

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.05.005

开槽仿形磁极在轴承内圈滚道光整中的应用

王 杰, 陈 燕*, 吕旖旎, 张东阳

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 为解决轴承内圈滚道表面抛光困难及研磨不均匀的问题, 选用了开槽仿形磁极对轴承内圈滚道表面进行光整加工。采用 Ansys Maxwell 对比分析了开槽仿形磁极和仿形磁极的磁场分布, 选用控制变量法探讨了各试验参数对轴承表面光整加工的影响。结果表明, 在磁性研磨粒子粒径为 $185\ \mu\text{m}$, 轴承与磁极间隙为 $2\ \text{mm}$, 工件转速为 $1200\ \text{r/min}$ 的条件下, 加工时间 $40\ \text{min}$, 表面粗糙度由 $1.35\ \mu\text{m}$ 下降为 $0.13\ \mu\text{m}$, 表面缺陷得到有效去除。

关键词: 开槽仿形磁极; 表面粗糙度; 磁力研磨; 表面形貌

中图分类号: TG356.28

文献标识码: A

Application of Slotted Profiling Magnetic Pole in Bearing Inner Ring Groove Finishing

WANG Jie, CHEN Yan*, LV Yini, ZHANG Dongyang

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

Abstract: In order to solve the problem of difficult polishing and uneven grinding of the inner ring raceway surface of the bearing, slotted profiling magnetic pole is selected to finish the inner ring raceway surface of the bearing. The magnetic field distribution of the slotted profiling magnetic pole and the profiling magnetic pole was analyzed by Ansys Maxwell and the influence of test parameters on bearing surface finishing was discussed by control variable method. The results show that when the particle size of the magnetic abrasive grains is $185\ \mu\text{m}$, the distance between the bearing and the magnetic pole is $2\ \text{mm}$, the workpiece rotation speed is $1200\ \text{r/min}$ and the processing time is $40\ \text{min}$, the bearing surface roughness could reduce from $1.35\ \mu\text{m}$ to $0.13\ \mu\text{m}$. Surface defects can be removed effectively.

Keywords: slotted profiling magnetic pole; surface roughness; magnetic grinding; surface morphology

随着机械工艺技术的持续发展, 行业对产品的质量要求在逐步提高, 因此如何使零件得到更好的表面质量, 强化零件的使用性能, 延长零件的服役寿命是必须彻底解决的关键问题。轴承内圈滚

道表面质量的好坏, 对轴承承受载荷的大小起着至关重要的作用。在实际的工作过程中, 滚动体在具有凹陷、凸起、裂纹等缺陷的粗糙的内圈滚道表面上滚动, 会增大滚道与滚动体的摩擦力, 容易产生

收稿日期: 2019-09-20

修回日期: 2019-10-22

通信作者: 陈燕, email: 1336852522@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)

噪声与振动,加速轴承内圈的磨损,降低轴承的使用寿命^[1-2]。磁粒研磨技术由于具有独特以柔克刚的加工特点,能够对工件表面进行微小去除,有很广泛的应用前景^[3]。轴承内圈是一个中间凹、具有弧度的不规则环形槽,普通的磁粒研磨加工不能对轴承内圈均匀的加工。因此,对轴承内圈滚道表面光整加工是急需解决的难题。

近年来,科研人员在轴承表面的光整加工方面开展了大量研究,并取得了一定成果。清华大学的周焯^[4]采用砂带磨削法进行抛光,该法虽然使轴承表面形貌有所改善。但砂带与工件表面为刚性接触,只能加工平面零件,不能保证表面精度,有一定的局限性。张世亮^[5]等利用磁力研磨的方法,在磁场作用力的条件下对轴承零件进行光整加工,此方法虽然满足精度要求,但使用电磁,具有能量损耗,加工效率低。魏泽飞等^[6]采用电化学溶解表面尖端再用机械磨削加工的复合方法来提高轴承表面质量,加工后的表面质量得到大幅提高,但影响因素多,误差大,污染环境。本文采用开槽仿形磁极对轴承内圈滚道进行加工,利用开槽磁极形状与轴承内表面滚道的仿形结构,增大磁极与轴承滚道的接触面积,使加工区域均匀受力,增大加工区域的磁场强度。对轴承内圈滚道实现了高效的光整加工,得到更高的表面质量。

