

引用格式: ZHANG Honglin, YANG Zhitao, WANG Yusa, et al. Simulation and Experiments for Effective Area of Wolter-I X-ray Focusing Mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552217

张洪林, 杨志韬, 王于仁, 等. Wolter-I 型 X 射线聚焦镜有效面积仿真与实验[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552217

Wolter-I 型 X 射线聚焦镜有效面积仿真与实验

张洪林¹, 杨志韬¹, 王于仁², 赵子健², 马佳², 侯懂杰², 杨雄涛², 祝宇轩²,
杨彦佶², 陈勇², 汪世杰¹

(1 哈尔滨理工大学 理学院, 哈尔滨 150080)

(2 中国科学院高能物理研究所 粒子天体重点实验室, 北京 100049)

摘 要: 为了解 Wolter-I 型 X 射线聚焦镜的有效面积在地面标定与在轨标定时差异, 并修正地面标定导致的聚焦镜有效面积偏差。对 X 射线天文卫星—爱因斯坦探针搭载的后随 X 射线望远镜有效面积进行两种标定工况的仿真分析, 并在中国科学院高能物理研究所的百米 X 射线标定装置中进行有效面积的地面标定实验。结果表明: 在 X 射线能量为 1.49 keV 时, 地面标定的有效面积比在轨标定大 2.7%; 利用地面标定数据结合仿真, 可对聚焦镜在轨标定有效面积进行预测, 同时聚焦镜离轴有效面积随离轴角度变化明显。该研究方法可以对搭载 Wolter-I 型聚焦镜的 X 射线天文卫星的有效面积标定提供数据参考。

关键词: X 射线光学; X 射线聚焦镜; X 射线掠入射; 爱因斯坦探针; Wolter-I; 有效面积

中图分类号: TP172.2; TH391

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552217

0 引言

X 射线聚焦镜的有效面积是评估聚焦镜性能的关键指标之一, 它主要表现为聚焦镜收集光子的能力。对于探测器本身, 其有效面积等于自身的探测灵敏面积, 但是由于宇宙背景辐射的存在和观测源本身的流强不稳定, 单靠探测器的有效面积收集到的光源信息, 往往存在很高的背景噪声, 探测灵敏度也很低。在实际的天文观测中, 为了增加探测器的有效面积, 收集更多的光子, 提高观测数据的信噪比, 会在探测器前装配聚焦镜, 由于 X 射线很难以透射方式聚焦, 因此不能用可见光学的透镜, 而掠入射光学系统则得以广泛应用。

聚焦镜的有效面积需要经过地面标定与在轨标定, 地面标定受光源与聚焦镜之间的距离限制, 入射光具有一定发散角, 无法达到与在轨标定相同的平行光入射条件。对于 Wolter-I 型掠入射光学系统, 不同的掠入射角度, X 射线的反射率不同, 实际集光面积也同样存在差异, 因此地面标定的有效面积也会存在一定的偏差。

地面标定装置的长度决定着标定结果接近在轨标定的程度, 美国航空航天局在为“坎德拉”卫星标定时建造了马歇尔地面标定装置^[1](X-ray Calibration Facility, XRCF), 该装置真空管道长 500 m, 是国际上最长的地面标定装置。德国马-普地外物理研究所(Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, MPE)为“能谱-琴伦-伽马”卫星任务建造了 PANTER^[2]地面标定装置, 真空管道长 130 m。中国科学院高能物理研究所于 2012 年提出建设百米标定装置^[3], 该装置主要承载我国第一颗 X 射线天文卫星(Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT)^[4]的测试, 以及未来完成我国 X 射线标定的相关任务。为了解决地面标定的偏差问题,

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(Nos. XDA15020501, XDA1531010301), 中国科学院国际合作专项(No. 113111KYSB20190020)

第一作者: 张洪林, zhanghonglinmail@163.com

通讯作者: 杨志韬, yangzt2012@163.com

收稿日期: 2022-10-13; **录用日期:** 2022-12-21

<http://www.photon.ac.cn>

MPE对Wolter-I型载荷聚焦镜标定时,采用了分扇区标定^[5]的方法,以减小地面标定产生的偏差,这种方法理论上扇区越多越接近在轨标定,但是实际标定时多扇区标定产生的误差也越大,往往达不到理想中的效果。

针对中国科学院高能物理研究所百米标定装置产生的有效面积偏差,利用光学仿真软件建立爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)的后随载荷聚焦镜(Follow-up X-ray Telescope, FXT)地面标定和在轨标定模型,选取铝(1.49 keV)、钛(4.51 keV)和铜(8.05 keV)三种不同靶材的特征辐射作为X射线源,分析两种模型中聚焦镜的有效面积,并结合地面标定实验数据推算在轨标定有效面积。不同于以往聚焦镜的在轨有效面积只能通过运行在轨运行时进行测量,通过本文研究内容,可以根据地面标定结果计算出在轨时的标定结果,增加聚焦镜在地面实验时对其在轨运行性能评估的准确性。对离轴时的有效面积仿真分析与实验,得出聚焦镜离轴角度对有效面积的影响结果,从而更直观地了解地面标定测得的聚焦镜有效面积和在轨标定时有效面积之间的关系,并修正地面标定数据。

1 原理

1.1 Wolter-I型聚焦镜原理

Wolter-I型聚焦镜为掠入射X射线聚焦镜,镜片由同轴共焦点的抛物面与双曲面相接而成,抛物面与双曲面镜片的轴向长度相等,X射线在两个面的内壁进行两次反射聚焦成像,如图1所示。为了提高同体积下聚焦镜的有效面积,Wolter-I型聚焦镜一般采用多层嵌套结构,并且广泛应用于X射线天文观测中。

