

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.02.013

轴承球变曲率研磨盘沟槽 结构参数数值优化研究*

李晓琪¹, 柯明峰¹, 祝佳俊¹, 周芬芬², 吕冰海^{1*}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310000; 2. 台州学院 机械工程学院, 浙江 台州 318000)

摘要:针对轴承球变曲率沟槽加工方法中沟槽结构参数优化问题,采用了数值仿真分析法,研究了研磨盘沟槽偏心距、沟槽半角、滚道极径及沟槽间距 4 个主要沟槽几何参数,对球面加工轨迹点分布均匀性的影响规律。设计了正交仿真试验,分析了沟槽几何参数对球面加工轨迹均匀性的影响权重,并得到了优化几何参数组合;最后,开展了轴承球的研磨实验研究。研究表明:变曲率沟槽最佳的结构参数为,偏心距/球径比 4,沟槽半角 45°,沟槽滚道极径/球径比 60,沟槽间距系数 2;在优化的槽形结构下,加工 4 h 后,球度误差从 0.057 μm 降低至 0.022 μm ,优于其他槽形结构下的加工结果;根据仿真分析,优化的研磨盘沟槽结构能够获得更好的球面轨迹均匀性,球面轨迹分布越均匀,加工后的球度误差越小。

关键词:轴承球;研磨;变曲率沟槽;结构参数优化

中图分类号:TH133.33;T580.68

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)02-0222-06

Numerical optimization on groove structure parameters of bearing ball with variable-radius V-groove

LI Xiao-qi¹, KE Ming-feng¹, ZHU Jia-jun¹, ZHOU Fen-fen², LV Bing-hai¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Faculty of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: Aiming at the optimization issue of the groove geometric parameters for the variable-radius V-groove lapping method of the bearing ball, the influence of groove geometric parameters, including the eccentricity, the half angle, the raceway pole diameter and the groove space, on the uniformity of the distribution of spherical machining trajectory points was analyzed by numerical simulation. The influence weight of the four main parameters on the spherical machining trajectory uniformity was analyzed by orthogonal simulation experiments. The bearing ball lapping experiment was carried out. The experimental results indicate that the best geometric parameter combination is an eccentricity to ball diameter ratio of 4, a groove half angle of 45°, a groove raceway pole diameter to ball diameter ratio of 60, and a groove space coefficient of 2. After 4 hours of processing under the optimized groove parameter combinations, the sphericity error reduces from 0.057 μm to 0.022 μm , which is better than the processing results under other groove parameters. According to the simulation analysis, the optimized groove structure of lapping plate can obtain better spherical trajectory uniformity. The more uniform the spherical trajectory distribution is, the smaller the sphericity error can be after processing.

Key words: bearing ball; lapping; variable-radius V-groove; structure parameters optimization

收稿日期:2020-06-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2000502);国家自然科学基金资助项目(U1809221)

作者简介:李晓琪(1996-),女,浙江温州人,硕士研究生,主要从事精密加工技术及装备方面的研究。E-mail:lxq9609@126.com

通信联系人:吕冰海,男,博士,研究员。E-mail:icewater7812@126.com

0 引言

精密轴承球是滚动轴承中最关键的元件。精密球体的形状精度、表面质量和一致性对轴承运动精度和使用寿命有至关重要的影响。

精密轴承球的加工是在球体和研磨盘之间添加磨粒,由驱动盘以摩擦力的形式提供驱动力带动球体,并且球体与研磨盘研磨面的接触点不断更换,通过磨粒对球面材料以滑刻或犁削的形式进行去除。

目前,国内外精密轴承球的加工方式按磨盘驱动个数及加工中有无磁性液体等特性主要分为单转盘驱动加工方式、多转盘驱动加工方式和磁流体加工方式。1976年,INAGAK等^[1]首次提出了同心圆V形沟槽加工方式;ZHANG等^[2]基于运动学原理,分析了球体在单个同心圆沟槽滚道中运动产生的球面轨迹的分布特点;黑部利次等^[3]提出了三转盘驱动加工方式,使研磨轨迹能均匀覆盖球面;袁巨龙等^[4]在此基础上提出了有双自转球体研磨方式,及双转盘偏心同心圆V形沟槽加工方式^[5]等系列加工方式;TANI Y和KAWATA K^[6]提出了磁流体研磨方式(magnetic fluid polishing, MFP);ZHANG等^[7]将其进一步改进,提出了偏心式磁流体加工方式。

