

力流变工艺对轴承滚道表面质量与精度的影响

郭路广^{1,2} 戴卓豪¹ 王东峰^{1,3} 王旭¹ 吕冰海¹ 袁巨龙^{1*}

1.浙江工业大学机械工程学院,杭州,310014

2.衢州学院机械工程学院,衢州,324000

3.洛阳轴研科技有限公司,洛阳,471003

摘要:为获得高质量的套圈滚动面形貌,改善形状精度,提高轴承服役性能,采用力流变抛光技术设计了正交试验方案,确认了试验参数范围,研究了力流变加工过程中抛光速度、磨粒粒径和磨粒浓度对材料去除率(MRR)和表面粗糙度 Ra 的影响规律。对数据进行信噪比分析,采用方差分析方法得到工艺参数对加工结果的影响权重和最优工艺参数。对比了最优参数加工前后套圈的形状精度,建立了力流变加工模型来分析精度改善机理。结果表明,抛光速度对材料去除率和表面粗糙度的影响都最为显著,磨粒粒径和浓度的影响相对较低。在最优工艺参数(抛光盘转速 90 r/min,磨粒粒径 2.5 μm ,质量分数 6%)下抛光 90 min, Ra 从初始的 322 nm 下降到 12.982 nm,且方差不超过 2.158 nm^2 ,平均圆度从抛光前的约 3.05 μm 下降到约 1.67 μm 。仿真模型揭示了形状精度改善的原因是凸出部位易形成更高的材料去除率。研究结果表明,采用优化的力流变抛光工艺可有效提高轴承套圈滚道的表面质量和形状精度。在提高轴承服役性能的高质量加工方面,力流变抛光技术提供了一种可行方案。

关键词:力流变抛光;轴承;套圈;超精密加工;剪切增稠

中图分类号: TG739

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Force Rheological Polishing Processes on Surface Quality and Accuracy of Bearing Raceways

GUO Luguang^{1,2} DAI Zhuohao¹ WANG Dongfeng^{1,3} WANG Xu¹ LYU Binghai¹ YUAN Julong^{1*}

1.College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310014

2.College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang, 324000

3.Luoyang Bearing Science and Technology Co., Ltd., Luoyang, Henan, 471003

Abstract: To obtain high-quality ring rolling surface morphology, improve shape accuracy and improve bearing service performance, GCr15 ring raceway was polished by force rheological polishing technology. The orthogonal experimental scheme was designed and the range of experimental parameters was confirmed. The effects of polishing speed, abrasive particle size and abrasive concentration on material removal rate(MRR) and surface roughness Ra were studied. The signal-to-noise ratio of the datum was analyzed, and the variance analysis method was used to obtain the influence weight of the processing parameters on the processing results, and the optimal processing parameters were obtained. The shape accuracy of the rings before and after the optimal parameter processing was compared, and the force rheological processing model was established to analyze the improvement mechanism. The polishing speed has the most significant effects on the MRR and surface roughness, and the abrasive particle size and concentration have relatively low effects. Under the optimal processing parameters(polishing disc speed 90 r/min, abrasive particle size 2.5 μm , concentration 6%) polishing 90 min, the value of surface roughness Ra decreases from the initial 322 nm to 12.982 nm, and the variance do not exceed 2.158 nm^2 . The roundness decreases from about 3.05 μm before polishing to about 1.67 μm . The simulation model reveals that the reason for the improvement of shape accuracy is that the protruding part is easy to form a higher MRR. Polishing the bearing ring raceway with the optimized force rheological polishing processes may improve the surface quality and shape accuracy of the bearing ring raceway effectively, and provide a feasible solution for high-quality processing to improve the service performance of the bearings.

Key words: force rheological polishing; bearing; ring; ultra-precision machining; shear thickening

收稿日期:2023-11-19 修回日期:2025-01-13

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2000402);浙江省自然科学基金(QZQN25E050002)

0 引言

影响轴承发生疲劳磨损的因素非常多,表面质量是引发轴承疲劳磨损失效的主要原因^[1]。初

始表面质量缺陷导致润滑状态变差,服役状态异常^[2-3]。大量研究证明,在一定的接触应力下,良好的表面粗糙度和精度能改善润滑状态,初始裂纹不易发展,从而提高轴承钢的抗疲劳磨损能力^[4-7]。因此,寻找适合轴承滚道、滚动体的超精密加工工艺,从而抑制轴承钢表面的初始缺陷是必要的。当前,轴承滚子采用无心磨削作为最后一道精密加工工序;套圈滚道常采用磨削后的油石超精作为最后一道精密加工工序。由于都采用磨粒强制性切入的加工方式,磨削热和力不可避免,易造成表面变质层。

先进的超精密加工技术是提高工业基础件表面质量的有效方法^[8-11]。在磨削领域,电化学磨削技术(electro-chemical grinding, ECG)是一种结合了传统电解加工(electro-chemical machining, ECM)和机械磨削的复合加工方法^[12]。王旭等^[13]将 ECG 方法应用于轴承滚道的光整加工,滚道表面粗糙度 R_a 降至 27 nm,获得了理想的表面形貌。NOVAK 等^[14]提出了砂轮在线电解修整(electrolytic in-process dressing, ELID)磨削方法,其原理是通过电解砂轮结合剂(主要是金属结合剂)使磨粒不断露出。RAFFLES 等^[15]研究了不同粒径的磨粒磨削质量的影响规律,并使用 12000 号超硬磨料磨削轴承钢,得到了 $R_a = 2$ nm 的表面。有学者结合 ELID 和 ECG 两种电解方法,提出了双电解磨削技术(dual electrolytic grinding, DEG)^[16]。JIAO 等^[16]采用 DEG 技术,顺利得到了 $R_a = 5$ nm 的轴承外圆。尹龙等^[17]采用超声振动辅助磨削套圈滚道,可获得最低表面粗糙度 $0.28 \mu\text{m}$ 的表面。先进磨削技术具有效率高、去除稳定的优势,但是引入了电源及振动系统,导致影响表面质量的工艺参数过多,同时设备要求高,成本高昂,不够绿色环保。磁流变加工技术和磨粒流光整技术是典型柔性超精密加工技术,由于磨粒的非强制性切入磨削,可以得到近无残余应力的光滑表面。LIU 等^[18]采用小球端永磁抛光头控制磁流变抛光,加工不规则表面,得到了 $R_a = 10$ nm 的表面。WU 等^[19]抛光套圈滚道, R_a 从初始的 $0.4 \mu\text{m}$ 下降到 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。但磁流变抛光技术设备、材料成本高昂,不符合轴承大批量的生产特点。磨粒流工艺的粗糙度加工极限较高,不符合轴承滚动面的加工要求。

