

文章编号 1004-924X(2011)11-2644-07

同步辐射水平偏转压弯镜面形误差分析与补偿

卢启鹏^{1*}, 高飒飒^{1,2}, 彭忠琦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 研究生院, 北京 100039)

摘要:为提高同步辐射压弯镜面形精度,降低水平偏转压弯机构及镜子自重对压弯镜面形的影响,分析了影响压弯镜面形精度的因素,并提出了一种有效的重力平衡补偿方法。在研究水平偏转压弯机构压弯机理的基础上,对压弯镜面形进行误差分析;针对光束线中使用的压弯聚焦镜,利用有限元方法分析了影响面形精度的主要因素;最后,根据水平偏转压弯机构特点及误差分析结果,提出了重力平衡补偿方法。研究显示,镜子自重和冷却装置的重力对压弯镜面形的影响主要表现为柱面镜母线的弯曲,驱动杆重力对压弯镜面形的影响主要体现在子午斜率误差上。利用重力平衡方法对压弯镜面形误差进行补偿,结果显示,柱面镜母线产生的斜率误差均方根值由 13.14 μrad 减小到 0.15 μrad , 镜面在子午方向的斜率误差均方根值由 8.21 μrad 减小到 0.86 μrad 。由此表明,压弯镜面形误差分析及补偿方法行之有效,显著提高了水平偏转压弯镜的面形精度。

关键词:同步辐射;压弯机构;水平偏转;面形误差;补偿

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2644

Analysis and compensation of slope error for synchrotron radiation horizontal deflected mirror

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

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: luqp@ciomp.ac.cn*

Abstract: To improve the precision of a bending mirror and to reduce the influence of a horizontal deflected bender and the mirror weight on the bending mirror, the factors that caused the slope errors were studied and a gravity compensation scheme for the horizontal deflected bender was presented. Firstly, the slope errors were studied on the basis of bending theory. Aiming at the bending focusing mirror used in the beamline, the main factors that affected its precision were analyzed by finite element method. Then, according to the characteristics of the horizontal deflected bender and the results of slope error analysis, a scheme was carried out to compensate the slope errors. The results indicate

收稿日期:2010-12-31;修订日期:2011-02-15.

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(No. O9Q33FQ091)

that the gravity of the mirror and a cooling device mainly had influence on the cylinder mirror generatrix, while the gravity of the driven-rod mainly affected the tangential slope error. After compensation, the slope error rms of cylinder mirror generatrix is reduced from 13.14 μrad to 0.15 μrad and the tangential slope error rms is reduced from 8.21 μrad to 0.86 μrad . It verifies that the slope error analysis and gravity compensation scheme proposed is effective, which improves the precision of the bending mirror greatly.

Key words: synchrotron radiation; bending mechanism; horizontal deflection; slope error; compensation

1 引言

同步辐射是由速度接近光速的带电粒子做曲线运动时沿轨道切线方向发出的电磁辐射,广泛应用于基础学科和应用研究领域^[1-2]。同步辐射装置是一种数百人可同时进行科学和技术实验的大科学平台,主要由光源、光束线和实验站构成。光束线根据实验站对光束的要求,对同步辐射光源产生的同步辐射光进行偏转、准直、分光和聚焦等处理,将同步光传输到实验站。光束线上需要各种面形复杂的光学元件,主要应用的反射表面形状有平面、柱面、环面、球面、抛物面和椭球面。根据光束线对光学元件的不同需求可采用不同的面形和加工方式。主要加工方式有两种:磨制和压弯。与磨制镜相比,压弯镜有半径可调,表面精度高和易于制造等优点^[3]。目前,压弯机构已经在同步辐射装置上得到广泛应用,压弯方式主要有三点压弯、四点滚轴压弯^[4]、双臂结构^[5]、单臂结构^[6]、无臂结构^[7]和柔性铰链^[8]等。常用的光束偏转方式有垂直偏转和水平偏转。同步辐射装置上常规使用的反射镜多是水平放置、光束垂直偏转。光源点在垂直方向尺寸上的远小于水平方向的尺寸,从保持光源的横向相干性和亮度的角度看,水平偏转反射镜更具优势。本文讨论的压弯镜采用了镜体垂直放置、光束水平偏转的工作方式,利用半径可调的四点滚轴压弯结构来实现光束线不同需求下所要求的各种曲率半径。与光束垂直偏转的压弯镜相比,水平偏转压弯镜的受力情况更为复杂,其面形误差来源有:镜子的加工误差、重力变形、压弯机构引起的误差、镜面受热负载后变形等。本文重点研究由重力变形和压弯机构引起的面形误差,在给定

