

# SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料铣削加工表面质量

黄青林 赵建设 徐亮 王凯 王新永

(航天材料及工艺研究所, 先进功能复合材料技术重点实验室, 北京 100076)

**文 摘** 使用PCD立式铣刀对聚合物浸渍裂解法(PIP)制备的SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料开展单因素铣削试验,通过对加工中产生的切削力和加工后的表面粗糙度进行测量,分析了铣削工艺参数对其的影响;对加工表面、纤维断口进行SEM分析,讨论了SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料加工表面的形成。研究表明,表面粗糙度与切削力的变化趋势相同,高主轴转速和小切削宽度有利于得到表面粗糙度较小的加工表面;近孔洞区域与远离孔洞区域的材料去除方式不同;材料中纤维发生面内偏移和层间屈曲,纤维存在多种去除方式。

**关键词** SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料,表面粗糙度,表面形貌,纤维断口

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.01.013

## Quality of Milling Surface of Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Carbide Ceramic Matrix Composites

HUANG Qinglin ZHAO Jianshe XU Liang WANG Kai WANG Xinyong

(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technolog, Beijing 100076)

**Abstract** The single factor milling test of SiC<sub>f</sub>/SiC composites prepared by PIP was carried out with PCD milling cutter. The effects of milling process parameters on the cutting force and surface roughness after machining were analyzed. The formation mechanism of machined surface morphology of SiC<sub>f</sub>/SiC composites was discussed by SEM analysis of machined surface and fiber fracture. The results show that the surface roughness and cutting force have the same change trend. High spindle speed and small cutting width are conducive to obtain the machined surface with small surface roughness. The material removal method near the hole area is different from that far away from the hole area. The in-plane deflection and interlaminar buckling of fibers in materials lead to a variety of fracture modes of fibers.

**Key words** SiC<sub>f</sub>/SiC composite, Surface roughness, Surface topography, Fiber fracture

### 0 引言

SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料作为一种先进陶瓷基复合材料,具有密度小、热机械性能优良、耐烧蚀性能优异等特点<sup>[1-3]</sup>,使其在恶劣的环境中有较好的耐候性和使用可靠性,在国外航空航天和军事国防领域有了广泛应用<sup>[4-6]</sup>。然而,它硬度高、各向异性、非均质等特点,导致加工出现损伤大、质量差等问题。探明SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料加工质量的影响因素及变化规律,提高加工质量成为了亟待研究的内容。

由于SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料为多相复合而成,且存在较多孔隙,加工后的表面形貌明显区别于均质材料。表面粗糙度是表面质量表征方法之一,相比二维评价参数 $Ra$ 仅能表示某一线上的形貌信息,三维评价参数 $Sa$ 可以表示某一面内的形貌信息,能更准确表征复合材料的加工表面质量<sup>[7-8]</sup>。目前,在用于树脂基复合材料的表面质量研究后, $Sa$ 也逐渐用在了SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料上,尤其是特种加工方面。康仁科等<sup>[9]</sup>对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料进行超声辅助磨削,研究表

收稿日期:2021-10-19

第一作者简介:黄青林,1997年出生,硕士研究生,主要从事复合材料加工与装配工作。E-mail:13971110876@163.com

通信作者:赵建设,1968年出生,研究员,主要从事复合材料加工及工艺研究工作。E-mail:6z8j3s05@163.com.cn

明超声振动能有效改善SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料的三维表面粗糙度Sa。张若衡等<sup>[10]</sup>选用超短脉冲激光对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料进行加工,研究表明低功率的激光加工有利于获得更好的加工表面。YAN Z等<sup>[11]</sup>开展了SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料飞秒激光加工研究,研究了入射角度对表面质量的影响,结果表明,随着入射角的增大,激光能量集中在复合材料的表面凸点,SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料的表面质量显著提高。池宪等<sup>[12]</sup>选用硬质合金刀具、金刚石涂层刀具、电镀超硬磨料刀具、钎焊金刚石刀具、PCD刀具进行SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料超声振动铣削制孔对比工艺试验,结果发现PCD能得到更好的制孔表面质量。

然而,目前针对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料常用的传统铣削加工的表面质量的相关研究较少。本文选择PCD

