

文章编号: 0253-2239(2008)06-1131-05

应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现

戴一帆 周 林 解旭辉 焦长君 李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院机电系, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了克服传统光学镜面抛光方法的缺点,提出了应用离子束进行光学镜面修形的方法。介绍了离子束修形技术的原理和方法,并对离子束修形中涉及的关键技术进行了讨论。在自研的离子束修形设备上对一块直径 $\phi 98$ mm 的微晶玻璃平面样件进行了离子束修形试验,经过两次的迭代修形使其面形精度均方根误差由初始的 0.136λ 提高到 0.010λ ($\lambda=632.8$ nm),平均每次迭代的面形收敛率达到 3.7。实验结果表明,应用离子束进行光学镜面修形无边效应、面形收敛快、加工精度高;由于离子束修形技术去除材料过程自身的特点,使数控离子束修形技术对非球面的加工和对平面的加工难度相当。

关键词 光学加工; 离子束修形; 计算机控制光学表面成形; 驻留时间; 去除函数

中图分类号 TH161 **文献标识码** A

Deterministic Figuring in Optical Machining by Ion Beam

Dai Yifan Zhou Lin Xie Xuhui Jiao Changjun Li Shengyi

(Department of Mechatronics Engineering, College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Ion beam figuring (IBF) is introduced to overcome the disadvantages of conventional polishing processes in optical machining. The principle and method of IBF are introduced, and the key techniques required to implement an IBF process are also discussed. To demonstrate an IBF process, a $\phi 98$ mm planar ceramic glass was processed on an IBF system. Its surface figure accuracy root-mean-square (RMS) is improved from initial 0.136λ to final 0.010λ ($\lambda=632.8$ nm) through two IBF processes, and the mean iterative convergence ratio is 3.7. The result shows that the IBF is a deterministic process, which results in a high surface figure accuracy without edge effect and a corresponding high convergence ratio of surface figure. Due to the unique characteristic of the sputtering process in IBF, machining an aspheric surface is no more difficult than machining a planar surface.

Key words optical machining; ion beam figuring; computer-controlled optical surfacing; dwell time; removal function

1 引 言

随着光刻机物镜、天文望远镜和其他高分辨率成像系统等现代光学系统的快速发展,其对光学零件表面面形精度的要求越来越高。而传统的光学零件面形修正方法由于加工周期长、面形收敛慢等缺点很难适应现代光学系统的发展需求。为了克服传统光学零件加工方法的缺点,出现了不少先进的光学零件加工方法^[1],其中最具代表性的是小磨头数控研抛^[2,3]、应力盘抛光^[4~6]、磁流变抛光^[7,8]和离子束修形^[9~11]等确定性光学研抛技术。

小磨头数控研抛最早应用,容易产生中高频误差,如果增大研抛盘尺寸,盘面与镜面很难完好吻合,导致加工精度不高。应力盘抛光克服了这个问题,由于接触面积大、修形能力较弱,而且主动变形控制较为复杂。小磨头数控研抛和应力盘抛光都属于接触式加工方法,加工中由于盘面与镜面的接触应力使镜面发生弹性形变以致镜面面形很难加工到较高的精度,而且接触式加工不可避免地存在较为严重的边缘效应(塌边或翘边)。磁流变抛光和离子束修形属于非接触式加工方法,由于“磨头”与镜面

收稿日期: 2007-09-18; 收到修改稿日期: 2007-12-11

基金项目: 国家 973 计划和国家自然科学基金(50775215)资助课题。

作者简介: 戴一帆(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事精密工程、先进光学零件加工等方面的研究。

E-mail: dyf@nudt.edu.cn

不再是刚性的机械接触,克服了接触式抛光方法固有的缺点,可以使镜面达到很高的精度。但磁流变抛光成本较高,且不环保,其对机床性能及控制水平要求较高,例如加工中要求抛光模与镜面的法向间隙具有较高的精度。

离子束修形最早由柯达公司应用,并成功加工了凯克(Keck)望远镜主镜。离子束修形技术在真空环境中采用聚焦离子束对镜面进行刻蚀,加工不需要抛光液,比较环保。

2 原理和方法

2.1 加工原理

应用离子束进行光学镜面修形加工的原理是离子束溅射去除加工。它使用聚焦离子束轰击工件表面,轰击过程中离子和工件原子之间以及工件原子相互之间发生复杂的级联碰撞过程。级联碰撞过程同时也是能量交换和传递的过程,当工件表面的原子获得足够的能量可以摆脱表面束缚能时,就会以溅射原子的形式脱离工件表面,如图 1 所示。

