

文章编号 1004-924X(2015)08-2220-09

气囊抛光过程的运动精度控制

王 飞*, 张 健, 彭利荣, 王高文, 隋永新

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室
超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对用于球面、非球面光学元件超精密光学加工的气囊抛光技术, 提出了一套控制抛光过程中气囊运动精度的方法。该方法通过控制加工单元的温度, 保证抛光过程中设备运动精度达到 $50\ \mu\text{m}$; 使用坐标传递法, 使检测数据二维方向对准不确定度达到 $0.30\sim 0.70\ \text{mm}$ 。另外, 基于磨头去除量估计与反馈修正法, 提高精抛过程面形误差收敛效率。最后, 通过磨头探测校准法, 将磨头与加工工件法向位置精度提高至 $10\ \mu\text{m}$ 。实际抛光实验显示: 使用运动精度控制法在 $280\ \text{mm}$ 口径的平面精密抛光中获得的面形加工精度为 $0.8\ \text{nm(RMS)}$, 在 $160\ \text{mm}$ 口径的凹球面精密抛光中获得的面形加工结果为 $1.1\ \text{nm(RMS)}$, 实现了超高精度面形修正的目的, 为超高精度球面、非球面光学元件加工提供了一套行之有效的办法。该方法同样适用于其他接触式小磨头数控抛光方法。

关键词: 光学加工; 气囊抛光; 运动精度; 球面抛光; 平面抛光

中图分类号: TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2220

Motion-precision control in bonnet-polishing

WANG Fei*, ZHANG Jian, PENG Li-rong, WANG Gao-wen, SUI Yong-xin

(*Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wangf@sklao.ac.cn*

Abstract: To meet the ultra-high precision manufacture demands of spherical surfaces and aspherical surfaces in an optical system of Deep Ultra Violet (DUV) and Extreme Ultra Violet (EUV), a series of motion-precision control methods in bonnet-polishing were proposed. Firstly, the temperatures of main operation units were finely controlled to allow the motion-precision of polishing to be to $50\ \mu\text{m}$. Then, the coordinates transmitting method was used to guarantee the two-dimension unity between measured data and operating data to be $0.30\text{--}0.70\ \text{mm}$. Furthermore, the convergence efficiency of surface-error in fine polishing was improved by bonnet removal estimation method and feedback correction method. Finally, the vertical position accuracy between bonnet and work piece was improved to $10\ \mu\text{m}$ by probing-correction method. The experiment results on a actual polishing by using motion-precision control methods indicate that the surface machining accuracy is $0.8\ \text{nm(RMS)}$ in polishing a

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2014-09-30.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2009ZX02205)。

flat with a diameter of 280 mm, and that is 1.1 nm(RMS) in polishing a concave with a diameter of 160 mm. The proposed methods realize ultra-high precision polishing for spherical surfaces and aspherical surfaces, and they are also suitable for other contact small tool computer controlled polishing.

Key words: optical manufacture; bonnet polishing; motion precision; sphere polishing; flat polishing

1 引 言

随着科技的发展,超精密光学元件在光学、电子、航空航天等诸多领域中的应用日益广泛,并且对光学元件的全频段面形精度要求越来越高,尤其在深紫外与极紫外高精度光学成像系统中,单个光学镜片的面形精度已要求达到纳米、亚纳米量级。同时,由于非球面光学元件具有可以减少系统中元件数量、减轻系统重量和体积、提高系统性能等优点,对其应用需求日益增强^[1-3]。现有深紫外与极紫外光刻物镜中都包含较多数量的超高精度非球面光学元件,面形精度需求达亚纳米量级^[4-9]。目前,超高精度球面与非球面光学元件的加工能力已经成为制约我国大规模集成电路制造业发展的主要瓶颈。

与球面、平面光学元件相比,非球面光学元件制造难度显著增加。首先,非球面光学元件铣磨的面形精磨难以使用范成法,只能采用单点磨削方式加工,从而增加了面形控制难度。其次,非球面元件的预抛光难以使用大盘抛光方法,只能采用小磨头抛光,导致铣磨工序残留的中频误差难以有效去除。再次,高精度的非球面检测必然采用波前补偿光学元件,而该补偿元件的制造难度大、成本高,且只能专用于同一个非球面方程下的非球面光学元件。为了解决非球面超精密抛光问题,多种计算机控制小磨头抛光技术相继被提出,如离子束抛光、磁流变抛光、小磨头自适应抛光、研抛力控制法抛光、数控化学机械抛光等^[10-18]。

