

表面摩擦与润滑

激光加工表面微织构对陶瓷刀具摩擦磨损性能的影响

刘泽宇, 魏昕, 谢小柱, 华显刚, 洪继伟

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 目的 优选陶瓷刀具表面微织构形貌, 以获得减摩性能较好的微织构。方法 采用摩擦磨损实验, 单因素研究微织构对陶瓷刀具摩擦磨损性能的影响。测定不同形貌织构刀具的表面摩擦系数, 对比其表面磨损形貌, 并通过有限元分析软件 ABAQUS 对微织构表面摩擦过程进行有限元仿真分析, 研究不同织构对刀具应力分布的影响。结果 在载荷 90 N、转速 300 r/min、时间 30 min 的条件下进行摩擦磨损实验, 无织构刀具表面摩擦系数约为 0.42; 放射状微织构刀具的微织构方向与对磨副运动方向垂直, 其摩擦系数最低, 约为 0.35。有限元仿真分析表明, 无织构刀具应力集中出现在对磨副与刀具接触的前沿, 约 16.68 ~ 18.19 MPa, 应力集中容易引起局部磨损; 微织构方向与速度方向垂直时, 等效应力值约为 21.96 ~ 31.37 MPa, 应力分布更为均匀, 应力较大值分布在微织构沟槽的两侧, 刀具更耐磨。结论 相比于无织构刀具, 加工微织构会使得刀具表面摩擦系数降低, 耐磨损性能提高, 应力分布更为均匀。

关键词: 微织构; 陶瓷刀具; 激光加工; 摩擦磨损性能; 摩擦系数; 磨损形貌

中图分类号: TG156.99; TG71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0033-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.006

Influence of Surface Micro Texture with Laser Processing on the Friction and Wear Performance of Ceramic Cutter

LIU Ze-yu, WEI Xin, XIE Xiao-zhu, HUA Xian-gang, HONG Ji-wei

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize the morphology of micro texture on ceramic cutter surface in order to obtain micro texture with better antifriction performance. **Methods** Through friction and wear experiment, the influence of micro texture on the friction and wear performance of ceramic cutter was studied using single factor studies. Surface friction coefficient under different morpholo-

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-07-14

Received: 2015-06-30; Revised: 2015-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(50675038, 51175092); 广东省科技计划项目促进科技服务业发展专项计划(2010A040203002); 省部产学研结合科技创新平台项目(2011A091000002)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (50675038, 51175092), Guangdong Technology Projects to Promote the Development of Technology Services Special Programs (2010A040203002), The Provincial Ministry of Combination Technology Innovation Platform (2011A091000002)

作者简介: 刘泽宇(1990—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要研究激光加工。

Biography: LIU Ze-yu(1990—), Male, from Henan, Master graduate student, Research focus: laser machining.

通讯作者: 魏昕(1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工。

Corresponding author: WEI Xin(1964—), Female, Ph. D., Professor, Research focus: advanced processing technology, inspect and control of the machining process.

gy was measured and the wear morphology was inspected. Through the finite element analysis software ABAQUS, the friction process of micro texture surface was analyzed. The effect of different texture on stress distribution of the cutter was studied. **Results** Under the condition of 90 N, 300 r/min, 30 min in the friction and wear test, the friction coefficient of the tool was about 0.42, the radial micro texture on ceramic cutter surface, namely the direction of micro texture was vertical with the direction of motion had a low friction coefficient of only about 0.35. The stress concentration on the surface of the cutter without texture occurred in the forefront of deputy contact with the cutter grinding, which ranged from about 16.68 MPa to 18.19 MPa. Stress concentration was easy to cause partial wear. When the directions of micro texture and speed were vertical, the equivalent stress value ranged from about 21.96 MPa to 31.37 MPa. The stress distribution was more even, the stress was on both sides of the groove and the cutter was more wear-resisting. **Conclusion** Compared to cutter without texture, the cutter processed with micro texture such as radial micro texture, cross micro texture and crater texture reduced the surface friction coefficient, improved the wear resistance performance. And the stress distribution was more homogeneous.

