

文章编号:1007-1180(2011)06-0008-06

# 压弯机构在同步辐射光束线中的应用

卢启鹏, 彭忠琦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 同步辐射光束线中压弯机构的主要的压弯方式有仿型弯曲、压电弯曲和机械弯曲, 由于压弯原理不同, 各种压弯机构的应用场合也不同。目前, 最常用的压弯方式是机械压弯, 主要有三点压弯、四点压弯、双臂结构、单臂结构、无臂结构和柔性铰链等。其中四点结构既可用于压弯长镜, 又可用于压弯短镜, 零部件加工与安装方便, 且力矩大小可调, 在同步辐射光束线中得到了广泛应用。

**关键词:** 压弯机构; 仿型弯曲; 压电弯曲; 机械弯曲; 四点滚轴压弯

中图分类号: TH744.1; TB24

文献标识码: A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112806.0008

## Application of Bender in Synchrotron Radiation Beamline

LU Qi-peng, PENG Zhong-qi

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Benders used in synchrotron radiation beamline can be mainly classified as model bending, piezoelectricity bending and mechanism bending. Each is used in different situations as the bending theory differs. At present, mechanism bending is in most common use, which contains three-point bending, four-point bending, double arm structure, single arm structure, no arm structure, flexural hinge-based bender, and so on. Four-point bender can be used to bend both long mirror, short mirror, whose component machining and fixing are convenience, also the moment can be regulated, so it is widely used in the synchrotron radiation beamline.

**Keywords:** bender; model bending; piezoelectricity bending; mechanism bending; four cylinder bender

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (No:11079035); 应用光学国家重点实验室开放基金资助项目 (No:09Q33FQ091)

# 1 引言

同步辐射光亮度高、发射度小，通过各种准聚焦系统可以得到很小的光斑，提供普通 X 光机和其他光源所无法比拟的亮度，有力地促进了众多学科的发展<sup>[1]</sup>。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。光束线的核心部件是各种类型的单色器和反射镜，其中反射镜的主要作用是对光束进行偏转、准直、聚焦以及光子能量截止等处理。与磨制镜相比，压弯镜具有半径可调、表面精度高、易于加工等优点。压弯机构的主要功能是将光学元件弹性压弯以获得一定的曲率半径，从而实现同步辐射光的准直或聚焦。

压弯机构主要的压弯方式有仿型弯曲、压电弯曲和机械弯曲。其中仿型弯曲、压电弯曲成本较高，应用范围有所限制，机械压弯是成像元件最常用、最可靠的弯曲方法。机械弯曲又可分为三点压弯、四点压弯、双臂结构、单臂结构、无臂结构和柔性铰链等。

目前，四点结构已凭借其独特的优势和前景而备受青睐，在同步辐射光束线中得到了广泛应用。但是，由于不同光束线上压弯镜的作用和尺寸不同，因而用于不同压弯镜的压弯机构也有很大的差别。本文综述了几种主要的压弯机构。

## 2 压弯机构的分类及特点

由于压弯机构的压弯原理不同，每种压弯机构的应用场合和环境也不尽相同。常用的压弯形式可归纳为 3 种：仿型弯曲、压电弯曲、机械弯曲。

### 2.1 仿型弯曲

仿型弯曲是采用特制的阴阳仿型模具来夹持晶体的上下表面，使光学反射面弯曲成相同于模具的曲面形状，其结构如图 1 所示<sup>[2]</sup>。采用仿型弯曲可以压制圆柱面、椭圆柱面和抛物面等，但是，压弯后的反射面形状不可改变，无法满足光束线能量变化

