

文章编号 1004-924X(2006)01-0034-09

非共轴掠入射 X 射线显微镜参数的误差分析

赵玲玲, 胡家升, 李 祥

(大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:设计了一套由4个反射镜组成的非共轴掠入射X射线显微镜,分析了该系统的像差和成像质量。为了研制出高质量的设备,需要制定合理的加工和装配公差。研究了由于元件和结构参数(反射镜的半径,物距,掠入射角等)的误差而引起的高斯参数和像差的变化。首次用点列图和调制传递函数来定量评价图像质量降低的程度,并在此基础上制定了合理的加工和装配公差。在这些公差的约束下,研制成一套非共轴掠入射X射线显微镜,在激光引爆的惯性约束聚变的诊断实验中,用该系统获得了高质量的图像。

关键词:X射线成像;X射线显微镜;公差制定;误差分析

中图分类号:TH742.63 **文献标识码:**A

Error analysis on the parameters of non-coaxial grazing X-ray microscope

ZHAO Ling-ling, HU Jia-sheng, Li Xiang

(School of Electronic and Information Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A set of non-coaxial grazing X-ray microscope consisting of four spherical mirrors was designed for diagnosis of ICF, and the aberrations and imaging quality of the microscope were analyzed. In order to acquire excellent image quality, it is necessary for manufacturing and assembling the microscope to set up the reasonable tolerances. In this paper, the changes of Gauss parameters and aberrations caused by component and subsystem parameters, such as the mirror's radius, the angle between mirrors, grazing angle, object distance, etc., were studied, and the spot diagrams and MTF were firstly adopted for evaluating quantitatively image quality of the microscope. The reasonable manufacturing tolerances of components and assembly tolerances of the system were established based on the discussion and analysis above. A set of non-coaxial grazing X-ray microscope has been manufactured under confinement of the tolerances. In site test of ICF, the images with high resolution are obtained by the microscope.

Key words: X-ray imaging; X-ray microscope; tolerance; error analysis

1 引 言

最近 20 年来,为了满足 X 射线光刻,空间探测,高能物理,惯性约束聚变(ICF)等方面的需要,X 射线成像技术得到迅速发展。由于普通的成像方法不适合于 X 射线波段,目前多采用掠入射反射成像和编码孔径成像方法,例如 Wolter 系统^[1],KB^[2]系统等。虽然 X 射线多层膜技术的迅速发展使正入射的 X 射线成像成为可能,但目前只在软 X 射线的长波波段获得实际应用^[3-4]。

本课题组为中国工程物理研究院的激光等离子体国家重点实验室设计了一套由 4 个球面反射镜组成的非共轴掠入射 X 射线显微镜,也称为 KBA 型 X 射线显微镜^[5]。通过对该显微镜的成像质量分析可以看出,该系统对加工及装配的尺寸精度要求很高^[6-9],这势必增加了研制的难度,使得成本提高。因此,在保证 KBA 显微镜成像质量的前提下,合理地制定加工和装配公差,对于降低研制难度和成本是至关重要的。在传统的 optical 设计中,对于公差的确定往往是凭经验和采用类比法,但合理的公差取值对于设计者来说是很难把握的,要靠长期的经验积累,这样给出的加工公差,难以保证研制出高质量的设备。为了提高安全系数,往往给出比较严的公差,这种制定公差的盲目性所造成的直接结果是提高成本。

本文在对所设计的 X 射线显微镜进行像差分析的基础上,进一步研究系统参数的改变对成像质量的影响,在保证整体质量的前提下,合理的给出各个零部件的加工和装配公差。鉴于 KBA 显微镜系统结构的特殊性,一般的光学设计 CAD 软件难以适应,为此作者编写了适应于非共轴掠入射 X 射线成像系统的光线追迹程序。利用这个程序分析了系统各参数的变化对系统的高斯参数和成像质量的影响,在这里,首先用点列图(弥散盘)和调制传递函数 MTF 来评价 X 射线显微镜的质量降低程度。根据这些分析,给出了掠入射 X 射线显微镜加工及装配的精度要求。

2 掠入射 X 射线显微镜系统的参数变化对成像质量的影响

掠入射 X 射线显微镜由 4 块曲率半径相同

的球面反射镜构成,如图 1 所示^[5,8]。水平面入射的光线对前一组双反射镜来说是子午光线,对后一组双反射镜是弧矢光线;反之,垂直面入射的光线对前一组双反射镜来说是弧矢光线,对后一组双反射镜是子午光线。为了说明方便,下文统一把水平面称为子午面,垂直面称作弧矢面。为了减小反射镜的尺寸并使整体结构紧凑,该系统子午面的光阑和弧矢面的光阑是分离放置的,即子午面的光阑放在第二块反射镜上,弧矢面内的光阑放在第四块反射镜上。

