

超声辅助纳米流体微量润滑车削钛合金实验研究

郑金滔 马浩然 王进 刘国梁*

青岛理工大学机械与汽车工程学院,青岛,266500

摘要:将超声振动切削加工技术与纳米流体微量润滑技术相结合,开展了不同振动方向和切削速度下的钛合金超声辅助纳米流体微量润滑车削实验,分析了金刚石、石墨烯和金刚石/石墨烯复合纳米流体与超声振动的协同作用机理。研究结果显示,不同润滑方式下,施加不同方向的超声振动均可减小主切削力并增大加工表面残余压应力,但切深方向的超声振动可能增大表面粗糙度;超声振动切削中,石墨烯纳米片可以产生层间剪切效应并增强换热,具有减小切削力、减小表面粗糙度和增大残余压应力的效果;金刚石纳米粒子在高速和进给方向振动条件下可以产生划擦抛光效应,显著减小加工表面粗糙度, Ra 最大减幅达50%;金刚石/石墨烯复合纳米流体性能均衡,在速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削、速度-切深方向椭圆超声辅助高速切削以及速度-进给方向椭圆超声辅助切削三种方式下较棕榈油润滑均能减小主切削力和表面粗糙度,主切削力和 Ra 最大减幅均超过20%。

关键词:超声振动;微量润滑;纳米流体;钛合金;车削加工

中图分类号:TG156

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Study of Ultrasonic Vibration Assisted Turning Titanium Alloys with Nanofluid MQL

ZHENG Jintao MA Haoran WANG Jin LIU Guoliang*

School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong, 266520

Abstract:By combining the ultrasonic vibration assisted cutting with nanofluid MQL, ultrasonic vibration assisted turning experiments were conducted for titanium alloys with different vibration directions and cutting speeds. The synergistic mechanism among diamond, graphene, diamond/graphene composite nanofluids and ultrasonic vibration was analysed. The results show that all modes of ultrasonic vibration may reduce the main cutting force and increase the compressive residual stress, but the ultrasonic vibration in depth of cut direction may enlarge surface roughness. During the ultrasonic vibration assisted cutting, graphene nanosheets may generate interlayer shear effect and enhance heat transfer, thus reducing the cutting forces, decreasing the values of surface roughness, and increasing the compressive residual stresses. The dominant effects of diamond nanoparticles are scratching and polishing under the conditions of high-speed cutting and vibrations in feed direction, which may reduce the values of surface roughness of Ra to 50%. Diamond/graphene composite nanofluid exhibits balanced performances and reduces the main cutting force and surface roughness than that of palm oil in all three cutting modes, namely the speed-depth of cut direction elliptical ultrasonic vibration-assisted low-speed cutting, the speed-depth of cut direction elliptical ultrasonic vibration-assisted high-speed cutting and the speed-feed direction elliptical ultrasonic vibration-assisted cutting. The maximum reductions of main cutting force and Ra were both larger than 20%.

Key words: ultrasonic vibration; minimum quantity lubrication(MQL); nanofluid; titanium alloy; turning

0 引言

切削液被广泛应用于切削加工过程,用于减小切削力、降低切削温度、延长刀具寿命并改善加工表面完整性等^[1]。随着技术的进步,传统浇注式冷却润滑在成本和环境等方面的缺陷越来越受

到关注。例如,浇注式冷却润滑难以将切削液输运进入切削区域,切削液利用率较低,为了达到较好的冷却润滑效果,切削液用量大,切削液成本占到总制造成本的7~17%^[2-3];矿物油基切削液对人体健康和环境生态具有巨大的威胁^[4]。因此,研究更加绿色高效的冷却润滑技术已成为切削加工领域的一项重要任务。

收稿日期:2024-05-21

基金项目:国家自然科学基金(52375446,52005281)

近年来,研究人员陆续提出了干切削、微量润滑(minimum quantity lubrication, MQL)切削、低温切削等新型绿色切削加工技术^[5-7]。干切削完全避免了切削液的使用,但恶劣的切削工况会导致刀具的快速磨损,进而破坏加工表面完整性^[8]。低温切削是在加工过程中采用液氮、液态二氧化碳或低温气体作为冷却剂,既具有高效的冷却性能,又不会产生污染物^[9],但这些低温流体的润滑性能有限,且成本相对较高。相比之下,MQL是将压缩气体与少量切削液混合形成高速喷射的雾滴以提高切削液进入切削区的效率,可以在获得较好润滑效果的同时显著减少切削液的消耗^[10]。

然而,较小的切削液流量限制了MQL技术的润滑和冷却性能,难以满足难加工材料的高速切削加工需求。为此,研究人员提出通过在切削液中加入适量纳米颗粒形成纳米流体来提高MQL液滴的导热和润滑性能,即纳米流体微量润滑技术(nanofluid minimum quantity lubrication, NMQL)^[11]。目前,研究人员已经研究了 Al_2O_3 、石墨烯、CNTs、 TiO_2 、 MoS_2 、hBN、Ag、 ZnO 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 和金刚石等纳米流体在车削、铣削、钻孔和磨削等不同加工方法下的切削性能^[11-16]。研究发现,这些纳米颗粒/纳米片因其形状和结构特征的不同而具有不同的润滑和冷却性能。 Al_2O_3 和金刚石纳米颗粒通过将滑动摩擦转化为滚动摩擦来降低刀具-切屑/工件的摩擦因数^[11-12]。 MoS_2 和石墨烯具有层状结构,具有优异的沉积成膜性能,可以将两个滑动的金属表面转化为分子层的相对滑移,从而降低摩擦因数^[15]。此外,石墨还具有极高的导热性,可以显著降低切削温度^[16]。为了获得更好的润滑和冷却性能,研究人员设计和测试了包含多种纳米颗粒的复合纳米流体。SHARMA等^[17]以 Al_2O_3 和石墨烯作为复合纳米流体对AISI 304钢进行了NMQL车削,取得了较好的效果。

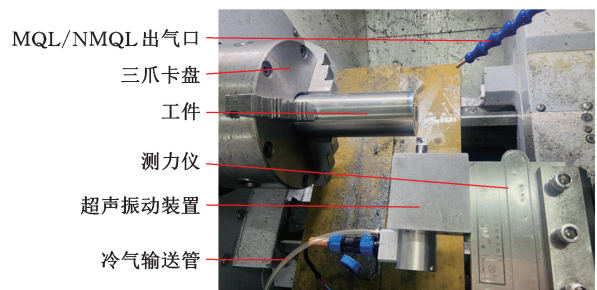
切削加工中,刀具与工件/切屑密切接触,形成封闭的切削区,纳米流体气雾射流难以直接进入刀具-切屑/刀具-工件界面,冷却润滑效果有限,这是NMQL加工工艺急需解决的制约因素。近年来,超声振动加工技术(ultrasonic vibration assisted machining, UVAM)在车削、磨削、铣削和钻孔等领域得到了广泛的应用^[18-19]。刀具的高频振动可以将连续切削过程转变为间歇加工过程,从而降低切削温度,减小切削力和刀具磨损,提高加工表面的完整性。此外,超声振动可以打

