

文章编号 1004-924X(2009)07-1621-09

SiC_p/Al 复合材料的超精密车削试验

葛英飞¹, 徐九华², 杨 辉³

(1. 南京工程学院 机械系, 江苏 南京 211167;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 3. 北京航空精密机械研究所, 北京 100076)

摘要: 试验研究了碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)的超精密车削加工性能。使用扫描电镜(SEM)对已加工表面、切屑及其根部、刀具前/后刀面磨损带进行观察,使用表面粗糙度轮廓仪对各种切削条件下的加工表面粗糙度轮廓进行测试分析。结果表明,该材料的加工表面常残留微孔洞、微裂纹、坑洞、划痕、残留物突起及基体材料撕裂等微观缺陷,刀具几何参数、切削速度、进给量、增强颗粒尺寸和材料体积分数是影响表面粗糙度的主要因素。由于切削变形区微裂纹动态形成的作用,超精密切削该材料时一般形成锯齿型切屑。刀具-工件的相对振动、基体撕裂增强颗粒拔出、破碎、压入等是该材料超精密车削表面形成的主要机制。单晶金刚石(SCD)刀具主要发生微磨损、崩刃、剥落和磨粒磨损,聚晶金刚石(PCD)刀具主要发生磨粒磨损和粘结磨损。结论表明 SiC_p/Al 的超精密切削加工性较差,但通过选择合适的工艺参数,体积分数为 15% 的 SiC_p/2024Al 加工表面粗糙度 R_s 可达 24.7 nm。

关键词: 铝基复合材料;超精密车削;表面粗糙度;刀具磨损

中图分类号: TG506.2; TB33 **文献标识码:** A

Experiments of ultra-precision turning of SiC_p/Al composites

GE Ying-fei¹, XU Jiu-hua², YANG Hui³

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

Abstract: The ultra-precision machinability of SiC_p/Al composites is investigated experimentally. A scanning electron microscope (SEM) is used to examine the machined surfaces, chips, chip roots and tool wear lands, and a surface profiling instrument is taken to measure the surface profile roughnesses in different turning conditions. The results show that the machined surface remains a lot of defects such as pits, voids, microcracks, grooves, protuberances, matrix tearing, etc. The tool geometries, cutting speeds, feed rates, particle reinforcement sizes and the volume fractions are the significant influence factors of surface roughness. Generally, a segmental chip is formed in turning composites due to the effect of dynamic microcrack behavior. The tool-workpiece relative vibration and the removal modes of SiC particles are the main mechanisms of surface generation. The microwear, chipping, peeling and the abrasive wear are the main wear patterns by using the Single Crystal Diamond (SCD)

收稿日期: 2008-08-05; **修订日期:** 2008-09-24.

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目 (No. 51464010604HK1301); 南京工程学院科研启动基金资助项目 (No. KXJ08002; No. KXJ08024)

tool, while Polycrystalline Diamond (PCD) tool mainly suffers from the abrasive wear on the rake face and the adhesive wear on the flank face. The experimental result indicates that the SiC_p/Al composites has a relatively bad machinability. However, when the cutting parameters are rationally chosen, a surface roughness R_a of 24.7 nm can be obtained for $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ (in a volume fraction of 15%).

Key words: aluminum matrix composites; ultra-precision turning; surface roughness; tool wear

1 引言

近年来,碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)由于具有较高的比强度和比模量、耐高温、热膨胀系数小、尺寸稳定性好等优点而越来越多地应用于卫星轴承、卫星天线、激光反射镜、惯导平台等器件中^[1-4],其精密/超精密加工技术也得到了密切关注。

单晶金刚石刀具超精密车削(SPDT)技术是一种利用具有纳米级刃口半径和耐磨性极好的单晶金刚石刀具进行车削的加工技术,很多材料都可以直接通过 SPDT 技术被车削成光学表面,而无需后续的研磨抛光。目前,SPDT 技术主要用于不含铁且强度较弱的塑性或脆性材料的加工,如铜、铝、硅、无氧铜、KDP 晶体和塑料等,而将该技术应用于 SiC 颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)的国内外相关报道还很少。目前,针对 SiC_p/Al 超精密加工的研究还处于初步阶段,且绝大多数的研究工作仅限于切削用量或切削条件对加工表面质量和表面粗糙度的影响^[5-7],而关于切屑形成机制和金刚石刀具磨损机理等方面的研究鲜有涉及,而对该材料的超精密车削加工性方面的研究还未见全面、系统的报道。

本文对超精密车削 SiC_p/Al 复合材料时的加工表面质量、切屑形态及其形成机制、表面形成机制、刀具磨损形态及其机理进行了试验研究,从而对该材料的超精密车削加工性给出全面、系统的评估,可为超精密切削此类材料时的车削用量和刀具选择提供重要理论和事实依据。