1 加工原理

1.1 磨粒受力分析

图1为开槽仿形磁极加工示意图及单颗磨粒粒子受力分析图。磁化后的磨粒在磁场力和摩擦力的共同作用下,形成具有柔性的“磁粒刷”,并吸附在磁极上。工件与磁极产生相对位移时,“磁粒刷”对工件表面进行划刻、磨擦,以去除表面缺陷。由于磁极头形状与凹槽外形吻合,且磁粒刷具有很好的柔性和自适应性,因此对工件外形尺寸的影响很小,并可实现均匀加工^[7]。

由图1可以看出,单颗磨料粒子受力时, ΔF 是沿 ΔF_x 磁力线方向和 ΔF_y 等磁位方向的合力,其大小为:

$$\Delta F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

合力 ΔF 可分解成竖直方向所受的研磨压力 P 和水平方向所受的驱动力 F_t ^[8],则:

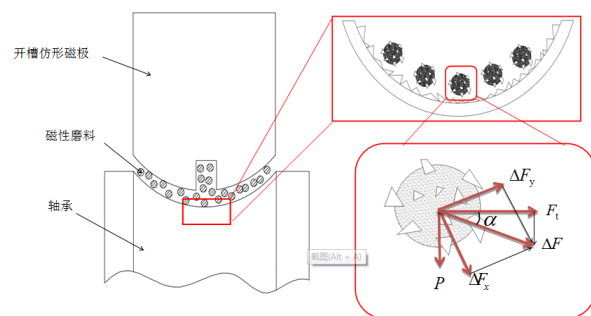


图1 开槽仿形磁极加工示意图及单颗磨粒受力分析
Fig.1 Schematic diagram of slotted profiling magnetic poles and analysis of the force of a single abrasive particle

$$P = \Delta F \sin \alpha = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (2)$$

$$F_t = \Delta F \cos \alpha \quad (3)$$

式中: B 为导磁件与磁场之间的磁感应强度,mT; μ_m 为磁性磨粒的相对磁导率,H/m; μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; α 为水平方向所受的驱动力与合力的夹角。

由数学公式Preston^[9]得出结论:

$$R(x, y) = kPV(x, y) \quad (4)$$

式中: R 为单位时间内材料去除量,mg; P 为工件所受磁性磨料的压力,N; V 是工件与磁极二者之间的相对移动速度, $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为比例常数。

由公式(2)和(4)得知,提高轴承滚道表面的光整加工效率有两种方案:一是增加轴承表面与磁性磨料的压力,二是提升轴承与磁极之间的相对运动。增加磁场强度可以提升工件表面的研磨压力,但是过高的运动速度对工件表面质量有一定影响,因此,在实际加工过程中,轴承转速保持在一个合适的范围^[8]。

1.2 Ansys Maxwell数据分析

利用Ansys Maxwell v16.1软件研究分析了开槽仿形磁极和普通仿形磁极两种建模的磁感应强度,结果如图2所示。加工区域的两种磁极顶部分别添加一条直线,可得出该线上磁感应强度 B 的变动的具体情况,分析结果如图3所示。当使用仿形磁极时,波谷处磁感应强度可达300 mT,波峰值处达到500 mT。当磁极为开槽仿形磁极时,波谷的磁感应强度可低至225 mT左右,波峰处可达到550 mT。开槽仿形磁极波峰波谷差大于仿形磁极的波峰波谷差,更有利于磁性磨粒更替搅拌、翻滚,使更多的

