

# TC4 钛合金平面磨削基础试验研究

方丁<sup>1</sup>,赵威<sup>2</sup>,龚会民<sup>1</sup>,舒磊<sup>2</sup>,李亮<sup>2</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限公司,四川 成都 610073; 2. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对钛合金磨削加工过程稳定性差、表面质量难以保证等问题,以 TC4 钛合金为研究对象,分别采用陶瓷结合剂锆刚玉砂轮和树脂结合剂金刚石砂轮在乳化液冷却润滑条件下进行平面磨削基础试验,对比分析砂轮材料和磨削用量对 TC4 钛合金平面磨削力、表面粗糙度及表面残余应力的影响。结果表明:采用锆刚玉砂轮和金刚石砂轮在合适的磨削参数下磨削 TC4 钛合金,均可以获得良好的磨削表面质量,锆刚玉砂轮在中低速磨削加工中具有更高的性价比,金刚石砂轮更适用于中高速磨削加工。

**关键词:**TC4 钛合金;平面磨削;磨削力;表面粗糙度;表面残余应力

**中图分类号:**TG580.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)02-0026-04

## Experimental Investigation on Surface Grinding of TC4 Titanium Alloy

FANG Ding<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>, GONG Huimin<sup>1</sup>, SHU Lei<sup>2</sup>, LI Liang<sup>2</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To improve the poor stability of grinding process and overcome the difficulty in ensuring the surface quality for the grinding of titanium alloy, with TC4 titanium alloy as the research object, the fundamental experiments on the surface grinding of TC4 titanium alloy were carried out by using ceramic bond zirconium corundum grinding wheel and resin bond diamond grinding wheel under the condition of emulsion cooling and lubrication. The effects of grinding wheel material and grinding quantity on the grinding force, surface roughness and surface residual stress of surface grinding TC4 titanium alloy were compared and analyzed. The results show that good surface quality can be obtained by utilizing both zirconium corundum grinding wheel and diamond grinding wheel to conduct TC4 titanium alloy grinding with suitable grinding parameter, and the zirconium corundum grinding wheel has higher cost performance in medium and low speed grinding of TC4 titanium alloy, while the diamond grinding wheel is more suitable for medium and high speed grinding of TC4 titanium alloy.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; surface grinding; grinding force; surface roughness; surface residual stress

## 0 引言

钛合金因其优良的物理、力学等综合性能,被广泛用作航空航天高端产品的关键零部件。然而,钛合金同时也因为其导热系数低、弹性模量小以及回弹量大等特性,被称为典型的难加工金属材料<sup>[1-4]</sup>。多年来,钛合金的磨削加工一直是机械加工领域的研究难点和热点,这主要是因为钛合金的磨削加工过程中,常常会出现磨削表面黏附、磨削表面烧伤、砂轮堵塞、磨削过程不稳定等问题。因此导致其磨削加工表面质量难以保证,加工精度一致性差等诸多难题<sup>[5-6]</sup>。针对上述问题,国内外诸多学者开展了大量的研究工作。胥军等<sup>[1]</sup>采用 CBN 砂轮对钛合金进行了高速磨削加工试验,结果表明采用合理的磨削参数可以获得良好的加工表面质量,并提高加工效率;陈日月等<sup>[3]</sup>通过试验研究了工艺参数对 CBN 砂轮加工 TC4 磨削性能的影响,研究结果表明磨削工艺参数对 CBN 砂轮加工钛

合金的磨削加工表面粗糙度和砂轮磨耗比均有显著的影响。此外,ZHAO T 等<sup>[7]</sup>和 LI J 等<sup>[8]</sup>分别对 TC4 钛合金磨削表面完整性和表面残余应力进行了研究分析,结果同样表明磨削工艺参数对磨削表面质量有着显著影响。因此,对于钛合金,选择合适的砂轮参数和磨削用量显得尤为重要<sup>[9]</sup>。

为此,本文以 TC4 钛合金为研究对象,分别采用陶瓷结合剂锆刚玉砂轮和金刚石砂轮在乳化液冷却条件下对 TC4 钛合金进行平面磨削试验,通过对比分析不同的砂轮材料和磨削用量对 TC4 钛合金磨削力、表面粗糙度及表面残余应力的影响规律,以期对 TC4 钛合金磨削加工砂轮材料选择及磨削工艺参数优选提供基础数据支持。

