

激光与光电子学进展

可见光波段测试 Wolter-I 型 X 射线望远镜的衍射影响分析

于可¹, 李凤岐^{1*}, 杨彦佳², 赵子健², 鲁兵², 张佳伟², 陈勇^{2**}, 吴开济³¹沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159;²中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;³哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 爱因斯坦探针卫星是一项针对时域天文学的任务, 搭载的科学载荷后随 X 射线望远镜配备嵌套式镍镀金 Wolter-I 型 X 射线望远镜具有高灵敏度。角分辨是 Wolter-I 型 X 射线聚焦镜的重要性能指标, 通常采用半能量直径表示。由于 X 射线聚焦镜在可见光与 X 射线下的光路相同, 可以使用可见光代替 X 射线进行聚焦镜角分辨性能的检测, 但也引入了可见光衍射的影响, 为了说明此种影响, 根据圆孔的夫琅禾费衍射理论, 推导遮盖率极大的细圆环衍射分布公式, 计算单层 Wolter-I 型镜片的可见光测试衍射影响。使用 EP-FXT#18 镜片在 473 nm 平行光条件下进行角分辨测试, 可见光测试角分辨为 $32.02'' \pm 0.44''$, 推导计算可见光衍射影响为 $20.15''$, 从可见光测试结果中扣除衍射引入的误差影响后角分辨约为 $24.90'' \pm 1.61''$, 与中国科学院高能物理研究所在百米真空 X 射线下对镜片的测试结果 $25.10'' \pm 1.55''$ 一致。

关键词 Wolter-I; EP-FXT; 衍射效应; X 射线聚焦镜; 可见光测试

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222444

Analysis of Diffraction Effects in Visible Wavelength Tests for Wolter-I X-Ray Telescope

Yu Ke¹, Li Fengqi^{1*}, Yang Yanji², Zhao Zijian², Lu Bing², Zhang Jiawei², Chen Yong^{2**}, Wu Kaiji³¹School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China;²Key Laboratory for Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract The Einstein probe is a mission for time-domain astronomy. The follow-up X-ray telescope is a scientific payload on the EP. FXT is equipped with a nested gold-plated nickel Wolter-I X-ray telescope, which has an advantage in terms of angular resolution, a critical performance parameter for the Wolter-I X-ray telescope. The Wolter-I X-ray focusing mirror contributes the most angular resolution of the telescope. The angular resolution is typically represented in terms of the half-power diameter. Because its optical path is the same as X-rays, visible light can be used to measure the angular resolution performance of focusing mirrors instead of X-rays. However, this also results in the effect of visible light diffraction. This work evaluates the diffraction effects in a visible light test and derives an equation for determining the diffraction distribution of an annular aperture with a very high obstruction ratio based on the Fraunhofer diffraction theory. The angular resolution is measured as $32.02'' \pm 0.44''$ in the visible light test using the 18th EP-FXT mirror shell under a 473 nm parallel laser, and the contribution of the visible light diffraction is calculated to be $20.15''$. The value for the mirror shell is $24.90'' \pm 1.61''$. Compared to the 100 m vacuum X-ray calibration facility measurements of $25.10'' \pm 1.55''$ at the Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, these results are consistent within the margin of error.

Key words Wolter-I; EP-FXT; diffraction effect; X-ray telescope; visible light test

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-09-12; 录用日期: 2022-10-13; 网络首发日期: 2022-10-23

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA1531010301)

通信作者: *lfq19640710@163.com; **ychen@ihep.ac.cn

1 引言

宇宙中充满了天体活动释放的高能射线,人们对高能天文的观测与探索也在不断发展^[1]。20世纪70年代末,国外陆续发射了多颗搭载X射线成像系统的天文卫星用于高能天文观测,这些卫星的X射线成像系统大多采用Wolter-I型结构望远镜,根据工艺可大致分为嵌套玻璃或陶瓷聚焦镜、嵌套镍薄壳聚焦镜以及扇区嵌套薄铝箔、热弯玻璃镜片。

