



·惯性约束聚变物理与技术·

# 适用于激光聚变实验的短焦距高放大 倍率 Wolter 显微镜设计\*

叶良灏, 徐捷, 李文杰, 王新, 穆宝忠

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 围绕内爆压缩及阻滞阶段相关物理实验的诊断需求, 提出了一种满足阿贝正弦条件的短焦距高放大倍率 Wolter-III 型 X 射线显微镜的光学设计。详细介绍了 Wolter-III 型显微镜的结构特点和设计方法, 与 Wolter-I 型相比可以通过将主平面向靠近物点方向移动的方式减小系统焦距, 从而获得更大的放大倍数, 实现显微镜与探测器的像质匹配, 提高诊断系统的空间分辨。由光线追迹可以得出, 在 $\pm 190\ \mu\text{m}$ 的视场范围内, 空间分辨率优于 $3\ \mu\text{m}$ ; 在 $\pm 240\ \mu\text{m}$ 范围内分辨率优于 $5\ \mu\text{m}$ ; 在 $\pm 300\ \mu\text{m}$ 范围内分辨率优于 $8\ \mu\text{m}$ , 几何集光立体角约为 $5 \times 10^{-6}\ \text{sr}$ 。

**关键词:** Wolter 显微镜; X 射线显微镜; 短焦距; 高放大倍率; 激光惯性约束聚变

中图分类号: O434.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220038

## Design of Wolter microscope with short focal length and high magnification for laser fusion experiment

Ye Lianghao, Xu Jie, Li Wenjie, Wang Xin, Mu Baozhong

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To meet the diagnostic requirements of physical experiments in the implosion compression and arrest stage, an optical design of Wolter-III X-ray microscope with short focal length and high magnification satisfying the Abbe sine condition was proposed. This paper introduces the structural characteristics and design method of Wolter type III microscope in detail. Compared with Wolter type I microscope, the focal length of the system can be reduced by moving the main plane to the direction of the object point, so as to obtain a larger magnification. The image quality matching between microscope and detector is realized to improve the spatial resolution of diagnostic system. It can be obtained by ray tracing that the spatial resolution is better than  $3\ \mu\text{m}$  in the field of view of  $\pm 190\ \mu\text{m}$ . The resolution is better than  $5\ \mu\text{m}$  in the field of view of  $\pm 240\ \mu\text{m}$ . In the field of view of  $\pm 300\ \mu\text{m}$ , the resolution is better than  $8\ \mu\text{m}$ . The geometric solid light angle is about  $5 \times 10^{-6}\ \text{sr}$ .

**Key words:** Wolter microscope, X-ray microscope, short focal length, high magnification, laser inertial confinement fusion

在激光惯性约束聚变(ICF)内爆过程中, 等离子体辐射的能量以宽频段光、X射线、高能中子及 $\alpha$ 粒子的方式释放, 这些反应产物的强度、数量、辐射方向包含了丰富的特征信息, 这些信息直观地反映等离子体在高温高压状态下的吸收机制和规律, 对于优化驱动激光辐照参数和靶丸形态设计至关重要。在内爆减速阶段靶丸内界面的流体力学稳定性急剧增长, 热斑形状快速演化, 中高模数的发展将影响热斑压缩密度并加剧热斑混合效应等。基于掠入射反射式聚焦成像的X射线显微镜目前被广泛应用于等离子体诊断研究中。然而当前基于X射线显微镜的诊断设备光学性能存在限制, 空间分辨难以提高, 主要体现在两个方面: 一是光学构型受几何像差限制, 二是探测器分辨率不足, 难以满足对高模不稳定性研究的诊断要求。

\* 收稿日期: 2022-01-30; 修订日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(12005157); 国家自然科学基金项目(11905281)

联系方式: 叶良灏, 1930970@tongji.edu.cn.

通信作者: 徐捷, 1310581@tongji.edu.cn.

