

Angel 型平面龙虾眼光学器件微孔统计特性测试和分析

黎龙辉¹, 张臣^{2,3*}, 金戈¹, 袁为民^{2,3}, 李臻¹, 顾燕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, 秦天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 为了研究 Angel 型平面龙虾眼光学器件微孔统计特性对聚焦成像性能的影响, 研发了一套点对点的真空 X 射线束流测试装置, 采用微焦斑 X 射线束对研制的光学器件进行了聚焦成像测试。通过利用刀口狭缝系统对平面龙虾眼光学器件进行二维扫描测试, 发现光学器件的不同区域存在不同程度的 Tilt 型工艺缺陷; 基于蒙特卡罗软件模拟了 Tilt 工艺缺陷对聚焦成像的影响。实验结果表明: 实验所采用的平面龙虾眼光学器件能在 3650 mm 焦距处将入射的 X 射线束会聚成清晰的十字图像, 焦斑最大半峰全宽约为 4.63 mm, 对应的角分辨率最大约为 4.36', 点扩展函数的不均匀性约为 33.7%。模拟结果表明: Tilt 型工艺缺陷会导致中心亮斑强度下降, 十字线弥散、不连续, 二次焦斑畸变, 成像质量变差。

关键词 光学设计; 平面龙虾眼光学器件; 聚焦成像; Tilt 型缺陷; 角分辨率

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0322001

Test and Analysis of Micropore Statistical Characteristics of Angel Type Planar Lobster Eye Optical Device

Li Longhui¹, Zhang Chen^{2,3*}, Jin Ge¹, Yuan Weimin^{2,3}, Li Zhen¹, Gu Yan¹,
Zhang Zhen¹, Xu Zhao¹, Jiang Bowen¹, Liao Yidai¹, Wu Chao¹, Li Yufei¹,
Guo Yan¹, Qin Tian¹, Ling Zhixing^{2,3}, Zhao Donghua^{2,3}

¹North Night Vision Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211106, China;

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

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

Abstract In order to study the influence of micropore statistical characteristics of Angel type planar lobster optical devices on the focused imaging performance, a set of point-to-point vacuum X-ray beam test devices was developed in this work. The micro focal spot X-ray beam was used to carry out the focused imaging test on the developed optical device. The knife slit system was used to conduct two-dimensional scanning test on the planar lobster eye optical device. Different degrees of tilt-type process defects were found in different areas of the optical device. The effect of tilt process defects on focused imaging was simulated based on the Monte Carlo software. Experimental results show that the

收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-09-15

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支持项目(Y713021V01)、国家自然科学基金青年基金(12003010)

* E-mail: chzhang@nao.cas.cn

plane lobster eye optical devices used in the experiment can converge the incident X-ray beam into a clear cross image at a focal length of 3650 mm, the maximum full width at half maximum of the focal spot is about 4.63 mm, the corresponding largest angular resolution is about $4.36'$, and the unevenness of the point spread function is about 33.7%. Simulation results show that tilt-type process defects will decrease the intensity of the central bright spot, the crosshairs are diffuse and discontinuous, the secondary focal spot is distorted, and the image quality is deteriorated.

Key words optical design; planar lobster eye optical device; focused imaging; tilt-type defect; angular resolution

OCIS codes 220.3630; 340.7470

1 引言

1979 年,Angel^[1]基于龙虾眼方孔阵列结构提出了正方形阵列结构,用于研制龙虾眼型 X 射线天文望远镜。虽然龙虾眼 X 射线光学系统很早就被提出,但受限于当时的工艺水平,研究人员始终无法取得突破性的进展,直到 20 世纪 90 年代,随着刻蚀技术和微加工技术的发展,哥伦比亚大学、墨尔本大学、莱斯特大学、捷克天文等研究机构才逐渐研制出龙虾眼 X 射线微孔光学(MPO)器件并开始相关的实验研究^[2-7]。MPO 器件应用于 X 射线天文观测成像领域时,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^[8]。而成像角分辨率主要由平面微孔统计特性和球面成型精度共同决定,其中平面微孔统计特性是指未经过球面热成型前平面 MPO 内部数百万方形通道之间的相互准直统计特性,这是影响 MPO 器件质量的因素,也是影响光学器件的键性能——角分辨率的最重要的因素之一。球面成型精度是指球面热成型的质量,这是影响角分辨率和点扩展函数(PSF)光斑形状的重要因素^[9],也是影响多个光学器件之间参数均匀性的重要因素^[10-11]。

