

变曲率沟槽精密球研磨加工优化实验研究

郑斌, 袁巨龙, 赵萍, 吕冰海, 周芬芬

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014)

摘 要: 目的 获得变曲率沟槽加工方法研磨精密轴承钢球的最优工艺参数。方法 应用田口法对变曲率沟槽加工方法研磨球体的参数进行实验和优化, 以研磨压力、磨料粒径、磨料浓度为主要影响参数设计正交实验, 以材料去除率、表面粗糙度和球度误差为评价指标, 通过平均响应分析和方差分析得到最优研磨参数组合。结果 对于材料去除率, 研磨压力的影响最显著, 磨料粒径的影响次之, 磨料浓度影响最小; 对于表面粗糙度, 磨料粒径的影响最大, 磨料浓度的影响次之, 研磨压力影响最小; 对于球度误差, 压力的影响最大, 其他因素的影响较小。结论 在每球的研磨压力为 5 N、磨料粒径为 3000[#] (5 μm)、磨料质量分数为 25%的条件下, 球体的材料去除率最大, 可达到 0.28 mg/h。在磨料粒径为 5000[#] (3 μm)、磨料质量分数为 25%、每球研磨压力为 2.5 N 的条件下, 球体的表面质量最佳, 表面粗糙度最小达到 12 nm。在每球研磨压力为 0.5 N、磨料粒径为 3000[#] (5 μm)、磨料质量分数为 50%的条件下, 球度误差小。

关键词: 参数优化; 精密球; 变曲率沟槽; 田口法; 材料去除率; 表面粗糙度

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)02-0214-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.036

Experiment of Optimized Grinding of Precision Ball with Variable-radius Groove

ZHENG Bin, YUAN Ju-long, ZHAO Ping, LYU Bing-hai, ZHOU Fen-fen

(Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the optimal process parameters in the lapping process of precision bearing steel balls based on variable-radius groove lapping method. Taguchi method was applied to test and optimize the parameters in the lapping process of steel balls based on variable-radius groove lapping method. With lapping pressure, abrasive size and abrasive concentration as the main influencing parameters, the orthogonal experiment was designed. With material removal rate (MRR), surface roughness (R_a) and ball degree error as evaluation indicators, the optimal lapping parameter combinations were obtained through the average response analysis and variance analysis. For material removal rate, the influencing factor of lapping pressure was the most significant followed by abrasive size and then abrasive concentration. For surface roughness, the influencing factor of abrasive size was the most significant followed by abrasive concentration and then lapping pressure. For ball degree error, the influencing factor of pressure was the most significant and other factors had less influence. The maximum MRR can be obtained under the conditions as follows: lapping pressure of 5 N/ball, abrasive size of 3,000[#] (5 μm) and abrasive mass frac-

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-08-28

Received: 2016-06-20; **Revised:** 2016-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51375455, U1401247)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51375455, U1401247)

作者简介: 郑斌 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事超精密加工技术的研究。

Biography: Zheng Bin (1991—), Male, Master student, Research focus: ultra-precision machining technology.

通讯作者: 袁巨龙 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为超精密加工技术及装备。

Corresponding author: Yuan Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: ultra-precision machining technology.

ture of 25%. The maximum MRR can reach up to 0.28 mg/h. The best surface quality can be got under the following conditions: abrasive size of 5,000[#] (3 μm), abrasive mass fracture of 25% and lapping pressure of 2.5 N/ball. When the lapping pressure is 0.5 N/ball, abrasive size is 3,000[#] (5 μm) and abrasive mass fracture is 50%, the ball degree error is small.

KEY WORDS: parameter optimization; precision balls; variable-radius groove; Taguchi method; material removal rate; surface roughness

高性能滚珠轴承是高精度机械中必不可少的核心零件，而这个重要零件的核心元件为精密球体。可见，对精密功能部件和高端机械设备而言，精密球是真正意义上对其性能和寿命起重要作用的关键元件^[1-3]。精密球体加工是在磨盘与工件之间加入磨料，并通过磨盘、工件、磨料三者之间的相互作用达到材料去除的一种加工方法。目前国内外精密球体的加工方式主要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^[4-6]。但随着高性能轴承类零件需求量的增加和性能要求的不断提高，传统方法存在的低效率、高耗费的缺点愈加突出。而如何实现精密球高效、高一一致性加工是目前精密球体超精密加工方法需要解决的重要难题^[7]。

