

# 高体积分数的SiC<sub>p</sub>/Al激光诱导氧化辅助铣削研究

赵长喜<sup>1</sup> 郑立彦<sup>1</sup> 张孝辉<sup>1</sup> 张开虎<sup>1</sup> 张子岚<sup>1</sup> 赵国龙<sup>2</sup>

(1 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

(2 南京航空航天大学, 南京 210016)

**文 摘** 为了解决高体积分数的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料在常规切削加工中存在切削力大、刀具磨损快、表面完整性差等问题。本文针对高体积分数的SiC<sub>p</sub>/Al材料开展激光诱导氧化辅助铣削技术研究,通过激光辐照铣削区域形成易于去除的疏松氧化层提高切削性能,同时开展氧化层调控策略及激光诱导氧化辅助下的铣削参数优化工艺研究,研究不同激光能量密度、辅助气体对氧化层质量的影响及铣削参数优化。结果表明随激光能量密度的增大热影响区宽度和烧蚀沟槽深度随之增加,在氧气辅助下易形成疏松且易于去除氧化层。选取较高的激光能量密度可获得较好的氧化效果,而使用PCD金刚石铣刀,主轴转速为10 000 r/min,在每齿进给量为7.5 μm/s可获得最佳表面质量。

**关键词** 高体积分数的SiC<sub>p</sub>/Al,激光诱导氧化辅助铣削,氧化机理,铣削参数优化

中图分类号:TB331

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.011

## Laser-induced Oxidation Assisted Milling of High Volume Fraction SiC<sub>p</sub>/Al in Spacecraft

ZHAO Changxi<sup>1</sup> ZHENG Liyan<sup>1</sup> ZHANG Xiaohui<sup>1</sup> ZHANG Kaihu<sup>1</sup>

ZHANG Zilan<sup>1</sup> ZHAO Guolong<sup>2</sup>

(1 Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

(2 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** In order to solve the problems of large cutting force, fast tool wear and poor surface integrity of SiC<sub>p</sub>/Al composites with high volume fraction of SiC in conventional machining, in this paper, the laser-induced oxidation assisted milling technology is studied for high volume SiC<sub>p</sub>/Al materials. The loose oxide layer that is easy to remove is formed in the milling area by laser irradiation to improve the cutting performance. At the same time, the oxide layer control strategy and the milling parameter optimization process assisted by laser-induced oxidation are studied. The influence of auxiliary gas and different laser energy densities on the quality of oxide layer and the optimization of milling parameters are studied. The results show that with the increase of laser energy density, the width of heat affected zone and the depth of ablation groove increase. With the help of oxygen, it is easy to form loose and easy to remove oxide layer. The conclusion shows that with the aid of oxygen, a better oxidation effect can be obtained by selecting a higher laser energy density. With PCD diamond milling cutter, the spindle speed is 10 000 r/min and the feed rate per tooth is 7.5 μm/s can obtain the best surface quality.

**Key words** High volume fraction SiC<sub>p</sub>/Al composites, Laser-induced oxidation assisted milling, Oxidation mechanism, Optimization of milling parameters

### 0 引言

随着航天器对大承载、轻量化、耐复杂空间环境等性能需求迫切,碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC<sub>p</sub>/Al composites)因具有轻质、高强、耐磨、高导热等特点而倍受关注<sup>[1-2]</sup>。另外, SiC<sub>p</sub>/Al材料的性能具

有可设计性,改变SiC<sub>p</sub>/Al材料的SiC含量,可以获得不同的热膨胀系数和机械性能。SiC<sub>p</sub>/Al材料的可设计性特别适用于航天器不同材料间的热匹配性调整,高体积分数的SiC<sub>p</sub>/Al(SiC<sub>p</sub>体积分数≥55%)与陶瓷材料的热膨胀系数基本一致,因而成为新一代航天

收稿日期:2021-08-16

第一作者简介:赵长喜,1970年出生,研究员,主要从事航天器制造工艺研究工作。E-mail:zhaoyz529@126.com

器电子产品中不可或缺的复合材料。但高体积分数SiC<sub>p</sub>/Al材料的高硬度、高耐磨性和多界面特性给加工带来了很大的困难,使其成为典型的难加工材料<sup>[3-4]</sup>。

