

光学学报

Angel 型龙虾眼 X 射线光学器件的研制及性能测试

金戈¹, 张臣^{2,3*}, 黎龙辉^{1**}, 李臻¹, 袁为民^{2,3}, 顾燕¹, 王健¹, 张振¹,
徐昭¹, 姜博文¹, 廖亦戴¹, 吴超¹, 李玉飞¹, 郭燕¹, 刘建强¹, 凌志兴^{2,3}, 赵冬华^{2,3}

¹北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211106;

²中国科学院国家天文台, 中国科学院空间天文与技术重点实验室, 北京 100012;

³中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 Angel 型龙虾眼 X 射线光学器件是一种新型 X 射线聚焦成像器件, 具有独特的 4π 立体角聚焦能力和最佳有效面积-重量比, 是未来最具有运用前景的 X 射线成像光学系统之一。依据龙虾眼的结构特性, 采用微通道板方孔阵列制作技术成功研制了龙虾眼光学器件。采用 Zygo 干涉仪、条纹反射面型仪以及 X 射线束流检测设备对龙虾眼光学器件球面成型精度和聚焦成像特性进行了测试。测试结果表明: 微孔光学器件的球面面型精度均方根为 $0.72 \mu\text{m}$, 峰谷值为 $2.27 \mu\text{m}$, 曲率半径约为 752.3 mm 。在电压为 2 kV , 电流为 $50 \mu\text{A}$ 条件下, 横轴和纵轴的焦斑半峰全宽的直径约为 0.39 mm 和 0.42 mm , 对应的成像角分辨率分别为 3.65 arcmin 和 3.93 arcmin 。

关键词 X 射线光学; 龙虾眼; 光学器件; 聚焦成像; 角分辨率

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0634001

Fabrication and Performance Testing of Angel Lobster-Eye X-Ray Micro-Pore Optics

Jin Ge¹, Zhang Chen^{2,3*}, Li Longhui^{1**}, Li Zhen¹, Yuan Weimin^{2,3}, Gu Yan¹,
Wang Jian¹, Zhang Zhen¹, Xu Zhao¹, Jiang Bowen¹, Liao Yidai¹,
Wu Chao¹, Li Yufei¹, Guo Yan¹, Liu Jianqiang¹, Ling Zhixing^{2,3}, Zhao Donghua^{2,3}

¹North Night Vision Technology CO., LTD., Nanjing, Jiangsu 211106, China;

²Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

³School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Angel lobster-eye X-ray micro-pore optics (MPO) device, as a novel X-ray focusing device, has unique 4π stereoangle focusing ability and the optimal ratio of effective area to weight, thus being one of the most promising X-ray optical imaging systems. According to the structure characteristics of a lobster eye, a lobster eye optical device was successfully fabricated based on the fabrication technique of micro-channel plate square hole array in this paper. Then, the spherical surface accuracy and focusing characteristics of the device were tested by a Zygo interferometer, a fringe reflection profiler, and X-ray beam equipment. The test results show that the fabricated MPO device has a root-mean-square spherical surface accuracy of $0.72 \mu\text{m}$, a peak-to-valley value of $2.27 \mu\text{m}$, and a radius of curvature of about 752.3 mm . In addition, at a voltage of 2 kV and a current of $50 \mu\text{A}$, the diameters of the full width at half maximum of the focal spots on the horizontal and vertical axes are approximately 0.39 mm and 0.42 mm , and the corresponding angular resolution is 3.65 arcmin and 3.93 arcmin , respectively.

收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-10-08; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA15310101-01)、国家自然科学基金重点项目(Y713021V01)、国家自然科学基金青年基金(12003010)

* E-mail: chzhang@nao.cas.cn; ** E-mail: bnullh@163.com

Key words X-ray optics; lobster eye; optical devices; focus imaging; angular resolution

OCIS codes 340.7470; 220.3630

1 引言

1979 年,Angel^[1]根据龙虾眼球形结构特性,提出了一种新型龙虾眼掠入射 X 射线天文望远镜(LE)。LE 成像系统不同于传统的 K-B 型^[2]和 Wolter 型 X 射线望远镜^[3],其特殊的正交几何结构,使其在各个方向的聚焦成像能力都相同,理论上视野能达到 4π 空间角,这是其他掠入射光学系统无法实现的。同时 LE 系统具备体积小、重量轻等特性,相对于金属材质的 Wolter-I 型望远镜单位有效面积重量之比高 1~2 个数量^[4],是未来最具有运用前景的 X 射线成像光学系统之一^[5-7]。