气囊抛光技术是 20 世纪 90 年代伦敦光学实验室提出的一种新型小磨头精密抛光技术,其在 UK 粒子物理、天文学研究委员会和工商业的资助下,开展了一系列气囊抛光理论与技术研究,最终与英国 Zeeko 公司合作开发了 IRP 系列气囊抛光机床,为气囊抛光技术提供了产品化的应用平台,使气囊抛光技术得以快速发展^[19-23]。目前,国内已经有多家研究机构引进了 Zeeko 公司制造的 IRP

系列气囊抛光机床,通过一系列的联合研制和自主开发等工作,攻克了多项关键技术,使气囊抛光技术在球面、非球面及自由曲面超精密抛光工作中取得了显著成果^[24-25]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于 2011 年引进了 IRP600 型气囊抛光设备,首次在 280 mm 口径的平面及 160 mm 口径的球面精密抛光中获得了亚纳米量级超高面形加工结果。本文提出了一套气囊抛光过程中的运动精度控制法,为超高精度球面、非球面光学元件加工提供了一套行之有效的办法。

2 气囊抛光技术介绍

2.1 气囊磨头结构

气囊抛光方法采用气囊结构作为抛光模黏附基底,气囊为球形柔性膜,采用柔性编织物与橡胶混合压制而成,这种混合结构有助于气囊在充气时保持形状稳定,结构如图 1 所示。气囊磨头结构在精密抛光中具有以下优点:1)气囊与工件接触区域压力呈现平滑的高斯状分布特性,有利于获得高斯型去除函数和精确的加工过程解析模型,从而可提高面形修正收敛效率;2)气囊内部所充压缩空气压强可调节,形成一种弹性系数可控的磨头基底结构,极大地丰富了加工参数的可选择性;3)气囊磨头为凸球面,容易实现磨头与工件接触区域的良好吻合;4)气囊磨头可黏附多种抛

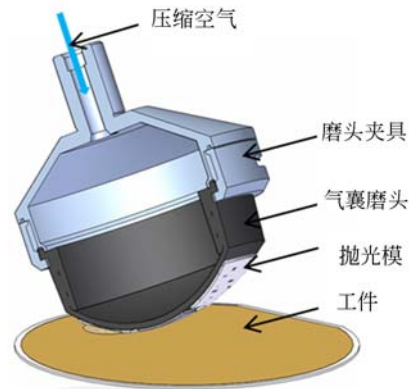


图 1 气囊磨头结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of bonnet tool

光模材料,操作简单可靠,拓展了气囊抛光法的应用范围。

2.2 气囊磨头旋转方式

气囊磨头抛光中通常可选择 3 种旋转方式,如图 2 所示。图 2(a)中,气囊旋转轴与工件法线夹角为 0° ,形成环状抛光痕迹,去除函数呈“W”状分布,加工收敛性较差,通常用于预抛光工序。图 2(b)中,气囊旋转轴与工件表面法线夹角一般为 $15^\circ \sim 20^\circ$,形成偏心环状抛光痕迹,去除函数呈偏心状类高斯分布,加工收敛性较强,已被广泛应用于英国 Zeeko 公司的 IRP 系列精密抛光设备中,取得了良好的加工结果。图 2(c)中,气囊磨头有 2 个旋转轴,其中一个旋转轴与工件表面法线夹角为 0° ,另一个旋转轴与工件表面法线形成一定夹角,可获得中心对称的类高斯分布去除函数,该种旋转方式回转体通常为偏心结构,不利于保持抛光气囊的位置稳定性,尚未进入产品化阶段。