由于碳化硅颗粒硬度高,传统的切削方法加工SiC<sub>p</sub>/Al材料,刀具因磨损严重而寿命显著降低,同时工件加工表面质量和精度也很差不能满足工程要求。又由于碳化硅颗粒不导电,电火花加工、电火花线切割等特种加工方法也不适用<sup>[5-6]</sup>。激光辅助加工通过将高能激光束聚焦在切削刃前方的工件表面,在高温下改变工件材料的强度和硬度,可大大降低切削阻力、刀具磨损和切削振动<sup>[7]</sup>。KONG等人<sup>[8]</sup>在45% SiC<sub>p</sub>/Al复合材料激光辅助加工中采用无涂层和有涂层硬质合金刀具,研究其寿命和磨损机理。结果表明,两种刀具在激光辅助加工中的使用寿命均比常规加工长。但是在激光辅助加工中,由于激光束的加热区域离刀具很近,使切削区温度升高,影响刀具的性能。针对该问题,ZHAO等人<sup>[9-10]</sup>提出了一种激光诱导氧化辅助铣削加工工艺。该工艺使用脉冲激光束照射目标区域,同时辅助供氧,使材料表面产生疏松多孔的氧化层,随后用刀具快速去除。该工艺可大大提高了材料的切削性能,获得了良好的表面质量,同时避免了温度对刀具的影响,延长了刀具寿命。本文针对高体积分数SiC<sub>p</sub>/Al材料开展激光诱导氧化辅助铣削技术研究,并以航天器常用

65% 体积分数的SiC<sub>p</sub>/Al材料为例,开展不同激光能量密度、不同辅助气体下的氧化层质量,及氧化后不同铣削参数下的铣削实验研究,以获得良好的加工表面质量。

### 1 高体积分数SiC<sub>p</sub>/Al激光诱导氧化机理分析

当激光辐射SiC<sub>p</sub>/Al工件时,材料表面迅速升温,基体材料与O<sub>2</sub>发生反应,生成氧化产物SiO<sub>2</sub>及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,由于两种氧化产物的生长速度及膨胀速度不同,会以不同的速度生长和膨胀。不同氧化物之间的相互挤压,在氧化层及过渡层内部会产生许多微小的裂纹及小孔。反应过程中产生的CO<sub>2</sub>气体通过这些裂纹孔洞从氧化层中逸出。而O<sub>2</sub>通过这些缝隙深入内部,促进内部的氧化反应进行。随着氧化反应的进一步进行,SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>会膨胀和挤压裂纹和孔洞,导致O<sub>2</sub>渗透和氧化反应速率降低。氧化层会逐渐致密,抑制O<sub>2</sub>的渗透,逐渐降低氧化反应速率。

激光诱导氧化辅助铣削工艺,是利用激光束辐照工件待加工区域使SiC<sub>p</sub>/Al材料发生氧化,转变为疏松易加工的氧化层和过渡层,提高材料的切削加工性能,从而把难加工的SiC<sub>p</sub>/Al材料转变为易加工的疏松材料。这样,SiC<sub>p</sub>/Al材料经过激光诱导氧化后,再利用高速铣削加工去除疏松层,最后再精加工微米级厚度的过渡层,在提高加工效率的同时,又获得了高的加工精度和表面质量。激光诱导氧化辅助铣削工艺过程如图1所示。

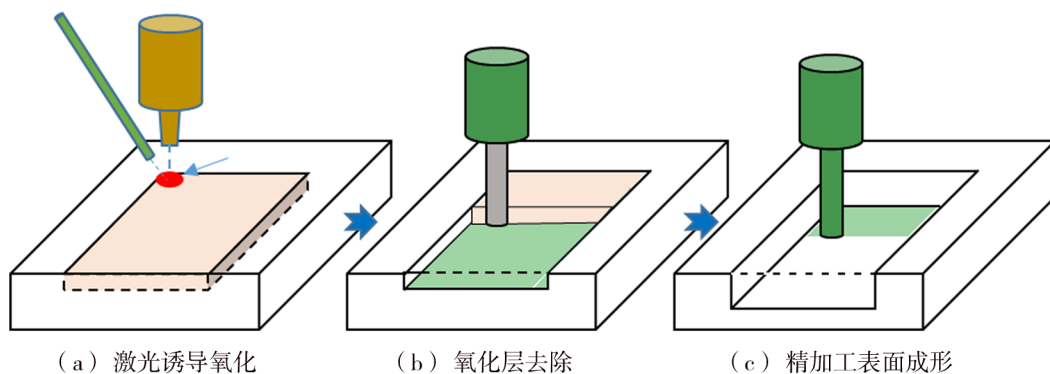


图1 激光诱导氧化辅助铣削工艺过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser induced oxidation assisted milling process

