

C_f/SiC 复合材料低温铣削工艺优化研究

徐亮,王凯,王新永,陈旭辉,刘宏瑞,王松,宋楠,韩军,严伟容,刘鸿贵
(航天材料及工艺研究所 先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

摘要:对超硬金刚石刀具低温铣削 C_f/SiC 复合材料进行工艺优化研究,主要研究聚晶金刚石刀具低温铣削 C_f/SiC 复合材料过程中,低温冷却介质(干冰、液氮)和冷却工艺参数(阀体出口压力和喷嘴喷射角度)对切削力、加工表面完整性和切屑的影响规律。研究表明:在干冰、液氮低温介质的冷却作用下,工件的加工表面质量得到了较大提高,主切削力显著降低。

关键词:C_f/SiC; 复合材料; 低温铣削; 工艺优化; 干冰; 液氮

中图分类号:TH161+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0036-05

Experimental Study on Cryogenic Cooling Milling Performance of C_f/SiC Composites

XU Liang, WANG Kai, WANG Xinyong, CHEN Xuhui, LIU Hongrui, WANG Song, SONG Nan, HAN Jun,
YAN Weirong, LIU Honggui

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

Abstract: In this paper, the process optimization of cryogenic milling of C_f/SiC composite with superhard diamond tool is studied. The effects of cryogenic cooling medium (dry ice, liquid nitrogen) and cooling process parameters (valve outlet pressure and nozzle spray angle) on cutting force, machined surface integrity and chip in the process of cryogenic milling of C_f/SiC composite with polycrystalline diamond tools are investigated. The results indicate that under the cooling effect of dry ice and liquid nitrogen, the machined surface quality of workpiece improves remarkably, and the main cutting force reduces significantly.

Keywords: C_f/SiC; composites; cryogenic milling; process optimization; dry ice; nitrogen

0 引言

在陶瓷基复合材料(CMC)领域,碳纤维具有高比强度、高比模量和优异的高温稳定性等特点,是连续纤维增强陶瓷基复合材料中最具应用前景的增强纤维之一^[1]。C_f/SiC 复合材料即碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料,是由碳纤维、SiC 陶瓷基体和界面相组成的^[2]。根据纤维的组织结构,C_f/SiC 可分为 2D、2.5D 和 3D 的复合材料。

现如今,碳纤维复合材料广泛应用于航空航天、能源技术、轨道交通工业、核工业等重要领域。但这种材料的硬度高、脆性大、各向异性、不均匀性和加工冷却条件苛刻等特点,在切削加工过程中容易出现刀具寿命短、加工表面质量低、加工精度低等问题,这使得 C_f/SiC 复合材料难以用传统机械加工方法加工成高精度、低损伤的结构件。因此,如何实现 C_f/SiC 复合材料的高效、高质量切削仍是实现其高性能应用的关键技术之一。

国内外学者已经对 C_f/SiC 复合材料的切削加工进行了研究。毕铭智^[3]对 C_f/SiC 复合材料进行了钻削、铣削加工试验,确定了加工 C_f/SiC 复合材料的最佳刀具,并分析了工艺参数对加工质量的影响。刘艳等^[4]通过旋转超

声振动和普通铣磨加工的对比,得知旋转超声振动辅助加工可大大降低切削力,降低幅度可达到 50% 以上。AZARHOUSHANG B^[5]提出了一种新的 C_f/SiC 复合材料超声振动磨削系统,并与传统磨削系统进行了比较,验证了该系统可以降低磨削力和表面粗糙度。

低温切削技术是指利用低温冷空气、液氮或液态二氧化碳等低温流体冷却工件材料、刀具或切削区域,并在低温下进行切削的方法^[6]。目前,国内外对低温切削技术的研究主要集中在典型难加工金属材料的切削上。齐向东^[7]采用内冷刀具对 TC4 钛合金进行了低温铣削,发现低温冷却有效降低了表面粗糙度,减少了刀具粘结磨损,提高了加工效率。MANIMARAN G 等^[8]使用液氮冷却磨削钢表面,相对于干磨削和传统冷却液磨削,低温磨削技术可降低表面粗糙度,改善表面完整性。BORDIN A 等^[9]对 Ti6Al4V 工件进行了低温切削,发现低温切削明显改善了工件的加工质量和延长刀具寿命,提高了 Ti6Al4V 工件的加工性能。