刀具对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料开展铣削单因素试验,分析铣削参数对切削力和表面粗糙度Sa的影响规律并对比它们的变化趋势,借助扫面电镜,讨论SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料加工表面的形成,拟为SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料铣削工艺参数优化研究提供参考。

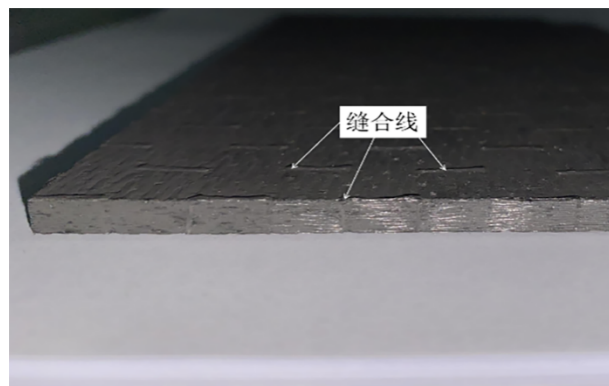
## 1 实验

### 1.1 材料

使用的SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料试样(图1)是由SiC纤维缎纹布采用缝合的方式先制作成纤维预制体,再经过聚合物浸渍裂解(PIP)工艺制备而成。其孔隙率为7%~9%,纤维体积分数为40%,厚度为5.5 mm,基本物理性能如表1所示。将加工后的工件制成16块尺寸为30 mm×5 mm×5.5 mm的试样,便于后续SEM表征分析(图2)



(a) SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料板俯视图



(b) SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料板侧视图

图1 SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料试样

Fig. 1 Samples of SiC<sub>f</sub>/SiC composite

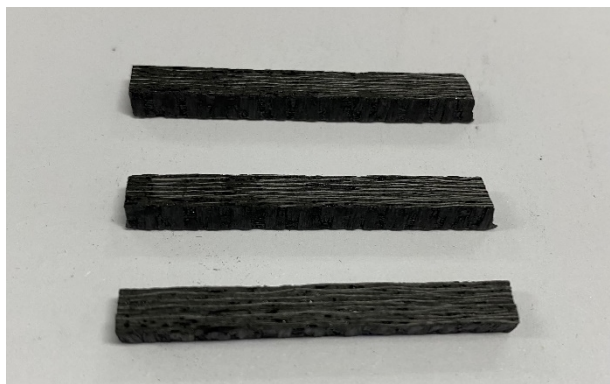


图2 SEM分析试样

Fig. 2 Samples of SEM analysis

表1 SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料基本特性

Tab. 1 Basic properties of SiC<sub>f</sub>/SiC composites

密度/g·cm <sup>3</sup>	压缩强度/MPa	弯曲强度/MPa	层间剪切强/MPa
2.30	35.0	400	25.0

### 1.2 试验方案及试验平台

为研究铣削参数对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料表面粗糙

度Sa的影响,分析Sa与切削力之间的关系,讨论其加工表面形貌及形成过程,优化工艺参数,设计了参数如表2所示的单因素试验,每个因素有四个水平,试验在无冷却液的干式条件下采用逆铣削的方式进行。使用测力仪对加工中的 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 进行测量;采用KEYENCE VHX-7000超景深显微镜分别在两个纤维方向远离孔洞的区域对各组参数下的Sa值进行测量,测量尺寸为0.8 mm×0.8 mm。采用Applo-300扫描电镜对超声清洗后试样的微观形貌和断口进行观测,加速电压设为15 kV。

试验平台主要由加工、测力、测温三个部分组成,加工部分为厦门大金三轴数控加工机床(TE855)和JORK金刚石平底PCD铣刀;测力部分主要包含YDCB-Ⅲ05三向测力仪、电荷放大器以及电荷采集器;测温部分为杭州美盛的Research-N3红外热像仪。工件的装夹方式如图3所示,将SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料板材固定在三向测力仪上进行铣削试验。

