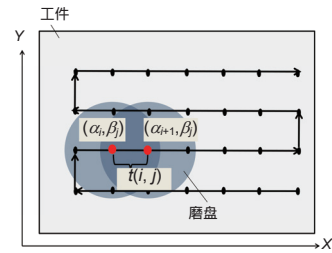




DOI: 10.12086/oe.2018.170642

## 基于变压力的 CCOS 光学研抛技术

叶枫菲<sup>1,2</sup>, 余德平<sup>1\*</sup>, 万勇建<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>2</sup>, 赵洪深<sup>2</sup><sup>1</sup>四川大学制造科学与工程学院, 四川 成都 610065;<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

**摘要:** 在非球面及自由曲面加工中, 应用最为成熟的是计算机控制光学表面成型(CCOS)技术。现有 CCOS 技术普遍采用恒压力研抛方法, 加工过程中研抛压力保持恒压, 通过控制驻留时间实现所需的去除量。本文研究了基于变压力的 CCOS 研抛方法, 增加了调控维度, 通过同时控制研抛压力和驻留时间实现所需的去除量。首先, 对该方法建立了加工控制的数学模型。然后, 测量分析了磨头输出力的稳定性和响应速度, 去除函数的稳定性。最终, 在 K9 材料平面镜上开展了正弦压力抛光材料去除实验。结果表明, 实测与理想正弦研抛压力周期一致, 力误差标准差约为 0.35 N, 对去除面形 PV 和 RMS 的影响均不到 9%; 实际与仿真加工的面形轮廓周期一致, 加工区域的面形误差在 17% 以内。本文实现了变压力研抛, 验证了基于变压力的 CCOS 研抛方法在光学加工中的有效性。

**关键词:** 光学加工; CCOS; 变压力; 研抛

**中图分类号:** O436.3

**文献标志码:** A

**引用格式:** 叶枫菲, 余德平, 万勇建, 等. 基于变压力的 CCOS 光学研抛技术[J]. 光电工程, 2018, 45(4): 170642

## Study on the variable pressure CCOS polishing technology

Ye Fengfei<sup>1,2</sup>, Yu Deping<sup>1\*</sup>, Wan Yongjian<sup>2</sup>, Liu Haitao<sup>2</sup>, Zhao Hongshen<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract:** In grinding and polishing of the aspherical and freeform surface, the CCOS technology is widely used. It commonly uses constant pressure during polishing, and thus the desired amount of material to be removed depends on the dwell time. This paper focuses on the variable pressure CCOS polishing technology. It adds one more degree of freedom to the polishing process, in which the desired amount of material to be removed is controlled by both the polishing pressure and the dwell time. Firstly, a mathematical model was established for the variable pressure polishing process. Then, the stability and response speed of the output force of the polishing tool, and the stability of removal function was measured and analyzed. Finally, a material removal experiment that applied sinusoidal force was carried out on a K9 material mirror. Results show that frequency of the measured force is the same as that of the ideal sinusoidal polishing force, with a standard deviation of the force error being about 0.35 N. Its effect on PV and RMS of the finish surface is less than 9%. The spatial period of the measured surface profile is the same as that of surface profile obtained by simulation of the sinusoidal polishing process. The surface profile error is within 17%. In

收稿日期: 2017-11-22; 收到修改稿日期: 2018-01-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51405313)

作者简介: 叶枫菲(1993-), 女, 硕士, 主要从事机械电子工程相关的研究。E-mail: yefengfei2017@163.com

通信作者: 余德平(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事超精密加工技术、等离子体技术及应用等领域的研究。

E-mail: williamydp@scu.edu.cn

this paper, variable pressure polishing was achieved, and its effectiveness for optical processing was verified.

**Keywords:** optical processing; CCOS; variable pressure; grinding and polishing

**Citation:** Ye F F, Yu D P, Wan Y J, *et al.* Study on the variable pressure CCOS polishing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170642

