

文章编号 1004-924X(2013)04-0934-07

## 微结构光学零件的大气等离子体数控加工

李娜, 王波\*, 金会良, 袁野, 杨允利

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了实现对微结构光学零件无表面损伤和亚表面损伤的高效加工, 建立了大气等离子体数控加工系统。研究了该系统的平台设计、大气等离子体加工工艺特性及其数控加工过程。首先, 根据大气等离子体加工的原理及要求介绍了该数控加工系统的组成。然后, 以 He/SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> 加工熔融石英为例, 采用针状电极等离子体炬对系统加工工艺的可控性以及多参数工艺特性进行了探索, 并根据工艺实验结果拟合出该加工条件下的去除函数。最后, 介绍了整个大气等离子体数控加工的实现过程。实验结果表明: 利用该系统可以在平面熔融石英材料上加工出幅值为 150 nm、波长为 6 mm 的正弦网格结构, 由此验证了该数控加工系统的可行性, 实现了对复杂面型光学零件表面的确定性加工。

**关键词:** 微结构光学零件; 大气等离子体加工; 去除深度; 数控加工系统

**中图分类号:** TN305.2; TG659 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0934

## Numerically controlled atmospheric pressure plasma processing of micro-structured optics

LI Na, WANG Bo\*, JIN Hui-liang, YUAN Ye, YANG Yun-li

(College of Mechanical and Electrical Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: brady.wang@hit.edu.cn

**Abstract:** To process micro-structured surface optical elements without surface damage and subsurface damage in higher efficiency, a numerical control system for Atmospheric Pressure Plasma Processing (APPP) was established. The design of a system platform, APPP process characteristics and numerical control process were investigated. First, according to the principle and requirements of the APPP, the numerical control system composition was presented. Then, by taking the processing of fused silica by He/SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> as an example, the controllability of the process as well as multi-parameter process characteristics were explored using the plasma torch with a needle electrode, and the removal function under this condition was fitted. Finally, the entire realization process of the numerical control machining for the APPP was proposed. Experimental results indicate that the sine structure with an amplitude of 150 nm and wavelength of 6 mm can be processed on a flat fused silica surface by this system, which verifies the feasibility of the numerical control system and achieves the deterministic processing of complex optical surfaces.

收稿日期: 2012-11-26; 修订日期: 2013-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175123)

**Key words:** micro-structured optics; atmospheric pressure plasma processing; removal depth; numerical control system

## 1 引言

随着现代光学技术的发展,光学系统中越来越多地采用非球面零件以改善像质、提高光学性能、减小外形尺寸和重量、简化结构等<sup>[1-2]</sup>。目前,高精度光学零件的制造已经大大超出了传统的研磨抛光技术<sup>[3]</sup>,大量先进的加工技术不断涌现。虽然这些技术具有各自的优越性,但也都存在着不同程度的局限性。例如浴法抛光<sup>[4]</sup>和浮法抛光<sup>[5]</sup>主要是利用磨料颗粒对工件表面进行机械微切削,因此会引入表面和亚表面损伤;磁流变抛光<sup>[6]</sup>虽然以剪切力为主、压力为辅,几乎不产生亚表面损伤层,但是该方法对抛光距离(抛光模与镜面法向间隙)比较敏感<sup>[7]</sup>;离子束抛光<sup>[8]</sup>虽然可以获得高质量无损伤的表面,但其需要复杂的真空系统来支持,设备维护成本较高。而大气等离子体加工是在大气压下,采用施加在电极之间的射频电压,使得反应气体在等离子体氛围中被激发产生活性粒子,与工件表面的原子发生化学反应生成挥发性产物,实现对光学零件的加工。该方法无需真空设备,加工成本较低,并且是基于原子之间的化学反应,属于非接触式加工,可以避免接触应力造成的表层及亚表层损伤。因此,大气等离子体加工在光学制造领域有很大的应用潜力。