2 试验条件及方案

使用 SCD 和 PCD 刀具对体积分数为 15%的

复合材料 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ (粉末冶金法制备,颗粒平均尺寸 s 为 $3\ \mu\text{m}$ 、 $7\ \mu\text{m}$)和体积分数为 0~20%的 $\text{SiC}_p/\text{ZL101Al}$ (搅拌铸造法制备,颗粒平均尺寸为 $12\ \mu\text{m}$)进行超精密车削加工,基体材料的主要化学成分如表 1 所示,工件材料尺寸为 $\Phi 25\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$,刀具材料及几何参数见表 2。

表 1 铝合金基体化学成分(质量分数%)

Tab.1 Main chemical compositions of 2024Al and ZL101Al matrix materials (mass fraction %)

基体	Si	Mg	Cu	Ti	Fe	Al
2024Al	0.14	1.4	3.8	0.15	0.1	余量
ZL101Al	7.0	0.35	—	0.12	0.25	余量

表 2 刀具材料及几何参数

Tab.2 Cutting tool materials and their geometrical parameters

刀具材料	前角 $\gamma_0/(^\circ)$	后角 $\alpha_0/(^\circ)$	刃倾角 $\lambda_s/(^\circ)$	刀尖圆弧半 径 r_e/mm	刃口半 径/ μm
SCD	0	7	0	0.5	0.2
PCD	-5~5	5~15	-5~5	0.4~1.6	1~2

车削试验在二轴 Nanosys-300 型 CNC 超精密加工复合系统上进行,该机床的测量、控制系统分辨率为 1.25~5 nm。如无特别说明,机床转速 n 、进给量 f 和切削深度 a_p 分别为 1 000 r/min、3 $\mu\text{m}/\text{r}$ 和 5 μm ,采用煤油喷雾冷却。同样,PCD 刀具的默认几何参数为: $\gamma_0=0^\circ$, $\alpha_0=5^\circ$, $\lambda_s=0^\circ$, $r_e=0.8\ \text{mm}$ 。表面粗糙度的测量在 Form Taly-surf-120 表面粗糙度轮廓仪上进行,其标准圆锥形探头直径为 2 μm 。测量取样长度设置为 0.25 mm,采样步长为 0.25 μm ,测量总长度 l 为 $5 \times 0.25\ \text{mm}$ 。切屑经环氧树脂冷镶嵌、抛光并腐蚀。使用 Quanta 2000 型扫描电子显微镜对切削表面、切屑形态和刀具磨损形态进行研究。

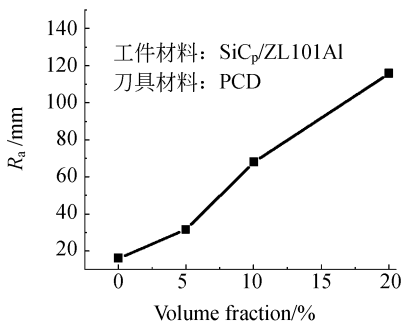
3 试验结果与分析

3.1 加工表面质量

3.1.1 表面粗糙度

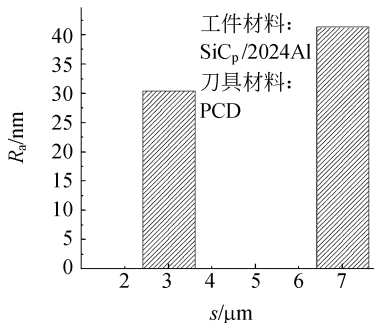
对 SiC_p/2024Al 和 SiC_p/ZL101Al, 使用 PCD 刀具并在 $n=400\sim 1\,500$ r/min, $f=1\sim 10$ $\mu\text{m}/\text{r}$, $a_p=1\sim 20$ μm 的切削用量范围内, 两者分别可获得 $R_a=26.6\sim 135.5$ nm 及 $R_a=24.7\sim 243.5$ nm 的表面粗糙度值。在同样的切削条件下, 使用 SCD 刀具车削 SiC_p/2024Al 时, 可获得 $R_a=23.6\sim 111.2$ nm 的表面粗糙度值。