KEY WORDS: micro texture; ceramic cutter; laser machining; friction and wear performance; friction coefficient; wear morphology

表面微结构可以在一定程度上改善刀具性能, 进而提高加工效率^[1-2]。众多学者研究表明, 加工质量较好的表面微结构可以降低切削力和摩擦系数, 提高刀具切削性能和摩擦磨损性能。这给研究刀具的减摩带来了新突破。

国内外学者^[3-9]在刀具或刀具材料上加工出不同形貌的微结构或纳结构, 并通过实验与无织构刀具或刀具材料进行对比, 验证了微结构的存在能够实现良好的减摩效果, 提高抗粘附性和耐磨性。胡天昌等^[10]采用激光微加工技术在45#钢表面制备了微坑型织构, 摩擦磨损实验表明, 在干摩擦条件下, 与未织构相比, 织构具有低而稳定的摩擦系数和长的耐磨寿命, 并且织构孔径或密度对减摩性能有影响。张高峰等^[11]使用划痕法在硬质合金表面加工出划痕宽度为10~50 μm的微结构, 摩擦磨损实验结果表明, 加工微结构有助于降低硬质合金表面摩擦因数, 当织构方向与摩擦磨损运动方向垂直时, 微结构对硬质合金摩擦磨损特性的改善效果最好。目前关于表面微结构在刀具上的应用研究大多集中在硬质合金刀具, 切削实验研究也局限在切削铝合金方面, 因此开展表面微结构在陶瓷刀具上的减摩作用的研究具有重要意义。

切削过程中的作用因素较多, 表面微结构的作用机理及其对刀具性能的影响难以观察和研究。文中借助摩擦磨损实验, 仿照切削过程中刀具所处的环境, 单因素研究微结构对刀具性能的影响, 并分析微结构的作用机理。

1 实验

1.1 激光加工

利用光纤激光器在陶瓷刀具表面加工出微结构。

所用陶瓷刀具型号为ISO SNGN 120708, 其组成成分为Al₂O₃/TiCN。激光加工后, 对刀具进行超声波清洗, 去除毛刺或熔渣。

参考文献并结合课题组前期研究结果, 设计微结构形状如图1所示。设计沟槽宽度25 μm, 深度10

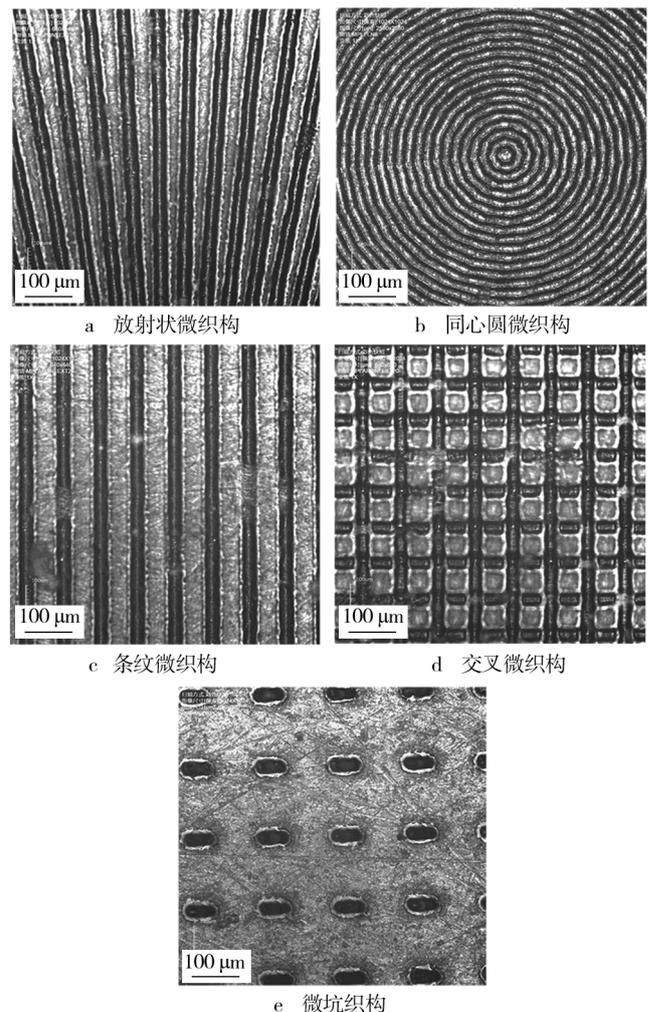


图1 不同形貌微结构

Fig. 1 Different morphology of micro texture

μm,间距 50 μm;微坑结构最大宽度 60 μm,深度 20 μm,间距 100 μm。结合加工条件,设计微织构截面形状为 V 形。其中,微坑织构激光加工条件为:扫描 1 次,扫描速度 50 mm/s,激光功率 1 W,激光频率 80 kHz。其余形貌微织构的激光加工条件与微坑织构基本相同,仅将激光功率改为 0.2 W。