1978年美国发射的首颗搭载X射线成像望远镜的HEAO-2卫星^[2]、1987年发射由德、美、英等国联合研制的ROSAT卫星^[3]以及1999年发射的钱德拉天文台^[4]均采用嵌套微晶玻璃聚焦镜,镜片厚度约为11~20 mm,具有迄今为止最高的角分辨率,但质量大且孔径利用率低;日本于1993年研制并发射的ASCA卫星^[5]与2005年发射的Suzaku X射线天文卫星^[6],采用厚度约为0.2 mm的薄铝箔镜片,有着重量轻的特点。此外,2013年美国研制发射的NuSTAR卫星^[7],采用超薄热弯玻璃,均进行扇区高度嵌套圆锥近似Wolter-I结构,减轻聚焦镜重量同时实现硬X射线聚焦,但角分辨率较比复制镍电铸工艺薄壳镜片差;1983年欧洲航天局(ESA)发射的EXOSAT卫星^[8-9]、与钱德拉天文台同年发射的ESA研制的牛顿望远镜XMM-Newton^[10-11]以及2004年由美、英、意共同研制的Swift^[12]卫星XRT载荷,以及2019年SRG卫星搭载的eROSITA望远镜^[13],均采用嵌套镍薄壳Wolter-I结构镜片。

嵌套镍薄壳Wolter-I结构单层镜片测试,有以下几种方法:1)托举式测试与装调,IXPE卫星搭载的镜组件采用此方法进行检测与装调^[14],该方法聚焦镜下端托举在姿态调节设备中,采用3组圆度测试仪器于上中下3个位置绕聚焦镜外表面旋转,返回聚焦镜的姿态信息进行拟合预测镜片角分辨,这种方法不需要搭建复杂的光路系统,测试结果几乎不涉及可见光衍射影响,但用于反射的是聚焦镜内表面型,对精度极高的X射线聚焦镜,通过检测外表面进行镜片光学质量评估会有较大误差。2)吊装式哈特曼检测,XMM-Newton采用此方法进行测试与集成^[15],该方法将镜片悬吊于检测系统中,入射光束通过旋转台对镜片不同扇区扫描,再利用光线追踪计算重构焦前、焦后光斑信息进行质量评估和焦距确定,此方法检测灵敏度高,可识别镜片姿态与面型的微小变化,并且可见光衍射引入的影响极小,但光路系统搭建复杂。3)吊装式光学全照明检测,SRG卫星搭载的eROSITA望远镜采用此方法进行测试与集成^[16],也是本文可见光测试采用的方法,该方法可实时、直接对光斑进行监测与采样测试,但测试结果中会引入可见光的衍射影响。4)X射线测试,X射线由真空管道远端光源发出,在百米真空管道内传播经过X射线聚焦镜会聚,X射线聚焦镜性

能的最终测试结果由X射线测试给出。

目前国内此领域在进行2台搭载多层嵌套式Wolter-I型结构镍镀金薄壳X射线成像光学系统的天文卫星——爱因斯坦探针(EP)卫星^[11]和增强型时变偏振天文台(eXTP)^[17],其中EP卫星已经进入研制阶段。EP卫星搭载的后随X射线望远镜(FXT)焦距为1.6 m,角分辨优于2',1.25 keV附近的有效面积大于100 cm²。完成望远镜需对研制的单层镜片进行性能检测与精密对准集成。软X射线波段需要在真空传播,在真空环境下集成聚焦镜、或对多达几十层的聚焦镜集成过程进行多次X射线测试是高成本、低效率且不容易实现的。EP和eXTP搭载的基于掠入射反射原理设计的Wolter-I型X射线聚焦镜,其X射线与可见光光路相同。为了提高聚焦镜镜片质量评估效率、镜组集成效率,采用吊装式光学全照明检测方法在可见光装调系统中进行集成。同时,由于光线掠入射相当于极窄圆环,因此测试镜片时衍射效应带来的影响将无法忽略。