超精密车削 SiC_p/Al 复合材料时, 增强颗粒体分比、增强颗粒平均尺寸、切削用量、刀具几何



(a) 体积分数比

(a) Volume fraction ratio



(b) 颗粒平均尺寸

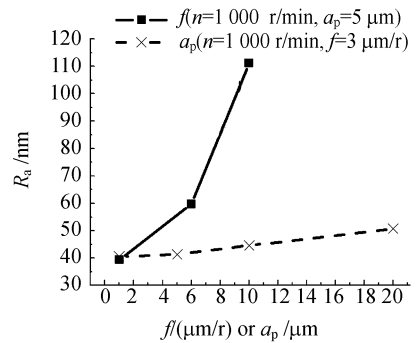
(b) Average particle size

图1 增强颗粒体积分数比和平均尺寸对表面粗糙度的影响

Fig. 1 Effects of reinforcement of volume fractions and average particle sizes on surface roughnesses

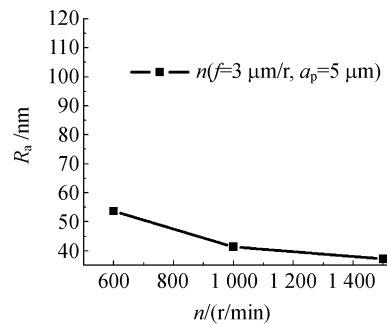
参数等因素对加工表面粗糙度具有不同程度的影响。由图1可看出, R_a 值随增强颗粒体分比或平均尺寸的增大而显著增大。

由图2可看出, 在切削用量三要素中, 进给量对表面粗糙度的影响显著, 主轴转速(或切削速度)次之, 切削深度影响较小。



(a) 进给量和切深

(a) Feed rate and cut depth vs surface roughness



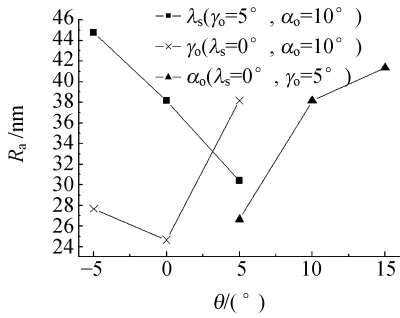
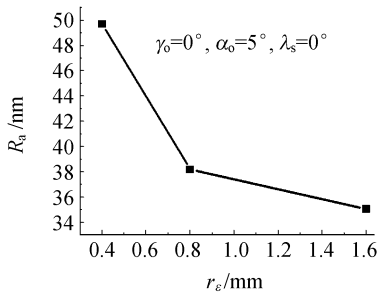
(b) 主轴转速

(b) Spindle speed vs surface roughness

图2 切削用量对表面粗糙度的影响(SiC_p/2024Al, $s=3$ μm , SCD)

Fig. 2 Effects of cutting parameters on surface roughnesses (SiC_p/2024Al, $s=3$ μm , SCD)

由图3可知, 具有正刃倾角、零前角、较小后角或较大圆弧半径的刀具可望获得较低的表面粗糙度 R_a 。

(a) 刀具几何角度 θ (a) Tool geometrical angles *vs* surface roughnesses

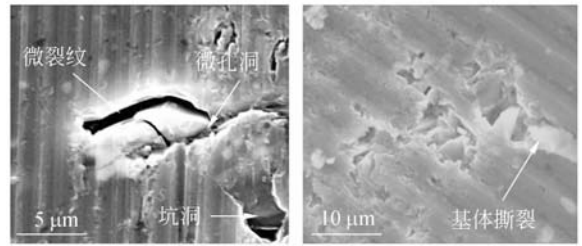
(b) 刀尖圆弧半径

(b) Tool nose radius *vs* surface roughness图 3 刀具几何参数对表面粗糙度的影响 ($\text{SiC}_p/2024\text{Al}$, $s=3 \mu\text{m}$, PCD)Fig. 3 Effects of tools' geometrical angles on surface roughnesses ($\text{SiC}_p/2024\text{Al}$, $s=3 \mu\text{m}$, PCD)

3.1.2 加工表面缺陷

由于基体和增强颗粒截然不同的物理、力学性能,超精密车削 SiC_p/Al 时,加工表面往往残留诸如微孔洞、微裂纹、坑洞、基体材料撕裂、划痕、表面突出物等微观缺陷,且这些缺陷大多在增强颗粒的去除过程中产生,可见增强颗粒去除方式对加工表面质量的好坏有着决定性的作用。

如图 4(a) 所示,切削时 SiC 增强颗粒会发生转动、破碎、拔出等现象,从而在加工表面形成微孔洞、微裂纹、坑洞等微观缺陷。在刀具将 SiC 增强颗粒拔出或折断时,往往会连带将其附近的基体材料一起撕裂去除(图 4(b))。破碎或从基体脱落的 SiC 在流向前刀面形成切屑时往往会在加工表面耕犁一段距离,如图 4(c) 所示。细碎的切屑和脱离基体的 SiC 有时还会落入刀具和已加工表面之间,从而被后刀面重新压入已加工表面,在加工表面形成许多突起(图 4(d))。