使用激光共聚焦显微镜观察微织构,其截面形状如图 2 所示。微织构沟槽的截面形状为 V 形,底部加工质量良好,两侧余高较低。结构尺寸见表 1,可见加工结果与设计方案基本相同。

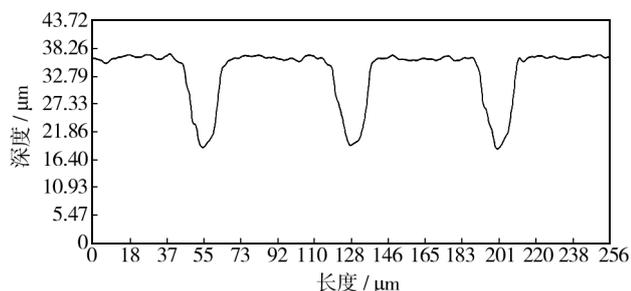


图 2 交叉微织构截面形状

Fig. 2 Section shape of cross micro texture

表 1 不同形貌微织构尺寸

Tab. 1 Size of micro texture with different morphology

微织构	宽度/μm	深度/μm
放射状微织构	24.734	10.000
同心圆微织构	24.200	13.190
条纹微织构	24.733	10.824
交叉微织构	24.567	9.784
微坑织构	57.278	20.300

1.2 摩擦实验

选用 CFT- I 型多功能材料表面综合性能测试仪进行摩擦实验。该设备是集旋转、往复、环块等多种测量方式为一体的高端材料测试仪器,可以对不同种类的涂层、聚合物、金属及陶瓷复合材料进行摩擦系数、磨损量等摩擦学性能测试。实验中采用旋转式摩擦,对磨副选用直径 4 mm 的 GCr15 钢球。

2 结果与仿真分析

2.1 不同形貌微织构对摩擦系数的影响

摩擦磨损实验中施加法向载荷 90 N,对磨副旋转半径为 2 mm,运行速度为 300 r/min,运行时间为 30

min。在相同实验条件下,测得无织构刀具与放射状微织构刀具的摩擦系数变化曲线,如图 3 所示。可以看出,在实验开始阶段,摩擦系数有一个上升的过程。这是由于法向载荷的施加是一个稳定增大的过程。随着实验时间的延长,法向载荷达到设定值,但由于刀具表面微织构对刀具粗糙度有一定影响,使得摩擦系数处于一个波动过程。实验时间继续延长,摩擦磨损过程趋于稳定阶段,摩擦系数的波动也较小。通过观察,选取 15 ~ 30 min 的摩擦系数作为摩擦磨损稳定阶段的摩擦系数。相比于无织构刀具,微织构刀具摩擦系数的波动更为剧烈和明显。无织构刀具表面摩擦系数约为 0.42,加工有放射状微织构的刀具表面摩擦系数为 0.35 左右,说明微织构的存在能够降低刀具表面摩擦系数。

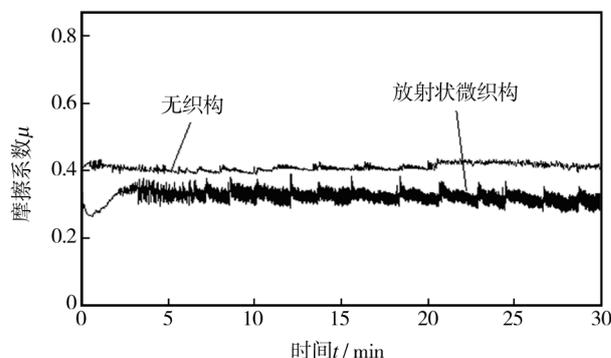


图 3 微织构对摩擦系数的影响

Fig. 3 The influence of micro texture on the friction coefficient

为更明显地对比不同微织构对刀具摩擦系数的影响,计算了稳定阶段平均摩擦系数,如图 4 所示。可以看出,放射状微织构表面的平均摩擦系数最低。这是由于放射状微织构沟槽方向与对磨副移动方向垂直,与众多学者提到的垂直微织构原理^[11-12]相同。同心圆微织构沟槽方向与对磨副移动方向平行,即切