1 力流变抛光原理

采用具有剪切增稠效应的抛光液^[20]冲击工件表面去除材料,即为剪切增稠抛光(shear-

thickening polishing),有学者将这种利用抛光液受剪切力产生流变进行柔性加工的技术归纳为力流变抛光(force rheological polishing, FRP)^[21]。相比于磁流变等抛光技术,FRP 具有高效高质、绿色环保的优点^[22]。根据经典 Bingham 模型,剪切增稠抛光液的本构方程为

$$\tau = \tau_s + \mu_0 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (1)$$

其中, τ_s 为抛光液所具有的初始的屈服剪应力,在某一具体环境中为常数。壁面所受抛光液的切应力 τ 与来流速度 u 、间隙 y 以及抛光液本身流变特性相关。如图 1 所示,当没有工件时,势流速度梯度为 0,磨粒、增稠相在抛光液里均匀分布。当抛光液的势流流动受到工件的阻碍时,工件表面会形成剪切流动。由于 $n > 1$,故当增稠相受剪切作用时,抛光液表观黏度和作用在工件表面的剪切力急剧增大,磨粒被增稠的抛光液牢固把持,在势流的推动作用,增稠的抛光液对工件表面材料进行微切削,从而达到超精密加工的目的。

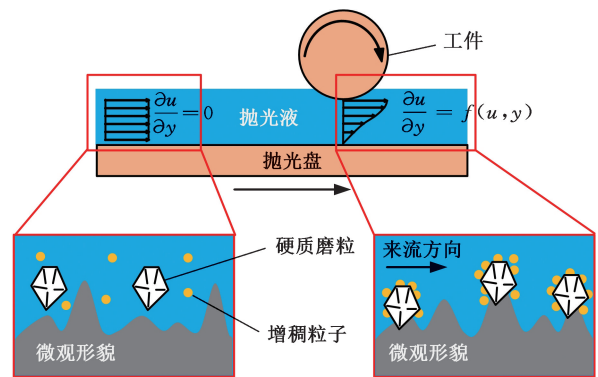


图 1 力流变技术材料去除机理

Fig.1 Material removal principle of FRP technology

在此前的研究中,学者们专注于将 FRP 方法应用到不同材料、结构的零件的超精密加工。如 WANG 等^[23]提出了化学增强辅助 FRP 抛光方法,通过氧化作用抛光 Ti-6Al-4V 钛合金,在 15 min 加工时间内将表面粗糙度从 124 nm 降到 8.6 nm。针对内表面流体抛光难的问题,GUO 等^[24]研究了冲击角度与内表面加工一致性的关系,并对套圈内表面进行试加工,得到了 $R_a = 11.16$ nm、方差 0.58 nm^2 的均匀表面。SHAO 等^[25]结合力流变抛光中化学增强作用和抛光角度的影响,抛光高温镍基合金材料的涡轮叶片,在 9 min 内将表面粗糙度从 72.3 nm 降到 4.2 nm。也有学者对抛光液本身作了相关研究。HUANG 等^[26]用无水基的剪切增稠抛光液来抛光水溶性 KDP 晶体,得到了 $R_a = 2.23$ nm 的无损表面。

ZHANG 等^[27]研究了不同石英粉形状对抛光液流变性能的影响规律,并认为其影响流变性能的本质是颗粒间相互作用。为了提高 GCr15 套圈滚道的服役性能,本文以表面粗糙度和去除率为目标,通过正交试验得到了 FRP 最佳工艺条件,对比了抛光前后套圈滚道的形状精度,建立了仿真模型来分析其精度改善原因,以验证 FRP 在提高轴承服役性能方面的可行性。

2 力流变抛光试验设置

剪切增稠液由去离子水(DI Water)和高羟基聚合物按一定比例调配而成,混合氧化铝磨粒作为抛光液。本研究采用自制的六轴力流变抛光机(图 2a)作为试验平台,抛光加工示意图见图 2b。试验以 7009C 内套圈外滚道作为研究对象,套圈使用专用夹具夹持,工件绕其圆心通过电机带动自转,电机主轴与水平面垂直。抛光盘以角速度 ω_1 转动,带动抛光液旋转,冲击工件表面。套圈以角速度 ω_2 与抛光盘相向转动,其外圆及端面通过夹具和聚氨酯胶带保护,防止被抛光。当抛光液流经工件附近区域时,套圈和抛光盘壁面之间形成剪切梯度,引发剪切增稠效应,如图 3 所示。其余加工工艺参数见表 1。