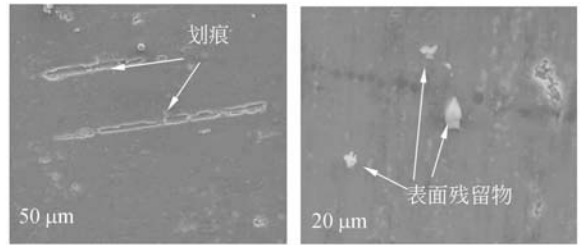


(a) 微裂纹和孔洞

(a) Micro cracks and pits

(b) 基体撕裂

(b) Matrix tearing



(c) 划痕

(c) Grooves and scratches

(d) 表面突出物

(d) Surface protuberances

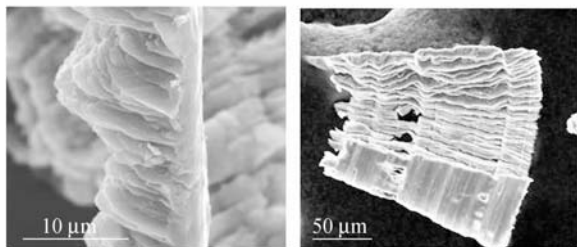
图 4 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 超精密加工表面缺陷 ($s=3 \mu\text{m}$, SCD)Fig. 4 A groups of surface defect of $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ composites in ultra-precision machining ($s=3 \mu\text{m}$, SCD)

3.2 切屑形态及其形成机制

试验表明,在 3.1 节所用的切削用量范围内,超精密车削本文所用的 SiC_p/Al 时切屑都呈锯齿型,如图 5 所示,切屑厚度的变化可达 80%~100%。由图 5 还可看出,切屑的自由表面由许多紧密排列的细小层状物组成,它们的宽度约为 0.5~1 μm 。

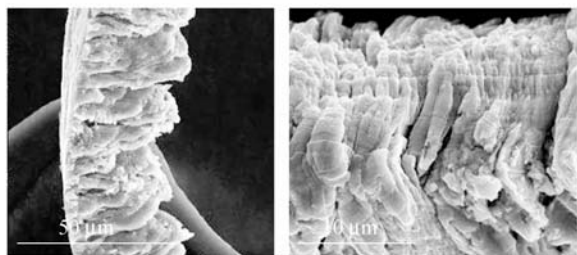
图 6 为腐蚀后的切屑(切削条件同图 5(b)),从图中可看出, SiC 增强颗粒沿剪切区呈线性排列,且锯齿型切屑中的剪切台阶都在 SiC 聚集处形成。

为了进一步探知 SiC_p/Al 复合材料超精密车削时的切屑形成机制,按文献[8]的方法获取切屑根部(图 7)。由图 7 可看出,在剪切区和切屑中存在大量的微孔洞和微裂纹,仔细观察这些微裂纹可发现,它们大多在 SiC 周围产生,并沿剪切面方向呈线性排列,裂纹附近的 SiC 并未发生断裂或破碎现象。由此可知,在 SiC_p/Al 复合材料切屑的形成过程中,孔洞、裂纹的形成和扩展起着重要的作用。切削时,剪切区的铝合金基体发生弹



(a) 体积分数为 10% 的 SiC_p/ZL101Al 切屑的侧面(左)和自由表面(右) ($n=1\ 200\ \text{r/min}$, $f=6\ \mu\text{m/r}$, $a_p=5\ \mu\text{m}$, PCD)

(a) Side surface (left) and free surface (right) of chip of SiC_p/ZL101Al with volume fraction of 10% ($n=1\ 200\ \text{r/min}$, $f=6\ \mu\text{m/r}$, $a_p=5\ \mu\text{m}$, PCD)



(b) 体积分数为 15% 的 SiC_p/2024Al 切屑的侧面(左)和自由表面(右) ($n=800\ \text{r/min}$, $f=10\ \mu\text{m/r}$, $a_p=20\ \mu\text{m}$, $s=3\ \mu\text{m}$, SCD)

(b) Side surface (left) and free surface (right) of chip of SiC_p/2024Al with volume fraction of 15% ($n=800\ \text{r/min}$, $f=10\ \mu\text{m/r}$, $a_p=20\ \mu\text{m}$, $s=3\ \mu\text{m}$, SCD)

