

某钛基复合材料骨架零件高效铣削技术

梁星慧¹ 杨叶¹ 宋健¹ 苏宏华² 蹇悦¹

(1 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

(2 南京航空航天大学, 南京 210016)

文 摘 以某TiC颗粒TiB晶须混合增强钛基复合材料[(TiC_p+TiB_w)/TC4]骨架零件为研究对象,开展切削速度在60~200 m/min铣削性能研究,研究结果应用于骨架零件的加工进行验证。研究表明,切削速度是影响铣削温度的一个因素,切削速度在60~200 m/min内,铣削温度随切削速度的增加而增加;切削速度对铣削温度的影响比径向切宽的影响大;切削速度和径向切宽在试验范围内对表面质量的影响较小。通过试验优化得到的铣削参数,结合骨架零件的结构特点,确定了粗加工的铣削参数为 $V=39.25$ m/min, $f_z=0.08$ mm/z, $a_e=12$ mm, $a_p=2$ mm,精加工的铣削参数为 $V=62.8$ m/min, $f_z=0.04$ mm/z, $a_e=10$ mm, $a_p=1$ mm,加工后满足图纸要求,验证了优化方案合理可行。

关键词 钛基复合材料, 铣削温度, 表面粗糙度, 骨架零件

中图分类号: TG506.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.012

High-efficient Milling of A Kind Skeleton Part of Titanium Matrix Composites

LIANG Xinghui¹ YANG Ye¹ SONG Jian¹ SU Honghua² JIAN Yue¹

(1 Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

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

Abstract The cutting performance comparison was carried out when milling in-suit TiB_w/TiC_p reinforced titanium matrix composites at the cutting speed of 60 to 200 m/min. The results are verified on the skeleton part of the same material. The results show that the cutting speed is a factor affecting the milling temperature. When the cutting speed is in the range of 60 to 200 m/min, the milling temperature of titanium matrix composites increases with cutting speed increasing. The influence of cutting speed on milling temperature is greater than that of radial cutting width, and the influence of cutting speed and radial cutting width on surface quality is small. Based on the optimized parameters and the structural of skeleton parts, the process parameters of skeleton parts are determined, the milling parameters of rough machining are $V=39.25$ m/min, $f_z=0.08$ mm/z, $a_e=12$ mm, $a_p=2$ mm, and the milling parameters of finish machining are $V=62.8$ m/min, $f_z=0.04$ mm/z, $a_e=10$ mm, $a_p=1$ mm. Finally, the machining process optimization is verified to be reasonable and flexible.

Key words Titanium matrix composites, Milling temperature, Surface roughness, Skeleton part

0 引言

钛基复合材料(TMCs)是以钛或钛合金为基体,以碳化钛、硼化钛、碳化硅、氧化铝等颗粒、晶须或连续纤维为增强相,由压力铸造、粉末冶金、搅拌铸造等方法制备而成^[1]。钛基复合材料将钛合金基体的韧性、延展性与增强相的高强度、高模量结合起来,具有了比钛合金更高的比强度、比模量、优异的高温性能和耐腐蚀性能,满足了未来航空、航天对材料需要在更高温度和更苛刻环境下工作的需求^[2]。

但由于钛基复合材料的基体钛合金本身就属于

难加工材料,加上基体中含有高模量、高硬度、高强度的增强相,使钛基复合材料更难加工,具体表现为铣削温度高、材料表面质量差以及刀具磨损严重,限制了其在各领域的广泛应用,因此,如何控制铣削温度、提高表面质量以及延长刀具寿命是该材料急需突破的关键问题。

本文结合应用实例,以某种TiC颗粒TiB晶须混合增强钛基复合材料[(TiC_p+TiB_w)/TC4]骨架零件为研究对象,对钛基复合材料开展铣削工艺研究,通过试验优化铣削钛基复合材料的铣削参数,同时以某

收稿日期:2021-08-12

第一作者简介:梁星慧,1981年出生,副主任工艺师,主要从事机械加工工艺和技术研究工作。E-mail:522638652@qq.com

骨架零件为例,通过优选的工艺路线、工装、刀具、铣削参数等,有效的控制零件的变形和表面质量,满足图纸的精度指标,拟为其他型号钛基复合材料零件的加工提供数据支撑。

1 铣削参数研究

1.1 试验条件

1.1.1 机床

铣削试验选在DMG MORI ecoMill 1035V 三轴立式加工中心上进行,该设备相关技术参数详见表1。

表1 设备技术参数

| 转速 /r·min ⁻¹ | x方向移动范围 /mm | y方向移动范围 /mm | z方向移动范围 /mm |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 12000 | 1035 | 560 | 510 |

