

进给速度对 MI 工艺制备 SiC_f/SiC 复合材料加工损伤的影响

姜卓钰^{1,2} 赵春玲³ 束小文⁴ 刘志强⁵ 焦健^{1,2}

(1 先进复合材料科技重点实验室, 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2 表面工程研究所, 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

(3 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

(4 陆军装备部航空军事代表局驻北京地区航空军事代表室, 北京 100101)

(5 精密与特种加工教育部重点实验室, 大连理工大学, 大连 116024)

文 摘 采用超声辅助磨削对 MI 工艺制备的 SiC_f/SiC 复合材料表面进行磨削加工, 研究了进给速度对复合材料性能的影响。结果表明: 采用超声辅助磨削加工 SiC_f/SiC 复合材料表面时, 加工区域出现纤维脱粘、断裂、破碎及基体裂纹和脱落现象, 且纤维与基体界面会有裂纹产生。当进给速度提高时, 复合材料表面损伤加重, 导致其比例极限强度和最大载荷降低。进给速度由 400 mm/min 提高至 1 000 mm/min 时, SiC_f/SiC 复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别降低 4.7% 和 20.6%。

关键词 SiC_f/SiC 复合材料, 超声辅助加工, 表面形貌, 进给速度

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.012

Effect of Feed Rate on Machining Damage of SiC_f/SiC Composites by MI Process

JIANG Zhuoyu^{1,2} ZHAO Chunlin³ SHU Xiaowen⁴ LIU Zhiqiang⁵ JIAO Jian^{1,2*}

(1 National Key Laboratory of Advanced Composites, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(2 Surface Engineering Division, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(3 AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002)

(4 Army Aviation Representative Office in Beijing, affiliated with the Equipment Department of People's Liberation Army Ground Force, Beijing 100101)

(5 Key Laboratory of Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract SiC_f/SiC composites was processed by ultrasound-assisted grinding, and the effect of feed rate on the machining damage of the composites by MI process was studied. The results show that when the surface of SiC_f/SiC composite is processed by ultrasound-assisted grinding, many machining defects will come into being, such as the fiber debonding, fracture, breakage, matrix crack and shedding. And the interface between the fiber and matrix also has cracks. With the increase of feed speed, the surface damage of the composite material is aggravated, which leads to the decrease of proportional ultimate strength and maximum load. When the feed rate increases from 400 mm/min to 1 000 mm/min, the tensile strength and bending strength of SiC_f/SiC composites reduce by 4.7% and 20.6%, respectively.

Key words SiC_f/SiC Composite, Ultrasound-assisted grinding, Surface topography, Feed rate

0 引言

SiC_f/SiC 复合材料是以 SiC 连续纤维为增强体, SiC 陶瓷为基体的复合材料。这种材料具有耐磨、耐高温、抗蠕变、耐腐蚀、抗烧蚀等优点^[1-2]。同时, 由

于在脆性的 SiC 陶瓷基体中引入了连续 SiC 纤维作为增强体, SiC_f/SiC 复合材料克服了陶瓷材料断裂韧性低和抗外部冲击载荷性能差等缺点^[3]。因而成为航空航天领域, 尤其航空发动机中典型构件选材的

收稿日期: 2021-02-25

第一作者简介: 姜卓钰, 1990 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事陶瓷基复合材料成型制备工作。E-mail: jzy180@163.com

通信作者: 焦健, 1976 年出生, 博士, 研究员, 主要从事高温陶瓷及其复合材料的研究工作。E-mail: jian.jiao@biam.ac.cn

热门^[4-5]。

SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料典型构件的制备过程中,需要通过机械加工实现典型构件的最终结构。但由于 SiC_f/SiC 复合材料具有典型的各向异性特征,基体材料具有典型的脆性特征。且连续增强体纤维与基体相之间的界面相也易损伤。因此机械加工会对 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料造成明显损伤,使复合材料中出现纤维脱落、基体破碎等现象,从而降低复合材料的性能,进而影响 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料典型构件的使用寿命^[6]。尤其当加工工艺参数选择不当时,这种加工损伤更加明显。