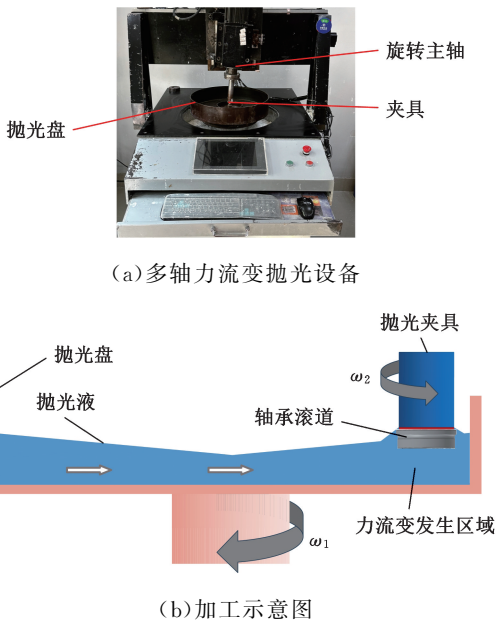


图 2 多轴力流变抛光机及加工示意图

Fig.2 Multi-axis shear-thickening polishing machine & machining schematic

采用光学 3D 表面轮廓仪(中途 SuperView W1)和超景深显微镜(VHX-S650E)观测滚道微观表面形貌。采用马尔圆度圆柱度仪(Mahr)测量滚道形状精度。

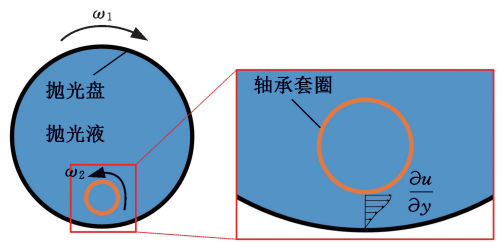


图 3 内套圈加工示意图

Fig.3 Diagram of inner ring's processing by FRP

表 1 试验参数

Tab.1 Experimental parameters setup

磨粒材料	Al ₂ O ₃
轴承钢材料	GCr15(AISI E52100)
加工时间/min	30
轴承型号	7009C

2.1 正交试验参数选择

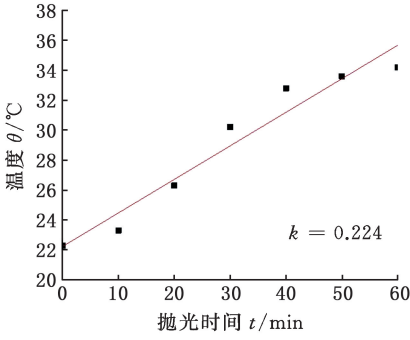
为了确定不同因素对抛光质量的影响规律,并简化试验过程,本文采用正交试验设计。田口法(Taguchi method)是基于正交试验结果,采用信噪比作为作为优化质量的指标,得到最佳工艺水平组合的优化方法。应尽可能选择较大的因素水平范围,确保包含每一个工艺参数的最佳工艺水平。磨粒尺寸和抛光液中的浓度是影响抛光质量的关键因素。由 FRP 的原理可知,剪切速率是影响增稠的重要参数,故选取抛光盘转速、磨粒浓度和磨粒尺寸作为工艺参数。

理论上,只要处于抛光液的增稠区间内,相对速度越高,则黏度越高,材料的去除效果越好。但在实际加工中发现,高黏度引起的温升是不能避免的。如图 4 所示,在 100 r/min 下,抛光液的温度在 60 min 内上升了 12 °C,其温升接近于线性,斜率达 0.224。在 110 r/min 下,其温升情况可分为两个区域。区域 1 中,10 min 内温升曲线斜率达 0.58,但在区域 2 区域降至 0.061。这是因为,高温高速下水分快速流失,抛光液固化,与工件的相互作用区域减少。由此可见,高速会导致抛光液性能、寿命下降。为了保持抛光液的长时间使用性能,设计正交试验最高转速为 90 r/min。

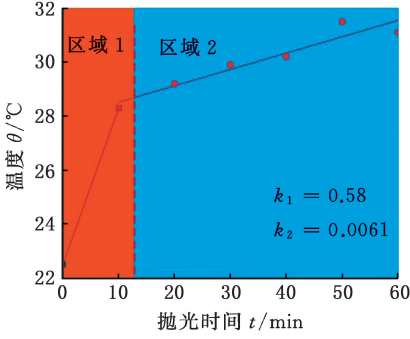
本次试验选取 L₉(3⁴)正交表,见表 2。A、B、C 分别代表抛光盘转速、磨粒浓度和磨粒尺寸。抛光盘转速水平选择 50,70,90 r/min,磨粒质量分数选择 3%、6%、9%,磨粒尺寸(微粉名义直径)选择 1.5,2.5,5 μm。

2.2 正交试验设计

试验结果以表面粗糙度 R_a 和材料去除效率(material removal rate, MRR) R_{MR} 为评价指标。材料表面的平均表面粗糙度 \bar{x} 、标准差 D_{st} 分别为



(a) 100 r/min



(b) 110 r/min

图 4 高抛光速度下工件表面温升曲线
Fig.4 Temperature rise curve of the workpiece surface at high polishing speeds

表 2 L₉(3⁴) 试验工艺参数设置

Tab.2 Process parameter for orthogonal experiments

试验组	试验因素			
	A- 抛光盘 转速/(r·min ⁻¹)	B- 磨粒质量 分数/%	C- 磨粒 粒径/μm	D- 空因素
1	50	3	1.5	1
2	50	6	5.0	2
3	50	9	2.5	3
4	70	3	5.0	3
5	70	6	2.5	1
6	70	9	1.5	2
7	90	3	2.5	2
8	90	6	1.5	3
9	90	9	5.0	1

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$D_{st} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

信噪比(S/N, 单位 dB) 是田口法中对试验结果分析的评估特征, 能够反映试验过程中抛光质量(Ra) 的偏差。由于表面粗糙度指标具有望小特性, 故采用下式计算其信噪比值:

$$S/N_{Ra} = -10 \lg \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^2 \right) \quad (4)$$

而去除率具有望大特性, 故采用下式计算其信噪比值:

$$S/N_{R_{MR}} = -10 \lg \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j^2 \right) \quad (5)$$

