

文章编号 1004-924X(2013)07-1741-07

超高真空精密四刀狭缝的结构原理及有限元分析

高飒飒^{1,2}, 卢启鹏^{*·1}, 彭忠琦¹, 龚学鹏¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对上海光源 X 射线干涉光刻(XIL)光束线对狭缝精度的要求,提出了一种应用于超高真空的精密四刀狭缝机构及热缓释方案。给出了四刀狭缝机构的工作原理,其四个缝片独立运动,采用线性驱动装置及精密直线导轨来实现开合。根据 XIL 光束线的特点,设计了一种合理有效的热缓释方案,对缝片进行了热-结构耦合分析。对狭缝的精度指标进行了测试。结果显示:该四刀狭缝的分辨率优于 $0.1\ \mu\text{m}$ 、运动重复精度优于 $2\ \mu\text{m}$ 、刀口直线度优于 $2.5\ \mu\text{m}$ 、平行度优于 $0.5\ \text{mrad}$,可以精确实现狭缝在水平和垂直方向 $-5\sim 250\ \mu\text{m}$ 的开度,缝片在热负载下的最大热变形控制在 $0.034\ \mu\text{m}$ 。得到的结果表明,该精密四刀狭缝具有高的精度和稳定性,可满足 XIL 光束线的使用要求,现已实际使用并制备出了 $100\ \text{nm}$ 周期的刻蚀线结构。

关键词:X 射线干涉光刻光束线;精密狭缝;四刀结构;重复精度;有限元分析

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1741

Principle and finite element analysis on UHV four-knife precision slit structure

GAO Sa-sa^{1,2}, LU Qi-peng^{1*}, PENG Zhong-qi¹, GONG Xue-peng¹

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
- * Corresponding author, E-mail: luqp@ciomp.ac.cn*

Abstract: To meet the requirements of X-ray Interferometric Lithography (XIL) beamline of Shanghai Synchrotron Radiation Facility for slit precision, an Ultra High Vacuum(UHV) four-knife precision slit structure and a cooling scheme were proposed. First, the structural principle of the four-knife precision slit structure was analyzed. The movements of the slits were controlled by linear drive devices independently, and their enclosures were achieved through the precision linear guides. Then, a cooling scheme was designed according to the characteristics of XIL beamline and the thermo-mechanical coupling was analyzed to verify whether the cooling scheme was reasonable. Furthermore, the precision indexes of slits were tested. The results indicate that the movement resolution and repeatability of the slit knife are better than $0.1\ \mu\text{m}$ and $2\ \mu\text{m}$, respectively, the straightness and parallelism of the knife

收稿日期:2013-02-07;修订日期:2013-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11079035);应用光学国家重点实验室开放基金资助项目(Y2Q03FQK02),国家科技重大专项资助项目(No. 2012ZX02702001)

are better than $2.5\ \mu\text{m}$ and $0.5\ \text{mrad}$, respectively. It can also realize the opening of slits by only $-5\sim 250\ \mu\text{m}$ in both horizontal and vertical directions. Moreover, the maximum thermal deformation under the thermal load is controlled under $0.034\ \mu\text{m}$. These results verify that the four-knife precision slit structure has a very high accuracy and stability, and meets the requirement of XIL beamline. By proposed slit structure and scheme, the etching line structure of $100\ \text{nm}$ periodicity has been achieved.

Key words: X-ray Interferometric Lithography(XIL) beamline; precision slit; four-slit structure; repeatability precision; finite element analysis

1 引言

上海光源(SSRF)是一台高性能的第三代同步辐射装置,以波荡器和扭摆器插入装置为特征,是我国迄今为止最大的科学装置^[1-3],被广泛应用于基础研究和应用研究领域^[4-5]。同步辐射装置主要由储存环、光束线和实验站构成。光束线中需使用大量的精密狭缝,以限定光束张角、阻挡杂散光、提高能量分辨率^[6]。第三代同步辐射光源的高通量和良好的相干性为发展高分辨和高产出的 X 射线干涉光刻技术提供了物质基础。X 射线干涉光刻(XIL)分支线站是新研制的一条性能优良的光束线。它是利用现有的高亮度相干 X 射线,从软 X 射线扫描显微光束线波荡器中引出一条分支光束线,构建成的 X 射线干涉光刻光束线站。在其入口距光源点 $26\ \text{m}$ 处采用一个四刀狭缝来定义分支光束线的水平和垂直接收角,保证光束的空间相干性和光束质量,并且可根据需要调整开口的大小。