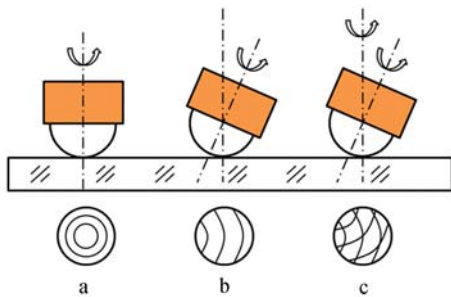


图 2 气囊磨头旋转方式示意图

Fig. 2 Rotating types diagrams of bonnet tool

2.3 气囊磨头去除函数模型

气囊抛光去除函数是磨头抛光驻留时间函数求解算法的基础,哈尔滨工业大学李洪玉等基于 Preston 假设和 Hertz 接触理论建立了气囊抛光去除函数模型^[25]。建立的材料去除量、压力和瞬时速度的线性关系为:

$$\frac{d\bar{z}}{dt} = k \cdot v \cdot p, \quad (1)$$

其中: k 为比例常数, v 为工件表面任一点瞬时抛光速度, p 为抛光压力。

定义去除函数 $R(x, y)$ 为不移动气囊磨头时单位时间 T 内的平均材料去除量,得到去除函数表达式为:

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta Z_r(x, y, t) dt, \quad (2)$$

其中: $\Delta Z(x, y, t)$ 为单位时间内材料去除量。

当压力及其它工艺条件不变时,抛光气囊的去除函数与相对运动速度 v_p 成正比,因此求得抛光区域内各点的相对运动速度 v_p 随转角 θ 的变化规律之后,在公转一周内对其积分即可得到气囊抛光区域内材料去除量的分布函数。公转周期 T 为 $2\pi/\omega$ 时,去除函数为:

$$R(r) = \frac{kp}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} v(x, y) d\theta. \quad (3)$$

2.4 加工路径规划及驻留时间算法

气囊抛光加工路径规划主要包括栅格路径、螺旋路径及自由路径。栅格路径规划由于求解驻留时间方便、路径运行简单而得到了广泛应用。驻留时间函数求解是根据磨头去除函数和被加工件面形误差进行的反卷积过程。2007 年哈尔滨工业大学针对气囊数控抛光法,提出了基于非周期矩阵模型的加权空间反卷积算法,在边缘控制及面形收敛效率方面取得了良好效果,加工面形达到了 8.2 nmRMS ^[24]。

螺旋路径规划存在工件旋转中心转速为 0 的情况,因此在求解驻留时间时存在奇异点,难以有效消除奇异点影响,限制了该种路径规划在高精度抛光中的应用。自由路径采用“一笔画”原则规划路径,以保证路径本身不相交,可以进行驻留时间控制^[26],有利于改善高频粗糙度指标。

2.5 其他工艺参数的选择

精密抛光是个复杂的加工过程,加工的影响因素很多,包括温度、压力、抛光液浓度、抛光液粒度、抛光模材料、被加工件材料、抛光磨头曲率半径、磨头转速、磨头刚度等十几项指标。因此,要想获得高精度面形加工结果,需要认真地分析加工因素的影响和采用严格的加工控制方法。国内学者在气囊抛光影响因素的研究中做了大量的工作并取得了良好进展^[27-29]。

3 运动精度控制法

国内外学者对于气囊抛光技术的研究报道大多关注于磨头去除函数、加工路径规划和加工参数变化等对去除函数的影响,对于实际加工中磨头运动精度控制方法未见报道,而磨头运动精度控制方法正是所有理论转化为应用的最终关键环节,是高效获得超高精度面形加工的必然保证。

磨头运动精度控制方法的主要目的是通过控

制,保证磨头在抛光过程中与工件的相对位置更加精确,从而保证气囊磨头在工件各接触区域去除函数更加稳定,进而提高面形修正效率并最终获得超高精度面形加工结果。为了保证磨头运动精度,可将加工影响因素划分为加工环境因素、加工数据精度因素及工件位置校准因素。

