

文章编号 1004-924X(2011)01-0090-07

积屑瘤状态对微细切削表面轮廓特征的影响

刘志兵,王西彬

(北京理工大学 先进加工技术国防重点学科实验室,北京 100081)

摘要:研究了微细切削条件下,刀具前刀面上的积屑瘤状态对切削表面轮廓特征的影响,为合理选择和控制微细切削刀具的切削条件,以及评价微细切削的表面形貌特征提供实验依据。利用表面粗糙度仪分别提取了无积屑瘤、积屑瘤生长、稳定和脱落等4种积屑瘤状态下的切削表面轮廓,选取幅值密度函数(ADF)、自相关函数(ACF)和功率谱密度函数(PSD)等数理统计函数,以及时间序列模型参数和自回归(AR)谱分析了聚晶金刚石(PCD)刀具表面积屑瘤状态对微细切削表面轮廓特征的影响规律。结果表明,无积屑瘤和积屑瘤稳定阶段,AR谱的谱峰分别出现在91.7 c/mm和93.7 c/mm处,与进给量的倒数比较接近;积屑瘤生长和脱落状态阶段,谱峰出现的空间频率明显偏低,与进给量之间的对应关系不再显著。积屑瘤与切屑之间的不规则接触将破坏微细切削表面轮廓空间结构的一致性;积屑瘤生长和脱落阶段获得的表面轮廓的AR谱中存在明显的空间低频谱峰。

关键词:微细切削;积屑瘤;表面轮廓;数理统计函数;自回归谱

中图分类号:TG501 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0090

Influence of built-up edge phases on characteristics of surface profile of micro cutting

LIU Zhi-bing, WANG Xi-bin

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The influences of Built-up Edge(BUE) phases of a rake face on the characteristics of surface profile of micro cutting were researched, which provided the proof for the optimal selection of cutting parameters and the evaluation for the characteristics of surface profile of micro cutting. The surface profile data in micro cutting were measured with a profilometer in different BUE phases, BUE free, BUE formation, BUE stable and BUE drop. The influences of the BUEs on the characteristics of machined surface profiles were analyzed with mathematical statistical functions such as Amplitude Density Function(ADF), Auto-correlation Function(ACF) and Power Spectral Density Function(PSD), as well as the time series model parameters and Auto Regression(AR) spectra. Obtained results indicate that in BUE free and BUE stable phases, the AR spectral peaks of micro cutting surface locate at 91.7 c/mm and 93.7 c/mm, respectively, which are very close to the reciprocal of a feed rate; while in BUE formation and BUE drop phases, the spatial frequency is significantly low compared with the recipro-

收稿日期:2010-04-23;**修订日期:**2010-07-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50935001, No. 50875026);“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题(No. 2009ZX04014-044);北京理工大学科技创新计划课题(No. CX02016)

cal of feed rate. It is concluded that the consistency of the surface profile is deteriorated by the irregular contact between BUE and chip, and the low spatial frequency component becomes more dominant in the AR spectra of machined surface profile during BUE formation and BUE drop phases.

Key words: micro cutting; Built-up Edge(BUE); surface profile; mathematical statistical function; Auto Regression(AR) spectrum

1 引言

精密和微细切削条件下,刀具表面的积屑瘤对于切削过程和加工表面质量的影响不容忽视^[1]。利用天然金刚石或聚晶金刚石(Polycrystalline Diamond,PCD)刀具对铜、铝合金等塑性材料进行微细切削时,尽管采用的切削线速度、进给量和切削深度等工艺参数较小,切削区的压力和温度相对较低,却仍然无法避免积屑瘤的产生^[2-3],但冷焊不再是形成积屑瘤的主要原因。此时,积屑瘤与刀具表面之间的结合并不十分牢固,容易随着切屑的流动而产生脱落,因此积屑瘤的形状、高度和生成位置具有很大的随机性^[4],对切削表面轮廓的影响不能用确定的切削模型进行描述。

