

仿生微坑—槽复合织构陶瓷刀具硬车削性能研究

郭志远,崔晓斌,燕凯

河南理工大学

摘要: 在金属加工中,切屑一般被当做固体进行研究。有研究表明,切屑具有类似于流体的特性,因此,刀—屑接触处于固体与固体接触和固体与流体接触的混合状态。为改善刀具切削性能,综合考虑刀具与切屑接触的混合状态以及切屑流动方向,本文基于蜣螂表皮和鲨鱼表皮,在陶瓷刀具前刀面设计加工了微凹坑织构(DT)、微沟槽织构(GT)和微坑—槽复合织构(DGT)。通过有限元仿真和车削试验,研究了不同切削速度下干式车削 GCr15 淬硬轴承钢时织构对于刀具切削性能的影响规律。研究表明:三种织构刀具有效改善了陶瓷刀具的切削性能;微坑—槽复合织构刀具(DGT)在不同切削速度下切削性能均为最优;微凹坑织构刀具(DT)在较低切削速度时表现出相对良好的减摩特性,适合于较低的切削速度;微沟槽织构刀具(GT)更适用于较高的切削速度。

关键词: 复合微织构;陶瓷刀具;有限元仿真;车削加工;刀具切削性能

中图分类号: TG712;TH162

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.01.005

Study on Hard Turning Performance of Bionic Micro-dimple-groove Composite Textured Ceramic Cutting Tools

Guo Zhiyuan, Cui Xiaobin, Yan Kai

Abstract: Chip which arises in the cutting process is usually considered as solid. However, some researches indicates that chip also has fluid-like properties. The contact area between cutting tool and workpiece contains both solid-solid and solid-fluid contact conditions. Taking the hybrid contact condition and chip flow direction into consideration, micro-dimple texture (DT), micro-groove texture (GT) and micro-dimple-groove composite texture (DGT) are fabricated in the ceramic tool rake face by learning from the skins of dung beetle and shark. These ceramic tools are prepared for improving tool performance. Finite element simulation and turning tests are performed to study the effects of different textures on tool performance at varying cutting speeds in dry turning of GCr15 hardened steel. It is found that all the three kinds of texture on the tool rake face can be utilized to improve ceramic tool performance. Ceramic tool with micro-dimple-groove composite texture (DGT) exhibits the best cutting performance for different cutting speeds. When cutting speed is relatively low, micro-dimple textured ceramic tool (DT) can be used to efficiently reduce the friction between tool and chip. Conversely, micro-groove textured ceramic tool (GT) shows better performance when cutting speed is relatively high.

Keywords: composite micro-texture; ceramic tools; finite element simulation; continuous turning; cutting performance

1 引言

刀具在切削时与切屑相互作用,这种相互作用极大地影响了刀具的切削性能。不同于金属材料受静力或准静态时只考虑塑性和弹性,对于切屑而言,还应考虑其粘性效应^[1]。相关研究表明,切屑除具备固体特性外,还具备类似于流体的特性^[2-4],因此,在切削过程中刀具与切屑的接触应是包含了固体与固体接触以及固体与流体接触的混合状态。自然界中,生物为适应外界环境,其表面形成了具有一定减摩特性的微结构,例如,蜣螂表面微坑状纹理在土壤中可以减小摩擦,提高抗粘附能力^[5],鲨鱼皮

表面肋条状纹理在水流中可助于减小摩擦力^[6,7],诸如此类的生物表面微结构为设计刀具几何结构和提高刀具性能提供了新思路。生物表面微结构适应于生物与外界物体的相对运动方向,因此,依据仿生学对刀具表面几何结构设计时应考虑切屑相对于刀具的运动方向,即切屑流向。

近年来,激光加工技术逐渐成熟,为刀具表面织构加工提供了技术平台。诸多学者借助激光加工技术,进行了织构刀具的加工并对其切削性能展开了研究^[8-12]。Deng J. 等^[8]研究了椭圆形微织构对于陶瓷刀具切削性能的改善,认为具有椭圆形织构和 MoS₂ 固态润滑剂的刀具,可有效提高刀具的减摩特性;Ma J. 等^[9]研究了不同的织构参数对于切削力的影响,认为微沟槽织构参数与切削力有着非常密切的关系;Sugihara T. 等^[10]研究了沟槽织构对于刀具