通常情况下,狭缝宽度调节的传动形式有螺旋、杠杆、楔形框、斜块导轨和柔性铰链式等,目前许多光谱仪都采用斜楔式狭缝机构^[7]。上海光源 XIL 光束线站对狭缝精度要求非常高,在 $-5\sim 250\ \mu\text{m}$ 连续可调,重复精度为 $2\ \mu\text{m}$ 。本文采用一种精密四刀狭缝结构,4 个缝片独立运动,分别由 4 个线性驱动装置控制,配合精密直线导轨来实现缝片的开合,采用数字电路与软件实现其智能化,同时备有手动工作模式,具有非常高的精度和稳定性。

作为光束线中的重要部件,狭缝的主要作用是限制光束口径、提高能量分辨率、保护下游光学元件等。本文所设计的精密四刀狭缝的作用是定义二次光源,保证光束的空间相干性及光束质量,满足实验站的使用要求。对于超高真空的狭缝来说,需解决高精度、高稳定性、高热负载以及刀

口的热变形等几个关键技术^[8]。

狭缝本身的性能包括刀口的直线度、平行度和刀口运动的重复精度^[9-10]。为了保证上述性能在超高真空环境中顺利实现,要求结构设计尽量简单,以保证良好的真空性能;同时为避免由同步辐射光引起的刀口热变形对狭缝性能的影响,需根据实际使用情况,采取合理的冷却措施。本文着重介绍该狭缝的结构原理、热载下的有限元分析及性能测试。

2 精密狭缝的结构原理及有限元分析

为了满足光学系统的分辨率和通量要求,狭缝的可在 $-5\sim 250\ \mu\text{m}$ 开启,能在 $666.5\times 10^{-10}\ \text{Pa}$ 真空度下灵活运动。本文提出了一种用于超高真空的精密四刀狭缝,采用 4 刀结构,4 个缝片分别由 4 个线性驱动装置控制,具有非常高的精度和稳定性。

2.1 狭缝的结构原理

在设计缝片时,须考虑刀口边缘对光斑的吸收,这决定所得光斑边缘的模糊程度^[11],通过计算可以得到缝片的设计参数。缝片的外形尺寸约为 $20\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}$,刀口的尺寸为 $8\ \text{mm}$,其结构如图 1 所示。

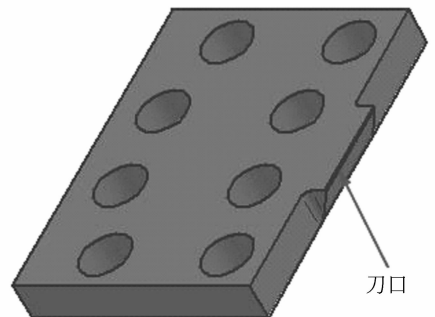


图 1 缝片的结构

Fig. 1 Diagram of precision slit blade

由于缝片具有热负载的要求,其材料必须具有低的热胀系数和高的热导率^[12]。本文设计的缝片采用钨合金(HD18),以钨为基体,导热系数大,热膨胀系数小,对射线的吸收能力强,易切削加工。在高热负载下,HD18 的温度将会升高,当温度升高到 400 °C 时,其屈服强度由 580 MPa 降低到 380 MPa。因此设计分析时需对其各项性能参数进行考虑,在高热负载下尽可能降低其温度,减小热变形及支撑固定部位的应力集中。HD18 的各项参数如表 1 所示。

表 1 缝片材料(HD18)参数

Tab.1 Properties of HD18 considered for slit blade

材料参数	室温	400 °C
传导率 $K/(W \cdot cm^{-1} \cdot K)$	1.65	1.35
弹性模量 E/MPa	3.65×10^5	3.1×10^5
热胀系数 $\alpha/(1 \cdot ^\circ C^{-1})$	4.5×10^{-6}	4.6×10^{-6}
泊松比 ν	0.28	0.28
屈服强度 σ_y/MPa	580	380
极限强度 σ_u/MPa	1 500+	1 500+

