

# 圆柱表面声波辅助剪切增稠抛光优化实验研究

戴伟涛, 吕冰海, 翁海舟, 邵琦

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014)

**摘要:**目的 获得声波辅助剪切增稠抛光方法抛光轴承钢圆柱表面的最佳工艺参数。方法 应用田口法,对声波辅助剪切增稠抛光过程中影响工件材料去除率,以及表面粗糙度的声波频率、声波功率、声波波形等参数进行实验与优化分析,以材料去除率、表面粗糙度为评价条件,得到最优抛光参数,并在最优参数条件下做多组重复性实验以验证结果的可靠性。利用金相显微镜、光学轮廓仪等测试手段对加工后的工件进行表面形貌检测。结果 以材料去除率为评价指标,声波频率影响最为显著,声波功率影响次之,声波波形影响最小;以表面粗糙度为评价指标时,声波波形影响最为显著,声波频率影响次之,声波功率影响最小。结论 在声波频率为 20 Hz、声波功率为 25 W、正弦波形条件下,工件材料去除率最高,材料去除率达到了 11.32  $\mu\text{m}/\text{h}$ ;在声波频率为 60 Hz、声波功率 25 W、正弦波形条件下,工件表面质量最佳,抛光 1 h 后工件平均表面粗糙度  $R_a$  由 100 nm 下降至 7 nm 以内,最低达到了 4.48 nm。

**关键词:** 声波辅助; 剪切增稠抛光; 田口法; 圆柱表面; 频率; 功率; 波形

**中图分类号:** TG175      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0188-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.030

## Optimization Experiment of Acoustic Assisted Shear Thickening Polishing of Cylindrical Surface

DAI Wei-tao, LYU Bing-hai, WENG Hai-zhou, SHAO Qi

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

**ABSTRACT:** **Objective** To obtain the optimal parameters in the acoustic assisted shear thickening polishing (ASTP) process of bearing steel cylindrical surface. **Methods** The Taguchi method was used to analyze and optimize the parameters such as acoustic frequency, acoustic power and acoustic waveform which would influence the material removed rate (MRR) and the surface roughness ( $R_a$ ). The optimized parameters were gained taking MRR and  $R_a$  as the evaluation indexes, and multi-group experiments were carried out to verify the reliability of the results under the optimized ASTP conditions and the surface morphology of the processed workpieces was investigated by the test methods including metallurgical microscopy and optical profilometry. **Results** When the MRR was used as the evaluation index, acoustic frequency was the most significant influencing factor, followed by acoustic power and then

收稿日期: 2015-11-16; 修订日期: 2015-12-16

Received: 2015-11-16; Revised: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51175166); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ12E05001); 浙江省科技计划公益项目(2013C31014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51175166), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LZ12E05001) and Science and Technology Project of Zhejiang Province(2013C31014)

作者简介: 戴伟涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事超精密加工技术研究。

Biography: DAI Wei-tao (1989—), Male, Master graduated student, Research focus: ultra-precision machining technology.

通讯作者: 吕冰海(1978—),男,研究员,硕士生导师,主要研究方向为超精密加工技术及装备。

Corresponding author: LYU Bing-hai(1978—), Male, Researcher, Master tutor, Research focus: ultra-precision machining technology and equipment.

acoustic waveform. While  $Ra$  was used as the index, acoustic waveform was the most significant influencing factor, followed by acoustic frequency and acoustic power. **Conclusion** Based on the analysis results, MRR reached the highest value of  $11.32 \mu\text{m}/\text{h}$  under the conditions of 20 Hz acoustic frequency, 25 W acoustic power and sine wave acoustic waveform. The surface quality of the workpiece was the best under the conditions of 60 Hz acoustic frequency, 25 W acoustic power and sine wave acoustic waveform, and the surface roughness  $Ra$  was reduced rapidly from 100 nm to 4.48 nm after 1 hour processing and the lowest roughness was 4.48 nm.