传统的KB(Kirkpatrick-Baez)显微镜采用前后正交放置的子午和弧矢球面镜(柱面镜)矫正掠入射条件下单块反射镜存在的严重像散,实现对X射线的显微成像,由于其不满足阿贝正弦条件,高分辨(分辨率优于 $5\ \mu\text{m}$ )的视场范围被限制在 $200\ \mu\text{m}$ 内<sup>[1-2]</sup>。1952年,德国物理学家Hans Wolter提出三种基于旋转二次曲面的掠入射成像光学系统设计<sup>[3]</sup>,Wolter构型最早应用于X射线天文望远镜。由Wolter型天文望远镜改良而成的Wolter-I显微镜,采用同轴共焦的旋转双曲凹面和旋转椭球凹面,能够有效克服KB显微镜对轴上点成像时的不满足阿贝正弦条件,扩大了高分辨视场范围。由于采用环面设计,可以有效提高系统的集光立体角到 $10^{-5}\ \text{sr}$ 量级以上,是KB显微镜的 $10^2$ 倍,是针孔相机的 $10^3$ 倍,这使得Wolter显微镜非常适合对像面光强度和对比度要求高的高通量时间、空间分辨诊断。在天文观测中得到广泛应用的是Wolter-I型。在硬X射线诊断区域,Wolter-II型和Wolter-III型反射镜<sup>[2]</sup>几乎可以作为超长焦镜和反聚焦透镜的等效光学器件。然而,只有少数报道<sup>[4-8]</sup>深入研究了Wolter-II型和Wolter-III型反射镜的特征,特别是Wolter-III型镜子很少有被详细讨论过。这是因为Wolter系统主要是为望远镜系统<sup>[9-11]</sup>开发的,成像光学的短焦距通常不适用于望远镜系统的设计。但对于显微镜来说,成像光学的短焦距成为了一个显著的优势。而当前在主战场应用的探测器空间分辨约 $20\ \text{lp/mm}$ ,只有提高光学系统的放大倍数,才能实现显微镜与探测器像质的匹配。然而由于ICF诊断条件和系统结构的限制,当前显微镜光学构型(如Wolter-I,KB等)放大倍数无法进一步提高。

为了能在空间紧凑的实验条件下实现较大的放大倍数,由此提出一种更紧凑的基于凹面镜和凸面镜组合的X射线成像光学系统——Wolter-III型显微镜系统,通过移动系统的主平面的方式来有效减小系统的光学焦距。本文详细介绍了由凹凸镜组合的新型Wolter显微镜系统的结构特点和设计方法,围绕内爆压缩及阻滞阶段相关物理实验的诊断需求,提出了一组短焦距高放大倍率的Wolter-III型显微镜光学结构参数,并通过仿真模拟对Wolter-III型显微镜的空间分辨率、视场,以及装调上误差容限和面形精度要求进行了评估研究。

## 1 光学结构

本节详细介绍了Wolter-III型显微镜的光学结构,阐述了Wolter-I型和Wolter-III型光学原理的对比,并给出了反射曲面的几何关系。系统的放大倍数由公式 $M = L/f$ 确定,系统的有效焦距 $f$ 被定义为从物平面到主平面的距离,主平面(principal surface)为入射光线延伸到光学系统和反射光线所形成的相交平面, $L$ 为主平面到像平面的距离。在子午面内,如图1(a)所示,Wolter-I型采用同轴共焦双曲凹面和椭球凹面的结构,该结构使Wolter-I型系统的主平面在两块反射镜中间处形成,系统的光学焦距由于结构限制难以减小。Wolter-III型显微镜的光学结构如图1(b)所示。椭球面和双曲面的同轴共焦点为 $F_2$ ,将物点放置在椭球面的另一焦点 $F_3$ 处,从椭球面反射的光线方向由过公共焦点 $F_2$ 的反向延长线决定,则从 $F_3$ 发出的光线经过椭球-双曲面的连续反射后将聚焦在双曲面的另一焦点 $F_1$ 处。由于椭圆的焦点于双曲线的焦点重合,因此该系统满足等光程原理和阿贝正弦条件,对轴上点进行消球差成像,降低了系统的球差和慧差。另外由于像面半径是由镜面曲率半径之和所决定的,因此在凹凸镜面的成像系统中,场曲像差也得到补偿。因此Wolter-III型显微镜系统也具有较宽的视场。

