

文章编号 1004-924X(2004)06-0608-06

# 同步辐射单色器冷却压弯机构

柳 晖<sup>1</sup>, 高雪官<sup>2</sup>

(1. 上海师范大学 机械与电子信息工程学院, 上海 201418;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘要:** 研究了带有柔性铰链组合体的冷却压弯机构, 以用于减少晶体的热变形。给出了晶体热变形的种类及其机理, 以及冷却压弯机构的受力分析及机构结构。运用有限元方法对这种机构进行了分析。结果表明: 此种机构大大降低了第一晶体的热变形, 在承受  $5 \text{ N/mm}^2$  峰值功率密度条件下, 面型误差仅为  $0.04 \mu\text{rad} \ll 3 \mu\text{rad}$ , 远远小于同步辐射光束线设计要求。结果还表明: 此种机构尤其适用于高热载情况, 是解决第三代同步辐射光源关键技术。

**关键词:** 同步辐射; 柔性铰链; 压弯机构; 双晶单色器

中图分类号: O432.1 文献标识码: A

## Monochromator cooling bender in synchrotron radiation

LIU Hui<sup>1</sup>, GAO Xueguan<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical and Electronic Information Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China;* 2. *School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

**Abstract:** The cooling bender with a flexural hinge based framework is researched to reduce the crystal thermal distortion. The types and their principles of the crystal thermal distortion are introduced, and the mechanical forces and cooling bender structure are analyzed with the finite element method. The results show that the bender can greatly cut down the thermal distortion of the first crystal, the crystal surface error is only  $0.04 \mu\text{rad} \ll 3 \mu\text{rad}$  at the peak power density of  $5 \text{ N/mm}^2$ , which is much lower than the design requirement to the beam line in synchrotron radiation. Such kind of bender especially fits in high heat load, and it is one of the key techniques to solve the problems in developing the third generation of synchrotron radiation light source.

**Key words:** synchrotron radiation; flexural hinges; bender; double crystal monochromator

## 1 引言

同步辐射光源是继电光源和激光源之后为人

类的文明带来革命性推动的一种新型光源。许多国家和地区都极为重视同步辐射的研究, 发展了不同的实验方法, 如生物、医药、物理等, 应用于不同的学科领域, 自上世纪六十年代以来, 已经历三

代的发展。

光束线系统是同步辐射应用的主要部分, 它包括精密机械系统、光学系统(聚焦镜、单色器、精密可调狭缝、束流位置探测器等部件)以及相应的电子控制系统、高真空或超高真空系统、辐射防护系统和安全连锁系统等。

第 3 代同步辐射光源的光束线系统设计制造关键技术之一, 是单色器第 1 晶体的受热变形问题。单色器是光束线中的“心脏”部件。在第 3 代同步辐射光源光束线设计中, 需要多种高性能的双晶单色器, 但单色器第 1 晶体表面受到高热负载, 将在其表面和内部之间形成一个很大的温度梯度, 产生很大的热变形, 大大降低光学元件的性能, 很大的热应力甚至破坏光学元件。目前通常采用的方法是使用冷却剂(水、液氮、液态镓), 降低热负载, 减小变形。在热功率密度不高的情况, 这些方法的效果是比较好的, 但是当晶体表面承受的热功率密度较高时, 效果就不甚理想。为此, 本文在常规冷却方法的基础上, 研究一柔性铰链压弯机构, 通过该机构施加的反向力偶, 使第 1 晶体的热变形与在反向力偶作用下产生的弯曲变形基本上抵消。

## 2 晶体变形的分析

晶体的变形主要来源有以下 3 个方面:

- (1) 加工晶体引起的形变, 如晶体与底座粘接时由于内应力的存在而导致的形变;
- (2) 工作环境引起的形变, 冷却液通过晶体内部, 会产生压力, 以及晶体处于高真空环境中, 表面受到的负压等导致形变。

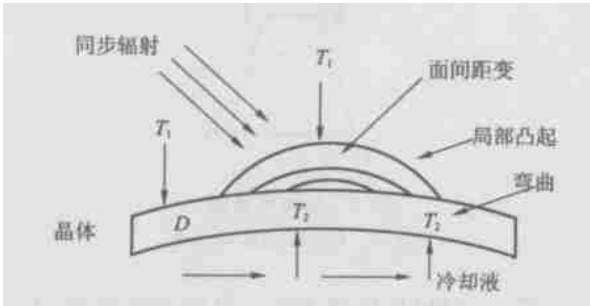


图 1 晶体的热变形  
Fig. 1 Crystal heat warp

- (3) 高热负载引起的形变, 使晶体内部产生

很大的温度梯度, 产生 3 种变形, 即晶体的总体弯曲、局部凸起和晶面间距变化<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。