磨损的影响,认为织构条纹宽度和刀具抗磨性之间有着很强的关联性;Obikawa T. 等^[11]研究了高速切削时微织构对于润滑条件的改善能力,认为织构深度越大,宽度越小,对于润滑的改善越强;Dong M. K. 等^[12]研究了沟槽织构对于 CBN 刀具切削性能的影响,发现微织构刀具在切削 AISI52100 钢时降低了摩擦系数,并降低了切削力以及刀具磨损;戚宝运等^[13]在硬质合金刀片上加工了微沟槽织构,通过正交切削试验研究了织构刀具的切削性能,研究表明,织构刀具可有效降低切削力、切削温度,并改善切削钛合金过程中刀具表面的粘结现象。

近年来,国内外众多学者对刀具表面微织构进行了大量的研究,但相关研究较少考虑刀具与切屑接触的混合状态,多针对具有单一型式微织构的刀具进行研究,在进行刀具表面微织构设计时,较少涉及切屑流动方向。GCr15 淬硬轴承钢广泛用于机械设备中的滚珠、轴承套以及冲模、量具等工具的制造。为提高 Al_2O_3/TiC 陶瓷刀具车削 GCr15 淬硬轴承钢时的切削性能,本文同时考虑了切削过程中刀屑接触的混合状态以及切屑流向,基于蛻螂表皮和鲨鱼表皮分别设计了微凹坑织构、微沟槽织构,并将二者结合,设计了微坑—槽复合织构。通过有限元仿真和硬车削试验,研究了不同切削速度下不同型式的织构对于刀具温度、切削力以及刀具后刀面磨损的影响。

2 仿真和硬车削试验

2.1 仿真试验

本文使用 DEFORM-3D 有限元软件研究了四种刀具切削时切削力和切削温度的差异(见图 1),刀具几何参数和加工参数见表 1。试验采用固定的进给量与背吃刀量,而将切削速度进行变化。刀具与工件的材料参数分别如表 2 和表 3 所示,其中 GCr15 淬硬轴承钢硬度为 60-62HRC。使用 tetrahedral mesh 软件对刀具和工件进行网格划分。其中工件最大网格尺寸为 0.62mm,最小网格尺寸为 0.3mm,刀具最大网格尺寸为 0.04mm,最小网格尺寸为 0.02mm。

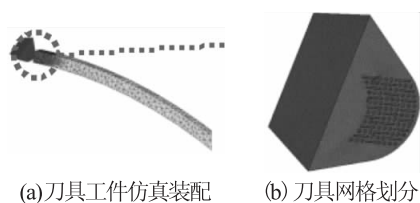


图 1 仿真示意

表 1 刀具几何参数和加工参数

刀具材料	工件材料	前角 γ_0 (°)	主偏角 κ_r (°)
Al_2O_3/TiC	GCr15 淬硬轴承钢	-6	90
刃倾角 λ_s (°)	切削速度 v_c (m/min)	进给量 f (mm/r)	背吃刀量 a_p (mm)
0	47, 60, 75	0.3	0.3

表 2 Al_2O_3/TiC 陶瓷刀具材料性能参数

密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	热传导率 (W/m°C)	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)
4520	407	0.23	14.58	7.8

表 3 GCr15 淬硬轴承钢 (60-62HRC) 材料性能参数

密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	热传导率 (W/m°C)	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)
7740	221	0.28	36	13.6

切削过程中伴随着较高的切削温度、应力以及大的变形出现。常用 Johnson-Cook 模型来研究工件材料的非线性问题,模型用公式可表示为

$$\bar{\sigma} = (A + B(\bar{\epsilon})^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left[1 - \left[\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right]^m \right] \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$ 、 $\dot{\epsilon}$ 和 T 分别为剪应力、剪应变、剪应变率和绝对温度。

工件材料的性能主要由以下参数决定:应变硬化指数 n 、应变率敏感系数 C 、热软化系数 m 、常数 A 、 B 、 $\dot{\epsilon}_0$ 、参考温度 T_{room} 和熔化温度 T_{melt} 。具体参数参照文献[13],如表 4 所示。

表 4 GCr15 淬硬轴承钢 JC 模型参数^[14]

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C	T_{room} (K)
2.482	1.498	0.19	0.66	0.027	25

