

文章编号 1004-924X(2011)12-2907-12

## 高速铣削 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料时 聚晶金刚石刀具的磨损机理

葛英飞<sup>1\*</sup>, 徐九华<sup>2</sup>, 傅玉灿<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院 机械学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**采用聚晶金刚石刀具(PCD),以 600~1200 m/min 速度对 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料进行了高速铣削试验,研究了铣削时 PCD 刀具的磨损机理。使用扫描电镜(SEM)观察加工材料表面和刀具前/后刀面磨损带,X射线衍射仪分析已加工表面物相,并使用能谱(EDS)和激光拉曼谱对后刀面磨损带进行元素分析。结果表明,增强颗粒碳化硅的高频刻划和冲击是导致刀具晶粒脱落、磨粒磨损、崩刃、剥落的主要机制,切削高体积分数增强铝基复合材料、经热处理的复合材料或使用更高的切削速度时,PCD 刀具会产生明显微裂纹。另外,增强颗粒体积分数是影响 PCD 刀具磨损的最显著因素,增强颗粒尺寸、工件材料热处理状态、刀具材料晶粒尺寸和冷却条件对刀具磨损均有显著影响。PCD 刀具刀的寿命在 70~240 min 之间。结论认为,增强颗粒机械冲击、切削振动和热冲击的综合作用是刀具产生微裂纹的主要原因。在高速铣削时的高温、高压下,工件材料中的铝元素和铜元素会向刀具有一定程度的扩散,PCD 刀具在铜元素的催化作用下会发生轻微的石墨化磨损。

**关键词:**颗粒增强铝基复合材料;高速铣削;聚晶金刚石刀具;磨损形态;磨损机理

**中图分类号:**TG506.2;TG113.26 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.2907

## Wear mechanisms of PCD tool in high-speed milling of SiC<sub>p</sub>/Al composites

GE Ying-fei<sup>1\*</sup>, XU Jiu-hua<sup>2</sup>, FU Yu-can<sup>2</sup>

(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)

\* Corresponding author, E-mail: yingfeige@163.com

**Abstract:** Milling tests for SiC<sub>p</sub>/2009Al composites were performed by using Polycrystal Diamond (PCD) tools at the cutting speed of 600—1 200 m/min and the mechanisms of tool wear were investigated. A Scanning Electron Microscope (SEM) was used to examine the machined surfaces and tool wear land, an X-ray diffractometer (XRD) was used to analyze the substances on the machined surface and the laser Raman spectra and Energy Density Spectrometry (EDS) were taken to analyze the elements on the tool wear land. The results show that the tool grain breaking-off, abrasive wear, chipping and the peeling caused by the high frequency impact and the script of SiC particles are the preva-

收稿日期:2011-03-25;修订日期:2011-05-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA04Z116);航空科学基金资助项目(No. 20090343006);江苏省高校自然科学基金资助项目(No. 09KJB460004)

lent wear patterns. When high volume fraction materials or heat treated materials are milled, or the milling is at a higher cutting speed, micro-cracks will form on the PCD tools. Furthermore, volume fractions, average sizes of SiC particles, tool grain sizes, cooling and heat treating conditions have significant influence on the tool wear. It concludes that the life of PCD tools is in the range of 70—240 min. The micro-cracks are produced on the tool flank under the combined effects of SiC particle impact, cutting vibration and heat impact. Moreover, the aluminum and copper can be diffused into the tool matrix under the very high cutting temperature and cutting forces and the trivial graphitization is taken place on the PCD tools due to the catalysis of copper in the aluminum matrix.

**Key words:** particulate reinforced aluminum matrix composite; high-speed milling; Polycrystal Diamond(PCD) tool; wear pattern; wear mechanism

## 1 引 言

碳化硅颗粒增强铝基复合材料( $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料)具有比强度和比模量高、耐高温、耐磨、耐疲劳、热膨胀系数小、尺寸稳定性好等优异的综合性能,从而广泛应用于航空航天、先进武器系统、汽车、光学精密仪器、电子和体育用品等领域<sup>[1-3]</sup>。但该材料由于塑性低、增强颗粒的磨粒磨损作用以及在微观上的不均匀性而难于机械加工,特别体现在刀具寿命短、表面质量差、生产效率低、加工成本高等方面<sup>[4-5]</sup>。由于增强相 SiC 颗粒的加入,复合材料变得硬而脆,坚硬的 SiC(硬度约为 HV2700-3500)对刀具会造成严重的磨粒磨损,很多情况下硬度比增强相低的传统刀具,如高速钢和硬质合金都无法对其进行加工。如粗加工时,高速钢在数十秒、硬质合金在数分钟内即宣告失效<sup>[6]</sup>;在同样加工条件下,氮化钛涂层硬质合金刀具和陶瓷刀具崩刃现象严重且陶瓷刀具在高温下对熔融铝还有一定的亲合性<sup>[7]</sup>;立方氮化硼(CBN)刀具也会发生较严重的粘结磨损和磨粒磨损<sup>[8]</sup>;聚晶金刚石(PCD)刀具高速车削时具有相对较高的耐用度,但耐用度也远低于切削常规的有色金属材料<sup>[9]</sup>。高刀具磨损率一方面会造成零件形状精度不易保证,另一方面由于被迫频繁更换刀具而无法对大型、整体结构件实现数字化高效加工。

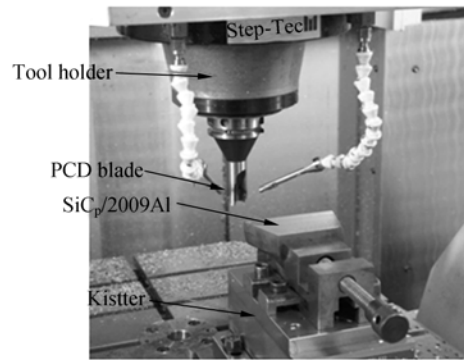
近年来,高速切削技术开始在  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料的高效、精密加工中得到应用,但对各类切削加工研究以车削和钻削为主,十分缺乏关于高速铣削的研究,到目前为止取得的相关研究成果非常有限。此外,在高速铣削金属基复合材料