目前主流的 X 射线测试设备都是针对热成型后的球面 MPO 器件性能进行测试^[12-13],无法有效

地区分平面微孔统计特性和球面成型精度对成像质量的影响,这导致无法对过程研制工艺流程进行更精确的定位和指导。为了克服上述困难,本文主要描述了一套平面龙虾眼 X 射线真空测试装置,利用平面龙虾眼光学器件的点对点的聚焦成像特性,得到微孔统计特性对平面 MPO 成像角分辨率的影响。其次,利用刀口狭缝系统对平面光学器件进行二维扫描,发现平面 MPO 存在 Tilt 型工艺缺陷。最后,利用蒙特卡罗成像模拟了 Tilt 型工艺缺陷对聚焦成像的影响。

2 原理与装置

2.1 实验原理

通过拉丝、复丝、排屏、压屏、切片、抛光和腐蚀等前行研制工序,得到重要的中间产品,即平面 MPO,其微孔阵列结构如图 1(a)所示。平面 MPO 内部分布着上百万量级的长宽比大于 50:1 的微米级方形通道,每个单通道指向平面的垂直方向,因此不可能使用传统方法对每一个方形微结构进行质量检测,目前有效的方法是使用 X 射线束流得到聚焦成像结果,通过对光斑形状、十字臂变形、光斑强度、焦斑弥散等进行大量的分析,实现对平面 MPO 的微孔统计特性的评价。

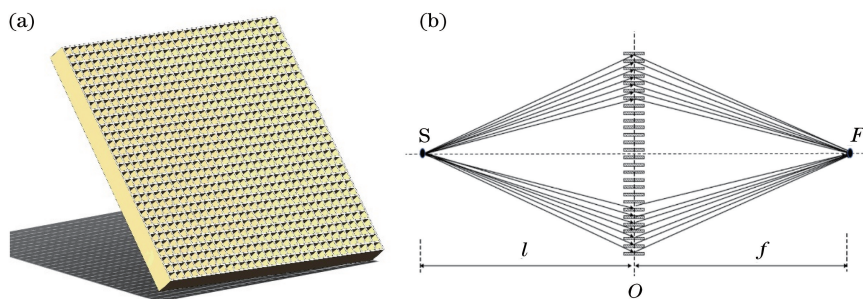


图 1 平面龙虾眼器件聚焦成像示意图。(a)结构示意图;(b)聚焦成像原理

Fig. 1 Focused imaging diagram of planar lobster eye optical device. (a) Diagram of structure;

(b) principle of focused imaging

经过球面热成型的平面 MPO 主要利用点对点的聚焦成像原理,如图 1(b)所示。光源 S 发出的 X 射线束经过 O 处的平面 MPO,其出射方向被改变并

聚焦在 F 处焦平面上,其中焦距 f 与物距 l 相等。每个方形微通道的架构主要由 X 和 Y 两个方向的正交侧壁组成,构成 X 射线反射镜面。在不考虑一维多

次反射的前提下,依据入射光线在方形微通道内壁的反射次数,入射光线可以划分为三类,即直通光、一次反射光和二次反射光。不参与反射的直通光线,直接透射到探测器上形成背景噪声;只在横轴方向或纵轴方向发生一次反射的光线分别聚焦在十字臂的横线和竖线上;同时在横轴方向或纵轴方向二次反射的光线聚焦在焦斑中心位置处,形成中心二次焦斑,二次焦斑强度远高于一次反射光线并服从高斯分布。