LE 系统关键技术在于龙虾眼 X 射线微孔(MPO)光学器件的研制。近年来,针对龙虾眼镜头宽视场、轻小型的需求,国际上很多研究机构做了大量的研究和尝试,提出了很多新型制作工艺和方法,其中包括 X 射线光刻技术、半导体电化学腐蚀技术、磁流体抛光技术以及硅片集成技术等^[8-11]。然而这些新型 MPO 镜头仍存在不足之处,如 X 射线光刻技术的通道内壁粗糙度难以保证^[8];半导体电化学腐蚀技术尚未解决热弯成球面等难题^[9];磁流体抛光技术工艺十分繁琐且孔径长度受到限制^[10];硅片集成技术装配极其复杂等^[11]。鉴于这些困难,MPO 光学器件的结构和性能仍未取得较大改善,目前 MPO 聚焦性能的提升依然是基于微通道板(MCP)微孔阵列制作工艺进行改善^[12-13]。

目前国内已经开展了 MPO 光学技术的预先

研究工作^[14-16],然而 MPO 光学器件制造技术的核心还掌握在国外唯一供货商 Photonis 商业公司手中,由于缺少自主研制生产宽视场器件能力,国内厂商在全面掌握宽视场 X 射线光学技术方面失去了重要的环节。一方面器件的关键工艺和参数掌握在国外厂商手中,国内的相关设计能力和理论模型无法进一步的提升;另一方面,由于国外厂商生产工艺参数的不可控性和成本昂贵,镜头的装配技术无法进一步提升,从而限制了光学镜头的质量,影响了可能的科学产出。国外厂商高昂的采购价格使得宽视场光学器件的成本成为了科学项目重要的工程制约条件,影响了项目的科学性能的提高。本文首先介绍了龙虾眼光学器件的结构特性和成像原理,随后基于微通道板方孔阵列制作技术成功研制了 MPO 光学器件,打破了国际垄断,填补了国内相关领域的空白。

2 龙虾眼 MPO 光学器件的研制

2.1 聚焦镜反射原理

龙虾眼光学器件是一种基于掠入射反射原理对 X 射线进行会聚的光学器件,由数百万个同时指向球心的方形微通道(微米尺度)阵列构成。这种球面蜂窝结构的对称性保证了其在视场内的无差别成像,通道内壁粗糙度达到纳米量级,结构如图 1 所示。入射的平行 X 射线经过球面蜂窝结构改变光线的传播方向,在焦距为 f 、曲率半径为 R 的一半位置处聚焦形成清晰的十字光斑。

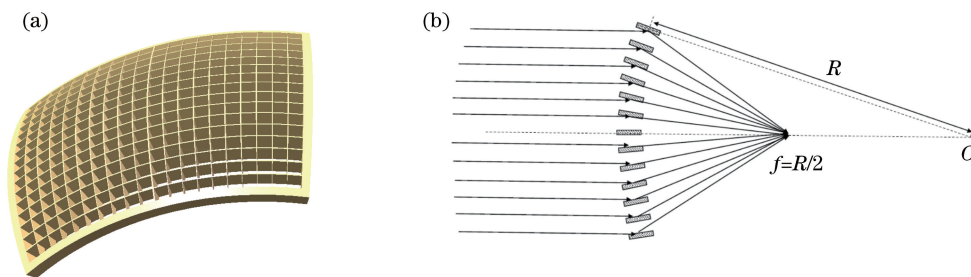


图 1 龙虾眼器件聚焦成像示意图。(a)结构示意图;(b)聚焦成像原理

Fig. 1 Schematic diagram of the lobster eye device. (a) Schematic diagram of the structure; (b) principle of focusing

2.2 聚焦光学器件的制备

MCP 是一种基于玻璃基底的二维电子倍增的电真空器件,由巨大数量($10^6 \sim 10^7$)具有电子倍增能力的微通道按照一定的几何形状排列而成,最早应用于微光夜视等军事领域,在 20 世纪 90 年代以