(Metal Matrix Composites, MMC)的研究中,国内外研究者绝大多数选择了硬质合金或硬质合金涂层刀具,还未涉及 PCD 超硬刀具在高速铣削 MMC 时的刀具耐用度及刀具磨损的研究。李丹<sup>[10]</sup>等使用 K10 硬质合金铣刀在干式条件下对  $\text{Al2024}/\text{SiC}_p$  复合材料进行中低速(1000~1800 r/min)铣削加工实验,研究表明,加工过程中刀具的失效形式主要为后刀面磨损和崩刃两种形式,增强颗粒尺寸对刀具的失效形式有重要影响。吴震宇等<sup>[11]</sup>以 10~180 m/min 的切削速度使用 TiAlN 涂层超细晶粒整体硬质刀具对质量分数为 15% 的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  高速铣削时的刀具磨损进行了研究,结果表明涂层硬质合金铣刀在铣削过程中的主要磨损形式是涂层脱落与磨料磨损。许立福<sup>[12]</sup>等使用 PCD 刀具,对体积分数为 56%、增强颗粒尺寸为 60  $\mu\text{m}$  的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料进行了铣削试验(铣削速度  $v=5\sim 300$  m/min),研究了切削速度、每齿进给量、切削深度对已加工表面粗糙度的影响,但没有针对刀具磨损进行研究。Paulo Davim 等<sup>[13]</sup>使用 K10 硬质合金刀具对体积分数为 55% 的碳纤维增强树脂基复合材料进行了铣削研究(铣削速度小于 47 m/min),建立了表面粗糙度  $R_a$  的多元回归经验公式,分析了切削速度和进给量对表面粗糙度和加工表面损伤的影响,该研究同样没有涉及刀具磨损。Nieminen 等<sup>[14]</sup>使用 K10 硬质合金刀具对树脂基复合材料进行了高速铣削试验( $v=800\sim 1400$  m/min),结果表明刀具寿命仅为 20 min。Suresh Kumar Reddy<sup>[15]</sup>等使用 TiAlN 涂层硬质合金刀具对质量分数为 20% 的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  进行了铣削试验( $v=100\sim 200$  m/min),研究了该材料铣削加工表面质量及加工损伤,但没有涉及刀具磨损的研究。

由以上文献可知,研究者所采用的速度都是中低速,且很少采用 PCD 刀具。由此可见,针对 PCD 刀具高速铣削时的刀具磨损及其机理方面的研究还十分匮乏,从而在实际生产中 MMC 高速铣削工艺数据也相当缺乏。目前,技术人员只能凭经验来选取较为保守的工艺参数,从而造成加工参数选择不当、加工表面质量和加工效率低下、加工成本昂贵。工艺参数选择不当造成的加工表面质量恶化,会严重影响零件的各项使用性能,而重要零部件在服役期内的突然失效更会引发重大灾难。本文采用 PCD 刀具在 600~1200 m/min 速度对 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料进行高速铣削加工试验,研究了 PCD 刀具的磨损形式及其产生机理,并探讨了切削参数、增强颗粒体积分数及尺寸、刀具材料晶粒尺寸、冷却条件及工件热处理状态对刀具磨损的影响。

## 2 试验条件及方案

高速铣削试验在 MIKRON UCP710 五坐标高速加工中心上进行,该机床功率为 16 kW,最高转速为 18 000 r/min。工件材料为 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料(由沈阳金属研究所提供),SiC 增强颗粒平均尺寸为 3.5 和 7 μm,体积分数分别为 17%、20%、35%。PCD 复合片为 ZDGT 150408 R-85,复合片焊接在硬质合金基体上,焊接后的刀片安装在直径为 25 mm 的刀杆上(规格为 F3040. H63A. 025. Z02. 15)。PCD 刀片前角为 0°,后角为 10°,刀尖圆弧半径为 0.8 mm,修光刃长度为 1.2 mm,刀具材料晶粒度为 5 μm 和 25 μm,刀具实物图及铣削实景图如图 1 所示。若非特殊说明,试验在干切条件下进行,增强颗粒体积



(b) PCD 刀具高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料  
(b) High speed milling with PCD tools

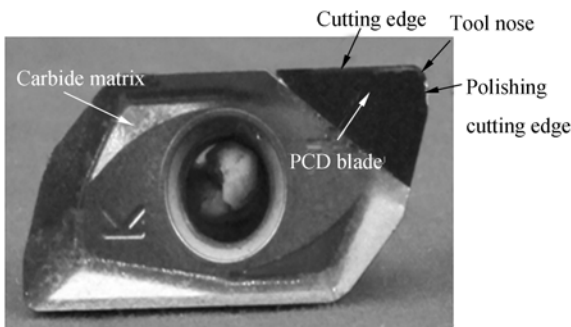
图 1 PCD 刀具及其在高速铣削中的实景图

Fig. 1 Photograph of PCD tool and high speed milling

分数为 20%,刀具材料晶粒度为 25 μm,铣削速度  $v=1\ 200$  m/min,每齿进给量  $f_z=0.25$  mm/tooth,径向切宽  $a_w=0.5$  mm,轴向切深为 6 mm。采用 Kistler 9265B 三向压电式测力系统(包括 Kistler 5019A 电荷放大器及 Kistler Dynoware 数据采集与处理系统)对高速铣削力进行测试。采用半自然热电偶(夹丝法)对高速铣削温度进行测量(测量软件使用自行开发的热电势采集系统:包括 NI USB-6211 型多功能数据采集卡、与数据采集卡配套的使用 LABVIEW 自行开发的一套测量程序)。

表 1 不同试验条件下刀具磨损与表面粗糙度对比试验  
Tab.1 Comparison of tool wear and surface roughness in different cutting conditions

Test number	Average particle size/ $\mu\text{m}$	Tool grain size/ $\mu\text{m}$	Cooling condition	Heat treating condition
No. 10	3.5	25	Dry	No heat treatment
No. 11	7	25	Dry	No heat treatment
No. 12	7	25	Wet	No heat treatment
No. 13	7	25	Dry	T6 (Solution treated at 500 °C and aged for 96 h in air)
No. 14	7	5	Dry	No heat treatment