破封闭的切削区并产生泵送现象,从而显著提高切削液的有效利用率。因此,将UVAM与NMQL相结合有望产生协同增效,提高难加工材料的切削加工性能。HOANG等^[20]将石墨烯NMQL与超声振动深孔钻削工艺(UVAD)相结合,对AISI SUS 304不锈钢进行加工,获得了较传统钻削更长的刀具寿命和更好的加工质量。GAO等^[21]在超声振动磨削(UVAG)过程中采用了多种类型复合纳米流体的微量润滑技术,证明NMQL和UVAG的结合可以进一步降低磨削温度,减小磨削力和摩擦因数。

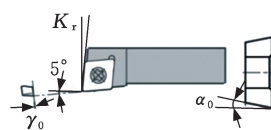
现有研究表明,超声振动加工技术与纳米流体微量润滑技术具有良好的结合潜力,因此,本研究将超声振动车削技术(ultrasonic vibration assisted turning, UVAT)与NMQL技术相结合,开展了超声辅助纳米流体微量润滑车削钛合金的实验研究,以采用金刚石、石墨烯和金刚石/石墨烯复合纳米流体作为微量润滑介质,在速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削、速度-切深方向椭圆超声辅助高速切削和速度-进给方向椭圆超声辅助切削三种工艺下开展了实验,从切削力、加工表面完整性和刀具磨损等方面对比分析了超声振动与纳米流体对切削过程的协同作用机理。

1 实验设置与方案

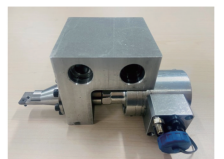
所有切削实验均在CAK3665数控车床上进行,采用自行研制的二维椭圆超声振动装置进行切削,如图1所示,该装置采用偏心圆锥式变幅杆将压电陶瓷产生的轴向超声振动转变为轴向和竖向的二维椭圆振动,轴线和垂直方向振幅分别为



(a) 实验装置



(b) 刀具角度



(c) 偏心圆锥式超声振动装置

图1 超声振动切削实验

Fig.1 UVAT experiment

5 μm 和 4.6 μm, 超声振动频率为 39.35 kHz, 相位差为 90°。加工刀具使用肯纳 CCMT060204 菱形硬质合金刀片, 刀尖圆弧半径为 0.4 mm, 刀具安装在超声变幅杆上后, 前角 γ_0 、后角 α_0 和刃倾角 K_r 分别为 0°、7° 和 5°。实验所用工件材料为 Ti6Al4V 钛合金(宝钛集团有限公司), 力学性能如表 1 所示。

表 1 Ti6Al4V 钛合金的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of Ti6Al4V alloy

密度	抗拉强度	屈服强度	伸长率	断面收缩率
4.5 g/cm ³	1010 MPa	935 MPa	16%	44%

为研究超声振动与纳米流体对切削过程的协同作用机理, 本研究设计了速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削、速度-切深方向椭圆超声辅助高速切削以及速度-进给方向椭圆超声辅助切削三种超声振动切削工艺, 分别如图 2 所示。将金刚石纳米流体微量润滑(DN-MQL)、石墨烯纳米流体微量润滑(GN-MQL)、金刚石/石墨烯复合纳米流体微量润滑(DN+GN-MQL)分别应用于上述三种超声振动切削工艺, 并设置了棕榈油微量润滑(MQL)超声振动切削和无振动湿切削(乳化液浇注式润滑, Wet)工艺作为对照, 共开展了 15 组实验, 如表 2 所示。低速或高速表示切削速度低于或高于刀具-工件分离的临界切削速度 v_0 ($v_0 = 2\pi f_u A_v$, f_u 为超声振动频率; A_v 为竖直方向超声振幅)。

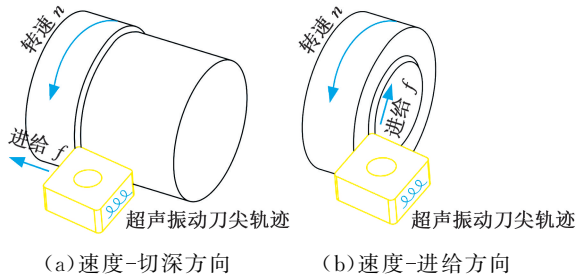


图 2 椭圆超声辅助切削方式示意图

Fig.2 Elliptic UVAT schematic diagram

微量润滑工艺采用金兆节能科技有限公司生产的 KS-2106 微量润滑供油系统, 该系统结构紧凑、操作简便。采用高压空气将纳米流体雾化形成高速运动的气雾射流, 然后喷向加工区域进行冷却润滑, 其中润滑油流量为 60 mL/h, 气体压力为 0.7 MPa。纳米流体均以棕榈油作为基液, 纳米粒子的总质量分数为 0.5%, 金刚石/石墨烯复合纳米流体中金刚石纳米颗粒与石墨烯纳米片的质量比为 1:1。石墨烯纳米片的长度为 1~3 μm, 厚度为 1~5 nm; 金刚石纳米颗粒接近球形, 直径为 50 nm。纳米流体的制备采用两步法: 先

表 2 钛合金切削实验方案

Tab.2 Experimental scheme of titanium alloy cutting

序号	车削位置	振动方向	润滑条件	切削速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	切削深度 a_p/mm
1	外圆	无振动	Wet	30	0.100	0.1
2	外圆			100	0.100	
3	端面			150	0.006	
4	外圆	速度-切深	MQL	30	0.100	
5	外圆	速度-切深		100	0.100	
6	端面	速度-进给		150	0.006	
7	外圆	速度-切深	DN-MQL	30	0.100	
8	外圆	速度-切深		100	0.100	
9	端面	速度-进给		150	0.006	
10	外圆	速度-切深	GN-MQL	30	0.100	
11	外圆	速度-切深		100	0.100	
12	端面	速度-进给		150	0.006	
13	外圆	速度-切深	DN+GN-MQL	30	0.100	
14	外圆	速度-切深		100	0.100	
15	端面	速度-进给		150	0.006	

在基液中加入一定量的纳米颗粒/纳米片和司班-80 分散剂(质量分数为纳米颗粒/纳米片质量的 20%); 然后在 42 kHz、240 W 的条件下进行 60 min 的超声处理。根据预实验, 经过超声处理后, 纳米颗粒/纳米片可以均匀地分散在棕榈油中。

