

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.10.002

超声辅助磁粒研磨TC4平面的光整试验研究

朱子俊, 韩冰*, 李奎, 李路杰, 陈燕

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁鞍山 114051)

摘要: 为了提高钛合金TC4表面质量, 采用超声辅助磁粒研磨技术对TC4平面进行光整试验研究, 研究了磁极开槽宽度与深度在不同比例下的磁场强度大小, 及不同超声波振动幅度和磨粒粒径条件下对TC4表面粗糙度值的影响。结果表明: 在磁极开槽宽度与深度比为1:1, 超声波振动幅度为10 μm , 磨粒粒径为200 μm 时, 研磨加工60 min, 钛合金TC4平面研磨前后的表面粗糙度值Ra由原始3.00 μm 下降到0.12 μm , 表面纹理去除, 形貌得到明显改善, TC4平板表面材料力学属性加强, 表面摩擦系数降低。

关键词: 超声波; 钛合金TC4平面; 开槽磁极; 磁场梯度; 表面粗糙度

中图分类号: TG147

文献标识码: A

Experimental Study on Ultrasonic-Assisted Magnetic Particle Grinding of TC4 Plane

ZHU Zijun, HAN Bing*, LI Kui, LI Lujie, CHEN Yan

(School of Mechanical Engineering & Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: In order to improve the surface quality of titanium alloy TC4, the TC4 plane was subjected to the skin finishing test by ultrasonic assisted magnetic particle grinding technology. The effects of the magnetic field strength of the magnetic pole slot width and depth at different ratios, the different ultrasonic vibration amplitude and abrasive grains, on the surface roughness of TC4 were studied. The results showed that the surface roughness value Ra of the titanium alloy TC4 before and after planar grinding was decreased from the original 3.00 μm to 0.12 μm when the magnetic pole slot width to depth ratio was 1:1, the ultrasonic vibration amplitude was 10 μm , the abrasive grain size was 200 μm , and the grinding process was 60 min. The surface texture was removed and the morphology was significantly improved. The mechanical properties of the TC4 flat surface material were strengthened and the surface friction coefficient was reduced.

Keywords: ultrasonic; titanium alloy TC4 plane; slotted pole; magnetic field gradient; surface roughness

随着航空制造业的不断发展, 国内外航空发动 机中大量使用钛合金材料制件, 其使用量已占到总

收稿日期: 2019-12-07

修回日期: 2020-03-10

作者简介: 朱子俊(1995—), 女, 硕士研究生, email: 1332624941@qq.com

通信作者: 韩冰, email: Hanb75@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775258); 辽宁省教育厅重点项目(2017LNZD02)

重量1/4以上^[1]。TC4钛合金在不同温度环境中都具备良好的力学性能,其密度小,质量轻,耐腐蚀系数高,表面硬度很高,但摩擦性能差,是一种常应用于高端制造但难加工的材质^[2]。针对钛合金材质在航天航空、化学、机械、石油等使用中需具备高精度、低粗糙度、良好的完整性的表面特性,使用磁粒研磨法可解决TC4钛合金加工难的问题,并能达到其使用要求。但在加工时,由于磨粒更新速度慢、大部分的磁性磨粒无法参与工件的研磨过程且部分磨粒黏附在工件表面,使得钛合金TC4平面的加工效率较低。在TC4平面的加工中,研磨轨迹较为单一、磁性磨粒重复性的加工、磨粒切削刃的更新等都是现阶段急需解决的问题。

本文以TC4平面为研究对象,针对以上提出问题,采用超声磁粒复合研磨对TC4表面进行研磨抛光;通过对磁性磨粒加以轴向的高频振动,增加磨粒切削刃的去除量及划刻频率,从而加速工件表面的研磨效率。并进行模拟和试验,验证磁极不同开槽宽度及深度比例下,磁场强度的变化,以此增强研磨中磁性粒子翻滚频率,改善研磨后工件的表面质量。

1 超声辅助磁粒研磨加工机理

如图1所示为超声波辅助磁粒研磨TC4平面的加工原理图,超声波发生器将电信号传递给超声波振子,由振子将电信号转换成轴向机械振动,通过变幅杆放大振动,并传递到研磨磁极上,使得研磨磁极上的磁性磨粒发生振动^[3]。永磁铁研磨头自身形成闭合磁回路,磁场形成的磁感线穿透不导磁工件,使得磁性磨粒中的铁基体产生感磁现象,随磁感线的指向形成柔性“磁刷”。“磁刷”上的切削刃压向工作表面,并在磁极自旋转下,于工件表面摩擦、划刻去除工件表面的原始加工痕迹。

