

# 铣削激光增材制造 TC4 钛合金铣削力的研究\*

王伟<sup>①</sup> 金成哲<sup>①</sup> 王俊杰<sup>①</sup> 刘玮<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159; <sup>②</sup>沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 为满足工件的表面质量的要求,对激光增材制造的 TC4 钛合金进行铣削加工,从而可以实现更高精度的加工要求。为研究铣削用量对铣削激光增材制造钛合金的铣削力的影响,建立了铣削激光增材制造 (selective laser melting, SLM) TC4 钛合金的仿真模型;另外,采用与仿真模型相同的铣削用量进行了铣削试验,对仿真和试验结果进行了极差分析。分析结果表明,轴向切深  $a_p$  对铣削力影响程度最大、其次为铣削速度  $v_c$  和每齿进给量  $f_z$ 。最优铣削参数为铣削速度  $v_c=55$  m/min,每齿进给量  $f_z=0.04$  mm/z,轴向切深  $a_p=0.3$  mm。铣削仿真和试验的误差对比分析结果表明,所建立的铣削仿真模型是合理可行的,因此,基于此铣削仿真模型,采用单因素试验法进行了仿真和铣削试验,研究结果表明,随着铣削速度、轴向切深和每齿进给量的增大,铣削力增大,但当铣削速度超过 75 m/min 时铣削力反而减小。

**关键词:** 铣削; 激光增材制造 TC4 钛合金; 铣削力; 铣削用量

中图分类号: TG506 文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.08.006

## Research on milling force in selective laser melting of titanium alloy milling

WANG Wei<sup>①</sup>, JIN Chengzhe<sup>①</sup>, WANG Junjie<sup>①</sup>, LIU Wei<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Science and Technology, Shenyang 110159, CHN;

<sup>②</sup>School of Equipment Engineering, Shenyang University of Science and Technology, Shenyang 110159, CHN)

**Abstract:** In order to meet the requirements of surface quality of workpieces, it is necessary to perform milling on TC4 titanium alloy manufactured by selective laser melting, in order to achieve higher precision machining requirements. A simulation model for milling SLM (selective laser melting) TC4 titanium alloy was established to study the effect of cutting parameters on the milling force of milling selective laser melting of titanium alloy. In addition, milling experiments were conducted using the same cutting parameters as the simulation model, and a range analysis was conducted on the simulation and experimental results. The research results indicate that the axial cutting depth  $a_p$  has the greatest impact on milling force, followed by cutting speed  $v_c$ , and the feed rate per tooth  $f_z$ . The optimal milling parameters are: milling speed  $v_c=55$  m/min, feed rate per tooth  $f_z=0.04$  mm/z, and axial cutting depth  $a_p=0.3$  mm. The comparative analysis of errors between milling simulation and experiments shows that the established milling simulation model is reasonable and feasible, so based on this milling simulation model, single factor experimental method was used for simulation and milling experiments. The research results showed that as the cutting speed, axial cutting depth, and feed rate per tooth increased, the milling force increased. However, when the milling speed exceeded 75 m/min, the milling force actually decreased.

**Keywords:** milling; selective laser melting of titanium alloys; milling force; milling parameters

钛合金具有低密度、高强度和良好的耐腐蚀性和生物相容性等特点,被广泛应用于航空航天领域<sup>[1]</sup>。增材制造 TC4 钛合金的一些因素会导致工件表面不

够光滑,使其力学性能受到限制等缺点<sup>[2]</sup>。为了满足工件的表面质量等要求,对增材制造的 TC4 钛合金进行铣削加工是必要的,从而实现更高精度的加

\* 沈阳理工大学国防科技创新团队培育建设计划项目 (SYLUGFTD202102)

工要求<sup>[3]</sup>。对增材制造钛合金进行铣削加工时，由于硬度高，导致铣削力增大，影响加工质量。因此，研究切削参数对铣削增材制造钛合金铣削力的影响具有重要意义。