表2 (TiC_p+TiB_w)/TC4 物理/力学性能

| 材料 | 增强相类型 | 增强相含量/% | 弹性模量/ MPa | 屈服强度 /MPa | 抗拉强度 /MPa | 增强相平均尺寸 /μm | 硬度 HRC | 热导率 /W·(m·K) ⁻¹ | 断裂伸长 率/% |
|----------|-----------|---------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|-----------|-------------------------------|-------------|
| 10%PRTMC | 颗粒+ 晶须 | 10 | 135 | 1005.9 | 1102.8 | 颗粒直径 1.5~20 晶须长度 35~80 | 35~38 | 5.968 | 2.2 |

1.1.3 刀具材料及角度参数

刀具选用PCD与硬质合金基体焊接而成刀具进行铣削试验,主要的角度参数如表3所示。

表3 刀具材料及角度参数

| 刀具材料 | 前角/(°) | 后角/(°) | 螺旋角/(°) | 刀尖圆弧半径/mm |
|------|--------|--------|---------|-----------|
| PCD | 13 | 0 | 15 | 0.8 |

1.1.4 铣削参数

切削速度、切宽是影响铣削温度、零件表面质量和加工效率等的主要因素,由此设计了两组切削速度的单因素试验,如表4所示。

表4 切削速度的单因素试验

| 切削速度V /m·min ⁻¹ | 每齿进给量f _z /mm | 轴向切深a _p /mm | 径向切宽a _e /mm |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 60, 100, 150, 200 | 0.08 | 3 | 3, 10 |

1.2 测量方法

1.2.1 表面粗糙度的测量方法

表面粗糙度的测量采用Mahr Perthometer M1粗糙度仪,如图2所示,测量垂直进给方向的表面粗糙度Ra值,取样长度L=1.75 mm,每处粗糙度值测量5次取其平均值。

1.1.2 工件材料及参数

钛基复合材料(TiC_p+TiB_w)/TC4,其基体材料为Ti-6Al-4V(TC4),两种增强相的摩尔比为1:1,材料的晶相组织如图1所示,材料的物理/力学性能如表2所示。

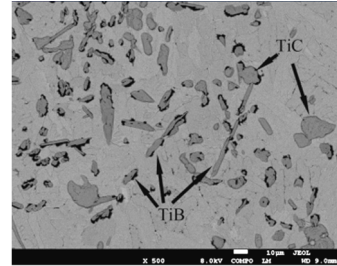


图1 (TiC_p+TiB_w)/TC4金相组织

Fig. 1 Microstructure of (TiC_p + TiB_w) / Ti-6Al-4V composites



图2 Mahr Perthometer M1粗糙度仪

Fig. 2 Mahr Perthometer M1 roughness tester

1.2.2 铣削温度的测量方法

铣削温度的测量采用半自然夹丝热电偶法,其测量原理如图3所示。将两片钛基复合材料之间用云母片隔绝,再将康铜丝从云母片之间穿过,康铜丝与钛基复合材料之间绝缘。制成一对半人工热电偶后,对其进行标定,获得热电偶输出的电势值和温度之间的关系。