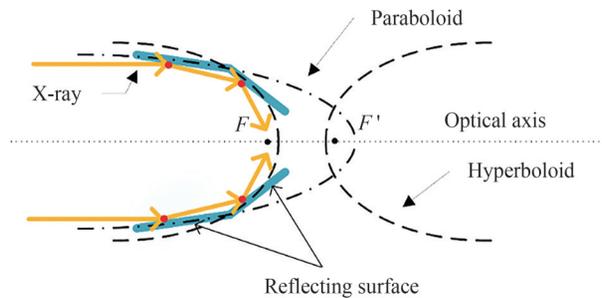


图1 单层Wolter-I型聚焦镜示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-layer Wolter-I focusing mirror

平行于聚焦镜光轴入射的X射线,先在抛物面镜片内表面发生第一次反射,反射后的X射线在双曲面内表面发生第二次反射,最后X射线向聚焦镜焦点位置汇聚。经过两次镜面反射,不仅可以减小焦距,还可抑制部分杂散光^[7]。

1.2 X射线反射原理

当X射线的掠入射角 θ 小于发生反射时的临界角 θ_c 时可以在介质表面发生反射,根据菲涅尔反射率公式^[8],可以推出X射线的反射率 $R_{\text{reflectivity}}$ 的表达式,即

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (1)$$

$$R_{\text{reflectivity}} = \frac{(\theta - A)^2 + B^2}{(\theta + A)^2 + B^2} \times e^{-\left(\frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

式中, σ 为内壁粗糙度; λ 为入射X射线波长; $A = \sqrt{\frac{\left\{ \left[\theta^2 - (2\delta)^2 \right] + (2\beta)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \theta^2 - 2\delta^2}{2}}$, $B =$

$\sqrt{\frac{\left\{ \left[\theta^2 - (2\delta)^2 \right] + (2\beta)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \theta^2 + 2\delta^2}{2}}$; δ 为介质的极化特性系数, β 为介质对X射线的吸收系数,可分别表示为

$$\begin{cases} \delta = \frac{r_e \lambda^2 N f_1}{2\pi} = \frac{e^2 \lambda^2 N_e f_1}{2\pi m_e c^2} \\ \beta = \frac{r_e \lambda^2 N f_2}{2\pi} = \frac{e^2 \lambda^2 N_e f_2}{2\pi m_e c^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_e 为电子的经典半径; N 为原子数密度; e 为电子电荷量; N_e 为介质中单位体积的自由电子数; m_e 为电子的静质量; c 为真空中的光速; f_1 和 f_2 为原子散射因子。

2 建立仿真模型

2.1 X射线源参数

聚焦镜地面标定测试时, X射线光源与聚焦镜距离为 103.5 m, 选用点光源模拟地面标定使用的 X射线源; 聚焦镜在轨运行时, 选用平行光源模拟天体发出的 X射线。光源的参数配置如表 1 所示。

表 1 光源参数
Table 1 Light source parameter

Light source	X half width/mm	Y half width/mm	Cone angle/(°)	Gross power/W
Point	—	—	0.18	100
Parallel	300	300	—	100

ZEMAX 软件中不提供 X射线光源, 仿真中调用每种特征辐射对应的镜片反射率库, 以此产生与 X射线光源相同的效果。标定测试中采用的 X射线源为多靶源^[9], 将选用铝、钛和铜三种靶材特征辐射作为 X射线源。

FXT 载荷聚焦镜采用镍镀金工艺^[10], X射线入射在镜片上的金膜表面并发生反射时, 掠入射角越小, 反射率越高。相同的掠入射角度, 能量越低的 X射线在镜片上的反射率越高。由式(2)可以得出铝、钛和铜三种靶材的特征辐射在镜片上的反射率随入射角度变化曲线, 如图 2 所示。

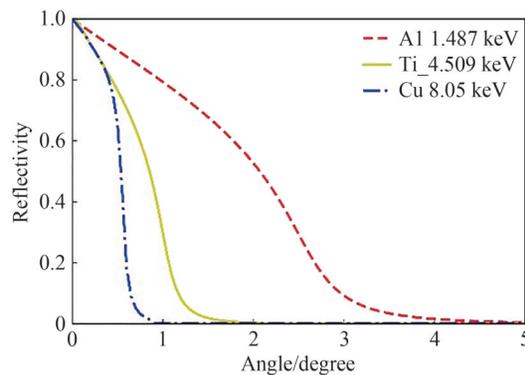


图 2 不同能量 X射线反射率曲线
Fig.2 X-ray reflectance curve with different energy

2.2 有效集光面积分析

入射 X射线需要完全覆盖镜片表面的抛物面区域, 根据每层镜片的抛物面开口面积在聚焦镜前设置相应透光孔径的光阑, 用来遮挡照射在抛物面以外的光线, 光阑的透光部分面积就是聚焦镜的有效集光面积。

当以点 X光源照射镜片时, 其光路如图 3 所示。点光源到光阑的距离为 $L=103.5$ m, 光阑的最大透光孔径为 R_2 , 最小透光孔径为 R_1 , 每层镜片长度为 300 mm, 其中抛物面镜片和双曲面镜片长度均为 $a=150$ mm, 镜片抛物面最小半径为 r , 根据 Media Lario^[11] 提供的每层镜片参数, 计算出光阑最小的透光孔径 $R_1 = \frac{Lr}{L+a}$ 。