本次试验在磁极轴向添加超声高频振动辅助运动,将超声振动的优点与磁粒研磨工艺自适应性、自锐性好、柔性加工等优点相结合^[4]。将传统磁粒研磨与轴向超声振动相结合,使研磨粒子在旋转刮擦工件表面时,在其法向方向有高频振动,增加粒子的冲击能,使其粗糙度值下降速度加快,增加研磨效率。其次在旋转与振动的复合运动下,粒子在平面上轨迹更加复杂,轨迹线间的夹角较小,

纹理细致均匀,有利于减小因加工对表面产生的裂纹损伤等。研磨中采用轴向磁极,磁力线回路较长,不利于加工效率,此试验采用将磁极加工表面开十字槽的方式,通过磁力线经过不同介质会有不同折射角的性质改变其转向,促进磁性磨粒在磁场中的自我旋转,且使磁性表面磁性梯度产生一定的差值,改变磁极中心磁场强度较低,试验中大部分粒子无法参与研磨的情况,利于提高研磨效率,改善平面表面加工均匀度^[5-6]。

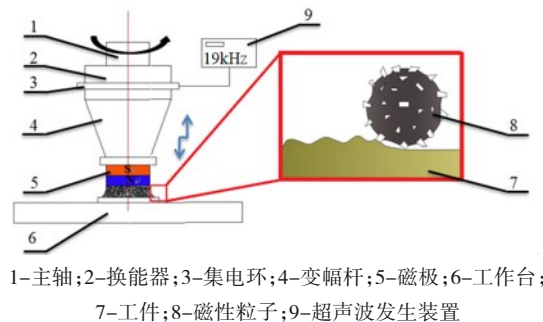


图1 超声辅助磁粒研磨加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

2 试验装置及条件

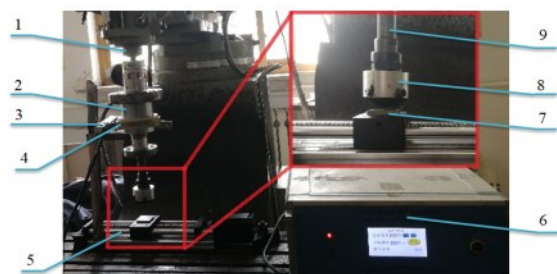
2.1 试验装置

图2为试验装置图,工件在钻床进给台的带动下做水平方向的往复匀速进给运动;超声波发生装置安装在钻床主轴上,由钻床主轴带动其旋转。超声波发生器将电信号传递给末端的集电环,集电环端部的换能器将电信号转化成机械振动,使得变幅杆带动吸附磁性粒子与水基研磨液混合物的磁极做轴向高频振动。超声振动加工给研磨粒子增添轴向的力,可冲击工件表面,能有效增大切削力,及材料的移除率。

2.2 试验条件

表1所示为超声辅助磁粒研磨加工钛合金TC4平面试验条件,加工使用磁极头为钕铁硼永磁体,研磨介质为自制的磁性研磨粒子,是铁粉和三氧化二铝粉末以2:1的质量比烧结而成。试验过程中,在磁极头旋转、工件横向进给形成的相对运动下,研磨粒子划擦、刮刻工件表面;超声波的轴向高频机械振动使旋转加工中的研磨粒子轴向冲击工件表面,加快表面凸起的去除,优化研磨粒子的加工

轨迹。研磨过程中,需每隔5 min添加2 mL的研磨液,降低加工中摩擦、切削生热;每隔10 min更换一次研磨粒子,保持研磨粒子切削刃的锐利;每隔10 min对工件表面进行一次表面形貌数据采集,使用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪测量工件表面粗糙度数值,使用VHX-500F超景深3D电子显微镜观测工件研磨前后表面微观形貌。



1-夹头;2-换能器;3-碳刷;4-集电环;5-进给台;6-超声波发生装置;7-工件;8-磁极;9-变幅杆

图2 超声辅助磁粒研磨加工试验装置图

Fig.2 Experimental device diagram of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

表1 复合研磨的试验条件

Tab.1 Test conditions for compound grinding

名称	试验条件
试验工件	TC4平面30 mm×30 mm
磁极/mm	钕铁硼磁极Φ25
研磨液	水基研磨液
主轴转速/($r \cdot \min^{-1}$)	600
工件进给速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	2
磁性磨粒平均粒径/ μm	150、200、250
振动幅度/ μm	5、10、15