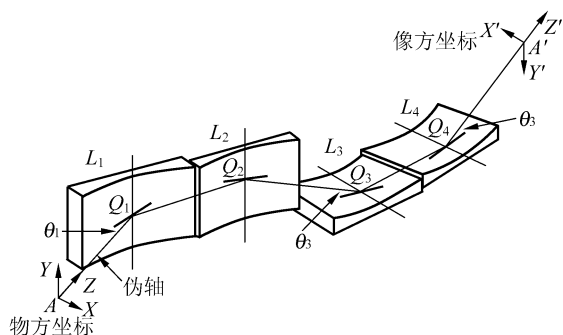


图 1 KBA X 射线显微镜的结构

Fig. 1 Scheme of KBA X-ray microscope

文献[5-6]对该系统的像差和成像质量进行了分析,然而在实际加工和装配过程中,系统中各元件的参数和它们的相互位置肯定会存在误差,这些误差将使系统的成像质量降低。这种因加工和装配误差引起的质量降低是有限度的,超过这个限度是不允许的,因此,可以由允许的质量降低的限度来确定加工和装配公差。

轴外点邻主光线细光束计算的杨氏公式为:

$$\frac{n' \cos^2 I'_p}{t'} - \frac{n \cos^2 I_p}{t} = \frac{n' \cos I'_p - n \cos I_p}{r} \quad (1)$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I'_p - n \cos I_p}{r} \quad (2)$$

式中, t, s, t', s' 分别为子午光线和弧矢光线的物距和像距, I_p, I'_p 为主光线的入射角和折射(或反射)角, n, n' 为入射和出射介质的折射率, r 为曲率半径。参照图 1,由杨氏公式可以看出,系统的物距(AQ_1)、反射镜的曲率半径(r)及掠入射角(θ_1 和 θ_3)等参数的误差都对成像有影响。此外,双反射镜的夹角和图像接收面位置(参量为 Q_1A')的误差也会对系统成像有影响。下面分析这些参

数的变化引起的成像质量的降低情况。在此基础上,制定出合理的加工和装配公差。

由于该显微镜的结构是严重的非共轴和非对称的系统,导致它的点列图在有效视场内基本呈三角形分布,其能量大部分集中在顶角上,如图 2 所示。在计算弥散直径时,把能量的 80% 所在区域的尺寸作为有效弥散直径, D_t 表示子午有效弥散直径, D_s 表示弧矢有效弥散直径。经过计算得到:伪轴上点目标在像方的有效弥散直径 $D_t = 18.45 \mu\text{m}$, $D_s = 16.35 \mu\text{m}$, 1 mm 视场的有效弥散直径 D_t 优于 $32 \mu\text{m}$, D_s 优于 $20 \mu\text{m}$, 2 mm 视场的有效弥散直径 $D_t < 50 \mu\text{m}$, $D_s < 35 \mu\text{m}$ 。考虑倍率关系,对应的物方的弥散直径要缩小 8 倍,其值分别为: $2.3 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$; $4.0 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$; $6.3 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$ 。很显然,这些值是满足使用要求的。为了考察系统成像的整体质量,计算了该显微镜的 MTF, 采用的物方空间频率分别是 165 lp/mm 和 100 lp/mm (这两个频率分别相当于 $6 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的分辨率)。图像在通过伪轴上像点 A' 且垂直于伪轴的平面 ($Q_1A' = 1786.72 \text{ mm}$) 上接收,即图 1 中的 $x'y'$ 平面。

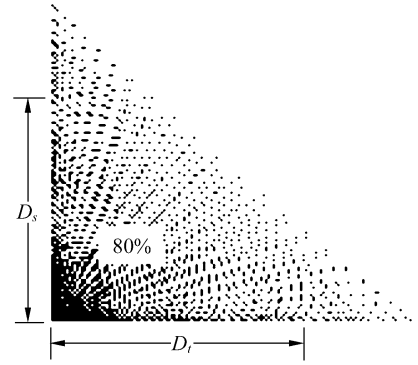


图 2 有效弥散直径的计算

Fig. 2 Calculation of effective dispersion diameter

2.1 物距对成像的影响

在 ICF 实验中, KBA 显微镜对处在真空壳体内部的靶标成像, 由于受到空间的限制, 精确地对准目标是很困难的, 物距的误差不可避免。通过计算知道, KBA 显微镜对物距的改变很敏感。这就要求制定合理的物距误差, 使得因物距的改变引起的像差在允许的范围内。计算结果表明, 物距改变主要引起像散和畸变。表 1 列出了当物距改变时引起的子午和弧矢的像距、有效弥散半径、倍率以及像散的变化情况。

