

离轴抛物面镜离子束抛光工艺研究

孙国斌, 蒋世磊, 张余豪, 张锦*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对离轴抛物面镜离子束修形过程中存在的热效应累积和迭代加工效率问题, 提出了将总去除量按一定比例划分的分批次加工与变束径加工相结合的方法, 并采用该方法进行工艺实验探索。对口径为 110 mm、曲率半径为 1732.7 mm、初始面形峰谷值(PV)为 0.525λ ($\lambda=632.8$ nm), 均方根(RMS)值为 0.025λ 的球面镜进行分批次变束径离子束抛光实验, 最终加工得到顶点曲率半径为 1728 mm、离轴量为 85 mm、PV 为 0.36λ 、RMS 值 0.029λ 的离轴抛物面镜。对实验过程及结果进行分析, 证明分批次加工方法有效消除了离子束加工过程中的热效应, 通过变束径局部精修加工的方法可以减少迭代加工次数, 提升加工效率。

关键词 光学设计; 离子束抛光; 离轴抛物面镜; 热效应; 变束径

中图分类号 TH161+.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0922003

Ion Beam Polishing Process of Off-Axis Parabolic Mirror

Sun Guobin, Jiang Shilei, Zhang Yuhao, Zhang Jin*

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Aiming at the problems of thermal effect accumulation and iterative processing efficiency in the process of off-axis parabolic mirror ion beam modification, a method is proposed to combine batch machining with variable beam diameter machining, which divided the total removal amount according to a certain proportion, and the experimental exploration is carried out by using this method. The spherical mirrors with an aperture of 110 mm, a radius of curvature of 1732.7 mm, an initial surface peak-valley value (PV) of 0.525λ ($\lambda=632.8$ nm) and a root mean square (RMS) value of 0.025λ are polished in batches. The off-axis parabolic mirrors with vertex radius of curvature of 1728 mm, off-axis of 85 mm, PV of 0.36λ and RMS of 0.029λ are obtained. Based on the analysis of the experimental process and results, it is proved that the batch machining method can effectively eliminate the thermal effect in the ion beam machining process, and the local finishing method with variable beam diameter can reduce the number of iterative machining and improve the machining efficiency.

Key words optical design; ion beam polishing; off-axis parabolic mirror; thermal effects; variable beam diameter

1 引言

离轴抛物面镜是光学仪器中常用的光学元件, 在离轴反射式平行光管、离轴双/三反系统中均得到了广泛的应用。离子束抛光技术是一种高精度、确定性的修形技术, 采用稳定的非接触式离子束代替接触式抛光垫, 可以有效避免接触式抛光过程中抛光垫与加工元件所产生的亚表层损伤, 可以有效解

决抛光垫与加工元件在边缘接触不足所造成的边缘去除不足, 以及抛光垫磨损所造成的去除不确定性等问题, 为此非接触式的离子束抛光技术具有更高的面形抛光修形精度。但是在离子束修形过程中通常需要多次迭代加工来提高待加工元件的面形精度, 因此离子束抛光技术具有较高的面形加工精度, 但加工效率较低^[1]。

2016年, 长春光学精密机械与物理研究所的唐

收稿日期: 2021-10-26; 修回日期: 2021-11-19; 录用日期: 2021-11-29

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(18JS053)

通信作者: *zhangjin@xatu.edu.cn

瓦^[2]在离子束抛光大口径非球面去除模型与工艺方面进行了大量的研究工作,建立并完善了离子束抛光大口径非球面的工艺操作流程,并完成了多项大口径离轴非球面反射镜的高精度抛光工作,其中包括 $\Phi 1450$ mm 硅改性层离轴非球面的抛光,经过 30 h 的加工,面形误差的均方根 (RMS) 值由 50.912 nm 达到 8.785 nm。2017 年,长春光学精密机械与物理研究所的尹小林^[3]对空间复杂光学曲面离子束修形设备和工艺进行了大量的研究工作,提出一种小磨头和离子束组合加工的策略,该策略可以有效减少中高频误差的引入,并在提高离子束最终加工精度的同时缩短了整个光学元件的加工周期。尹小林^[3]对口径为 100 mm 的高陡度融石英球面反射镜进行了离子束修形实验,最终光学元件的面形 RMS 值由初始的 0.032λ 收敛至 0.014λ ($\lambda = 632.8$ nm),收敛比达到 2.3,说明所提的加工策略具有较高的面形加工精度。2018 年,成都精密光学工程研究中心的李智钢等^[4]提出了一种由计算机控制的多磨头组合抛光技术,该技术可实现对非球面元件中频误差 (PSD1) 的有效控制,最终 $\Phi 460$ mm 离轴抛物面元件的面形 PSD1 值相比之前降低了近 70%,达到 2.835 nm,峰谷值 (PV) 达到 0.16λ ,RMS 值达到 0.02λ 。

本文对基于离轴抛物面镜的离子束抛光工艺进行研究,工艺实验均在本课题组自主独立开发的离子束抛光机上进行。本文针对离子束加工过程中热效应影响离子束修形精度的问题,对总加工时间进行一定比例的分配以分批次加工,用来消除热效应的影响;针对离子束抛光面形收敛效率低的问题,提出基于离子束的变束径加工方式,即分别采用原始口径加工、小束径加工、小束径局部高点加工的分阶段加工方式。