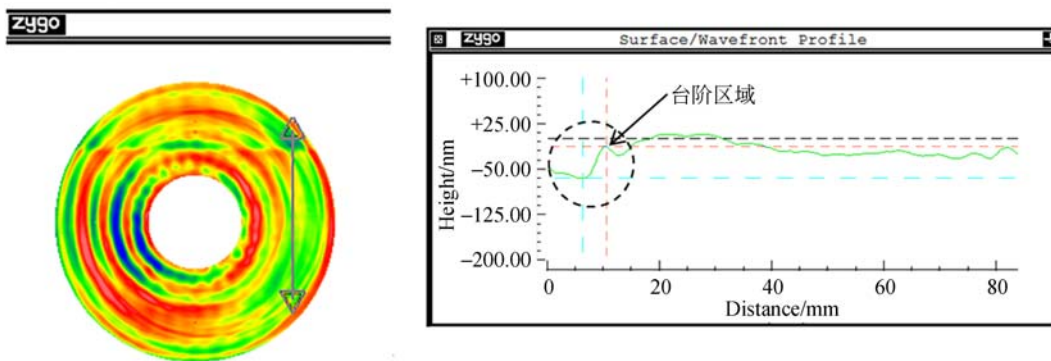
3.1 加工环境中的温度控制

加工环境中的温度控制关键控制区域包括:设备运动轴系、抛光液循环区域及加工区域,其中对磨头运动精度影响最明显的是设备运动轴系温度控制,抛光液温度对磨头去除函数影响较弱,加工区域温度影响设备整体稳定性。

加工设备运动精度是保证气囊磨头运动精度的基础,为了保证设备运动精度,加工设备运动轴系除了具有良好定位精度外,还需要对设备运动轴系实施温度控制。Zeeko 公司制造的 IRP 系列

气囊抛光机床充分考虑了加工过程气囊磨头运动精度控制,采用高精度运动导轨和温控系统,可在 200 mm 内的任意二维平面上实现优于 50 μm 的定位精度。为验证温度对运动轴系的影响,将运动轴系温控设备在一次抛光过程中先关闭一段时间再开启,抛光路径为栅格路径,加工结果如图 3 所示。数据上半部出现一个横向台阶状跃变,跃变出现的时间即开启温控设备的时间。在加工结果竖直方向截取一段包含跃变的数据,可以看到温度变化对加工结果的影响达到 53 nm PV,该过程中温度变化量为 4 $^{\circ}\text{C}$ 。为了保证设备轴系运动精度,轴系温控系统温度变化需控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

抛光液循环系统具有 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 温控能力,对气囊磨头去除函数基本没有影响。加工区域温度变化主要影响设备整体框架变形,通常 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的室温控制可满足高精度抛光需求。



(a) 加工结果 (a) Polishing result
(b) 温度变化引入的面形误差 (b) Surface error caused by temperature change

图 3 温度对抛光结果的影响

Fig. 3 Influence of temperature on polishing work

3.2 加工数据精度控制

加工数据误差主要来源于检测数据的位置对准精度、检测数据的检测精度和磨头抛光去除量的估测精度。

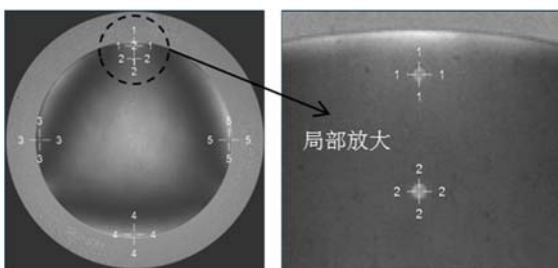


图 4 坐标传递法示例

Fig. 4 Demonstration of coordinates transferring method

由于检测数据与加工数据是在两个独立坐标系下获取的,因此需要两个坐标系之间实现精密位置对准。坐标系间位置对准通常关注的要素为长度缩放比例、位置同心度、旋转方向对准度及坐标系方向一致性,最简易的对准方式是采用坐标传递法。坐标传递法是指通过加工设备在被加工表面边缘附近的同心圆上,制作至少 2 个过工件圆心的标记点,此时的标记点可携带加工设备的空间长度信息、方向信息和工件的中心位置信息,如图 4 所示。利用加工设备在镜面上做了 5 个标记点,其中 1、3、4、5 号标记点在一个同心圆上,可标定数据中心、旋转方向和像素宽度,2 号标记点用于标记坐标系方向。增加标记点数量有助于提