**KEY WORDS:** acoustic assistance; shear thickening polishing; Taguchi method; cylindrical surface; frequency; power; waveform

抛光技术一直都是超精密加工最主要的一种方法,是降低表面粗糙度、去除损伤层,获得光滑、无损伤表面的终加工手段<sup>[1-2]</sup>。目前国内外学者提出的抛光方法有弹性发射加工(Elastic emission machine, EEM)<sup>[3]</sup>、化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP)<sup>[4-5]</sup>、磁流变抛光(Magnetorheological finishing, MRF)<sup>[6]</sup>、电解抛光(Electropolishing, EP)<sup>[7-8]</sup>、气囊抛光(Ballonet tool polishing, BTP)<sup>[9]</sup>等。复杂曲面由于其曲率的多变性,导致抛光工具曲率很难和被抛光曲面曲率一致,虽然以计算机控制光学表面成形技术(Computer control optical surfacing, CCOS)<sup>[10]</sup>为基础的曲面成形技术,结合磁流变抛光、气囊抛光、应力盘抛光(Stressed-lap polishing, SLP)<sup>[2]</sup>等技术已成功应用于各类曲面的抛光加工,但随着曲面类零件需求量的增加和性能要求的不断提高,高效、高质量的曲面抛光仍不断受到研究人员的关注。

为实现高效、高质量、低成本的加工目标,笔者提出剪切增稠抛光(Shear thickening polishing, STP)<sup>[11]</sup>,在具有剪切增稠效应的非牛顿流体<sup>[12]</sup>中添加磨粒制备剪切增稠抛光液,由于与工件接触区域的抛光液受到剪切作用而黏度增大,大大增强了对抛光液中磨粒的把持力,使得磨粒对工件表面产生微切削或化学机械作用而去除材料,实现对工件表面的抛光。由于STP加工需要合理地调节抛光液的剪切增稠效应来控制抛光质量,因此,如何有效地控制抛光液的剪切增稠效应极为重要。

为了更好地控制剪切增稠效应以提升工件的加工效率和表面质量,本文在STP加工方法的基础上提出声波辅助剪切增稠抛光(Acoustic assisted shear thickening polishing, ASTP)方法,并采用田口方法<sup>[13]</sup>研究声波频率、声波功率、声波波形3个主要辅助声波参数对轴承钢圆柱滚子的材料去除率及表面粗糙度的影响,从而确定最佳工艺参数。

## 1 机理

在STP抛光中,剪切增稠效应是依靠工件与抛光

液之间较高的相对速度形成较大的剪切速率而引发的,为有效消除相对速度对STP效果的制约,ASTP利用声波辅助振动对抛光液施加剪切作用,其加工原理如图1所示。ASTP在抛光池的底部施加了一个声波的作用,使得抛光池中的剪切增稠抛光液发生振动,从而在抛光液内部产生强烈的剪切增稠现象;进而在声波作用的区域,抛光液将形成一个“柔性固着磨具”,当工件与该“柔性固着磨具”发生相对运动,磨粒对工件表面产生微切削作用,实现工件材料的高效加工。由于抛光液所具有的流动性,从而使形成的“柔性固着磨具”能够很好地吻合各类曲面,实现不同曲面的抛光。通过调节声波的频率、功率以及波形主动控制抛光液的剪切增稠程度,从而实现不同的抛光效果。