## 1 试验条件及方案

### 1.1 试验条件

试验用机床为改造的 JASU/H-1900 T 卧式镗铣加工中

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2020 YFB2010600);国家自然科学基金项目(51975289)

**第一作者简介:**方丁(1975—),女,江苏宿迁人,高级工程师,研究方向为高性能加工技术。

心,最高转速为 6000 r/min,最大进给速度为 4000 mm/min。磨削砂轮安装在卧式主轴上,如图 1 所示。试验用砂轮采用粒度均为 80 的陶瓷结合剂锆刚玉砂轮和树脂结合剂金刚石砂轮,具体参数见表 1。被加工材料为退火态 TC4 钛合金(Ti6Al4V),试件尺寸为 40×20×20 mm。该类钛合金是一种典型的  $\alpha+\beta$  型中等强度钛合金,金相组织和化学成分分别如图 2 和表 2 所示。

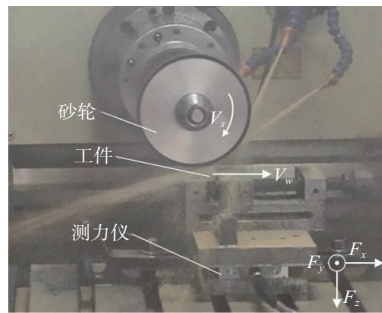


图 1 磨削加工试验现场

表 1 试验用砂轮参数

砂轮材料	粒度	规格/(mm×mm×mm)
陶瓷结合剂锆刚玉砂轮	80	φ350×φ75×30
树脂结合剂金刚石砂轮		

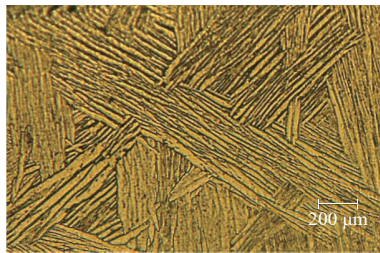


图 2 试验用 TC4 钛合金金相组织

表 2 试验用 TC4 钛合金质量分数 单位:wt. %

元素	Al	V	Fe	C
含量	5.50~6.80	3.50~4.50	0.300	0.100
元素	N	H	O	Ti
含量	0.050	0.015	0.200	余量

试验过程中,首先采用 Kistler 9129A 压电式三向动态测力仪对工件水平进给方向/砂轮切向( $x$ 向)、砂轮轴向( $y$ 向)以及砂轮法向( $z$ 向)的磨削分力进行测量。磨削加工后采用 Mahr S3 P 测量仪测量工件已加工表面粗糙度  $Ra$ (垂直于工件水平进给方向/砂轮轴向)。与此同时,采用 Pulstec  $\mu$ -X360 X 射线残余应力分析仪测量工件已加工表面残余应力  $\sigma_x$ (工件水平进给方向/砂轮切向)和  $\sigma_y$ (砂轮轴向)。此外,采用逆磨加工方式,并采用乳化液浇注方式对磨削区进行充分冷却润滑(图 1)。

## 1.2 试验方案

为分析砂轮材料和磨削用量对 TC4 钛合金磨削表面

质量的影响规律,探寻适合 TC4 钛合金工件半精磨削加工的砂轮材料和磨削用量,根据砂轮厂商推荐和调研,本试验采用如表 3 所示的磨削参数设置,其中磨削宽度固定为 20 mm。试验时以砂轮线速度  $v_s = 25$  m/s,工件(水平进给)速度  $v_w = 14$  m/min,磨削深度  $a_p = 0.02$  mm 作为基础磨削参数组,其余参数在此基础上进行单因素变化。每组磨削试验均重复 3 次,然后对磨削力、表面粗糙度以及表面残余应力的测量结果取其平均值进行分析。

表 3 试验用磨削参数

试验编号	砂轮线速度 $v_s/(m/s)$	工件速度 $v_w/(m/min)$	磨削深度 $a_p/mm$
1-5	15, 20, 25, 30, 35	14	0.020
6-9	25	10, 12, 16, 18	0.020
10-13	25	14	0.010, 0.015, 0.025, 0.030