2.2 实验装置

平面龙虾眼 X 射线真空测试装置示意图如图 2 (a)所示,该测试装置(总长度约为 8 m)主要以真空

系统为主体,搭载 200 nm 厚度有机膜封装的 X 射线 Ti 靶光源(不含 Be 窗,微焦斑直径约为 $35\ \mu\text{m}$)、CMOS 探测器(制冷温度为 $-20\ ^\circ\text{C}$,单像素大小为 $11\ \mu\text{m}$,靶面大小为 $2040\ \text{pixel}\times 2048\ \text{pixel}$)、平面 MPO(厚度为 $2.5\ \text{mm}$,尺寸为 $42.5\ \text{mm}\times 42.5\ \text{mm}$,方孔边长为 $40\ \mu\text{m}$,壁厚为 $8\ \mu\text{m}$)、刀口狭缝系统(4 个单轴真空位移台共同构成,每个单轴行程范围为 $40\ \text{mm}$,重复定位精度优于 $10\ \mu\text{m}$)和 PI 真空位移系统(包含 PI 六轴位移台和 PI 单轴水平位移台,空间重复定位精度优于 $5\ \mu\text{m}$,角度重复定位精度优于 $5''$)构成。

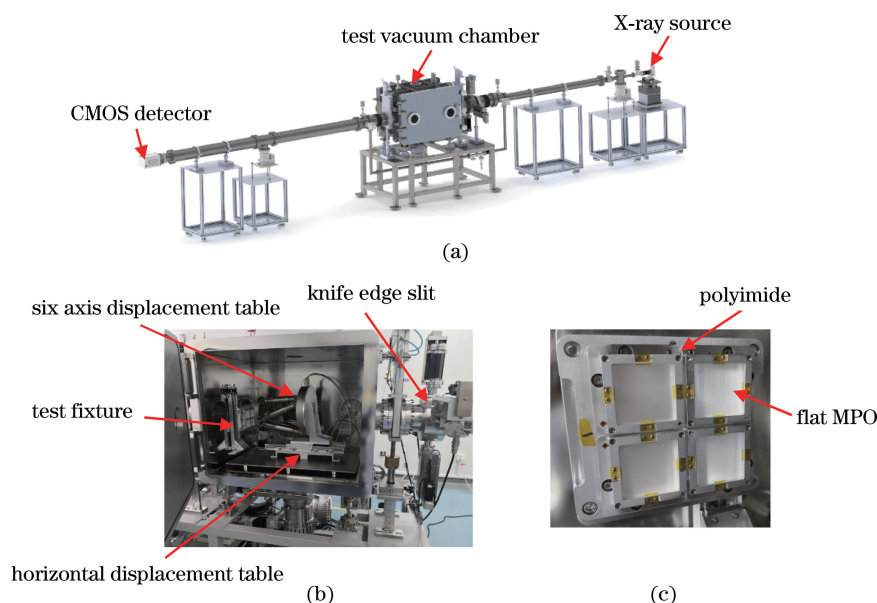


图 2 平面龙虾眼 X 射线真空测试装置图。(a)设备示意图;(b)测试腔体实物图;(c)低应力夹持工装图

Fig. 2 Diagrams of planar lobster eye X-ray vacuum test equipment. (a) Diagram of equipment; (b) physical map of test chamber; (c) clamping fixture with low stress

MPO 器件的测试腔体如图 2(b)所示,首先将平面 MPO 器件放置于低应力的工装夹具上[图 2(c)]。其次将装有 MPO 器件的夹具安置于 PI 位移系统上,其中 PI 六轴位移台用于调节平面 MPO 的姿态,单轴 PI 水平位移台用于调节 X 射线焦距。X 射线光源需放置于与平面 MPO 前端的距离为 $3650\ \text{mm}$ 的位置处。CMOS 探测器位于 MPO 器件后端 $3650\ \text{mm}$ 处,用于收集聚焦光线。所有测试均需在光源管道的真空度小于 $10^{-4}\ \text{Pa}$ 、测试腔体的真空度小于 $10^{-3}\ \text{Pa}$ 的条件下进行,测试电压为 $2\ \text{kV}$,电流为 $200\ \mu\text{A}$,曝光时间为 $205\ \text{ms}$ 。