## 1 引言

现代先进光学制造技术已经发展为用数学模型描述工艺过程、以计算机数字控制为主导的可确定性加工,目前应用最为成熟的是计算机控制光学表面成型技术(computer controlled optical surfacing, CCOS)<sup>[1]</sup>。近年来国内外在 CCOS 技术的基础上发展了一系列数控加工技术,其基本加工原理与 CCOS 技术相同<sup>[2]</sup>。CCOS 技术根据 Preston 理论,用计算机控制小磨头对光学元件进行研磨和抛光,能够有效跟踪面型各点的曲率变化并精确控制各点的驻留时间和研抛压力<sup>[3]</sup>。目前,CCOS 等研抛中普遍采用恒压力研抛方式<sup>[4-7]</sup>,整个加工过程中研抛压力恒定,根据面形误差分布以及去除函数,计算得到研抛工具的进给速度的分布。当研抛压力确定,最小去除量为驻留时间最短时的去除量,也就是机床最大移动速度时的去除量,若某点去除量比最小去除量更小,则会发生过去除<sup>[8]</sup>。为避免过去除,要么增加整体去除层,由于去除层涉及整个镜面范围,其对于去除效率的影响极大<sup>[9]</sup>;要么选择更小的研抛压力,整个加工过程中研抛压力变小,驻留时间变长,导致加工效率严重降低。基于此,上海交通大学学者研究了变压力研抛方法<sup>[10]</sup>,研究结果表明,该方法既可减少去除层厚度又能大幅提高加工效率,可以看出变压力研抛在光学镜面加工中具有重大研究意义。在此基础上,本文开展了基于变压力的 CCOS 研抛技术的研究。本文首先以 Preston 方程为理论基础,建立加工控制的数学模型,该加工控制的数学模型在实际加工时计算及控制都较容易实现。然后本文用气缸式主动施力磨头提供研抛压力,测量分析了磨头输出力的稳定性和响应速度,去除函数的稳定性。最终通过仿真与实际加工,实现 K9 材料的正弦压力抛光材料去除实验。

## 2 变压力研抛方法数学模型

本文所提基于变压力的 CCOS 研抛方法基于 Preston 理论,即研磨抛光模型可以被描述成以下的一个线性方程:

$$\frac{dz(x,y)}{dt} = kP(x,y,t)V(x,y,t) \quad (1)$$

式中:  $dz/dt$  表示磨盘与工件接触点  $(x,y)$  的单位时间材料去除量;  $k$  为比例常数,它由外部环境、研磨液浓度、磨盘材料等所有因素决定;  $P$  为该点  $(x,y)$  在  $t$  时刻的正压强;  $V$  为该点  $(x,y)$  在  $t$  时刻的抛光速度。

现假设材料表面磨盘作用的范围内压力相等。定义单位时间、单位压力下,材料表面的平均去除量  $r(x,y)$  为研抛磨盘的去除函数,即:

$$r(x,y) = k \cdot \frac{F}{\pi R^2} \cdot \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(x,y,t) dt \quad (2)$$

式中:  $R$  表示磨盘半径;  $F$  为研抛压力,  $F=1\text{ N}$ ;  $T$  为加工时间。

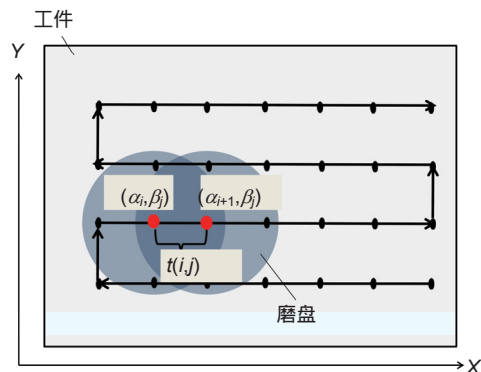


图 1 研抛加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grinding and polishing

加工过程中,研抛磨盘中心在工件表面上按照预定轨迹移动,如图 1 所示。

我们将该轨迹在  $X$ 、 $Y$  方向上等间隔取点,各点坐标记为  $(\alpha_i, \beta_j)$ ,  $i, j$  为  $X$ 、 $Y$  方向各点的序号。研磨盘从点  $(\alpha_i, \beta_j)$  运动到下一个点  $(\alpha_{i+1}, \beta_j)$  的时间记为  $t(i, j)$ , 该时间定义为研磨盘在  $(\alpha_i, \beta_j)$  的驻留时间  $d(\alpha_i, \beta_j)$ 。则该连续过程等价于这样一个离散过程:磨盘中心依次在每个驻留的点以研抛压力  $F_e(\alpha_i, \beta_j)$  停留了对应的驻留时间  $d(\alpha_i, \beta_j)$ 。假定在整个研磨过程中去除函数不变,将研抛磨盘在加工过程中对工件上点  $(x,y)$  的材料去除量进行叠加,就可以得到该点的总去除量  $h(x,y)$ :

$$h(x, y) = \sum_i \sum_j [r(x - \alpha_i, y - \beta_j) \cdot d(\alpha_i, \beta_j) \cdot F_e(\alpha_i, \beta_j)] \quad (3)$$

式(3)就是基于变压力的CCOS研抛方法加工控制的数学模型。 $r(x, y)$ 与研抛磨盘尺寸和材料性能、相对速度等因素有关,可以通过计算机模拟及工艺实验求得; $h(x, y)$ 是工件表面的面形误差分布,由测量确定;当已知 $r(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 后,根据式(3)采用迭代运算求出驻留时间和研抛压力的乘积分布。接下来,将乘积分布转换为驻留时间分布 $d(x, y)$ 和研抛压力分布 $F_e(x, y)$ 。此处需考虑机床移动速度和加速度、磨头出力范围和响应速度、总加工时间等限制,选择适当的驻留时间分布和研抛压力分布。然后在加工环境确定后,计算实际变压力研抛时的去除函数,根据实际去除函数修正研抛压力和驻留时间,得到最终的规划结果。