2 最接近球面求解

目前,科研人员一般都是寻找一个匹配的球面来加工离轴抛物面镜。为了表征非球面元件的加工难易程度,提出了非球面度的概念,即球面与非球面的偏差值。若非球面度越大,则非球面元件的加工难度越大,耗时与成本也就越高^[5-8]。本文利用转换坐标系的方式将离轴抛物面镜所在的坐标系与加工坐标系建立关系,即原始坐标系经过坐标平移和旋转后得到以离轴抛物面镜中心为原点的新坐标系,横轴为新原点坐标系在离轴抛物面的切线,纵轴为新原点坐标系在离轴抛物面的垂线^[9],坐标转换示意图如图 1 所示,其中 P 为离轴抛物面镜的中心点, φ 为离轴抛物面镜的法线与对称轴之间的夹角。

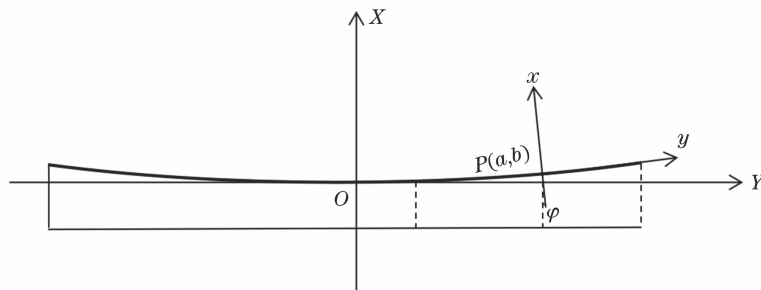


图 1 离轴抛物面镜的坐标变换示意图

Fig. 1 Schematic of coordinate transformation of off-axis parabolic mirror

原始抛物线的方程为

$$y^2 + z^2 = 2Rx, \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为原始坐标; R 为抛物面的顶点曲率半径。平移变换的转换关系可表示为

$$\begin{cases} x = x' + a \\ y = y' + b \\ z = z' \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (x', y', z') 为变换坐标; (a, b) 为点 P 的横纵坐标。

旋转变换的转换关系可表示为

$$\begin{cases} x = x' \cos \varphi - y' \sin \varphi \\ y = x' \sin \varphi - y' \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),整理可得

$$x^2 + \sin^2 \varphi + 2x(b \sin \varphi - R \cos \varphi + y \sin \varphi \cos \varphi) + [y^2 \cos^2 \varphi + 2y(b \cos \varphi + R \sin \varphi)] + z^2 = 0. \quad (4)$$

由式(4)可得离轴抛物面镜的各点横坐标。以离轴抛物面的计算公式为准,根据图 2 的搜索算法流程进行搜寻并优化,可以得到最接近球面和材料的修切量,同时根据所求非球面的不同来改变圆锥系数及添加高次项,此时搜索算法更具有普适性。

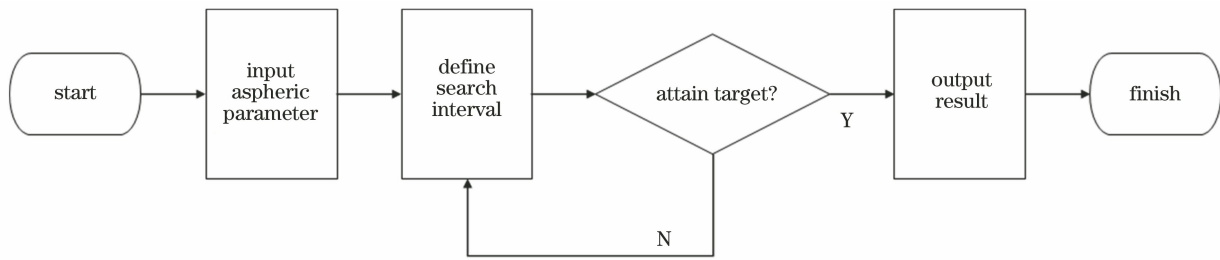


图 2 最接近球面的搜索算法流程图

Fig. 2 Flowchart of search algorithm closest to sphere

经过计算,得到口径 D 为 110 mm、曲率半径 R 为 1728 mm、离轴量 h 为 85 mm 的离轴抛物面镜。仿真结果如图 3 所示,其中图 3(a)为离轴抛物面的三维矢高仿真图,图 3(b)为最接近球面的三维矢高仿真图,图 3(c)为球面转离轴抛物面的修切量仿真

图,图 3(d)为非球面度曲线。经过求解,得到最接近球面的曲率半径为 1732.7 mm,最大非球面度为 $2.3 \mu\text{m}$,即边缘最大去除厚度为 $2.3 \mu\text{m}$,体积总去除量为 5.32 mm^3 。初始球面镜如图 4 所示。