磁性磨料参与到工作中,更好的提高研磨效率。

在仿形磁极的端部开槽,在摩擦力与磁场力二者共同作用下,可将磁性磨料挤压、填充到开槽磁极棱边处,由于磁场尖点效应磁极凹槽棱边处的磁

力大于凹槽内部的磁力,大幅提高磁力研磨的磁场强度梯度的变化,使研磨粒子更加活跃,提高磨料与磁极之间的切削力与压力,大幅增强磁性磨料的使用效率,从而得到更好的表面质量^[10-11]。

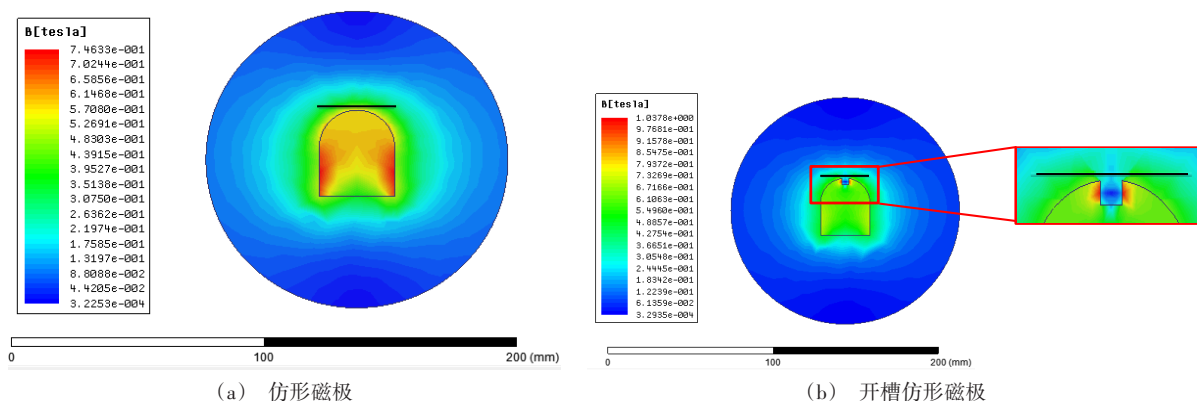


图2 开槽仿形磁极与仿形磁极磁感强度

Fig.2 Cloud diagrams of magnetic field strength on different magnetic pole

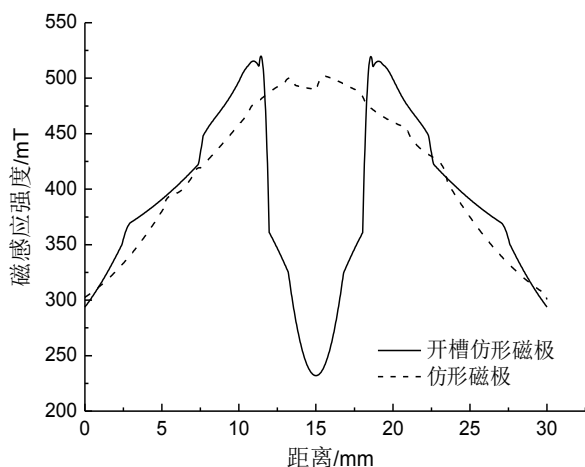


图3 两种磁极磁感应强度变化曲线图

Fig.3 Curve of magnetic induction intensity of two magnetic poles

观测工件原始表面原始微观形貌^[12]。

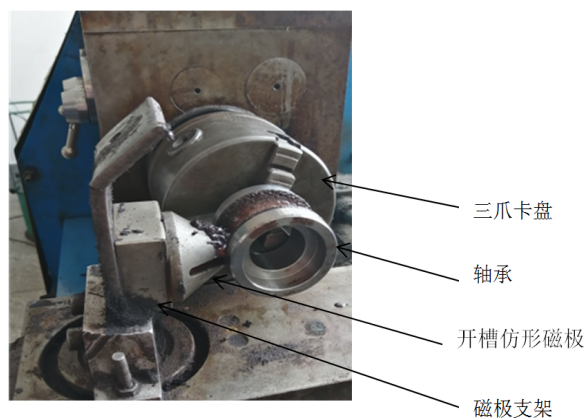


图4 加工装置

Fig.4 Working device

2 实验部分

2.1 实验条件与方法

实验装置如图4所示,将轴承内圈固定在三爪卡盘上,调整开槽仿形磁极与轴承的间隙,并填充磨料。将工件用超声波清洗机冲洗干净,晾干后用广州市广精精密仪器有限公司生产的JB-8E触针式表面粗糙度测量仪测定原始表面粗糙度值;使用日本基恩士生产的VHX-500F超景深3D电子显微镜

