

文章编号 1004-924X(2005)02-0198-07

一种中小口径非球面元件数控抛光技术

薛栋林^{1,2}, 张忠玉¹, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:基于自主设计研制的 FSGJ-3 型非球面数控加工中心, 针对口径 $\phi 108$ mm 凸非球面透镜(曲率半径 $R = 318$ mm, $k = -3$), 研究了非球面粗抛光工艺、精抛光工艺、抛光设备、磨料以及相关工艺参数, 提出了规范的中小口径非球面加工的工艺方法和新型轮式抛光技术, 实现了中小口径非球面元件的数控快速精密铣磨成型, 且保证了光学零件具有较高的面形精度。抛光后元件面形精度达到 0.306λ (PV)、 0.028λ (RMS) ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。满足了在光学系统中使用非球面零件, 明显改善像质, 提高光学特性, 减少光学零件数目, 从而简化系统结构, 减小系统体积, 减轻系统质量的目的。

关键词:非球面透镜; 轮式抛光技术; 面形精度

中图分类号: TQ171.68 **文献标识码:** A

Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens

XU E Dong-lin^{1,2}, ZHANG Zhong-yu¹, ZHANG Xue-jun¹

(1. *OTRC of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: Based on aspheric computer controlled manufacturing center (FSGJ-3), as for $\phi 108$ mm aspheric lens ($R = 318$ mm, $k = -3$), the polishing equipment, tools, abrasives and testing method used in polishing are researched. Wheeled polishing technology for the middle or small aspheric lens is introduced. It's showed that the final surface figure of the lens is 0.306λ (PV)、 0.028λ (RMS) ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$). Discussing and analyzing the key technology of middle or small aspheric lens in detail, supplies a basic technology guarantee for aspheric optical component to reduce the size, weight and complexity of decreasing the number of surfaces required to form unaberrated images.

Key words: aspheric lens; wheeled polishing technology; surface figure

收稿日期: 2005-01-14; 修订日期: 2005-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 60178037)

1 引言

在光学系统中使用非球面零件,可以明显改善像质,提高光学特性,减少光学零件数目,从而简化系统结构,减小系统体积,减轻系统的质量^[1-2]。

近年来,中小口径非球面光学零件在军用和民用产品上的应用也越来越普及。如红外广角地平仪中的锗透镜、变焦照相机镜头、显示投影系统中的镜头、刻录机光头等。中小型非球面光学元件的加工技术近几年来有了一定的发展,如中小型非球面的数控研磨成型、离子束抛光法、模压成型法、真空镀膜法等^[3-4]。中小口径的非球面的生产工艺,主要可分为3个阶段,精密铣磨成型、精密抛光和中间过程的定量数据检测。目前,国际上像美国的 Rochester 大学和德国 LOH 公司等,利用计算机自动控制技术,实现非球面元件的快速精密铣磨成型,并且能够保证光学零件具有较高的面形精度。然而如何对铣磨成型后的元件进行快速确定性抛光,是制约中小口径非球面元件低耗快速生产的瓶颈^[5-6]。

由于实践应用中的多样性,对元件抛光工艺和设备提出了许多难以解决的技术问题。国际上许多国家都开展了这方面的研究工作^[3,6-9],美国的 Rochester 大学研究利用计算机控制固着磨料抛光头对非球面元件进行抛光,得到了很高的材料去除率和加工效率。德国的 LOH 光学机械公司和英国 Taylor-Hobson 公司等也相继开展了非球面抛光方法的研究,取得了很大进展。长春光机所从 1992 年开始就开展了基于小磨头数控加工技术的研究,并研制第1代、第2代和第3代非球面数控光学加工中心。

本文结合实际工程任务,依托德国 LOH 公司生产的 SPM120SL 非球面精密

铣磨设备和自主开发研制的新型非球面抛光机,探讨如何对精密铣磨成型后的中小口径非球面元件进行快速确定性抛光,使其满足设计要求。

2 非球面数控抛光技术的理论基础^[10]

