

具有沟槽微织构的超硬材料 刀具切削仿真与实验研究

徐明刚¹, 宋恩禹¹, 张海旭², 程曦¹, 吴志伟¹

(1.北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144;

2.北京轨道交通技术装备集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: **目的** 探究微织构置入切削刀具表面对切削性能产生的影响。**方法** 在具有沟槽微织构的超硬材料刀具上, 设计了切削仿真与实验。基于流体动压射流和流体二次润滑, 以 J-C 准则作为车削的本构关系, 采用 ABAQUS 进行仿真。在相同条件下, 对有无沟槽微织构的超硬材料刀具进行了三维切削 Al6061 模拟, 并结合刀具应力和前刀面切削温度, 对切削性能进行了分析。采用飞秒激光工艺制备了新型沟槽微织构超硬材料车刀, 并在 CA6136 车床上进行单因素切削实验。**结果** 刀具在置入沟槽微织构后, 不仅降低了摩擦副间的接触面积, 而且在切削液的双重作用下, 瞬时高温现象也得到了缓解。在干切削条件下, 沟槽微织构刀具的前刀面不具有较好的减磨抗粘能力, 刀具磨损较快。在切削液润滑、流体动压射流现象和沟槽微织构共同作用下, 刀具的摩擦磨损状况得到很大改善, 使用寿命得到延长。**结论** 综合切削仿真与实验结果可知, 微织构置入切削刀具表面能够提升刀具切削性能并缓解刀具磨损情况。

关键词: 沟槽微织构; 切削刀具; 超硬材料; 切削仿真; 飞秒激光工艺; 流体动压射流

中图分类号: TG506.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)02-0363-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.039

Research on the Cutting Simulation and Experiment of Super-hard Material Tool with Grooved Micro Texture

XU Ming-gang¹, SONG En-yu¹, ZHANG Hai-xu², CHENG Xi¹, WU Zhi-wei¹

(1.School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2.Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co., Ltd, Beijing 100160, China)

ABSTRACT: This paper aims to explore the influence of micro texture added to the cutting tool on the cutting performance. The cutting simulation and experiment are designed for the super-hard material tool with grooved micro texture. Based on the hydrodynamic jet and the secondary lubrication of fluid, the J-C criterion is used as the constitutive relation of turning, and ABAQUS is used to simulate the three-dimensional Al6061 cutting by the super-hard material tool with or without grooved

收稿日期: 2020-02-15; 修订日期: 2020-07-31

Received: 2020-02-15; Revised: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金 (51205005); 北京市自然科学基金 (3162011)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51205005), Beijing Natural Science Foundation (3162011)

作者简介: 徐明刚 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高效复合加工技术及数控技术方面的研究工作。邮箱: xmg@ncut.edu.cn

Biography: XU Ming-gang (1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: high-efficiency composite machining technology and numerical control technology. E-mail: xmg@ncut.edu.cn

引文格式: 徐明刚, 宋恩禹, 张海旭, 等. 具有沟槽微织构的超硬材料刀具切削仿真与实验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 363-370.

XU Ming-gang, SONG En-yu, ZHANG Hai-xu, et al. Research on the cutting simulation and experiment of super-hard material tool with grooved micro texture[J]. Surface technology, 2021, 50(2): 363-370.

micro texture under the same conditions, and the cutting performance is analyzed by combining the stress of the tool and the cutting temperature of the front face. A new type of grooved micro texture super-hard material turning tool has been prepared by femtosecond laser technology, and the single factor cutting experiment has been carried out on CA6136 lathe. When the grooved micro texture is added to the tool, not only the contact area between the friction pairs is reduced, but also the instantaneous high temperature phenomenon is alleviated under the dual action of the tool and the cutting fluid. Under the condition of dry cutting, the front face of the grooved micro texture tool does not have good anti-friction and anti-viscosity ability, and the tool wear is fast; the combination of cutting fluid lubrication and hydrodynamic jet and grooved micro texture can greatly reduce the friction and wear condition of the tool, and prolong the service life of the tool. The results of cutting simulation and experiment show that the micro texture can improve the cutting performance and reduce the tool wear.

KEY WORDS: grooved micro-texture; cutting tool; super-hard material; cutting simulation; femtosecond laser technology; hydrodynamic jet