镜子基底外形尺寸、材料和面形加工精度的条件下,构建从驱动系统、夹持机构到压弯光学元件的整体模型,应用有限元方法对影响面形精度的主要因素进行深入的分析。根据水平偏转压弯机构的结构特点及误差来源,提出了一种简洁有效的重力平衡补偿方法,并对压弯装置进行优化,获得了较为满意的结果。

2 压弯理论及水平偏转压弯机构原理

2.1 压弯理论

在第三代同步辐射光束线中,由于掠入射角非常小,致使成像镜面在光束线方向的长度很长,从而使得光学元件的长宽比很大,此种情形可以看作是梁的弯曲。根据材料力学中梁的挠曲线方程可知,对于长条形的平面镜来说,在镜子两端施加相等的力矩 M_0 ,可以压制成柱面镜,弯曲方程^[9]为:

$$M_0 = \frac{EI}{R}, \quad (1)$$

式中, E 是镜子的弹性模量; I 是镜子截面对中性轴的惯性矩; R 是镜子压弯后的曲率半径。若在镜子两端施加不对称力矩 M_1 和 M_2 ,可以压制出各种不同的面形和曲率半径。弯曲方程^[10]为:

$$\frac{EI}{\rho(x)} = M(x) = \frac{M_1 + M_2}{2} + \frac{M_2 - M_1}{L}x, \quad (2)$$

式中, $\rho(x)$ 表示镜子压弯后 x 点处的曲率半径。

环面镜具有两个相互垂直的聚焦半径,能同时实现子午方向和弧矢方向的聚焦。采用柱面镜做基底,在四点压弯机构作用下,可以使反射面形成类似轮胎内表面的环面。光束水平偏转时,由式(1)可知,对垂直放置的柱面镜两端施加相等的力矩,可以得到环面镜,如图 1 所示。

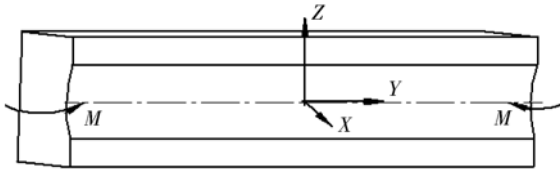


图 1 柱面镜压制环面镜示意图

Fig. 1 Diagram of bending cylinder mirror into toroidal mirror

本文以上海光源光束线中使用的环面聚焦镜为例进行研究,其参数及设计指标如表 1 所示。

表 1 环面聚焦镜参数及设计指标

Tab. 1 Parameters and design indexes of toroidal focusing mirror

聚焦镜尺寸 /mm	掠入射角 θ /mrad	物距 p /m	像距 q /m
1000×70×50	2.8	23	11.5
材料	半径误差范 围/m	子午斜率误 差/ μ rad	弧矢斜率误 差/ μ rad
单晶硅	±30	2.5	10

环面聚焦镜结构参数由光程函数导出^[11]：

弧矢聚焦半径：

$$R_s = 2 \sin \theta \frac{pq}{p+q} = 42.96 \text{ mm.} \quad (3)$$

子午聚焦半径：

$$R_m = \frac{2pq}{(p+q) \sin \theta} = 5\,473.4 \text{ m,} \quad (4)$$

其中弧矢聚焦半径 $R_s = 42.96 \text{ mm}$ 直接加工成形,子午聚焦半径 $R_m = 5\,473.4 \text{ m}$ 在四点压弯机构作用下弯曲成形。

