

## EP-FXT聚焦镜真实表面状态的性能模拟方法

祝宇轩 陆景彬 陈勇 王于仁 杨彦佶 韩大炜 崔苇苇 赵晓帆 丛敏 李天明 吕中华 王皓迪

## Simulation method of performance of X-ray focusing mirror under actual surface state used in FXT on board EP satellite

Zhu Yu-Xuan Lu Jing-Bin Chen Yong Wang Yu-Sa Yang Yan-Ji Han Da-Wei Cui Wei-Wei Zhao Xiao-Fan Cong Min Li Tian-Ming Lü Zhong-Hua Wang Hao-Di

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 120702 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220017>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 玻璃基底 Wolter-I 型 X 射线聚焦镜研制及测试

Development and testing of glass substrate Wolter-I X-ray focusing mirror

物理学报. 2018, 67(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181330>

#### X 射线聚焦望远镜光学设计

Optical design of X-ray focusing telescope

物理学报. 2019, 68(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190709>

#### 一种快速估算聚焦型空间 X 射线仪器粒子本底水平的方法及应用

Method and application of fast estimating particle background level for space-based focusing X-ray instruments

物理学报. 2020, 69(15): 150701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200576>

#### 一种聚焦型 X 射线探测器在轨性能标定方法

A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar

物理学报. 2018, 67(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172352>

#### 面向先进光源线站等大科学装置的低温 X 射线能谱仪原理及应用进展

Development of basic theory and application of cryogenic X-ray spectrometer in light sources and X-ray satellite

物理学报. 2021, 70(18): 180702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210350>

#### 一种点光源的自适应束斑 X 射线衍射仪的研制

A type of X-ray diffractometer with adaptive X-ray spot sizes

物理学报. 2021, 70(1): 010701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201228>

## EP-FXT 聚焦镜真实表面状态的性能模拟方法\*

祝宇轩<sup>1)2)</sup> 陆景彬<sup>1)†</sup> 陈勇<sup>2)‡</sup> 王于仁<sup>2)</sup> 杨彦佶<sup>2)</sup> 韩大炜<sup>2)</sup>  
崔苇苇<sup>2)</sup> 赵晓帆<sup>2)</sup> 丛敏<sup>2)</sup> 李天明<sup>2)</sup> 吕中华<sup>2)3)</sup> 王皓迪<sup>1)</sup>

1) (吉林大学物理学院, 长春 130012)

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) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2022 年 1 月 4 日收到; 2022 年 3 月 10 日收到修改稿)

后随 X 射线望远镜 (follow-up X-ray telescope, FXT) 是爱因斯坦探针卫星的主要载荷之一. 为了获取高信噪比的数据, 实现对观测天体的高精度定位, FXT 使用 Wolter-I 型 X 射线聚焦光学系统, 该系统一直是 X 射线空间天文观测中的重要设备. 根据 Wolter-I 型的聚焦原理, 结合实际的加工特点, 利用蒙特卡罗模拟算法对影响光学成像质量的几个关键参量, 如表面粗糙度、面形误差进行了模拟, 结合模拟结果对各参量的作用效果进行了分析. 之后利用 PANTER 实验室提供的聚焦镜性能测试结果对模拟方法进行了验证, 同时对面形误差参量进行了限制. 最终聚焦镜结构热控件半能量宽度 (half energy width, HEW) 模拟与实测结果基本一致. 该模拟过程可以很有效地应用于聚焦镜加工工艺的摸索, 为 FXT 的聚焦镜测试和标定工作提供参考. 结合实测标定数据, 该模拟方法生成的有效面积、渐晕和点扩散函数等可用于在轨观测标定数据库.

**关键词:** 爱因斯坦探针卫星, 后随 X 射线望远镜, Wolter-I 型 X 射线聚焦镜, 真实面形模拟

**PACS:** 07.85.Fv, 07.60.-j

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220017

## 1 引言

聚焦型 X 射线望远镜一直是 X 射线天文观测中的重要仪器, 聚焦观测方式使观测数据具有高空间分辨、高信噪比的特点, 是 X 射线天文学进入精密观测时期后的主流方案. 从 20 世纪 80 年代起, 一批聚焦型 X 射线望远镜陆续发射升空, 其中有代表性的有 HEAO-2<sup>[1]</sup>, Chandra<sup>[2]</sup>, XMM-Newton<sup>[3]</sup> 和 eROSITA<sup>[4,5]</sup> 等.

国内的 X 射线空间观测近十几年也在逐步发展完善, 其中硬 X 射线调制望远镜的成功发射更是我国 X 射线天文领域的里程碑式成果<sup>[6,7]</sup>. 为了

获得更为精细的观测数据, 我国相继规划提出了包括爱因斯坦探针 (Einstein probe, EP)<sup>[8]</sup> 和增强型时变与偏振天文台 (enhanced X-ray timing and polarimetry mission, eXTP)<sup>[9,10]</sup> 在内的多个聚焦型 X 射线望远镜项目. EP 卫星于 2017 年正式立项, 计划于 2023 年发射. EP 搭载宽视场 X 射线望远镜 (wide-field X-ray telescope, WXT)<sup>[11]</sup> 和后随 X 射线望远镜 (follow-up X-ray telescope, FXT)<sup>[12]</sup>, 可以实现大视场的全天监测和深度后随的定点观测<sup>[8]</sup>. EP-FXT 使用了与 eROSITA 结构类似的聚焦光学系统, 具有较高的空间分辨 (目标优于 30'') 和有效面积 (目标优于 340 cm<sup>2</sup> @1.49 keV)<sup>[12]</sup>, 是国内 X 射线聚焦天文观测中的代表.

\* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (批准号: XDA1531010301, XDA15020500) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [ljb@jlu.edu.cn](mailto:ljb@jlu.edu.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [yichen@ihep.ac.cn](mailto:yichen@ihep.ac.cn)

本文设计了 FXT 的聚焦镜性能模拟软件, 对影响成像质量的各项误差进行了数学模型的描述, 利用性能实测数据对模型参数进行限定, 对模拟软件进行了验证. 结果表明, 该模拟算法能很好地还原聚焦镜的各项光学性能, 可以为聚焦镜的研制积累经验; 结合标定数据, 该方法可以很好地应用于 FXT 的标定工作中, 辅助标定数据库的建立.

## 2 FXT 聚焦镜性能模拟

### 2.1 光学原理

X 射线相对于可见光能量较大 (典型能量为 0.1—120 keV), 常规的光学聚焦方式无法应用于 X 射线聚焦中. 1923 年, 康普顿提出了 X 射线的全反射, 当 X 射线以极小的角度 (典型值小于  $3^\circ$ ) 入射到极光滑的介质表面时 (介质表面粗糙度均方根 (root-mean-square, RMS) 约为 0.5 nm), 会发生全反射<sup>[13]</sup>. 基于这种掠入射的 X 射线聚焦技术, 1975 年 Wolter<sup>[14]</sup> 提出了三种双镜片 Wolter 构型, 其中的 Wolter-I 型可以使用多层嵌套结构, 增大有效面积, 被广泛地应用于 X 射线天文观测中, 包括 EP 和 eXTP 在内的国内外多颗聚焦型望远镜均使用了 Wolter-I 构型. 我国 2016 年发射的脉冲星导航实验 01 星 (X-Ray pulsar navigation-I satellite, XPNAV01) 也使用了 Wolter-I 构型的聚焦镜<sup>[15,16]</sup>.