2.2 硬车削试验

硬车削试验加工设备见图 2。采用郑州合赢激光科技有限公司 YLP-20 激光加工系统进行陶瓷刀具前刀面上微凹坑织构、微沟槽织构以及微坑—槽织构的加工。加工参数:功率 3W,扫描速度 80mm/s,扫描频率 40kHz,扫描次数 2 次。硬车削试验采用 CD6140A 车床,刀具、工件以及切削参数与仿真设置相同。使用信号采集系统对切削力进行测量,该系统配备 kistler9441 压电式传感器和 kistler5807A 三通道电荷放大器,采样频率为 4kHz。使用 Dino-Lite 数码显微镜对切削过程中刀具后刀面磨损进行周期性测量,使用 VHX-1000E 三维超景深显微镜对刀具微织构形貌以及失效刀具形貌进行观察和测量。

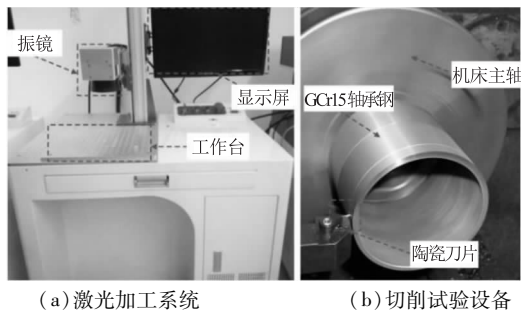


图 2 试验加工设备

3 试验结果与分析

3.1 织构设计原则

织构设计流程见图 3。在切削过程中,切屑受高温高应变率的影响,具有固体特性和类流体特性,因此刀-屑的接触应处于固-固接触和固-液接触的混合状态,本文借鉴蛭螂表皮和鲨鱼表皮进行刀具前刀面微织构的设计。

有研究指出,蛭螂表皮布满微坑,在土壤中可以减小摩擦,提高抗粘结能力^[2]。为降低刀具与切屑接触时固-固接触状态的摩擦系数,本文基于蛭螂表皮设计了微凹坑织构(DT)。文献[3,4]指出,鲨鱼表皮充满着规则排布的肋条状纹理,使鲨鱼游动过程中产生湍流作用从而减小了水中摩擦力。因此,为降低刀-屑接触中固-液接触状态的摩擦系数,本文基于鲨鱼表皮设计了微沟槽织构(GT)。

刀-屑接触实际上是处于固-固接触和固-液接触混合状态,仅单独针对刀具与切屑接触的一种状态进行设计无法达到最好的减摩效果。因此,将微凹坑织构(DT)和微沟槽织构(GT)进行复合,设计了微坑-槽复合织构(DGT)。自然界中,鲨鱼表皮上的微结构方向与水流平行。有研究表明^[15],顺流方向的沟槽型织构可有效减小壁面的摩擦阻力,为发挥刀具微织构的应有效应,应确定切屑相对于刀具的运动方向,否则会削弱甚至损害微织构的有益效应。为此,使用有限元软件对常规刀具车削 GCr15 淬硬轴承钢的过程进行仿真,以确定切屑流向,并根据切屑流向将三种织构阵列于刀具前刀面进行加工。

织构加工效果如图 4 所示。织构的设计尺寸参数与实际加工尺寸参数见表 5。分析表明,实际尺寸基本达到了预期目标。

3.2 刀具温度

当切削速度 $v_c = 60\text{m/min}$ 、进给量 $f = 0.3\text{mm}$ 、背吃刀量 $a_p = 0.3\text{mm}$ 时,常规刀具(CT)最高温度

提取见图 5a。图 5b 为 CT 刀具温度典型提取结果,其中虚线框内为切削稳定时的刀具最高温度,直线段为刀具温度平均值。本文主要针对切削稳定后的刀具温度平均值进行分析。