虽然已有不少专家学者对 C_f/SiC 复合材料的切削加工进行了研究,但仍然难以满足如今各行业对 C_f/SiC 材料高效率和高质量的加工需求。国内外对低温切削技术的研究主要集中在难加工金属材料,而对低温切削加工 C_f/SiC 复合材料的研究较少。复合材料低温切削匹配性

基金项目:国防科技重点实验室稳定支持项目(790006020603030215121905);中国航天科技集团工艺研究项目(900703710602010115031801)

第一作者简介:徐亮(1984—),男,辽宁朝阳人,高级工程师,博士,主要从事先进切削刀具材料及难加工材料切削加工等方面的研究工作。

和加工性、低温介质和参数对复合材料切削特性影响规律、冷却工艺参数优化等方面的研究仍需不断开展。本文着重研究利用金刚石刀具低温铣削 C_f/SiC 复合材料的工艺优化,研究了聚晶金刚石(PCD)刀具低温铣削 C_f/SiC 复合材料过程中,低温冷却介质(干冰、液氮)和冷却工艺参数对切削力、加工表面完整性和切屑的影响规律,从而为难加工材料的低温切削加工技术如何有效地降低切削温度、提高刀具寿命和改善加工表面质量提供指导,为实现 C_f/SiC 复合材料高效率、高质量和低成本切削加工探索新途径。

1 试验设计

本文采用 C_f/SiC 复合材料作为工件材料,尺寸为 $50\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,如图 1 所示。工件所用碳纤维是 T800,单根纤维直径为 $5 \sim 7\ \mu\text{m}$,每根经纱或纬纱的宽度为 $1 \sim 1.5\text{ mm}$,经纬层表面的垂直纱线宽度约为 1 mm 。每层的经纬纱平织面上,由多根经纱和多根纬纱相交且上下交替编织而成。

采用直径为 $\phi 10\text{ mm}$ 的双刃聚晶金刚石立铣刀,如图 2 所示。刀具的螺旋角约为 4° ,前角约为 1.9° ,后角约为 8.8° ,将其装夹于一台高速五坐标加工中心(Mikron UCP710),以此进行铣削试验。

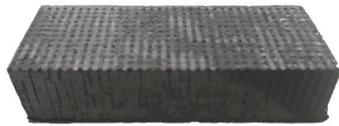


图 1 C_f/SiC 复合材料



图 2 试验用 PCD 铣刀

基于低温喷射冷却技术,设计了低温冷却系统,如图 3 所示,将低温液氮或干冰按照一定的阀体出口压力和喷射角度喷射于切削区中,对铣削过程进行低温冷却。

试验中采用顺铣平面铣削,如图 4 所示。切削过程中所用的切削参数如表 1 所示,其中,喷嘴喷射角度是指喷嘴与刀具轴向之间的角度。在初步选择适合于 C_f/SiC 复合材料的干式铣削、干冰辅助铣削和液氮辅助铣削试验研究,设计若干组单因素实验,记录各组实验结果。通过比较不同冷却介质、喷嘴射流角度和阀门出口压力下的切削力、切削表面形貌和切屑形貌,探究低温工艺参数的影响规律,并优化低温工艺参数。

试验过程中使用压电式三向动态测力仪(KISTLER 9625B)测量切削过程中坐标轴 x 、 y 和 z 方向的切削力。采用光学显微镜(VHX-600)对工件表面形貌和微观组织进行了测试。使用日立(S-4800)扫描电子显微镜观测不同冷却介质下的切屑形貌。采用激光共聚焦显微镜(LSM

700)对加工表面粗糙度进行了测量,并观察了表层的微观形貌。



图 3 低温液氮冷却系统

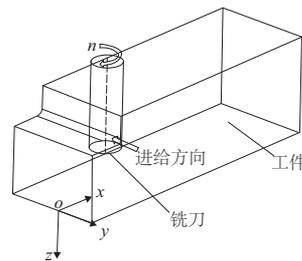


图 4 C_f/SiC 铣削示意图

表 1 主要参数表

参数	数值
主轴转速 $n/(r/min)$	3 000
进给速度 $v_f/(mm/min)$	60
铣削深度 a_p/mm	3
铣削宽度 a_e/mm	2
喷射角度 $\varphi/(^\circ)$	30, 60, 90
干冰阀体出口压力/MPa	3, 4, 5
液氮阀体出口压力/MPa	0.05, 0.075, 0.1

