

文章编号 1004-924X(2015)06-1572-08

# 离子束抛光高陡度离轴非球面的去除函数修正

唐 瓦<sup>1,2</sup>, 邓伟杰<sup>1\*</sup>, 李锐钢<sup>1</sup>, 郑立功<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 研究了三轴离子束系统抛光大口径高陡度离轴非球面过程中镜面曲率变化对离子束抛光去除函数的影响。提出了利用修正矩阵修正各驻留点处的去除函数信息, 进而实现对高陡度离轴非球面高精度抛光的方法。该方法通过对离轴非球面进行坐标转换来降低陡度变化对去除函数的影响; 基于 Sigmund 溅射理论分析离子束抛光非球面材料的去除率, 建立离子束抛光非球面去除函数模型, 计算了材料去除率在非球面各驻留点处的变化。最后, 根据投影原理计算在各驻留点处去除函数的半宽, 得到以驻留点矩阵为基础的去除函数修正矩阵, 从而掌握每一个驻留点处的去除函数信息, 然后根据计算机控制光学表面成形(CCOS)原理解得加工驻留时间分布。选取口径为 900 mm×680 mm, 离轴量为 350 mm 的离轴体育场型非球面镜进行了抛光实验, 实验显示抛光后非球面镜面形精度的 RMS 值由 32.041 nm 达到 11.566 nm, 收敛率达 2.77, 对实际加工具有指导意义。

**关键词:** 光学制造; 离轴非球面; 离子束抛光; 溅射效应; 去除函数

**中图分类号:** TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1572

## Correction of removal function of ion beam figuring highly steep off-axis asphere

TANG Wa<sup>1,2</sup>, DENG Wei-jie<sup>1\*</sup>, LI Rui-gang<sup>1</sup>, ZHENG Li-gong<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: mr-deng@163.com

**Abstract:** The effect of curvature change of a mirror surface on the removal function of ion beam figuring was explored. A new higher precision figuring method for a highly steep off-axis asphere was proposed by using a correction matrix to calculate the removal function in different dwell points. The coordinate transformation for the off-axis asphere was used to decrease the effect of steep change on the removal function, the material removal rate of ion beam figuring asphere was analyzed based on Sigmund sputtering theory and a mathematics model of the removal function of the ion beam figuring asphere was established to calculate the variation of the material removal rate in different well points. The FWHMs (full wave and half maximum) of removal functions on different dwell points were

**收稿日期:** 2014-05-08; **修订日期:** 2014-07-01.

**基金项目:** 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013205); 国家自然科学基金重点项目 (No. 61036015)

calculated based on projection theory. Then the correction matrix for removal function was obtained based on the dwell point matrix, by which the information of removal function on every dwell points was calculated. Furthermore, the dwell time could be computed by Computer Controlled Optical Surfacing(CCOS) theory. At last, the experiments were performed by combing with a simulation. A silicon off-axis sphere mirror with a size of 900 mm $\times$ 680 mm and an off-axis magnitude of 350 mm was figured. Obtained the RMS value of profile accuracy for the off-axis asphere mirror changes from 32.041 nm to 11.566 nm and the rate of convergence is up to 2.77. The experimental result demonstrates that the correction matrix for removal function of ion beam figuring satisfies the requirement of optical fabrication.

**Key words:** optical fabrication; off-axis asphere surface; ion beam figuring; sputtering theory; removal function

## 1 引言

离轴非球面反射镜能够以单一元件提供更多的光学设计自由度,且具有良好的光学性能,因而在现代空间光学系统中的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。但是其加工难度大,传统光学加工工艺如小磨头,在加工过程中会引入复印效应、边缘效应等,难以独立完成对高精度高陡度离轴非球面的抛光<sup>[2]</sup>。离子束抛光是一种确定性高、稳定性好并且能够与非球面更好贴合的加工手段,因此离子束抛光高陡度离轴非球面具有更高的加工效率与可靠性,尤其是在精抛光阶段具有更高的收敛率<sup>[3]</sup>。