使用散粒磨料对光学材料进行研磨、抛光的物理过程比较复杂,很难找到和表面去除量有关参数之间的确定性数学关系,到目前为止对这个过程描述比较成功的数学模型还是 Preston 假设:

$$\Delta Z(x, y) = k P(x, y) V(x, y), \quad (1)$$

$\Delta Z(x, y)$ 为磨头与工件接触区域中某点 (x, y) 单位时间内的材料去除量;

$P(x, y)$ 为磨头与工件间的相对压力;

$V(x, y)$ 为磨头与工件间的相对运动速度;

k 为与加工过程有关的比例常数(温度、磨头材料等)。

在这个假设条件下,可以认为磨头与工件间相互作用的小区域内,磨头对工件表面材料的去除量与压力、相对速度以及驻留时间成正比。利用计算机的数字控制技术,精密控制多维机构职能部件的运动,从而实现小工具磨头,精密重复、多次修琢较大口径非球面元件表面,使被加工表面的面形精度逐步收敛,最终实现非球面元件的数控加工。

3 口径 $\phi 108$ mm 凸非球面元件数控抛光工艺研究

计算 50 机数控光学表面成形技术(简称 CCOS 技术),它根据定量的面形检测数据,在上述加工模型的基础上,用计算机控制小磨头在工件表面的驻留时间以及在一定的压力下磨头与工件间的相对速度,对

光学表面进行研磨和抛光。我们曾经研制了 FSGJ-1 和 FSGJ-2 型非球面数控加工中心,成功地解决了口径在 $\varnothing 200 \sim \varnothing 1\,000$ mm 非球面的数控加工技术。

对于口径 $\varnothing 200$ mm 以下非球面,要求磨头尺寸大小为几十 mm 或更小,此时小工具磨头与被加工元件口径比例关系失调,利用上述工作方式将无法得到稳定的工作速度、加工力和吻合性,因此小磨头对其不再具有良好的加工修琢能力。因此,必须对上述工作模式进行改进,才能更有效地实现对中小口径非球面的加工。

本文研究采用了一种新型的轮式抛光技术用于实现中小口径非球面元件加工,其工作原理如图 3 所示,此结构特点在于它成功地得到了一个近似于点或线大小的工作磨头,利用计算机实时控制,非常有效地实现了对非球面元件表面的修琢加工效应。而此模型下非球面加工工艺过程如下:第 1 步:首先进行非球面数控铣磨成型,得到具有一定精度的非球面毛坯;第 2 步:以轮廓仪测量结果为指导,对非球面元件进行数控快速均匀粗抛光,实现对铣磨后的表面破坏层的去除和表面光洁度的提高,得到稳定的面形精度以便进行激光干涉测量;第 3 步:在数字波面干涉仪的测量结果指导下,实现非球面的数控精抛光。

3.1 非球面数控铣磨成型

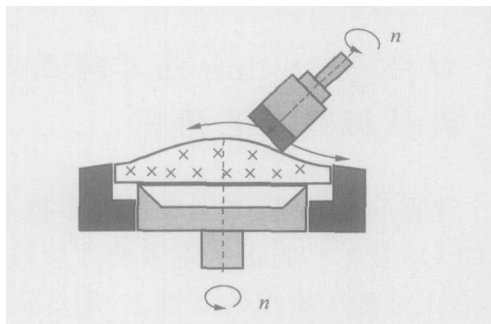


图 1 数控铣磨原理示意图

Fig. 1 Configuration of grinding equipment

德国 LOH 公司生产的 SPM120SL 非球面精密铣磨设备的工作原理如图 1 所示,利用计算机自动控制技术,实现非球面元件的快速精密铣磨成型,能够保证光学零件具有一定的面形精度。采用该设备对 $\varnothing 108$ 凸非球面透镜元件进行精密铣磨成型后,非球面元件的母线轮廓检验结果如图 2 所示。