本文提出了一种基于变曲率沟槽的研磨加工方法^[8]。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一一致性加工。本文基于变曲率沟槽研磨加工方法进行了一系列的正交加工实验，研究了研磨压力、磨料粒径及磨料浓度对球体的材料去除率、表面粗糙度和球度误差的影响，并通过对实验数据的统计与分析获得最佳的工艺参数。

1 变曲率沟槽加工方法机理

如图 1 所示，在变曲率沟槽研磨加工方法中，沟槽盘中的沟槽轨道由传统的同心圆 V 型槽轨道^[9]改为变曲率曲线 V 型槽轨道，即 V 型沟槽轨道上任意一点相对于研磨盘中心的曲率半径都不同且连续变化，并通过该曲率半径的变化而改变球体自转角。加工时，球体依序从沟槽轨道的起始点出发，沿沟槽逐渐向外作自转角连续变化的运动，在单个加工周期（从沟槽轨道形状起始点经过整个沟槽路径至研磨盘外沿的出球口）内实现成球轨迹全包络，并通过外循环送料机构将球体从出球口依序送回至沟槽轨道起点进行循环加工。在球体、研磨盘及注入加工区域的磨粒之间的相互作用下实现球体表面的材料去除。

2 实验设计

2.1 实验装置

本实验所用的设备如图 2 所示。设备主要包括上

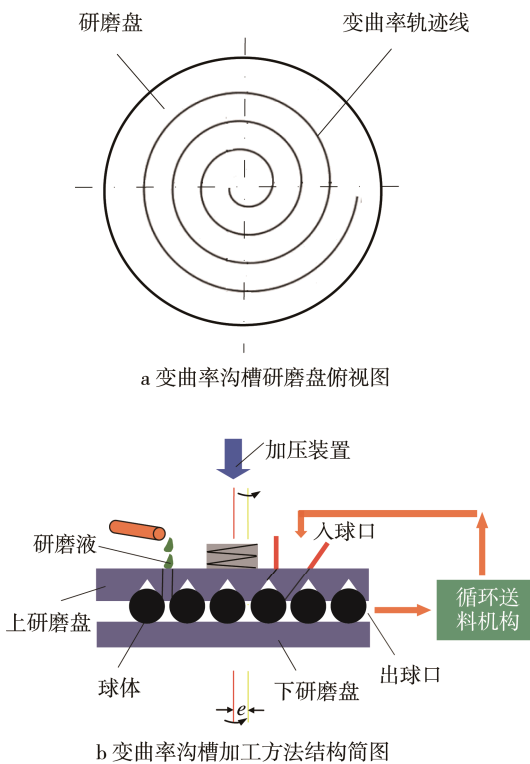


图 1 变曲率沟槽研磨方法示意图
Fig.1 Schematic diagram of variable-radius groove lapping method: a) variable-radius groove grinding disc top view, b) structure diagram of variable-radius groove lapping method

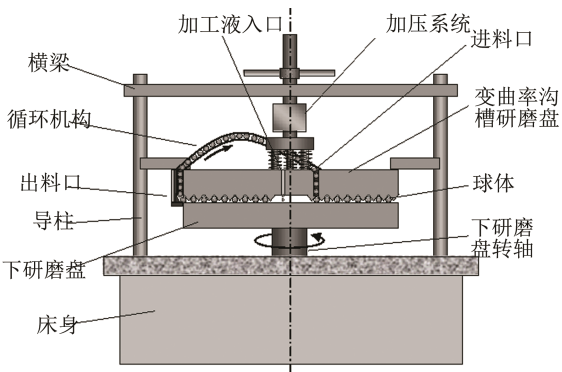


图 2 实验装置示意
Fig.2 Schematic diagram of experimental device

研磨盘、下研磨盘，以及上研磨盘的加压及控制系统。上研磨盘加工成变曲率沟槽，设有管道式送料循环机构、进料口与研磨液输入口。加工时，下研磨盘转动，球体依序由磨盘中部沿变曲率沟槽逐渐向外作自旋