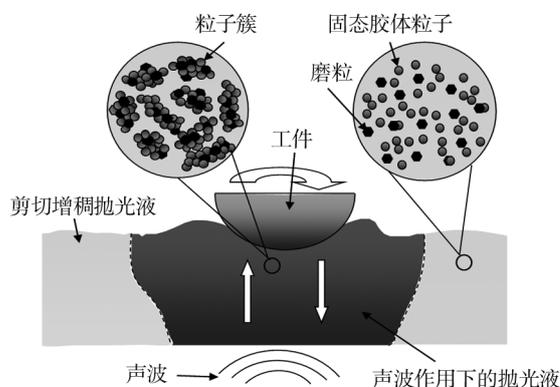


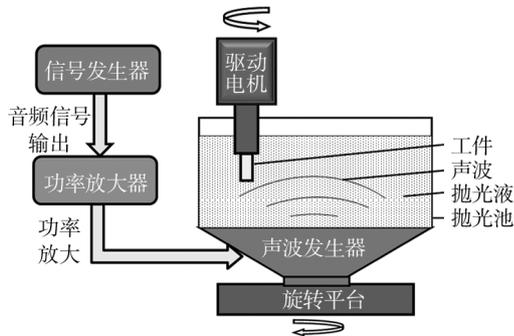
图1 声波辅助剪切增稠抛光的材料去除机理

Fig. 1 Material removal mechanism of ASTP process

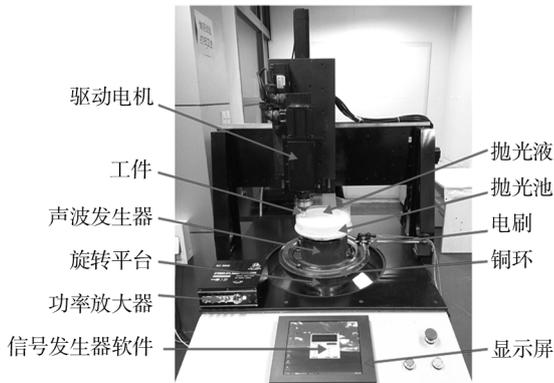
## 2 实验及设计

实验所用ASTP的加工设备如图2所示。设备由一台工控机控制,信号发生器软件安装在工控机系统中,用于输出不同音频信号;功率放大器将信号发生器输出的信号功率进行放大,并可调节音频的功率;放大后的音频信号通过导线、电刷、铜环传送到声波发生器并发生声波作用于抛光池中抛光液;不同声波参数由信号发生器和功率放大器进行调节。声波发生器固定于下方的旋转平台,工件被夹持于抛光池上

方,旋转平台和夹具均由伺服电机驱动;加工时,抛光池转动与工件形成一定的相对速度,工件自转以保证圆柱表面抛光的均匀性。



a 声波辅助剪切增稠抛光设备示意图



b 声波辅助剪切增稠抛光设备实物图

图2 声波辅助剪切增稠抛光设备  
Fig.2 Experimental device for ASTP

实验中工件为 GCr15 轴承钢圆柱滚子,尺寸为  $\phi 20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ,工件初始表面粗糙度  $Ra = (100 \pm 10)\text{ nm}$ 。具体的加工条件如下:磨料类型为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,磨料粒径平均为  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,磨料质量分数为 30%,声波频率分别为 20、40、60 Hz,声波功率分别为 15、25、35 W,声波波形选择正弦波、三角波、方波,工件转速为 500 r/min,抛光池转速为 60 r/min,每组实验时间为 60 min。

在 ASTP 的加工试验中主要考虑声波频率(A)、声波功率(B)、声波波形(C)3个影响因素对材料去除率以及表面粗糙度的影响,每个因素都有3个水平,根据田口方法,选用  $L_9(3^4)$  作为正交表(见表1),共有9组实验。

本实验通过分析信噪比(S/N)对抛光参数进行优化。根据田口方法,评价条件为材料去除率时,归于望大特性的参数设计,S/N计算公式为式(1);评价条件为表面粗糙度时,归于望小特性的参数设计,S/N计算公式为式(2):

表1 田口实验正交表

Tab.1 Orthogonal table of the Taguchi method

实验号	频率/Hz	功率/W	波形	未知因素
1	20	15	正弦波	1
2	20	25	三角波	2
3	20	35	方波	3
4	40	15	三角波	3
5	40	25	方波	1
6	40	35	正弦波	2
7	60	15	方波	2
8	60	25	正弦波	3
9	60	35	三角波	1

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

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

式中: $i$ 为实验号; $r$ 为每组实验中圆柱滚子表面的检测点数量, $r=6$ 。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结果

为准确衡量每次实验工件的材料去除率与表面粗糙度,利用 CMT-1100 激光精密快速厚度检测仪与 SJ-411 型表面粗糙度仪(日本三丰公司)分别测得抛光后每个工件同一圆周上6个位置的材料去除率以及表面粗糙度,并将获得的6个采样数据进一步计算得到信噪比(S/N),用以分析和评价最佳的加工条件。材料去除率、表面粗糙度的测试结果及 S/N 计算值结果见表2、表3。