在切削过程中, 用 YDC-III 89B 型压电测力仪测量各切削工况下切削速度和切削深度方向上的切削力。车削加工结束后, 使用 KEYENCE VK-X1000 激光显微镜观察加工表面及刀具后刀面形貌, 并利用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对加工表面及刀具后刀面的形貌和组分进行分析。在此基础上, 根据激光显微镜测量结果, 分析获取加工表面粗糙度指标 R_a (算术平均表面粗糙度) 和 R_z (最大峰谷高度)。采用加拿大 Proto LXR D 型 X 射线残余应力仪测量加工工件表面速度方向的残余应力。为了减小实验结果的误差, 每次切削都使用新刀片进行, 并对每个试样进行 3 次及以上的测量, 计算其平均值作为最终结果。

2 实验结果与讨论

2.1 速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削

速度-切深方向椭圆超声辅助低速 ($v = 30$ m/min) 切削条件下, 不同润滑方式的切削力、表面粗糙度和残余应力如图 3 所示。相比于无振动车削, 刀具施加椭圆超声振动后, 切削过程的切深抗力和加工表面粗糙度均有较为明显的增大, 超声辅助切削表面的 R_a 值大多接近甚至超过 $0.6 \mu m$, 而无振动湿切削的 R_a 值约为 $0.4 \mu m$ 。但是, 椭圆超声辅助切削不仅减小了主切削力, 而

且显著增大了加工表面残余压应力,超声辅助棕榈油微量润滑切削表面的残余压应力值接近无振动湿切削表面的两倍。

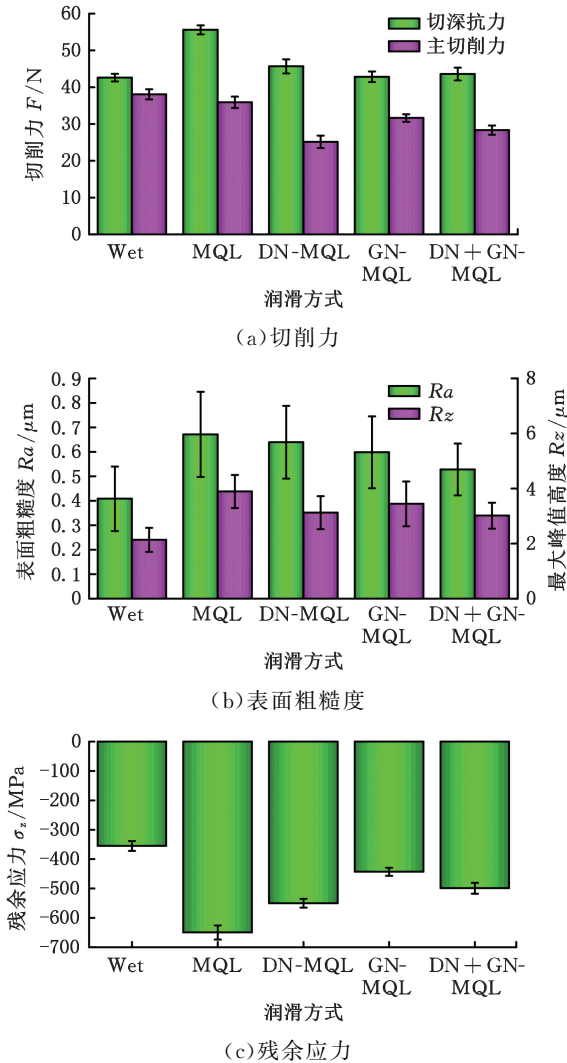


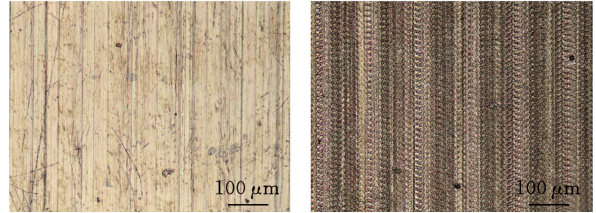
图3 速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削条件下不同润滑方式的切削力、表面粗糙度和残余应力

Fig.3 Cutting forces, surface roughness and surface residual stresses of low-speed velocity-depth direction UVAT with different lubrication methods

实验中采用的切削速度低于超声振动切削的刀-屑分离临界切削速度 v_0 ($v_0 = 2\pi f_u A_v = 68.2$ m/min, $f_u = 39.35$ kHz, $A_v = 4.6$ μm), 刀具和工件/切屑周期性分离, 可以避免刀具与工件/切屑持续接触带来的应力和热量累积, 减小刀具与工件/切屑之间的摩擦力及黏结, 从而使主切削力减小。但是, 刀具沿切深方向振动时会对工件已加工表面的弹性回复层造成冲击, 产生额外的冲击抗力, 所以超声振动切削条件下的切深抗力更大。

刀具对工件表面的超声冲击作用除了产生更大的切深抗力外, 还会促使被冲击区域工件表层材料产生更大的塑性变形。一方面会在加工表面

产生周期性纹理微结构, 产生额外的残留高度, 导致表面粗糙度的增大; 另一方面会在工件表层材料中引入更大的机械应力, 表现为更大的残余压应力。图4所示为无振动低速 ($v = 30$ m/min) 湿切削与速度-切深方向椭圆超声辅助棕榈油微量润滑低速切削所获得的加工表面形貌, 可以看出, 超声振动切削表面存在大量均匀分布的凹坑形微结构。



(a) 无振动低速湿切削 (b) 速度-切深方向椭圆超声辅助 MQL 低速切削

图4 切削加工表面形貌

Fig.4 Surface topography of cutting processing

图3中的结果还显示, 超声振动切削中, 不同微量润滑介质对加工性能也有显著的影响。棕榈油微量润滑工况获得了最大的切削力、加工表面粗糙度和残余压应力。相比之下, 采用不同类型纳米流体进行微量润滑均可以减小切削力和加工表面粗糙度, 证明各类型纳米粒子的引入均起到了良好的减摩润滑效果。

椭圆超声辅助低速切削过程中, 刀具与工件/切屑周期性分离, 纳米流体雾滴可以高效地进入切削区, 携带大量的纳米粒子/纳米片进入刀具-切屑/刀具-工件界面, 充分发挥其减摩润滑作用, 降低摩擦力以及减少刀具对已加工表面的划擦和黏结, 实现切削力和表面粗糙度的减小。图5和图6所示分别为金刚石和石墨烯纳米流体微量润滑条件下的切削表面形貌及能谱测试结果。由图5可知, 工件已加工表面吸附有白色球形颗粒, 能谱测试显示其富含碳元素, 可以判定其为金刚石纳米粒子, 其粒径不超过 100 nm, 与实验采用的金刚石纳米粒子的粒径也一致。图6的结果显示, 工件表面嵌入黑色斑块呈片状, 主要成分为碳元素, 可以判断其为贴敷在工件表面的石墨烯纳米片。上述结果表明, 金刚石纳米粒子与石墨烯纳米片均进入了刀具/工件切削界面, 可以起到减摩润滑的作用, 使得切削力和表面粗糙度减小。

