

## 高精度离轴非球面透镜的制造与检测

钟波<sup>1,2</sup>, 陈贤华<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 周炼<sup>1</sup>, 石琦凯<sup>1</sup>, 邓文辉<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

2. 电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 针对强激光系统所需大口径非球面元件高精度、批量化的加工需求, 提出了一种气囊抛光技术与柔性沥青小工具抛光技术相结合的大口径非球面元件高效制造方法。采用气囊抛光技术进行非球面保形抛光和快速修正抛光, 实现磨削缺陷层快速去除以及低频误差快速修正。采用柔性沥青工具匀滑抛光技术, 在低频误差不被恶化的情况下, 控制元件中高频误差。在抛光过程中, 利用球面干涉仪搭建的自准直波前干涉检测系统和粗糙度仪对非球面元件进行全频段误差检测。基于上述加工与检测方法完成了 430 mm×430 mm 口径离轴非球面透镜样件实验加工, 实验结果为元件通光口径内透射波前  $PV=0.1\lambda$ ,  $GRMS=5.7$  nm/cm,  $PSD1$   $RMS=1.76$  nm,  $PSD2$   $RMS=1$  nm,  $Rq=0.61$  nm, 并且中频段功率谱密度曲线均在要求的评判曲线之下。实验结果表明, 离轴非球面透镜样件全频段指标均达到了合格指标要求。所述制造方法也适用于其他类型大口径非球面光学元件的高精度加工。

**关键词:** 先进光学制造; 全频段误差; 气囊抛光; 沥青抛光

中图分类号: TQ171.6 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0718003

## Fabrication and test of high-precision off-axis aspheric lens

Zhong Bo<sup>1,2</sup>, Chen Xianhua<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>1</sup>, Zhou Lian<sup>1</sup>, Shi Qikai<sup>1</sup>, Deng Wenhui<sup>1</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement of high precision and mass manufacturing of large aspheric lens for high power laser device, a novel manufacturing method combining the bonnet polishing (BP) technology and flexible pitch polishing (FPP) technology was explored. Firstly, after the aspheric generating by ultra-precision grinding, the bonnet polishing technology, in keeping the aspherical surface shape, was used to quickly remove the grinding defect layer and improve the roughness of the element so that it can be directly tested by interferometer. Then, the bonnet polishing technology was used to quickly correct the low frequency error. Finally, the flexible pitch tool was adopted to smooth the middle and high frequency error. During the polishing process, the self-built wavefront detection system and the roughness instrument were used to detect the full frequency error of the aspheric element. Based on the above-mentioned fabrication and testing method, a 430 mm×430 mm off-axis apherical lens was manufactured, and the results indicate that, after polishing, the  $PV$ ,  $GRMS$ ,  $PSD1$   $RMS$ ,  $PSD2$   $RMS$  and

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-03

基金项目: 科学挑战计划(JCKY2016212A506-0502); 中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金(RCFCZ1-2017-6)

作者简介: 钟波(1986-), 男, 工程师, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。Email: zhongbo\_foerc@163.com

通讯作者: 陈贤华(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。Email: xianhuachenmail@163.com

$Rq$  are 0.1 $\lambda$ , 5.7 nm/cm, 1.76 nm, 1 nm and 0.6 nm, respectively. In addition, the power spectral density (PSD) curves are below the required evaluation curve. The experimental results show that the full frequency specifications of the off-axis aspheric lens meet the requirements. The manufacturing method is also applicable to the high-precision manufacturing of other types of large aspheric optical elements.

**Key words:** advanced optical manufacturing; full frequency error; bonnet polishing; pitch polishing

## 0 引言

大口径非球面元件具有无中心遮拦、可改善像质且简化系统结构等优点,已成为空间相机、极紫外光刻机、超高功率激光装置等大型光学系统的关键元件<sup>[1-7]</sup>。随着科技的发展,当前大型光学系统对元件的表面质量和制造效率均提出了远远超越于古典光学系统的要求。

以美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)建立的高功率固体激光器—“国家点火装置”(National Ignition Facility, NIF)为例,LLNL提出基于功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)的光学表面误差评价方法<sup>[8]</sup>。该方法建立在对制造误差进行频带划分的基础之上。目前,光学元件制造误差在频域上分为低频误差、中频误差和高频误差。低频误差的空间频率在 $2.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 的范围内。中频误差的空间频率在 $3.0 \times 10^{-2} \sim 8.3 \text{ mm}^{-1}$ 的范围内。另外,中频误差又分为 PSD1 和 PSD2 两个频段误差,分段频率为 $0.4 \text{ mm}^{-1}$ 。高频段相位误差空间频率范围为 $8.3 \sim 100 \text{ mm}^{-1}$ 。为了保证元件满足 NIF 装置运行要求,LLNL 提出了全频段误差控制的技术指标要求,如低频误差 $\leq \lambda/3$ ,中频误差 PSD1: $A \leq 1.01 \nu^{-1.55}$ , $RMS \leq 1.8 \text{ nm}$ ,中频误差 PSD2: $A \leq 1.01 \nu^{-1.55}$ , $RMS \leq 1.1 \text{ nm}$ ,高频误差 $\leq 1.0 \text{ nm}$ <sup>[9]</sup>。