当以平行光照照射镜片时, 其光路如图 4 所示。选用半径为 300 mm 的光源, 可以完全覆盖每一层镜片的抛物面。此时设置光阑的透光孔径与镜片抛物面的最大和最小半径相同。

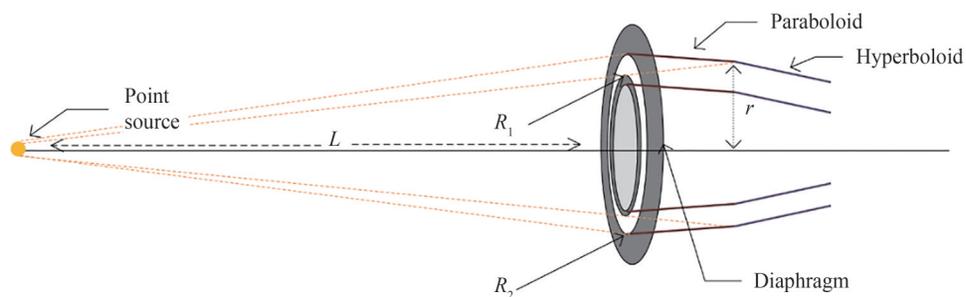


图3 点光源标定仿真模型光路
Fig.3 Light path diagram of point light source calibration simulation model

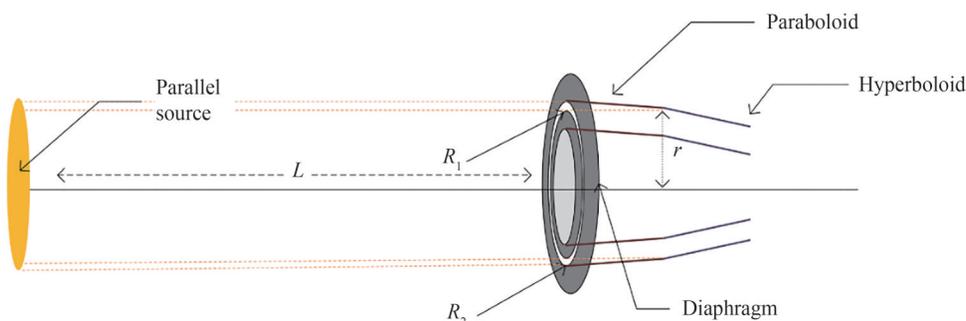


图4 平行光源标定仿真模型光路
Fig.4 Light path diagram of parallel light source calibration simulation model

2.3 建立标定模型

以X射线沿聚焦镜光轴传播方向为x轴正方向,建立坐标系^[12]。抛物面截面方程为

$$y^2 = -2\rho x \quad (4)$$

式中, ρ 为抛物面顶点的曲率半径。双曲面截面方程为

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

式中, a 、 b 分别为双曲面的长半轴和短半轴。双曲面顶点曲率半径 R_h 为

$$R_h = -\frac{b^2}{a} \quad (6)$$

双曲面圆锥系数 K 为

$$K = -\frac{a^2 + b^2}{a^2} \quad (7)$$

非序列模式中,选择标准面建立 Wolter-I 型聚焦镜的模型。聚焦镜焦距为 1.6 m,探测器放置在焦点位置,使用单像素矩形探测器代替地面测试使用的硅漂移探测器 (Silicon Drift Detector, SDD),如图5所示。

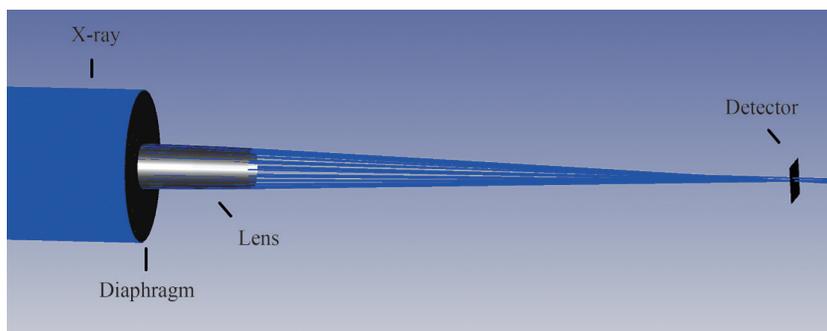


图5 有效面积仿真光路
Fig.5 Effective area simulation light path diagram

3 有效面积

3.1 聚焦镜正轴有效面积仿真分析

使用ZEMAX非序列模式中的光线追迹,可以从复杂的X射线光学系统中求解出探测器平面上的点扩散函数。仿真使用的分析光线条数设置为 1.0×10^9 ,以此来保证X射线经过镜片反射后到达探测器时接收到的光线条数不少于 1.0×10^6 。

单层镜片的有效面积 A_{sin} 可表示为

$$A_{\text{sin}} = \frac{P_{\text{bef}}}{P_{\text{aft}}} (R_2^2 - R_1^2) \pi \quad (8)$$

式中, P_{bef} 为透过光阑未入射镜片前的X射线总功率; P_{aft} 为发生二次反射之后的总功率

54层嵌套聚焦镜的最外层镜片编号#1,依次向内标记至#54。镜片越大,其掠入射角度越大,反射率越小。以铝为靶材时,如图6(a)所示,镜片越大,有效面积越大;X射线点源测得的有效面积大于平行X射线源。

