

基于X射线光学追迹的旋转椭球镜聚焦仿真

黄子文 杨磊 赵帅 杨煜 张磊 王克逸

Focusing simulation of rotating ellipsoidal mirror based on X-ray optical tracing

HUANG Ziwen, YANG Lei, ZHAO Shuai, YANG Yu, ZHANG Lei, WANG Keyi

引用本文:

黄子文, 杨磊, 赵帅, 等. 基于X射线光学追迹的旋转椭球镜聚焦仿真[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1003–1010. DOI: 10.5768/JAO202546.0501007

HUANG Ziwen, YANG Lei, ZHAO Shuai, et al. Focusing simulation of rotating ellipsoidal mirror based on X-ray optical tracing[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1003–1010. DOI: 10.5768/JAO202546.0501007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

X-ray在鱼体组织及微量元素检测中的应用

Application of X-ray in detection of fish tissue and trace elements

应用光学. 2024, 45(1): 166–176 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0103005>

反向追迹法获取水下对空全景图像

Obtaining water-to-air panoramic images by inverse ray tracing method

应用光学. 2020, 41(5): 929–937 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502001>

一种基于离轴椭球面的小光程差波面整形系统

Wavefront shaping system of tiny optical path difference based on off-axis ellipsoidal surface

应用光学. 2022, 43(3): 399–408 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301004>

基于深度学习的铸件X射线图像分割研究

Casting X-ray image segmentation based on deep learning

应用光学. 2021, 42(6): 1025–1033 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602003>

基于轻量化校准反射镜的旋转平移干涉绝对检验技术

Absolute test technology for rotation and translation interference based on lightweight calibration mirror

应用光学. 2023, 44(1): 122–127 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103002>

光束斜入射的折反射组合光学系统的像差计算

Aberration calculation of catadioptric combined optical system with oblique incidence

应用光学. 2021, 42(2): 236–241 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1003-08

引用格式: 黄子文, 杨磊, 赵帅, 等. 基于 X 射线光学追迹的旋转椭球镜聚焦仿真 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1003-1010.

HUANG Ziwen, YANG Lei, ZHAO Shuai, et al. Focusing simulation of rotating ellipsoidal mirror based on X-ray optical tracing[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1003-1010.



在线阅读

基于 X 射线光学追迹的旋转椭球镜聚焦仿真

黄子文¹, 杨磊¹, 赵帅², 杨煜³, 张磊¹, 王克逸¹

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027; 2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230027; 3. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 旋转椭球镜是一类理想的反射式 X 射线聚焦器件。提出一种基于 Matlab 实现椭球镜聚焦仿真的 X 射线光学追迹方法。归纳了椭球镜聚焦效果的影响因素, 建立了 X 射线光学追迹模型, 在 8 keV 能量下对两组长度 50 mm 的小口径椭球镜进行了聚焦模拟, 分析了焦斑尺寸、平均反射率等聚焦特性参数, 同时仿真了离焦情况下的环状光斑; 讨论了面形高度误差与表面粗糙度对椭球镜聚焦效果的影响, 引入了光源强度分布信息, 在直径 7 μm 的面光源条件下, 分别仿真了平均分布与高斯分布光源的聚焦光斑。该仿真方法支持自主设置椭球镜尺寸、表面反射率、面形误差、光源特性等信息, 兼具科学性与灵活性, 能够作为直观研究椭球镜聚焦光斑与聚焦特性的便捷工具。

关键词: X 射线; 旋转椭球聚焦镜; 光学追迹; Matlab 仿真

中图分类号: TN201; O434.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0501007

Focusing simulation of rotating ellipsoidal mirror based on X-ray optical tracing

HUANG Ziwen¹, YANG Lei¹, ZHAO Shuai², YANG Yu³, ZHANG Lei¹, WANG Keyi¹

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instruments, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Rotating ellipsoidal mirror is an ideal reflective X-ray focusing device. An X-ray optical tracing method based on Matlab to realize the focusing simulation of the ellipsoidal mirror was proposed. The factors affecting the focusing effect of the ellipsoid mirror were summarized, and the X-ray optical tracing model was established. The focusing simulation of two groups of small-diameter ellipsoidal mirrors with a length of 50 mm was carried out at the energy of 8 keV, and the focusing characteristic parameters such as the focal spot size and average reflectivity were analyzed. At the same time, the annular spot under defocus was simulated. The influence of the surface height error and surface roughness on the focusing effect of the ellipsoidal mirror was discussed. The light source intensity distribution information was introduced, and the focusing spots of the average distribution and Gaussian distribution light sources were simulated, respectively, under the condition of surface light source with a diameter of 7 μm . This simulation method supports the independent setting of the

收稿日期: 2024-08-12; 修回日期: 2024-09-17

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划 (202304a05020015); 安徽省自然科学基金 (2308085QF208); 同步辐射联合基金 (KY2090000080)

第一作者: 黄子文, E-mail: zwhuang@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 王克逸, E-mail: kywang@ustc.edu.cn

ellipsoidal mirror size, surface reflectivity, surface error, light source characteristics and other information. It is both scientific and flexible, and can be used as a convenient tool for intuitively studying the focusing spot and focusing characteristics of the ellipsoidal mirror.

