

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.12.006

基于均匀设计和遗传算法的液动压 悬浮抛光工艺参数优化研究*

尹林志, 朴钟宇, 李攀星, 文东辉*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对液动压悬浮抛光流场压力均匀性优化问题,研究了悬浮抛光加工过程中工艺参数对加工区域动压力的影响;采用计算流体力学(CFD)和均匀设计方法求解了不同工艺参数下加工区域的压力均值和压力标准差;采用多元非线性回归方法建立了工艺参数与压力均值、压力标准差的拟合数学模型;通过遗传算法对工艺参数进行了优化;通过数值模拟和加工实验对比研究了优化前后的压力分布和加工效果。研究表明:所选的工艺参数与压力均值、压力标准差有非线性回归关系,最优工艺参数为 $h = 285 \mu\text{m}$, $\omega = 1\ 300 \text{ r/min}$, $\varphi = 0.12$, 在该参数下工件区域的流场压力均值最大,压力标准差最小,有助于快速均匀地去除材料。

关键词:液动压悬浮抛光;数值模拟;均匀设计;多元非线性回归;工艺参数优化

中图分类号:TH16;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)12-1285-06

Optimization of hydrodynamic pressure levitation polishing process parameters based on uniform design and genetic algorithm

YIN Lin-zhi, PIAO Zhong-yu, LI Pan-xing, WEN Dong-hui

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of pressure uniformity optimization of hydrodynamic pressure suspension polishing flow field, the influence of process parameters on the dynamic pressure in processing area was studied. Computational fluid dynamics (CFD) and uniform design method were used to solve the pressure mean and pressure standard deviation of the processing area under different process parameters. The mathematical model of the fitting of process parameters and pressure mean or pressure standard deviation were established by multiple nonlinear regression method, the process parameters were optimized by genetic algorithm and through numerical model. The pressure distribution and processing effect before and after optimization were compared. The results indicate that there is a nonlinear regression relationship between the selected process parameters, the pressure mean and pressure standard deviation. The optimal process parameters are $h = 285 \mu\text{m}$, $\omega = 1\ 300 \text{ r/min}$, and $\varphi = 0.12$. Under this parameter, the flow field pressure in the workpiece area is the largest and the pressure standard difference is the least, which helps to remove the material quickly and evenly.

Key words: hydrodynamic suspension polishing (HSP); numerical simulation; uniform design; multivariate nonlinear regression; process parameter optimization

收稿日期:2018-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375457);浙江省自然科学基金资助项目(Y14E050057)

作者简介:尹林志(1985-),男,浙江临海人,博士研究生,主要从事精密与超精密加工方面的研究。E-mail:yinlinzhi@foxmail.com

通信联系人:文东辉,男,教授,博士生导师。E-mail:wendh@zjut.edu.cn

0 引 言

现代科技发展对光学元件、计算机芯片和纳米薄膜衬底的表面质量提出了苛刻要求,需要达到纳米级甚至原子级^[1-2]。目前,抛光依然是降低工件表面粗糙度,去除损伤层,得到高精度和高质量表面的主要加工手段^[3]。传统的机械抛光和化学机械抛光以磨粒与工件的刚性接触为主,抛光工具容易磨损,难以实现表面的无损伤加工。因此,在传统抛光方法的基础上,出现了许多应用磁学、流体力学、流体流变特性原理得到的柔性悬浮抛光方法,如磁流变抛光(MRF)^[4]、浮法抛光(FP)^[5]、弹性发射加工(EEM)^[6]、动压浮离抛光(HFP)^[7]和剪切增稠抛光(STP)^[8]。这些抛光方法改变了磨粒与工件的接触方式,有利于抛光加工过程中低表面粗糙度、低损伤表面的形成。其中,MRF作为一种基于计算机控制光学表面成型技术(CCOS)的柔性抛光方法,已成功应用于各类形面超精密加工中,但在加工中必须使用造价昂贵的加工介质(磁流变液);FP虽然可以获得完好的表面晶格,亚表面没有损伤层,但液动压效应较弱,加工效率低;EEM可获得超光滑无损伤表面,但工件表面易形成波纹,设备要求高;HFP存在动压力分布不均匀、动压浮离盘楔形结构设计难度大的问题;STP利用抛光液的剪切增稠流变特性达到增强把持磨粒的约束力,成功应用于石英晶片、GCr15轴承钢、Si₃N₄陶瓷的加工中,是一种很有潜力的抛光方法,但长时间抛光会降低抛光液的流变特性。