传统的大口径非球面元件加工方法为:通过铣磨成形、散粒研磨及抛光加工出最接近球面,再利用手工修抛或数控机床由球面加工出非球面。这种基于先抛光加工球面,再由球面加工到非球面的方式具有明显的加工局限性,比如非球面度(球面与非球面偏差)大的元件抛光去除的材料量大,极大影响加工效率;铣磨或研磨过程的缺陷深度较难实现稳定控制,影响后续缺陷去除的加工时间;抛光阶段确定

性不足,面形收敛率低,加工周期长等<sup>[10-11]</sup>。

为了克服上述局限性并提高非球面加工效率及精度,各种先进制造技术(磁流变抛光技术、离子束抛光技术、气囊抛光技术、等离子体抛光技术等)被提出并快速发展;同时基于先进制造技术的各种工艺加工方法被提出,如“超精密磨削+气囊抛光”、“超精密磨削+磁流变抛光+沥青小工具匀滑抛光”等。英国 Zeeko 公司 Walker 等<sup>[4]</sup>提出采用“超精密磨削+气囊抛光”的工艺加工方法完成欧洲超大望远镜工程所需大口径非球面元件加工,所加工米级口径六边形非球面光学元件面形  $PV$  达到 62 nm,  $RMS$  达到 11 nm。美国 QED 公司 Dumas 等<sup>[12]</sup>提出在非球面磨削成形后采用基于磁流变抛光和传统小工具沥青抛光相结合的抛光加工方法。基于上述加工方法 QED 经三天的抛光加工使 300 mm $\times$ 90 mm 离轴非球面镜面形  $PV$  优于  $\lambda/20$ 。国防科技大学胡浩等<sup>[13]</sup>基于与 QED 公司类似的非球面制造工艺流程,采用磁流变抛光技术和匀滑抛光技术完成楔形非球面镜的抛光加工,并获得了高质量的加工效果。

综上所述,基于先进制造技术的加工方法促进了大口径非球面光学元件制造精度、效率的提升,但是目前在保证缺陷控制和高效率的情况下,实现非球面全频段误差控制依然十分困难。文中针对强激光装置对大口径离轴非球面的高精度、批量化制造要求,提出一种气囊抛光技术与柔性沥青小工具抛光相结合的大口径非球面元件高效制造方法,实验证明可有效地提高非球面全频段的加工精度。

## 1 加工工艺流程及关键技术

### 1.1 加工工艺流程

通过对大口径非球面元件的典型工艺分析可知,当前主流工艺流程均是基于“超精密磨削+确定性抛光”技术路线构建。该工艺路线的特点是:(1)直

接用超精密磨削的方法加工出一定面形精度的非球面,同时控制磨削缺陷深度。(2) 磨削成型后,通过单一子口径技术或多种技术组合实现磨削缺陷层快速去除,以及表面误差修正,直到最终指标要求。为了实现非球面元件各项加工指标的控制,确定性抛光阶段可细分为保形抛光(或称快抛)、修正抛光、匀滑抛光三个步骤。

图 1 为理想的非球面元件表面误差收敛过程图。首先,采用超精密磨削方法进行非球面的直接成型,同时将亚表面缺陷控制在较低水平。然后,采用高去除效率的子口径抛光技术实现元件表面的快速保形抛亮以及磨削亚表面缺陷的快速去除。另外,采用高稳定性的子口径抛光技术快速修正元件低频误差。最后,采用匀滑抛光技术在低频误差不被恶化的情况下,控制元件中高频误差。

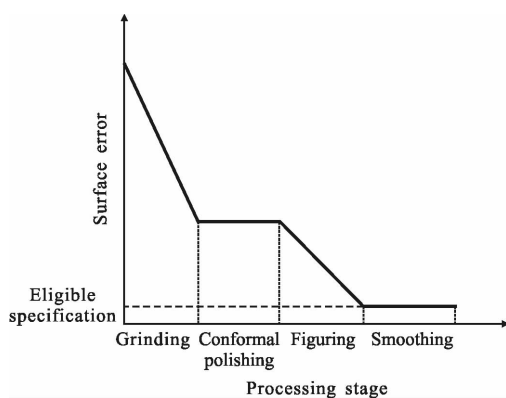


图 1 理想的非球面元件表面误差收敛过程

Fig.1 Ideal convergence curve of surface error of aspheric element

为了达到如图 1 所示理想的误差收敛效果,文中通过气囊抛光技术和柔性沥青小工具抛光技术提出如图 2 所示的工艺方案,其中修抛和匀滑可根据实际情况进行交替,直至元件全频段误差均达到指标要求。