## 2 试验结果与分析

### 2.1 磨削力

在磨削试验过程中,由于砂轮的有效宽度(30 mm)大于工件的宽度(20 mm),且磨削宽度固定为 20 mm,故而磨削过程中只存在砂轮的旋转运动和工件的水平方向进给运动,砂轮轴向( $y$ 向)磨削分力可以忽略不计。所以本试验主要研究分析切向磨削力( $F_x$ )和法向磨削力( $F_z$ )受砂轮材料和磨削用量的影响规律。其中,分别取各向稳定状态时的峰值力均值作为各向磨削力值。

图 3 所示为锆刚玉砂轮和金刚石砂轮磨削 TC4 钛合金时的磨削力随砂轮线速度变化曲线。由该图可以看出,当工件速度和磨削深度不变,在所设置的砂轮线速度范围内(15 m/s~35 m/s),金刚石砂轮的切向磨削力和法向磨削力均随砂轮线速度的增大而减小。而对于锆刚玉砂轮,其切向磨削力和法向磨削力随砂轮线速度的增大呈现先减小后增大的趋势,即当砂轮线速度>30 m/s 时,采用锆刚玉砂轮产生的磨削力有所增大。这主要是因为砂轮线速度过大导致磨削温度上升,磨削过程中部分磨屑黏附在砂轮表面,使砂轮磨粒变钝,增大了磨削阻力。

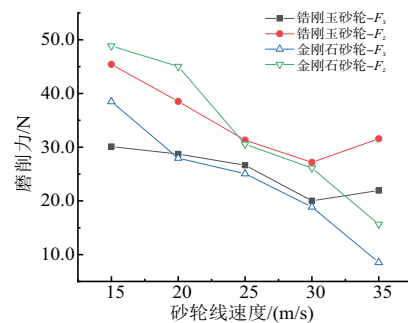
图 3 磨削力随砂轮线速度变化曲线  
( $v_w = 14$  m/min,  $a_p = 0.020$  mm)

图 4 所示为两种砂轮磨削 TC4 钛合金时工件速度对磨削力的影响曲线。从该图可以看出,在砂轮线速度和磨

削深度不变的条件下,在所设置的工件速度范围内(10 m/min~18 m/min),两种砂轮的切向磨削力和法向磨削力均随工件速度的增大而增大。这主要是因为,当工件进给速度增大时,材料去除率大幅增加,单位时间内磨除材料变多,而切深不变。因此单颗磨粒磨削力增加,从而导致砂轮整体的切向磨削力和法向磨削力均增大。

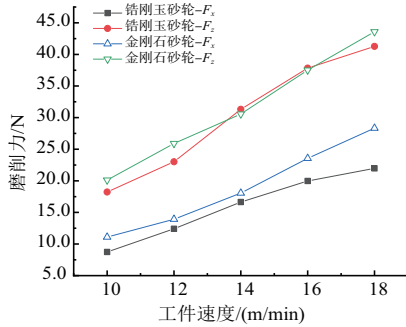


图4 工件速度对磨削力影响曲线  
( $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $a_p = 0.020 \text{ mm}$ )

此外,两种砂轮磨削 TC4 钛合金时的磨削力随磨削深度的变化曲线如图 5 所示。从该图可以看出,当砂轮线速度和工件速度不变,在所设置的磨削深度范围内(0.010 mm~0.030 mm),两种砂轮的各向磨削力均随磨削深度的增大而增大,且法向磨削力与切向磨削力的差值亦越来越大。这主要是因为,当其他磨削用量不变时,磨削深度越大,单位时间需要去除的材料越多,磨削阻力也越大,且在法向分量上呈现越发明显。

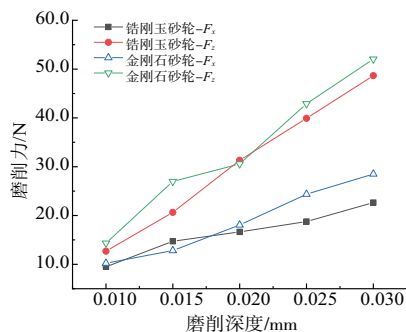


图5 磨削力随磨削深度变化曲线  
( $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 14 \text{ m/min}$ )