为了说明可见光条件下测试的衍射效应引入的影响,主要通过圆孔的夫琅禾费衍射理论^[18],推导遮盖率极大的细圆环衍射分布公式,计算单层Wolter-I型镜片的可见光测试衍射影响。并使用EP-FXT的单层镜片进行可见光角分辨测试,与中国科学院高能物理研究所百米真空X射线测试结果比对验证衍射影响的计算结果,实现使用可见光测试装调系统对镜片质量的评估,提高X射线聚焦镜质量评估效率。

2 实验装置及工作原理

2.1 测试装置

EP-FXT单层聚焦镜的测试在可见光测试系统中进行,系统配有波长为473 nm的平行激光光源位于底部,如图1所示。

测试时镜片由系统中部装置吊起在平行光源上方,系统使用CMOS相机位于系统顶部用于数据采集,分辨率为4112 pixel×2176 pixel,像素尺寸为3.45 μm,每像素对应0.44",位深为12 bit,满足测试镜片光斑数据采集的要求。

2.2 工作原理与衍射效应

20世纪,国际上已经展开了对X射线观测领域的研究,发展出了多种X射线成像元件,如K-B结构^[19]、X射线菲涅耳波带片^[20]、毛细管光学元件^[21]、Wolter型结构^[22]等。Wolter型结构^[22]是德国科学家H. Wolter在1952年提出的掠入射全反射X射线聚焦镜,共有3种结构。其中,Wolter-I型结构因工艺实现简单的优势,成为天文望远镜应用最广泛的结构。

如图2所示,Wolter-I型结构聚焦镜由同轴共焦的旋转抛物面和旋转双曲面组成,抛物面的焦点与双曲面的后焦点重合。X射线在抛物面和双曲面各进行一次小角度的掠入射全反射,最后在焦点处会聚,两次掠

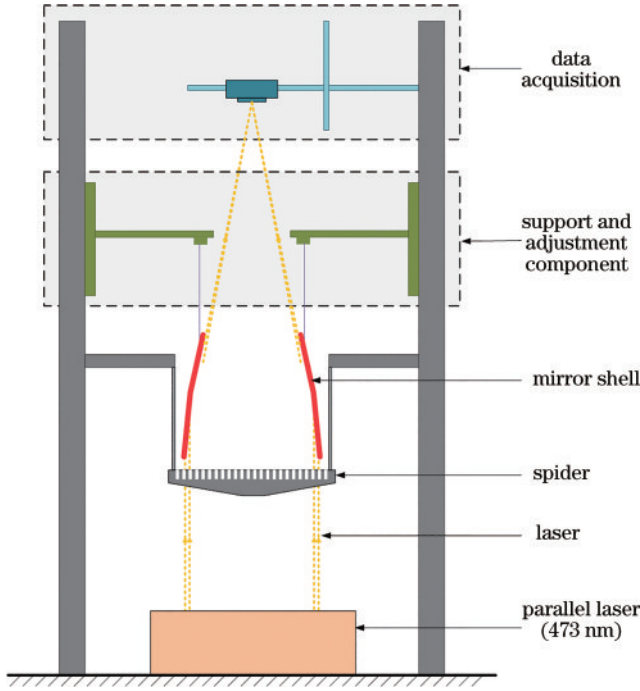


图 1 Wolter-I 型聚焦镜可见光测试系统示意图

Fig. 1 Diagram of the visible light test facility for Wolter-I focusing mirror shells