图 2 基于“气囊抛光+沥青抛光”工艺方案

Fig.2 Manufacturing method combining the bonnet polishing and flexible pitch polishing technology

## 1.2 气囊抛光技术

### 1.2.1 气囊结构与材料优化

气囊抛光技术材料去除基于 Preston 原理  $R=$

$KPV$ ,即材料去除量  $R$  与比例常数  $K$ 、接触区应力分布  $P$ 、接触区速度分布  $V$  相关。比例常数  $K$ ,它由除速度和应力以外的所有因素决定,如抛光液浓度、抛光粉粒度、抛光垫硬度等。在实际工艺过程中,为了控制光学元件表面缺陷以及稳定的材料去除,抛光液浓度、抛光粉与抛光垫的型号等影响比例常数  $K$  的参数一般不变。那么,在  $K$  值不变的情况下,气囊抛光提高去除效率主要手段包括:(1) 采用高稳定性(结构稳定和热稳定)主轴,使其可以获得尽可能高的气囊转速,进而提高接触区速度分布  $V$ ;(2) 对气囊结构、材料进行优化,既保证气囊具有适当的柔性使其与非球面工件良好吻合,又可保证气囊具有较大的刚度,以获得气囊与工件接触区的应力分布  $P$  越大。接触区内的速度分布  $V$  通过建立气囊抛光运动学模型即可求解,求解过程较为简单,这里不再赘述。下面介绍气囊工具材料结构优化以获得不同去除效率的分析过程。

为了分析气囊材料、结构等参数对抛光力的影响,采用 ANSYS 软件建立气囊与工件接触模型求解接触区的应力分布,如图 3 所示。仿真条件与结果如表 1、图 4 所示。

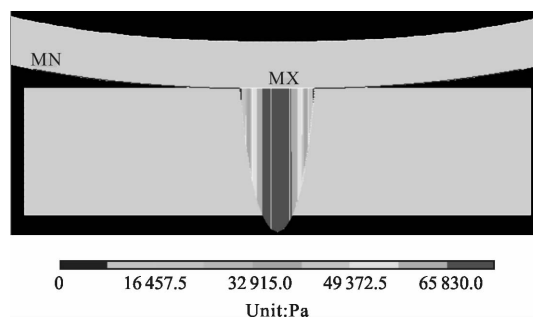


图 3 气囊与工件接触区应力分布

Fig.3 Distribution of contact stress between bonnet and workpiece

表 1 仿真条件与结果

Tab.1 Conditions and results of simulation

Bonnet material and structure	Rubber	Rubber+aluminum	Rubber+steel
Elastic modulus/Pa	$7.80 \times 10^6$	$7.00 \times 10^{10}$	$2.06 \times 10^{11}$
Poisson's ratio	0.47	0.47	0.27
Maximum contact stress/Pa	20 279.6	53 838.7	74 058.8

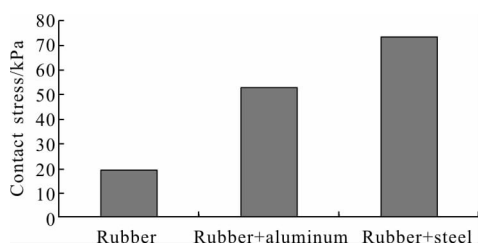


图 4 不同结构气囊与工件接触应力结果

Fig.4 Results of contact stress with different structural bonnets

由图 4 可知,不同结构气囊的刚度不同,“橡胶+钢片”的气囊刚度最大,“橡胶+铝片”的气囊刚度次之,纯橡胶气囊刚度最小。在相同参数下,刚度越大,气囊与工件接触应力越大。因此,实际加工中,采用不同刚度气囊可以获得不同材料去除效率,以满足不同工艺阶段对去除效率的需求。

### 1.2.2 气囊修整技术

气囊抛光是一种高效率的接触式加工技术,气囊表面所粘贴抛光垫携带抛光液中的磨粒在压力和摩擦作用下对工件表面材料进行高速去除过程中抛光垫也必然存在磨损现象。在以往的实验中已发现气囊高效去除过程中工具的磨损现象,并对材料去除特性会有显著的影响<sup>[14]</sup>。由图 5、图 6 可知,新气囊工具去除函数较为对称,去除深度  $1.56\lambda$ (抛光时间 4 s);磨损后气囊工具去除函数形态发生明显的变化,同时去除深度降低为  $0.87\lambda$ (抛光时间 4 s)。