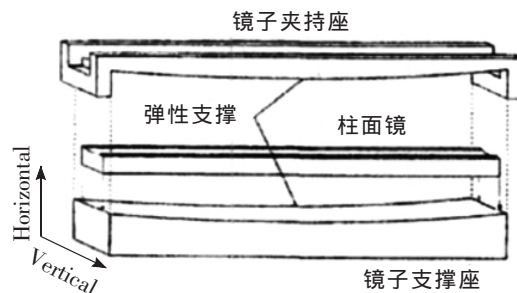


图1 仿型压弯示意图

对压弯半径动态调整的要求，并且对镜子的长度有所限制，故其应用范围较小。

### 2.2 压电弯曲

压电弯曲是由两层压电陶瓷板 (PZT) 及上下两层作光学反射的晶片组成，在 PZT 的上下表面和界面处都有镀金膜作为电极，向其供电，其中一个 PZT 膨胀，另一个收缩，从而使上下晶片的光学表面弯曲。其原理如图 2 所示。通过选择适当的电极数目和电压，可以获得各种反射面形，并可用反馈系统调节压电陶瓷上的电压，动态控制反射镜面形，在不同温度和其他条件下保持很高的精度。

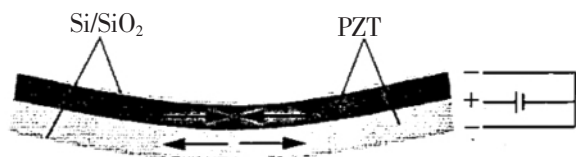


图2 压电弯曲机理

欧洲同步辐射装置 ESRF 上使用的一种压电陶瓷反射镜如图 3 所示<sup>[3]</sup>，这种反射镜的粗糙度达到 0.1 nm 以下，面形精度高达  $\lambda/100$ <sup>[4]</sup>。但是，由于压电弯曲的理论推导较为复杂，电压分布与电源本身、反馈系

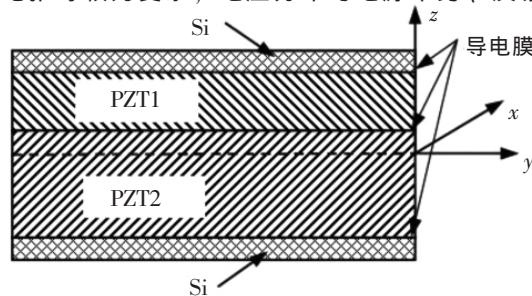


图3 压电弯曲示意图

统等有关, 要得到稳定精确的电压分布较为困难, 加上这种压弯方式中的压电陶瓷价格昂贵, 致使压电弯曲应用范围受限, 一般用于长度较短、曲率半径较小的镜子。

### 2.3 机械压弯

机械压弯是成像元件最常用、也是最可靠的弯曲方法。其原理是在镜子的一端或两端加力矩强迫其弯曲, 通过改变力矩、镜子截面宽度或镜子截面厚度, 从而弯曲成任何面形。随着技术的不断发展, 机械压弯的实现方法不断改进与完善, 压弯方式主要有三点压弯、四点结构、双臂结构、单臂结构、无臂结构和柔性铰链等。

#### 2.3.1 三点结构

三点压弯结构如图4所示<sup>[5]</sup>, 采用两点支撑, 一点用力。结构简单, 用力比较容易控制, 通常用来压制圆柱面。

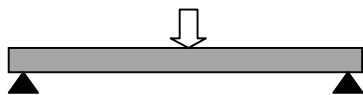


图4 三点压弯结构示意图

#### 2.3.2 四点结构

四点压弯结构如图5所示, 用4个轴分别作为力点和支点。结构特点是力的大小可以调节, 既可用于压弯长镜, 又可用于压弯短镜<sup>[6-7]</sup>。其优点是镜子两端受力均匀, 零部件加工与安装方便, 压弯力矩可调。目前, 同步辐射光束线上长镜的压弯多采用此种结构。

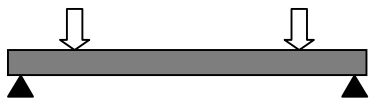


图5 四点压弯结构示意图

四点压弯机构按照压弯镜夹持机构可分为3种类型: U型压弯、四点滚轴压弯、四点压弯<sup>[8]</sup>。根据驱动方式不同又可分为拉杆式和千斤顶式<sup>[9]</sup>。