(a) PCD 刀具实物图片  
(a) Photo of PCD tool

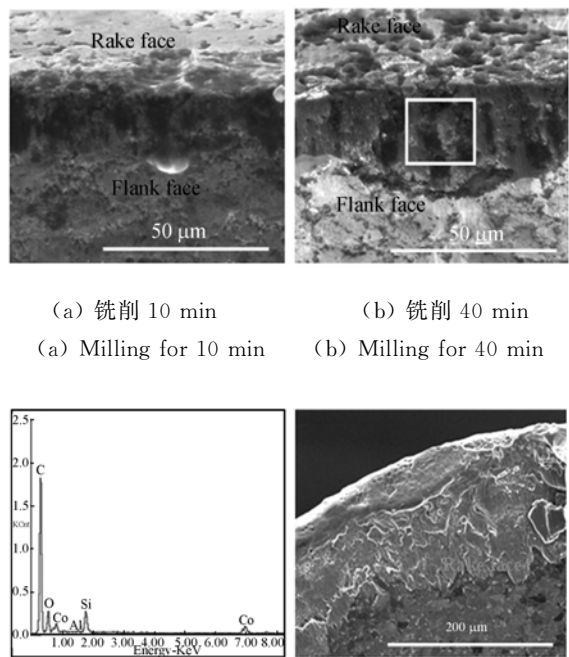
采用比较法在自制的高精度快速热电偶标定装置上对半自然热电偶进行标定。使用光学显微镜对刀具后刀面磨损进行测量,使用扫描电镜(Quanta 200)对刀具磨损形貌及磨损机理进行研究。使用  $\text{HCl}(50\%) + \text{HNO}_3(4\%) + \text{HF}(3\%)$  溶液消融刀具上的积屑瘤(Built-up Edge, BUE)。使用 MarSurf Psl 型粗糙度仪(探头直径为  $2\ \mu\text{m}$ )对加工表面粗糙度进行测量,并设定取样长度为  $5.6\ \text{mm}$ ,在每个试样加工表面不同位置取 5 点作为测量点,以这 5 点测量值的平均值作为最终测量结果。表 1 用于对比研究增强颗粒尺寸、刀具材料晶粒尺寸、冷却条件及工件热处理状态对刀具磨损和加工表面粗糙度的影响。

### 3 试验结果

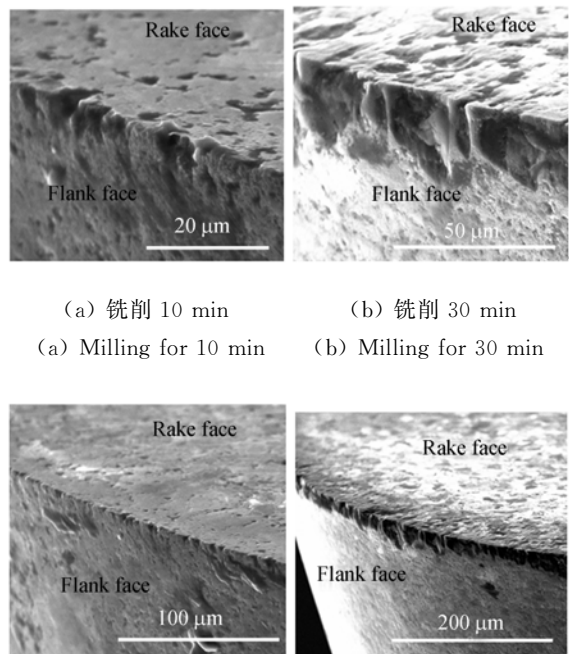
#### 3.1 磨粒磨损及刀具晶粒脱落

由图 2(a)可看出,PCD 刀具磨损初期,碳化硅增强颗粒仅仅将刀具中的黏接剂及细小的 PCD 颗粒刮除,从而磨粒磨损不明显。但由于增强颗粒不断的刻画、摩擦、碰撞,当刀具磨损到一定阶段时,PCD 刀具上会形成明显的沟槽状磨损(图 2(b))。磨粒磨损的证据可由沟槽内的硅含量增加来说明(图 2(c))。由图 2 可知,磨粒磨损一般形成于刀具后刀面,而前刀面磨粒磨损不明显。这是因为前刀面与切屑接触压力比后刀面与工件的压力小,且切削不久前刀面就粘附一层工件材料(图 2(d)),并积累形成 BUE,从而对前刀面具有一定的保护作用,使其免于进一步的磨粒磨损。

如图 3 所示,高速铣削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料时,PCD 刀具发生金刚石颗粒脱落现象较普遍。刀具磨损初期仅有较细小的 PCD 颗粒在 SiC 增强颗粒的刻划和冲击下从刀具基体脱落(图 3(a)),这是因为刀具晶粒尺寸比增强颗粒平均尺寸大一个数量级,所以增强颗粒一开始不能对 PCD 晶粒造成刻划并使其脱落。随着切削时间的增加,刀具晶粒周围黏接剂被刮除,在切削力的作用下凸出的大颗粒 PCD 晶粒也发生脱落(脱落坑的尺寸与 PCD 刀具晶粒平均尺寸( $25\ \mu\text{m}$ )非常接近,图 3(b))。PCD 刀具刃磨时留下的刃磨缺陷,如刀刃不平整、磨痕和细小颗粒脱落留下的微缺口等(图 3(c))是促进刀具发生颗粒脱落



(a) 铣削 10 min (a) Milling for 10 min  
(b) 铣削 40 min (b) Milling for 40 min  
(c) (b) 图方框部位的能谱 (c) EDS in rectangle of (b)  
(d) 前刀面上的积屑瘤 (d) BUE on rake face  
图 2 PCD 刀具后刀面磨粒磨损及前刀面积屑瘤  
Fig. 2 Abrasive wear on the flank and BUE on the rake face of PCD tool



(a) 铣削 10 min (a) Milling for 10 min  
(b) 铣削 30 min (b) Milling for 30 min  
(c) 新刀刃口形貌 (c) Cutting edge appearance  
(d) 铣削 30 min 后的刃口形貌 (d) Milling for 30 min of new tool

图 3 PCD 刀具晶粒脱落形貌

Fig. 3 Grain breaking-off of PCD tool during milling

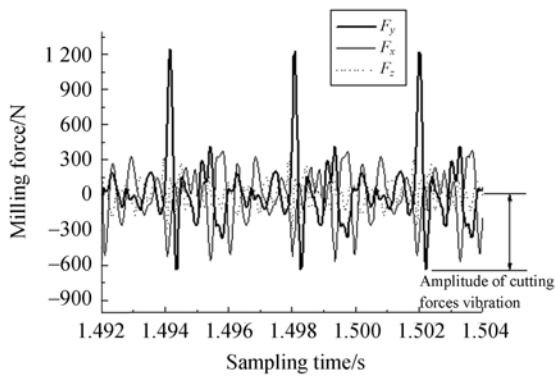
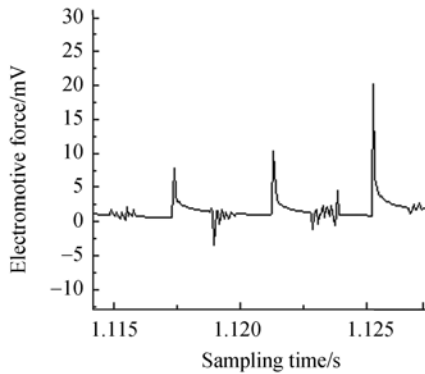