2.2 实验参数

表1为开槽仿形磁极加工轴承内圈滚道的实验参数。

表1 实验参数

Tab.1 Experimental parameters

主轴转速/($r \cdot \min^{-1}$)	磨粒粒径/ μm	磁极与工件间隙/mm
1000	150	1
1200	185	2
1400	250	3

选用的磁性磨料是由Fe粉与 Al_2O_3 按2:1混合烧结而成,磁极选用为钕铁硼的开槽仿形磁极,研磨液选用水基式研磨液6 mL,加工时间为40 min。

3 结果与讨论

3.1 不同工件转速对表面粗糙度的影响

在工件间隙为2 mm,磁性磨料粒径为150 μm 的条件下,研究了工件转速对表面粗糙度值的影响,结果如图5所示。由图5可以得知,加工前10 min,工件转速越高,轴承表面粗糙度下降越快。加工到40 min,工件转速1400 r/min的表面粗糙度值高于转速1200 r/min的值,低于1000 r/min的表面粗糙度值。影响结果的主要原因是:工件转速越高,单位时间内磁性磨料磨削滚道表面的次数越多,表面粗糙度下降的越来越快。但是,当轴承转速过高时,磨料所受的离心力大于磁场的吸附力,压附在轴承表面的磁性磨料在离心力的作用下,脱离磁场力的束缚远离加工区域,导致加工区域的磁性磨料减少,形成的磁力刷对轴承表面的切削力减弱,加工效率降低。从图5还可以看出,采用开槽仿形磁极加工40 min后,工件表面粗糙度值为0.14 μm 。为了更好的提高对轴承内圈滚道表面粗糙度的加工效率,故选取1200 r/min。