Key words: X-ray; rotating ellipsoidal mirror; optical tracing; Matlab simulation

引言

在 X 射线光学系统中, 可根据需求引入聚焦、准直、单色、滤波、调制等不同功能的元件, 其中, 聚焦型器件^[1]能够会聚光线, 减小光束发散, 集中光子能量, 广泛应用于实验室级 X 射线仪器与同步辐射大科学装置。各类 X 射线聚焦器的工作原理存在差异, 椭球镜不同于折射式、衍射式元件^[2], 是一种基于 X 射线掠入射的反射式聚焦器^[3], 包括磨制镜^[4-5]、压弯镜^[6-7]、毛细管镜^[8-9]等。旋转椭球镜属于磨制镜, 通常结合芯棒磨削与膜层镀制两步工艺制造, 具有回转对称反射面, 外形呈现为管状, 因其照明均匀、无色差、数值孔径高的优秀特性, 常作为 X 射线显微镜、消色差透镜、电子探针荧光等系统的关键器件^[10-11]。

几何尺寸与膜层结构对旋转椭球镜的聚焦效果影响较大, 在进行椭球镜设计时, 可通过对 X 射线聚焦光斑进行仿真模拟, 观察设计参数是否恰当。由于旋转椭球镜为单次全反射器件, 因此非常适合使用光学追迹的方法对其进行聚焦仿真。光学追迹法通过设定大量入射光线, 借助反射和折射定律, 对每一条光线经光学元件相互作用后的路径进行追踪, 直至到达待成像平面。在束线光学中, 基于 OASYS(OrAnge Synchrotron Suite) 平台的 SHADOW 与 SRW 光束追迹程序是模拟 X 射线传播的常用工具^[12-13]。此外, 一些研究者也通过自研算法, 对椭球镜进行仿真分析, 大多基于几何光学原理^[14-18], 部分报道则是基于波动光学原理^[19]。

在 X 射线波段, 物质的复折射率小于 1, 且正入射反射率近乎为零, 包括旋转椭球镜在内的各类反射式器件, 实现 X 射线聚焦的机制均为小角度掠入射与全反射, 且反射率与掠入射角高度敏感, 故 Zemax 等传统光学追迹软件难以构建椭球镜的仿真模型。此外, 在部分同步辐射研究中, 只考虑 X 射线在反射镜中心位置的部分照明, 事实上, X 射线可以入射至旋转椭球镜表面的各个位置并发生反射, 应用于旋转椭球镜的对称全照明模式时, SHADOW 等束线追迹工具也存在一定局限性。

鉴于此, 本文借助 Matlab 平台, 提出了一种可自定义光源、面形轮廓、反射率等信息的 X 射线光学追迹方法, 并对桌面级小尺寸旋转椭球镜进行了聚焦仿真。首先, 基于旋转椭球镜的聚焦原理, 建立了 X 射线的光学追迹模型, 提出了影响聚焦效果的几大因素; 然后, 针对课题组先前设计的两组旋转椭球镜, 进行了理想情况下的焦斑模拟, 分析了相关聚焦特性参数, 并进一步仿真了离焦情况下的环状光斑; 之后分别讨论了引入面形高度误差与表面粗糙度后聚焦光斑的变化情况; 最后, 在考虑光源实际强度分布的前提下, 对两组旋转椭球镜进行了仿真与分析。

1 理论基础

1.1 旋转椭球镜的聚焦原理

椭圆作为圆锥曲线的一种, 具有点对点聚焦的几何性质, 即从焦点位置出射的光线经椭圆表面反射后, 将会聚于另一焦点处。将椭圆沿其长轴旋转一周, 得到的回转体表面即构成椭球镜的内表面轮廓。旋转椭球镜作为反射式聚焦器件, 基于理想椭圆的光学原理及其表面的小角度掠入射实现对 X 射线的聚焦。在椭球镜焦点处放置成像屏, 可获得 X 射线聚焦光斑, 若将屏移至偏离焦点位置, 根据几何关系, 还能够观察到环状光斑, 如图 1 所示。

