

# WS<sub>2</sub>/Zr软涂层微纳织构陶瓷 刀具的制备及其切削性能\*

Fabrication and Cutting Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC Ceramic Tools Combined With Micro/Nano-Textures and WS<sub>2</sub>/Zr Soft-Coatings

山东大学机械工程学院 邢佑强 邓建新 岳鸿志 高鹏 孟荣 周咏辉



邢佑强

博士研究生,主要从事微纳织构摩擦学及自润滑刀具的研究。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷刀具具有硬度高、耐磨性好、化学稳定性好及良好的高温力学性能,广泛应用于干切削及难加工材料的切削加工<sup>[1-3]</sup>。但由于干切削时,刀具与切屑之间摩擦较为剧烈,切削温度较高,导致了刀具磨损

本文针对目前表面织构刀具及陶瓷刀具的研究现状,提出将微纳米织构与软涂层结合并应用于陶瓷刀具表面,制备出新型的软涂层微纳织构陶瓷刀具,并通过切削实验研究了软涂层与微纳织构对陶瓷刀具切削性能的影响,为进一步提高陶瓷刀具切削性能提供了一种新的设计思路。

十分严重。因此为了减少陶瓷刀具干切削过程中的摩擦,国内外学者进行了大量的研究:Broniszewski等<sup>[4]</sup>在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷刀具基体中添加Mo元素,使其在切削过程中由于高温氧化形成MoO<sub>3</sub>和MoO<sub>2</sub>膜,从而减小切削时摩擦。Deng等<sup>[5]</sup>在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷刀具基体中添加CaF<sub>2</sub>固体润滑剂,干切削试验结果表明,添加固体润滑剂的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷刀具与传统陶瓷刀具相比能够更有效的减小切削过程中的摩擦与磨损。

表面涂层是一种减少刀具磨损、提高刀具寿命的有效方法,目前其主要分为硬涂层(TiN、TiCN、TiAlN等)

及软涂层(MoS<sub>2</sub>、WS<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub>等)<sup>[6-10]</sup>。硬涂层主要通过提高刀具表面硬度来减小磨损,软涂层主要依靠其较低的剪切强度,在切削过程中通过减小刀屑之间的摩擦从而减小刀具磨损;但由于陶瓷刀具基体本身具有较高的硬度,依靠硬涂层很难大幅度提高陶瓷刀具的硬度来减少刀具磨损,因此硬涂层或许不是最优的涂层选择。相关研究表明<sup>[11-12]</sup>,在陶瓷刀具表面沉积软涂层能有效减少刀具磨损提高刀具寿命,但关于软涂层在陶瓷刀具上的应用目前研究较少,且软涂层较为单一,因此需要进一步研究。

理论计算与试验研究结果表明,

\*国家自然科学基金资助项目(51375271)、济南市高校自主创新计划项目(201401226)和山东大学基本科研业务费资助项目(2014JC039)资助。

刀具表面形貌对刀具切削过程中摩擦磨损性能有着重要影响<sup>[13-15]</sup>,同时近年来摩擦学和仿生学研究结果表明,表面织构能够有效地减少摩擦磨损<sup>[16-19]</sup>,将这种表面织构技术应用于切削刀具表面,能够有效地减少刀具切削过程中的摩擦,提高刀具切削性能<sup>[20-23]</sup>。本文针对目前表面织构刀具及陶瓷刀具的研究现状,提出将微纳米结构与软涂层结合并应用于陶瓷刀具表面,制备出新型的软涂层微纳米结构陶瓷刀具,并通过切削试验研究了软涂层与微纳米结构对陶瓷刀具切削性能的影响,为进一步提高陶瓷刀具切削性能提供了一种新的设计思路。

## WS<sub>2</sub>/Zr 软涂层微纳米结构陶瓷刀具的制备工艺

### 1 试验材料

试验采用热压烧结法制得的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 陶瓷刀具,其主要成分及性能如表 1 所示。陶瓷刀具型号为 SNGN120701,负倒棱为 0.1 mm × (-5)°。试验前将陶瓷刀具前刀面及负倒棱处研磨抛光,其表面粗糙度在 0.02 μm 以下,并在丙酮和酒精中超声清洗 2 次,每次 15min,待干燥后使用。