表 1 物距与成像关系的数据表

Tab. 1 Relation between object distance and imaging quality

物距 (mm)	子午面			弧矢面			像散(mm)
	像距(mm)	倍率	弥散 D_t (μm)	像距(mm)	倍率	弥散 D_s (μm)	
-222	1670.0	7.878	22.380	1712.8	6.191	18.660	42.7691
-221	1726.2	7.901	18.884	1748.8	6.211	16.636	22.6348
-220.5	1755.9	7.913	18.460	1767.6	6.221	16.435	11.659
-220	1786.7	7.925	18.447	1786.7	6.232	16.352	0.0198
-219.5	1818.7	7.937	18.549	1806.4	6.242	16.465	12.331
-219	1852.0	7.949	18.962	1826.6	6.252	16.645	25.447
-218	1922.7	7.973	20.871	1868.5	6.273	17.872	54.205

注: 弥散是相对于标准像面而言

由表 1 可见, 物距改变引起子午和弧矢像面分离, 像散变得严重, 其结果导致像点弥散, 分辨率降低, 图 3 描述了物距变化引起的像距、像散、弥散直径和 MTF 的变化情况。当物距误差为

2 mm 时, 会使像方弥散增加近 $4 \mu\text{m}$, 分辨率降低约 20%, 这是不允许的。由上述的分析可以得出, $\pm 100 \text{ mm}$ 的物距误差是允许的。

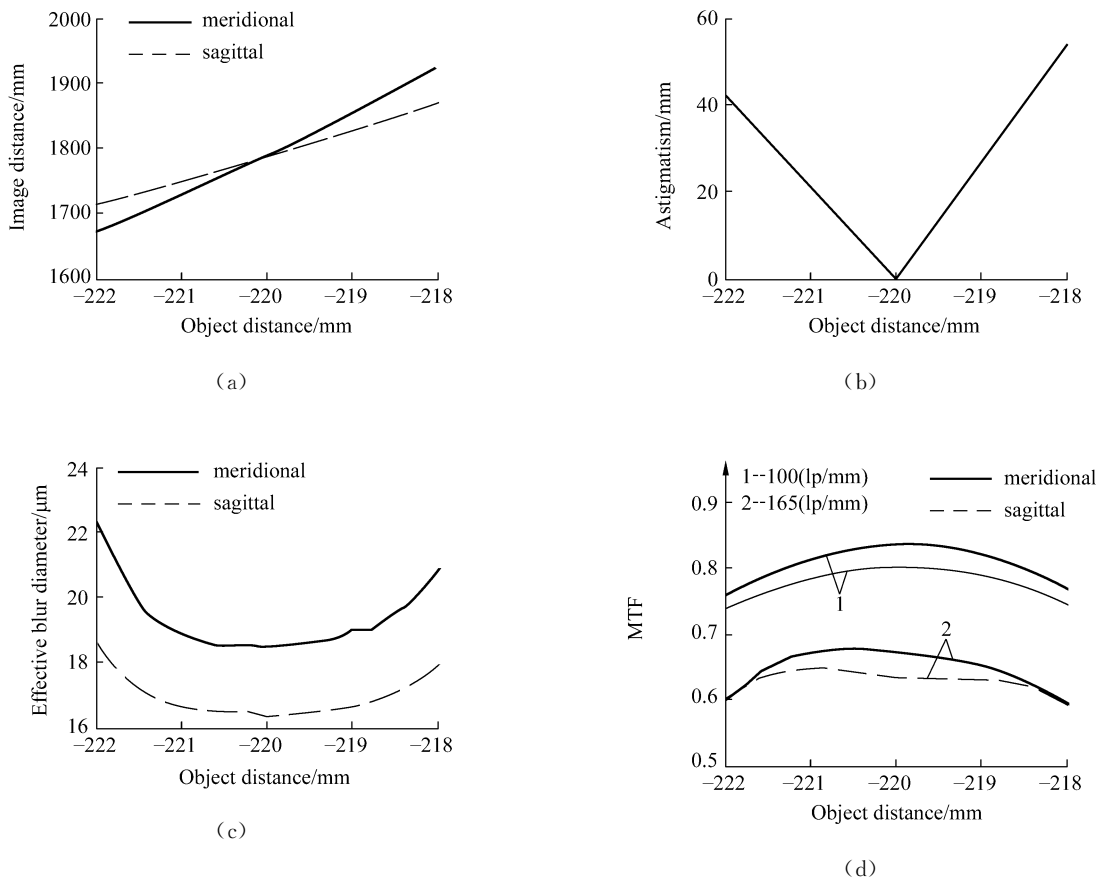


图 3 物距与成像质量的关系曲线
 Fig. 3 Relation between object distance and imaging quality

2.2 离焦对成像的影响

所谓的离焦,就是实际像点对理想像点的纵向偏离,它所造成的弥散是离焦量乘以像方孔径角。KBA 显微镜的像方孔径角很小,约为 $0.008\ 081\ 425^\circ$,所以离焦对系统成像质量的影响不大。图 4(a)和(b)分别为有效弥散直径和 MTF 随离焦量的变化曲线。由图可以看出,如果离焦量不超过 $\pm 100\ \text{mm}$,系统的成像质量变化不大。