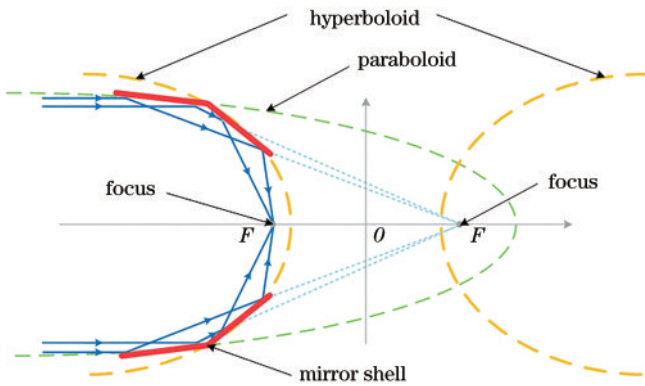


图 2 Wolter-I 型光路结构示意图

Fig. 2 Schematic of the light path for the Wolter-I focusing mirror

入射反射使该结构近似满足阿贝正弦条件^[22]。

测试实验使用单层镜片 EP-FXT#18, 测试镜片的结构参数, 如表 1 所示。

表 1 测试聚焦镜 EP-FXT#18 的结构参数
Table 1 Key parameters of the 18th EP-FXT focusing mirror shell

Parameter	Specification
Shell name	EP-FXT#18
Front radius(R_{max}) /mm	108.86
Middle radius(R_{mid}) /mm	106.40
Rear radius(R_{min}) /mm	98.89
Length /mm	300
Thickness /mm	1.00
Focal length /mm	1600

光的衍射是指光在传播路径中, 经过障碍物或狭缝小孔时, 绕过障碍物偏离直线传播的现象。1690 年惠更斯提出波面上的每一个点都可以看作一个发射子波的波源, 后一个时刻的子波包络面就是该时刻的新波面。基于光的干涉原理, 惠更斯子波来自同一光源, 因此它们是相干的, 波面外的光振动是波面所有子波在该点相干叠加的结果, 菲涅耳对惠更斯原理加以完善, 发展成为惠更斯-菲涅耳原理, 成功解释了衍射现象^[18]。

根据夫琅禾费衍射在后焦面上某点 $P(x, y)$ 的复振幅分布为

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{C}{f} \exp\left[ik\left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f}\right)\right] \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x_1, y_1) \exp\left[-i\frac{k}{f}(xx_1 + yy_1)\right] dx_1 dy_1, \quad (1)$$

式中: $C = 1/(i\lambda)$; f 为焦距; $\tilde{E}(x_1, y_1)$ 为 x_1, y_1 面上孔径范围内的复振幅分布, 平面波垂直入射时, $\tilde{E}(x_1, y_1)$ 为常数, $k = 2\pi/\lambda$ 是波矢量的大小。

1928 年, Steward^[23] 给出了环形孔径衍射表达式, 外环半径为 ρ_1 , 内环半径为 ρ_2 , 其中环孔中心障碍比率为 $\epsilon(\rho_2/\rho_1, 0 \leq \epsilon \leq 1)$ 的圆衍射屏, 通光环孔面积为 $S = \pi\rho_1(1 - \epsilon)$, 环形孔径衍射分布为

$$I^2 = \frac{2}{1 - \epsilon^2} \left\{ \frac{J_1(z)}{z} - \epsilon^2 \frac{J_1(\epsilon z)}{\epsilon z} \right\}, \quad (2)$$

式中: $J_1(z)$ 为一阶贝塞尔函数, $z = k\rho\theta = k\rho(r/f)$, 其中 r 为焦平面上的半径, ρ 为衍射环半径, 即可推导出焦平面处衍射能量包围半径 r , 以及与之相对应的角分辨率影响, X 射线测试角分辨率可通过可见光测试角分辨率与衍射的角分辨率影响进行预估^[24]。