椭圆超声辅助低速切削过程中, 润滑工况良好, 切削温度较低, 难以引起工件表层材料的塑性变形及剧烈相变, 所以热应力和相变应力可以忽略不计, 由切削力主导的机械应力是加工表面残余应力的主要成因, 因此, 相比于棕榈油微量润滑

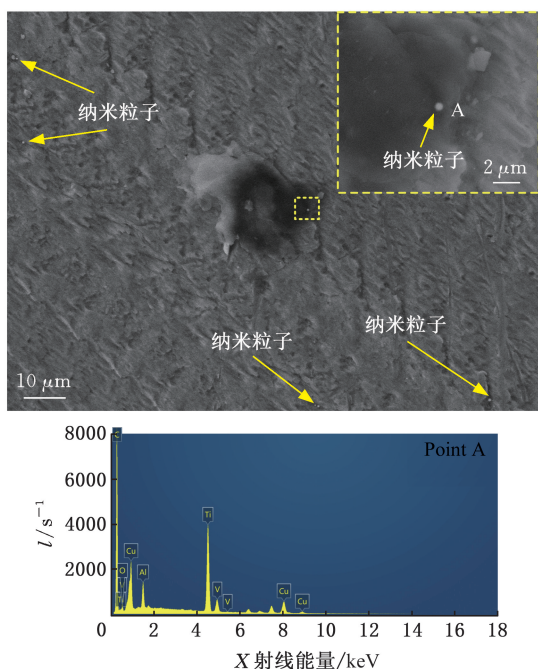


图5 速度-切深方向椭圆超声辅助金刚石纳米流体微量润滑低速切削表面形貌及能谱测试结果

Fig.5 Surface morphology and energy spectrum test results under low-speed velocity-depth direction ellipse UVAT with DN-MQL

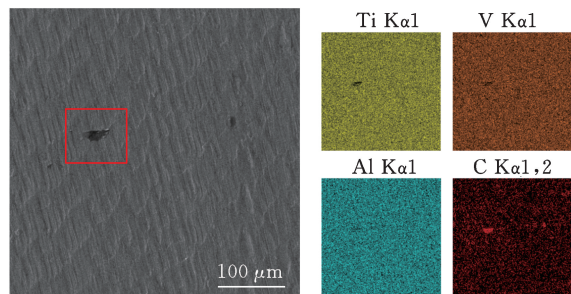


图6 速度-切深方向椭圆超声辅助石墨烯纳米流体微量润滑低速切削表面形貌及能谱测试结果

Fig.6 Surface morphology and energy spectrum test results under low-speed velocity-depth direction ellipse UVAT with GN-MQL

条件,采用纳米流体进行微量润滑后,加工表面的残余压应力也随着切削力的减小而减小。

从图3中可以发现,三种不同类型纳米流体中,金刚石纳米流体微量润滑获得了最小的主切削力,表现出了更好的减摩润滑效果,但该条件下的切深抗力大于石墨烯和复合纳米流体润滑工况,加工表面残余压应力和粗糙度 R_a 值也较大;石墨烯纳米流体和金刚石/石墨烯复合纳米流体可以更有效地减小加工表面粗糙度,其中,复合纳米流体微量润滑条件下的 R_a 和 R_z 值均小于其余微量润滑工况。这一结果与文献[22]中采用无振动磨削实验研究获得的结果不一致,其结果显示,相比于氧化铝等三维颗粒形结构的纳米材料,

具有二维层状结构的石墨烯润滑性能更好,导致了最大的切向力下降百分比。

图5中的结果证明,金刚石纳米粒子进入了刀具/工件切削界面,并且凭借本身的高硬度在切削过程中保持了其原本的三维球形结构。本实验中刀具相对于工件沿切深方向和速度方向做椭圆运动,存在水平方向速度分量。当刀具向工件表面运动并接触工件表面散布的金刚石纳米粒子时,刀具相对于工件的水平运动分量会促使金刚石纳米粒子产生“类轴承”的作用,变滑动摩擦为滚动摩擦,极大地减小摩擦力,从而有效减小主切削力,如图7所示。但是,刀具相对于工件的径向冲击会将纳米粒子向工件材料内部挤压,产生额外的切深抗力。相比于石墨烯纳米片,金刚石纳米粒子被挤入深度更大,产生的额外抗力也就更大,因此它导致的切深抗力较大。更大的切深抗力会导致工件表层材料更大的塑性变形,从而引入更大的机械应力,最终表现为更大的残余压应力。

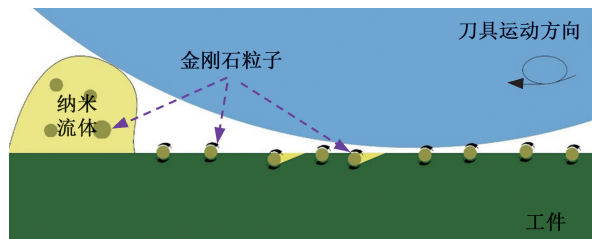


图7 金刚石纳米粒子在刀具/工件界面的摩擦学机理
Fig.7 Tribological mechanism of diamond nanoparticles at the tool/workpiece interface

二维层状结构的石墨烯纳米片主要依靠层间剪切效应来实现刀具与切屑/工件之间的减摩增润。石墨烯的分子结构如图8所示,分子层间作用力较弱。当工件表面的石墨烯纳米片承受超声振动刀具的斜向冲击时,会随着刀具与工件的相对滑动而产生层间剪切行为。由于石墨烯分子层间的剪切强度远小于工件材料的剪切强度,所以可以减小刀具/工件界面的摩擦力,减小切削力。图6中工件表面贴敷的石墨烯纳米片边长为 $20\sim 30\ \mu\text{m}$,远大于实验所采用的石墨烯纳米片尺寸(边长 $1\sim 3\ \mu\text{m}$),而且颜色呈现中间深,边缘浅。工件表面石墨烯纳米片的面积增大,除了发生图9所示的重叠团聚以外,层间剪切效应的发生也是其重要成因之一。

为了更清晰地分析金刚石与石墨烯纳米粒子在刀具/工件界面的减摩机理,采用LAMMPS平台对超声辅助纳米流体微量润滑切削过程进行了分子动力学模拟,利用OVITO对模拟结果进行