除此之外, 还发展了其他类型的 X 射线聚焦光学系统, 如 EP-WXT 的光学系统就采用龙虾眼构型 (Lobster-eye)<sup>[17]</sup>, 其利用 Lobster-eye 视场大的优点, 可以实现约 3600 平方度的大视场监测<sup>[11]</sup>.

Wolter-I 型聚焦镜由抛物面内反射镜和双曲面内反射镜组成, 两段镜片同轴共焦. 如图 1(a) 所示, 平行于光轴入射的光线经由两段镜片的反射, 最终汇聚在系统焦点  $F$  处. 单层 Wolter-I 型聚焦镜的收光面积是有限的, 为了增大有效面积, 提高观测数据的信噪比, 一般采用如图 1(b) 所示的多层嵌套方式, 各层镜片均同轴共焦.

FXT 采用双望远镜系统 (A 套和 B 套), 两系统均采用了 Wolter-I 构型<sup>[8]</sup>, 其中 A 套聚焦镜由欧洲航天局 (European space agency, ESA) 提供, B 套聚焦镜拟采用德国马克普朗克地球外部物理研究所 (Max Planck institute for extraterrestrial physics, MPE) 提供的 eROSITA 飞行备份件. 单套聚焦镜采用 54 层嵌套结构, 入射端内径范围为 76.28—356.53 mm, 镜长 300 mm (抛物面和双曲面各 150 mm), 焦距为 1600 mm. 同时为了给 B 套聚焦镜提供备份方案, 也积极开展国产聚焦镜的设计和研制工作<sup>[18–21]</sup>. FXT 聚焦镜的加工选用镍电铸复制工艺<sup>[22–24]</sup>. 如图 2 所示, 首先根据设计参数通过车削和超精密抛光的方式制作模具, 然后在模具表面电铸一层镍单质, 利用一定方式脱模, 即可复制模具的形状和表面状态.

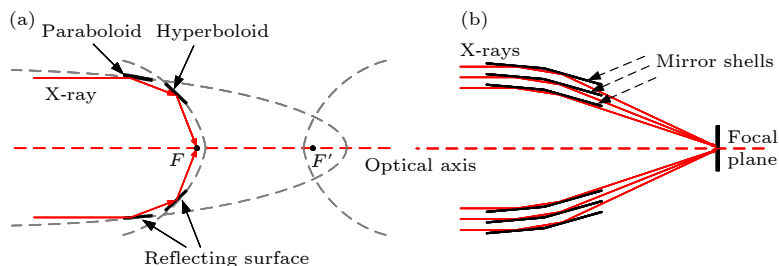


图 1 (a) Wolter-I 型聚焦镜光路示意图; (b) 多层嵌套结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of (a) optical path of Wolter-I focusing mirror and (b) multi-layer nested structure.

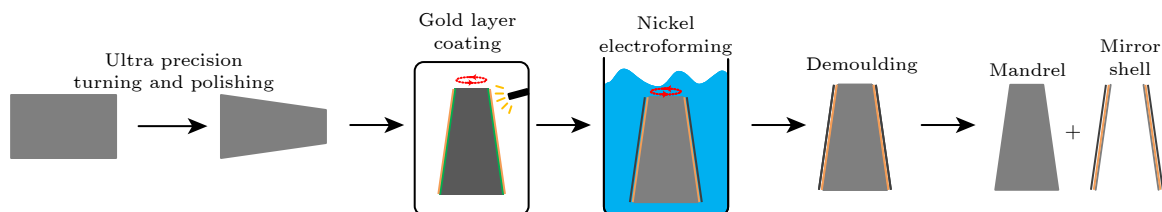


图 2 国产聚焦镜加工流程

Fig. 2. Processing flow of domestic mirror.

镍复制方法生产的聚焦镜成像精度在很大程度上受机械加工精度的影响. 为了对聚焦镜的性能进行深入的研究, 结合聚焦镜的生产特点, 完成了聚焦镜性能模拟算法, 并根据聚焦镜的测试数据对模拟算法进行验证, 对模拟参数进行限定.

## 2.2 模拟方法

一般情况认为加工精度对聚焦镜表面状态的影响从尺度上主要分为高频的表面粗糙度和低频的面形误差两方面. 如图 3 所示, 当需要考虑的误差尺度与 X 射线波长相当时, 粗糙度误差会引起 X 射线的散射效应 (X-ray scatter, XRS)<sup>[25]</sup>; 面形误差通常对应较大的一个空间尺度, 这一尺度的误差会导致光线在较大空间尺度上的偏折效应, 可以直接采用几何光线追迹的方式.

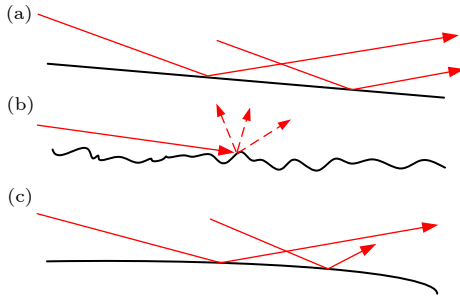


图 3 (a) 理想镜面的反射; (b) 高频表面粗糙度误差下的 XRS 效应; (c) 低频面形误差下的大角度偏折

Fig. 3. (a) Ideal Reflection; (b) XRS effect under high frequency error; (c) large angle deflection under low frequency error.

### 2.2.1 粗糙度误差

一般常用粗糙度的 RMS 来表征镜片的粗糙度误差. 当 RMS 与入射光子的波长相当时, 传统的几何光线追迹的模拟无法适用于 XRS 的模拟, 光子的反射按照一定的概率分布被散射到各个方向上, 散射光子的分布服从 Debye-Waller 定律<sup>[26]</sup>:

$$\frac{I_s}{I_i} = 1 - e^{\frac{-16\pi^2\sigma^2\sin^2\theta_i}{\lambda^2}}, \quad (1)$$

其中  $I_s$  和  $I_i$  分别为散射光子强度和反射光子的总强度;  $\sigma$  为粗糙度 RMS, 单位为 nm;  $\lambda$  为入射光子波长, 单位为 nm;  $\theta_i$  为光子的掠入射角. 对于光滑且各向同性的表面介质表面, 小角度散射 ( $|\theta_s - \theta_i| \ll \theta_i$ ) 的归一化散射强度在散射角为  $\theta_s$  时的分布与镜片表面的功率密度谱 (power spectral density,

PSD) 相关<sup>[27,28]</sup>:

$$\frac{dI_s}{d\theta_s} = \frac{16\pi^2}{\lambda^3} \sin\theta_i \sin^2\theta_s \frac{P(f)}{2}, \quad (2)$$

式中  $P(f)$  是镜片表面的 PSD,  $f$  为 RMS 给定的空间频率. 考虑 XRS 时,  $f = \frac{\cos\theta_i - \cos\theta_s}{\lambda}$ . PSD 的形式取决于镜片的表面状态, 一般的形式是近似幂律函数<sup>[29,30]</sup>:

$$P(f) = K/f^n, \quad (3)$$

其中  $K$  为归一化常数, 单位为  $\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-n}$ , 典型值为  $1 \text{ nm}^3 \cdot \text{nm}^{-1.5}$ . 由以上分析可知, XRS 效应取决于光子能量和 RMS. 结合 (1) 式和 (2) 式, 可以得到散射概率和散射角度的分布情况, 如图 4 所示.