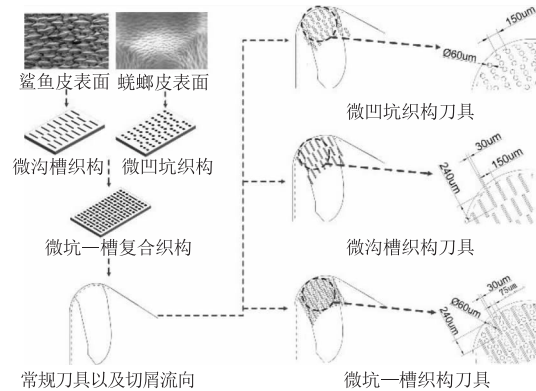


图 3 织构设计流程

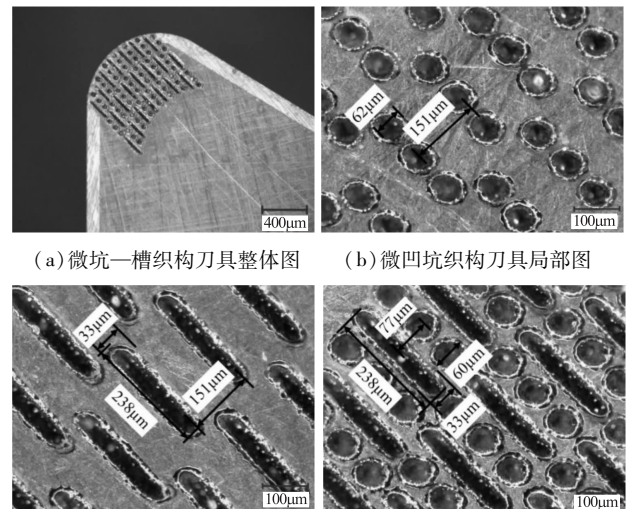
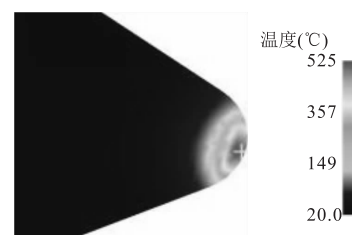


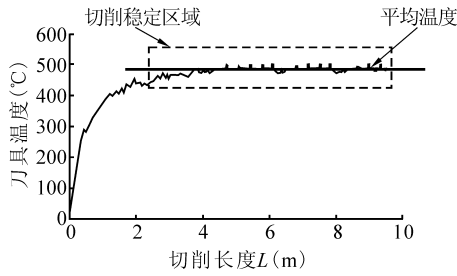
图 4 微织构形貌参数

表 5 织构尺寸参数 (µm)

织构型式	设计尺寸	实际尺寸
微凹坑织构	直径:60 间距:150	直径:62 间距:151 深度:25-30
微沟槽织构	宽度:30 长度:240 间距:150	宽度:33 长度:238 间距:151 深度:25-30
微坑-槽复合织构	间距:75	间距:77



(a) 刀具温度提取



(b) 刀具温度提取结果

图5 刀具温度典型仿真结果

图6为不同切削速度下四种刀具温度对比柱状图。可知,切削速度提高时,刀具温度呈上升趋势。四种刀具中,DGT刀具温度最低,较CT刀具降低24.1% - 35.2%,DT刀具温度较CT刀具降低11.7% - 23.8%,GT刀具温度较CT刀具降低3.5% - 20.1%。当 $v_c = 47\text{m/min}$ 、 60m/min 时,DT刀具温度低于GT刀具;当 $v_c = 75\text{m/min}$ 时,GT刀具温度略低于DT刀具。切削过程中刀具前刀面切削热的主要来源为刀具前刀面与切屑的摩擦功。三种仿生织构刀具在切削过程中有效减少了刀具与切屑间的摩擦系数,降低了前刀面处的热源强度,起到了降低刀具温度的作用。

