

# 离子束抛光等量去除的实现及抛光实验

王玉宁, 蒋世磊\*, 孙国斌, 刘卫国, 党小刚

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 为了提高光学元件的面形精度, 精确拟合出离子束去除函数。以去除函数的方均根(RMS)为分析对象, 分析不同叠加间距下离子束等量去除的去除量及波动量。根据理论及实验数据分析验证一维等量去除的可行性, 得出最优叠加间距为 $\sigma$ 。再以 $\sigma$ 为叠加间距进行二维等量去除理论及实验分析, 通过 30 s 熔石英二维等量去除实验, 得出去除量为 384.7 nm。结合抛光实验, 对 RMS 值为 138.5 nm 的  $\Phi 100$  mm 口径的熔石英平面窗口玻璃进行面形修正, 加工后 RMS 值为 18 nm, 面形收敛率达到 7.82。

**关键词** 光电子学; 光学加工设备; 离子束抛光; 去除函数; 叠加间距; 等量去除

中图分类号 TG356.28

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.032501

## Ion Beam Polishing Equivalent Removal and Polishing Experiments

Wang Yuning, Jiang Shilei\*, Sun Guobin, Liu Weiguo, Dang Xiaogang

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

**Abstract** To improve the surface accuracy of the optical elements, the ion beam removal function was accurately fitted. Taking the root mean square (RMS) value of the removal function as the analysis object, the removal and fluctuation amount of the ion beam equivalent removal under different stacking spacings were analyzed. The feasibility of one-dimensional equivalent removal was verified on ground of theoretical and experimental data analysis, and the optimal stacking spacing was  $\sigma$ . With  $\sigma$  as the stacking spacing, the theoretical and experimental analyses of two-dimensional equivalent removal were carried out. Fused silica was used for 30 s two-dimensional equivalent removal experiments, and the removal value was 384.7 nm. The surface modification of fused silica plane window glass with the RMS of 138.5 nm ( $\Phi 100$  mm) was carried out in combination with polishing experiment. The RMS was 18 nm after processing and the surface convergence rate reached 7.82.

**Key words** optoelectronics; optical processing equipment; ion beam polishing; removal function; stacking spacing; equivalent removal

**OCIS codes** 250.4745; 120.4610; 350.4600; 350.4800

## 1 引言

现代光学加工技术的一个突破性进展, 是基于计算机控制的“小磨头”抛光原理的应用, 近年来发展的磁流变抛光、液体射流抛光、气囊进动抛光、大气等离子体抛光和离子束抛光等技术, 均为基于这一原理的抛光技术<sup>[1-2]</sup>。

离子束加工过程中利用离子束流密度分布呈单峰类高斯分布的离子束对待加工件进行刻蚀, 采用非接触的加工方式, 很好地避免了传统加工过程中

的工件磨损、边缘效应、工件负载应力等一系列问题<sup>[3]</sup>。为了获得好的加工效果, 对栅格路径进行刻蚀<sup>[4-6]</sup>, 采用的栅格路径加工方式是将待加工件初始面形划分为多个像素数相同的元胞, 根据各个元胞内的面形数据进行高度均值求解, 解出值即为该元胞区域内各点的平均去除量。另一方面, 进行离子束刻蚀时, 不同的叠加间距产生的刻蚀效果不同, 所以对刻蚀的叠加间距进行分析, 实现对光学元件的等量去除。通过分析等量去除的效果, 确定等量去除最佳的叠加间距及去除速率, 并对各个元胞内的

收稿日期: 2019-09-20; 修回日期: 2019-10-29; 录用日期: 2019-11-13

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目(18JS053)

\* E-mail: jiangshilei8@163.com

平均去除量求解驻留时间,得到加工数据进行抛光修形。采用栅格路径加工方式降低了系统的运动精度和定位精度要求,对待加工样片的面形参数能够实现较快速度的收敛,提高了加工效率,降低了加工成本。