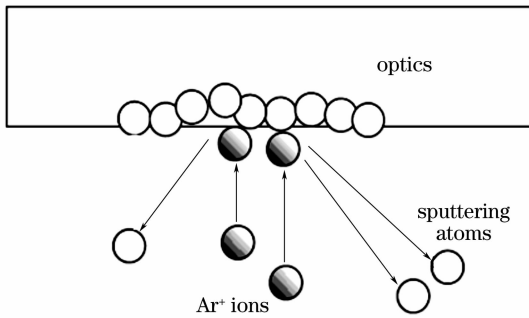


图 1 离子束修形中的材料溅射过程

Fig. 1 Sputtering process in ion beam figuring

2.2 去除函数

由于聚焦离子束的束流密度通常呈高斯分布,导致离子束加工中的去除函数(即束函数,BRF)也

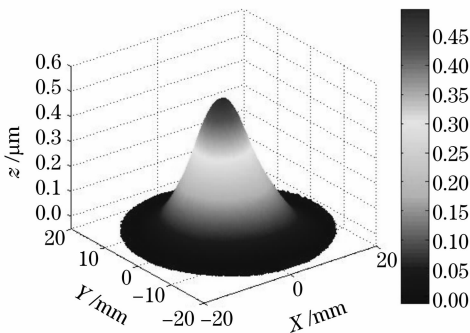


图 2 离子束修形中的去除函数

Fig. 2 Beam removal function (BRF) in ion beam figuring

呈高斯分布。图 2 所示为实验得到的束函数,图 3 所示为该束函数沿径向的平均值,以及用高斯函数拟合的结果。由拟合结果可见,离子束加工中的去除函数形状很好,与理想的高斯函数非常接近。

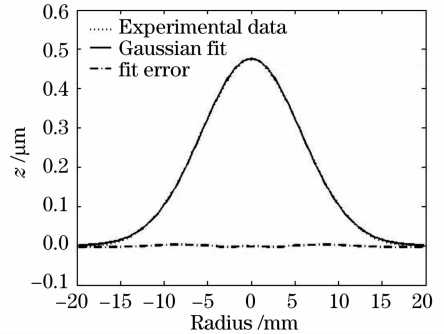


图 3 束函数的径向分布及其高斯拟合

Fig. 3 Beam removal function versus radial distance and its Gaussian fit

2.3 加工方法

离子束加工一般是通过控制离子束(离子源)在光学镜面上扫描来实现的。通常离子束相对于工件有五个运动自由度,以实现离子束相对非球镜面法线运动。光学零件通常还有一个旋转自由度,如图 4 所示。在加工过程中,为了去除镜面的面形分布误差,需要控制离子束在镜面不同位置驻留不同的时间。为了实现驻留时间的控制,通常把镜面网格化,计算出离子束在每一个网格上的驻留时间,然后控制离子束沿预定的路径逐点扫描并驻留。

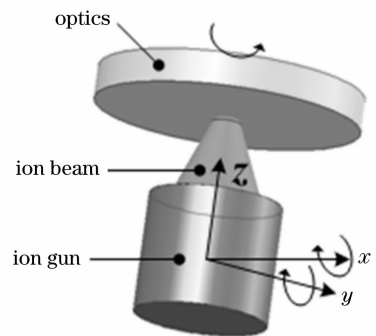


图 4 离子源与光学零件的运动配置

Fig. 4 Motion configuration of ion source and workpiece

由于去除函数的形状与大小与工件的形状和位置无关,所以在工件边缘内外束函数没有明显的变化。只要在实际中,将工件边缘以外的点纳入到驻留时间计算过程中,并在加工过程中扫描加工到光学零件边缘以外,如图 5 所示,就可有效克服传统加工中的边缘问题(即翘边或塌边)。

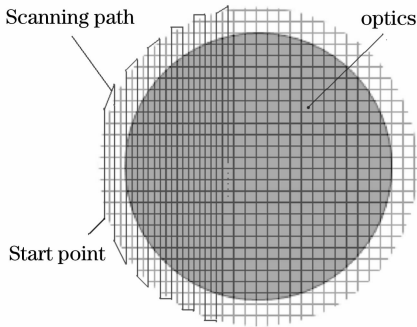


图5 网格划分及加工扫描路径

Fig. 5 Grid and scanning path for machining

3 关键技术

3.1 离子源

离子源是离子束修形的核心部件,它的功能是在加工中持续提供稳定的离子束。离子源产生的离子束在空间分布的束流密度以及稳定性直接影响到加工的修形能力和修形精度。

离子束修形中常用的离子源是考夫曼离子源,其原理如图6所示。工作时,离子源放电室阴极放电,发射的电子电离通入的氩气,从而在放电室内产生放电等离子体。离子通过扩散与漂移到达屏栅,与屏栅之间形成离子鞘。经过由屏栅和加速栅组成的离子光学系统抽取、加速、聚焦,形成用于光学零件加工的聚焦离子束。