国内外对钛合金的切削特性和铣削增材制造材料进行了研究。唐成铭等<sup>[4]</sup>分别用增材工艺和“增材-减材”交替复合工艺制备 316L 奥氏体不锈钢粉末，分析了成形区的致密度及残余应力。与增材制造相比，铣削可以提高致密度，并且降低工件的残余应力程度。Wentian S 等<sup>[5]</sup>对激光增材制造 TC4 钛合金孔的铣削进行了建模分析，探讨了铣削速度、孔径和材料去除率对铣削孔轴向力的影响，试验与铣削模型仿真结果误差在允许的范围内，证明了模型的准确性。战勇等<sup>[6]</sup>通过建立车削 TC4 钛合金的仿真模型，研究了不同切削参数对切削力的影响规律。与切削用量相比，刀具角度对切削力的影响更明显，而且刀具角度和切削速度与切削力呈现负相关关系。陈莉等<sup>[7]</sup>通过设计高速铣削测试方案，比较了 TC4 合金在铸造与激光熔覆条件下的切削性能差异，发现铣削激光熔覆钛合金时存在各向异性。Liu J Y 等<sup>[8]</sup>以及标准铣刀对 TB6 钛合金的铣削力影响规律，采用干式铣削的方式铣削钛合金。与标准铣刀相比，螺距和螺旋线的变化均导致径向力和切向力的增加，此外，螺距的变化导致径向力大于切向力，螺旋线的变化相反。张文瑞等<sup>[9]</sup>进行了铣削钛合金薄壁件的仿真和正交试验，研究了装夹方式对加工变形的影响。为减小装夹方式对铣削 TC4 钛合金加工变形的影响，采用垂直叶背装夹方式效果最好。胡波等<sup>[10]</sup>通过仿真软件对 TC4 钛合金进行切削仿真，对刀具角度如何影响切削力展开了研究，通过回归分析，得到刀具前角的增大会导致铣削力减小的结论。李安海等<sup>[11]</sup>对 TC4 钛合金型面件侧壁的铣削过程进行了仿真，为钛合金结构件侧面铣削加工工艺参数的制定和优化选择提供了理论指导依据。季文彬等<sup>[12]</sup>研究了铣削对 SLM 的 TC4 钛合金表面完整性和疲劳性能的影响规律，SLM 的 TC4 钛合金经过铣削后，表面粗糙度 Ra 得到显著改善，疲劳寿命也得到提高。Polishetty A 等<sup>[13]</sup>对通过 SLM 和锻造制备的 TC4 钛合金进行了铣削试验，并比较了两者在铣削力和表面粗糙度方面的差异。通过 SLM 制备的 TC4 钛合金相比锻件，在铣削过程中表现出更大的铣削力，但表面粗糙度更低。

综上所述，对切削通过其他工艺制造的钛合金的铣削力研究较多，而对激光增材制造 TC4 钛合金

的铣削特性研究很少。因此，本文对铣削用量如何影响铣削激光增材制造钛合金的铣削力展开研究，为铣削增材制造钛合金铣削参数选择、提高加工质量提供了理论依据。

## 1 铣削仿真模型

### 1.1 铣削仿真模型的建立

本仿真试验采用 Johnson-Cook 本构模型来描述增材制造 TC4 钛合金材料，模型表达式<sup>[14]</sup>见式(1)，模型材料参数见表 1。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left( 1 + \frac{C \ln \dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中： $\sigma$ 为流动应力； $\varepsilon$ 为应变； $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率； $T$ 为试验温度； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率； $\varepsilon_p$ 为等效塑性应变； $T_0$ 为参考温度（取为室温）； $T_m$ 为试验材料的熔点； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$ 分别为试验材料屈服应力、应变硬化系数、应变率敏感系数、温度敏感系数、应变硬化指数。