美国 Kodar 公司成功地应用了离子束抛光 (IBF) 技术对凯克望远镜 1.8 m 主镜微晶玻璃离轴段的残余表面误差进行了校正,主镜经过两次迭代加工,第一次迭代加工后表面误差方均根 (RMS) 值从 0.726  $\mu\text{m}$  降低到 0.252  $\mu\text{m}$ ,第二次迭代加工后降低到 0.090  $\mu\text{m}$ <sup>[7-8]</sup>。德国 IOM 研究所使用离子束对 150 mm  $\times$  80 mm 的微晶玻璃进行了抛光,抛光后的方均根值小于  $\lambda/100$ ,获得了极高的加工精度<sup>[9]</sup>。国防科技大学分别采用位置加工模式和速度加工模式对光学元件进行了修形,经过两次迭代加工使其面形精度误差方均根值由初始的 0.136 $\lambda$  提高到 0.01 $\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),平均每次迭代的面形收敛率达到 3.7<sup>[10]</sup>。长春光学精密机械与物理研究所对口径  $\Phi 800 \text{ mm}$  碳化硅表面硅改性层平面镜进行了抛光,初始面形误差方均根值为 57.886 nm,经过两次抛光后 RMS 值为 11.837 nm,收敛率达到 4.89<sup>[11-13]</sup>。

本文通过精确拟合离子束去除函数,基于栅格路径刻蚀方式<sup>[11-13]</sup>,对离子束不同叠加间距的去除量进行理论和实验分析,实现等量去除并给出最佳叠加间距。结合抛光实验进行分析,经过一次迭代抛光后,对比抛光前后的面形误差信息,达到较高的面形收敛率。

## 2 离子束等量去除的实现

离子束等量去除的实现依赖于稳定的去除函数。离子源激发的高能离子束束形呈高斯分布,因此离子束去除函数可用二维高斯函数来拟合<sup>[14-16]</sup>。对离子束束形的分布状态进行建模,建立的二维高斯数学模型为

$$f(x, y) = A \exp \left[ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - \mu)^2}{2\sigma_y^2} \right], \quad (1)$$

式中:  $A$  为离子束的峰值去除率;  $\sigma_x$  为高斯函数在  $x$  方向的正态分布标准差;  $\sigma_y$  为高斯函数在  $y$  方向的正态分布标准差;  $\mu$  为高斯函数位置参数。

离子束产生的高斯去除函数是对称的,因此  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  基本相等。进行去除函数拟合时,将去除函数分布的标准差定义为

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}. \quad (2)$$

为了准确获取离子束的束形分布状态,实验使用西安工业大学设计研发的 LZSKS-1300 离子束刻蚀机,离子源为射频离子源,测量设备为 Zygo VERI FIRE 型波面干涉仪<sup>[17]</sup>。经过大量的工艺实验确定一组离子源稳定的工艺参数:射频功率为 200 W;屏栅电压为 900 V;屏栅电流为 13 mA;氩气流量为 50 mL/min (标准状态);工作距离为 65 mm;入射角度为  $0^\circ$ ;稳定工作压强为  $4.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。利用上述参数,对口径  $\Phi 50 \text{ mm}$ 、厚度为 3 mm 的熔石英平面玻璃进行 10 min 刻蚀。分析熔石英刻蚀前后的面形信息,拟合得到去除函数分布,如图 1 所示。

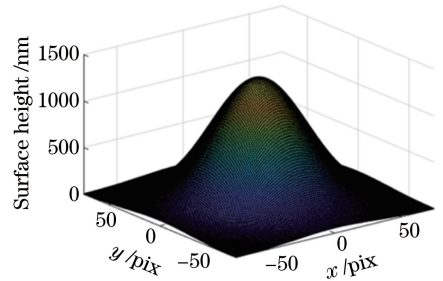


图 1 去除函数拟合图

Fig. 1 Diagram of the fitted removal function

根据离子束刻蚀过程中去除量线性变化的特点,得出离子束的峰值去除率为 133 nm/min。去除函数分布可表示为

$$f(x, y) = 133 \times \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2 \times 30.2^2} \right), \quad (3)$$