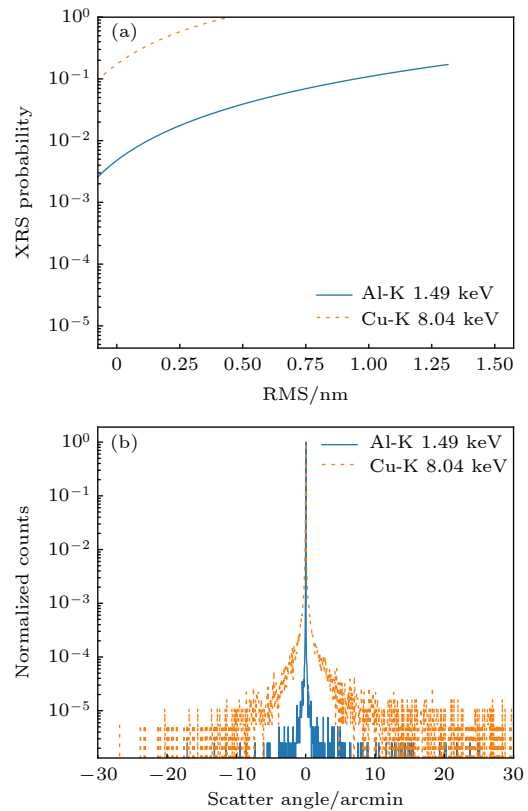


图 4 (a)  $\theta_i = 0.7^\circ$  时散射概率随 RMS 的变化; (b) RMS = 0.5 nm 时, 不同能量下的散射角分布

Fig. 4. (a) Variation of scattering probability with RMS value at  $\theta_i = 0.7^\circ$ ; (b) scattering angle distribution at different energies when RMS = 0.5 nm.

入射能量较低时, 散射概率相对较小, 散射角也分布在一个很小的范围内 ( $\pm 5'$ ); 能量增大时, 散射概率随 RMS 的增大明显增大, 当能量为 8.04 keV, RMS = 0.75 nm 时, 散射概率已达到 0.4. 由此可见 XRS 效应直接与 X 射线能量和 RMS 相关.



### 2.2.2 面形误差

大尺寸空间下的面形误差对聚焦镜成像质量的影响与能量无关, 可以使用几何光学的光线追迹进行很好的模拟. 一般的方法是从模拟参数出发, 假定在理想的镜面上进行反射, 面形误差会对反射面法向量产生扰动, 扰动的形式一般采用高斯分布的数学形式<sup>[31]</sup>.

对于机械加工引入的面形误差, Zombeck 等<sup>[32]</sup>进行了详细的介绍, 他们的测试表明, 在列举的几种误差形式中只有两种对光学性能的影响较重要. 按照这一结论, 可以将面形误差的扰动相应地分解为轴向和径向两个方向, 如图 5 所示. 在法向量  $\mathbf{V}$  模长一定时, 面形对  $\mathbf{V}$  的扰动可以分解为对  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  大小的干扰, 换言之, 整体扰动可以分解为对  $\mathbf{V}_1$  模长和  $\mathbf{V}_2$  方向的变化.

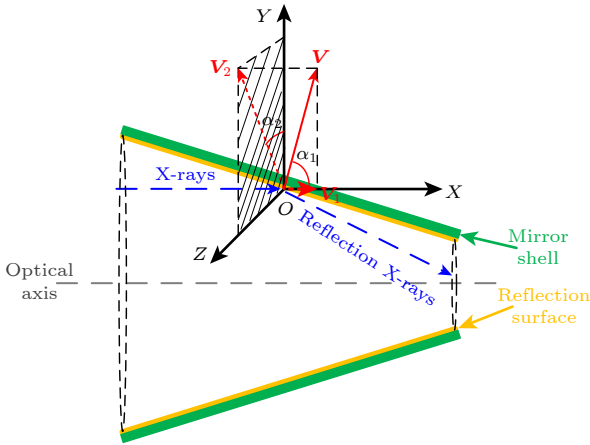


图 5 镜片二维剖面下面形误差扰动分解示意图.  $O$  点为光子在反射面上的入射点,  $XOY$  面平行于纸面,  $YOZ$  面平行于聚焦镜入射平面,  $X$  轴与光轴平行, 为方便显示, 进行了一定的夸张

Fig. 5. Decomposition diagram of surface error disturbance under two dimensional (2D) section of mirror. Point  $O$  is the incident point on the reflecting surface, the  $XOY$  and  $YOZ$  planes are parallel to the paper plane and incident plane of the mirror respectively, and the  $X$  axis is parallel to the optical axis.

### 2.3 模拟参数分析

天文观测上一般用能量包围函数 (encircled energy function, EEf) 来描述成像能力, EEf 代表以光斑峰值处为中心向外扩展的圆形区域的积分亮度随扩展直径的变化曲线. 在 EEf 中, 可以用半能量宽度 (half energy width, HEW) 描述光

斑的展宽, HEW 表征 EEf 中积分亮度达到 50% 时的直径; 同时, 为了描述背景光子或散射光子强度, 一般还会使用 W90 (90% 光子直径). 以 FXT 的最外层镜片 #1 镜 (大端内径 356.52 mm, 中间内径 348.48 mm, 小端内径 323.92 mm, 厚度约为 0.54 mm) 为例, 根据前两节中介绍的算法, 对聚焦镜进行模拟, 分析各参数对成像性能的影响.

为了研究两个扰动分量对成像质量的影响, 在不考虑 XRS 的情况下, 分别对两个方向的扰动单独进行模拟, 分析其对 HEW 的影响, 如图 6 所示. 对比两条曲线,  $\mathbf{V}_2$  方向的旋转扰动分量对 HEW 的影响相比  $\mathbf{V}_1$  方向的影响几乎可以忽略不计. 当  $\mathbf{V}_1$  方向的扰动  $\sigma_1$  达到  $10''$  时, HEW 已经达到  $37.25'' \pm 1.55''$ . 在之后的模拟中, 为了简化模型, 取  $\sigma_2 = 5''$ , 对 HEW 的影响约为  $0.4''$ .

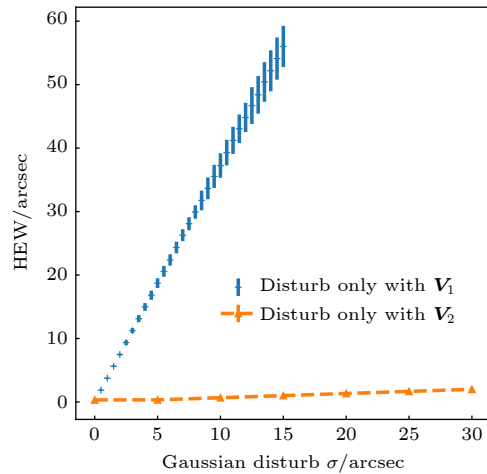


图 6 高斯模型下的扰动分量对光斑 HEW 的影响. 其中十字点为  $\mathbf{V}_1$  方向扰动分量, 虚线为  $\mathbf{V}_2$  方向扰动分量

Fig. 6. Influence of disturbance component on spot HEW in Gaussian model. The cross point is the disturbance component in  $\mathbf{V}_1$  direction, and the dotted line is the disturbance component in  $\mathbf{V}_2$  direction.