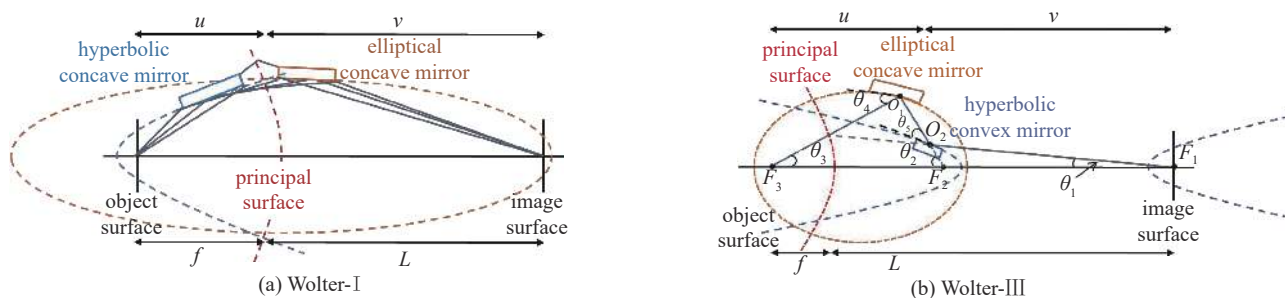


Fig. 1 Schematic of Wolter-I and Wolter-III optical microscopes

图1 Wolter-I型和Wolter-III型光学原理图

Wolter-III型采用椭圆凹镜和双曲凸镜的组合使系统的主平面在靠近物点的地方形成,相比Wolter-I型系统可以有效减小系统的光学焦距,提高放大倍数。因此两种系统在相同的尺寸长度下,Wolter-III型系统具有更小的光学焦距,同时主平面距离像平面距离 $L$ 增大,因此放大倍数得以提高,可以实现在有限实验室空间内提高系统放大倍数的需求。

Wolter-III 型显微镜的光学结构设计基于以上模型, 根据实验室已有的一套 Wolter-I 型显微镜参数, 将 Wolter-III 型显微系统设计成具有相同的物距以及数值孔径进行成像性能比较。如图 1(a) 所示, 假设在非球面反射镜的掠入射角分别为  $\theta_4$  和  $\theta_5$ 。通过构建简单的几何关系推导出主光线  $F_3-O_1-O_2-F_1$  与光轴的夹角, 其中入射光线  $F_3O_1$  与光轴夹角为  $\theta_3$ , 反向延长线  $F_2O_1$  与光轴夹角为  $\theta_2$ , 出射光线  $O_2F_1$  与光轴的夹角为  $\theta_1$ , 关系如下

$$\theta_3 = M\theta_1 \quad (1)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + 2\theta_5 \quad (2)$$

$$\theta_2 + \theta_3 = 2\theta_4 \quad (3)$$

通过三角形  $\Delta F_3O_1F_2$  和  $\Delta F_1O_2F_2$  可以分别表示出椭球面镜和双曲面镜的离心率  $e_1$  和  $e_2$ <sup>[12]</sup>。

$$e_1 = \frac{c_1}{a_1} = \frac{\sin(\theta_3 + \theta_2)}{\sin\theta_3 + \sin\theta_2} \quad (4)$$

$$e_2 = \frac{c_2}{a_2} = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin\theta_2 - \sin\theta_1} \quad (5)$$

此时椭球面和双曲面的形状参数  $(e_1, a_1)$  和  $(e_2, a_2)$  并不能唯一确定, 需要构建圆锥曲线的形状参数与系统初始结构参数 (包括物距  $u$ 、放大倍数  $M$  和掠入射角  $\theta_4$  和  $\theta_5$  等) 之间的联系。由于系统采用的椭球面以及双曲面同轴共焦, 同时像系统的物点和像点又是在焦点位置, 因此在确定一条圆锥曲线方程的前提下可以唯一确定另一曲线方程。在三维坐标系内, 椭球面和双曲面的方程可以分别表示为

$$\frac{(x+s)^2}{a_1^2} + \frac{y^2+z^2}{b_1^2} = 1 \quad (6)$$

$$\frac{x^2}{a_2^2} - \frac{y^2+z^2}{b_2^2} = 1 \quad (7)$$

$$s = c_1 + c_2 \quad (8)$$

## 2 结构参数

本节介绍了所设计的 Wolter-III 型显微镜的结构参数设计过程, 使用了仿真软件计算所设计系统的分辨率并根据要求进行参数优化。现提出一组与已有 Wolter-I 型具有相同的物距的 Wolter-III 型系统进行对比。表 1 为 Wolter-I 型和 Wolter-III 型显微镜光学参数。已知这套 Wolter-I 型显微镜能够在  $\pm 260 \mu\text{m}$  的视场范围内, 空间分辨率优于  $1 \mu\text{m}$ ; 在  $\pm 460 \mu\text{m}$  范围内优于  $3 \mu\text{m}$ ; 在  $\pm 600 \mu\text{m}$  范围内优于  $5 \mu\text{m}$ , 几何集光立体角为  $6.1 \times 10^{-5} \text{sr}$ <sup>[13]</sup>。