$T_1, T_2$ —衍射面、冷却液体相接处晶面的温度,

$D$ —晶体厚度,

$Q$ —热通量。

### 2.1 晶体总体弯曲

在垂直光束方向上的温度梯度, 引起不同高度位置上的热膨胀系数不同, 造成晶体总体的弯曲。

$$\text{曲率半径 } \rho = \frac{D}{\beta \Delta T_{12}} (\beta \text{—线性膨胀系数})$$

$$\Delta T_{12} = T_1 - T_2 = \frac{QD}{K} (K \text{—热传导系数})$$

代入上式得,

$$\rho = \frac{K}{\beta Q}$$

表明晶体总体弯曲曲率半径与晶体厚度无关, 仅与晶体材料  $\beta$  和  $K$  及热负载有关。总体弯曲引起的衍射角变化  $\Delta\theta_{bend}$ <sup>[2]</sup>,  $\Delta\theta_{bend} = \frac{\Delta X}{\rho} = \frac{\beta}{K} \Delta X$  ( $\Delta X$ —总体弯曲造成面元沿晶体表面移动距离)。

### 2.2 晶体局部凸起

若同步辐射功率分布成高斯形状, 则局部凸起的曲率半径为<sup>[3]</sup>:

$$\rho = \frac{K \delta^2}{\beta Q_0 D^2}$$

$Q_0$ —热通量的最大值

$\delta$ —高斯分布的标准偏差。

### 2.3 晶面间距变化

同步辐射引起晶面间距变化为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d}{\Delta d} = \beta \Delta T$$

$$\text{换算成衍射角变化 } \Delta\theta = \frac{\Delta T \beta}{\cot \theta}$$

上述三种原因中, 引起衍射角改变主要原因是总体弯曲, 晶体局部凸起和晶面间距变化的影响可忽略不计<sup>[2]</sup>。对于硅晶体,  $\beta = 1.57 \times 10^2$  ( $W/m/K$ ),  $K = 2.6 \times 10^{-6}$  ( $1/K$ ), 若热功率密度  $q = 0.6 W/mm^2$  时, 造成晶体弯曲曲率半径为 89 m, 倾斜误差为 994  $\mu rad$ , 超过光束线设计要求的 3  $\mu rad$  (晶体表面的倾斜误差为 3  $\mu rad$  时, 单色器的传输效率为 75%, 根据光束线设计要求传输效率应大于 75%), 严重影响单色器的光学性能。

### 3 柔性铰链压弯机构的研究

#### 3.1 工作原理

由于柔性铰链具有体积小, 无机械摩擦, 无空回, 稳定性和运动灵敏度高特点, 近年来, 柔性铰链在同步辐射光束线中得到了广泛应用。本文研究的压弯机构采用多轴柔性铰链, 如图 2 所示。

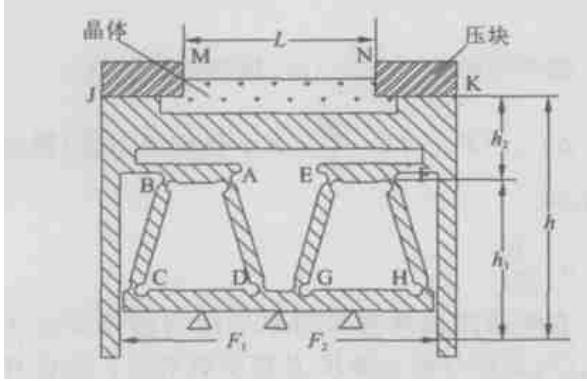


图 2 柔性铰链压弯机  
Fig. 2 Flexural hinge based bender

第 1 晶体底座与压弯机构连成一体, 压弯机构对中心线完全对称, 两边各有 4 个相同的柔性铰链— $ABCD$  和  $EFGH$ ,  $CDGH$  固定不动, 晶体放在上端, 用压块压紧, 晶体上开有 20 个矩形 ( $1 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ) 贯穿槽, 槽两端的底座上, 分别配一个集液箱, 所有槽都开口到集液箱, 冷却液过冷液氮可从一端流入, 另一端流出。通过驱动机构—两个固定安装的步进电机, 对两边侧板的下端施加力  $F_1$ 、 $F_2$ , 使晶体产生弯矩。调节步进电机驱动位移, 就可改变弯矩大小。