离子束抛光利用由离子源发射出的具有一定能量与空间分布的离子束流轰击光学表面,入射离子在光学表面一定深度内发生溅射效应,通过级联碰撞将能量传递给工件原子使其离开原位置,当工件原子运动到工件表面并且能量大于材料表面束缚能时,工件原子飞离材料表面形成材料去除,然后结合计算机控制光学表面成形(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)原理对光学表面进行加工<sup>[4-5]</sup>。与传统光学加工不同,离子束抛光属于非接触式的材料去除,加工中具有稳定的高斯型去除函数、不存在复印效应和边缘效应,能够更好地满足抛光高陡度离轴非球面的要求。目前,离子束抛光已成为一种重要的光学加工手段,德国 IOM 研究所与 NTG 公司合作开发的三轴离子束抛光系统能够对多种材料与不同面形的离轴非球面镜进行高精度抛光<sup>[6]</sup>,其中抛光13.5 mm 的石英玻璃非球面镜时得到的面形 RMS 值优于 1 nm。中国国防科技大学应用自主研发的离子束抛光系统<sup>[7]</sup>对直径 21.3

mm 的融石英球球面镜进行了抛光,得到的面形 PV 值为 44.3 nm、RMS 值为 5.9 nm。

在三轴离子束系统抛光曲面的过程中,离子束流并非正入射,去除函数随镜面曲率半径的改变而改变,非球面各点的曲率半径不同,导致各驻留点处去除函数的变化明显,从而给离子束抛光过程中去除函数的确定带来了一定困难。目前,最常用的方法是按照非球面最接近的球面或者平面来计算离子束抛光去除函数在其表面上的变化,但是随着非球面陡度的增大,此方法的准确性将下降,难以满足更高精度的抛光需求。本文提出利用修正矩阵对去除函数进行计算修正的方法,得到了更准确的去除函数信息指导加工。首先以离子束抛光材料去除原理与投影原理为基础,分析与计算了离子束抛光非球面过程中去除函数的变化,得到去除函数的变化矩阵。然后,将此矩阵引入到驻留时间求解过程中,对驻留时间进行修正。最后,采用三轴离子束抛光系统对大口径高陡度离轴非球面反射镜进行抛光实验,验证了此方法的可行性。

## 2 离子束抛光离轴非球面材料去除特性

### 2.1 离子束抛光材料去除原理

离子束抛光过程中,入射离子到达工件表面后在材料表层一定深度内发生溅射效应。根据 Sigmund 溅射理论<sup>[8]</sup>,具有一定能量并入射到工件表面的原子在工件表层一定范围内的能量沉积具有高斯型分布,获得足够能量的材料粒子能够飞离材料表面,实现材料的法向去除。这种材料去除特性决定了离子束抛光过程中并不要求离子束流

沿驻留点法向入射。因此,与传统加工手段不同,三轴离子束抛光系统可以对离轴非球面进行抛光。

根据 Sigmund 溅射理论可知,单一入射离子在其作用范围内任意一点  $O$  的能量沉积为:

$$E(X, Y) = \frac{\epsilon}{(2\pi)^{3/2} \sigma \mu^2} \exp\left\{-\frac{z^2}{2\sigma^2} - \frac{X^2 + Y^2}{2\mu^2}\right\}, \quad (1)$$

其中:  $z$  为入射平均深度点至  $O$  点沿离子入射方向的距离;  $X, Y$  为垂直于  $Z$  的平面上的距离;  $\epsilon$  为入射离子的总能量;  $a$  为离子入射到工件内部的平均深度;  $\sigma, \mu$  分别为描述能量沿平行和垂直于离子入射方向的分布系数,系数随材料的不同而不同。由此可见,入射离子能量在工件表面一定深度内呈高斯分布。

对于具有一定能量与空间分布的离子束流来说,其作用范围内任意一点的材料去除率可以通

$$\omega = 1 + \frac{a}{2} \left(\frac{a_\sigma}{a_\mu}\right)^2 \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right] - \frac{1}{4} \left[\frac{a_\sigma^2}{a_\mu^2} - \frac{a_\sigma^4}{a_\mu^2} - 1\right] \left[\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2\right], \quad (4)$$

