

# 高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料精密车削加工工艺技术

吕立生 王咏莉 李光 张孝辉 赵丹妮

(北京卫星制造厂,北京 100094)

**文 摘** 针对高体积分数铝基碳化硅材料车削加工过程中出现的刀具磨损严重、寿命低、切削难度大、零件质量难以保证等问题,采用聚晶金刚石刀具(PCD 刀具)对其进行精密车削工艺实验,并利用扫描电镜、粗糙度仪、圆度仪等设备对已加工表面和刀具磨损形态进行观察分析研究。研究表明:刀具材料、切削速度、切削深度和进给量是影响高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料加工质量的主要因素。当切削速度在 25~40 m/min、切削深度在 25~35 μm 和进给量为 25 μm/r 的 PCD 车刀时,切削效果最佳,可以有效地提高加工效率,改善工件表面加工质量,得到表面粗糙度为 0.58 μm 和圆柱度为 0.91 μm 的加工表面。

**关键词** SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料,车削,刀具磨损,PCD 刀具

中图分类号: TG506.7

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.018

## Precision Turning Technology of High Volume SiC<sub>p</sub>/Al Composite Material

LV Lisheng WANG Yongli LI Guang ZHANG Xiaohui ZHAO Danni

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** During the cutting process of high volume SiC<sub>p</sub>/Al composite material, the attrition of the cutter will lower the tool's life, thus leads to the increasing difficulty of the cutting process, makes it more hard to control the final quality of the product. This paper conducted an experiment which is used the PCD cutter to turning the material and analyzed the processed surface of the material and monitoring the tool wear condition with scanning electron microscope, surface roughness measuring instrument, roundness measuring instrument and other equipment. The experiment results indicated that the material of the blade, the cutting speed, the cutting depth and the feed rate are the 3 major factors that influence the final result. When the PCD blade is at 25 to 40 m/min cutting speed, 25 to 35 μm cutting depth, and 25 μm/r feed rate, the quality of the processing comes the best. In this way, the machining efficiency and the quality of the processed surface can be significantly improved, with a result of getting a fine processed surface with 0.58 μm surface roughness, 0.91 μm cylindricity.

**Key words** SiC<sub>p</sub>/Al composite material, Turning, Tool wear, PCD cutter

### 0 引言

高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 具有高比强度、比模量、低热胀系数、高屈服强度、低密度和良好的尺寸稳定性及耐磨性等一系列优异特点,被广泛的应用在航空固体发动机、卫星轴承、卫星铰链等器件中,已成为航空航天应用领域中一种不可或缺材料<sup>[1-3]</sup>。

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料是由超硬的增强相颗粒加入铝基体而得到的一种新型复合材料<sup>[4-7]</sup>。该材料的切

削加工性能很差,特别是 SiC<sub>p</sub> 含量在 40% 以上时。查询国内外文献,对高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的精密加工工艺研究相对较少,没有成型的加工工艺。因此,本文采用聚晶金刚石精密车削加工技术对高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行加工实验,研究刀具材料和工艺参数对加工质量的影响,获得一套成熟的工艺系统。

### 1 试验

收稿日期:2016-05-09

作者简介:吕立生,1988 年出生,硕士,主要从事复合材料精密加工技术研究。E-mail:446842589@qq.com

为满足高精度、高刚度、高稳定性和高自动化的要求,本实验选用瑞士进口的肖布林数控机床。

材料采用航天试用件,  $\text{SiC}_p$  含量为 40%。试件如图 1 所示,力学性能如表 1 所示。刀具的几何参数和力学性能如表 2、表 3 所示。

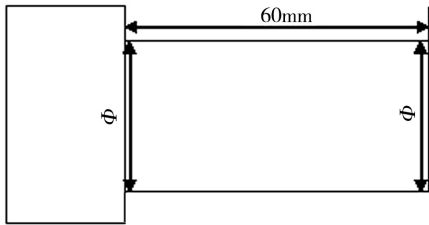


图 1 试样尺寸测量部位示意图

Fig.1 Scale of the test sample

表 1  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料的力学性能

Tab.1 Mechanical property of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composite material

密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	硬度 (HB)	热导率 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	弹性模量 / $\text{GPa}$	弯曲强度 / $\text{MPa}$
2.92	229	120	138	500~550