角连续变化的研磨运动,并通过送料机构将球体从研磨盘外沿的出料口依序送至研磨盘中心的入料口进行循环加工。

2.2 实验方法

在轴承钢球的研磨过程中,影响加工质量和效率的因素有很多,主要有球坯材料、磨料粒径、加工载荷、研磨盘转速以及加工系统的刚性等。对于精研加工阶段,在球坯材料、转速组合以及研磨系统给定的情况下,影响加工质量和加工效率的主要因素为以下三个:1)研磨压力,2)磨料粒径,3)磨料浓度。因此实验主要研究研磨压力(A)、磨料粒径(B)、磨料浓度(C)三个影响因素对材料去除率、表面粗糙度及球度误差的影响。根据田口法^[10]选用 $L_9(3^4)$ 正交表^[11],见表1。实验选用公称直径为8.731 mm的轴承钢球(GCr15)为加工对象,初始平均表面粗糙度为25 nm。GCr15轴承钢球具有较高的硬度和均匀的组织,而氧化铝磨料硬度很高,稳定性好,是一般钢铁试样常用的研磨抛光磨料,因此对于去除余量小的精密球加工,选用 Al_2O_3 微粉配合铸铁研具进行精研,可以获得较好的加工效果。实验总共9组,每组实验选用350颗钢球,每组实验加工5 h,具体实验条件如下:磨料类型为 Al_2O_3 ,磨料粒径为8000[#](1.875 μm)、5000[#](3 μm)、3000[#](5 μm),每球研磨压力为0.5、2.5、5 N,磨料浓度(质量分数,全文同)为10%、25%、50%,下研磨盘转速为8 r/min。检测设备采用SJ-410型表面粗糙度仪、SI-234高精度电子天平及三丰的RA-1500型圆度仪。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交表
Tab.1 Orthogonal table $L_9(3^4)$

实验序号	因素			
	每球压力 (A)/N	磨料粒径 (B)	磨料浓度 (C)/%	未知因素 (D)
1	0.5	8000 [#]	10	1
2	0.5	5000 [#]	25	2
3	0.5	3000 [#]	50	3
4	2.5	8000 [#]	25	3
5	2.5	5000 [#]	50	1
6	2.5	3000 [#]	10	2
7	5	8000 [#]	50	2
8	5	5000 [#]	10	3
9	5	3000 [#]	25	1

3 结果和分析

3.1 实验结果

田口法以信噪比(S/N)^[12]作为优化设计和分析中

的评估特征。这是因为 S/N 值能同时反映每次实验后工件球度和表面粗糙的平均值和偏差^[13]。 S/N 采用dB值表示。每组实验从加工的350颗钢球中随机选8颗钢球,测量初始表面粗糙度和初始质量,并在实验中追踪这8颗钢球。加工5 h后,分别测量该8颗钢球的表面粗糙度、材料去除率和圆度误差,再通过进一步计算得到信噪比(S/N)。根据田口法,评价条件为材料去除率时,材料的去除率越大越好, S/N 计算公式为(1);评价条件为表面粗糙度和球度误差时,表面粗糙度和球度误差越小越好, S/N 计算公式为(2)。

$$S/N_i = -10 \lg MSD_i = -10 \lg \left(\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \frac{1}{R_{ij}^2} \right) \quad (1)$$

式中: i 为实验序号; r 为检测的球数量($r=8$)。

$$S/N_i = -10 \lg MSD_i = -10 \lg \left(\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r R_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

式中:MSD为平均值的平均方差。采用 S/N 进行水平平均响应分析时, S/N 的值越大越好。材料去除率(MRR)、表面粗糙度(Ra)和球度误差(ΔS_{ph})的测试结果 S/N 计算值如表2所示。

表 2 S/N 计算结果
Tab.2 Results of S/N

试验号	MRR(dB)	Ra (dB)	ΔS_{ph} (dB)
1	-26.24	-32.48	9.58
2	-19.84	-26.75	10.79
3	-18.6	-32.41	12.22
4	-18.51	-28.63	8.12
5	-17.71	-27.13	10.67
6	-14.09	-31.53	8.55
7	-15.44	-29.49	8.24
8	-18.12	-31.15	6.33
9	-11.95	-32.96	8.40

3.2 S/N 平均响应分析

S/N 响应分析的目的在于找出最优的研磨工艺参数。各因素 S/N 平均响应对材料去除率、表面粗糙度及圆度误差的影响曲线如图3—5所示。由图3可知,材料去除率随着研磨压力、磨料粒径和磨料浓度的增大而提高。这是因为钢球与研磨盘的接触面积随着载荷的增加而增大,参与研磨的磨粒数量增多,同时磨料的切入量也将增加,材料去除率也随之提高。同样,磨料浓度的增加也使参与材料切削的磨粒增加,提高了材料去除率,但由于接触面积的限制,磨料浓度的增加并不能使参与加工的磨粒数量一直增加下去,而是在达到一定浓度后趋向饱和,材料去除率也不再增大^[15]。由图4可知,较小的研磨压力和磨料粒径可以得到更好的表面质量。这是因为研磨压力的增加会导致更大的磨粒切入量,从而使球体表面质量下降,而