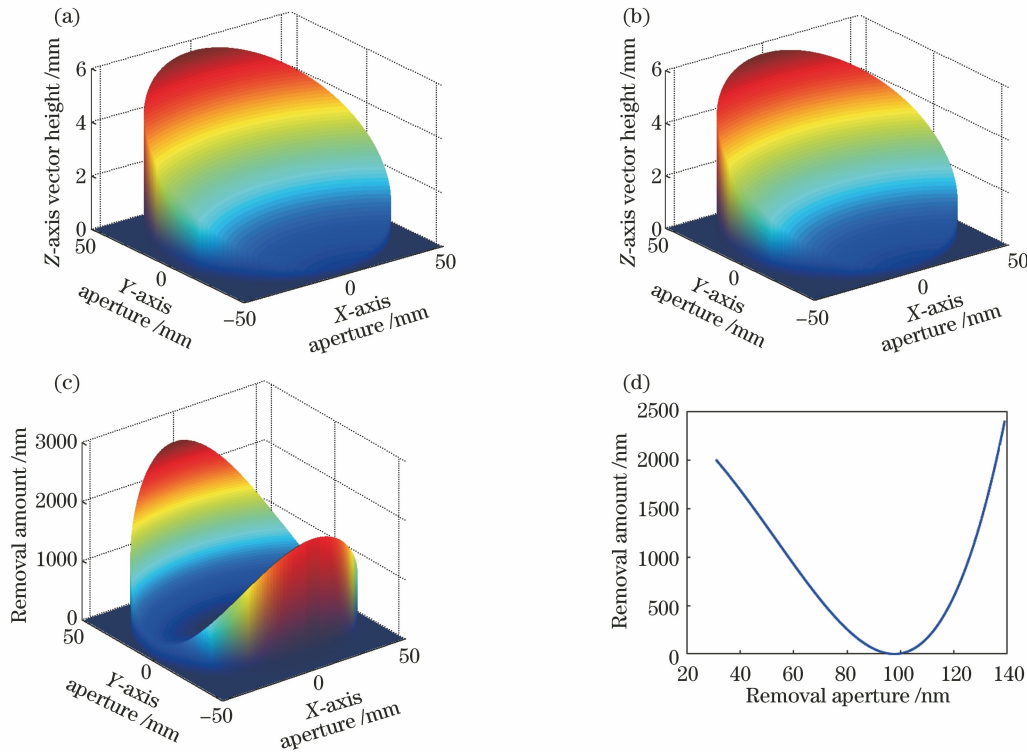


图 3 离轴抛物面镜的三维仿真结果。(a)离轴抛物面的矢高;(b)最接近球面的矢高;
(c)球面转离轴抛物面的修切量;(d)非球面度曲线

Fig. 3 Three-dimensional simulation results of off-axis parabolic mirror. (a) Vector height of off-axis paraboloid; (b) vector height of best fitting sphere; (c) removal amount of sphere turning off-axis paraboloid; (d) asphericity curve

3 离子束抛光过程中抑制热效应工艺探索实验

在离子束加工过程中,高速离子撞击光学元件表面后会与表面的原子发生能量转移,入射离子的大部分能量被转化成热能,这会导致光学表面加工部位的温度迅速升高。加工部位的驻留时间过长或者叠加时间过长均会导致其局部升温过快,造成加

工部位的去除速率呈非线性变化,这会影响离子束面形加工的精度和可靠性。因此,在离子束加工工艺中必须采取有效措施来抑制这种热效应,从而保证离子束的确定性和加工的可靠性。

根据离子源稳定工作的工艺参数(表 1),在 $\Phi 50 \text{ mm}$ 的 K9 光学平面元件上进行线扫实验。实验过程中增大叠加间距,可以使离子束在光学元件



图 4 初始球面镜

Fig. 4 Initial spherical mirror

上加工出一条类似单点刻蚀实验的效果。K9 光学元件的面形相减图如图 5 所示, MATLAB 软件的读取结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 离子束在元件上刻蚀的深度从左到右呈现出逐步递增的趋势, 其中最左侧点的叠加去除速率为 1176 nm/min, 最右侧点的叠加去除速率为 1263 nm/min。实验初期元件的加工温度还没有达到平衡点, 所以出现前期去除速率较低的现象, 随着加工时间的增加直至

加工中后期, 去除速率逐渐增加。若是采用前期加工的去除速率来计算驻留时间, 则会出现因去除速率较低而导致实验后期加工出现过去除的现象; 若采用后期加工的去除速率来计算驻留时间, 则会造成前期的去除速率较实际偏大, 从而出现前期欠去除的现象。综上所述, 上述现象在处理因加工去除量较大而驻留时间较长的光学元件时更严重。

表 1 离子源稳定工作的工艺参数

Table 1 Process parameters for stable operation of ion source

| Parameter | Value |
|--|-------|
| Background vacuum / (10^{-3} Pa) | 5.3 |
| Operating vacuum / (10^{-2} Pa) | 4.2 |
| Radio frequency power / W | 200 |
| Screen grid voltage / kV | 0.9 |
| Accelerator grid voltage / V | 100 |
| Duty cycle / % | 90 |
| Gas flow / ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) | 50 |
| Working distance / mm | 95 |