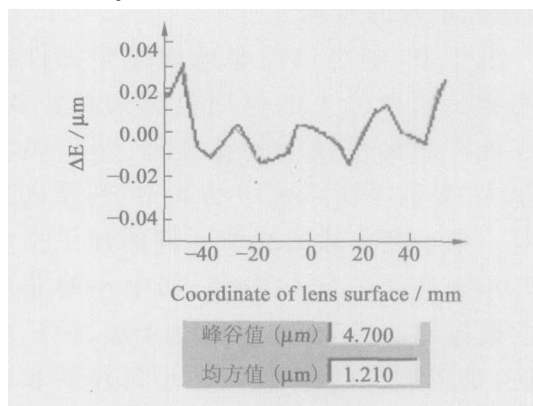


图 2 母线轮廓检验结果

Fig. 2 Tested result of X-profile of the surface

3.2 非球面数控粗、精抛光工艺

经过精密铣磨成型后,非球面凸透镜具有一定的面形精度,进入下一步粗抛光和精抛光工序,数控抛光是制造过程的关键部分,抛光后元件表面的面形精度和表面质量被修正到设计要求。

3.2.1 FSGJ-3 型非球面数控加工中心

自主开发设计的 FSGJ-3 型非球面数控抛光设备工作原理如图 3 所示:它是由计算机控制的四轴数控系统,即二维 X、Y 轴移动、工件转动、抛光轴转动 4 个自由度的实时四轴数控联动系统,软件采用自主开发的应用程序,将定量测试的非球面轮廓或面形误差分布准确地生成数据控制文件,用于完成口径 $\varnothing 200$ mm 以下非球面元件的快速抛光。其设备床身采用天然花岗岩石材料制造;运动部件为精密级直线滚动导轨,驱动方式为滚珠丝杠副;采用复合材料制作柔性抛光头,具有良好的弹性和耐磨特性;位置反馈装置采用德国 HEF

DENHAIN 公司的测量光栅,其最小分辨率为 $\pm 1 \mu\text{m}$,数控系统采用 DELTA TAU 公司的可编程多轴运动控制器 (PMAC),通过系统总线与 PMAC 通讯,用高精度的编码器和光栅实现系统反馈控制。

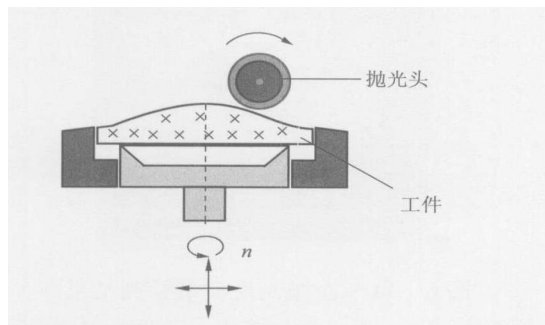


图 3 数控抛光设备原理示意图

Fig.3 Configuration of polishing equipment

3.2.2 非球面数控粗抛光工艺

$\phi 108 \text{ mm}$ 凸非球面元件经数控铣磨成型后,虽然具有一定的面形精度,但表面仍然存在一定的铣磨痕迹和微观表面破坏层,首先必须对元件进行数控粗抛光加工。在此工序操作过程中,依据轮廓仪检验结果,对元件表面进行快速均匀抛光。数控铣磨后母线轮廓检验结果如图 2 所示;经过第 1 次数控粗抛光工艺循环后母线轮廓检验结果如图 4 所示;经过第 2 次数控粗抛光工艺循环后母线轮廓检验结果如图 5 所示;再经过多个工艺循环后的母线轮廓检验结果如图 6 所示。从图形和数据显示,