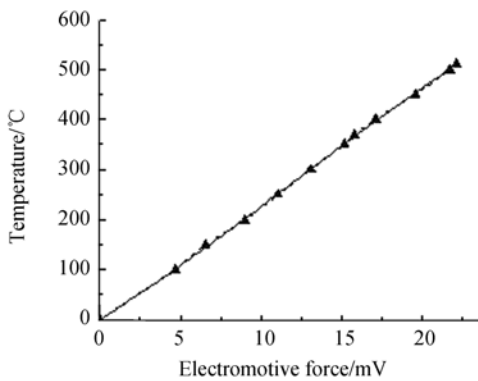
图 4 PCD 刀具高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料时的切削力原始信号(切削力定义为:进给方向为 F<sub>y</sub>,刀具径向为 F<sub>x</sub>,刀具轴向为 F<sub>z</sub>)

Fig. 4 Cutting force signals during high speed milling of SiC<sub>p</sub>/2009Al



(a) 切削温度原始信号

(a) Electromotive force signals



(b) 切削温度标定曲线

(b) Calibration curves of workpiece-constantan thermocouple

图 5 PCD 刀具高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料时的切削温度原始信号及其标定曲线

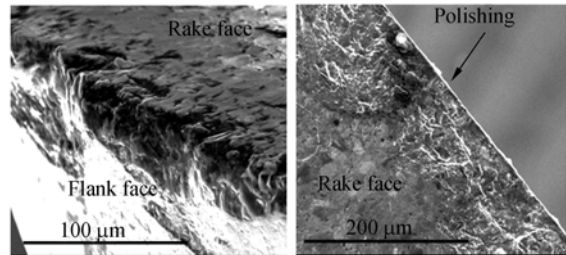
Fig. 5 Cutting temperature signals and calibration curves during high speed milling of SiC<sub>p</sub>/2009Al

现象的重要因素。这些刃磨缺陷处都是应力集中的区域,在高速切削时很高的切削力(高于 1 200 N,图 4)和切削温度(接近 500 °C,图 5)下,很容易在这些区域形成对材料的破坏,进而造成更大区域的破坏/断裂。通过选择一段切削刃磨损形貌做跟踪研究发现(图 3(d)),切削一段时间后,更大、更多的金刚石颗粒发生了脱落。

值得提出的是,在本文试验条件下,由于试件材料中的增强颗粒平均尺寸远小于 PCD 刀具晶粒尺寸,所以磨粒磨损和刀具晶粒脱落现象并不十分剧烈,从而整体上刀具拥有较长的耐用度。

### 3.2 崩刃及剥落

由图 6(a)可看出,高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料时,崩刃也是 PCD 刀具的一种普遍的磨损形式。



(a) 后刀面崩刃

(b) 修光刃处的剥落

(a) Chipping (flank)

(b) Peeling (polishing cutting edge on rake face)

图 6 PCD 刀具发生崩刃和剥落形貌(切削 90 min)

Fig. 6 Chipping and peeling on PCD tool (milling for 90 min)

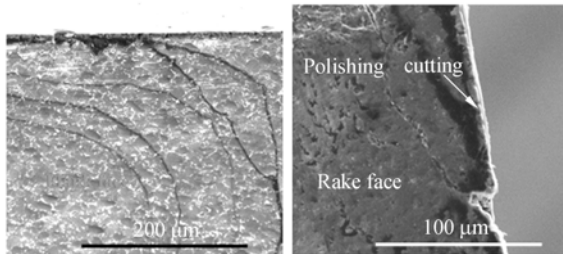
产生崩刃的主要原因有两个:一是在增强颗粒的高速、高频冲击作用下,刀刃刃磨时产生的金刚石突出颗粒(群)容易从刀具基体上脱落(因为此时切削分力大于钴-金刚石界面粘结力),当若干刀具晶粒脱落形成凹坑或黏接剂被刮除使刀具晶粒凸出时,在切削力的作用下其周围刀具材料容易发生集体脱落;二是高速切削时切削力及切削振动相当大(如图 4 中 F<sub>y</sub> 在负方向的值达 600 N),韧性较弱的 PCD 刀具刃口薄弱地区就会发生局部断裂。发生崩刃的区域在后续的磨损过程中会逐渐或突然扩大,形成破损。

由图 6(b)可知,高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料时,在增强颗粒冲击、轴向切削振动(如图 4 中 F<sub>z</sub> 在负方向的值达 150 N)和高切削力作用下,抗冲击性和韧性较弱的 PCD 刀具底刃和修光

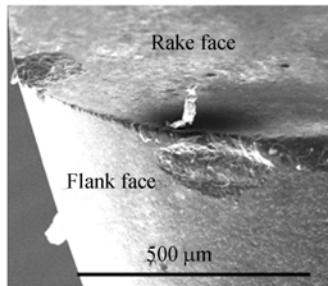
刃部位容易产生较大面积剥落现象。

### 3.3 刀具微裂纹

如图 7(a)~(b)所示,高速铣削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料时,在 PCD 刀具前刀面或后刀面处会产生微裂纹。



(a) 后刀面 (b) 前刀面处的副切削刃  
(a) Flank (b) Side cutting edge of rake face



(c) 微裂纹扩展导致刀具材料断裂脱落

(c) Tool material fracture due to spread of micro cracks

图 7 切削冲击振动和切入切出温度差在 PCD 刀具基体上形成微裂纹(切削 60 min)

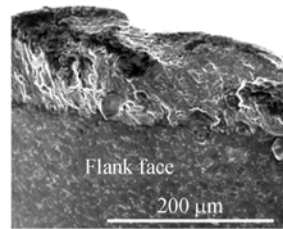
Fig. 7 Micro cracks generated by  $\text{SiC}$  particle impact, cutting vibration and heat impact (milling for 60 min)

由于 PCD 本身抗振性和韧性不强,且刀具本身制备过程中不可避免会残留内部孔洞和微裂纹、黏接剂-刀具晶粒界面缺陷如结合不善、微空洞等,在很高的切削速度下,增强颗粒对刀具的冲击以及切削振动产生的冲击力会超过黏接剂对刀具晶粒的把持力,从而在刀具基体中(主要是黏接剂-刀具晶粒界面处)形成微裂纹。此外,干切削时切入和切出的温差所形成的热冲击也是微裂纹产生的原因之一。虽然,高速切削时 PCD 刀具基体裂纹一般仅发生在浅层;但这种裂纹对刀具磨损也有重要影响,如造成刀具表层黏接剂和刀具晶粒分层,当切削力增大、刀具磨损较大时,这种微裂纹可能或向纵深和横向扩散,加速刀具发生

崩刃或剥落等磨损形式,如图 7(c)所示。切削高体积分数工件材料、切削速度较高或切削热处理材料时,PCD 刀具易于产生这种微裂纹。由此可见,在充分冷却的条件下高速铣削体积分数相对较低的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料时可避免 PCD 刀具产生微裂纹现象。