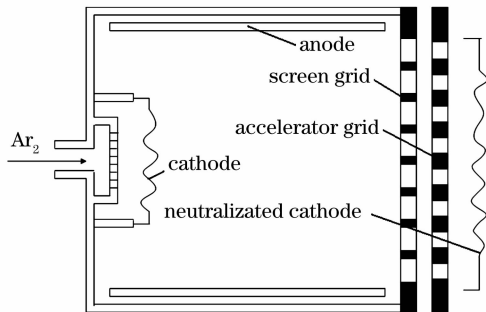


图6 考夫曼离子源的结构原理图

Fig. 6 Structural schematic of Kaufmann-type ion source

3.2 真空多轴运动系统

为了实现离子源与工件的相对运动,通常需要在无油的高真空中实现多轴精密运动,然而普通的电机、丝杆、导轨、滑块以及检测部件都不能在高真空中使用,而且高真空中还不允许使用普通的润滑油。如何实现在无油的高真空环境下的多轴精密运动是离子束加工中的一个技术难点。

3.3 驻留时间求解

离子束修形加工中,一旦确定了网格划分和加

工路径之后。剩下的问题是如何确定各个网格点的驻留时间,即驻留时间求解问题。Zhou Lin等^[12]提出并采用了截断奇异值分解(TSVD)方法来求解驻留时间 C-E-H(Carnal-Egert-Hylton)模型^[13]。C-E-H模型将驻留时间求解问题转换为线性方程组的求解问题,不需要进行边缘数据延拓,同时又避免了边缘效应。但是,C-E-H模型建立的线性方程组不能使用传统的高斯消元法等方法求解,为此选择TSVD方法求解。在离子束光学加工中,用C-E-H模型和TSVD方法来求解驻留时间可以得到满意的求解结果^[12]。

4 设 备

历经一年多的时间,设计并研制了一台非球光学镜面离子束修形设备^[11]。该设备真空室直径1.2 m,高1.1 m,极限真空可达 10^{-4} Pa。设备应用了考夫曼离子源,内部建立了6轴的真空精密运动系统,运动和环境控制都实现了自动化。

离子束溅射引起的去除函数的大小和形状影响光学镜面修形的速率和精度。为了考察离子源各参量对去除函数的大小和形状的影响规律,确定离子束修形的优化工艺参量,我们进行了大量的实验研究,确定的一组较优的工艺参量是离子能量为1100 eV(即屏栅电压为1100 V),束电流为20 mA,加速栅电压为100 V,工作气体Ar的流速为3 sccm。

5 修形实验

为了演示离子束加工对光学镜面的确定性修形,对一块直径 $\phi 98$ mm的微晶玻璃平面样镜进行了面形误差修正。样镜事先经过了传统的研磨抛光,离子束修形前其面形精度在 $\phi 96$ mm的评价口径范围内峰谷值(PV)为 0.619λ 、均方根(RMS)误差为 0.136λ , $\lambda = 632.8$ nm,如图7所示。面形测量

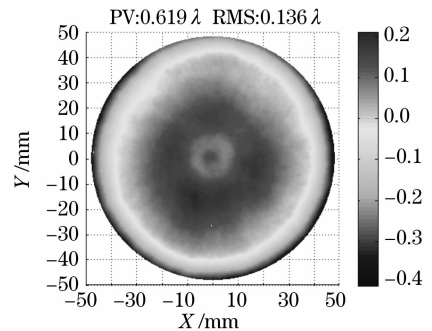


图7 离子束修形前的面形

Fig. 7 Surface figure before ion beam figuring

使用的仪器为 Zygo 波面干涉仪, 型号为 GPI-XP 1000, 测量口径 10.16 cm (4 inch)。

该样镜经过了两次离子束修形, 两次修形都使用相同的网格划分, 间隔 2 mm, 在样镜上划分有 1829 个网格, 边缘延伸出 1784 个网格, 总共有 3613 个网格。第一次修形中计算出的 3613 个网格点上的驻留时间分布如图 8 所示, 总驻留时间为 31.5 min。预测的加工后面形残留误差如图 9 所示, 预测的面形精度峰值为 0.19λ 、均方根误差值为 0.024λ 。加工过程中(如图 10 所示)采用图 5 所示的扫描路径, 实际加工后的面形残留误差如图 11 所示, 面形精度峰值为 0.26λ 、均方根误差值为 0.032λ 。本次加工的面形收敛率(定义为加工前面形精度的均方根之比)达到了 4.4, 大大高于传统抛光的面形收敛率(传统的抛光加工的面形收敛率一般仅在 1.1~1.3 之间^[9])。

