

永磁场磁力研磨 TC11 钛合金的实验研究

肖阳¹, 孙友松², 陈光忠¹

(1. 湖南信息职业技术学院, 长沙 410200; 2. 广东工业大学, 广州 510006)

摘要: 目的 解决钛合金机械加工后表面质量差的难题。方法 采用磁力研磨工艺对 TC11 钛合金进行了表面光整加工。以表面粗糙度为主要评价指标, 研究了磁力研磨工艺参数对钛合金表面质量的影响, 并对工艺参数进行了优化。采用优化后的工艺参数对钛合金进行了表面光整加工, 研究了磁力研磨工艺对钛合金金相组织的影响。结果 当加工间隙为 3 mm 时, 研磨压力适宜, 加工后工件表面粗糙度值最小。采用粒径为 100 目的磨粒使工件表面研磨加工后纹理更细, 表面粗糙度值最低。提高主轴转速, 工件表面材料去除率增加, 当主轴转速为 1500 r/min 时, 加工后工件表面粗糙度值最小。对比工件加工前后的金相组织, 加工后试样表面组织晶粒变细, 晶界增多, 工件表面应力状态由张应力转变为压应力。结论 实验确定了较优的工艺参数组合, 即: 加工间隙为 3 mm, 磨粒粒径为 100 目, 主轴转速为 1500 r/min。采用永磁场磁力研磨工艺, 能够大幅降低 TC11 钛合金表面粗糙度, 并使钛合金表面组织得到改善。

关键词: 钛合金; 磁力研磨; 光整加工; 工艺参数; 表面粗糙度; 金相组织

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)02-0229-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.039

Experimental Study of Magnetic Abrasive Finishing of TC11 Titanium Alloy in Permanent Magnetic Field

XIAO Yang¹, SUN You-song², CHEN Guang-zhong¹

(1. Hunan College of Information, Changsha 410200, China;

2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of poor quality of machined titanium alloy surface. Surface finishing was conducted to TC11 titanium alloy by virtue of magnetic abrasive process. Effects of process parameters of magnetic abrasive finishing on surface quality of titanium alloy was studied with surface roughness as the main evaluation criteria, and process parameters were optimized on this basis. Surface finishing was conducted by using the optimized process parameters, to study the influence of magnetic abrasive process on microstructure of titanium alloy. When the machining clearance was 3 mm, the grinding pressure was appropriate and the surface roughness of machined workpiece was the minimum; when abrasive grain in 100 meshes was used, the surface texture was fine, surface roughness value was the minimum; provided that the spindle speed

收稿日期: 2016-06-22; 修订日期: 2016-07-30

Received: 2016-06-22; Revised: 2016-07-30

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (14C0824); 广东省粤港关键领域重点突破项目 (2009Z019)

Fund: Scientific Research Project Supported by the Hunan Province Department of Education (14C0824); Supported by Major Breakthroughs in Key Areas of Guangdong-Hong Kong (2009Z019)

作者简介: 肖阳 (1982—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事精密加工与特种加工技术的研究与教学工作。

Biography: XIAO Yang (1982—), Male, Master graduate, Lecturer, Research focus: precision machining and special processing.

通讯作者: 陈光忠 (1968—), 男, 副教授, 主要从事零件表面强化技术及表面完整性研究。

Corresponding author: CHEN Guang-zhong (1968—), Male, Associate professor, Research focus: parts surface strengthening technology and surface integrity.

and surface material removal rate of the workpiece increased, surface roughness value of the machined workpiece was the minimum at the spindle speed of 1500 r/min; compared with metallographic structure of the workpiece before machining, the microstructure grain was refined, grain boundaries increased, and the surface tensile stress of workpiece became compressive stress. The experiments have determined the optimal process parameters combination, namely: machining clearance of 3 mm, magnetic abrasive size of 100 meshes and spindle speed of 100 r/min. Permanent magnetic abrasive process can greatly reduce the surface roughness and improve surface microstructure of TC11 titanium alloy.