表 1 Wolter-I 型和 Wolter-III 型显微镜光学结构参数  
Table 1 Optical structure parameters of Wolter-I and Wolter-III microscopes

	contour	object distance/mm	grazing angle/(°)	a/mm	b/mm	mirror length/mm	f/mm	magnification
Wolter-I	hyperboloid	292.4	0.4	165.8	3.0	15	300	20
	ellipsoid	307.8	0.4	3 315.9	13.6	15.8		
Wolter-III	hyperboloid	307.8	0.3	2 956.0	3.6	8	242.3	25
	ellipsoid	292.4	0.4	194.0	1.2	10		

如表 1 所示, Wolter-I 型显微镜物距为 292.4 mm, 放大倍数为 20, 系统总长为 6300 mm。将 Wolter-III 型显微镜系统总长定为 6300 mm, 第一块镜子的掠入射角为  $0.4^\circ$ , 第一和第二块镜子物距  $u_1$  和  $u_2$  分别为 292.4 mm 和 307.8 mm, 第一块镜长为 15 mm。在 Wolter-III 型显微镜的光学设计中, 通过  $u_1, u_2, \theta_4, \theta_5$  这四个初始结构参数就可以确定系统的放大倍数  $M$  以及唯一的一组圆锥曲线形状参数与之相对应。椭球面镜长  $L_1$  为可变量, 由设计系统所需的几何集光立体角和空间分辨率来确定其长度, 理论上增加  $L_1$  的长度可提高系统的集光效率, 但是会导致空间分辨率的下降。双曲面镜长  $L_2$  可根据椭球面镜长  $L_1$  进行适配, 根据要求使得由  $L_1$  反射的所有或部分光线被接收或反射。为了达到需要的分辨率和视场要求, 对  $L_1$  和  $L_2$  进行调整。

为了与 Wolter-I 型比较,将第一块发射镜的掠入射角 $\theta_4$ 也控制在 $0.4^\circ$ 左右。由式(2)和(3)得出, Wolter-III 型系统的两块镜子掠入射角 $\theta_4$ 和 $\theta_5$ 与 I 型相比不相等。使用 MATLAB 软件对系统进行光线追迹,通过仿真模拟所设计系统的成像结果并使用点扩散函数计算系统的空间分辨率,结果如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,第二块镜子掠入射角度 $\theta_5$ 对系统的空间分辨率有明显的影响,掠入射角度越小系统的分辨率越高,系统的几何集光立体角随掠入射角的减小而增加,但是系统的放大倍数随掠入射角的减小而减小,在此选择为 $0.3^\circ$ 。确定了 $\theta_5$ 后,系统的放大倍数 $M$ 也随之确定了,根据系统的参数计算可得系统的放大倍数为 25。由此可见,在同一光学系统尺寸下, Wolter-III 型的放大倍数有所提高, III 型结构相比 I 型在尺寸相同的条件下可以获得更大的放大倍数,为在紧凑结构中实现高放大倍数创造了条件。通过对两块镜子物距的调整可以实现对放大倍数的调控,但是放大倍数增加的同时,系统的分辨率和视场会有所牺牲。