表 1 激光增材制造钛合金 J-C 模型参数

A/MPa	B/MPa	C	m	n
1 015	254.6	0.011	1.15	0.465

相较于其他仿真软件，Deform 软件具有高度专业化的特点，能够准确地模拟各种金属材料成形过程，因此，本文采用 Deform 软件进行铣削仿真过程。工件材料为激光增材制造 TC4 钛合金，工件尺寸为 13 mm×11 mm×4 mm，其物理性能见表 2。刀具为 PVD TiAlN 涂层硬质合金立铣刀，其参数见表 3。对所建立的 TC4 钛合金工件和铣刀模型进行网格划分，网格数分别为 60 000 和 40 000，网格划分结果如图 1 所示，铣削仿真过程如图 2 所示。

表 2 TC4 钛合金的物理力学性能(室温)

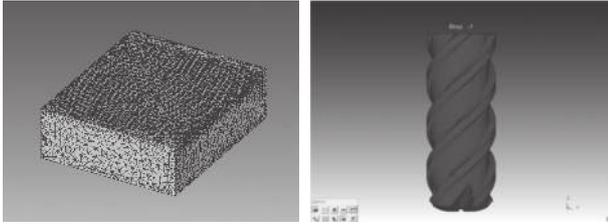
密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	熔点/ ℃	热导率λ/ (W/(m· ℃))	比热容/ (J/(kg· ℃))	弹性 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	泊松 比	屈服强 度σ <sub>0.2</sub> / MPa	抗拉强 度σ <sub>b</sub> / MPa
4.43	1 630	6.70	526	114	44.0	0.33	830	900

表 3 刀具参数

刃数/个	刀具直 径/mm	径向前 角/(°)	轴向前 角/(°)	螺旋角 /(°)	刀体长 度/mm	刀具总 长/mm
4	10	-18	6	50	26	72

### 1.2 设计正交试验方案

本文采用三因素四水平的正交试验方案，见表 4。



(a) 工件网格的划分 (b) 刀具网格的划分

图1 网格划分结果

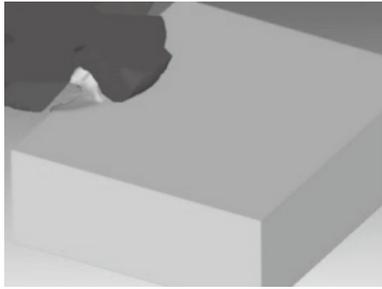


图2 铣削仿真过程

表4 正交试验表

序号	铣削速度 $v_f$ / (m/min)	轴向切深 $a_p$ / mm	每齿进给量 $f_z$ / (mm/z)
1	55	0.3	0.04
2	55	0.5	0.06
3	55	0.7	0.08
4	55	0.9	0.10
5	65	0.3	0.06
6	65	0.5	0.04
7	65	0.7	0.10
8	65	0.9	0.08
9	75	0.3	0.08
10	75	0.5	0.10
11	75	0.7	0.04
12	75	0.9	0.06
13	85	0.3	0.10
14	85	0.5	0.08
15	85	0.7	0.06
16	85	0.9	0.04

### 1.3 铣削仿真结果

本次仿真过程中采用立铣刀进行顺铣加工，所得  $X$ （切向力）、 $Y$ （径向力）、 $Z$ （轴向力）三个方向上的分力，并对其合力进行整理计算，结果见表5。

### 1.4 铣削力仿真结果极差分析

对仿真得到的铣削力试验结果进行极差分析，

结果见表6。根据极差分析表可得，轴向切深  $a_p$  是影响铣削力最大的因素，其次是铣削速度  $v_c$ ，最后是每齿进给量  $f_z$ ；铣削激光增材制造钛合金的最优参数应选择铣削速度  $v_c=55$  m/min，每齿进给量  $f_z=0.04$  mm/z，轴向切深  $a_p=0.3$  mm。