其中:  $a_\sigma = a/\sigma$ 。由式(3)、式(4)可知利用具有稳定能量与束流空间分布的离子束流抛光非球面时,材料去除率随着非球面陡度的增大而明显增大,此现象已得到了实验验证<sup>[10]</sup>。三轴离子束抛光系统抛光非球面的坐标系如图 1 所示,其中镜面上任意点  $O$  处的镜面坐标系为  $(X, Y, Z)$ , 实验室坐标系为  $(x, y, h)$ , 抛光过程中离子束流始终沿实验室坐标系中  $-h$  方向入射到工件表面,与工件表面法线方向  $Z$  具有一个变化的夹角  $\theta$ 。

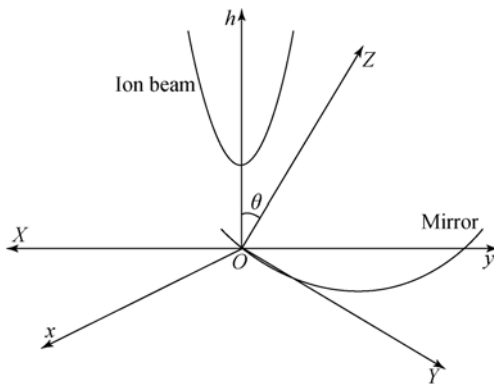


图 1 镜面坐标系  $(X, Y, Z)$  与实验室坐标系  $(x, y, h)$  转换关系

Fig. 1 Illustration of local reference frame  $(X, Y, Z)$  and laboratory reference frame  $(x, y, h)$

由式(3)可知非球面上各点处的材料去除率可以通过修正平面去除函数的材料去除率而得到。修正系数由非球面驻留点处的面型变化决定,镜面

过全部入射离子在此点沉积的能量产生的溅射产额积分来求得<sup>[8]</sup>,如式(2)所示:

$$V_0 = p \int_S \Phi(r) E(r) dr, \quad (2)$$

式中:  $S$  为入射离子的有效作用区域,  $p$  为与材料性质有关的常数,  $\Phi$  为入射离子束流在工件表面的分布。1988 年,Bradley 与 Harper 在此基础上推导出了均匀束流入射到自由曲面上任意点处的材料去除率<sup>[9]</sup>,针对三轴离子束抛光系统的特点,对材料去除率进行修正可以得到:

$$R = F\omega, \quad (3)$$

式中:  $R$  为工件表面各驻留点沿其法向的去除函数;  $F$  表示具有一定束流分布  $J(x, y)$ 、能量为  $\epsilon$  的离子束流正入射到平面时的去除函数;  $\omega$  为待抛光表面对抛光过程中材料去除率的影响,其计算公式为:

陡度越大材料去除率的变化越大。按照各点坐标能够修正矩阵材料的去除率。

## 2.2 坐标变换降低陡度

传统工艺抛光高陡度离轴非球面的过程中常用坐标变换法来降低矢高变化率,从而降低加工难度<sup>[11]</sup>。对于三轴离子束抛光系统来说非常有必要降低矢高变化率,通过对非球面进行坐标转换能够降低三轴离子束抛光系统抛光非球面的难度<sup>[12-13]</sup>。坐标变换的优点主要有:(1)降低镜面陡度对材料去除率的影响,使材料去除率变化放缓,提高加工文件的可执行性与数学补偿的精度;(2)旋转后工件母线在  $y$  轴上的投影变长,镜面残差在离子束入射方向能够表现出更多细节,减小残差间相互干扰,提高了离子束抛光对镜面残差的加工可达性和加工收敛率<sup>[14]</sup>。

离轴非球面坐标转换如图 2 所示( $x$  轴、 $x_1$  轴正向均垂直纸面向外),将非球面从其母线坐标系  $(x, y, h)$  转换到新坐标系  $(x_1, y_1, h_1)$  中,图中  $D$  为离轴量,  $O_1$  点在母线坐标系中的坐标为  $(0, a, b)$ , 旋转后离轴非球面在新坐标系中的坐标与母线坐标系的关系为:

$$\begin{aligned} (x_1 \ y_1 \ h_1) &= ((x \ y \ h) - (0 \ a \ b)) \times \\ &\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $\alpha$  为坐标轴旋转角度。