超硬材料在数控加工刀具中的应用越来越广泛,以PCD为代表的超硬材料刀具,在高速切削加工领域的应用尤为突出,其刀磨技术和刃磨品质是关乎加工精度的关键。现代摩擦学和仿生学证实,存在一定非光滑形态的高性能表面织构具有更好的抗磨减摩性能。这为改善超硬材料刀具表面抗磨状态带来了新的理论依据^[1-3]。与此同时,基于流体动压射流现象的辅助支撑研究也逐渐成熟。微织构与水射流现象相结合的方式,已成为解决车削过程中瞬时高温过高的良好途径,且是延长超硬材料刀具寿命的有效方法。邵世超^[4]通过切削实验发现,沟槽微织构的最佳切削性能表现在垂直于切屑流方向。邓大松^[5]通过钻削仿真及实验得出,微织构的置入可减缓麻花钻的磨损,合理的织构间距可以提升钻削性能。戚宝运^[6]在对钛合金进行切削实验时,发现沟槽微织构的置入可以改善加工过程中刀具的磨损,且在低温润滑下,其减摩效果更好。李一楠等^[7]采用增材制造的方法制备了凸微织构表面,经仿真及对磨实验发现,凸微织构刀具可以改善摩擦性能。Sugihara等人^[8-10]通过干切削实验得出,在主切削刃表面置入沟槽微织构可改善刀具抗粘性。

综上,国内外学者对刀具置入微织构进行了大量的切削实验,在润滑液作用下,微织构的置入可有效改善切削性能。但对流体动压射流在沟槽微织构车削等方面的研究并不多见。因此,本文针对超硬材料刀具前刀面置入沟槽微织构,研究了干切削和流体动压射流作用下刀具性能的变化,对延长刀具使用寿命和提高车削铝合金切削性能有积极意义。以YG8刀具为主要研究对象,Al6061铝合金工件为切削对象,建立了三维车削模型,并采用ABAQUS软件对不同加工工况的车削实验进行了仿真。通过对沟槽微织构刀具的切削仿真与实验,拟为微织构刀具的研究提供一定的理论基础。

1 沟槽微织构有限元模型

1.1 沟槽微织构理论模型

Al6061 铝合金的切削可看作工件材料在高度集

中的小区域内发生变形的过程^[11]。刀具表面微织构主要置入在前刀面与主切削刃附近,在切削液射流工况下,主要对切削第一和第二变形区进行降温,故主要研究此变形集中区域。工件几何尺寸为15 mm×5 mm×1 mm,刀具前角为10°,后角为8°。沟槽截面为矩形,宽度为100 μm,间距为100 μm,深度为50 μm,如图1所示。

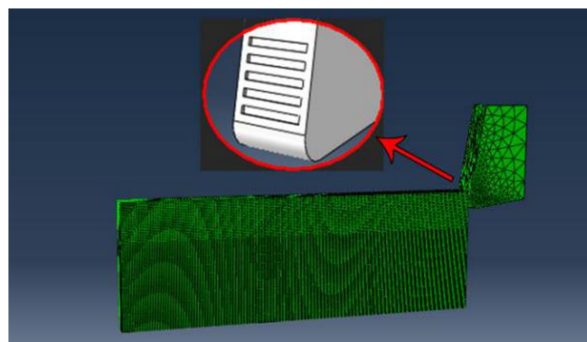


图1 三维车削有限元模型
Fig.1 3D turning finite element model

1.2 工件和刀具材料本构模型的建立

实际车削过程中,Al6061合金在高温高压、热力耦、速率的影响下,发生弹性、塑性等变形,因此选用Johnson-Cook本构关系。其数学表达式为^[11]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

在该式中,系数A、B、C、n、m是通过实验测量的参数。T为变形温度,T_m为材料熔点,T_r为室温,ε为等效塑性应变,ε/ε₀为相对应变率。实验结果见表1。

YG8硬质合金刀具在切削6061铝合金时,优势明显,可实现高效高质加工,其主要材料属性见表2。

表1 Al6061 Johnson-Cook 模型材料参数
Tab.1 Al6061 Johnson-Cook model material parameters

A/MPa	B/MPa	n	c	m
345	462	0.25	0.04	2.75

表 2 PCD 和 YG8 刀具物理性能参数
Tab.2 Physical performance parameters of PCD and YG8 tool

	Density (/kg·m ⁻³)	Elasticity modulus/MPa	Poisson ratio
PCD	3520	1×10 ⁷	0.1
YG8	14 600	6×10 ⁶	0.22

1.3 材料断裂准则

Strenkow^[12]等用等效塑性应变准则即 Johnson-Cook 准则，分析了剪切破坏对材料失效的影响。当满足单位积分点 $\omega_D=1$ 时，材料失效：

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}^{pl}(\eta, \bar{\epsilon}^{pl})} = 1 \tag{2}$$

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[D_1 + D_2 \exp D_3 \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{\epsilon_0} \right] \left[1 - D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right) \right] \tag{3}$$

式中： $\Delta\bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变增量； $\Delta\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 为失效应变； D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为断裂参数； ϵ_0 为参考应变率。