因此,基于HFP方法,笔者提出了液动压悬浮抛光方法(HSP)^[9],在抛光工具盘的平行区域后面增设约束边界,用约束边界调控平行流场内的压力分布。仿真结果表明:加入约束边界可有效改善工件区域的流体压力均匀性。朱胜伟^[10]利用正交试验法研究了加工工况对流场动压力及磨粒与壁面撞击状况的影响,但其只选择了一点作为动压力数据的参考点;谢重^[11]利用ABAQUS模拟了加工过程中固相磨粒与工件表面的撞击过程,研究了磨粒速度和角度对撞击后工件表面残余应力沿工件深度方向的分布规律;齐欢^[12]通过仿真和实验进一步研究了HSP对工件表面残余应力松弛的影响。

由于抛光工艺参数影响了抛光液的流动特性,而工件区域的流体压力大小和压力均匀性对工件表面的材料去除速率和粗糙度有重要影响,有必要研究抛光工艺参数对流体压力大小和压力均匀性的影响。

本文以ANSYS Fluent软件为计算平台,采用固-液两相流的欧拉模型,对液动压悬浮抛光流场进行CFD数值模拟,研究抛光工艺参数对压力大小和均匀性的影响,同时利用多元非线性回归模型和遗传算法对工艺参数进行优化。

1 液动压悬浮抛光

液动压悬浮抛光工具盘的结构如图1所示。

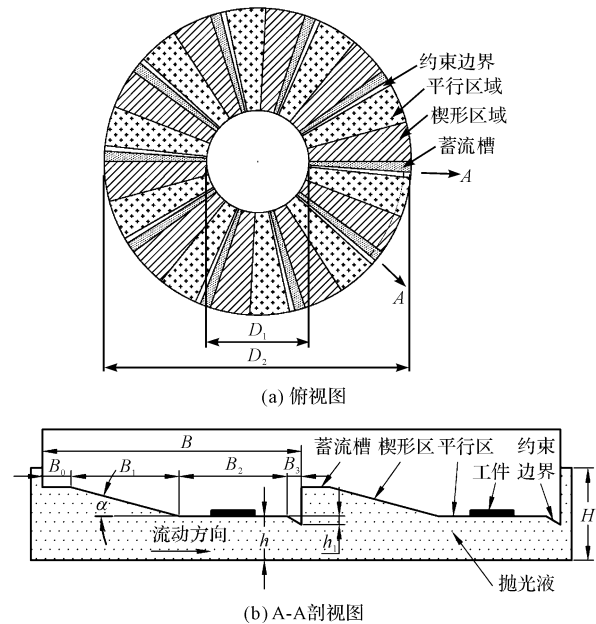


图1 液动压悬浮抛光工具盘结构示意图

D_1 —抛光工具盘内径; D_2 —抛光工具盘外径; B —单元结构长度; B_0 —蓄流槽; B_1 —楔形区; B_2 —平行区; B_3 —约束边界; α —楔形角度; h_1 —约束高度; h —加工间隙; H —液槽高度

抛光工具盘底部共10个单元,每个单元分为4个区域:蓄流槽、楔形区、平行区和约束边界。

液动压悬浮抛光方法采用抛光液浸没工件的方式,适当粘度的抛光液在楔形抛光工具盘旋转驱动下,快速通过间隙收敛的液楔,形成液动压使抛光工具悬浮,保持了磨粒与工件表面处于非接触状态,使工件在液动压力稳定区完成加工。

2 模型建立

2.1 流体控制方程

液动压悬浮抛光楔形区流体的实际流动为湍流,本文采用连续性方程、N-S方程和基于各向同性涡粘性理论的 $k-\varepsilon$ 双方程组组成的控制方程进行分析^[13-15]。上述描述加工区域内不可压缩流体流动的方程如下。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

湍动能 k 方程为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2)$$

耗散率 ε 方程为:

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

式中: ρ —流体密度, kg/m^3 ; μ_t —湍流黏度, $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$; G_k —平均速度梯度引起的湍动能, m^2/s^2 ; G_b —由浮力影响引起的湍动能, m^2/s^2 ; Y_M —不可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响, m^2/s^3 。

湍流黏度:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$k - \varepsilon$ 模型中经验常数的取值通常情况下为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$, 湍动能 k 与耗散率的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.2 模型计算

抛光工具盘的几何尺寸如表 1 所示。

表 1 抛光工具盘几何尺寸

| 几何尺寸 | 数值 |
|-------------------------|-----|
| 抛光工具盘内径 D_1/mm | 70 |
| 抛光工具盘外径 D_2/mm | 180 |
| 蓄流槽 B_0/mm | 5 |
| 楔形区 B_1/mm | 25 |
| 平行区 B_2/mm | 25 |
| 约束边界 B_3/mm | 2 |
| 楔形角度 α | 1 |
| 约束高度 h_1/mm | 25 |

本研究在三维实体建模软件中进行布尔运算,得到液动压悬浮抛光流场模型,如图 2 所示。

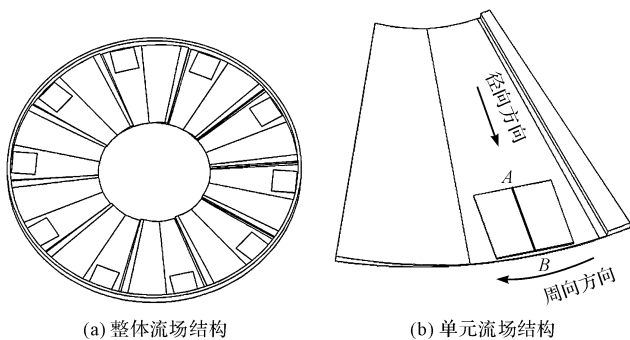


图 2 流场三维几何建模

图 2 中,沿着圆周方向周期性地分布着相同的若干单元。本研究选取工件贴片区域的中分线 AB 作为压

力数据提取的参考线。

取抛光加工区域中抛光工具盘与液槽之间的环形流体作为计算区域,计算区域及边界条件如图 3 所示。

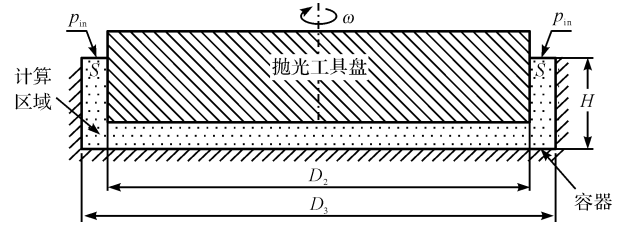


图 3 计算区域及边界条件

液槽直径 $D_3 = 182 \text{ mm}$,液槽高度 $H = 5 \text{ mm}$ 。根据实际工况,设置边界条件如下:环形表面 S 设置为压力入口,且 $P_{in} = 1 \text{ atm}$;抛光工具盘的所有表面设置为旋转壁面;液槽壁面设置为固定壁面。

为实现对加工区流场形态的数值模拟,本文以 Fluent14.5 为计算平台,采用 3D 单精度稳态隐式压力基求解器,以及工程上广泛应用的 Simple 算法进行求解。Simple 是求解压力耦合方程组的半隐式方法,它的核心是采用“猜测 - 修正”的过程,在交错网格的基础上来计算压力场,从而达到求解动量方程(N-S 方程)的目的。

3 均匀设计试验和工艺参数优化

3.1 均匀设计试验

流体抛光时液体压力的大小和均匀性对加工效率和质量都有直接影响。由 Preston 方程可知,被加工工件表面材料去除率与磨粒在近壁区域的相对压力成正比^[16]。

根据液动压悬浮抛光特点,本研究选择加工间隙 h 、抛光工具盘转速 ω 和抛光液浓度 φ 作为考察因素。以加工区域的压力大小和压力均匀性为试验指标。具体地说,计算 AB 线上的压力均值 P_{AVG} 作为工件区域的压力大小,计算 AB 线上的压力标准差 P_{SD} 作为工件加工区域的压力均匀性。

