

砂带磨削钛合金磨削加工性能研究

蒲昌兰¹,陈清良¹,苏宏华²,丁文锋²,赵彪²

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司,四川 成都 610092;

2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对钛合金零件干式打磨过程中磨具堵塞引起烧伤的问题,开展锆刚玉砂带和碳化硅砂带干式磨削 TC4 合金加工试验。通过分析磨削温度、材料去除量、表面完整性及磨粒磨损特征,对砂带磨削钛合金加工工艺进行研究。结果表明:相同磨削用量条件下,锆刚玉砂带相比于碳化硅砂带,磨削温度最高降低 23.6%,耐用度提高 2 倍。磨削表面粗糙度随砂带线速度的增大逐渐降低,且两种砂带磨削表面粗糙度差值呈逐渐增加趋势。当砂带线速度 $v_s = 20$ m/s 时,锆刚玉砂带比碳化硅砂带磨削表面粗糙度降低了 29.7%;当磨削深度增大时,碳化硅砂带磨削表面粗糙度值快速增加,锆刚玉砂带磨削表面粗糙度增量缓慢,当磨削深度增大到 0.1 mm 时,表面粗糙度差值达到 22%。

关键词:TC4 合金;砂带磨削;磨削温度;材料去除量;表面完整性

中图分类号:TG580.6 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0025-04

Reserch on Grinding Performance of Ti-6Al-4V Alloys with Abrasives Belt

PU Changlan¹, CHEN Qingliang¹, SU Honghua², DING Wenfeng², ZHAO Biao²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China; 2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the grinding surface burns of Ti-6Al-4V alloys caused by severe tool blocking with chips, the dry grinding test of Ti-6Al-4V alloys with zirconium corundum abrasive belt and silicon carbide abrasive belt was carried out. By analysis of the grinding temperature, material removal, surface integrity and abrasive wear characteristics, the abrasive belt grinding process of titanium alloy was studied. The results show that zirconium corundum abrasives belt possesses lower grinding temperature by 23.6% and durability two times higher than that of silicon carbide one under the same grinding parameters. The ground surface roughnesses deceases gradually along with the increase of the abrasive belt line speed, and the roughness differences of grinding target for both abrasives belts tend to decline. The zirconium corundum abrasive belt has smaller ground surface roughness values by 29.7% at 20 m/s compared to the silicon carbide one under the same value of depth-of-cut. As the grinding depth increases, the grinding surface roughness value of silicon carbide abrasive belt increases rapidly, the grinding surface roughness increment of zirconium corundum abrasive belt is slow and when the grinding depth increases to 0.1 mm, the surface roughness difference reaches 22%.

Keywords: Ti-6Al-4V alloys; abrasive belt grinding; grinding temperature; material removal; surface integrity

0 引言

钛合金作为一种典型难加工材料,其加工性能差、加工成本高以及材料去除量大等问题日益凸显。特别是航空航天所用零部件,对材料的加工精度以及表面质量有着更高的要求。因此,对钛合金材料加工技术的研究一直是航空航天制造业所关注的重要问题^[1-3]。

磨削加工通常作为钛合金零部件的最后一道工序,其对钛合金零部件的加工精度和质量有着重要影响^[4-6]。砂带磨削技术具有效率高、工艺方式灵活及适应性高等特点,符合航空零部件高精度、高质量的加工要求,因此,国内外许多学者针对砂带磨削特点进行了研究并取得了一定的研究成果^[7-11]。针对钛合金零件加工存在的问题,在

国内外学者研究的基础上,本文开展了砂带磨削 TC4 合金材料的磨削性能试验,通过对比分析碳化硅砂带和锆刚玉砂带的磨削温度、材料去除率以及加工表面质量,优选 TC4 合金材料磨削工具。通过砂带磨削试验分析了磨削参数对磨削温度、表面粗糙度和显微硬度的影响规律以及磨削过程中磨粒磨损特征,对 TC4 钛合金材料砂带磨削工艺进行研究,为 TC4 钛合金高效、高质磨削加工提供了技术支持。

1 试验及方法

1.1 试验材料及装置

试验所用 TC4 钛合金工件样块尺寸为 100 mm ×

40 mm×8 mm,磨削面尺寸为 100 mm×8 mm。试验在改装的立式铣床 XS5040 上进行,即在立式铣床 XS5040 增加了砂带磨削装置。如图 1 所示,砂带磨削装置主要由高速电机、驱动机构、张紧机构以及接触机构组成。高速电机通过驱动机构使砂带转动,张紧轮提供一定的转矩并协助