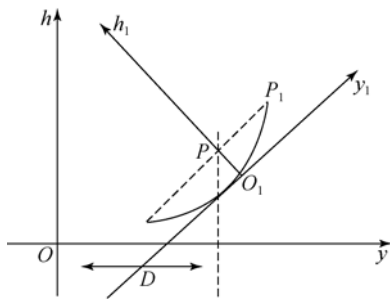


图2 离轴非球面坐标转换示意图

Fig. 2 Illustration of coordinate transformation of off-axis asphere

### 2.3 去除函数修正

坐标转换后离轴非球面陡度降低,但对于三轴离子束抛光系统而言仍然不能忽略材料去除率变化,需要对其进行修正与补偿,尤其是在高陡度离轴非球面的抛光过程中,去除函数变化明显,必须对去除函数进行修正。离子束抛光去除函数具有近高斯型的空间分布,表征去除函数的主要参数包括材料去除率峰值和高斯型去除函数分别在  $x$ 、 $y$  方向上的半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)。通常离子束抛光的去除函数为:

$$R = r_{\max} \exp \left[ -\frac{x^2}{2\eta_x^2} - \frac{y^2}{2\eta_y^2} \right], \quad (6)$$

其中:  $r_{\max}$  为材料去除率峰值,  $\eta_x$ 、 $\eta_y$  分别为去除函数在  $x$ 、 $y$  方向上的高斯分布系数。在抛光离轴非球面的过程中,去除函数在不同驻留点具有不同的材料去除率与空间分布,无法通过测量得到每一个驻留点处去除函数的准确数据,通常只能通过计算来修正与补偿平面去除函数,得到近似的非球面去除函数。通过计算或者测量可以得到离子束抛光在平面上的去除函数。采用相同工作参数的离子源发射出的离子束流具有相同的能量与空间分布,因此在抛光非球面时,能够以平面去除函数为基础进行修正,得到修正后的去除函数矩阵。

首先修正去除函数的材料去除率峰值。离轴非球面坐标旋转后在实验室坐标系内的坐标为  $(x_1, y_1, h_1)$ , 抛光过程中根据测量数据选定驻留点间距,得到驻留点矩阵,根据每一个驻留点的坐标计算得到每个驻留点处的材料去除率峰值,

即有:

$$r_{\max(i)} = r_{\max(0)} \cdot \omega_i, \quad (7)$$

其中:  $r_{\max(0)}$  为初始去除率峰值,  $r_{\max(i)}$  为驻留点  $i$  处的去除率峰值,  $\omega_i$  为驻留点  $i$  处对应的修正系数。理论上在离子束流作用区域内非球面上各处的材料去除率变化各不相同,从而导致去除函数不再是对称高斯型;但是经过坐标转换后,工件陡度下降,在束流作用范围内(投影直径约为 40 mm)材料去除率的变化非常小,因此可以采用驻留点(对应去除函数峰值)处的材料变化率来计算整个去除函数的变化,忽略由曲率变化导致的材料去除率增幅,使去除函数仍然保持高斯型。再经过计算可以得到材料去除率修正矩阵。

然后修正去除函数 FWHM。离子束流投影到非球面上,其作用区域随面形的变化而变化,引起去除函数 FWHM 的变化,由于离子束去除函数在非球面上的作用区域尺寸较小,因此可以利用入射束流在驻留点处切平面上的投影尺寸来近似计算去除函数的 FWHM。如图 3 所示,入射离子束流为圆柱型,其正入射平面的去除函数为  $R_0$ , 在驻留点处的去除函数为  $R_1$ , 求得  $P_n$  点处分别沿  $x$ 、 $y$  方向上的斜率,得到其切平面,按照投影原理计算得到去除函数在  $x$ 、 $y$  方向上的 FWHM 修正系数,利用式(8)对 FWHM 进行修正。

$$h_a = h_t \cdot \cos \gamma, \quad (8)$$

其中:  $h_a$  为非球面去除函数的 FWHM,  $h_t$  为平面去除函数的 FWHM,  $\gamma$  为投影截面与参考平面的夹角。将材料去除率修正矩阵与半宽修正矩阵中的数据分别代入式(8),便能得到去除函数的修正矩阵,实现任意驻留点去除函数的修正。

由 CCOS 理论可知,光学加工中表面材料去除量  $E(x, y)$  等于去除函数  $R(x, y)$  与驻留时间函数  $D(x, y)$  沿加工路径的卷积,即:

$$E(x, y) = R(x, y) \otimes D(x, y). \quad (9)$$

其中预期材料去除量  $E(x, y)$  能够由干涉测量结果与目标面形得到,各驻留点的去除函数可以通过修正得到,由此解算出驻留时间分布  $D(x, y)$ ,再利用驻留时间分布生成加工文件指导工件的加工。