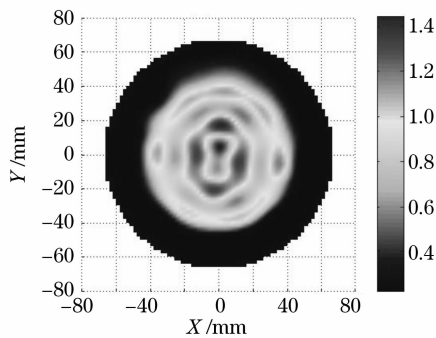


图 8 第一次修形的驻留时间

Fig. 8 Dwell time in the first figuring

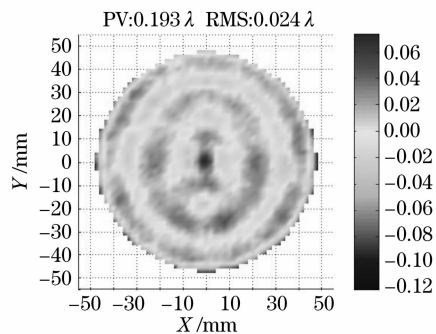


图 9 第一次修形后的预测残留误差

Fig. 9 Predicted residual error after the first figuring

第一次修形后又进行了第二次修形。第二次修形中计算出的各网格点上的驻留时间分布如图 12 所示, 总驻留时间为 19.9 min。预测的残留误差如图 13 所示, 预测的面形精度峰值为 0.10λ 、均方根误差值为 0.010λ 。实际加工后的残留误差如图 14 所示, 面形精度峰值为 0.105λ 、均方根误差值为 0.010λ 。本次加工的面形收敛率为 3.2。