表2 材料去除率测试结果及 S/N 计算值

Tab.2 The test results of MRR and S/N value

序号	材料去除率/ $(\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$						S/N /dB
	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	
1	10.31	7.31	8.21	9.65	8.43	7.97	18.56
2	8.53	9.54	9.46	9.61	7.81	8.76	18.96
3	6.92	8.84	7.57	8.41	7.56	8.17	17.88
4	7.43	6.18	7.79	7.03	7.34	8.42	17.22
5	8.56	7.20	6.58	7.31	6.58	7.73	17.19
6	6.59	6.64	7.15	7.63	7.44	6.89	16.93
7	7.06	7.25	6.80	7.17	5.91	6.87	6.64
8	8.94	8.24	8.21	7.90	8.32	8.12	18.35
9	5.24	7.99	7.97	5.92	5.41	5.48	15.64

表3 表面粗糙度测试结果及 S/N 计算值  
Tab.3 The test results of Ra and S/N value

序号	表面粗糙度/nm						S/N /dB
	Ra <sub>1</sub>	Ra <sub>2</sub>	Ra <sub>3</sub>	Ra <sub>4</sub>	Ra <sub>5</sub>	Ra <sub>6</sub>	
1	9	8	7	13	12	8	-19.78
2	8	10	12	9	10	8	-19.65
3	11	10	11	12	9	13	-20.89
4	6	13	14	10	13	10	-21.08
5	7	9	9	8	11	10	-19.17
6	9	6	8	8	10	9	-18.51
7	9	8	7	8	11	12	-19.40
8	7	8	5	6	7	9	-17.05
9	10	9	10	10	9	6	-19.19

### 3.2 S/N 平均响应分析

从表1可以看出,因素A在不同的水平条件下的因素B和C的水平条件组合是相同的,它抵消了因素B和C对因素A响应的影响。因此,通过因素A的某个水平所出现的3个实验的平均值,可以确定因素A的最优值。同理,B和C的最优值也可以被确定。图3和图4分别为各因素 S/N 平均响应对材料去除率 MRR、表面粗糙度 Ra 的影响曲线图。

如图3a、图4a所示,在一定范围内,声波频率越高,工件表面粗糙度也越好,但是材料去除率却呈现下降的趋势。这是因为随着剪切速率的增加,剪切增

稠抛光液依次会出现剪切变稀、剪切增稠、剪切变稀3个状态区间<sup>[14]</sup>;而在本实验中声波频率决定了剪切速率的大小,当声波频率为20 Hz时,抛光液的黏度在峰值附近,对磨粒的把持力较大,单颗磨粒对工件的切入较深,从而使工件整体的材料去除率比较高,但是表面质量却较差。随着频率的增大,抛光液呈现剪切变稀的趋势,对磨粒的把持力减小,单颗磨粒对工件的切入深度减小,改善了工件表面质量,但是降低了材料去除率。

由图3b、图4b所示,随着声波功率的增加,工件材料去除效率以及表面质量都是先变好后又变差,功率为25 W时,工件材料去除效率以及表面质量明显好于其他两个水平。这是因为当功率较低时,声波没有足够的能量使抛光液产生剪切增稠效应,绝大多数磨粒处理游离状态,对工件表面的切削力很小,从而使材料去除率较低,表面粗糙度也得不到快速改善。而当功率过大时,由于声波作用于抛光液的能量较大,加工半小时后,抛光液发热严重而性质改变,逐渐失去剪切增稠特性,从而降低了材料去除率,工件表面质量也越来越差。

由图3c、图4c所示,当声波波形为正弦波时,工件的材料去除率最高,表面粗糙度最好。相对于方波,正弦波与三角波是连续波;而相对于三角波,正弦波的波形变化更为平缓,在正弦波的作用下,抛光液将产生持续稳定的剪切增稠效果,从而实现