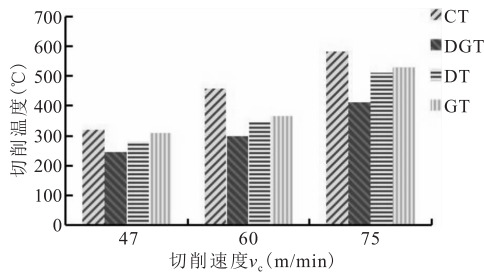


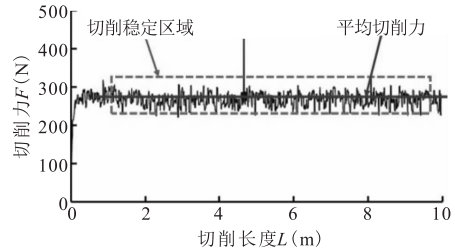
图6 不同切削速度下刀具温度对比

3.3 切削力

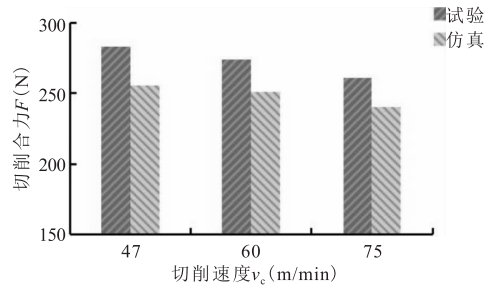
采用CT刀具,在切削速度 $v_c = 60\text{m/min}$ 、进给量 $f = 0.3\text{mm}$ 、背吃刀量 $a_p = 0.3\text{mm}$ 时获取的典型仿真切削合力见图7a。其中虚线框内为切削力稳定区域,实线为切削力平均值。本文主要针对切削稳定后的切削力平均量进行分析。图7b为不同切削速度下,采用CT时仿真切削力与试验切削力的对比。由图可知,切削力随切削速度上升呈下降趋势,仿真与试验数值相差最大11%,最小8%,两者误差在10%左右,这在一定程度上证明了切削仿真的正确性。

图8a为四种刀具在切削速度变化时切削力的对比结果。如图所示,切削力随切削速度的上升呈下降趋势。这种现象的主要原因是切削温度随切削速度的提高而上升,被加工材料因切削温度的上升而软化,切削力随之降低。当采用CT刀具时,切削

力数值最高;采用DGT刀具时,切削力数值最小,与CT刀具相比降低了11.6% - 13.4%。采用DT刀具和GT刀具时,切削力数值较CT刀具分别降低了6.2% - 9.1%、4.3% - 9.9%。当切削速度较低时,采用DT刀具可获得比GT刀具更低的切削力数值;当切削速度较高时,GT刀具相比DT刀具能更好地降低切削力。

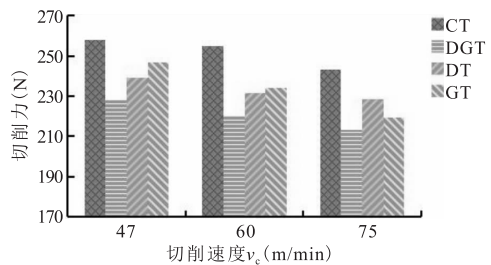


(a) 切削力提取结果

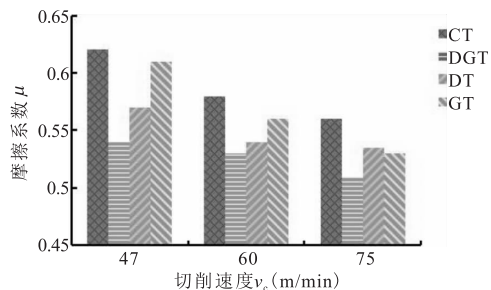


(b) 试验与仿真对比

图7 切削力典型仿真结果



(a) 不同切削速度下切削力柱状图



(b) 不同切削速度下摩擦系数柱状图

图8 不同切削速度下的切削力与摩擦系数

切削过程中,切削力的一部分来自于切屑对于前刀面的摩擦力。文献[16]指出,在不考虑后刀面作用力时,刀具前刀面摩擦系数 μ 的公式可表示为

$$\mu = \tan[\arctan(\frac{F_y}{F_z}) + \gamma_0] \quad (2)$$

式中, F_y 为径向切削力; F_z 为切向切削力; γ_0 为刀具前角。

计算结果见图 8b。三种织构刀具均降低了摩擦系数, 采用 DGT 刀具时, 摩擦系数最低; DT 刀具在 $v_c = 47\text{m/min}$ 、 60m/min 时摩擦系数要小于 GT 刀具; 当 $v_c = 75\text{m/min}$ 时, DT 刀具的摩擦系数略大于 GT 刀具。这也就解释了为何采用四种不同刀具时会出现如图 8a 所示的切削力对比结果。

3.4 刀具磨损

针对等切削长度 (1000m) 条件下, 对四种刀具的磨损进行对比研究。图 9 为 CT 刀具前刀面和后刀面典型磨损形貌。刀具主要磨损型式为前刀面磨损、边界磨损和后刀面磨损, 其中后刀面磨损带较为平均。本文主要针对刀具前、后刀面磨损进行分析。对于刀具前刀面磨损, 采用磨损长度来对其进行衡量。文献 [16] 中指出, 若刀具后刀面为有规则磨损, 应取 VB 值作为后刀面磨损量值, 因此, 本试验主要采用 VB 值作为刀具后刀面磨损的度量指标。