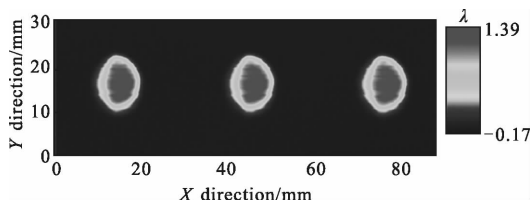


图 5 未磨损气囊的去除函数

Fig.5 Removal function with unworn bonnet

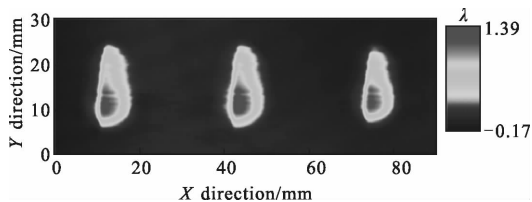


图 6 磨损气囊的去除函数

Fig.6 Removal function with worn bonnet

修整是恢复或改善抛光垫性能的重要手段,它不仅可以改善抛光效果,还可以提高其使用寿命,降

低抛光成本。图 7 为气囊工具修整过程图。杯状金刚石修整砂轮与气囊以一定转速相对旋转,同时修整砂轮绕气囊球心以一定速度往复摆动。另外,修整砂轮在直线轴驱动下向气囊进行微量进给。图 8 显示修整后去除函数深度为  $1.16\lambda$ ,去除函数轮廓趋于对称。由此可见,气囊表面抛光垫修整可改善去除形态和去除效率,这对提高去除稳定性具有重要作用。

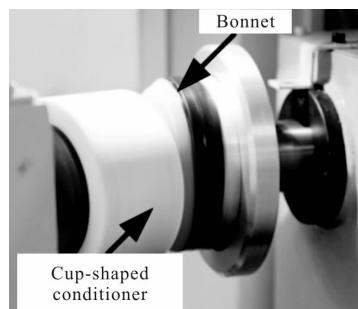


图 7 气囊工具修整过程

Fig.7 Conditioning process of bonnet

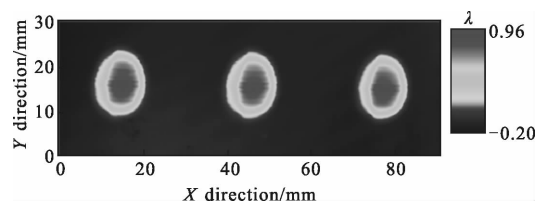


图 8 修整后气囊采集去除函数

Fig.8 Removal function with conditioned bonnet

### 1.3 柔性沥青抛光技术

#### 1.3.1 柔性沥青工具

前期的研究发现采用传统沥青小工具进行非球面加工时去除函数存在空间畸变,且该畸变是由工件局部非球面度和工具刚度共同造成<sup>[15]</sup>。针对该问题,通过传统沥青盘中增加弹性层,使抛光工具与待加工非球面元件的表面相吻合。图 9 为柔性沥青工具的示意图。

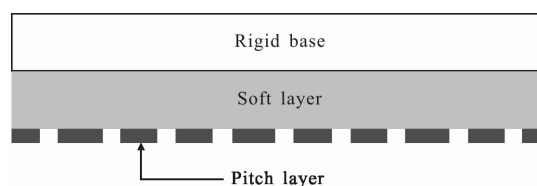


图 9 柔性沥青工具

Fig.9 Flexible pitch tool

根据非球面去除函数采集实验结果可知,不含



柔性层的传统抛光盘去除函数形态为椭圆形，其长轴指向非球面轴线(见图 10);而柔性抛光工具采集的去除函数形态为近高斯型，并且柔性抛光工具去除函数在离元件不同位置时均能得到幅值和形态一致的去除函数(见图 11),说明柔性沥青工具能适应局部非球面形貌变化。

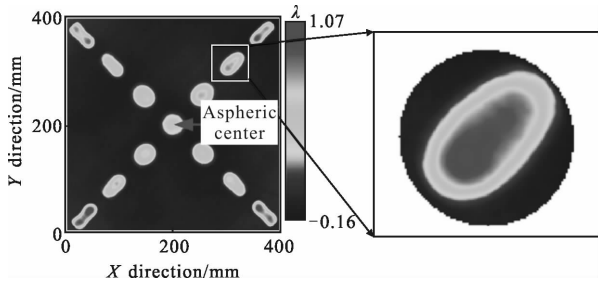


图 10 传统沥青工具采集的非球面去除函数

Fig.10 Removal function on aspheric lens by traditional pitch tool

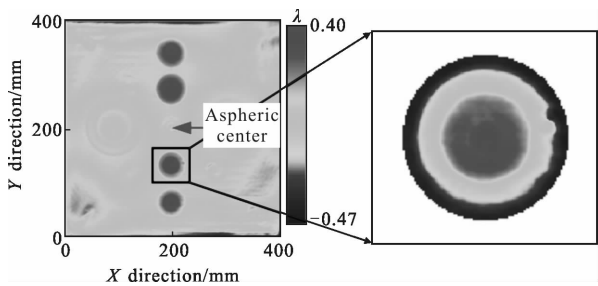


图 11 柔性沥青工具采集的非球面去除函数

Fig.11 Removal function on aspheric lens by flexible pitch tool

### 1.3.2 柔性沥青工具匀滑效应

对于非球面来说，首先应解决的是抛光模与元件表面各点良好接触的问题；其次就是该抛光工具对波纹的匀滑效果。为了描述抛光工具对波纹的平滑效果，引入波纹平滑效率因子，用于评价波纹高度变化量相对于总体材料去除量的变化程度。波纹平滑效率因子表达式为：