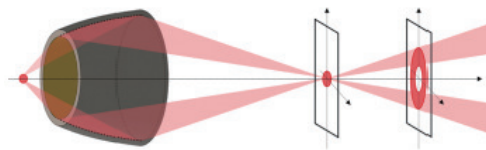


图 1 旋转椭球镜的聚焦原理图

Fig. 1 Focusing principle diagram of rotating ellipsoidal mirror

上述概念中点光源与旋转椭球镜均限于理想情况。在实际研究中, 下列因素均会对 X 射线的聚焦效果产生影响: 1) 膜层的反射率; 2) 表面形貌误差; 3) 表面粗糙度; 4) 光源的强度分布。在建立椭球镜仿真模型时, 应充分考虑这些信息的引入与设置。

1.2 X 射线光学追迹模型

结合旋转椭球镜的回转对称结构, 为简化追迹模型, 可在椭球镜长轴方向的子午截面内进行分析。分别记 $2a$ 、 $2b$ 、 $2c$ 为椭圆截面的长轴、短轴与焦距, 在平面直角坐标系下, 椭球镜的面形方程 F_{ellip} 可表示为

$$F_{\text{ellip}}(x, y) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0 \quad (1)$$

椭球镜的部分几何参数如图 2 所示。图 2 中, 点 P 、 Q 及其横坐标 x_1 、 x_2 定义了椭球镜的实际使用范围, 即 X 射线在椭球镜两端的入射位置; 左侧端面处放置光阑, 用于阻挡直通 X 射线; β_1 、 β_2 分别对应 X 射线在椭球镜焦点处的照明角。当成像位置偏离焦平面时, 记离焦距离为 Δf , 得到的环状光斑内径与外径分别为 r_1 、 r_2 。

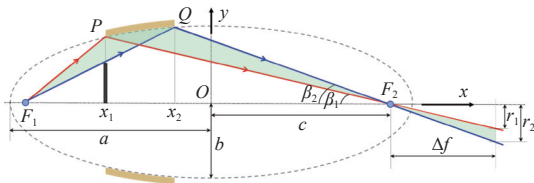


图 2 旋转椭球镜的几何参数

Fig. 2 Geometrical parameters of rotating ellipsoidal mirror

通过光阑对直通光的限制, 从点光源 F_1 处发射的 X 射线可以抵达椭球镜表面各位置, 对应掠入射角为 θ , 记 F_1P 、 F_1Q 两条光线的斜率为 k_p 、 k_q , 则斜率位于 $[k_p, k_q]$ 范围内的入射光线均可有效照明。当考虑 X 射线光源尺寸时, 可在面光源上足量采样, 将各采样点视作点光源处理即可。进行光学追迹时, 应从椭球镜左侧端面扫描至右侧端面, 依次计算各条光线反射后的传播方向, 如图 3 所示。

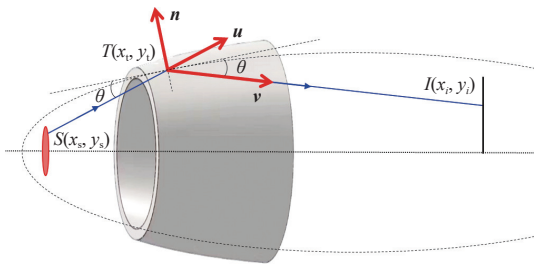


图 3 旋转椭球镜的光学追迹模型

Fig. 3 Optical tracing model of rotating ellipsoidal mirror

对斜率 $k \in [k_p, k_q]$ 的一条入射光线进行分析, 其发射点为 $S(x_s, y_s)$, 则该条 X 射线的直线方程

F_{line} 为

$$F_{\text{line}}(x, y) = k(x - x_s) - (y - y_s) = 0 \quad (2)$$

将椭球镜面形方程与直线方程联立, 即可求解 X 射线在椭球镜表面的入射点坐标 $T(x_t, y_t)$ 。再对椭球镜面形方程求偏导数, 将入射点 T 处对应的镜面法向量 $\mathbf{n}$ 表示为

$$\mathbf{n} = \frac{\frac{\partial F_{\text{ellip}}(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial F_{\text{ellip}}(x, y)}{\partial y}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F_{\text{ellip}}(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{\text{ellip}}(x, y)}{\partial y}\right)^2}} \quad (3)$$

根据入射光线斜率, 可将该条 X 射线的单位向量 $\mathbf{u}$ 表示为

$$\mathbf{u} = \frac{x_t - x_s, y_t - y_s}{\sqrt{(x_t - x_s)^2 + (y_t - y_s)^2}} \quad (4)$$

由几何关系可知, 经椭球镜表面反射后的 X 射线单位向量 $\mathbf{v}$ 为

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} - 2\mathbf{n} \cdot \sin(\sin^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})) \quad (5)$$