砂带定位,接触轮在砂带磨削过程中起到支撑砂带作用并为砂带提供接触压力,工件固定在铣床工作台,通过机床工作台实现工件进给运动。本文采用的两种砂带参数见表 1。

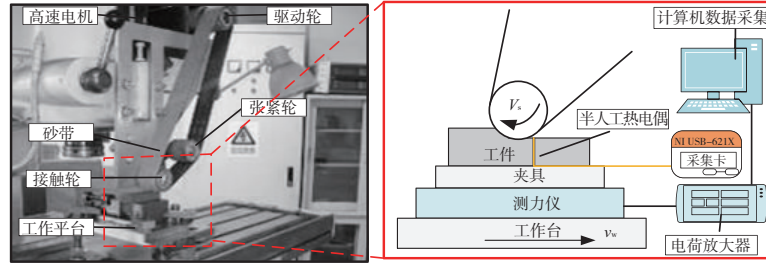


图 1 砂带磨削加工试验装置

表 1 砂带结构参数

砂轮类别	磨料	磨料粒径/mm	砂带宽度/mm
锆刚玉砂带	锆刚玉	0.150~0.118	50
碳化硅砂带	碳化硅		50

1.2 试验条件及方案

为探究砂带磨削 TC4 钛合金磨削性能,设计单因素试验,分析磨削参数即砂轮速度 v_s 、进给速度 v_w 和切深 a_p 对磨削过程以及磨削结果的影响规律,并对比两种磨粒砂带的磨削性能。试验过程采用逆磨的磨削方式,每组试验前,使用相同的磨削参数对钛合金工件表面进行平整加工,确保试验条件的一致性。试验参数见表 2。

表 2 试验参数

磨削参数	参数值范围
砂带线速度 $v_s/(m/s)$	8~20
进给速度 $v_w/(mm/min)$	200~1 000
磨削深度 a_p/mm	0.02~0.15

2 结果与讨论

2.1 磨削温度分析

磨削温度是砂带磨削中磨粒对材料去除效果的直观

表现,因此,本文针对磨削过程中参数选取对磨削温度的影响规律进行了分析。

不同砂带线速度下的磨削温度如图 2(a)所示,砂带磨削温度随砂带线速度的增大而逐渐增大,但温度还是维持在 300 °C 以下。随着砂带线速度的增大,单颗磨粒作用在磨削弧区时间减小,相同的时间内,有更多的磨粒参与了磨削,导致磨粒对工件材料的“滑擦”效应加剧。因此,更多的能量转换成磨削热集中在磨削弧区。砂带磨削时温度随进给速度的增加呈现逐渐增大的趋势,如图 2(b)所示。工件进给速度的增大,虽然会加快磨削热源的移动,但单位时间内砂带上磨粒与工件材料接触面积增大,磨粒对材料的切除面积增多,导致切削厚度增加,磨削温度升高。在产热效果大于散热效果的综合作用下,磨削温度呈现上升趋势。图 2(c)所示为砂带磨削温度随磨削深度的变化趋势。由于砂带属于柔性磨具,增大磨削深度最直观的表现是磨削压力的增加,使砂带上单颗磨粒切入工件的深度以及摩擦力增大,切削厚度增加,在磨削区产生的热量也随之增大,磨削温度升高。从图 2(a)—图 2(c)可知,锆刚玉砂带相比于碳化硅砂带,在相同磨削参数下,磨削温度均低于碳化硅砂带磨削,最大降幅达到 23.6%。当磨削深度和进给速度相同时,随着砂带线速度的增加,两者磨削温度差变大。