3 结果与讨论

3.1 X 射线聚焦成像

X 射线光管发出的 X 射线光束经过平面 MPO

器件后会聚于焦点位置处,在理论焦点位置附近放置 CMOS 探测器,微调聚焦光学器件角度并前后移动平面 MPO,找到十字线光斑形状最佳时 CMOS 相对于聚焦光学器件的位置,此位置与聚焦光学器件入射端的距离即为聚焦光学器件的实际焦距 f ,实验结果如图 3 所示。由图 3 可知,平面 MPO 相对于 CMOS 探测器的距离与聚焦成像性能有直接的关系。出射 X 射线光斑的最大强度随着距离的逐渐增大而逐渐减小。十字线点扩展函数(PSF)的形状随着远离焦距的变化也发生着变化,一次反射的十字臂会分裂成四条,二次反射的中心焦斑弥散成四个。当焦距约为 $3650\ \text{mm}$ 时,X 射线光斑的强度达到最大,十字线尺寸最细,二次焦斑面积最小。

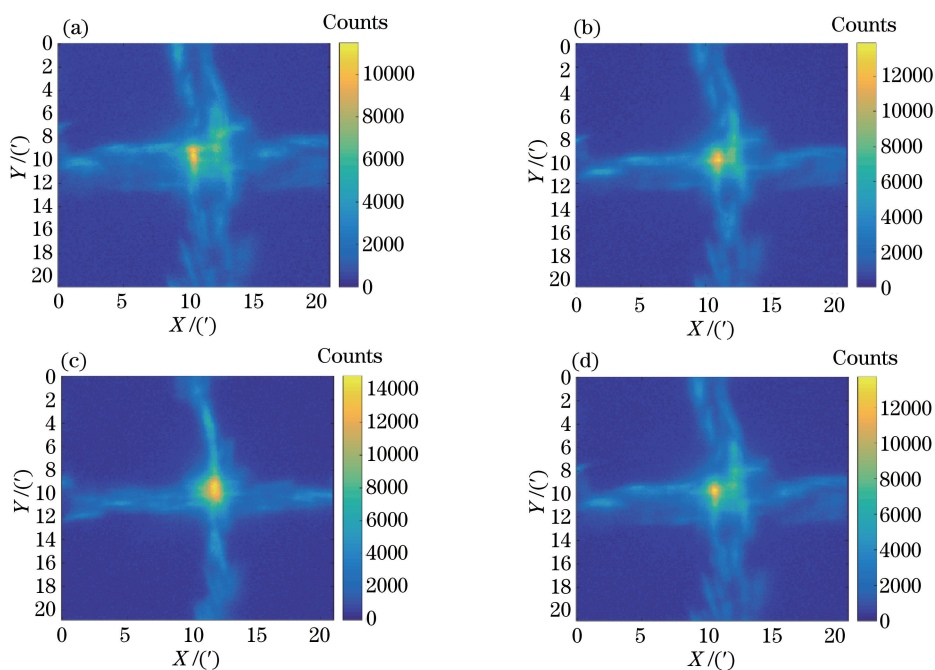


图 3 平面 MPO 在不同聚焦位置处的聚焦成像情况。(a) 3600 mm; (b) 3620 mm; (c) 3650 mm; (d) 3700 mm
 Fig. 3 Focused imaging results of flat MPO at different focusing positions. (a) 3600 mm; (b) 3620 mm; (c) 3650 mm; (d) 3700 mm

3.2 角分辨率

角分辨率是通过使用数据处理软件对 CMOS 探测器收集到的数据进行处理得到的,通过挑选 2 次聚焦焦斑并使用重心法求得焦斑重心位置,并通过绘制光斑强度分布的等高线图得到焦斑的半峰全宽(FWHM)包围直径及其对应的角分辨率。测试结果如图 4 所示。其中①为 FWHM 对应的等高线分布曲线,②为拟合的 FWHM 的椭圆范围,③为以椭圆长轴为直径的圆形范围,④为以 FWHM 最远距离为直径的圆形范围。