磨料粒径的增大也会直接导致磨料切削深度的增加, 从而造成表面粗糙度升高。由图 5 可知, 较小的研磨压力可以获得较好的球度, 而磨料粒径和磨料浓度的影响较小。研磨压力的增大导致球与研磨盘的接触面

积增大, 这导致球坯表面曲率半径大的地方与曲率半径小的地方被同时去除, 降低了对尺寸的选择性, 导致球形误差修正效果变差。

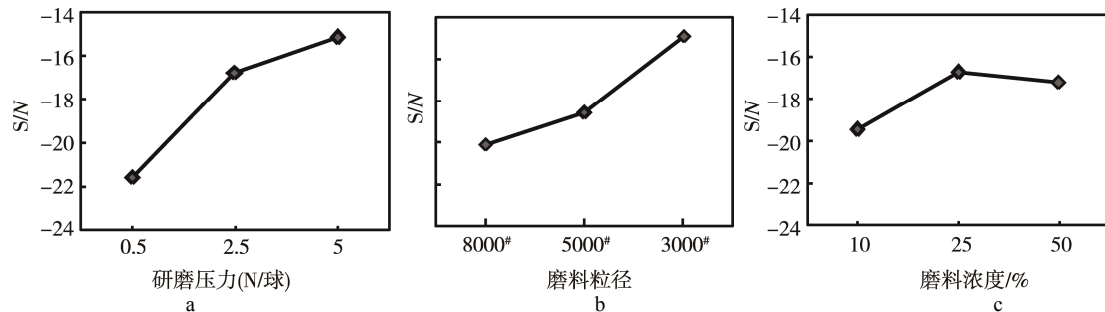


图 3 工艺参数水平对材料去除率 MRR 的影响
Fig.3 Plots of S/N ratio of each parameter level on MRR

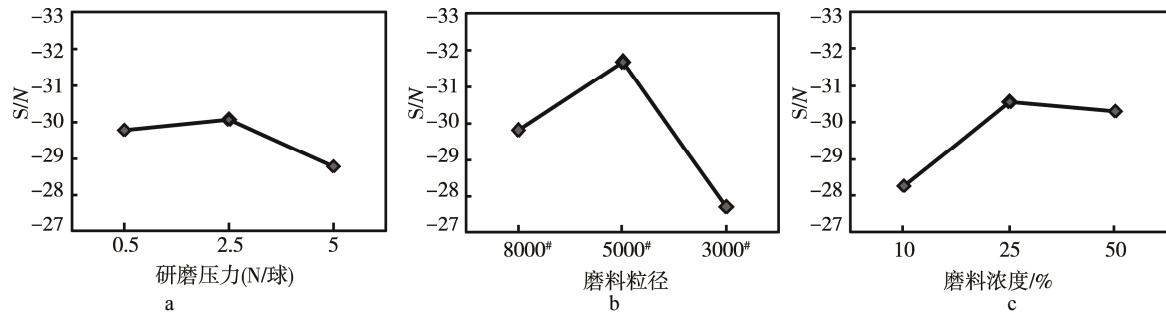


图 4 工艺参数水平对表面粗糙度 R_a 的影响
Fig.4 Plots of S/N ratio of each parameter level on R_a

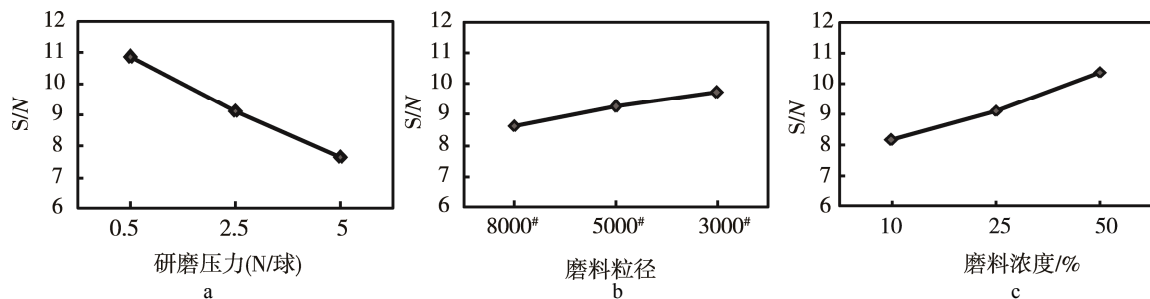


图 5 工艺参数水平对球度误差 ΔS_{ph} 的影响
Fig.5 Plots of S/N ratio of each parameter level on ΔS_{ph}