近年来,为了进一步提高精密轴承球的加工效率,浙江工业大学袁巨龙等^[8]提出了变曲率沟槽研磨方法,该加工方法可对精密球体进行循环批量加工,并能实现球体的高效高一致性加工^[9]。

为优化变曲率沟槽结构参数,本文提出一种数值分析方法,通过数值仿真分析变曲率沟槽几何参数对球面加工轨迹形态、球面加工轨迹点分布均匀性的影响规律,并结合正交试验设计和方差分析法,分析变曲率沟槽几何参数对球面加工轨迹均匀性的影响权重,以获得最佳几何参数组。

1 变曲率沟槽加工方式基本原理

变曲率沟槽球体加工方式的基本原理如图1所示。

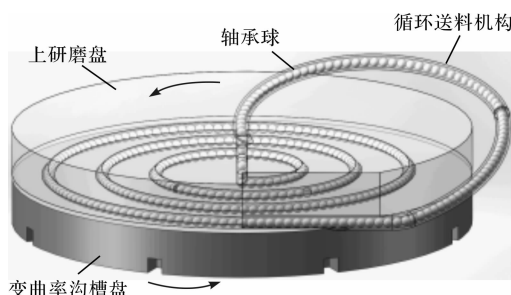


图1 变曲率沟槽球体加工方式的基本原理

该加工方式的基本原理为:

将变曲率沟槽盘代替传统同心圆沟槽盘,利用球体在变曲率沟槽中接触点位置及相对速度的变化,使球体由磨盘中心向外作自旋角连续变化的运动,从磨盘入料口经过整个变曲率沟槽路径至磨盘出料口完成单个周期加工,之后借助循环送料机构再次进入磨盘加工区域实现循环加工,实现了加工轨迹均匀包络球面效果,从而获得高精度、高一致性轴承球。

该加工方法既有与V形槽研磨方式相当的装球量,又具有双自转研磨方式的加工精度一致性,结构简单,便于工程实现。

变曲率沟槽球体加工方式沟槽几何关系如图2所示。

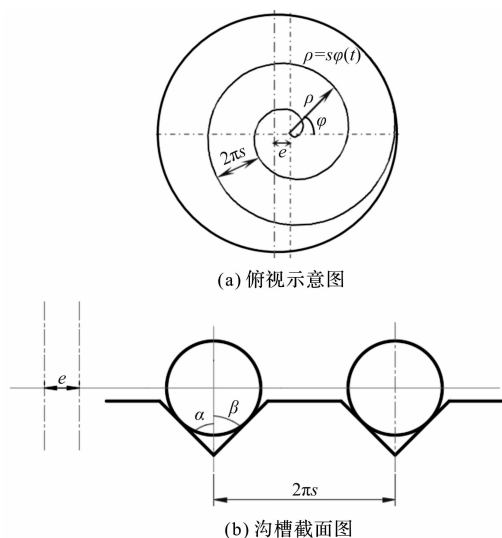


图2 变曲率沟槽球体加工方式沟槽几何关系

加工沟槽按阿基米德螺旋线排布,其极坐标表达式为:

$$\rho = s\varphi(t) \quad (1)$$

式中: ρ —极径,mm; $\varphi(t)$ —随时间变化的极角, $^{\circ}$;s—沟槽间距系数,mm。

选取单颗球体进行几何运动学分析^[10],可得双转盘沟槽偏心式变曲率沟槽加工系统总的几何运动学方程组如下:

$$\begin{cases} \omega_b r_b \cos\theta \cos\varphi_1 + \omega_g r_b \sin\varphi_1 + \rho\omega + e\omega_2 \cos\varphi = \omega_1 l_A \cos\tau_A \\ \omega_g r_b \cos\varphi_1 - \omega_b r_b \sin\varphi_1 - 1/\varphi\rho\omega - e\omega_2 \sin\varphi = -\omega_1 e \sin\varphi \\ -\omega_b r_b \sin(\alpha + \theta) \cos\varphi_1 - \omega_g r_b \sin\alpha \sin\varphi_1 + \\ \rho\omega + e\omega_2 \cos\varphi = \omega_1 l_B \cos\tau_B \\ -\omega_b r_b \sin(\beta - \theta) \cos\varphi_1 - \omega_g r_b \sin\beta \sin\varphi_1 + \\ \rho\omega + e\omega_2 \cos\varphi = \omega_2 l_C \cos\tau_C \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_b —球体半径,mm; ω_g, ω_b —自转角速度的两个

分量, $r \cdot \min^{-1}$; γ, θ —方位角, rad ; α, β —沟槽半角, $^\circ$; l_A, l_B, l_C —盘上接触点到主轴中心的距离, mm ; e —沟槽中心与磨盘主轴中心的偏心距, mm ; τ_A, τ_B, τ_C —接触点盘上线速度与 τ 轴夹角, $^\circ$ 。

由式(2)可见, 表征球体运动规律的自转角速度和自转角 $\omega_g, \omega_b, \theta$ 和 γ 与 V 形槽半角、磨盘转速、变曲率沟槽滚道极径和偏心距等因素均有关。

为避免不同球径影响模型的适应性, 偏心距和沟槽滚道极径均取其球体半径 r_b 的比值, 即分别表达为 ρ/r_b 和 e/r_b 。

2 球面加工轨迹均匀性的定量评价方法

球面材料去除发生在球-盘接触点位置处, 球面加工轨迹分布越均匀, 则球面材料去除机率越均匀。

本文采用球面的等面积网格划分方法^[11], 即把球面按地球经纬方向划分成许多相等的单元, 统计每个网格区域内的轨迹点数量; 采用统计方法计算各区域内研磨轨迹密度的标准差 SD 值, 将其作为球面研磨轨迹均匀性的定量评价价值 (SD 越小, 轨迹点分布均匀性越好)^[12]; 以研磨轨迹均匀性为目标, 采用寻优方法, 获得最佳几何参数组。

仿真分析流程图如图 3 所示。

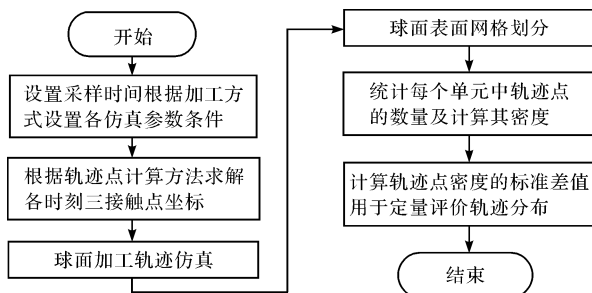


图 3 仿真分析流程图

仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

参数名	参数设置值
轨迹方程 / mm	$\rho = s \cdot \varphi, \varphi \in (0, 32\pi)$
球体半径 r_b / mm	2.5
平盘转速 $\omega_1 / (\text{r} \cdot \min^{-1})$	15
沟槽盘转速 $\omega_2 / (\text{r} \cdot \min^{-1})$	10
采样间隔 $\Delta t / \text{s}$	0.04
偏心距 / 球径比 e/r_b	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
槽型半角 $\alpha, \beta / (^\circ)$	$10^\circ \sim 80^\circ$
沟槽滚道极径 / 球径比 ρ/r_b	0 ~ 200
沟槽间距系数 s / mm	0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.5, 1.7, 2, 2.2, 2.5