表 2 刀具的几何参数

Tab.2 Geometric parameters of cutting tools used for experimentation

刀具	前角 / $(^\circ)$	后角 / $(^\circ)$	刃倾角 / $(^\circ)$	刀尖圆弧 半径/mm	切削液
PCD 刀	5	10	0	0.4	无
合金刀	5	10	0	0.4	无

表 3 刀具的力学性能

Tab.3 Mechanical property of cutting tools used for experimentation

刀具名称	硬度 (HV)	弯曲强度 / $\text{GPa}$	压缩强度 / $\text{GPa}$	弹性模量 / $\text{GPa}$
PCD 刀	8000~10000	2.4~3.2	5.3~6.2	800~850
合金刀	1900~2400	0.25~0.53	3.5~5.2	610~640

在上述工艺参数和实验条件下,采用单一变量法对高体积分数  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料进行精密车削加工工艺实验,选择  $f=25 \mu\text{m}/\text{r}$ ,  $v_c$  和  $a_p$  分别在 10~60 m/min 和 10~50  $\mu\text{m}$  内进行加工实验。

## 2 结果及讨论

### 2.1 切削参数对工件已加工表面质量的影响

根据试验数据绘制切削速度与表面粗糙度、刀具磨损量的关系,如图 2、图 3 所示,当  $f=25 \mu\text{m}/\text{r}$ ,  $a_p=30 \mu\text{m}$  时,增加  $v_c$ ,  $Ra$  值减小,当  $v_c$  增大到大于 25 m/min 时,  $Ra$  值减小开始缓慢;另外,增加  $v_c$ , 刀具磨损速度也加快,当  $v_c$  大于 40 m/min 时,刀具磨损剧烈,刀具的使用寿命也急剧下降。综合图 2 和图 3 不难

看出,  $v_c$  在 25~40 m/min 变化时,工件的已加工表面质量和刀具的使用寿命都处于较佳状态。

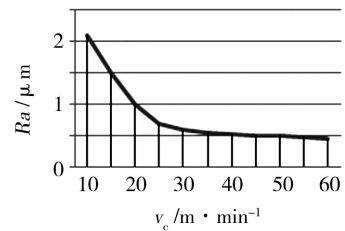


图 2 切削速度对表面粗糙度的影响

Fig.2 Effect of cutting speed on surface roughness

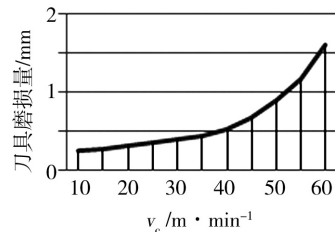


图 3 切削速度对刀具磨损量的影响

Fig.3 Effect of cutting speed on attrition of the cutting tools

根据试验数据绘制切削深度与表面粗糙度、刀具磨损量的关系,如图 4、图 5 所示。根据试验要求,控制  $v_c$  在 30 m/min  $f=25 \mu\text{m}/\text{r}$  时,随  $a_p$  的增加,工件  $Ra$  值也不断增加,当  $a_p$  增大到 35  $\mu\text{m}$  时,已加工  $Ra$  急剧增加;另外,在一定时间条件下,控制  $v_c$  在 30 m/min  $f=25 \mu\text{m}/\text{r}$  时,增加  $a_p$ , 刀具磨损速度加快,当  $a_p \geq 35 \mu\text{m}$  时,刀具的使用寿命明显缩短。综上分析,由试验结果可知,当  $a_p$  为 25~35  $\mu\text{m}$  时,工件加工表面质量和刀具磨损情况都处于较佳状态。

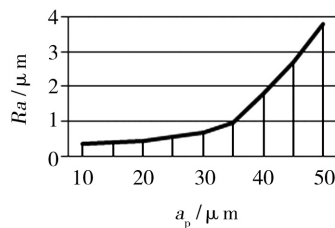


图 4 切削深度对表面粗糙度的影响

Fig.4 Effect of cutting depth on the surface roughness

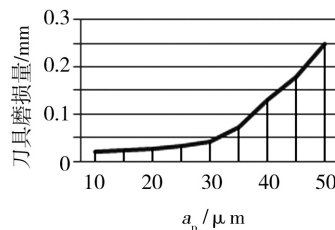
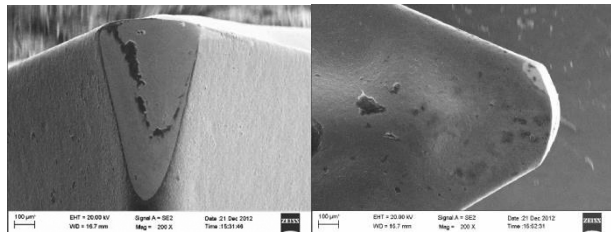