高位置对准精度。

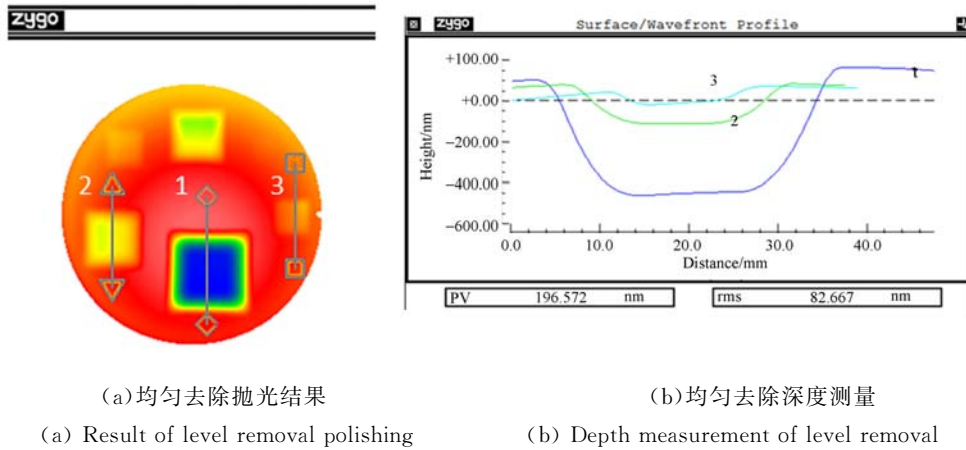
加工设备标记精度 u_1 可达 0.05 mm, 检测设备标记精度 u_2 为 2 个像素, 通常每个像素代表的宽度在 0.15~0.35 mm 内随工件曲率半径和参考镜的选择变化。因此, 检测数据的二维空间位置不确定度 u 可按式(4)合成, u 的取值为 0.30~0.70 mm:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (4)$$

面形检测精度是制约加工精度的最关键指标, 为了获得超高精度的加工结果, 必须具有超高精度的检测能力。本文的超高精度面形检测平台具备 0.1 nmRMS 的检测复现性, 可充分保证检

测数据的精度。

磨头抛光去除函数的估测精度决定了每轮加工的面形误差收敛效率, 需要精确评估。首先采用局部区域均匀去除法做初步评估, 即在一个与被加工件材料相同的平面样件上, 选择若干方形区域, 对可能采用的气囊压入量进行均匀去除加工, 将均匀去除深度作为评估气囊磨头去除量的基本参考值, 如图 5 所示。图 5(a)中, 检测数据为加工前后数据相减结果, 区域 1、2、3 分别为气囊压入量 0.3、0.15 和 0.05 mm 时, 局部区域均匀去除造成的凹陷区。凹陷区深度通过截取数据进行测量, 如图 5(b)所示。



(a) 均匀去除抛光结果

(b) 均匀去除深度测量

(a) Result of level removal polishing

(b) Depth measurement of level removal

图 5 均匀去除法评估去除量

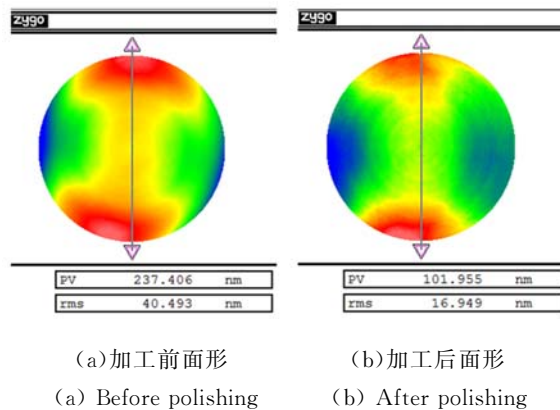
Fig. 5 Removal estimation by uniformity polishing method

由于相同气囊磨头与不同曲率半径工件的接触区域不同, 均匀去除法获得的参考值需要在获得第一次加工结果后, 根据加工前后面形变化进行适度修正, 如图 6 所示。将加工前与加工后的数据进行对比, 发现低频面形高点和低点区域位置基本不变, 将这种面形修正结果称为欠量加工, 若面形高点和低点位置发生反转则称为过量加工。此时, 可根据这次加工结果对加工去除量进行修正, 欠量加工时去除量的修正方法如式(5)所示, 过量加工时去除量的修正方法如式(6)所示:

$$R_1 = R_0 \cdot (1 - Z_1 / Z_0), \quad (5)$$

$$R_1 = R_0 / (1 + Z_1 / Z_0), \quad (6)$$

式中: R_1 为修正后的气囊磨头去除量, R_0 为均匀去除法估计的气囊磨头去除量, Z_0 为加工前工件低频面形的 PV 值, Z_1 为加工后工件低频面形的 PV 值。