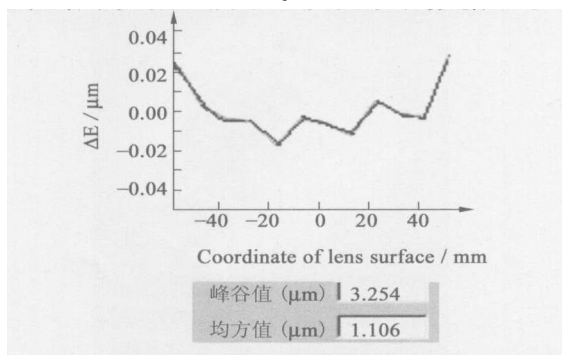


图 4 一次抛光后检测结果

Fig.4 Tested result of X-profile after the first polishing period

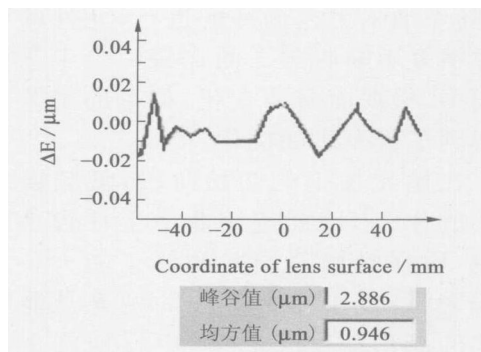


图 5 二次抛光后检测结果

Fig.5 Tested result of X-profile after the second polishing period

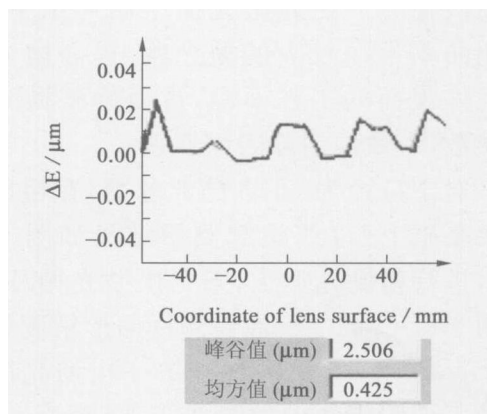


图 6 多次抛光后检测结果

Fig.6 Tested result of X-profile after several polishing period

非球面元件的面形精度略有提高,而元件的表面微观质量得到了明显的改善,整个过程有效地实现了均匀快速抛光的目的。

3.2.3 非球面数控精抛光工艺

利用自主开发的应用程序将 ZYGO 数字波面干涉仪测得的面形误差分布准确地生成数据控制文件,指导数控抛光设备对元件进行精抛光。由元件材料去除的数学模型 Preston 方程可知:抛光过程中,去除速度是由磨具与工件间的相对压力和机床转速决定的。采用轮式抛光技术,由于磨头和工件之间的弹性作用,导致相对压力较小,但抛光轮转速很快,因此能够产生较

大的去除效率。采用氧化铈作为抛光磨料,随着加工工艺循环的进行,元件的表面面形精度不断收敛。而在每一个工艺循环过程中,根据面型的变化,相关的工艺参数都得到了进一步的优化。

在抛光加工的初始阶段,低频误差占主要成分^[11],因此选用曲率半径较小的抛光轮,增强对局部误差的修正能力。加工实践表明:较小曲率半径的抛光盘能够跟踪工件面形的变化趋势,更好地修正局部误差,使工件表面形状精度在较短时间内达到规定指标,但它产生的表面波纹度比较明显,从而引入表面的中高频误差,产生高级像差。在此抛光加工循环结束后,选用曲率半径较大的抛光轮,提高抛光轮与工件表面的工作面积,重新修整抛光工艺参数,有效地消除表面残差。

对于口径为 $\phi 108$ 凸非球面,在粗抛光结果基础上(母线轮廓测量结果如图 6 所示),进行精抛光加工,第 1 次抛光循环后,使用 ZYGO 数字干涉仪测量面形精度如图 7 所示,第 2 次、第 3 次和第 4 次抛光循环后的干涉测量结果如图 8、9、10 所示,可见面形精度得到了快速的收敛。