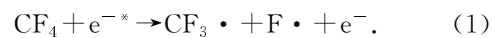
20世纪90年代,日本大阪大学的等离子体化学蒸发加工(Chemical Vaporization Machining, CVM)<sup>[9]</sup>、美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室与英国克兰菲尔德大学合作的反应原子等离子体技术(Reactive Atom Plasma, RAP)<sup>[10]</sup>以及德国莱布尼茨表面改性实验室的等离子体射流刻蚀(Plasma Jet Etching, PJE)<sup>[11]</sup>均已经成功地将大气等离子体应用于光学零件的制造加工中。其中,CVM和PJE采用电容耦合的放电方式,RAP则采用电感耦合的方式;CVM和RAP均采用射频电源激发等离子体,而PJE则大多采用微波电源。由于电感耦合的放电方式和微波电源的激发方式都会造成等离子体区域温度过高,需要根据加工过程中的温度变化考虑对待加工光学表面造成的影响。因此本文选择温度效应较小的射频电

源-电容耦合的方式进行大气等离子体加工。

本文建立了大气等离子体数控加工系统来进行微结构光学零件的加工。根据大量工艺实验的结果,证明了该系统对加工过程的可控性,得到了多个参数的工艺特性,并拟合出特定条件下加工的去除函数。为了获得期望的面形,采用计算机控制精密机床使得等离子体炬以特定的路径和速度在光学零件表面上进行复杂的相对运动,通过控制每一区域内的驻留时间精确地控制工件材料的去除量。最后的正弦网格加工实验证明了该系统满足微结构光学零件表面的加工要求,验证了该数控系统的可行性。

## 2 大气等离子体加工系统设计

大气等离子体加工中,等离子体气体一般选择易被电离的气体,如He、Ar等惰性气体,来产生和维持高活性的等离子体,而反应气体则是为特定材料去除过程提供活性反应原子的气体。由于加工对象为含Si元素的光学零件(如熔融石英、SiC、微晶玻璃等),因此反应气体采用CF<sub>4</sub>或SF<sub>6</sub>等含F元素的气体,有时还加入辅助性气体O<sub>2</sub>以提高反应速率。这些气体以特定的比例进入等离子体发生装置后,在13.56 MHz射频电源的激励下,反应气体便与等离子体中高速运动的电子发生碰撞反应(以CF<sub>4</sub>气体为例):



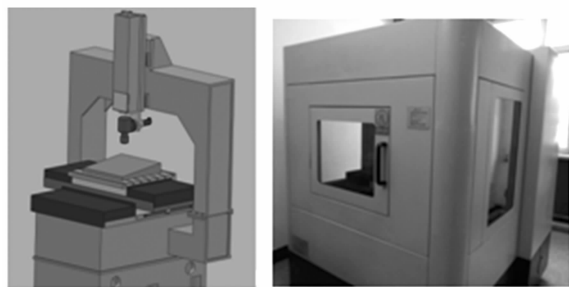
反应生成的单个F原子具有极强的化学活性,可以与材料中的Si成分发生在常温常压下难以发生的化学反应,生成气态产物被气流带走:



这就是大气等离子体加工含硅脆性光学材料的原理。

大气等离子体系统是进行上述大气等离子加工的平台,主要包括气体供应系统,气体回收及尾气净化系统,电源系统,在线监测系统,冷却系统以及运动控制系统等。加工过程中,驻留时间计算、加工轨迹求取、数控代码生成以及机床各轴运动均由计算机通过数控系统进行控制,工件与等离子体炬之间的相对运动由如图1所示的机床执

行。该机床可以保证等离子体炬的轴线方向与工件被加工表面的法线方向重合,从而实现复杂曲面的大气等离子体加工。另外,由于加工过程中化学反应生成具有刺激性气味且有毒的气体  $\text{SiF}_4$ ,为机床设计了一个密闭的工作舱,可以使有害气体不直接排放到空气中,保证了加工人员的人身安全。