### 3 变压力研抛实验

#### 3.1 实验设备

相比恒压力研抛方法,变压力研抛方法增加对力主动控制系统的要求。本文研抛设备如图2(a)所示,由移动机构和力主动控制磨头组成,移动机构采用Staubli TX200工业机器人,力主动控制磨头采用气缸式主动施力磨头,力输出范围为0 N~35 N。本文力测量设备如图2(b)所示,是由三支CZLYB-3E/10 kg力传感器搭建的高精度力测试平台,精度可达0.05%,可以测量力主动控制磨头的力输出特性,也可以实时检测、采集研抛过程中的研抛压力。

#### 3.2 实验设计

##### 3.2.1 磨头输出力的稳定性和响应速度

变压力研抛方法的加工控制参数是研抛压力和驻

留时间。考虑到驻留时间控制已相对成熟,且变压力研抛相比恒压力研抛的关键点在于研抛压力控制,所以本文只研究研抛压力控制。本文实验中研抛压力由气缸式主动施力磨头提供,磨头输出力的稳定性将直接影响加工中研抛压力的稳定性;磨头输出力的变化速度,即响应速度将决定加工中研抛压力的变化速度,需保证加工中研抛压力变化速度小于磨头力响应速度。因此测量分析磨头输出力的稳定性和响应速度是必要的。首先磨头输出0 N~35 N的不同力值并保持一定时间,通过高精度力测试平台测量实际输出的力值,分析在此时间内磨头输出力的稳定性。然后磨头从不同初始力值 $F_0$ 跳变不同力值 $F_{step}$ ,通过高精度力测试平台测量实际力变化情况,计算磨头输出力的响应速度。

##### 3.2.2 去除函数稳定性

去除函数是变压力研抛方法的关键点。在加工环境确定后,需测量分析去除函数的真实情况<sup>[11]</sup>。本文去除函数实验工艺参数如表1所示,进行多组研抛压力保持恒定和线性变化的去除函数实验,通过测量及数据处理获得去除函数。预测去除函数保持恒定。

##### 3.2.3 仿真加工

考虑到变压力研抛相比恒压力研抛的关键点在于主动力控制的实现,以及实验单一变量原则,进行驻留时间恒定的正弦压力抛光材料去除实验。实验工艺参数与去除函数实验工艺参数一致。实验的加工轨迹是80 mm的直线,轨迹点间隔为1 mm;沿轨迹的研抛压力如图3所示,是峰峰值为8 N~22 N的两个周期的正弦力;驻留时间为1.2 s。该实验所需研抛压力变化速度约为0.6 N/s,故磨头输出力的响应速度应大于该值。

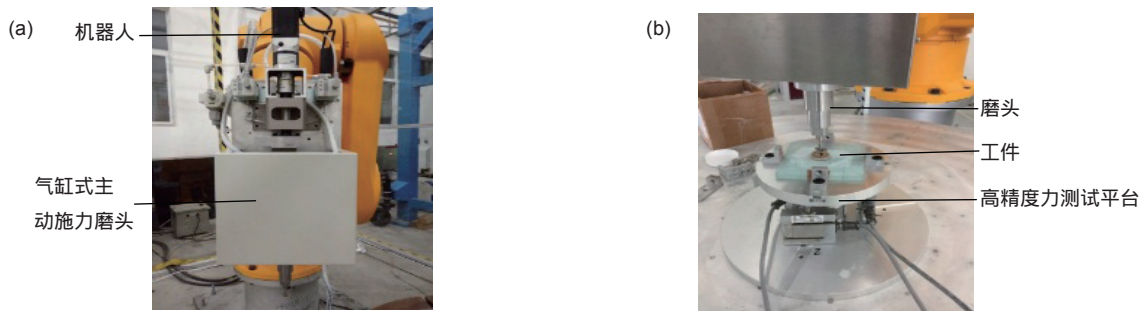


图2 实验设备。(a) 研抛机器人和磨头; (b) 高精度力测试平台

Fig. 2 Experimental setup. (a) Grinding robot and tool; (b) High precision force measurement platform

表 1 研抛实验工艺参数

Table 1 Grinding and polishing experimental process parameters

移动机构	磨头	工件材料	抛光液材料	抛光液浓度/%	磨盘材料	磨盘直径/mm	公转速度/(r/min)	自转速度/(r/min)	偏心距/mm	研抛压力/N	驻留时间/s
工业机器人 Staubli TX200	气缸式主动控制磨头	K9 平面镜	氧化铈	20	聚氨酯	15	-150	180	4	5~30	>0.05