变曲率沟槽球体加工方式下球面加工轨迹分布

形态仿真图如图 4 所示。

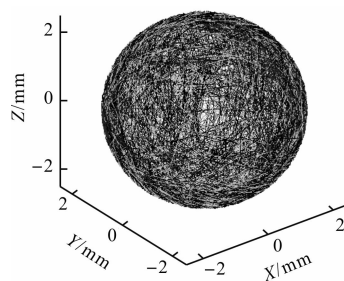


图 4 球面加工轨迹分布形态仿真图

单个加工周期后, 球体加工轨迹能够均匀包络整个球面。

3 变曲率沟槽几何参数的影响

(1) 偏心距的影响。

偏心距对加工轨迹均匀性标准差值 SD 的影响如图 5 所示。

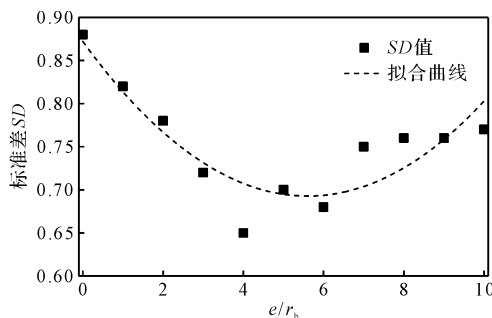


图 5 偏心距对加工轨迹均匀性标准差值 SD 的影响

拟合曲线反映了 SD 的变化趋势, SD 值随着偏心距的增加逐渐减小, 当 $e/r_b = 4$ 时, SD 达到最小值, 之后再增加偏心距, SD 值逐渐增加, 此时由于自转角和自转角速度的变化幅值均增大, 自转角和自转角速度的综合作用使得轨迹形态分布呈现多方向性, 轨迹点分布更加密集, 能够全包围整个球面。

(2) 沟槽半角的影响。

沟槽半角对加工轨迹均匀性标准差值 SD 的影响如图 6 所示。

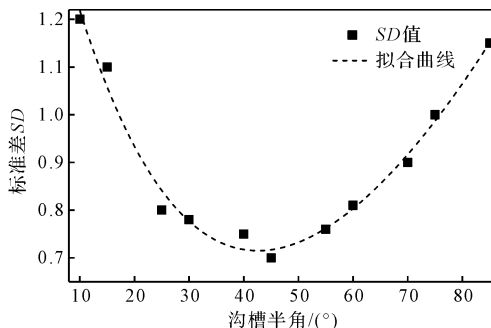


图 6 沟槽半角对加工轨迹均匀性标准差 SD 的影响

随着沟槽半角的增加, SD 值呈现抛物线变化状态,先递减后增加,在沟槽半角为 45° 时, SD 值最小。这是由于随着沟槽半角 α 的增加,自转角速度 Z 轴上的正交分量相位增加,但是相位的增加并不会影响加工轨迹的分布形态,其影响的是轨迹分布的位置。

(3) 沟槽滚道极径的影响。

沟槽滚道极径对加工轨迹均匀性标准差 SD 的影响如图 7 所示。

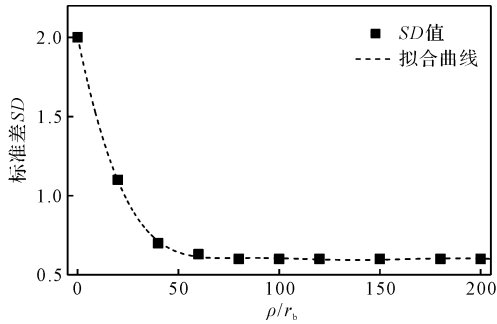


图 7 沟槽滚道极径对加工轨迹均匀性标准差 SD 的影响

随着沟槽滚道极径的增加, SD 值快速下降, $\rho/r_b > 50$ 后, SD 值仍逐渐减小,但减小速率非常缓慢,因此可视为当 ρ/r_b 不断增大后, SD 值逐渐趋于稳定。