因此, 可求得反射 X 射线的斜率 $k_{\text{ref}} = v_y / v_x$ 。仿真光斑时, 若选择将屏放置于 x_i 处, 则 X 射线传播至此处对应的纵坐标为

$$y_i = k_{\text{ref}} \cdot (x_i - x_t) + y_t \quad (6)$$

若该条 X 射线的初始光强为 I_0 , 入射点位置的反射率为 $R(\theta)$, 则出射光强为 $I = I_0 \cdot R(\theta)$ 。重复上述步骤, 对每一条 X 射线进行追迹, 并记录其在观察屏上的坐标 (x_i, y_i) 及强度 I , 即可实现椭球镜聚焦光斑的仿真。

2 聚焦仿真

2.1 椭球镜参数

本文仿真的两组椭球镜长度均为 50 mm, 适用于桌面级 X 射线系统, 基本参数如表 1 所示。

表 1 两组椭球镜的基本参数

Table 1 Basic parameters of two ellipsoidal mirrors

Parameters	ELL1	ELL2
a /mm	250	250
b /mm	2.115	4.945
c /mm	249.991 1	249.951 1
x_1 /mm	-90	-60
x_2 /mm	-40	-10
Reflector material	Au	W-Si
σ /nm	0.3	0.3

从表 1 可知, ELL1 表面镀制单层金膜, ELL2 表面镀制钨-硅多层膜, 膜层材料、膜层结构、掠入射角、光子能量等均为椭球镜表面 X 射线反射率的影响因素。在 8 keV 能量下, 两组椭球镜膜层反射率与掠入射角的关系如图 4 所示(反射率数据源于 CXRO 网站)。

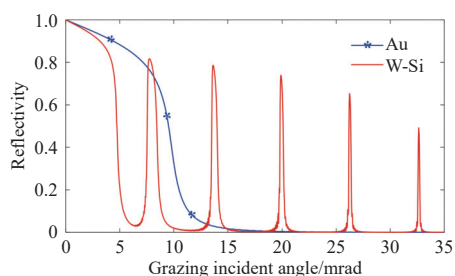


图 4 不同膜层的 X 射线反射率

Fig. 4 X-ray reflectivity of different film layers

2.2 聚焦光斑模拟

基于 Matlab 平台与 1.2 节所提出的光学追迹思路, 以点光源为例, 将光源放置于 ELL1 与 ELL2 的左焦点处, 各取 500 条强度为 100 的入射 X 射线, 令观察屏处于右焦点处, 即 $x_i = c$, 对两组椭球镜的聚焦光斑进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。

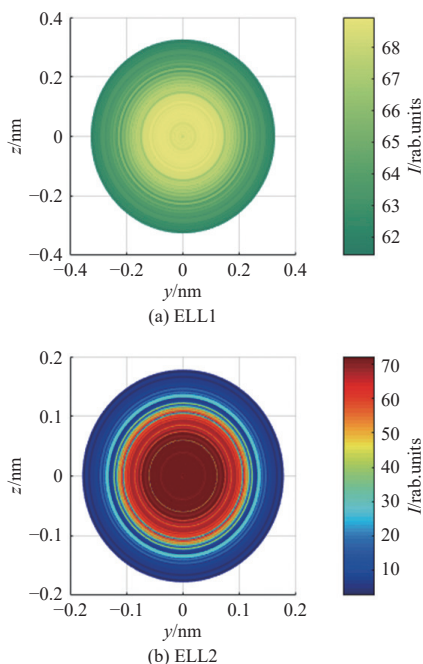


图 5 椭球镜聚焦光斑仿真结果

Fig. 5 Simulation results of focused light spot of ellipsoidal mirror

理想情况下, 经椭球镜表面反射后的 X 射线应全部会聚于一点, 考虑到椭球镜芯棒加工与镀

膜过程导致的表面微小起伏, 实际聚焦光斑会存在一定扩散。ELL1 与 ELL2 设计参数中的表面粗糙度为 $\sigma = 0.3 \text{ nm}$, 两组椭球镜的焦斑实际展宽半径约为 0.32 nm 与 0.18 nm 。

椭球镜整体的 X 射线反射率 R_{ellip} 为反射光强之和与入射光强之和的比值, 即:

$$R_{\text{ellip}} = \frac{\sum I}{\sum I_0} = \frac{\sum [I_0 \cdot R(\theta)]}{\sum I_0} \quad (7)$$

根据式(7)可计算出 ELL1 与 ELL2 的整体反射率, 分别为 65.85% 与 47.42%。

2.3 离焦光斑模拟

在透射式显微镜等系统中, 旋转椭球镜将 X 射线聚焦至右焦点处的样品上, 再通过后端光路在 CCD 上显微成像。由于成像光路通常使用波带片作为物镜, 而波带片具有环状结构, 因此反射后的 X 射线环状锥束需要与波带片相匹配, 以保证椭球镜能够充分对波带片起到照明作用。此时可以通过对环状光斑进行模拟, 观察不同离焦位置处的光斑内径 r_1 与外径 r_2 , 即令 $x_i = c + \Delta f$ 。分别取 0.50 mm 、 0.75 mm 、 1.00 mm 三组离焦量, 椭球镜 ELL1 与 ELL2 的光斑仿真结果如图 6 所示。