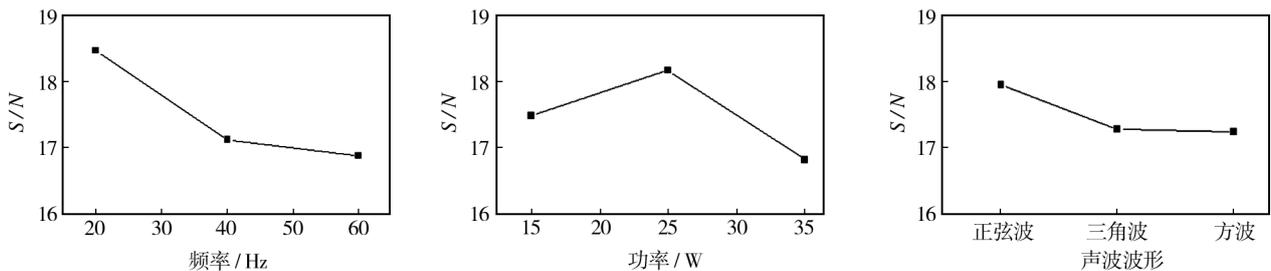


图3 工艺参数水平对材料去除率的影响

Fig.3 Plots of S/N ratio of each parameter level on MRR: a) frequency, b) power, c) waveform

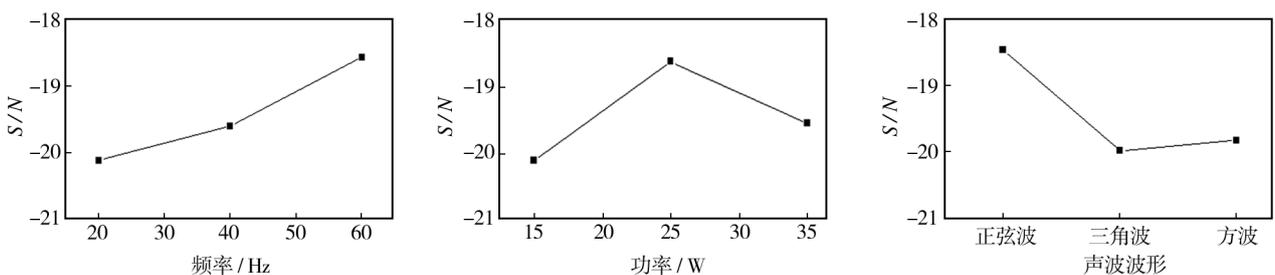


图4 工艺参数水平对表面粗糙度 Ra 的影响

Fig.4 Plots of S/N ratio of each parameter level on Ra: a) frequency, b) power, c) waveform

效、高质量地抛光。但是,当声波波形为三角波或方波时,工件的抛光效果都较差,且两者差区别不大。

根据田口理论,信噪比越大,工件加工出的效果越好。因此根据各因素信噪比平均值,可以得到最优材料去除率的参数组合为:A1B2C1,即在声波频率 20 Hz、声波功率 25 W 的正弦波条件下可以得到最大的材料去除率。最优表面粗糙度的参数组合为:A3B2C1,即在声波频率 60 Hz、声波功率 25 W 的正弦波条件下可以得到最好的表面粗糙度。

### 3.3 方差分析

方差分析<sup>[15]</sup>(ANOVA, Analysis of Variance)是通过百分比量化评估实验因素对材料去除率以及表面粗糙度的影响,并作出正确的判断与评价。表 4 和表 5 列出了 MRR 和 Ra 的方差分析结果。对于材料去除率,因素 A 声波频率的影响最为显著(SS=50%),因素 B 声波功率的影响次之(SS=31%),因素 C 声波波形的影响最小(SS=11%);对于表面粗糙度,因素 C 声波波形的影响最为显著(SS=36%),因素 A 声波频率的影响次之(SS=33%),因素 B 声波功率的影响最小(SS=28%)。此外,材料去除率和表面粗糙度还受到其它一些不确定因素的影响,它们对材料去除率和表面粗糙度的影响分别为 8% 和 3%。