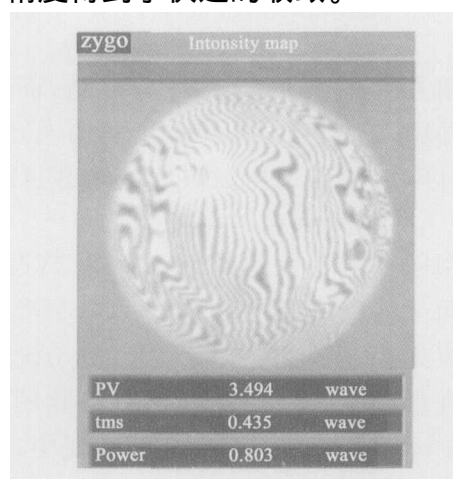


图 7 第 1 次抛光后面形检测结果

Fig. 7 Tested result of the surface after the first polishing period

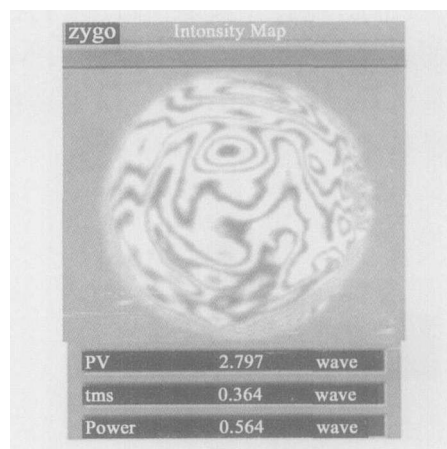


图 8 第 2 次抛光后面形检测结果

Fig. 8 Tested result of the surface after the second polishing period

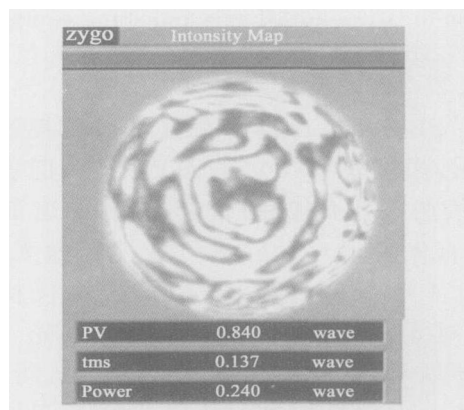


图 9 第 3 次抛光后面形检测结果

Fig. 9 Tested result of the surface after the third polishing period

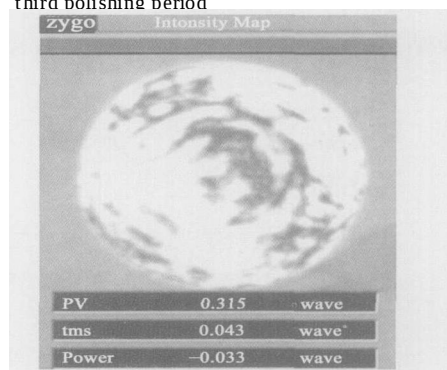


图 10 第 4 次抛光后面形检测结果

Fig. 10 Tested result of the surface after the fourth polishing period

4 实验结果

利用自主开发的应用程序将定量测试的非球面轮廓或面形误差分布准确地生成数据控制文件,利用计算机控制数控抛光设备工作,完成镜面数控精抛光后,经干涉检验可以获得镜面最终面形精度为 $0.306 \lambda(\text{PV})$ 、 $0.028 \lambda(\text{RMS})$ (如图 11 所示),满足设计要求。