3 测试与分析讨论

测试时将镜片姿态调节至其光轴与平行光源共轴, 沿光轴方向移动相机采集光斑进行寻焦测试, 由焦前至焦后或反之寻找最小光斑, 计算得到测试镜片的角分辨率。图 3 为 Wolter-I 型镜片焦点以及焦点前后光斑示意 Wolter-I 型聚焦镜寻焦测试的光斑变化。角分辨率是评价天文望远镜的重要指标之一, 代表一部天文望远镜区分 2 个源之间所需的最小距离, 以角秒为单位, 其数值越小表示望远镜分辨能力越强。测试中通过采集焦斑图像数据, 计算焦斑灰度 50% 能量包围直径分布 (HPD), 换算成角秒单位即角分辨率, 作为镜片质量评价标准^[25]。

如寻焦过程中肉眼观察光斑, 其衍射环不明显。图 4 为测试镜片 EP-FXT#18 的可见光测试离焦环斑, 环形弧间的空隙为系统中蛛形轮毂支撑辐条遮挡, 数据经过对数与色阶显示处理后, 呈现清晰的衍射环,

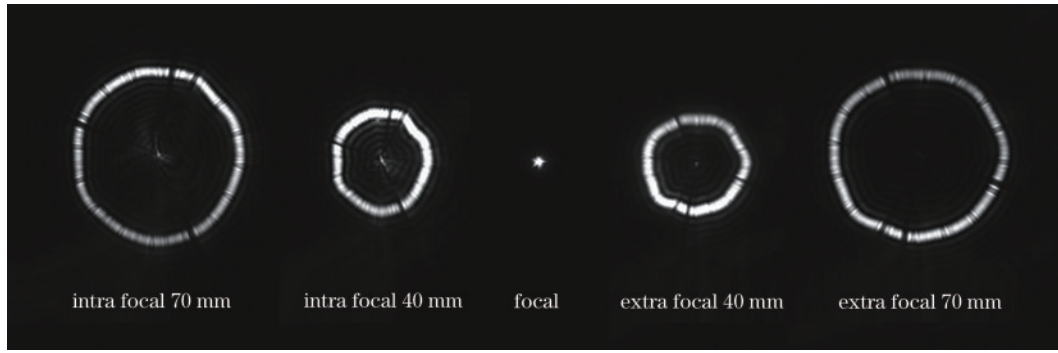


图 3 镜片沿轴寻焦过程示意图(示例光斑为 EP-FXT#23 镜片)

Fig. 3 Diagram of the searching focus on-axis of the mirror shell (example data from EP-FXT#23 mirror shell)