综合图 3~图 5 可以发现,采用相同的磨削用量时,金刚石砂轮产生的各向磨削力与锆刚玉砂轮产生的各向磨削力大小较为接近,而当工件速度和磨削深度恒定,砂轮线速度在 35 m/s 时,较金刚石砂轮而言,锆刚玉砂轮表面开始出现磨屑黏附从而导致磨削力有所增大。因此,从控制磨削力的角度考虑,可选用较大的砂轮线速度、较低的工件速度和磨削深度以降低磨削力,在中低速段( $v_s \leq 30 \text{ m/s}$ ),锆刚玉砂轮和金刚石砂轮的各向磨削分力较为接近,金刚石砂轮可以选择在较高的速度下( $v_s > 30 \text{ m/s}$ )磨削 TC4 钛合金。此外,金刚石砂轮的价格显著高于锆刚玉砂轮。因此从工具性价比的角度考虑,可选择锆刚玉砂轮进行中低速磨削 TC4 钛合金。

## 2.2 表面粗糙度

图 6 为砂轮线速度对磨削表面粗糙度的影响。从该图可以看出,当工件进给速度和磨削深度一定时,在所设置的砂轮线速度范围内(15 m/s~35 m/s),金刚石砂轮的磨削表面粗糙度随着砂轮线速度的增大呈近似线性下降,而锆刚玉砂轮的磨削表面粗糙度则随砂轮线速度提高先下降,当砂轮线速度超过 30 m/s 时,工件表面粗糙度又开始上升。这与图 3 显示的变化规律和原因均相似,即当砂轮线速度超过 30 m/s 时,采用锆刚玉砂轮产生的磨削温度较高,砂轮表面出现磨屑黏附,工件磨削表面出现大量涂覆物导致工件磨削表面粗糙度上升。

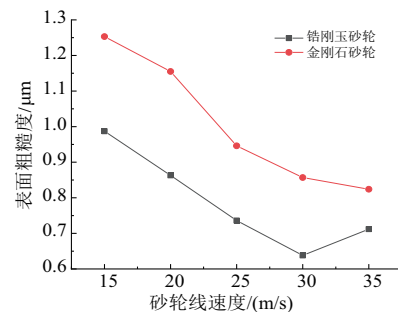


图6 砂轮线速度对表面粗糙度影响  
( $v_w = 14 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.020 \text{ mm}$ )

图 7 所示为两种砂轮的磨削表面粗糙度随工件速度的变化曲线。从该图可以看出,当砂轮线速度和磨削深度不变,工件速度在 10 m/min~18 m/min 的范围内变化时,两种砂轮的磨削表面粗糙度均随着工件速度的增大而呈现上升趋势,但总体上看工件速度的变化对工件表面粗糙度的影响相对较小。

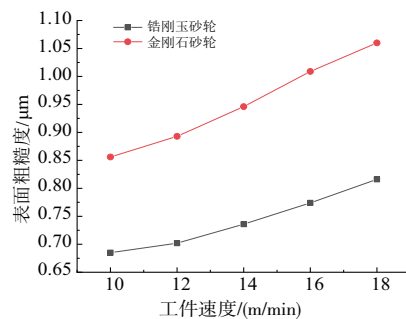


图7 工件速度对表面粗糙度影响  
( $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $a_p = 0.020 \text{ mm}$ )

两种砂轮的磨削表面粗糙度随磨削深度的变化曲线如图 8 所示。可以看出,当砂轮线速度和工件速度一定,磨削深度在 0.010 mm~0.030 mm 时,两种砂轮的磨削表面粗糙度均随着磨削深度的增大而上升。

此外,综合图 6~图 8 还可以发现,在磨削用量相同的情况下,金刚石砂轮的磨削表面粗糙度要大于锆刚玉砂轮的磨削表面粗糙度值。这主要是因为金刚石磨粒的硬度高,且锋利度保持性好,对磨削区工件表面的多次挤压效应没有锆刚玉好而导致。