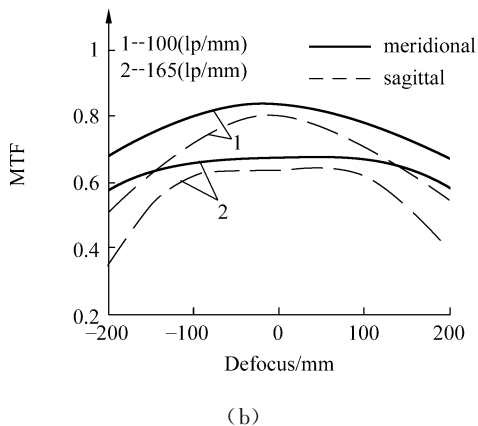
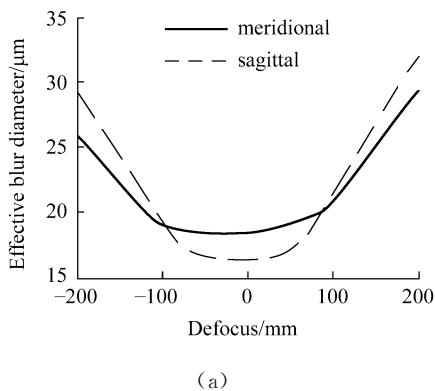


图 4 离焦量与成像质量的关系
 Fig. 4 Defocusing effect on imaging quality

2.3 曲率半径对成像质量的影响

KBA X 射线显微镜的反射镜误差主要有表面粗糙度,曲率半径和表面面形。在所设计的 X 射线显微镜的使用条件下,要求表面粗糙度在 $0.5\ \text{nm}$ 左右,表面粗糙度增加会使反射镜的反射

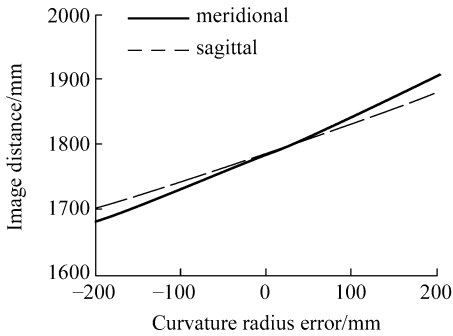
率迅速降低^[9]。由于该系统反射镜的半径很大,达到 29 000 mm。表面面形的微小变化会使半径改变很大,这里以实例来说明。如果反射镜的口径为 30 mm,由矢高公式

$$x = \frac{h^2}{2R}$$

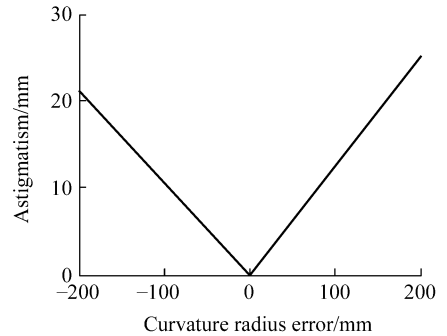
可以算出矢高来,式中 h 为反射镜口径之半, R 为曲率半径。把上面数据代入公式,得出矢高为 0.003 88 mm。如果用平面样板进行检查,可显示出 13 个光圈(6.5λ)。如果表面面形误差为一个光圈,相应的曲率半径变化量为 2 250 mm,这显然是不允许的。如果要把曲率半径的变化量控制在 100 mm 之内,那么就要把面形误差控制在 $1/30$ 光圈之内,这当然是十分困难的。另外,表面面形的局部误差会降低反射率和图像的信噪