### 2 软涂层微纳米结构刀具的制备

#### 2.1 制备工艺

图 1 所示为 WS<sub>2</sub>/Zr 软涂层微纳米结构陶瓷刀具的制备工艺示意图。首先采用 Nd:YAG 固体激光在陶瓷刀具前刀面加工出微米织构(图 1(a)),然后采用飞秒激光在负倒棱及前刀面上加工出纳米织构(图 1(b)),最后采用物理气相沉积方法(PVD)在织构陶瓷刀具表面沉积 WS<sub>2</sub>/Zr 软涂层(图 1(c))。

#### 2.2 微纳米结构的制备

试验分别采用济南产 DP-H50 半导体侧面泵浦 Nd:YAG 固体激光打标机和美国相干公司生产的型号为 Legend Elite-USP 的钛宝石

飞秒激光器系统分别加工微米织构与纳米织构。激光加工设备参数如下: Nd:YAG 固体激光工作介质为钕铝石榴石,最大激光功率 50W,波长 1064nm,脉冲重复最大频率 20 kHz,脉冲宽度为 10ns;飞秒激光器激光工作介质为钛宝石,激光波长 800nm,单脉冲最大能量 1mJ,脉冲宽度为 120fs。首先采用 Nd:YAG 固体激光打标机在陶瓷刀具前刀面加工出微米织构,其加工参数为:加工电流为 19A,频率为 6kHz,扫描速度为 5 mm/s,扫描 1 次;然后采用飞秒激光在刀具负倒棱及前刀面加工出纳米织构,其加工参数为:纳米结构加工能量为 1.75 μJ,扫描速度为 500 μm/s,扫描 1 次。试验结束后采用扫描电子显微镜(SEM),光学显微镜及原子力显微镜(AFM)观察刀具表面织构形貌。

图 2 为制备出的微纳米结构陶

瓷刀具表面形貌 SEM 图。图 2(b)为微纳米结构陶瓷刀具前刀面形貌,由图可见,微织构方向平行于主切削刃,其间距为 150 μm;图 2(a)为微织构放大形貌图,可以看出由于加工过程中激光的烧蚀,陶瓷材料迅速的熔化及冷凝,微织构边缘出现了较多的突起;图 2(c)为纳米织构表面放大形貌,由图可见,纳米织构均匀分布在整个的前刀面加工区域,其方向基本垂直于主切削刃方向。

图 3 为微纳米结构二维轮廓图。由图可见,微米织构截面呈三角形,深度约为 40~50 μm,上边缘宽度约为 40~50 μm;纳米织构深度约为 80~150nm,周期约为 600~800nm。

#### 2.3 软涂层的制备

试验设备为大连远东真空技术有限公司生产的多功能离子镀膜机(AS-858),采用多弧离子镀和中频磁控溅射分别在织构刀具表面沉积

表1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 陶瓷刀具材料性能

质量分数 /%	硬度 /GPa	屈服强度 /MPa	断裂韧性 / (MPa·m <sup>1/2</sup> )	弹性模量 /GPa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiC55%	23.5	900	5.04	420

表2 沉积工艺参数

沉积温度 /°C	氩气压强 /Pa	基体负偏压 /V	Zr 靶电流 /A	WS <sub>2</sub> 靶电流 /A	沉积时间 /min
180	0.5	-100	80	1.2	100