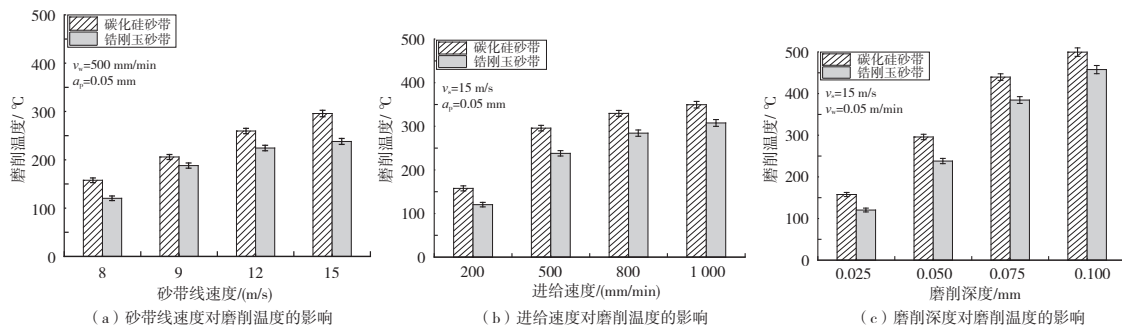


图 2 磨削参数对磨削温度影响对比

2.2 砂带磨削材料去除量分析

砂带磨削时材料去除体积随磨削深度的变化如图3所示。由图可见,锆刚玉砂带的磨除量相比碳化硅砂带优势明显,是碳化硅砂带的2倍多(当磨削深度达到0.125 mm时)。说明在同样磨削条件下,锆刚玉砂带的磨除能力比碳化硅砂带强。碳化硅砂带在制作时采用重力植砂的方式,磨粒直接铺在带基上,因此磨粒排布方向各异,如图4(a)所示。锆刚玉砂带采用的制作工艺是静电植砂^[12]的方式,即依靠静力场中电场力作用在磨粒中心点,实现将形状各异的磨粒进行排布,使磨粒大端埋入带基,而磨粒尖端、刃端朝外,从而使砂带拥有锋利的磨削刃,如图4(b)所示;同时,锆刚玉磨粒是由氧化铝和氧化锆组成的晶体结构,因此锆刚玉磨粒具有韧性值大、硬度略低、强度高的特点。在磨削过程中,锆刚玉砂带能够保持较好的锋利度和自锐性,因此,即使在恶劣的加工场合,锆刚玉砂带也可以表现出优异的磨削性能和较长的使用寿命。

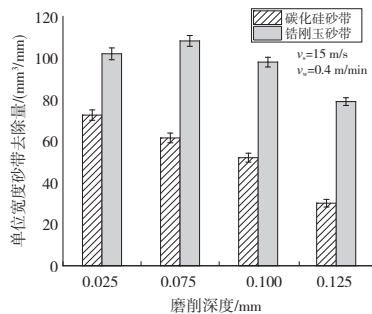


图3 砂带磨削材料去除量对比分析

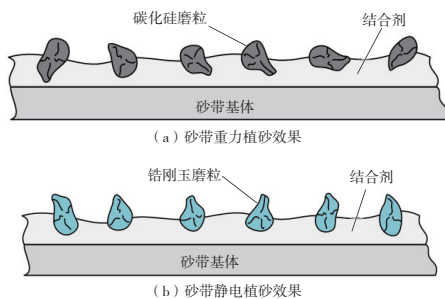


图4 砂带不同植砂方式效果对比示意图

2.3 砂带磨削表面完整性分析

图5为两种砂带磨削后钛合金工件显微硬度随测量深度数值变化。锆刚玉砂带磨削表面显微硬度略大于碳化硅砂带磨削,但两者差值较小,且均呈现随材料深度先减小后增大并稳定在母材显微硬度值。在距表层0.02 mm处,磨削表面最大显微硬度值达到HV320~330。这是因为在磨削力的作用下,加工表面发生晶粒变形和晶格错位,钛合金磨削表面产生加工硬化;由于钛合金导热性能差,磨削过程中砂带可以带走磨削表面大部分热,而距离表层深处0.06 mm处的磨削热消散较慢,产生软化效应,导致显微硬度值低于母材。

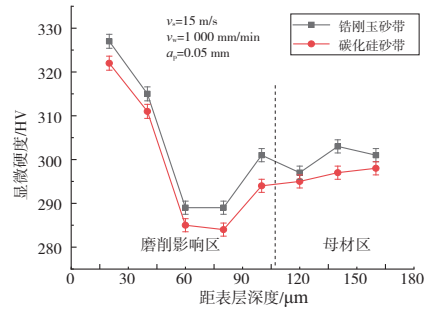
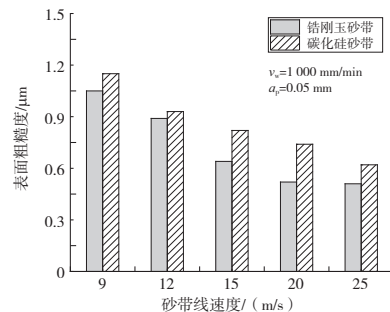
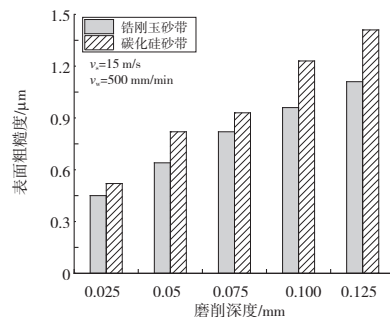