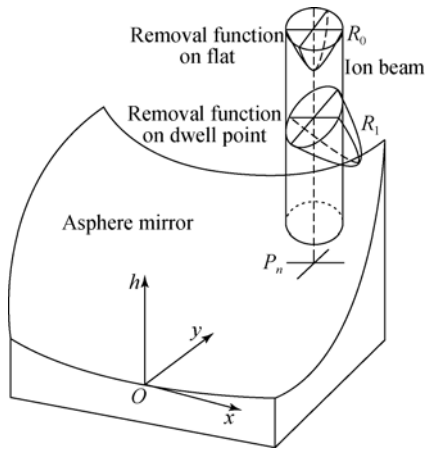


图 3 离子束抛光非球面去除函数修正示意图

Fig. 3 Illustration of correction of removal function of ion beam figuring asphere

### 3 高陡度离轴非球面抛光实验

非球面的一般表达式为:

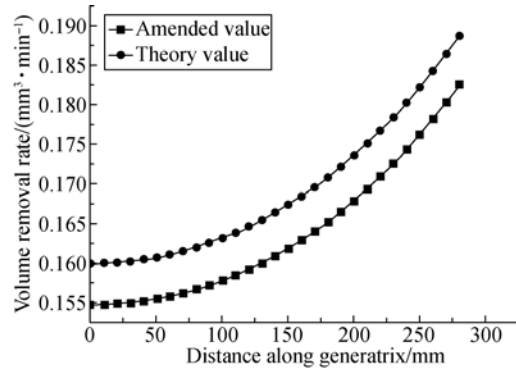
$$h = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} + A_1r^2 + A_2r^6 + A_3r^8 + \dots, \quad (10)$$

式中:  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $c = 1/R$ ,  $R$  为曲率半径,  $K$  为二次曲面常数;  $A_n$  为系数,  $n = 1, 2, 3, \dots$ 。选取某体育场形高陡度离轴非球面, 镜面材质为硅改性层, 口径为  $900 \text{ mm} \times 680 \text{ mm}$ , 离轴量为  $350 \text{ mm}$ ,  $K$  为  $0.25$ , 顶点曲率半径为  $1\,344.5 \text{ mm}$ ,  $A_1$  为  $-1.75^{-12}$ , 其他系数为零。

#### 3.1 去除函数修正误差分析

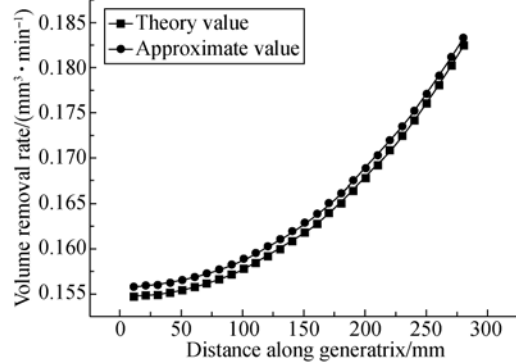
由于待加工离轴非球面镜口径大、陡度高、去除函数变化幅度大, 采用修正矩阵修正离子束抛光去除函数的过程中存在一定误差。该误差主要源自于修正矩阵计算过程中的近似计算。通过修正矩阵计算得到的去除函数在体积去除率、空间分布上与实际去除函数存在差别, 这会影响驻留时间计算的准确性, 进而影响到抛光结果。因此修正矩阵的计算误差对高陡度离轴非球面镜的抛光有很重要的影响。抛光高陡度离轴非球面的过程中, 坐标转换后利用修正矩阵修正沿母线方向上不同驻留点处的去除函数, 其体积去除率计算误差如图 4(a)、(b) 所示, 修正矩阵引入的修正误差随着陡度上升而增大。本实验中, 高陡度离轴非球面镜的去除函数体积去除率的计算误差小于  $1.5\%$ , 修正精度能够满足加工需求。去除函数的