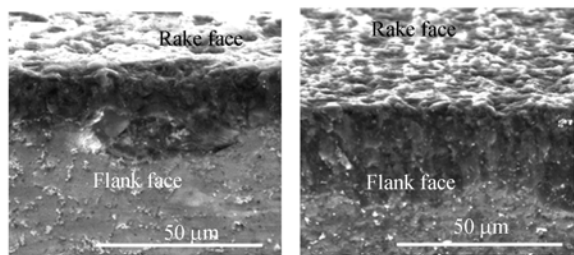
### 3.4 粘结磨损

PCD 高速干切削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料时,切削力和切削温度较高,铝基体很容易粘结在刀具前刀面上形成显著的形状较大的 BUE(图 8(a)),BUE 脱落时往往同时将部分刀具基体材料撕裂,造成刀具材料的流失,从而使刀具切削一定时间后发生明显的粘结磨损,如图 8(b)和(c)所示。值得注意的是,前刀面处的粘结磨损形式与后刀面显著不同,前刀面是点蚀状粘结磨损,后刀面是片状粘结磨损。



(a) 积屑瘤(腐蚀前)

(a) BUE (before etching)



(b) 后刀面粘结磨损(腐蚀后) (c) 前刀面粘结磨损(腐蚀后)

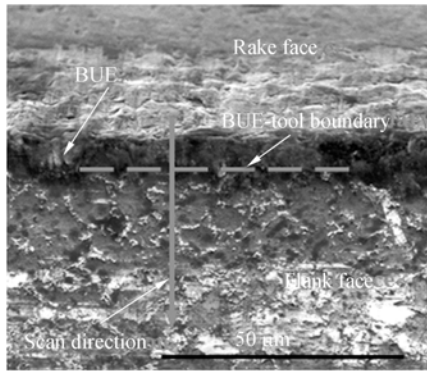
(b) Adhesive wear on flank (after etching) (c) Adhesive wear on rake face (after etching)

图 8 PCD 刀具后刀面及前刀面粘结磨损

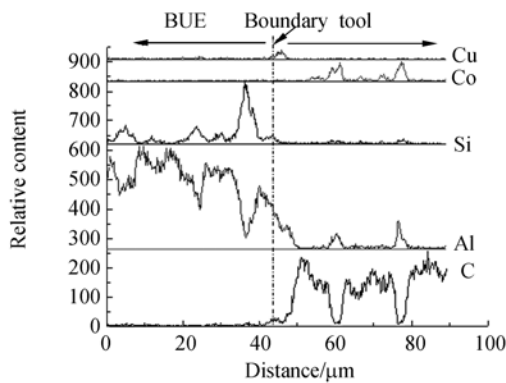
Fig. 8 Adhesive wear on flank and rake face

### 3.5 扩散磨损和石墨化磨损

PCD 刀具后刀面轻抛光后 EDS 线扫描显示(图 9),高速干切削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料时,由于切削压力和切削温度高,工件材料中的铝元素



(a) 后刀面磨损带能谱分析示意图  
(a) Sketch map of EDS analysis



(b) 能谱分析结果  
(b) Results of EDS analysis

图 9 PCD 刀具后刀面 EDS 线扫描  
Fig. 9 EDS analysis of PCD tool flank

和铜元素向刀具中有一定程度的扩散, Xiao 等人<sup>[16]</sup>的研究也表明,即使在冷却条件下,PCD 刀具切削铝合金时工件材料中的铝和刀具基体中的钴也有较强的亲和性。但加工表面 XRD 显示(图 10)有氧化铜生成,这表明 PCD 刀具可能发生了一定程度的石墨化磨损。Masao Uemura<sup>[17]</sup>的研究表明,铜元素及其氧化物在有硬质相存在的条件下能使单晶金刚石刀具发生剧烈的石墨化磨损。PCD 刀具高速切削含质量分数 3.8% 铜元素的 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料时温度较高,后刀面存在较大压应力,加上钴黏接剂本身就是促进石墨化的元素,所以石墨化磨损不可避免。如图 11 所示,对高速铣削 30 min 后的 PCD 刀具后刀面进行的激光 Raman 物相分析表明,石墨拉曼峰(1 581.72 cm<sup>-1</sup>)的存在表明 PCD 刀具高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 时的确发生了石墨化(图中 1 338.83 cm<sup>-1</sup>对应的为金刚石拉曼峰)。需要指

出的是,Raman 测试时选择了后刀面磨损带上的单颗金刚石颗粒,由于单位时间内金刚石石墨化产生的石墨量很少,且生成的石墨不断及时地受到工件材料的擦拭作用,从而图 11 中的石墨峰强度较弱。由于 PCD 晶粒发生一定程度的石墨化后不久便在随后的切削过程中从刀具基体中脱落,所以刀具整体石墨化磨损不明显。

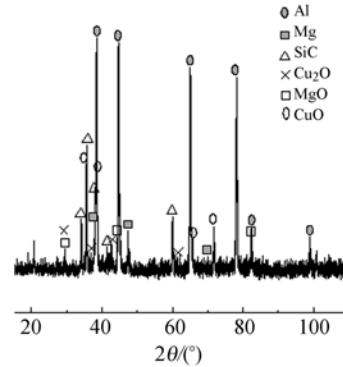


图 10 PCD 刀具高速铣削 SiC<sub>p</sub>/2009Al 表面的 XRD 分析  
Fig. 10 XRD analysis on machined surface produced by PCD tool

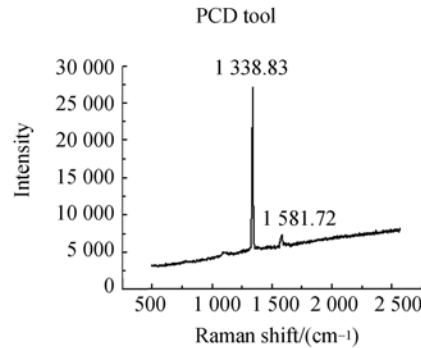


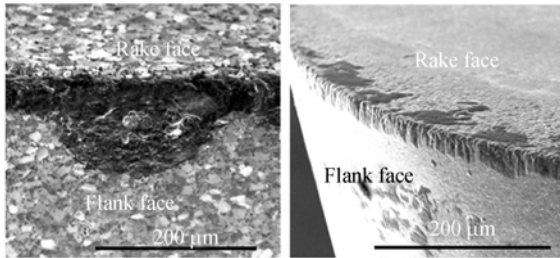
图 11 PCD 刀具后刀面磨损带的激光 Raman 物相分析  
Fig. 11 Raman spectra measured in flank wear land of PCD tool