## 2 高体积分数SiC<sub>p</sub>/Al激光诱导氧化调控策略研究

为有效控制疏松氧化层的生长速率和层厚,从而形成可高效去除的易切削层,主要研究激光参数和氧化剂对SiC<sub>p</sub>/Al材料氧化速率和氧化物特征的影响规律,优选激光参数和氧化剂,实现待去除区域材料的快速氧化和疏松氧化物的生成。

选用工件材料为65% SiC<sub>p</sub>/Al复合材料,增强相SiC颗粒的平均粒径为10 μm。使用的激光为脉冲光纤激光器(YLP-1/100/20, IPG Photonics),波长为1

064 nm、脉宽为100 ns、平均功率范围为2~20 W、光斑直径为57 μm、脉冲重叠频率为20~200 kHz。选取激光能量密度*F*为主要影响因素,分别为7.84、11.75、15.67、19.59和23.51 J/cm<sup>2</sup>。在相同的激光参数下,分别以O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和Ar为辅助气体。使用热致发射扫描电子显微镜(SEM, Hitachi regules 8220)对激光处理后的工件表面及热影响区、铣削加工表面进行观察。使用Perthometer M1表面粗糙度仪获取铣削加工表面粗糙度。

## 2.1 激光能量密度对氧化效果的影响

脉冲能量密度  $F$  是影响脉冲激光与材料反应的主要因素。在单次激光扫描下材料表面生成沟壑, 沟壑两侧为热影响区。绘制了  $O_2$ 、 $N_2$  和 Ar 辅助下热影响区宽度及沟槽深度随能量密度变化曲线, 如图 2 所示。由图 2(a) 可以看出, 在三种辅助气体下, 当激光能量密度增加时, 热影响区宽度均随之增加, 且增长趋势相近。在较低的激光能量密度下, 热影响区的宽度增加速度较快, 而在较高的激光能量密度下, 由于光斑直径的限制, 热影响区的宽度增加速度减缓。在相同的能量密度下, 不同的辅助气体下获得

的加工表面热影响区宽度相近,  $O_2$  环境下略大于其他环境。这是因为  $O_2$  较  $N_2$  及 Ar 而言性质更为活泼, 激光照射后更易与高温材料发生反应。而由图 2(b) 可见, 激光辐照产生的凹槽深度也随着激光能量密度的增加而增加, 相同激光参数下, 不同辅助气体下的深度非常接近。由上述结果分析可知, 当激光能量密度增大时, 脉冲激光束单位面积的单脉冲能量增大, 材料的吸收能量增大, 工件材料的反应加剧。从而使热影响区宽度和加工槽深度增大。 $O_2$  环境可以促进材料表面的热影响区增加而对烧蚀沟壑深度影响不大, 这是由于气体难以深入材料内部。