(4) 沟槽间距的影响。

沟槽间距对加工轨迹均匀性标准差值 SD 的影响如图 8 所示。

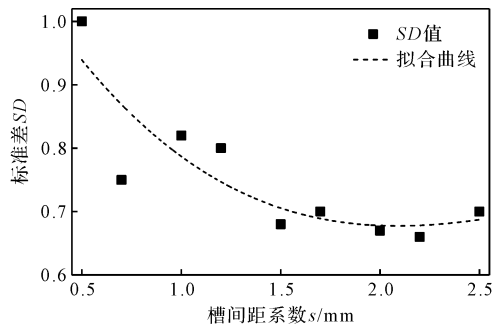


图 8 沟槽间距对加工轨迹均匀性标准差值 SD 的影响

随着 s 值增大, SD 值逐渐减小,当 $s > 2$ 后, SD 值减小的速率变缓慢。对于变曲率沟槽加工方式,相邻两槽之间的距离为定值 $2\pi s$, s 越大, ρ 的增长速率越快,使得球体自转角速度的变化增大,同时结合沟槽滚道越长越利于球面轨迹的分布,可得 s 增大,加工轨迹分布均匀性越好。但是考虑到加工效率,在相同的盘径下,过大的 s 值,将使沟槽滚道长度减小,装球量减小。

4 正交试验和方差分析

为了分析沟槽内角 α 、沟槽外角 β 、偏心距 e/r_b 及槽间距系数 s 对球面加工轨迹均匀性的影响程度,设

计了一组正交仿真实验,以标准差 SD 作为试验指标。

正交仿真试验因素水平如表 2 所示。

表 2 正交仿真试验因素水平表

水平	因素				
	A 沟槽内角 α	B 沟槽外角 β	C 偏心距 e/r_b	D 槽间距 s	E 未知因素
1	30	30	2	1	
2	45	45	4	1.5	
3	60	60	6	2	
4	75	75	8	2.5	

为了可对 4 因素 4 水平进行正交试验和方差分析,本文选取 5 因素 4 水平的正交试验设计表 $L_{16}(4^5)^{[13]}$,第 5 列 E 作空列处理为未知因素。

正交试验方案及试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验方案及试验结果

试验序号	因素					试验结果 x_i SD	x_i^2
	A	B	C	D	E		
1	1	1	1	1	1	0.863 9	0.746 3
2	1	2	2	2	2	0.693 8	0.481 4
3	1	3	3	3	3	0.651 2	0.424 1
4	1	4	4	4	4	0.781 0	0.610 0
5	2	1	2	3	4	0.699 8	0.489 7
6	2	2	1	4	3	0.743 8	0.553 2
7	2	3	4	1	2	0.715 1	0.511 4
8	2	4	3	2	1	0.782 1	0.611 7
9	3	1	3	4	2	0.630 5	0.397 5
10	3	2	4	3	1	0.739 2	0.546 4
11	3	3	1	2	4	0.938 8	0.881 3
12	3	4	2	1	3	0.928 7	0.862 5
13	4	1	4	2	3	0.745 5	0.555 8
14	4	2	3	1	4	0.757 6	0.574 0
15	4	3	2	4	1	0.826 5	0.683 1
16	4	4	1	3	2	1.060 4	1.124 4

试验指标 SD 的数据处理如表 4 所示。

表 4 试验指标 SD 的数据处理表

参数名	因素					
	A	B	C	D	E	
水平均值	11	0.747 5	0.734 9	0.901 7	0.816 3	0.802 9
	12	0.735 2	0.733 6	0.787 2	0.775 6	0.775 0
	13	0.809 3	0.782 9	0.705 4	0.803 2	0.767 3
	14	0.847 5	0.888 1	0.745 2	0.720 5	0.794 3
极差 R_j		0.112 3	0.154 5	0.196 3	0.095 8	0.037 0
因素离差平方和 SS_j		0.047 5	0.063 1	0.086 2	0.018 6	0.003 3