表 4 MRR 的 ANOVA 分析结果  
Tab.4 ANOVA results of MRR

	DOF	SS	SS/%
A(声波频率)	2	3.78	33
B(声波功率)	2	3.30	28
C(声波波形)	2	4.23	36
D(未知因素)	2	0.36	3
总计	8	11.67	100

表 5 Ra 的 ANOVA 分析结果  
Tab.5 ANOVA results of Ra

	DOF	SS	SS/%
A(声波频率)	2	4.43	50
B(声波功率)	2	2.74	31
C(声波波形)	2	0.96	11
D(未知因素)	2	0.71	8
总计	8	8.84	100

### 3.4 优化分析

对于材料去除率,最佳的参数组合为:20 Hz、25 W、正弦波。在该组合下,经过多次重复性实验,在加工 1 h 后,工件的平均材料去除率达到 11.32 μm/h。图 5 为金相显微镜观测的工件加工前后微观表面形

貌。由图 5 可见,工件初始为不光滑表面,经 ASTP 后,工件表面已呈现镜面效果。

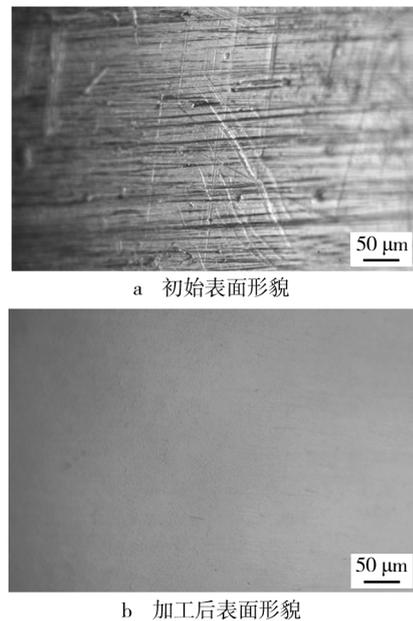


图 5 工件加工前后表面形貌(100×)

Fig.5 Surface morphology of the workpiece before and after processing(100×)

对于表面粗糙度,最佳的参数组合为:60 Hz、25 W、正弦波。在该组合下,经过 3 次重复性实验,初始平均粗糙度 100 nm 左右的轴承钢圆柱表面在加工 1 h 后,工件表面的平均粗糙度为 Ra=7 nm,最低表面粗糙度值达到了 4.48 nm。如图 6 所示为用 NT9800

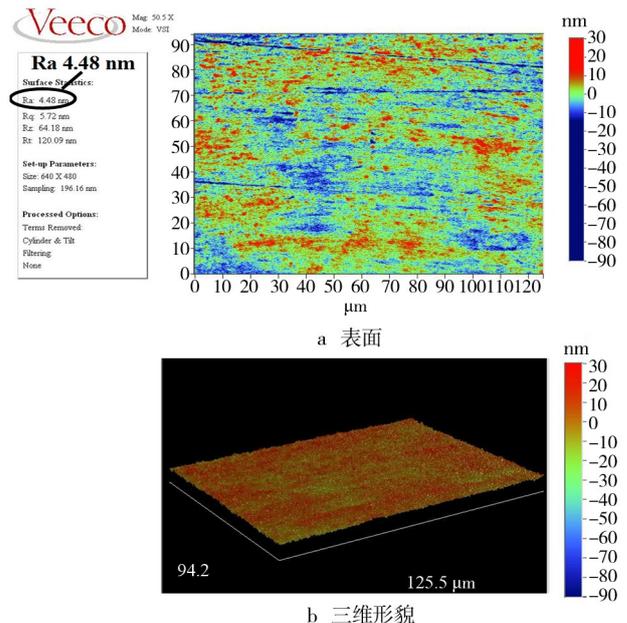


图 6 工件加工后表面粗糙度

Fig.6 Surface roughness of the processed workpiece: a) surface data, b) 3-dimensional interactive display

型光学轮廓仪(美国 Veeco 公司)检测的工件加工后表面的粗糙度。

## 4 结论

为获得良好的轴承钢圆柱表面质量和较高的加工效率,本文以材料去除率,表面粗糙度为评价条件,探讨了基于田口法的 ASTP 工艺参数优化设计方法,并对 ASTP 工艺中声波频率、声波功率、声波波形进行实验优化。

