

文章编号: 1001 - 2486(2011)01 - 0100 - 05

离子束抛光加工矩形离轴非球面镜*

廖文林, 戴一帆, 周林, 王建敏, 袁征, 解旭辉
(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 采用一种简单的方法使用线性三轴离子束系统实现了矩形离轴非球面镜的抛光加工。根据离子束材料去除机理, 分析了去除函数的法向材料去除特性, 并且以去除函数束径、峰值去除速率和体积去除速率为指标, 评价了入射角的小扰动鲁棒性。利用相关的分析和实验结果, 对矩形离轴镜的抛光加工进行了合理的简化, 并在自行研制的离子束抛光机床上进行了修形试验, 经过多次迭代加工后, 总计用时 584min, 其面形精度均方根误差 RMS 由初始的 0.295λ , 提高到 0.046λ , 收敛率达到了 6.4。实验结果表明, 利用离子束抛光独特的材料去除特性, 能够有效地改善面形精度, 可以对非球面镜进行高效高精度修形。

关键词: 离子束抛光; 离轴非球面; 去除函数; 材料去除特性

中图分类号: TG171.68 文献标识码: A

Ion Beam Figuring for Rectangular Off-axis Aspheric Mirrors

LIAO Wen-lin, DAI Yi-fan, ZHOU Lin, WANG Jian-min, YUAN Zheng, XIE Xu-hui

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A simple method of ion beam figuring was successfully employed for processing rectangular off-axis aspheric mirror. Based on the material removal mechanism, the normal removal characteristic was analyzed. Beam diameter, peak removal rate and volume removal rate are the three factors to evaluate the robustness of removal function with respect to little disturbance of incidence angle. According to the results of analyses and experiments, the method of processing rectangular off-axis aspheric mirror by ion beam figuring was appropriately simplified. To validate the feasibility of this method, an off-axis aspheric ellipsoidal mirror was processed in our IBF system. With three iterations of 200 minutes, the surface error was reduced from 0.294λ RMS to 0.05λ RMS and the total convergence ratio was 10. The experimental results indicate that IBF has inimitable material removal characteristics, can effectively improve surface precision and realize the rapid processing of ultra-precision rectangular off-axis aspheric mirror.

Key words: ion beam figuring; off-axis asphere mirror; removal function; material removal characteristics

光学设计中采用非球面元件可以减小系统中元件的数量, 进而减轻其重量、减小其体积, 同时可以降低系统复杂程度, 并提高光学系统的性能^[1]。20世纪90年代提出的离轴三反消像散型结构是同时实现对地遥感器大视场、高分辨率和较小的质量、体积的一种有效形式^[2], 但是离轴非球面的特殊几何形状, 使得传统的范成法已经很难满足高精度的加工要求^[1]。

离子束抛光是一种光学镜面高确定性加工的新技术, 使用稳定的加速粒子束轰击光学元件, 对材料表面实现原子尺度的选择性去除, 利用 CCOS 成型原理对面形误差进行修正^[3-6], 非接触加工

方式克服了传统抛光方法的边缘效应、刀具磨损和预压力^[3-4,7]。因此, 将离子束抛光技术引入离轴非球面镜的加工, 可以实现其高精度和高效率的加工要求。

本文以离子束的材料去除机理为基础, 首先分析了去除函数的法向材料去除特性, 在束电压和束电流等工艺参数恒定的条件下, 采用实验手段对入射角小扰动鲁棒性进行了分析; 其次利用上述特性, 采用坐标变换减小加工过程中入射角的变化, 对离轴非球面镜进行了近似平面化的加工; 最后使用线性三轴系统对离轴非球面镜进行了初步修形实验, 验证了该方法的可行性。

* 收稿日期: 2010 - 08 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775215, 50975281)

作者简介: 廖文林(1984—), 男, 博士生。

1 材料去除特性分析

1.1 法向材料去除特性

离子束抛光方法利用离子溅射效应对材料进行去除, Sigmund 溅射理论指出, 入射离子在工件表面沉积的能量呈高斯分布^[8], Bradley 和 Harper 在此基础上推导出了任意曲面在离子束倾斜入射轰击下的去除速率, 可以知道离子束是沿曲面法向方向去除材料^[9], 这与传统抛光和其他确定性抛光技术有很大的差别。

