

微纳复合织构自润滑陶瓷刀具的制备及切削性能研究*

Fabrication and Properties of Micro/Nano-Textured Self-Lubricated Ceramic Tool in Dry Cutting

山东大学机械工程学院 邢佑强 邓建新 冯秀亭 闫光远 程宏伟



邢佑强
博士研究生,主要从事织构表面摩擦学及自润滑刀具的研究。

针对目前表面织构刀具研究现状,结合陶瓷刀具自身的特点,提出了将微米级织构与纳米级织构相结合的方法,在陶瓷刀具负倒棱处加工出纳米级织构,在前刀面加工出微米级织构,并填充润滑剂制备出一种微纳复合织构自润滑陶瓷刀具,预期设计和制备的微纳复合织构自润滑陶瓷刀具将有效地改善陶瓷刀具的切削性能。

分严重,导致刀具寿命降低^[1],为解决这一问题国内外学者不断寻求开发新型刀具材料,优化刀具结构,研究新型刀具^[2-4]。

近年来,摩擦学与仿生学研究领域提出表面织构能够有效地减小摩擦,降低摩擦系数^[5-8],将这种技术应用于切削加工刀具将是一种富有前景的研究领域。目前国内外学者将表面织构应用于刀具研究尚处在起步阶段。日本学者 Kawasegi^[9]等利用飞秒激光在 WC-Co 硬质合金刀具前刀面加工了微纳米沟槽结构,在干切削和最小微量润滑(MQL)条件下切削铝合金试验,结果表明微纳织构能有效地降低切削力。日本的 Obikawa^[10]等采用光刻加工方法在硬

质合金刀具前刀面制备了类金刚石(DLC)涂层微织构刀具,切削铝合金试验结果表明平行于主切削刃微沟槽与微凸点阵列织构能够有效减小前刀面摩擦,改善刀具切削性能。国内的吴泽^[11]等采用微织构自润滑刀具切削 45 钢试验表明,织构刀具能够有效降低切削力和切削温度,减小切屑变形,减少刀具前刀面磨损。

陶瓷刀具的硬度高、耐磨性好、化学稳定性强、高温力学性能优良且不易与金属发生粘结,被广泛应用于难加工材料的切削加工^[12]。针对目前表面织构刀具研究现状,结合陶瓷刀具自身的特点,提出了将微米级织构与纳米级织构相结合的方法,在陶瓷刀具负倒棱处加工出纳米级织构,

金属干切削过程中,由于前后刀面与切屑和工件之间存在的剧烈的摩擦,切削温度极高,刀具的磨损十

* 国家自然科学基金资助项目(51075237)、教育部博士点基金(2011013113002)、山东省自然科学基金重点项目(ZR2010EZ002)、山东大学自主创新基金资助项目(2011JC001)资助。

在前刀面加工出微米级织构,并填充润滑剂制备出一种微纳复合织构自润滑陶瓷刀具,预期设计和制备的微纳复合织构自润滑陶瓷刀具将有效地改善陶瓷刀具的切削性能。

微纳复合织构自润滑陶瓷刀具的制备工艺

1 试验材料

试验陶瓷刀具采用热压烧结法制得的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷刀具,其主要成分及性能见表 1。陶瓷刀具型号为 ISO SNGN120708 试样,负倒棱为 $0.25\text{ mm} \times (-8)^\circ$ 。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 $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 以下,并在丙酮和酒精中超声清洗 2 次,每次 15 min,待干燥后使用。

2 试验设备

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出微米级织构与纳米级织构,通过调节不同的加工参数加工出理想的微纳米织构。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 20kHz,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。

3 微纳织构的制备工艺

在激光表面微纳织构加工工艺试验中,影响微纳织构形成的因素很多,主要是材料本身的特性以及激光加工参数。文中微米级织构的制备主要研究了泵浦电流、扫描速度、频率,扫描次数对微织构形貌和几何尺寸的影响;纳米级织构的制备主要