仿真加工面形可通过基于变压力的 CCOS 研抛方法加工控制的数学模型计算得到。因为研抛压力为两个周期的正弦力，预测加工面形中有两个相同的去除峰值。

3.2.4 实际加工

在 K9 材料平面镜上开展正弦压力抛光材料去除实验，如图 4 所示。

3.3 实验结果

3.3.1 磨头输出力的稳定性和响应速度

经测量，如图 5(a)所示，该气缸式主动施力磨头在 5 N~30 N 的力标准差均小于 0.2 N，稳定性较好。经进一步测量计算，在不同初始力值时，增大或减小不同力，对应的响应速度不小于 3.75 N/s。图 5(b)为磨头输出力从 5 N 变为 30 N 的实际测量力变化情况。因

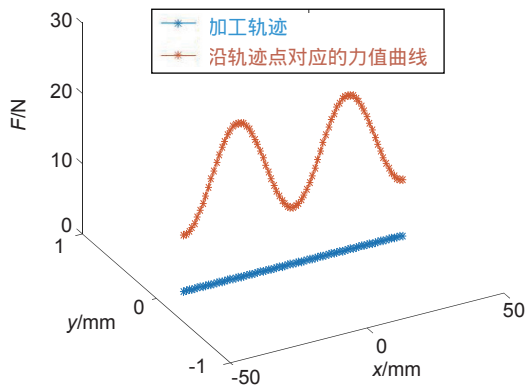


图 3 正弦压力抛光材料去除实验的力值曲线  
Fig. 3 Sinusoidal force applied in the polishing experiment

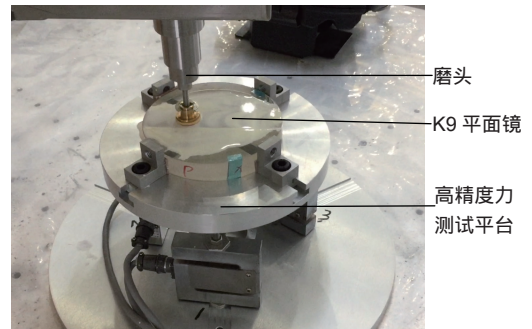


图 4 正弦压力抛光的材料去除实验加工过程  
Fig. 4 Machining process of sinusoidal pressure polishing experiment

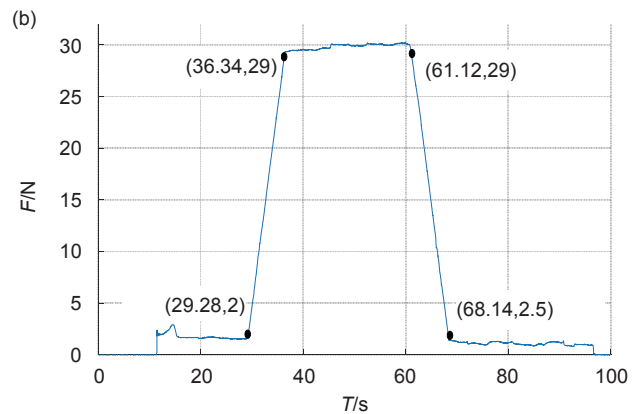
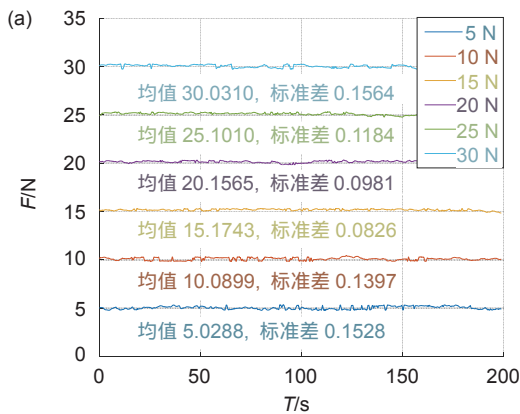


图 5 磨头输出力实测结果。(a) 磨头输出力保持不变；(b) 磨头输出力变化 (2 N-30 N-2 N)  
Fig. 5 The measured output force of the polishing tool. (a) Constant force; (b) Changing force (2 N-30 N-2 N)

此可知该磨头可以提供的变压力范围为 5 N~30 N, 绝对力误差为 0.2 N, 力响应速度约为 3.75 N/s。可以看出该磨头满足正弦压力抛光材料去除实验中所要求的力响应速度。