近年来,国内外学者对积屑瘤的生成和对加工表面的影响开展了深入研究。A. Manna 对于铝碳化硅复合材料的切削实验表明,在较低的切削速度条件下,由于积屑瘤的形成,单位切削力和后刀面磨损率均显著增加^[5]。Q. Meng 建立了一种修正的刀具寿命计算模型,不仅可用于优化切削参数,而且可用于验证刀具塑性变形和积屑瘤的生成条件^[6]。Y. Ozcatalbas 针对 Al_4C_3 颗粒增强复合材料,系统研究了不同机械合金化时间和切削速度对切屑形成、积屑瘤形成、加工表面损伤的影响规律^[7]。T. Akasawa 研究了中碳合金钢微观组织和显微硬度对于积屑瘤形成条件和加工表面粗糙度的影响规律^[8]。J. D. Kim 采用金刚石立铣刀和较高的铣削线速度,有效抑制了积屑瘤和毛刺的生成,在铝合金材料上实现了镜面加工^[9]。J. M. Sanchez 借助 SEM(Scanning Electron Microscopy)和 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)研究了铝合金的合金成分和合金微观结构对积屑瘤形态的影响规律,以及积屑瘤

与积屑层生成条件的差异^[10]。J. A. Arsecularatne 建立了一种基于切屑流动方向的等效切削刃模型,不仅可实现较大刀具切削参数和切削用量范围内切削力和切削温度的预报,而且可用于积屑瘤生成条件的精确预报^[11]。N. Fang 建立了一种滑移线模型,可同时预报积屑瘤的尺度和表面形状,进而可对切屑流动、切削力波动等与积屑瘤相关的加工现象进行预报^[12]。

本文采用触针式表面粗糙度仪提取了不同积屑瘤状态下 PCD 外圆车刀微细切削铝合金 2A12 的表面轮廓离散数据,应用幅值密度函数(Amplitude Density Function, ADF)、自相关函数(Auto Correlation Function, ACF)和功率谱密度函数(Power Spectral Density, PSD)等数理统计函数,以及自回归(Auto Regression, AR)模型参数和 AR 谱分析了其空间微观结构特征,探讨了积屑瘤状态对微细切削表面轮廓特征的影响规律。

2 试验条件与参数

试验采用的设备、材料和工艺参数如下:

(1)机床:精密微小型车铣加工中心,车削主轴最高转速为 8 000 r/min。

(2)刀具参数:整体焊接式 PCD 外圆车刀,前角 $\gamma_0=10^\circ$,后角 $\alpha_0=4^\circ$,主偏角 $\kappa_r=117.5^\circ$,刀尖圆弧半径 $r_c=0.15$ mm。

(3)工件材料:铝合金 2A12,直径为 4 mm。

(4)切削用量:主轴转速 $n=1\ 000$ r/min,进给量 $f=0.01$ mm/r,切削深度 $a_p=0.02$ mm。

(5)测试仪器及参数:时代 TR 240 触针式表面粗糙度仪,取样长度为 0.25 mm,采样长度为 1.25 mm,采样间隔为 0.001 mm。

3 表面轮廓及其基本参数

利用表面粗糙度仪分别提取了一次切削中的

不同阶段,即无积屑瘤、积屑瘤生长、积屑瘤稳定和积屑瘤脱落 4 种状态下的微细切削表面轮廓数据(见图 1)。图 1 中,无积屑瘤和积屑瘤稳定条件下,表面轮廓特征总体优于积屑瘤生长和脱落阶段的切削表面,无积屑瘤和积屑瘤稳定阶段的微细切削表面轮廓高度关于基准线对称,两侧极端数值和异常点的数量均较少;积屑瘤生长和脱落阶段的表面轮廓在幅值上的起伏明显,特别是积屑瘤脱落阶段的表面轮廓曲线波动性较大。产生此种差异的原因主要是积屑瘤结构的动态变化使刀具切削区与切屑之间产生不规则接触,从而破坏了切削表面轮廓的一致性,削弱了 PCD 刀具的精密微细切削性能。