后才开始应用于龙虾眼光学器件的研制。基于 MCP 微孔阵列新技术制作龙虾眼光学器件的生产过程,主要包括高精度方形材料制备、大规模精密方形阵列制备、大曲率半径球面成型、酸碱腐蚀以及镀金属反射膜等关键技术,如图 2 所示。

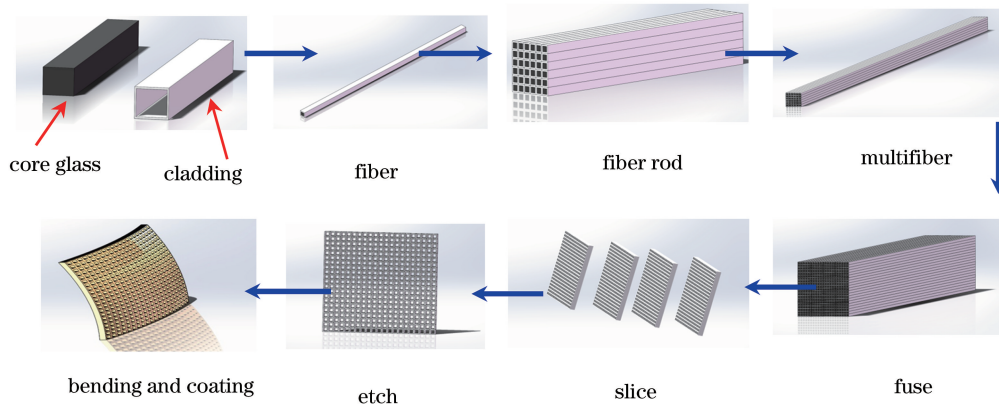


图 2 MPO 光学器件研制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MPO device fabrication

首先,需要依据温度、黏度以及膨胀系数来选择匹配的方形芯料棒和皮料管,经过拉丝炉的热熔,一次拉制形成芯料外包裹皮料的方形单丝;其次,将单丝整齐排列为方形单丝棒,单丝棒经过拉丝炉二次拉制形成方形复丝,复丝内部分布着排列整齐的方孔结构,拉制过程需严格控制单复丝的尺寸精度;再次,将复丝依次排列好放置于模具内,选择合适工装和压屏工艺,经过压屏炉的高温熔压为方形屏段;然后,经过冷加工将其切片,选择合适的腐蚀工艺,腐蚀掉通道内部芯料,再通过球面成型过程使得通道指向球心;最后,通过原子沉积技术在微孔内壁沉积一层金属反射膜,最终形成特殊的球面阵列结构。本文基于爱因斯坦探针卫星项目科学目标^[14]的需求,研制的 MPO 光学器件主要技术参数见表 1,其中 arcmin 为角度制单位的角分,也就是通常说的分。

表 1 龙虾眼 MPO 光学器件技术指标

Table 1 Technical indicators of lobster-eye MPO devices

Serial number	Technical index	Parameter requirement
1	Geometric diameter / (mm × mm)	42.5 × 42.5
2	Radius of curvature / mm	750
3	Thickness / mm	2.5
4	Square hole length / μm	40
5	Spacing of square holes / μm	48
6	Length to diameter ratio	62.5
7	Roughness / nm	RMS ≤ 1
8	Metal Ir film thickness / nm	20
9	Angular resolution / arcmin	≤ 4.5 @ 1 keV

3 龙虾眼光学器件的关键性能测试

MPO 光学器件应用于 X 射线天文观测成像领域,需要考虑 MPO 透镜的空间分辨能力,通常采用

角分辨率来表征透镜的空间成像分辨能力^[17-18]。而成像角分辨率主要由球面成型精度和微孔统计特性共同决定,其中球面成型精度是指球面热成型的质量,微孔统计特性是指 MPO 内部数百万方形通道之间的相互准直统计特性。