1.4 切削热的产生

图 2 为车削 Al6061 工件产生的正应力和切应力沿前刀面的分布^[13]。

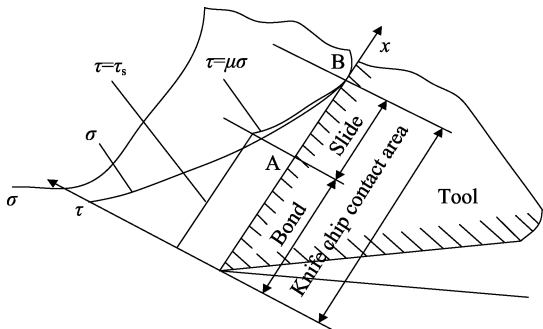


图 2 刀屑界面上正应力和切应力的分布
Fig.2 Distribution of normal stress and shear stress on the interface of cuttings

在瞬时高温高压下，工件自身的粘附行为由塑性变形产生塑性流动，切屑易粘附在刀具前刀面上，主切削刃 OA 区附近形成粘结接触。在 AB 区域，随着正应力逐渐减小，切屑与工件形成滑动接触。在车削过程中，粘接接触区产生的 98%~99% 的热量转化为切削热，这对刀具磨损和刀具寿命有重要影响，如图 3 所示^[14]。

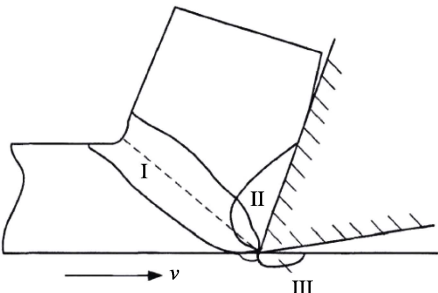


图 3 变形区示意图
Fig.3 Schematic diagram of deformation zone

1.5 切削液作用下沟槽微结构的减摩机理

图 4 为切削液流体动压射流示意图。可将其大致分为 2 个区域^[15]：自由射流区及降温区（图中上半区）、除屑射流区（图中下半区）。自由射流区内，切削液的流动特性与射出喷嘴时相符，不发生改变；降温区内，切削液的流动方向发生了转变，促使温度急剧下降；除屑射流区分为内层与外层，外层的流动特性与自由射流一致，内层与前刀面和微结构沟槽相接触，加速排屑。

在切削液下，沟槽微结构刀具不易产生崩刃和积屑瘤现象，流入气体中的切削液射流是非淹没非自由的连续流体动压射流。切削液射流与周围的空气发生着动量交换并产生了扩散，将动量传递给附近的空气，使周围的空气速度提高。当切削液射流冲击到前刀面时，流动的方向发生偏转，变成了几乎与壁面平行的流动。如图 4 所示，当切削液流动到前刀面沟槽结构时，水压与沟槽微结构内的空泡及水的冲击波对

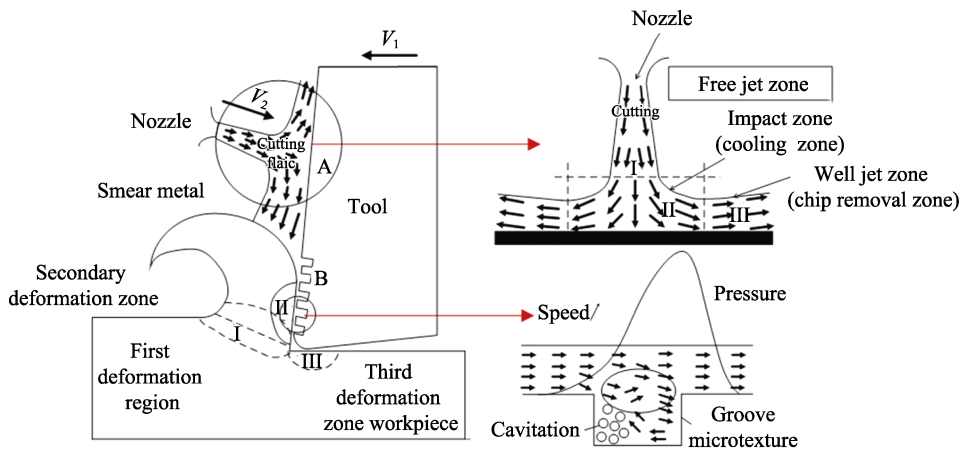


图 4 切削液射流工况下的车削示意图
Fig.4 Turning diagram under jet condition of cutting fluid

沟槽切屑的排出起到协同作用。由文献[15]可知,平整的射流冲击固体将不会产生持续的水锤压力,即切削液下的射流不会对超硬材料刀具产生冲蚀破损,可以清洗切屑表面,降低切屑对沟槽内的二次切削作用。切削液的不断流动和切屑带走的大部分热量,可以有效地降低切削过程中的瞬时高温高压。同时,在水压作用下,相比于干切削,前刀面上的切屑不易黏结在前刀面上,有效抑制了积屑瘤及“冷焊”现象的产生。

1.6 仿真结果与分析

1.6.1 应变分析

由于刀具的挤压和摩擦,工件发生塑性变形,导致应力急剧增加,如图5所示,云图中的最大应力位于切削的第一变形区。

图6为工件的20919号网格在干切削、切削液和沟槽微织构条件下的应力曲线。结果显示,在切削液和沟槽微织构的作用下,应变速率和工件的正应力均得到改善。干切削工况下,刀具与切屑摩擦副间的接