式中: 30.2 为高斯去除函数正态分布标准差  $\sigma$  (单位为 pix, pix 是 Zygo 干涉仪检测的单位), 对应实际的空间尺寸为 3.66 mm。高斯型去除函数的二维表达式转为空间尺寸后的表达式为

$$f(x, y) = 133 \times \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2 \times 3.66^2} \right). \quad (4)$$

离子束高斯型去除函数是对称的,因此可使用高斯型去除函数的母线方程  $f(x)$  来表示去除函数,即

$$f(x) = 133 \times \exp \left( -\frac{x^2}{2 \times 3.66^2} \right). \quad (5)$$

采用图 2 所示栅格路径的加工方式对光学元件进行修形。因为栅格路径的加工方式与二维等量去除率以及元胞尺寸的划分有关,通过分析及实验发现元胞直径为 1.41 $\sigma$  时,能够获取准确的驻留时间,达到较高的面形收敛。为了实现离子束等量去除相

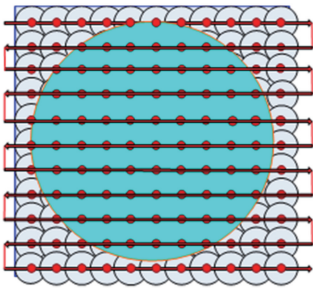


图2 栅格路径扫描图

Fig. 2 Diagram of the raster path scan

关量,对高斯型去除函数进行预测,其数学表达式所传递的含义都与 $\sigma$ 有关,因此根据 $\sigma$ 来分析不同叠加间距下的等量去除效果。

### 2.1 一维等量去除的实现

当离子束的叠加间距分别为 $\sigma, 1.5\sigma, 2\sigma, 2.5\sigma, 3\sigma$ 时,根据(5)式拟合得到离子束去除函数,不同位置上对应的高斯函数为

$$R_i(x) = 133 \times \exp\left\{-\frac{[x + 3.66k(i-1)]^2}{2 \times 3.66^2}\right\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

式中: $n$ 为高斯叠加的数量; $k$ 为 $\sigma$ 的倍率系数。叠加后的曲线函数 $R(x)$ ,即去除深度,可表示为

$$R(x) = \sum_{i=1}^n R_i(x) = \sum_{i=1}^n 133 \times \exp\left\{-\frac{[x + 3.66k(i-1)]^2}{2 \times 3.66^2}\right\}. \quad (7)$$

叠加间距分别为 $\sigma, 1.5\sigma, 2\sigma$ 的高斯函数叠加分布仿真,如图3所示。从叠加结果可以看出,去除曲线经过边缘上升后达到平稳状态,平稳区域即为等量去除评价区域,叠加间距不同,等量去除的去除总量不同。当叠加间距为 $\sigma \sim 1.5\sigma$ 时去除波动小,在平稳区域,去除量曲线基本趋于一条直线;当叠加间距为 $2\sigma$ 时,在平稳区域能够看到明显的峰谷。

对平稳区域的波动量进行定量分析,为了能够准确地描述波动量,使用的计算公式为

$$\gamma = P - V, \quad (8)$$

式中: $P$ 为叠加后平稳区域的波峰值; $V$ 为叠加后平稳区域的波谷值; $\gamma$ 为波动量。

$\gamma$ 值的大小表示波动程度的大小,波动值越大叠加效果越差。波动值分析曲线如图4所示。当叠加间距为 $\sigma$ 时,波动值为 $3.57 \times 10^{-6}$  nm;叠加间距为 $1.5\sigma$ 时,波动值为0.13 nm,基本实现了理想的理论去除;当叠加间距为 $2\sigma$ 时,波动比较明显,因此选择叠加间距在 $2\sigma$ 以内进行实验分析更合理。