### 3.3.2 去除函数稳定性

表 2 为去除函数实验结果, 由研抛压力保持 15 N 不变时的去除函数实验结果可知, 去除峰峰值(PV)的最大偏差为其均值的 7.82%, 去除体积值(V)的最大偏差为其均值的 2.30%; 由研抛压力 5 N~20 N 线性变化的去除函数实验结果, 可知去除 PV 值的最大偏差为其均值的 5.90%, 去除 V 值的最大偏差为其均值的 5.19%。由去除函数实验结果可知, 去除 PV 值和 V 值的偏差分别不大于 8%和 6%, 去除函数稳定性较好, 在后续变压力研抛时不需要再次修正研抛压力和驻留时间。

### 3.3.3 仿真加工

图 6 为仿真所采用的去除函数, 将实测去除函数进行数据拟合所得。图 7 为加工控制的数学模型, 采

用 LR 迭代算法得到的仿真加工面形。仿真加工面形与预测相同, 有两个相同的峰值, 加工面形 PV 为 254 nm、RMS 为 39 nm。图 8 为考虑磨头输出力的稳定性和响应速度时, 磨头正弦输出力的仿真曲线。实际正弦输出力存在一定稳定性误差, 且在  $t_1$  时刻力由  $F_1$  变为  $F_2$ , 需要  $\delta t$  响应时间。图 9 为由该仿真力值曲线计算得到的仿真加工面形。图 9 与图 7 相比, 可以看出该力误差对加工面形 PV 的影响为 2.31%, 对加工面形 RMS 的影响为 7.04%。

### 3.3.4 实际加工

图 10(a)为实际加工过程中所测得的正弦研抛压力曲线; 图 10(b)为将实测力值与理想力值相减, 得到的力误差曲线。从实验结果可以看出: 加工中实测与理想正弦力曲线周期和峰峰值一致, 实测正弦力曲线绝对力误差最大不超过 0.9 N, 力误差标准差约为 0.35 N。将实测力误差加入仿真面形计算, 得到有实测力误差的仿真面形, 如图 11 所示, 该仿真面形 PV 为 262 nm、RMS 为 43 nm。与无力误差的仿真面形图 7 对比,

表 2 去除函数实验结果

Table 2 Removal function test results

压力(压强)	时间/s	实测去除量		去除函数(归一化 1N1min)				
		PV/nm	V/ $\mu\text{m}^3$	PV/nm	PV 偏差/%	V/ $\mu\text{m}^3$	V 偏差/%	
保持 恒定	15 N(849 g/cm <sup>2</sup> )	30	417.8	73832079	55.71	-7.82	9844277	0.47
	15 N(849 g/cm <sup>2</sup> )	45	632.0	111129247	56.18	-7.04	9878155	0.81
	15 N(849 g/cm <sup>2</sup> )	60	920.7	150357930	61.38	1.56	10023862	2.30
	15 N(849 g/cm <sup>2</sup> )	90	1400.5	225229297	62.24	2.98	10010191	2.16
线性 变化	5 N(283 g/cm <sup>2</sup> )	240	1175.2	185795136	58.76	-2.77	9289757	-5.19
	10 N(566 g/cm <sup>2</sup> )	120	1276.8	191565012	63.84	5.63	9578251	-2.25
	15 N(849 g/cm <sup>2</sup> )	90	1381.1	248036904	61.38	1.56	9878155	0.81
	20 N(1132 g/cm <sup>2</sup> )	60	1280.0	197706222	64.00	5.90	9885311	0.89

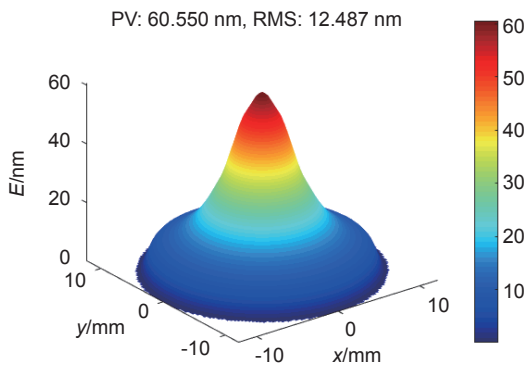


图 6 去除函数  
Fig. 6 Removal function

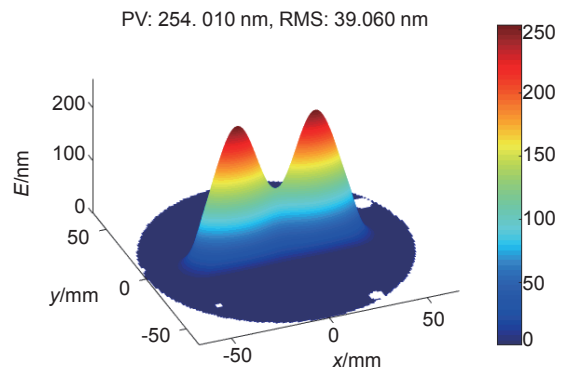


图 7 正弦压力抛光实验仿真加工面形  
Fig. 7 Simulated machined surface of the sinusoidal pressure polishing experiment