图 5 SiC_p/Al 复合材料典型的切屑形态

Fig. 5 Chip forms during ultra-precision turning of SiC_p/Al composites

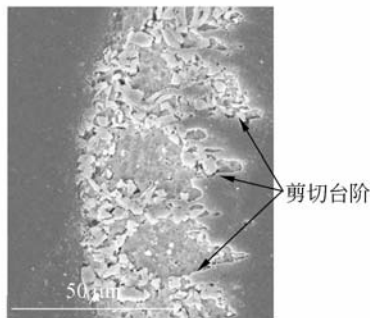


图 6 腐蚀后的切屑形态

Fig. 6 Chip form after etching

性或塑性变形,而 SiC 增强颗粒阻碍这个变形,当位错攀越 SiC 颗粒的速度小于切削速度时,就会在颗粒周围形成位错塞积群,当这种位错应力达到一定程度时,颗粒周围的界面或基体中就会产生空洞。同时,在切削热的作用下,由于增强颗粒与基体热膨胀系数的差异,在界面处产生位错失配应力^[9],从而容易在此处形成微孔洞和微裂纹。此外,切削刃频繁和 SiC 相互碰撞,使 SiC 发生断裂破碎或被拔出,这个过程也将导致微裂纹和微空洞的产生。上述各种原因产生的裂纹在基体中传播,并和基体中原有的裂纹源汇聚、长大。由于微裂纹的存在,剪切区的实际承载面积大大减小,应变在此处集中,当包含大量微裂纹的剪切区材料其剪切应变大于材料的断裂应变时,切屑发生突发剪切并产生部分断裂。由于切屑-工件交线处(如图 7 中箭头 A 所示)的应力为零,所以该处的裂纹更容易扩展,并同其它裂纹汇聚,造成材料在此处产生突发剪切和断裂。

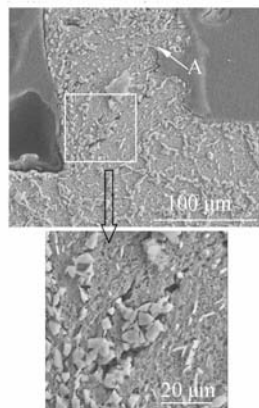


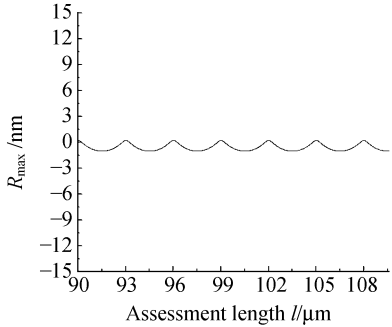
图 7 腐蚀后 SiC_p/2024Al 切屑的根部(SCD,切深=30 μm,切削速度=10 m/min,切宽=50 μm)

Fig. 7 Etched chip root of SiC_p/2024Al composite (SCD, cut depth of 30 μm, cutting speed of 10 m/min, cut width of 50 μm)

3.3 表面形成机制

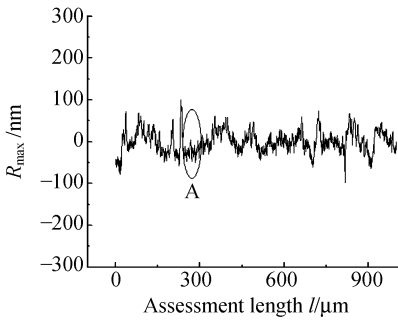
由于增强颗粒的存在, SiC_p/Al 复合材料的表面形成机制与其基体合金有较大不同。加工表面的轮廓或形貌其形成因素不仅包含进给量和刀尖圆弧半径组成的进给波纹、刀具-工件相对振动、基体材料塑性膨胀测流等,而且包含那些由于增强颗粒去除时在加工表面留下的振动、坑洞、裂纹、基体撕裂、表面凸起等。对比图 8(a)、(c)可知,切削基体材料时,由于沿切削刃两侧塑性测流

(热膨胀而致)以及最小切削厚度的存在^[10-11],实际加工表面粗糙度($R_{max} = 9.42 \text{ nm}$)约为理论粗糙度值($R_{max} = 1.41 \text{ nm}$)的 6.7 倍(图 8 中(c)图为(b)图中刀具-工件基本无相对振动的一段粗糙度轮廓 A 部分的局部放大)。由图 8(a),(b)可知,切削基体材料时,由各种因素引起的刀具-工件相对振动使得实际加工表面粗糙度远远高于理论值,而由图 8(b)、(d)可知,当基体中加入增强