依据田口法的理论, 工件加工所达到的效果与信噪比的值成正相关。对于材料去除率, 去除率越大越好, 因此最佳的参数组合为 A3B3C2, 即在每球研磨压力为 5 N、粒径为 3000#、浓度为 25% 的条件下, 可以得到最大的材料去除率。对于表面粗糙度, 最佳参数组合为 A2B2C3, 即在压力为 2.5 N、粒径为 5000#、浓度为 25% 条件下得到的表面粗糙度最优。对于球度误差最佳参数组合为 A1B3C3, 即在压力为 0.5 N、粒径为 3000#、浓度为 25% 条件下得到的球度误差最小。

3.3 ANOVA 方差分析

田口方法采用方差分析 (ANOVA) [15] 评估正交

实验中每个参数的响应量对结果的影响程度。ANOVA 通常采用标准偏差平方值的和来计算和分析每个参数 (因素) 的差异和差异度, 通常采用标准偏差。其基本特性为总校正平方和 SS_T 等于所有参数的处理平方和 SS_k 及误差平方和 SS_e 的总和, 即:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_e \quad (3)$$

所有结果数据的总校正平方和 SS_T 为:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - 2n\bar{y}^2 + n\bar{y}^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{G^2}{n} \quad (4)$$

式中: y_i 为每个实验结果的信噪比, 即 S/N_i , $G = \sum y_i$, 是所有实验结果数据的总和; n 为总实验的次数 ($n=9$)。总的实验方差为 $V_T = SS_T/F_T$, F_T 是总方差的自由度 (DOF), 本研究中的自由度 $F_T = 9-1=8$ 。

每个参数的处理平方和 SS_k 为:

$$SS_k = \sum_{j=1}^t \bar{x} \left(\bar{y}_j - \bar{y} \right)^2 = \sum_{j=1}^t \left(\frac{Sy_j^2}{t} \right) - \frac{G^2}{n} \quad (5)$$

式中: k 为所研究的一个参数; j 为参数 k 的水平数量; \bar{y}_j 为参数 k 每个水平下的平均值; t 为参数每个水平的重复次数, 本文 $t=3$; Sy_j 为每个参数 k 下所有 y_j 的和; n 为总实验的次数 ($n=9$)。每个参数的方差为: $V_k = SS_k / F_k$, F_k 是参数的自由度, 本研究中的自由度为 $F_k=3-1=2$ 。

误差平方和为:

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C \quad (6)$$

则未知因素 (表 1 中的 D 列) 的方差为:

$$V_e = SS_e / F_e, F_e = 3 - 1 = 2。$$

采用 ANOVA 方差分析的目的在于对研磨压力 (A)、研磨料粒径 (B)、磨料浓度 (C) 及未知因素 (D) 的影响权重进行分析。表 3—5 列出了材料去除率 MRR 和表面粗糙度 Ra 的 ANOVA 分析结果, 其中 DOF 为自由度, SS 为各参数的处理平方和及误差平方和, SA 为各参数及误差 SS 值占总校平方和的百分比。通过百分比量化评估实验因素对材料去除率、表面粗糙度及球度误差的影响。研磨压力、磨料粒径、磨料浓度以及未知因素对精密球体的材料去除率和表面粗糙度的影响程度如图 6—8 所示。材料去除率的影响权重依次为 A (研磨压力) 51% > B (磨料粒径) 33% > C (磨料浓度) 10% > D (未知因素) 6%。表面粗糙度的影响权重依次为 B (磨料粒径) 53% > C (磨料浓度) 21% > A (研磨压力) 15% > D (未知因素) 11%。球度误差的影响权重依次为 A (研磨压力) 61% > B (磨料浓度) 29% > C (磨料粒径) 7% > D (未知因素) 3%。