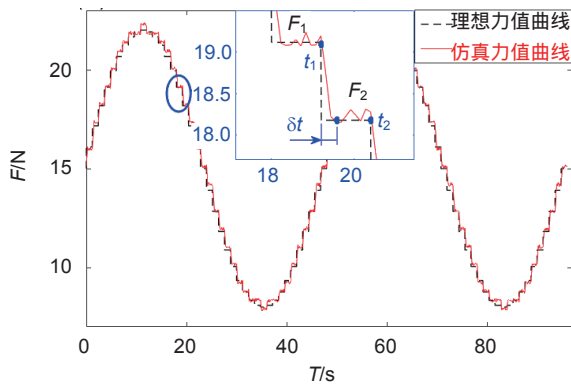


图 8 磨头正弦输出力的仿真曲线

Fig. 8 Simulated sinusoidal output force of the polishing tool

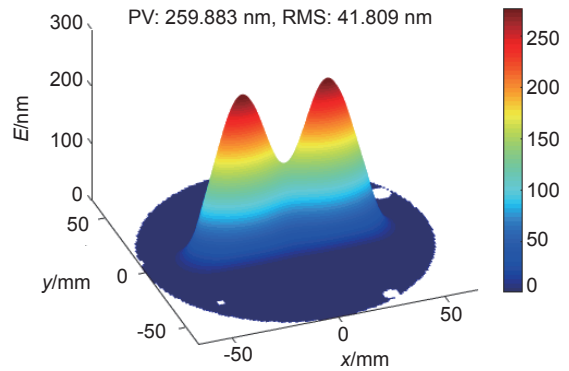


图 9 加入仿真力误差的仿真面形

Fig. 9 Simulated machined surface when the simulated sinusoidal force is applied

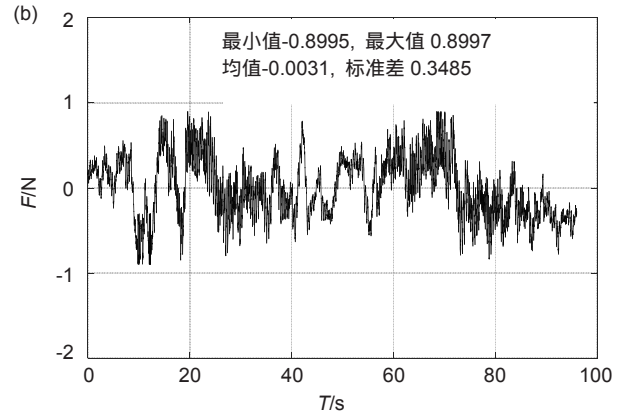
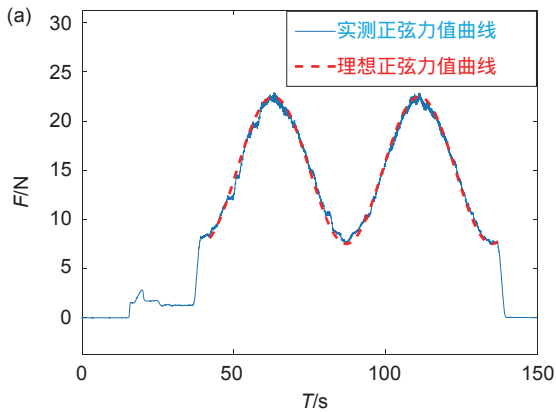


图 10 正弦压力抛光实验。(a) 实测力值曲线; (b) 力误差曲线

Fig. 10 Sinusoidal pressure polishing experiment. (a) Measured and desired output force; (b) Force error

可以看出该力误差对加工面形 PV 的影响为 3.20% ,对加工面形 RMS 的影响为 8.96%。由以上可以看出力误差对加工面形 RMS 影响更明显,但不超过 9%。

图 12(a)为采用干涉仪检测得到的实际加工面形,加工面形 PV 为 312 nm ,RMS 为 40 nm。图 12(b)为去除量最大处(即  $y=0$  时)的实际加工、仿真加工的面形轮廓线及面形误差。从实验结果可以看出:加工中实际与仿真的面形轮廓周期一致,实际去除量总体略小于仿真去除量,峰值处相差略大,加工区域 $[-40, 40]$ 的面形误差在 17%以内。可能原因:

1) 随着加工进行,实际加工中去除函数略有变化,与仿真所用去除函数不一致;