图5 砂带磨削 TC4 合金显微硬度

砂带磨削中,磨削参数与表面粗糙度的关系如图6所示。由图6(a)可知,两种砂带磨削表面粗糙度均呈现随砂带线速度增加而下降的趋势。砂带线速度的增加使单颗磨粒与工件接触时间缩短,单位时间内参与磨削的磨粒数增多,有效去除了在磨削过程中材料由于磨粒的切削作用产生的“塑性隆起”。由于磨粒是多切削刃和不规则体积,相邻磨粒对上一步磨粒切削后的沟槽及犁耕隆起具有去除和挤压修整的效果,随着砂带线速度增加,这种效果更加明显,因此表面粗糙度呈下降趋势。图6(b)为磨削深度对表面粗糙度的影响。随着磨削深度的增大,磨削压力增大,磨粒“犁入”材料的深度增加,而磨粒去除材料的能力有限,犁耕隆起材料体积增大使表面粗糙度增加。通过以上分析可知,在砂带磨削中,适当增大砂轮线速度、减小磨削深度可以获得较小的表面粗糙度;锆刚玉砂带磨削 TC4 合金相比碳化硅砂带磨削更具有优势,随着砂带线速度的增大,优势更加明显,当砂带磨削线速度达到 $v_s = 20$ m/min 时,锆刚玉砂带磨削 TC4 合金相比碳化硅砂带磨削表面粗糙度降低了 29.7%。随着磨削深度的增加,碳化硅砂带磨削表面粗糙度增速较大,当磨削深度达到 0.1 mm 时,锆刚玉砂带比碳化硅砂带磨削表面粗糙度值低了 22%。



(a) 砂带线速度对表面粗糙度的影响



(b) 磨削深度对表面粗糙度的影响

图6 磨削参数与表面粗糙度的关系

锆刚玉砂带磨削 TC4 合金工件表面形貌如图 7 所示。图 7(a)、图 7(b) 为相同的砂带线速度 ($v_s = 12 \text{ m/s}$)、进给速度 ($v_w = 300 \text{ mm/min}$)，磨削深度 a_p 分别为 0.02 mm 、 0.1 mm 时磨削表面形貌。当磨削深度较小时，钛合金工件表面划痕均匀且没有明显缺陷，表面粗糙度值 R_a 达到 $0.2 \mu\text{m}$ ；当 $a_p = 0.1 \text{ mm}$ 时，磨削表面质量变差，表面粗糙度 R_a 达到 $0.58 \mu\text{m}$ ，并且磨粒划痕较深，缺陷明显，表面黏附有钛合金磨屑。图 7(c)、图 7(d) 为相同的磨削深度 ($a_p = 0.1 \text{ mm}$)、进给速度 ($v_w = 300 \text{ mm/min}$)，砂带线速度 v_s 分别为 9 m/s 、 15 m/s 时磨削表面形貌。当砂带线速度较小时，钛合金工件表面磨粒划痕较深且不均匀，表面有轻微烧伤，表面粗糙度值 R_a 达到 $0.76 \mu\text{m}$ ；当 $v_s = 15 \text{ m/s}$ 时，磨削表面质量明显改善，表面粗糙度 R_a 达到 $0.28 \mu\text{m}$ ，并且钛合金工件表面划痕均匀且没有明显缺陷。