在完成了面形误差对成像质量影响的分析后, 可以利用 (1) 式—(3) 式将 XRS 效应叠加到面形误差之上, 使光斑的点扩展函数 (point spread function, PSF) 更加接近真实结果. 如图 7 蓝色实线所示, 面形误差使理想的光斑从一点扩展为具有一定展宽的高斯分布; 在 XRS 效应的作用下, 如黄色和绿色点线所示, 高斯分布的 PSF 形成了散射的边缘特性. 而且 XRS 效应也如 (1) 式和 (2) 式所述, 能量增大, 散射概率增大, 边缘的平台占比增大.

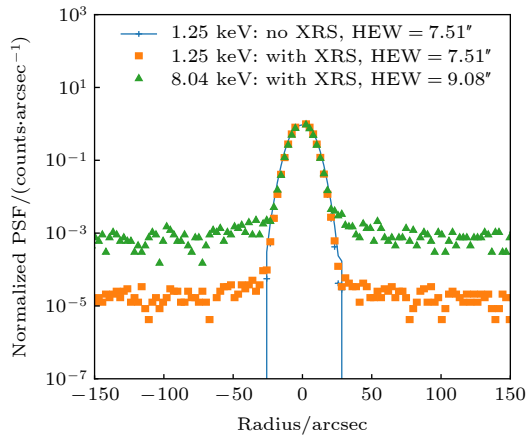


图 7 XRS 对光斑 PSF 的影响 ( $\text{RMS} = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_1 = 2''$ ,  $\sigma_2 = 5''$ )

Fig. 7. Effect of XRS on spot PSF ( $\text{RMS} = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_1 = 2''$ ,  $\sigma_2 = 5''$ ).

按照这种模拟方式, 模拟不同能量和不同表面粗糙度 RMS 下 XRS 效应对成像质量的影响, 结果如图 8 所示. 可以看出总体上, XRS 效应随 RMS 增大而显著增大, HEW 和 W90 随 RMS 的增大而增大; XRS 效应随能量增大而增大, 8.04 keV 的 HEW 和 W90 随 RMS 的增量明显大于 1.49 keV. 综合图 8(a) 和图 8(b) 可以看出, XRS 效应主要影响 PSF 的边缘光子, 影响 W90, 如图 8(b) 所示,  $\text{RMS} = 0.75 \text{ nm}$ , 能量为 8.04 keV 时, 散射概率急剧增大, W90 急剧恶化 (约  $1300''$ ).

### 3 模拟结果与参数限定

利用模拟算法, 对有效面积和渐晕曲线进行了

模拟, 并与实测的渐晕曲线进行了对比. 其中聚焦镜反射率随角度和能量变化的数据来源于 CXRO (the center for X-Ray optics)<sup>[33]</sup>. 根据实测的成像结果对模拟算法中面形误差的模拟参量进行限定. 需要指出的是, 模拟过程中的光子入射能量与表面粗糙度为影响有效面积的两个重要参量, 考虑到全反射和有效面积对聚焦镜粗糙度 RMS 的要求, RMS 指标典型值为  $0.5 \text{ nm}$ , 本节中 RMS 值均取为  $0.5 \text{ nm}$  (实际测量的 RMS 也约为  $0.5 \text{ nm}$ ). 为了方便与测试数据对比, 本节中所有模拟结果除特殊标明入射能量外, 其余结果均为测试所用 Al 的  $K_\alpha$  线 ( $1.49 \text{ keV}$ ).

#### 3.1 有效面积和渐晕曲线

模拟了不同能量下 FXT 聚焦镜的有效面积, 如图 9(a) 所示. 为了遮挡空间环境中的可见光, 同时降低观测较强天体源时探测器的事例堆积效应 (pile-up 效应), FXT 在探测器前预设了几种不同遮光膜档位, 可以通过转轮进行调节. 遮光膜为聚酰亚胺基底镀铝膜, 根据材料厚度可以分为 thin, medium 和 thick 三种<sup>[34]</sup>, 图 9(b) 为膜对 X 射线的透过率. 模拟了三种膜对有效面积的影响, 如图 9(a) 中橙、绿、红三线所示. 可以看出, 遮光膜对低于  $2.0 \text{ keV}$  的有效面积衰减较为严重, 大于  $5 \text{ keV}$  时, 基本没有影响. 两种典型能量下的模拟结果如表 1 所列, 未加遮光膜时聚焦镜有效面积可以达到  $(401.96 \pm 3.02) \text{ cm}^2 @ 1.49 \text{ keV}$ , 能很好地满足 FXT 目标要求. 同时在使用厚膜时,  $1.49 \text{ keV}$  处有效面积衰减严重, 降至  $273.22 \text{ cm}^2$ .

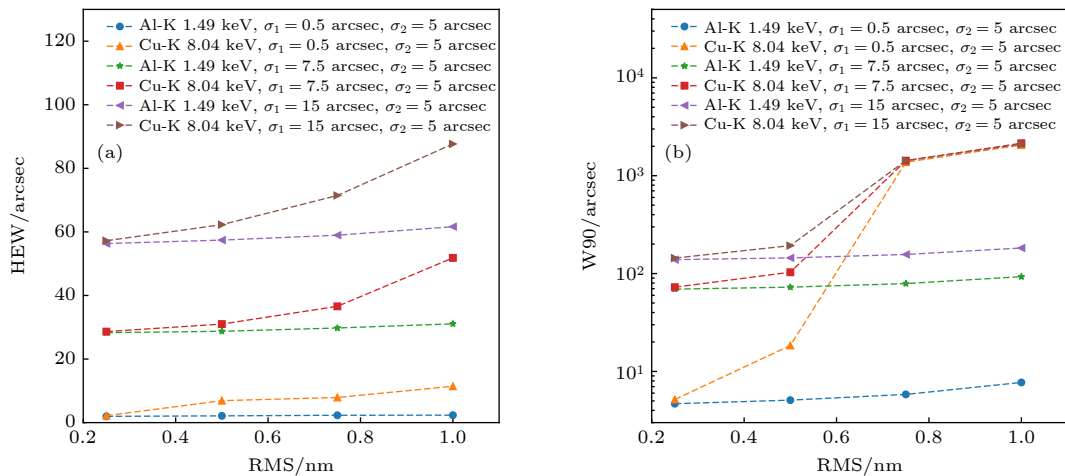


图 8 三种不同  $\mathbf{V}_1$  方向扰动  $\sigma_1$  下粗糙度 RMS 的影响 (a) 对 HEW 的影响; (b) 对 W90 的影响

Fig. 8. Influence of roughness RMS under three different  $\sigma_1$ : (a) on HEW; (b) on W90.

