

# 加工工艺对 C/SiC 复合材料性能的影响

李晓东<sup>1</sup> 赵英民<sup>1</sup> 张晓峰<sup>2</sup> 林彬<sup>2</sup>

(1 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

(2 天津大学,天津 300072)

**文 摘** 采用普通磨削和超声辅助磨削工艺对 C/SiC 复合材料进行加工,对不同加工工艺参数获得的 C/SiC 复合材料进行表面状态表征及力学性能的测试。结果显示在磨削深度 0.05 mm,进给速度 600 mm/h,转速 1 600 r/min,超声频率 14 kHz 的工艺参数匹配条件下,所得到的 C/SiC 复合材料的表面粗糙度最小,弯曲强度最大。表明超声辅助磨削加工工艺对材料力学性能损伤较小。

**关键词** C/SiC 复合材料,加工工艺,超声辅助磨削

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.024

## Influence of Machining Process Parameters on Property of C/SiC Composites

LI Xiaodong<sup>1</sup> ZHAO Yingmin<sup>1</sup> ZHANG Xiaofeng<sup>2</sup> LIN Bin<sup>2</sup>

(1 Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

(2 Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** In this paper, C/SiC composites were machined by traditional grinding and ultrasonic vibration-assisted grinding. Surface characterizations and mechanical properties of the C/SiC composites grinded under different processing parameters are measured. Results of performance test indicated that the composite material machined by ultrasonic assisted grinding process obtained the better surface roughness quality and the greater bending strength, the best processing parameters were: grinding depth 0.05 mm, feed velocity 600 mm/h, speed 1 600 r/min, ultrasonic frequency 14 kHz. It shows that ultrasonic vibration-assisted grinding has the lower damage to material mechanical properties.

**Key words** C/SiC composites, Machining process, Ultrasonic assisted grinding

### 0 引言

C/SiC 复合材料具有优良的高温力学性能以及抗氧化、抗烧蚀、抗热震、耐腐蚀等特性,如今已作为热结构材料被广泛应用在航空航天领域<sup>[1-2]</sup>。但受到当前技术水平的限制,该材料的其他特点如制备周期长,生产过程中需进行多次加工,加工效率影响产品的研制进度,加工质量影响产品型面及尺寸精度,加工表面状态甚至影响 C/SiC 复合材料性能等等。

C/SiC 复合材料传统加工方法主要包括车削、铣削和磨削。机械车削和铣削加工方法经济实用,但加工效率低,刀具易磨损,产品易产生毛刺、剥离、崩边等缺陷。采用金刚石砂轮磨削技术对 C/SiC 复合材

料进行加工相对于车削和铣削,减少了毛刺、剥离和崩边缺陷,然而磨削加工过程中依然存在着切削力大、刀具磨损严重等现象,而且当加工刀柄过长、切削力大时易造成砂轮偏心旋转、刀柄刚度不足,从而严重影响加工质量<sup>[3]</sup>。

超声辅助加工是将超声振动与传统的机械加工相结合的一种加工方法,它将高频超声振动附加在刀具或加工工件上,利用超声振动能量来改变材料去除机理,改善加工过程及加工效果。超声辅助磨削在 C/SiC 等硬脆材料加工领域具有独特的优势,显著降低切削力,提高加工效率<sup>[4-6]</sup>。

本文采用普通磨削及超声辅助磨削工艺对针刺

收稿日期:2015-06-03

基金项目:863 计划(2013AA040103)

作者简介:李晓东,1978 年出生,博士,主要从事 C/C、C/SiC 复合材料研究工作。E-mail:s306s5@qq.com

结构 C/SiC 复合材料进行加工,分析加工后的 C/SiC 复合材料表面状态,并对其进行力学性能测试,初步分析了加工工艺对材料性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 制备 C/SiC 复合材料

采用针刺结构碳纤维预制体,采用 CVI+PIP 复合工艺制备 C/SiC 复合材料,C/SiC 最终密度 $>1.85 \text{ g/cm}^3$ 。

### 1.2 加工设备

采用汉川机床厂 XH716D 型加工中心对 C/SiC 复合材料进行磨削加工,砂轮选用 100 mm 直径金刚石砂轮,选用 80<sup>#</sup>磨粒。

超声系统频率为 30 kHz,超声系统振幅为 10  $\mu\text{m}$ 。

### 1.3 分析表征

常温弯曲强度测试:电子式万能试验机,ZX-YQ-154;采用超景深三维显微镜对各个磨削表面进行拍照,采用 800 倍放大倍数,观察材料磨削表面形貌以及材料损伤形式。采用非接触式测量仪 NANOVEA ST400 利用向色差原理来测量加工后的材料表面三维表面形貌特征和粗糙度值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 C/SiC 复合材料加工