(a) 机床装配图 (b) 机床实物图  
(a) Assembly drawing (b) Machine picture

图 1 大气等离子体数控加工机床

Fig. 1 Numerically controlled machine for APPP

### 3 大气等离子体加工工艺过程研究

对大气等离子体加工工艺过程的研究主要包括加工系统的可控性验证和多参数的工艺特性研究。

以  $\text{He}/\text{SF}_6/\text{O}_2$  加工熔融石英为例,采用如图 2 所示的电容耦合等离子体发生装置进行实验。该炬由三部分构成:聚四氟乙烯基体、用于约束出口气流的石英管和直径为 1 mm 的针状电极(不锈钢或钨)<sup>[12]</sup>。

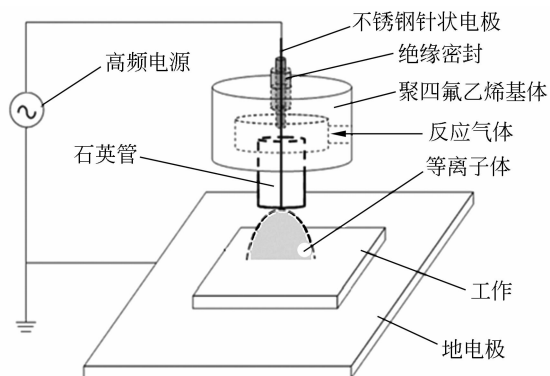


图 2 大气等离子体发生装置

Fig. 2 Plasma torch for APPP

#### 3.1 加工系统的可控性验证

可控性主要包括短时重复性、小扰动稳定性以及去除量与时间的关系<sup>[12-13]</sup>。采用定点加工方式,之后用轮廓仪测量加工深度。

##### 3.1.1 短时间内重复性验证实验

采用相同的加工条件及测量环境在短时间内进行重复性实验。 $\text{He}$  和  $\text{SF}_6$  的流量分别为 1.2 和 20 ml/min,施加的射频功率为 200 W,喷嘴与工件之间的距离为 1 mm,加工时间为 2 min。

在  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的熔石英片上重复加工 5 个点,可得如图 3 所示的去除轮廓。图中横纵坐标分别代表加工的宽度和深度,可见 5 个点的宽度基本一致,深度方向的最大偏差为 4.4%。该结果证明大气等离子体加工的去函数呈十分稳定的高斯型,并且该加工方法具有良好的短时间可重复性(优于 5%)<sup>[13]</sup>。

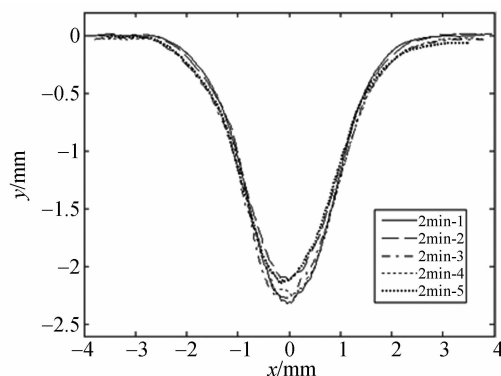


图 3 重复性实验结果

Fig. 3 Results of repetitive experiments

##### 3.1.2 小扰动稳定性实验

在实际加工中,系统特性或参数的摄动是不可避免的,这些小的扰动会对加工速度有一定的影响,因此有必要对该系统在参数小范围内变化情况下的加工稳定性进行研究。

首先研究各种气体流量小扰动对去除深度的影响,根据各气体流量计的分辨率,采用如表 1 所示的实验参数,所得结果如图 4 所示。

表 1 小扰动稳定性实验参数

Tab. 1 Parameters of small disturbance stability experiments

产生扰动的参数	常用流量	小扰动流量
$\text{He}$ 流量/ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$	1.2	1.1, 1.2, 1.3
$\text{SF}_6$ 流量/ $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	20	19, 20, 21
$\text{O}_2$ 流量/ $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	2	1.9, 2, 2.1