3.1 球面面型精度

使用 Zygo 干涉仪(型号:F045)对所研制的龙虾眼光学器件的面型精度进行测量,球面面型精度的均方根(RMS)为 $0.72 \mu\text{m}$,峰谷值为 $2.27 \mu\text{m}$,面型分布测试结果如图 3 所示。由图可知,相对于中心区域,MPO 光学器件的四个顶角区域面型形变较为严重。分析原因可能是 MPO 在球面热压成型阶段,四个顶角区域移动位移最大,在退火冷却过程中会产生较大的应力反弹,导致顶角区域存在较大的形变。四个顶角区域的形变程度不完全对称,左上角和右下角形变较大。这可能是因为 MPO 光学器件中心摆放不正,不同顶角位置靠近炉膛的高温区不同,与模具产生粘合程度不一致,导致不同顶角区域的应力反弹程度不同。由于 MPO 光学器件退火工艺带来的误差,必然会导致球面偏离理想情况,影响聚焦光线发生偏移。后续需要进一步研究退火工艺,提高球面的成型精度进而提高 X 射线聚焦成像特性。

3.2 曲率半径

利用条纹反射面型仪^[19]测试不同位置处的曲率半径,曲率半径分布见图 4。由图可知,中心区域半径约为 20 mm,曲率半径大体分布均匀,越靠近左上角或右下角顶角区域,曲率半径越呈变大的趋势,越靠近左下角曲率半径越呈变小的趋势。通过对 MPO 光学器件曲率半径分布进行球面拟合可以得到,曲率半径约为 752.3 mm,均方根为 1.3 mm,

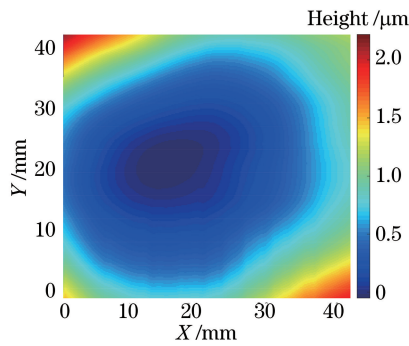


图 3 Zygo 干涉仪测试面型图

Fig. 3 Zygo interferometer measurement surface of lobster eye device

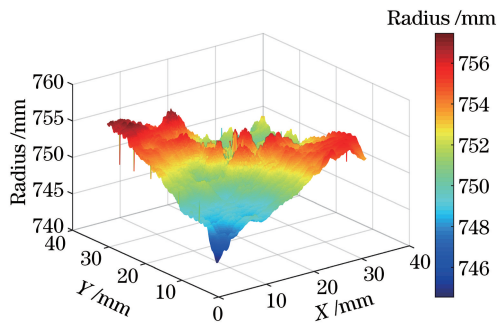


图 4 MPO 光学器件曲率半径测试结果

Fig. 4 Fringe reflection measurement radius of MPO device
峰谷值为 13.6 mm, 相较于理论值(750 mm)偏大。分析原因可能是 MPO 光学器件在高温阶段与模具

完全贴合,退火过程受残余应力影响,MPO 光学器件的球面可能会出现往外反弹的情况,并且不同位置处的反弹程度可能不一致,越靠近中心区域反弹越小,顶角区域反弹大,与面型分布情况存在类似的情况。上述这些工艺误差会导致 X 射线聚焦反射方向发生偏移,十字线弥散,点扩展函数(PSF)形状畸变,成像质量变差,在加工过程中需尽量规避。

3.3 X 射线聚焦性能测试

MPO 光学器件的 X 射线聚焦成像性能测试系统如图 5 所示,实验中将 MPO 光学器件分别放置于精密的六维调节架(空间定位精度优于 $5 \mu\text{m}$)上,使用光学仪器经纬仪调整光学器件位置与姿态,使 Ti 靶光源(能量为 4.5 keV,微焦斑为 $35 \mu\text{m}$,不含 Be 窗)、MPO 光学器件以及互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器(图像分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2040 \text{ pixel}$,单个像素尺寸为 $11 \mu\text{m}$)三者中心在同一光轴上。X 射线光源需放置于距离 MPO 光学器件凸面前端 15300 mm 位置处。CMOS 探测器位于 MPO 光学器件凹面后端,用于收集聚焦 X 射线。所有测试均在真空腔体(真空度 $< 10^{-3} \text{ Pa}$)内进行,测试电压为 2 kV,其主要 X 射线能段为 1 keV,电流为 $50 \mu\text{A}$,曝光时间为 256 ms。一般而言,X 射线能量越高掠入射角度越小,参与反射的区域越小,成像质量也会更好。