## 4 分析与讨论

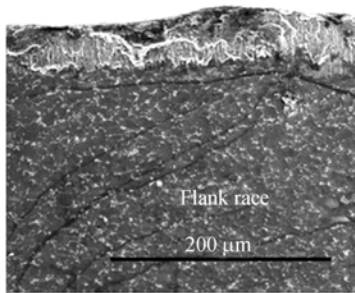
### 4.1 刀具磨损及其影响因素分析

增强颗粒体积分数是影响 PCD 刀具磨损的最显著因素,随着增强颗粒体积分数的增加,刀具磨损显著增大。这是因为体积分数越高,相同时间内增强颗粒与刀具划擦、碰撞的次数越多,从而刀具受到的磨料磨损和冲击作用越严重。如图 12(a)、(b)所示,在相同切削条件下,高速切削体

积分数高的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料时刀具发生崩刃和 PCD 颗粒脱落的情况更加严重, 由于此时刀具和机床之间振动更加剧烈, 韧性较弱的 PCD 刀具会产生微裂纹(图 12(c))。



(a) 体积分数为 35%(切削刃中部) (b) 体积分数为 17%  
(a) Volume fraction in 35% and milling for 20 min (b) Volume fraction in 17%  
and milling for 90 min (middle of cutting edge)



(c) 体积分数为 35%(切削刃后部)  
(c) Volume fraction in 35% and milling for 20 min  
(rear of cutting edge)

图 12 高速铣削不同体积分数  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料时的后刀面磨损对比( $v=900$  m/min,  $f_z=0.25$  mm/tooth,  $a_w=0.5$  mm)

Fig. 12 Comparison of flank wear for high speed milling  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composite with different volume fractions

不同增强颗粒尺寸、工件材料热处理状态、刀具材料晶粒尺寸和冷却条件下对刀具耐用度的影响如图 13 所示。结合表 1, 对比图 13 中的曲线 No. 10、No. 11 可知, 在其它条件相同时, 随增强颗粒尺寸的减小, 刀具耐用度显著减小。在相同体积分数下, 在一定范围内, 随增强颗粒尺寸减小, 单位体积包含的增强颗粒数目更多, 其对刀具的刻划作用和频率增大, 更容易将颗粒较小的刀具晶粒脱落, 从而使得刀具更容易发生崩刃、磨粒磨损等磨损形式。对比图 13 中的曲线 No. 11、No. 12 可知, 使用切削液(15% Blasterocut 2000

Nuniversal SW)可明显提高刀具耐用度。这是因为试验所采用的切削速度很高, 在巨大的离心力作用下切屑和脱落的增强颗粒随切削液一起被迅速甩出, 刀具对切屑和脱落增强颗粒的二次切削现象大大减少, 从而减轻了刀具的磨粒磨损。另一个重要原因是切削液的使用会显著抑制 BOE 的产生, 从而减轻了刀具的粘结磨损。由曲线 No. 11、No. 13 可知, 工件材料热处理状态对刀具耐用度有显著影响, 切削经 T6 处理的材料时刀具耐用度大幅度减小。这是因为材料经热处理后, 基体由于强化作用(晶粒及亚结构细化强化、基体与增强颗粒热膨胀系数差、应变错配等)而硬度显著增大<sup>[18]</sup>, 增强颗粒切削过程中不易发生转动而易于发生破碎或断裂, 从而对刀具的磨粒磨损和冲击作用加剧, 使得切削振动加剧(对比图 4, 图 15), 刀具产生严重崩刃和较大冲击裂纹(对比图 14(a), (c))。

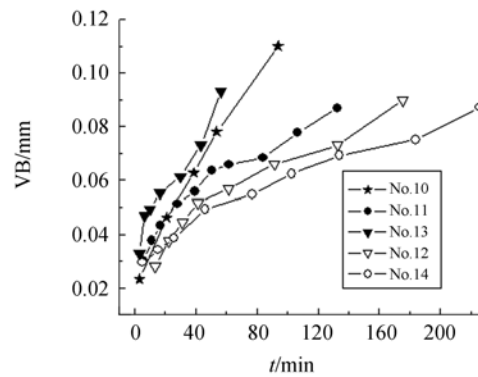
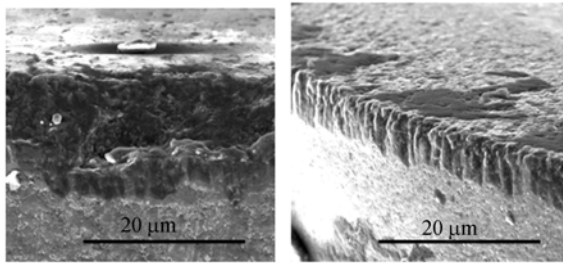


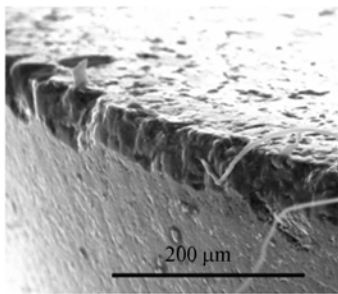
图 13 表 1 各组切削条件下 PCD 刀具耐用度的对比  
Fig. 13 Comparison of PCD tool life with milling conditions in table 1

由图 13 曲线 No. 11、No. 14 可知, 使用较小晶粒的 PCD 刀具可大幅度提高刀具耐用度。这是因为:(1)虽然刀具晶粒较细、耐磨性较低, 但试验所用工件材料的增强颗粒尺寸很小, 此时刀具晶粒尺寸仍大于增强颗粒尺寸, 从而刀具抗磨粒磨损性能没有明显降低(对比图 14(b), (c));(2)对于细晶粒的刀具, 即使有若干刀具晶粒在工件材料中的增强颗粒的刻划、冲击作用下脱落, 也不会对后续磨损有太大影响; 相反, 当刀具晶粒尺寸较大时, 当有若干刀具晶粒脱落后会在刀刃上留下较大凹坑, 从而使其附近材料在后续的磨损过程中容易发生群体脱落, 形成崩刃(对比图 14(b), (c));(3)细晶粒刀具的刃磨质量及刃口质量

较好,所以抗崩刃性和粘结性强(对比图 14(b), (c))。



(a) 切削热处理材料 (b) 刀具材料晶粒为 5 μm  
(a) Heat treated material (b) Tool with 5 μm grain size(milling for 120 min)  
(milling for 30 min)



(c) 切削未热处理材料  
(c) Material without heat treatment (milling for 120 min)  
图 14 工件材料热处理及 PCD 刀具晶粒对刀具磨损的影响

Fig. 14 Effect of workpiece heat treatment and tool grain size on wear of PCD tool