$$\alpha = \frac{\Delta PV_{\text{ripple}}}{\Delta PV} \quad (1)$$

式中： $\Delta PV_{\text{ripple}}$  为波纹幅值变化量； $\Delta PV$  为整体材料去除深度。

根据上式可知，在波纹平滑阶段针对工件表面波纹的幅值可以预计元件表面整体的去除量，从而规划匀滑抛光时间。图 12、图 13 为柔性抛光工具波纹匀滑效率实验结果。

由图 12 可知，每次匀滑后波纹的幅值均在逐渐减小，波纹深度从初始约  $0.65\lambda$ (见图 13(a))，经 13 次

匀滑加工后波纹幅值仅为  $0.014\lambda$ ，且波纹表现为非规律性(见图 13(b))，此时认为正弦规律性波纹已被完全去除。

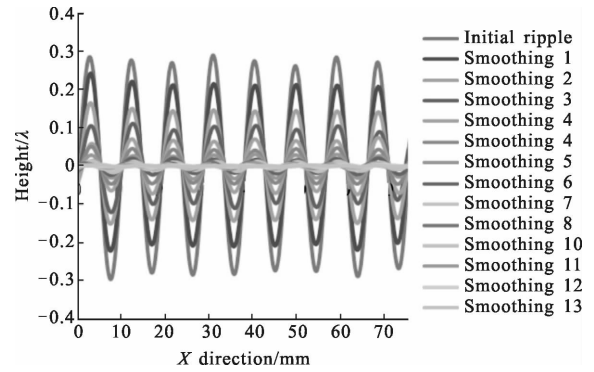
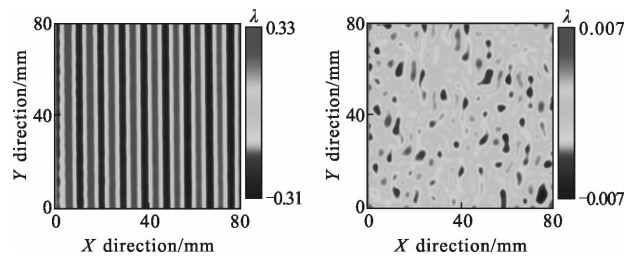


图 12 柔性沥青工具匀滑过程中波纹变化图

Fig.12 Variety of ripple in the smoothing process by flexible pitch tool



(a) 初始波纹

(b) 匀滑 13 次后波纹

(a) Initial ripple

(b) Ripple after thirteenth smoothing

图 13 波纹特征

Fig.13 Ripple characteristic

由图 14 可知，波纹幅值与匀滑效率呈线性关系。由此可见，随着波纹幅值降低，匀滑效率也随之线性降低，并且波纹幅值较大时匀滑效率高，波纹幅值下降快。

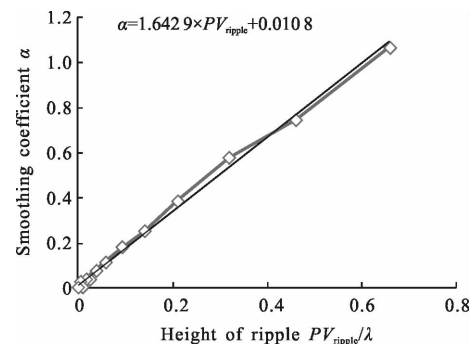


图 14 匀滑效率曲线

Fig.14 Curve of smoothing coefficient

## 2 加工检测实验

基于上述工艺流程与关键技术对口径为 430mm×430 mm 的离轴非球面透镜进行超精加工与检测。

首先, 基于 X/Y/Z 三直线轴磨床的平行磨削技术, 通过圆弧砂轮运行光栅式轨迹, 砂轮的外圆轮廓面上不同接触点的轨迹在被加工工件上形成一个非球面包络面, 完成整个非球曲面包络加工。磨削完成后, 采用非接触式面形检测系统在超精密磨削机床进行非球面面形在位检测, 检测结果 2.31 μm, 如图 15(a) 所示。磨削完成后, 采用 Zygo 粗糙度仪检测非球面表面粗糙度, 检测结果为 40.7 μm, 如图 16 所示。