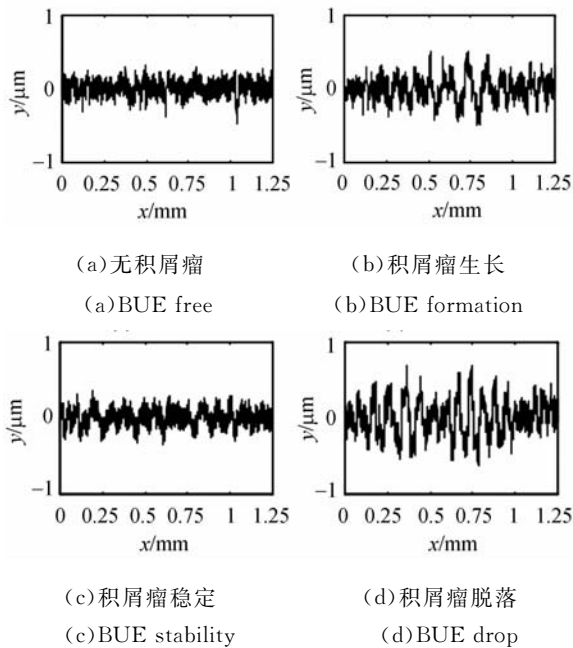


图 1 不同积屑瘤状态下的切削表面轮廓

Fig. 1 Micro cutting surface profiles with different BUE phases

对于图 1 中的 4 种表面轮廓,其轮廓算术平均偏差 R_a 、轮廓均方根偏差 R_q 、微观不平度十点高度 R_z 、第三峰谷高度平均值 R_{3z} 、轮廓最大高度 R_y 、轮廓最大峰高 R_p 、轮廓最大谷深 R_m 等表面轮廓基本参数如表 1 所示。表 1 中的各表面轮廓基本参数作为表面形貌的一维度量,总体上反映了不同积屑瘤状态下切削表面轮廓在幅值上的特征:积屑瘤稳定时获得的表面粗糙度与无积屑瘤时相当,均显著低于积屑瘤生长和脱落时的表面粗糙度。

表 1 微细切削表面粗糙度试验结果

Tab. 1 Experimental results of surface roughness of micro cutting

表面粗糙度	积屑瘤状态			
	无	生长	稳定	脱落
R_a (μm)	0.099	0.180	0.104	0.253
R_q (μm)	0.121	0.226	0.127	0.309
R_z (μm)	0.727	1.229	0.658	1.649
R_{3z} (μm)	0.378	0.628	0.332	0.835
R_y (μm)	0.787	1.300	0.704	1.730
R_p (μm)	0.328	0.590	0.363	0.963
R_m (μm)	0.458	0.709	0.340	0.767

4 表面轮廓的数理统计函数

分别选取 ADF、ACF 和 PSD 等常用的数理统计函数,从不同角度对不同积屑瘤状态的微细切削表面轮廓的微观形貌进行评价。

4.1 ADF

ADF 主要反映表面轮廓的幅度特征,其含义为:

$$ADF(y) = [2\pi R_q^2]^{-1/2} \exp[-y^2 / (2R_q^2)] \quad (1)$$

式中, y 为表面轮廓相对于中线的高度, R_q 为轮廓均方根偏差。

对于图 1 所示的微细切削表面轮廓,其 ADF 如图 2 所示。

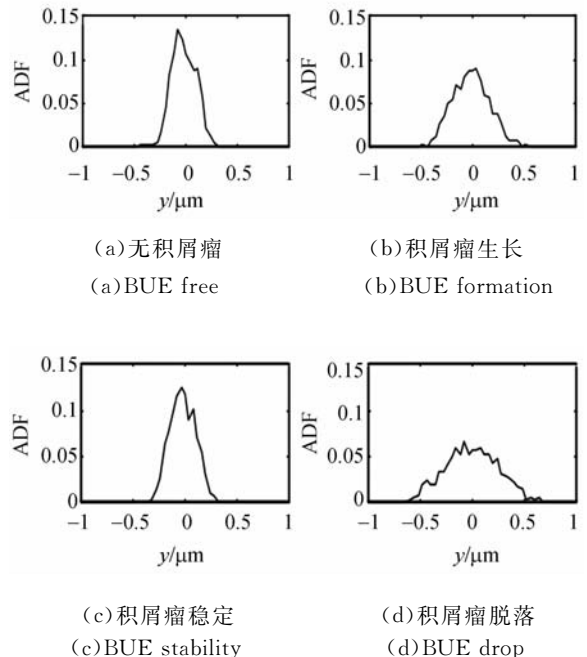


图 2 不同积屑瘤状态下的 ADFs

Fig. 2 ADFs with different BUE phases

由图 2 的 ADF 可知,4 种表面轮廓均在一定程度上偏离了正态分布,表面轮廓的峰度分别为 3.78,6.12,3.40 和 5.65。以上峰度数值表明,积屑瘤生长和脱落阶段,表面轮廓两侧的极端数值更多,刀具与工件之间的相对位置波动现象较无积屑瘤和积屑瘤稳定时更为突出,表现出更多的紊乱和有序状态。