3 磁极开槽仿真模拟分析

磁极的形状是影响磁粒研磨加工的主要因素之一,通过改变磁极头形状,使磁极的磁力线发生变化,从而改变磁极端面与被加工工件表面之间的磁场强度梯度的分布,使得磁性磨粒受到的磁场力不同,以至于影响加工效果^[7]。

针对所选TC4钛合金材质,磁极采用十字开槽,磁极开槽宽度比深度分别为1:1、1:2、2:1,三种不同开槽情况进行仿真模拟对比,分析不同情况下磁场梯度的变化,得出较优结果。图3为Maxwell仿真软件模拟磁极开槽时的磁感应强度示意图。

相同尺寸、材质、充磁方向的磁极开同样形状的“十字矩形槽”,随矩形槽宽度及深度在设计参数范围内的变化,磁极整体磁感应强度最大值相差较小;磁极研磨表面都呈现棱边上的磁感应强度较大,且强于磁极加工平面及槽底的磁感应强度。由此可得,轴向柱形磁极开槽宽度及深度对磁极总磁感应强度大小的提升无明显影响;磁极在加工平面及矩形槽底面会形成一定的磁感应强度差值,在研磨过程中,对磁性研磨粒子磁化产生的磁场力大小不同,会促进不同研磨区域中研磨粒子的更换。

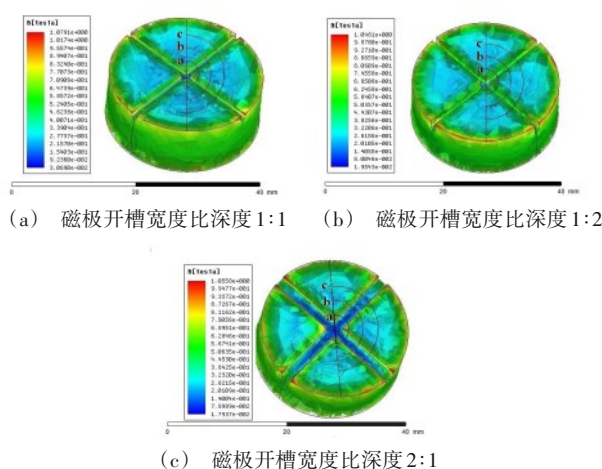
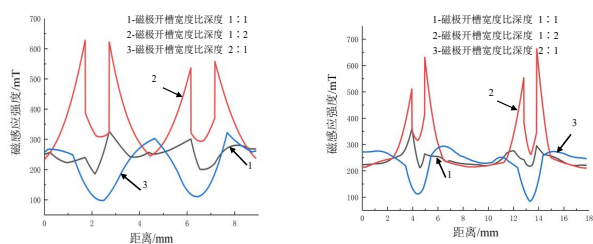


图3 磁极开槽的磁场强度模拟效果图

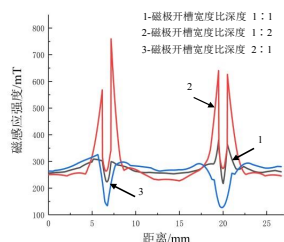
Fig.3 Simulation of magnetic field intensity of magnetic pole slotting

图3为磁极开槽宽度比深度分别为1:1、1:2及2:1的仿真模拟效果图,磁极为轴向充磁圆柱形磁极,以磁极圆心为坐标轴中心,沿磁极开槽方向为 x 、 y 的坐标轴方向;分别以坐标(2,2)、(4,4)、(6,6)与圆心的连线为半径做半圆,所得的半圆线命名为 a 、 b 、 c ,并对三处所测得磁感应强度大小进行分析。由图4模拟数据分析可得:较磁极开槽宽度比深度为1:1与2:1时,比例为1:2的磁极开槽表面及槽底处,两者间的磁感应强度差值巨大,平均达到0.30 T;两者间较大的磁场梯度差,使得磁极开槽的棱边处磁感应强度远强于平面处,导致加工中的磁性研磨粒子分布严重不均匀,工件表面研磨效果差。磁极开槽宽度比深度为2:1时,磁极表面及槽底处具有0.14 T的磁场梯度差值,但槽底处磁场强度为0.10 T,在研磨过程中无法保存磁性粒子,从而