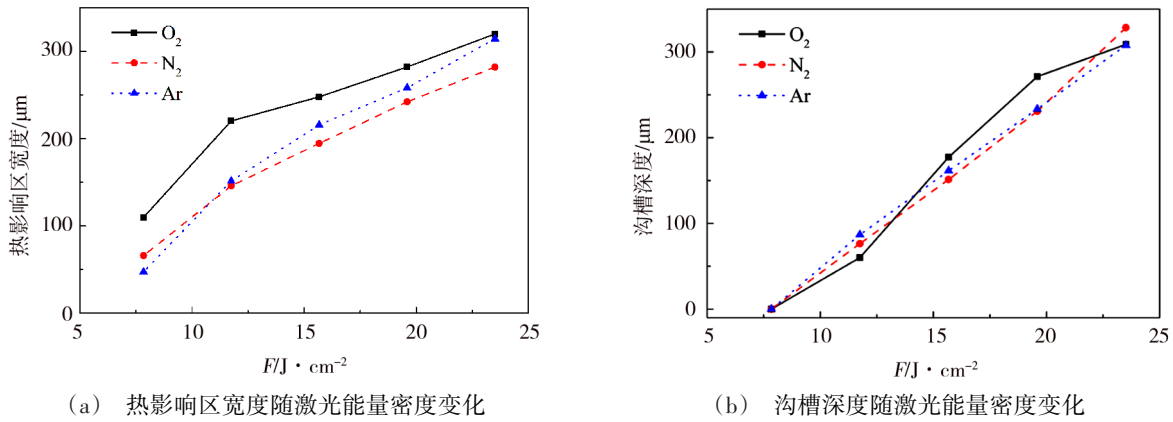


图 2 在  $O_2$ 、 $N_2$  和 Ar 的辅助下热影响区宽度及沟槽深度随激光能量密度变化

Fig. 2 Width of heat affected zone and groove depth change with laser energy density under the assistance of  $O_2$ ,  $N_2$  and Ar

## 2.2 不同辅助气体对氧化效果的影响

图 3 为不同辅助气体下加工表面的 SEM 图, 此时激光能量密度  $23.51 J/cm^2$ , 扫描速度为  $1 mm/s$ , 扫描宽

度  $10 \mu m$ 。图 3(a) 呈现了在  $O_2$  辅助下获得的氧化层形貌, 激光扫描区域形成白色疏松多孔氧化层, 该氧化层非常疏松, 易于去除, 可采用超声波清洗轻易去除。

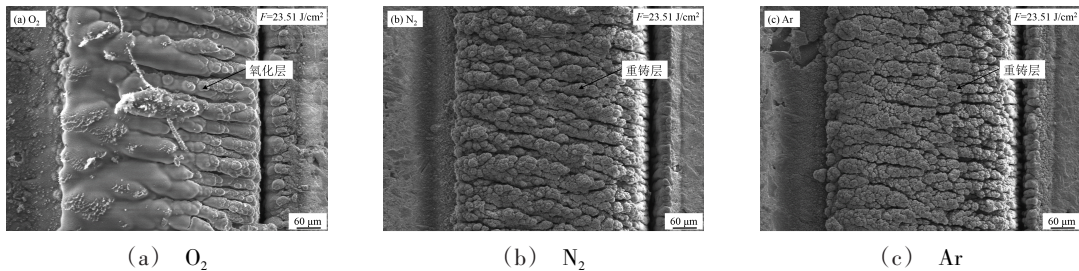


图 3 在不同辅助气体下的激光辐照表面 SEM 照片

Fig. 3 SEM pictures of laser irradiated surface under different auxiliary gases

图 4 为对应横截面的 SEM 图像, 由图 4(a) 所示的横截面, 氧化层体积增大并凸出材料表面。此外氧化层下部有许多孔洞, 靠近材料基体的部分形状不规则, 该部分主要由激光辐照生成的重凝物组成。

图 3(b) 为  $N_2$  辅助下激光辐照表面的形貌, 该部分主要为重凝物堆积而成的重铸层。其表面粗糙且不规则, 由许多细小的颗粒和团簇组成, 团簇和颗粒之间存在大量的孔隙。重铸层整体呈现黑色, 且质地坚硬, 难以去除。图 4(b) 为重铸层的横截面, 重铸

层存在大量褶皱和裂缝, 使重铸层体积增大, 但重铸层的体积比氧化层的体积小。此外重铸层的底部形貌与氧化层相似, 这是因为该区域距离材料表面较远, 气体环境影响较小。图 3(c) 和图 4(c) 是在 Ar 环境下获得的重铸层的表面形貌及横截面。其形貌特征与氮气辅助下的相似, 反映了激光与材料在惰性气体中反应的典型形貌。通过对三种辅助气体下的形貌比分析, 发现氧气对氧化层的形成有明显的促进作用。惰性气体环境下, 由于材料烧蚀溅射后不