2 试验结果与分析

2.1 切削力随冷却工艺参数的变化规律

图 5 为 $n = 3\ 000\text{ r/min}$, $v_f = 60\text{ mm/min}$, $a_p = 3\text{ mm}$, $a_e = 2\text{ mm}$ 时单个铣削过程测得的三向切削力波形图(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。波形图已经进行过信号漂移补偿和低速降噪滤波处理。当刀具开始切削工件和即将完成切削时,由于刀具与工件在初始切削和最终切削阶段时存在不稳定冲击振动,力的波动范围比稳定铣削阶段大得多。而在稳定铣削阶段,也存在少量的力值突变峰点,这是由于材料本身的结构缺陷(材料内部存在孔洞)和材料的各向异性所致,使得切削力有时会突然变得局部不均匀、不稳定。本试验中,取稳定铣削阶段的最大切削力(不包括数值极大的突变点)作为测得切削力。根据测力仪上工件夹紧的位置方向和进给方向,确定力的方向。如图 5 所示, F_x (垂直于进给方向的水平力)取负方向的力

值, F_y (沿进给方向的力) 和 F_z (沿主轴轴线方向的力) 取正方向的力值。

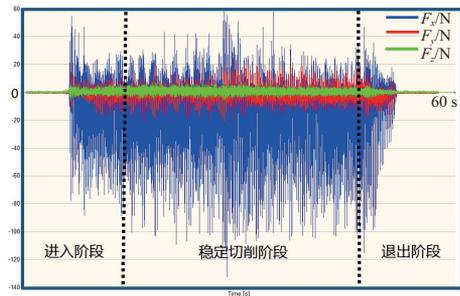


图5 铣削过程中测得的三向切削力波形图

试验分别按如下参数进行:

$n = 3000 \text{ r/min}$; $v_f = 60 \text{ mm/min}$; $a_p = 3 \text{ mm}$; $a_e = 2 \text{ mm}$; $P = 4 \text{ MPa}$ (干冰); $P = 0.075 \text{ MPa}$ (液氮)。

测得不同冷却介质、冷却工艺参数所对应的 x 、 y 和 z 轴方向的切削力, 获得不同坐标轴方向上的切削力随喷嘴喷射角度的变化曲线, 如图6所示。由此可知:

1) 无论是在干式切削、干冰辅助铣削还是液氮辅助铣削过程中, F_x 远高于 F_y 和 F_z , 且 F_x 是主要切削力, 应重点得到关注。干冰和液氮辅助铣削时的 F_x 明显低于干式切削, 即低温铣削对 F_x 的影响较大。

2) 干冰辅助铣削时, F_x 随喷射角度 ($30^\circ \sim 90^\circ$) 的增大而平稳减小, 但变化不明显, F_y 和 F_z 则呈先减小后增大的变化规律, 且在 $\varphi = 60^\circ$ 时, F_y 和 F_z 达到最低值。

3) 当液氮辅助铣削时, F_x 随喷射角的增大 ($30^\circ \sim 90^\circ$) 先减小后增大, $\varphi = 60^\circ$ 时铣削力最小, 铣削力下降最大, 此时低温铣削降低切削力效果最好; 而 F_y 和 F_z 的变化较小, 射流角度对 F_y 和 F_z 的影响较小。

相同的方法获得不同坐标轴方向上的切削力随阀体出口压力的变化曲线 ($n = 3000 \text{ r/min}$, $v_f = 60 \text{ mm/min}$, $a_p = 3 \text{ mm}$, $a_e = 2 \text{ mm}$, $\varphi = 30^\circ$), 如图7所示。由此可知:

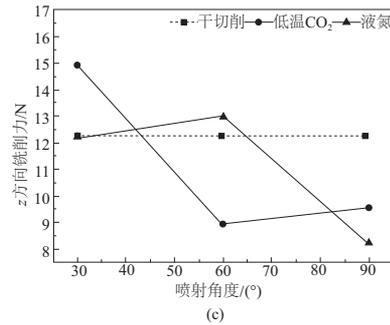
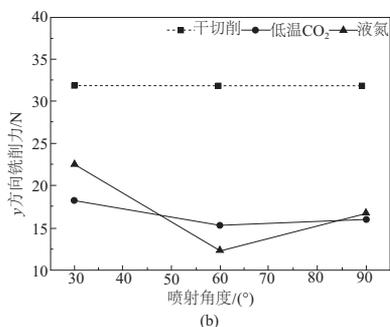
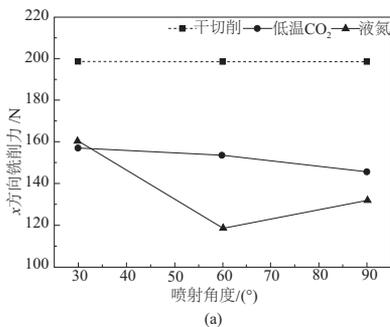