比,也要加以严格控制,一般应小于 $1/100$ 波长才行。

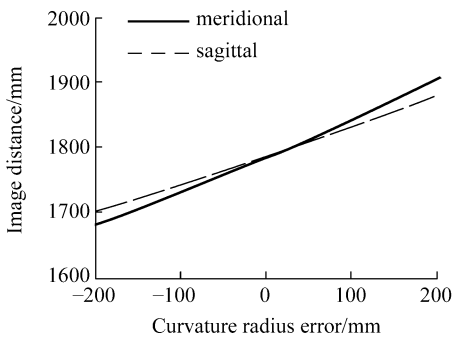
由于球面反射镜曲率半径太大,给加工和检测带来很大困难(关于加工和检测,将另文论述)。在加工过程中,4 块反射镜被固定在同一磨盘上,因此所产生的误差是相同的,表 2 列出了半径变化引起的像面参数和像差的变化,图 5 是其图形表示。由图 5(a)和(b)可以看到,曲率半径的改变使得子午和弧矢像面分离,也就是说产生了像散,图 5(c)和(d)画出了半径变化引起的弥散盘和 MTF 的变化。综合上述分析,当曲率半径的变化小于 100 mm 时,引起的高斯参数和像差的变化基本上是在允许的范围内。



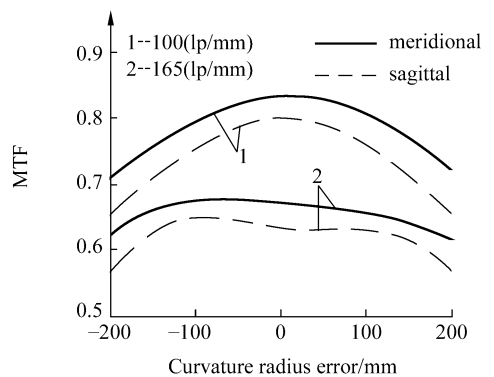
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 曲率半径的改变对成像的影响

Fig. 5 Correlation between change of mirror radius and image quality

表 2 曲率半径的偏离量对成像影响的数据表

Tab. 2 Effect of curvature radius error on image quality

半径偏离量 (mm)	子午面			弧矢面			像散(mm)
	像距(mm)	倍率	弥散 D_t (μm)	像距(mm)	倍率	弥散 D_s (μm)	
-200	1681.1	7.943	21.035	1702.2	6.234	19.836	21.052
-100	1732.6	7.934	18.690	1743.6	6.233	16.827	11.032
-50	1759.3	7.930	18.505	1764.9	6.232	16.435	5.656
0	1786.7	7.925	18.447	1786.7	6.232	16.352	0.0198
50	1814.9	7.921	18.614	1809.0	6.231	16.530	5.892
100	1843.8	7.916	18.823	1831.7	6.230	16.859	12.095
200	1904.1	7.907	20.083	1878.7	6.229	18.728	25.440

2.4 双反射镜夹角的变化对成像质量的影响

KBA 显微镜由互相垂直的两组平行的双反射镜组成,其主要目的是减少像面倾斜和增加有效视场。双反射镜的焦距为^[5,10]:

$$f' \approx \frac{R\eta}{8} \quad (d \ll R\eta), \quad (3)$$

其中 η 为双镜的夹角, d 为双镜中两块反射镜的中心间隔。由公式(3)可以知道,由于 R 很大,夹角 η 的微小改变会引起焦距的明显改变,从而导致系统成像参数和像差的变化。在 KBA 显微镜中,子午面和弧矢面的成像分别由一组双镜起主

要作用^[3,5]。在设计中,第一组双镜的夹角 $\eta_1 = 3.2^\circ$,第二组双镜的夹角 $\eta_2 = 3.8^\circ$ 。在系统装配过程中夹角 η 肯定会有误差,这个误差也要控制在允许的范围。计算了不同的误差引起的成像质量的改变,如表 3 所示。相应的变化曲线表示在图 6 中。

从图 6 看出,如果双反射镜的夹角的改变量控制在 20 s 之内,成像质量没有明显的变化,因此给出 20 s 的装配公差是可以的。

表 3 双镜夹角的偏离量对成像影响的数据表

Tab. 3 Effect of the angle error between the bimirrors on image quality

夹角偏离量 ($''$)	子午面				弧矢面			
	像距(mm)	像散(mm)	倍率	弥散 D_t (μm)	像距(mm)	像散(mm)	倍率	弥散 D_s (μm)
-60	1895.0	108.29	7.916	19.903	1844.8	58.165	6.232	17.138
-40	1857.7	70.996	7.919	19.180	1825.1	38.480	6.232	16.727
-20	1821.6	34.913	7.922	18.765	1805.8	19.101	6.232	16.494
-10	1804.0	17.306	7.923	18.564	1796.2	9.523	6.232	16.489
0	1786.7	0.0198	7.925	18.447	1786.7	0.0198	6.232	16.352
10	1769.7	17.072	7.927	18.437	1777.3	9.411	6.232	16.345
20	1752.9	33.857	7.928	18.494	1768.0	18.770	6.232	16.433
40	1720.1	66.651	7.931	18.844	1749.5	37.274	6.232	16.542
60	1688.3	98.448	7.935	20.426	1731.3	55.500	6.232	16.954