表5 铣削力仿真结果

序号	铣削速度 $v_f$ / (m/min)	每齿进给量 $F_f$ / (mm/z)	轴向切深 $a_p$ / mm	铣削力 $F/N$
1	55	0.04	0.3	30.851
2	55	0.06	0.5	74.487
3	55	0.08	0.7	110.716
4	55	0.10	0.9	148.424
5	65	0.06	0.3	40.438
6	65	0.04	0.5	77.302
7	65	0.10	0.7	170.931
8	65	0.08	0.9	229.481
9	75	0.08	0.3	93.303
10	75	0.10	0.5	167.557
11	75	0.04	0.7	184.565
12	75	0.06	0.9	217.23
13	85	0.10	0.3	110.082
14	85	0.08	0.5	172.293
15	85	0.06	0.7	201.198
16	85	0.04	0.9	245.474

表6 仿真结果极差分析

试验指标	A: 铣削速度 $v_f$ / (m/min)	B: 轴向切深 $a_p$ / mm	C: 每齿进给量 $f_z$ / (mm/z)
$K_1$	364.478	274.674	507.341
$K_2$	518.152	491.639	533.353
$K_3$	662.655	667.41	605.793
$K_4$	729.047	840.609	596.994
$k_1$	91.119	68.668	126.835
$k_2$	129.538	122.909	133.338
$k_3$	165.663	166.852	151.448
$k_4$	182.261	210.152	149.248
极差 $R$	91.142	141.484	24.613
主次因素	$a_p > v_c > f_z$		
最优组合	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>		

## 2 铣削增材制造钛合金铣削力试验

### 2.1 试验装置

本次试验所用工件为激光增材制造的 TC4 钛合金，尺寸为 100 mm×50 mm×8 mm，形状如图 3 所示。刀具为硬质合金四刃铣刀，型号为 R215.H4-10050DAC07P 1620，涂层为 PVD TiAlN，如图 4 所示。



图 3 SLM 钛合金工件



图 4 试验所用硬质合金刀具

本次试验选择 9123C 1011 旋转测力仪作为铣削力采集设备。铣削试验现场如图 5 所示。

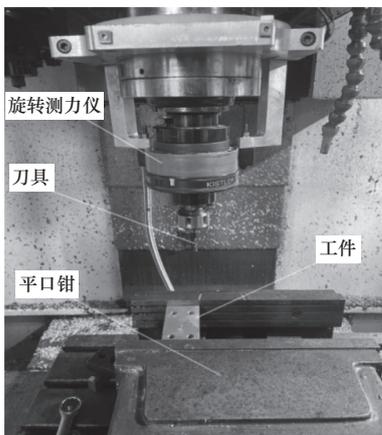


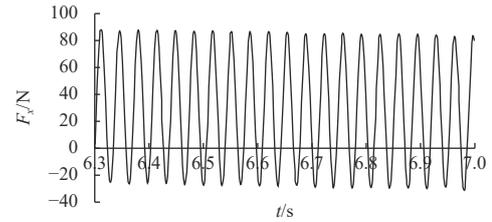
图 5 铣削试验现场

### 2.2 试验结果与分析

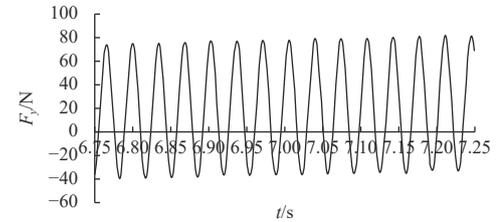
将测试点上的铣削力信号输入至 DynoWare 软件中，获得铣削力周期信号，如图 6 所示。