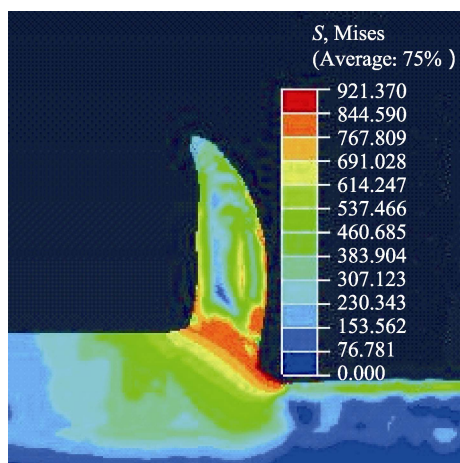


图5 YG8沟槽微织构刀具等效应力示意图

Fig.5 Schematic diagram of equivalent stress of YG8 grooved micro-textured tool

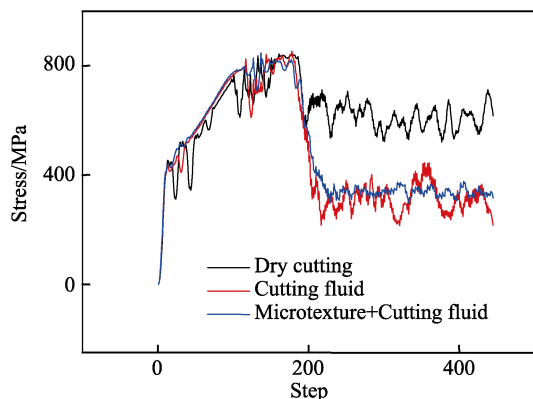


图6 YG8硬质合金刀具在干切削、切削液和微织构条件下的应力曲线

Fig.6 Stress curve of YG8 cemented carbide tool under dry cutting, cutting fluid and micro-texture conditions

触面积较大,导致切削温度高,接触应力大。沟槽微织构的置入能减小刀-屑接触面积,达到冷却、降压的效果。仿真结果表明,沟槽微织构的置入可以改善刀具前刀面在车削过程中的应力分布情况。

1.6.2 温度场分析

在沟槽微织构和切削液的共同作用下,刀具前刀面温度得到了有效的降低。切削液避免了两个摩擦副的直接接触,沟槽微织构的置入可以存储部分切削液,加速排屑和热量的扩散,使得刀具表面降温效果更加明显,温度如图7所示。刀具温度变化的结果与文献[11]的结论相符,即在实际车削中,切削热量大部分被切屑带走,传给工件的次之,最后传给刀具的最少。

在干切削下,仿真过程中的切屑温度如图8所示。切屑温度超过了Al6061短时间内的动态再结晶温度(76~94℃),且不低于工件的熔点,即在实际加工过程中,形成切屑且出现“冷焊”现象。

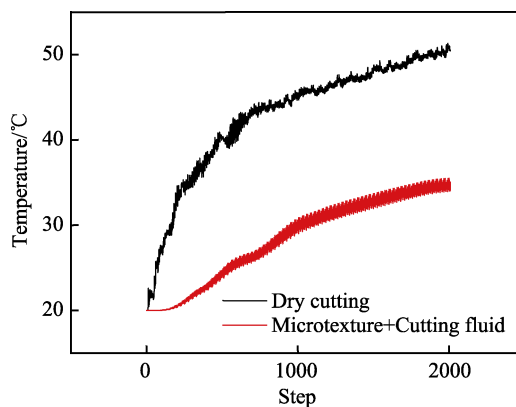


图7 刀具前刀面温度变换趋势

Fig.7 Temperature change trend of the tool rake face

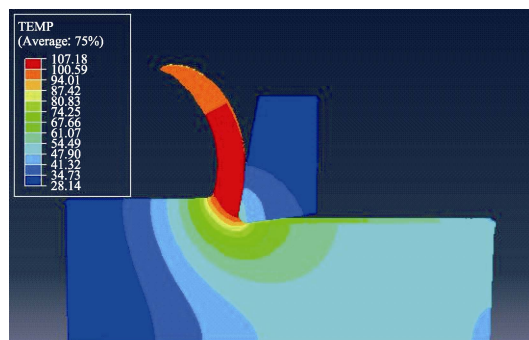


图8 YG8在干切削工况下的温度示意图

Fig.8 Schematic diagram of YG8 temperature under dry cutting conditions

切削液射流到前刀面斜面时,由于重力、斜面、冲击波的共同作用,切削液趋于流向应力及温度高度集中的两摩擦副相接触的沟槽微织构区域。切削液能缓解前刀面的瞬时高温高压,实现降温的效果。由文献[15]可知,在冲击波和水锤效应作用下,倾斜角较小时,扰动区域长度随无量纲速度 V/C 的增大,近似