(a) 加工前面形

(b) 加工后面形

(a) Before polishing

(b) After polishing

图 6 一轮精密抛光前后面形检测结果

Fig. 6 Results of before and after polishings

由于同一工件每轮加工中, 加工条件变化较少, 因此所有加工条件变化可归结为对加工去除量的影响, 通过这种去除量修正方式进行迭代加

工,可明显提高面形精抛收敛效率。

3.3 气囊磨头位置校准法

气囊磨头的最佳压入量为 0.15~0.3 mm。由于设备在 200 mm 的任意二维空间定位精度为 50 μm,再考虑到加工工装引入的倾斜因素,通常可使气囊磨头在抛光过程中压入量的波动达到 0.1 mm 量级,严重影响了加工过程面形修正的收敛速度,因此必须进一步精确矫正磨头和工件的位置关系。Zeeko 公司的 IRP 系列气囊抛光设备具有气囊磨头力学位置探测功能,因此可充分利用这一特点探测气囊磨头顶点曲率半径和气囊磨头与工件的位置误差,然后对其进行补偿。

气囊磨头顶点曲率半径的测量通过标准球标定法实现。首先,将标准球工具装入磨头装夹位置,利用标准球探测工件台上的平面样件,获得 Z 向坐标值 Z_0 。然后,取下标准球工具,将气囊磨头装入磨头装夹位置,再次探测工件台的同一平面样件,获得 Z 向坐标值 Z_1 。由于标准球的直径已知,标准球和气囊磨头装夹后同心,因此气囊磨头顶点曲率半径为:

$$R = Z_1 - Z_0 + R_0, \quad (7)$$

式中: R 为气囊磨头顶点曲率半径, R_0 为标准球曲率半径。检测结果的重复性如图 7 所示。图 7 为 20 个气囊磨头顶点曲率半径检测结果减去均值后获得的数据,数据标准偏差为 2.5 μm。

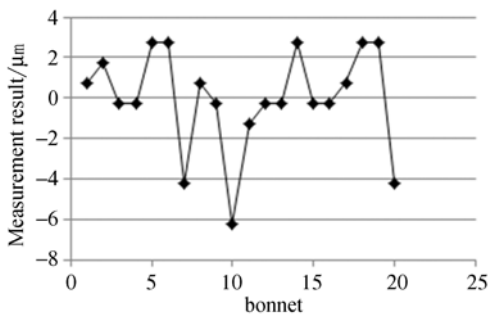
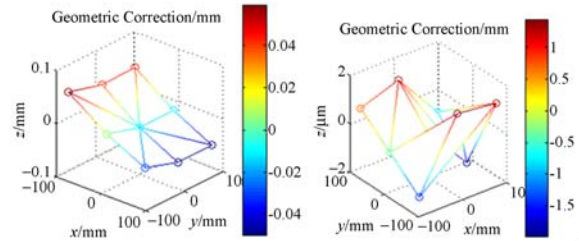


图 7 气囊磨头顶点曲率半径测量重复性结果

Fig. 7 Repeatability of bonnet apical-radius measurement

气囊磨头与工件的位置误差通过探测补偿法实现。将气囊磨头作为探头,探测工件上若干点位置,由于加工工装加工精度问题,探测结果通常带有明显的倾斜偏差,如图 8(a)所示。平面工件的倾斜通过调整气囊磨头摆轴倾角补偿,球面倾斜通过平移工件坐标系补偿。补偿后,气囊磨头与工件的法向位置误差可由 100 μm 减小至 10

μm 以内,如图 8(b)所示。此时,若采用 0.15 mm 的气囊磨头压入量,则由位置偏差引入的相对不确定度由 66.7% 下降至 6.7%,显著提高了气囊磨头与工件的位置精度,确保了加工过程去除函数的稳定性。



(a) 补偿前探测结果 (b) 补偿后探测结果
(a) Before correction (b) After correction

图 8 气囊磨头与工件位置偏差补偿前后结果

Fig. 8 Results of before and after corrections for reducing position error between bonnet and work piece

4 实验结果

为了验证气囊抛光运动精度控制方法的加工效果,分别采用 280 mm 口径的平面及 160 mm 口径的凹球面进行气囊磨头精密抛光测试,加工结果分别如图 9 和图 10 所示,其 RMS 值分别达到 0.8 nm 和 1.1 nm。加工中,面形收敛过程如图 11 所示。