使得不同区域处粒子无法更换,易对加工表面产生损伤,且加工效率低。磁极开槽宽度比深度为1:1的开槽磁极,在磁极加工平面有一定的磁场梯度,不仅使磁极头“十字矩形槽”中心交叉处磁性粒子均匀分布,还有利于促进磨粒的翻滚、更新,及时更换不同研磨粒子的切削刃,实现高效率精加工研磨TC4平面。



(a) 磁极线段a上的磁场强度 (b) 磁极线段b上的磁场强度



(c) 磁极线段c上的磁场强度

图4 磁感应强度在磁极不同直径处的变化曲线

Fig.4 Variation curve of magnetic induction intensity at different diameter position of magnetic pole

4 摩擦磨损

在对TC4表面研磨中,采用磁极转速为600 r/min;研磨磁极开槽宽度比深度为1:1,分别为1 mm的“十字矩形槽”;研磨介质为直径200 μm 的自制烧结研磨粒子与水基研磨液混合的试验条件下。研磨60 min后,工件表面形貌得到明显改变的同时,表面的材料性能也得到强化,随着研磨粒子切削刃对工件表面的撞击,表面粗糙度值大幅降低,显微硬度得到提升。TC4在航空中经常使用于传动副中,这就要要求其不仅要具有良好的表面形貌,也要有一定的摩擦性能,才能延长其使用寿命,达到合理使用材料。

在此通过对比磁粒研磨加工前后对表面的滑动实验数据对比,来探究其影响及变化程度。所做

摩擦磨损实验设备为MS-T3001型摩擦磨损试验机,试验参数如表2所示。

表2 旋转摩擦磨损试验条件

Tab.2 Test conditions of rotating friction and wear

转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	载荷/g	时间/min	旋转半径/ mm
200	500	20	8

图5为工件研磨前后表面摩擦系数曲线图。从图5中可得,工件经过磁粒研磨后表面摩擦系数要明显小于加工前表面摩擦系数。在摩擦磨损开始前,对试验仪摩擦系数进行调0处理,设置相应的转速及时间。开始试验时,摩擦球头从接触工件至进入研磨,未处理过的工件表面摩擦系数值数据变化幅度较大,在10 min后趋于稳定并保持在0.45左右。而经磁粒研磨后的工件表面摩擦系数很快就趋于平稳,并维持在0.3左右。且磁粒研磨后工件表面摩擦系数在15 min后,有上升趋势,最后稳定在0.38左右。这是因为在15 min后,摩擦球头已经磨穿磁粒研磨加工所形成的强化层,进而深入摩擦工件内部结构层,但其摩擦系数仍小于未经处理的原始表面摩擦系数。因此,磁粒研磨加工可强化工件表面材料力学属性,加工后可使得工件摩擦力减小,能增强工件运行时的稳定性及使用寿命。

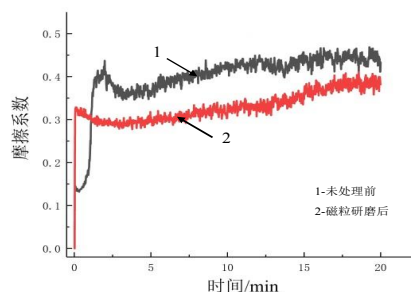


图5 工件磁粒研磨前后摩擦系数变化曲线图

Fig.5 Variation curve of friction coefficient before and after magnetic abrasive finishing of workpiece

5 结果及分析

5.1 不同粒径对工件表面粗糙度的影响

如图6所示,为主轴转速600 r/min,超声波振动频率19 kHz,振幅10 μm ,研磨时间60 min条件下,磁性粒子平均粒径在250 μm 、200 μm 、150 μm 时工件研磨表面粗糙度的变化。实验可得,磁性研

磨粒子粒径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时,工件表面粗糙度最佳,由原始 $3.00\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$ 。当磨粒粒径为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 时,因粒径较大,粒子对工件表面的研磨压力较大,研磨初期工件表面粗糙度值下降较快。精密研磨后期,较大的研磨压力下研磨粒子会划伤工件表面,留下划痕。当磨粒粒径为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 时,由于研磨粒子粒径较小,其所受垂直于工件方向的压力较小,使得工件表面加工不充分,表面粗糙度值下降较慢。