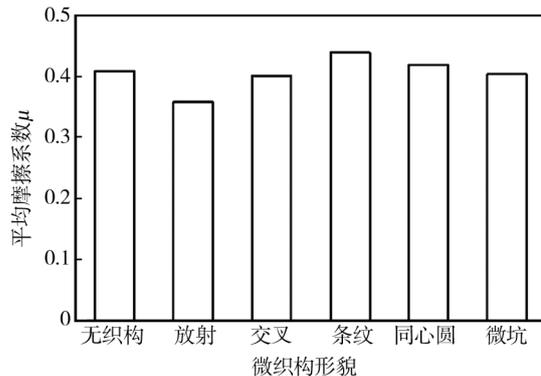


图 4 不同微织构平均摩擦系数

Fig. 4 Average friction coefficient of different micro texture

削实验中采用了平行微织构,测得该微织构的平均摩擦系数明显大于无织构刀具。条纹微织构的平均摩擦系数最大,交叉微织构和微坑织构的平均摩擦系数与无织构刀具基本相同。由此可知,微织构的存在会影响刀具表面摩擦系数。

2.2 不同形貌微织构对磨损形貌的影响

陶瓷材料属于硬脆材料,陶瓷刀具在切削过程中的主要磨损机理是粘着磨损和磨粒磨损。对磨损后的形貌进行观察,再结合摩擦系数,可对不同形貌微织构的影响进行分析。如图5所示,微织构的置入可以有效减轻刀具的磨损。这是由于在干摩擦条件下,

微织构的置入减少了刀具与对磨副的接触面积,增大了刀具表面的散热面积,在降低摩擦系数的同时,也降低了摩擦过程中产生的热量。相比于无织构刀具,加工有微织构的刀具在摩擦磨损过程中,粘着物有效减少。陶瓷刀具的导热性较差,摩擦磨损实验过程中产生的较高摩擦热会加剧刀具的粘着磨损,而微织构能够降低摩擦热,进而减轻刀具的粘着磨损,减少刀具表面的粘着物。此外,存在的沟槽可以储存一定的磨粒,从而在一定程度上减轻刀具的磨粒磨损,提高刀具的耐磨性能。