地呈线性增加，水锤压力不体现冲蚀特性。因此，本次仿真模拟的温度预测具有正确性。结果表明，刀具表面沟槽微结构的置入与切削液的双重作用能够缓解车削瞬时高温现象。

2 实验研究

2.1 沟槽微结构刀具的制备

飞秒激光加工技术是一种常见的超硬材料刀具制备表面微结构的工艺，属于非接触式加工，具有加工能量密度高、加工速度快、方向性和可控性好等优点^[16,18]。飞秒激光具有极短的脉宽和极高的峰值功率，实际加工中，产热较少，可以实现冷加工，在微结构精密加工领域中拥有巨大优势^[16,18-19]。在制备沟槽微结构的激光照射区内，材料晶格温度快速升高并扩散，产生高温熔化、气化现象。当能量密度足够高时，由于强烈的烧灼，产生快速、无选择性的质量迁移。多脉冲激光的热应力场作用，引起了积累效应，产生了塑性变形，形成了沟槽微结构形貌。经急剧冷却后，在沟槽边缘形成一圈毛刺，去刺和清洗后，沟槽微结构形貌如图 9 所示。

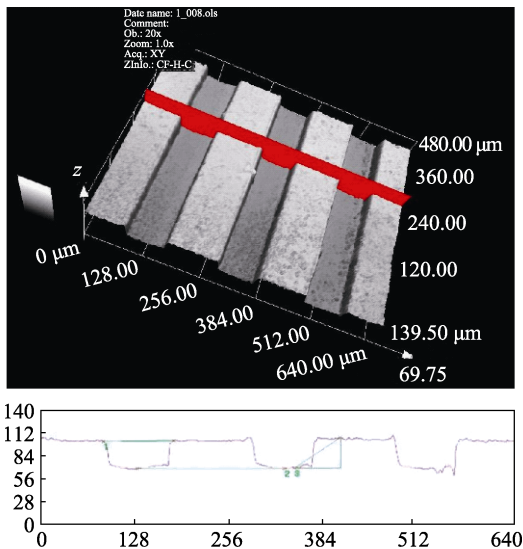


图 9 沟槽微结构形貌
Fig.9 Grooved micro texture morphology

2.2 切削实验装备及参数

本次切削试验的加工平台选用沈阳机床厂 CA6136 车床，如图 10 所示。进行实验时，在车床上夹持硬质合金刀具。刀具的切削角度参数为前角为 10° ，后角为 8° ，主偏角为 45° ，刃倾角为 0° 。刀具前刀面微结构沟槽截面为矩形，宽度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，间距为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，深度为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。分别进行单因素车削实验，并对实验结果进行比较。具体的加工参数如表 3 所示。



图 10 车削实验平台 CA6136
Fig.10 Turning experimental platform CA6136

表 3 Al6061 铝合金切削加工参数
Tab.3 Cutting parameters of Al6061 aluminum alloy

Parameters	Value
Cutting speed $v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	103
Feed speed $f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	0.16
Cutting depth a_p/mm	0.2
Way of cutting	Dry cutting/Lubrication cutting

2.3 实验结果分析

本文在相同切削液介质下，对不同材质的超硬沟槽微结构刀具和无微结构刀具进行了对比实验。同时，在两种不同工况下，进行了同质刀具在干切削和切削液润滑下的实验，深入研究了沟槽微结构的置入对超硬材料刀具磨损机理的影响。

在高速车削下，刀具会呈现出不同的磨损形式，主要有机械磨损、粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损等几种形式。其中，扩散磨损和粘结磨损导致前刀面极易形成月牙洼状磨损和崩刃。当月牙洼磨损达到一定的承受极限时，车刀的主切削刃刃口组织结构发生塑性变形，组织强度降低。多次使用后，最终会导致刀尖破损，当超过刀具的疲劳极限时，刀具失效。

车刀的磨损形式会因其切削环境的不同而异，但氧化磨损和机械磨损不是中高速车削过程的主要磨损形式，因此本文主要从前刀面的粘结磨损和扩散磨损来分析实验结果。

2.3.1 干切削下的前刀面磨损

在干切削下，两摩擦副间直接接触并产生相对运动，6061 铝合金的化学活性伴随着切削热的产生而不断增大，形成刀具和工件之间的相互扩散。分子之间的剧烈活动使刀具表面组织结构发生改变，降低了刀具前刀面强度，分子的减少导致了刀具的扩散磨损。如图 11 和图 12 所示，刀具主切削刃上的崩刃现象也极为明显，具有沟槽微结构的刀具扩散磨损尤为显著。飞秒激光在制备沟槽微结构时，前刀面的去除伴随着材料的冷却再结晶，形成了不同程度的损伤，影响刀具前刀面的组织结构。在瞬时高温高压和排屑