图 5 切削深度对刀具磨损量的影响

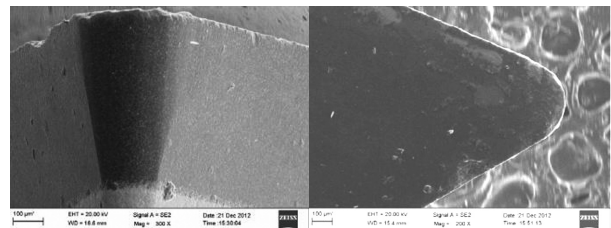
Fig.5 Effect of cutting depth on attrition of the cutting tools

## 2.2 刀具材料对工件加工质量的影响

在相同的工艺参数和试验条件下,分别采用PCD刀具和合金刀具对40% SiC<sub>p</sub>/Al复合材料进行切削加工试验。加工工艺参数: $v_c = 30 \text{ m/min}$ ;  $f = 25 \text{ }\mu\text{m/r}$ ;  $a_p = 30 \text{ }\mu\text{m}$ 。加工后,利用SEM观察两种刀具的磨损情况和试件表面形貌,如图6所示。由图6可知,两种不同材质的刀具切削加工SiC<sub>p</sub>/Al复合材料后,刀具的磨损程度明显不同,PCD刀具磨损要明显小于合金刀具。



(a) 合金刀



(b) PCD刀

图6 刀具磨损形貌

Fig.6 Pictures of the attrition of the blade

两种刀具材料对工件加工后,零件表面状态如图7所示。右侧发暗部分为用PCD刀加工,左侧发亮部分为用合金刀加工。发亮是由于合金刀具加工时,由于刀具磨损导致切削时刀具对零件表面挤压而发亮。

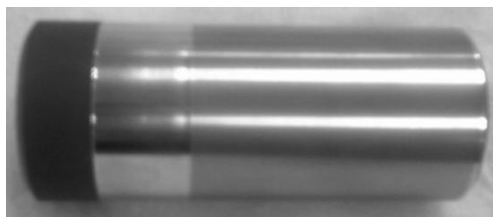


图7 车加工试样

Fig.7 Sample of the SiC<sub>p</sub>/Al composite material

用千分尺对两种刀具加工后的工件圆柱度进行检测,测试结果如图8所示。可以看出,合金刀具加工后的工件外圆圆柱度明显从零件端头到根部呈递增趋势,这是由于刀具磨损造成零件根部尺寸偏大。PCD刀加工出的外圆从零件端头到根部尺寸基本一致,这是因为PCD刀具加工SiC<sub>p</sub>/Al复合材料时,磨宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第4期

损较小,刀具可以从头到尾对零件产生切削的尺寸稳定。可见,PCD刀具加工后的工件表面质量要优于合金刀具。

在切削加工后,对复合材料试样外圆表面进行SEM观察,图9为放大3000倍下的试样外圆表面扫描照片。可以看出,经两种刀具切削加工后,复合材料试样外圆的表面出现了截然不同的形貌。采用合金刀加工的表面,车削刀痕模糊,这是由于刀具磨损后和零件出现挤压现象,而PCD刀具加工后的工件表面清晰,为切削形态。

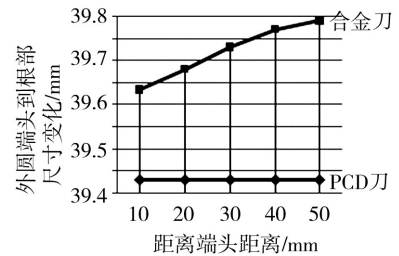
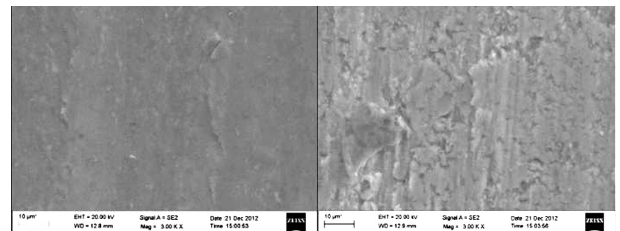