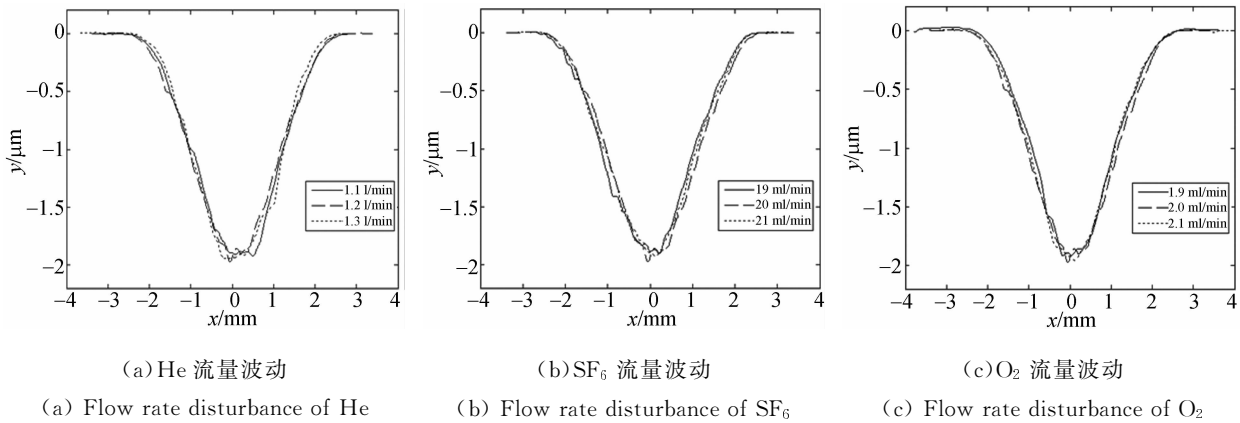


图 4 气体流量小扰动稳定性实验结果

Fig. 4 Experimental results of small gas flow rate disturbance stability

由图 4 可见,He, SF<sub>6</sub> 和 O<sub>2</sub> 流量在一定范围内的小扰动对去除轮廓影响都不太明显,去除宽度和去除深度的变化都可以保持在 3% 以内,说明这三种气体的小范围波动对去除函数的影响可以忽略不计。因此在加工过程中,可以允许 He, SF<sub>6</sub> 和 O<sub>2</sub> 的流量分别存在 8%, 5% 和 5% 以内的波动,无须极其精准的控制。

另外,加工中所用的射频电源功率每档的增

幅为 10 W, 每升高或降低 1 档都会使放电状态发生很大变化,对去除效果也有相当大的影响,因此实际加工中不存在功率的小范围波动,加载功率的档位采用手动的方式进行控制和调节。

### 3.1.3 去除量随时间变化特性

以加工时间为唯一变量(除加工时间以外的其他参数均与 3.1.1 节相同),分别定点加工 1、3、5、7 min, 实验结果如图 5 所示。

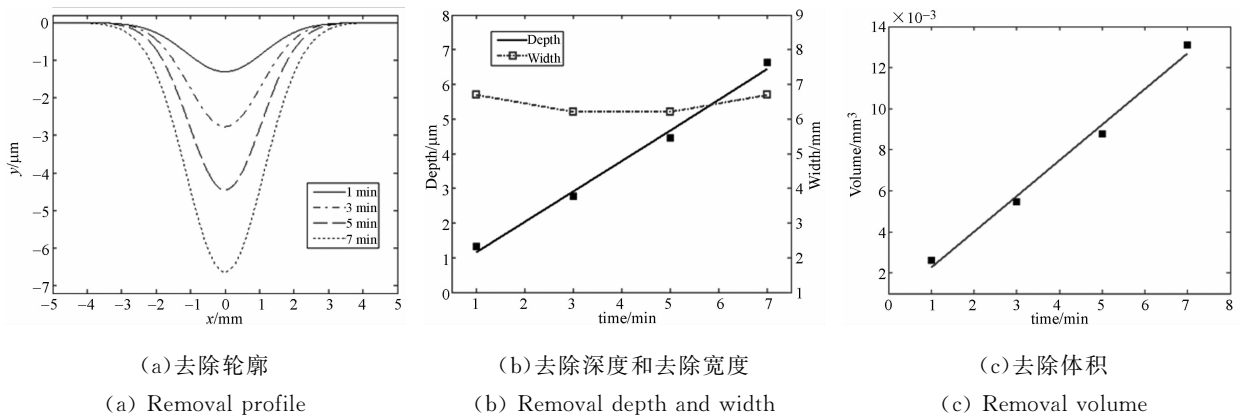


图 5 去除函数随时间变化趋势

Fig. 5 Variation trend of removal function with time

由图 5(b) 可知,去除宽度随时间基本不变,而去除深度随加工时间的增长逐渐增加,其线性拟合方程的确定系数为 0.998 2, 因此可以认为加工深度与加工时间呈近似线性关系。另外,由图 5(c) 可见,材料去除体积也与时间呈近似线性关系。