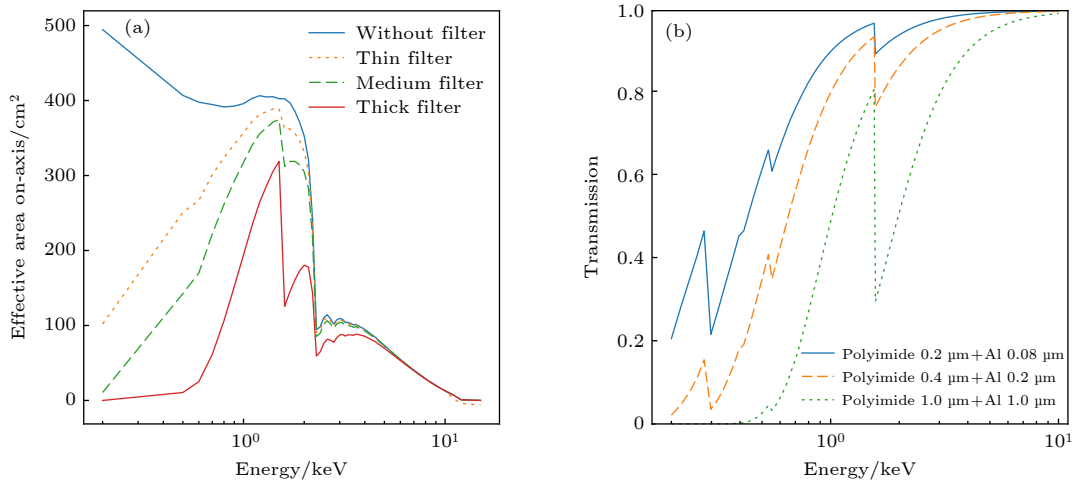


图 9 (a) FXT 聚焦镜有效面积随能量变化的模拟结果 (考虑了嵌套结构支撑轮毂的遮挡效应); (b) FXT 三种不同遮光膜透射率随能量变化

Fig. 9. (a) Simulation results of variation of effective area with energy of FXT focusing mirrors (support spider of multi-layer nested structure has been considered); (b) variation of transmittance with energy of FXT's three different filter.

表 1 FXT 聚焦镜有效面积模拟结果  
Table 1. Test simulations of effective area of FXT focusing mirror.

Energy/keV	Effective area/cm <sup>2</sup>	Effective area with filter/cm <sup>2</sup>		
		Thin	Medium	Thick
1.49	401.96 ± 3.02	379.94 ± 2.89	356.63 ± 2.91	273.22 ± 2.53
8.04	28.53 ± 0.21	28.49 ± 0.20	28.44 ± 0.18	28.14 ± 0.18

对 FXT 聚焦镜鉴定件 (quality module, QM) 进行了渐晕曲线模拟和测试结果对比. QM54 层镜片均具有光学性能, 测试结果由 MPE 的 PANTER 实验室<sup>[35]</sup> 提供, 其中渐晕曲线的测试结果可以用双高斯经验函数拟合<sup>[36]</sup>, 如图 10 中虚线所示. 对比模拟结果 (如对应颜色的散点所示) 表明, 模拟与实测渐晕曲线趋势基本一致<sup>[37]</sup>, 这说明模拟方法能很好地应用于对有效面积和渐晕曲线的研究. 在 FXT 聚焦镜渐晕和有效面积标定过程, 可以使用标定数据结合模拟结果的方法, 生成在轨标定数据, 为标定工作提供参考.

### 3.2 面形误差模拟参数限定

如第 2 节所述, 影响成像质量的主要有 XRS 和面形效应. 首先对 XRS 的模拟算法进行验证, 根据第 2 节, 为了简化模型, 粗糙度 RMS 取 0.5 nm. 图 11 为散射比例的实测与模拟结果对比, 其中实测结果为 QM 成像光斑边缘散射光子的统计结果.

从图 11 可以看出, 能量较低时 (C 的  $K_{\alpha}$  线, 0.277 keV), 实测与模拟结果相差较大 (约 0.02); 但是随着能量的增大, 两者基本保持一致 (相差约

0.004). 在实测中, 颗粒污染也会引起 XRS<sup>[38]</sup>, 能量较低时, 由粗糙度引起的散射光子不足 1%, 此时污染造成的散射效应要明显高于前者, 但在实测的光斑中统计散射光子时无法区分两者, 导致实测

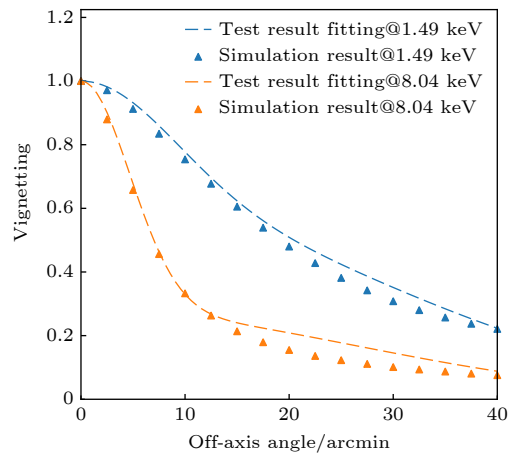


图 10 FXT 的 QM 渐晕曲线实测数据拟合曲线与模拟结果对比. 对应颜色的虚线和散点分别为相同能量下的实测拟合曲线和模拟结果

Fig. 10. Fitting results of measured data and simulation results of vignetting. The dashed lines and scattered points of corresponding colors are the fitting and simulation results under the same energy respectively.

光斑的散射光子统计比例占比要高于模拟值;随着入射能量增大,粗糙度导致的 XRS 光子比重明显增大,其他原因导致的散射光子比例明显下降,模拟与测试结果的差距变小.总体来说,对 XRS 的模拟与实测结果基本一致,能很好地描述聚焦镜表面由于粗糙度产生的 XRS 效应.

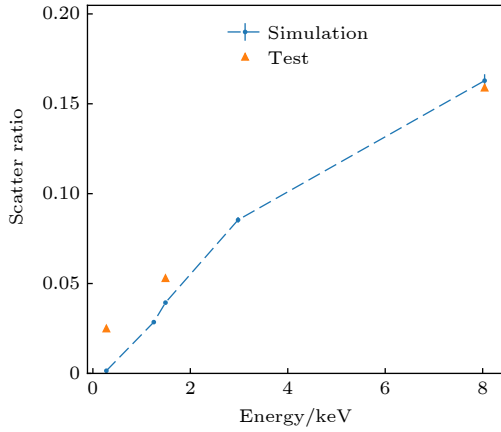


图 11 RMS = 0.5 nm 时散射比例实测值与模拟值对比  
Fig. 11. Comparison between measured and simulated scattering ratio when RMS = 0.5 nm.

在完成了 XRS 模拟与实测的对比后,可以利用表 2 中聚焦镜结构热控件 (structural-thermal module, STM) 的 HEW 测试结果对面形误差的模拟方法进行验证,限定 STM 面形误差对应的扰动参量大小. STM 由 MPE 提供,其中 6 片镜片具备光学性能,分别为 #1, #24—#27 和 #54. 如表 2

所列, #1 镜片在 1.49 keV 时的 HEW 明显高于其他两组镜片,这是因为 #1 镜片在测试过程中发生了不可逆的应力形变,光斑形状也发生了明显的三角形畸变<sup>[39]</sup>.

表 2 STM 在入射能量为 1.49 keV 时测试结果<sup>[39]</sup>  
Table 2. Test results of STM@1.49 keV<sup>[39]</sup>.

Shell No.	HEW/arcsec
#1	48.4 ± 0.5
#24—#27	25.1 ± 0.4
#54	24.4 ± 0.4

如图 12(a) 所示,前期利用高能物理研究所标定大厅的百米束线对 STM 进行了进场测试,测试结果也显示 STM 整体光斑呈现明显的三角形畸变.其他两组镜片的测试结果表明,在不考虑 #1 镜片的三角形畸变的情况下,聚焦镜的角分辨基本可以达到 25".而考虑 #1 镜片的形变作用后,STM 三组镜片整体光斑的 EEF 如图 12(b) 所示,HEW 约为 32.8" ± 0.12",W90 约为 163.2" ± 3.12".