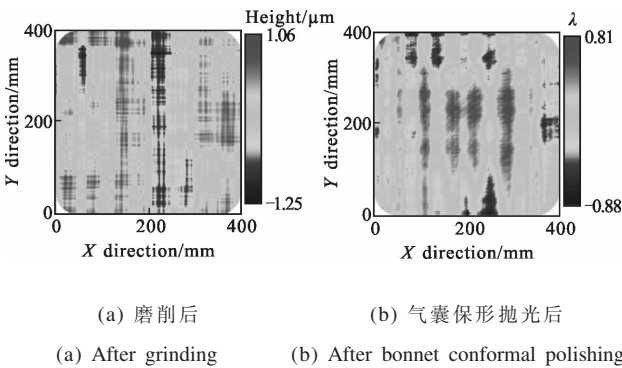


图 15 非球面保形抛亮前后误差比较

Fig.15 Comparison of error before and after aspheric conformal polishing

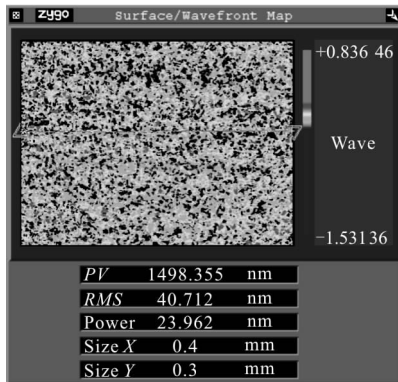


图 16 非球面磨削后粗糙度

Fig.16 Roughness of aspheric lens after grinding

非球面磨削成型后, 采用气囊抛光机床对超精密磨削后的非球面元件快速保形抛亮, 并去除磨削表面的缺陷, 去除深度大于 10 μm。气囊抛光机床与气囊抛光过程照片如图 17 所示。气囊保形抛光完成后, 采用 Zygo DynaFiz 球面干涉仪搭建的非球面干

涉检测系统(见图 18)进行非球面透过波前检测, 检测结果透过波前 PV 为 1.69λ(换算至非球面面形 PV 约 2.15 μm), 如图 15(b)所示。该实验结果表明, 气囊抛光达到了非球面保形去除磨削缺陷层的工艺目的。气囊保形抛光完成后, 采用 Zygo 粗糙度仪检测非球面表面粗糙度, 检测结果为 5.74 nm, 如图 19 所示。

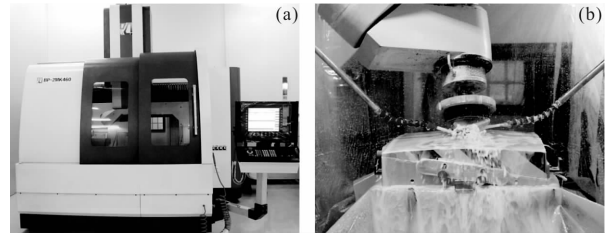


图 17 气囊抛光机床与气囊抛光过程图

Fig.17 Photos of bonnet polishing equipment and polishing process

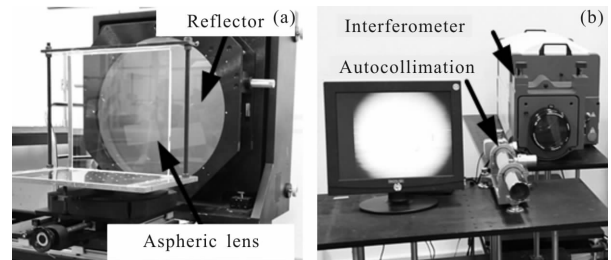


图 18 非球面透镜干涉检测系统

Fig.18 Interferometry detection system of aspheric lens

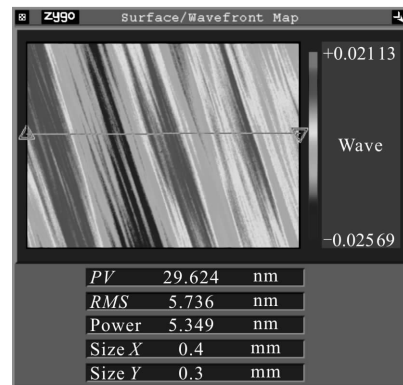


图 19 非球面气囊抛亮后粗糙度

Fig.19 Roughness of aspheric lens after bonnet polishing

非球面经气囊抛亮后, 仍有莫磨削波纹残留导致干涉条纹不清晰, 可能引起透过波前检测结果不准确, 影响后续加工。因此, 在非球面面形修正前, 采用柔性沥青匀滑抛光技术, 保持元件面形精度, 去除部分中高频误差。气囊匀滑抛光完成后, 采用非球面自准式干涉检测系统进行非球面透过波前检测, 检