由图 4 可知,平面 MPO 的聚焦二次焦斑为非

规则的椭圆形,其 FWHM 最大直径为 4.63 mm,对应的角分辨率为 4.36'。拟合椭圆的长轴直径为 2.98 mm,短轴直径为 1.97 mm,长轴和短轴对应的角分辨率为 3.17'和 2.1',聚焦十字焦斑在 X-Y 方向两个维度的微孔统计特性存在差异性,PSF 形状的非均匀性即拟合椭圆的长轴与短轴的比值约为 33.7%。分析其原因可能是在高温熔压成型阶段,MPO 器件在两个方向的受力不均,导致方形通道的松紧程度不一致,进而使得方形通道的轴向偏差弥散程度不一致。

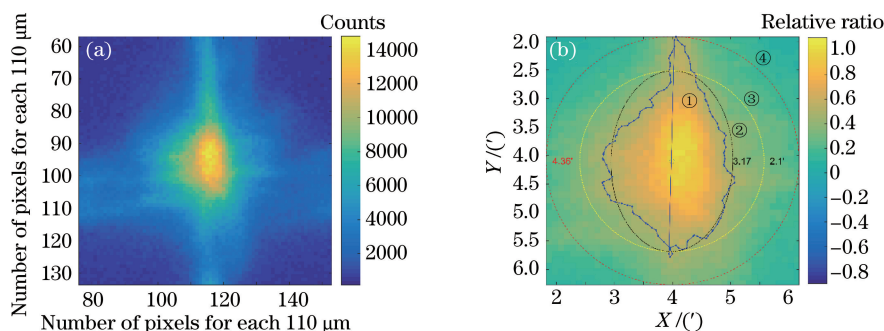


图 4 聚焦成像等高线情况。(a)二次焦斑局部放大图;(b)二次焦斑对应的等高线分布图
 Fig. 4 Contour distributions of focused imaging. (a) Partial enlargement map of secondary focal spot; (b) contour map corresponding to secondary focal spot

为了确定点对点 X 射线束流检测设备的重复测量精度,将平面龙虾眼光学器件固定放在夹具上,

设备每隔 10 min 测量一次聚焦成像情况,连续测量 12 次,测试结果如图 5 所示。由图 5 可知,在焦距

为 3650 mm 处,在相同的测试条件下,平面龙虾眼光学器件测量的角分辨率的最大值以及拟合椭圆长轴、短轴数值均相对稳定,重复测量三次,得到三者的均方根(RMS)分别为 $0.09'$, $0.09'$, $0.05'$,该结果验证了该套 X 射线检测设备测量成像质量为角分量级平面龙虾眼光学器件的可行性。

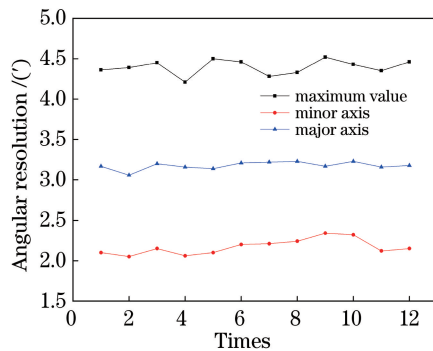


图 5 角分辨率重复测试结果

Fig. 5 Results of repeated test of angular resolution

3.3 二维扫描

理想情况下平面 MPO 的二次聚焦焦斑是一个理想圆点,但研制工序存在多种工艺缺陷,导致焦斑会发生畸变。为了研究平面 MPO 工艺缺陷对于一次反射光斑和二次反射焦斑的影响,首先通过刀口狭缝系统的 4 个真空位移台对真空管路中的刀口进

行移动,调节中心光束形成方形区域。其次通过 PI 六轴位移台调整平面 MPO 的姿态,使透射光、一次反射光斑和二次反射光斑分离,微调 X 射线焦距使其二次焦斑光强最大,13 mm×13 mm 中心区域的成像结果如图 6 所示。通过重心法确定二次焦斑的重心位置和最高强度,提取半峰全宽对应的成像范围。再利用角分辨率换算公式,直接得到二次焦斑的等高线。X 射线焦距为 3650 mm,该条件下可将通道形变对成像的影响进行等距离放大,从而有助于发现研制过程存在的工艺误差。