### 3.2 多参数工艺特性研究

大气等离子体加工中影响等离子体放电状态的参数很多,因此需要对各参数的工艺特性进行研究。影响去除函数的参数主要包括射频电源功率、加工间隙和 O<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 的混合比例等。采用表 2 所示的参数进行加工实验。

实验结果如图 6 所示,由图 6(a)可知,随着功率的增加,去除深度及轮廓宽度相应增加。当输入功率达到 220 W 时,加工深度突然大幅度增加,这可能与加工中放电形态的温度有关。由图 6(b)可知,随着加工间隙的增大,材料去除深度值相应减小。这是因为距离越远,重新复合的活性 F\* 原子就会越多,可以与零件表面原子发生反应的活性粒子就越多,从而使去除量呈现大幅下降。从图 6(c)可见,随着 O<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 配比从 10% 增加至 40%,去除量逐渐增大,当达到 50% 时,去除

量出现下降趋势,这说明该实验条件下,最佳的 O<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 配比在 40% 左右。

表 2 多参数工艺特性研究实验参数

Tab. 2 Parameters of multi-parameter process characteristics

实验名称	He 流量/ (l · min <sup>-1</sup> )	SF <sub>6</sub> 流量/ (ml · min <sup>-1</sup> )	O <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub> /%	功率 /W	距离 /mm	时间 /min
变功率	1.2	20	0	140~220	0.5	1
变距离	1.2	20	0	200	0.5~2.5	1
变 O <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub>	1.2	20	10~50	200	1	1

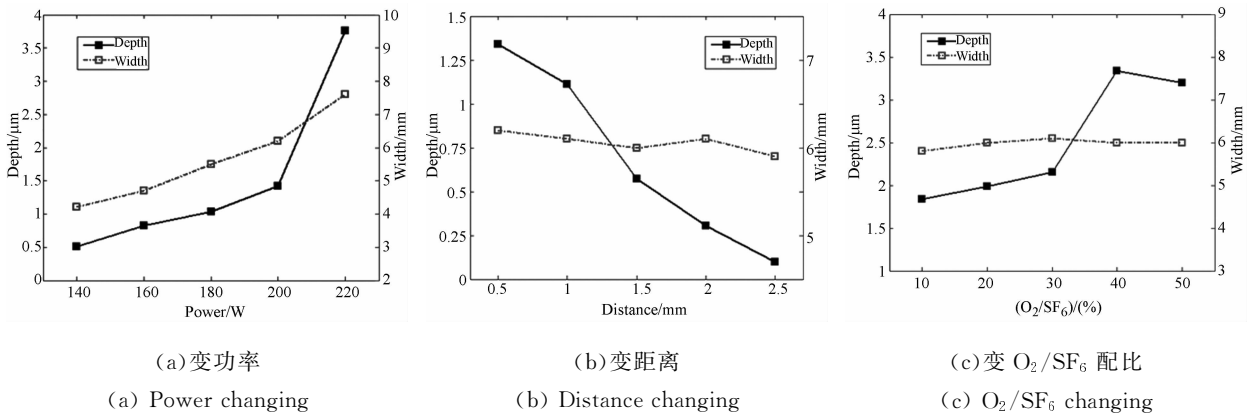


图 6 工艺参数变化实验结果

Fig. 6 Results of process parameters changing

### 3.3 去除函数模型的建立

通过对多参数工艺特性的研究,可以建立起各参数对去除轮廓的影响规律。采用 matlab 中的 trust-region algorithm 方法拟合图 5 中加工时间为 1 min 时的轮廓曲线,将目标函数设定为高斯类型