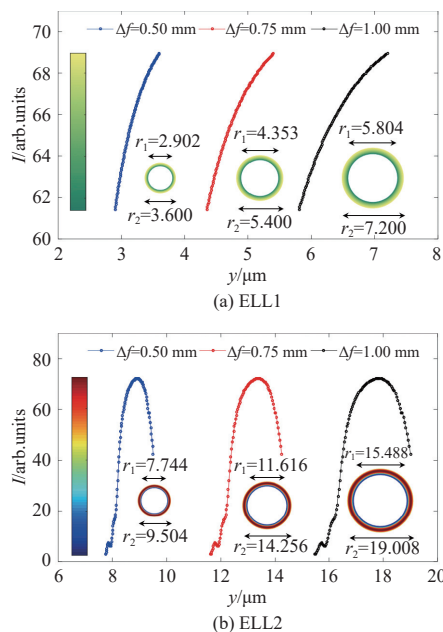


图 6 椭球镜离焦光斑仿真结果

Fig. 6 Simulation results of defocused light spot of ellipsoidal mirror

从图 6 可以看出, 随着离焦量的增加, 环状光斑的整体尺寸也随之增大。记环状光斑的有效宽度 $r = r_2 - r_1$, 则其大小由椭球镜的照明角与离焦

量共同决定:

$$r = \Delta f \cdot (\tan \beta_2 - \tan \beta_1) \quad (8)$$

仿真结果表明, 两组椭球镜的照明角分别为: ELL1, $\beta_1 = 5.804 \text{ mrad}$, $\beta_2 = 7.199 \text{ mrad}$; ELL2, $\beta_1 = 15.487 \text{ mrad}$, $\beta_2 = 19.005 \text{ mrad}$ 。代入式(8)即可求解不同离焦量下的环状光斑有效照明区域。

3 面形误差引入

3.1 表面形貌误差

基于面形复制法制造椭球镜, 可以先使用曲面

辊对芯棒进行粗磨削, 然后通过精磨削、抛光等工艺, 逐步控制芯棒的面形。然而, 加工过程中若不能精确控制磨抛装置与芯棒之间的距离, 导致欠加工或过加工, 则会使芯棒表面轮廓偏离理想面形, 整体产生一定高度误差。面形高度误差不改变椭球镜各位置的曲率, 但会使 X 射线的反射方向发生变化, 进而影响聚焦光斑分布。

将面形高度误差用 Δh 表示, 当加工过量时, 定义 Δh 为负值, 反之则为正值。对于 ELL1 和 ELL2, 各取 8 组面形高度误差值, 分别进行聚焦光斑仿真, 仿真结果如图 7 所示。