目前关于 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料加工具有较多报道。更多关注的不同加工方式对 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料微观形貌等的影响^[7]。张文武等^[8]对陶瓷基复合材料的加工技术进行了比较,阐述了机械加工、传统超声加工以及旋转超声加工的工艺特点,对比发现超声加工具有明显的优势。FENG 等^[9]采用超声辅助加工对 C_f/SiC 复合材料钻孔,发现超声辅助作用可有效降低进给力。康仁科等^[10]通过研究超声辅助磨削和普通磨削 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料时的磨削力、表面形貌等,发现超声振幅在一定范围内有助于改善加工件表面的质量。LIU^[11]研究了 C_f/SiC 复合材料的超声辅助加工,研究结果表明进给速度与纤维方向呈一定角度时,可以有效提高加工件的表面粗糙度。可见与普通机械加工相比,超声辅助加工技术可有效降低切削力、改善加工质量等。采用超声振动辅助加工时,进给速度直接关系到加工效率,现有研究中就进给速度对于 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料加工影响的研究较少,因此具有深入研究的必要性。

1.3 测试表征

弯曲及拉伸强度采用 MTS810 材料试验系统进行测试,弯曲强度测试参照标准为 GB/T6569—2006《精细陶瓷弯曲强度试验方法》;拉伸强度参照标准为 GJB6475—2008《连续纤维增强陶瓷基复合材料常温拉伸性能试验方法》。采用 ZWSP-4K CN 光学显微镜和 OLS 4100 三维激光共聚焦显微镜对样品形貌进行观察;采用 Nova Nano SEM450 扫描电子显微镜(SEM)对样品的微观形貌进行观察。

本文采用超声辅助磨削加工 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料,通过对不同进给速度加工后复合材料的性能、表面形貌等测试,研究进给速度对复合材料的性能影响,为 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料类零件的高效低损伤加工提供研究基础。

1 实验材料及方法

1.1 SiC_f/SiC 复合材料制备

该材料选用国产的连续 SiC 纤维为增强体,采用料浆浸渍法制备 SiC 纤维预浸料。将 SiC 纤维预浸料正交铺层制备 SiC 纤维预制体。最后采用熔渗工艺(Melt infiltration, MI)工艺制备试验用 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料,具体熔渗工艺制备过程参见文献[12]。

1.2 加工设备与方法

加工试验在集成超声辅助系统的三轴立式数控加工中心上进行,机床主轴最高转速 15 000 r/min。加工刀具选择金刚石磨头,磨头直径为 10 mm。超声辅助系统的输出频率 28 kHz,振幅 5 μm。加工时保持其他参数不变,分别采用 400 mm/min 和 1 000 mm/min 两种进给速度对 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料平板件的上下表面进行加工(如图 1),具体加工参数见表 1。

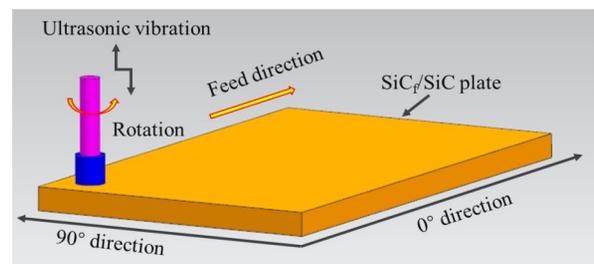


图1 SiC_f/SiC 复合材料加工示意图

Fig. 1 Schematic of the SiC_f/SiC composite plate

表 1 加工参数

Tab. 1 Parameters of Machining

Sample	Spindle speed /r·min ⁻¹	Grinding depth /mm	Ultrasonic vibration amplitude /μm	Feed rate /mm·min ⁻¹
Sample-A	8 000	0.05	2	1 000
Sample-B	8 000	0.05	2	400

2 结果与讨论

图 2 为不同进给速度加工复合材料试样的性能测试结果。可见 Sample-A 样品的拉伸强度为 253 MPa,弯曲强度为 743 MPa。Sample-B 样品的拉伸强度和弯曲强度均有所下降,分别为 241 MPa 和 590 MPa。相比于 Sample-A 样品分别下降了 4.7% 和 20.6%。