研究了激光能量、扫描速度、扫描次数对于表面形貌和织构尺寸的影响。

3.1 微织构的制备工艺

(1) 泵浦电流与扫描速度对微沟槽尺寸的影响。

泵浦电流是影响激光功率的主要因素,图 1 为频率为 6 kHz,扫描次数为 1 次时,泵浦电流与扫描速度对微沟槽深度与宽度的影响。由图 1 可知,微沟槽的深度随泵浦电流的增大而增大,随扫描速度的增大而减小;微沟槽的宽度随着泵浦电流的增大呈现先减小后增大趋势,随着扫描速度的增大变化趋势不大;同时试验研究发现当泵浦电流过小或者扫描速度较大时,加工沟槽形貌出现了明显的不连贯现象。其原因主要是由于激光电流较小或者扫描速度较大时,激光能量密度小于烧蚀阈值,表面沟槽深度较小;随着泵浦电

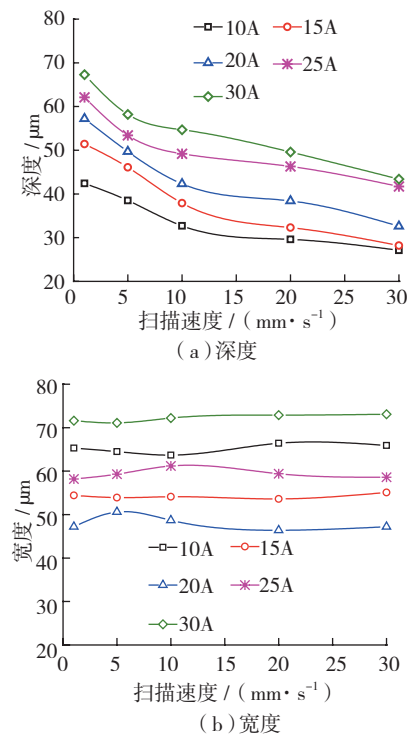


图1 泵浦电流及扫描速度对微沟槽几何尺寸的影响

表1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷刀具材料性能

成分	TiC 质量分数 / %	硬度 HV ($\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$)	屈服强度 / MPa	断裂韧性 / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	弹性模量 / GPa
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$	55	2400	900	5.04	420

流的增大或扫描速度的减小,单位面积上沉积的能量变大,被烧蚀去除的材料增多,沟槽深度增加,同时由于电流增大,激光能量增加,作用区域更加集中,反而使沟槽宽度略微变小;随着泵浦电流的继续增大,单位面积沉积的激光能量更多,试样表面烧蚀较为严重,沟槽宽度和深度都显著增加。因此,为了保证加工质量,兼顾加工效率与加工精度,必须协调好加工速度与激光功率的关系。图 2 为不同试验参数下微沟槽形貌。由试验可知,存在最合理的一个泵浦电流和扫描速度范围,即 18~20A, 4~6mm/s。