四刀狭缝要求对应的缝片刀口相互平行,并和相邻的狭缝正交,垂直狭缝(缝片刀口水平排列)位于上游。每个缝片的运动由单一的线性驱动装置进行控制,在驱动装置的端部装有限位开关,可以非常准确地控制位置精度。在垂直和水平方向上,狭缝可在 $-5 \sim 250 \mu m$ 调节。每对缝片相对中心点对称移动,狭缝可以达到一个完全闭合的状态。四刀狭缝的缝片空间位置分布如图 2 所示。

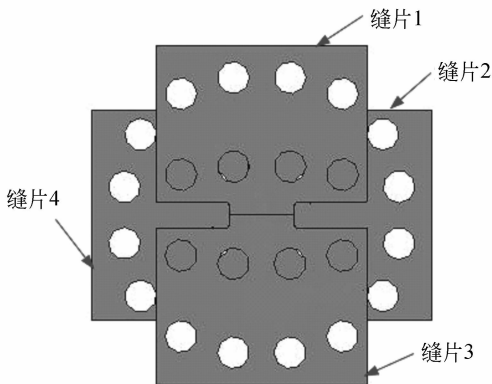


图 2 精密四刀狭缝的缝片位置分布

Fig.2 Spacial displacement of precision slit

为实现上述的运动性能,设计的等效原理图如图 3 所示,垂直狭缝的上、下缝片分别固定在刚体 AB、CD 上,当竖直方向的线性驱动装置的驱动位移为 y 时,它们分别会有向下、向上的垂直位移。当驱动位移逐渐减小时,在弹簧回复力的作用下,狭缝开口实现反方向的运动。水平方向的设计类似。根据此原理,设计的狭缝的结构如图 4 所示,狭缝的上、下缝片分别固定在两个上轨座上,通过精密线性导轨与下轨座配合,上轨座与下轨座之间还有弹簧连接,线性驱动装置推动上轨座带动缝片运动,配合弹簧回复力的作用,实现刀口的开合。

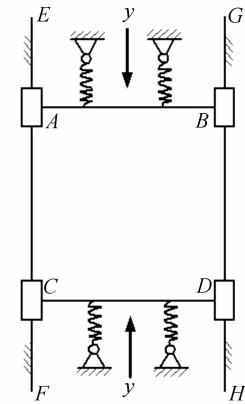


图 3 狭缝结构的等效原理图

Fig.3 Diagram of equivalent principal of precision slit

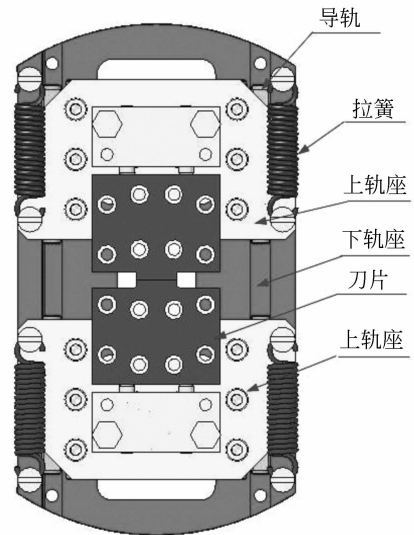


图 4 垂直方向的狭缝结构图

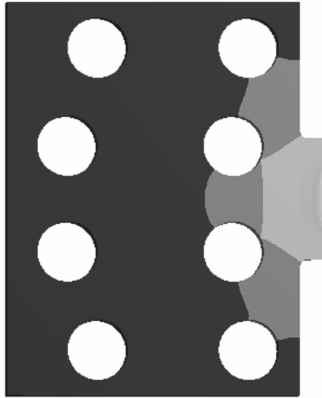
Fig.4 Diagram of vertical precision slit