4.2 ACF

ACF 是反映轮廓周期性变化和表面随机分量变化的函数,其含义为:

$$ACF(\tau) = L^{-1} \int_0^L y(x)y(x+\tau)dx, \quad (2)$$

式中, τ 为横向位移, x 为沿表面轮廓的距离, L 为测量长度。

对于图 1 所示的微细切削表面轮廓,其 ACF 如图 3 所示。由图 3(a)和 3(c)可见,无积屑瘤和积屑瘤稳定时,表面轮廓 ACF 曲线分布密集,说明微细切削表面轮廓具有较强的周期性,以空间高频成份为主,空间低频成份所占比重相对较低;积屑瘤生长和脱落时,表面轮廓 ACF 曲线沿轮廓横向位移方向具有比较明显的周期性,说明表面轮廓中包含有较长的空间波长,即空间结构中的低频成份比较明显。与图 3(a),3(c)和 3(d)中的 ACF 相比,图 3(b)中的自相关曲线沿轮廓横向位移方向发生了明显的衰减,说明积屑瘤生长阶

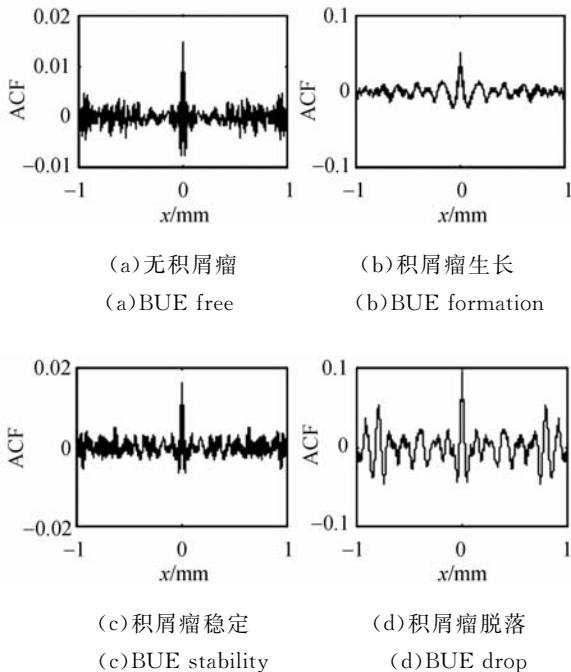


图 3 不同积屑瘤状态下的 ACFs

Fig. 3 ACFs with different BUE phases

段的切削轮廓相关性随横向位移的增加而减少。

4.3 PSD

PSD 是反映表面轮廓的幅度和间距特征的函数,其含义为:

$$PSD(f) = 2L^{-1} \left| \int_0^L y(x)\exp(-i2\pi fx)dx \right|^2, \quad (3)$$

式中, f 为表面轮廓的空间频率。

对于图 1 所示的微细切削表面轮廓,其 PSD 如图 4 所示。4 种积屑瘤状态的表面轮廓 PSD 均在 10~40 c/mm 的低频和 80~100 c/mm 的高频出现了两个比较明显的谱峰。其谱线结构的主要区别在于,图 4(a)无积屑瘤阶段的 PSD 谱线中,100 c/mm 左右较高频段的谱峰占据主导,与进给量之间的倒数对应关系明显;图 4(a),4(b)和 4(c)的 PSD 谱线中,谱峰位置出现向低频偏移的趋势,谱峰能量更多集中于 10~20 c/mm 的较低频段,100 c/mm 左右较高频段的谱峰能量相对较弱。此时在积屑瘤的作用下,刀具切削刃区参数没有能够完全复映到加工表面,除了导致切削表面实际残留高度偏大以外,还破坏了表面轮廓的空间结构,产生了大量空间波长较长的空间随机分量。