KEY WORDS: titanium alloy; magnetic abrasive finishing; finishing processing; process parameters; surface roughness; metallographic structure

随着先进制造技术的快速发展和新型材料的广泛应用,装备制造领域对零件表面质量的要求也越来越高。钛合金作为一种重要的轻金属合金,以强度高、耐高温和抗腐蚀性能好等优异性能,被广泛应用于航空航天、汽车、船舶等重要领域^[1]。由于钛合金的韧性、化学活泼性高,磨削加工中工件表面易产生烧伤和微裂纹,并出现表面加工硬化现象,工件表面完整性下降,使零件的表面质量受到严重威胁^[2]。为使钛合金更好地应用于苛刻的服役环境,研究人员希望改善钛合金的表面质量以提高其使用性能,因此,对钛合金进行表面光整加工是非常有必要的。

光整加工通过降低零件表面粗糙度,细化零件表面形貌,改善材料表层组织,可以有效提高零件的表面完整性。目前常用的光整加工方法主要有手工抛光、化学和电化学抛光^[3-4]、超声波抛光^[5]、研磨^[6-7]及磁力研磨^[8-10]等。其中,磁力研磨是借助于磁性磨料在磁场中所产生的研磨压力,对工件表面进行研磨加工的光整加工工艺^[11],因具有加工装置简单、加工时温升小、自适应性强、柔性加工等优点,近年来在平面、孔表面及复杂型腔模具的光整加工中得到了广泛应用^[12]。文中使用磁力研磨加工工艺对 TC11 钛合金进行表面研磨加工,研究磁力研磨光整加工工艺对 TC11 钛合金的表面质量的影响。

1 磁力研磨加工机理

磁力研磨最早由苏联工程师提出,是利用磁场中的磁性磨粒对工件表面研磨加工的一种表面光整加工方法。加工时将具有磁性的磨料置于磁极和工件之间,在磁场力的作用下,磁性磨粒沿磁场线方向呈规律性排列,形成“弹性研磨刷”,并以一定的正压力作用于工件表面^[13-15],当磁极带动磁性磨粒高速旋转时,磁性磨粒和工件之间便产生相对运动,磨粒对工件表面反复进行微观切削,从而实现对工件表面的光整加工。

图1为磁力研磨加工原理示意图。规定沿磁力线的方向为 x 向,沿磁等位线的方向为 y 方向,其中磁等位线的方向垂直于磁力线方向。对于加工区域中的某点 A ,磨粒在该点所受到的磁力分别为:

$$F_x = V_0 \chi H \frac{\partial H}{\partial X} \quad (1)$$

$$F_y = V_0 \chi H \frac{\partial H}{\partial Y} \quad (2)$$

合力 F 可表示为:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$

式中: V_0 为磁性磨粒的体积; χ 为磁性磨粒的磁化率; H 为磁场中位置 A 处的磁场强度; $\frac{\partial H}{\partial X}$ 、 $\frac{\partial H}{\partial Y}$ 分别为磁场中 A 点沿 x 方向和 y 方向的磁场强度变化率。

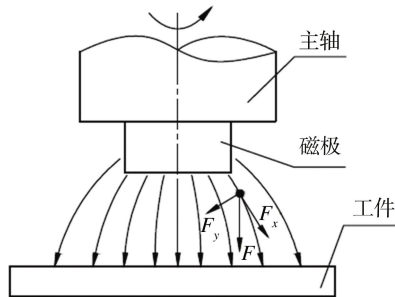


图1 磁力研磨加工原理

Fig.1 Principle of magnetic abrasive finishing

由以上受力分析可知,合力 F 的方向指向工件表面。在磁场力作用下,每颗磁性磨粒沿着 F 的方向排列成无数条磁串,并对工件表面产生一合力 P ,即磨粒对工件表面的研磨压力。其表达式为:

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (4)$$

式中: B 为磁场的磁感应强度; μ_0 为真空磁导率; μ_m 为磁性磨粒的相对磁导率。

当磁极带动磨粒高速旋转时,磨粒对工件表面主要有以下两方面作用:

1) 降低工件表面粗糙度。由于磨粒和工件之间存在研磨压力,磨粒的微刃将对工件表面产生微量

切削作用。在加工的初始阶段,磨粒的微刃比较锋利,可以在较短时间内降低工件的表面粗糙度。随着加工的进行,微刃将逐渐钝化,磨粒对工件表面的切削作用减弱,而挤压、抛光作用比较明显,使工件的表面质量得到进一步提高。