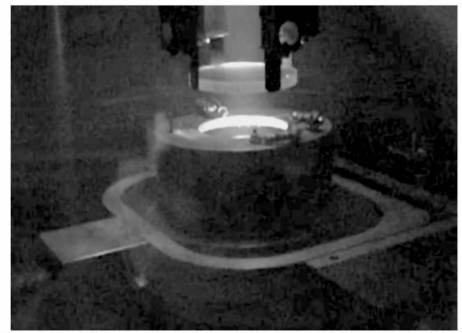


图 10 直径 $\phi 98$ mm 的样镜加工中的照片

Fig. 10 Photo of machining a sample of $\phi 98$ mm

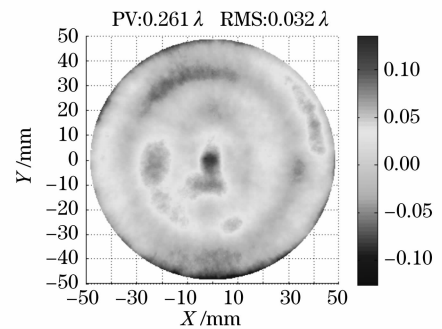


图 11 第一次修形后的实际残留误差

Fig. 11 Real residual error after the first figuring

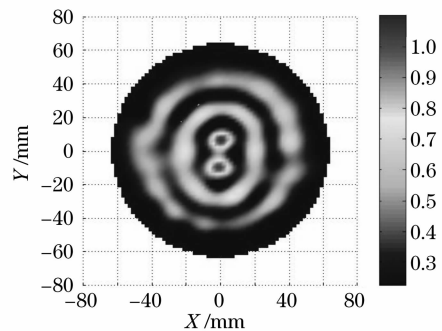


图 12 第二次修形的驻留时间

Fig. 12 Dwell time in the second figuring

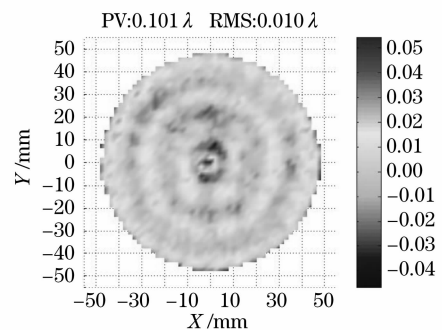


图 13 第二次修形后的预测残留误差

Fig. 13 Predicted residual error after second figuring

对比两次离子束修形的预测残留误差和真实残留误差可以看出, 预测残留误差和真实残留误差在

在面形和数值上都吻合得很好,这充分说明了离子束修形确定性高、可预测性好。

该样镜经过两次离子束修形之后的残留误差在全口径范围内的面形图如图 15 所示,由此图可以看出,离子束加工确实没有明显的边缘效应。

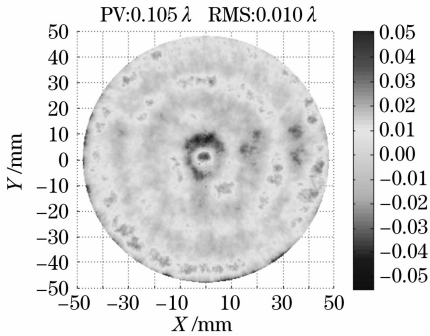


图 14 第二次修形后的实际残留误差

Fig. 14 Real residual error after the second figuring

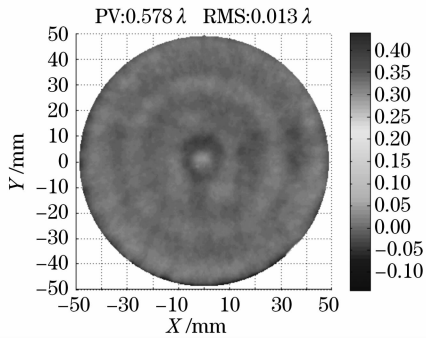


图 15 修形后全口径范围内的残留误差

Fig. 15 Residual error in full aperture after the second figuring

6 结 论

应用离子束进行光学镜面修形的方法,在自研的离子束加工设备上实现了离子束修形试验,加工了一块直径 $\phi 98$ mm 的微晶玻璃平面,经过两次迭代加工使其面形精度均方根误差值由初始的 0.136λ 提高到 0.010λ ($\lambda = 632.8$ nm),平均每次迭代的面形收敛率达到 3.7。

由于离子束修形属于非接触式加工,而且材料去除量可以控制到原子量级,所以应用离子束进行光学镜面修形可以克服传统抛光方法的缺陷并达到很高加工精度。离子束修形技术由于自身去除材料过程的特点,去除函数在加工过程中对镜面等因素具有良好的适应性,即去除函数对镜面曲率变化不敏感、对离子源到工件表面的法向距离不敏感、在垂直入射时对入射角度的微小偏差不敏感。这些特点

或优点使数控离子束修形技术对非球面的加工和对平面的加工难度相当,所以离子束修形技术用于加工非球面具有巨大的优势。

参 考 文 献

- 1 Yang Li. *Advanced Optical Manufacture Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 Zheng Ligong, Zhang Xuejun, Zhang Feng. NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 113~117
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
- 3 Wang Guilin, Dai Yifan, Li Shengyi. Research on the determination for the abrasive disk's dimension in aspheric optics machining [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2004, **40**(1): 147~150
王贵林, 戴一帆, 李圣怡. 光学非球面加工中研抛盘尺寸合理选择的研究[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(1): 147~150
- 4 Fan Bin, Wan Yongjian, Chen Wei *et al.*. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 128~132
范斌, 万勇建, 陈伟等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 128~132
- 5 Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407
崔向群, 高比烈, 汪达兴等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- 6 Gao Bilie. The mathematical analysis for the active lap deformation on proceeding condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 525~532
高比烈. 对主动抛光盘在加工、测量状态下盘面的变形及提升的数学分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 525~532
- 7 Zhang Feng, Yu Jingchi, Zhang Xuejun. Magnetorheological finishing technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(5): 1~7
张峰, 余景池, 张学军. 磁流变抛光技术[J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(5): 1~7
- 8 You Weiwei, Peng Xiaoqiang, Dai Yifan. MR fluids for finishing use[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(3): 330~334
尤伟伟, 彭小强, 戴一帆. 磁流变抛光液的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(3): 330~334
- 9 L. N. Allen, R. E. Keim. An ion figuring system for large optic fabrication[C]. *Proc. SPIE*, 1989, **1168**: 33~50
- 10 Zhou Lin, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Machining reachability in ion beam figuring[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 160~166
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
- 11 Zhou Lin, Xie Xuhui, Dai Yifan *et al.*. An ion beam figuring system in NUDT[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6722**: 67224A-1~6
- 12 Zhou Lin, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Model and method to determine dwell time in ion beam figuring[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(2): 107~112
- 13 C. L. Carnal, C. M. Egert, K. W. Hylton. Advanced matrix based algorithm for ion beam milling of optical components[C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1752**: 54~62