按照这种性能特点将 STM 分成两种,一种是未发生其他应力形变的 #24—#27 和 #54 镜片,一组是发生应力形变的 #1 镜片.首先通过对  $\sigma_1$  模拟,得到如图 13 所示的  $\sigma_1$  与 HEW 的对应关系. HEW 为 25" 对应的  $\sigma_1$  约为 6.5",第一种镜片的面形误差扰动参量基本可以限定为  $\sigma_1 = 6.5''$ ,  $\sigma_2 = 5''$ .

之后在 #1 的面形误差的模拟过程中,在以上  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  扰动的基础上,圆周方向每隔 120° 附加额外

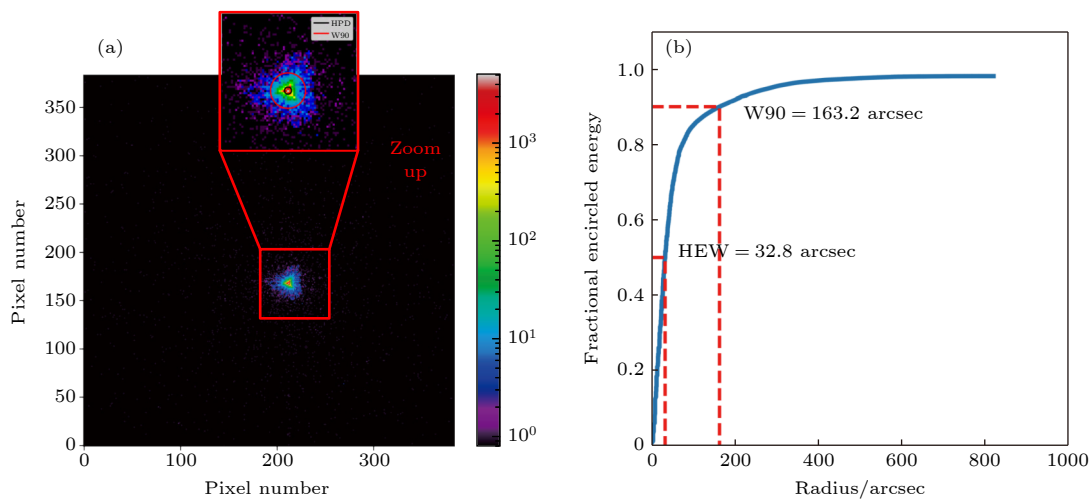


图 12 (a) STM 成像结果 (使用 FXT 焦平面探测器 pnCCD, 单像素尺寸 75  $\mu\text{m}$   $\times$  75  $\mu\text{m}$ , 像素数 384  $\times$  384, 中间红色方形区域的放大图如上图所示); (b) STM 成像结果的 EEF 曲线

Fig. 12. (a) Imaging and (b) EEF results of STM test (using FXT focal plane detector pnCCD, single pixel size is 75  $\mu\text{m}$   $\times$  75  $\mu\text{m}$ , pixel number is 384  $\times$  384 and the enlarged view in the middle red square area is shown in the upper in panel (a)).



的扰动, 来模拟应力形变. 扰动模型在圆周方向符合正弦分布, 光轴方向沿光路线性递减 (即镜片的入口端形变程度最大). 调整扰动参数 (入口端峰值形变扰动约为  $12.6''$ ), 达到 #1 的实测 HEW 指标. 如图 14(b) 中的 EEf 曲线所示,  $\text{HEW} = 48.54''$ ,  $\text{W90} = 166.51''$ .

在对 STM 的两种镜片分别进行了模拟参数的限定后, 对整体三组镜片进行了模拟, 图 15 为模拟结果. 为了更直观地对比光斑形状, 将模拟与测试光斑沿焦平面探测器的一个方向进行投影, 如图 15(a) 所示. 从图 15(a) 可以明显看出, 在只考虑高斯形式面形误差的情况下 (蓝色虚线), 一维投影的展宽明显小于实测结果 (橙色方形点). 加入三角形形变后 (绿色三角点), 投影图像基本与实测结果相同, 两者在散射光子比重上也符合得很好 (红色箭头所示区域). 图 15(b) 的模拟和实测的 EEf 曲线也基本一致. 对比图 12 和图 15, 模拟 W90 为

$158.88''$ , 略大于测试结果. 光斑的 W90 主要受散射光子的影响, 导致这一偏差的原因主要是污染引起的散射 [38].

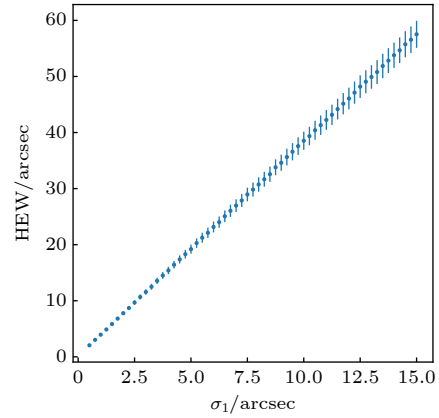


图 13 RMS = 0.5 nm, 光子能量为 1.49 keV,  $\sigma_2 = 5''$  时 HEW 随  $\sigma_1$  的变化

Fig. 13. Variation of HEW with  $\sigma_1$  when RMS = 0.5 nm, photon energy is 1.49 keV and  $\sigma_2 = 5''$ .

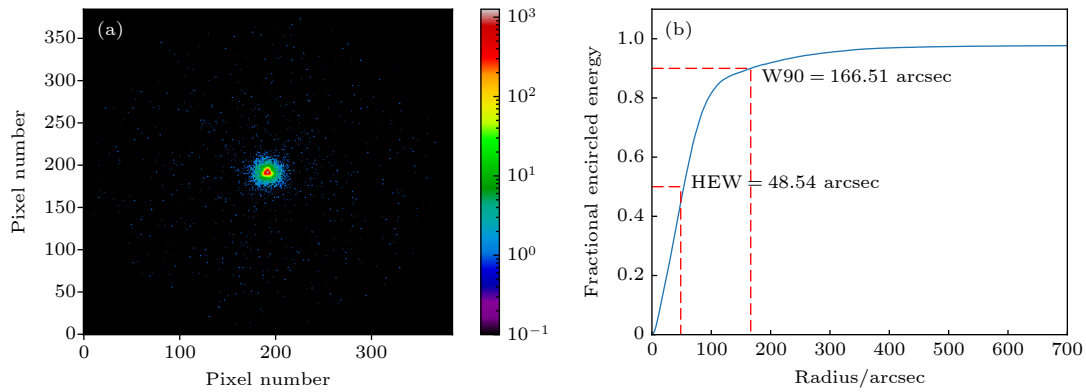


图 14 (a) #1 镜三角形畸变成像模拟结果 (焦平面探测器为 pnCCD); (b) 模拟光斑的 EEf 曲线

Fig. 14. (a) Simulation results of triangular deformation (focal plane detector is pnCCD); (b) simulated EEf.