2.2 水平偏转压弯机构的组成与原理

光束线中使用的水平偏转压弯机构如图 2 所示。镜子的底面有一对滚柱作线性支撑,左端滚柱为固定辊,由固定轴与基座连接,相当于固定铰链;右端为拖动辊,由拖动轴与基座连接,相当于活动铰链,这样可避免压弯过程中产生纵向力致使镜子压碎。2 个压辊与镜面线性接触,压弯时对镜面两端施加垂直于镜面的压力。压弯机构通过两端的基座水平安装在一平台上,基座两侧各有一个摇臂,摇臂一端固定在基座上,另一端连接压辊和动力轴。工作时驱动杆向外侧推动动力轴,将力传给摇臂,使摇臂绕转轴做微小的旋转,带动压辊转动,从而使镜子弯曲到所需的曲率半径。驱动杆中设

有测力传感器,可以直接读出驱动力的大小,通过调节驱动力的大小得到不同的弯曲半径。

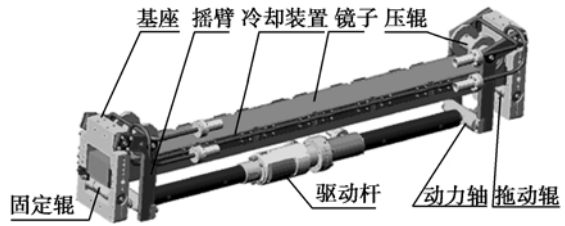


图 2 压弯机构简图

Fig. 2 Diagram of bent mechanism

3 压弯镜面形误差分析

面形误差是实际反射表面与理想平面之间的面形差异,在束线光学中通常用斜率误差 (slope error) 来度量,包括子午斜率误差和弧矢斜率误差。它的存在弥散了聚焦光斑,降低了成像质量^[12]。图 3 为面形误差对成像效果影响的示意图,光束 R_i 以掠入射角 θ_i 入射,在理想平面上发生反射以掠反射角 θ_r 出射形成光束 R_r ,在实际反射面上以掠反射角 θ_p 出射形成光束 R_p ,使聚焦光斑弥散程度加大。

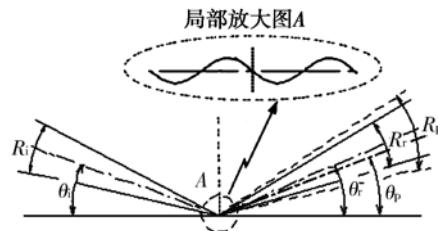


图 3 反射表面的面形误差对成像效果的影响

Fig. 3 Influence of slope error reflection surface on optical focus

此外,光束水平偏转时,用柱面镜压成环面镜,母线在重力作用下发生弯曲,也会对成像效果产生影响,用柱面镜母线弯曲斜率误差来度量,其对成像效果的影响如图 4 所示。理想情况下,由光源 A 发出的光束经环面镜聚焦后在 B 点成像,而柱面镜母线在重力作用下发生弯曲,使得到达环面镜的光线经反射后不再汇聚成点,而是形成一个像斑 B' 。可见,柱面镜母线的弯曲不仅影响到成像光斑的位置,还增大了聚焦光斑的弥散程度,降低了成像质量。

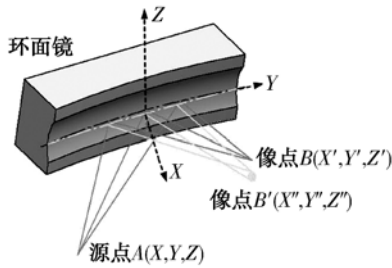


图 4 柱面镜母线弯曲对成像效果的影响
Fig. 4 Effect of bended generatrix on imaging

水平偏转压弯镜产生面形误差的主要因素有:压弯镜自重、冷却装置的重力以及驱动杆的重力。这里以表 1 中的环面聚焦镜为例,在几何建模的基础上应用有限元方法对这些影响面形精度的主要因素进行分析。