由图 6 可知,一次反射光线断裂不连续,并且横线弥散程度大于竖线,二次反射光斑形状弥散为类椭圆形。经过计算可得二次焦斑的角分辨率最大为 $2.77'$,经过拟合后的椭圆长轴角分辨率为 $2.75'$,短轴为 $2.03'$ 。图 7(a)为 Tilt 型缺陷的理想位置。测试结果表明,平面 MPO 可能存在的工艺缺陷主要为 Tilt 型^[14-16],即方形通道指向偏离理想位置[图 7(b)]。Tilt 型工艺缺陷产生的原因主要是:在方丝光纤拉制成型过程中,方丝尺寸精度存在波动,导致通道指向可能发生偏移,X 射线与通道内壁反射后偏离理想位置,进而导致二次焦斑畸变为椭圆。后续在对不同的平面 MPO 器件进行批量测试的过程中,均发现不同程度的 Tilt 型工艺缺陷。

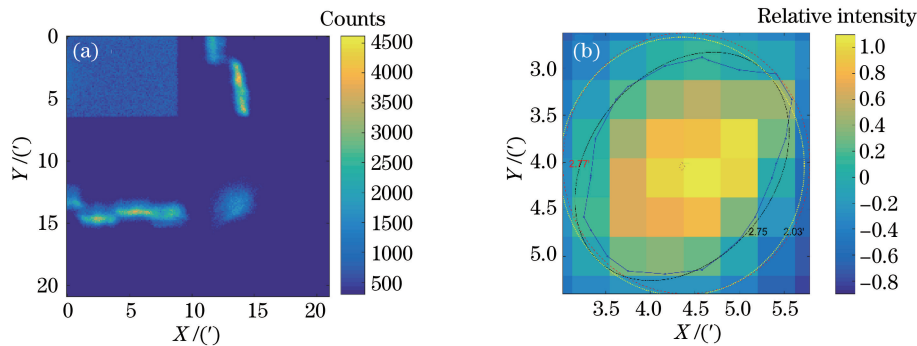


图 6 13 mm×13 mm 中心区域聚焦成像情况。(a)聚焦成像结果;(b)二次焦斑等高线分布图

Fig. 6 Focused images in central region of 13 mm×13 mm. (a) Focused imaging results;
(b) contour map of secondary focal spot

为了分析不同区域微孔统计特性的差异性,每隔 13 mm 上下左右移动平面 MPO,对其进行 3×3 的二维扫描成像测试,微调器件的姿态保持二次焦斑重心位置在探测器上相对恒定,微调 X 射线焦距让其二次焦斑亮度最大,扫描结果如图 8 所示,其中 p1~p9 为平面 MPO 的 9 个不同区域。由图可知,不同区域存在的 Tilt 型缺陷程度不一致,对点扩展函数(PSF)形状的贡献不同,这些微小的差异是工艺改进的重要依据。一次反射光线

直接决定了二次焦斑的形状,一次反射光线畸变越小,二次焦斑越规则,光强强度越大。因此可通过计算椭圆焦斑的面积对不同区域的微通道排列质量情况进行评估,二次焦斑面积越小,成像效果越佳。其中 p4 位置的聚焦效果最差,最大角分辨率为 $2.7'$,椭圆长轴、短轴分辨率分别为 $2.6'$ 和 $2.5'$,焦斑面积最大。p6 位置的聚焦效果最佳,最大角分辨率为 $2.1'$,椭圆长轴、短轴分辨率分别为 $1.9'$ 和 $1.7'$,焦斑面积最小。