#### 3.2 受力分析

为了便于分析, 假定:

- (1) 压弯机构为平面梁系;
- (2) 柔性铰链为理想铰链;
- (3) 机构各处按等截面梁计算。

如图 3 所示。

此结构有 4 个可动铰链支座, 有 4 个约束反力, 为一次超静定结构。解除  $E$  处约束的静定基, 将外载荷  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_1 h_1$ 、 $F_2 h_1$  与多余约束反力  $N_x$  加在静定基上得到原超静定机构的相当系统。

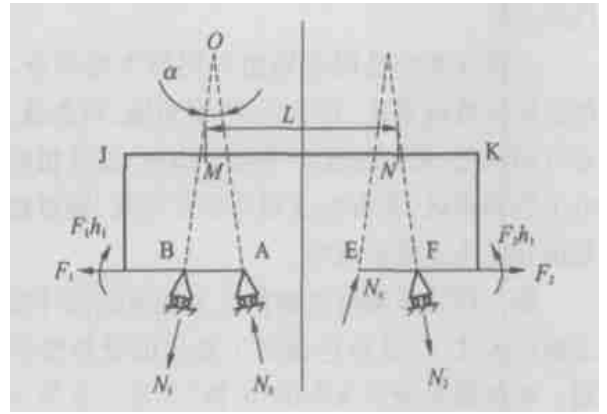


图 3 柔性铰链压弯机力学简图

Fig. 3 Mechanical diagram of flexural hinge based bender

此种压弯机构的驱动方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{\Delta F(h + \Delta h)}{E_m I_m L} x + \frac{1}{E_m I_m} \times [F_1 h - \Delta F \Delta h - N_x \sin \alpha \Delta h], \quad (1)$$

$$\Delta F = F_1 - F_2. \quad (2)$$

$\Delta h$ —转动中心  $O$  与晶体中性面的距离;

$$\Delta h = AB \cot \alpha - h_2, \quad (3)$$

$R(x)$ —压弯半径

$E_m$ —晶体的弹性模量;

$I_m$ —晶体的惯性矩。

$\Delta h$  越接近于零, 压弯半径越小, 压弯性能就越好, 且柔性铰链的弯矩损失可忽略不计, 一般  $|\Delta h| \leq 2 \text{ mm}$ 。

#### 3.3 压弯机构尺寸的确定

取  $ABCD$  柔性铰链为研究对象,  $O$  是转动中心, 如图 4 所示。

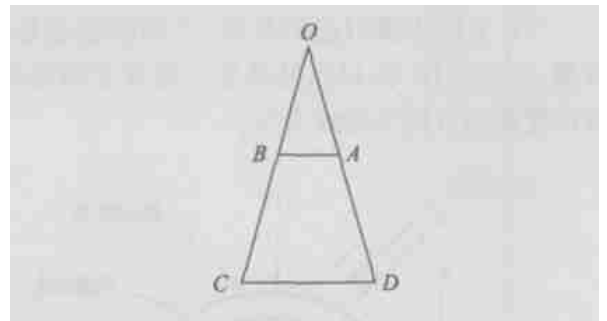


图 4 几何示意图

Fig. 4 Geometric sketch

假定:  $\triangle OAB$  形状不变, 根据参考文献[4], 当  $BC = AD$ ,  $OB = OA$  时, 旋转点  $O$  的偏移量最小; 又据能量守恒定律, 压弯机形变能量与  $(OB/BC)^2$  成正比, 理论上,  $OB/BC$  应尽可能的小, 但

BC 若过长, C、D 处的受力太小, 对恢复压弯不利, 一般取下端柔性铰链 (C、D) 的受力是上端 (A、B) 的 2 倍。考虑到空间位置, 取  $AD = BC = 35 \text{ mm}$ ,  $OB = OA = 24 \text{ mm}$ ,  $AB = 16 \text{ mm}$ ,  $CD = 35 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 25 \text{ mm}$ 。此时  $\alpha = 31.4^\circ$  带入式 (3), 求得  $\Delta h = 1.1 \text{ mm}$ , 完全满足要求。