笔者按照 3 因素 7 水平的均匀设计表 $U_7(7^4)$ 及其使用表安排试验,均匀设计方案和试验结果如表 2 所示。

表 2 均匀设计方案和试验结果

| 编号 | $h/\mu\text{m}$ | ω/rpm | φ | P_{AVG}/Pa | P_{SD}/Pa |
|----|-----------------|---------------------|-----------|---------------------|--------------------|
| 1 | 150 | 600 | 0.15 | 5 135 | 520.2 |
| 2 | 250 | 1 000 | 0.3 | 11 076 | 930.4 |
| 3 | 350 | 1 400 | 0.1 | 24 125 | 2 099 |
| 4 | 450 | 400 | 0.25 | 2 257.2 | 186.35 |
| 5 | 550 | 800 | 0.05 | 4 194.2 | 342.06 |
| 6 | 650 | 1 200 | 0.2 | 15 224 | 1 507.6 |
| 7 | 750 | 1 600 | 0.35 | 26 657 | 3 285.6 |

本研究对表 2 中的每组试验参数分别建模,并在 Gambit 中进行结构化网格划分,将网格文件导入 FLUENT 中进行边界条件设置,然后进行数值模拟计算,计算得到的抛光工具盘压力分布如图 4 所示。

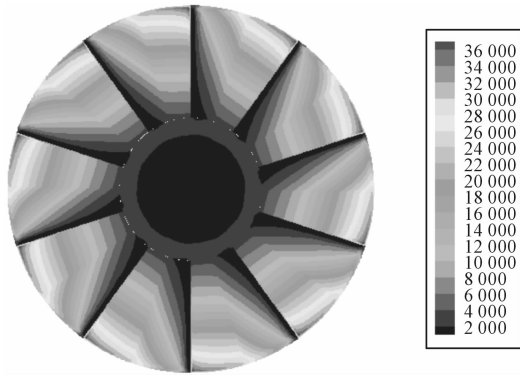


图 4 液动压悬浮抛光工具盘压力分布

从图 4 中可以看出:每个单元上内的压力分布相同,在任一单元中,动压力沿周向(蓄流槽-楔形区-平行区-约束边界)方向先逐渐增大后迅速减小,沿径向方向则逐渐增大。

本研究分别提取每组试验参数的 AB 线上的压力数据,绘制成关于径向坐标的压力分布曲线,如图 5 所示。

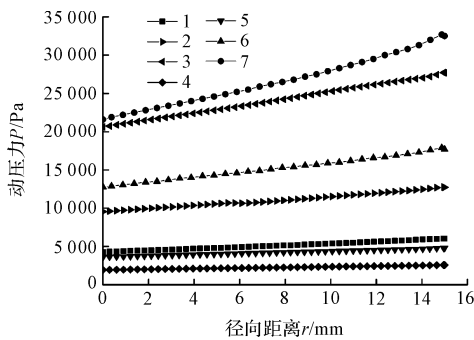


图 5 工件区域 AB 线上压力分布曲线

可以发现,在不同工艺参数组合下,压力沿 AB 径向方向呈线性分布,符合圆周运动在不同半径上的线速度分布。通过计算,AB 线上的压力均值 P_{AVG} 和压力标准差 P_{SD} 如表 2 所示。

由表 2 结果可知:在不同工艺参数组合下,工件加工区域 AB 线上的压力均值不同,在 4 000 Pa ~ 35 000 Pa 范围内变化,且压力标准差也有所不同。这说明工艺参数对压力均值和压力标准差有影响。

由于均匀设计因素水平的选取不具有整齐可比性,无法通过指标观测值直接得到指标与因素之间的关系,需要对表中的数据进行回归拟合再进行分析^[17]。

3.2 多元非线性回归模型

本研究采用多元非线性回归方法,分别建立压力均值和压力标准差与加工间隙、转速和抛光液浓度之间的拟合数学模型。

设加工间隙 h 为 x_1 ,抛光工具盘转速 ω 为 x_2 ,抛光液浓度 φ 为 x_3 。多元二次非线性回归处理多变量参数与目标函数之间的非线性拟合数学关系方程为^[18-19]:

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j>i}^n \beta_{ji} x_j x_i \quad (5)$$