将铣削力进行后处理，求出其合力得出各组试验的铣削力见表 7。根据上述正交试验得到的铣削力进行极差分析，结果见表 8。

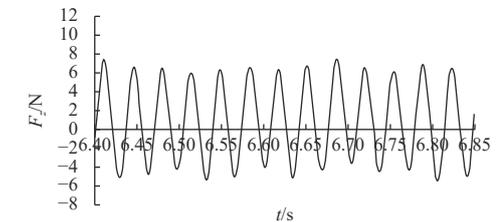
由极差分析表可得，轴向切深  $a_p$  是影响铣削力最大的因素，其次是铣削速度  $v_c$ ，最后是每齿进给量  $f_z$ ；铣削激光增材制造钛合金的最优参数应选择铣削速度  $v_c=55$  m/min，每齿进给量  $f_z=0.04$  mm/z，轴向切深  $a_p=0.3$  mm。



(a) X方向铣削力信号图



(b) Y方向铣削力信号图



(c) Z方向铣削力信号图

( $v_c=55$  m/min,  $f_z=0.06$  mm/z,  $a_p=0.5$  mm)

图 6 铣削 SLM 钛合金铣削力周期信号图

表 7 铣削 SLM 钛合金试验结果

序号	铣削速度 $v_c$ / (m/min)	每齿进给量 $f_z$ / (mm/z)	轴向切深 $a_p$ / mm	铣削力 $F$ / N
1	55	0.04	0.3	38.768
2	55	0.06	0.5	69.452
3	55	0.08	0.7	120.171
4	55	0.10	0.9	182.249
5	65	0.06	0.3	52.889
6	65	0.04	0.5	90.331
7	65	0.10	0.7	185.521
8	65	0.08	0.9	250.113
9	75	0.08	0.3	106.345
10	75	0.10	0.5	144.521
11	75	0.04	0.7	160.775
12	75	0.06	0.9	235.223
13	85	0.10	0.3	111.332
14	85	0.08	0.5	194.583
15	85	0.06	0.7	212.074
16	85	0.04	0.9	249.645

表 8 试验结果极差分析

试验指标	A: 铣削速度 $v_c$ / (m/min)	B: 轴向切深 $a_p$ / mm	C: 每齿进给量 $f_z$ / (mm/z)
$K_1$	410.640	309.334	539.519
$K_2$	578.854	498.887	569.638
$K_3$	646.864	678.541	551.041
$K_4$	767.634	917.230	623.623
$k_1$	102.660	77.333	134.879
$k_2$	144.713	124.721	142.409
$k_3$	161.716	169.635	137.760
$k_4$	191.908	229.307	155.905
极差 $R$	89.248	151.974	21.026
主次因素	$a_p > v_c > f_z$		
最优组合	$A_1 B_1 C_1$		

一方面, 仿真模型是基于一些假定条件下建立的理想化模型; 另一方面, 在实际铣削试验过程中, 试验结果会受到机床振动、测试仪器精度以及主轴转速误差等因素的影响, 因此, 仿真与试验的铣削力结果会存在一定的误差。图 7 所示为铣削激光增材制造 TC4 钛合金的仿真和试验所得到的铣削力结果对比, 通过计算得到两者的平均误差为 9.14%, 所建立的激光增材制造钛合金的铣削仿真模型是合理可行的。

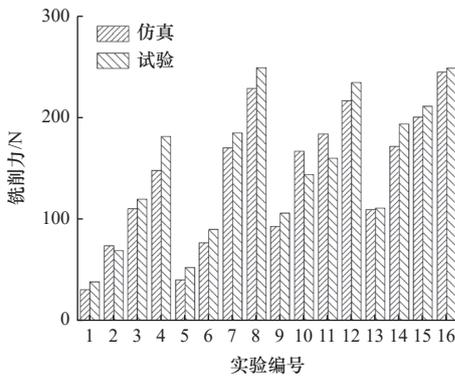


图 7 仿真与试验铣削力结果对比

### 3 铣削用量对铣削力的影响

通过极差分析表所得最优组合为铣削速度  $v_c=55$  m/min, 每齿进给量  $f_z=0.04$  mm/z, 轴向切深  $a_p=0.3$  mm, 在最优参数组合的基础上, 进行铣削激光增材制造 TC4 钛合金的铣削力单因素的仿真和切削试验, 分析铣削用量对铣削力的影响规律。