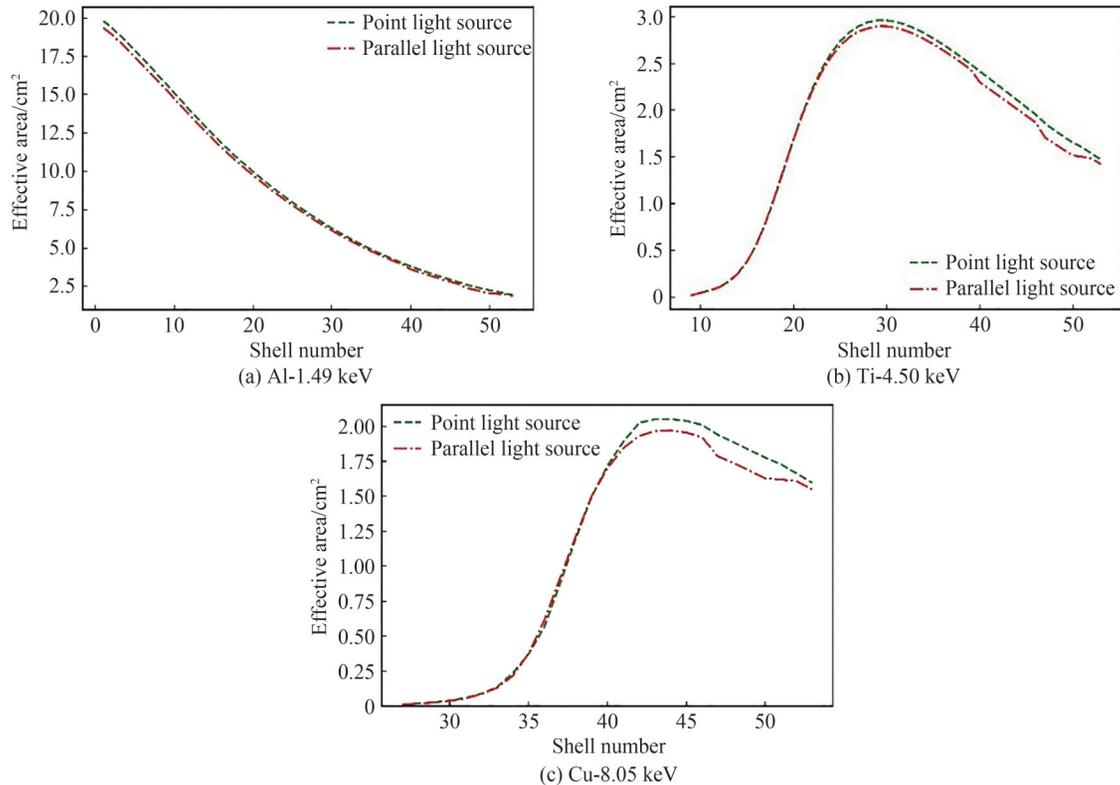


图6 两种模型下每层镜片的有效面积

Fig.6 Effective area of each lens layer under two models

以钛为靶材时,如图6(b)所示,由于光子能量较高,反射率受掠入射角度影响较大,#1~#9镜片反射率基本为0,#9之后的镜片出现X射线反射效果,单层有效面积随镜片层数呈先增大后减小的趋势,并且每层镜片在点X射线源的有效面积大于平行X射线源下的有效面积。铜靶和钛靶类似,如图6(c)所示,其光子能量更高。#1~#23镜片探测不到明显的反射现象,#23之后的镜片有效面积先增大后减小,点X射线源下的有效面积依然大于平行X射线源下的有效面积。

铝、钛和铜三种靶材的特征辐射下,聚焦镜的总有效面积如表2所示。本文方法得出的聚焦镜有效面积与其他方法得出的基本一致^[13]。对于EP-FXT的Wolter-I型聚焦镜,在地面标定条件下,使用X射线点源入射聚焦镜时,有效面积要比在轨平行X射线入射镜片时偏大,且随X射线光子能量的增加,反射率随角度的变化越明显,有效面积在不同光源入射时的偏差比例逐渐增大,这种现象与图2的结果一致。

表2 不同光源入射的有效面积比较

Table 2 Comparison table of effective areas with different light sources

Light source (target)	Total effective area (point)/cm ²	Total effective area (parallel)/cm ²	Deviation ratio
Al	460.9	448.6	2.7%
Ti	84.75	82.27	3.0%
Cu	31.31	30.1	4.0%

3.2 聚焦镜离轴有效面积仿真分析

对聚焦镜进行离焦+40 mm、以0.05°为间隔,1°以内的离轴分析。在离焦、正轴的条件下聚焦光斑均为二次反射光,此时聚焦镜的理想成像如图7(a)所示。当对聚焦镜进行0.05°间隔的离轴时,成像出现依次向外延展的一次反射光,当离轴角度为0.5°时,成像结果如图7(b)所示。当离轴角度达到1°时,成像多数为一次反射光,只有中间少部分二次反射光,如图7(c)所示。