图6 不同冷却方式下各坐标轴方向的力随喷射角度的变化曲线

1) 对于干冰和液氮辅助铣削, 随着阀体出口压力的增加 (用干冰时, $P = 3 \sim 5 \text{ MPa}$, 用液氮时, $P = 0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$), F_x 先减小后显著增大, F_y 和 F_z 则很小。

2) 在相同的阀门出口压力下, 干冰和液氮辅助铣削时 F_y 和 F_z 均显著低于干式切削时的切削力, 阀体出口压力对 F_x 和 F_y 的影响较大。其中, $P = 4 \text{ MPa}$ (干冰)、 $P = 0.075 \text{ MPa}$ (液氮) 时, F_x 和 F_y 的值下降最大, 表明降低切削力的效果也最好。

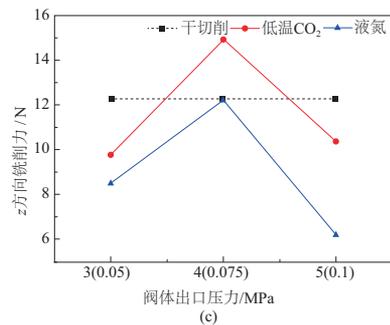
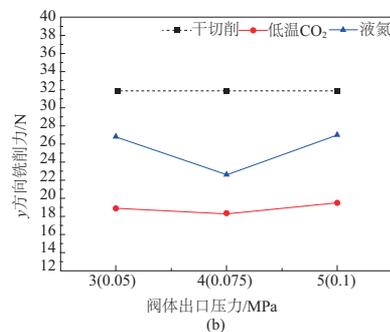
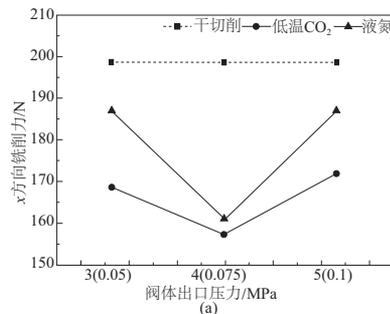


图7 不同冷却方式下各坐标轴方向力随阀体出口压力的变化曲线

2.2 加工表面粗糙度随冷却工艺参数的变化规律

采用光学显微镜(VHX-600)测得了不同冷却条件下工件的加工表面形貌,如图8所示。工件的加工表面不可避免地存在孔隙,这与材料本身的孔隙率和材料切削断裂机制有关。在C_f/SiC复合材料的制备过程中,特别是在碳纤维与基体SiC的结合处以及纤维束与其他纤维束的相交处,材料结合性较低,比较容易形成孔洞。

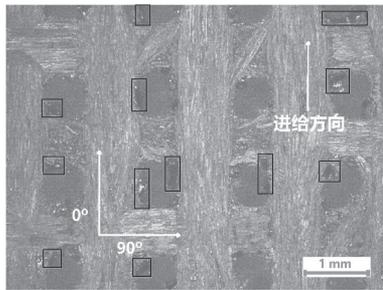


图8 C_f/SiC 复合材料加工表面显微图

采用光学显微镜(VHX-600)测得了不同冷却方式下加工表面放大200倍的形貌,如图9所示,从被加工工件表面碳纤维区的表面形貌和碳纤维与基体的界面可以看出:

- 1) 干式铣削时,工件表面碳纤维层断裂较多,甚至可以看到多层纤维束的断裂痕迹和界面脱粘现象;
- 2) 干冰辅助铣削表面相对较好,但仍有不少碳纤维断裂层;
- 3) 与前两种冷却方式对比,液氮辅助铣削加工的工件表面断裂较少,碳纤维区的纤维束层也相对连续完整,表明液氮辅助铣削加工的工件表面完整性相对较好。