2) 加工中待去除面形发生改变,磨盘与镜面不能完全贴合,造成峰值处去除量误差相对较大。可考虑减小磨盘或更换磨盘材料,保证磨盘与镜面更好贴合。

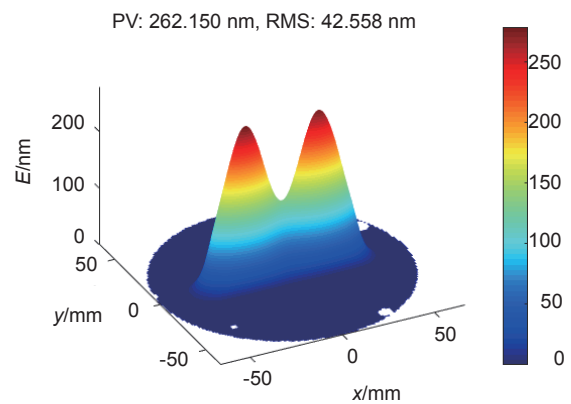


图 11 加入实测力误差的仿真面形

Fig. 11 Simulated machined surface when the measured sinusoidal force is applied

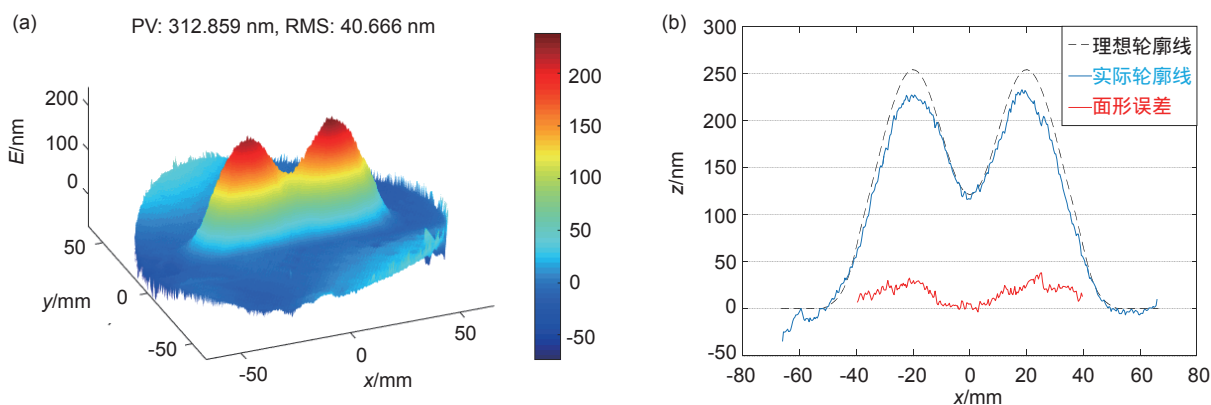


图 12 正弦压力抛光实验。(a) 实际加工面形；(b) 实际与仿真去除面形轮廓及误差

Fig. 12 Sinusoidal pressure polishing experiment. (a) Measured machined surface; (b) Measured and simulated machined surface profile and profile error

## 4 总结与展望

本文进行了基于变压力的 CCOS 研抛方法的研究,通过控制研抛压力和驻留时间实现所需的去除量。本文建立了该方法加工控制的数学模型。并通过测量分析磨头输出力的稳定性和响应速度,去除函数的稳定性,最终在 K9 材料平面镜上开展了正弦压力抛光的材料去除实验。结果表明,实测与理想正弦研抛压力周期一致,力误差标准差约为 0.35 N,将力误差加入仿真后,对去除面形 PV 和 RMS 的影响均不到 9%,影响不大;实际与仿真加工的面形轮廓周期一致,加工区域的面形误差在 17%以内。本文实现了变压力研抛,验证了基于变压力的 CCOS 研抛方法在光学加工中的有效性。

变压力研抛方法相对恒压力研抛方法增加了调控维度,理论上可以提高加工效率和收敛率,但对力主动控制系统有一定的要求,主动控制系统的力输出范围、力响应速度及力精度将影响变压力研抛的结果。所以,研制高性能的主动控制磨头将是变压力研抛方法的关键,预测今后主动控制磨头将普遍采用闭环力控制方式。

## 参考文献

[1] Williamson R. *Field guide to optical fabrication*[M]. Tian A L, Su J H, trans. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2016.  
瑞·威廉森. 光学元件制造技术[M]. 田爱玲, 苏俊宏, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2016.

[2] Walker D, Yu G Y, Gray C, et al. Process automation in computer controlled polishing[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, **806**: 684–689.

[3] Rao Z M, Guo B, Zhao Q L. Investigation of contact pressure and influence function model for soft wheel polishing[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(27): 8091–8099.

[4] El Khalick Mohammad A, Hong J, Wang D W. Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, **49**: 54–65.

[5] Tian F J, Li Z G, Lv C, et al. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **87**(1–4): 639–646.