测结果透过波前 PV 为 1.41λ,如图 20 所示。该实验结果表明,匀滑抛光后整体面形分布并未改变,透射波前 PV 略有改善。

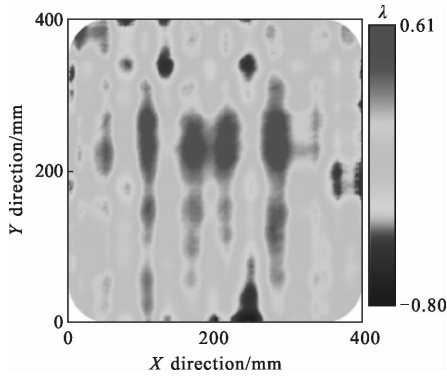


图 20 非球面柔性沥青抛光匀滑加工后检测结果

Fig.20 Detection results of aspheric lens after smoothing by FPP

采用气囊抛光技术快速修正非球面元件表面低频误差。经过四次气囊抛光加工,面形误差得到明显改善,气囊修正抛光完成后非球面透过波前检测结果透过波前 PV 为 0.24λ,如图 21 所示。该实验结果表明,气囊修正抛光单次加工收敛效率较高,最高达到约 50%,并且透过波前 PV 指标快速收敛至该阶段工艺控制指标以下。

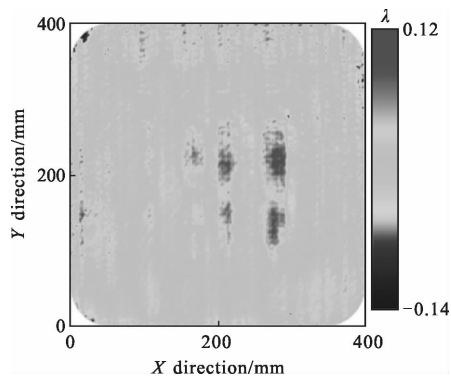
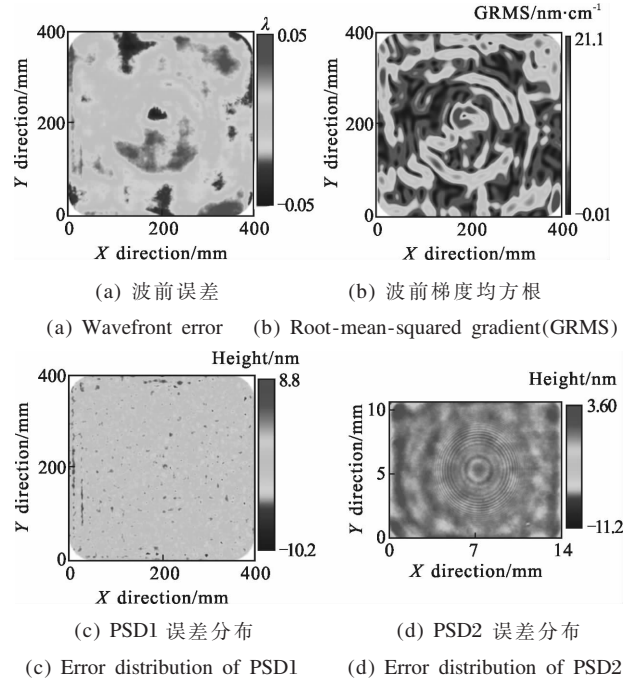


图 21 非球面气囊修正抛光加工后检测结果

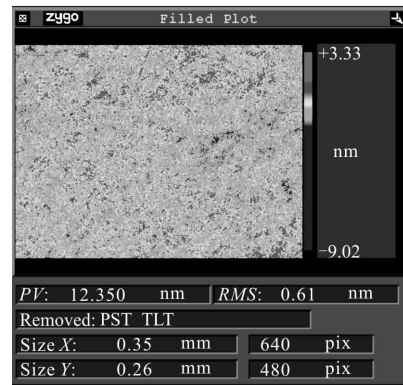
Fig.21 Detection results of aspheric lens after being figured by BP

非球面经气囊修正抛光后元件低频指标达到要求,但是表面富含较多中高频误差。因此,采用柔性沥青匀滑抛光技术去除中高频误差,直到达到指标要求。匀滑抛光完成后,采用非球面自准式干涉检测系统进行非球面透过波前检测,透过波前 PV 为 0.1λ,如图 22(a)所示。另外,经计算,非球面 GRMS、PSD1 分别为 5.7 nm/cm、1.76 nm,如图 22(b)、图 22(c)所示。采用 Zygo 粗糙度仪分别在 0.5 倍、20 倍的检测倍率下检测非球面表面 PSD2、非球面表面粗糙度,

检测结果分别为 1 nm、0.61 nm,如图 22(d)、图 22(e)所示。另外,计算中频 PSD1、PSD2 频段 PSD 曲线结果如图 23、图 24 所示。



(a) 波前误差 (b) 波前梯度均方根  
(a) Wavefront error (b) Root-mean-squared gradient (GRMS)  
(c) PSD1 误差分布 (d) PSD2 误差分布  
(c) Error distribution of PSD1 (d) Error distribution of PSD2