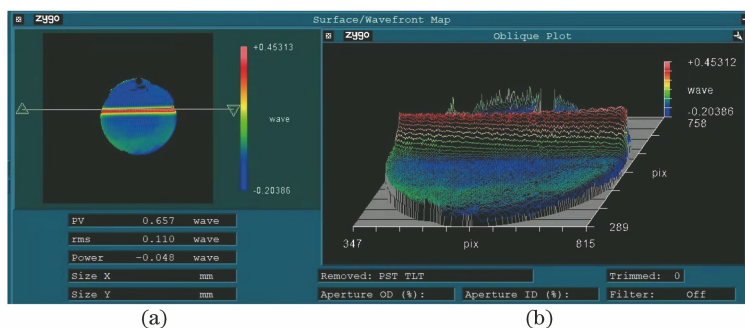


图 5 线扫加工后的面形相减图。(a)二维图;(b)三维图

Fig. 5 Surface shape subtraction diagram after line scanning processing. (a) 2D diagram; (b) 3D diagram

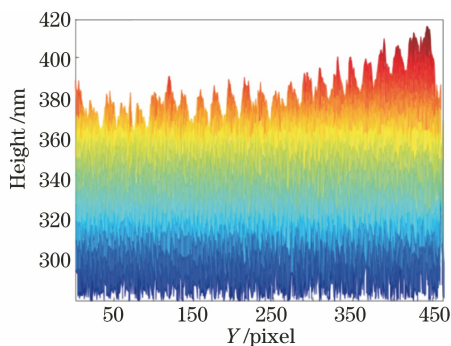


图 6 MATLAB 上的刻蚀深度图

Fig. 6 Etching depth diagram on MATLAB

热效应会导致去除速率呈非线性变化, 为此本文针对性地提出分批次加工的方式, 即在总加工时间不变的情况下, 将总加工时间按照一定比例进行划分以达到多次加工的目的, 其优势在于第一次加工可以在保证一定去除量的同时使样品温度达到一

个相对平衡的状态, 再分批次进行精密修形加工以减少修形过程中的热效应, 从而达到确定性去除的目的。采用光阑直径为 8 mm 的离子束进行面扫实验, 图 7 为在总驻留时间内一次性进行面扫实验后得到的面形图, 图 8 为将总驻留时间细分成三批次进行面扫实验后得到的面形图。从图 7 和图 8 可以看出, 一次性面扫实验有明显的欠去除现象, 分批次加工有效消除了加工过程中的热效应, 所以更加符合预期加工效果。

4 离轴抛物面镜离子束加工实验

4.1 球面转离轴抛物面加工

离子束抛光是一种基于原子级物理溅射的技术, 利用特定的去除函数对光学元件按照预设的加工路径进行一定时间的表面轰击, 从而达到原子量级去除的目的, 进而实现面形的修正, 其中抛光精度

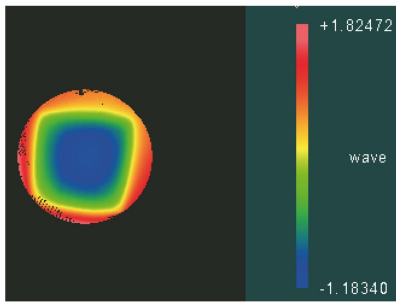


图 7 一次性面扫的面形图

Fig. 7 Surface diagram of one-time surface scanning

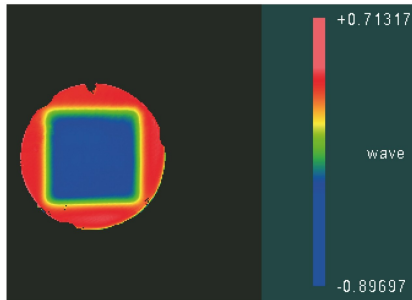


图 8 分批次面扫的面形图

Fig. 8 Surface diagram of batch sub-surface scanning

主要取决于去除函数与驻留时间。在已知光学元件的初始面形和去除函数后,如何利用这两个因素来确定驻留时间以使面形残差最小,这是影响面形精度的关键因素。本文采用实验室前期积累的算法对驻留时间进行求解^[10-12]。

球面转离轴抛物面镜的加工样件选用口径为 110 mm、曲率半径为 1732.7 mm、材料为 K9 的凹球面镜。利用 ZYGO 干涉仪来检测初始球面面形,其与所求解的材料去除量叠加后计算驻留时间。根据前期工艺实验得到不加光阑的离子束的峰值去除速率为 386.5 nm/min,去除函数分布参数为 5 mm,叠加间距设定为 7.5 mm。由于球面转离轴抛物面镜局部区域的加工去除量较大、理论驻留时间较长,因此必须采取分批次加工的方式以有效抑制热效应的影响。为了确定实际加工样件第一次分批次加工的时间,需要验证样件的温度平衡点,因此选择口径为 110 mm 的平面光学元件进行等量面扫实验,同时在样品上放置热电偶进行测温,监测升温至稳定状态的加工时间,即温度平衡时间,实验工艺所获得的平面光学元件的温度平衡时间为 72 min,因此第一次分批次加工的时间应不少于该温度平衡时间,球面转离轴抛物面镜的理论驻留时间较长,约 13 h,因此分批次加工时间的比例设定为 1:2:7。图 9(a)和图 9(b)为初始球面的面形误差,图 9(c)为