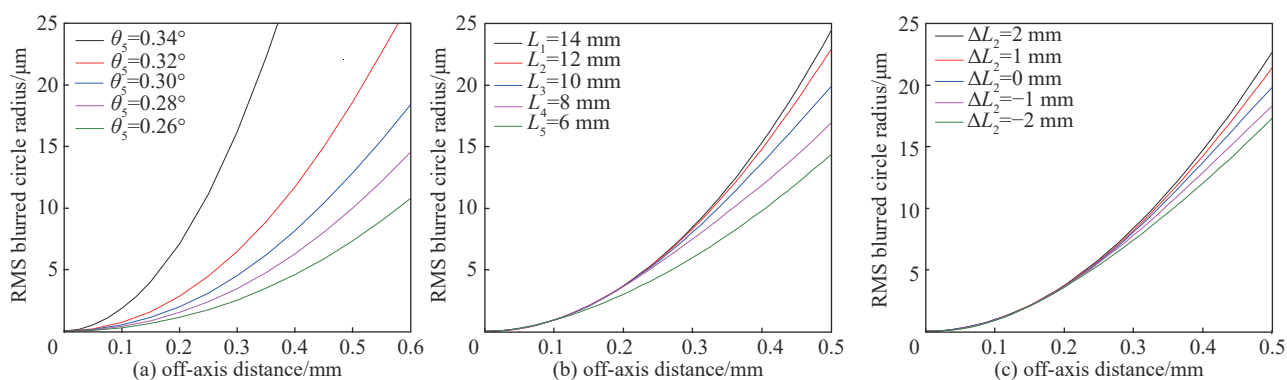


Fig. 2 Effect of grazing incident angle  $\theta_5$ , mirror length  $L_1$  and mirror length  $L_2$  on resolution of Wolter system

图 2 掠入射角 $\theta_5$ 、镜长 $L_1$ 和镜长 $L_2$ 对 Wolter 系统分辨率的影响

镜长 $L_1$ 的变化对系统分辨率的影响如图 2(b)所示,系统分辨率随镜长 $L_1$ 增加而降低。增长镜长 $L_1$ 会增加系统的集光效率,但同时分辨率会降低,在此取 $L_1$ 为 10 mm。适当地调整 $L_2$ 可以起到孔径光阑的作用,能够进一步改善轴外像差,如图 2(c)所示,最终 $L_2$ 定为 8 mm。

至此确定出一组符合要求的 Wolter-III 型显微镜光学结构参数,表 1 中为提出的 Wolter-III 型系统具体参数。表 2 为 I 型和 III 型系统的仿真结果对比,椭圆凹面镜和双曲凸面镜的组合将系统的主平面向靠近物点的方向移动,在系统总长不变的情况下减小了系统的焦距,从而提高了系统的放大倍数。但采用这种构型设计会使镜子更靠近光轴,镜子的口径减小,导致系统的集光效率降低,系统的几何集光立体角为 $5 \times 10^{-6}$  sr。Wolter-I 型显微镜在高分辨视场以及集光效率上更具优势;而 Wolter-III 型显微镜的优势在于短焦距高放大倍数,能够有效弥补当前诊断设备探测器空间分辨的不足。

表 2 Wolter-I 型和 Wolter-III 型系统仿真结果比较

Table 2 Comparison of simulation results between Wolter-I and Wolter-III systems

	the field of view corresponds to the spatial resolution/ $\mu\text{m}$				solid light angle/sr
	1 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$	
Wolter-I	$\pm 260$	$\pm 460$	$\pm 600$	$\pm 760$	$6.1 \times 10^{-5}$
Wolter-III	$\pm 100$	$\pm 190$	$\pm 240$	$\pm 300$	$5 \times 10^{-6}$

### 3 装调误差分析

本节研究装调误差导致的像差对系统的分辨率影响,根据需要满足的分辨率要求,计算出最大装调容差限度,并提出了对元件面形和粗糙度的要求。金属靶丸流体背光成像的空间尺度在几百微米量级,因此反射镜元件的定位精度要求非常高。对于有更高分辨率要求的,接近理想成像的 Wolter 型显微镜系统,镜面对准必须要更加精确。在此模拟成像的结果中,不考虑 Wolter 显微镜的面形误差以及曲面的粗糙度等因素,将 Wolter-III 型的两个旋转曲面当作为理想的几何曲面,仅从几何光学的角度来分析其成像的结果。此处研究装调误差导致的像差,主要研究了椭圆镜和双曲镜的相对角度,水平方向的相对长度 $H$ 和垂直方向的相对高度 $V$ 三个重要对准参数对分辨



率的影响,如图 3 所示。

为了评估误差极限,利用光线追迹模拟计算了各个参数对中心视场分辨率的影响。误差极限定义为小于  $1.5 \mu\text{m}$ ,图 4 显示了计算结果,图中水平线表示可接受的公差值。由此可得,水平方向相对长度的误差容限为  $90 \mu\text{m}$ ,垂直方向的相对高度误差容限为  $1 \mu\text{m}$ ,两个镜子的相对角度误差容限为  $0.66 \text{ mrad}$ 。