(2) 频率对微沟槽尺寸的影响。

图 3 是电流为 19A,扫描速度为 5mm/s,扫描 1 次时激光频率对微沟

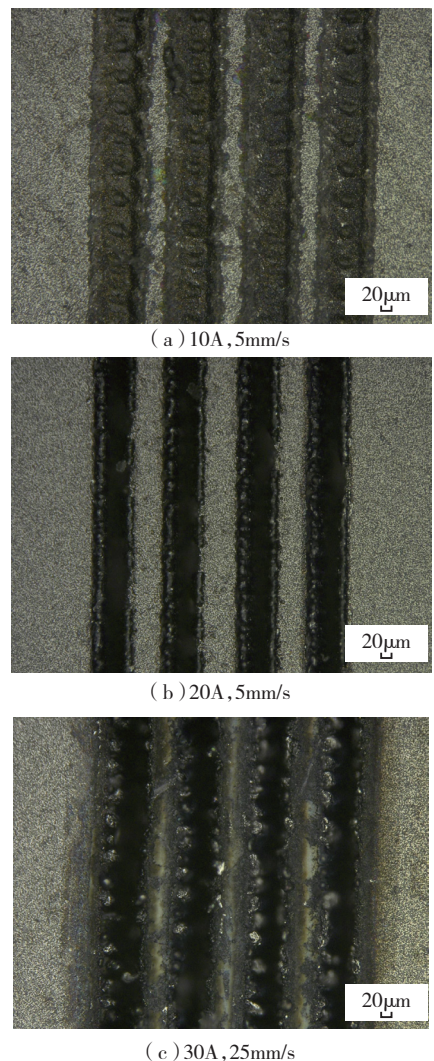


图2 不同试验参数下微沟槽表面形貌

槽尺寸的影响。由图3可知,随着频率的增大,微沟槽宽度几乎不变;沟槽的深度呈现先增大后减小的趋势。分析认为,随着频率的增大,光斑的重合度增大,微沟槽的深度随之增大;当频率继续增大时,重合度过大,产生了重铸现象,会使微沟槽内产生过多的残渣无法溅射出来,同时由于单个脉冲能量的减小,使得微沟槽深度略有降低^[13]。试验研究得到的最佳频率范围为5~8 kHz。

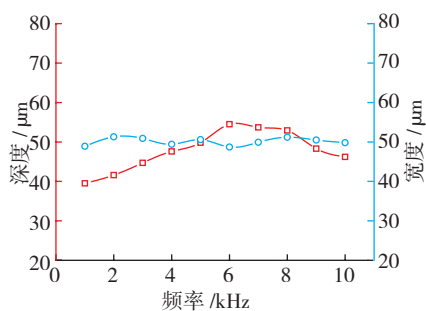


图3 频率对微沟槽尺寸的影响

(3) 扫描次数对微沟槽尺寸的影响。

图4是电流为19A,扫描速度为5mm/s,频率为6kHz时,扫描次数对微沟槽尺寸的影响。由图4可知,扫描次数是影响微沟槽尺寸的重要因素。随着扫描次数的增加,沟槽深度逐渐增加,其宽度变化不大。但由于扫描次数的增加,沟槽深度增加,熔融的陶瓷材料不能溅射出来,使得沟槽表面重铸现象较为严重,因此重复扫描次数不易太多,根据试验研究选择1~3较为合适。

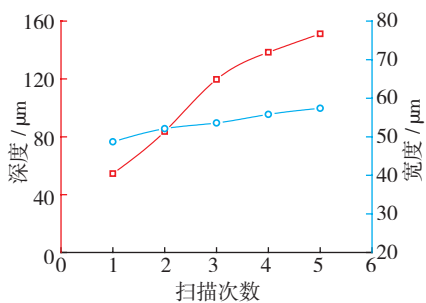
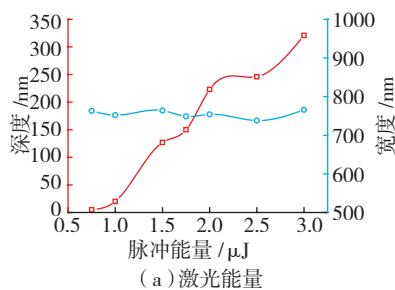


图4 扫描次数对微沟槽尺寸的影响

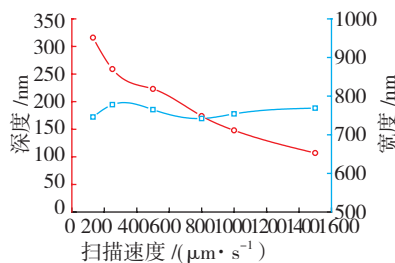
3.2 纳结构的制备工艺

(1) 能量与扫描速度对纳结构尺寸的影响。

图5所示为激光能量与扫描速度对纳结构尺寸的影响。图5(a)为速度为500 μm/s,频率为500Hz时,能量对纳结构尺寸的影响;图5(b)为能量为2 μJ,频率为500Hz时,扫描速度对纳结构尺寸的影响。由图5可知,不同能量与扫描速度下,纳结构的宽度基本不变,这与纳结构的形成是由强激光产生的电子密度波与入射光相干干涉机理是一致的。织构烧蚀深度随着能量的增大而增大,随着速度的增加逐渐减小。分析认为随着能量的增加,沉积在试样表面的总能量增大,更多的材料被烧蚀溅射出去;而随着速度的增大,作用在试样表面的有效脉冲个数减少,沉积试样表面的能量变小,从而使得纳结构的深度变浅。