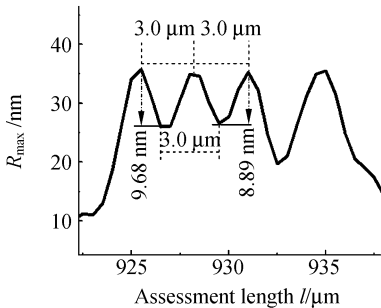
(a) 理论表面粗糙度轮廓

(a) Theoretical surface roughness profile



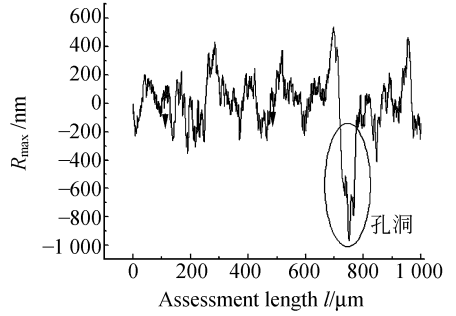
(b) ZL101Al

(b) ZL101Al



(c) 图(b)中 A 附近的放大

(c) High magnification of A in (b)



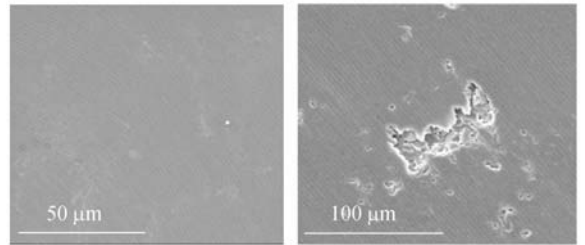
(d) 10%SiC_p/ZL101Al

(d) 10%SiC_p/ZL101Al

图 8 SiC_p/Al 及其基体材料的表面粗糙度轮廓对比 (PCD)

Fig. 8 Surface roughness profiles of SiC_p/ZL101Al composite and its matrix (PCD)

颗粒后,由于刀具交替切削硬质的不可变形的 SiC 增强颗粒和塑性的铝合金基体,切削振动更为剧烈,振幅几乎是切削基体材料时的 2 倍。图 9 显示了切削基体材料和复合材料时加工表面形貌的差异。



(a) ZL101Al 基体

(b) 10%SiC_p/ZL101Al

(a) ZL101Al matrix

(b) 10%SiC_p/ZL101Al

图 9 已加工的 SiC_p/Al 及其基体材料的表面形貌对比(PCD)

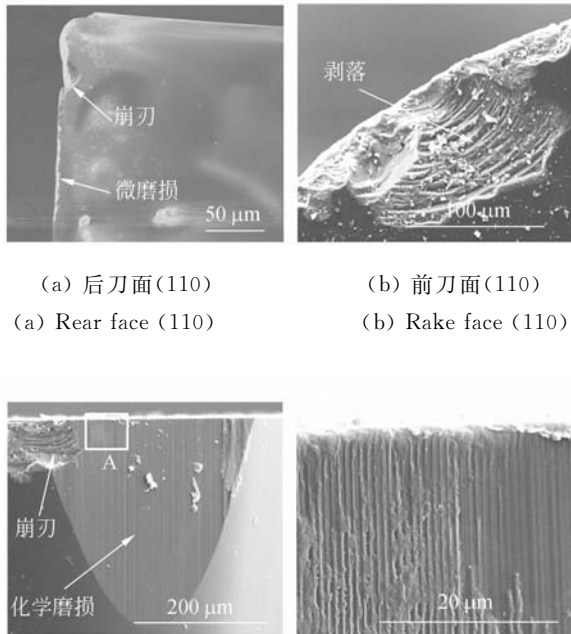
Fig. 9 Machined surfaces of SiC_p/ ZL101Al composite and its matrix (PCD)

3.4 刀具磨损形态及其形成机理

3.4.1 SCD 刀具

如图 10(a)、(b)所示,SCD 刀具切削体积分数为 15%的 SiC_p/2024Al 时,发生了微磨损以及较多的脆性崩刃和剥落。由于切削 SiC_p/Al 复合材料时刀具-工件振动现象严重,且 SiC 增强颗粒对切削刃或前刀面具有频繁的强力冲击作用,使得刀具承受较大的冲击应力。在上述两因素的综合作用下,当刀具刃口局部区域应力达到其脆性解理强度时,就会发生微小的脆性剥落或崩刃。

而在发生剥落或崩刃处极容易产生应力集中,从而引起更大规模的崩刃或剥落,如图 10(b)、(c)所示。由图 10(d)可看出,圆弧刃 SCD 后刀面存在明显的磨粒磨损痕迹,产生上述现象的一个原因是工件材料中的众多硬质相 SiC 颗粒的刻划作用,虽然单晶金刚石的硬度比 SiC 高出数倍,但由于 SiC 颗粒众多(对本文所使用的材料,每 20 μm 长度上分布 10 个左右的 SiC 颗粒),SiC 对单位长度切削刃的冲击、刻划达 10⁶~10⁷ 次/min(在 $n=1\ 000\ \text{r/min}$ 下);另一原因是超精密切削 SiC_p/2024Al 复合材料时产生的温度比人们先前认为的要高很多,且 SCD 刀具此时在基体中铜元素^[12]和 SiC 增强颗粒的共同作用下发生了化学磨损,从而使得刀具变“软”。如图 10(c)所示,圆弧刃 SCD 刀具圆弧顶部后刀面处的抛物线状磨损平台正是石墨化磨损所致。限于篇幅,该部分内容的详细研究结果将另文发表。