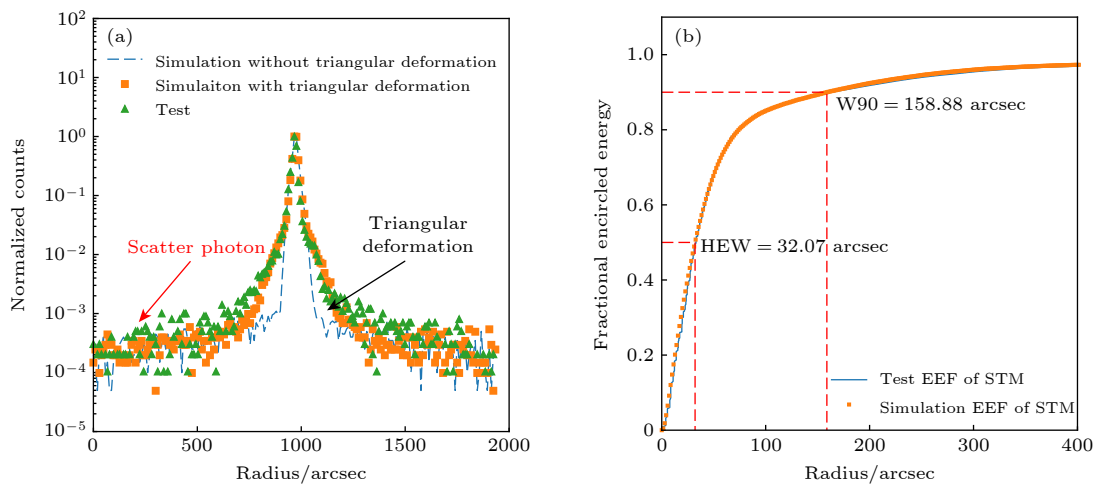


图 15 (a) STM 模拟与实测光斑的一维投影; (b) STM 模拟光斑的 EEf 曲线

Fig. 15. (a) One dimensional projection of STM simulated and test spot; (b) simulated and test EEf curve.

模拟与测试光斑对比结果可知, 本文提出的模拟方法在完成聚焦镜的模拟参量限定后, 可以很好地还原实测光斑的 PSF. 在实际聚焦镜的标定过程中, 可以利用标定数据结合模拟的方式, 完成标定数据库的建立工作.

## 4 结 论

为了深入研究和发 展 X 射线聚焦镜的研制, 本文介绍了针对 EP-FXT 的 X 射线聚焦镜性能模拟算法. 利用算法对各种参数进行了模拟和分析, 结果显示: 散射概率随粗糙度误差 RMS 和能量的增大而增大, 随之光斑 HEW 和 W90 也增大, 而且增幅直接与能量有关, 能量越高, 增幅越明显; 面形误差扰动分量的  $V_1$  是影响 HEW 的主要因素, 当  $\sigma_1 = 10''$  时, 光斑的 HEW 约为  $35.25'' \pm 1.55''$ .

在完成了对各参数的分析后, 对有效面积和遮光膜影响进行了模拟. 利用 QM 测试结果, 对渐晕曲线和 XRS 效应的模拟进行了验证, 模拟结果与测试结果基本一致. 利用 STM 光斑 HEW 的测试结果对 STM 的面形误差模拟参量进行了限制, 结果表明: 在  $\sigma_1 = 6.5''$  时, 光斑 HEW 达到  $25''$ , 与 STM 的 #24, #25 和 #54 镜片基本一致; 利用正弦分布与圆周上的额外干扰模拟了 #1 镜片的三角形光斑畸变, 成像结果基本达到了 #1 镜片的 HEW 水平. 之后模拟了 STM 三组镜片总的性能, 模拟结果表明, 在加入三角形畸变的模拟后, 光斑的一投影展宽与实测结果符合得很好, EEF 曲线也基本一致, 最大相差在  $5''$  左右.

综合考虑, 该模拟方法可以很好地应用于聚焦镜基本性能, 如有效面积、渐晕曲线等的研究, 结合标定数据, 可以为在轨标定数据库提供参考. 对真实表面状态的模拟方法, 可以很好地建立加工误差与成像性能之间的联系, 为国内聚焦镜的加工、测试和标定工作提供参考. 需要指出的是, 本文针对 STM 测试结果的 W90 指标讨论并不充分, 影响 W90 指标的不只有聚焦镜粗糙度引起的 XRS 效应, 还有聚焦镜表面的颗粒物导致的光子散射和吸收. 关于针对污染产生的散射和光子吸收效应, 也是今后工作的一个重点方向.

感谢 MPE 的 PANTER 实验室提供的 FXT 聚焦镜 STM 与 QM 的测试数据<sup>[37,39]</sup>. 感谢路雪峰老师、李正伟老师和张洪林同学关于算法验证工作提供的帮助和技术支持.

## 参考文献

- [1] Giacconi R, Branduardi G, Briel U, Epstein A, Fabricant D, Feigelson E, Forman W, Gorenstein P, Grindlay J, Gursky H, Harnden F R, Henry J P, Jones C, Kellogg E, Koch D, Murray S, Schreier E, Seward F, Tananbaum H, Topka K, Van Speybroeck L, Holt S S, Becker R H, Boldt E A, Serlemitsos P J, Clark G, Canizares C, Markert T, Novick R, Helfand D, Long K 1985 *Astrophys. J.* **230** 540
- [2] Weisskopf M C, Tananbaum H D, Speybroeck L, O'Dell S L 2000 *Proc. SPIE* **4012** 0277
- [3] Jansen F, Lumb D, Altieri B, Clavel J, Ehle M, Gabriel C, Guainazzi M, Gondoin P, Much R, Munoz R, Santos M, Schartel N, Texier D, Vacanti G 2000 *Astron. Astrophys.* **365** L1-L6
- [4] Predehl P 2017 *Astron. Nachr.* **338** 159
- [5] Merloni A, Predehl P, Becker W, Bohringer H, Boller T, Brunner H, Brusa M, Dennerl K, Freyberg M, Friedrich P, Georgakakis A, Haberl F, Hasinger G, Meidinger N, Mohr J, Nandra K, Rau A, Reiprich T H, Robrade J, Salvato M, Santangelo A, Sasaki M, Schwobe A, Wilms J, German eROSITA Consortium 2012 *Casopis Lekarů Ceskych* **99** 1280
- [6] Li T P 2007 *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* **166** 131
- [7] Zhang S N, Li T P, Lu F J, et al. 2020 *Sci. Chin.: Phys., Mech. Astron.* **63** 249502
- [8] Yuan W M, Zhang C, Ling Z X, Zhao D H, Wang W X, Chen Y, Lu F J, Zhang S N, Cui W 2018 *Proc. SPIE* **10699** 1069925
- [9] Zhang S N, Santangelo A, Feroci M, et al. 2018 *Sci. Chin.: Phys., Mech. Astron.* **62** 029502
- [10] Qiang P F, Sheng L Z, Li L M, Yan Y Q, Liu Z, Zhou X H 2018 *Acta Phys. Sin.* **68** 160702 (in Chinese) [强鹏飞, 盛立志, 李林森, 闫永清, 刘哲, 周晓红 2018 物理学报 **68** 160702]
- [11] Zhao D H, Zhang C, Yuan W M, Zhang S N, Willingale R, Ling Z X 2017 *Exp. Astron.* **43** 267
- [12] Chen Y, Cui W W, Han D W, et al. 2020 *Proc. SPIE* **11444** 114445b
- [13] Bernal J D 1935 *Nature* **136** 661
- [14] Wolter H 1975 *Ann. Phys.* **10** 94
- [15] Zhang X Y, Shui P, Huang L W, Chen S L, Xu L H 2017 *Int. J. Aerosp. Eng.* **2017** 8561830
- [16] Zhou Q Y, Wei Z Q, Jiang K, Deng L L, Liu S W, Ji J F, Ren H F, Wang Y D, Ma G F 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 050701 (in Chinese) [周庆勇, 魏子卿, 姜坤, 邓楼楼, 刘思伟, 姬剑锋, 任红飞, 王奕迪, 马高峰 2018 物理学报 **67** 050701]
- [17] Angel J 1979 *Astrophys. J.* **233** 364
- [18] Zhu Y X, Lu J B, Yang Y J, Cong M, Sheng L Z, Qiang P F, Cui W W, Zhang Z L, Wang Y S, Han D W, Li W, Wang J, Huo J, Li M S, Zhao X F, Yu N, Song Z Y, Ma J, Lv Z H, Zhao Z J, Wang H, Hou D J, Chen C, Chen T X, Yang X T, Luo L D, Lu B, Xu J J, Chen Y H, Chen Y 2021 *Opt. Eng.* **60** 025102
- [19] Zhang X, Wang J, Zhang Y, Yang Y J, Chen Y, Wen J 2020 *Acta Photon. Sin.* **49** 0512002 (in Chinese) [张星, 王娟, 张艺, 杨彦洁, 陈勇, 文健 2020 光子学报 **49** 0512002]
- [20] Zhao Z J, Wang Y S, Zhang L Y, Chen C, Ma J 2019 *Opt. Precis. Eng.* **27** 2331 (in Chinese) [赵子健, 王于仁, 张留洋, 陈灿, 马佳 2019 光学精密工程 **27** 2331]
- [21] Li L S, Qiang P F, Sheng L Z, Liu Z, Zhou X H, Zhao B S, Zhang C M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 200701 (in Chinese) [李林森, 强鹏飞, 盛立志, 刘哲, 周晓红, 赵宝升, 张淳民 2018 物理学报 **67** 200701]
- [22] Laine R, Giralt R, Zobl R, de Korte P A, Bleeker J A M 1979