##### 2.3.2.1 U型压弯

U型机构是在镜子两端用U型夹持座夹持, 采

用柔性铰链在晶体两端施加力矩, 通过U型块的移动来实现镜子的压弯, 其结构如图6所示。U型夹持方式在压弯过程中限制了镜子在型座连线方向的自由度, 容易使镜子受到挤压而在镜子表面产生机械应力, 导致镜子的面形精度降低。



图6 U型压弯示意图

##### 2.3.2.2 四点滚轴压弯

四点滚轴压弯机构在距镜子两端面一定距离的上下采用圆柱轴装置, 通过施加弯矩带动圆柱轴发生相对运动来实现镜子的压弯。其结构如图7所示。镜子端面自由度没有受到限制, 压弯过程中轴与镜面滚动接触, 接触位置随压弯半径的改变而调整, 镜子不会因受到挤压而产生机械应力。目前, 四点压弯机构不仅应用于单色器的晶体压弯机构, 还广泛应用于聚焦镜和准直镜的压弯聚焦机构中。



图7 四点滚轴压弯示意图

##### 2.3.2.3 四点压弯

四点压弯和四点滚轴压弯原理相同, 不同的是其与镜子的接触为面接触, 如图8所示。



图8 四点压弯示意图

##### 2.3.2.4 拉杆式驱动

拉杆式驱动方式的驱动装置是利用步进电机施加垂直方向的力, 经过涡轮蜗杆减速将驱动力施加到拉杆的中间位置, 利用拉杆的伸长对镜子两端施加相等的弯矩。如图9所示。

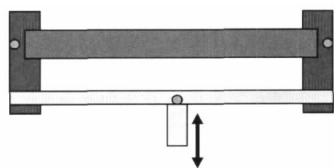


图9 拉杆式驱动方式

### 2.3.2.5 千斤顶式驱动

千斤顶式驱动装置是利用步进电机施加水平方向的力，通过滚柱螺旋传动机构将驱动力施加到驱动杆两侧，利用驱动杆的伸长对镜子两端施加弯矩，从而使镜子弯曲到所需的曲率半径。如图10所示。

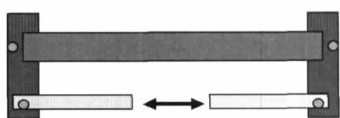


图10 千斤顶式驱动

### 2.3.3 双臂结构

双臂结构<sup>[10]</sup>是利用步进电机推动两臂，对镜子两端施加力矩，从而使镜子发生弯曲，其结构如图11所示。对两臂施加的力矩不同，镜子沿长度方向的曲率半径也不同。臂和镜子的连接方式有两种，粘在一起或夹在一起。该结构多用于短镜的压弯。



图11 双臂结构

### 2.3.4 单臂结构和无臂结构

单臂结构<sup>[11]</sup>是镜子一端固定，另一端设有弹性悬臂，推动悬臂使镜子弯曲，其结构如图12所示。若另一端没有悬臂，在其自由边直接用力，压弯成柱面镜，则称该结构为无臂结构<sup>[12]</sup>，如图13所示，多用于单色器镜体的压弯。



图12 单臂结构



图13 无臂结构

### 2.3.5 柔性铰链

柔性铰链具有体积小、无机械摩擦、无空回、高灵敏度、重复精度高、分辨率高等特点<sup>[13]</sup>。近年来在同步辐射光束线中得到广泛的应用，如狭缝的调节、单色器晶体的微调机构、弧矢聚焦晶体的压弯等。由于柔性铰链压弯机构由一整块材料切割而成，如图14所示，因而是小元件压弯的理想构件，不适合大面积元件的压弯。