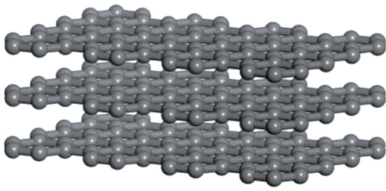


图 8 石墨烯的分子结构

Fig.8 The molecular structure of graphene

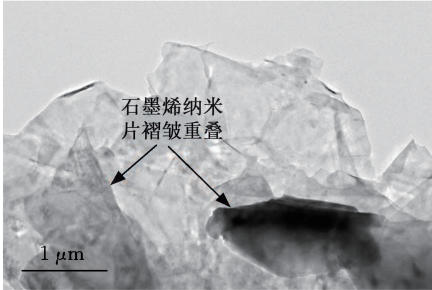


图 9 石墨烯纳米流体冷冻蚀刻复型试样中石墨烯纳米片分散状态 TEM 观测结果

Fig.9 TEM result of graphene nanosheets dispersion state in graphene nanofluid freeze-etched replica samples

可视化,建立的分子动力学模型如图 10 所示。工件材料设定为 Ti-Al-V 三组分合金的简化模型。Ti、Al 和 V 原子的比例分别为 90%、6% 和 4%，三种元素随机分布在工件中。工件尺寸为 30 nm×11 nm×5 nm。将整个工件模型沿 Z 轴正方向依次划分为边界层、恒温层和牛顿层。边界层和恒温层的厚度均为 0.5 nm。以立方氮化硼(CBN)单晶作为刀具材料,设定其 X 方向速度为 50 m/s,Z 方向速度为-10 m/s,以模拟椭圆振动刀具向工件表面运动的斜向冲击过程。分别以金刚石和石墨烯纳米流体为润滑液进行模拟,时长均为 0.225 ns。由图 11 所示的模拟结果可知,金刚石纳米粒子在刀具与工件界面产生了滚动和滑移,模拟过程中金刚石纳米粒子的位移约为 6.2 nm,旋转角度约为 260°;石墨烯纳米片在工件表面产生了约 7.5 nm 的位移,同时发生了一定的层间剪切。分子动力学模拟结果证明了上述对金刚石和石墨烯纳米粒子在超声振动切削界面减摩增润机理的分析是准确的。

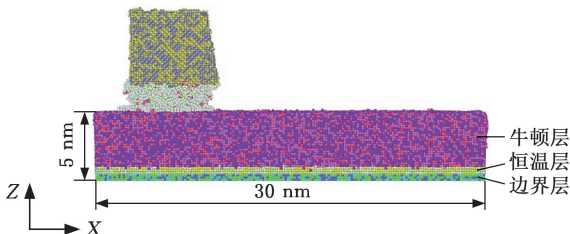


图 10 刀具/工件界面纳米粒子减摩机理的分子动力学模型

Fig.10 Molecular dynamics model of nanoparticle wear reduction mechanism at tool/workpiece interface

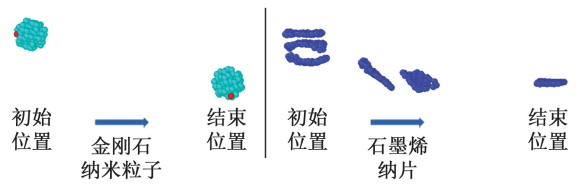


图 11 金刚石和石墨烯纳米粒子在椭圆超声辅助低速切削过程中的摩擦学行为

Fig.11 Tribological behavior of diamond and graphene nanoparticles in low-speed elliptical UVAT processes

由上述分析可知,文献[22]的实验结果中石墨烯纳米片的减摩效果优于三维球形纳米粒子,与本文结果相反,主要是由加工方式的不同导致的。石墨烯纳米片的层间剪切滑移主要由刀具与工件水平方向的相对滑动进行驱动。超声振动切削过程中,刀具与工件的接触是瞬时过程,相比于无振动磨削过程,刀具与工件接触时间较短,水平方向相对滑移距离短。由图 6 和图 9 的结果可知,石墨烯纳米片会相互重叠,在工件表面形成较大面积的片层。当实际运动方向为斜向的超声振动刀具冲击工件表面时,大面积且柔软易变形的石墨烯纳米片会包覆在刀具切削刃表面一起运动,导致超声振动切削刀具-工件界面石墨烯纳米片的层间剪切滑移不如磨削过程中磨粒-工件界面充分,减小摩擦因数的作用效果不够显著。相反,超声振动切削中刀具与工件的分离可以使金刚石纳米粒子更多地进入刀具/工件切削界面,并自由分布在工件表面。当刀具向工件表面运动并接触工件表面散布的金刚石纳米粒子时,刀具相对于工件的水平运动分量会促使金刚石纳米粒子产生“类轴承”的作用,变滑动摩擦为滚动摩擦,极大地减小摩擦力,从而有效减小主切削力。磨削过程中,砂轮与工件持续紧密接触,三维纳米粒子难以高效进入加工界面,部分挤入砂轮/工件界面的粒子也更多地被挤压进入工件表面,而难以自由分散在工件表面进行滚动,“类轴承”作用难以充分发挥。因此,两次实验结果的不同是超声振动与纳米流体协同作用的典型效果之一。

但是,包覆在切削刃表面或铺展贴敷在工件表面的石墨烯纳米片层可有效减少刀具对工件表面的划擦以及刀具-工件材料的黏结,从而减小加工表面粗糙度。金刚石纳米粒子体积较小,对工件表面的保护作用不如石墨烯纳米片,所以导致其表面粗糙度大于石墨烯纳米流体和复合纳米流体润滑工况。

2.2 速度-切深方向椭圆超声辅助高速切削

速度-切深方向椭圆超声辅助高速($v = 100$

m/min) 切削条件下, 不同润滑方式的切削力、表面粗糙度和残余应力如图 12 所示。

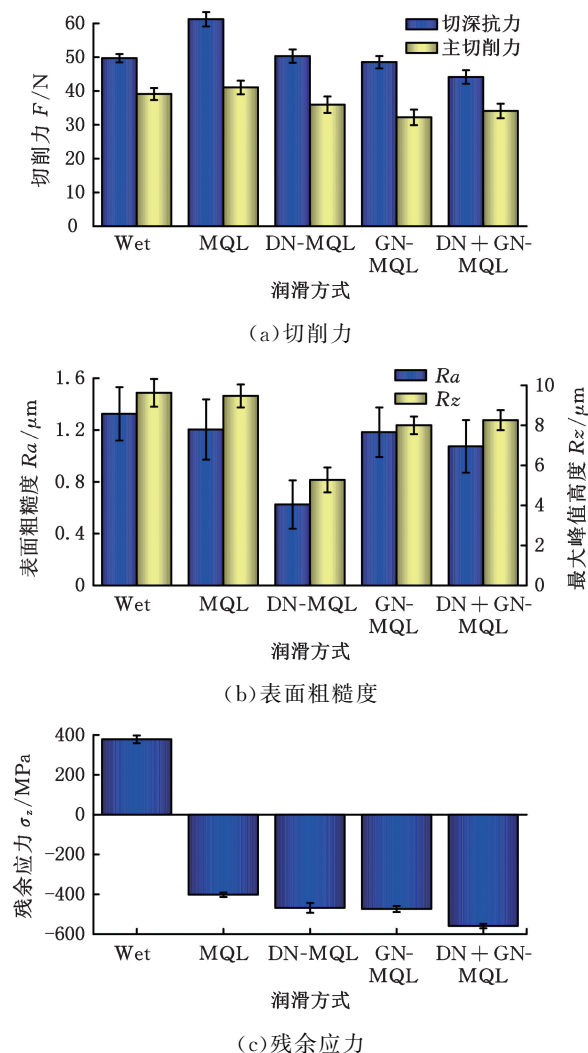


图 12 速度-切深方向椭圆超声辅助高速切削条件下不同润滑方式的切削力、表面粗糙度和表面残余应力

Fig.12 Cutting forces, surface roughness and surface residual stresses of high-speed velocity-depth direction UVAT with different lubrication methods