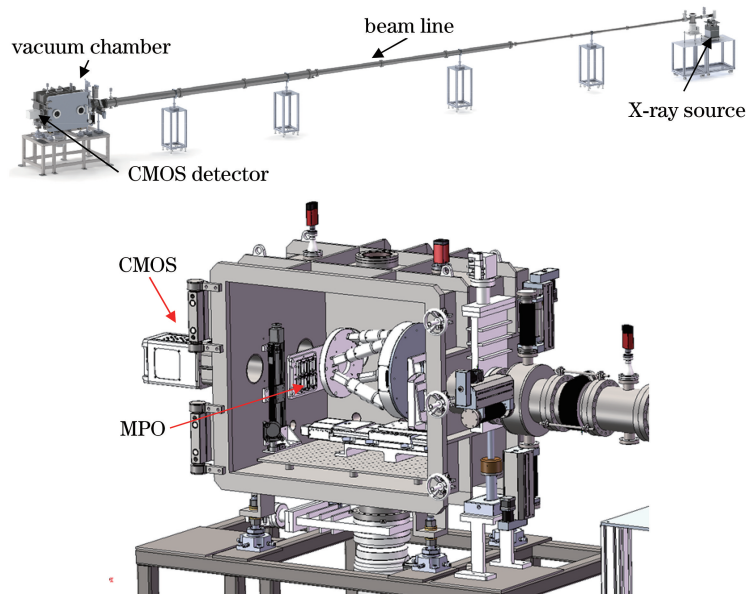


图 5 国家天文台 X 射线束流检测设备装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of X-ray beam equipment of national astronomical observatories

角分辨率的获取途径是使用数据处理软件对 CMOS 探测器收集到的数据进行强度分析,可定量测试得到焦斑半峰全宽(FWHM)包围直径及其对

应的角分辨率。MPO 光学器件在 367 mm 焦距处的 X 射线焦斑点扩展函数如图 6 所示。由图 6 可知,二次焦斑的强度远高于一次反射光线,服从高斯

分布,点扩展函数分布与模拟结果类似^[14-16]。

研制出的龙虾眼 MPO 光学器件在横向和纵向的光强强度分布曲线见图 7。经过计算,焦斑半峰全宽直径分别约为 0.39 mm 和 0.42 mm,对应角分辨率分别约为 3.65 arcmin 和 3.93 arcmin,能够满足爱因斯坦探针卫星科学目标的要求^[14]。理想情况下的 MPO 光学器件半峰全宽和角分辨率分别为 0.02 mm 和 0.18 arcmin。X 射线测试结果与理想龙虾眼光学器件的半峰全宽及角分辨率存在差异,这是由于在龙虾眼光学器件制备过程中存在多种工艺缺陷,导致了中心焦斑的扩散和角分辨率降低。

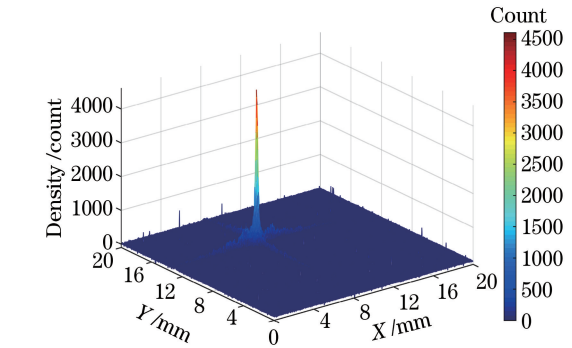
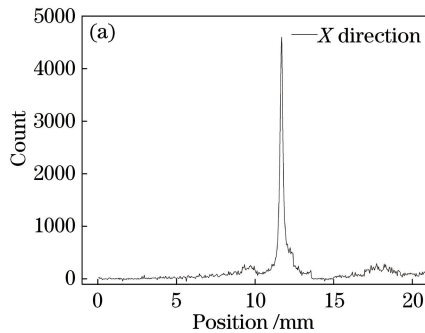