2.2 狭缝的有限元分析

在光束线中,很多元件都会受到同步辐射热载的影响。对于狭缝来讲,其刀口的热变形影响到了光束的空间性质,因此需对其在热载下的温升情况及刀口的热变形进行分析。第三代同步辐射光束线使用的精密狭缝一般都需要水冷,考虑到主线上已有一个狭缝定义了整个光束线的接收角,并吸收掉一部分不必要的热负载。因此定义二次光源的精密狭缝系统的主要功能是保证光束的空间相干性及光束质量,满足实验站的使用要求。但该精密狭缝仍具有热负载的要求,需采取一定的冷却措施。

B: Radiation $r=0.3$ (ANSYS)
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1
2012-05-16 16:49

119 Max
118.77
118.55
118.33
118.1
117.88
117.66
117.43
117.21
116.99 Min

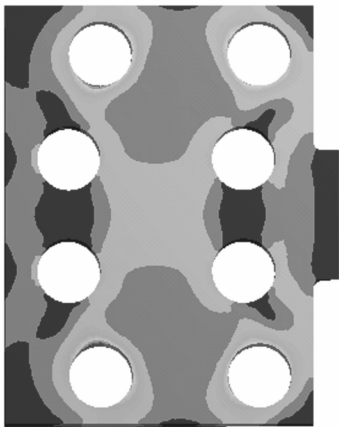


(a)刀片的温度分布

(a)Temperature contour of the slit blade

C: Static Structural(ANSYS)
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2012-05-17 10:42

758.03 Max
673.83
589.62
505.42
421.22
337.02
252.82
168.62
84.415
0.21371 Min



(b)刀片的应力分布

(b)Stress contour of slit blade

图 5 狭缝完全关闭时温度和应力分布图

Fig. 5 Thermo-mechanical analysis when aperture is zero

运用有限元分析软件 ANSYS 对缝片在热负载情况下进行热-结构耦合分析。在没有冷却的条件下,4 刀狭缝完全关闭时(此时温度及应力最大),缝片的温度和应力分布如图 5 所示。在同步辐射光照射的情况下,缝片的最大温度为 119 °C,最大热应力约为 753 MPa,超出了 HD18 材料的热疲劳承受范围,应力主要集中在螺钉孔定位处。利用 ANSYS 软件后处理功能得到刀口边缘的热变形分布,如图 6 所示,其最大变形为 5.77 μm ,最小变形为 5.37 μm ,超出了 XIL 对狭缝的精度要求。

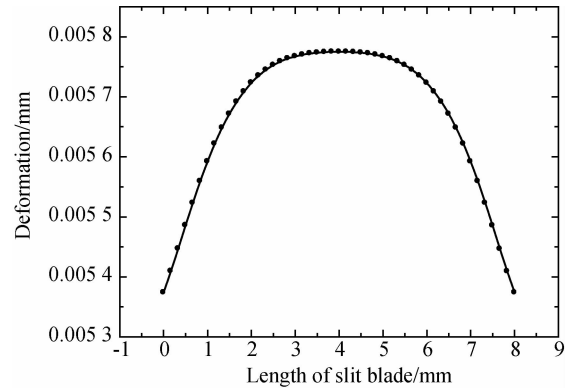
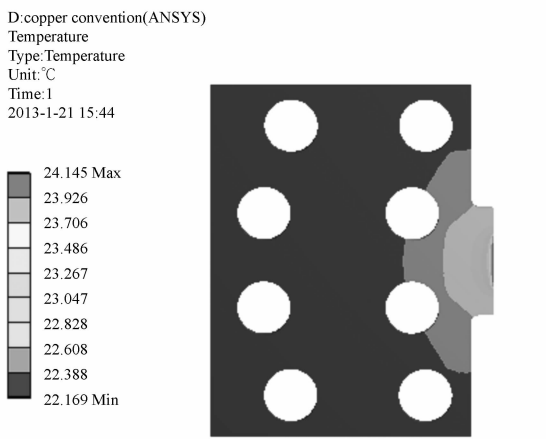