3 结果与分析

正交试验得到的表面粗糙度及其 S/N 响应值见表 3。各因素水平对试验结果的平均响应变化曲线如图 5 所示。方差分析(analysis of variance, ANOVA)通过评估工艺参数水平对试验结果的影响程度, 并能以此确定各参数的贡献度, 如图 6 所示。通过对图 5、图 6 的分析, 可以得出以下结论:

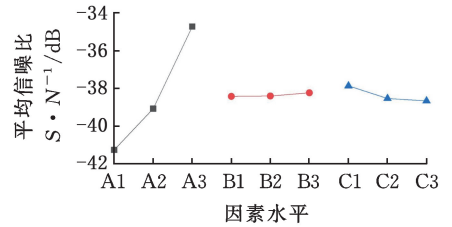
1) 随着抛光盘速度的升高, 粗糙度降低而材料去除率增大。原因一是转速越高, 导致增稠效应越明显, 增稠相对磨粒的把持更加稳定; 原因二是根据 Preston 去除方程, 更高的速度具有更高的去除率, 在相同试验的加工时间内更接近 FRP 的加工极限。

2) 随着磨粒浓度的增大, 加工区域内参与加

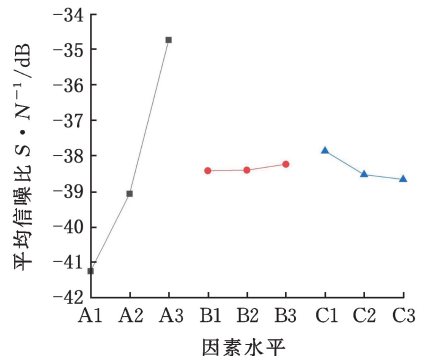
表 3 正交试验结果

Tab.3 Results of orthogonal experiments

实验组	A	B	C	D	\bar{Ra}/nm	$\frac{S}{N_{Ra}}/dB$	$\bar{R}_{MR}/(\mu m \cdot h^{-1})$	$\frac{S}{N_{R_{MR}}}/dB$
1	50	3	W1.5	1	106.88	-40.58	0.0192	-25.82
2	50	6	W5	2	127.65	-42.12	0.0163	-24.30
3	50	9	W2.5	3	113.23	-41.08	0.0149	-23.62
4	70	3	W5	3	91.34	-39.21	0.0240	-27.32
5	70	6	W2.5	1	89.51	-39.04	0.0380	-31.73
6	70	9	W1.5	2	88.69	-38.96	0.0346	-31.02
7	90	3	W2.5	2	59.33	-35.46	0.0495	-34.26
8	90	6	W1.5	3	50.34	-34.04	0.0408	-32.25
9	90	9	W5	1	54.09	-34.66	0.0446	-33.20



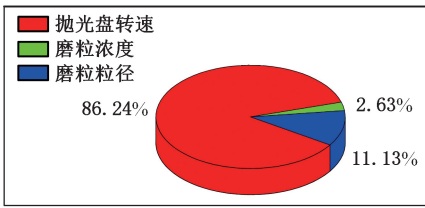
(a) 各因素对表面粗糙度的影响



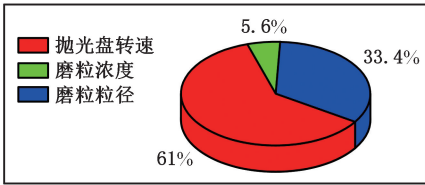
(b) 各因素对材料去除率的影响

图 5 试验参数信噪比

Fig.5 S/N ratio of each parameter level



(a) 平均粗糙度影响因素占比



(b) 材料去除率影响因素占比

图 6 方差分析结果

Fig.6 ANOVA results

工的磨粒增加,相同加工时间内粗糙度下降更多,工件表面粗糙度呈现逐渐减小的趋势。

3) 随着磨粒粒度的增大,相同加工时间内粗糙度下降率减小。这是因为柔性抛光对粒度不敏感,而高浓度下参与加工的小粒径磨粒更多,所以加工效率也更高。

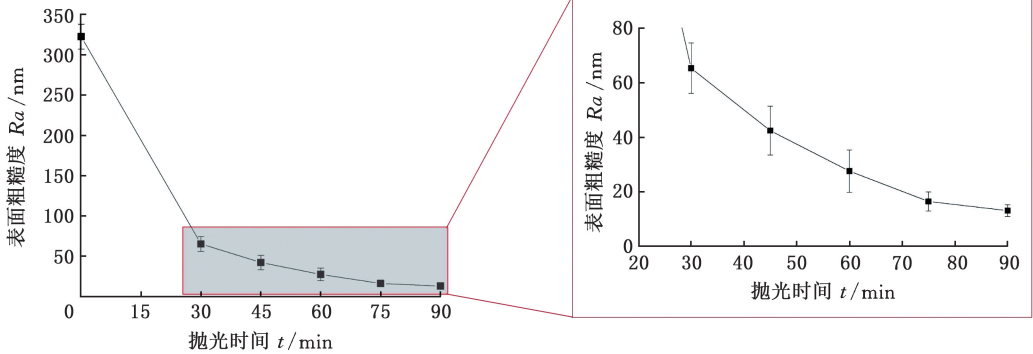


图 7 优化试验-粗糙度随加工时间的演变

Fig.7 Evolution of roughness with machining time

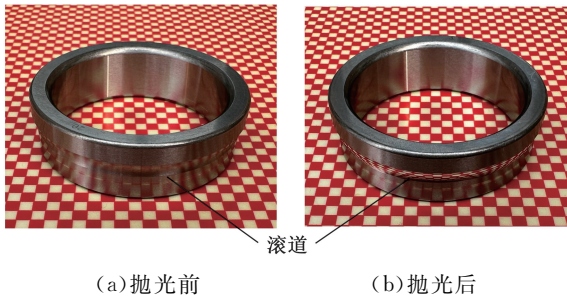


图 8 抛光前后滚道表面实物图

Fig.8 Image of the raceway before and after polishing

在力流变抛光过程中,滚道的形状精度随加工时间的演变改善情况如图 11 所示。在初始状态下,滚道的平均圆度达 $3.05 \mu\text{m}$,且数据离散度高。随着力流变抛光过程的进行,圆度显示出和粗糙度类似的演变情况。在初始的 30 min 加工