图 6 探测器焦平面强度分布图

Fig. 6 Intensity distribution of detector focal plane

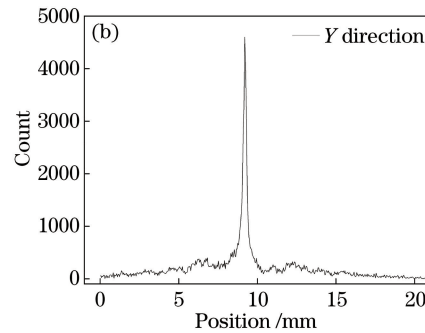


图 7 X 射线焦斑光强分布曲线。(a) 横向;(b) 纵向

Fig. 7 X-ray focal spot light intensity distribution curves. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

3.4 MPO 光学器件顶角点扩展函数

基于 X 射线束流设备位移控制系统调节 MPO 光学器件的位置,让其四个顶角位置分别处于光轴上,微调 MPO 光学器件的姿态让投射光、一次反射光和二次光线分离。图 8 为 MPO 光学器件在四个

顶角的 X 射线聚焦成像情况,测试电压为 2 kV,电流为 $50 \mu\text{A}$,曝光时间为 256 ms。

由图 8 可知,MPO 光学器件的顶角处的二次反射焦斑畸变为椭圆,并且在横向和竖向分别会延展出部分焦斑。焦斑畸变为椭圆主要原因是由于方孔

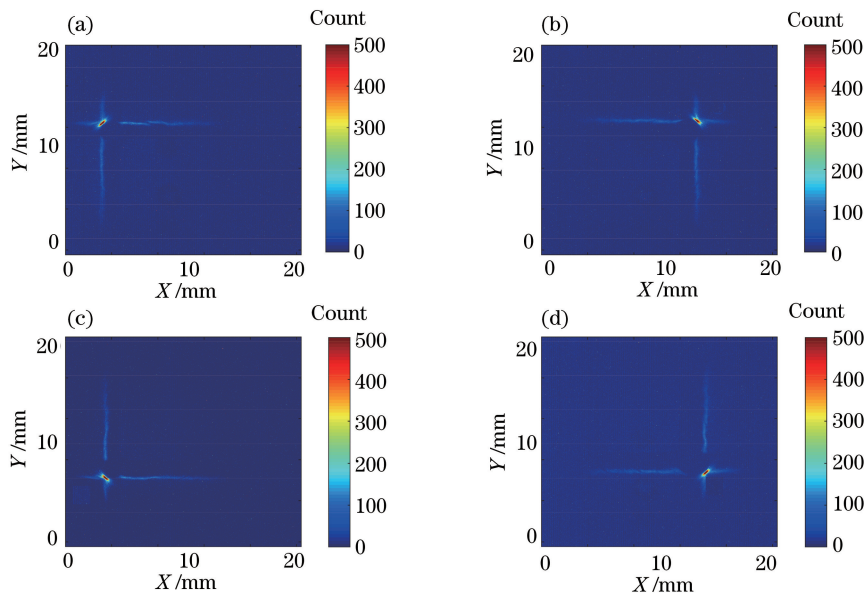


图 8 顶角区域的 X 射线测试结果。(a) 左上角;(b) 右上角;(c) 左下角;(d) 右下角

Fig. 8 X-ray test results of corner area. (a) Left-up; (b) right-up; (c) left-down; (d) right-down

在球面成型阶段发生形变,方孔阵列畸变为平行四边形,进而导致焦斑畸变为椭圆^[20]。由图 4 可知,顶角区域的曲率半径偏离理论值,进而导致 X 射线聚焦光轴发生偏移,二次焦斑弥散影响 X 射线聚焦成像质量。横向和竖向延展出来的焦斑可能是由于顶角区域曲率半径不同,X 射线焦距不一致,进而产生的离焦现象。

4 结 论

本文首先详细介绍了龙虾眼光学器件的结构特性和成像原理,并基于 MCP 微孔阵列制作新技术,成功研制了龙虾眼 MPO 光学器件。其次,利用 Zygo 干涉仪和条纹反射面型仪分别测试光学器件面型分布和曲率半径。最后在 X 射线束流设备条件下,对 MPO 光学器件进行了聚焦成像特性测试,其横向和纵向的角分辨率分别约为 3.65 arcmin 和 3.93 arcmin,能够满足爱因斯坦卫星科学目标的需求。未来将重点研究玻璃热成型的方法,减少热成型过程引入的面型偏差,进一步缩小十字光斑尺寸,优化成像质量,提高聚焦效率,进一步提升器件的聚焦性能。