材料去除叠加量,图 9(d)为 10%驻留时间的仿真结果,图 9(e)为 20%驻留时间的仿真结果,图 9(f)为 70%驻留时间的仿真结果。

采用分批次加工的方式进行三次迭代加工,采用零位干涉法中的无像差点法对离轴抛物面镜进行检测^[13-14]。由于待测离轴抛物面镜的 F 数为 7.8,故选择 F 数为 7.1 的标准球面镜进行实验。由于干涉仪所发出的标准球面波与待测离轴抛物面镜的焦点重合,所以球面波经离轴抛物面镜反射后变为平面波,将标准平面反射镜置于焦点附近以避免切光,调整其偏转角度直至测试光束经过标准平面反射镜后自准直原路返回,并与标准球面波干涉,此时可测得待测离轴抛物面镜的表面面形误差。检测光路如图 10 所示,检测现场实物如图 11 所示,检测面形如图 12 所示,图 12(a)~12(c)分别为三次迭代加工的面形检测结果。经过三次迭代加工后,离轴抛物面镜的面形误差 RMS 值收敛至 0.103λ ,PV 收敛至 0.837λ 。

4.2 小束径离子束加工

不同频段的误差对面形有不同的影响,而在离子束加工过程中一般只能有效去除中低频误差,为了提升中高频段的修形能力,实验过程中通常改变离子束的束径。改变离子束束径的方法通常有两种:第一种是设计不同曲率及口径的栅网、调整离子源参数,从而达到改变离子束束径的目的;第二种是在原始曲率及口径下设计不同口径的光阑,即在离子束出光口处遮拦,在外部改变束径,从而达到缩小束径的目的。第一种方法操作比较复杂,需要设计不同的栅网系统,这对能量的利用率较高,但是换取栅网系统流程繁琐,而针对不同需求来更换栅网系统不能保证两次安装位置相同,还会造成去除函数存在误差,为此需要大量重复的工艺实验来验证,所以该过程耗时费力且成本较高。第二种方法是在原来已有结构的基础上设计不同大小的光阑、不同高度的靶距,即可对离子束的束径进行缩小操作,其缺点是离子束的遮拦会造成能量利用不充分,去除效率降低,而本课题组采用第二种方法进行小束径的离子束修形加工。考虑到离子束的束径太小会导致被拦截的离子束能量越多,离子束的去除速率越低会造成加工时间成倍增长、加工效率下降,因此采用口径为 8 mm 的光阑进行去除函数获取的工艺实验,实物如图 13 所示。根据工艺实验得到 8 mm 光阑的峰值去除速率为 325.4 nm/min,去除函数分布参数为 2.38 mm,叠加间距设定为 3.57 mm,计算