- Proc. SPIE* **184** 181
- [23] Hunter W R, Michels D J, Fleetwood C M, Mangus J D, Bach B W 1980 *Appl. Opt.* **19** 2128
- [24] Jin Y, Feng X, Li D, Xue J D, Wang B, Yang Y J, Ding F 2020 *Optik* **218** 165022
- [25] Stover J C 2012 *Optical Scattering: Measurement and analysis* (SPIE) pp4–10
- [26] Canestrari R, Spiga D, Pareschi G 2006 *Proc. SPIE* **6266** 626613
- [27] Church L, Jenkinson H, Zavada A, Zavada J 1979 *Opt. Eng.* **18** 182125
- [28] Church L, Takacs P Z 1986 *Proc. SPIE* **0640** 126
- [29] Spiga D, Cusumano G, Pareschi G 2007 *Proc. SPIE* **6688** 66880H
- [30] Qi L Q, Li Gang, Xu Y P, Zhang J, Yang Y J, Sheng L Z, Basso S, Campana R, Chen Y, De Rosa A, Pareschi G, Qiang P F, Santangelo A, Sironi G, Song L M, Spiga D, Tagliaferri G, Wang J, Wilms J, Zhang Y, Lu F J 2020 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **963** 163702
- [31] Spiga D, Raimondi L, Svetina C, Zangrando M 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **710** 125
- [32] Zombeck M V, Braeuninger H, Ondrusch A, Predehl P 1981 *Proc. SPIE* **316** 174
- [33] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C 1993 *At. Data Nucl. Data Tables* **54** 181
- [34] Chen T X, Gao N, Li L, Chen Y, Xu Y P, Lu F J 2019 *Opt. Precis. Eng.* **27** 2338 (in Chinese) [陈田祥, 高娜, 李琳, 陈勇, 徐玉朋, 卢方军 2019 *光学精密工程* **27** 2338]
- [35] Freyberg M J, Brauningner H, Burkert W, Hartner G D, Citterio O, Mazzoleni F, Pareschi G, Spiga D, Romaine S, Gorenstein P, Ramsey B D 2005 *Exp. Astron.* **20** 405
- [36] Predehl P, Andritschke R, Arefiev V, et al. 2020 *Astron. Astrophys.* **647** A1
- [37] Rukdee S, Budau B, Burwitz V 2021 *Test Report-EP FXT MM ACC PANTER* (MPE: PANTER) p85
- [38] O'Dell S L, Elsner R F, Oosterbroek T 2010 *Proc. SPIE* **7732** 77322V
- [39] Bradshaw M, Budau B, Burwitz V 2020 *Test Report-EP FXT STM MA X4 Post-Thermal Test PANTER* (MPE: PANTER) p67

# Simulation method of performance of X-ray focusing mirror under actual surface state used in FXT on board EP satellite<sup>\*</sup>

Zhu Yu-Xuan<sup>1)2)</sup> Lu Jing-Bin<sup>1)†</sup> Chen Yong<sup>2)‡</sup> Wang Yu-Sa<sup>2)</sup> Yang Yan-Ji<sup>2)</sup>  
 Han Da-Wei<sup>2)</sup> Cui Wei-Wei<sup>2)</sup> Zhao Xiao-Fan<sup>2)</sup> Cong Min<sup>2)</sup>  
 Li Tian-Ming<sup>2)</sup> Lü Zhong-Hua<sup>2)3)</sup> Wang Hao-Di<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (*College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China*)

<sup>2)</sup> (*Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

<sup>3)</sup> (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 4 January 2022; revised manuscript received 10 March 2022 )

## Abstract

The Follow-up X-ray Telescope (FXT) is one of the main payloads on board the Einstein probe satellite. In order to obtain data with high signal-to-noise ratio and realize high-precision positioning of the sources, FXT adopts the Wolter-I X-ray focusing optical system which has been widely used in X-ray astronomy. According to the principle of Wolter-I and combining the actual manufacture characteristics, we simulate several key parameters affecting the optical quality by Monte Carlo simulation algorithm, such as surface roughness Root-Mean Square (RMS) and surface profile error. The effect of each parameter is analyzed according to the simulation results. Then, the simulation method is verified by the test results of the focusing mirrors provided by PANTER laboratory, and the surface profile error parameters are restricted. The simulation results of the half energy width of the structural-thermal module mirror are basically consistent with the test results. This method can be effectively applied to the later study of focusing mirror manufacture and can accumulate experience for testing and calibrating FXT focusing mirrors. Furthermore, combining the tested calibration data, some key performance of the mirrors can be obtained by this simulation method, such as the effective area, vignetting and the point spread function, which can compose the on-orbit calibration database.

**Keywords:** Einstein probe, follow-up X-ray telescope, Wolter-I X-ray focusing mirror, simulation of actual surface

**PACS:** 07.85.Fv, 07.60.-j

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220017

<sup>\*</sup> Project supported by the Strategic Priority Research Program on Space Science, Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDA1531010301, XDA15020500).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ljb@jlu.edu.cn](mailto:ljb@jlu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [yichen@ihep.ac.cn](mailto:yichen@ihep.ac.cn)