表2 铣削单因素试验参数

Tab. 2 Milling single factor test parameters

主轴转速 /r·min <sup>-1</sup>	进给速度 /mm·min <sup>-1</sup>	径向切深 /mm	轴向切深 /mm
2 500、3 000、 3 500、4 000	400	0.2	3
3 000	300、400、 500、600	0.2	3
3 000	25	0.1、0.15、 0.2、0.25	3

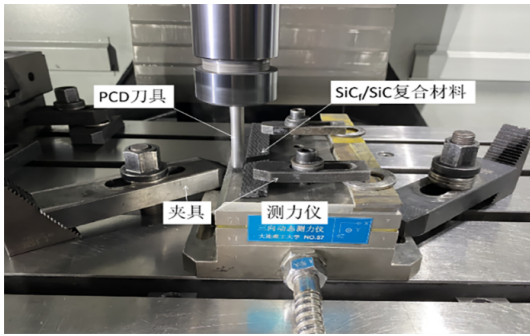


图3 铣削试验装置

Fig. 3 Devices of milling test

## 2 结果与讨论

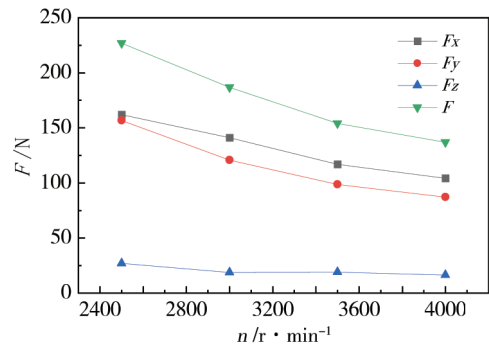
### 2.1 切削力

图4为铣削参数对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料加工中切削力的影响曲线。从图中可以看出,在各组参数下均是 $F_x > F_y > F_z$ 。

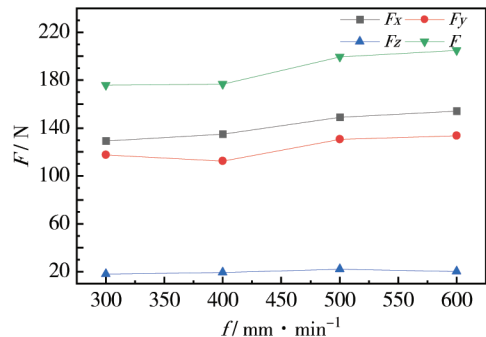
图4(a)为主轴转速与切削力的关系曲线, $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 及切削合力 $F$ 都随着主轴转速的增加而单调递减,并且下降幅度逐渐降低。这是由于主轴转速的增加,单位时间内切削SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料的次数增加,在进给速度和切削宽度不变时,每齿切削的去除总量减少,刀具所受到阻力抗性减少,切削力下降。

图4(b)为进给速度与切削力的关系曲线, $F_x$ 和 $F_y$ 两个方向的切削力都随着主轴转速的增加而增加, $F_z$ 的变化很小。总体来看,切削合力 $F$ 随着进给速度的增加呈单调递增的趋势。当进给速度增加时,单位时间内刀具前进路程增大,在主轴转速和切削宽度固定时,每齿进给量逐渐增加,每次需要去除的材料增多,导致切削力上升。

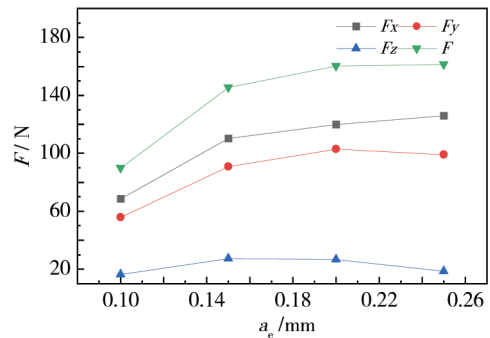
图4(c)为切削宽度与切削力的关系曲线, $F_x$ 随着切削宽度的增加而增加, $F_y$ 先增加随后稍微下降,而 $F_z$ 则是出现小范围内的波动。总体来看,切削合力 $F$ 随着切削深度的增加而单调递增。这是当切削宽度增加,单位时间内切削SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料的量会增加,在主轴转速和进给速度固定时,刀具受到的阻力增大造成的。