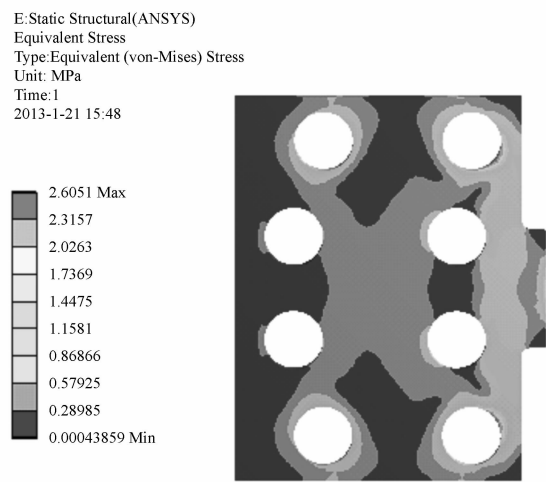
图 6 刀口的热变形

Fig. 6 Thermal deformation of slit blade edge

由于在热负载下刀口的变形较大,对光斑的空间性质产生影响,因此需要采取适当的冷却方案,采用铜辫子进行冷却,材料为紫铜。将其沿缝片上的螺钉孔固定,然后连接到容纳整个狭缝结构的真空腔体上,下面对其冷却效果进行分析。紫铜和 HD18 的接触热阻为 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$,对流系数为 $0.01 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{°C}$ 。用热传导换热模式进行冷却,缝片通过热传导把吸收的 X 射线所转化的热量经由铜辫子传递给外部腔体得以冷却。用有限元方法对其进行热-结构耦合分析,得到缝片的温度和应力分布如图 7 所示。缝片的最大温度为 24.1 °C,和图 5 相比,得到大幅度的下降;最大热应力约为 2.6 MPa,在 HD18 材料的热疲劳承受范围,应力集中现象得以明显的削减。刀口边缘处的热变形和斜率误差如图 8 所示,其最大值为 0.034 μm ,最小值为 0.028 μm 。和没有采取冷却方案的图 6 相比,刀口的变形量降低了两个数量级。此时的斜率误差最大值为 3.07 μrad 。该冷却方案合理有效,满足了 XIL 光束线的使用要求。



(a)缝片的温度分布
(a)Temperature contour of slit blade



(b)缝片的应力分布
(b)Stress contour of slit blade

图 7 加铜辫子后狭缝完全关闭时的温度和应力分布图
Fig. 7 Thermo-mechanical analysis when aperture is zero with copper plait

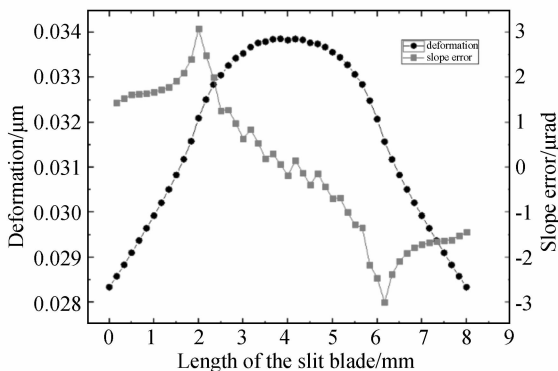


图 8 刀口边缘的热变形和斜率误差

Fig. 8 Thermal deformation and slope error of slit blade edge

3 狭缝的性能测试

根据狭缝的结构及运动原理,设计的精密 4 刀狭缝如图 9 所示,主要由垂直和水平方向的狭缝机构,容纳狭缝机构的真空容器,连接到各自缝片的铜辫子,线性驱动装置,限位开关等组成。垂直和水平方向的狭缝机构由 4 个缝片成十字分布,在束线方向错开分布,上、下两缝片控制垂直方向的接收角,左、右两缝片控制水平方向的接收角。

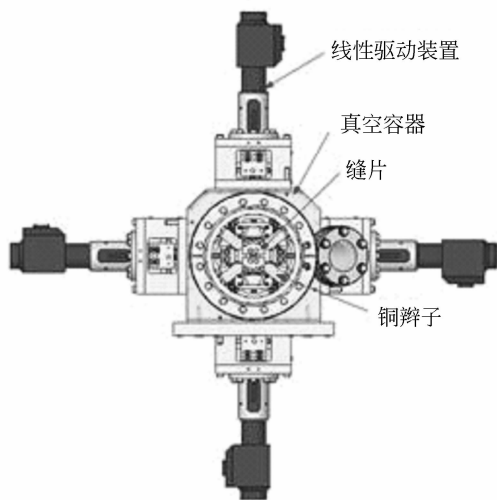


图 9 精密 4 刀狭缝总体结构

Fig. 9 Diagram of precision slit

表 2 狭缝刀口的直线度

Tab. 1 Straightness of slit blade edge (μm)