2) 改善表层组织。在磨粒对工件表面进行微量切削过程中,由于磨粒的切削刃负前角较大,当增大研磨压力时,切削刃对工件表面产生很大的压应力。在压应力作用下,工件表面发生塑性变形,使工件表面的耐磨性增强,材料的抗疲劳性能得到改善。

2 实验条件

采用实验室铣床改装的磁力研磨设备,工件材质为 TC11 钛合金,工件尺寸为 $130\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,磁极为钕铁硼永磁体,主轴转速为 $800 \sim 1500\text{ r/min}$,加工间隙为 $2 \sim 4\text{ mm}$,磨料采用烧结型氧化铝磨料,粒径为 $60 \sim 100\text{ 目}$ 。

采用北京时代检测公司生产 TR220 便携式表面粗糙度仪对工件的表面粗糙度进行测量,在工件表面加工区域测量 5 次并求取平均值,作为最终的测量结果。为消除加工前工件的表面缺陷,实验前依次采用 200#, 400#, 600#, 800#, 1000# 的砂纸对工件表面进行打磨。

3 工艺参数对表面粗糙度的影响

3.1 加工间隙对表面粗糙度的影响

在加工间隙分别为 2, 3, 4 mm 的条件下,取磨料粒径为 80 目,铣床主轴转速为 1200 r/min ,实验测得表面粗糙度随加工时间的变化如图 2 所示。在加工间隙为 3 mm 和 4 mm 时,表面粗糙度随加工时间的增加逐渐降低。而当加工间隙为 2 mm 时,表面粗糙度随加工时间的增加呈先减小后增大的趋势。这是因为在加工间隙为 2 mm 时,因加工间隙过小,加工区域的磁感应强度较高,由式(4)可知,此时的研磨压力最大,磨粒对工件表面的切削作用最强,因此在加工的起始阶段,工件的表面粗糙度值下降最快。随着加工的进行,表面粗糙度值在降低到最小值后反而增加。这是因为当加工间隙为 2 mm 时,加工间隙内磨粒数量降低,“弹性研磨刷”的长度缩短,“研磨刷”的柔韧度降低,长时间的加工使得磨粒对工件表面划伤严重,表面粗糙度值增高;当加工间隙为 4 mm 时,与加工间隙 2 mm 和 3 mm 相比,此间隙值最大,加工区域内工件表面漏磁现象严重,磁感应强度较低,由式(4)知,此时研磨压力最小,

磨粒对工件表面的切削力最小,加工效率最低。在相同的加工时间内,当加工间隙取 3 mm 时,工件表面粗糙度值最低。

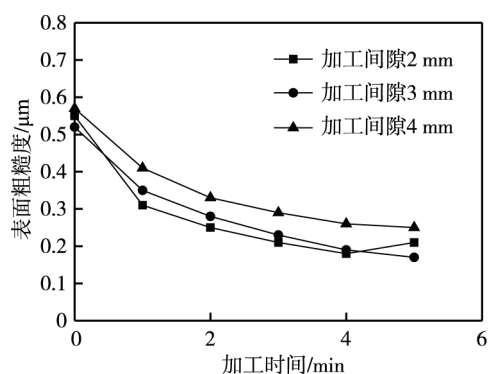


图 2 加工间隙对表面粗糙度的影响
Fig.2 Influence of machining gap on surface roughness of workpiece

3.2 磨粒粒径对表面粗糙度的影响

在加工间隙为 3 mm, 主轴转速为 1200 r/min , 磨粒粒径分别为 60 目、80 目、100 目的条件下,工件表面粗糙度随加工时间的变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,在加工起始阶段,磨粒粒径与加工效率成正比。当磨粒粒径为 60 目时,加工起始阶段的加工效率最高,但是加工完成后工件表面粗糙度值却最大。当磨粒粒径较大时,一方面磨粒之间的保持力增强,增加了“弹性研磨刷”的刚度;另一方面,粒径较大的磨粒具有更大的切削刃,对工件表面切削力强,因此加工效率高。随着加工的进行,磨粒的切削刃逐渐钝化,当继续进行研磨加工时,钝化的磨粒对工件表面的磨削作用严重下降,与此同时,当磨粒钝化后,易和工件表面之间发生粘着摩擦,工件表面温度升高,其结果是导致工件表层材料的屈服强度下降,当研磨压力较大时,磨粒将对工件表面造成划伤。磨粒的尺寸对加工后的工件表面粗糙度值有重要影响,其主要原因是磨粒的尺寸决定了工件表面的残留加工纹理,而粒径小的磨粒在工件表面产生更细的加工纹理,因此,当磨粒粒径为 100 目时,工件的表面粗糙度值最小。