作用下,相比于无微织构刀具,其扩散磨损更为显著。

在干切削下,刀-屑接触区内存在瞬时高温高压,随着扩散磨损的加剧,少部分切屑会粘结在前刀面上,形成粘结磨损。大块的粘结物主要聚集在沟槽微织构底部,靠近主切削刃附近。沟槽微织构的置入使切削区域的底槽对切屑产生切削作用,在切屑流经沟槽织构时,会有微小的切屑材料不断被切除,并堆积在沟槽织构底部,形成粘结磨损。

在干切削下,具有沟槽微织构的刀具前刀面的积屑瘤现象并不显著。沟槽微织构的置入改善了刀-屑接触面的磨损状态,降低了接触时的温升,抑制了积屑瘤的产生。在加工过程中,产生的积屑瘤会与切屑不断地进行摩擦,使积屑瘤减少。切屑中的硬质颗粒很难在 PCD 和 YG8 车刀前刀面上划出沟纹,在剧烈摩擦时,微沟槽可以存储少量的切屑和硬质点颗粒,减小表面之间的耕犁作用,降低刀具前刀面的机械磨损。

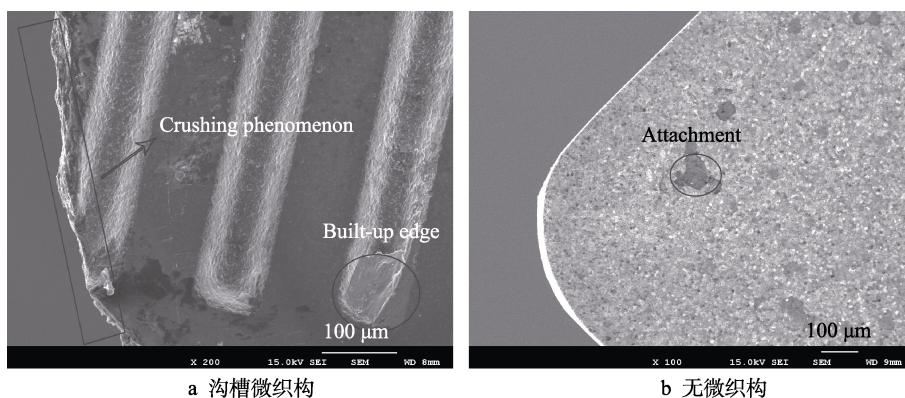


图 11 PCD 刀具前刀面在干切削下的磨损形貌

Fig.11 Wear morphology of PCD tool rake face under dry cutting: a) grooved micro textured; b) non-micro textured

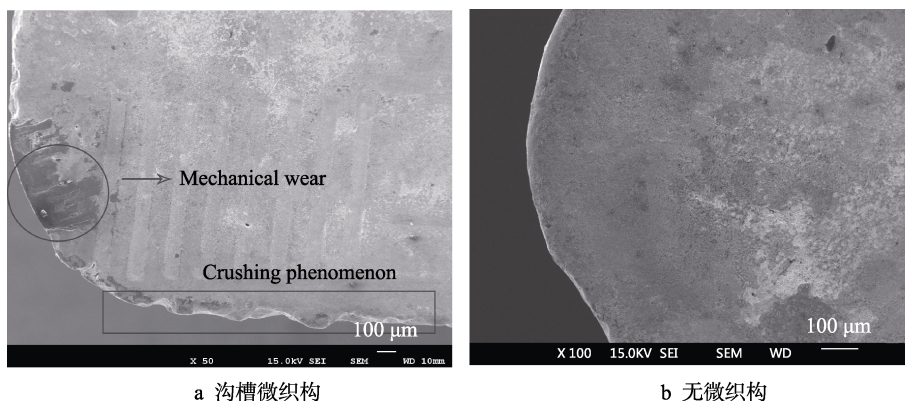


图 12 YG8 刀具前刀面在干切削下的磨损形貌

Fig.12 Wear morphology of YG8 tool rake face under dry cutting: a) grooved micro textured; b) non-micro textured

2.3.2 切削液润滑下的前刀面磨损

冲击波和水锤现象的作用能加速切削液流经沟槽微织构,加速沟槽内的排屑,改善前刀面上的粘结破坏现象,如图 13 所示。前刀面上不易形成“冷焊”现象,抑制了积屑瘤的产生。

如图 14 和图 15 所示,在切削液润滑作用下,刀-屑接触面上形成了稳定的油膜润滑层,可避免刀-屑直接接触,减小粘结区的实际接触面积,降低主切削力和表面摩擦力。同时,在切削液流入微织构时,由于切削液厚度发生变化,形成了收敛楔,产生的流体动压能抑制高温的产生,起到冷却作用。沟槽微织构中存储的部分切削液形成了稳定的润滑膜,缓解了沟槽底槽对切屑的切削作用,产生的润滑作用加速了排屑,缓解了刀具在车削过程中的两种主要磨损形式——