表 3 MRR 的 ANOVA 分析结果
Fig.3 ANOVA results of MRR

	DOF	SS	SA/%
A (研磨压力)	2	66.40	51
B (磨料粒径)	2	42.63	33
C (磨料浓度)	2	12.61	10
D (未知因素)	2	8.62	6
总计	8	130.25	100

表 4 Ra 的 ANOVA 分析结果
Fig.4 ANOVA results of Ra

	DOF	SS	SA/%
A (研磨压力)	2	6.94	15
B (磨料粒径)	2	23.55	53
C (磨料浓度)	2	9.40	21
D (未知因素)	2	4.73	11
总计	8	44.62	100

表 5 ΔS_{ph} 的 ANOVA 分析结果
Fig.5 ANOVA results of ΔS_{ph}

	DOF	SS	SA/%
A (研磨压力)	2	15.44	61
B (磨料粒径)	2	1.75	7
C (磨料浓度)	2	7.45	29
D (未知因素)	2	0.66	3
总计	8	25.30	100

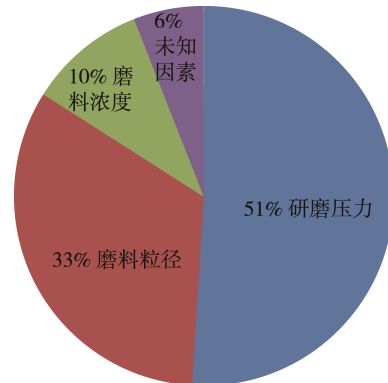


图 6 各参数对去除率的影响程度
Fig.6 Effect degree of parameters on MRR

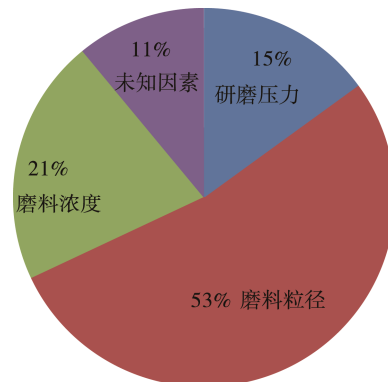


图 7 各参数对表面粗糙度的影响程度
Fig.7 Effect degree of parameters on Ra

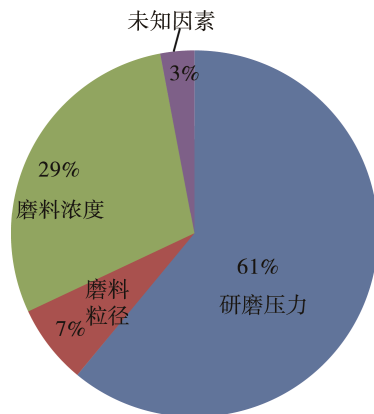


图 8 各参数对球度误差的影响程度
Fig.8 Effect degree of parameters on ΔS_{ph}

3.4 优化分析

通过上述 S/N 平均响应分析和ANOVA方差分析可知,对于材料去除率,最佳参数组合为压力5 N/球、磨料粒径3000 μ 、磨料浓度25%,在该组合下重复实验,加工5 h后,平均材料去除率达到0.28 mg/h。对于表面粗糙度,最佳参数组合为压力2.5 N/球、磨料粒径5000 μ 、磨料浓度为25%,在该条件下重复实验,初始平均粗糙度为25 nm的钢球在加工5 h后,平均表面粗糙度达到18 nm,最低达到12 nm。图9和图10分别为该条件下加工前后钢球表面形貌显微图。

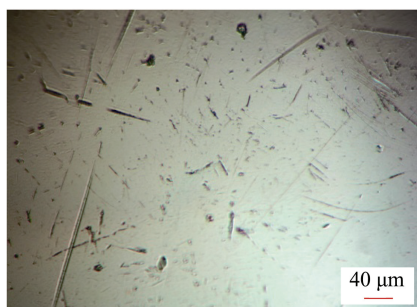


图9 加工前表面形貌(100 \times)

Fig.9 Surface before processing

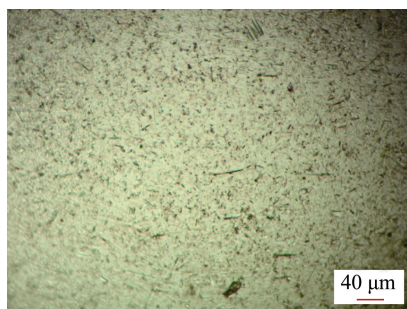


图10 加工后表面形貌(100 \times)