3.1 镜子自重和冷却装置的重力引起的面形误差

光束水平偏转时,垂直放置的柱面镜在重力作用下产生变形,会给镜面带来一定的面形误差。镜子自重对柱面镜的作用可视为均布载荷,简化模型如图 5 所示。

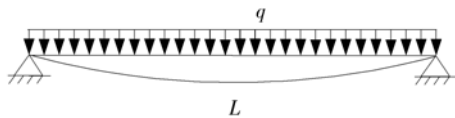


图 5 镜子在自重作用下的变形
Fig. 5 Deformation of mirror under self-gravity

根据弹性弯曲变形理论,柱面镜在自重作用下变化的方程为:

$$y(G) = -\frac{qx}{24EI}(L^3 - 2Lx^2 + x^3).$$

母线弯曲产生的斜率误差为:

$$\theta(G) = -\frac{q}{24EI}(L^3 - 6Lx^2 + 4x^3),$$

其中, E 为柱面镜的杨氏模量, I 为惯性矩, $q = G/L$ 为镜体单位长度的自重, L 为镜长。计算得到母线弯曲的最大斜率误差为 $13.85 \mu\text{rad}$ 。

建立柱面镜模型,采用有限元方法对其进行结构静力学分析,根据柱面镜的材料和工作状态,设定边界条件。在镜子自重作用下,子午和弧矢方向的斜率误差最大值分别为 $1.36 \times 10^{-3} \mu\text{rad}$ 和 $0.54 \mu\text{rad}$, 小于设计要求的 $2.5 \mu\text{rad}$ 和 $10 \mu\text{rad}$ 。柱面镜母线在自重作用下的斜率误差如图

6 中的 ΔG_1 曲线所示,最大值为 $13.7 \mu\text{rad}$, 与理论计算吻合,求得斜率误差均方根值(slope error rms)为 $9.6 \mu\text{rad}$ 。可见,镜子自重对压弯镜的影响主要表现为母线的弯曲。

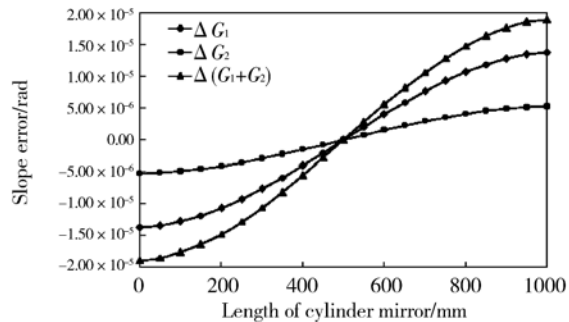


图 6 柱面镜母线的斜率误差
Fig. 6 Slope error of cylinder mirror generatrix

高功率的同步辐射光照射在压弯镜上,在其表面和内部产生较大的温度梯度,需要冷却装置进行冷却。本文讨论的水平偏转压弯机构采用如图 2 所示的边冷冷却装置,无氧铜块通过固定装置均匀安装在镜子两侧,其重力与镜子自重对镜面产生的影响类似,这里重点分析柱面镜母线的弯曲。当冷却装置的质量约为 3 kg 时,其对母线变形的影响如图 6 中的 ΔG_2 曲线所示,最大值为 $5.23 \mu\text{rad}$ 。当镜子自重与冷却装置重力的共同作用时,柱面镜母线沿 Z 向产生的斜率误差如图 6 中的 $\Delta(G_1 + G_2)$ 曲线所示,最大值为 $18.74 \mu\text{rad}$,求得均方根误差为 $13.14 \mu\text{rad}$,对成像光斑的位置和质量影响较大。

3.2 驱动杆的重力引起的面形误差

压弯机构水平放置时,其本身的重量对镜子施加垂直于光束线方向的扭矩。由于镜子的性能对受力变化非常敏感,相对于镜子所要求的极小面形误差和定位误差来说,需要精确分析其对面形的影响。根据压弯机构的结构特点,首先对整个机构进行必要的简化,建立从驱动系统、夹持机构到压弯光学元件的整体有限元模型,然后对其进行接触非线性分析。简化后的有限元网格模型如图 7 所示。