如图 1 所示, 磨料水射流抛光利用射流束喷射镜面, 射流冲击工件表面时发生塑性去除, 对其表面进行抛光。碰撞后的磨料颗粒在冲击压力及水平方向速度的作用下对工件材料产生剪切应力, 当剪切应力足够大时, 会将工件材料直接剪切去除, 从而达到抛光的目的。当垂直入射时, 抛光区域呈规则的圆环状分布, 但是当以一定角度入射时, 去除函数则变成了月牙形^[10]。这说明径向剪切应力是射流抛光中材料去除的最主要原因, 当倾斜入射时水射流主要是沿射流入射方向去除材料。

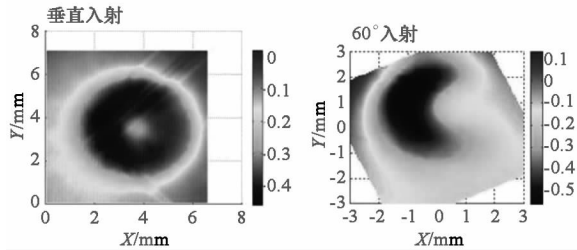


图 1 水射流抛光的去除函数

Fig.1 The removal function of abrasive jet polishing

但是, 离子束抛光方法利用离子溅射效应对材料进行去除, 其抛光机理与水射流及其他抛光方式不同。如图 2 所示, 垂直入射时的去除函数呈回转对称的高斯形状, 当入射角为 60°时, 其抛光区域变成了椭圆形。通过理论分析和相关的实验验证, 可以得到当高斯分布的离子束以倾斜角 θ 入射到工件表面时(如图 3), 其去除函数模型可以表示为^[9]:

$$R(\theta, x, y) = R_{\theta} \exp\left(-\frac{(x \cos \theta)^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, (x, y, z) 是分别以入射点的法向和切向方向为 x 和 y 建立的坐标系; $R(\theta, x, y)$ 是入射角为 θ 时的去除函数; R_{θ} 为峰值去除速率; $d = 6\sigma$ 为去除函数的束径参数。

从式(1)中可以知道, 离子束是沿曲面法向方

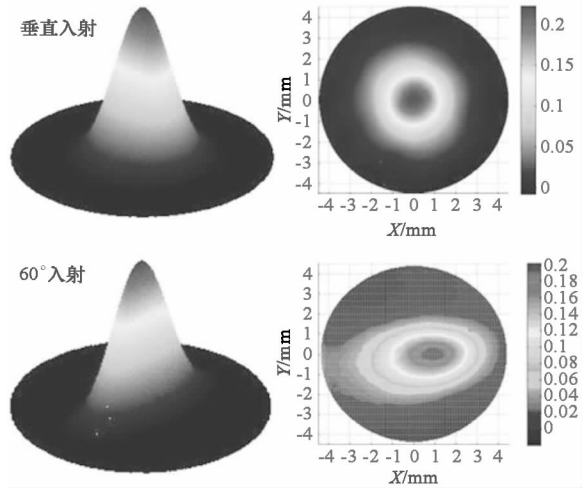


图 2 离子束抛光的去除函数

Fig.2 The removal function of IBF

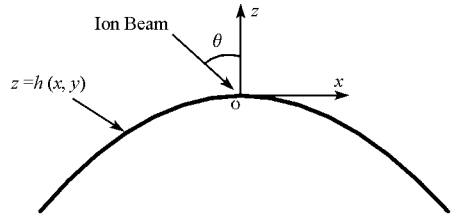


图 3 离子以入射角 θ 轰击工件表面

Fig.3 Ions striking a surface of workpiece at the incidence angle θ

向去除材料, 那么, 在特定的加工条件下, 当离子束倾斜入射镜面时, 也能有效地去除作用区域内的误差, 而不是去除作用点处误差的一个分量。

1.2 去除函数的小角度鲁棒性

离子束抛光加工过程中, 为了确保去除函数的稳定性, 一般都是将离子源的工艺参数设为恒定值, 如束电压和束电流等, 然而, 去除函数还会受到入射角的影响。为了评价去除函数对入射角的鲁棒性, 分别以去除函数束径、峰值去除速率和体积去除速率为指标, 对去除函数进行了实验研究。

实验以熔石英为研究对象, 分别以 $0^\circ, 2^\circ \sim 10^\circ$ 为入射角对镜面进行定点轰击, 采用 ZYGO 干涉仪得到轰击前后的面形, 通过面形做差获得去除函数, 实验结果如表 1 和图 4 所示。在入射角偏差在 10° 范围内, 去除函数束径、峰值去除速率和体积去除速率的相对变化量都不超过 9%, 去除函数具有良好的小角度鲁棒性。然而, 当入射角达到 20° 和 30° 时, 各项指标与垂直入射时相比, 其差别比较大。那么在抛光非平面镜时利用以上特性, 特别是对某些矩形离轴非球面镜的加工, 可以简化其抛光方式和相关的加工路线。