(a) 激光能量

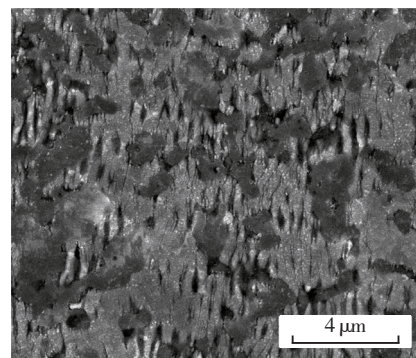


(b) 扫描速度

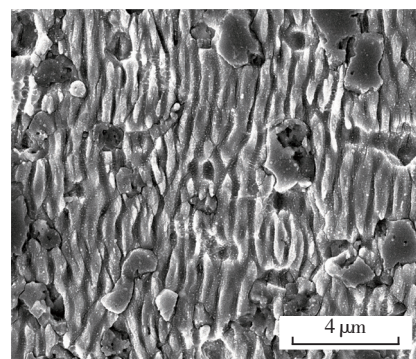
图5 激光能量与扫描速度对纳结构尺寸的影响

试验研究发现,当能量较小时,低速下试样表面出现了少量的纳米波纹织构,速度增大时,试样表面几乎没有纳米波纹织构形成;当能量增大时,低速下试样表面出现了模糊纳米波纹织构及较多的粒状结构,速度增大时,形成的纳米波纹织构较为清晰且相对连续;当速度继续增大时,织构相对较少且较为模糊;当能量过大时,无论速度的大小,其试样

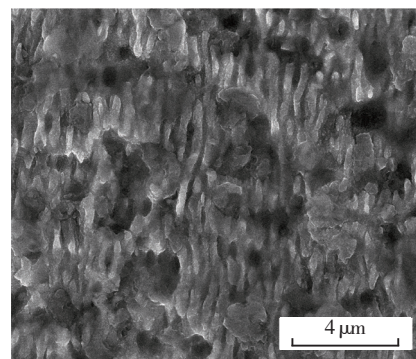
表面都出现了相对无序且模糊的纳米波纹织构及大量的粒状结构。分析认为当能量较低及扫描速度较大时,沉积在试样表面的能量较小,材料的移除率较小,形成的纳米波纹织构较少;当能量增大且速度降低时,沉积在试样表面的能量较多,材料的移除率相对较多,形成了较为清晰且连续的纳米波纹织构;当能量过大且速度相对较小时,沉积在试样表面能量过多,使试样表面烧蚀较为严重,形成了较为模糊的纳米波纹织构及较多的粒状结构。图6为不同能



(a) 1 μJ, 130 μm/s



(b) 2 μJ, 500 μm/s



(c) 3 μJ, 1000 μm/s

图6 不同试验参数下纳米波纹织构表面形貌

量与扫描速度下纳结构的形貌。因此,为了保证加工质量,必须选择适当的激光能量与扫描速度,试验研究获得的最佳参数为能量 $1.75 \sim 2 \mu\text{J}$, 速度 $500 \sim 800 \mu\text{m/s}$ 。

(2) 扫描次数对纳结构尺寸的影响。

图 7 为 $1.75 \mu\text{J}$, $500 \mu\text{m/s}$ 和 $2 \mu\text{J}$, $500 \mu\text{m/s}$ 条件下纳米结构烧蚀深度随扫描次数的变化。由图 7 可见,纳米结构深度随着扫描次数的增加近似呈线性增大的趋势。但是由于扫描次数的增加,沉积在试样表面的能量不断增大,使得试样表面烧蚀越来越严重,产生了紊乱的纳米波状结构及较多的粒状结构。由试验可知,重复次数在 3 次以内,得到表面纳米沟槽结构较好。