柔性铰链中心厚度  $t$  是决定灵敏度的主要因素之一, 同时又要能符合制造条件, 取  $t = 0.15 \text{ mm}$ ; 取柔性铰链圆弧半径  $R = 3 \text{ mm}$ 。柔性铰链 EFGH 的结构尺寸与 ABCD 相同。

## 4 有限元分析

### 4.1 热应变分析原理

有限元热应变分析技术属于多场耦合技术, 方法是在静力场结构分析的基础上加入固体的温度分布产生的热胀冷 所引起的结构变形分析。热应力理论计算公式为:

$$\sigma_{\max} = \Delta T \times \beta \times E$$

其中,  $\Delta T$  — 温差

$\beta$  — 线性膨胀系数

$E$  — 弹性模量

热应力分析开始之前要对被分析模型进行一次热分析以求得温度分布情况; 再将热分析的结果作为负载输入到结构分析中, 进行变形计算。两次分析过程所用的单元类型的次数和模型的网格划分必须一致, 节点数目和位置必须相同。

### 4.2 有限元分析具体方法

采用 COSMOS 有限元软件分析, 分为 3 个步骤: (1) 前处理: 建模; (2) 求解: 施加载荷计算; (3) 后处理: 查看结果。

#### 4.2.1 建模

先将压弯机构和晶体三维造型, 选择八节点六面体单元, 进行建模, 如图 5 所示。晶体、不锈

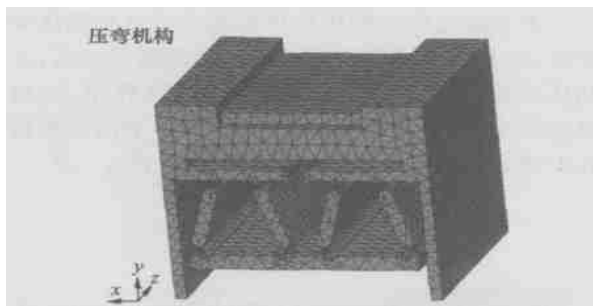


图 5 模型的格划分图

Fig. 5 Net dividing of the model

钢和过冷液氮的有关参数如表 1:

表 1 Si 晶体、不锈钢和过冷液氮的性能

Tab. 1 The properties of Si crystal, stainless steel and over cooling liquid nitrogen

	Si111	不锈钢	过冷液氮
弹性模量(GPa)	1.62	210	
泊松比	0.17	0.28	
导热系数(W/mK)	157	40	0.000 744
热膨胀系数( $10^{-6} \text{ m/K}$ )	2.6	16.6	

#### 4.2.2 施加载荷

同步光入射角的范围为  $6 \sim 24^\circ$ , 在  $6^\circ$  情况下, 着光区域长  $3.6 / \sin 6^\circ = 34.4 \text{ mm}$ , 而在  $24^\circ$  时, 由于晶体着光区域较窄, 仅为  $3.6 / \sin 24^\circ = 8.85 \text{ mm}$ , 因而此时热负载最高。所以, 在入射角  $24^\circ$  时, 利用 SHADOW 软件<sup>[6]</sup> 计算同步光的能量在空间的分布情况, 以此投射到晶面上, 作为热负载施加, 开始进行有限元分析。

#### 4.2.3 后处理

COSMOS 将热分析的结果, 以云彩图显示。

### 4.3 晶体热—结构耦和分析

图 6 和 7 分别表示晶体表面峰值功率密度为  $5 \text{ W/mm}^2$  时, 温度及变形彩色云图。在矩形槽两端, 过冷液氮与晶体接触面积较中间小, 两端晶体表面温度高, 最高温度为  $293 \text{ K}$ , 最大变形与最小变形之差约为  $34.2 \mu\text{m}$ 。根据图 7, 以 X 方向为横坐标, 以 Y (变形量) 方向为纵坐标, 绘制变形量分布曲线, 如图 8。