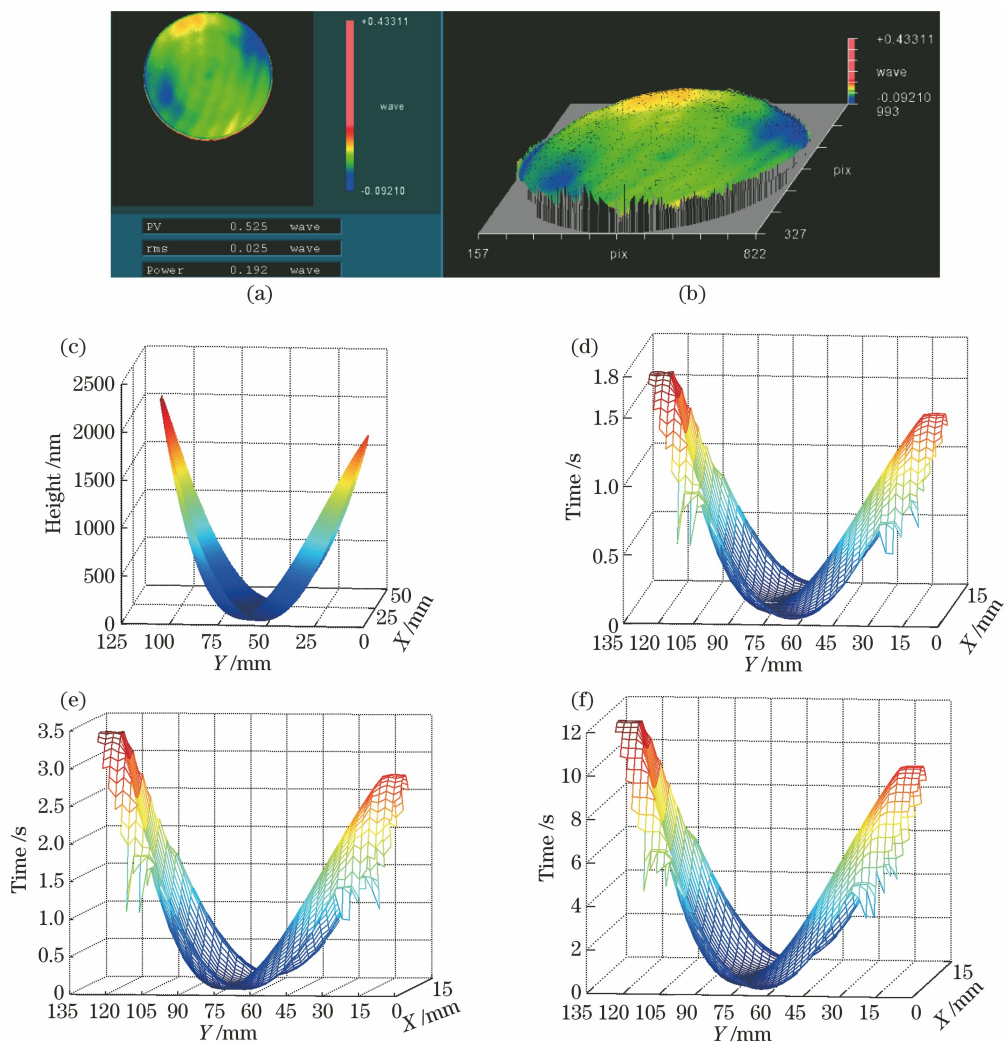


图 9 球面转离轴抛物面镜分批次加工的仿真结果。(a)凹球面镜初始球面面形误差的二维分布图;(b)凹球面镜初始球面面形误差的三维分布图;(c)材料去除总量;(d) 10%驻留时间;(e) 20%驻留时间;(f) 70%驻留时间

Fig. 9 Simulation results of batch machining of spherical off-axis paraboloid mirror. (a) Two-dimensional distribution of initial spherical error of concave spherical mirror; (b) three-dimensional distribution of initial spherical error of concave spherical mirror; (c) total material removal; (d) 10% residence time; (e) 20% residence time; (f) 70% residence time

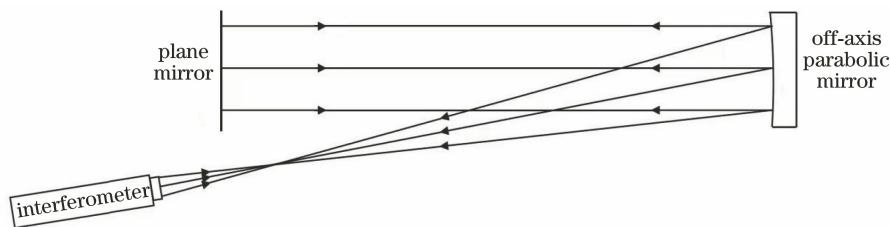


图 10 离轴抛物面镜的检测光路示意图

Fig. 10 Schematic of detection light path of off-axis parabolic mirror

求得驻留时间后对小束径离子束进行修形加工,加工后离轴抛物面镜的表面面形 PV 为 1.187λ , RMS 值为 0.064λ ,检测结果如图 14 所示。

4.3 小束径局部高点离子束确定性加工

局部高点离子束加工方法即是在原始面形上取

一基面,然后只对高于基面的高点进行修形,就可以将整体面形误差降低至基面水准。该方法适用于元件大部分区域的基面水准都收敛在一个值附近,根据需求设置一个基面可以略低于或高于收敛极值,这可以使整体面形再次快速收敛。

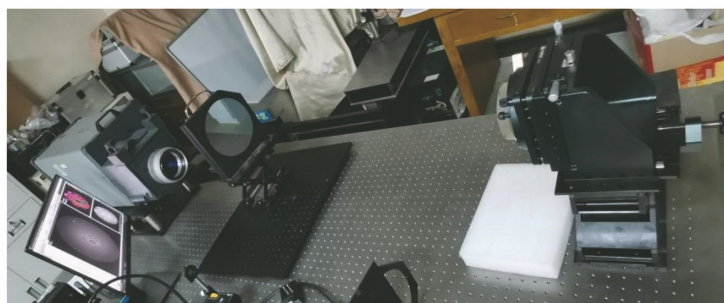


图 11 离轴抛物面镜的检测实物图

Fig. 11 Inspection diagram of off-axis parabolic mirror

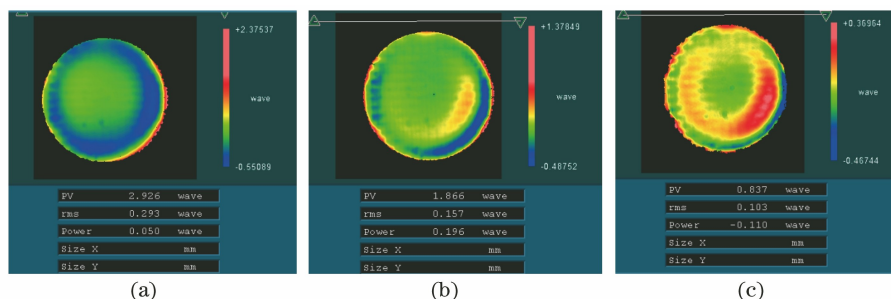


图 12 三次迭代加工后离轴抛物面镜的面形检测结果。(a)第一次加工后的检测结果；(b)第二次加工后的检测结果；(c)第三次加工后的检测结果

Fig. 12 Surface shape detection results of off-axis parabolic mirror after three iterations. (a) Test results after 1st processing; (b) test results after 2nd processing; (c) test results after 3rd processing