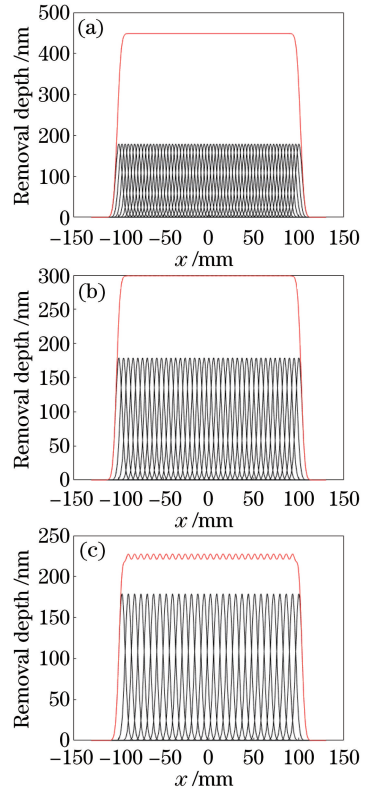


图3 不同叠加间距仿真图。(a)叠加间距为 $\sigma$ ;(b)叠加间距为 $1.5\sigma$ ;(c)叠加间距为 $2\sigma$

Fig. 3 Simulation of different stacking spacings. (a) Stacking spacing is  $\sigma$ ; (b) stacking spacing is  $1.5\sigma$ ; (c) stacking spacing is  $2\sigma$

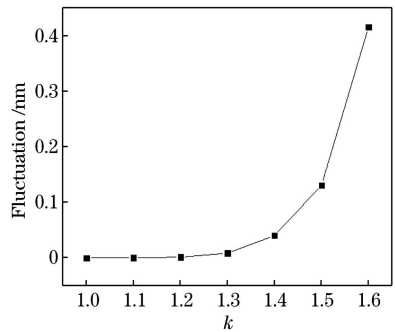


图4 波动值变化曲线

Fig. 4 Fluctuation value curve

当叠加间距小于 $\sigma$ 时,虽然同样能够达到平滑的叠加效果,但是达到叠加平稳状态的去除量时所需的子离子束个数比较多,进行加工时,运动系统随着加工点的增多,会严重影响加工效率。另一方面,叠加间距变小以后,等量去除的去除总量也明显提升,进行加工时要求离子源快速移动,因此要求运动系统有较高的平稳性,然而加工过程中,移动点数越多,加工工件尺寸变大时,加工效率会大大降低。选择叠加间距为 $\sigma \sim 1.6\sigma$ 时,能够实现高质量的等量去

除,保证加工效率。

对口径  $\Phi 50$  mm 的熔石英光学元件进行刻蚀,验证不同叠加间距下的刻蚀量及波动值。图 5 和图 6 所示即为不同间距的刻蚀量,随着叠加间距的变大刻蚀总量逐渐降低。

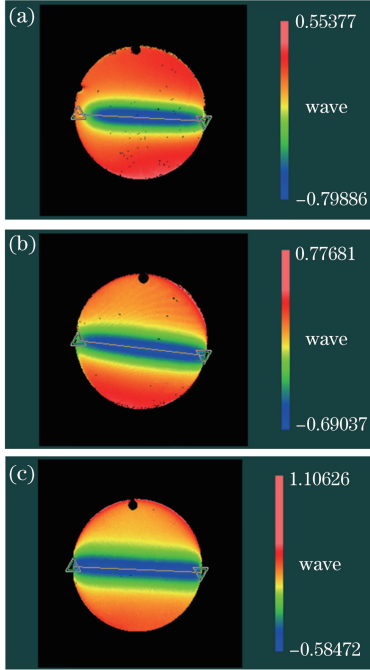


图 5 不同叠加间距的离子束一维等量刻蚀结果。(a)叠加间距为  $\sigma$ ; (b)叠加间距为  $1.2\sigma$ ; (c)叠加间距为  $1.5\sigma$