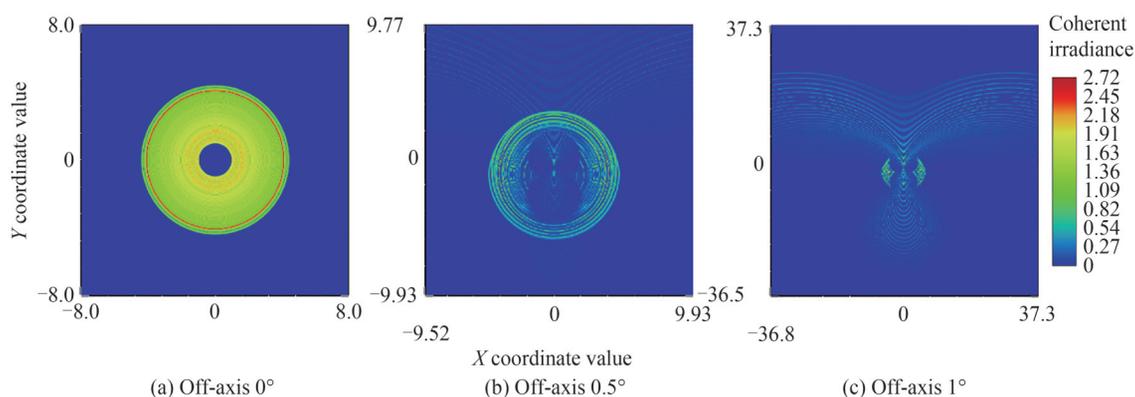


图7 离轴仿真成像图

Fig.7 Off-axis simulation imaging

由于二次反射光为聚焦镜的有效收集光,聚焦镜表面反射率与入射角度相关,因此聚焦镜的离轴角度对有效面积有很大影响,将聚焦镜正轴时的有效面积视为1,有效面积随离轴角度的变化如图8所示。当离轴角度达到10°时,有效面积较正轴工况减少约20%。

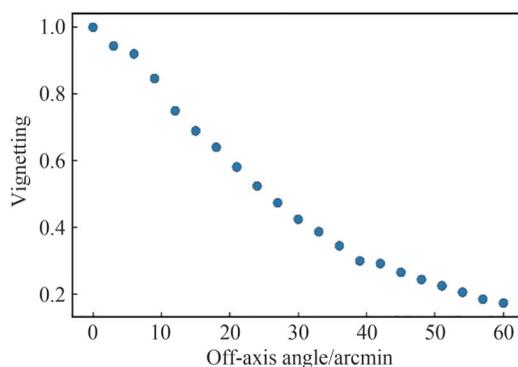


图8 仿真得到的有效面积随离轴角度的变化

Fig.8 Variation of effective area with off-axis angle by simulation

4 有效面积标定测试

Wolter-I型X射线聚焦镜实验需要进行光学对准,光学对准过程主要分为三步:

第一步,将聚焦镜模块安装固定在真空大罐内部转台上,如图9所示。在100 m真空管道的另一侧为X光源,用532 nm激光入射百米X射线标定装置,光线与管道内部无接触并且光斑中心置于管道轴心,使聚焦镜轴心、SDD中心与激光光束初步重合。

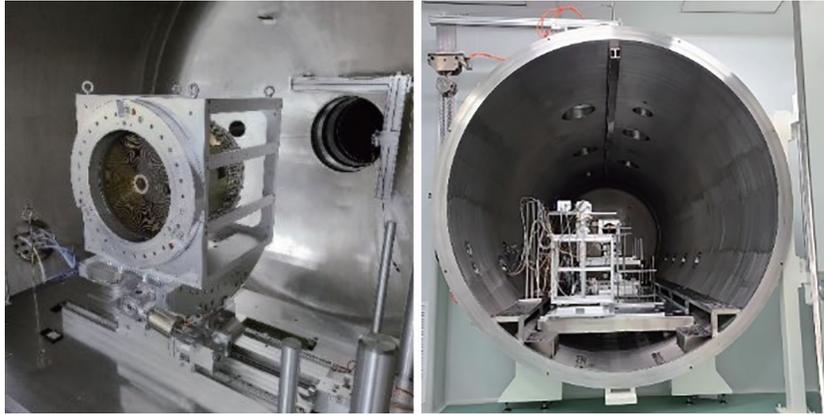


图9 真空罐内部
Fig.9 Vacuum tank interior

第二步,将光屏置于聚焦镜后,调整聚焦镜转台,使激光束经聚焦镜汇聚在光屏成像无一次反射光,如图10。此时沿光轴方向调整光屏前后位置,初步寻找聚焦镜焦点位置,即光斑最小位置,并将SDD和CCD相机调至此处。

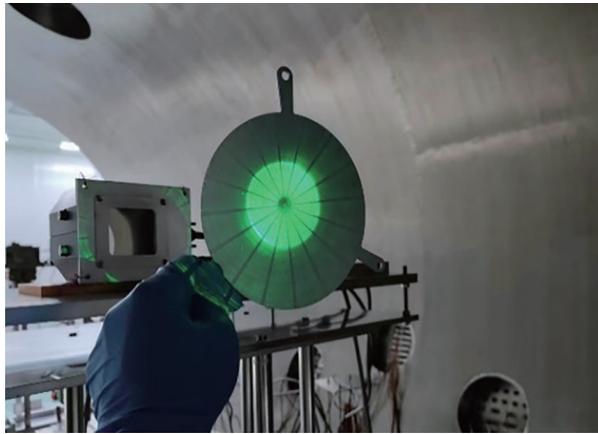


图10 可见光对准
Fig.10 Visible light alignment

第三步,关闭真空罐,用多靶X射线源代替激光器,在高真空下使用X射线对准聚焦镜。微调聚焦镜转台,使像为标准聚焦镜离焦光斑,如图11所示。探测器进行多次扫描进一步微调,找到成像光斑最小时的位