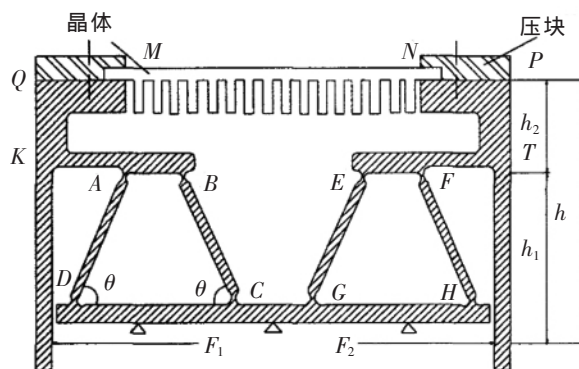


图14 柔性铰链结构

## 3 压弯机构的应用及研究现状

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。在接近1 m长的镜子上直接加工子午曲率半径为数千米的圆弧或椭圆弧面，难以得到高精度的面形。目前，同步辐射装置上使用的大尺寸反射镜普遍采用压弯方式成形，将长条形的平面镜弯曲成柱面或将柱面镜弯曲成环面，实现一个方向或两个方向的准直或聚焦。采用可调节的压弯镜技术，可以精确地得到所需的曲率半径，最好的面形斜率误差均方根可达到 $<2 \mu\text{rad}$ 。此外，还可灵活调节镜子的曲率，以适应不同的聚焦焦距和掠入射角。

压弯机构作为光束线中的关键部件之一，其性

能及精度影响到整个压弯系统的工作运行精确程度。目前,国内对压弯机构的压弯机理及压弯性能进行了大量研究。上海交大与北京同步辐射室合作,开展了用于同步辐射 X 光束线的准直、单色、聚焦系统研究,其设计目标是要将北京第一代同步辐射 X 光束线性能提升到国际第二代水平。中国科技大学在同步辐射 X 光束线的准直、单色、聚焦系统方面也开展了一系列研究,如 X 射线环面聚焦镜压弯调整与面形测量<sup>[14]</sup>、X 射线衍射和散射光束线聚焦镜的面形精度与像差分析<sup>[15]</sup>、同步辐射弧矢聚焦晶体压弯原理等。中科院西安光机所对压弯聚焦镜自重的平衡<sup>[16]</sup>进行了研究,并对超环面聚焦镜压弯装置进行了优化设计<sup>[17]</sup>。

北京同步辐射装置和合肥同步辐射装置,已建

造或在建的压弯镜设备有近 10 套,这些设备都是国内自行研制的。其中,合肥光源研制的长达 600 mm 的超环面镜面形斜率误差均方根值 $<5 \mu\text{rad}$ ,北京光源和上海交大合作研制的更大尺寸的压弯镜根据在线使用的效果分析,面形斜率误差均方根值 $>10 \mu\text{rad}$ 。这些压弯机构虽然能基本满足合肥光源和北京光源的要求,但在面形精度方面距离国际水平及第三代同步辐射光源的要求还有相当大的差距。国外著名的同步辐射如 ESRF、APS 和 ALS 等都拥有很强的束线技术研发力量,能够发展新的束线技术,对已有技术进行改进,及时满足束线技术日益提高的要求。国内外同类压弯机构现状及发展趋势的对比如表 1 所示。

在上海光源首批线站建设中,共使用 7 台高性能

表1 国内外压弯镜技术水平比较

技术指标	国内水平	国际水平	最好水平
镜子长度	600~800 mm	1 000 mm	1 500 mm
压弯面型RMS斜率误差	$\geq 5 \mu\text{rad}$	$\leq 2 \mu\text{rad}$	$\approx 1 \mu\text{rad}$
镜子最小曲率半径变化		50 m	30 m
曲率半径变化可重复性		$\pm 50 \text{ m}$	$\pm 30 \text{ m}$
姿态调节自由度	5维	5维	5维
光束稳定性		$\leq 3 \mu\text{rad}$	$\leq 1 \mu\text{rad}$