空间分布如图 4(c) 所示, 这种变化能够近似看成引入了一个很小的定位误差。由于去除函数形状变化微小, 沿上述抛光曲面母线方向计算此近似误差, 其峰值对应的坐标偏差小于  $0.5 \text{ mm}$ , 能够满足大口径光学表面抛光加工的需求。因此, 采用修正矩阵修正去除函数在体积去除率与空间分布两个关键特征上误差微小, 能够满足抛光高陡度离轴非球面的工艺要求。



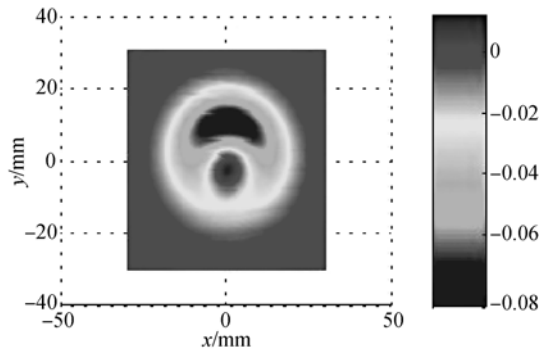
(a) 去除函数体积去除率比较

(a) Comparison of volume removal rate of removal function



(b) 计算误差

(b) Calculation error



(c) 去除函数分布差

(c) Difference distribution of removal function

图 4 去除函数体积去除率计算结果

Fig. 4 Illustration of volume removal rate of removal function

### 3.2 去除函数修正与仿真

首先对离轴非球面进行坐标转换,以降低陡度对加工的影响,经过坐标转换的离轴非球面陡度下降,使得抛光过程中的材料去除率、去除函数 FWHM 变化幅度较小,便于仿真计算与实际加工操作。

图 5 为坐标转换前后各驻留点处的材料去除率变化对比。由图可见,坐标变换前去除率最大处值为最小处的 210%,坐标转换后去除率最大处值为最小处的 140%,由此可见坐标转换有效降低了陡度对加工的影响。

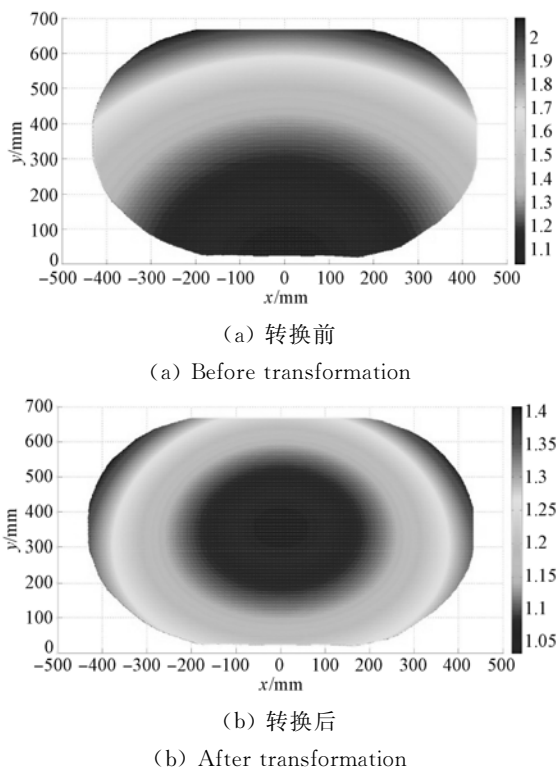


图 5 坐标转换前后各点材料去除率变化比较

Fig. 5 Comparison of material removal rates before and after coordinate transformations

抛光过程中,将选定的平面去除函数中的材料去除率峰值带入到修正矩阵中,得到每一个驻留点处去除函数的材料去除率峰值。图 6 为各驻留点处的去除函数 FWHM 分别在  $x, y$  方向上的修正系数。将选定的平面去除函数在  $x, y$  方向上的 FWHM 分别带入到修正矩阵中,得到每一个驻留点处的去除函数在  $x, y$  方向上的 FWHM,与前面计算得到的材料去除率峰值组合起来便能得到任意驻留点处的去除函数。