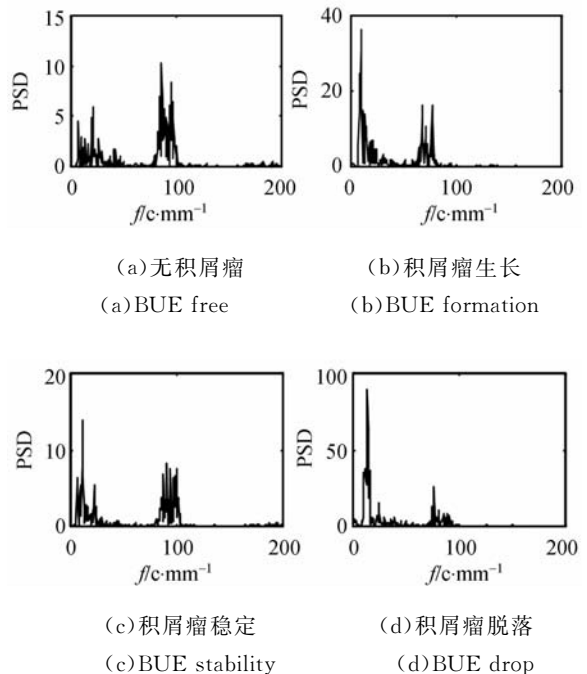


图 4 不同积屑瘤状态下的功率谱密度函数

Fig. 4 PSDs with different BUE phases

5 表面轮廓的空间序列分析

表面轮廓作为一组按照空间的前后顺序排列的随机数据,经采样后即成为随机空间序列,将轮廓的水平距离看作触针移动速度与时间的乘积,应用时间序列分析方法即可对其空间结构特征进行分析。

5.1 表面轮廓的 AR 模型参数

对于图 1 所示的表面轮廓,以 y_n 表示轮廓高于基准线的高度,可以用 AR(p)模型进行描述:

$$y_n = \varphi_1 y_{n-1} + \varphi_2 y_{n-2} + \dots + \varphi_p y_{n-p} + \varepsilon_n, \quad (4)$$

式中, p 为模型阶数; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为模型自回归参数; ε_n 为模型残差,满足 $\varepsilon_n \sim \text{NID}(0, \sigma_a^2)$ 。

采用 AIC 准则^[8]确定 4 种积屑瘤状态下表面轮廓的 AR 模型最优阶数 p , 准则函数为:

$$AIC(p) = N \ln \sigma_a^2 + 2p. \quad (5)$$

取 AIC(p)最小时的模型阶数 p 作为适用的模型阶数。采用该准则确定的 4 种积屑瘤状态下表面轮廓的 AR 模型最优阶数 p 分别为 31, 14, 24 和 13, 以上模型阶数对于积屑瘤状态的变化比较敏感,可在一定程度上反映不同积屑瘤状态下表面轮廓特征的差异:无积屑瘤时的模型阶数最高,表面轮廓的空间结构相对复杂;积屑瘤生长和脱落时的模型阶数显著降低,表面轮廓的空间结构相对简单。

5.2 表面轮廓的 AR 谱

对于 AR(p)模型,其 AR 谱为:

$$S_{AR}(f) = \frac{\sigma_a^2}{\left| \sum_{i=0}^p \varphi_i e^{-j2\pi f i \Delta} \right|^2}, \quad (6)$$

采用增阶算法计算出图 1 中 4 种表面轮廓的 AR 谱(见图 5)。图 5(a)中,AR 谱图上 25.4 c/mm 和 91.7 c/mm 的空间频率处出现了两个主要谱峰,其中 91.7 c/mm 处的谱峰能量最为突出,且谱峰位置与进给量的倒数比较接近。另外在 183.5 c/mm 的空间频率处出现了较微弱的谱峰,该谱峰恰为 91.7 c/mm 处谱峰的二次谐波,表明无积屑瘤时,进给量是影响表面轮廓空间结构的主导性因素。图 5(c)中,AR 谱图上的谱峰出现在 17.5 c/mm 和 93.7 c/mm 处。与图 5(a)相比,低频谱峰的空间频率略有降低,其能量在总能量中的比重明显增加,表明处于稳定状态

的积屑瘤粘结在前刀面和切削刃上,代替切削刃进行切削,在一定程度上破坏了表面轮廓的微观结构,导致空间频谱的低频成份增强。以上两种情形下,AR 谱基本上能够反映进给量对于表面轮廓的影响,与刀具进给量相对应的空间频率及其谐波分量构成了 AR 谱的主要空间成份,切削表面的空间波长主要由刀具的进给运动引起。