图 3 为两种样品弯曲强度测试过程中的载荷-位移曲线。由图可见,在初始加载阶段,两种样品均表

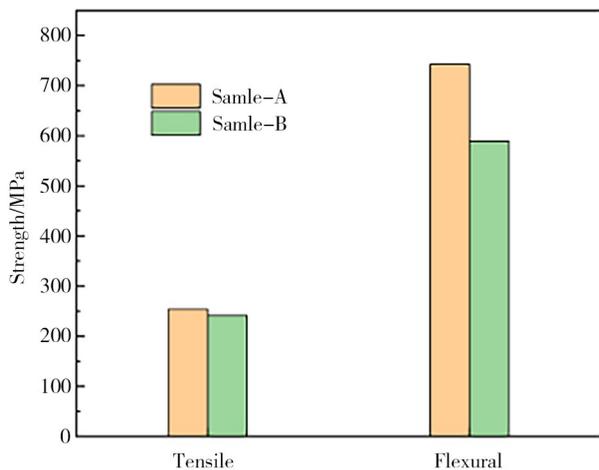


图2 SiC_f/SiC复合材料的拉伸和弯曲强度

Fig. 2 Flexural and tensile strength of SiC_f/SiC composite

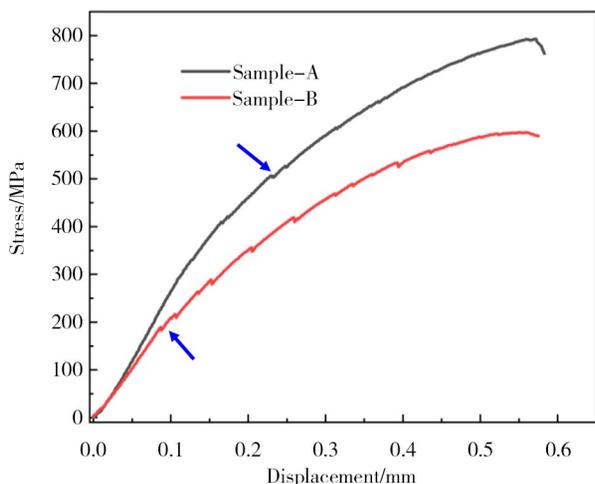


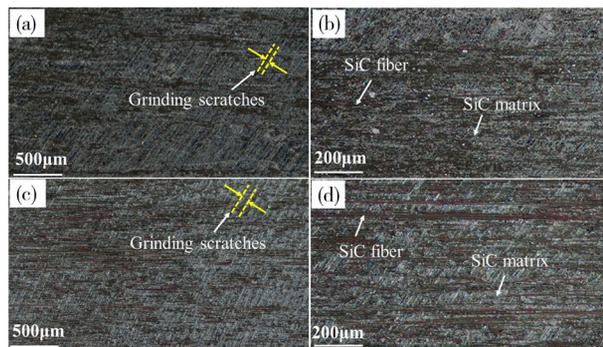
图3 载荷位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve

现出准弹性的应变过程^[13]。当载荷逐渐增大时,两种样品中均出现了“震荡”。Sample-A样品的载荷位移曲线中,首次出现“震荡点”对应的载荷约为500 MPa。Sample-B样品的载荷位移曲线中,首次出现“震荡点”对应的载荷约为200 MPa,随着载荷的进一步增加,出现了较多的“震荡点”。同时Sample-B样品的曲线斜率明显下降,因此其最大载荷有明显降低。

图4为不同进给速度加工复合材料表面的放大形貌。可见,超声辅助机械加工后,加工区SiC基体表面形成研磨纹路。对比低倍照片图(a)和(c)可见提高进给速度时,研磨纹路间距明显变大。同时,由高倍放大图(b)和(d)可见,加工区表面明显存在彩色的横向条纹,该条纹为SiC纤维。Sample-A样品中,大部分区域的SiC纤维被银灰色的SiC基体覆盖。Sample-B样品加工区横向SiC纤维暴露区域较大,银灰色的SiC基体区域较小。