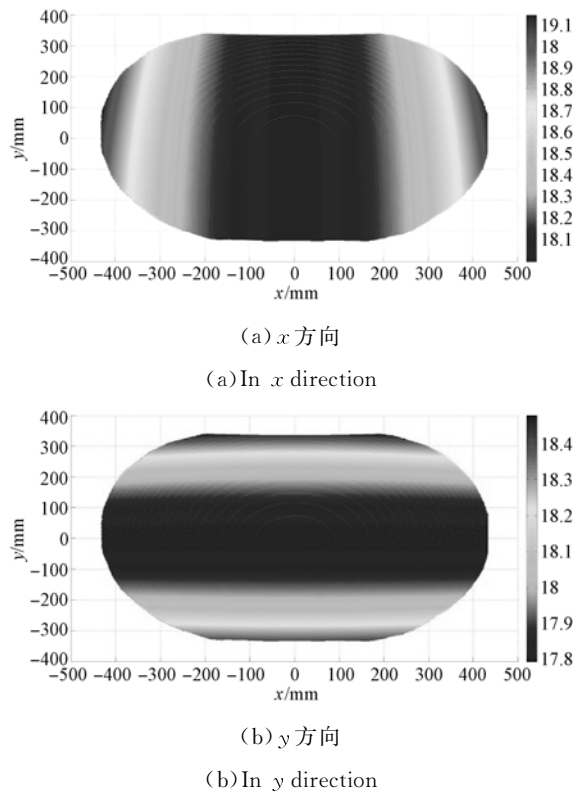
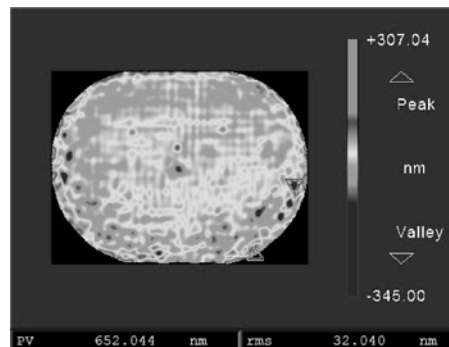


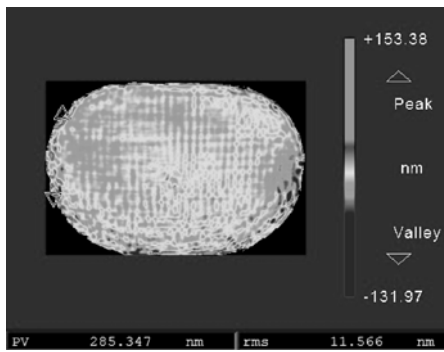
图 6 去除函数分别在  $x, y$  方向上的半宽

Fig. 6 FWHM values of removal function in  $x$  and  $y$  directions

实验中选择的离子源工作参数对应的正入射平面去除函数数据如下: $r_{\max}$  为 6.853 nm/s,  $\eta_x$  为 7.653,  $\eta_y$  为 7.600 mm。根据工件参数修正去除函数,得到实际加工需要的去除函数矩阵。根据 CCOS 原理,结合上述去除函数信息与面形残差数据解算出加工驻留时间分布,对工件进行抛光。经过 22 h 的抛光,镜面 PV 值达到 285.347 nm, RMS 值达到 11.566 nm,如图 7 所示。



(a) Before figuring



(b) 抛光后

(b) After figuring

图 7 离轴非球面加工检测结果

Fig. 7 Testing results of off-axis asphere figuring

结果表明,采用去除函数修正矩阵法解算驻留时间能够有效地补偿抛光高陡度非球面过程中去除函数的材料去除率与 FWHM 变化。与简单地按照非球面的最接近球面计算去除函数相比,该方法能够更准确地补偿每一个驻留点的去除函数变化,从而提升抛光效率和收敛率。而若不修正去除函数会导致驻留时间存在较大误差,从而在抛光结果中引入新的加工残差,影响抛光的准确性与收敛效率。

## 4 结 论

本文针对三轴离子束系统抛光大口径高陡度

离轴非球面过程中镜面曲率变化对离子束抛光去除函数的影响进行了研究,提出了利用去除函数修正矩阵修正离子束抛光去除函数的方法,进而优化了高陡度离轴非球面的抛光过程。首先通过坐标转换降低工件陡度,减小陡度变化对去除函数的影响;其次以离子束抛光材料去除理论为基础,分别修正不同驻留点材料的去除率与去除函数 FWHM,在驻留点矩阵的基础上求得去除函数的修正矩阵,从而得到每个驻留点处的去除函数,建立针对待加工非球面的去除函数矩阵;最后利用修正后的去除函数数据对待加工工件进行仿真加工,并解算出驻留时间分布以指导实际抛光。抛光实验结果表明,经过 22 h 的离子束抛光,大口径高陡度离轴非球面镜的面形 PV 值由 652.044 nm 提高到 285.347 nm、RMS 值由 32.041 nm 提高到 11.566 nm,收敛率达到 2.77,能够满足高精度的光学加工要求。