由以上实验结果及分析可得出如下规律:当采用大尺寸的磨粒进行研磨加工时,加工效率高,但工件表面最终的研磨效果较差;采用小尺寸的磨粒进行研磨加工时,适当延长加工时间,可以获得最优的加工效果。为此,为提高加工效率和表面质量,当工件表面初始表面粗糙度值较小时,可采用小尺寸的磨粒进行加工;当工件表面初始表面粗糙度值较大时,在加工的初始阶段可采用大尺寸的磨粒,加工 $1 \sim 2\text{ min}$ 后可换用小尺寸的磨粒进行加工。

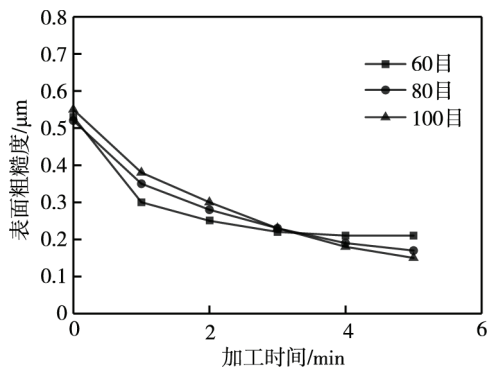


图3 磨粒粒径对表面粗糙度的影响

Fig.3 Influence of abrasive size on surface roughness of workpiece

3.3 主轴转速对表面粗糙度的影响

选用粒径为 100 目的磨粒,取加工间隙为 3 mm,设定主轴转速依次为 800, 1200, 1500 r/min,不同转速下表面粗糙度随加工时间的变化如图 4 所示。在加工时间为 5 min 时,1500 r/min 的转速条件下加工得到的表面粗糙度值最小,其次为 1200 r/min,转速为 800 r/min 时得到的表面粗糙度值最大。这是因为磁力研磨加工属于一种微切削加工,工件表面材料的去除依赖于磨粒和工件的相对运动。从提高加工效率的角度考虑,主轴转速越高,单位时间内磨粒与工件表面之间的相对位移量就越大,工件表面的材料去除量增大,加工后工件表面粗糙度值就越低。从图 4 可以明显看出,当主轴转速为 1500 r/min 时,加工过程中表面粗糙度值下降最快。但是主轴转速并不是越大越好,过高的主轴转速一方面易造成磨粒飞溅,另一方面使工件表面发热严重,影响加工效果。

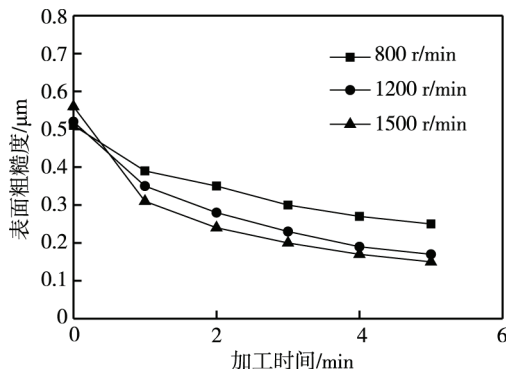


图4 主轴转速对表面粗糙度的影响

Fig.4 Influence of spindle speed on surface roughness of workpiece

由以上实验及分析,确定磁力研磨加工 TC11 钛合金较优的工艺参数组合为:加工间隙选取 3 mm,磨粒粒径选取 100 目,主轴转速为 1500 r/min。

4 磁力研磨加工对钛合金组织性能的影响

在磁力研磨的过程中,由于磨粒的尺寸很小,磨粒与工件之间近似于点接触,当磨粒受到法向的磁场力后,将对工作表面产生很大的压强。当磁极相对工件做高速旋转运动时,无数条“弹性研磨刷”将对工件表面产生强烈的压力。“弹性研磨刷”最外层的磨粒在工件摩擦力的作用下不断翻滚,因此磨粒对工件表面产生强烈的滚压作用,使工件表面产生塑性变形。