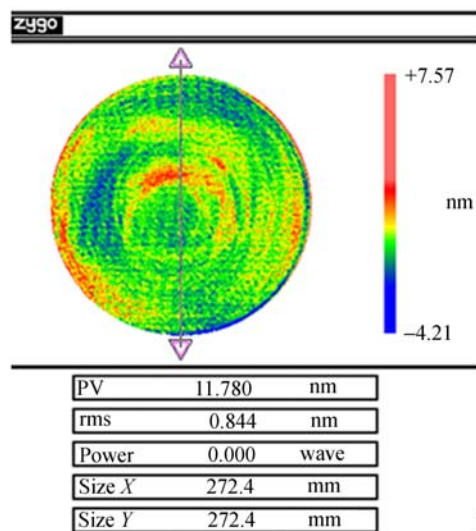


图 9 平面精密抛光结果

Fig. 9 Results of flat polishing

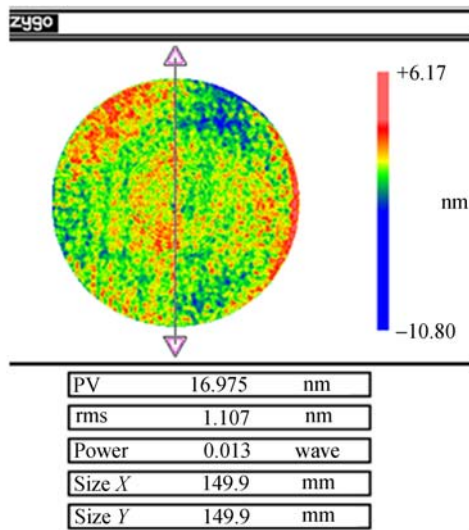


图 10 凹球面精密抛光结果

Fig. 10 Results of concave polishing

5 结 论

本文针对气囊抛光加工过程中气囊运动精度控制方法进行了详细分析和论述,通过控制加工设备运动精度、加工数据对准精度以及气囊磨头位置精度等方法,使加工数据对准精度达到 0.30~0.70 mm,使磨头在加工过程中与工件的法向

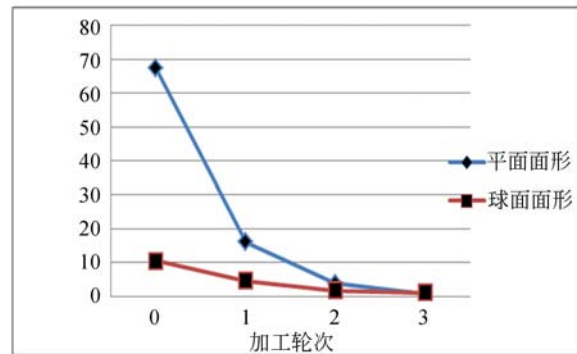


图 11 面形收敛过程结果

Fig. 11 Results of correction polishing

位置相对偏差缩小至 10 μm 以内,实现了气囊抛光法的超高精度面形修正能力,利用气囊抛光设备获得了 0.8 nm (RMS) 的面形修正结果,为超高精度球面、非球面光学元件加工提供了有效方法。同时,本文所述的气囊运动精度控制方法同样适用于其他接触式小磨头数控抛光方法,具有较强的普适性。

参考文献:

- [1] 师途,杨甬英,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. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 王孝坤,王丽辉,邓伟杰,等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3):520-528.
WANG X K, WANG L H, DENG W J, *et al.*. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 520-528. (in Chinese)
- [4] KERKHOF M. Full optical column characterization of DUV lithographic projection tools [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, 5377: 1960-1970.
- [5] KAMEYAMA M. Immersion and 32 nm lithography: Now and future [J]. *Proc. of SPIE*, 2007, 6724:0277786X1-6.
- [6] WEISER M. Ion beam figuring for lithography optics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2009, 269(8-9):1390-1393.
- [7] GARREIS R. Catadioptric optics enabling ultra-high NA lithography [C]. *Selete and Sematech. Hyper-NA Session. 3rd International Symposium on Immersion Lithography, Kyoto, 2006*: 34-35.
- [8] 杨力. 现代光学制造工程[M]. 北京:科学出版社, 2008.
YANG L. *Modern Optical Manufacturing Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