表 1 不同入射角的去除函数实验结果

Tab.1 The experimental results of removal function at different incidence angles (from 0°, 2° to 10°)

入射角	0°	2°	4°	6°	8°	10°	(最大误差)	20°	(误差)	30°	(误差)
$d_{6\sigma}$ (mm)	x 21.5	21.6	21.7	21.6	21.8	22.1	(2.8%)	23.4	(8.8%)	25.2	(17.2%)
	y 21.5	21.6	21.7	21.5	21.6	21.8	(2.4%)	22.0	(2.3%)	21.8	(1.4%)
R_{θ} ($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.182	0.183	0.183	0.184	0.186	0.188	(3.3%)	0.223	(22.5%)	0.275	(51.1%)
V_{θ} ($\times 10^3 \text{mm}^3/\text{min}$)	14.2	14.5	14.8	14.9	15.1	15.2	(8.3%)	18.7%	(47.2%)	25.3	(78%)

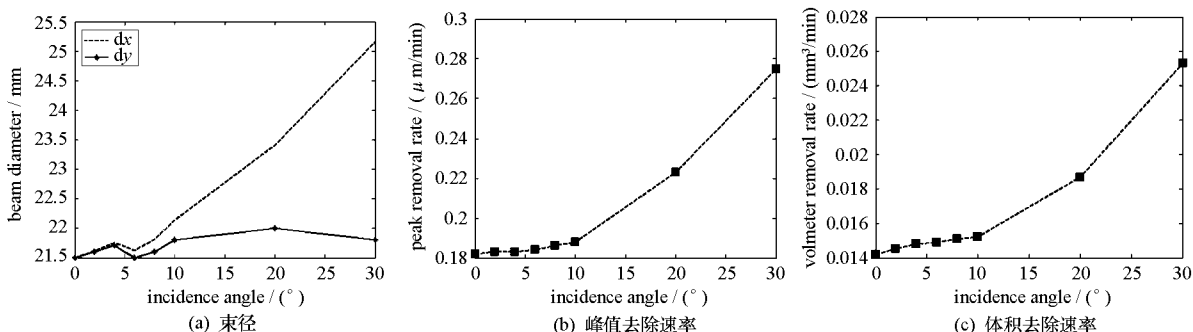


图 4 去除函数参数随入射角的变化规律

Fig.4 The parameters of removal function vary with various incidence angles

2 离轴镜加工分析

由于离轴镜面在离轴方向的曲面变化较明显,并且各点法线与光轴的夹角较大,对于传统的抛光方法而言,“小磨头”在加工过程中的位姿需要进行复杂的调节。但是,对于离轴量大而垂直于离轴方向尺寸较小的矩形非球面镜而言,使用离子束抛光技术,可以采用近似平面的方式进行加工。

2.1 坐标变换减小加工入射角

对于高陡度离轴非球面的确定性加工,为了降低加工难度,可以利用坐标变换把工件摆平,从而降低矢高变化率,即对镜面曲面坐标进行平移和旋转变换,如图 5 所示。下面以椭球非球面镜为例进行分析。

以母椭球体中心为坐标原点的椭球面方程为:

$$\frac{z^2}{a^2} + \frac{x^2 + y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

图 5 中 O' 为离轴非球面镜的几何中心, l 为 O' 点处的切线, S 为离轴量。通过椭球面方程,可以很容易地得到 O' 在 (x, y, z) 中的坐标值 $(s, 0, d)$ 。为了尽可能地减小各点法线与 z' 轴的夹角,坐标变换后直线切线 l 应该变换到水平位置。原坐标系中各点在新坐标系中的坐标可以用以下矩阵变换得到:

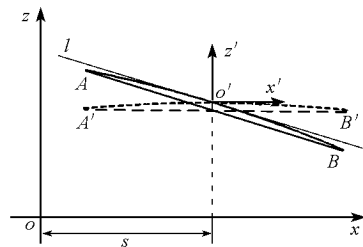


图 5 离轴非球面镜的坐标变换

Fig.5 The coordinate transform of off-axis aspheric mirror

$$(x', y', z', 1) = (x, y, z, 1) PT = (x, y, z, 1) * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a & 0 & -d & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将椭球面方程(2)代入坐标变换方程(3)可以得到:

$$\frac{(x \sin\phi + z \cos\phi + a\sqrt{1 - \frac{s^2}{b^2}})^2}{a^2} + \frac{x^2 + (x \cos\phi - z \sin\phi + s)^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