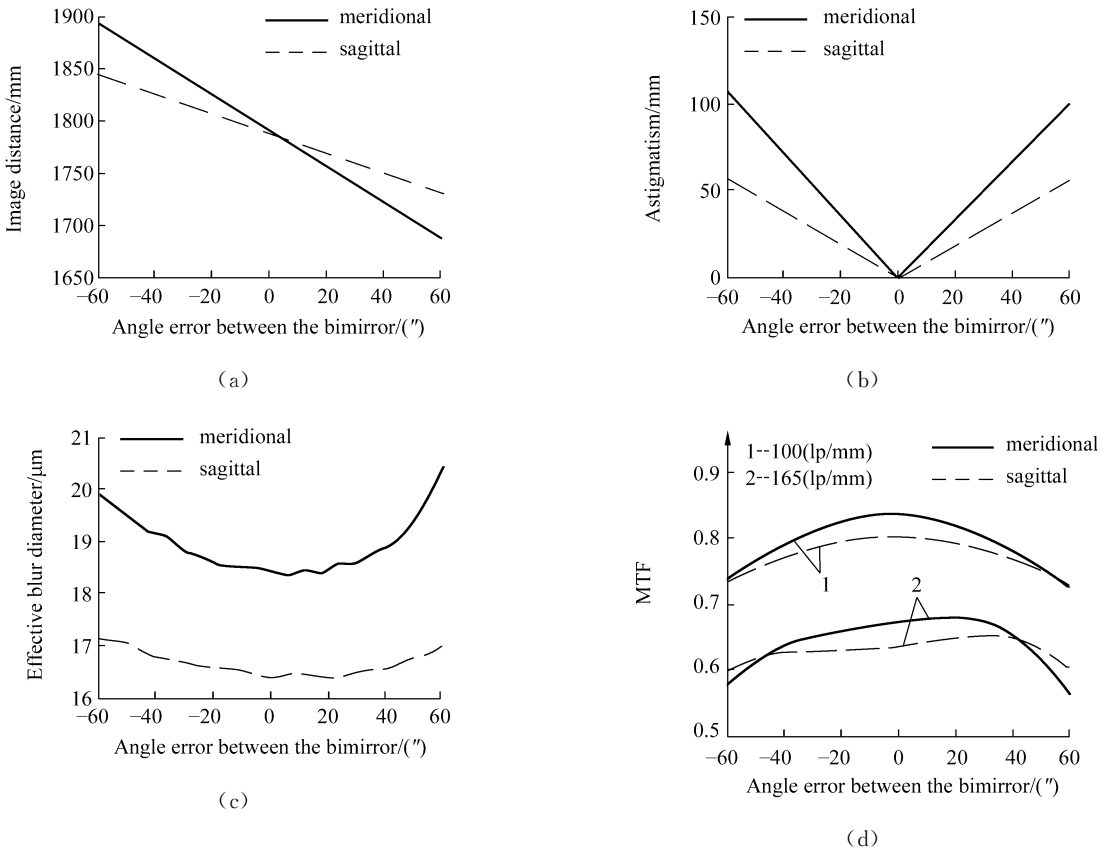


图 6 双反射镜夹角的变化对成像质量的影响

Fig. 6 Effect of angle error between bimirrors on image quality

2.5 掠入射角误差对成像的影响

在掠入射反射成像中,掠入射角是一个重要的参量,掠入射角减小,将会提高反射率,但对表面粗糙度提出了更高的要求。本文设计的系统中第一组双反射镜的掠入射角 $\theta_1 = 1.6^\circ$,第二组双镜的掠入射角 $\theta_3 = 1.9^\circ$ 。在子午面内系统的物像关系主要取决于第一组双镜,所以掠入射角 θ_1 的

误差主要影响子午面的成像质量;同理,掠入射角 θ_3 的误差将影响弧矢面的成像质量。

掠入射角的改变除了会影响反射率之外,还会引起高斯参数和像差的改变。本文根据这些变化给出合理的公差,表 4 列出了掠入射角的偏离量对成像的影响。

表 4 掠入射角的偏离量对成像的影响

Tab. 4 Effect of grazing angle error on the image quality

入射角偏离量 (°)	子午面				弧矢面			
	像距(mm)	像散(mm)	倍率	弥散 D_t (μm)	像距(mm)	像散(mm)	倍率	弥散 D_s (μm)
-80	1844.2	57.505	7.943	20.375	1813.4	26.663	6.245	17.660
-50	1824.5	37.729	7.936	19.680	1804.6	17.874	6.239	17.189
-30	1810.0	23.319	7.931	19.124	1797.9	11.204	6.236	16.895
-10	1794.7	7.982	7.927	18.637	1790.6	3.903	6.233	16.558
0	1786.7	0.0198	7.925	18.447	1786.7	0.0198	6.232	16.352
10	1778.5	8.236	7.923	18.288	1782.7	4.016	6.230	16.282
30	1761.4	25.288	7.919	17.915	1774.2	12.536	6.227	15.975
50	1743.6	43.125	7.916	17.631	1765.1	21.642	6.224	15.777
80	1715.5	71.244	7.911	17.533	1750.4	36.360	6.219	15.512