图 13 离子源光阑的实物图

Fig. 13 Physical diagram of ion source aperture

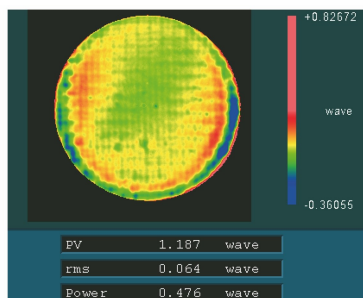


图 14 小束径加工后的面形检测结果

Fig. 14 Test results of surface shape after machining of small beam diameter

基于上述原理,本文需要寻找一个基准面作为合适的基准。如图 15(a)所示,离轴抛物面镜中心

区域的 RMS 值基本收敛到 10 nm 以内,精度能达到 $\lambda/50$,这完全满足技术指标要求,此时只要确保其他区域的面形值逼近这个值,就可以使整个离轴抛物面镜具有非常高的面形精度。在整个面形误差分布图中作一标尺,上下平移进行调整以寻找最大的 PV(不仅仅局限于水平方向,可以以任意角度作出标尺来寻找最大的 PV),如图 15(b)所示。由图 15(b)可知,离轴抛物面镜的面形误差 PV 为 383.913 nm。MetroPro 软件中有其自定义算法关于基线的标准,即高度为 200 nm,从谷值到基线保留面形数据,基线以上为待加工的面形数据,如图 15(c)所示。

采用小束径局部高点离子束加工方法需要在驻留时间求解算法中加入基面值的选择,正则化后选择 200 nm 的基面值来求解驻留时间,结果如图 16 所示。加工后的面形检测结果如图 17 所示。由图 17 可知,加工后,离轴抛物面镜的面形误差 PV 为 0.36λ ,RMS 值为 0.029λ ,最终实现了离轴抛物面镜的离子束精密修形抛光。

5 结 论

本文通过对离子束抛光过程中抑制热效应的工

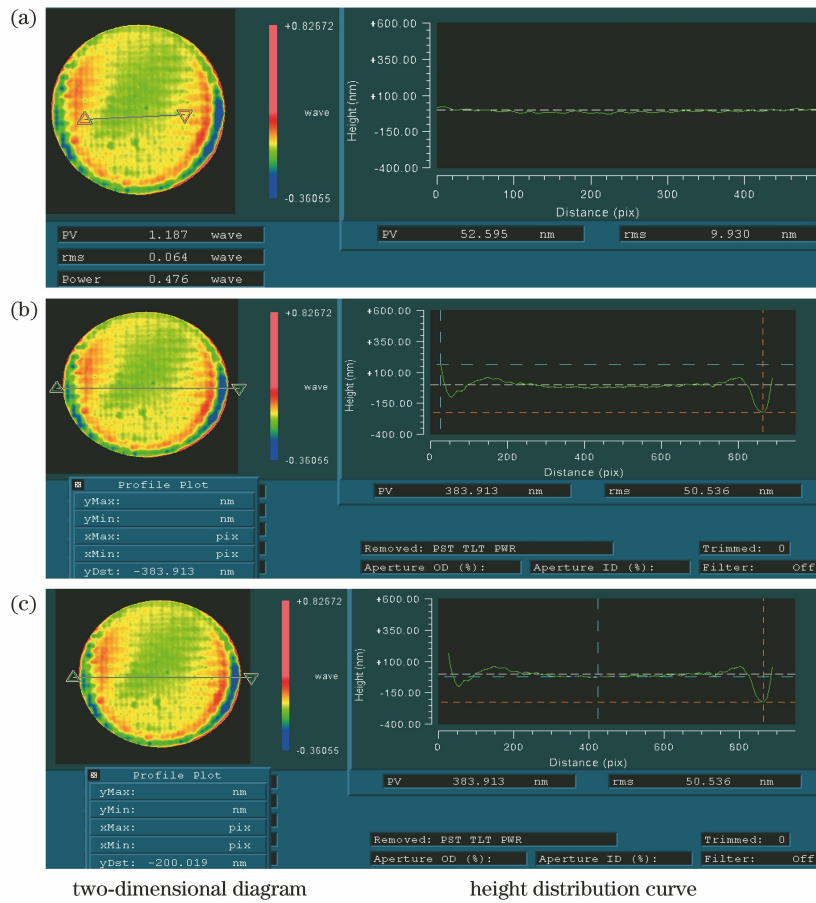


图 15 局部高点离子束修形基面的分析结果。(a)面形检测拾取图 1;(b)面形检测拾取图 2;(c)面形检测拾取图 3
 Fig. 15 Analysis results of local high point ion beam modification base surface. (a) Surface shape detection and pick-up figure 1; (b) surface shape detection and pick-up figure 2; (c) surface shape detection and pick-up figure 3