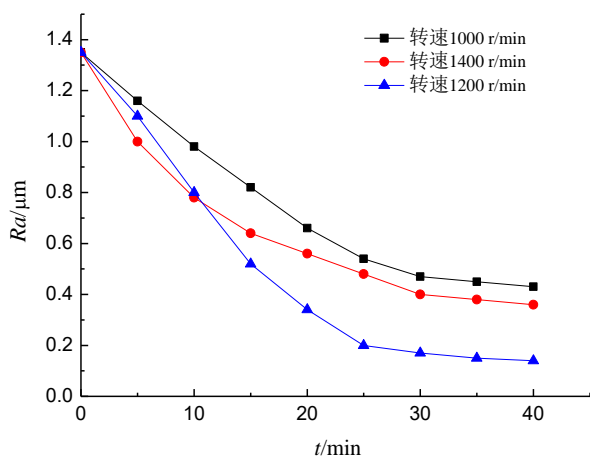


图5 工件转速对表面粗糙度的影响

Fig.5 Effect of workpiece rotation speed on surface roughness

3.2 不同磨料粒径对表面粗糙度的影响

在工件转速为1200 r/min,加工间隙为1 mm的条件下,研究了磨料粒径对表面粗糙度值的影响,结果如图6所示。在加工前20 min,粒径为250 μm

研磨后的表面粗糙度值比150 μm 和185 μm 表面粗糙度值的下降速率大,原因是轴承原始表面的波峰波谷相差较大,磁性粒子在加工时最先切削波峰,加工过程中工件波峰所受的背吃刀量最大,表面粗糙度下降速率很快。在工作时间为20 ~ 40 min,磨料粒径150 μm 加工后表面粗糙度值降低速率较慢,原因是粒径太小时,所受磁场力太小,工件所受压力也变小,导致切削效率降低,粒径为250 μm 受磁场力更大,使磨料粒子的切削刃对轴承表面产生过磨的现象,粗糙度值变大,而粒径为185 μm 的磨料粒子比其余两种粒径的磁性磨料较好,且加工40 min后,表面粗糙度值由原来的1.35 μm 降到0.16 μm 。

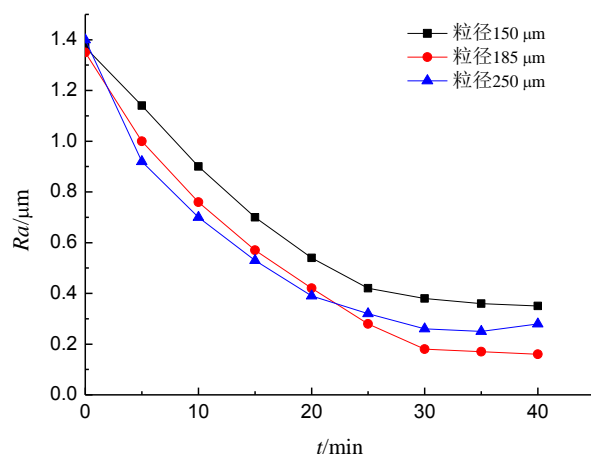


图6 磨料粒径对表面粗糙度的影响

Fig.6 Effect of abrasive particle size on surface roughness

3.3 不同加工间隙对表面粗糙度的影响

在工件转速为1200 r/min,磁性磨料粒径为185 μm 的条件下,研究了加工间隙对表面粗糙度值的影响,结果如图7所示。在工作时间0 ~ 15 min,轴承表面粗糙度值随工作时间的上升不断减小。当加工时间25 ~ 40 min时,加工间隙为1 mm的表面粗糙度大于加工间隙为2 mm的表面粗糙度。这是因为在加工间隙为1 mm时,加工间隙过小,产生的磁感应强度较高,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,当加工间隙内的磁性磨料的数量被挤压出工作区域,导致参与加工的磁性磨料数量减少,降低了磁性磨料的柔性,使轴承表面被