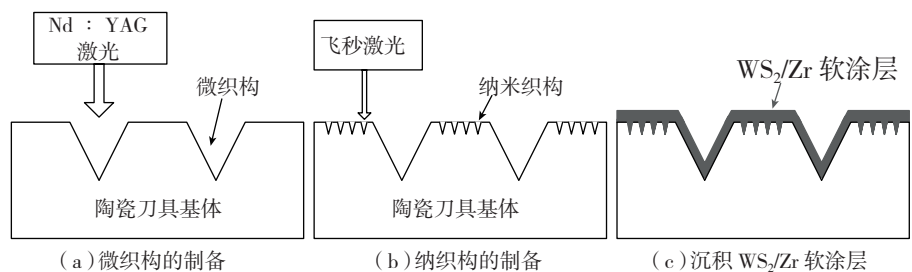


图1 WS<sub>2</sub>/Zr软涂层微纳米结构陶瓷刀具的制备工艺

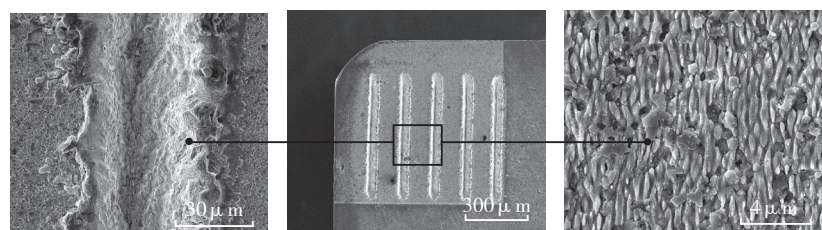
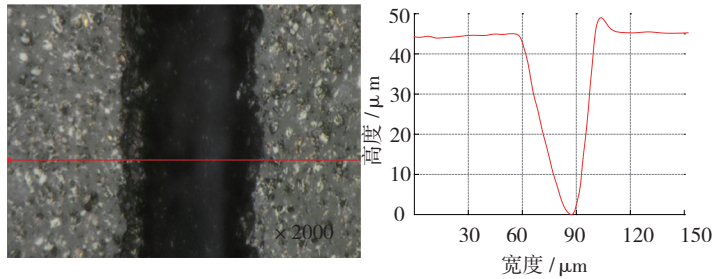
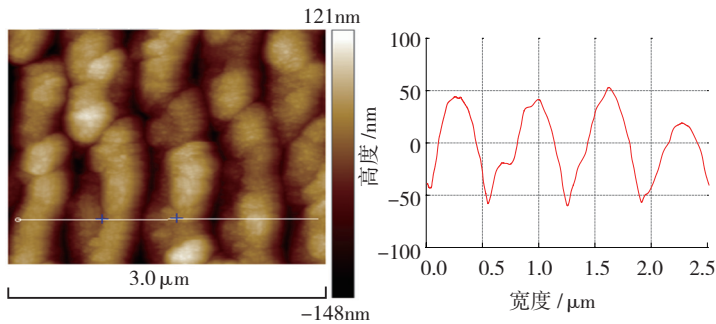


图2 微纳米结构刀具SEM图



(a) 微结构二维轮廓图



(b) 纳米结构二维轮廓图

图3 微纳米结构二维轮廓图

一层 Zr 过渡层和  $WS_2/Zr$  软涂层。真空室本底真空度为  $7.0 \times 10^{-3} Pa$ , 加热至  $180^\circ C$  并保温 30min。沉积涂层前首先用 Ar 离子预溅射清洗 20min, 接着采用多弧离子镀沉积一层 Zr 过渡层, 沉积时间为 3min; 然后采用中频磁控溅射外加离子束辅助沉积  $WS_2/Zr$  软涂层。沉积参数如表 2 所示。沉积结束后, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对涂层表面进行表征, 并采用 MH-6 硬度测试仪和 MFT-3000 多功能表面性能测试仪分别对涂层表面硬度及涂层基体结合强度进行测定。

图 4 为制备出的  $WS_2/Zr$  涂层微纳结构陶瓷刀具 SEM 形貌。由图 4 可见, 无织构区域表面涂层较为致密 (图 4 (b)); 涂层后微米织构仍然存在 (图 4 (c)); 纳米织构被完全覆盖, 纳米织构表面涂层较为疏松, 涂层表面出现了大量的孔隙 (图 4 (d))。

试验通过涂层截面可以明显看出基体、Zr 过渡层及  $WS_2/Zr$  软涂层三层结构,  $WS_2/Zr$  软涂层表面, 软涂层与基体之间有明显的过渡层; 其中 Zr 过渡层的厚度约为  $0.13 \mu m$ ,  $WS_2/Zr$  软涂层的厚度约为  $0.8 \mu m$ 。