按照有限元法对几何模型的接触区域建立接触单元。根据压弯机构的工作状态施加相应的约束条件,对驱动杆施加 Z 向的重力进行求解。对结果进行采样,得到柱面镜的面形误差如图 8 所示,其中图 8(a)为子午方向的斜率误差,其最大值为

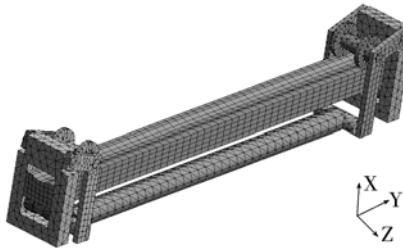
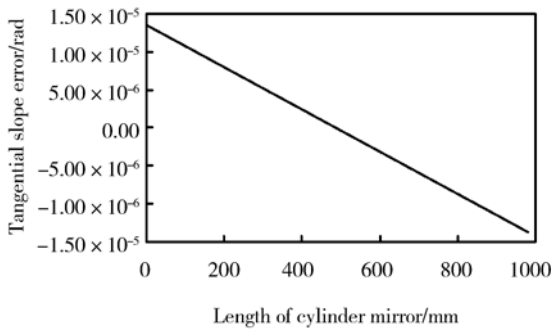
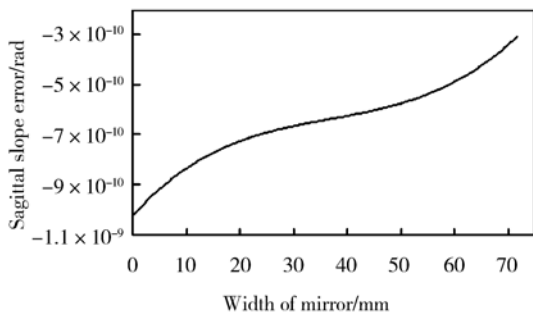


图 7 简化后的有限元网格模型
Fig. 7 Simplified finite element model

14.8 μrad ,求得均方根误差为 8.21 μrad 。图 8(b)为弧矢方向斜率误差,最大值为 $1.06 \times 10^{-3} \mu\text{rad}$ 。由此可见,驱动杆对压弯镜面形的影响主要体现在子午斜率误差上,该误差对聚焦光斑具有弥散作用,降低了光束线在实验样品上的束斑质量。



(a) 子午方向的斜率误差
(a) Tangential slope error



(b) 弧矢方向的斜率误差
(b) Sagittal slope error

图 8 驱动杆重力作用下的面形误差
Fig. 8 Slope errors caused by drive-rod gravity

4 面形误差补偿方法

通过以上分析,根据水平偏转压弯机构的结

构特点以及面形误差的来源,提出了针对镜子自重、冷却装置重力及压弯驱动杆重力的平衡补偿方法。在压弯机构上设计补偿装置,使压弯镜的理论面形误差和母线弯曲斜率误差降低 1~2 个数量级。

4.1 镜子自重和冷却装置的重力平衡补偿

光束水平偏转时,为降低柱面镜自重和冷却装置的重力(G')对母线的影响,在柱面镜底面对称位置安装力平衡器,对镜子施加一对载荷 P 进行平衡,载荷 P 距镜子端面的距离为 d ,其平衡原理如图 9 所示。镜子在 Z 向主要受到沿纵向均匀分布的重力载荷 $q = G'/L = 109.32 \text{ N/m}$ 的影响。

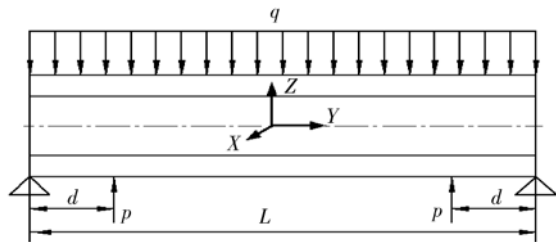


图 9 镜子沿 Z 向的受力分布
Fig. 9 Forces acting on mirror along Z direction

为了使平衡装置的补偿效果最佳,对力平衡器的位置 d 和平衡力 P 的大小进行了优化计算。假设 $\alpha = P/qL, \beta = (L - 2d)/L$,对于 $x \in [0, L]$,由重力和平衡力引起母线弯曲的斜率均方根误差为^[13]:

$$\theta_{\text{RMS}}(\alpha, \beta) = \sqrt{\frac{\int_0^L \theta^2(x) dx}{L}} \quad (5)$$