Fig. 5 One-dimensional equivalent-etching results of ion beams with different stacking spacings. (a) Stacking spacing is  $\sigma$ ; (b) stacking spacing is  $1.2\sigma$ ; (c) stacking spacing is  $1.5\sigma$

根据图 6 所示实验结果,对等量去除的平稳区域进行去除量的分析,可以看出理论去除量与实际去除量基本一致;对于实验加工的波动量而言,实验结果大于理论分析结果,因为实际刻蚀过程中波动量的大小不仅与叠加间距有关,还与离子源的稳定性以及检测过程中的对准误差有关。经过大量实验后得出,当叠加间距为  $\sigma$  时,能够保证等量去除的稳定性以及加工效率。

## 2.2 二维等量去除的实现

对一维高斯分布的叠加仿真及实验分析,说明了等量去除的可行性,并得出最佳叠加间距为  $\sigma$ 。离子束修形过程是二维去除,对整个面形进行去除的过程中要分析两个方向上的叠加,因此不难得出另一个方向上的叠加间距仍为  $\sigma$ 。离子束二维去除函数如(3)式所示,根据一维仿真分析对应的叠加间距进行二维去除分析。叠加后的去除函数为

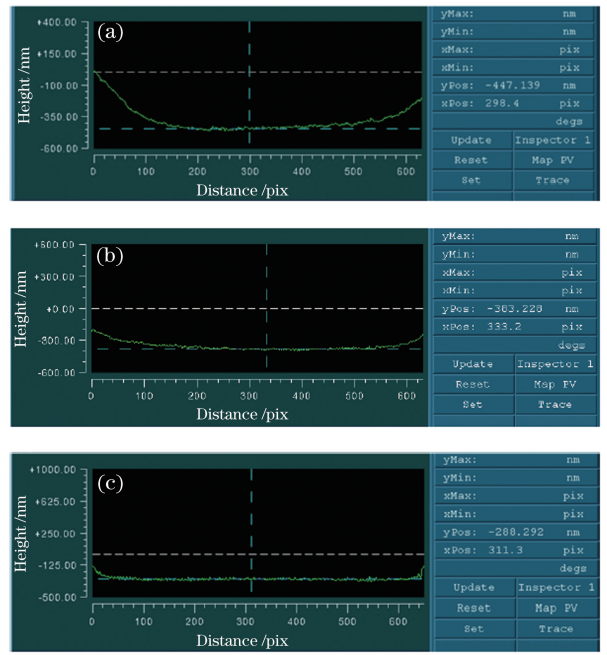


图 6 不同叠加间距的离子束一维等量去除轮廓图。(a)叠加间距为  $\sigma$ ; (b)叠加间距为  $1.2\sigma$ ; (c)叠加间距为  $1.5\sigma$

Fig. 6 One-dimensional equivalent removal contour of ion beams with different stacking spacings. (a) Stacking spacing is  $\sigma$ ; (b) stacking spacing is  $1.2\sigma$ ; (c) stacking spacing is  $1.5\sigma$

$$H(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{i,j}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m 133 \times \exp \left\{ -\frac{[x + 3.66k(i-1)]^2}{2 \times 3.66^2} - \frac{[y + 3.66k(j-1)]^2}{2 \times 3.66^2} \right\}, \quad (9)$$

式中: $H(x, y)$ 为离子束二维等量去除的理论去除量; $n$ 为  $x$  方向高斯叠加的数量; $m$ 为  $y$  方向高斯叠加的数量。

二维等量去除仿真叠加后的去除量呈方形平底锅状,如图 7 所示。当叠加间距为  $\sigma$  时,在去除稳定区域分析得到等量去除深度为 381 nm,波动量为 0.01 nm。

对二维等量去除进行实验验证。在 65 mm 工作距离处对口径  $\Phi 50$  mm、厚度为 3 mm 的熔石英样片进行刻蚀,实验中对样片进行 13 行、13 列的刻蚀,单点驻留时间为 30 s。