[6] Fan M, Liu F, Wang P, et al. Polishing pressure control system for large caliber aspherical optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(4): 1019–1026.  
范敏, 刘凤, 王佩, 等. 大口径非球面光学研抛压力控制系统[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(4): 1019–1026.

[7] Tian H D. Complex surface precision polishing technology research bases on polishing force controled[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016.  
田洪东. 基于研抛力控制的复杂曲面精密研抛技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.

[8] Li L X, Xue D L, Deng W J, et al. Positive dwell time algorithm with minimum equal extra material removal in deterministic optical surfacing technology[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(32): 9098–9104.

[9] Schinhaerl M, Rascher R, Stamp R, et al. Utilisation of time-variant influence functions in the computer controlled polishing[J]. *Precision Engineering*, 2008, **32**(1): 47–54.

[10] Xu Y, Yin Y H. The effect of varied lapping pressure on the material removal rate of optics lapping[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(8): 862–871.  
徐勇, 殷跃红. 变压强研磨数学力学原理与去除效率分析[J]. *科学通报*, 2016, **61**(8): 862–871.

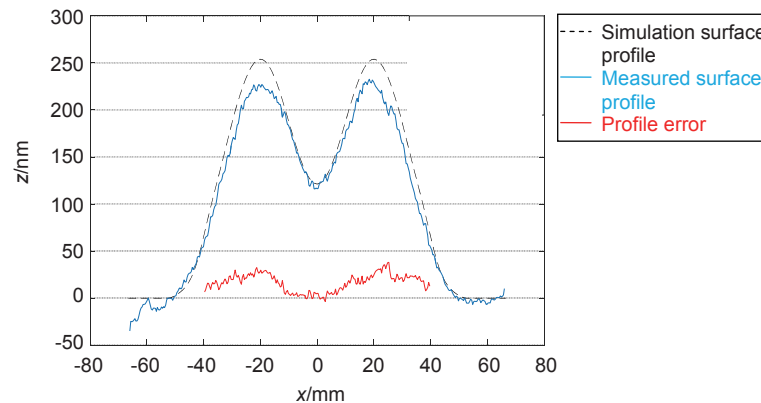
[11] Liu H T, Wan Y J, Zeng Z G, et al. Freeform surface grinding and polishing by CCOS based on industrial robot[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9683**: 96832D.

# Study on the variable pressure CCOS polishing technology

Ye Fengfei<sup>1,2</sup>, Yu Deping<sup>1\*</sup>, Wan Yongjian<sup>2</sup>, Liu Haitao<sup>2</sup>, Zhao Hongshen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



Measured and simulated machined surface profile and profile error

**Overview:** The aspherical and freeform surface mirror, as one of the key elements in optical system, is needed more and more. Both higher figure accuracy and higher fabricating efficiency are demanded with the development of the optical systems. In grinding and polishing of the aspherical and freeform surface, the CCOS technology is widely used. It is a process during which errors can be corrected quantitatively by a small tool that can follow the local curves of the aspherical and freeform surface. The CCOS technology commonly uses constant pressure during polishing, and thus the desired amount of material to be removed depends on the dwell time. This paper focuses on the variable pressure CCOS polishing technology. It adds one more degree of freedom to the polishing process, in which the desired amount of material to be removed is controlled by both the polishing pressure and the dwell time. Firstly, a mathematical model was established for the variable pressure polishing process. Then, the stability and response speed of the output force of the polishing tool, and the stability of removal function was measured and analyzed. Finally, a material removal experiment that applied sinusoidal force was carried out on a K9 material mirror. Results show that: 1) The mathematical model for the variable pressure polishing process is correct; 2) Frequency of the measured force is the same as that of the ideal sinusoidal polishing force, with a standard deviation of the force error being about 0.35 N. Its effect on PV and RMS of the finish surface is less than 9%; 3) The spatial period of the measured surface profile is the same as that of surface profile obtained by simulation of the sinusoidal polishing process. The surface profile error is within 17%. In this paper, variable pressure polishing was achieved, and its effectiveness for optical processing was verified. Compared with the constant pressure CCOS polishing technology, the variable pressure CCOS polishing technology adds one more degree of freedom to the polishing process, so it need to control both the polishing pressure and the dwell time. In theory, it can improve processing efficiency and convergence rate. At the same time, it need have higher requirements for the force active control system, such as the output force range, response speed and precision. These performance parameters can affect the processing results. Therefore, the key to developing the variable pressure CCOS polishing technology is to research the polishing tool, which must have high performance force active control system.

**Citation:** Ye F F, Yu D P, Wan Y J, *et al.* Study on the variable pressure CCOS polishing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170642

Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Fund (51405313)

\* E-mail: williamydp@scu.edu.cn