图8 合金刀和PCD刀具加工尺寸对比

Fig.8 Comparison of different cutting tools caused scale change



(a) 合金刀

(b) PCD刀

图9 切削加工后复合材料的外圆表面形貌

Fig.9 Different surface condition by different cutting tools

将用PCD刀具加工出来的零件在圆柱度仪上进行了检测,得到零件根部和端部的圆度分别为 $1.19 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.93 \text{ }\mu\text{m}$ ,整体的圆柱度为 $0.91 \text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出,分别用PCD刀具和合金刀对40% SiC<sub>p</sub>/Al复合材料进行精密车削时,PCD刀具磨损量要远小于合金刀,并且PCD刀具加工后的已加工表面形貌清晰,表面质量好。

综合以上内容,可以看出在使用PCD刀具进行高体积分数SiC<sub>p</sub>/Al复合材料进行精密车削加工时,当 $v_c$ 为 $30 \text{ m/min}$ 、 $a_p$ 为 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $f$ 为 $25 \text{ }\mu\text{m/r}$ 时,切削效果最佳,可以有效的提高加工效率,改善工件表面加工质量,得到表面粗糙度为 $0.58 \text{ }\mu\text{m}$ 和圆柱度为 $0.91 \text{ }\mu\text{m}$ 的已加工表面。

## 3 结论

(1) PCD刀具对SiC<sub>p</sub>/Al复合材料精密车削加工

中,  $v_c$  为 25~40 m/min、 $a_p$  为 25~35  $\mu\text{m}$ , 各项性能指标都处于较佳状态。

(2) PCD 刀具的加工性能要远远好于合金刀具, PCD 刀具更适合高体积分数  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料精密加工;

(3) 当  $v_c$  为 30 m/min、 $a_p$  为 30 $\mu\text{m}$  和  $f$  为 25 $\mu\text{m}/\text{r}$  的 PCD 刀加工时, 切削效果最佳, 可以有效的提高加工效率, 改善工件表面加工质量, 得到  $Ra$  为 0.58  $\mu\text{m}$  和圆柱度为 0.91  $\mu\text{m}$  的已加工表面。

### 参考文献

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

[2] CAROLINE J E, ANDREWES S. Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102: 25-29

[3] 葛英飞, 徐九华, 杨辉.  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料的超精密车削试验[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1621-1629

[4] 王大镇, 冯培峰, 赵清亮. 航天铝基复合材料零部件超精密加工技术研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1341-1346

[5] 周家林, 黄树涛, 许立福.  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料高速切削的研究现状[J]. 工具技术, 2008, 42(7): 3-6

[6] 刘小涵, 姜明珠, 曹宏等. 碳化硅零部件机械加工工艺[J]. 长春理工大学学报, 2011, 34(2): 150-153

[7] 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): 15-18

(上接第 59 页)

### 参考文献

[1] MAREK T. Analytical application of carbon nanotubes; a Review [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2006, 25(5): 480-489.

[2] HIROAKI M, MICHAEL R J, LAWRENCE D T. Thermo-physical properties of epoxy nano-composites reinforced by carbon nanotubes and vapor grown carbon fibers [J]. Thermochimica Acta, 2006, 442: 67-73.

[3] BEN S D, ZHAO J H, ZHANG Y C, et al. The interface strength and debonding for composite structures: Review and recent developments[J]. Composite Structures, 2015, 129: 8-26

[4] ANDREW N R, QI A, NARELLE B, et al. Polymer nanocomposite fiber model interphases: Influence of processing and interface chemistry on mechanical performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 269: 121-134

[5] AJAYAN P M, STEPHAN O, COLLIES C, et al. Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin-nanotube composite[J]. Science, 1994, 265: 1212-1214

[6] ANDREWS R, JACQUES D, RAO A M, et al. Nanotube composite carbon fibers[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75: 1329-1331

[7] LAU K T, HUI D. Effectiveness of using carbon nanotubes as nano-reinforcements for advanced composite structures [J]. Carbon, 2002, 40: 1605-1606

[8] LAU K T, SHI S. Failure mechanisms of carbon nanotube/epoxy composites pretreated in different temperature environments[J]. Carbon, 2002, 40: 2965-2968

[9] PENUMADU D, DUTTA A, PHARR G, et al. Mechanical properties of blended single-wall carbon nanotube composites[J]. Journal of Materials Research, 2003, 18: 1849-1853