4) 相较于抛光盘转速,磨粒浓度和粒度对粗糙度和去除率的影响都相对较小。如图 6 所示,抛光盘转速对 R_a 和 MRR 值的影响程度分别达 86.24% 和 61.00%。这说明在抛光中,抛光盘的速度是最重要的因素。

4 表面质量与精度演变情况

由正交试验结果的方差分析可以看出,对抛光表面质量影响最大的是抛光液对工件的冲击速度,这是因为高转速下,抛光液形成了更高的速度梯度,从而黏度更高,去除效果更好。相比之下,磨粒粒径和浓度对抛光效果的影响较小。故优化试验采用 A3B2C2 的组合。

优化的抛光试验结果如图 7 所示。随着抛光时间的增加,套圈表面粗糙度首先从 322 nm 快速下降到 65.319 nm,随后下降趋势略有减缓,60 min 时下降到 27.491 nm,其方差为 7.792 nm^2 ,最终在 90 min 时达 12.982 nm,方差为 2.158 nm^2 。抛光后滚道表面达到了镜面效果(图 8),且原有的磨削形貌已基本消除(图 9、图 10)。

时间内,圆度迅速下降到 $2.12 \mu\text{m}$,随后改善效率放缓,最终在经历 90 min 力流变抛光后下降到平均圆度 $1.67 \mu\text{m}$ 。

需要说明,为了保证精度改善的有效性,必须对工装安装精度进行精密测量,确保不引入其他不可控误差。试验结果证明,力流变抛光有效改善了套圈表面质量,可作为套圈滚道加工的一种高效精密加工工艺。

5 CFD 仿真

5.1 CFD 流程与模型

仿真流程如图 12 所示。简化的仿真模型如图 13 所示,为了凸显可视化效果,套圈滚道截面被简化为一个椭圆,其长轴长度为 80 mm,短轴长度为 60 mm。模型设置一个入口和一个出口,

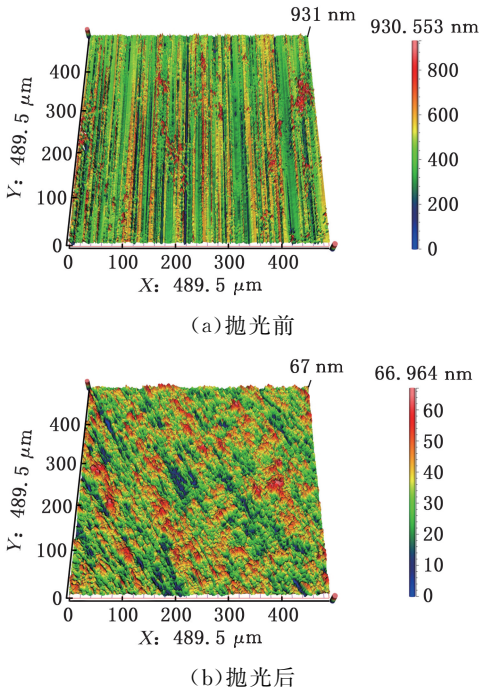


图 9 抛光前后的微观表面形貌演变(白光干涉仪)
Fig.9 Evolution of microscopic morphology before and after polishing(measured by optical 3D surface profiler)

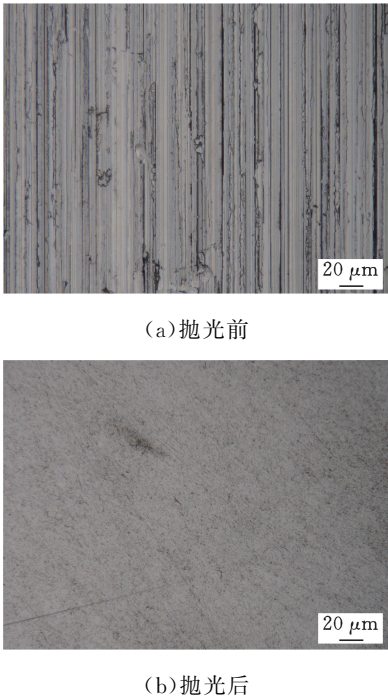


图 10 抛光前后的微观表面形貌演变(超景深显微镜)
Fig.10 Evolution of microscopic morphology before and after polishing(measured by 3D microscope)

边界为固壁边界。工件距离上边界足够远,保证上边界不对仿真产生干扰。下边界模拟的是抛光盘壁面。在工件周围对边界层网格进行了加密。抛光液流变参数设置参见文献[18],抛光液速度按照 A3(90 r/min)设置。动网格设置工件为刚体运动,UDF 文件见附录。