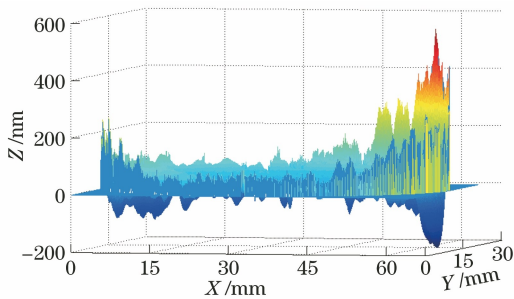


图 16 正则化基面去除量的仿真结果

Fig. 16 Simulation results of regularized base surface removal

艺探索,实验验证了将总加工时间按照一定比例划分成多批次方法抑制热效应的有效性。对口径 $D=110\text{ mm}$ 、顶点曲率半径 $R=1728\text{ mm}$,离轴量 $h=85\text{ mm}$ 的离轴抛物面镜进行最接近球面的计算,得到最接近球面的曲率半径 $R=1732.7\text{ mm}$,采用传统抛光工艺加工方法得到初始球面,采用离子束抛光分批次加工方式进行三次迭代加工,结合小束径加工、小束径局部高点加工的收敛加工工艺方法,最终实现了面形误差 PV 为 0.36λ 、RMS 值为 0.029λ

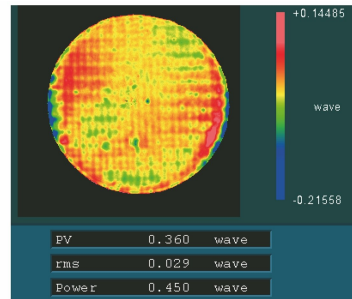


图 17 离轴抛物面镜的最终面形检测结果
 Fig. 17 Detection results of final surface shape of off-axis parabolic mirror

的离轴抛物面镜的离子束精密抛光加工。所得结果有效提高了离轴抛物面镜的离子束加工精度和工艺效率,为其他种类的非球面离子束加工提供了可靠的工艺方法。

参 考 文 献

[1] 马占龙, 谷勇强, 彭利荣, 等. 应用五轴离子束修正超高陡度镜面 [J]. 光学学报, 2015, 35 (6): 0622001.

- Ma Z L, Gu Y Q, Peng L R, et al. Ultra-gradient mirror figuring by 5-axis ion beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0622001.
- [2] 唐瓦. 离子束抛光大口径非球面去除模型与工艺研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Tang W. Research on removal model and technology for ion beam figuring large aspheric mirror [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [3] 尹小林. 空间复杂光学曲面离子束修形设备与工艺研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
Yin X L. Research on equipment and technology of ion beam figuring for space complex optical surface [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [4] 李智钢, 鲍振军, 朱衡, 等. 多磨头数控抛光对大口径离轴抛物面镜中频误差的抑制[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(6): 47-52.
Li Z G, Bao Z J, Zhu H, et al. Restraining mid-spatial-frequency error of large-size off-axis parabolic mirrors by multi-tool NC polishing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(6): 47-52.
- [5] 潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
Pan J H. Design, processing and inspection of optical aspheric surface [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1994.
- [6] 王权陡, 余景池, 张学军, 等. 离轴非球面最接近球面半径及非球面度的求解[J]. *光电工程*, 2000, 27(3): 16-19.
Wang Q D, Yu J C, Zhang X J, et al. Solution for best fitting spherical curvature radius and asphericity of off axis aspherics [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27(3): 16-19.
- [7] 杨航, 孔维雄, 何建国, 等. 考虑坐标系特性的非球镜面最小修磨量确定算法[J]. *制造技术与机床*, 2017(6): 97-101.
Yang H, Kong W X, He J G, et al. Minimum grinding amount algorithm of aspherical lens with respect to coordinate system's properties [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2017(6): 97-101.
- [8] 王欣, 刘强, 周浩, 等. 无限远前后零位补偿结合的非球面检验[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1722003.
Wang X, Liu Q, Zhou H, et al. Aspheric test combining front and back null compensation for infinite optical path[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1722003.
- [9] 程灏波, 王英伟, 冯之敬. 大偏离量非球面最接近球面的确定方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(8): 1040-1042, 1046.
Cheng H B, Wang Y W, Feng Z J. Methods to determine best fit sphere for large off-axis aspheric lenses[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(8): 1040-1042, 1046.
- [10] 向雪峰. 离子束加工路径优化及实现研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
Xiang X F. Research on ion beam fabrication path optimization and implementation[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
- [11] 王玉宁, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 离子束抛光等量去除的实现及抛光实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 032501.
Wang Y N, Jiang S L, Sun G B, et al. Ion beam polishing equivalent removal and polishing experiments[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 032501.
- [12] 康乐, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 光阑法变口径离子束修形仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0810016.
Kang L, Jiang S L, Sun G B, et al. Simulation study on ion beam polishing with changing aperture by diaphragm method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0810016.
- [13] 师途, 杨雨英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 26-46.
Shi T, Yang Y Y, Zhang L, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46.
- [14] 郝群, 宁妍, 胡摇. 基于干涉法的非球面测量技术[J]. *计测技术*, 2018, 38(1): 1-8.
Hao Q, Ning Y, Hu Y. Interferometric testing of aspheric surface [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(1): 1-8.