扩散和粘结磨损。如图 14 所示,基于切削液射流现象下的沟槽微织构刀具,不易产生崩刃和积屑瘤现象。切削液射流到前刀面斜面时,可以抑制前刀面的瞬时高温高压,实现降温的效果。

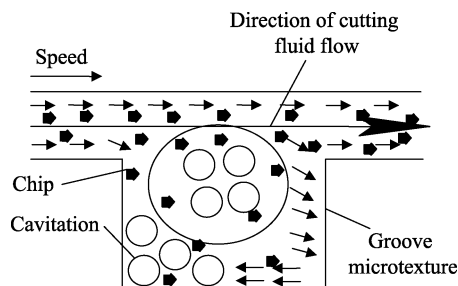


图 13 流体动态润滑和润滑加速排屑

Fig.13 Fluid dynamic lubrication and cavitation accelerating the chip evacuation

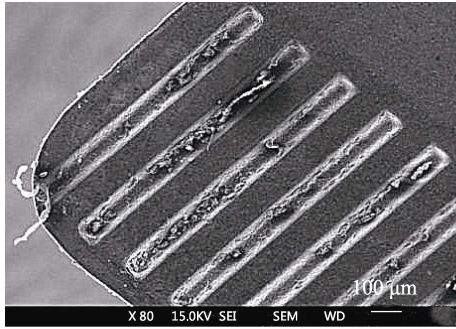


图 14 切削液下 PCD 刀具前刀面磨损
Fig.14 Wear of PCD tool rake face under cutting fluid

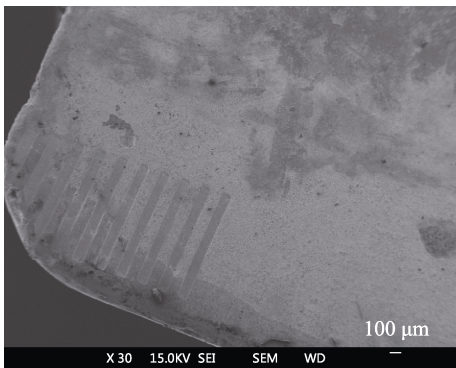


图 15 切削液下 YG8 刀具前刀面磨损
Fig.15 Wear of YG8 tool rake face under cutting fluid

根据伯努利原理,当切削液润滑下的水锤压力和切削速度达到一定条件时,沟槽微结构中少部分切削液可以对车削产生二次润滑^[20-21]。同时,切削液可以很好地产生流体动压效果,带走切屑。前刀面上形成的边界油膜阻碍了机械磨损,从而延长了刀具的使用寿命。

3 结论

通过 ABAQUS 对 Al6061 表面微结构刀具车削过程进行了模拟仿真。采用飞秒激光工艺在 YG8 超硬材料刀具前刀面上制备了沟槽微结构,并在 CA6136 车床上进行了单因素切削 Al6061 实验。仿真及实验结果表明:

1) 在切削液润滑下,基于流体动压射流和二次润滑现象,沟槽微结构刀具的减磨抗粘性相比于无沟槽微结构刀具有所提高,切削过程抑制了积屑瘤的产生。

2) 干切削下刀具前刀面的减磨抗粘性,不及润滑液介入的情况。

3) 仿真结果表明,切削液介入条件下,切削液流场和沟槽微结构的共同作用可有效改善刀-屑摩擦磨损状况,延长刀具使用寿命。

参考文献:

[1] 戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. 科

学通报, 2006(20): 2353-2359.

DAI Zhen-dong, TONG Jin, REN Lu-quan. Research and development of bionic tribology[J]. Chinese science bulletin, 2006(20): 2353-2359.

[2] ETSION I, SHER E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings[J]. Tribology international, 2009, 42(4): 542-547.

[3] BRUZZONE A A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in engineered surfaces for functional performance[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2008, 57(2): 750-769.

[4] 邵世超. 基于仿生微结构的刀具减摩性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

SHAO Shi-chao. A study on the anti-friction properties of cutting tools based on bionic microwovens[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

[5] 邓大松. 沟槽参数对表面微结构麻花钻切削性能的影响研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.

DENG Da-song. Effect of the groove parameters on the drilling performance of the surface micro-textured twist drill[D]. Suzhou: Suzhou University, 2017.

[6] 戚宝运. 基于表面微结构刀具的钛合金绿色切削冷却润滑技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

QI Bao-yun. Research on green cutting cooling lubrication technology of titanium alloy based on surface micro-textured tool[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[7] 李一楠, 张勇, 冯天明, 等. 放电沉积凸貌微结构表面动压润滑性能仿真研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 59-67.

LI Yi-nan, ZHANG Yong, FENG Tian-ming, et al. Simulation study on hydrodynamic lubrication performance of convex texture surface based on discharge deposition[J]. Surface technology, 2019, 48(8): 59-67.

