流向约分别成 60° 、 30° 和 0° ,主切削力的大小及其波动幅度依次变大,粘结面积也越来越大,说明凹槽与切屑流向夹角越大,减摩抗粘性能越好,这与上述分析基本吻合。Chang W L^[13] 等通过微铣刀试验得出了垂直主切削刀的织构铣刀切削性能最好的结论,与上述结论相反。具体原因为:首先,上文中微凹槽宽为 $4.5\ \mu\text{m}$,比文中的凹槽宽度小了一个数量级。其次,上文中加工材料为 NAK80 模具钢,其硬度为 40 HRC,比铝合金的硬度高很多。此外,T-6 刀不仅粘结较严重,还出现了一定程度的破损,其性能甚至比普通刀具还差,说明合适的织构方向很重要,不恰当的凹槽方向不仅不会提高刀具的性能,反而会大大缩短刀具的寿命。

3 结 论

(1) 较优的表面微织构使主切削力 F_z 的波动幅度减小;均方根值减少了约 10%,均值减小了约 9%;且凹槽间距越小, F_z 的大小和稳定性越好。进给力 F_x 受热影响较大,随凹槽间距的减小而呈增大的趋势。背向力 F_y 由于受刀具角度的影响而没有较明显的变化。

(2) 较优的凹槽织构减轻了刀具的粘结,避免了刀尖附近积屑瘤的产生,且凹槽间距越小,抗粘效果越好。

(3) 凹槽的方向对刀具的切削性能有较大的影响,且凹槽方向与切屑流向越趋于垂直其减摩抗粘效果越好,不恰当的凹槽方向不仅不会提高刀具的性能,反而会显著增大刀具的磨损。

参考文献

[1] Menezes P L, Kailas S V. Influence of surface texture on coefficient of friction and transfer layer formation during sliding of pure magnesium pin on 080 M40 (EN8) steel

plate [J]. *Wear*, 2006, 261(5): 578-591.

- [2] 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.
- [3] 宋文龙, 邓建新, 王志军. 微池润滑刀具干切削过程中的减摩机理 [J]. *摩擦学报*, 2009, 29(2): 103-108.
- [4] 邢佑强, 邓建新, 冯秀亭, 等. 微纳复合织构自润滑陶瓷刀具的制备及切削性能 [J]. *航空制造技术*, 2013, (6): 42-46.
- [5] 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.
- [6] Lei S, Devarajan S, Chang Z. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1612-20.
- [7] 戚宝运, 李亮, 何宁, 等. 微织构刀具正交切削 Ti6Al4V 的实验研究 [J]. *摩擦学报*, 2011, 31(4): 346-351.
- [8] 王亮. 表面微织构刀具切削钛合金的试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [9] 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.
- [10] Da Silva W M, Suarez M P, Machado A R, et al. Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools [J]. *Wear*, 2013, 302(1): 1230-40.
- [11] Sugihara T, Enomoto T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface—improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4): 425-429.
- [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] Chang W L, Sun J, Luo X, et al. Investigation of micro-structured milling tool for deferring tool wear [J]. *Wear*, 2011, 271(9): 2433-7.
- [14] 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

作者地址: 江苏省镇江市学府路 301 号

212013

江苏大学机械工程学院

Tel: (0511) 8878 0056

E-mail: fyh@ujs.edu.cn