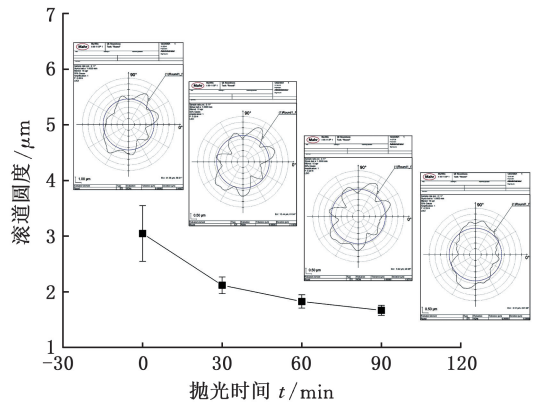


图 11 随加工时间圆度的改善
Fig.11 Improvement of roundness with machining time

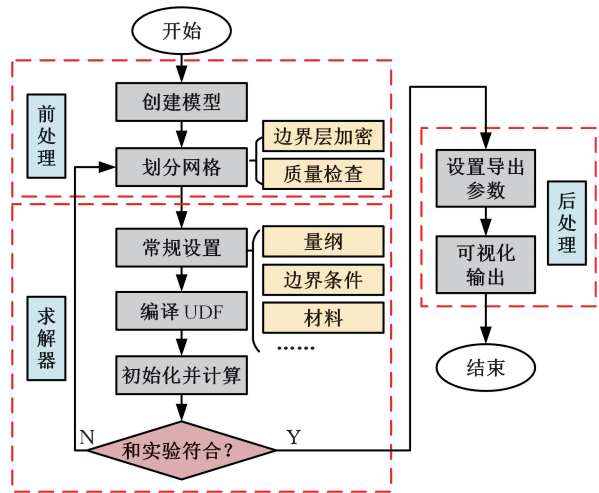


图 12 FRP 抛光过程仿真流程图
Fig.12 Flowchart of FRP simulation process

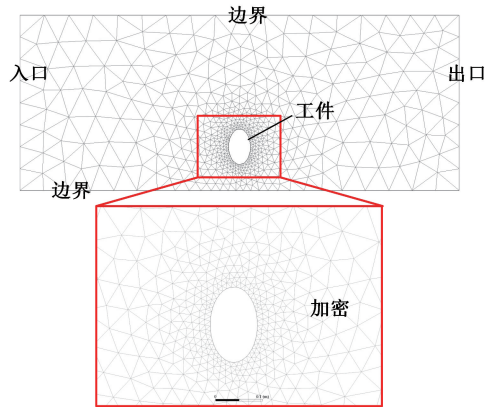


图 13 简化的二维 CFD 模型

Fig.13 Simplified model of CFD process

5.2 CFD 结果与讨论

图 14~图 16 分别为抛光区域压力、速度和去除率的分布情况,其中去除率采用 $p.v$ 值代替^[28]。对比短轴靠近壁面时,当工件处于长轴在靠近壁面一侧时,压力减小但幅度有限。从图 14 中云图观察得出,其正压区压力都在 1230 Pa 左右,短轴靠壁面情况下,正压区范围较大。相比之

下,两者的速度差距非常大。如图 15 所示,在长轴靠壁面时,最大速度达到了 4 m/s,而在短轴靠壁面时,最大速度只有约 2 m/s。图 16 中 $p.v$ 值的分布则直观确认了精度改善原因。无论长轴短轴,面向抛光液来流方向部位的材料去除率最高,

但两者峰值基本相等;而当长轴和短轴分别靠近壁面时,其去除率分布有了明显变化。在一个自转周期内,长轴端具有更高的材料去除,这是因为它同时具有更高的 $p.v$ 值和更长的有效抛光驻留时间。