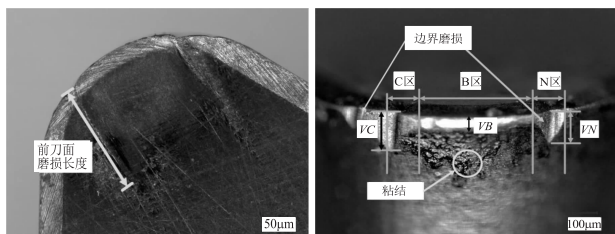
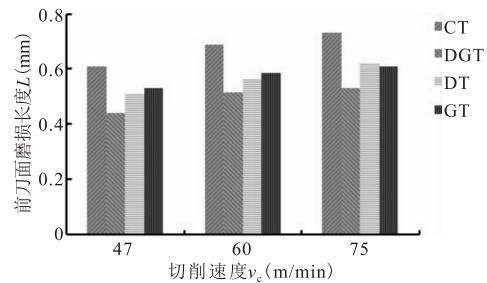


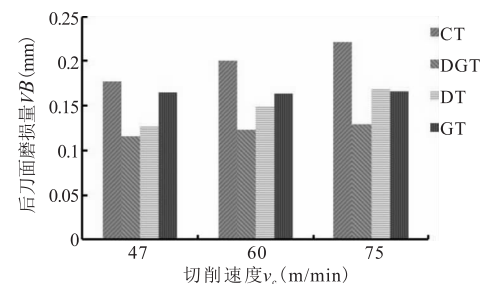
图 9 CT 刀具前、后刀面典型磨损形貌

图 10 为不同切削速度下各类型刀具前、后刀面磨损量对比结果。由图可知, 在每一切削速度下, CT 刀具前刀面磨损长度和后刀面磨损量均为最大, DGT 刀具前刀面磨损长度和后刀面磨损量均为最小。当切削速度 (47、60m/min) 相对较低时, DT 刀具前、后刀面磨损量均低于 GT 刀具, 因此 DT 刀具更适合于较低切削速度; 当切削速度 (75m/min) 相对较高时, GT 刀具前、后刀面磨损量略低于 DT 刀具, 其更适合于较高切削速度。DGT 刀具前刀面磨损长度较 CT 刀具减少 23.2% - 27.3%, 后刀面磨损量较 CT 刀具减小 34.4% - 41.6%。DT 刀具和 GT 刀具较 CT 刀具前刀面磨损长度和后刀面磨损量也均有所减小; DT 刀具前刀面磨损减少 15.1% - 18.4%, 后刀面磨损量减小 23.5% - 28.2%; GT 刀具前刀面磨损长度减小 13.1% - 16.4%, 后刀面磨损量减小 11.9% - 22.2%。刀具磨损是刀具温度、切削力共同影响而导致的结果, 仿生织构减小了刀具前刀面的摩擦系数, 降低了刀具温度和切削力,

最终减小了刀具磨损。不同切削速度中, DGT 刀具摩擦系数均为最小, 刀具温度和切削力数值均为最低, 从而取得了最小的刀具磨损量。在较低切削速度时, DT 刀具摩擦系数要小于 GT 刀具, 因而刀具温度、切削力数值均小于 GT 刀具, 从而刀具磨损量小于 GT 刀具。而切削速度较高时, GT 刀具摩擦系数、刀具温度、切削力数值均略小于 DT 刀具, 刀具磨损量略小于 DT 刀具。



(a) 前刀面磨损长度 L



(b) 后刀面磨损量 VB

图 10 刀具磨损对比

4 结语

本文考虑了刀具与切屑固流混合接触状态以及切屑流动方向, 基于蛻螂表皮和鲨鱼表皮进行设计, 并在陶瓷刀具前刀面加工了微凹坑织构 (DT)、微沟槽织构 (GT) 以及微坑一槽复合织构 (DGT)。通过有限元和硬车削试验, 研究了不同切削速度下陶瓷刀具干式切削 GCr15 淬硬轴承钢时的刀具温度、切削力以及刀具磨损, 得出以下结论:

(1) 三种织构刀具在不同切削速度下均能有效减少切削时的刀具温度。微坑一槽复合织构刀具 (DGT) 较常规刀具 (CT) 温度减少 24.1% - 35.2%, 其刀具温度为最低。微凹坑织构刀具 (DT) 和微沟槽织构刀具 (GT) 分别减少 11.7% - 23.8% 和 3.5% - 20.1%。当 $v_c = 47\text{m/min}$ 、 60m/min 时, 微凹坑织构刀具 (DT) 温度低于微沟槽织构刀具 (GT); 当 $v_c = 75\text{m/min}$ 时, 微沟槽织构刀具 (GT) 切削温度略低于微凹坑织构刀具 (DT)。