(a) 切削力随主轴转速变化曲线



(b) 切削力随进给速度变化曲线



(c) 切削力随切削宽度变化曲线

图4 铣削工艺参数对切削力的影响

Fig. 4 Influence of milling process parameters on cutting force

### 2.2 加工表面形貌及形成机制

#### 2.2.1 横向纤维形貌

图5为横向纤维的表面形貌图,可以看出横向纤维以台阶状脆性断裂为主,且存在两种朝向不同的纤维断口,这是纤维与加工表面不平行且所呈角度不同造成的。

图5(b)朝左的断口相对平整,断口几乎垂直于纤维轴向;图5(c)朝右的断口为倾斜断口,断口与纤维轴向呈一定的角度。这是因为两种纤维的去除方式不同,当刀具从右往左逆铣削时,断口朝左的束纤维为顺剪切,纤维先受到刀具的剪切力并发生剪切断裂,随着刀刃的前进,被切断的纤维受到沿轴向的推力,在推力的作用下发生界面脱粘,随后纤维与基体发生剥离;而断口朝右的纤维束的为逆剪切。在剪切时,纤维先受到具沿轴向的推力,发生界面脱粘,随着刀刃带着纤维抬起,

与界面完全剥离,纤维受到弯曲应力和沿轴向压应力的共同作用,纤维发生弯曲断裂,故断口为倾斜面。

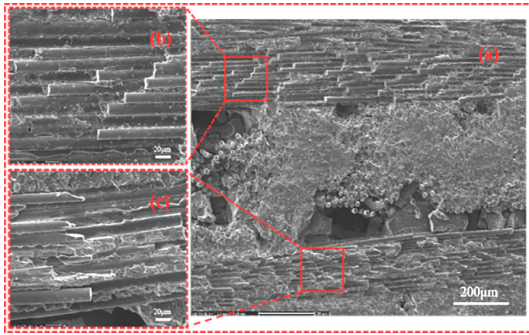


图5 横向纤维表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of transverse fibers

### 2.2.2 纵向纤维形貌

图6为纵向纤维的整体形貌,从图6(a)中可以看出靠近孔洞的纤维存在界面脱粘和基体脱落等现象,裂纹沿着相邻纤维界面传递,存在极少数的纤维拔出,而远离孔洞处的纤维在完整性较好,没有发生界面脱粘及纤维拔出等现象。这是因为在靠近孔洞的纤维缺少基体的支撑,界面更容易被剥离,裂纹扩展还导致纤维界面脱粘深度加深,进而出现纤维拔出。图6(b)中可以看出纤维直径相差大、均匀性较差。纤维的断口以平滑断口和台阶断口为主。平滑断口的截面非常的平整,由垂直于纤维轴向且大于纤维轴向强度的剪切力作用产生的典型断口;台阶断口的截面出现两个以上的平台,这是由弯曲应力造成的弯曲破坏断口。

### 2.2.3 涂覆物形貌

在观察过程中,发现加工表面出现了大量的涂覆物,如图7所示。涂覆物黏附在加工表面,覆盖加工产生的实际表面,使得表面更加平整超声清洗也无法去除,对表面粗糙度的测量会产生重要影响。从图7(a)和图7(b)可知,横向纤维束和纵向纤维束区域都出现了涂覆物,从图7(c)可以看出这些涂覆

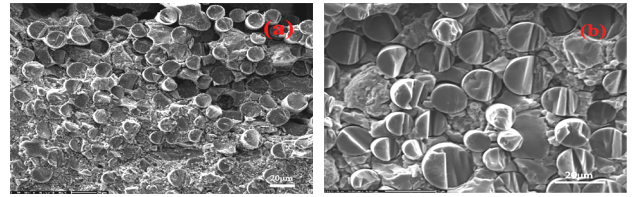


图6 纵向纤维微观图

Fig. 6 Surface morphology of longitudinal fibers

物显然是由细小切屑聚集在一起产生的,图7(d)中的涂覆物上与后刀面的划痕清晰可见。因此,这些涂覆物出现的原因是积留在加工表面的切屑在加工过程的高温高压条件下,受PCD刀具后刀面的碾压堆积造成的。