旋转对称结构的非球面反射镜加工是 Wolter 系统的核心所在。由于 Wolter 系统面形误差对于最终的分辨率结果影响较大,因此对反射镜面形精度要求很高。如图 5 所示为 Wolter-III 型显微镜所采用的椭球-双曲反射镜的面形及参数,提出倾斜度误差优于  $0.3 \mu\text{rad}$ ,粗糙度优于  $0.3 \text{ nm}$  的面形要求。旋转对称的椭球-双曲面反射镜是 Wolter 显微系统的关键光学元件,采用单点金刚石车削<sup>[14-15]</sup>或芯轴复制的方法可以制造出具备一定面形精度和粗糙度的超光滑反射镜。由于 Wolter 型显微镜为旋转对称构型,小口径旋转对称凹面镜的加工难度高于凸面镜。因此,相同的加工精度下,Wolter-III 型显微镜稍具优势。

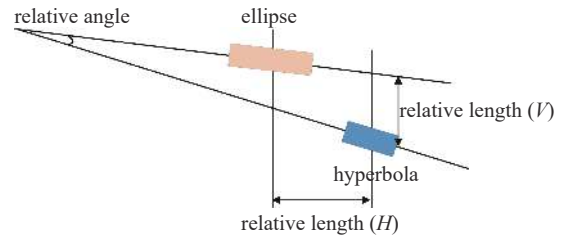


Fig. 3 Schematic diagram of three important alignment parameters

图 3 三个重要对准参数示意图

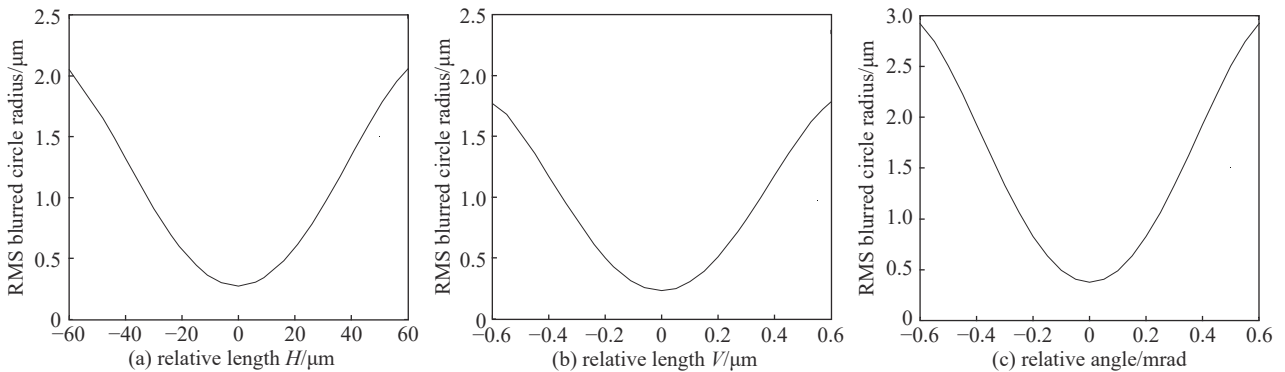


Fig. 4 The relationship between alignment error and system resolution

图 4 对准误差与系统分辨率的关系

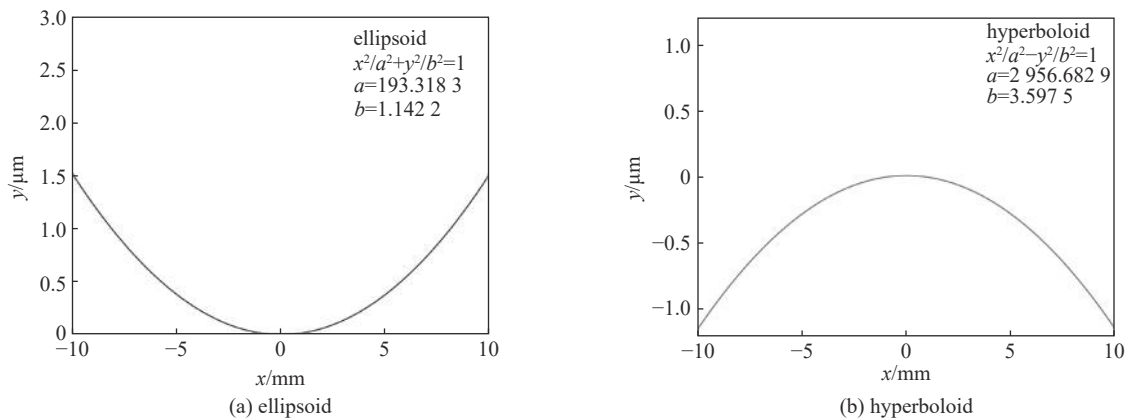


Fig. 5 Surface parameters of Wolter-III microscope

图 5 Wolter-III 型显微镜面形参数

#### 4 系统景深研究

本节介绍了使用 MATLAB 软件,通过移动物点改变物距模拟成像实验结果来研究系统的景深大小。保持系统像距不变,通过改变物距  $u$ ,使点光源沿轴偏离物点,模拟成像结果的变化,结果如图 6 所示。物距改变依次为:(a)  $0 \text{ mm}$ , (b)  $1 \text{ mm}$ , (c)  $2 \text{ mm}$ , (d)  $3 \text{ mm}$ , (e)  $4 \text{ mm}$ , (f)  $5 \text{ mm}$ 。可以看出像斑随着点光源的偏移,部分光线逐渐外扩变成一个圆环。而大量光线仍然集中在圆环中心处,由于比例关系,图中圆环中心显示为一个点。定义分辨率优于  $10 \mu\text{m}$  处为系统景深,当物距移动至大约  $3 \text{ mm}$  处,经 MATLAB 软件计算点扩散函数得出此时系统分辨率为  $10 \mu\text{m}$ ,