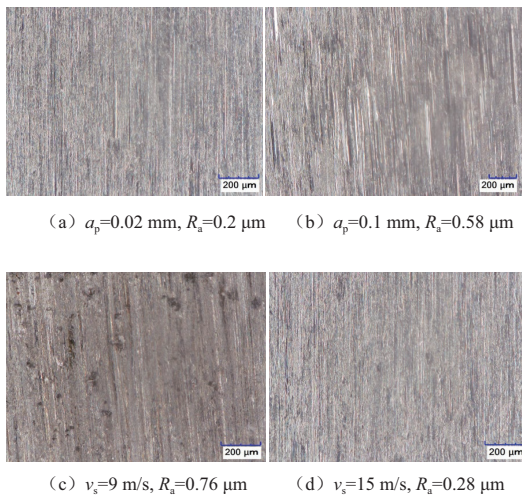


图 7 砂带磨削工件表面形貌

锆刚玉砂带磨削 TC4 合金 ($v_s = 15 \text{ m/s}$, $v_w = 1\ 000 \text{ mm/min}$, $a_p = 0.05 \text{ mm}$) 表面显微组织如图 8 所示。将磨削后的钛合金工件沿垂直于磨削表面切割，研磨抛光后得到显微组织如图 8(a) 所示，图 8(b) 为磨削加工表面。由图可知，钛合金是等轴 α +晶间 β 相的共晶组织，在磨削影响区，受磨削温度及磨削法向力的影响，晶格将产生滑移、畸变和歪扭，转变为等轴 α +针状 α +晶间 β 相的共晶组织。在磨削切向力的作用下，工件表面层产生塑性变形，使晶粒破碎和拉长。从表层的显微组织可知，工件未出现明显烧伤变质层。

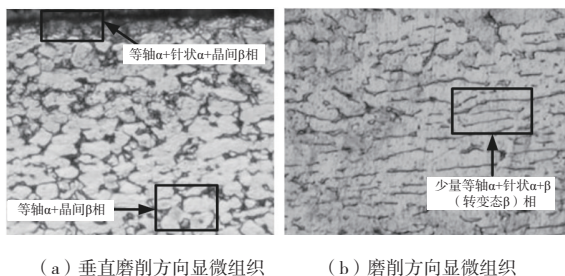


图 8 工件基体与磨削表层的显微组织

2.4 砂带磨粒磨损分析

锆刚玉砂带磨粒磨损在不同磨削阶段的形貌如图 9 所示。砂带的原始形貌如图 9(a) 所示，磨粒具有良好的出露高度、磨粒间隙以及包埋深度。当磨粒参与磨削，进入初期阶段，如图 9(b) 所示，锆刚玉磨粒由于切削刃比较锋利，磨粒韧性较高，在磨削压力及摩擦力的作用下磨削刃尖端很快被磨掉，初期磨损阶段磨粒主要以破碎断裂为主。随着砂带磨削的进行，绝大多数磨粒参与了磨削且磨削刃尖端被磨掉，在磨粒的顶端出现磨耗平台，磨粒进入稳定磨损阶段，如图 9(c) 所示。此时磨粒变钝，摩擦效应增加，进而磨削力增大、磨削温度升高以及单个磨粒所承受的弯矩增加，在磨削力以及工件对磨粒剪切力的作用下，磨粒逐渐出现裂纹和微破碎。在此阶段，磨粒的磨耗磨损为砂带磨削的主要磨损形式。当磨粒磨损在磨削过程中持续增加，磨粒顶端被磨平或破损，导致磨削力增大，磨粒与工件表面接触面积增加，在较大弯矩和摩擦力的共同作用下，磨粒脱离结合剂，如图 9(d) 所示。此时砂带的磨损形式以磨粒脱落磨损为主。

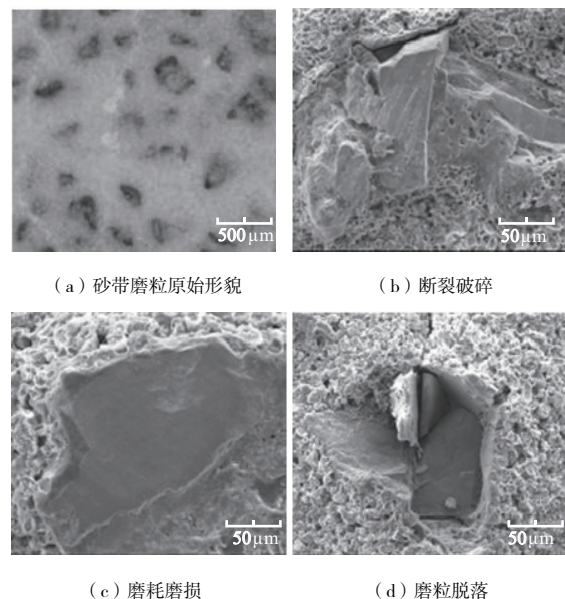


图 9 砂带磨粒磨损形貌

3 结语

1) 砂带磨削 TC4 合金时，在砂带线速度 $8 \sim 15 \text{ m/s}$ 、工作台进给速度 $200 \sim 1\ 000 \text{ mm/min}$ 、磨削深度 $0.025 \sim 0.100 \text{ mm}$ 之间时，采用砂带对钛合金进行磨削，可有效控制磨削温度。