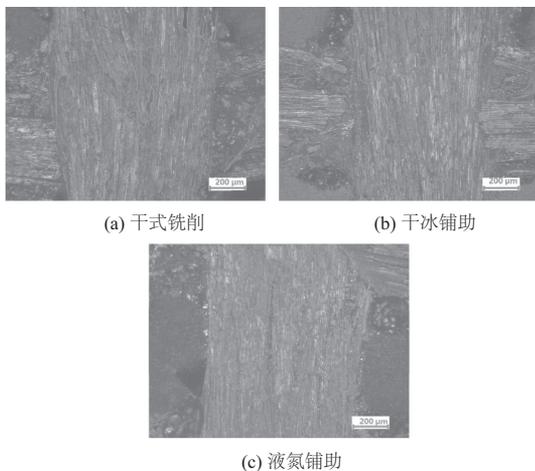


图9 3种铣削方式下C_f/SiC 复合材料加工表面显微图

采用激光共聚焦显微镜测得了不同冷却方式下工件加工表面的形貌,如图10所示,由此可知:

- 1) 干式铣削时工件表面非常不均匀,表面起伏变化大,有较多的深沟和高峰突起,表面质量较差;
- 2) 干冰辅助铣削时,工件加工表面质量较干式铣削时略有改善;

3) 液氮辅助铣削时,工件加工表面非常均匀,表面起伏变化不大,深沟槽少,突起的高峰也较少,加工表面完整性相对较好,表面质量最好。

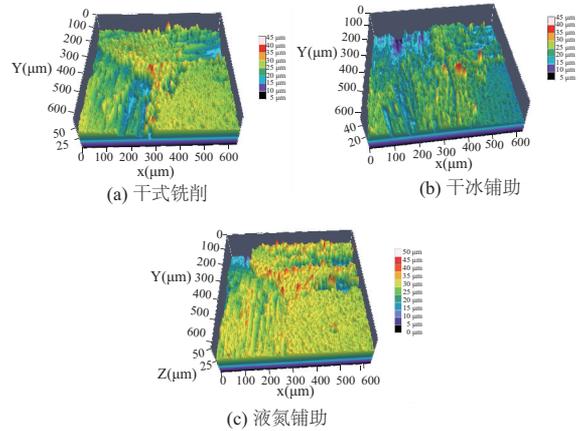


图10 3种铣削方式下C_f/SiC 加工表面激光共聚焦扫描图

测得不同冷却方式下工件加工的表面粗糙度,如图11所示。由此可知,在低温冷却条件下,加工表面的S_a、S_q和S_z值明显小于干式切削,表明低温介质冷却辅助铣削时,工件加工表面质量优于干式切削。主要原因是低温介质降低了铣削力,提高了材料的低温脆性,减少了工件的塑性,降低了工件材料在切削区的变形程度和对加工表面变形的影响。另外,与干冰冷却相比,液氮冷却辅助时工件加工表面的S_a、S_q和S_z值最低,表明加工表面质量较高。

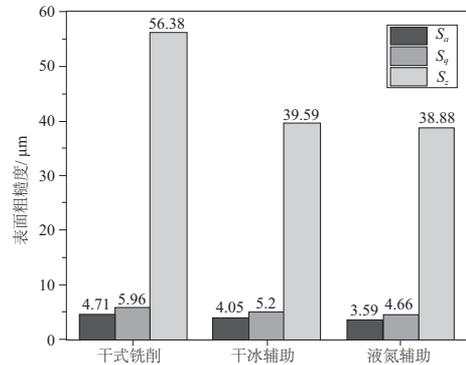


图11 3种铣削方法加工的工件表面粗糙度

2.3 切屑形貌随冷却工艺参数的变化规律

采用扫描电子显微镜测得了不同冷却介质下铣削过程所产生的切屑形貌,如图12所示。由此可知,用3种冷却方式下铣削C_f/SiC时的切屑均为破碎的碳纤维和SiC陶瓷颗粒的混合粉末状切屑。其中:

- 1) 干式铣削时,切屑多为细小的破碎颗粒(粉末SiC颗粒和破碎的细小碳纤维),微块状陶瓷颗粒和长条状碳纤维较少;
- 2) 与干式铣削相比,干冰辅助铣削时的切屑中含有较多的长条形碳纤维和微块状SiC颗粒,而液氮辅助铣削