图6为放射状微织构刀具和交叉微织构刀具磨损后的三维形貌高度示意图。从图中可以很明显看出,

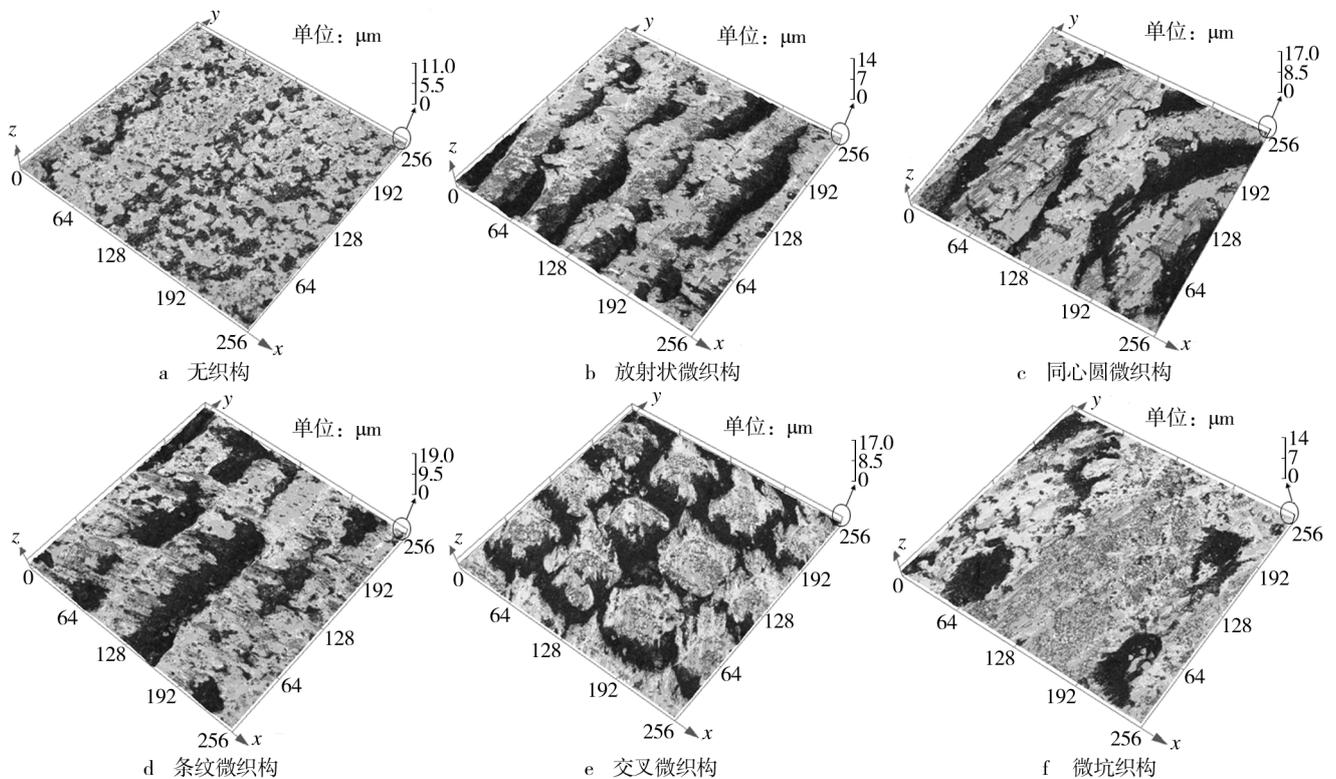


图5 不同微织构的磨损形貌

Fig. 5 Wear morphology of different micro texture

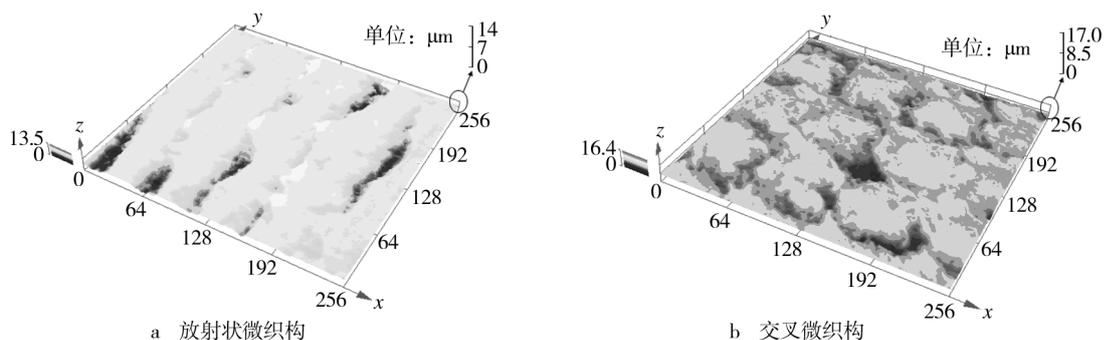


图6 微织构磨损形貌高度

Fig. 6 Height map of wear topography of micro texture

磨粒或粘着物出现后,会随着对磨副的运动首先覆盖微织构的沟槽,当沟槽内部被磨粒或粘着物填满后,对磨副会在填满磨粒或粘着物的沟槽表面和刀具表面滑动,逐渐将沟槽覆盖。同时,磨损形貌与微织构沟槽方向有很大关系^[5],不同的微沟槽方向会改变磨粒或粘着物流动方向,使得刀具表面的磨损情况不同。

2.3 仿真分析

在摩擦过程中,载荷及摩擦导致的温升使刀具摩擦接触表面产生应力而磨损,此应力的大小及分布会对摩擦表面的磨损程度产生很大影响。运用通用有限元分析软件 ABAQUS 对微织构表面摩擦过程进行有限元仿真分析,研究表面微织构形状、尺寸等对摩擦应力大小及分布的影响规律,具有重要意义^[13-15]。在摩擦磨损实验的开始阶段,对磨副与刀具表面的接触形式为点-面接触,实验进行一段时间后,对磨副出现磨损,与刀具接触形式变为面-面接触。摩擦磨损实验选择的是旋转式摩擦,在较短的摩擦距离内,其运动形式类似于直线滑动。因此,将旋转滑动简化为直线滑动,并将对磨副钢球简化为长度 0.5 mm、宽度 0.5 mm、厚度 0.25 mm 的长方体,将刀具简化为长度 2.5 mm、宽度 0.5 mm、厚度 0.5 mm 的长方体,建立如图 7 所示的面-面接触模型,其中上试样材料为对磨副 GCr15 钢球,下试样材料为刀具材料。