试验测得涂层表面硬度约为  $6.2 GPa$ , 临界载荷约为  $32 N$ , 因此与基体材料相比, 软涂层降低了表面硬度。

### $WS_2/Zr$ 软涂层微纳结构陶瓷刀具切削性能

#### 1 试验条件

试验采用制备出的软涂层微纳结构刀具在 CA6140 普通车床上进行切削试验, 工件材料为 45 淬火钢 (HRC40-50), 车削方式为连续干式切削, 并与传统的未加工织构的  $Al_2O_3/TiC$  陶瓷刀具进行实验对比, 两种刀具基体材料成分与刀具结构完全相同, 为方便比较将软涂层微纳结构刀具与传统刀具分别简记为 AT-WS 和 AS。刀具几何参数为: 前角  $\gamma_0 = -5^\circ$ , 后角  $\alpha_0 = 5^\circ$ , 刃倾角  $\lambda_s = -5^\circ$ , 主偏角  $K_r = 45^\circ$ , 倒棱为  $0.1 mm \times (-5^\circ)$ , 刀尖圆弧半径  $r_s = 0.1 mm$ 。切削条件: 切削速度  $v = 80 \sim 260 m/min$ , 进给

量  $f = 0.2 mm/r$ , 切削深度  $a_p = 0.2 mm$ 。试验过程采用 KISTLER 压电晶体测力仪测量三向切削力, 使用 TH5104 型红外热像仪测量切削温度, 使用扫描电子显微镜 (SEM) 及 X 射线能谱 (EDS) 对刀具磨损表面形貌及成分进行检测。

#### 2 试验结果与分析

##### 2.1 切削力

图 5 为两种不同刀具切削力随切削速度的变化曲线。由图 5 可以看出不同切削速度下, AT-WS 刀具三向切削力与 AS 刀具相比都出现了不同程度的降低, 因此制备出的软涂层微纳结构陶瓷刀具能够有效地降低切削力。

##### 2.2 前刀面刀屑间平均摩擦系数

根据试验测量的三向切削力计算出两种不同刀具前刀面与切屑之间的平均摩擦系数, 计算公式如下 [24]:

$$\mu = \tan(\beta) = \tan(\gamma_0 + \arctan(F_y/F_z)) \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为摩擦角,  $\gamma_0$  为刀具前角,  $F_y$  为径向切削力,  $F_z$  为主切削力。

图 6 为绘制出的刀具前刀面刀屑摩擦系数随切削速度的变化曲线。由图可见, 在相同的试验条件下, 制备出的软涂层微纳结构刀具前刀面摩擦系数明显降低, 表现出较好的减