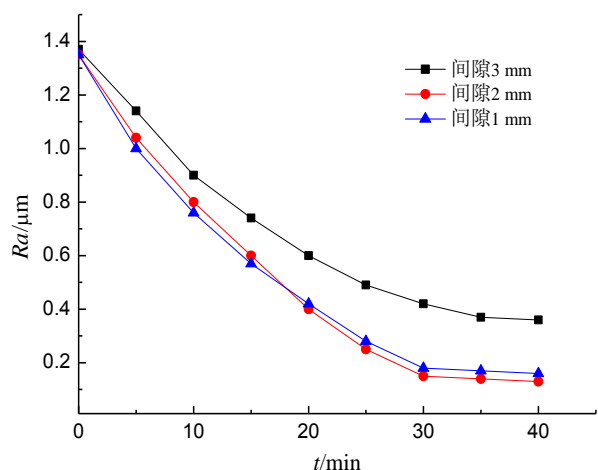


图7 加工间隙对表面粗糙度的影响

Fig.7 Effect of machining gap on surface roughness

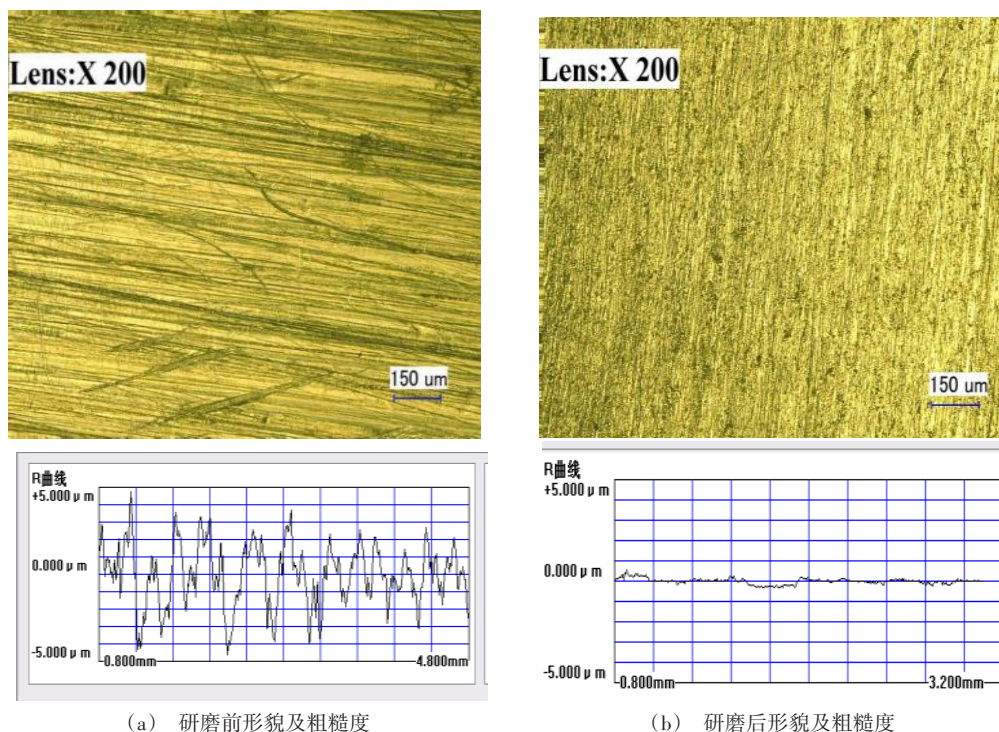
划伤,表面粗糙度值即会增高;当加工间隙为3 mm时,间隙值最大,此时加工区域内的磁感应强度很

小,由公式(4)得知,此时轴承表面所受的研磨压力最小,材料去除量最小。

4 开槽仿形磁极对轴承内圈滚道表面形貌的影响

图8为轴承内圈滚道原始表面形貌。使用VHX-500F超景深显微镜放大200倍可以明显看出,原始内表面滚道缺陷较多,表面形貌中有明显的划痕、凹坑,并且纹理的深浅不一,平整度较差。使用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪测量出轴承表面原始表面粗糙度为 $1.35\ \mu\text{m}$ 。

在加工间隙为2 mm,转速为1200 r/min,磨料粒径 $185\ \mu\text{m}$ 的条件下,采用开槽仿形磁极对轴承内表面滚道进行研磨,表面形貌如图所示,轴承原始表面的划痕、沟槽等缺陷都被有效的去除,滚道表面十分平整、光滑,表面质量较好,测得表面粗糙度值为 $0.13\ \mu\text{m}$ 。



(a) 研磨前形貌及粗糙度

(b) 研磨后形貌及粗糙度

图8 研磨前后的表面形貌和粗糙度变化

Fig.8 Surface morphology and roughness changes before and after grinding

5 结论

(1)利用开槽磁极形状与轴承内圈滚道的仿形

结构,可增大磁极与轴承滚道的接触面积,使加工区域均匀受力,提高加工区域的磁场强度。轴承内圈滚道可实现高效的光整加工,得到更高的表面

质量。

(2)当磁性研磨粒子粒径为 $185\text{ }\mu\text{m}$,轴承与磁极间隙为 2 mm ,工件转速为 1200 r/min 时,采用开槽仿形磁极可实现对轴承内圈滚道的均匀研磨,研磨 40 min 后,表面粗糙度可由 $1.35\text{ }\mu\text{m}$ 下降为 $0.13\text{ }\mu\text{m}$,表面缺陷得到有效去除。该方法为轴承内圈滚道的光整加工提供了新的途径。