2) 与碳化硅砂带相比，在相同的磨削参数下，锆刚玉砂带磨削 TC4 合金磨削温度更低，实验参数选取范围内，磨削温度可降低 23.6% ，磨削去除量提高 2 倍。因此锆刚玉砂带具有更好的磨削性能。

3) 提高砂带线速度、减小磨削深度可降低磨削表面粗糙度，获得较好的表面形貌。相比于碳化硅砂带磨削，

(下转第 44 页)

3 结语

本文基于空气涡轮起动机整机有限元模型对涡轮转子进行转子动力学计算,其中啮合刚度通过威伯-班纳斯切克模型计算得到,等效简化为弹簧连接。可以得到以下结论:

1)在涡轮转子在持续加速到达最高转速 120 000 r/min 的过程中有两阶临界转速,分别为 21 067 r/min 以及 56 371 r/min;

2)在涡轮一阶临界转速附近时,实则为轴承系统发生振动,导致涡轮转子发生偏摆,并未发生变形,通过响应曲线可以看到壳体并未产生较大响应;

3)在涡轮二阶临界转速附近时,为涡轮的一阶弯曲振动,振动较大,可能会导致涡轮擦墙碰磨,在加工制造时应严格把控不平衡量大小,减小对其振动的影响。

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明. 航空发动机结构分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006:353-357.
- [2] 蒋聪,刘冕,熊欣,等. 航空用空气涡轮起动机典型故障诊断分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):203-205.
- [3] 刘磊. 航空发动机地面与高空启动特点分析[J]. 价值工程,2011,30(15):34-35.
- [4] 王浩,杨恒辉,卢玉芳. 飞机第二动力系统技术综述[J]. 信息系统工程,2014(4):38-39.
- [5] 朱增宝. 封闭差动人字齿轮传动系统均载及动力学特性分析研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [6] HUAITAO S, JIZONG Z, YU Z, et al. Calculation and analysis of critical speed of high speed motor spindle rotor system[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 399: 012025.
- [7] 钟一谔. 转子动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1987.

收稿日期:2021-12-03

(上接第 28 页)

采用锆刚玉砂带磨削 TC4 合金,表面粗糙度更低,当砂带线速度达到 $v_s = 20$ m/min 时,工件表面粗糙度可降低 29.7%;当磨削深度增加到 0.100 mm 时,锆刚玉砂带比碳化硅砂带磨削表面粗糙度降低 22%。

4)采用静电植砂方式布磨粒,可以使磨粒保持较好的锋利度和自锐性。因此,即使在恶劣的加工场合,锆刚玉砂带也可以表现出优异的磨削性能和较长的使用寿命。

参考文献:

- [1] 赵振业. 高强度合金应用与抗疲劳制造技术[J]. 航空制造技术,2007,50(10):30-33.
- [2] 叶洪涛,张军,杨金发,等. 航空难加工材料切削加工中的关键应用技术[J]. 航空制造技术,2012,55(10):44-46.
- [3] 杨胜强,李永刚,李文辉. 航空钛合金抗疲劳表面改性技术研究进展[J]. 航空制造技术,2017,60(13):28-35.
- [4] 何利民,郭力. 钛合金磨削加工研究的进展[J]. 精密制造与自动化,2008(2):8-13,5.
- [5] LI Z, DING W F, MA C Y, et al. Grinding temperature and wheel wear of porous metal-bonded cubic boron nitride superabrasive wheels in high-efficiency deep grinding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(11):1961-1971.
- [6] MIAO Q, DING W F, KUANG W J, et al. Comparison on

grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH4169, K403, DZ408 and DD6 nickel-based superalloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49:175-186.

- [7] AXINTE D A, KRITMANOROT M, AXINTE M, et al. Investigations on belt polishing of heat-resistant titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3):398-404.
- [8] QU C, LYU Y J, YANG Z Y, et al. An improved chip-thickness model for surface roughness prediction in robotic belt grinding considering the elastic state at contact wheel-workpiece interface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5/6/7/8):3209-3217.
- [9] REN X Y, KUHNENKÖTTER B. Real-time simulation and visualization of robotic belt grinding processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(11/12):1090-1099.
- [10] 梁巧云,单坤,李兆瑞,等. 航发钛合金叶片金刚石砂带磨削的磨粒磨损研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2020,40(4):59-64.
- [11] 黄云,肖贵坚,邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势[J]. 航空学报,2019,40(3):48-67.
- [12] 霍文国. 钛合金干式磨抛加工技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

收稿日期:2021-12-08