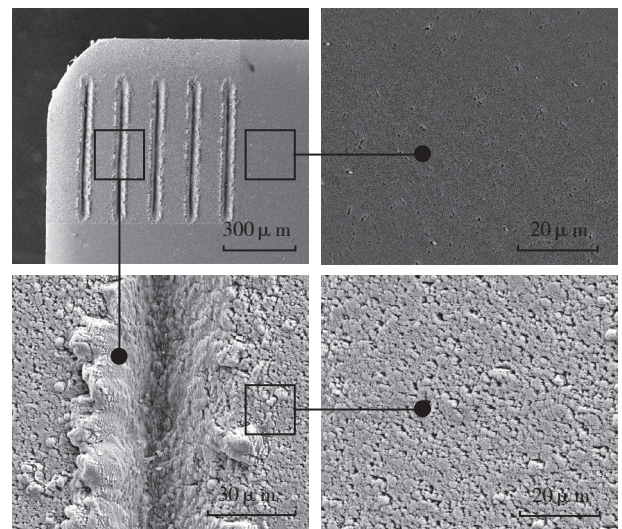


图4  $WS_2/Zr$  涂层微纳结构刀具 SEM 图

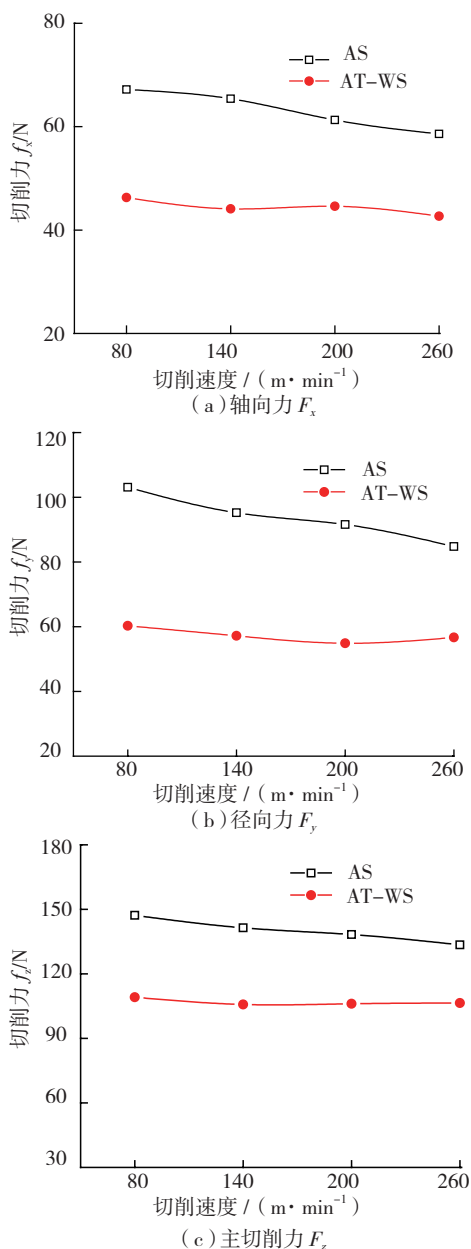


图5 切削力随切削速度的变化曲线

摩特性。

### 2.3 切削温度

试验过程中对切削温度进行数据采集,每次切削过程测量5次,并将测量的5次切削温度分布图中最高温度的平均值作为试验条件下的切削温度,绘制出两种不同刀具切削温度随切削速度的变化曲线,如图7所示。由图可见,两种不同刀具的切削温度随着切削速度的增加不断增加,与传统刀具AS相比,AT-WS刀具在不同的切削速度下均能有

效地降低切削温度,其降低幅度在17%~20%左右。

### 2.4 磨损形貌

图8为AS刀具在切削速度为200m/min,切削4min后前刀面磨损形貌及对应Fe元素的面分布。由图8(a)可见,刀尖处出现了明显的破损;由前刀面放大图8(b)可以看出,前刀面出现了大量的犁沟,其主要的磨损形式为磨粒磨损;通过磨损表面Fe元素的面分布(图8(c))可以看出大量的Fe元素分布在整个的磨损表面。

图9为AT-WS刀具在切削速度为200m/min,切削4min后前刀面磨损形貌及A点与B点成分分析。由图9可见,刀尖处未出现明显的破损,由微结构放大形貌(图9(b))可知,磨损后微结构仍然存在,织构中填充大了Fe。由纳织构表面放大形貌(图9(c))可以看出,其磨损表面与AS刀具(图8(b))相比较为轻微,磨损表面未出现明显的犁沟,且纳织构仍然存在,未发现Fe元素存在磨损表面。图为AT-WS刀具磨损表面S、W、Zr和Fe元素面分布。由图可见,少量的S和W元素及大量的Zr元素存在于磨损表面,Fe元素含量与AS刀具(图8(c))相比明显较少,且其主要集中在微织构中。

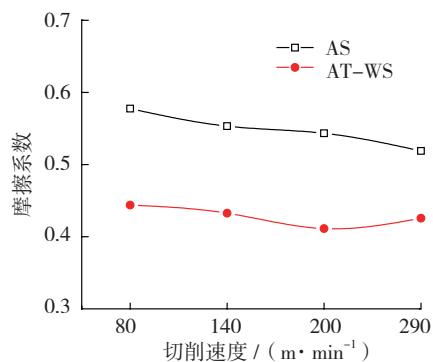


图6 前刀面刀屑摩擦系数随切削速度的变化

### 2.5 作用机理

图11所示为软涂层微纳织构刀具切削时作用机理示意图。图11(a)为切削开始阶段,此时织构刀具表面存在一层WS<sub>2</sub>/Zr软涂层,切削时刀屑之间的摩擦主要发生在切屑与软涂层之间,较高硬度的基体承受载荷。在切削时,软涂层在刀具摩擦表面形成一层润滑膜,由于WS<sub>2</sub>/Zr软涂层具有较低的剪切强度,因此能够降低前刀面与切屑之间的摩擦剪切强度,减小刀具前刀面与切屑之间的摩擦,从而减小切削力及刀屑之间摩擦热的产生;同时,相关文献研究表明,纳米织构的存在增加了涂层与基体的结合强度,因此涂层不易被切屑带走<sup>[25-26]</sup>。随着切削过程的继续进行(图11(b)),磨损的软涂层被切屑带走,同时由于微织构的存在,能