选取 6 组不同加工工艺参数对 C/SiC 复合材料试样进行加工,试样加工尺寸 50 mm $\times$ 9 mm $\times$ 3 mm,每组加工 6 个试样。具体加工工艺参数如表 1 所示。宏观上,6 组试样的磨削表面质量均较为平整,没有出现局部较大裂纹或者缺陷。

表 1 加工工艺参数

Tab. 1 Different processing parameters

试样 编号 <sup>1)</sup>	磨削深度 /mm	进给速度 /mm $\cdot$ min <sup>-1</sup>	转速 /r $\cdot$ min <sup>-1</sup>	频率 /kHz
1 <sup>#</sup>	0.03	600	800	0
2 <sup>#</sup>	0.05	600	1600	0
3 <sup>#</sup>	0.03	600	800	14
4 <sup>#</sup>	0.05	600	1600	14
5 <sup>#</sup>	0.03	600	800	28
6 <sup>#</sup>	0.05	600	1600	28

注:1)1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>为普通磨削加工;其他为超声辅助磨削加工。

### 2.2 加工工艺对 C/SiC 复合材料力学性能的影响

表 2 为不同加工工艺参数样条的测试结果。从表中可以看出,第四组加工工艺参数获得的复合材料的力学性能最高。

对于普通磨削加工而言,转速较高对材料表面的损伤较小。而对于超声辅助磨削而言,超声频率为宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 4 期

14 kHz 时加工后材料的力学性能较高,表明其对材料的力学性能损伤较小。

表 2 C/SiC 材料的力学性能

Tab. 2 Flexural properties of C/SiC by different processing parameters MPa

试样编号	弯曲强度	试样编号	弯曲强度
1 <sup>#</sup>	268	4 <sup>#</sup>	295
2 <sup>#</sup>	252	5 <sup>#</sup>	260
3 <sup>#</sup>	222	6 <sup>#</sup>	225

### 2.3 加工工艺对 C/SiC 复合材料表面状态的影响

图 1 是采用表 1 中 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>加工工艺参数所得的 C/SiC 材料磨削表面状态,可以看出:在垂直纤维分布方向,C/SiC 复合材料表面具有明显的纤维断裂现象,这是由于金刚石磨粒对纤维进行切割破坏所导致的磨粒磨痕,在纤维断裂的同时也伴随着基体脱落的现象。1<sup>#</sup>试样的磨痕较 2<sup>#</sup>试样更深,这是由于磨削转速较低,对材料造成的加工应力较大造成的。普通磨削加工时,表 1 中第 2 组加工工艺参数所得到的 C/SiC 复合材料表面状态更好。

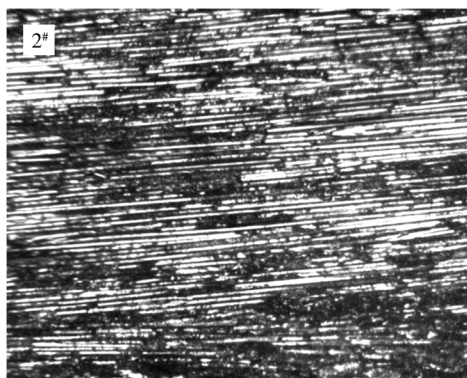
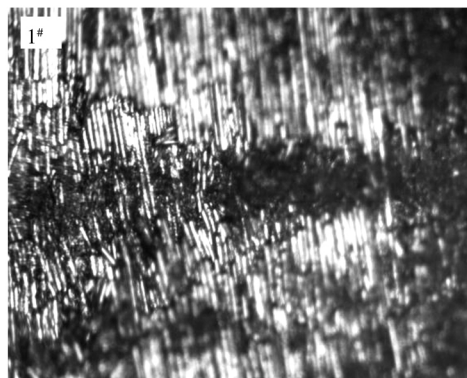


图 1 普通磨削 C/SiC 表面的金相照片  
Fig. 1 Metallographic morphology of C/SiC surface by traditional grinding

图 2 是采用表 1 中 3<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>加工工艺参数所得的 C/SiC 材料磨削表面状态,可以看出:3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>表面磨痕