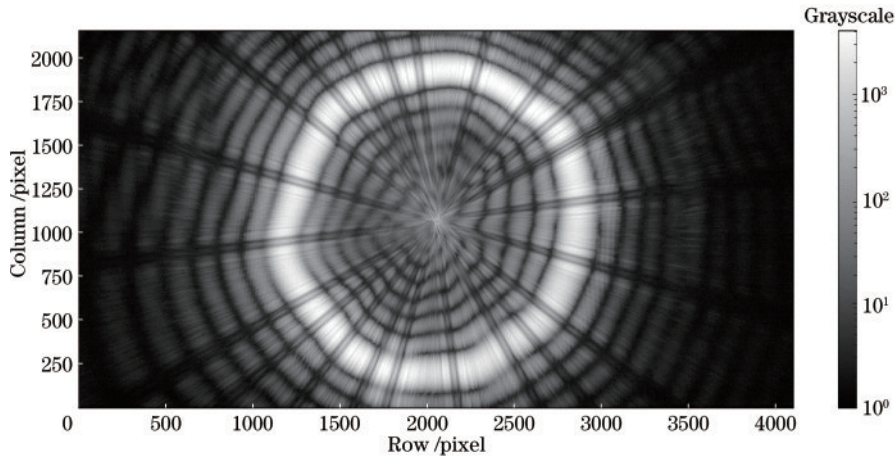


图 4 测试镜片 EP-FXT#18 的 40 mm 离焦环形光斑灰度图

Fig. 4 40 mm extra focal of the 18th EP-FXT mirror shell

在角分辨计算过程中这部分灰度值将被计算在内,可见光测试的角分辨结果中衍射效应的影响不可忽视。

测试选用的镜片经过高精度抛光处理,镜片反射层为超光滑表面,X 射线光子在其表面掠入射反射时散射引入的影响约为几个角秒,因此 X 射线测试结果的主要误差影响由镜片面型贡献,包括沿轴方向母线面型误差与圆度面型误差。可见光测试结果的影响在镜片面型误差基础上还引入了衍射效应的影响,并且该影响与面型误差贡献的影响线性无关。X 射线与可见光测试对同一片聚焦镜,面型误差均为该镜片提供。因此,本次对 EP-FXT#18 聚焦镜可见光与 X 射线的角分辨测试结果中的主要误差为衍射效应贡献,推导计算衍射效应影响与测试结果的对比差值进行相互验证。

参考表 1 中实验镜片结构参数前端口最大半径 R_{max} 与双曲面和抛物面交界处半径 R_{mid} , 得到测试镜片衍射圆环遮挡比 ϵ 为 0.977, 根据式(2)环形孔径的衍射能量分布可以获得遮挡比为 0.977 的圆环衍射屏对应焦平面处 50% 衍射能量包围半径 r_1 为

$$r_1 = 0.517 \frac{\lambda f}{2R(1 - \epsilon)}, \quad (3)$$

式中: f 为焦距; R 为圆环外圈半径, 即镜片前端口最大半径 R_{max} 。进而计算得到焦平面处衍射能量包围半径

约为 $78.12 \mu\text{m}$, 根据焦距计算其角分辨影响 $\Phi_{HPD \text{ diffraction}}$ 约为 $20.15''$ 。根据式(3)圆环衍射屏对应焦平面处 50% 衍射能量包围半径的计算公式, 统计 EP-FXT 全层口径聚焦镜镜片在可见光装调测试系统中的衍射影响, 如图 5 所示。

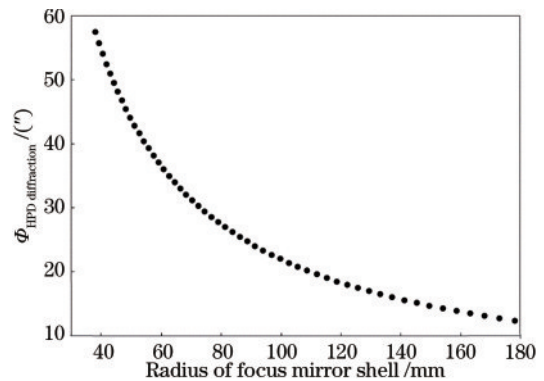


图 5 EP-FXT 全层聚焦镜 473 nm 波长可见光衍射影响
Fig. 5 Diffraction effect of all EP-FXT focusing mirror shells at 473 nm parallel visible light

能量包围直径分布(HPD)通过积分数据图像灰度值计算得到, 衍射效应的影响也通过灰度值体现, 因此测试中数据采集时的光强与曝光时间被严格控制在合适范围。测试单层镜片 EP-FXT#18 的可见光结果,

如图 6 所示。图 6(a) 为经过灰度值对数处理显示图像, 焦斑周围可见清晰衍射环。图 6(b) 为焦斑数据计算得到的能量包围函数曲线, 其中计算结果焦点光斑 50% 能量包围半径为 124.20 μm , 根据镜片焦距参数 1600 mm, 获得对应角分辨 $\Phi_{\text{HPD optical}}$ 约为 $32.02'' \pm 0.44''$ 。由于上文提到此镜片经过高精度抛光处理, 可见光与 X 射线测试间仅存在衍射引入的误差影响, 且误差之间线性无关, 因此可以通过从可见光测试角