$$f(x) = a \cdot \exp[-((x-b)/c)^2], \quad (3)$$

可得  $a = -0.001\ 306$ ,  $b = 0$ ,  $c = 1.585$ 。则单位去除函数为:

$$f(x) = -0.001\ 306 \cdot \exp(-x^2/2.512). \quad (4)$$

拟合结果显示,方程的确定系数为 0.998 2,峰值相对误差为 1.1%,说明该结果足以准确描述实际的加工截面轮廓。根据式(4)可知,在该条件下,单位时间的去除深度为 1.306 μm,去除函数的半高宽为  $2 \sqrt{\ln 2} \cdot c = 2.64$  mm。根据采样定理,该函数可以加工周期大于 5.28 mm 的正弦网格,因此 3.4 节将采用该去除函数进行周期为 6 mm 的正弦网格的加工实验。另外,由于大气

等离子体加工的单位去除函数为回转对称的高斯曲面,因此可以根据高斯曲面的体积公式计算得到单位时间的去除体积为:

$$-ac^2\pi/4 = 2.58 \times 10^{-3} \text{ mm}^3. \quad (5)$$

### 3.4 大气等离子体数控加工

在大气等离子体数控加工过程中,采用光栅扫描式的加工路径和点驻留的线性进给方式,通过控制等离子体炬在零件表面的驻留时间,实现定量去除和确定性加工。从大气等离子体加工原理的角度,加工去除量等于单位去除函数与驻留时间函数的卷积<sup>[14-15]</sup>。其中,零件表面相应位置的去除量由原始面形与期望面形的差值决定,而单位去除函数则采用 3.3 节拟合的结果。那么,等离子体炬的驻留时间函数就可以通过采用傅里叶变换的方法计算去除量与单位去除函数之间的反卷积得到。

利用所建立的大气等离子体加工预测模型在平面融石英材料上加工正弦网格,得到幅值为

150 nm、波长为 6 mm 的正弦网格结构,检测三维形貌及剖面轮廓结果如图 7 所示。

从图中 7 可以看出,该正弦网格在周期方向上的误差约为 1.17%,幅值方向上的误差约为  $\lambda = 632.8$  nm。根据之前的工艺实验结果可知,驻留时间变化引起的去除函数宽度方向的变化很小,因此正弦网格周期方向上的误差也非常小。而幅值方向上存在较大误差的原因可能有以下几点:(1) 单位去除函数的拟合误差;(2) 文中的反卷积算法是基于去除深度随时间呈线性变化假设

的,而实际加工中,环境的干扰以及长时间加工的温升等因素会使得该变化不再呈严格的线性关系;(3) 加工以及检测过程中的安装定位误差。这三种因素都会在一定程度上影响幅值方向上的加工精度。但总体来说,实验结果表明了加工预测模型的有效性,同时证明了大气等离子体加工过程的可控性。

## 4 结 论

通过对微结构光学零件的大气等离子体数控加工,建立了大气等离子体数控加工系统。等离子体发生装置与工件之间复杂的相对运动由计算机控制,并由一个具有密闭工作舱的机床精准、高效的执行。以 He/SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> 加工熔融石英为例,采用电容耦合针状电极炬对大气等离子体加工工艺的可控性以及多参数工艺特性进行研究,验证了大气等离子体加工去除函数呈稳定的高斯型,并根据工艺实验结果拟合出该加工条件下的去除函数模型。运用大气等离子体数控加工系统在平面融石英材料上进行加工实验,结果表明:利用该系统可以加工出幅值为 150 nm、波长为 6 mm 的正弦网格结构。证明了去除函数模型的准确性,实现了对微结构光学零件表面的确定性加工。