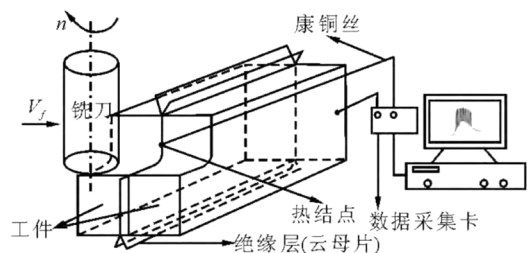


图3 半自然夹丝热电偶法示意图

Fig. 3 Diagram of semi natural thermocouple method

1.3 结果及分析

根据上述的试验条件和测量方法,最终测量得

到两组单因素试验的铣削温度和表面粗糙度值,如表5所示。

表5 铣削参数和试验结果

Tab. 5 Process parameters data and the experiment results

| 序号 | 切削速度 V /m·min ⁻¹ | 每齿进给量 f_z /mm·z ⁻¹ | 径向切宽 a_e /mm | 轴向切深 a_p /mm | 材料去除率 Q /mm ³ ·min ⁻¹ | 铣削温度 t /°C | 表面粗糙度/ μ m | |
|----|----------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|--|-----------------|----------------|-------|
| | | | | | | | R_a | R_z |
| 1 | 60 | 0.08 | 3 | 3 | 1100 | 345 | 0.236 | 1.4 |
| 2 | 100 | 0.08 | 3 | 3 | 1835 | 470 | 0.201 | 3.41 |
| 3 | 150 | 0.08 | 3 | 3 | 2753 | 546 | 0.525 | 3.48 |
| 4 | 200 | 0.08 | 3 | 3 | 3670 | 598 | 0.496 | 3.36 |
| 5 | 60 | 0.08 | 10 | 3 | 3668 | 446 | 0.562 | 3.2 |
| 6 | 100 | 0.08 | 10 | 3 | 6115 | 551 | 0.55 | 3.41 |
| 7 | 150 | 0.08 | 10 | 3 | 9173 | 612 | 0.525 | 3.48 |
| 8 | 200 | 0.08 | 10 | 3 | 12230 | 753 | 0.510 | 3.36 |

1.3.1 切削速度对铣削温度的影响分析

从图4可以看出,切削速度在60~200 m/min内,铣削温度随切削速度的增加而增加;相同切削速度下,径向切宽为10 mm的铣削温度比径向切宽为3 mm的铣削温度高80~150 °C;径向切宽为10 mm切削速度在60~100 m/min的低速范围内,铣削温度随切削速度的增长趋势小于切削速度在150~200 m/min的高速范围内。

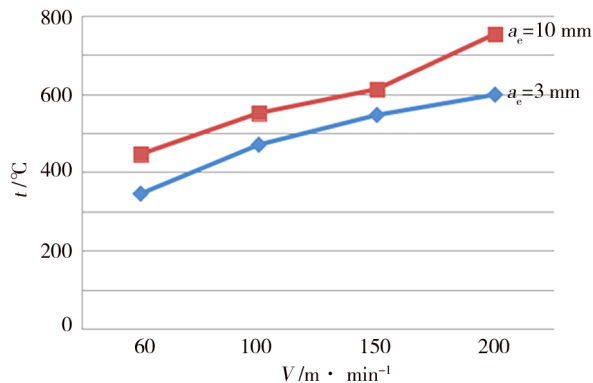


图4 不同切削速度下的铣削温度

Fig. 4 Milling temperature at different cutting speeds

分析可知,由于切削速度的升高,会引起切屑与前刀面、已加工表面与后刀面的摩擦增大,进而引起温度的升高,但同时也会减少切削层的变形,所以铣削温度不与切削速度成正比。

1.3.2 材料去除率对铣削温度的影响分析

从图5可以看出,材料去除率在1100~2753 mm³/min和6115~12230 mm³/min内,铣削钛基复合材料的温度随材料去除率的增加而增加,材料去除率在2753~6115 mm³/min的范围内,铣削温度呈现出波动。对比材料去除率3670 mm³/min和3668 mm³/min两组铣削参数可以发现,材料去除率基本相

同,但材料去除率3670 mm³/min对应的铣削温度是598 °C,材料去除率3668 mm³/min对应的铣削温度是446 °C,说明切削速度对铣削温度的影响比径向切宽对铣削温度的影响大,因此粗加工应采用低切削速度、大切宽的铣削参数。

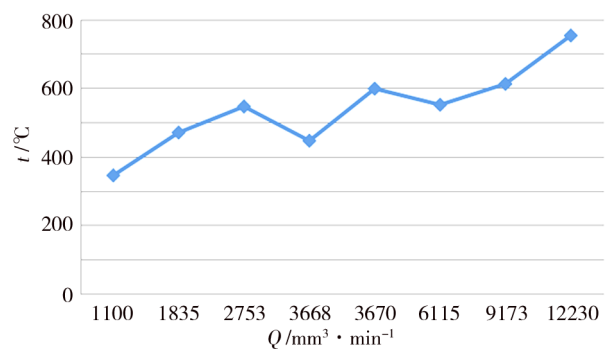


图5 不同材料去除率下的铣削温度

Fig. 5 Milling temperature at different material removal rate

1.3.3 表面质量的影响分析

从图6、7中可以看出,表面粗糙度值 R_a 均小于0.6 μ m, R_z 均小于3.5 μ m;从其变化趋势和幅度也可以看出,切削速度和径向切宽在试验范围内的变