参考文献

- [1] 张晋. 机械加工表面质量对零件的使用性能的影响及控制措施[J]. 山东工业技术, 2017(1): 21.
Zhang J. The influence of machining surface quality on the performance of parts and control measures [J]. Shandong Industrial Technology, 2017(1): 21 (in Chinese).
- [2] 侯朋坤, 杨胜强, 李文辉, 等. 粘结法制备磁性磨料及其对轴承钢外圆表面的光整加工研究[J]. 现代制造工程, 2015(3): 75-78.
Hou P K, Yang S Q, Li W H, et al. Study on preparation of magnetic abrasives by bonding and finishing of the external surface of bearing steel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(3): 75-78 (in Chinese).
- [3] 孙岩, 陈燕, 兰勇. 磁力研磨法应用于不同材质工件的光整加工[J]. 制造技术与机床, 2013(11): 88-91.
Sun Y, Chen Y, Lan Y. Magnetic grinding method applied to the finishing of workpieces with different materials [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2013(11): 88-91 (in Chinese).
- [4] 周焯, 冯之敬, 苏玉达, 等. 采用精密砂带超精轴承滚道的工艺研究[J]. 机械工艺师, 1995(11): 2-4.
Zhou X, Feng Z J, Su Y D, et al. Research on the technology of super-precision bearing raceway using precision abrasive belts [J]. Mechanical Technologist, 1995(11): 2-4 (in Chinese).
- [5] 张世亮, 何真. 滚动轴承滚道磁力研磨超精加工的实验研究[J]. 制造技术与机床, 2000(10): 32-34.
Zhang S L, He Z. Experimental study on magnetic finishing and superfinishing of rolling bearing raceway [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2000(10): 32-34 (in Chinese).
- [6] 魏泽飞, 李蕾, 余东生, 等. 电化学机械加工对轴承滚子表面质量及凸度的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 119-124.
Wei Z F, Li L, Tong D S, et al. Effect of electrochemical machining on surface quality and convexity of bearing rollers [J]. Surface Technology, 2018, 47(7): 119-124 (in Chinese).
- [7] 吕兴国, 韩冰, 陈燕. 基于磁力研磨法对微型槽的精密研磨研究[J]. 航空制造技术, 2016(14): 93-96+101.
Lu X G, Han B, Chen Y. Research on precision grinding of micro grooves based on magnetic grinding method [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(14): 93-96 + 101 (in Chinese).
- [8] 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. Electrochemical magnetic grinding composite finishing test of titanium alloy tube inner surface [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 123-131 (in Chinese).
- [9] 韩晓露, 王家忠, 弋景刚, 等. 基于Preston方程的反射杯抛磨工艺参数研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(14): 12-16.
Han X L, Wang J Z, Tong J G, et al. Study on the parameters of polishing process of reflector cup based on Preston equation [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(14): 12-16 (in Chinese).
- [10] 陈燕, 张耀明, 邓超, 等. V形磁铁在SUS304管内表面抛光中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 187-191.
Chen Y, Zhang Y M, Deng C, et al. Application of V-shaped magnets in polishing the inner surface of SUS304 tube [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 187-191 (in Chinese).
- [11] Vahdati M, Shokuhfar A. A trend toward abrasive nano finishing of plane surfaces with magnetic field energy [J]. Material Wissenschaft and Werkstofftechnik, 2008, 39: 167-170.
- [12] 张龙龙, 焦安源, 刘新龙, 等. 电解-磁粒复合研磨对TCTC4孔棱边毛刺的光整加工[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(10): 1-5.
Zhang L L, Jiao A Y, Liu X L, et al. Finishing of TCTC4 hole edge burr by electrolytic-magnetic particle composite grinding [J]. Plating & Finishing, 2018, 40(10): 1-5 (in Chinese).