在离子束抛光大口径高陡度离轴非球面的过程中,需要修正不同驻留点的去除函数变化。对于高陡度离轴非球面镜,去除函数的修正误差小于 1.5%,本文提出的方法较好地修正了去除函数的变化,并且大幅提升了高陡度离轴非球面精抛光阶段的加工效率与精度。

## 参考文献:

- [1] 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)
- [2] DEMMLER M, ZEUNER M, LUCA A, et al.. Ion beam figuring of silicon aspheres [J]. *SPIE*, 2011, 7934: 793416-793416-6.
- [3] 戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 离子束修形技术 [J]. 应用光学, 2011, 32(4): 753.  
DAI Y F, ZHOU L, XIE X H, et al.. Ion beam figuring technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 753. (in Chinese)
- [4] WILSON S R, REICHER D W, MCNEIL J R. Surface figuring using neutral ion beams [C]. *32nd Annual Technical Symposium, International Society for Optics and Photonics*, 1989: 74-81.
- [5] WILSON S R, MCNEIL J R. Neutral ion beam figuring of large optical surfaces [C]. *31st Annual Technical Symposium, International Society for Optics and Photonics*, 1987: 320-324.
- [6] HAENSEL T, NICKEL A, SCHINDLER A. Ion beam figuring of strongly curved surfaces with a  $(x, y, z)$  linear three-axes system [C]. *Optical Fabrication and Testing, Optical Society of America*, 2008, 10(19): JWD6.
- [7] DAI Y, LIAO W, ZHOU L, et al.. Ion beam figuring of high-slope surfaces based on figure error compensation algorithm [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(34): 6630-6636.
- [8] SIGMUND P. *Elements of Sputtering Theory* [M]. Pan Stanford Publishing, 2009: 5-7.
- [9] BRADLEY R M, HARPER J M E. *Theory of ripple*

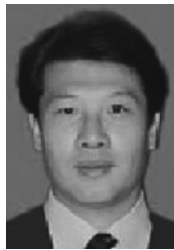
- topography induced by ion bombardment [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1988, 6(4): 2390-2395.
- [10] 焦长君, 李圣怡, 王登峰, 等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1250-1256.  
JIAO CH J, LI SH Y, WANG D F, *et al.*. Material removal property in ion figuring process for optical components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1250-1256. (in Chinese)
- [11] 李锐钢, 郑立功, 张峰, 等. 大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 633-639.  
LI R G, ZHENG L G, ZHANG F, *et al.*. Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 633-639. (in Chinese)
- [12] 廖文林, 戴一帆, 周林. 离子束抛光加工矩形离轴非球面镜[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 23(1): 100-104.  
LIAO W L, DAI Y F, ZHOU L. Ion beam figuring for rectangular off axis aspheric mirror [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 23(1): 100-104. (in Chinese)
- [13] LIAO W L, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. Mathematical modeling and application of removal functions during deterministic ion beam figuring of optical surfaces. Part 1: Mathematical modeling [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19): 4266-4274.
- [14] 周林, 戴一帆, 解旭辉, 等. 光学镜面离子束加工的可达性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 160-166.  
ZHOU L, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. Machining reachability in ion beam figuring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 160-166. (in Chinese)

## 作者简介:



唐 瓦(1988—),男,吉林镇赉人,博士研究生,主要从事光学超精密加工和检测的研究。E-mail: tangwtang@126.com

## 导师简介:



张学军(1968—),男,博士,研究员,主要研究方向为大口径非球面加工与检测、新型空间反射镜制造、空间相机总体设计等。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

## 通讯作者:



邓伟杰(1983—),男,安徽安庆人,博士,主要从事光学表面数控成型及检测等方面的研究。E-mail: mr-deng@163.com

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)