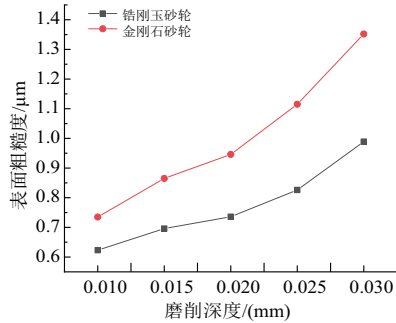


图8 磨削深度对表面粗糙度影响  
( $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 14 \text{ m/min}$ )

### 2.3 表面残余应力

磨削加工后,对磨削表面的残余应力测量结果如表4所示。可以看出,在乳化液冷却条件下,采用金刚石砂轮磨削的工件表面残余应力均为残余压应力,在相同的磨削用量下,金刚石砂轮的磨削表面残余应力绝对值普遍大于锆刚玉砂轮的磨削表面残余应力绝对值,这对提高零件的抗疲劳性能较为有利。而对于锆刚玉砂轮,虽然表面残余应力仍以压应力为主,但试验过程中仍存在部分磨削用量下的表面残余应力为拉应力。如第8组试验( $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 16 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.020 \text{ mm}$ ),磨削表面在 $x$ 方向和 $y$ 方向上的残余应力均为残余拉应力,而第9组试验( $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 16 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.020 \text{ mm}$ ),磨削表面在 $y$ 方向上的残余应力也为残余拉应力,这显然不利于保证零件的抗疲劳性能。

表4 表面残余应力测量结果 单位:MPa

试验编号	x 方向残余应力		y 方向残余应力	
	锆刚玉砂轮	金刚石砂轮	锆刚玉砂轮	金刚石砂轮
1	-101	-285	-88	-248
2	-176	-274	-95	-325
3	-153	-268	-152	-290
4	-125	-319	-34	-232
5	-190	-236	-124	-52
6	-143	-330	-78	-140
7	-47	-414	-93	-168
8	51	-291	106	-202
9	-43	-420	12	-238
10	-253	-401	-68	-291
11	-216	-349	-81	-164
12	-162	-356	-50	-194
13	-216	-380	-80	-322

针对锆刚玉砂轮的部分磨削表面存在残余拉应力问题,经分析认为,锆刚玉砂轮相比于金刚石砂轮,砂轮表面

更易堵塞、散热性较差,而当工件进给速度超过  $16 \text{ mm/min}$  时,随着工件进给速度的提高,磨削后的工件表面与冷却液接触时间缩短,磨削后的工件表面得不到充分冷却,从而在磨削区散热性较差的情况下容易使工件表面产生残余拉应力。对于金刚石砂轮来说,其磨粒硬度极高,不易磨钝且导热性好,砂轮表面不易堵塞,容屑空间较大,散热性较好,当采用金刚石砂轮磨削 TC4 钛合金时,大量的磨削热容易被砂轮与工件表面的冷却液和工具带走,工件进给速度的提高对工件表面层的热影响并不显著,因此,在良好的工具散热性和冷却液的冷却润滑等综合作用下,工件磨削表面主要呈现残余压应力。

### 3 结语

本文以 TC4 钛合金为研究对象,分别采用陶瓷结合剂锆刚玉砂轮和树脂结合剂金刚石砂轮在乳化液冷却条件下对 TC4 钛合金进行平面磨削试验,对比分析了砂轮材料及磨削用量对 TC4 钛合金磨削力、表面粗糙度以及表面残余应力的影响规律,主要结论如下。

1) 砂轮材料和磨削用量对于 TC4 钛合金磨削加工过程均有着重要影响,在合适的磨削用量和冷却润滑条件下,锆刚玉砂轮和金刚石砂轮均可用于 TC4 钛合金的磨削加工。其中,金刚石砂轮可用于 TC4 钛合金的中高速磨削加工,而锆刚玉砂轮在 TC4 钛合金的中低速磨削加工中具有更高的性价比。

2) 在所选择的工艺参数范围内,磨削 TC4 钛合金,金刚石砂轮的磨削力随砂轮线速度的增大而减小,锆刚玉砂轮的磨削力则随着砂轮线速度的增大先减小,而当砂轮线速度  $> 30 \text{ m/s}$  后呈增大趋势。此外,两种砂轮的磨削力均随着工件速度和磨削深度的增大而增大。