对刻蚀后的样片进行标记对准检测,并对样片的前后面形作差,作差后的面形即为刻蚀的绝对深度,在刻蚀范围内对面形误差峰谷(PV)值进行数据分析,PV 值即为刻蚀深度。作差后的面形如图 8 所示,可以看出刻蚀深度为 384.7 nm,与仿真结果基本一致。在该叠加间距下,离子束能够实现稳定的等量去除加工。

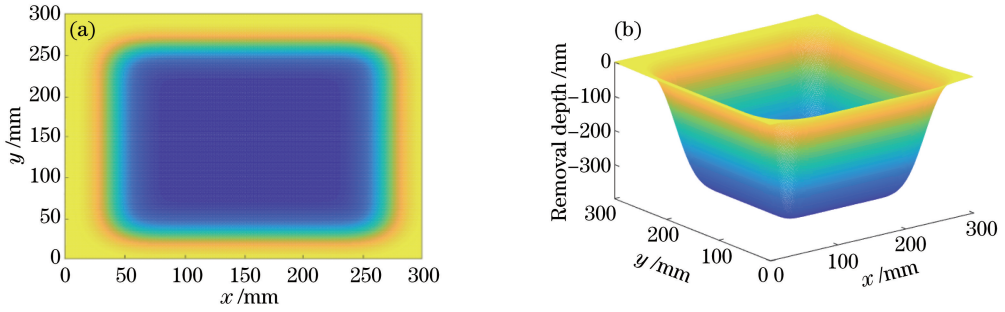


图7 二维等量去除仿真图。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 7 Simulation of two-dimensional equivalent removal. (a) Top view; (b) side view

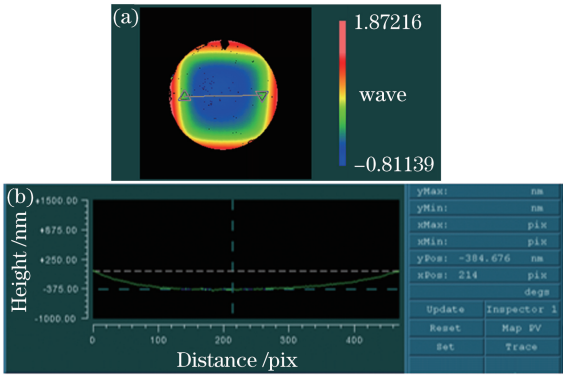


图8 二维等量去除结果。(a)刻蚀结果;(b)刻蚀轮廓

Fig. 8 Two-dimensional equivalent removal results.

(a) Etching result; (b) etching profile

### 3 修形实验

修形实验的基本工艺参数如下:射频功率为200 W;屏栅电压为900 V;屏栅电流为13 mA;氩气流量为50 mL/min(标准状态);工作距离为65 mm;入射角度为 $0^\circ$ ;稳定工作压强为 $4.5 \times 10^{-2}$  Pa。通过栅格路径对 $\Phi 100$  mm的熔石英玻璃进行面形修正,如图9所示。修形前全口径范围内PV值为919.9 nm,RMS值为138.5 nm。

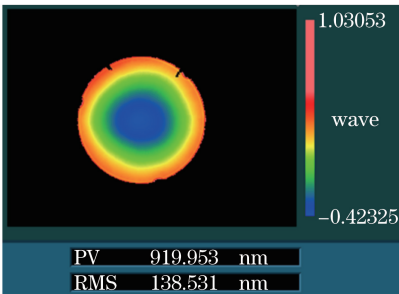


图9 离子束修形前的面形

Fig. 9 Surface shape before ion beam modification

将熔石英初始面形按照 $1.41\sigma$ 的直径划分为多个元胞,根据二维等量去除速率求解各个元胞的驻

留时间,如图10所示。为了避免边缘效应的影响,对边缘进行合理的延拓。图11所示为经过延拓后的驻留时间分布,图12所示为仿真加工结果,PV值为126 nm,RMS值为15 nm。