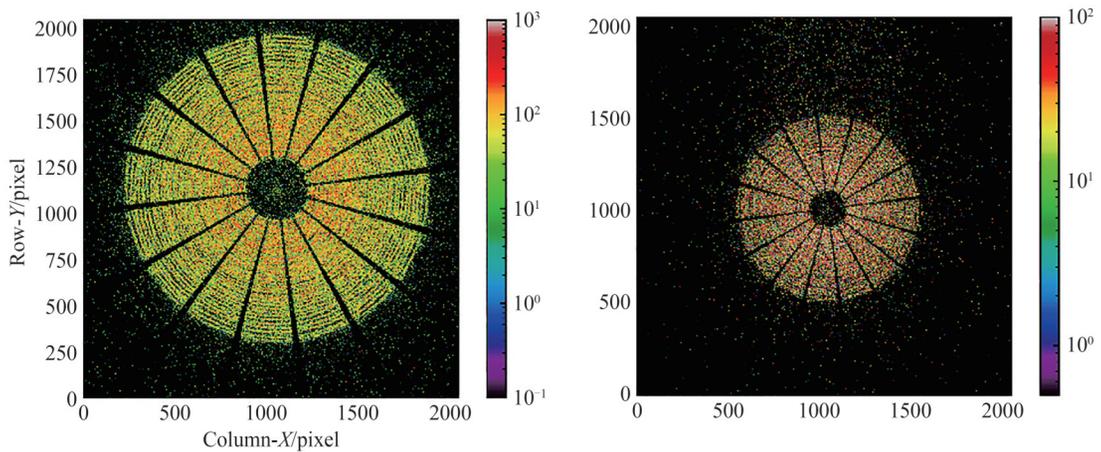


图11 离焦光斑
Fig.11 Defocused spot

置,此时,CCD相机的位置即为FXT聚焦镜最佳焦点位置。此时将CCD相机更换为SDD,测试平场计数和经过聚焦镜聚焦后的光子计数。

4.1 聚焦镜正轴有效面积实验结果

地面有效面积标定使用德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)标定过的SDD,其灵敏面积为 17 mm^2 。分别测试有聚焦镜能谱计数、平场能谱计数,有效面积表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{mirror}}}{C_{\text{flat}}} A_{\text{det}} \quad (9)$$

式中, A_{eff} 为聚焦镜有效面积, A_{det} 为SDD有效面积, C_{mirror} 为有聚焦镜光子计数, C_{flat} 为平场光子计数。

地面测试时为了得到连续能量范围的聚焦镜有效面积,选取铜作为X射线靶材,设置管电压为 16 kV ,管电流为 $10\text{ }\mu\text{A}$,获得连续谱,处理SDD采集的数据统计相同时间内聚焦镜光子数与平场光子数,如图12(a)所示。计算得出连续谱下聚焦镜的有效面积,如图12(b)所示。

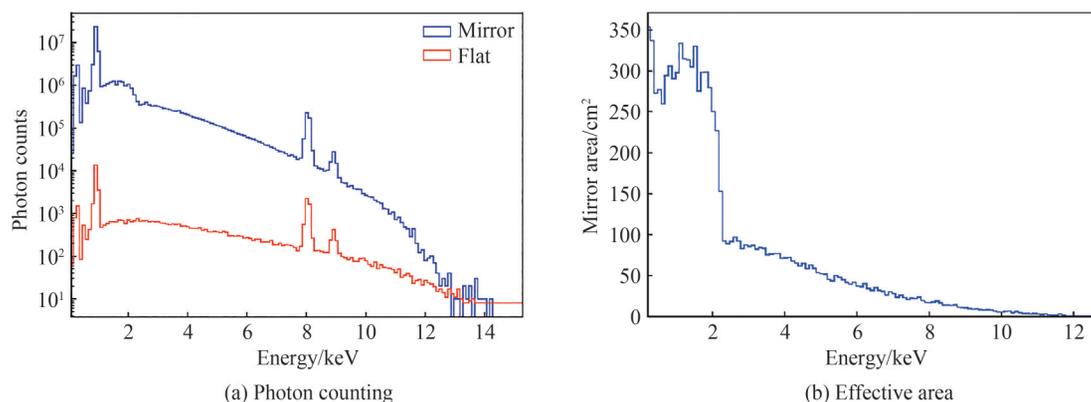


图12 实验标定结果

Fig.12 Experimental calibration results

在图13(b)中选取与仿真分析相对应的X射线能量,得到聚焦镜地面标定的有效面积分别为 $339.80\text{ cm}^2@1.49\text{ keV}$ 、 $73.57\text{ cm}^2@4.51\text{ keV}$ 和 $29.47\text{ cm}^2@8.05\text{ keV}$ 。由于地面标定与在轨标定光源掠入射角度不同,通过仿真分析得出地面标定大于在轨标定的有效面积,两种标定有效面积的偏差比例分别为 $2.7\%@1.49\text{ keV}$ 、 $3.0\%@4.51\text{ keV}$ 和 $4.0\%@8.05\text{ keV}$,对地面标定数据进行修正,推测出在轨有效面积为 $330.74\text{ cm}^2@1.49\text{ keV}$ 、 $71.43\text{ cm}^2@4.51\text{ keV}$ 和 $28.34\text{ cm}^2@8.05\text{ keV}$ 。