- [9] ZEISS C. Very high aperture projection objective, US:7339743[P]. 2005-06-30.
- [10] JONES R A. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing[J]. *Opt. Eng.*, 1991, 30(11): 1962-1969.
- [11] LAGUARTA F, LUPON N, VEGA F, *et al.*. Laser application for optical glass polishing[C]. *SPIE*, 1996, 2775: 603-612.
- [12] 戴一帆,周林,谢旭辉,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): 1132-1137.
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): 1132-1137. (in Chinese)
- [13] POLLICOVE H M. Next generation optics manufacturing technologies [C]. *SPIE*, 2000, 4231:8-15.
- [14] 彭小强,戴一帆,唐宇. 基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):100-105.
PENG X Q, DAI Y F, TANG Y. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 100-105. (in Chinese)
- [15] 张健,代雷,王飞,等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822002-1-7.
ZHANG J, DAI L, WANG F, *et al.*. Restraint of mid-spatial-frequency error asphreic surface by small-tool adaptive polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0822002-1-7. (in Chinese)
- [16] 史永杰,郑堤,王龙山,等. 非球面精密数控研抛中研抛力的控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1013-1021.
SHI Y J, ZHENG D, WANG L SH, *et al.*. Polishing force control in precise NC polishing of aspheric parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1013-1021. (in Chinese)
- [17] 张峰. 非球面碳化硅表面硅改性层的数控化学机械抛光[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12):3015-3020.
ZHANG F. Computer-controlled chemical mechanical polishing of silicon modification layer on aspheric silicon carbide surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3015-3020. (in Chinese)
- [18] 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种中小口径非球面元
- 件数控抛光技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):198-204.
- XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):198-204. (in Chinese)
- [19] BINGHAM R G, WALKER D D, KIM D H, *et al.*. A novel automated process for aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2000, 4093: 445-451.
- [20] WALKER D D, BROOKS D. The first aspheric form and texture results from a product ion machine embodying the precession process [C]. *SPIE*, 2001, 4451:267-277.
- [21] WALKER D D, FREEMAN R, CAVANA G, *et al.*. The Zeeko/ UCL process for polishing large lenses and prisms [C]. *SPIE*, 2002, 4411: 106-112.
- [22] WALKER D D, BEAUCAMP A, BROOKS D, *et al.*. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2002, 4767: 99-106.
- [23] WALKER D D, BEAUCAMP A, BROOKS D, *et al.*. New results from the precessions polishing process scaled to larger sizes [C]. *SPIE*, 2004, 5494: 71-81.
- [24] 张伟,李洪玉,于国彧. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 27-34.
ZHANG W, LI H Y, YU G Y. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1):27-34. (in Chinese)
- [25] 李洪玉,张伟,于国彧. 空间光学元件超精密气囊抛光的去除特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(3):811-817.
LI H Y, ZHANG W, YU G Y. Removing characteristics of ultraprecise bonnet polishing on spatial optics elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3):811-817. (in Chinese)
- [26] WALKER D D, BEAU CAMP A, DOUBROVSKI V, *et al.*. New developments in the precessions process for manufacturing freeform, large-optical, and precision mechanical surfaces [C]. *SPIE*, 2005, 6148: 51-60.
- [27] 王春锦,郭隐彪,王振忠,等. 光学元件气囊抛光系统动态去除函数建模[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 19-25.

- WANG C J, GUO Y B, WANG ZH ZH, *et al.*. Dynamic removal function modeling of bonnet tool polishing on optics elements [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17):19-25. (in Chinese)
- [28] 金明生, 计时鸣, 张利, 等. 连续进动气囊抛光行间距优化及实验研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(7):861-865.
- JIN M SH, JI SH M, ZHANG L, *et al.*. Line spacing optimization and experimental research of gasbag polishing with continuous precession[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(7):861-865. (in Chinese)
- [29] 潘日, 王振忠, 王春锦, 等. 自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制技术[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(3):186-193.
- PAN R, WANG ZH ZH, WANG CH J, *et al.*. Control techniques of bonnet polishing for free-form optical lenses with precession[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(3):186-193. (in Chinese)

作者简介:



王 飞(1979—),男,黑龙江伊春人,博士,助理研究员,2002年、2004年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事超精密光学加工工艺方面的研究。E-mail: wangf@sklao. ac. cn



张 健(1983—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2006年于长春理工大学获得学士学位,2011年于中科院长春光机所获得博士学位,主要研究方向为现代光学制造。E-mail: jzhang@sklao. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)