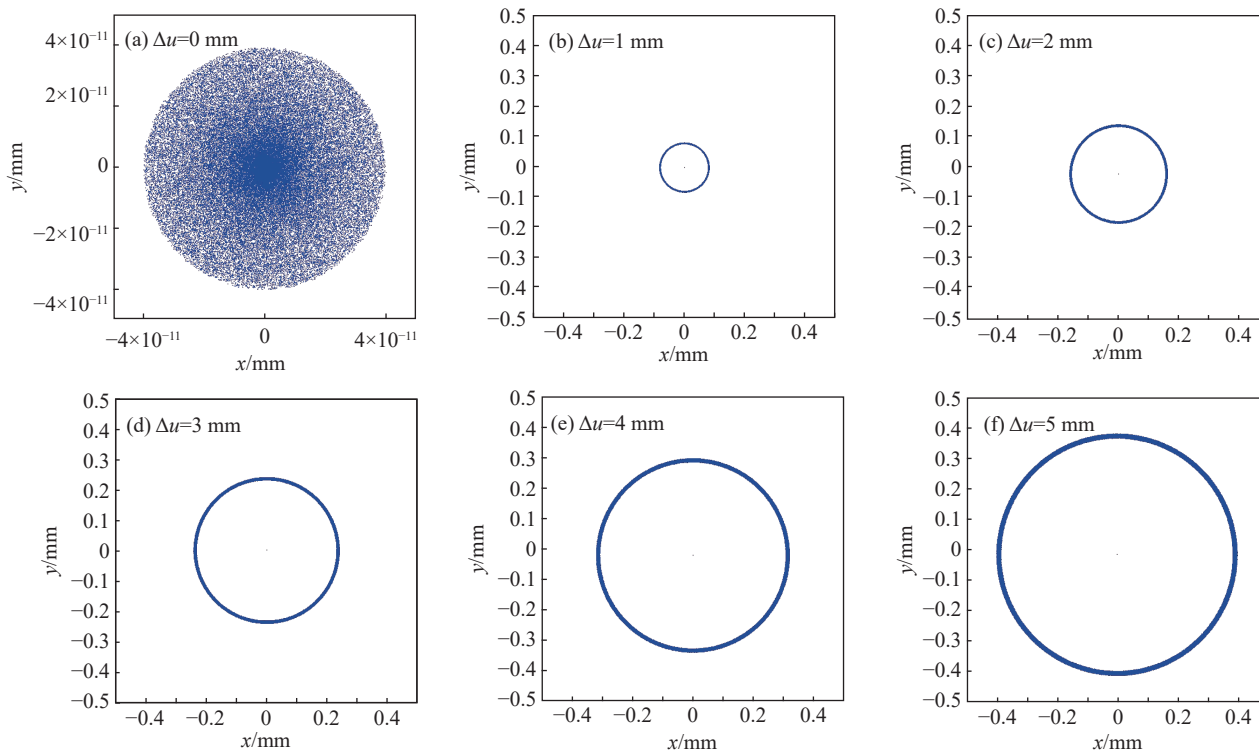


Fig. 6 Imaging results after moving object distance

图6 移动物距后的成像结果

因此系统景深大致在 3 mm, 从图中可以看出物距变化对成像的影响较大。

## 5 结论

系统地阐述了 Wolter-III 型显微镜的光学设计, 提出了一组用于内爆压缩及阻滞阶段相关物理实验的显微镜结构参数, 获得了相比 Wolter-I 型更大的放大倍率, 但由于系统结构限制会降低系统的集光效率, 系统空间分辨率也会受到影响。通过光线追迹模拟仿真进行方案验证和性能评价。在  $\pm 190 \mu\text{m}$  的视场范围内, 空间分辨率优于  $3 \mu\text{m}$ ;  $\pm 240 \mu\text{m}$  范围内分辨率优于  $5 \mu\text{m}$ ; 在  $\pm 300 \mu\text{m}$  范围内分辨率优于  $8 \mu\text{m}$ 。几何集光立体角为  $5 \times 10^{-6} \text{sr}$ 。在提高系统放大倍数方面 Wolter-III 型系统具有明显的优势, 可以通过调整镜子的物距实现对系统的放大倍数的调控, 但是 III 型系统由于结构的限制, 镜头口径小, 系统的集光效率会有所下降, 同时系统的视场相对较小。Wolter-III 型显微镜通过“主平面前移”有效减小系统光学焦距, 在相同系统总长下获得更大的放大倍数, 实现显微镜与探测器的像质匹配, 将诊断系统的整体分辨率提升到新的台阶。尽管目前 Wolter-III 型系统在显微镜领域的研究较少, 但是随着我国超光滑反射镜加工和检测技术的提升, Wolter-III 型显微镜因其空间分辨及短焦距高放大倍数的优势, 有望在内爆压缩阶段的流体力学不稳定性、阻滞阶段热斑界面的精细结构等研究中发挥重要作用。

## 参考文献:

- [1] Yamauchi K, Yabashi M, Ohashi H, et al. Nanofocusing of X-ray free-electron lasers by grazing-incidence reflective optics[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(Pt 3): 592-598.
- [2] Wolter H. Spiegelsysteme streifenden einfalls als abbildende optiken für röntgenstrahlen[J]. *Annalen der Physik*, 1952, 445(1/2): 94-114.
- [3] Matsuyama S, Mimura H, Yumoto H, et al. Development of mirror manipulator for hard-X-ray nanofocusing at sub-50-nm level[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77: 093107.
- [4] Saha T T. Aberrations for grazing incidence telescopes[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(8): 1492-1498.
- [5] Saha T T. Transverse ray aberrations for paraboloid-hyperboloid telescopes[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(12): 1856-1863.
- [6] Yamada J, Matsuyama S, Yasuda S, et al. Development of concave-convex imaging mirror system for a compact and achromatic full-field X-ray microscope[C]//Proceedings of SPIE 10386, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XII. 2017.