4.2 聚焦镜离轴有效面积实验分析

聚焦镜在离焦 $+40\text{ mm}$ 位置处,进行离轴 0.5° 和 0.95° 的成像,如图13所示。离轴二次反射光斑成像与

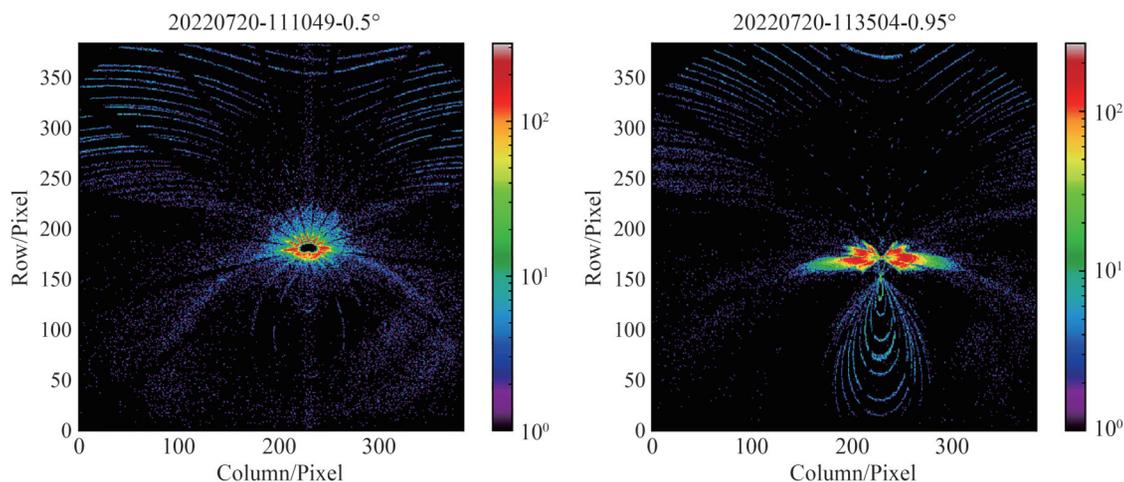


图13 离轴实验成像结果

Fig.13 Off-axis experimental imaging results

仿真基本一致,根据一次反射光可以看出,少部分一次反射光有明显交合,这是由于镜片制作加工过程复杂,微小应力作用或者镀膜工艺差异都会改变镜片的面型,从而影响镜片的性能^[14-16],这也是聚焦镜有效面积实际测试结果偏低于理想模型的原因。

控制转台,以 0.05° 为步长,进行离轴实验,得到有效面积随离轴角度变化曲线,如图14所示。实验得到的有效面积随离轴角度变化与仿真结果(图8)趋势基本一致,当离轴角度达到 $10'$ 时,有效面积只有正轴工况的80%,这也说明X光源出射的中心方向与聚焦镜的轴心共轴是很重要的。

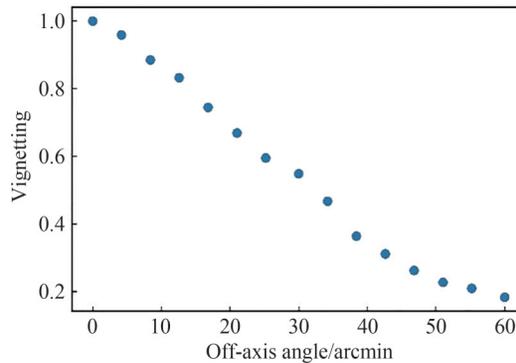


图14 实验得到的有效面积随离轴角度的变化

Fig.14 Variation of effective area with off-axis angle by experiment

5 结论

本文对 Wolter-I 型聚焦镜的地面标定与在轨标定进行仿真,分析不同标定方式对有效面积与离轴有效面积的影响。在 IHEP 标定厅的百米 X 射线标定装置中,对 Wolter-I 型聚焦镜进行了 X 射线束的测试。通过仿真分析得出,聚焦镜在地面标定的实验条件下其有效面积要大于在轨有效面积,在铝的特征辐射下,偏差比例为 $2.7\% @ 1.49 \text{ keV}$ 。实际地面标定实验中测得聚焦镜有效面积为 $339.80 \text{ cm}^2 @ 1.49 \text{ keV}$,对地面标定结果按仿真分析得出的偏差比例修正,得到在轨有效面积为 $330.74 \text{ cm}^2 @ 1.49 \text{ keV}$,符合 FXT 的指标要求。该研究对 X 射线聚焦镜通过有地面标定结果推算其在轨有效面积提供了有效方法,并会作为修正地面与在轨标定差异的基础,EP 卫星发射成功后,将进行在轨标定,结合两种标定数据,可进一步研究两者之间差异的修正方法。所得结果可对未来 Wolter-I 型 X 射线聚焦望远镜的标定工作有一定的参考价值。

参考文献

- [1] JEFF K, MARK B, JAY C, et al. Improved cryogenic testing capability at marshall space flight center's X-ray cryogenic facility[J]. SPIE, 2006, 6265:1626548.
- [2] BERND A, HEINRICH B, KARL-HEINZ S, et al. X-ray test facilities at max-planck-institut garching[J]. SPIE, 1979, 184: 234-238.
- [3] WANG Yusa, ZHAO Zijian, HOU Dongjie, et al. The 100-m X-ray test facility at IHEP[J]. Experimental Astronomy, 2022, 22: 09872.
- [4] QU Jinlu. Goggles for exploring the high-energy X-ray sky[J]. Modern Physics, 2020, 32(5): 3-9.
屈进禄. 探索高能 X 射线天空的慧眼卫星[J]. 现代物理知识, 2020, 32(5):3-9.
- [5] FREYBERG M J, BRÄUNINGER H, BURKERT W, et al. The MPE X-ray test facility PANTER: calibration of hard X-ray (15-50 keV) optics[J]. Experimental Astronomy, 2005, 20: 405-412.
- [6] YUAN Weimin, ZHANG Chen, CHEN Yong, et al. Einstein probe: exploring the ever-changing X-ray universe [J]. Scientia Sinica-Physica Mechanica Astronomica, 2018, 48: 039502.
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: 039502.
- [7] ZHAO Zijian, WANG Yusa, ZHANG Liuyang, et al. X-ray optical experiment and simulation of Wolter-I focusing mirror [J]. Optical and Precision Engineering, 2019, 27(11): 2230-2336.
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.
- [8] PENG S, YE Y, WEI F, et al. Numerical model built for the simulation of the earth magnetopause by lobster-eye-type soft X-ray imager onboard SMILE satellite[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15138-15152.