图5为两种试样加工表面的三维形貌。可以看

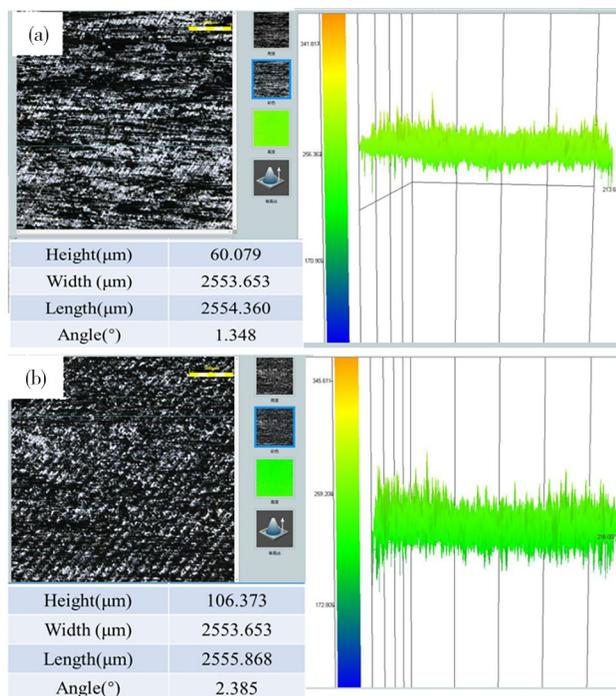


注:Sample-A的低倍(a)和高倍(b)照片; Sample-B的低倍(c)和高倍(d)照片。

图4 SiC_f/SiC复合材料加工表面形貌

Fig. 4 Machined surfaced of SiC_f/SiC composite

出Sample-A样品表面高度差为60.079 μm, Sample-B样品表面高度为107.373 μm。可见提高进给速度后,试样加工表面的起伏更大。因此高进给速度加工的试样表面可能会形成更严重的加工损伤。



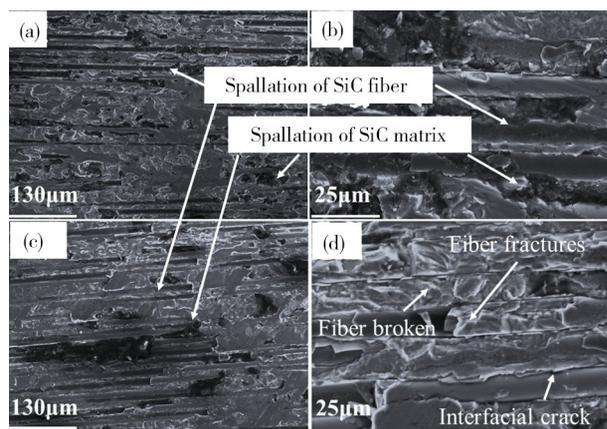
注:(a)Sample-A; (b)Sample-B。

图5 加工表面的三维形貌图

Fig. 5 3D surface morphology of machined surfaced

图6两种样品加工表面的微观形貌。由图6(a)和(c)可见,经过超声辅助机械加工后,试样表面有不同程度的损伤,纤维脱黏后形成了沟槽,部分区域出现了基体脱落。图6(b)中Sample-A样品表面加工区域出现了明显的纤维剥落,纤维与基体的界面处出现了裂纹。图6(d)中Sample-B样品表面加工区除纤维与基体界面处出现裂纹外,还出现了严重的纤维破碎、折断等缺陷。

在超声辅助磨削加工过程中,材料的去除机理
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第4期



注：(a)、(b)是 Sample-A；(c)、(d)是 Sample-B。

图6 加工表面的微观形貌

Fig. 6 SEM images of machined surfaced

分为两个不同阶段。一个是韧性区去除,另一个阶段是脆性区去除。当磨削加工的实际深度由0逐渐增大并超过临界加工深度时,加工过程由韧性区去除阶段转变为脆性区去除阶段。对于MI工艺制备的SiC_f/SiC复合材料,其磨削加工时的临界加工深度值与材料本身的物理特性相关,与超声辅助加工参数无关,而实际加工深度与磨削力 F 正相关^[14]。

图7为超声磨削加工示意图。可见在磨削加工过程中,SiC纤维和基体会受到金刚石磨头施加的法向力 F_n 和切向力 F_t 的作用, F_n 和 F_t 的合力为磨削力 F 。当磨削力增大时,实际磨削加工深度趋近或超过临界加工深度,材料加工去除机理转变为脆性去

除。此时磨头施加的磨削力大于纤维与基体的结合强度,使得材料加工区出现裂纹并发生扩展^[15-16][图8(a)],甚至出现加工区纤维脱黏并与基体分离后沿磨削力方向移动的现象,这将对周围基体形成挤压,导致加工区周围基体脱落[图8(b)]。