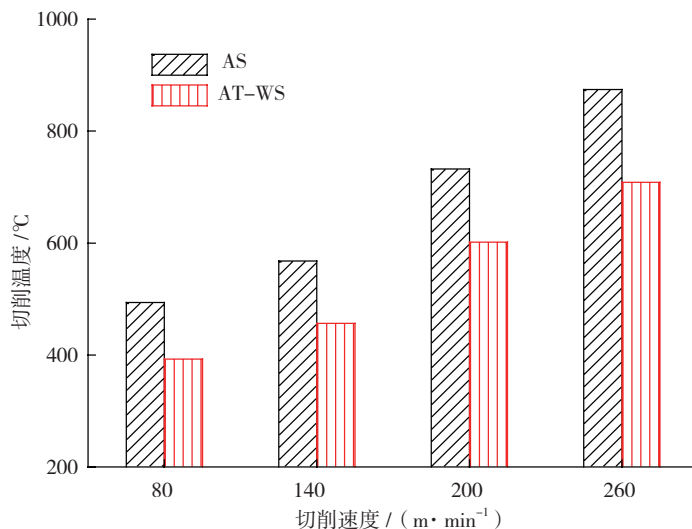


图7 前刀面刀屑摩擦系数随切削速度的变化曲线

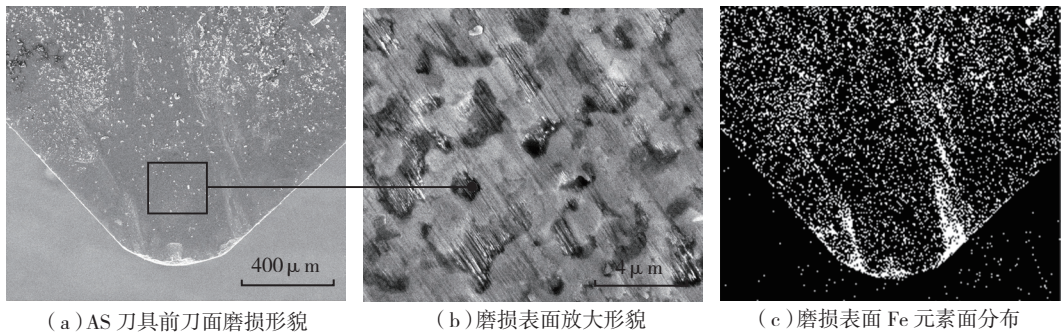


图8 AS刀具前刀面磨损形貌及Fe元素面分布  
( $v=200\text{m/min}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$ ,  $f=0.2\text{mm/r}$ ,  $t=4\text{min}$ )

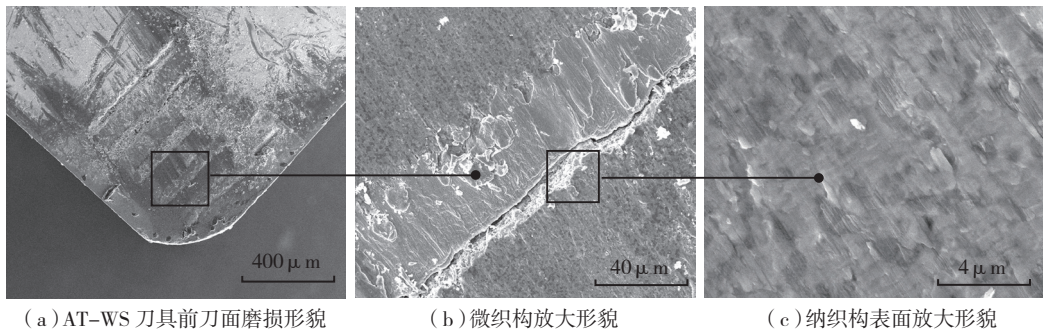


图9 AT-WS刀具前刀面磨损形貌  
( $v=200\text{m/min}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$ ,  $f=0.2\text{mm/r}$ ,  $t=4\text{min}$ )

够有效地收集磨损掉的软涂层。此时,摩擦仍然发生在软涂层与切屑之间,同时,织构的存在减少了刀屑接触长度,因此亦能够减小摩擦系数及切削力;同时织构的存在一定程度上增加了刀具的散热面积,能够加速