1) 通过  $S/N$  平均响应分析得到,在声波频率为 20 Hz、声波功率为 25 W、正弦波形条件下,工件材料去除率最高,材料去除率达到了  $11.32 \mu\text{m}/\text{h}$ ;在声波频率为 60 Hz、声波功率为 25 W、正弦波形条件下,工件表面质量最佳,抛光 1 h 后工件平均表面粗糙度可由 100 nm 下降至 7 nm 以内,最低达到了 4.48 nm。

2) 通过方差分析得到,对于材料去除率而言,声波频率的影响最为显著,声波波形的影响最小;对于表面粗糙度而言,声波波形的影响最为显著,声波功率的影响最小。

## 参考文献

- [1] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等.超精密加工领域科学技术发展研究[J].机械工程学报,2010,46(15):161—171.  
YUAN Ju-long,ZHANG Fei-hu,DAI Yi-fan,et al. Development Research of Science and Technologies in Ultra-precision Machining Field[J].Journal of Mechanical Engineering,2010,46(15):161—171.
- [2] 李敏,袁巨龙,吴喆,等.复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展[J].机械工程学报,2015,51(5):178—191.  
LI Min,YUAN Ju-long,WU Zhe,et al. Progress in Ultra-precision Machining Methods of Complex Curved Parts[J].Journal of Mechanical Engineering,2015,51(5):178—191.
- [3] 徐兴芹.弹性发射加工中磨粒群运动特性的研究[D].大连:大连理工大学,2013.  
XU Xing-qin. Numerical Simulation of the Movement of Abrasives Grains and Experiment Research in Elastic Emission Machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [4] 彭进,夏琳,邹文俊.化学机械抛光液的发展现状与研究方向[J].表面技术,2012,41(2):78—81.  
PENG Jin,XIA Lin,ZOU Wen-jun. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Surface Technology,2012,41(2):78—81.
- [5] KIM S,SAKA N,CHUN J H,et al. Modeling and Mitigation of Pad Scratching in Chemical-mechanical Polishing[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology,2013,62(1):307—310.
- [6] GOLINI D,SCHNEIDER G,FLUG P,et al. Magnetorheological Finishing[J]. Optics & Photonics News,2001(10):20—24.
- [7] ELIAZ N,NISSAN O. Innovative Processes for Electropolishing of Medical Devices Made of Stainless Steels[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A,2007,83(2):546—557.
- [8] 黄军波,何毅,殷福星.电解抛光工艺对 AP1000 管座焊接表面的改善作用[J].表面技术,2013,42(1):87—90.  
HUANG Jun-bo,HE Yi,YIN Fu-xing. Improvement of Electro-polishing on the Welding Nickel-based Alloy Surface of AP1000 CRDM Nozzle[J]. Surface Technology,2013,42(1):87—90.
- [9] JI S M,ZHANG L,YUAN Q L,et al. A Novel Ballonet Polishing Tool and Its Robot Control System for Polishing the Curved Surface of Mould[J]. International Journal of Computer Applications in Technology,2007(29):212—215.
- [10] KIM D W,MARTIN H M,BURGE J H. Calibration and Optimization of Computer-controlled Optical Surfacing for Large Optics[J]. Optical Manufacturing & Testing IX,2011,8126(1):230—235.
- [11] LI M,LYU B,YUAN J,et al. Shear-thickening Polishing Method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2015,94:88—99.
- [12] IYOH O A W,AZAR J J. An Accurate Slot-flow Model for Non-newtonian Fluid Flow through Eccentric Annuli[J]. Society of Petroleum Engineers Journal,2013,21(5):565—572.
- [13] KACKAR R N. Off-line Quality Control,Parameter Design, and the Taguchi Method[J]. Quality Control Robust Design & the Taguchi Method,1989,17(4):176—188.
- [14] LEE Y S,WETZEL E D,WAGNER N J. The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar<sup>®</sup> Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid[J]. Journal of materials science,2003,38(13):2825—2833.
- [15] 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.