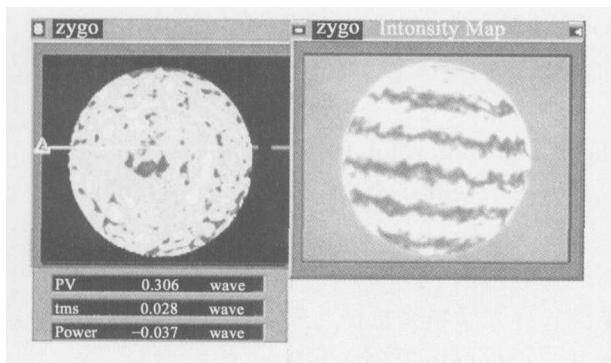


图 11 最终检测面形结果

Fig. 11 Final result of the surface

5 结 论

本文结合口径 $\phi 108 \text{ mm}$ 实际工程应用的非球面透镜元件 (曲率半径 $R = 318 \text{ mm}$, $k = -3$), 探讨了中小口径非球面元件加工和检测技术。首先利用 LOH 铣磨设备对镜面进行精确铣磨成型, 然后采用非球面快速抛光设备对镜面进行粗抛光、最后利用自主开发的应用程序将定量测试的非球面轮廓或面形误差分布准确地生成数据控制文件, 采用计算机控制设备进行数控精抛光。同时对每一个工艺循环中的工艺参数进行了不同程度的优化, 引入传统加工工艺的实际经验, 并针对抛光轮大小对元件表面中高频的影响以及抛光轮进给量对表面残余痕迹的影响进行深入的研究。结果经过了 7 个加工周期后, 口径 $\phi 108$ 凸非球面元件最终面形精度达到 $0.306 \lambda(\text{PV})$ 、 $0.028 \lambda(\text{RMS})$ 。满足工程研究的需要, 实现了中小口径非球面的快速加工。

参考文献:

- [1] GILLMAN B E, JACOBS S D. Bound-abrasive polishing for optical glass[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(16): 3498-3505.
- [2] 杨福兴. 非球面零件超精密加工技术[J]. *航空精密制造技术*, 1997, 33(5): 4-7.
YANG F X. Ultraprecision machine technology of aspheric[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1997, 33(5): 4-7. (in Chinese)
- [3] 罗松保, 孙建明. 非球面曲面光学元件超精密加工装备与技术[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(1): 75-79.
LUO S B, SUN J M, et al. Ultraprecision machine equipment and technology of aspheric optics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 75-79. (in Chinese)
- [4] 庞长涛, 罗松保. 非球面加工先进技术[J]. *航空精密制造技术*, 2001, 37(3): 1-5.
PANG CH T, LUO S B. Advanced aspheric surface machining technology[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2001, 37(3): 1-5. (in Chinese)
- [5] 张忠玉, 王权陡. 真空自励研磨抛光工艺的研究[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9 (3): 238-241.
ZHANG Z Y, WANG Q D, et al. Polishing technology of vacuum-induced lap[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9 (3): 238-241. (in Chinese)
- [6] 张忠玉, 张学军. 中小口径非球面元件加工技术的探讨[J]. *光学技术*, 2001, 27(6): 524-525.

- ZHANG Z Y, ZHANG X J, *et al.* Discussion on the fabrication technology of middle and small size aspheric optics element[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 524-525. (in Chinese)
- [7] 孙新民, 李树文. 四轴球体研磨机超精密研磨的机理及试验[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 46-50.
SUN X M, LI S H, *et al.* Mechanism and experiment of superprecision ball lapping for the four shafts lapping machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(1): 46-50. (in Chinese)
- [8] 李全胜, 成晔. 光学自由曲面数控加工方法[J]. 光学技术, 1998, 11(6): 77-81.
LI Q S H, CHENG Y, *et al.* NC fabrication method of optical free-form surface[J]. *Optical Technique*, 1998, 11(6): 77-81. (in Chinese)
- [9] 周旭升, 戴一帆. 非球面加工机床的设计[J]. 设计与研究, 2004, (5): 55-57.
ZHOU X S H, DAI Y F, *et al.* Design of an aspheric surface machine tool[J]. *Design and Research*, 2004(5): 55-57. (in Chinese)
- [10] 范镒, 张忠玉. 反应烧结碳化硅球面反射镜的光学加工与检测[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 6-8.
FAN D, ZHANG Z Y, *et al.* Optical surfacing of spherical reaction-burned silicon carbide (RB-SiC) mirror [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(1): 6-8. (in Chinese)
- [11] 王贵林, 戴一帆. 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.
WANG G L, DAI Y F, *et al.* Research on the determination for the abrasive disk's dimension in aspheric optics machine[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(1): 147-150. (in Chinese)

作者简介: 薛栋林(1979 -), 男, 江苏靖江人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 从事光学超精密加工和检测技术研究。Email: xuedonglin08 @sohu.com