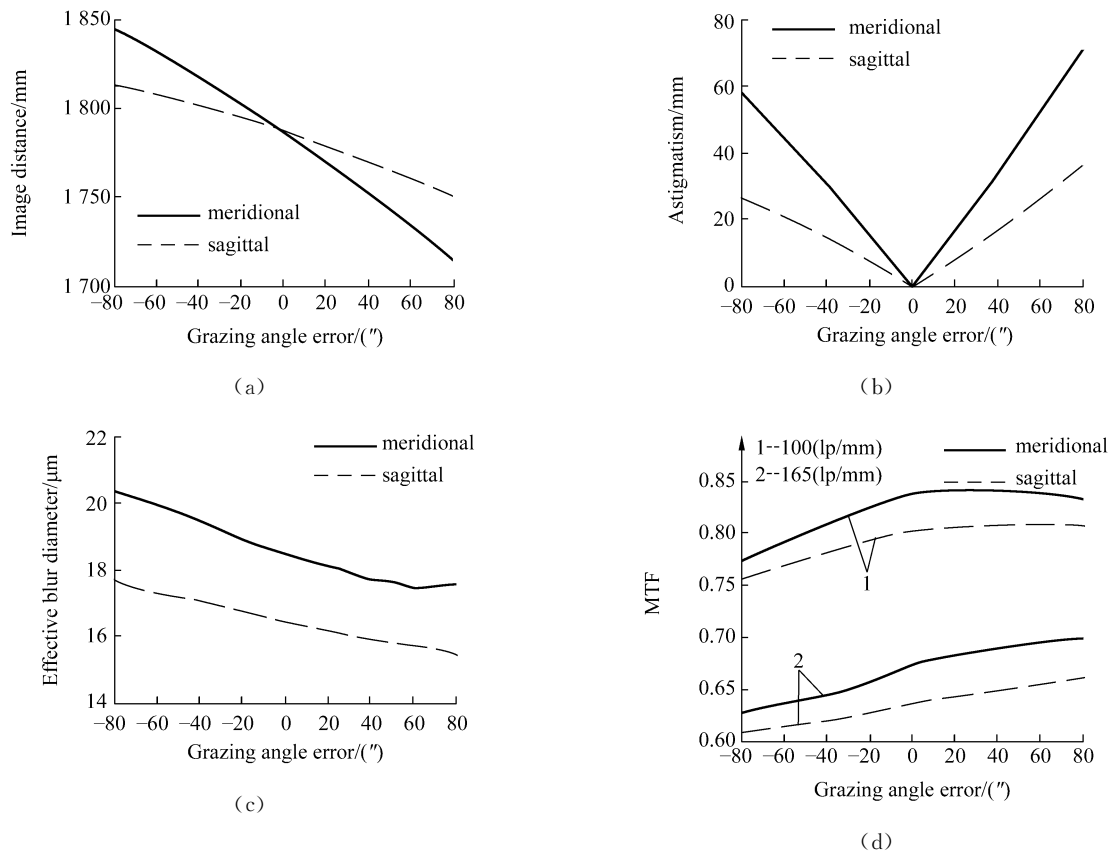


图 7 掠入射角的偏离量与成像的关系

Fig. 7 Effect of grazing angle error on the image quality

由表 4 中的数据和图 7 的曲线可以看出,掠入射角的变化对成像质量的影响还是很大的,其误差应该控制在 10 s 左右,最大不应超过 20 s。

经过上面的分析,制定了合理的加工和装调公差,在这些公差的指导下,研制成功了一套高精度的非共轴掠入射 X 射线显微镜,如图 8 所示。在工程物理研究院星光 3 装置上进行的惯性约束

聚变(ICF)的诊断实验中,获得了高分辨率的图像,如图 9 所示。实验中所用的靶标是周期为 20 μm ,开口为 20 μm ,线宽为 6 μm 的镍网格(没镀金膜)。