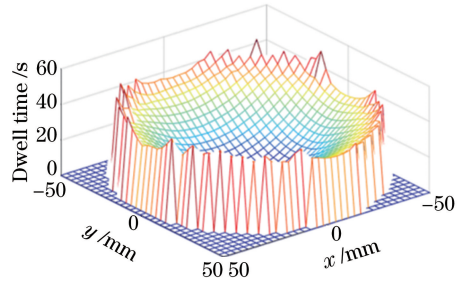


图10 驻留时间分布

Fig. 10 Dwell time distribution map

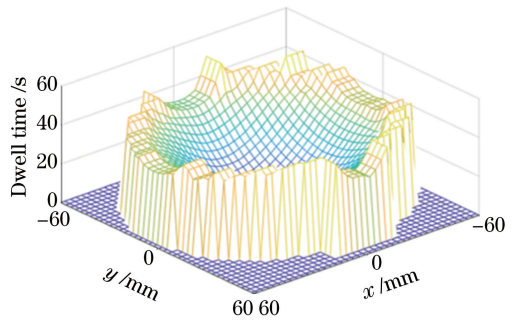


图11 延拓后的驻留时间分布

Fig. 11 Dwell time distribution map after continuation

经过4 h的抛光,离子束修形后全口径的面形如图13所示。加工后的面形误差PV值为284.8 nm,RMS值为18 nm。

加工的面形收敛率达到7.82。实验结果证明了采用叠加间距 $\sigma$ 求解修形驻留时间的合理性。由于面形受夹具夹持的影响,在边缘局部也留下明显的残差。85%口径内的面形残差如图14所示,面形误差PV值为77 nm,RMS值为12 nm,相对传统抛光而言,抛光效率得到极大的提升。

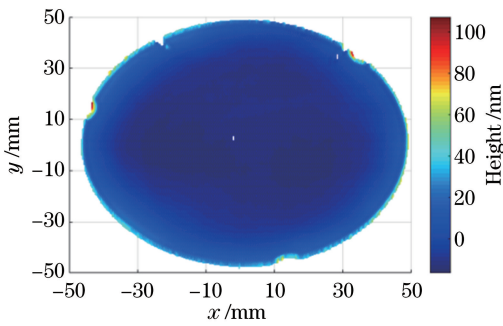


图 12 仿真加工结果

Fig. 12 Simulated processing result

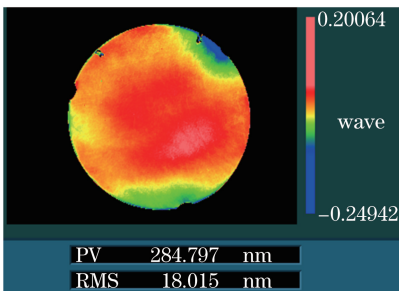


图 13 离子束修形后全口径的面形

Fig. 13 Full-caliber surface shape after ion beam modification

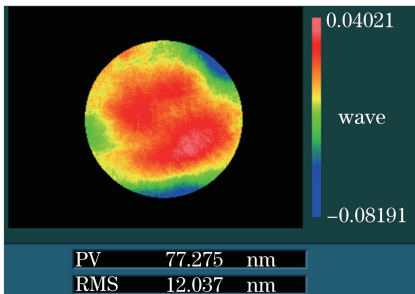


图 14 离子束修形后 85%口径的面形

Fig. 14 Surface shape of 85% aperture after ion beam modification

## 4 结 论

针对离子束刻蚀熔石英材料获取熔石英材料的去除特性,精确拟合去除函数;从理论上分析了不同叠加间距下离子束的一维等量去除,并通过实验验证了不同叠加间距下的去除效果,得出最佳叠加间距,以最佳叠加间距进行二维等量去除的理论及实验分析,并进行抛光实验,根据理论分析及实验结果得出以下结论。对于一维等量去除,通过仿真分析可知,叠加间距越大,去除量总量越小,波动量越大,通过实验验证了不同叠加间距下等量去除的去除量与仿真结果一致,说明等量去除的可行性,并给出最