式中: $f(x)$ —目标函数; x_j, x_i —设计变量, n —设计变量数; β —待定多项式系数。

将表 2 的数据导入 Matlab 软件,运用 nlinfit 拟合,分别得到压力均值 P_{AVG} 和压力标准差 P_{SD} 的多元非线性回归方程:

$$P_{AVG}(x_i) = 88\,524.9 - 333.1x_1 - 430.3x_2 + 1\,252\,166x_3 + 0.67\,647x_1^2 + 0.24\,224x_2^2 + 420\,809.5x_3^2 + 0.240\,38x_1x_2 - 2\,460.3x_1x_3 - 458.336x_2x_3 \quad (6)$$

$$P_{SD}(x_i) = 91\,040.7 - 333x_1 - 435.6x_2 + 1\,235\,475x_3 + 0.694\,45x_1^2 + 0.232\,74x_2^2 + 475\,240.2x_3^2 + 0.239\,99x_1x_2 - 2\,508.1x_1x_3 - 442.458x_2x_3 \quad (7)$$

式中: $P(x_i)$ —目标函数; x_1 —加工间隙; x_2 —加工转速; x_3 —抛光液浓度。

3.3 基于遗传算法的工艺参数优化

为获得最优工艺参数,本研究采用遗传算法(GA)对多元非线性回归方程进行求解。遗传算法的本质是一种高效、并行、全局搜索的方法^[20]。

根据上面建立的加工流场数学模型,相应的优化模型为:

$$\begin{cases} \max \{ P_{AVG}(x_i) \} \\ \min \{ P_{SD}(x_i) \} \\ 150 \leq x_1 \leq 550 \\ 600 \leq x_2 \leq 1\,400 \\ 0.05 \leq x_3 \leq 0.35 \end{cases} \quad (9)$$

在 Matlab 软件中,本研究运用其遗传算法优化模块(GA tool box)对工艺参数进行全局寻优。取 $f(x_i) = P_{AVG}(x_i) - P_{SD}(x_i)$ 为遗传算法适应的函数,交叉概率与变异概率等参数采用软件默认值,解得 $h = 285 \mu\text{m}$, $\omega = 1\,300 \text{ r/min}$, $\varphi = 0.12$ 。将求解所得的优化工艺参数重新建模,经数值模拟后单元流场的压力云图,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出:压力沿径向方向呈梯度增大,工件区域的压力比较均匀。

本研究分别提取优化前和优化后径向 AB 线上的

压力数据,如图 7 所示。

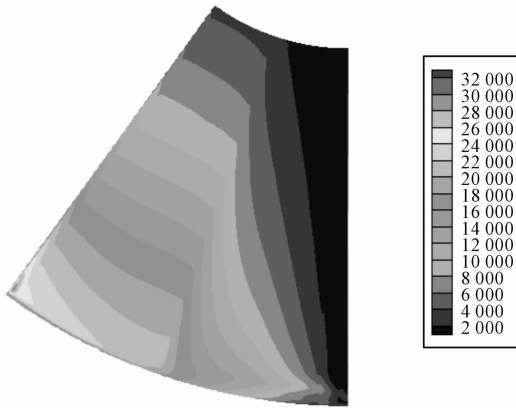


图 6 单元流场的压力分布

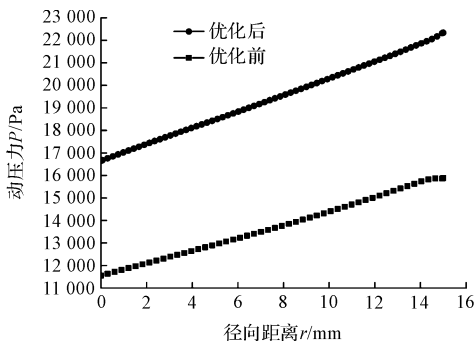


图 7 优化前后 AB 线上压力曲线

本研究计算这两组数据的压力均值和压力标准差,并与回归模型的预测值进行对比,如表 3 所示。

表 3 AB 线上压力均值和标准差

| | P_{AVG}/Pa | P_{SD}/Pa |
|-------|--------------|-------------|
| 优化前 | 13 732 | 1 326.9 |
| 优化后 | 19 416 | 1 665.4 |
| 回归预测值 | 20 574 | 1 846.4 |