综合考虑加工效率与加工精

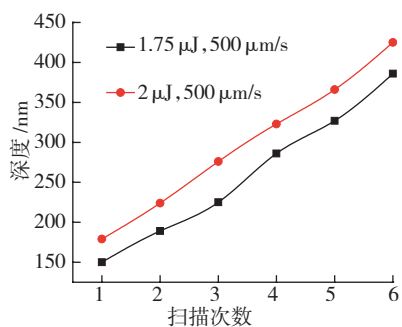
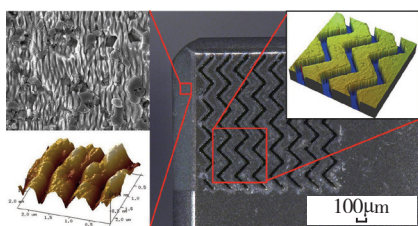
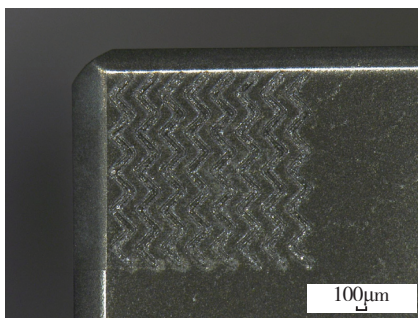


图7 扫描次数对纳结构深度的影响



(a) 未填充固体润滑剂刀具形貌



(b) 填充固体润滑剂刀具形貌

图8 微纳复合结构自润滑陶瓷刀具

度,试验使用微纳结构的制备参数如下:微结构加工电流为 19A , 频率为 6kHz , 扫描速度为 5mm/s , 扫描 1 次; 纳结构加工能量为 $1.75 \mu\text{J}$, 扫描速度为 $500 \mu\text{m/s}$, 扫描 1 次。试验在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷刀具前刀面与负倒棱处分别加工出微纳结构,并分别在制备出的微纳米结构中填充粒度小于 20nm 的 MoS_2 固体润滑剂。图 8 所示为试验制备的微纳复合结构自润滑陶瓷刀具。

微纳复合结构自润滑陶瓷刀具的切削性能

1 试验条件

切削试验在 CA6140 普通车床上进行,工件材料为 45 淬火钢 ($\text{HRC}40\sim 50$), 车削方式为连续干式切削。使用刀具为传统的未加工结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷刀具 (AS) 与微纳复合结构自润滑陶瓷刀具 (AT), 两种刀具基体材料成分与刀具结构完全相同。刀具几何参数为: 前角 $\gamma = -5^\circ$, 后角 $\alpha = 5^\circ$, 刃倾角 $\lambda_0 = -5^\circ$, 主偏角 $K_r = 45^\circ$, 倒棱为 $0.25\text{mm} \times (-8)^\circ$, 刀尖圆弧半径 $r_c = 0.2\text{mm}$ 。切削条件: 切削速度 $v = 80 \sim 260\text{m/min}$, 进给量 $f = 0.2\text{mm/r}$, 切削深度 $a_p = 0.2\text{mm}$ 。试验采用 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) 观测刀具磨损形貌。

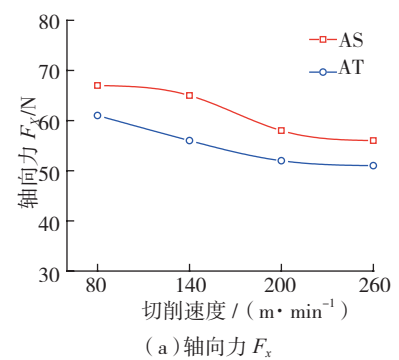
2 试验结果与分析

2.1 切削力

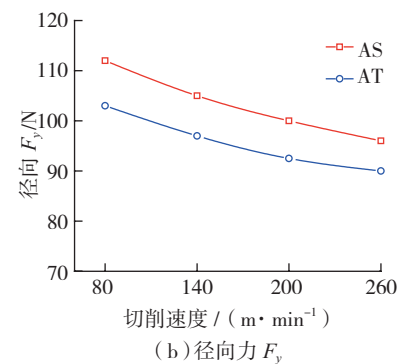
图 9 所示为两种不同刀具切削力随切削速度的变化曲线。由图可见, 不同切削速度下, 三向切削力都随着速度的增加呈现下降的趋势, 相同实验条件下, AT 刀具三向切削力明显小于 AS 刀具。试验结果表明, 微纳复合结构自润滑陶瓷刀具具有显著的降低切削力的作用。