佳的叠加间距为 $\sigma$ ;对于波动量来说,因为实验中存在一定的对准误差,不能充分验证理论分析的波动量,实验需要进一步完善。基于一维等量去除得出的最佳叠加间距 $\sigma$ 进行二维等量去除理论分析,并通过实验验证二维等量去除的去除率,实验结果与理论分析一致;基于二维等量去除的去除率求解待加工件的驻留时间,经过 4 h 抛光后,分析加工件修形前后的面形信息可得面形收敛率达到 7.82。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou L, Dai Y F, Xie X H, et al. A novel path used in computer-controlled polishing process based on uniform-area-increment spiral[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(4): 1-4.  
周林, 戴一帆, 解旭辉, 等. 计算机控制抛光中基于等面积增长螺旋线的加工路径[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 1-4.
- [2] Li S Y, Dai Y F, Xie X H, et al. New technology for manufacturing and measurement of large and middle-scale aspheric surfaces[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 92-93.  
李圣怡, 戴一帆, 解旭辉, 等. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 92-93.
- [3] Jiao C J, Li S Y, Wang D F, et al. Material removal property in ion figuring process for optical components[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1520-1526.  
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): 1520-1526.
- [4] Zhou L. Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 34-35.  
周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 34-35.
- [5] Jiao C J. Study on the material removal mechanisms and fundamental processes for ion beam figuring optical mirrors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 20-23.  
焦长君. 光学镜面离子束加工材料去除机理与基本工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 20-23.
- [6] Liao W L. Deterministic ion beam figuring technology for high-precision spherical components [D]. Changsha: National University of Defense

- Technology, 2010: 26-28.
- 廖文林. 高精度球体类零件离子束确定性修形技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 26-28.
- [7] Allen L N. Progress in ion figuring large optics[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2428: 237-247.
- [8] Michel F, Schindler A, Thomas H. Ion beam figuring of SiC mirrors provides ultimate WFE performances for any type of telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3739: 142-154.
- [9] Schindler A, Haensel T, Zeuner M, et al. Ion beam figuring and ion beam polishing production tools-processing technology included-for customized solutions[C]//Optical Fabrication and Testing, June 18, 2000, Québec City, Canada. Washington, D.C.: OSA, 2000: OWA6.
- [10] Dai Y F, Zhou L, Xie X H, et al. Deterministic figuring in optical machining by ion beam[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.  
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.
- [11] Tang W, Deng W J, Zheng L G, et al. Calculation of removal function of ion beam figuring and polishing experiment[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 31-39.  
唐瓦, 邓伟杰, 郑立功, 等. 离子束抛光去除函数计算与抛光实验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 31-39.
- [12] Wu J F. Research on the ion beam figuring technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2010: 40-42.  
武建芬. 离子束加工技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2010: 40-42.
- [13] Tang W. Research on removal model and technology for ion beam figuring large aspherical mirror[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 31-39.  
唐瓦. 离子束抛光大口径非球面去除模型与工艺研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2016: 31-39.
- [14] Duan G P. Study on removal characteristics of ion beam polishing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 32-33.  
段洁坪. 离子束抛光去除特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 32-33.
- [15] Wang Z Y, Zhang L X, Sun P F, et al. Mathematical modeling method for generation of Gaussian-type removal function in fluid jet polishing [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1022002.  
王中昱, 张连新, 孙鹏飞, 等. 射流抛光中生成高斯型去除函数的数学建模方法[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022002.
- [16] Li J, Zhang L X, Sun P F, et al. Fast generation method of Gaussian-shaped removal function of fluid jet polishing [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0722002.  
李建, 张连新, 孙鹏飞, 等. 射流抛光高斯型去除函数的快速生成方法[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0722002.
- [17] Xi J P, Li B, Ren D X, et al. Research progress of measurement technology for large-diameter aspheric elements on grinding stage [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030008.  
席建普, 李彬, 任东旭, 等. 大口径非球面元件磨削轮廓测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030008.