在切削参数中,切削速度对刀具耐用度的影响最为显著,每齿进给量次之,而径向切削宽度的影响不明显。限于篇幅,相关的详细研究结果将另文发表。

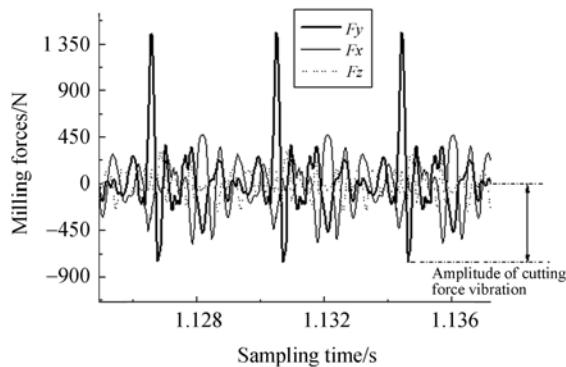
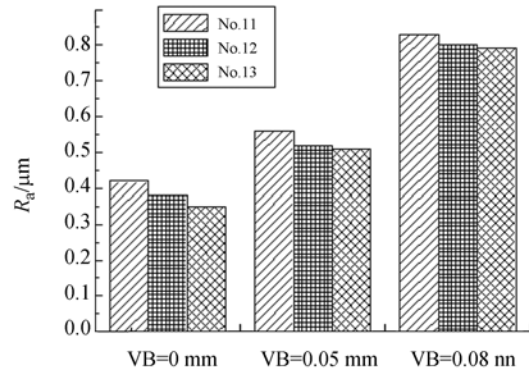


图 15 PCD 刀具高速铣削热处理 SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料时的切削力原始信号

Fig. 15 Cutting force signals during high speed milling of heat treated SiC<sub>p</sub>/2009Al

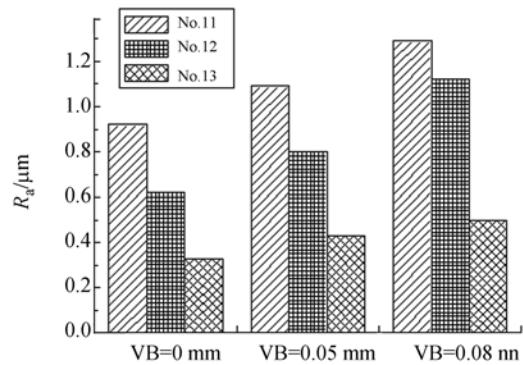
#### 4.2 刀具磨损对加工表面粗糙度的影响

表 1 中 No. 11~No. 13 组试验条件下获得的侧面(由主切削刃切出,沿平行于刀具进给方向测量其粗糙度)和端面(由底刃和修光刃切出,沿垂直于刀具进给方向测量其粗糙度)表面粗糙度  $R_a$  随刀具磨损的变化如图 16 所示。由图 16 可看出,无论对于干切、湿切还是热处理材料,高速铣削表面粗糙度  $R_a$  随 PCD 刀具后刀面磨损 VB 的增加而显著增加。这是因为刀具发生晶粒脱落、崩刃、剥落或磨粒磨损后,刀刃磨损形貌直接复印在加工表面上,从而在加工表面形成深浅不一的划痕。此外,刀刃发生各种形貌磨损后,刀刃锋利性变差,从而工件材料中更多的增强颗粒发生脱落或破碎,在加工表面形成更多的微坑洞和基体撕裂。在本文试验条件下,当  $VB \leq 0.1$  mm 时,侧面表面粗糙度  $R_a \leq 1.05 \mu\text{m}$ 、 $R_z \leq 4.25 \mu\text{m}$ ,底面粗糙度  $R_a \leq 1.35 \mu\text{m}$ 、 $R_z \leq 8.05 \mu\text{m}$ 。



(a) 侧面粗糙度

(a) Roughness of side face



(b) 端面粗糙度

(b) Roughness of step face

图 16 加工表面粗糙度随刀具磨损的变化

Fig. 16 Machined surface roughness versus tool flank wear

### 4.3 硬质合金与 PCD 刀具材料高速铣削性能对比

由图 17 可看出,硬质合金刀具高速铣削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料时,仅 3 min 刀具后刀面磨

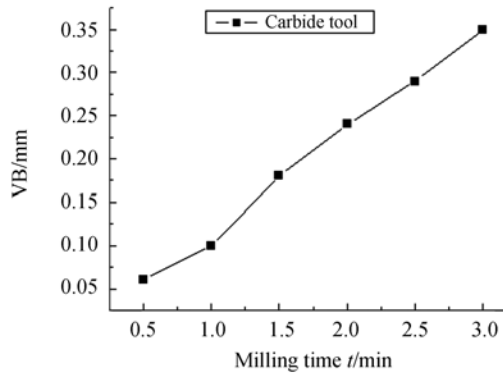
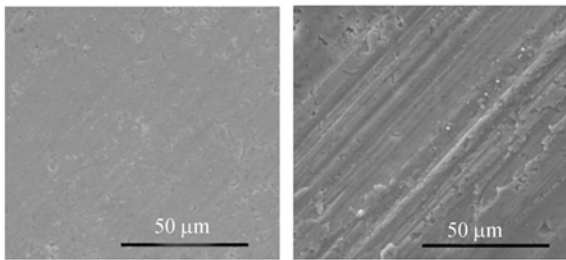


图 17 硬质合金刀具高速铣削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料刀具磨损曲线

Fig. 17 Tool wear curve for carbide tool during high speed milling of  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$



(a) PCD 刀具切出表面 (b) 硬质合金切出表面  
(a) Milling surface using PCD tool (b) Milling surface using carbide tool

图 18 硬质合金与 PCD 刀具高速铣削  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  复合材料加工表面对比

Fig. 18 Machined surfaces of  $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$  obtained by carbide tool and PCD tool

损就达 0.35 mm(由图 13 中的 No. 11 曲线可知, PCD 刀具切削 3 min 时后刀面磨损仅为 0.032 mm);而由图 18 可知,PCD 刀具获得的加工表面质量也明显好于硬质合金刀具。

## 5 结 论

用 PCD 刀具对  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料进行了高速铣削,结果显示,刀具寿命在 70~240 min 之间,增强颗粒碳化硅的高频刻划和冲击是导致刀具晶粒脱落、磨粒磨损、崩刃、剥落的主要机制。PCD 刀具基体微裂纹的产生是由于切削高体积分数工件材料、经热处理复合材料或使用很高的切削速度时增强颗粒冲击、切削振动和热冲击的综合作用。干切削时积屑瘤的不断产生和脱落现象使刀具发生粘结磨损。工件材料中的铝元素和铜元素向刀具中有一定程度的扩散,在铜元素的作用下,PCD 刀具发生了轻微的石墨化磨损。

增强颗粒体积分数是影响 PCD 刀具磨损的最显著因素,增强颗粒尺寸、工件材料热处理状态、刀具材料晶粒尺寸和冷却条件对刀具磨损有显著影响。在切削参数中,切削速度对刀具耐用度的影响最为显著,每齿进给量次之。加工表面的粗糙度和质量对刀具磨损有显著的敏感性。