的切屑中含有大量的长条形碳纤维和较大块状的 SiC 陶瓷碎块。这是因为 C_f/SiC 是硬脆材料,特别是陶瓷基体,在干式切削过程中容易以破碎的形式被去除。而在低温介质冷却下,切削区温度降低,导致基体与增强纤维结合强度降低,增强碳纤维更容易在整个截面上拔出或整体去除,而靠近碳纤维与基体界面处的碳化硅陶瓷也容易被整块切削去除。

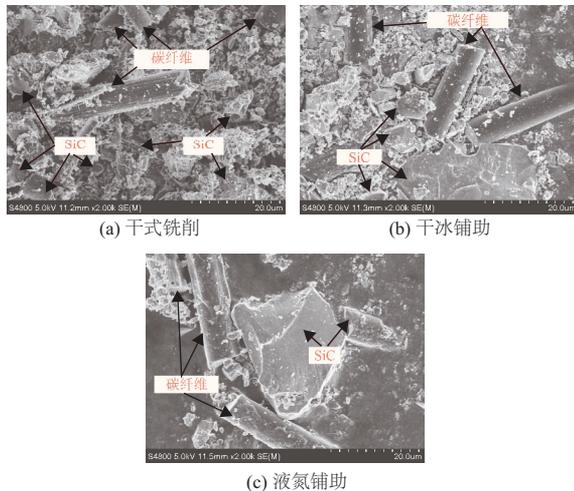


图 12 不同冷却方式下切削 C_f/SiC 所得到的切屑形貌

3 结语

本文利用聚晶金刚石(PCD)刀具切削 C_f/SiC 复合材料,研究了 C_f/SiC 复合材料低温铣削特性,并得出如下结论:

1) 无论是干式铣削还是干冰或液氮冷却辅助铣削, F_x (垂直于进给方向的水平力)均远高于 F_y (沿进给方向的力)和 F_z (沿主轴轴线方向的力);与干式铣削相比,干冰或液氮冷却辅助铣削的切削力均显著降低;其中,在液氮辅助铣削条件下,当阀体出口压力为 0.075 MPa、喷射角度为 60°时,铣削力最低,相对于干式铣削时切削力下降最大,低温辅助降低切削力的效果最明显,可作为冷却工艺参数的最优化方案。

2) 经低温冷却(干冰和液氮)后,工件加工表面粗糙度 S_a 、 S_q 和 S_z 明显低于干式切削,工件加工表面纤维束断裂层较少,碳纤维区的纤维束层相对连续完整,表面起伏变化不大,液氮辅助铣削加工的工件表面完整性最好。

3) 3 种冷却方式辅助铣削 C_f/SiC 复合材料时的切屑均为破碎碳纤维和破碎 SiC 陶瓷的混合粉末状切屑。与干式铣削相比,干冰辅助铣削的切屑中含有较多的长条碳纤维和微块状碳化硅颗粒,而液氮辅助铣削的切屑中含有大量的长条形碳纤维和大块碳化硅碎块。

参考文献:

- [1] 湛青坡. 超声振动辅助铣磨三维针刺 C/SiC 复合材料加工工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [2] 张立峰, 王盛, 乔伟林, 等. 单向复合材料 C/SiC 平面磨削力实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1155-1159, 1165.
- [3] 毕铭智. C/SiC 复合材料钻、铣加工技术的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [4] 刘艳, 郑景珍, 陈阿娣, 等. C/SiC 复合材料超声振动加工切削力单因素试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 35-37, 99.
- [5] AZARHOUSHANG B, TAWAKOLI T. Development of a novel ultrasonic unit for grinding of ceramic matrix composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9/10/11/12): 945-955.
- [6] 段鹏飞, 乔阳, 王相宇, 等. 低温切削加工技术的研究进展[J]. 工具技术, 2019, 53(9): 8-13.
- [7] 齐向东. 干冰低温铣削 TC4 钛合金的试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [8] MANIMARAN G, PRADEEP KUMAR M, VENKATASAMY R. Surface modifications in grinding AISI D3 steel using cryogenic cooling[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015, 37(4): 1357-1363.
- [9] BORDIN A, SARTORI S, BRUSCHI S, et al. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti₆Al₄V produced by Additive Manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 4142-4151.

收稿日期: 2019-12-06