较深,5<sup>#</sup>次之,4<sup>#</sup>磨痕最浅,表明第4组加工工艺参数的匹配度最好,该超声频率更适合 C/SiC 复合材料的

加工。该结果与弯曲强度测试结果相吻合。

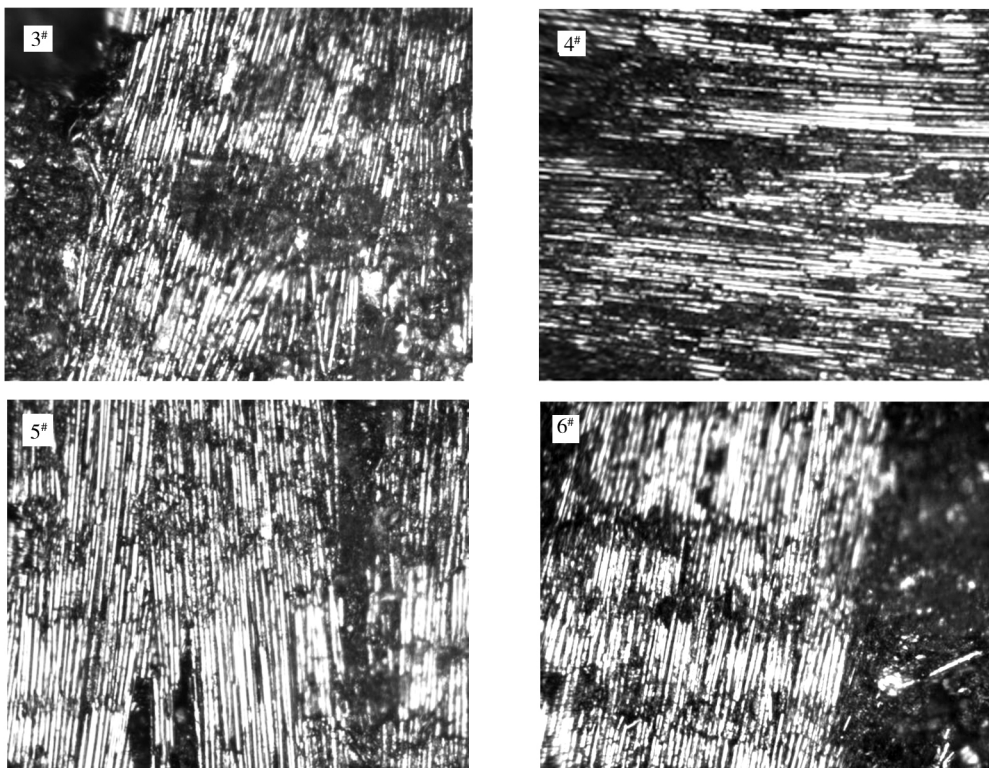


图2 超声辅助磨削 C/SiC 表面的金相照片

Fig. 2 Metallographic morphology of C/SiC surface by ultrasonic vibration-assisted grinding