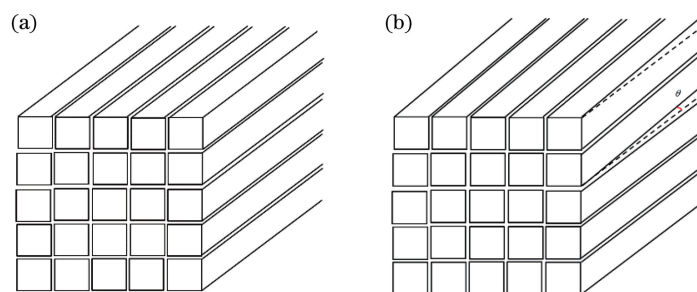


图 7 Tilt 型缺陷结构示意图。(a)理想情况;(b)方形通道偏离理想位置 θ 角度

Fig. 7 Schematic diagrams of tilt type defect structure. (a) Ideal condition; (b) square channel deviating from ideal position with deviating angle of θ

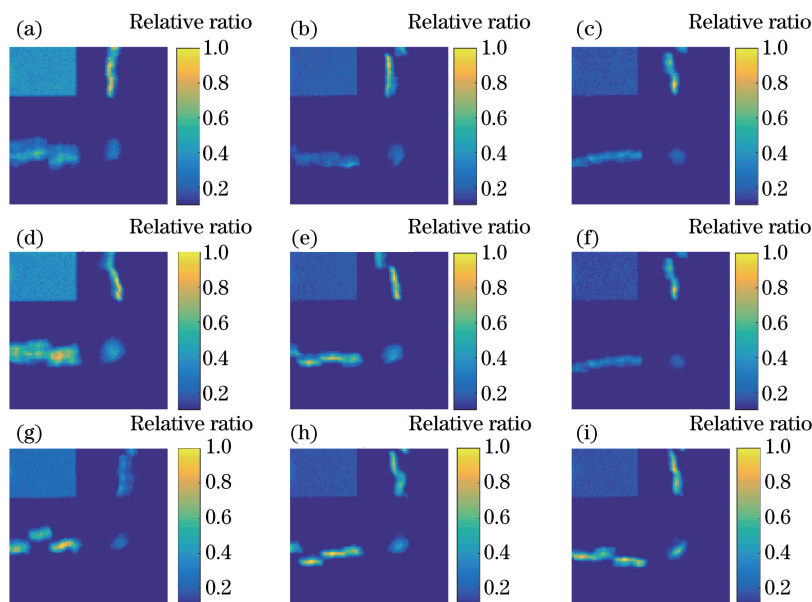


图 8 平面 MPO 不同区域的成像结果。(a) p1; (b) p2; (c) p3; (d) p4; (e) p5; (f) p6; (g) p7; (h) p8; (i) p9

Fig. 8 Imaging results of flat MPO in different areas. (a) p1; (b) p2; (c) p3; (d) p4; (e) p5; (f) p6; (g) p7; (h) p8; (i) p9

3.4 模拟结果

假设平面 MPO 的 Tilt 型工艺缺陷的轴向偏差 θ 角度分布服从高斯正态分布 $N(\mu, \delta)$, 其中数学期望 μ 用于表征通道指向的整体偏移量, 标准差 δ 用于表征通道指向的幅值大小。模拟平面 MPO 的方孔通道边长为 $40 \mu\text{m}$, 壁厚为 $8 \mu\text{m}$, 厚度为 2.5 mm 。为了简化时间, 设置模拟区域尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, 模拟光线数量为 4×10^4 个。点光源到平面 MPO 的距离与平面 MPO 到探测器的距离均为 3650 mm 。为了验证 Tilt 型工艺缺陷对于平面 MPO 聚焦成像的影响, 进行了 2 组模拟。第一组模拟设置为: 模拟区域为 X 方向局部的 $1 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的长方形区域, 其 X 方向的方孔通道指向服从高斯正态分布 $N_x(-0.9', 0)$, 局部通道指向向