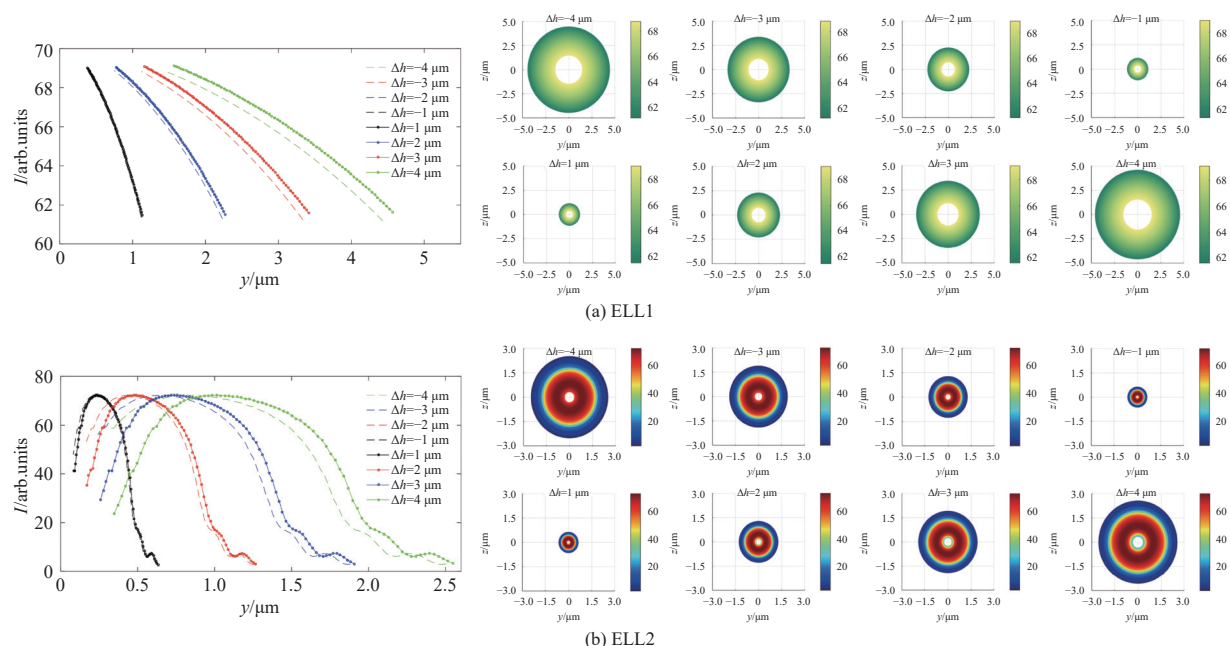


图 7 含有面形误差的聚焦光斑仿真结果

Fig. 7 Simulation results of focused light spot with surface errors

从图 7 可以看出, 面形高度误差的存在, 使得反射面不再为标准椭圆面, 故“点对点聚焦”特性失效, 右焦点位置处应有的理想聚焦点产生展宽, 变为环状光斑。无论芯棒处于过加工或欠加工状态, Δh 的绝对值越大, X 射线聚焦光斑的展宽程度也越高, μm 量级的高度误差将引起 μm 量级的焦斑半径增加, 因此必须严格保证芯棒的面形加工精度。此外, 椭球镜在进行尺寸与膜层设计时, 将 X 射线反射率作为重要指标参数, 面形高度误差使每条 X 射线在椭球镜表面的入射位置与掠入射角发生改变, 进而影响椭球镜的整体反射率。

3.2 表面粗糙度

受超精密加工水平的限制, 椭球镜芯棒表面会存在一定程度的微小起伏, 可用粗糙度 σ 进行评

估。上述 2.2 节中提到, σ 的存在使得聚焦光斑产生展宽, 况且在镀膜工艺中, 芯棒的表面粗糙度还会传递至反射膜层表面, 从而直接影响椭球镜的 X 射线反射率。对于两组椭球镜, 分别取 4 组表面粗糙度参数对聚焦光斑数据进行仿真, 仿真结果如图 8 所示。

图 8(a) 中, 对于 ELL1, 随着 σ 从 0.5 nm 提高至 3.0 nm, 其聚焦光斑展宽了 4.72 倍, 整体反射率由 65.17% 降低为 36.82%; 图 8(b) 中, 对于 ELL2, 由于多层膜反射率受粗糙度的影响极大, 故 σ 仅从 0.3 nm 提高至 1.0 nm, 整体反射率便从 47.42% 降为 10.61%, 损失约 77.63%, 焦斑则展宽了 3.25 倍。从图 8 可以看出, 随着表面粗糙度的增大, 椭球镜焦斑发生扩散的同时, 整体的 X 射线反射率

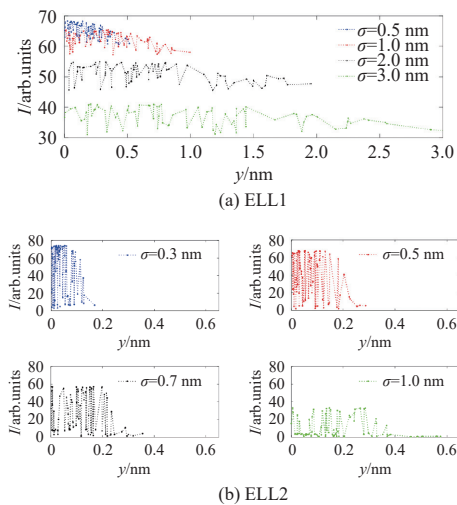


图8 含有表面粗糙度的聚焦光斑仿真结果

Fig. 8 Simulation results of focused light spot with surface roughness

显著下降。椭球镜芯棒制造工艺中的抛光工艺,正是为了不断减小其表面粗糙度,为了保证椭球镜反射面的光滑程度,同样需要更加精密的膜层镀制工艺。

4 光源强度分布引入

在完成了反射率、面形误差等信息设置后,还需要根据X射线光源的特性,将光源强度分布数据引入追迹程序。从微焦点光源到同步辐射光源,再到新一代自由电子激光,实际的X射线光源均非点光源,而是具有一定尺寸的面光源。记光源直径为 D_s ,焦斑直径为 D_f ,当光源强度平均分布,且椭球镜各位置反射率相同时,由图2中的几何关系可知:

$$D_f = D_s \cdot \frac{c - x_1}{x_1 - (-c)} \quad (9)$$

以 $D_s = 7 \mu\text{m}$ 均匀分布面光源为例,通过式(9)计算ELL1与ELL2的焦斑直径,结果分别为 $14.88 \mu\text{m}$ 和 $11.42 \mu\text{m}$ 。事实上,由于X射线反射率与掠入射角高度敏感,故实际的焦斑强度与理论计算结果相比,并非均匀分布,光学追迹仿真效果如图9所示。