刀具表面温度与空气中的热对流速度,因此亦能够有效的降低切削温度。随着切削的继续进行(图11(c)),靠近刀尖处涂层磨损较为严重,沉积软涂层的纳米织构能够起到减小刀屑接触长度及润滑作用;同时微织

构中收集较多的软涂层作为润滑剂被切屑再一次涂覆到前刀面,形成润滑膜;且微织构能够收集摩擦过程产生的磨屑,减小由于磨屑在前刀面的摩擦产生的犁沟。因此在整个的切削过程中,摩擦系数、切削温度、摩擦力及刀具磨损的减少是微织构、纳米织构及  $\text{WS}_2/\text{Zr}$  软涂层共同作用的结果。

## 结论

(1) 采用激光加工技术与物理气相沉积方法(PVD)在陶瓷刀具表面加工出微纳米织构并沉积  $\text{WS}_2/\text{Zr}$  软涂层,成功制备出了  $\text{WS}_2/\text{Zr}$  软涂层微纳米织构陶瓷刀具。

(2) 采用制备出的软涂层微纳米织构刀具(AT-WS)进行干切削45钢试验并与传统刀具(AS)进行对比,研究表明制备出的AT-WS刀具能够有效减小切削力、切削温度和前刀面摩擦系数,减少刀具表面的磨粒磨损及刀尖的破损。

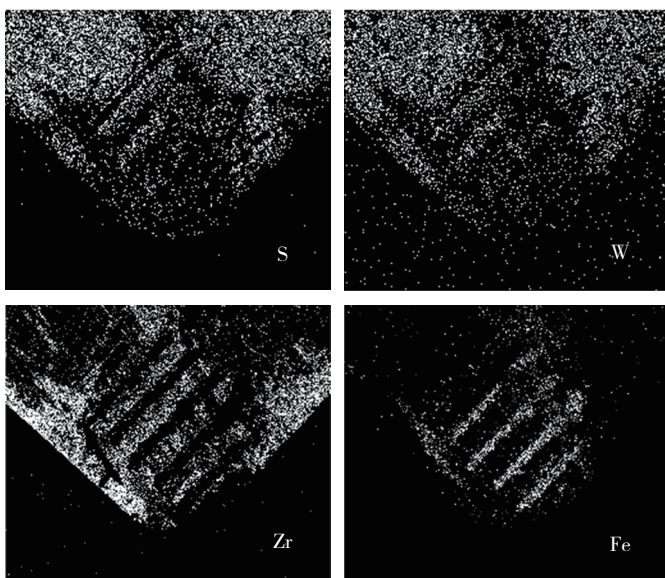


图10 AT-WS刀具磨损表面S、W、Zr和Fe元素面分布  
( $v=200\text{m/min}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$ ,  $f=0.2\text{mm/r}$ ,  $t=4\text{min}$ )

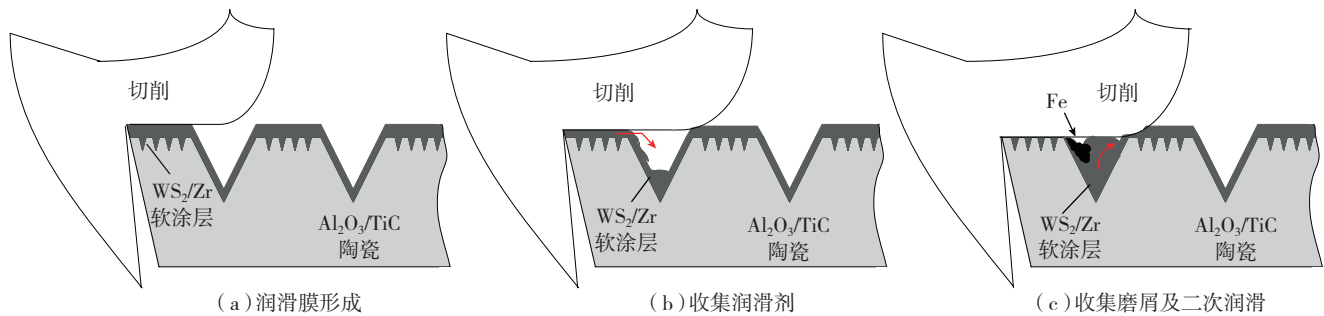


图11 软涂层微纳织构刀具作用机理示意图

(3) 软涂层微纳织构陶瓷刀具能够有效减小摩擦与磨损是  $WS_2/Zr$  软涂层、微织构与纳织构共同作用的结果。其主要的作用机理为软涂层由于具有较低的剪切强度能够减小刀屑之间的摩擦；纳织构的存在增加了涂层与基体的结合强度同时能够减小刀屑接触长度；微织构能够有效收集磨损的润滑涂层，进一步提供二次润滑，同时能够有效收集磨屑，减小刀屑接触长度。