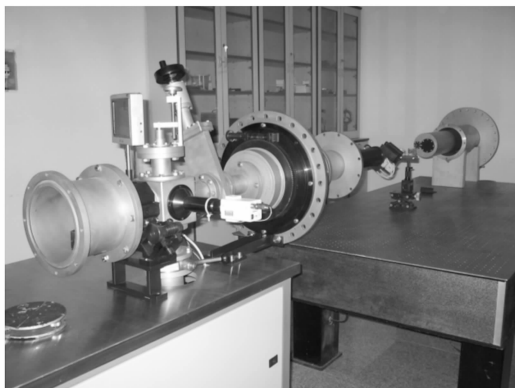


图 8 X 射线显微镜的外观照片

Fig. 8 Photo of X-ray microscope

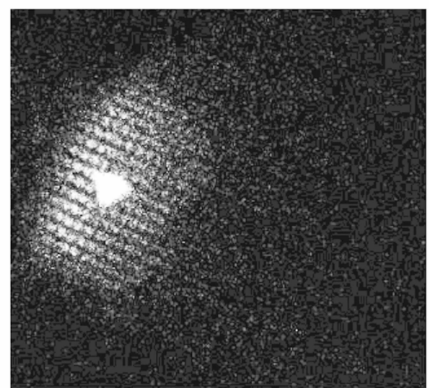


图 9 X 射线显微镜所获得的靶标像

Fig. 9 Image of the grid target obtained by the X-ray microscope up to here

3 结 论

通过大量的光线追迹计算,对所设计的显微镜的结构参数和初始参数的变化可能引起的像面参数和像差的改变进行了分析和计算。在不影响整体质量的前提下,合理的制定出该系统的加工和装配公差,其结果不但保证了成像质量,而且还有效地降低了研制该系统的成本。掠入射 X 射线显微镜是一种高精度的成像设备,对加工和装

调要求非常高,如果不制定出合理的加工公差,就有可能超出目前的加工水平,更不用说加大成本了。因此,在保证成像质量的前提下,制定合理的公差是非常必要的。在上述分析计算的基础上,得到的主要公差是:曲率半径的加工公差为 100 mm,离焦量的公差为 100 μm ,双反射镜的夹角误差小于 20",掠入射角误差不大于 10°,物距误差为 ± 1 mm 等。在这些公差的指导下,研制出了一套高精度的掠入射 X 射线显微镜,并在 ICF 的诊断实验中获得了高质量的 X 射线图像。

参考文献:

- [1] WOLTER H. Mirror systems with glancing incidence as image-producing optics for X-rays[J]. *Ann. Phys.*, 1952, 10:94-114.
- [2] KIRKPATRICK P, BAEZ A V. Formation of optical images by X rays[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, 38:776-774.
- [3] 王占山. 膜厚控制误差对软 X 射线多层膜性能影响的分析[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(2):136-138.
WANG ZH SH. Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2):136-148. (in Chinese)
- [4] 张众, 王占山, 吴文娟, 等. X 射线超反射镜设计[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(1):49-54.
ZHANG ZH, WANG ZH SH, WU W J, *et al.* Research on multilayer films used in synchrotron radiation monochromator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1):49-54. (in Chinese)
- [5] 胡家升, 赵玲玲, 李祥. 非共轴掠入射 X 射线显微镜的设计与分析[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(5):534-537.
HU J SH, ZHAO L L, LI X. Design and analysis of X-ray microscope of four mirrors working at grazing incidence [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, 16(5):534-537. (in Chinese)
- [6] HU J SH, ZHAO L L, LI X, *et al.* Imaging quality analysis of KBA X-ray microscope working at grazing incidence [J] *SPIE*, 2004, 5638:956-960.
- [7] HU J SH, WU X. Manufacturing and testing of X-ray imaging components with high precision[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(5):620-625.
- [8] SAUNEUF R, DALMASSO J M, JALINAUD T, *et al.* Large-field high-resolution X-ray microscope for studying laser plasmas[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, 68(9):3412-3420.
- [9] 胡家升, 宋利民. 软 X 射线多层膜设计中表面粗糙度对反射率的影响[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(4):380-385.
HU J SH, SONG L M. Roughness effects on the reflectance in the design of a soft X-ray multi-layer mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4):380-385. (in Chinese)
- [10] 胡家升. 光学工程导论(第二版)[M]. 大连理工大学出版社, 2005:829-864.
HU J SH. *Introduction to optical engineering (the second edition)*[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005:829-864. (in Chinese)

作者简介: 赵玲玲(1977—), 女, 山东龙口人, 在读博士, 主要从事 X 射线成像和图像处理技术的研究。

胡家升(1941—), 男, 辽宁昌图人, 大连理工大学教授, 博士生导师。主要从事现代成像技术, 图像处理, 模式识别, X 射线光学, 光学系统设计等方面的研究。发表论文逾百篇。* E-mail: jshu@dlut.edu.cn