[8] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces[J]. Precision engineering, 2013, 37(4): 888-896.

[9] SUGIHARA T S C M, 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.

[10] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. Precision engineering, 2012, 36(2): 229-237.

[11] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering fracture mechanics, 1983, 21: 541-548.

[12] WILLIAMS J A. Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability[J]. Wear, 1991, 150(1): 380-381.

[13] 于骏一 邹青. 机械制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

YU Jun-yi, ZOU Qing. Technical basis of machinery

- manufacturing [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [14] 王海涛. 6061 铝合金高速铣削有限元仿真与实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- WANG Hai-tao. Finite element simulation and experimental research on high speed milling of 6061 aluminum alloy[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2015.
- [15] 黄飞. 水射流冲击瞬态动力特性及破岩机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- HUANG Fei. Study on transient dynamic characteristics and rock breaking mechanism of water jet impact[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [16] 吴先福. 飞秒激光制备固体润湿性能微纳结构表面的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- WU Xian-fu. Research on the wettability of micro/nano structured solid surface fabricated by femtosecond laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [17] 张俊生. 刀具表面微织构切削机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- ZHANG Jun-sheng. Study on cutting mechanism of tool surface microtexture[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [18] 杨奇彪, 陈中培, 杨涛, 等. 飞秒激光加工 YG6 不同微织构表面浸润性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 275-280.
- YANG Qi-biao, CHEN Zhong-pei, YANG Tao, et al. Surface wettability of different micro-textured YG6 processed by femtosecond lasers[J]. Laser & optoelectronics process, 2018, 55(9): 275-280.
- [19] XIE J, HE J L, LIU X R, et al. Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting titanium alloy[J]. International journal of precision engineering & manufacturing, 2012, 13(10): 1845-1852.
- [20] CERETTI E, LUCCHI M, ALTAN T. FEM simulation of orthogonal cutting: Serrated chip formation[J]. Journal of materials processing technology, 1999, 95(1): 17-26.
- [21] BÄKER M, RÖSLER J, SIEMERS C. A finite element model of high speed metal cutting with adiabatic shearing[J]. Computers & structures, 2002, 80(5): 495-513.

(上接第 276 页)

- [18] LIU Liang, ZHU Jian-bo, HOU Chao, et al. Dense and smooth amorphous films of multicomponent FeCoNiCuVZrAl high-entropy alloy deposited by direct current magnetron sputtering[J]. Materials and design, 2013, 46: 675-679.
- [19] LUKASZ R, SZKLARZ Z, BOBROWSKI P, et al. Microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi base high entropy alloys obtained using powder metallurgy[J]. Metals and materials international, 2019, 25(4): 930-945.
- [20] SCHEUNIS L, CAMPFORTS M, JONES P T, et al. Spinel saturation of a PbO based slag as a method to mitigate the chemical degradation of magnesia chromite bricks[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(16): 4291-4299.
- [21] 杨晓宁, 邓伟林, 黄晓波, 等. 高熵合金制备方法进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(22): 30-33.
- YANG Xiao-ning, DENG Wei-lin, HUANG Xiao-bo, et al. Research on preparation methods of high-entropy alloy[J]. Hot working technology, 2014, 43(22): 30-33.
- [22] SMELTZER J A, MARVEL C J, HORNBuckle B C, et al. Achieving ultra hard refractory multi-principal element alloys via mechanical alloying[J]. Materials science and engineering, 2019, 763: 138140.
- [23] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys (HEAs) and related concepts[J]. Acta materialia, 2017, 122: 448-511.
- [24] ZHANG Y, ZHOU Y, LIN J, et al. Solid solution phase formation rules for multi-component alloys[J]. Advanced engineering materials, 2008, 10(6): 534-538.
- [25] GUO S, LIU C T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase[J]. Progress in natural science: Materials international, 2011, 21(6): 433-446.
- [26] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys[J]. Materials chemistry and physics, 2012, 132: 2-3.
- [27] AKIHISA I. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta materialia, 2000, 48(1): 279-306.
- [28] AKIRA T, AKIHISA I. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element[J]. Materials transactions, 2005, 46(12): 2817-2829.
- [29] 周芳. 激光熔覆高熔点高熵合金涂层组织结构演化及其抗高温软化行为[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- ZHOU Fang. Microstructure evolution and high-temperature softening resistance of high-entropy alloy coating with high-melting point fabricated by laser cladding[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [30] 鲍亚运, 纪秀林, 顾鹏, 等. Al 含量对 FeCrNiCoCu 高熵合金涂层组织结构及冲蚀性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 421-428.
- BAO Ya-yun, JI Xiu-lin, GU Peng, et al. Effect of aluminum content on the microstructure and erosion wear resistance of FeCrNiCoCu high-entropy alloy coatings[J]. Tribology, 2017, 37(4): 421-428.