(a) 后刀面(110) (b) 前刀面(110)
(a) Rear face (110) (b) Rake face (110)

(c) 刀尖圆弧顶部后刀面 (d) 中方框部分的放大
(c)Rear face at the tool nose (d)Partial enlarged view A in (c)

图 10 SCD 刀具磨损形貌(切削行程 $L=6.4\ \text{km}$)

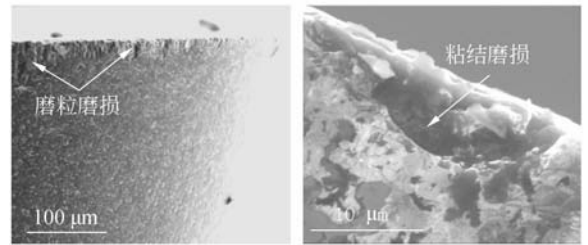
Fig. 10 SCD tool wear appearances after cutting for 6.4 km

3.4.2 PCD 刀具

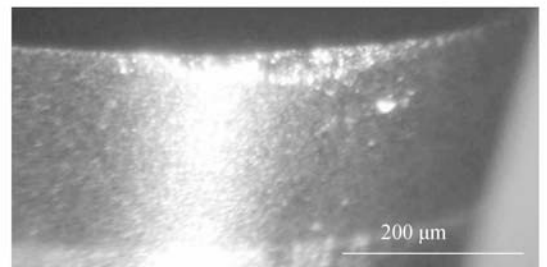
由图 11 可看出,PCD 刀具超精密车削体积分数为 15% 的 SiC_p/2024Al 复合材料时,后刀面、前刀面和刃口部位都会发生明显的磨损。图 11(a)所示为 PCD 刀具后刀面的典型磨损形貌,

图中一些平行于切削速度方向的细小沟槽均匀分布于与工件材料相接触的后刀面处,它们是由不规则形状的 SiC 增强颗粒刻划所造成的,是刀具和工件之间包括两相和三相在内的磨粒磨损。

虽然聚晶金刚石的硬度高于增强颗粒,但切削时,增强颗粒对刀具不断地刻划和微切削破坏了金刚石和结合剂之间的结合,使得金刚石颗粒从刀具材料中脱落。造成磨粒磨损的原因除了 SiC 增强颗粒外还有高温切削,切削表面或粘附在刀具上的部分铝基体发生氧化生成氧化铝,它会对刀具产生刻划作用,从刀具材料中脱落的金刚石颗粒也会对刀具进行刻划。



(a) 后刀面($L=4.8\ \text{km}$) (b) 前刀面($L=7.2\ \text{km}$)
(a) Rear face ($L=4.8\ \text{km}$) (b) Rake face ($L=7.2\ \text{km}$)



(c) 刃口磨损($L=14.4\ \text{km}$)
(c) Radial wear ($L=14.4\ \text{km}$)

图 11 PCD 刀具典型磨损形貌

Fig. 11 Wear appearances of PCD tool

由图 11(b)可看出,超精密车削体积分数为 15% 的 SiC_p/2024Al 复合材料时,PCD 刀具前刀面的主要磨损模式是粘结磨损。在切削初始阶段,由于刀具前刀面和新鲜的切屑底面相接触,前刀面也会受到切屑中增强颗粒的刻划作用。然而,由于 PCD 刀具的前刀面和刃口较粗糙,再加上铝基体本身的粘性较强,从而切削不久前刀面就发生了粘结现象。正是由于粘结材料的存在,使前刀面免于进一步的磨粒磨损。然而由于粘结

材料和积屑瘤的不断生长和脱落,前刀面刀具材料不断被切屑撕裂带走,从而使刀具经受较严重的粘结磨损。随着后刀面磨粒磨损和前刀面粘结磨损的加重,PCD 刀具最终会发生明显的刃口磨损,如图 11(c)所示。

4 结 论

上述试验研究结果表明, SiC_p/Al 复合材料超精密车削加工性较差,具体表现在以下几方面:

(1) 切削表面包含大量微孔洞、微裂纹、坑洞、划痕、基体撕裂、表面残留物突起等加工缺陷。

(2) 切削该材料时一般形成锯齿型切屑,不利

于切削过程稳定性和加工表面质量。

(3) 切削时刀具-工件相对振动剧烈,造成表面粗糙度波动剧烈。

(4) SCD 刀具脆性崩刃、剥落情况较严重,PCD 刀具发生较严重的后刀面磨粒磨损和前刀面粘结磨损。

正因为上述不利因素或现象的存在,超精密切削体积分数为 15% 的 SiC_p/Al 复合材料时要获得表面粗糙度 R_a 低于 10 nm 的超光滑表面是极其困难的。虽然如此,通过合理、正确地选择工艺参数和刀具可以较大幅度地提高表面质量,并可望获得表面粗糙度 R_a 低于 20 nm 的加工表面。

参考文献:

- [1] MIRACLE D B. Metal matrix composites—from science to technological significance [J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65: 2526-2540.
- [2] 张剑寒, 张宇民, 韩杰才, 等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试 [J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(2): 179-184.
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)
- [3] 崔岩, 李丽富, 李景林, 等. 制备空间光机结构件的高体份 SiC/Al 复合材料 [J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(8): 1175-1180.
CUI Y, LI L F, LI J L, *et al.*. High volume fraction SiC/Al composites for space-based optomechanical structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1175-1180. (in Chinese)
- [4] 林再文, 刘永琪, 梁岩, 等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用 [J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(8): 1181-1185.
LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y, *et al.*. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1181-1185. (in Chinese)
- [5] CHANDRASEKARAN H, JOHANSSON J O. Influence of processing conditions and reinforcement on the surface quality of finish machined aluminum alloy matrix composites [J]. *Annals of the CIRP*, 1997, 46(1): 493-496.
- [6] HUNG N P, TAN T C, ZHONG Z W, *et al.*. Ductile-regime machining of particle-reinforced metal matrix composites [J]. *Machining science and technology*, 1999, 3(2): 255-271.
- [7] CHEUNG C F, CHAN K C, TO S, *et al.*. Effect of reinforcement in ultra-precision machining of Al6061/SiC metal matrix composites [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47: 77-82.
- [8] ARCONA C, DOW T A. A new technique for studying the chip formation process in diamond turning [J]. *Precision Engineering*, 1996, 18: 157-160.
- [9] KOMANDURI R, BROWN R H. The formation of microcracks in machining a low carbon steel [J]. *Metals Materials*, 1972, 6(12): 531-533.
- [10] 王洪祥, 董小瑛, 董申. 金刚石车削表面微观形貌形成机理的研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34(4): 509-513.
WANG H X, DONG X Y, DONG SH. Generation of surface micro-topography in diamond turning [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(4): 509-513. (in Chinese)
- [11] CHEUNG C F, CHAN K C, LEE W B. Surface

characterization in ultra-precision machining of Al/SiC metal matrix composites using data dependent systems analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003,140:141-146.

[12] MASAO U. An analysis of the catalysis of Fe, Ni or Co on the wear of diamonds[J]. *Tribology International*, 2004,37:887-892.

作者简介:



葛英飞(1975—),男,安徽含山人,工学博士,讲师,2004年、2007年于南京航空航天大学分别获硕士和博士学位,主要从事高速加工技术、难加工材料加工技术、高效精密加工技术等方面的研究。E-mail: yingfeige@yahoo.com.cn



杨辉(1969—),男,浙江宁波人,博士,研究员,1989年、1992年和1999年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事超精密基础元部件及集成技术、超精密加工工艺及微机械超精密加工技术的研究。E-mail: yanghui303@gmail.com



徐九华(1964—),男,安徽马鞍山人,教授,博士生导师,1986年、1989年和1992年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事难加工材料高效精密加工方面的研究。E-mail: jh xu@nuaa.edu.cn

●下期预告

特征谱区筛选在近红外光谱检测茶叶游离氨基酸含量中的应用

郭志明,赵杰文,陈全胜,黄星奕

(江苏大学食品与生物工程学院,江苏镇江212013)

在近红外光谱快速检测茶叶游离氨基酸含量过程中,为了提高检测的精度和稳定性,利用特征谱区结合偏最小二乘法建立预测模型。分别尝试联合区间偏最小二乘法和遗传偏最小二乘法等特征谱区筛选方法,通过交互验证法确定偏最小二乘模型的主成分因子数和筛选区间,以预测均方根误差 RMSEP 和作为模型评价指标的相关系数 R 。试验结果表明:两种方法建立模型的预测能力都好于传统 PLS 模型;利用联合区间偏最小二乘法建立的预测模型最佳,预测时的相关系数 R 和预测均方根误差 RMSEP 分别为 0.9542 和 0.2560。研究结果表明,近红外光谱结合特征谱区筛选方法可以快速准确地测定茶叶中游离氨基酸含量。