- [7] Yamada J, Matsuyama S, Sano Y, et al. Simulation of concave-convex imaging mirror system for development of a compact and achromatic full-field X-ray microscope[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 967-974.
- [8] Yamada J, Matsuyama S, Sano Y, et al. Compact reflective imaging optics in hard X-ray region based on concave and convex mirrors[J]. *Optics Express*, 2019,

27(3): 3429-3438.

- [9] 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(s1): S9-S21.
- [10] Takahashi T, Mitsuda K, Kelley R, et al. The ASTRO-H X-ray observatory[C]//*Proceedings of SPIE 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*. 2012: 84431Z.
- [11] Zuo Fuchang, Mei Zhiwu, Ma Tao, et al. Design and development of grazing incidence X-ray mirrors[C]//*Proceedings of SPIE 9796, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences Held November 2015*. 2016: 97961O.
- [12] Chon K S, Namba Y, Yoon K H. Optimization of a Wolter type I mirror for a soft X-ray microscope[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(2): 223-230.
- [13] 李亚冉, 谢青, 陈志强, 等. 激光等离子体诊断用Wolter型X射线显微镜的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 062002. (Li Yaran, Xie Qing, Chen Zhiqiang, et al. Optical design of Wolter X-ray microscope for laser plasma diagnostics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 062002)
- [14] Chon K S, Namba Y, Yoon K H. Single-point diamond turning of aspheric mirror with inner reflecting surfaces[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 364/366: 39-42.
- [15] Chon K S, Namba Y. Single-point diamond turning of electroless nickel for flat X-ray mirror[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(8): 1603-1609.