为分析磁力研磨工艺对 TC11 钛合金表面组织性能的影响,采用 3 mm 的加工间隙,100 目粒径的磨粒、1500 r/min 的主轴转速,对 TC11 钛合金试样进行了加工,加工时间为 5 min。采用 FJ-1A 金相显微镜对试样加工前后的金相组织进行了观察,如图 5 所示。从图 5 可以看出,加工前试样表面组织晶粒粗大,晶界不明显;研磨加工后的试样,晶粒尺寸变小,晶界增多。这表明,采用上述工艺参数对 TC11 钛合金进行磁力研磨能够显著改善试样的组织性能。

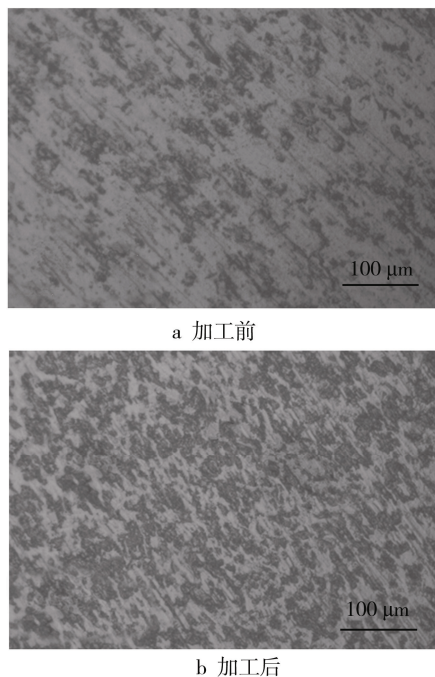


图5 磁力研磨加工前后试样的金相组织

Fig.5 The microstructure of samples that before and after magnetic abrasive processing

采用 X-350A 型 X 射线应力分析仪对试样加工前后的残余应力进行了测试。测量方法为侧倾固定 ψ 法, ψ 值依次选取 0°、10°、20°、30°。衍射晶面为 Ti{213} 晶面,管电压为 40 kV,管电流为 6 mA,采用 Cu 靶辐射。残余应力的测试结果如图 6 所示。加工前试样表面为张应力,其值为 47 MPa;磁力研磨加工后,由于工件表面发生塑性变形,工件表面应力

状态由张应力转为压应力, 其值为 78 MPa。这表明, 磁力研磨加工有利于钛合金疲劳寿命的提高。

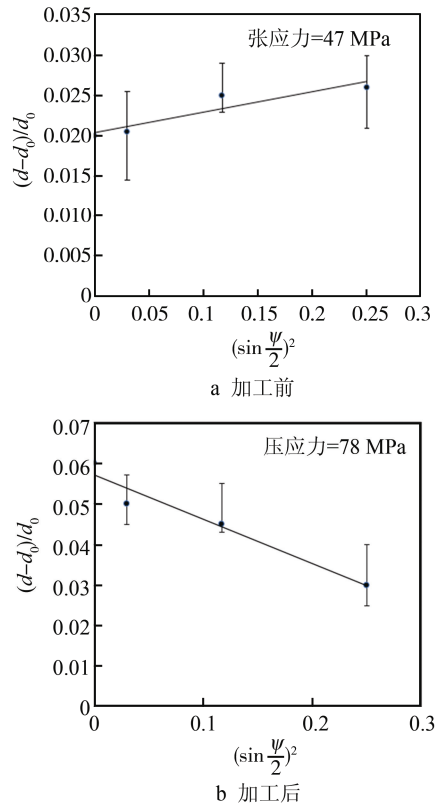


图 6 磁力研磨加工前后试样表面的残余应力

Fig.6 The surface residual stress of specimen before and after processing

5 结论

1) 不同加工间隙下加工区域内研磨压力不同, 实验结果差异较大。加工间隙过小时, 研磨压力太大, 易对工件表面造成划伤; 加工间隙过大时, 研磨压力太小, 磨粒对工件表面的切削力不足, 工件表面材料去除困难; 增大磨粒粒径可提高加工效率, 然而小粒径的磨粒能够产生更细的加工纹理, 从而得到较低的表面粗糙度值; 提高主轴转速, 单位时间内工件表面材料去除量增加, 在相同的加工时间内, 工件表面粗糙度值下降更为明显。

2) 通过实验确定较优的工艺参数组合为: 加工间隙取 3 mm, 磨粒粒径取 100 目, 主轴转速取 1500 r/min。

3) 与加工前试样表面组织相比, 磁力研磨加工后, 试样表面组织晶粒尺寸变小, 晶界增多, 磁力研磨加工对 TC11 钛合金表面组织改善效果明显; 研磨加工后, 工件表面应力状态由张应力转为压应力, 这对提高钛合金的疲劳寿命是有益的。

参考文献:

[1] 张彩珍, 杨健, 魏磊, 等. 航空发动机钛合金喷丸强

化残余应力研究[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 208—212.