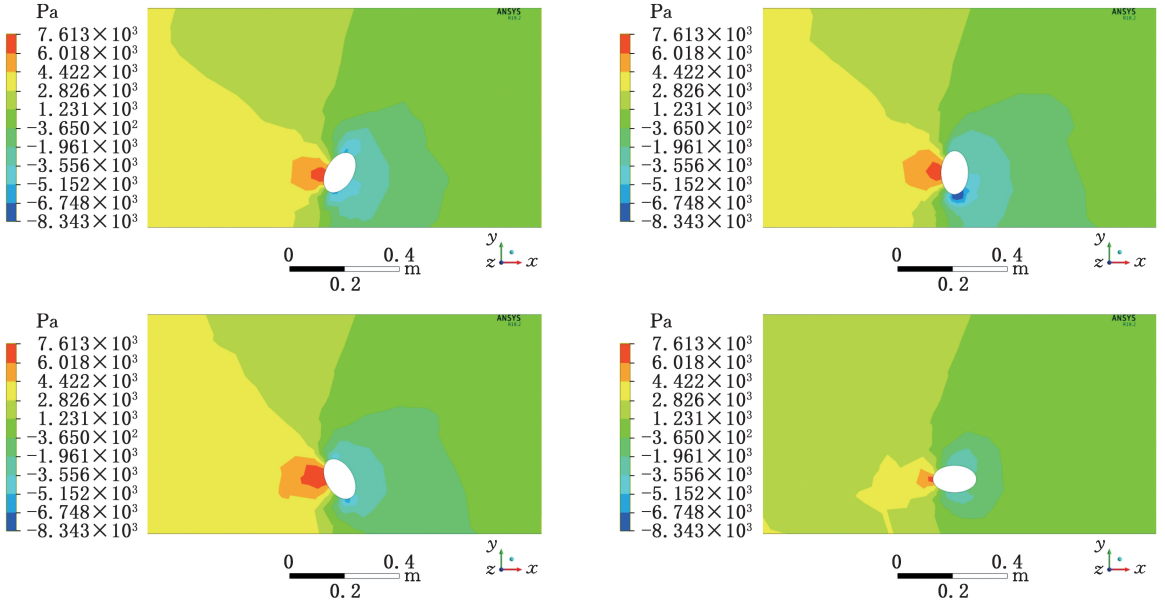


图 14 工件不同位置下流域抛光液压力分布

Fig.14 Distribution of pressure of the slurry

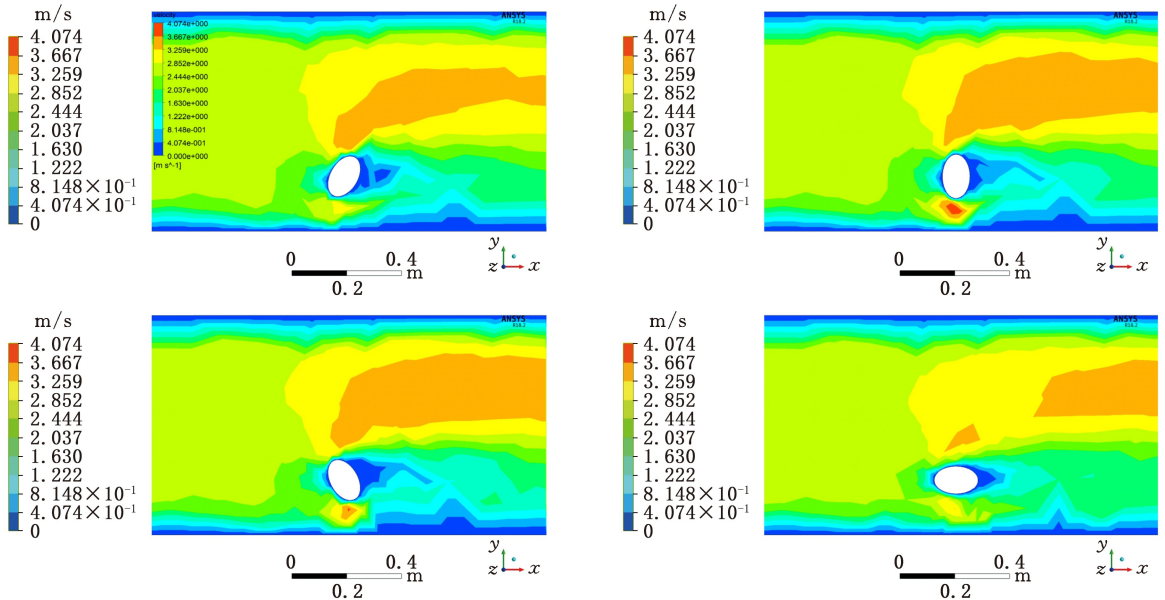


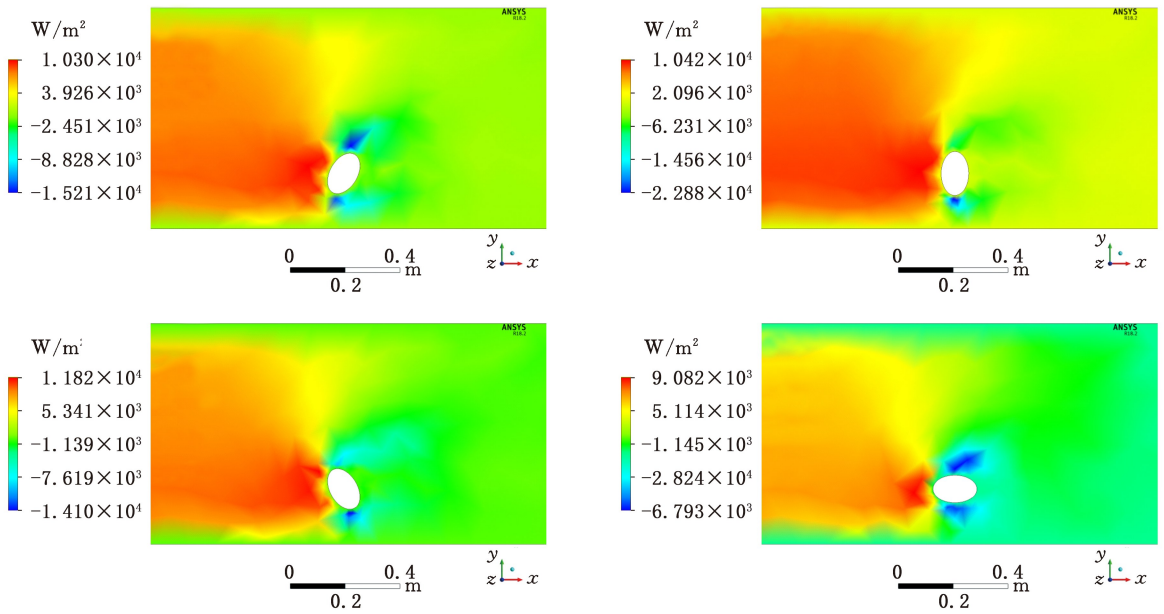
图 15 工件不同位置下流域抛光液速度分布

Fig.15 Distribution of velocity of the slurry

6 结语

本研究中,力流变抛光技术在轴承领域的应用可能性得到了证明。试验结果证明,抛光液冲击速度是影响加工效率的关键因素。在保证表面质量和抛光液可持续性的前提下,高转速得到了最高的去除效率和最好的表面粗糙度。磨粒粒径和浓度对去除率和粗糙度的影响不显著。在优化

的加工参数(抛光盘转速 90 r/min,磨粒粒径 2.5 μm ,质量分数 6%)下加工了 90 min,粗糙度 Ra 由原始的 322 nm 下降到 12.982 nm。对比了抛光前后的套圈滚道圆度变化,发现平均圆度精度由初始的 3.05 μm 提高到 1.67 μm 。建立了基于动网格的内套圈力流变抛光模型,分析了圆度改善机理。仿真结果揭示了高剪切速率导致的高去除率是圆度改善的原因。研究结果证明了力流变

图 16 工件不同位置下流域抛光液 $p.v$ 值分布Fig.16 Distribution of $p.v$ value of the slurry

抛光技术在轴承精密加工应用领域的可行性。

参考文献:

- [1] BARROIS W. Repeated Plastic Deformation as a Cause of Mechanical Surface Damage in Fatigue, Wear, Fretting-fatigue, and Rolling Fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 1979, 1(4):167-189.
- [2] EL LAITHY M, WANG Ling, HARVEY T J, et al. Further Understanding of Rolling Contact Fatigue in Rolling Element Bearings—a Review[J]. Tribology International, 2019, 140:105849.
- [3] SADEGHI F, JALALAHMADI B, SLACK T S, et al. A Review of Rolling Contact Fatigue[J]. Journal of Tribology, 2009, 131(4):041403.
- [4] DEOLALIKAR N, SADEGHI F. Fatigue Life Reduction in Mixed Lubricated Elliptical Contacts[J]. Tribology Letters, 2007, 27(2):197-209.
- [5] AKAMATSU Y, TSUSHIMA N, GOTO T, et al. Influence of Surface Roughness Skewness on Rolling Contact Fatigue Life[J]. Tribology Transactions, 1992, 35(4):745-750.
- [6] CUI Li, SU Yin. Contact Fatigue Life Prediction of Rolling Bearing Considering Machined Surface Integrity[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2022, 74(1):73-80.
- [7] LORENZ S J, SADEGHI F, TRIVEDI H K, et al. A Continuum Damage Mechanics Finite Element Model for Investigating Effects of Surface Roughness on Rolling Contact Fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143:105986.
- [8] CHEN Hongyu, WANG Lin, PENG Feng, et al. Hydrogen Retention and Affecting Factors in Rolled Tungsten; Thermal Desorption Spectra and Molecular Dynamics Simulations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(78):30522-30531.
- [9] WANG Jiahuan, ZHOU Yu, QIAO Zhen, et al. Surface Polishing and Modification of Ti-6Al-4V Alloy by Shear Thickening Polishing[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 468:129771.
- [10] WANG Jiahuan, TANG Zewei, GOEL S, et al. Mechanism of Material Removal in Tungsten Carbide-cobalt Alloy during Chemistry Enhanced Shear Thickening Polishing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6865-6879.
- [11] WANG Lin, PENG Feng, CHEN Hongyu, et al. The Influence of pH and H_2O_2 on Surface Quality and Material Removal Rate during W-CMP[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(9):4097-4110.
- [12] SORKHEL S, SUR B. Mechanism of Electrochemical Grinding[J]. Journal of the Institution of Engineers (India), 1972, 53(1):45-48.
- [13] 王旭, 赵萍, 吕冰海, 等. 滚动轴承工作表面超精密加工技术研究现状[J]. 中国机械工程, 2019, 30(11):1301-1309.
WANG Xu, ZHAO Ping, LYU Binghai, et al. Research Status of Ultra-precision Machining Technologies for Working Surfaces of Rolling Bearings[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(11):1301-1309.
- [14] NOVAK M, KASUGA H, OHMORI H. Comparison of Roughness and Profile between ELID and Ground Surfaces[C]// Proceedings of the 7th

- International Congress of Precision Machining (ICPM 2013). Miskolc, 2013:378-383.
- [15] RAFFLES M H, STEPHENSON D J, SHORE P, et al. Electrolytic In-process Dressing Superfinishing of Spherical Bearings Using Metal - Resin Bond Ultra-fine CBN Wheels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(1):112-122.
- [16] JIAO F, MA X, BIE W, et al. Research Status and Prospects of Electrochemical Grinding Technology[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(12):3247-64.
- [17] 尹龙, 赵波, 郭星辰, 等. 超声辅助内圆磨削 40Cr₁₅Mo₂VN 轴承套圈的试验研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(10):1172-1180.
YIN Long, ZHAO Bo, GUO Xingchen, et al. Experimental Research on Ultrasonic Assisted Internal Grinding of 40Cr₁₅Mo₂VN Bearing Rings [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10):1172-1180.
- [18] LIU Henan, CHENG Jian, WANG Tingzhang, et al. Magnetorheological Finishing of an Irregular-shaped Small-bore Complex Component Using a Small Ball-end Permanent-magnet Polishing Head [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2019, 2(3):125-129.
- [19] WU M Y, GAO H. Experimental Study on Large Size Bearing Ring Raceways' Precision Polishing with Abrasive Flowing Machine (AFM) Method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9):1927-1935.
- [20] WEI Minghai, LIN Kun, SUN Li. Shear Thickening Fluids and Their Applications[J]. Materials & Design, 2022, 216:110570.
- [21] 袁巨龙, 王金虎, 吕冰海, 等. 力流变抛光技术 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(15):21-30.
YUAN Julong, WANG Jinhu, LÜ Binghai, et al. Force Rheological Polishing Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15):21-30.
- [22] ZHU Wule, BEAUCAMP A. Compliant Grinding and Polishing: a Review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 158:103634.
- [23] WANG Jiahuan, LYU Binghai, JIANG Liang, et al. Chemistry Enhanced Shear Thickening Polishing of Ti-6Al-4V [J]. Precision Engineering, 2021, 72:59-68.
- [24] GUO Luguang, WANG Xu, LYU Binghai, et al. Shear-thickening Polishing of Inner Raceway Surface of Bearing and Suppression of Edge Effect[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(5):4055-4068.
- [25] SHAO Qi, LYU Binghai, YUAN Julong, et al. Shear Thickening Polishing of the Concave Surface of High-temperature Nickel-based Alloy Turbine Blade[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11:72-84.
- [26] HUANG Linbin, WANG Xu, CHEN Fangyuan, et al. Anhydros-based Shear-thickening Ultra-precision Polishing of KDP Crystal[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(7):3103-3115.
- [27] ZHANG Xiaoyan, DU Haiyan, GONG Xiaoxiao, et al. The Importance of Surface Hydration and Particle Shape on the Rheological Property of Silica-based Suspensions[J]. Ceramics International, 2014, 40(4):5473-5480.
- [28] 付有志. 粘性挤压磨料流加工边缘效应及抑制策略[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
FU Youzhi. Edge Effect of Viscous Extrusion Abrasive Flow Machining and Its Suppression Strategy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

(编辑 陈 勇)

作者简介:郭路广,男,1990年生,讲师、博士。研究方向为超精密加工技术与装备。袁巨龙* (通信作者),男,1962年生,教授、博士研究生导师。研究方向为超精密加工技术与装备。E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn.

本文引用格式:

郭路广,戴卓豪,王东峰,等.力流变工艺对轴承滚道表面质量与精度的影响[J]. 中国机械工程,2025,36(2):271-279.

GUO Luguang, DAI Zhuohao, WANG Dongfeng, et al. Effects of Force Rheological Polishing Processes on Surface Quality and Accuracy of Bearing Raceways[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):271-279.