参 考 文 献

- [1] Angel J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1979, 233: 364-373.
- [2] Hudec R, Inneman A, Pina L. Lobster-eye: novel X-ray telescopes for the 21st century[J]. New Century of X, 2001, 251: 542.
- [3] Nandra K, O'Neill P M, George I M, et al. An XMM-Newton survey of broad iron lines in Seyfert galaxies [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 382(1): 194-228.
- [4] Brinkman A C, Behar E, Güdel M, et al. First light measurements with the XMM-Newton reflection grating spectrometers: evidence for an inverse first ionisation potential effect and anomalous Ne abundance in the Coronae of HR 1099 [J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 365(1): L324-L328.
- [5] Aslanyan V, Keresztes K, Feldman C, et al. Design and implementation of electron diverters for lobster eye space-based X-ray optics [J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(12): 124502.
- [6] Su L N, Li W, Wu M X, et al. Modeling the focusing efficiency of lobster-eye optics for image shifting depending on the soft X-ray wavelength[J]. Applied Optics, 2017, 56(22): 6267-6271.
- [7] Peng S W, Wei F, Guo Y H, et al. Preliminary geometric parameters optimization of lobster-eye-type wide field of view soft X-ray imager [J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 1-3.
- [8] Peele A G, Irving T H K, Nugent K A, et al. LIGA fabrication of high-aspect-ratio lobster-eye optics[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4592: 406-413.
- [9] Peele A G. Investigation of etched silicon wafers for lobster-eye optics [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(2): 1268-1273.
- [10] Riveros R E, Yamaguchi H, Mitsuishi I, et al. Magnetic field assisted finishing of ultra-lightweight and high-resolution MEMS X-ray micro-pore optics [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7360: 736013.
- [11] Ezoe Y, Koshiishi M, Mita M, et al. Silicon micro-pore X-ray optics [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 579(2): 817-820.
- [12] Inneman A V, Hudec R, Pina L, et al. Lobster-eye X-ray optics [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1999: 72-79.
- [13] Mutz J L, Bonnet O, Fairbend R, et al. Micro-pore optics: from planetary X-rays to industrial market [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6479: 64790F.
- [14] Yuan W M. Special topic of Einstein probe: exploring the dynamic X-ray universe [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(3): 2-21.
袁为民. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的 X 射线宇宙专题·编者按 [J]. 中国科学 (物理学 力学 天文学), 2018, 48(3): 2-21.
- [15] Jin G, Li L H, Zhang C, et al. Numerical simulation of angel lobster eye X-ray micro pore optic lens [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0934001.
金戈, 黎龙辉, 张臣, 等. 基于 Angel 型龙虾眼 X 射线透镜的数值模拟 [J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0934001.
- [16] Guo Y H, Peng S W, Wei F, et al. Design and simulation of soft X-ray imager on SMILE satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4348-4355.
郭亦鸿, 彭松武, 韦飞, 等. SMILE 卫星载荷宽视场软 X 射线成像仪设计与仿真 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4348-4355.
- [17] Liu D, Qiang P F, Li L S, et al. Multilayer nested X-ray focusing optical device [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0834002.

- 刘舵, 强鹏飞, 李林森, 等. 多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0834002.
- [18] Le Z C, Liang J Q. Theory of the compound X-ray lenses for focusing high energy X-ray radiation [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 572-576.
- 乐孜纯, 梁静秋. 高能 X 射线聚焦组合透镜的理论研究[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 572-576.
- [19] Zhang S K, Li L H, Sun J N, et al. Surface measurement of angel lobster eye X-ray lens based on fringe reflection [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0934001.
- 张诗鲲, 黎龙辉, 孙建宁, 等. 基于条纹反射方法的 Angel 型龙虾眼 X 射线镜片面型测试[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0934001.
- [20] Willingale R, Pearson J F, Martindale A, et al. Aberrations in square pore micro-channel optics used for X-ray lobster eye telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9905: 99051Y.