#### 3.1 铣削速度对铣削力的影响规律

将每齿进给量设置为 0.04 mm/z, 轴向切深为 0.3 mm, 选取铣削速度分别为 45、55、65、75、85 m/min, 研究铣削速度对铣削力的影响规律, 并进行仿真与试验对比分析, 得到的结果如图 8 所示。

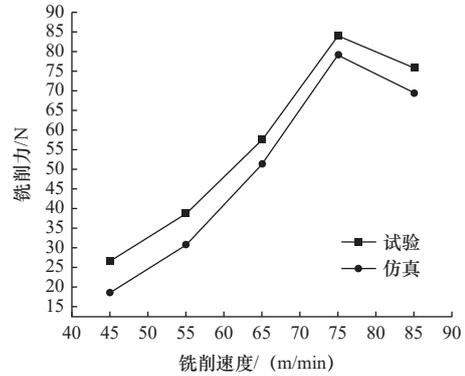


图 8 铣削速度对铣削力单因素试验结果与仿真结果对比

由图 8 可得, 铣削速度增大, 铣削力随之增大, 当铣削速度达到 75 m/min 且继续增大时, 铣削力则随之降低。在对铣削速度进行单因素试验后所得的铣削力变化趋势与仿真所得趋势一致, 可证明仿真所得结果的准确性。

#### 3.2 轴向切深对铣削力的影响规律

将铣削速度设置为 55 m/min, 每齿进给量为 0.04 mm/z, 选取轴向切深分别为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mm, 研究轴向切深对铣削力的影响规律, 并进行仿真与试验对比分析, 得到的结果如图 9 所示。

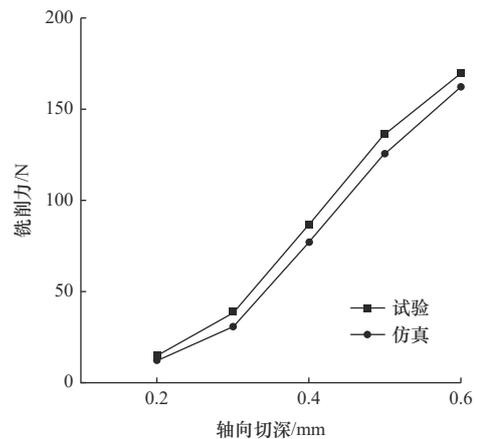


图 9 轴向切深对铣削力单因素试验结果与仿真结果对比

由图 9 可得, 仿真值与试验值变化趋势相似的变化规律。结果表明, 随着轴向切深的增大, 铣削力也随之增加。

### 3.3 每齿进给量对铣削力的影响规律

将铣削速度设置为 55 m/min，轴向切深为 0.3 mm，选取每齿进给量分别为 0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 mm/z，研究每齿进给量对铣削力的影响规律，并进行仿真与试验对比分析，得到的结果如图 10 所示。

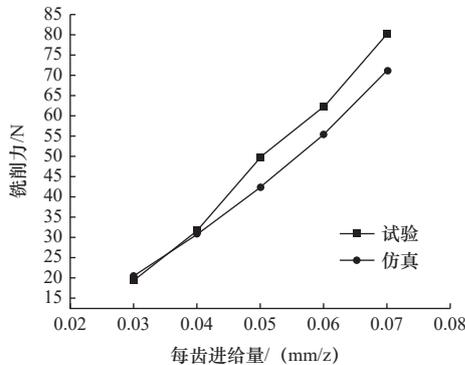


图 10 每齿进给量对铣削力单因素试验结果与仿真结果对比

由图 10 可得：铣削力随每齿进给量的增大而增大，此趋势与仿真的趋势一致，总体呈增长趋势，在每齿进给量从 0.06 mm/z 增长到 0.09 mm/z 阶段，试验所得的铣削力大于仿真所得铣削力，但是在每齿进给量为 0.05 mm/z 时，试验所得铣削力略小于仿真所得铣削力，此结果在误差范围内，因此并不影响对每齿进给量与铣削力间关系的判断与分析。