则:

$$z = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4CE}}{2C}$$

其中: ϕ 为 l 与 x 轴的夹角;

$$A = x \sin \phi + a \sqrt{1 - \frac{s^2}{b^2}}$$

$$B = x \cos \phi + s$$

$$C = b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi$$

$$D = 2Ab^2 \cos \phi - 2Ba^2 \sin \phi$$

$$E = A^2 b^2 + a^2 B^2 - a^2 b^2 + a^2 y^2$$

2.2 加工分析

待加工的零件为离轴椭球面镜,其有效口径为 125mm × 200mm,离轴量为 200mm,顶点曲率半径 $R_0 = 658.47\text{mm}$,偏心率 $K = -0.8345$ 。由式(2)和式(4)可以得到坐标变换前后,最大入射角分别为 23.4° 和 9.9° ,坐标变换中的角度 ϕ 为 17° 。

CCOS 原理指出,假设加工过程中去除函数不随时间和空间变化,加工过程中的材料去除量 $E(x, y)$ 等于驻留时间 $T(x, y)$ 与去除函数 $R(x, y)$ 的二维卷积^[4-5],即:

$$E(x, y) = R(x, y) \otimes \otimes T(x, y) \quad (5)$$

利用反卷积算法求解上式获得驻留时间,需要确保每次加工前干涉测量得到的面形误差能够真实反映镜面误差,也就是说,若待加工面为平面镜时,可以利用式(5)直接进行求解,但是对于非平面镜而言,由于 $E(x, y)$ 中未能反映位置 z 的信息,不能精确求解驻留时间。然而,离子束具有

法向的材料去除特性,通过坐标变换后加工过程中的入射角变化较小,由小角度鲁棒性的分析可以知道,在此范围去除函数具有较好的保形性,该离轴椭球面镜可以近似平面镜加工,线性三轴 (x, y, z) 系统便可满足要求,如图 6 所示。

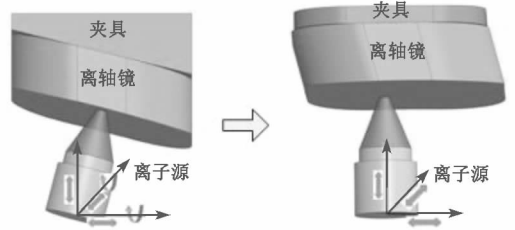
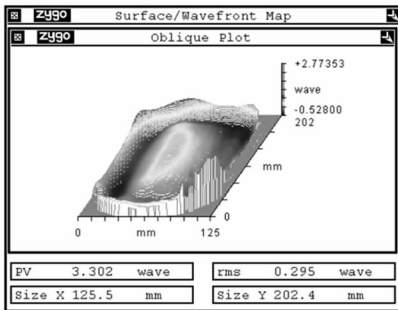


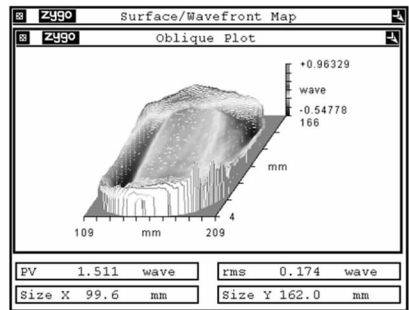
图 6 变换前后的两种加工方式
Fig.6 The coordinate transformation and processing method

3 修形实验

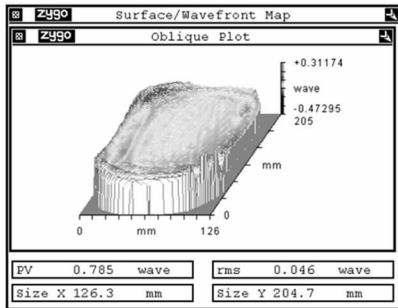
由于使用补偿器对非球面镜进行干涉测量的过程中存在投影畸变,需要对面形误差进行标定和面形重构,可参考文献[11]。在镜面加工过程中,使用三轴离子束抛光系统进行加工,那么需要根据坐标变换,使用标定和重构后的面形求解工件坐标系中任意点 (x, y) 的误差。由于离子束是沿曲面法向方向去除误差高点的,所以在坐标变换过程中,只需要考虑镜面各点坐标值 (x, y, z) 的变换,而对应的误差值 Δ 是不需要变换的。