分辨结果中扣除该镜片计算得出的衍射影响 $\Phi_{\text{HPD diffraction}}$ 。

$$\Phi_{\text{HPD de-diffraction}} = \sqrt{\Phi_{\text{HPD optical}}^2 - \Phi_{\text{HPD diffraction}}^2}, \quad (4)$$

扣除衍射影响后的角分辨 $\Phi_{\text{HPD de-diffraction}}$ 为 $24.90'' \pm 1.61''$, 该镜片在中国科学院高能物理研究所的百米真空 X 射线测试^[26]角分辨 $\Phi_{\text{HPD x-ray}}$ 约为 $25.10'' \pm 1.55''$, 扣除衍射影响后的可见光测试结果与 X 射线测试结果在误差范围内一致。

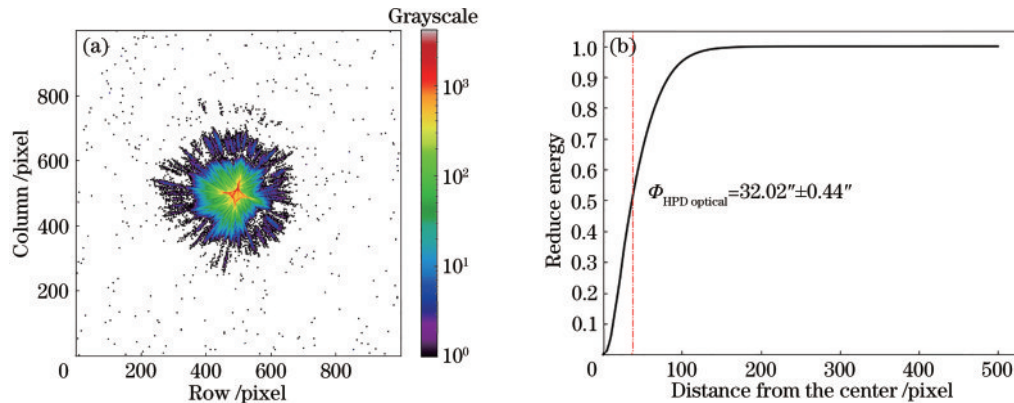


图 6 测试镜片 EP-FXT#18 的可见光结果。(a) 焦点环斑; (b) 能量包围函数曲线

Fig. 6 Testing results of the 18th EP-FXT mirror shell in visible light. (a) Focal image; (b) encircled energy function

4 结 论

采用 473 nm 的平行光对单层 Wolter-I 型聚焦镜测试, 并根据遮盖率极大的夫琅禾费圆环衍射计算聚焦镜可见光测试的衍射影响, 实现使用可见光装调测试系统对 X 射线聚焦镜镜片质量评估。可见光环境下 EP-FXT#18 聚焦镜测试结果角分辨约为 $32.02'' \pm 0.44''$, 根据衍射效应计算该镜片在此可见光波长下的衍射影响为 $20.15''$, 可见光测试结果扣除衍射影响后的角分辨约为 $24.90'' \pm 1.61''$, 与该镜片在中国科学院高能物理研究所百米真空 X 射线测试所得结果 $25.10'' \pm 1.55''$ 在误差范围内一致。实验结果验证了衍射影响计算结果, 使用可见光装调测试系统对 X 射线聚焦镜进行评估是可行的。采用可见光装调系统将为国产多层嵌套 X 射线聚焦镜的研制集成提高效率、节约成本等发挥巨大作用。此外, 即将展开研制工作的 eXTP 镜片结构比 EP-FXT 聚焦镜焦距更长, 掠入射环宽更窄, 即衍射圆环更窄, 衍射影响要大于 EP 镜片, 因此计划替换更短波长的光源以减小 EP 与 eXTP 聚焦镜研制过程评估结果的衍射影响。

参 考 文 献

[1] 袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的 X 射线宇宙[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(3): 6-25.
Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein probe: exploring the ever-changing X-ray universe[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48