Fig.10 Surface after processing

4 结语

为获得良好的高精度球体表面质量和加工效率,本文以压力、磨料粒径、磨料浓度为主要影响参数设计正交实验,以材料去除率、表面粗糙度及球度误差为评价指标,对变曲率沟槽加工方法研磨球体的工艺参数进行优化。结果表明:对于材料去除率而言,研磨压力的影响最大,磨料浓度的影响较小,研磨压力和磨料粒度越大,材料去除率越大;对于表面粗糙度而言,磨料粒径的影响最大,磨料粒径和研磨压力越小,表面粗糙度越好;对于球度误差而言,研磨压力的影响最大。综合考虑精密球的研磨要求,实验确定研磨压力2.5 N/球,磨料粒径5000 μ ,磨料浓度25%为最佳的加工参数组合。在该工艺参数组合下,钢球加工5 h后,平均表面粗糙度达到18 nm,最低达到12 nm,球度误差达到0.26 μ m。

参考文献:

- [1] OHTA H, KOBAYASHI K. Vibrations of Hybrid Ceramic Ball Bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 192(2): 481—493.
- [2] 黄传真, 艾兴. 新型陶瓷轴承研究的现状与展望[J]. 中国陶瓷工业, 1999, 6(2): 25—27.
HUANG Chuan-zhen, AI Xing. The Present Situation and Future Prospect of Study on Advanced Ceramic Bearing [J]. China Ceramic Industry, 1999, 6(2): 25—27.
- [3] GOOO K, MIZUMOTO H. A Lapping System for Ultra-Precision Bearing Balls[J]. JS PE, 1996, 62(5): 681—685.
- [4] ITOIGAWA F, NAKAMURA T, FUNABASHI K. Steel Ball Lapping by Lap with V shape Groove[J]. JSME, 1993, 562(59): 1906—1912.
- [5] REN C Z. The Eccentric Circular Groove Lapping Technique for Ceramic Balls[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1995, 11(4): 2—24.
- [6] DEZZANI M M, PEARSON P K. Hybrid Ceramic Bearings for Difficult Applications[J]. Journal of Engineering for Gas Trbine Surbines and Power Transactions of the ASME, 1996, 118(2): 449—452.
- [7] LEE R T, HWANG Y C, CHIOU Y C. Lapping of Ultra-precision Ball Surfaces Part I: Concentric V-Groove Lapping System[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1146—1156.
- [8] ZHOU F, YUAN J, LYU 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, 35: 1—12.
- [9] 袁巨龙. 功能陶瓷的超精密加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
YUAN Ju-long. Ultraprecision Machining of Functional Ceramics[M]. Harbin: Harbin Industrial of Technology Press, 2000.
- [10] KANG J, HADFIELD M. Parameter Optimization by Taguchi Methods for Finishing Advanced Ceramic Balls Using a Novel Eccentric Lapping Machine[J]. Proc Instn Mech Engrs, 2005, 215(B): 69—78.
- [11] 于小洁, 常福荣. 用正交实验法提高中温锌系磷化质量[J]. 表面技术, 2005, 34(1): 73—74.
YU Xiao-jie, CHANG Fu-rong. Improving the Quality of Phosphide for Series of Zincat Middle Temperature with Orthogonal Test Method[J]. Surface Technology, 2005, 34(1): 73—74.
- [12] 邱华, 张宗明, 冉洪武. 正交试验方法在防腐涂料研究中的应用[J]. 表面技术, 2006, 35(6): 67—68.
QIU Hua, ZHANG Zong-ming, RAN Hong-wu. Research of Anticorrosion Coating through the Orthogonal Design [J]. Surface Technology, 2006, 35(6): 67—68.
- [13] 付川, 祁俊生. 正交试验优化电镀 Zn-Ni-P 合金工艺[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 43—46.
FU Chuan, QI Jun-sheng. Optimization of Technology of Zn-Ni-P Alloy Electroplating by Orthogonal Test[J]. Surface Technology, 2003, 32(6): 43—46.
- [14] WANG Zhi-wei, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long. On the Evaluation of Lapping Uniformity for Precision Balls[J]. Key Engineering Materials, 2009, 46: 558—562.
- [15] ROSS P J. Taguchi Techniques for Quality Engineering[J]. Technometrics, 1996, 31(2): 34—39.