能的大型压弯镜装置,采用与国外委托合作研制的办法。通过国外合作研制,对压弯技术有了比较全面的了解,掌握了一些国外先进的压弯技术。但是,要从技术和工艺上实现压弯机构的国产化还需要一个过程。

#### 4 结 束 语

同步辐射光源的进步以及同步辐射应用研究对光束性能提出了更高的要求,促进了包括压弯技术在内的束线技术的发展。目前,我国有 4 台同步辐射装置:北京同步辐射装置、合肥同步辐射装置、上海光源和台湾同步辐射光源。上海光源是一台高

性能的中能第三代同步辐射光源,仅次于日本的 Spring、美国 APS、欧洲 ESRF,居世界第四。正在建设中的上海光源需要使用大量高性能的大型压弯镜装置,若这些设备都从国外采购,不仅成本高、维护不方便,而且对设备的不足之处进行改进也较困难。只有掌握了相关技术,进行技术改进和创新,自行研制压弯镜设备,才能更好地发挥上海光源的作用,提升我国自行研制光束线关键设备的能力,适应科学技术快速发展的需要。上海光源的建设,将使国内光束线技术整体上得到大幅度的提高,为国内光束线技术的可持续发展和技术创新奠定坚实的基础。



## 参考文献

- [1] 王俊杰, 陈文元, 张卫平, 等. 一种用于同步辐射光束线上的压弯机构的设计与试验[J]. 机械设计与研究, 2004, 12(20): 53-55.
- [2] 邓小国. 高热负载水冷弧矢聚焦双晶单色器研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所博士学位论文, 2008: 43.
- [3] 马礼敦, 杨福家. 同步辐射应用概论[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2000: 44.
- [4] Freund A. X-ray optics at the European synchrotron radiation facility[J]. *SPIE*, 1995, 2515: 445-457.
- [5] 李志怀. 同步辐射光束线聚焦镜压弯机制研究[D]. 上海: 中国科学院原子核研究所硕士学位论文, 1999: 10-14.
- [6] Timoshenko S, Woionowsky-Krieger S. *Theory of Plates and Shells*[M]. McGraw-Hill, New York, 1987.
- [7] Barrington L J, Rosenbaum G. Synchrotron x-ray sources as a tool in biological structure and kinetic analysis[J]. *Ann Rev Biophy Bioeng*, 1976, 5: 220-239.
- [8] 傅远, 祝万钱, 薛松. 上海光源光束线压弯机构研制[J]. 核技术, 2010, 33(10): 725-729.
- [9] Chao Weilun, Harteneck B D, Liddle J A, et al. Zone plate microscopy to sub-15nm spatial resolution with XM-1 at the ALS[C]. *Proc.8th Int. Conf. X-ray Microscopy, IPAP Conf.*, 2005, 7(7): 4-6.
- [10] 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.
- [11] Lienert U, Hartlarb S, Freund A K. Experimental shape optimization of bent crystals[J]. *SPIE*, 1997, 3152: 120-124.
- [12] Beynon T D, Kirk I, Mathews T R. Gabor zone plate with binary transmittance values[J]. *Opt. Lett.*, 1992(17): 544-546.
- [13] 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(001): 1-9.
- [14] 刘绍义, 徐朝银, 潘国强, 等. X射线环面聚焦镜压弯调整与面形测量[J]. 核技术, 2001, 24(7): 571-574.
- [15] 黄志刚, 董晓浩, 高飞. 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, 12(2): 26-30.
- [16] 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): 180-182.
- [17] 邓小国, 周泗忠, 熊仁生. 超环面聚焦镜压弯装置的优化设计[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 797-800.

作者简介: 卢启鹏 (1964-), 男, 汉族, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 研究员, 博士生导师, 1990年于中科院长春光机所获得硕士学位, 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