(e) 表面粗糙度

(e) Surface roughness

图 22 离轴非球面透镜最终实验结果

Fig.22 Final results of off-axis aspheric lens

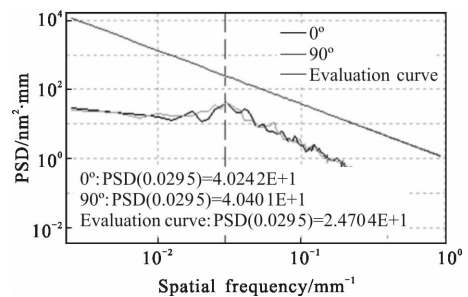


图 23 PSD1 频段下 PSD 曲线结果

Fig.23 Results of PSD curves in PSD1 frequency band

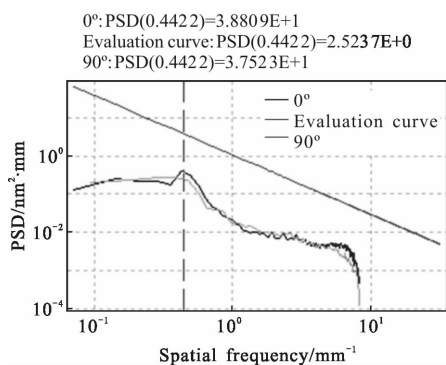


图 24 PSD2 频段下 PSD 曲线结果

Fig.24 Results of PSD curves in PSD2 frequency band

### 3 结论

文中提出了一种气囊抛光技术与柔性沥青小工具抛光技术相结合的非球面高效制造方法。该方法充分发挥了气囊抛光技术高效性、确定性以及柔性沥青小工具抛光技术匀滑性的优势, 不仅可提高非球面加工效率, 而且可控制全频段误差。经采用 430 mm×430 mm 离轴楔形透镜进行了试验加工后, 元件通光口径内的加工精度达到透射波前  $PV=0.1\lambda$ ,  $GRMS=5.7\text{ nm/cm}$ ,  $PSD1\ RMS=1.76\text{ nm}$ ,  $PSD2\ RMS=1\text{ nm}$ ,  $Rq=0.61\text{ nm}$ , 并且中频段功率谱密度曲线均在要求的评判曲线之下。实验结果表明, 所述制造方法使离轴楔形非球面透镜样件全频段指标均达到了合格指标要求。

#### 参考文献:

[1] Spaeth M L, Manes K R, Widmayer C C, et al. The national ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 25-42.  
 [2] Semenov A P, Abdulkadyrov M A, Belousov S P, et al. Technological features of the fabrication of the primary mirrors of telescopes [J]. *J Opt Technol*, 2013, 80(4): 207-213.  
 [3] Martin H M, Allen R G, Burge J H, et al. Fabrication and testing of the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope [C]//SPIE, 2010, 7739: 77390A.  
 [4] Yu G Y, Walker D D, Li H Y. Research on fabrication of

mirror segments for E-ELT[C]//SPIE, 2012, 8416: 841602.  
 [5] Glatzel H, Ashworth D, Bremer M, et al. Projection optics for extreme ultraviolet lithography (EUVL) micro-field exposure tools (METs) with a numerical aperture of 0.5[C]//SPIE Advanced Lithography, 2013, 8679(1): 867917.  
 [6] Meng Xiaohui, Wang Yonggang, Ma Xianmei, et al. Fabrication and test for  $\Phi 520\text{ mm}$  secondary mirror of on-axis three mirror space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0818002. (in Chinese)  
 [7] Zhang Xin, Luo Xiao, Yan Lisong, et al. Technology of large aperture off-axis parabolic mirror with Tri-station processing center[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0819001. (in Chinese)  
 [8] Aikens D M. The origin and evolution of the optics for the national ignition facility[C]//SPIE, 1995, 2536: 2-12.  
 [9] Campbell J H, Hawley-Fedder R, Stolz C J. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]//SPIE, 2004: 5341.  
 [10] Pan J H. Design, Fabrication and Test of Optical Aspheric Surface [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. (in Chinese)  
 [11] Chen H B, Wang Y W, Feng Z J. Methods to determine best fit sphere for large off-axis aspheric lens [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(8): 1040-1042. (in Chinese)  
 [12] Dumas P, Hall C, Hallock B, et al. Complete sub-aperture pre-polishing & finishing solution to improve speed and determinism in asphere manufacture [C]//SPIE, 2007, 6671: 1-11.  
 [13] Hu H, Song C, Xie X. Combined fabrication technique for high-precision aspheric optical windows [C]//SPIE, 2016, 9912: 99123W.  
 [14] Zhong B, Chen X H, Pan R, et al. The effect of tool wear on the removal characteristics in high-efficiency bonnet polishing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91: 3653-3662.  
 [15] Chen X H, Zhong B, Wang J, et al. Distortion of removal function based on the local asphericity of aspheric surface and the viscoelasticity of polishing tool in computer-controlled optical surfacing [J]. *J Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(7): 1135-1145.