### 参考文献:

- [1] 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  $\text{SiC}$  mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)
- [2] 崔岩,李丽富,李景林,等. 制备空间光机结构件的

高体份  $\text{SiC}/\text{Al}$  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  $\text{SiC}/\text{Al}$  composites for space-based optomechanical structures[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1175-1180. (in Chinese)

- [3] 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.*. Applica-

- tion of carbon fibre reinforced composite to space optical structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1181-1185. (in Chinese)
- [4] 葛英飞, 徐九华, 杨辉. SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的超精密车削试验[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1621-1629.
- GE Y F, XU J H, YANG H. Experiments of ultra-precision turning of SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1621-1629. (in Chinese)
- [5] EI-GALLAB M, SKLAD M. Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites Part III: comprehensive tool wear models [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2000, 101:10-20.
- [6] 全燕鸣, 周泽华. 不同颗粒度 SiC 增强铝基复合材料的切削加工性与适应刀具[J]. *材料科学与工程*, 1996, 14(4):59-64.
- QUAN Y M, ZHOU Z H. Machinability of aluminum matrix composites reinforced by different size SiC particles and their applicable tools[J]. *Materials Science & Engineering*, 1996, 14(4):59-64. (in Chinese)
- [7] 刘林海. 金属基复合材料的切削加工[J]. *武汉交通大学学报*, 1994, 18(4):363-368.
- LIU L H. Cutting of metal matrix composites[J]. *Journal of Wuhan Transportation University*, 1994, 18(4):363-368. (in Chinese)
- [8] XU J H, ZUO D W, YANG M D, *et al.*. Machining of metal matrix composites[J]. *Trans. NUAA*, 1995, 12(2):161-167.
- [9] IBRAHIM C, MEHMET T, ULVI S. Evaluation of tool wear when machining SiC<sub>p</sub>-reinforced Al-2014 alloy matrix composites [J]. *Materials and Design*, 2004, 25:251-255.
- [10] 李丹, 闫国成. 颗粒增强铝基复合材料铣削加工实验研究[J]. *现代制造工程*, 2007(3):15-17.
- LI D, YAN G C. Experimental study on milling machining of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. *Modern Manuf. Eng.*, 2007(3):15-17. (in Chinese)
- [11] 吴震宇, 王学根, 孙方宏, 等. SiC 颗粒增强铝基复合材料高速铣削工艺研究 [J]. *工具技术*, 2004, 38(3):15-17.
- WU ZH Y, WANG X G, SUN F H, *et al.*. An experimental research on the high-speed milling of SiC particle reinforced aluminum matrix composites [J]. *Mach. Tool Technol.*, 2004, 38(3):15-17. (in Chinese)
- [12] 许立福, 于晓琳, 周家林, 等. PCD 刀具高速铣削 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的表面粗糙度研究 [J]. *沈阳理工大学学报*, 2009, 28(1):41-43.
- XU L F, YU X L, ZHOU J L, *et al.*. A study on the surface roughness for high speed milling SiC<sub>p</sub>/Al-matrix composite using PCD tools[J]. *Trans. Shenyang Ligong University*, 2009, 28(1):41-43. (in Chinese)
- [13] PAULO D J, PEDRO R. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005, 160:160-167.
- [14] NIEMINEN I, PARO J, KAUPPINEN V. High-speed milling of advanced materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 56:24-36.
- [15] SURESH K R, SHIN K S, MIN Y Y. Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, 201:574-579.
- [16] XIAO X, LEV L C, LUKITSCH M J. Material transfer during machining of aluminum alloys with polycrystalline diamond cutting tools [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, 209:5760-5765.
- [17] MASAO U. An analysis of the catalysis of Fe, Ni or Co on the wear of diamonds [J]. *Tribology International*, 2004, 37:887-892.
- [18] 赵玉厚, 肖纯芳, 李建平, 等. 热处理对 SiC<sub>p</sub>/ZL102 复合材料力学和物理性能的影响 [J]. *西安工业学院学报*, 1996, 16(2):157-160.
- ZHAO Y H, XIAO CH F, LI J P, *et al.*. Heat treatment effect on the mechanics and physics performance of SiC<sub>p</sub>/ZL102 composite [J]. *Journal of XI'an Institute of Technology*, 1996, 16(2):157-160. (in Chinese)

## 作者简介:



葛英飞(1975—),男,安徽含山人,工学博士,讲师,2004、2007 年于南京航空航天大学分别获得硕士和博士学位,现为北京航空精密机械研究所客座专家,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@163.com



傅玉灿(1972—),男,福建人,教授,博士生导师,1999 年于南京航空航天大学获得博士学位,1999 年 7 月~2001 年 6 月,在中国科学技术大学从事博士后研究,2007 年入选教育部新世纪优秀人才计划,2003 年获 UTC-容闳科技教育奖。E-mail: yucanfu@nuaa.edu.cn



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,现为南京航空航天大学机电学院副院长,主要从事难加工材料的高效精密加工方面的研究。E-mail: jhxu@nuaa.edu.cn

## ● 下期预告

## 0Cr18Ni9 不锈钢箔的飞秒激光烧蚀特性

徐 斌<sup>1</sup>,伍晓宇<sup>1</sup>,罗 烽<sup>1</sup>,杜晨林<sup>2</sup>,孙秀泉<sup>2</sup>

(1. 深圳大学 机电与控制工程学院 深圳市模具先进制造技术重点实验室,广东 深圳 518060;

2. 深圳大学 电子科学与技术学院 深圳市激光工程重点实验室,广东 深圳 518060)

利用飞秒激光对厚度为 20  $\mu\text{m}$  的 0Cr18Ni9 不锈钢箔进行了表面烧蚀、微细切割等试验,并对不锈钢箔的烧蚀特性进行了研究。首先,根据烧蚀区域的直径和脉冲能量的关系,得到了 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值,并估算了飞秒激光的束腰半径。然后,对飞秒激光切割不锈钢箔的边缘进行金相观察并测试了切割试件的电阻率,以确定飞秒激光切割对不锈钢箔的热影响。最后,对切割试件进行 X 射线衍射分析(XRD),以确定飞秒激光切割对不锈钢箔物相组成的影响。实验结果表明:飞秒激光的束腰半径为 10.416  $\mu\text{m}$ ;厚度为 20  $\mu\text{m}$  的 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值为 0.455  $\text{J}/\text{cm}^2$ ;飞秒激光切割后试件的金相组织处于回复阶段,因此金相组织不会产生明显变化;飞秒激光切割对不锈钢箔的物相组成没有影响,但对物相的相对含量产生了影响。