(2) 三种织构刀具在不同切削速度下较常规刀

具均能有效减少切削力。采用微坑—槽复合织构刀具(DGT)能取得最低切削力数值,较常规刀具(CT)降低 11.6% - 13.4%。微凹坑织构刀具(DT)和微沟槽织构刀具(GT)切削力数值较常规刀具(CT)分别降低 6.2% - 9.1%、4.3% - 9.9%。采用微凹坑织构刀具(DT),在 $v_c = 47\text{m/min}$ 、 60m/min 时可获得比微沟槽织构刀具(GT)更小的切削力;在 $v_c = 75\text{m/min}$ 时,使用微沟槽织构刀具(GT)时的切削力比微凹坑织构刀具(DT)更低。三种织构刀具均起到一定的减摩效果,其中,微坑—槽复合织构(DGT)具有最好减摩效果,微凹坑织构刀具(DT)在较低切削速度时有良好的减摩效果,微沟槽织构刀具(GT)在较高切削速度时减摩效果较好。

(3)相等切削长度下,三种织构刀具在不同切削速度下的前刀面磨损长度和后刀面磨损量均小于常规刀具。微坑—槽复合织构刀具(DGT)前刀面磨损长度较常规刀具(CT)减小 23.2% - 27.3%,后刀面磨损量降低 34.4% - 41.6%,刀具磨损量最低。微凹坑织构刀具(DT)前刀面磨损长度减小 15.1% - 18.4%,后刀面磨损量减小 23.5% - 28.2%,微沟槽织构刀具(GT)前刀面磨损长度减小 13.1% - 16.4%,后刀面磨损量减小 11.9% - 22.2%。微凹坑织构刀具(DT)在低速切削时刀具磨损量小于微沟槽织构刀具(GT),适宜于较低的切削速度;微沟槽织构刀具(GT)在较高切削速度时刀具磨损量小于微凹坑织构刀具(DT),适宜于较高的切削速度。

参考文献

- [1] 张克国. 高速切削变形过程的类流体特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [2] Kwon K B, Cho D W, Lee S J, et al. A fluid dynamic analysis model of the ultra-precision cutting mechanism[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 1999, 48(1): 43 - 46.
- [3] Kazban R V, Mason J J. Fluid mechanics approach to machining at high speeds: part I: justification of potential flow models[J]. Machining Science & Technology, 2007, 11(4): 475 - 489.
- [4] Flom D G, Komanduri A R, Lee M. High speed machining of metals[J]. Annual Review of Materials Research, 1984, 14(1): 231 - 278.
- [5] 程红, 陈茂生, 孙久荣. 臭蛻螂体壁的组织结构[J]. 昆虫学报, 2003, 46(4): 429 - 435.
- [6] 杨海龙, 郑宇, 王远. Ti6Al4V 表面仿鲨鱼皮形貌的生物摩擦学特性[J]. 热加工工艺, 2016(16): 119 - 122.
- [7] Malshe A, Rajurkar K, Samant A, et al. Bio-inspired functional surfaces for advanced applications[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 607 - 628.
- [8] Deng J, Wu Z, Lian Y, et al. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2012, 30(1): 164 - 172.
- [9] Ma J, Duong N H, Lei S. 3D numerical investigation of the performance of microgroove textured cutting tool in dry machining of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 1 - 11.
- [10] Sugihara T, Enomoto T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces[J]. Precision Engineering, 2013, 37(4): 888 - 896.
- [11] 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.
- [12] Dong M K, Lee I, Sun K K, et al. Influence of a micropatterned insert on characteristics of the tool workpiece interface in a hard turning process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 160 - 171.
- [13] 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.
- [14] 邱慧, 班新星, 纪莲清, 等. 高速切削 GCr15 切削力的仿真与实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 154 - 157.
- [15] Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. Aiaa Journal, 1983, 21(4): 485 - 486.
- [16] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
第一作者: 郭志远, 硕士研究生, 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000 河南省焦作市
First Author: Guo Zhiyuan, Postgraduate, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China
通信作者: 崔晓斌, 副教授, 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000 河南省焦作市
Corresponding Author: Cui Xiaobin, Associate Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China