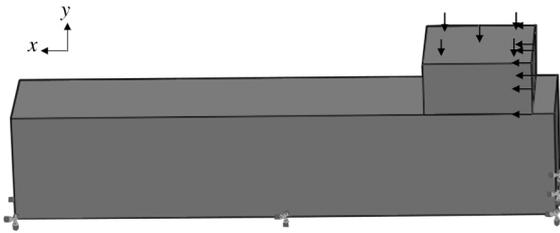


图7 摩擦磨损模型

Fig.7 Model of friction and wear

摩擦磨损实验中,刀具下表面被固定,上表面与钢球接触,钢球被施加 Y 轴负方向的载荷和 X 轴正方向的速度约束。结合前文摩擦磨损实验条件,通过计算,对上试样上表面施加的 Y 轴负方向载荷为 15 MPa。分析过程创建两个边界条件:第一步,在初始分析步中,设定下试样底面所有节点上的位移均为零,目的是为了固定下试样不动,即底面 X 向、Y 向和 Z 向位移和旋转均为 $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$,并延续到后续分析步;第二步,在创建第二个分析

步中,上试样沿着 X 正方向移动, $V_1=0.1$ 。实验中,放射状微织构的织构方向与对磨副运动方向垂直,同心圆织构的织构方向与对磨副运动方向平行。

根据分析计算结果,从最大应力和应力分布情况两方面进行分析对比。图 8 为不同形貌微织构刀具表面最大等效应力。微织构的置入改变了刀具表面原有受力情况,使得刀具所受最大应力增大。通过对比可以发现,放射状微织构和微坑织构所受最大应力值基本相同,交叉微织构所受最大应力值最大。过大的应力集中很容易使刀具出现裂纹,造成刀具破损。

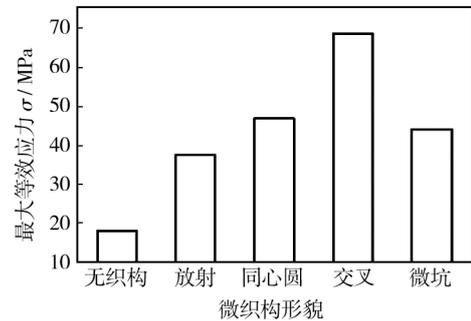


图8 不同形貌微织构最大等效应力

Fig.8 Maximum equivalent stress of different micro texture

图 9 为不同形貌微织构刀具在相同实验条件下的应力分布情况。由图 9a 可见,对于无织构刀具,应力集中出现在对磨副与刀具接触的前沿,约 16.68 ~ 18.19 MPa。在滑动接触过程中,应力集中容易引起局部磨损,因此降低刀具表面的应力集中现象,使刀具表面应力分布更加均匀,可以提高刀具的耐磨性能。

当沟槽方向与对磨副移动方向平行时,如图 9b 所示,其应力分布情况较无织构刀具均匀,但仍在刀具与对磨副接触前沿出现应力集中现象,等效应力值约为 27.43 ~ 31.35 MPa。

对于放射状微织构(即垂直微织构),如图 9c 所示,等效应力值约为 21.96 ~ 31.37 MPa,刀具表面所受应力分布较为均匀,应力较大值分布在微织构沟槽的两侧。由易斌等的研究可知^[13],微织构沟槽两侧为激光加工热影响区,该区域具有很高的硬度和很好的耐磨性能。因此,加工有放射状微织构的刀具具有良好的耐磨性能。