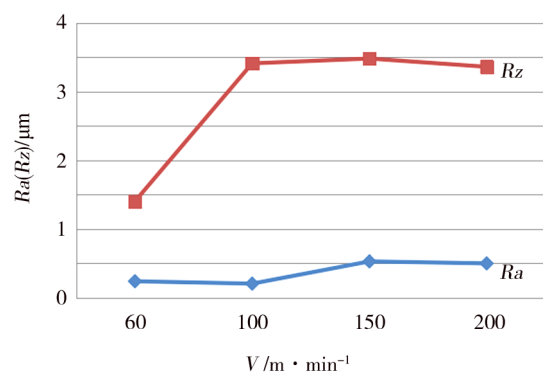


图6 不同切削速度下($a_e=3$ mm)的表面质量

Fig. 6 Surface roughness at different cutting speed at $a_e=3$ mm

化,对表面质量的影响较小。切削速度 100 m/min, 径向切宽为 3 mm, 表面粗糙度 Ra 最小, 切削速度 60 m/min, 径向切宽为 3 mm, 表面粗糙度 Rz 最小; 相同切削速度下, 径向切宽为 10 mm 的表面粗糙度值大于等于径向切宽为 3 mm 表面粗糙度值。

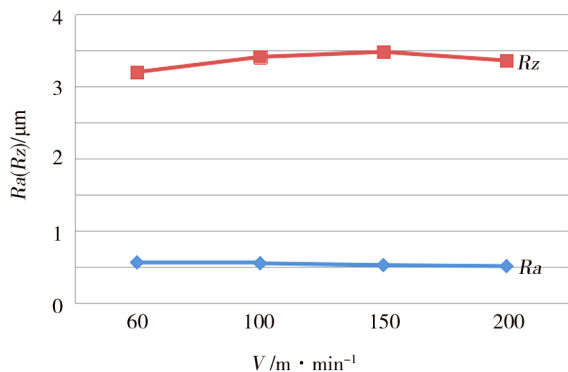


图7 不同切削速度下($a_c=10$ mm)的表面质量

Fig. 7 Surface roughness at different cutting speed at $a_c=10$ mm

综上所述,切削速度对铣削温度的影响比径向切宽对铣削温度的影响大,切削速度和径向切宽对表面质量的影响较小。结合材料去除率的影响分析,优选出粗加工的铣削参数为 $V=60$ m/min, $f_z=0.08$ mm/z, $a_c=10$ mm, $a_p=3$ mm, 精加工的铣削参数为 $V=100$ m/min, $f_z=0.084$ mm/z, $a_c=3$ mm, $a_p=3$ mm。

2 骨架零件铣削工艺研究

2.1 零件结构特点

某钛基复合材料骨架零件如图8所示,是薄壁整体对称多角度型面结构,总长近似为400 mm,高近似200 mm,整体厚度从12 mm平滑过渡到3 mm,长度与壁厚比超过25:1,与其他零件配合处的宽度为 $50^{-0.05}$ mm,零件的中部有4个减重口框,产品呈骨架状,刚性整体较弱,设计要求对称度、平行度均为0.1 mm 零件的材料和结构特性导致加工效率难以提升,刀具磨损严重,进而影响了产品的交付和企业的利润。

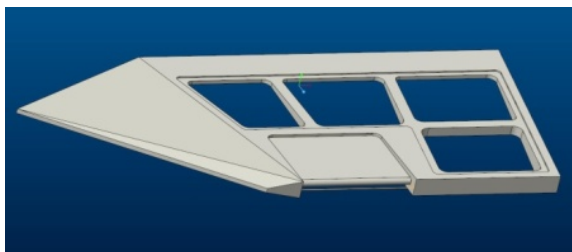


图8 某种钛基复合材料骨架零件三维图

Fig. 8 3D model of the skeleton part of a kind of titanium matrix composite

2.2 加工基准选择及工装设计

该零件毛坯外形不规则,仅有不到10%的下陷区域是平行的,其余对称型面均不平行,装夹位置和加工

基准难以在零件本身的结构上选取,为了满足零件装夹、定位需求,也能兼顾零件薄壁区域的支撑,在型面最薄处周围设计了辅助工艺块,并采用一面两销的定位原理,利用一处直角作为定位基准,如图9所示。