式中, $\theta(x)$ 为 G' 和平衡力 P 共同作用时产生的斜率误差。选取 θ_{RMS} 最小时的 d 和 P 为最佳值,用 MATLAB 编程进行计算,最终得出当 $\alpha = 0.389, \beta = 0.390$ 时, θ_{RMS} 最小,最小值为 $0.15 \mu\text{rad}$ 。此时, $P = \alpha qL = 42.53 \text{ N}$ 。因此,力平衡器安装在柱面镜底面距离两端 305 mm 处,平衡力为 42.53 N,柱面镜母线在 Z 向的斜率误差最小,此时的斜率误差分布如图 10 所示。与图 6 中的曲线 $\Delta(G_1 + G_2)$ 进行比较,经过平衡后,由 G' 引起母线产生的斜率误差显著降低了。图 11 给出了平衡装置的实体图,平衡装置的存在不影响镜子的压弯。使用过程中,在一定范围内调节平衡位置和平衡力的大小,可以使母线弯曲斜率误差最小。

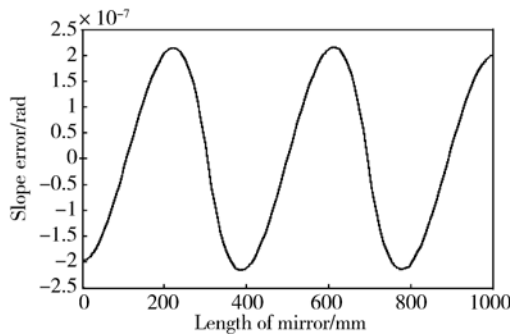


图 10 施加平衡后母线在 Z 向的斜率误差

Fig. 10 Slope error of generatrix caused by G' after compensation



图 11 力平衡器装置

Fig. 11 Device of counterbalance

4.2 驱动杆的重力平衡补偿

驱动杆的重力对镜面的影响主要体现在子午斜率误差上,通过平衡驱动杆的重力,可以减小驱动杆对镜子施加的弯矩,从而减小该误差。根据实际情况,考虑到工作过程中驱动杆的运动方式,采用导向轴承支撑平衡装置,对驱动杆施加一对平衡支撑力来进行平衡。其平衡原理和过程与镜子自重和冷却装置重力的平衡类似,根据简化模型的理论计算,轴承支撑安装在距离驱动杆两端 253.15 mm 处时产生的面形误差最小。但是由于驱动杆实际形状的限制,支撑安装在靠近中间的部位,如图 12 所示。压弯过程中,可以通过调节轴承支撑的位置,逐步减小因驱动杆重力产生的影响,使聚焦达到最佳效果。轴承支撑的最佳

位置位于距离驱动杆两端 310.35 mm 处,得到的子午斜率均方根误差为 $0.86 \mu\text{rad}$ 。

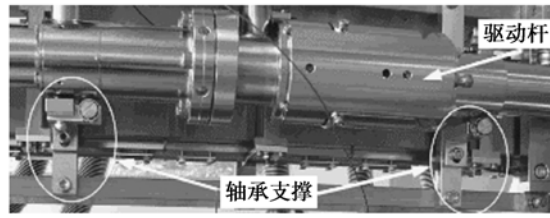


图 12 压弯机构的平衡装置

Fig. 12 Counterbalance device of bend mechanism

4.3 压弯结果

子午曲率半径为 5 473.4 m 时,驱动杆两端所需要施加的驱动力为 131.3 N。采用重力平衡补偿方法进行压弯,得到环面聚焦镜的子午曲率半径为 5 458.5 m,子午方向的斜率误差为 $0.86 \mu\text{rad}$,母线的弯曲斜率误差为 $0.15 \mu\text{rad}$ 。由此可见,采取的补偿方法有效地提高了压弯镜的面形精度。