加工有交叉微织构的刀具表面的最大等效应力值最高,并且如图 9d 所示,刀具表面出现了应力集中现象,等效应力值约为 34.38 ~ 40.11 MPa。

微坑织构刀具表面应力分布情况如图 9e 所示,

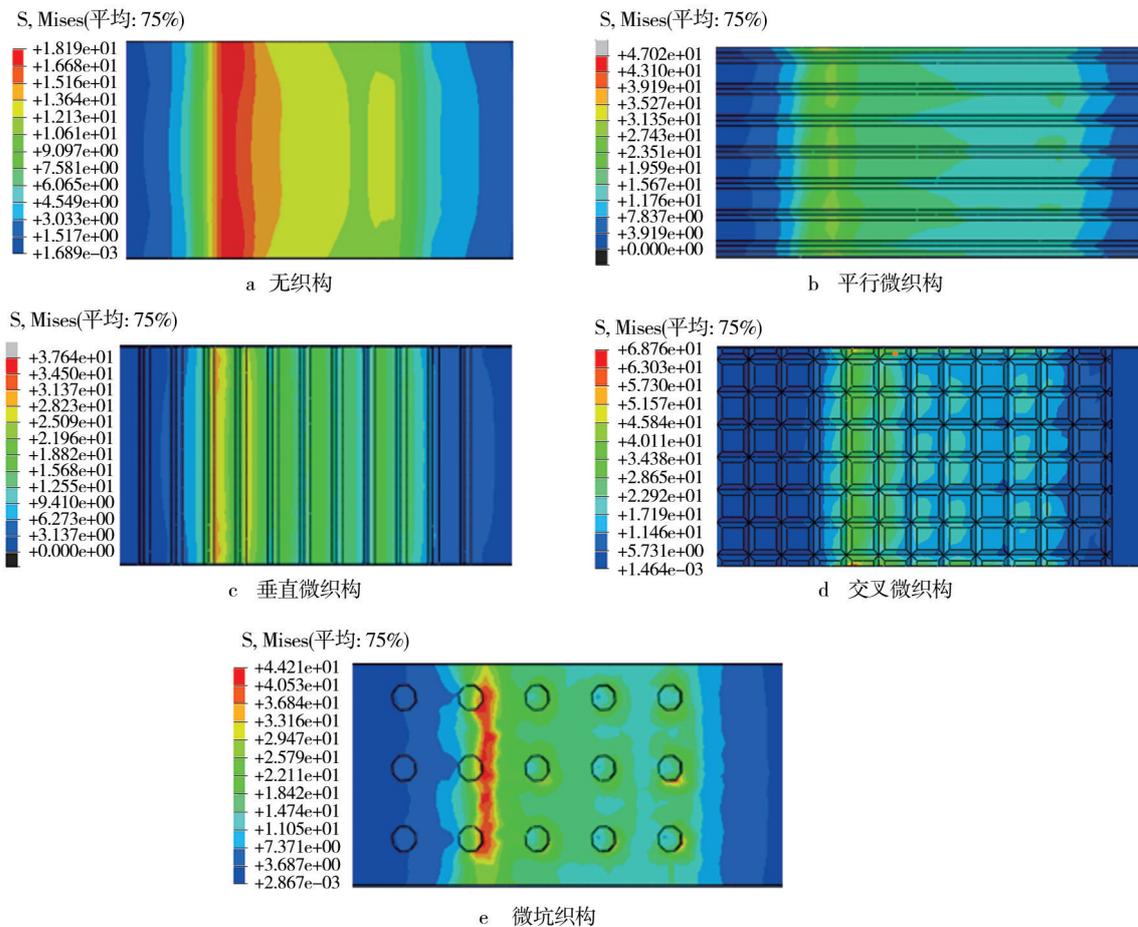


图9 不同形貌织构刀具表面应力分布

Fig.9 Stress distribution on cutter surface with different micro texture

与无织构刀具大致相同,在刀具与对磨副接触前沿出现了应力集中,等效应力值约为 36.84 ~ 44.21 MPa。但在其余区域,由于微坑织构的置入,应力分布较无织构刀具更为均匀,较大应力出现在微坑织构周围。

3 结论

1) 加工质量较好的表面微织构可以降低摩擦系数,不同形貌表面微织构对刀具表面摩擦系数的影响不同。其中,微织构沟槽方向与对磨副运动方向垂直时,摩擦系数最小。在文中的摩擦条件下,无织构刀具摩擦系数约为 0.4,放射状微织构刀具和微坑织构刀具的表面摩擦系数均低于无织构刀具,其中放射状微织构刀具的摩擦系数约为 0.35。

2) 表面微织构能够减小刀具与对磨副的接触面积,增大刀具的散热面积,从而增大刀具与空气之间的热交换,降低摩擦热,减轻刀具表面磨损;此外,微织构能够储存一定的磨粒或粘着物,提高刀具抗磨损

性能;这两方面的原因使得不同形貌微织构刀具的磨损均比无织构刀具轻微。

3) 微织构的置入使得刀具所受最大等效应力增大,同时也改变了刀具表面的应力分布情况。微织构沟槽方向与对磨副运动方向垂直时,刀具表面应力分布更加均匀,有助于提高刀具的抗磨损性能。