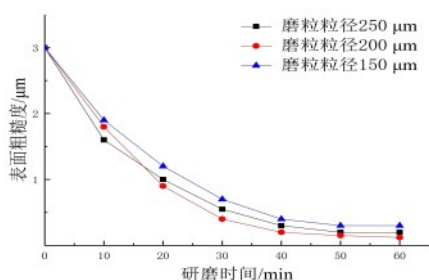


图6 磨粒粒径对工件表面粗糙度的影响

Fig.6 Effect of abrasive particle size on surface roughness of workpiece

5.2 超声波不同振幅对工件表面粗糙度的影响

选用5.1所述的优化试验条件,在主轴转速 600 r/min ,超声波振动频率 19 kHz ,磨粒粒径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 条件下,考察超声波平均振幅在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时超声波振幅对工件研磨表面粗糙度的变化,研磨时间为 60 min ,其结果如图7所示。实验可得,超声波振幅为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,工件表面粗糙度最佳,由原始 $3.00\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$ 。当超声波振幅为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时,因振动幅度较大,粒子对工件表面的研磨轨迹周期较长,轨迹峰值较小导致轨迹间交叉较小,工件表面研磨效果不佳。当超声波振幅为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,振动幅度较小,相同加工间隙下,研磨粒子所受研磨压力较小,工件表面无法充分加工。

5.3 超声辅助磁粒研磨前后表面微观形貌分析

使用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪测量工件表面粗糙度数值、VHX-500F超景深3D电子显微镜观测工件研磨前后表面微观形貌,可得工件表面微观形貌图,如下图8所示。结合Maxwell模拟仿真及试验影响因素对比结果分析,选用磁极开槽宽度与深度比为1:1即开槽宽度、深度分别为 1 mm 的磁极头,超声波振动幅度 $10\text{ }\mu\text{m}$,磨粒粒径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的条件下和表1中的试验条件进行试验。

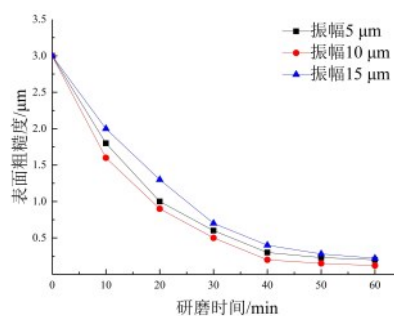
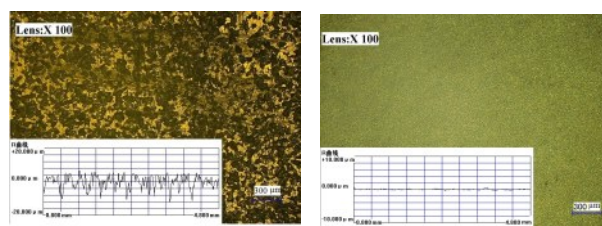


图7 超声波振幅对工件表面粗糙度的影响

Fig.7 Influence of ultrasonic amplitude on workpiece surface roughness



(a) 原始形貌图

(b) 研磨后形貌图

图8 磁粒研磨前后TC4钛合金平面表面形貌对比图

Fig.8 Comparison chart of planar surface morphology of TC4 titanium alloy before and after magnetic abrasive finishing

如图8(a)所示,工件原始表面凹凸不平现象严重,且不同粗、细的生产加工痕迹深浅不一,表面粗糙度值测量曲线波动范围及差值大。工件加工在磁粒研磨与超声振动的复合运动下,研磨粒子受旋转磁场力及轴向振动的合力,增大对工件表面的研磨压力,且研磨粒子运动轨迹复杂多样,减少研磨加工残留痕迹;磁极表面开槽,使得加工区域内粒子不停的更换,保持切削刃的锐利,加快表面凸起的去除。经 60 min 加工后,工件表面无明显划痕,表面粗糙度值测量曲线波动浮动微小,工件表面原始斑驳不平及加工划痕现象均被去除,表面粗糙度值由原始 $3.00\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$,表面形貌改善较好。

6 结论

本文通过超声辅助磁粒研磨对TC4平面进行磁粒研磨光整加工,实验过程对研磨头进行Maxwell仿真模拟,得出磁极开槽最优宽度与深度比,进而使用此试验条件,分析研磨粒子粒径、超声

波振幅对工件表面粗糙度、表面质量的影响,并将TC4平面研磨前后分别进行摩擦磨损试验分析,得出如下结论:

(1)通过Maxwell软件对磁极进行磁场强度模拟,分析出当磁极开槽宽度比深度比例为1:1时,磁极具有较好的磁场梯度,可促进磁粒研磨过程中磨粒的翻滚与更新。

(2)经超声波复合磁粒研磨加工后工件表面摩擦系数比原始摩擦系数小,工件表面得到了强化。经过磨粒的划擦、挤压和碰撞,表面具有了一定的耐磨性。

(3)在磁极开槽宽度与深度比为1:1,且开槽宽度为1 mm,超声波振动幅度10 μm ,磨粒粒径200 μm 的条件下。60 min研磨后,工件表面粗糙度值由原始3.00 μm 降为0.12 μm ,表面形貌得到明显改善。

参考文献

- [1] 黄旭,李臻熙,高帆,等.航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J].航空制造技术,2014,57(7):70-75.
Huang X, Li Z X, Gao F, et al. Recent development of high-temperature titanium alloys for aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(7): 70-75 (in Chinese).
- [2] 杨海吉,邓祥伟,韩冰,等.超声波辅助磁力研磨TC4薄壁细长管内表面研究[J].组合机床与自动化加工技术,2018,60(2):30-33.
Yang H J, Deng X W, Han B, et al. Study on the inner surface of TC4 thin-walled tube by ultrasonic vibration assisted MAF [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018, 60(2): 30-33 (in Chinese).
- [3] 曾加恒,陈燕,张科丙,等.旋转超声辅助磁力研磨镍基合金试验研究[J].硬质合金,2018,35(3):180-185.
Zeng J H, Chen Y, Zhang K B, et al. Experimental research on rotary ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of nickel based alloy [J]. Cemented Carbide, 2018, 35(3): 180-185 (in Chinese).
- [4] 廖明,韩冰,陈燕,等.钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J].中国表面工程,2016,29(3):123-131.
Liao M, Han B, Chen Y, et al. Inner surface of titanium alloy tube by electrochemical magnetic abrasive compound finishing [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 123-131 (in Chinese).
- [5] 康璐,陈燕,赵杨,等.超声振动辅助磁力研磨协同增效机制与试验研究[J].航空制造技术,2018,61(21):57-62+68.
Kang L, Chen Y, Zhao Y, et al. Synergistic mechanism and experimental study of ultrasonic vibration assisted magnetic grinding [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(21): 57-62+68 (in Chinese).
- [6] 叶恒宇,梁存真,覃寿同.磁极开槽情况对磁力研磨的影响[J].机械设计与制造,2018,56(4):101-103+107.
Ye H Y, Liang C Z, Tan S T. Effect of magnetic pole groove on magnetic abrasive finishing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, 56(4): 101-103+107 (in Chinese).
- [7] 赵文聪,张桂香,陈春增.磁力光整加工永磁极结构参数设计及仿真[J].机械设计与研究,2016,32(6):106-109.
Zhao W C, Zhang G X, Chen C Z. Design and simulation research of the magnetic poles' structure parameters on magnetic abrasive finishing system [J]. Machine Design & Research, 2016, 32(6): 106-109 (in Chinese).
- [8] 王兰.钛合金磨损行为及磨损机理的研究[D].镇江:江苏大学材料学,2014.
- [9] 彭钧约.表面微结构在大气和水环境下的摩擦学特性研究[D].南京:南京航空航天大学研究生院机电学院,2011.
- [10] 吴红艳,张跃文,黄珂,等.TC4钛合金表面渗铝层的显微组织与摩擦磨损性能[J].机械工程材料,2016,40(5):77-80.
Wu H Y, Zhang Y W, Hang K, et al. Microstructure and friction and wear properties of Zr-alloyed layer on TC4 titanium alloy surface [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(5): 77-80 (in Chinese).
- [11] Hitomi Y, Anil K S, Michael T, et al. Magnetic abrasive finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2014, 7(4): 299-304.
- [12] 马付建,栾诗宇,罗奇超,等.超声辅助磁性磨料光整加工工艺对钛合金表面完整性的影响[J].中国表面工程,2019,32(2):128-136.
Ma F J, Luan S Y, Luo Q C, et al. Effects of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing on surface integrity of titanium alloy [J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 128-136 (in Chinese).
- [13] 姜海涛,邵忠财,魏守强.钛合金表面处理技术的研究进展[J].电镀与精饰,2010,32(10):15-20.
Jiang H T, Shao Z C, Wei S Q. Research progress of surface treatment techniques for titanium alloys [J]. Plating & Finishing, 2010, 32(10): 15-20 (in Chinese).