根据分析各个参数的水平均值响应的最低值,得出最佳几何参数组合:偏心距 $e/r_b = 4$,沟槽半角 $\alpha =$

$\beta = 45^\circ$, 沟槽滚道极径 $\rho/r_b = 60$, 沟槽间距系数 $s = 2$, 与单因素分析结果基本一致。

根据 ANOVA 中影响权重 SA 为 SS_j 值占总校正平方和的百分比^[14] 计算可得, 变曲率沟槽几何参数对标准差 SD 的影响权重如图 9 所示。

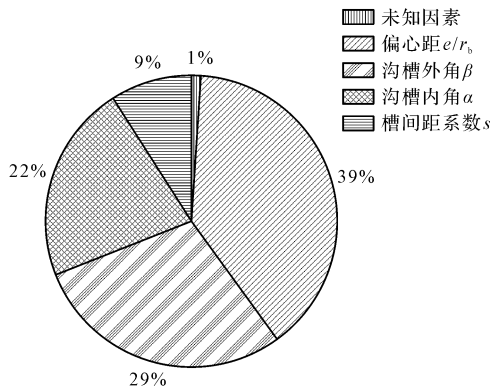


图 9 变曲率沟槽几何参数对标准差 SD 的影响权重

偏心距 e/r_b 的影响权重为 39%, 沟槽外角 β 为 29%, 沟槽内角 α 为 22%, 槽间距系数 s 为 9%。这与前面的单因素分析相吻合, 偏心距的有无很大程度上影响球面加工轨迹的分布。

5 验证实验与结果分析

基于上述理论分析成果, 为验证上述仿真对轴承球研磨变曲率沟槽结构参数优化结果的正确性, 本研究搭建了变曲率沟槽球体加工实验装置。实验选用公称直径 8.731 mm 的轴承钢球为加工对象, 原始精度约为 G10 级。

实验参数如表 5 所示。

表 5 实验参数表

实验序号	沟槽内角 α	沟槽外角 β	偏心距 e/r_b	槽间距 s
1	45	45	4	2
2	20	45	4	2
3	45	20	4	2
4	45	45	2	2
5	45	45	4	1

表 5 中: 实验 1 为最优工艺参数组合下的实验组, 为了比较各参数的影响程度, 其他每组实验根据仿真结果, 只改变其中一个加工参数, 其他参数保持不变; 实验 2 只改变沟槽内角, 取 $\alpha = 20^\circ$; 实验 3 只改变沟槽外角, 取 $\beta = 20^\circ$; 实验 4 只改变偏心距大小, 取 $e/r_b = 2$; 实验 5 只改变槽间距系数, 取 $s = 1$ 。

加工条件如表 6 所示。

表 6 加工条件

参数名	参数值
磨盘转速/($r \cdot \min^{-1}$)	10
加工载荷/($N \cdot \text{Ball}^{-1}$)	2.5
磨料	Al_2O_3 微粉 5000#
切削液	微乳化水溶性切削液 (德国宇索化工)
研磨液配比/(wt. %) 磨料: 水: 切削液: 清洗剂	= 20 : 100 : 2 : 1
加工时间/h	4

以钢球批平均球度作为变曲率沟槽球体加工实验轨迹均匀性的指标, 评价变曲率沟槽工艺参数对均匀性的影响。

本研究采用三丰 (Mitutoyo) 的 RA-1500 型圆度仪, 对每粒球体 3 个相互垂直方位的圆度进行检测, 取最大值作为该球的球度误差。

每次实验后随机抽测 5 颗球测量, 取平均值, 实验结果如图 10 所示。

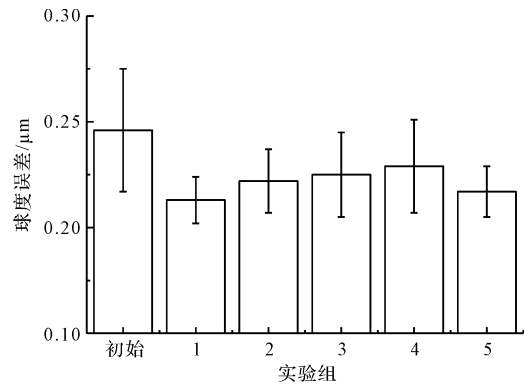


图 10 实验结果

由图 10 可知: 加工 4 h 后, 球度误差在最优仿真工艺参数下, 能够达到最小值, 从 0.057 μm 降低至 0.022 μm ; 其他实验参数下, 平均球度误差值由小到大的实验组依次为: 实验 5 < 实验 2 < 实验 3 < 实验 4, 其球度误差值也均有所减小。

由此可见: 实验结果与仿真优化分析结果基本一致, 球面轨迹分布越均匀, 加工后的球度误差越小。

6 结束语

为优化轴承球研磨变曲率沟槽结构参数, 本文利用数值仿真分析方法, 研究了变曲率沟槽几何参数对球面加工轨迹形态、标准差 SD 和球体运动状态的影响, 并得出以下结论:

(1) 单因素仿真分析结果显示: 随着偏心距和沟槽半角的增加, 标准差 SD 的变化趋势均为先减小后增加, 当偏心距为球体直径的 2 倍、沟槽半角为 45° 时, 标准差 SD 达到最小值; 随着沟槽滚道极径和沟槽间距系数的增加, 标准差 SD 的变化趋势均为先快速

减小后变化缓慢,逐渐趋于稳定;

(2)根据各参数水平均值分析,得出最佳几何参数组合:偏心距 $e/r_b = 4$,沟槽半角 $\alpha = \beta = 45^\circ$,沟槽滚道极径 $\rho/r_b = 60$,沟槽间距系数 $s = 2$;

(3)通过变曲率沟槽几何参数的正交仿真试验,对各参数的显著性进行分析,得出偏心距为显著影响因素,权重39%,沟槽外角 β 为29%,沟槽内角 α 为22%,槽间距系数 s 为9%;

(4)进行了钢球的抛光实验,结果表明,球度误差在最优沟槽结构参数条件下,能够达到最小值,从 $0.057 \mu\text{m}$ 降低至 $0.022 \mu\text{m}$,与正交试验分析结果基本一致。

参考文献(References):

- [1] INAGAKI K, ABE K. Evaluation of performance of minute sphere grinders prepared for trial (in Japanese), report of science and measurement research institute[J]. **Tohoku University**, 1976, 25(1): 49-65.
- [2] BO Z, UEMATSU T, NAKAJIMA A. High efficiency and precision grinding of Si_3N_4 ceramic balls aided by magnetic fluid support using diamond wheels[J]. **Jsm International Journal**, 1998, 41(3): 499-505.
- [3] 黑部利次. ヤラミックスの球超精密研磨[J]. 机械と工具, 1990, 34(2): 43-49.
- [4] YUAN J L, CHEN L N, ZHAO P, et al. Study on sphere shaping mechanism of ceramic ball for lapping process[J]. **Key Engineering Materials**, 2004(259-260): 195-200.
- [5] 周芬芬,袁巨龙,姚蔚峰,等. 精密球超精密加工技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2019, 30(13): 1528-1539.
- [6] TANI Y, KAWATA K, NAKAYAMA K. Development of high-efficient fine finishing process using magnetic fluid[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 1984, 33(1): 217-220.
- [7] UMEHARA N, KIRTANE T, GERLICK R, et al. A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si_3N_4) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP) [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2006, 46(2): 151-169.
- [8] ZHAO P, GUO W, FENG M, et al. A novel lapping method for high precision balls based on variable-radius V-groove [J]. **Journal of Micro & Nano Manufacturing**, 2013, 1(4): 041007.
- [9] ZHOU F, YUAN J, LV B, et al. Kinematics and trajectory in processing precision balls with eccentric plate and variable-radius V-groove [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015, 84(9-12): 1-12.
- [10] 郭伟刚,袁巨龙,周芬芬,等. 基于偏心式变曲率沟槽的高精度球体加工理论与试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 183-190.
- [11] 周芬芬,袁巨龙,姚蔚峰,等. 陶瓷球成球过程的建模与仿真[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2): 128-132.
- [12] 郭伟刚,袁巨龙,项震,等. 基于单转盘变曲率沟槽研磨方法的球体加工试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 252-258.
- [13] 刘文卿. 实验设计[M]. 清华大学出版社, 2005.
- [14] 郑斌,袁巨龙,赵萍,等. 变曲率沟槽精密球研磨加工优化实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 214-219.

[编辑:杨骏泽]

本文引用格式:

李晓琪,柯明峰,祝佳俊,等. 轴承球变曲率研磨盘沟槽结构参数数值优化研究[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 222-227.

LI Xiao-qi, KE Ming-feng, ZHU Jia-jun, et al. Numerical optimization on groove structure parameters of bearing ball with variable-radius V-groove[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(2): 222-227.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>