## 4 结语

(1) 通过铣削仿真和正交试验结果的极差分析，得到轴向切深  $a_p$  对铣削力影响程度最大，其次为铣削速度  $v_c$  及每齿进给量  $f_z$ 。最优铣削参数组合为：铣削速度  $v_c=55$  m/min，每齿进给量  $f_z=0.04$  mm/z，轴向切深  $a_p=0.3$  mm。

(2) 通过铣削仿真和试验的误差对比计算得到两者的平均误差为 9.14%，所建立的铣削仿真模型是合理可行的，为进一步研究铣削增材制造 TC4 钛合金的特性提供理论基础。

(3) 通过最优铣削参数进行铣削仿真和单因素试验，得到随铣削速度、轴向切深和每齿进给量的增大，铣削力增大，但当铣削速度超过 75 m/min 时铣削力会减小，因此，可以通过提高铣削速度来降低铣削力，从而提升加工质量。

## 参 考 文 献

- [1] Krzysztof A. Structure and properties of titanium and the Ti-6Al-7Nb alloy after isothermal oxidation [J]. *Surface Engineering*, 2020, 36(8): 847-858.
- [2] 刘波, 吴代建, 高巍, 等. 激光选区熔化复合制造 TC4 钛合金组织性能研究 [J]. *大型铸锻件*, 2023(2): 1-5.
- [3] Igor P, Anna G, Anatoly P. Interface characterization of bimetallic Ti-6Al-4V/Ti2AlNb structures prepared by selective laser melting [J]. *Materials*, 2022, 15(23): 8528-8537.
- [4] 唐成铭, 赵吉宾, 赵宇辉, 等. 激光选区熔化/干式铣削复合加工实验研究 [J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1160-1166.
- [5] Shi W T, Yan T M, Liu Y D, et al. Simulation analysis and experimental study on SLM forming titanium alloy milling hole [J]. *Metals*, 2022, 12(11): 1919-1936.
- [6] 战勇, 金成哲, 张莹莹. 切削参数对车削钛合金铣削力影响的研究 [J]. *工具技术*, 2021, 55(10): 23-27.
- [7] 陈莉, 张美娟. 硬质合金刀具铣削参数对激光熔覆 TC4 合金铣削力的影响研究 [J]. *山西冶金*, 2023, 46(7): 37-39.
- [8] Liu J Y, Qiao L H, Chen W Y. Cutting force analysis in machining of titanium alloy with solid carbide cutters of different geometry [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 179: 02002.
- [9] 张文瑞, 金成哲, 战勇. 装夹方式对铣削薄壁件加工变形的影响分析 [J]. *沈阳理工大学学报*, 2022, 41(6): 80-85, 91.
- [10] 胡波, 赵先锋, 史红艳, 等. TC4 钛合金切削过程铣削力的预测 [J]. *机床与液压*, 2021, 49(22): 155-159.
- [11] 李安海, 朱晓丽, 张茹, 等. 钛合金型面侧壁铣削力建模与仿真 [J]. *制造技术与机床*, 2023(2): 52-56.
- [12] 季文彬, 邓日清, 戴士杰, 等. 铣削对 SLM 增材 TC4 钛合金表面完整性和疲劳性能的影响 [J]. *中国机械工程*, 2023, 34(2): 208-217, 225.
- [13] Polishetty A, Shunmugavel M, Goldberg M, et al. Milling force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 7: 284-289.
- [14] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.

第一作者: 王伟, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 研究方向为高速切削及数控装备技术。E-mail: 1592137209@qq.com

通信作者: 金成哲, 男, 1971 年生, 教授, 研究方向为先进切削加工技术。E-mail: jinchengzhe71@163.com

(编辑 李静)

(收修改稿日期: 2024-01-18)

文章编号: 20240807

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。