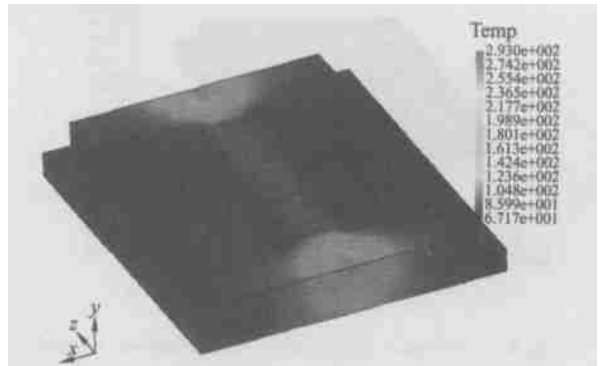


图 6 晶体表面温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of crystal surface

由曲线上斜度最大的两点近似计算热变形造成的平均倾斜误差 (由于热变形造成晶体弯曲) 为  $5.13 \mu\text{rad}$ 。

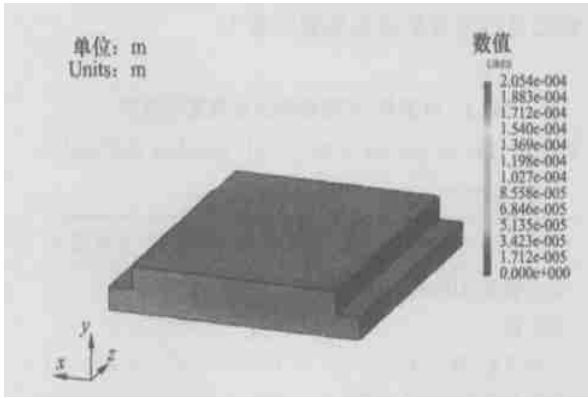


图 7 晶体变形图

Fig. 7 Thermal distortion distribution of crystal surface

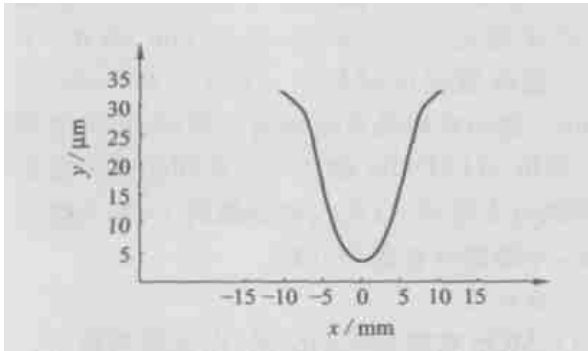


图 8 变形量分布曲线

Fig. 8 Distortion curve

图 9 为施加力  $F_1 = F_2 = 10\text{ N}$  时,晶体的变形。

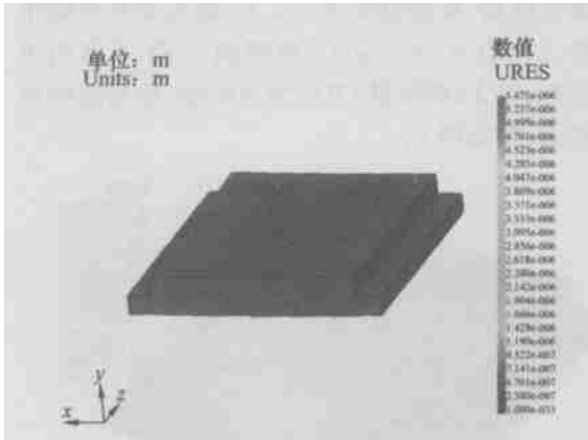


图 9 施力后晶体变形

Fig. 9 Thermal distortion distribution of crystal surface with imposed force

由图中可知,最大与最小变形量之差为  $0.268\text{ }\mu\text{m}$ 。同样根据图 9,以  $X$  方向为横坐标,以  $Y$ (变形量)方向为纵坐标,绘制变形量分布曲线,如图 10。

由曲线上斜度最大的两点近似计算热变形造成的平均倾斜误差(由于热变形造成晶体弯曲)仅为  $0.04\text{ }\mu\text{rad}$ 。

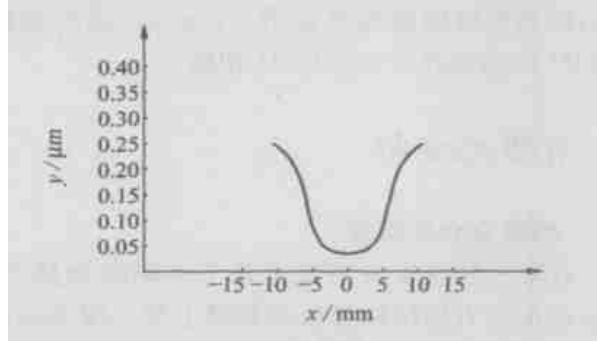


图 10 施力后变形量分布曲线

Fig. 10 Distortion curve of crystal surface with imposed force

### 5 实验结果

双晶单色器第一晶体面形误差,是通过在距离双晶单色器出口一定距离处安装一荧光屏靶,测量出射光在屏靶上光斑的位置和能量。若位置变化或能量减少,即表明出射光高度发生变化,第一、二晶体不平衡,存在面形误差,多次实验证明,在双晶单色器晶等用姿正确,当晶体表面受热峰值功率密度为  $5\text{ W/mm}^2$  时出射光光斑的位置能量几乎没有变化,说明采用冷却压弯机构,可有效控制晶体面形误差。