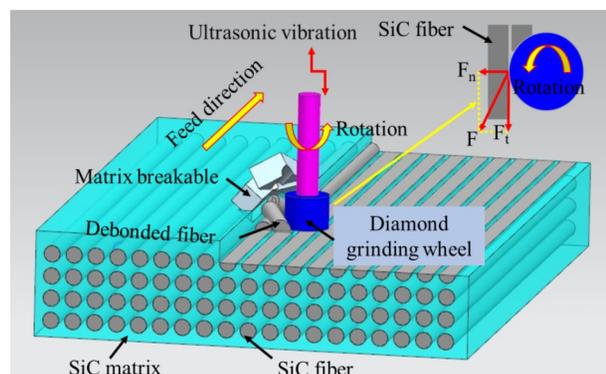


图7 超声磨削加工示意图

Fig. 7 Schematic of ultrasonic machining-drilling

磨削力与进给速度存在正相关^[17]。即当其他参数不变,进给速度提高时,磨削力将明显增加。因此,采用更高进给速度加工复合材料时,磨头对纤维及基体会产生更大的磨削力,脆性去除机理将使加工区形成更为严重的加工损伤^[18]。因此,相比于Sample-A, Sample-B样品加工区的纤维断裂、剥离、和破碎等现象更加明显,复合材料表面损伤更加严重。

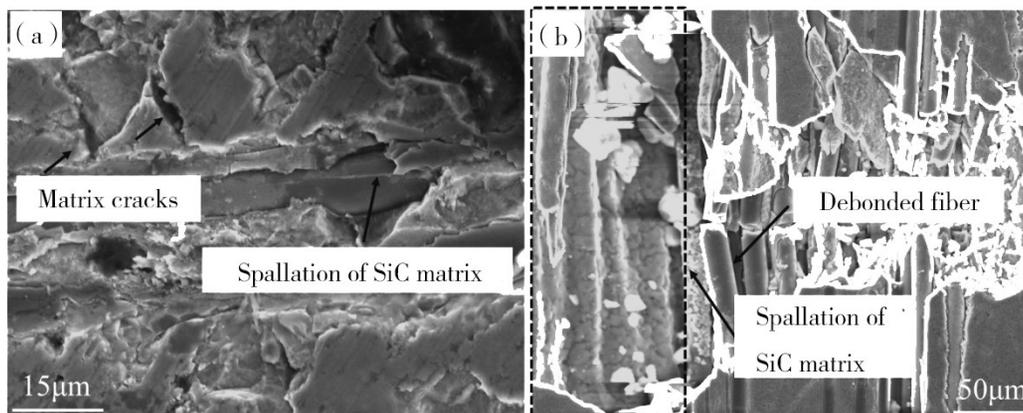


图8 加工区表面缺陷

Fig. 8 Machining defects on machined surface

MI工艺制备的SiC_f/SiC陶瓷基复合材料具有典型的硬脆特性,因此对加工表面的微裂纹较为敏感。采用磨削加工在试样表面形成微小裂纹后,在复合材料试样受载时,裂纹源开始扩展,导致复合材料强度下降^[19]。相比于Sample-A样品,采用较高的进给速度加工使Sample-B样品表面形成了更严重的损伤,在受载过程中更易开裂,因此在载荷位移曲线中出现了较多的“震荡点”。同时,Sample-B样品中加

工损伤深度较大,因此Sample-B样品的拉伸及弯曲强度明显下降。

3 结论

采用超声辅助机械加工的方法对SiC_f/SiC复合材料表面进行磨削加工,进给速度较高时,金刚石磨头对SiC纤维和基体的磨削力增大。大磨削力的加工过程将导致实际磨削加工深度大于SiC_f/SiC复合材料的临界加工深度,材料去除机理由韧性区去除

转变为脆性区去除。此时纤维与基体的界面及SiC基体中出现裂纹,复合材料表面部分区域出现纤维脱黏、断裂、破碎及脱落等现象,加工区形成严重的损伤。本文中,当进给速度由400 mm/min提高至1 000 mm/min时,SiC_f/SiC复合材料表面加工损伤加重,复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别下降了4.7%和20.6%。因此,在加工过程中,应根据MI-SiC_f/SiC复合材料特性,选择适合的进给速度等加工参数,使磨削力 F 小于纤维与基体的结合强度,从而降低加工损伤,提高复合材料产品的综合性能。