对比速度-切深方向椭圆超声辅助低速和高速切削的实验结果可以发现, 切削速度提高后, 刀具超声振动以及不同润滑条件对加工性能的影响规律有一定的变化。首先, 高速切削工况下, 刀具超声振动引起的主切削力减小效应减弱, 导致 MQL 工况下的主切削力甚至大于无振动湿切削工况, 而不同类型纳米流体微量润滑切削条件下的切削力虽然较 MQL 工况小, 但减幅较小, 主切削力的减幅均不超过 10 N, 证明纳米流体相比于棕榈油的减摩增润效果减弱。其次, 高速切削条件下, 超声辅助微量切削技术均可以较无振动湿切削工艺产生更光滑的表面, 而且超声辅助金刚石纳米流体微量润滑技术获得了最小的表面粗糙度。最后, 高速切削条件下, 刀具超声振动依然可

以增大加工表面的残余压应力, 但低速切削中获得最大表面残余压应力的 MQL 工况的加工表面残余压应力反而较各纳米流体微量润滑工况小, 复合纳米流体微量润滑条件下获得了最大的残余压应力。

不同切削速度下, 刀具超声振动以及不同润滑条件对加工性能的影响规律变化主要是由切削区工况变化导致的。速度-切深方向椭圆超声辅助高速 ($v=100$ m/min) 切削条件下, 切削速度超过了刀-屑分离的临界速度 ($v_0=68.2$ m/min), 刀具和切屑之间的分离特性会消失, 刀具与切屑持续接触, 导致超声振动减小摩擦力的效果减弱。

此外, 刀具与切屑的持续接触还会阻碍微量润滑射流进入切削区, 导致进入切削界面的纳米粒子数量下降, 直接降低纳米流体的作用效果。而且, 随着切削速度的提高, 切削区工件材料变形加剧, 产热量增大, 刀具与工件材料黏结加剧, 会使刀具-工件界面的接触状态随时变化, 进入其中的纳米粒子/纳米片均可能被黏附的材料所包裹或压制, 难以充分发挥其减摩作用。金刚石纳米粒子更多的嵌入刀具/工件界面, 被刀具推动产生划擦作用, 而不是滚动以产生滚珠减摩效应, 而石墨烯纳米片的层间剪切程度也会受到限制, 进一步降低纳米流体的减摩增润效应, 导致切削力的减幅较小。图 13 所示为速度-切深方向椭圆超声辅助石墨烯纳米流体微量润滑高速 ($v=100$ m/min) 切削的刀具后刀面形貌及能谱测试结果, 可以发现, 刀具后刀面存在大面积的工件材料黏附。

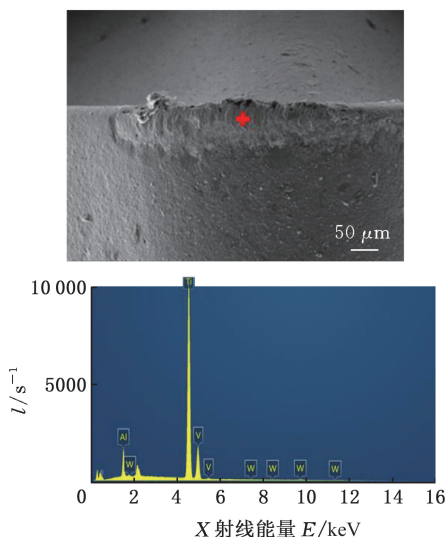


图 13 速度-切深方向椭圆超声辅助石墨烯纳米流体微量润滑高速切削刀具后刀面形貌及能谱测试结果
Fig.13 Tool flank face morphology and energy spectrum test results under high-speed velocity-depth direction ellipse UVAT with GN-MQL

随着切削速度的提高,虽然刀具超声振动以及微量润滑工艺减小切削力的效果有所减弱,但对加工表面粗糙度却起到了改善作用。对比图 3b 和图 12b 中湿切削加工表面的粗糙度可以看出,随着切削速度的提高,加工表面粗糙度急剧恶化。这主要是因为高速切削过程较高的切削温度导致刀具-工件界面黏结严重,使加工表面产生了大量的撕裂损伤和黏结碎屑。而刀具上施加的速度-切深方向超声振动虽然在高速切削中不能使刀具与切屑分离,但可以导致刀具与工件周期性分离,从而减少刀具后刀面与工件表面的持续摩擦生热,削弱加工表面材料侧流及黏结,并高频撕裂初步黏结的刀具和工件,减小材料黏结对加工表面形貌的损伤,提高表面光洁度,所以,在高速切削条件下,超声辅助微量切削工艺均产生了比无振动湿切削工艺更光滑的表面。

相比于棕榈油微量润滑,纳米流体更高的导热性能以及纳米粒子在刀具-工件界面的滚动、滑移等减摩作用也有利于降低切削区工件表面的温度,减弱刀具-工件黏结,提高表面质量。

相比于石墨烯纳米片的层间剪切行为发生于纳米片内部,受刀具-工件材料黏结影响较小,金刚石纳米粒子的滚珠效应完全依赖于刀具-工件之间的相对滑动,刀具后刀面的材料黏结会显著削弱金刚石粒子的滚动能力,使其嵌入工件或刀具表面的黏结材料中,并被刀具带动在工件表面划擦,所以金刚石纳米流体在高速切削中的减摩效果不如低速切削中的减摩效果。如图 3a 和图 12a 所示,低速切削中,金刚石纳米流体获得了最小的主切削力,而高速切削中其主切削力大于石墨烯纳米流体和复合纳米流体。但是,金刚石纳米粒子在工件表面的划擦也会产生微加工效应,对工件表面的黏结材料等进行去除,从而较其余类型纳米流体产生更光滑的加工表面。