- [9] ZHU Yuxuan, WANG Yusa, CHEN Yong, et al. X-ray secondary multi-target source for soft X-ray calibration [J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(5):50402.
祝宇轩, 王于仁, 陈勇, 等. 用于软X射线探测器标定的X射线二次多靶源[J]. 核技术, 2021, 44(5):50402.
- [10] HUNTER W R, MICHELS D J, FLEETWOOD C M, et al. Replication of Wolter lens components [J]. Applied Optics, 1980, 19(13): 2128-2131.
- [11] VERNANI D, BORGHINI G, CALEGARI G, et al. Performance of a mirror shell replicated from a new flight quality mandrel for eROSITA mission [C]. SPIE, 2011, 8147: 814707.
- [12] ZHAO Zijian. X-ray optical analysis and experimental study of Wolter-I focusing mirror [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020: 33-34.
赵子健. Wolter-I型聚焦镜X射线光学分析与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020: 33-34.
- [13] ZHU Y X, LU J B, YANG Y J, et al. Optical design and simulation of Einstein probe satellite follow-up x-ray telescope [J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 025102.
- [14] WANG Fuguo. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2 m SiC primary mirror surface figure [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 933-936.
王富国. 温度和支撑方式对1.2 m SiC主镜面面型的影响分析[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 933-936.
- [15] ZHANG Xing, WANG Juan, ZHANG Yi, et al. Numerical study on thermal deformation of Wolter-I focusing telescope [J]. Acta photonica Sinica, 2020, 49(5): 0512002.
张星, 王娟, 张艺, 等. Wolter-I型聚焦镜热变形数值研究[J]. 光子学报, 2020, 49(5): 0512002.
- [16] ZHU Yuxuan. The study on X-ray focusing mirror of follow-up X-ray telescope on board Einstein probe [D]. Changchun: Jilin University, 2022: 80-96.
祝宇轩. EP卫星FXT聚焦镜的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 80-96.

Simulation and Experiments for Effective Area of Wolter-I X-ray Focusing Mirror

ZHANG Honglin¹, YANG Zhitao¹, WANG Yusa², ZHAO Zijian², MA Jia², HOU Dongjie²,
YANG Xiongtao², ZHU Yuxuan², YAN Yanji², CHEN Yong², WANG Shijie¹
(1 School of Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)
(2 Key Laboratory for Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

Abstract: One of the crucial components of an X-ray focusing lens's performance test is effective area calibration. The focusing lens will be calibrated on the ground before being launched into space. The X-ray source can't achieve the ideal condition of an incident on the mirror in parallel due to the distance restriction of the ground experimental device, so its calibration results will be different from those in orbit. In order to understand and correct the discrepancy between the effective area of the Wolter-I X-ray focusing lens in ground calibration and in-orbit calibration, the effective area of the X-ray telescope carried by the Einstein probe was simulated and analyzed under two calibration conditions. The ground calibration experiment of effective area was carried out in the 100-meter X-ray calibration device of the Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences.

First, prior to designing the light source, the calibration model is created, then the incident conditions of on-orbit and ground light sources are taken into consideration. The program makes use of X-ray sources with energies of 1.49 keV, 4.5 keV, and 8.5 keV. Second, the light source used for the on-orbit calibration can be thought of as a parallel light source while the light source used for the ground calibration can be considered a point source. The effective area of the focusing lens under the two calibrations is determined using the two incident light sources to mimic the ground calibration and the on-orbit calibration, respectively. The deviation percentage of their effective areas is determined using the simulation data. To determine the connection between the effective area and the off-axis angle, the off-axis analysis of the focusing lens's effective area is performed within 1°, and the change diagram of the off-axis effective area is drawn. Lastly, the ground calibration experiment is run in the Institute of High Energy's 100-meter calibration device. The effective area of the focusing lens is determined using the photon count

on the monitor before and after the addition of the focusing lens in the experiment, which employs continuous spectrum X-rays. The useful area is corrected based on the simulation-derived deviation ratio. In a similar manner, the off-axis experiment is conducted within 1, and the change diagram of the experiment's off-axis effective area is made.

The findings indicate that when the X-ray energy is 1.49 keV, 4.5 keV, and 8.5 keV correspondingly, the effective area of ground calibration is 2.7%, 3.0%, and 4.0%, bigger than that of on-orbit calibration. The difference between them increases with increasing X-ray energy. This phenomenon is compatible with the energy-dependent decrease in X-ray reflectivity. In the simulation and experiment, the off-axis angle affects the focusing mirror's effective area, which falls by 20% when the off-axis angle approaches 10'. The research presented in this paper demonstrates that the effective area of ground calibration is always greater than the effective area of on-orbit calibration and that the effective area of on-orbit calibration of the focusing lens can be predicted using ground calibration data combined with simulation. The off-axis effective area of the focusing lens also demonstrates a clear relationship with the off-axis angle. This study's methodology can offer data references for the Wolter-I focusing mirror-equipped X-ray astronomy satellite's effective area calibration.

Key words: X-ray optics; X-ray focusing mirror; X-ray grazing incidence; Einstein probe; Wolter-I ; Effective area

OCIS Codes: 340.0340; 340.7440; 340.7470; 340.7480