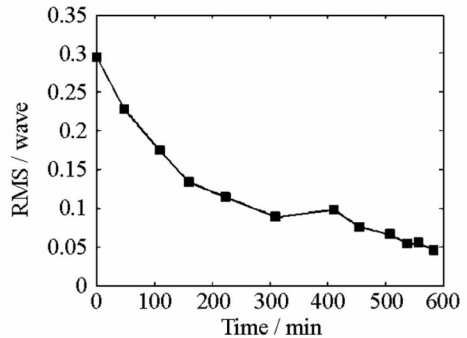
(a) 初始面形



(b) 第二次加工后的面形



(c) 第十一次加工后的面形



(d) 加工过程收敛曲线

图 7 矩形离轴椭球面镜修形结果和收敛过程

Fig.7 The correcting results of rectangular off-axis ellipsoidal mirror and convergence process

镜面的初始面形误差 RMS 为 0.295λ ,如图 7

(a)所示,离轴镜的边缘和中间区域有明显凸起,

并且在右下角有一区域误差梯度太大,干涉测量中有数据缺失。由于镜面口径较大,初始面形误差高点明显,需要的材料去除量较大,实验过程采用的去除函数的束径为 21mm,峰值去除速率为 $0.18\mu\text{m}/\text{min}$ 。前两次加工的目的主要用于对刀,以防止对刀误差造成低谷深度增大,不能有效去除误差高点。如图 7(b)所示,经过两次加工迭代后,RMS 收敛到 0.174λ ,PV 值变化明显,收敛到 1.51λ ,用时只有 110min,RMS 收敛效率达到 1.69,并且全口径的数据可见。对于加工复杂的曲面来说,离子束能够高效地扩充数据点,具有较高的可控性和确定性。

镜面一共进行了 11 次加工,后 5 次为精修过程,加工后边缘高点变得平滑,中间区域也得到了改善,耗时 173min,全口径的 RMS 收敛到 0.046λ ,如图 7(c)所示,RMS 达到了 $\lambda/20$ 的面形精度要求。离轴镜加工总共耗时 584min,总的加工收敛率达到 6.4,其收敛过程如图 7(d)所示。对比初始面形和最终的加工结果,可以知道该方法对矩形非球面离轴镜具有很好的加工效果,同时说明离子束加工不仅没有产生边缘效应,而且能够对边缘进行有效的修形。

4 结论

通过材料去除机理和实验研究表明,离子束抛光具有法向材料去除特性和小角度扰动鲁棒性。利用离子束抛光技术的材料去除特性,对离轴非球镜的近似平面化加工方法进行了分析。利用线性三轴系统实现了复杂曲面的高精度和高效加工,验证了近似平面化加工方法能够有效地改

善矩形离轴非球面镜的面形精度,延伸了三轴系统的加工能力。同时表明离子束加工不仅没有产生边缘效应,而且能够对边缘进行有效的修形。

参考文献:

- [1] 郑立功,张学军,张峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 113 - 117.
- [2] Paul M. Compact Three-mirror Anastigmat with Reflective Lens [J]. SPIE, 1998, 3482: 282 - 293.
- [3] Jiao C J, Li S Y, Xie X H. Algorithm for ion Beam Figuring of Low-gradient Mirrors [J]. Applied Optics, 2009, 48 (21): 4090 - 4096.
- [4] Drueding T W, Bifano T G, Fawcett S C, Contouring Algorithm for Ion Figuring [J]. Precision Engineering, 1995, 17: 10 - 21.
- [5] Allen L N, Romig H W. Demonstration of an Ion Figuring Process [J]. SPIE, 1990, 1333: 22 - 33.
- [6] 解旭辉,谷文华,周林. 应用细小离子束加工小型精密光学零件[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 10 - 14.
- [7] 戴一帆,周林,解旭辉,等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131 - 1135.
- [8] Sigmund P. A Mechanism of Surface Micro-roughening by Ion Bombardment [J]. Journal of Material Science, 1973, 8: 1545 - 1553.
- [9] Dai Y F, Liao W L, Chen S Y, et al. Theoretical Analysis and Experimental Study of Material of Material Removal Characteristics in Ion Beam Figuring Process [C]//Proc. of SPIE, 2010, 7655: 76550X - 1 - 6.
- [10] 李兆泽,李圣怡,戴一帆,等. 磨料射流抛光中各工艺参数对材料去除率及抛光区域形貌影响[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2532 - 2535.
- [11] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等. 大口径高次、离轴非球面镜干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学精密工程, 2006, 4(14): 533 - 538.