2.2 切削温度

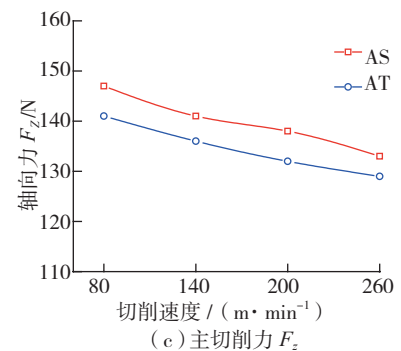
试验中采用 TH5104 型红外热



(a) 轴向力 F_x



(b) 径向力 F_y



(c) 主切削力 F_z

图9 切削力随切削速度的变化曲线

像仪测量切削温度, 将测量的切削温度分布图中最高的温度作为切削条件下的切削温度, 绘制切削温度随切削速度的变化曲线如图 10 所示。试验结果表明, 随着切削速度的增大, 切削温度升高; 相同试验条件下, AT 刀具切削温度要小于 AS 刀具。

2.3 磨损形貌

图 11 所示切削速度为 200m/min , 切削深度为 0.2mm , 进给量为 0.2mm/r , 切削时间为 15min 后, 两种不同刀具前刀面的磨损形貌。图 11 (a) 为 AS 刀具前刀面磨损形貌; 图 11 (b) 为 AT 刀具前刀面磨损形貌。由图 11 可见, 刀具磨损表面出现了明显的磨损凹坑; 通过对比发现, AT 刀具磨损

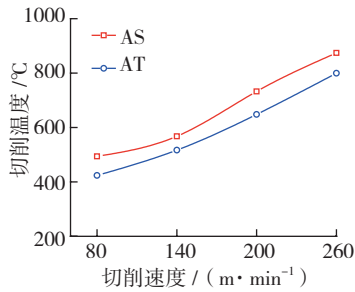
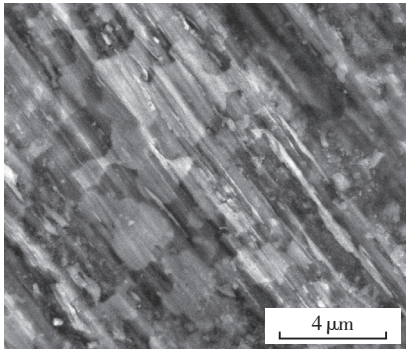
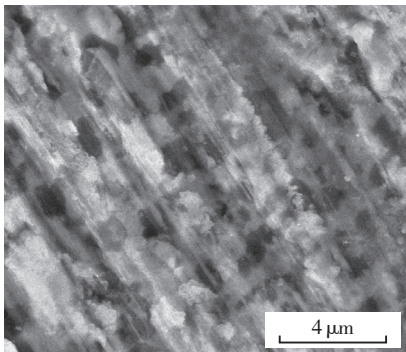


图10 切削温度随切削速度的变化曲线



(a) AS 刀具前面磨损区域放大形貌



(b) AT 刀具前面磨损区域放大形貌

图11 两种不同刀具前刀面磨损形貌

表面的犁沟相对较浅,其磨损相对轻微,表面纳米结构完全磨损掉,微结构仍然存在。同时发现,AT刀具的磨损长度较AS刀具略微减小。

2.4 讨论

切削试验结果表明,微纳复合结构自润滑刀具能够有效的降低三向切削力,降低切削温度,减少刀具前刀面的磨损。分析认为刀具切削性能的改善主要归因于刀具前刀面的自润滑作用,研究文献指出^[14-15],结构本身的自润滑作用与润滑剂的双重润滑机理是提高刀具耐磨损能力的主要原因。