发生氧化,熔融溅射的材料冷却后重新凝固形成重铸层,其硬度高,形貌不规则,表面粗糙,难以去除,对切削加工不利。与重铸层相比,氧化层更大,更疏

松,易于去除,有利于进一步加工,因此氧气辅助可有效提高氧化层生成。

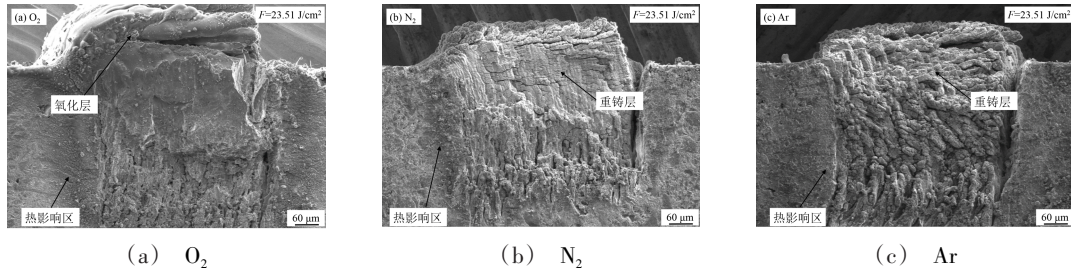


图4 在不同辅助气体下的横截面SEM照片

Fig. 4 SEM pictures of cross section under different auxiliary gases

### 3 激光诱导氧化辅助铣削工艺优化

激光诱导氧化SiC<sub>p</sub>/Al后,基体材料上会形成氧化层和过渡层,氧化层整体结构疏松,为了获得精密的工件表面,开展切削工艺参数优化研究。铣削设备采用DMG五轴数控加工机床,刀具选用CVD及PCD金刚石刀具,齿数均为2,刀具直径为8 mm,选取每齿进给量为2.5、5、7.5、10 μm/z,主轴转速为5 000、7 500及10 000 r/min。

图5(a)为采用CVD金刚石加工获得的不同参数下的表面粗糙度测量结果。由图可见,在主轴转速为5 000 r/min时,每齿进给量为2.5 μm/z时,表面粗糙度Ra为0.182 μm,当每齿进给量增加到5 μm/z时,Ra为0.238 μm,当每齿进给量为7.5 μm/z时,Ra最大为0.301 μm,而当每齿进给量达到10 μm/z时,

Ra下降到0.229 μm。在主轴转速为7 500 r/min时,表面粗糙度总体上呈现随每齿进给量增加而增加的趋势,每齿进给量为5 μm/z时,粗糙度Ra最小为0.129 μm。在主轴转速为10 000 r/min时,粗糙度整体随每齿进给量增加而增加,当每齿进给量为2.5 μm/z时,Ra最小为0.107 μm。通过比较不同主轴转速下的粗糙度可以发现,粗糙度总体上随着主轴转速的增加而减小,在5 000、7 500及10 000 r/min三种主轴转速下,5 000 r/min下的各个每齿进给量水平粗糙度均较大,而10 000 r/min下粗糙度均较小,说明在CVD刀具加工情况下,主轴转速越快,加工表面质量越好。在主轴转速为10 000 r/min,每齿进给量为2.5 μm/z时获得最小的表面粗糙度,为0.107 μm。

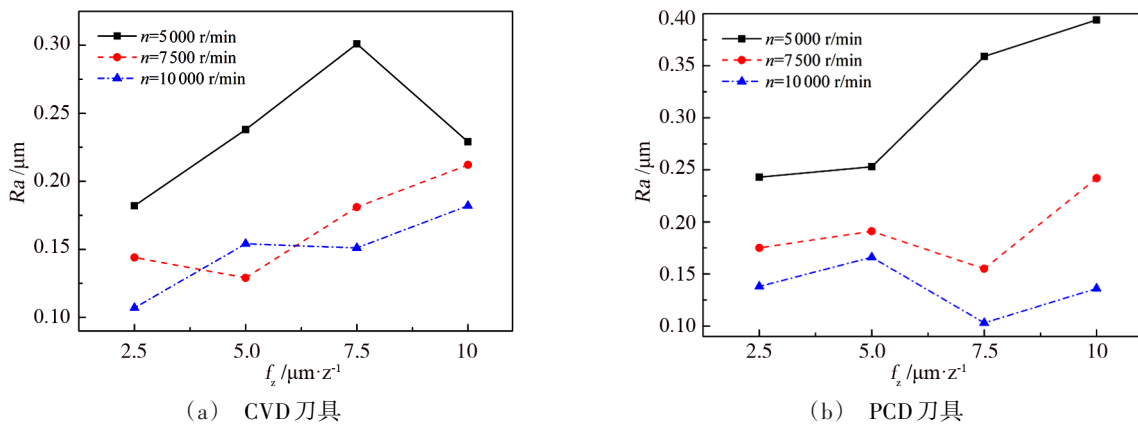


图5 不同刀具加工下表面粗糙度随每齿进给量变化

Fig. 5 Variation of surface roughness with feed rate of each tooth under different cutting