(3): 6-25.
[2] Giacconi R, Branduardi G, Briel U, et al. The Einstein (HEAO-2) X-ray observatory[J]. The Astrophysical Journal, 1979, 230(2): 540-550.
[3] Trümper J. The ROSAT mission[J]. Advances in Space Research, 1982, 2(4): 241-249.
[4] Weisskopf M C. The Chandra X-ray observatory: an overview[J]. Advances in Space Research, 2003, 32(10): 2005-2011.
[5] Tanaka Y, Inoue H, Holt S S. The X-ray astronomy satellite ASCA[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 1994, 46: L37-L41.
[6] Serlemitsos P J, Soong Y, Chan K W, et al. The X-ray telescope onboard Suzaku[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2007, 59(sp1): S9-S21.
[7] Harrison F A, Boggs S, Christensen F, et al. The nuclear spectroscopic telescope array (NuSTAR) [J]. Astrophysical Journal, 2010, 770(2): 103-122.
[8] de Korte P A, Giral R, Coste J N, et al. EXOSAT X-ray imaging optics[J]. Applied Optics, 1981, 20(6): 1080-1088.
[9] Taylor B G, Andresen R D, Peacock A, et al. The exosat mission[J]. Space Science Reviews, 1981, 30(1): 479-494.
[10] 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.
[11] de Chambure D, Laine R, van Katwijk K, et al. Status of the X-ray mirror production for the ESA XMM spacecraft[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2808: 362-375.
[12] Burrows D N, Hill J E, Nousek J A, et al. The Swift X-ray telescope[J]. Space Science Reviews, 2005, 120(3):

- 165-195.
- [13] Predehl P, Böhringer H, Brunner H, et al. eROSITA on SRG[C]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1248 (1): 543-548.
- [14] Bongiorno S D, Kolodziejczak J J, Kilaru K, et al. Assembly of the IXPE mirror modules[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11822: 118220Y.
- [15] Schmidt M, Beckstette K, Dinger U, et al. An optical test and alignment method for the XMM mirror module [J]. Proceedings of SPIE, 1989, 1160: 564-567.
- [16] Arcangeli L, Borghi G, Bräuninger H, et al. The eROSITA X-ray mirrors: technology and qualification aspects of the production of mandrels, shells and mirror modules[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 105652M.
- [17] Zhang S N, Santangelo A, Feroci M, et al. The enhanced X-ray timing and polarimetry mission: eXTP [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62(2): 29502.
- [18] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 391-410.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 391-410.
- [19] Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by X-rays[J]. Journal of the Optical Society of America, 1948, 38(9): 766-774.
- [20] Ojeda-Castañeda J, Ramírez G. Zone plates for zero axial irradiance[J]. Optics Letters, 1993, 18(2): 87-89.
- [21] Kovantsev V E, Pant J, Pantojas V, et al. Capillary-based X-ray collector/collimator for diffraction applications [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(23): 2905-2907.
- [22] Wolter H. Spiegelsysteme streifenden einfalls als abbildende optiken für röntgenstrahlen[J]. Annalen Der Physik, 1952, 445(1/2): 94-114.
- [23] Steward G C. The symmetrical optical system[M]. Cambridge: The University press, 1928.
- [24] Basso S, Citterio O, Mazzoleni F, et al. The problems concerning the integration of very thin mirror shells[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7437: 74371C.
- [25] O'Dell S L, Brissenden R J, Davis W N, et al. High-resolution X-ray telescopes[J]. Proceedings of SPIE, J. Proceedings of SPIE, 2010, 7803: 78030H.
- [26] 赵子健, 王于仁, 张留洋, 等. Wolter- I 型聚焦镜 X 射线光学实验与仿真[J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2330-2336.
Zhao Z J, Wang Y S, Zhang L Y, et al. Experiments and simulation of X-ray optical Wolter- I focusing mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(11): 2330-2336.