刀口名称	直线度				平均值
	1	2	3	4	
缝片 1	1	2	1	1	1.25
缝片 2	2	1	1	1	1.25
缝片 3	2	3	2	3	2.50
缝片 4	3	1	1	3	2.00

狭缝的性能包括缝片刀口的直线度、平行度和刀口运动的重复精度。采用影像法,利用三坐标测量仪,探头接触法进行测量。在每个刀口上分 4 段来测量其直线度,用其平均值表征刀口的直线度,其结果如表 2 所示,可以看出该四刀狭缝刀口的直线度优于 2.5 μm。在入光口和出光口

相对应的刀口上取两段来评价它们的平行度,重复测量 4 次,取平均值,得到的结果如表 3 所示,其刀口平行度优于 0.5 mrad。

表 3 相对缝片的平行度

Tab. 3 Parallelism of relative slit blade (μrad)

刀口名称	平行度				
	1	2	3	4	平均值
刀口 1& 刀口 3	0.63	0.63	0.25	0.25	0.44
刀口 2& 刀口 4	0.50	0.25	0.50	0.50	0.44

重复精度是测量狭缝运动高稳定性的一个非常重要的精度指标,受线性驱动装置系统特性、导轨间隙以及摩擦特性等的影响。精密线性驱动装置选用 PI(Piezo Nano Positioning)公司生产的 M-235.2DG,分辨率为 0.016 μm ,单向重复精度为 0.1 μm ,双向重复精度为 1 μm ,通过测试,狭缝的开口可以达到 300 μm ,运动分辨率为 0.019 μm 。以法兰中心为固定点,分别测量狭缝各刀口零点到法兰中心的距离 X_i ,重复测量 5 次,利用重复精度计算公式计算狭缝运动的重复性,得到的结果如表 4 所示,可以看出其重复精度优于 2 μm 。重复精度计算公式为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}. \quad (1)$$

参考文献:

- [1] 马礼敦. 同步辐射装置-上海光源及其应用 [J]. 理化检验(物理分册), 2009,45(11):717-723.
MA D L. Sanghai synchrotron radiation facility and its application [J]. *Physical testing and chemical analysis (Part A: Physical testing)*, 2009,45(11):717-723. (in Chinese)
- [2] 吕清涛,薛松,彭忠琦,等. 拉杆式压弯聚焦镜组件线性与接触非线性工程比较分析[J]. 光学精密工程, 2010, 8(18):1843-1846.
LV Q T, XUE S, PENG ZH Q, et al. Comparison on linear and contact nonlinear analysis methods of pull-rod bent focusing mirror assembly [J]. *Opt.*

表 4 狭缝刀口运动的重复精度

Tab. 1 Repeatability of slit blade edge (μm)

刀口名称	刀口到法兰中心的距离					重复性
	1	2	3	4	5	
缝片 1	-1.2	-1.2	1.8	-0.2	0.8	1.3
缝片 2	-0.2	0.8	-2.2	-0.2	1.8	1.5
缝片 3	0.4	-0.6	0.4	-0.6	0.4	0.6
缝片 4	-0.2	1.8	-0.2	-0.2	-1.2	1.1

从以上测试结果可以看出,有关设计满足了同步辐射 XIL 光束线所要求的狭缝精度。

4 结 论

针对 X 射线干涉光刻光束线的要求,提出了一种应用于超高真空的精密四刀狭缝,详细阐述了其缝片的结构设计及原理,运用有限元方法对缝片在热载下的变形进行了热-力耦合分析,最后,对其性能进行了测试。结果表明,该四刀狭缝的运动分辨率优于 0.1 μm 、运动重复精度优于 2 μm 、缝片刀口直线度优于 2.5 μm 、平行度优于 0.5 mrad,在热负载下刀口的最大热变形控制在 0.034 μm 。目前,该精密四刀狭缝已完成线站安装调试并成功投入使用,制备出 100 nm 周期的刻蚀线结构。XIL 光束线关键设备的成功研制,将推进我国纳米科技的发展,为我国纳米器件制备、纳米加工方面的研究提供了技术支持。