为了提高加工效率,并根据前面试验的分析,设计将主型面的铣削转化为平面铣,采用大切宽的方式开粗,减少主型面分层爬坡的低效加工,按照这一思路设计了与主型面角度相配的斜面工装,如图10所示,其余加工内容采用平面工装加工。



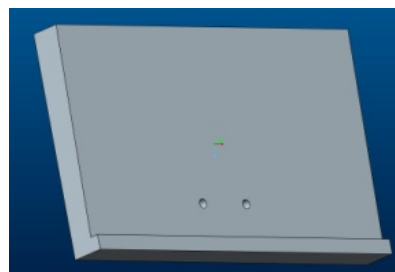
(a) 零件工艺块设计三维图



(b) 零件装夹及基准设置实物图

图9 工艺块及加工基准示意图

Fig. 9 Diagram of process blocks and benchmark



(a) 斜面工装三维图



(b) 斜面工装实物图

图10 斜面工装图

Fig. 10 Drawing of inclined tooling

2.3 工艺流程

为了控制零件变形,安排了粗加工、精加工,并

设计工艺流程为正反交替加工以平衡掉铣削过程中产生的应力,具体流程如图 11 所示。

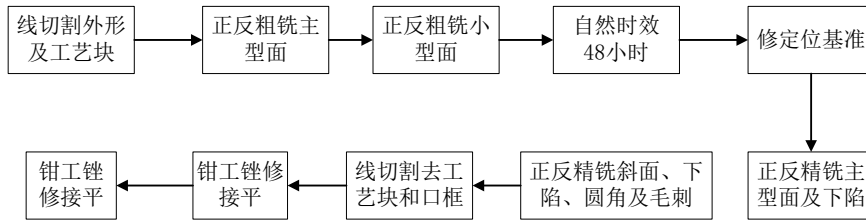


图 11 零件工艺流程图

Fig. 11 Process flow chat of the part

2.4 加工条件

零件加工选在 DMG MORI ecoMill 1035V 三轴立式加工中心上进行,设备相关技术参数详见表 1。工件材料与试验所使用材料选相同,材料的晶相组织如图 1 所示,材料的物理/力学性能如表 2 所示。

根据零件的加工内容,一共需要用到 5 种刀具,考虑到零件刚性较弱,降低了试验所得的切削速度,具体刀具及选用的铣削参数如表 6 所示。加工过程中全部选择顺铣的铣削方式,采用乳化液进行冷却。

表 6 刀具参数及铣削参数

Tab. 6 Parameters of milling tool and milling process

| 加工内容 | 选用的刀具 | $S/r \cdot \text{min}^{-1}$ | $V/m \cdot \text{min}^{-1}$ | $f_z/\text{mm} \cdot \text{z}^{-1}$ | a_e/mm | a_p/mm |
|-------|--|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 粗加工平面 | 平底铣刀;试验所用PCD铣刀 | 500 | 39.25 | 0.08 | 12 | 2 |
| 精加工平面 | 平底铣刀;PCD铣刀,角度:前角 0° ,后角 10° ,刀尖圆弧0.8 | 800 | 62.8 | 0.04 | 10 | 1 |
| 修定位基准 | 波刃立铣刀,阿诺BRGM-4W-D10.0 | 800 | 25.12 | 0.03 | 6 | 1 |
| 斜面爬坡 | 球头铣刀;SUNROXM SB623X 8.0 4.0R | 1000 | 25.12 | 0.24 | 0.3 | ≤ 1 |
| 平面下陷 | 平底铣刀;MSMHD 4;MSMHD 8;VSM-4E-D10.0 | 800 | 20.096 | 0.04 | 3 | 1 |

2.5 加工结果

采用上述的工艺方法和试验条件,对骨架零件进行了程序编制及加工,加工过程如图 12 所示。



(a) 骨架零件现场加工图



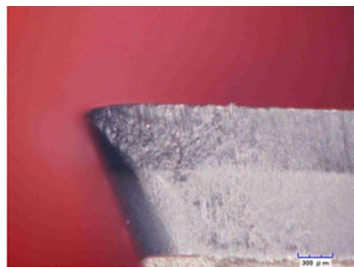
(b) 骨架零件装夹状态下现场图

图 12 骨架零件加工现场图

Fig. 12 Processing diagram of the skeleton part



(a) 前刀面磨损图



(b) 后刀面磨损图

图 13 刀具磨损照片

Fig. 13 Photos of tool wear

采用表面粗糙度对已加工表面进行取样测量, $Ra=0.31 \sim 0.35 \mu\text{m}$, $Rz=0.75 \sim 1.41 \mu\text{m}$;采用三坐标对零件的形位公差进行测量,平面度 0.02 mm ,对