参考文献

- [1] 刘虎,杨金华,周怡然,等. 国外航空发动机用SiC_f/SiC复合材料的材料级性能测试研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(11):5-16.
- LIU H, YANG J H, ZHOU Y R, et al. Progress in coupon tests of SiC_f/SiC ceramic matrix composites used for aero engines [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(11):5-16.
- [2] JONES R H, GIANCARLI L, HASEGAWA A, et al. Promise and challenges of SiC_f/SiC composites for fusion energy applications[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307(3):1057-1072.
- [3] KATOH Y, SNEAD L L, HENAGER C H, et al. Current status and recent research achievements in SiC/SiC composites[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455(1-3): 387-397.
- [4] 焦健,陈明伟. 新一代发动机高温材料-陶瓷基复合材料的制备、性能及应用[J]. 航空制造技术, 2014(7): 62-69.
- JIAO J, CHEN M W. New generation of high temperature material for engine preparation, property and application of ceramic matrix composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(7): 62-69.
- [5] 王鸣,董志国,张晓越,等. 连续纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014(6):10-13.
- WANG M, DONG Z G, ZHANG X Y, et al. Application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites in aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(6):10-13.
- [6] AN Q, CHEN J, MING W, et al. Machining of SiC ceramic matrix composites: A review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 34(4):540-567.
- [7] 焦健,王宇,邱海鹏,等. 陶瓷基复合材料不同加工工艺的表面形貌分析研究[J]. 航空制造技术, 2014(6):89-92.
- JIAO J, WANG Y, QIU H P, et al. Morphology analysis of SiC_f/SiC ceramic matrix composites machining surface with different processing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(6):89-92.
- [8] 张文武,张天润,焦健. 陶瓷基复合材料加工工艺评价[J]. 航空制造技术, 2014(6):45-49.
- ZHANG W W, ZHANG T R, JIAO J. Comment on ceramic matrix composites machining processes [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(6):45-49.
- [9] FENG P, WANG J, ZHANG J, et al. Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites [J]. Ceramics International, 2017, 43(1):791-799.
- [10] 康仁科,赵凡,鲍岩,等. 超声辅助磨削SiC_f/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 of SiC_f/SiC composites [J], Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(4):85-91.
- [11] LIU Q, HUANG G, XU X, et al. Influence of grinding fiber angles on grinding of the 2D-C_f/C-SiC composites [J]. Ceramics International, 2018, 44(11):12774-12782.
- [12] CORMAN G S, LUTHRA K L, BANSAL N P, ed. Silicon Melt Infiltrated Ceramic Composites (HiPerComp™). Handbook of Ceramic Composite [D]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004:99-116.
- [13] HE Q C, LI H J, YIN X M, et al. Microstructure, mechanical and anti-ablation properties of SiC_{mw}/PyC core-shell networks reinforced C/C-ZrC-SiC composites fabricated by a multistep method of chemical liquid-vapor deposition [J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 20414-20426.
- [14] LI Z C, JIAO Y, DE INES T W, et al. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: feasibility study and designed experiments [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(12-13):1402-1411.
- [15] ZHENG K, XIAO X Z, LIAO W H, et al. Study on rotary ultrasonic machining of sintered zirconia dental ceramics [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(9):1864-1869.
- [16] WANG D, LU S, XU D, et al. Research on material removal mechanism of C/SiC composites in ultrasound vibration-assisted grinding [J]. Materials, 2020, 13(8):1918.
- [17] LIU Z, KANG R, LIU H, et al. FEM-based optimization approach to machining strategy for thin-walled parts made of hard and brittle materials [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(5-6): 1399-1413.
- [18] SHI L W, HONG Z, Jun T J, et al. Investigation on surface micro-crack evaluation of engineering ceramics by rotary ultrasonic grinding machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1):483-492.
- [19] ZHAO S, ZHOU X, YU J, et al. Mechanical properties and in situ crack growth observation of SiC/SiC composites [J]. Ceramics International, 2014, 40(5): 7481-7485.