随着切削速度的提高,加工表面切削温度显著上升,还会在工件表层产生较大的热应力从而诱发残余压应力,与机械应力导致的残余压应力相互抵消,共同决定最终加工表面的残余应力状态。本文实验中,无振动高速湿切削表面的残余拉应力(图 12c)即为过高的切削温度导致的热应力占据了主要地位而导致的。

向刀具施加超声振动后,刀具对工件表面的冲击作用可以增大表层材料的塑性变形,产生更大的机械应力;刀具与工件的周期性分离不仅可以直接减缓热量累积,配合微量润滑技术还可以使气雾射流更好地对切削表面进行冷却,可以有

效降低切削温度,减小热应力,最终导致机械应力超过热应力占据主导地位,在加工表面产生残余压应力。

相比于纳米流体微量润滑工况,棕榈油微量润滑工况虽然产生了较大的切削力,但其润滑及冷却效率较差,切削温度较高,会产生较大的热应力抵消机械应力,导致最终的加工表面残余压应力反而更小。相比之下,复合纳米流体的导热性能卓越,可以保证切削区较低的切削温度,降低热应力影响,获得了最大的残余压应力。

2.3 速度-进给方向椭圆超声辅助切削

进给方向超声振动切削是近年来提出的一种新型加工技术,其优势是以超过刀具-切屑分离临界速度的切削速度实现断续切削,获得切削力减小、表面完整性提高等优良效果^[23]。本文对速度-进给方向椭圆超声辅助切削工况下超声振动与纳米流体的协同作用机理进行研究。根据张翔宇等^[23]的研究结果,进给方向超声振动切削实现刀具与切削区周期性分离的必要条件是进给速率小于两倍的进给方向超声振幅,因此本实验设置的进给率为 $6 \mu\text{m}/\text{r}$,小于进给方向振幅 $5 \mu\text{m}$ 的两倍。

在速度-进给方向椭圆超声辅助切削条件下,不同润滑方式的切削力、表面粗糙度和残余应力如图 14 所示。可以看出,对刀具施加速度-进给方向椭圆超声振动后,切深抗力均较无振动切削工况增大,除金刚石纳米流体微量润滑工况外,主切削力总体减小,同时,超声振动切削表面的粗糙度较无振动切削表面减小,残余压应力增大。

对比不同微量润滑工况的结果可以看出,采用纳米流体作为润滑介质较纯棕榈油显著增大切深抗力和加工表面残余压应力,并减小加工表面粗糙度。除金刚石纳米流体外,石墨烯纳米流体和复合纳米流体较棕榈油具有更小的主切削力。

金刚石纳米流体在速度-进给方向椭圆超声辅助切削过程中表现出了与其余切削方式下不同的性能,获得了最大的切削力、最大的加工表面残余压应力和最小的表面粗糙度。

在速度-进给方向椭圆超声振动切削中,刀具切削刃与工件已加工表面持续接触,仅仅是刀尖圆弧与切削区过渡表面周期性接触与分离,因此,纳米粒子难以直接进入刀具-工件界面,而是在刀具背离进给方向振动时进入刀尖圆弧与过渡表面之间。当刀具向进给方向振动时,进入刀尖圆弧前端的纳米粒子会被刀具挤压碾入工件表面(图 15),产生额外的切深抗力,导致三种纳米流体微量润滑条件的切深抗力均大于 Wet 和 MQL 工

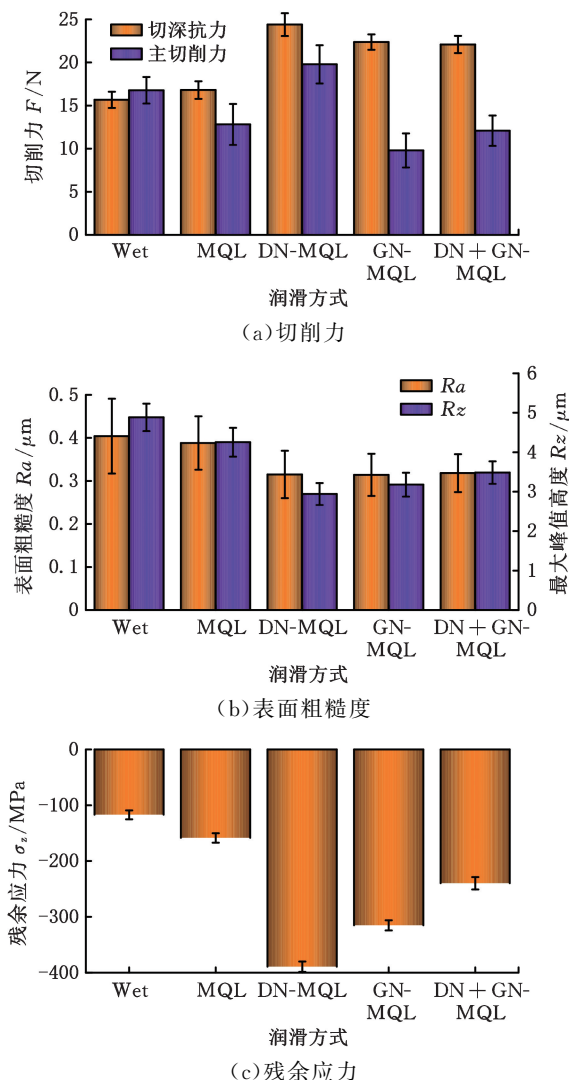


图 14 速度-进给方向椭圆超声辅助切削条件下不同润滑方式的切削力、表面粗糙度和残余应力
 Fig.14 Cutting forces, surface roughness and surface residual stresses of velocity-feed direction UVAT with different lubrication methods

入刀具-工件界面的纳米粒子大多被挤压碾入工件表面。在此情况下,金刚石纳米粒子难以产生滚动减摩效应,反而会作为硬质点阻碍刀具运动,产生额外的切削力,导致其主切削力最大。而石墨烯纳米片层间剪切效应发生在内部,仍然可以产生减摩润滑效果,从而减小石墨烯纳米流体和复合纳米流体润滑条件下的主切削力。

在速度-进给方向椭圆超声辅助切削过程中,刀具不存在相对于工件表面的径向冲击,所以不会产生周期性凹坑微结构从而额外增大加工表面粗糙度,进给方向振动的刀具会反复碾压已加工表面以及刀具两次进给之间的残留区域,产生往复熨压效应,使加工表面更加光滑。施加纳米流体后,石墨烯纳米片可以铺展在刀具-工件界面并产生层间剪切效应,减小刀具对已加工表面的划伤和黏结损伤,进一步减小表面粗糙度,而金刚石纳米粒子更可以与刀具超声协同效应,在刀具推动下可以对工件表面产生微加工形成抛光效应,从而较其余加工工况产生更光滑的加工表面。

在速度-进给方向椭圆超声辅助切削条件下,进给量极小,材料去除率较低,因此,虽然切削速度较高,切削热依然被控制在一定范围内,加工表面热应力的影响较小,切削力主导的机械应力是加工表面残余应力的主要成因,因此不同润滑方式的加工表面均获得了残余压应力。