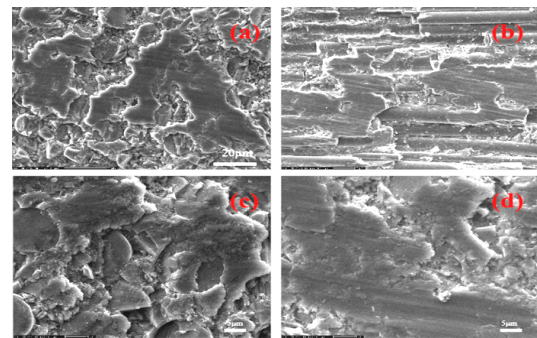
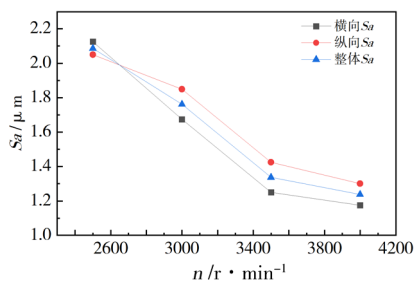


图7 表面涂覆物形貌

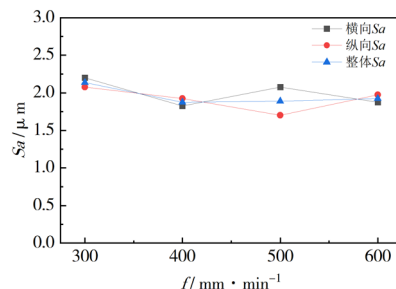
Fig. 7 Morphology of surface coating

### 2.3 表面粗糙度

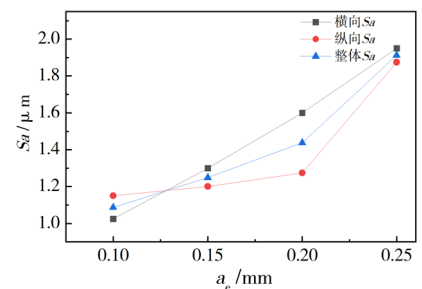
图8(a)为 $S_a$ 随主轴转速变化的关系曲线。主轴转速的增加,会导致 $S_a$ 逐渐降低。当主轴转速从2 500 r/min增加至4 000 r/min时,整体 $S_a$ 从2.09下降到1.24  $\mu\text{m}$ ,增量为-0.85  $\mu\text{m}$ 。这是因为主轴转速增加,每齿进给量减小,切削厚度降低,纤维断裂长度变短,表面整体更加平滑。另外,主轴转速增加切削热逐渐积累,表面涂覆物含量增加,导致表面粗糙度减少。



(a) 表面粗糙度随主轴转速的变化



(b) 表面粗糙度随进给速度的变化



(c) 表面粗糙度随切削宽度的变化

图8 铣削工艺参数对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Influence of milling process parameters on surface roughness

图8(b)为 $S_a$ 随进给速度变化的关系曲线。当进给转速增加时, $S_a$ 先降低再增加,整体变化幅度小,整

体 $S_a$ 仅在2.14~1.88  $\mu\text{m}$ 波动,说明所选参数范围对表面粗糙度 $S_a$ 的影响较小。这是因为进给速度增加较

少,对表面粗糙度的影响变化不大,但温度上升导致表面涂覆物填充表面,导致表面粗糙度降低,而当进给速度进一步增加时,涂覆物的影响作用相对降低,导致 $S_a$ 再次上升。

图8(c)为 $S_a$ 随切削宽度变化的关系曲线。当切削宽度增加, $S_a$ 逐渐增加。当切削宽度从0.1增加到0.25 mm时,整体 $S_a$ 从1.09增加到1.91  $\mu\text{m}$ ,增量为0.82  $\mu\text{m}$ 。由2.1可知,当切削宽度增加,主轴转速和进给速度不变时,切削力增加,切削震动加大;纤维断裂长度增加,断口高度差异大,表面粗糙度 $S_a$ 增大。