对于本课题组使用的滨松光子学L9421-02型微焦点光源,其强度满足高斯分布,半高宽约为 $7 \mu\text{m}$,当输出功率调至4 W时,能够获得最小 $5 \mu\text{m}$ 的光源尺寸。以 $D_s = 7 \mu\text{m}$ 高斯分布面光源为例进行焦斑仿真,并对焦斑光强进行归一化处理,结果如图10所示。考虑到高斯光源直径的定

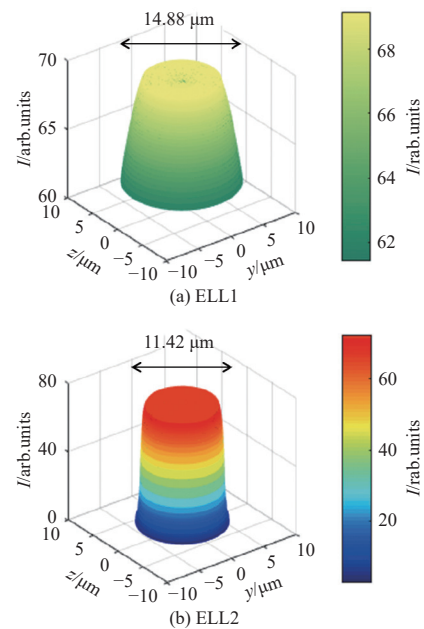


图9 基于均匀分布光源的聚焦光斑仿真结果

Fig. 9 Simulation results of focused light spot based on uniformly distributed light source

义,同样将聚焦光斑的半高宽作为 D_f ,ELL1与ELL2的焦斑直径分别为 $13.62 \mu\text{m}$ 和 $8.98 \mu\text{m}$ 。

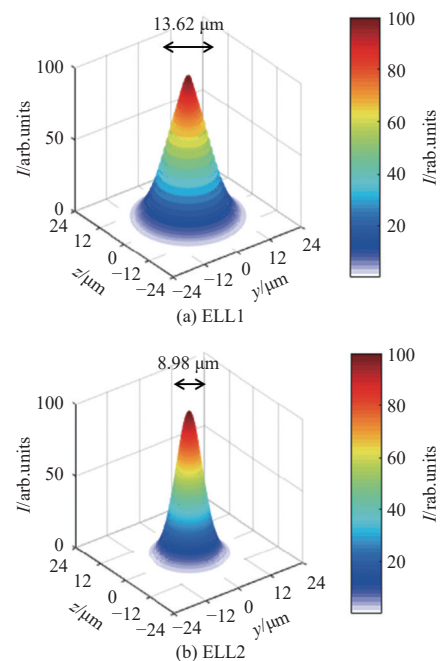


图10 基于高斯分布光源的聚焦光斑仿真结果

Fig. 10 Simulation of focused light spot based on gaussian distributed light source

从图10可以看出,引入光源强度分布后的聚焦光斑仿真结果,充分结合了实验条件,能够更加科学地模拟旋转椭球镜的聚焦特性。根据各类

X 射线光源的参数, 还可以设置更多不同的光源强度分布信息。

5 结论

提出了一种适用于旋转椭球镜的 X 射线光学追迹方法, 并对给定参数的椭球镜进行了仿真分析。详细描述了椭球镜聚焦仿真的思路与流程, 针对回转对称结构的椭球聚焦镜, 归纳了其聚焦特性的影响因素, 建立了 X 射线传播与追迹的数学模型。在 8 keV 能量下, 基于 Matlab 平台对两组长度 50 mm 的椭球镜(ELL1 和 ELL2)进行了仿真。分别在聚焦与离焦情况下, 定量分析了焦斑尺寸、平均反射率等参数, 并在光学追迹模型中引入了面形误差与光源强度分布信息。文中使用了 0.50 mm、0.75 mm、1.00 mm 三组离焦量, $\pm 1 \mu\text{m}$ 、 $\pm 2 \mu\text{m}$ 、 $\pm 3 \mu\text{m}$ 、 $\pm 4 \mu\text{m}$ 共 8 组面形高度误差值, 累计 8 组表面粗糙度值, 取光源尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 进行仿真, 仿真结果符合理论规律。设计者可基于该追迹方法, 自主设置椭球镜尺寸与反射率参数, 并添加面形误差、光源等信息, 实现对椭球镜的光斑仿真与聚焦特性研究。

聚焦光斑的仿真工作不仅能够直观研究椭球镜聚焦特性, 评价前期设计工作是否符合要求, 还可以为后续的 X 射线聚焦测试结果提供参考。该仿真方法兼具科学性、灵活性与直观性, 可作为 X 射线椭球聚焦镜科研工作者的一项便捷工具。

参考文献:

- [1] 王凯歌, 王雷, 牛憨笨. 微束斑 X 射线源及 X 射线光学元件[J]. *应用光学*, 2008, 29(2): 183-191.
WANG Kaige, WANG Lei, NIU Hanben. Microfocal X-ray source and X-ray optical elements[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 183-191.
- [2] 蒋晖, 李爱国. X 射线衍射极限纳米聚焦的前沿进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(11): 51-73.
JIANG Hui, LI Aiguo. Frontier development of X-ray diffraction-limited nanofocusing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(11): 51-73.
- [3] 李明, 吴介立, 吴永前, 等. X 射线反射镜研制技术的现状和发展[J]. *光电工程*, 2020, 47(8): 200205.
LI Ming, WU Jieli, WU Yongqian, et al. A review on the fabrication technology of X-ray reflector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200205.
- [4] KUME T, TAKEI Y, EGAWA S, et al. Development of electroforming process for soft X-ray ellipsoidal mirror[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 021718.
- [5] MIMURA H, TAKEI Y, KUME T, et al. Fabrication of a precise ellipsoidal mirror for soft X-ray nanofocusing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(9): 093104.
- [6] 王梓齐, 樊凯, 张军剑, 等. 用于同步辐射的压电变形镜控制策略数值模拟[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 23-29.
WANG Ziqi, FAN Kai, ZHANG Junjian, et al. Numerical simulation of piezoelectric bimorph mirror control strategy applied to synchrotron radiation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 23-29.
- [7] 程光宇, 黄智超, 王克逸, 等. 同步辐射聚焦镜压弯机构设计与面形误差分析[J]. *应用光学*, 2019, 40(1): 120-126.
CHENG Guangyu, HUANG Zhichao, WANG Keyi, et al. Design and surface shape error analysis of synchronous radiation focusing mirror bending mechanism[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 120-126.
- [8] SHAO S K, LI H Q, TAO F, et al. A passive characterization method of the single-bounce ellipsoidal capillary for the full field transmission X-ray microscopy[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2021, 1014(21): 165735.
- [9] 陶芬, 肖体乔, 王玉丹, 等. X 射线纳米成像单毛细管椭球镜的设计与检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 367-374.
TAO Fen, XIAO Tiqiao, WANG Yudan, et al. Design and detection of ellipsoidal mono-capillary for X-ray nanomicroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 367-374.
- [10] 赵帅. X 射线光学元件在线波前检测与精密制造技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
ZHAO Shuai. Research on online X-ray optics wavefront characterization and precision fabrication technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [11] 田金萍, 李文杰, 陈洁, 等. X 射线成像椭球聚焦镜的设计与检测[J]. *核技术*, 2008, 31(9): 671-675.
TIAN Jinping, LI Wenjie, CHEN Jie, et al. The design and test of ellipsoidal glass capillaries as condensers for X-ray microscope[J]. *Nuclear Techniques*, 2008, 31(9): 671-675.
- [12] RIO M, REBUFFI L. OASYS: a software for beamline simulations and synchrotron virtual experiments[C]//Pro-

- ceedings of the 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation. New York: AIP Publishing LLC, 2019.
- [13] REBUFFI L, RIO M. ShadowOui: a new visual environment for X-ray optics and synchrotron beamline simulations[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(6): 1357-1367.
- [14] SHAO S K, LI H Q, YUAN T Y, et al. Detailed simulation of single-bounce capillaries for various X-ray sources[J]. *Frontiers in Physics*, 2022(10): 816981.
- [15] 邵尚坤, 袁天语, 李惠泉, 等. 大口径椭球型单管 X 射线聚焦镜设计与仿真[J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 58(5): 681-685.
- SHAO Shangkun, YUAN Tianyu, LI Huiquan, et al. Design and simulation of large-diameter ellipsoidal single-bounce capillary lens[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2022, 58(5): 681-685.
- [16] 李惠泉, 邵尚坤, 孙学鹏, 等. 椭球单毛细管高能 X 射线微焦斑透镜模拟表征[J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 58(5): 692-696.
- LI Huiquan, SHAO Shangkun, SUN Xuepeng, et al. Simulation and characterization of ellipsoidal monocapillary X-ray lens with a micro focal spot for high energy X-ray[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2022, 58(5): 692-696.
- [17] ZHANG S, PAN K, WANG Z, et al. Simulation of optical properties of ellipsoidal monocapillary X-ray optics with inner-surface imperfections[J]. *Optics Communications*, 2021, 493: 127028.
- [18] LIN X Y, LIU A D, LI Y D, et al. A MATLAB programming for simulation of X-ray capillaries[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 172(1): 188-197.
- [19] MOTOYAMA H, SAITO T, MIMURA H. Error analysis of ellipsoidal mirrors for soft X-ray focusing by wave-optical simulation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(2): 022503.