图5(b)为采用PCD金刚石加工获得的不同参数组合下的表面粗糙度测量结果,从图中可以看到,在主轴转速为5 000 r/min时,粗糙度随每齿进给量增加而增加,当每齿进给量为2.5 μm/z时,表面粗糙度Ra最小,为0.243 μm,当每齿进给量达到10 μm/z时,Ra增加到0.394 μm。在主轴转速为7 500 r/min

时,粗糙度整体呈上升趋势,但是当每齿进给量为7.5 μm/z时,粗糙度下降,且此时粗糙度最小为0.155 μm。在主轴转速为10 000 r/min时,粗糙度变化趋势与在7 500 r/min时相近,当每齿进给量为7.5 μm/z时,获得最小表面粗糙度Ra=0.103 μm。通过比较不同主轴转速下的粗糙度可以发现,与CVD铣

刀相同,PCD刀具下粗糙度总体上随着主轴转速的增加而减小,5 000 r/min下的各个每齿进给量水平粗糙度均较大,而10 000 r/min下粗糙度均较小。但与CVD刀具存在不同,当主轴转速为7 500 r/min及10 000 r/min时,每齿进给量在7.5  $\mu\text{m}/\text{z}$ 下粗糙度最小。综合上述实验结果,当主轴转速为10 000 r/min,每齿进给量为7.5  $\mu\text{m}/\text{z}$ 时获得最小的表面粗糙度,为0.103  $\mu\text{m}$ 。

#### 4 结论

针对航天器用高体积分数的 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 材料开展激光诱导氧化机理分析、氧化调控策略等技术研究,并基于氧化后的65%体积分数的 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 工件开展铣削工艺参数优化工作。研究了激光能量密度及辅助气体对氧化效果的影响,以及不同每齿进给量及主轴转速对切削质量的影响。结果如下:

(1)随激光能量密度的增加,热影响区宽度及烧蚀沟槽深度增大;

(2)与 $\text{N}_2$ 和 $\text{Ar}$ 相比,在 $\text{O}_2$ 的辅助下更易生成疏松多孔,易于去除的氧化层;

(3)使用PCD金刚石铣刀,主轴转速为10 000 r/min,每齿进给量为7.5  $\mu\text{m}/\text{s}$ 时可获得最佳的铣削表面质量,此时粗糙度为0.103  $\mu\text{m}$ 。

#### 参考文献

[1] CHAK V, CHATTOPADHYAY H, DORA TL. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1059-1074.

[2] 张荻, 张国定, 李志强. 金属基复合材料的现状与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(4): 1-7.

ZHANG Di, ZHANG Dingguo, LI Zhiqiang. The current state and trend of metal matrix composites [J]. Materials china. 2010, 29(4): 1-7.

[3] SAMAL P, et al. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 131-152.

[4] ZUO L, et al. A review of friction stir joining of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 792-804.

[5] LALMUAN S K, et al. Machining investigation on hybrid metal matrix composites-A review [J]. Materials today: Proceedings, 2017, 4(8): 8167-8175.

[6] EL-GALLAB M, SKLAD M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites: Part I: Tool performance [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1): 151-158.

[7] 王志达, 等. 铝基碳化硅激光辅助微切削仿真及实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(10): 59-63.

WANG Zhida, et al. Simulation and experimental study on laser assisted micro cutting of aluminum based silicon carbide [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(10): 59-63.

[8] KONG X, et al. Mechanisms involved in the tool life improvement of laser assisted machining 45% $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites [J]. Optics and Laser Technology, 2021: 139.

[9] ZHAO G, et al. Enhanced machinability of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites with laser-induced oxidation assisted milling [J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 18592-18600.

[10] ZHAO G, et al. Micro-milling of 65 vol%  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites with a novel laser-assisted hybrid process [J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 26121-26128.