3) 在所选择的工艺参数范围内,平面磨削 TC4 钛合金,当磨削用量相同时,金刚石砂轮的磨削表面粗糙度大于锆刚玉砂轮的磨削表面粗糙度。对于同一种砂轮,当其他磨削参数给定的条件下,砂轮线速度和磨削深度对 TC4 钛合金磨削表面粗糙度的影响较大,而工件速度的影响则相对较小。

4) 在所选择的工艺参数范围内,平面磨削 TC4 钛合金,金刚石砂轮的磨削表面残余应力主要为残余压应力,而对于锆刚玉砂轮,当工件速度超过  $16 \text{ m/min}$  时,磨削表面易出现残余拉应力。此外,当磨削用量相同时,金刚石砂轮的磨削表面残余应力绝对值普遍大于锆刚玉砂轮的磨削表面残余应力绝对值。

#### 参考文献:

- [1] 胥军,卢文壮,王晗,等. 陶瓷结合剂 CBN 砂轮高速磨削钛合金 TC4-DT[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(5): 12-16, 21.
- [2] 丁文锋,奚欣欣,占京华,等. 航空发动机钛材料磨削技术研究现状及展望[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 022763.
- [3] 陈日月,刘小磐,张先桂,等. 工艺参数对 cBN 砂轮加工 TC4 钛合金磨削性能的影响[J]. 超硬材料工程, 2018, 30(5): 11-15.

(下转第 38 页)



图 12 实物图

使用时,老人坐在此多功能椅上按下黑色按钮,控制两电动推杆同时伸缩驱使扶手板带动翻转板转动一定角度,改变老人腿部位姿,实现辅助老人如厕后站起的功能。翻转后如图 13 所示。

按下折合铰链的触发机关,使擦背模块向前翻折 90°。拉动拉杆,使椅子支撑腿上收。折叠后椅子长 500 mm、宽 640 mm、高 490 mm。如图 14 所示。



图 13 翻转后实物图



图 14 折叠后实物图

## 5 结语

该助老椅大大降低了老人在沐浴时的滑倒风险及如厕后站起时老人肌肉损伤的风险,同时本产品也提供了较为便捷的擦背模块及折叠模块,可携带于室内以外的公众场合使用。随着老龄化的到来,公共场所等也可以普及使用,应用前景较为广阔,具有较大的推广价值。

### 参考文献:

- [1] 仲瑞娟. 中国失能老年人构成及长期护理需求分析[J]. 中西医结合心血管病电子杂志, 2018, 6(32): 17, 20.
- [2] 李永田. 一种多功能淋浴椅: 中国, CN201720308155.0 [P]. 2018-06-15.
- [3] 林如珊, 周颂华, 黄静君, 等. 老年护理用具多功能洗澡椅的研制[J]. 医药前沿, 2018(36): 367-368.
- [4] 刘坤, 吉硕, 孙震源, 等. 多功能坐站辅助型如厕轮椅机械结构设计与优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3): 872-880.
- [5] 滕兵, 陈静涛, 黄鑫海. 轮椅床的结构设计[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(3): 75-76.
- [6] 朱亚坤, 姚立纲, 徐业良, 等. 基于物联网的电动轮椅控制系统研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 164-168.

收稿日期: 2021-05-07

(上接第 29 页)

- [4] 徐九华. 钛合金切削磨削加工技术研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(5): 1-4.
- [5] 盛晓敏, 唐昆, 宓海青, 等. TC4 钛合金高效深磨磨削力及磨削能特征研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 24-28.
- [6] DE MELLO A, DE SILVA R B, MACHADO Á R, et al. Surface grinding of Ti-6 Al-4 V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 590-600.
- [7] ZHAO T, SHI Y Y, LAAKSO S, et al. Investigation of the effect of

grinding parameters on surface quality in grinding of TC4 titanium alloy[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 2131-2138.

- [8] LI J, JIA Y K, SHEN N Y, et al. Effect of grinding conditions of a TC4 titanium alloy on its residual surface stresses[J]. Strength of Materials, 2015, 47(1): 2-11.
- [9] 曹克. 微晶刚玉砂轮的钛合金磨削性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

收稿日期: 2021-03-31