对比铣削参数对切削力的影响规律后发现,工艺参数对表面粗糙度的影响规律与切削力的几乎一致。切削力和表面粗糙度均随主轴转速的增加而单调递减;随进给速度的增加小范围波动;随切削宽度增加而单调增加。对比表面形貌观测结果可知,表面涂覆物影响加工产生的实际表面,会降低所测量的表面粗糙度。

### 3 结论

(1)  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料加工时,铣削参数对切削力和表面粗糙度的影响趋势相同,切削力和表面粗糙度均随主轴转速的增加而单调递减;随进给速度的增加而小范围波动;随切削宽度增加而单调增加。高转速、小切宽利于得到质量较好的加工表面。

(2)  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料内部存在孔洞,孔洞周围的轴向纤维因为缺少基体的支撑,去除方式与非孔洞周围的纤维存在差异;横向纤维的面内偏移和层间屈曲导致其存在多种断裂方式,包括剪切断裂、弯曲断裂、组合断裂等。

(3) 加工表面的形貌主要包含:横向纤维束的台阶状脆断、纤维剥离、纤维压溃;纵向纤维束的纤维脆断、纤维拔出、界面脱粘;黏附在加工表面的涂覆物。

#### 参考文献

[1] CHEN M W, QIU H P, JIAO J, et al. Preparation of high performance  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  composites through PIP process [J]. Key Engineering Materials, 2013, 544:43-47.

[2] 周新贵.  $\text{SiC}/\text{SiC}$  复合材料研究现状[J]. 功能材料信息, 2010, 7(5):21-25.

ZHOU X G. Research status of  $\text{SiC}/\text{SiC}$  composites [J]. Functional Materials Information, 2010, 7(5):21-25.

[3] WANG L Y, LUO R Y, CUI G Y, et al. Oxidation resistance of  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  composites with a  $\text{PyC}/\text{SiC}$  multilayer interface at 500  $^{\circ}\text{C}$  to 1 100 $^{\circ}\text{C}$  [J]. Corrosion Science, 2020, 167:108522.

[4] 林智群, 雷永鹏. 碳化硅陶瓷纤维的性能及其在航空航天领域的应用[J]. 飞航导弹, 2008(2):55-57.

LIN Z Q, LEI Y P. Properties of silicon carbide ceramic fiber and its application in aerospace field [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2008(2):55-57.

[5] ROODE M V, PRICE J, KIMMEL J, et al. Ceramic matrix composite combustor liners: A summary of field evaluations [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2007, 129(1): 283-292.

[6] 梁春华. 纤维增强陶瓷基复合材料在国外航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006(3): 40-45.

LIANG C H. Application of fiber reinforced ceramic matrix composites in foreign aeroengines [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(3): 40-45.

[7] 周鹏. 碳纤维复合材料工件切削表面粗糙度测量与评定方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.

ZHOU P. Study on measurement and evaluation method of carbon fiber composites cutting surface roughness [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

[8] 赵凡. 超声辅助磨削碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.

ZHAO F. Experimental study on ultrasonic assisted grinding of  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[9] 康仁科, 赵凡, 鲍岩, 等. 超声辅助磨削  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  陶瓷基复合材料[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(4):85-91.

KANG R K, ZHAO F, BAO Y, et al. Ultrasonic assisted grinding  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  ceramic matrix composites [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(4):85-91.

[10] 张若衡.  $\text{SiC}/\text{SiC}$  复合材料的超快激光加工工艺与特性研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2016.

ZHANG R H. Study on ultrafast laser processing technology and characteristics of  $\text{SiC}/\text{SiC}$  composites [D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[11] YAN Z, LIN Q, LI G, et al. Femtosecond laser polishing of  $\text{SiC}/\text{SiC}$  composites: Effect of incident angle on surface topography and oxidation [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(11): 1437-1445.

[12] 池宪, 李杨, 王旭峰, 等.  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  陶瓷基复合材料超声振动高速铣削制孔表面形貌研究[C]//第二十一届全国复合材料学术会议(NCCM-21)论文集, 2020:83-89.

CHI X, LI Y, WANG X F, et al. Study on surface morphology of hole making by ultrasonic vibration high speed milling of  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  ceramic matrix composites [C]// Proceedings of NCCM-21, 2020:83-89.