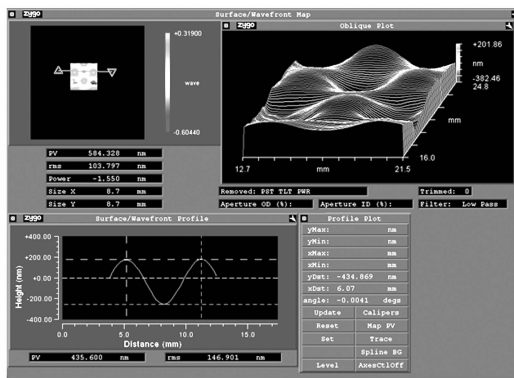


图 7 正弦网格表面加工效果

Fig. 7 Processing effect of sine structure

## 参考文献:

- [1] 贺俊,陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形[J]. 光学精密工程,2010,18(1): 69-74.  
HE J, CHEN L. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 69-74. (in Chinese)
- [2] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程,2010,18(12): 2557-2563.  
ZHANG F. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2557-2563 (in Chinese)
- [3] 王朋,陈亚,宣斌,等. 大口径光学元件的机械手抛光[J]. 光学精密工程,2010,18(5): 1077-1085.  
WANG P, CHEN Y, XUAN B, et al.. Polishing large aperture mirror by manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1077-1085. (in Chinese)
- [4] RALPH W D, JEAN M B. Bowl feed technique for producing supersmooth optical surfaces [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(5): 881-882.
- [5] JEAN M B, JOSEPH J S, YUKIO S, et al.. Float polishing of optical materials [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(4): 696-703.
- [6] 石峰,戴一帆,彭小强,等. 高精度光学表面磁流变修形[J]. 光学精密工程,2009,17(8): 1859-1864.  
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, et al.. Magneto-rheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1859-1864. (in Chinese)
- [7] 周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 北京:国防科学技术大学,2008.  
ZHOU L. *Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces* [D]. National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] 武建芬,卢振武,张红鑫,等. 光学非球面离子束加工模型及误差控制[J]. 光学精密工程,2009,17(11): 2678-2683.

- WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, *et al.*. Magnetorheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2678-2683. (in Chinese)
- [9] HIDEO T, KAZUYA Y, YASUHISA S, *et al.*. Shape correction of optical surfaces using plasma chemical vaporization machining with a hemispherical tip electrode [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 401-407.
- [10] MICHAEL N M, ANDREW S, OTAR M. Reactive atom plasma for rapid figure correction of optical surfaces [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 496:182-187.
- [11] ARNOLD T, BOHM G, FECHNER R, *et al.*. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques-status and outlook [J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 2009, 616(2-3):147-156.
- [12] 袁野. 熔石英材料大气等离子体加工工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2010.
- YUAN Y. *Research on processing technology of fused quartz material with atmospheric plasma* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 焦长君, 李圣怡, 解旭辉, 等. 光学镜面离子束加工去除函数工艺可控性分析 [J]. *光学技术*, 2008, 34(5): 651-654.
- JIAO CH J, LI SH Y, XIE X H, *et al.*. Controllability of removal function in the ion beam figuring process for optics mirrors [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(5):651-654. (in Chinese)
- [14] ROBERT A J. Optimization of computer controlled polishing [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(1): 218-224.
- [15] 杨允利. 大气等离子体加工数控方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2011.
- YANG Y L. *Research on numerical control strategy of atmospheric pressure plasma processing* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



李娜(1986—),女,山东蓬莱人,博士研究生,2011年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事大气等离子体加工技术方面的研究。E-mail: lina\_hit@hit.edu.cn



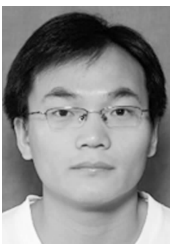
袁野(1985—),男,辽宁沈阳人,硕士,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事大气等离子体加工技术方面的研究。E-mail: yuanye2120859@yahoo.cn



王波(1971—),男,山东泰安人,博士,教授,博士生导师,1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事大气压等离子体化学加工技术、超精密机床设计及其运动控制技术、超精密微细切削加工技术等方面的研究。E-mail: bradywang@hit.edu.cn



杨允利(1986—),男,江苏连云港人,硕士,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事大气等离子体加工数控方法的研究。E-mail: yunli.yang@cn.bosch.com



金会良(1984—),男,河南南阳人,博士研究生,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事大气等离子体加工技术方面的研究。E-mail: jinhl@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)