参考文献

- [1] 戚宝运,李亮,何宁,等. 表面织构在刀具减磨技术中的应用[J]. 工具技术,2010(12):3—6.
QI Bao-yun, LI Liang, HE Ning, et al. Application of Surface Texture in Tool Antifriction Technology [J]. Tool Engineering, 2010(12):3—6.
- [2] 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]. 摩擦学学报,2009(2):103—108.
SONG Wen-long, DENG Jian-xin, WANG Zhi-jun, et al. Machining Performance of Micro-pool Tools [J]. Tribology,

- 2009(2):103—108.
- [3] 杨超,刘小君,杨海东,等.表面织构对刀具切削性能及前刀面摩擦特性的影响[J].摩擦学学报,2015(2):228—235.
YANG Chao, LIU Xiao-jun, YANG Hai-dong, et al. Effect of the Textured Surface on the Cutting Performance of the Tool and the Friction Property for the Rake Face[J]. Tribology, 2015(2):228—235.
- [4] 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.
WANG Liang. Experimental Study on Titanium Alloy Cutting Process Using Surface Micro-textured Cutting Tool [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [5] 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.
XING You-qiang, DENG Jian-xin, FENG Xiu-ting, et al. Fabrication and Properties of Micro/Nano-textured Self-lubricated Ceramic Tool in Dry Cutting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(6):42—46.
- [6] 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.
- [7] ENOMOTO T, SUGIHARA T. Improving Anti-adhesive Properties of Cutting Tool Surfaces by Nano-/Micro-textures [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010(59):597—600.
- [8] ENOMOTO T, SUGIHARA T. Improvement of Anti-adhesive Properties of Cutting Tool by Nano/Micro Textures and Its Mechanism[J]. Procedia Engineering, 2011(19):100—105.
- [9] 冯秀亭.表面织构陶瓷刀具的切削性能研究[D].济南:山东大学,2014.
FENG Xiu-ting. Cutting Performance of Surface Textured Ceramic Tools [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [10] 胡天昌,胡丽天,张永胜.45#钢表面复合润滑结构的制备及其摩擦性能研究[J].摩擦学学报,2012(1):14—20.
HU Tian-chang, HU Li-tian, ZHANG Yong-sheng. Preparation of Composite Lubrication Structure and Its Tribological Properties on 45# Steel Surface [J]. Tribology, 2012(1):14—20.
- [11] 张高峰,龙石山,汤爱民,等.基于划痕法制备的微织构硬质合金摩擦磨损试验研究[J].中国机械工程,2014(16):2143—2148.
ZHANG Gao-feng, LONG Shi-shan, TANG Ai-min, et al. Experimental Study on Tribological Properties of Textured Cemented Carbide Made by Diamond Scratching [J]. China Mechanical Engineering, 2014(16):2143—2148.
- [12] 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.
- [13] 易斌.硬质合金刀具材料激光微织构表面摩擦磨损特性研究[D].湘潭:湘潭大学,2014.
YI Bin. Study on Friction and Wear Characteristics of Laser Micro-textured Surface on Cemented Carbides Tool Materials [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [14] 冯艳宏.基于ABAQUS的混合陶瓷深沟球轴承摩擦接触问题数值分析[D].天津:天津大学,2007.
FENG Yan-hong. Numerical Contact Analyses with Friction of Hybrid-ceramic Deep Groove Ball Bearings Based on ABAQUS [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [15] 万轶.表面织构与合金化改善密封材料摩擦学性能研究[D].南京:南京理工大学,2008.
WAN Yi. Study on Surface Texturing and Alloying Technology Improving Tribological Properties of Seal Material [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

(上接第21页)

- [14] 陈焕铭,高亚红,吕琼,等.化学镀Ni-P-W/Al₂O₃复合镀层与NdFeB基体的结合强度研究[J].表面技术,2012,41(4):13—15.
CHEN Huan-ming, GAO Ya-hong, LYU Qiong, et al. Investigation on the Interfacial Bonding Strength between Ni-P-W/Al₂O₃ Composite Coatings and NdFeB Matrix [J]. Surface Technology, 2012, 41(4):13—15.
- [15] CHEN Z, ALICE N, YI J Z, et al. Multi-layered Electroless Ni-P Coatings on Powder Sintered Nd-Fe-B Permanent Magnet [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 302:216—222.