### 参考文献

- [1] Senthil K, Raja A D, Sornakumar T. The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173: 151-166.
- [2] Masuda M. Cutting performance and wear mechanism of alumina-base ceramic tools when machining austempered ductile iron. *Wear*, 1994, 174: 147-153.
- [3] 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [4] Broniszewski K, Wozniak J, Czechowski K, et al.  $Al_2O_3$ -Mo cutting tools for machining hardened stainless steel. *Wear*, 2013, 303: 87-91.
- [5] Deng J X, Cao T K, Yang X F. Self lubrication of sintered ceramic tools with  $CaF_2$  additions in dry cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46: 957-963.
- [6] 胡传忻, 宋幼慧. 涂层技术原理及应用. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [7] Liu A H, Deng J X, Cui H B, et al. Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 31: 82-88.
- [8] Jindal P C, Santhanam A T, Schleinkofer U, et al. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1999, 17: 163-170.
- [9] Deng J X, Song W L, Zhang H, et al. Performance of PVD  $MoS_2/Zr$ -coated carbide in cutting processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48: 1546-1552.
- [10] Du G Y, Ba D C, Tan Z, et al. Tribological behavior of radio-frequency sputtering  $WS_2$  thin films with vacuum annealing. *Thin Solid Films*, 2011, 520: 849-852.
- [11] Wang H M, Yu Y L, Li S Q. Microstructure and tribological properties of laser clad  $CaF_2/Al_2O_3$  self-lubrication wear-resistant ceramic matrix composite soft-coatings. *Scripta Materialia*. 2002, 47: 57-61.
- [12] Liu Y R, Liu J J, Du Z. The cutting performance and wear mechanism of ceramic cutting tools with  $MoS_2$  coating deposited by magnetron sputtering. *Wear*, 1999, 231: 285-292.
- [13] Fallqvist M, Schultheiss F, M'Saoubi R, et al. Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part I experimental observations of contact conditions. *Wear*, 2013, 298-299: 87-98.
- [14] Schultheiss F, Fallqvist M, M' Saoubi R, et al. Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting-part II Theoretical calculations of contact conditions. *Wear*, 2013, 298-299: 23-31.
- [15] Childs T H C. Friction modeling in metal cutting. *Wear*, 2006, 260: 310-318.
- [16] Etsion I, Halperin G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal. *Tribology Transactions*, 2002, 45: 430-434.
- [17] Etsion I. State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology*, 2005, 127: 248-253.
- [18] Pettersson U, Jacobson S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. *Tribology International*, 2003, 36: 857-864.
- [19] Xing Y Q, Deng J X, Wu Z, et al. Effect of regular surface textures generated by laser on tribological behavior of  $Si_3N_4/TiC$  ceramic. *Applied Surface Science*, 2013, 265: 823-832.
- [20] Kawasegi N, Sugimori H, Morimoto H, et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behaviour. *Precision Engineering*, 2009, 33: 248-254.
- [21] Obikawa T, Kamio A, Takaoka H, et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51: 966-972.
- [22] Deng J X, Lian Y S, Wu Z, et al. Performance of femtosecond laser-textured cutting tools deposited with  $WS_2$  solid lubricant coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 222: 135-143.
- [23] Chang W, Sun J, Luo X, et al. Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear. *Wear*, 2011, 271: 2433-2437.
- [24] 陈日曜. 金属切削原理. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [25] Neves D, Diniz A E, Lima de M S F. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 179: 139-145.
- [26] Neves D, Diniz A E, Lima M S F. Microstructural analyses and wear behavior of the cemented carbide tools after laser surface treatment and PVD coating. *Applied Surface Science*, 2013, 282: 680-688.

(责编 杰一)