Precision Eng., 2010,8(18):1843-1846. (in Chinese)

- [3] 卢启鹏,高飒飒,彭忠琦. 同步辐射水平偏转压弯镜面形误差分析与补偿[J]. 光学精密工程, 2011, 11(19):2644-2650.
LU Q P, GAO S S, PENG ZH Q. Slope error analysis and compensation for synchrotron radiation horizontal deflexed mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,11(19):2644-2650. (in Chinese)
- [4] ANDREAS K F. Third-generation synchrotron radiation X-ray optics[J]. *Facility. Stru.*, 1996, 4(2):121-125.
- [5] 卢启鹏,马磊,彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器波长扫描机构转角精度的检测方法研究[J]. 光学精

密工程, 2010,7(18):1548-4553.

LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of VAPGM wavelength scanning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,7(18):1548-1553. (in Chinese)

[6] 徐朝银. 同步辐射光学与工程(第三版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006,1-4, 105-111.

XU CH Y. *Synchrotron Radiation Optics and Engineering(The 3rd edition)*[M]. Hefei: Publishing House of University of Science and Technology of China, 2006.1 - 4, 105 - 111. (in Chinese)

[7] 赵高峰, 薛松. 新型柔性铰链式精密狭缝的结构原理及有限元分析[J]. 机械设计, 2009,11(26):21-23.

ZHAO G F, XUE S. Structural principle and finite element analysis on new flexible hinged precision slit [J]. *Journal of Machine Design*, 2009,11(26):21-23. (in Chinese)

[8] SHU D, BRITE C, NIAN T, *et al.*. Precision white beam slit design for high power density x-ray undulator beamlines at the Advanced Photon Source [J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1995,66(2): 1789-1791.

[9] 王秋平, 陈镛, 余小江, 等. 新型精密狭缝的设计[J]. 航空精密制造技术, 2001,4(37),6-8.

WANG Q P, CH Q, YU X J, *et al.*. A design of elastic-hinge-based precision slit mechanism [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2001,4(37),6-8. (in Chinese)

[10] 程琳, 宋丽, 马春桃. 显微成像测量精密狭缝的重复精度[J]. 核技术, 2010,7(33):481-485.

CHENG L, SONG L, MA CH T. High precision measurement of the micro-imaging system to check repeatability of precision optical slits in SSRF beamlines [J]. *Nuclear Techniques*, 2010,7(33): 481-485. (in Chinese)

[11] 朱毅, 夏绍建, 王纳秀, 等. 上海光源插入件光束线白光狭缝设计[J]. 核技术, 2007, 6(30):481-485.

ZHU Y, XIA SH J, WANG N X, *et al.*. The design of white beam slits for inset device beamlines of SSRF [J]. *Nuclear Techniques*, 2007,6(30): 481-485. (in Chinese)

[12] THOMAS N H L, KUZAY T M, SHU D, *et al.*. Thermo-mechanical analysis of the white beam slits for an undulator beamline at the advanced photon source [J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1995,66(2): 1735-1737.

作者简介:



高飒飒(1986—),女,河南洛阳人,博士研究生,2009年于河南科技大学获得学士学位。主要从事同步辐射关键技术方面的研究。E-mail: gaosa8608@163.com



龚学鹏(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,助理研究员,2010年于吉林大学获得博士学位,主要从事连续多点成形设备设计、精密机械设计与工程CAE分析。E-mail: gongxuepeng120@yahoo.com.cn



彭忠琦(1957—),男,吉林榆树人,高级工程师,1984年于吉林工学院获得学士学位,主要从事精密机械设计方面的研究。E-mail: pengzhongqi@126.com



卢启鹏(1964—),男,黑龙江齐齐哈尔人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位。主要从事光谱仪器及同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: luqp@ciomp.ac.cn