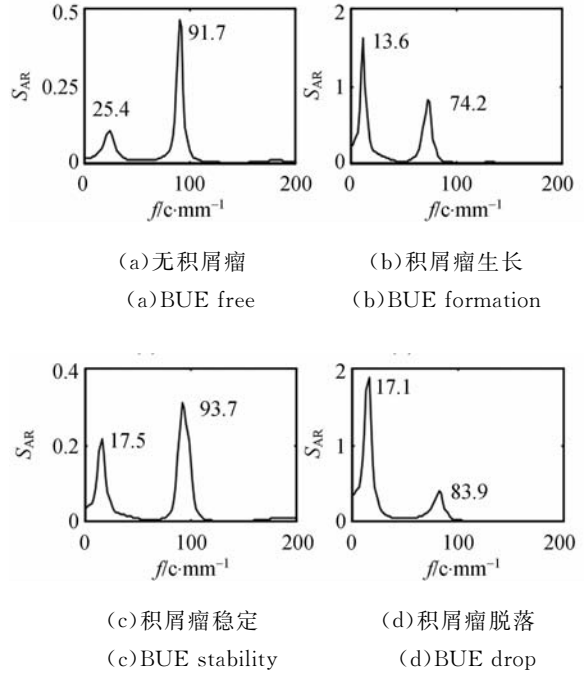


图 5 不同积屑瘤状态下的表面轮廓 AR 谱

Fig. 5 AR spectra of surface profile with different BUE phases

图 5(b)和图 5(d)中,AR 谱峰值出现的位置与图 5(a)和 5(c)大致相同,但谱峰出现的空间频率更加偏低,空间低频成份的能量强于高频成份。AR 谱峰值能量的变化说明积屑瘤生长和脱落阶段,空间频率与进给量之间的对应关系不再显著,加工表面轮廓呈现出不确定的特征,AR 谱已不能确切反映进给量对于表面轮廓的影响。此时的表面轮廓不完全由刀具的进给运动产生,积屑瘤结构动态变化引发的前刀面切削条件的随机波动是影响表面轮廓空间结构的重要因素。

由于积屑瘤时生时灭的动态变化过程将导致实际切削前角和刀-屑接触条件不断发生变化,随着积屑瘤与切屑根部不规则接触程度的增加,表面轮廓上低频成份的能量相应增加,因此不同积屑瘤状态下的加工表面轮廓具有比较明显的区

别。无积屑瘤和积屑瘤稳定时有利于获得规则的切削轮廓;积屑瘤生长和积屑瘤脱落阶段的切削表面空间特征比较紊乱,不利于获得均匀一致的加工表面。为减小积屑瘤状态变化对于加工表面轮廓的不利影响,应注意及时清除PCD刀具前刀面上的积屑瘤。

6 结 论

微细切削条件下,积屑瘤的生成和形态变化是影响加工表面粗糙度水平和轮廓微观结构的重要因素之一。本文应用数理统计函数和时间序列方法分析了4类积屑瘤状态对PCD刀具微细切削表面轮廓特征的影响,研究结果为合理选择和评价微细切削刀具的切削条件,以及评价微细切

削的表面形貌特征提供了实验依据。主要得出以下结论。(1)通过表面轮廓的幅值特征参数实验,可知积屑瘤稳定时获得的表面粗糙度与无积屑瘤时相当,均显著低于积屑瘤生长和脱落时的表面粗糙度。(2)通过表面轮廓的数理统计函数分析,可知无积屑瘤和积屑瘤稳定阶段,AR谱的谱峰分别出现在91.7 c/mm和93.7 c/mm处,与进给量的倒数比较接近;积屑瘤生长和脱落状态阶段,谱峰出现的空间频率明显偏低,与进给量之间的对应关系不再显著。(3)通过表面轮廓的空间序列分析,可知积屑瘤与切屑之间的不规则接触将破坏微细切削表面轮廓空间结构的一致性,积屑瘤生长和脱落阶段获得的表面轮廓AR谱中存在明显的空间低频谱峰,且其表面粗糙度水平较积屑瘤稳定阶段有明显下降。

参考文献:

[1] 韩雪松. 纳米切削工艺中刀具原子尺度磨损机理的分子动力学分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 107-112.
HAN X S. Investigation atomic level micromechanism about tool wear in the case of nanometric cutting using molecular dynamics method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 107-112. (in Chinese)

[2] 王大镇, 韩荣第, 刘华明, 等. 铝基复合材料超精密加工中的刀-屑摩擦磨损性能及模型研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(6): 569-573.
WANG D ZH, HAN R D, LIU H M, *et al.*. Wear model and characteristics between cutting tool and chips in ultraprecision machining of SiC reinforced aluminum composites[J]. *Tribology*, 2005, 25(6): 569-573. (in Chinese)

[3] CARRILERO M S, BIENVENIDO R, SÁNCHEZ J M. A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al - Cu alloy[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(2): 215-220.

[4] KIM J D, MARINOV V R, KIM D S. Built-up edge analysis of orthogonal cutting by the visco-plastic finite-element method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 71(3): 367-372.

[5] MANNA A, BHATTACHARAYYA B. A study on machinability of Al/SiC-MMC[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140: 711-716.

[6] MENG Q, ARSECULARATNE J A, MATHEW P. Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40: 1709-1733.

[7] OZCATALBAS Y. Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3-Al composite [J]. *Materials & Design*, 2003, 24(3): 215-221.

[8] AKASAWA T, FUKUDA I, NAKAMURA K, *et al.*. Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chrome-molybdenum steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153-154: 48-53.

[9] KIM J D, KANG Y H. High-speed machining of aluminium using diamond endmills[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1997, 37: 1155-1165.

[10] SANCHEZ J M, RUBIO E, LVAREZ M, *et al.*. Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace aluminium alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164-165: 911-918.

[11] ARSECULARATNE J A, FOWLE R F, MATHEW P. Nose radius oblique tool: cutting force and built-up

edge prediction[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164-165: 911-918.

[12] FANG N, DEWHURST P. Slip-line modeling of

built-up edge formation in machining[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(7): 1079-1098.

作者简介:



刘志兵(1977—),男,河北藁城人,博士,讲师,2000年于合肥工业大学获得学士学位,2003年、2006年于北京理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密微细切削技术、高速切削技术的研究。E-mail: liuzhibing@bit.edu.cn



王西彬(1958—),男,陕西蒲城人,教授,博士生导师,1982年于西安交通大学获得学士学位,1987年于西北工业大学获得硕士学位,1994年于西安交通大学获得博士学位,现为北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室副主任,主要从事精密切削与磨削加工技术、表面完整性控制与评价等方面的研究。E-mail: cutting0@bit.edu.cn

● 下期预告

GaSe 及相关晶体的历史、现状与未来:具有出色非线性光学特性的层状材料

K. Allakhverdiev^{1,2}, T. Baykara¹

(1. Turkish Scientific and Technological Research Council (TÜBİTAK), Marmara Research Center (MRC), Materials Institute (MI), Gebze/Kocaeli, Turkey;

2. Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan)

概述了针对高度各向异性的,尤其是无掺杂和掺杂的层状半导体 GaSe 和相关晶体 InSe、GaS、GaSe-GaS 固体溶液的结构性质,光学性质和非线性光学性质的实验研究结果。同时也概述了由共焦拉曼和光致发光显微镜表现出来的光学性质的研究结果和由声波降解法和激光消融技术得到的 GaSe 纳米粒的光学性质的实验研究结果。重点讨论了 ϵ -GaSe 的性质:它有一个最大的光学二阶非线性系数 χ ,并且结晶成 4 种不同的多型体($\epsilon, \gamma, \beta, \delta$),每个晶胞有不同数目和排列方式的层状结构。研究认为在红外和太赫兹光谱范围内的非线性应用中,GaSe 可以被看作是最好的晶体之一。已发表的 1 700 多篇关于物理性质的论文也指出在 THz 波段的应用中,GaSe 是一种出色的材料。通过共焦拉曼显微镜实验的研究,讨论了晶体的域结构和非线性光学性质。除了主要探讨这些材料最重要的物理性质,还进一步研究了在主边缘附近的光吸收,在红外和太赫兹范围内的光致发光、非线性光学性质以及它们的纳米粒的物理性质,这些研究对理解二维晶体结构和其物理性质之间的联系是必要的。