金属切削过程中,三向切削力及

刀屑接触面的摩擦力可以表示为^[16-17]:

$$F_x = \frac{F_f}{\sin\beta} \sin(\beta - \gamma_0) \cos(\psi_r + \psi_\lambda) = a_w l_f \tau_c \left(\cos\gamma_0 - \frac{\sin\gamma_0}{\tan\beta} \right) \cos(\psi_r + \psi_\lambda), \quad (1)$$

$$F_y = \frac{F_f}{\sin\beta} \sin(\beta - \gamma_0) \sin(\psi_r + \psi_\lambda) = a_w l_f \tau_c \left(\cos\gamma_0 - \frac{\sin\gamma_0}{\tan\beta} \right) \sin(\psi_r + \psi_\lambda) \quad (2)$$

$$F_z = \frac{F_f}{\sin\beta} \cos(\beta - \gamma_0) = a_w l_f \tau_c \left(\sin\gamma_0 - \frac{\cos\gamma_0}{\tan\beta} \right), \quad (3)$$

$$F_f = A_r \tau_c = a_w l_f \tau_c \quad (4)$$

式中, a_w 为切削宽度, l_f 为刀屑接触长度, τ_c 为平均剪切强度, β 为摩擦角, γ_0 为前角, ψ_r 为余偏角, ψ_λ 为流屑角。

由式(1)~(3)可以看出,三向切削力与刀屑接触长度 l_f 和刀屑接触面平均剪切强度 τ_c 成正比。一方面由于结构的存在,使得刀屑接触面积及接触长度变小,另一方面认为是微纳结构中填充了固体润滑剂,切削时,切屑与负倒棱及前刀面的摩擦作用,使得存储在微纳结构中的润滑剂能够有效的涂覆在倒棱及前刀面上,形成润滑层,降低了刀屑接触面的剪切强度,从而起到减少摩擦降低切削力的作用。切削过程中的热主要是由刀屑及刀工之间的摩擦产生的,根据式(4),刀屑之间的摩擦力与刀屑接触长度 l_f 和刀屑接触面平均剪切强度 τ_c 成正比。切削过程中由于微纳结构的存在及润滑剂的存在减小刀屑接触长度及刀屑接触面的平均剪切强度,故能减小刀屑之间的摩擦,从而能够降低前刀面摩擦热的产生;另一方面接触区域的微纳结构的存在,在一定程度上增大了刀具的热传导面积,刀屑接触区域之外的微纳结构增大刀具表面与空气的对流换热面积,从而能够有效地降低切削温度。

试验研究发现在切削过程的初始阶段,主要是负倒棱与切屑之间的摩擦磨损,起主要作用的是负倒棱上的纳米结构。由刀具磨损形貌(图11)可见,切削15min后纳米结构几乎完全磨损掉,因此随着切削过程的继续进行,刀具前刀面磨损较为剧烈,起作用的将是前刀面的微米结构。因此,试验设计的微纳复合结构自润滑陶瓷刀具能够有效的在整个切削过程中起到很好的自润滑作用。

结 论

(1) 微沟槽的深度随泵浦电流的增大而增大,随扫描速度的增大而减小,随着频率的增大先增大后减小,随扫描次数的增大而增大;宽度随着泵浦电流的增大先减小后增大,随着扫描速度、频率及扫描次数的增大变化趋势不大。综合考虑加工效率与加工精度,得出微结构最合理的加工参数为:泵浦电流18~20A,扫描速度4~6mm/s,频率5~8kHz,扫描次数1~3次。

(2) 纳米结构的深度随着能量的增大而增大,随着速度的增加逐渐减小,随着扫描次数的增加近似呈线性增大的趋势;不同试验条件下,纳米结构宽度变化不大。试验得出纳米结构最合理的加工参数为:能量1.75~2μJ,速度为500~800μm/s,扫描次数1~3次。

(3) 制备的微纳复合结构自润滑陶瓷刀具在整个的切削过程中,能够有效地降低切削力和切削温度,减小刀具前刀面的磨损。由刀具的磨损形貌可见,在初始切削过程中,起主要作用的是纳米结构,随着切削过程的继续进行,微米结构起主要的作用,因此,微纳结构良好的结合能够实现整个切削过程的自润滑作用,提高刀具的耐磨性能。

本文共有参考文献17篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)