相比于无振动切削过程,进给方向振动导致的刀具与切削区周期性分离可以进一步减弱切削热的累积,并强化冷却润滑介质对切削区的冷却效果,使加工表面的热应力更小,从而获得了更大的加工表面残余压应力。同时,相比于棕榈油微量润滑,采用纳米流体进行润滑时,一方面其冷却效率更高,可以更有效减小热应力;另一方面,纳米粒子被挤压时产生更大的切深抗力(图 14a),导致更大的机械应力,从而共同增大了加工表面的残余压应力。金刚石纳米流体微量润滑加工表面较大的残余压应力也主要归因于该工况下更大的切削力。

3 结论

1)速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削条件下,刀具与工件/切屑周期性分离,可以减小主切削力。但超声振动刀具对工件表面存在冲击作用,会增大切深抗力、表面粗糙度和残余压应力。椭圆超声振动有利于金刚石纳米粒子的滚珠效应和石墨烯纳米片层间剪切效应的发挥,使纳米流体润滑工况下的切削力和表面粗糙度都小于棕榈

况,表明超声振动切削与纳米粒子的协同作用也可能产生负面效果,需要针对性地进行研究。

由于刀具后刀面与工件的持续接触,所以进

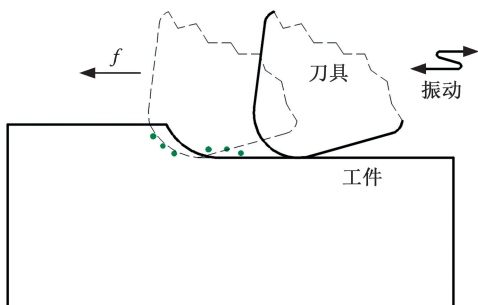


图 15 速度-进给方向椭圆超声振动切削条件下金刚石纳米粒子在刀具/工件界面的摩擦学机理
 Fig.15 Tribological mechanism of diamond nanoparticles at the tool/workpiece interface in velocity-feed direction UVAT

油润滑工况下的切削力。

2)速度-切深方向椭圆超声辅助高速切削条件下,刀具-切屑不再分离,超声振动的减摩效果降低,但可以抑制切削温度上升并削弱加工表面材料黏结,从而提高加工表面光洁度并在加工表面产生残余压应力。纳米粒子的减摩增润效应被高速切削导致的刀具表面材料黏结所削弱,但其增强换热的效果依然可以增大加工表面残余压应力。

3)速度-进给方向椭圆超声振动可以减小主切削力和表面粗糙度并增大加工表面残余压应力。该工艺下刀具与已加工表面持续接触,纳米粒子容易被挤压进入工件表面从而增大切深抗力,但石墨烯纳米片依然可以产生减摩和促进换热的效果,从而减小主切削力和表面粗糙度并增大残余压应力。

4)金刚石纳米流体在速度-切深方向椭圆超声辅助低速切削中可以有效发挥滚珠效应以减小主切削力,但在速度-进给方向超声振动和较高切削速度条件下以划擦运动为主,减摩效果较弱,但可以产生抛光效应,减小加工表面粗糙度。

参考文献:

- [1] SAID Z, GUPTA M, HEGAB H, et al. A Comprehensive Review on Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining Processes Using Nano-cutting Fluids[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 2057-2086.
- [2] AMIRIL S A S, RAHIM E A, SYAHRULLAIL S. A Review on Ionic Liquids as Sustainable Lubricants in Manufacturing and Engineering: Recent Research, Performance, and Applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168:1571-1589.
- [3] YILDIRIM Ç V, SARIKAYA M, KIVAK T, et al. The Effect of Addition of hBN Nanoparticles to Nanofluid-MQL on Tool Wear Patterns, Tool Life, Roughness and Temperature in Turning of Ni-based Inconel 625 [J]. Tribology International, 2019, 134:443-456.
- [4] ABD R E, DORAIRAJU H. Evaluation of Mist Flow Characteristic and Performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) Machining[J]. Measurement, 2018, 123:213-225.
- [5] LIU Guoliang, ZHENG Jintao, HUANG Chuanzhen, et al. Coupling Effect of Micro-textured Tools and Cooling Conditions on the Turning Performance of Aluminum Alloy 6061[J]. Advances in

Manufacturing, 2023, 11(4):663-681.

- [6] ZHAO Guolong, XIN Lianjia, LI Liang, et al. Cutting Force Model and Damage Formation Mechanism in Milling of 70wt% Si/Al Composite[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(7):114-128.
- [7] LIU Kuo, ZHANG Jie, LI Jian, et al. Experiment Study of Surface Formation Mechanism during Cryogenic Turning of PEEK[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 104:322-333.
- [8] ŞIRIN Ş, SARIKAYA M, YILDIRIM Ç V, et al. Machinability Performance of Nickel Alloy X-750 with SiAlON Ceramic Cutting Tool under Dry, MQL and HBN Mixed Nanofluid-MQL[J]. Tribology International, 2021, 153:106673.
- [9] ALBERTELLI P, STRANO M, MONNO M. Simulation of the Effects of Cryogenic Liquid Nitrogen Jets in Ti6Al4V Milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85:323-344.
- [10] HE Tao, LIU Niancong, XIA Long, et al. Progress and Trend of Minimum Quantity Lubrication (MQL): a Comprehensive Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 386:135809.
- [11] GUPTA M K, JAMIL M, WANG Xiaojuan, et al. Performance Evaluation of Vegetable Oil-based Nano-cutting Fluids in Environmentally Friendly Machining of Inconel-800 Alloy [J]. Materials, 2019, 12(17):2792.
- [12] YILDIRIM Ç V. Experimental Comparison of the Performance of Nanofluids, Cryogenic and Hybrid Cooling in Turning of Inconel 625[J]. Tribology International, 2019, 137:366-378.
- [13] DARSHAN C, JAIN S, DOGRA M, et al. Machinability Improvement in Inconel-718 by Enhanced Tribological and Thermal Environment Using Textured Tool [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138:273-285.
- [14] MUSAVI S H, DAVOODI B, NIKNAM S A. Effects of Reinforced Nanoparticles with Surfactant on Surface Quality and Chip Formation Morphology in MQL-turning of Superalloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 40:128-139.
- [15] DAS A, PRADHAN O, Patel S K, et al. Performance Appraisal of Various Nanofluids during Hard Machining of AISI 4340 Steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 46:248-270.
- [16] LIM S K, AZMI W H, JAMALUDIN A S, et al. Characteristics of Hybrid Nanolubricants for MQL Cooling Lubrication Machining Application [J]. Lubricants, 2022, 10(12):350.

(下转第 759 页)