称度 0.08 mm, 各项测量结果均满足图纸要求, 刀具的前后刀面磨损正常, 如图 13 所示, 工作效率提高了 200%, 骨架零件的加工成品如图 14 所示。

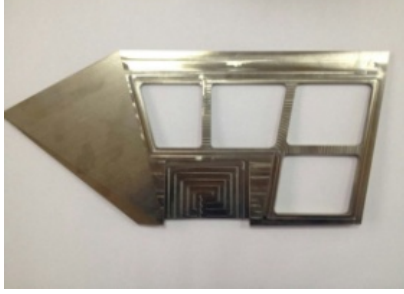


图 14 骨架零件加工成品图

Fig. 14 Photo of the skeleton part processed

3 结论

(1) 切削速度是影响铣削温度的一个因素, 切削速度在 60 ~ 200 m/min 内, 刀具铣削钛基复合材料的温度随切削速度的增加而增加, 基本呈线性增加; 相同切削速度下, 径向切宽为 10 mm 的铣削温度比径向切宽为 3 mm 的铣削温度高 80 ~ 150 °C。

(2) 材料去除率在 1 100 ~ 2 753 mm³/min 和 6 115 ~ 12 230 mm³/min 的范围内, 铣削温度随材料去除率的增加而增加, 材料去除率在 2 753 ~ 6 115 mm³/min 的范围内, 铣削温度出现波动。

(3) 切削速度和径向切宽在试验范围内, 对表面质量的影响较小。

(4) 结合材料去除率的影响分析, 切削速度对铣削温度的影响比径向切宽对铣削温度的影响大, 试验优选出粗加工的铣削参数为 $V=60$ m/min, $f_z=0.08$ mm/z, $a_c=10$ mm, $a_p=3$ mm, 精加工的铣削参数为 $V=100$ m/min, $f_z=0.084$ mm/z, $a_c=3$ mm, $a_p=3$ mm。

(5) 结合骨架零件结构的分析, 设计了刀具、工装、定位方式和工艺流程, 优化得出该零件粗加工的铣削参数为 $V=39.25$ m/min, $f_z=0.08$ mm/z, $a_c=12$ mm, $a_p=2$ mm, 精加工的铣削参数为 $V=62.8$ m/min, $f_z=0.04$ mm/z, $a_c=10$ mm, $a_p=1$ mm, 加工后零件满足图纸公差及表面粗糙度要求, 刀具正常磨损, 工作效率提高了 200%。

参考文献

[1] 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 3-6.

ZHANG Guoding, ZHAO Changzheng. Metal matrix composites[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1996: 3-6

[2] 胡宏楠, 董明. 颗粒增强金属基复合材料切削加工工艺的新进展[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(1): 3-7.

HU Hongnan, DONG Ming. New development on cutting technology of particles enforcement metal matrix composites[J]. Metal Materials And Metallurgy Engineering, 2009, 37(1): 3-7

[3] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006

GENG Guosheng. Fundamental research on high speed milling of titanium alloys [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006

[4] 边卫亮. 钛基复合材料切削加工性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012

BIAN Weiliang. Experimental study on turning of titanium matrix composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012

[5] 宦海祥. 颗粒增强钛基复合材料切削加工性研究[D]. 南京航空航天大学, 2017

HUAN Haixiang. Research on machinability of particle reinforced titanium matrix composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017

[6] 章宇, 苏宏华, 傅玉灿, 等. 刀具材料及其磨损对钛基复合材料车削温度的影响[J]. 航空制造技术, 2014, 10: 94-97

ZHANG Yu, SU Honghua, FU Yucan, et al. Influences of material tool and tool wear on cutting temperature of turning titanium matrix composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 10: 94-97

[7] LU J Q, LU W J, LIU Y, et al. Microstructure and tensile properties of in situ synthesized (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V composites [J]. Key Engineering Materials, 2007, 351 (351): 201-207.

[8] OTA M, OKIDA J, HARADA T et al. High speed cutting of titanium alloy with PCD tools [J]. Key Engineering Materials, 2009, 389-390: 157-162.