5 结 论

水平偏转压弯机构压弯柱面镜时,面形误差的存在使光斑质量降低,弥散程度加大,母线弯曲变化不仅影响到光斑的位置还影响到光斑质量。本文深入分析了影响面形精度的因素,提出了一种简洁有效的重力平衡补偿方法,并对补偿效果进行优化,得到了较为满意的结果。柱面镜母线产生的斜率误差均方根值由 $13.14 \mu\text{rad}$ 减小到 $0.15 \mu\text{rad}$,镜面的子午斜率误差均方根值由 $8.21 \mu\text{rad}$ 减小到 $0.86 \mu\text{rad}$ 。可见,压弯镜面形误差分析及补偿方法行之有效,达到了提高水平偏转压弯镜面形精度的目的。

参考文献:

[1] ANDREAS K F. Third-generation synchrotron radiation X-ray optics[J]. *Facility Stru.*, 1996, 4(2):121-125.
 [2] 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-ac-

curacy measurement of VAPGM wavelength scanning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 7(18):1548-1553. (in Chinese)

[3] 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. Precision*

- Eng., 2010, 8(18):1843-1846. (in Chinese)
- [4] KAMACHI N, ENDO K, OHASI H, *et al.*. Characteristics of mechanically-bent-shaped mirror[C]. *2nd International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI02)*, 2002(9): 113-121.
- [5] PADMORE H A, HOWELLS M R, IRICK S, *et al.*. Some new schemes for producing high-accuracy elliptical x-ray mirrors by elastic bending [J]. *SPIE*, 1996, 2856:145-155.
- [6] LIENERT U, HARTLAUB S, FREUND A K. Experimental shape optimization of bent crystals [J]. *SPIE*, 1997, 3152: 120-124.
- [7] BEYNON T D, KIRK I, MATHEWS T R. Gabor zone plate with binary transmittance values [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17: 544-546.
- [8] ZETTL B, SZYSZKOWSKI W, ZHANG W J. Accurate low DOF modeling of a planar compliant mechanism with flexure hinges: the equivalent beam methodology [J]. *Precision Engineering*, 2004, 9(1):1-9.
- [9] 刘鸿文. 材料力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社, 1992:136-283.
LIU H W. *Material Mechanics (First Manual)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 136-283. (in Chinese)
- [10] HOWELLS M R, CAMBIE D, DUARTE R M, *et al.*. Theory and practice of elliptically bent x-ray mirrors[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2000, 5:2748-2761.
- [11] 徐朝银, 潘国强, 吴冠原. X射线衍射和散射光束线设计[J]. 中国科学技术大学学报, 1999, 29(2): 181-188.
XU CH Y, PAN G Q, WU G Y. The design of a beamline for X ray diffraction and scattering experiments [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1999, 29(2):181-188. (in Chinese)
- [12] 黄志刚, 董晓浩, 高飞, 等. X射线衍射和散射光束线环面聚焦镜的面形精度与像差分析[J]. 光学精密工程, 2004, 2(12):26-30.
HUANG ZH G, DONG X H, GAO F, *et al.*. Slope error and aberration analysis for XRD beamline toroidal focusing mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 2(12):26-30. (in Chinese)
- [13] 周泗忠, 杨晓许, 时惠霞. 压弯聚焦镜自重的平衡[J]. 核技术, 2005, 28(3):180-183.
ZHOU S ZH, YANG X X, SHI H X. Study of gravity compensation of bent focusing mirror[J]. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(3): 180-183. (in Chinese)

作者简介:



卢启鹏(1964—),男,黑龙江人,研究员,博士生导师,现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



彭忠琦(1957—),男,吉林榆树人,高级工程师,主要从事精密机械设计方面的研究。E-mail: pengzhongqi@126.com



高飒飒(1986—),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: gaosa8608@163.com