ZHANG Cai-zhen, YANG Jian, WEI Lei, et al. Shot-peened Residual Stress of Aeroengine Titanium Alloy Blades[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 208—212.

[2] 盛晓敏, 唐昆, 余剑武. TC4 钛合金超高速磨削工艺试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008(9): 28—32.

SHENG Xiao-min, TANG Kun, YU Jian-wu. Process Test Research on TC4 Titanium Alloy in Ultra-high Speed Grinding[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008(9): 28—32.

[3] 高永超, 程好, 杨淑平, 等. 金属基带的连续非接触式电化学抛光[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 105—108.

GAO Yong-chao, CHENG Hao, YANG Shu-ping, et al. Non-contact and Continuous Electrochemical Polishing of the Metal Strip[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 105—108.

[4] 陈虎, 杨卫英. 电化学抛光对 HR-1 不锈钢表面的影响[J]. 电镀与环保, 2015, 35(2): 37—40.

CHEN Hu, YANG Wei-ying. Influence of Electrochemical Polishing on the Surface of HR-1 Stainless Steel[J]. Electroplating & Pollution Control, 2015, 35(2): 37—40.

[5] 张占立, 熊明照, 王恒迪, 等. 氮化硅陶瓷滚子磁流变、化学与超声复合抛光工艺试验[J]. 轴承, 2016(2): 14—19.

ZHANG Zhan-li, XIONG Ming-zhao, WANG Heng-di, et al. Polishing Processing Test for Silicon Nitride Ceramic Rollers Based on Magnetorheological and Chemo-Ultrasonic Compound Technology[J]. Bearing, 2016(2): 14—19.

[6] 陈光忠, 何志坚, 杨岳. 离心研磨工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金表面组织性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 101—105.

CHEN Guang-zhong, HE Zhi-jian, YANG Yue. Influence of Centrifugal Grinding Process on Surface Microstructure Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy [J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 101—105.

[7] 韩宝军, 何琼, 杨妙. 机械研磨处理 AZ91D 镁合金表面晶粒细化研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 34—36.

HAN Bao-jun, HE Qiong, YANG Miao. Investigation of Surface Grain Refinement of AZ91D Magnesium Alloys by Surface Mechanical Attrition Treatment [J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 34—36.

[8] NGUYEN N T, TRAN T N, YIN S H, et al. Multi-objective Optimization of Improved Magnetic Abrasive Finishing of multi-curved Surfaces Made of SUS202 Material[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1—11.

[9] ZHOU K, CHEN Y, DU Z W, et al. Surface Integrity of Titanium Part by Ultrasonic Magnetic Abrasive Finishing[J]. International Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80: 997—1005.

- [10] 高国富, 王岩. 磁力研磨加工技术研究进展[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 813—817.
GAO Guo-fu, WANG Yan. Research Progress of Magnetic Abrasive Finishing Technology[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(6): 813—817.
- [11] WANG Yan, HU De-jin. Study on the Surface Finishing of Tubing by Magnetic Abrasive Finishing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(1): 43—49.
- [12] 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 Ming, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Inner Surface of Titanium Alloy Tube by Electrochemical Magnetic Abrasive Compound Finishing[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 123—131.
- [13] NISHIDA H, SHIMADA K, GOTO M. Polishing Inner capillary Walls by a Magnetic Compound Fluid[J]. Int J Appl Electromagnet Mech, 2007, 25(1/4): 25—29.
- [14] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 814—817.
- [15] HAN Bing, LIU Li-xin, CHEN Yan. Optimization of Process Parameters on Magnetic Abrasive Finishing to Inner Surface of Bending Pipe[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 814—817.
- [16] ZHOU K, CHEN Y, DU Z W, et al. Surface Integrity of Titanium Part by Ultrasonic Magnetic Abrasive Finishing[J]. International Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80: 997—1005.