## 2.4 加工工艺对 C/SiC 复合材料表面粗糙度的影响

图3是采用不同加工工艺参数所得的 C/SiC 材料表面的三维形貌。测量时,选取的采样区域为 1

mm×1 mm,采样步长为 2 μm。通过观察可以看出,采用第4组工艺参数加工后的材料表面最为平整光滑。

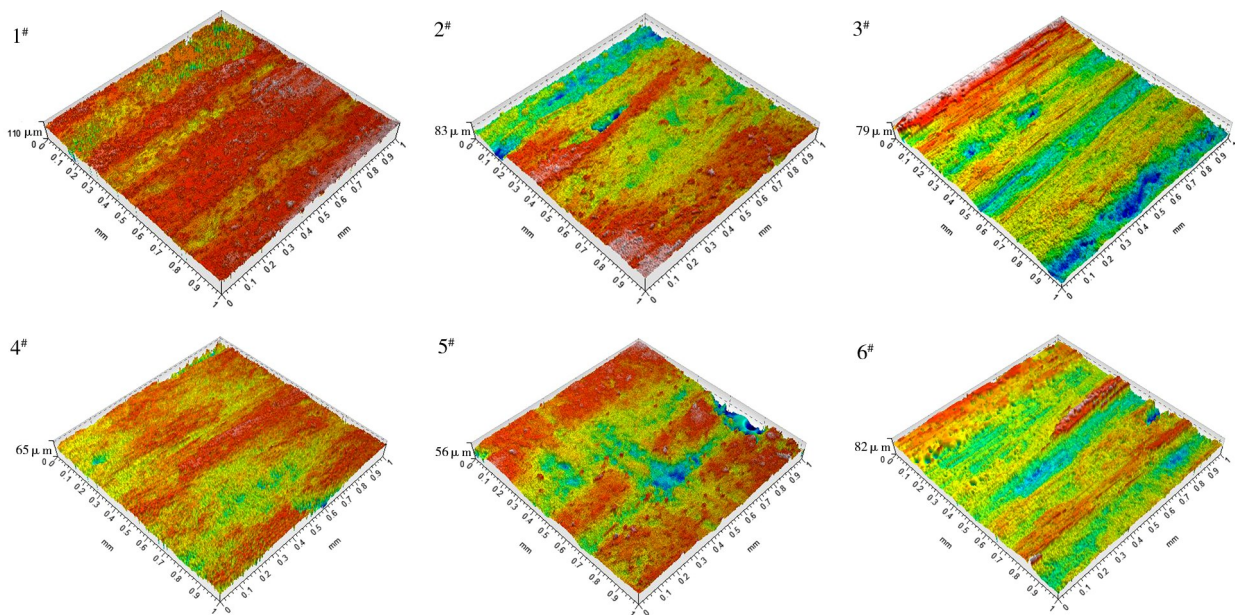


图3 C/SiC 材料表面的三维形貌

Fig. 3 3D morphology of C/SiC surface

定义采样表面上任一点 $(x, y, z)$ 到基准平面的偏距为 $l=l(x, y, z)$ ,且采样区域在基准面上的正投

影为  $S$ 。在表面形貌的三维评定参数中,选取三维轮廓均方根偏差  $S_q$  作为评定表面粗糙度的标准。

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S l^2(x, y, z) dx dy} \quad (1)$$

式中,  $S_q$  反应轮廓偏离基准平面的程度,相当于统计学中的标准偏差  $\sigma$ ,是一个较理想的评定参数<sup>[7]</sup>。

表3为不同加工工艺参数下,根据材料表面的三维形貌所得出的表面粗糙度结果。测量时,在每个试件表面选取三个  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的采样区域,取其粗糙度的平均值作为该试件表面的粗糙度值。通过该表可以看出,在普通磨削时,材料表面粗糙度随着转速的提高而降低。超声辅助磨削后的材料表面粗糙度值要明显低于普通磨削加工,采用超声辅助磨削可以获得更好的表面质量。因此,对于 C/SiC 复合材料的高精度、高质量加工方面,超声辅助磨削具有非常明显的优势。同时,对比表3中各组工艺参数下的粗糙度值,采用第4组匹配的工艺参数加工 C/SiC 复合材料,表面粗糙度值最小,这与上面所得到的弯曲强度和表面状态测试结果一致。

表3 C/SiC 复合材料的表面粗糙度

Tab.3 Surface roughness of C/SiC composites by different processing parameters

试样	粗糙度值/nm	试样	粗糙度值/nm
1#	17736	4#	7156
2#	12382	5#	8168
3#	11960	6#	10533

### 3 结论

(1) 针刺结构 C/SiC 复合材料在普通磨削时,随着转速的增加,材料表面的损伤减小,表面粗糙度降低,表面质量提高。

(2) 采用超声辅助磨削 C/SiC 复合材料,不仅可以提高加工后材料的力学性能,同时材料的表面粗糙度降低,表面质量提高。因此,超声辅助磨削对 C/SiC 复合材料的加工具有显著优势。

(3) 在磨削深度  $0.05\text{ mm}$ ,进给速度  $600\text{ mm/h}$ ,转速  $1\ 600\text{ r/min}$ ,超声频率  $14\text{ kHz}$  的工艺参数匹配条件下,所得到的 C/SiC 复合材料的力学性能最好,材料表面质量最高。

### 参考文献

- [1] 张玉娣,周新贵,张长瑞. Cf/SiC 陶瓷基复合材料的发展与应用现状[J]. 材料工程, 2005(4):60-63
- [2] 邓娟利,范尚武,成来飞,等. 三维针刺 C/SiC 复合材料无纬布纤维方向对材料力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012(3):571-574
- [3] 王生朝. C<sub>f</sub>/SiC 复合材料的应用研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2007(3):489-492
- [4] Komaraiah M, Manan M A, Narasimha R P, et al. Investigation of surface roughness and accuracy in ultrasonic machining[J]. Precision Engineering 1988, 10(2):59-65
- [5] Pei Z J, Prabhakar D, Ferreira P M. A mechanistic approach to the prediction of material removal rates in rotary ultrasonic machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, 1993, 64:771-784
- [6] 郑书友,冯平法,徐西鹏. 旋转超声加工技术研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(11):1799-1804
- [7] Dong W P, Sullivan P J, Stout K J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography 111: Parameters for characterising amplitude and some functional properties[J]. Wear, 1994, 178(1):29-43

(编辑 李洪泉)