### 6 结论

本文研究的冷却压弯机构能有效减少晶体的变形,尤其适合高热负载情况。初步研究表明,在晶体承受  $5\text{ W/mm}^2$  峰值功率密度条件下,面型误差仅为  $0.04\text{ }\mu\text{rad} \ll 3\text{ }\mu\text{rad}$ ,远远小于同步辐射光束线设计要求,实验的结果也证明了这一点。

### 参考文献:

[1] KNAPP G S. High resolution monochromator systems using thermal gradient induced variable bragg spacing[J]. Nucl.

- Instrum. Methods*. 1986, A246(1): 365-367.
- [2] JOKSCH S. Heating effects of monochromator crystals at a high intensity wiggler beam line[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1990, A291(1): 325-331.
- [3] G. VAN DER LAAN. A chromatic premirror system for a double crystal monochromator[J]. *Nucl. Instrum. Methods*. 1990, A291(1): 225-227.
- [4] 傅旋. 弧矢聚焦双晶单色器[D]. 中国科学院西安光机所, 2001.  
FU X. *A sagittally focusing double crystal monochromator in synchrotron radiation* [D]. Xi'an Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences 2001.
- [5] 曲艳峰, 吕丽军. 同步辐射仪器中柔性铰链压弯机的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 220-225.  
QU Y F, LU L J. Research on the flexural hinge based bender in a synchrotron radiation instrument[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2): 220-225.
- [6] LAI B, SHADOW C F. A synchrotron radiation ray tracing program[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1986, A246(1): 337-341.
- [7] 汤琦. 弧矢聚焦双晶单色器设计[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(4): 411-415.  
TANG Q. Design of a sagittally focusing double crystal monochromator in synchrotron radiation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 411-415.
- [8] 王纳秀. 液氮冷却单色仪晶体的热变形分析[J]. *核技术*, 2002, 25(6): 402-407.  
WANG N X. Analysis of thermal distortion of crystal of DCM cooler by liquid nitrogen[J]. *Nuclear Techniques*, 2002, 25(6): 402-407.
- [9] 傅旋. 同步辐射光束线中柔性铰链的研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(8): 67-70.  
FU X. Research on the flexural hinge in synchrotron radiation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(8): 67-70.
- [10] 柳晖. 水冷双晶单色器结构的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2): 156-160.  
LIU H. Structure of water cooling double crystal monochromator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2): 156-160.
- [11] SOUVOROV A. Fixed exit double crystal monochromator with one single cooled crystal[J]. *Nucl. Instrum. Methods*. 1998, A413(1): 427-430.
- [12] Chaoyin Xu. A Double crystal monochromator for EXAFS measurement at NSRL[J]. *Nucl. Instrum. Methods*. 1998, A410(1): 293-296.
- [13] BERNSTORFF S. Fixed exit double crystal monochromator for the diffraction beamline at ELETTRA: A new concept for crystal movements[J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1995, 66(2): 2065-2068.
- [14] RAMANATHAN M. Multipurpose monochromator for the basic energy science synchrotron radiation center collaborative access team beamlines at the advanced photon source X-ray facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1995, 66(2): 2191-2193.
- [15] FERME J J. New improvements in bendable mirrors. SPIE 1997 Proceedings[C]. *SAN DIEGO-USE*, 1997.
- [16] SATO S. High heat load vacuum ultraviolet mirror development in Japan[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(2): 377-387.
- [17] PADMORE H A, HOWELLS M R. Some new schemes for producing high accuracy elliptical X-ray mirrors based on elastic bending[J]. *Optical Engineering*, 1989, 32(8): 29-32.

作者简介: 柳晖(1962-), 男, 湖北武汉人, 上海师范大学机电学院, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机电方面的教学和研究工作。E-mail: liuhui00@shtu.edu.cn