左偏离 $0.9'$, 模拟结果如图 9(a) 所示, 一次反射光不连续, 长度为 5 mm 的竖线向左偏离理想位置 1.91 mm , 进而导致二次焦斑分裂成 2 个, 聚焦光斑强度变弱。第二组模拟设置为: X 方向和 Y 方向角度指向分布分别服从高斯正态分布 $N_x(0, 10'')$ 和 $N_y(0, 20'')$, 模拟结果如图 9(b) 所示。由图可知, 竖线弥散的线宽尺寸约为 0.7 mm , 横线约为 1.4 mm , 对应的二次焦斑畸变为长方形, 光强变弱。实验结果与模拟结果相类似, 表明平面 MPO 主要存在 Tilt 型工艺缺陷, 这会导致二次焦斑产生畸变, 微孔统计特性变差, 进而降低聚焦成像性能, 使得成像质量变差, 研制过程应该尽量避免 Tilt 型工艺缺陷的产生。

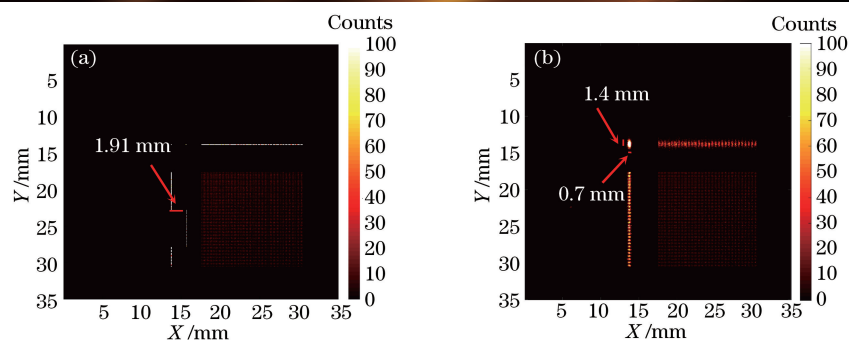


图 9 蒙特卡罗模拟结果。(a)第一组模拟;(b)第二组模拟

Fig. 9 Simulation results by Monte Carlo. (a) 1st group; (b) 2nd group

4 结 论

为了得到平面 MPO 微孔统计特性对于聚焦成像的影响,研制了一套平面 MPO 的 X 射线点对点测试装置,得到了平面 MPO 的 X 射线测试结果,结合不同区域的扫描测试结果,发现平面 MPO 存在 Tilt 型工艺缺陷。此外,项目组将开展平面 MPO 的球面热成型的研制和测试工作、研究球面成型精度对于龙虾眼 MPO 聚焦成像的影响。通过设置对照实验,明确影响龙虾眼光学器件成像质量的工艺过程,并提出可能造成这样变化的原因,以便于理论模型完善和工艺改进。

参 考 文 献

- [1] Angel J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1979, 233: 364.
- [2] Kodama R, Ikeda N, Kato Y, et al. Development of an advanced Kirkpatrick-Baez microscope [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1321-1323.
- [3] Hudec R, Inneman A V, Pina L, et al. Lobster-eye X-ray telescopes: recent progress [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4851: 578-586.
- [4] Ulmer M P, Graham M E, Vaynman S, et al. Deformable mirrors for X-ray astronomy and beyond [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8076: 513-521.
- [5] Aschenbach B, Briel U G, Haberl F, et al. Imaging performance of the XMM-Newton X-ray telescopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4012: 731-739.
- [6] Yuan W M. Einstein probe: exploring the dynamic X-ray universe [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(3): 5.
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): 5.
- [7] 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.
- [8] Martindale A, Pearson J F, Whitford C, et al. The mercury imaging X-ray spectrometer: instrument overview [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7441: 744115.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Yue 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.
- [12] Collon M J, Beijersbergen M W, Wallace K, et al. X-ray imaging glass micro-pore optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6688: 668812.
- [13] Zhang D, Sanmartin D R, Button T W, et al. The fabrication and characterisation of piezoelectric actuators for active X-ray optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7448: 744807.
- [14] Zhao D H, Zhang C, Yuan W M, et al. Ray tracing simulations for the wide-field X-ray telescope of the Einstein Probe mission based on Geant4 and XRTG4 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9144: 91444E.
- [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] 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.