由表 3 可知:优化后压力均值提升了 41% 左右,而压力标准差变化不大,优化后的流场不仅提高了加工效率,而且也有助于加工质量的提高。将优化后的压力均值和标准差分别和回归模型的预测值进行了对比,可以发现压力均值和压力标准差的误差分别为 5% 和 10%,相对比较准确。

4 实验及结果分析

实验是在课题组研发的第二代液动压悬浮抛光装置上进行的,该装置如图 8 所示。

试样采用单晶铜,因单晶铜衬底具有导电性好、电流密度分布均匀等优点。试样标准大小为 12 mm × 12 mm × 1 mm,选取机械研磨抛光后粗糙度相近的铜试样进行液动压悬浮抛光实验。

实验分两组对比,即优化前的工艺参数实验 1 和优化后的工艺参数实验 2,不同的加工参数如表 4 所示。

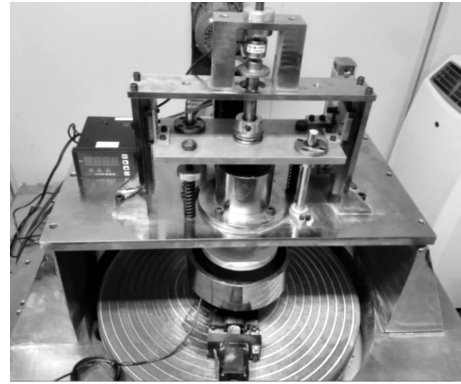
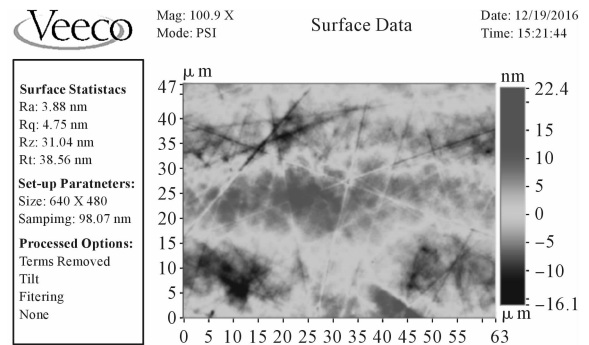


图 8 液动压悬浮抛光装置

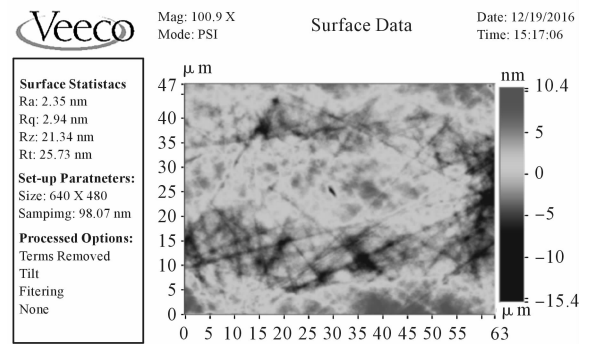
表 4 不同的加工参数

| 实验号 | $h/\mu m$ | $\omega/(r \cdot \min^{-1})$ | φ |
|-----|-----------|------------------------------|-----------|
| 1 | 150 | 1 000 | 0.05 |
| 2 | 285 | 1 300 | 0.12 |

经过 0.5 h 的液动压悬浮抛光后,两个试样表面粗糙度 Ra 的测量结果,如图 9 所示。



(a) 实验号1试样的粗糙度



(b) 实验号2试样的粗糙度

图 9 优化前后试样的表面粗糙度

从图 9 中可以看出:试样 1 粗糙度 Ra 值为 3.88 nm (63 μm × 47 μm),试样 2 的粗糙度为 Ra 值为 2.35 nm (63 μm × 47 μm)。测量结果表明:优化后工艺参数加工的铜试样,其粗糙度比优化前工艺参数加工的铜试样要低,说明优化工艺参数有助于提高试样表面的加工质量,进一步证明了回归模型的正确性,说明该模型可以用来指导工艺参数的优化。

5 结束语

本文以液动压悬浮抛光方法为研究对象,以固液两相流为模型,基于均匀试验设计与 CFD 数值模拟,从流体压力均值和标准差两个方面研究了加工间隙 h 、抛光工具盘转速 ω 和抛光液浓度 φ 对液动压悬浮抛光加工区域动压力的影响。可获得以下结论:

(1) 多元非线性回归模型能准确地拟合工件加工区域的压力均值和标准差与工艺参数之间的数学关系,能建立带有约束的多目标压力的数学模型;

(2) 以压力均值最大和标准差最小为目标函数,利用遗传算法对回归方程进行求解,得到最优工艺参数为:加工间隙 285 mm,抛光工具盘转速 1 300 r/min,抛光液浓度 0.12;

(3) 对优化后的流场加工参数进行数值模拟对比分析和实验分析进行验证,证明回归模型和优化结果的准确可靠。

参考文献 (References):

- [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):161-177.
- [2] 文东辉,周海锋,徐 钉,等.超光滑表面加工技术研究进展[J].机电工程,2015,32(5):579-584.
- [3] YUAN J, LYU B, HANG W, et al. Review on the progress of ultra-precision machining technologies[J].机械工程前沿:英文版,2017,12(2):158-180.
- [4] 郑立功,李龙响,王孝坤,等.磁流变抛光系统去除函数的原点位置标定[J].光学精密工程,2017(1):8-14.
- [5] 彭文中,彭文强.间隙自适应射流抛光装置及实验验证[J].航空精密制造技术,2016,52(1):13-15.
- [6] HIRATA T, TAKEI Y, MIMURA H. Machining property in smoothing of steeply curved surfaces by elastic emission machining[J]. *Procedia Cirp*, 2014(13):198-202.
- [7] WATANABE J, SUZUKI J, KOBAYASHI A. High precision polishing of semiconductor materials using hydrodynamic principle[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,

1981,30(1):91-95.

- [8] 翁海舟,吕冰海,胡刚翔,等.石英晶片剪切增稠抛光优化实验[J].纳米技术与精密工程,2017(3):227-233.
- [9] WEN D H, ZHONG-YU P, ZHANG T H. A hydrodynamic suspension polishing method for ultrasmooth and low-damage surface[J]. *Precision Engineering*, 2016(46):278-287.
- [10] 朱胜伟,张丽慧,洪 滔,等.液动压悬浮抛光固液两相流数值模拟[J].系统仿真学报,2017,29(12):2993-3000.
- [11] 谢 重,朱胜伟.液动压悬浮抛光中磨粒与工件表面作用的数值模拟研究[J].机电工程,2017,34(8):851-855.
- [12] QI H, XIE Z, HONG T, et al. CFD modelling of a novel hydrodynamic suspension polishing process for ultra-smooth surface with low residual stress[J]. *Powder Technology*, 2017(317):320-328.
- [13] 计时鸣,於加峰,洪 滔,等.槽形抛光工具形状对液流悬浮抛光加工效果的影响[J].农业工程学报,2012(s1):87-91.
- [14] 吕 迅,张冬辉,金杨福.软脆光学镜片多件抛光的表面质量一致性研究[J].轻工机械,2017,35(6):43-46.
- [15] 苗新刚,武美萍,缪小进.基于硬脆材料的磨料水射流抛光技术研究[J].液压气动与密封,2016(3):4-6.
- [16] 计时鸣,李 琛,谭大鹏,等.基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性[J].机械工程学报,2011,47(17):156-163.
- [17] 王海鹏,赵 莉,王殿生,等.基于 MATLAB 的均匀设计实验数据多元非线性最小二乘拟合[J].化学工程与装备,2010(9):29-32.
- [18] 赵茂俞,薛克敏,李 萍.多元非线性回归的铝合金覆盖件成形模拟优化设计[J].农业机械学报,2008,39(9):166-169.
- [19] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [20] 申 远,金 一,褚 彪,等.基于遗传算法的锻压机床多目标优化设计方法[J].中国机械工程,2012,23(3):43-46.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

尹林志,朴钟宇,李攀星,等.基于均匀设计和遗传算法的液动压悬浮抛光工艺参数优化研究[J].机电工程,2018,35(12):1285-1290.

YIN Lin-zhi, PIAO Zhong-yu, LI Pan-xing, et al. Optimization of hydrodynamic pressure levitation polishing process parameters based on uniform design and genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(12):1285-1290. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>