

BSRF-3B3 中能光束线聚焦镜压弯机构离线测试

朱 毅¹ 傅 远¹ 王纳秀¹ 夏绍建¹ 朱佩平² 周泗忠³

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院北京高能物理研究所 北京 100039)

3 (中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068)

摘要 在 BSRF-3B3 中能光束线安装调试过程中, 我们设计出一套完整的离线测试方法。这种方法采用激光模拟同步辐射光, 测试聚焦镜压弯机构性能, 并通过观察焦点以及焦点前后处光斑变化规律测试压弯机构性能, 摸索压弯成像规律; 另一方面, 记录压力传感器读数, 为今后在线调试提供参考依据。

关键词 光束线, 聚焦镜压弯机构, 成像规律

中图分类号 TL505

北京同步辐射装置 BSRF-3B3 光束线是一条能区为 1.5—6 keV 的中能、单色、聚焦 X 射线光束线。其光学布局如图 1 所示: 光源点发出的水平同步光掠入射至平面反射镜, 经平面镜反射后光束以与水平方向呈 1.1° 入射至超环面聚焦镜, 然后光束水平传输, 再经单色器单色化聚焦于离光源点 28.50 m 处样品上。

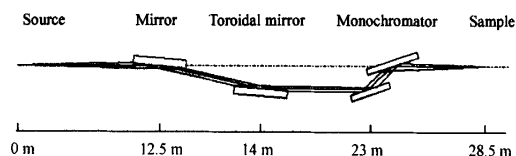


图 1 BSRF-3B3 光束线光学布局图

Fig.1 Optical layout of the BSRF-3B3 beamline

聚焦镜作为光束线中重要部件, 将从储存环中引出的同步辐射光在水平和垂直两个方向上聚焦, 以缩小像斑、提高光子密度。聚焦镜的聚焦性能好坏直接影响到光束线的成像性能。目前, 国际上对聚焦镜压弯机构性能测试, 有些是采用长程面型仪 (LTP), 从微观上测量聚焦镜的面型, 而不是从宏观的角度涉及聚焦镜成像性能的测试; 另外, 对于聚焦镜成像性能及规律的测试, 也大多采用在线测试的方法。

2003 年 7 月, 北京 BSRF-3B3 光束线利用停机时段进行了离线测试, 以便为在线调试做好充分的技术准备。在测试过程中, 我们主要对各个部件进行了调试, 尤其对聚焦镜压弯机构性能进行了严格的测试, 摸索其聚焦压弯规律, 以便节约在线调试

时间。本文即是在测试过程中的经验总结。

1 聚焦镜与压弯机构

在 BSRF-3B3 工程设计中, 聚焦镜是由一块熔融硅作衬底、表面镀镍的柱面镜 (图 2), 其中镀层厚度为几十 nm。

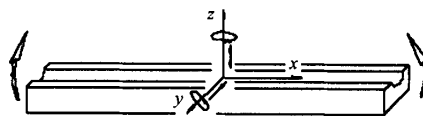


图 2 聚焦镜外形图

Fig.2 Schematic of the cylindrical mirror

聚焦镜在光束线上的作用分为弧矢方向和子午方向上聚焦, 其半径满足 Coddington 方程。

弧矢方向聚焦半径为:

$$R_s = \frac{2pq \sin \theta_i}{(p+q)}, \text{ 现采用 } R_s = 134.4 \text{ mm},$$

子午方向聚焦半径 (通过聚焦镜压弯产生, 压弯前 $R_m = \infty$) 为:

$$R_m = \frac{2pq}{(p+q) \sin \theta_i}, \text{ 压弯后 } R_m = 1458.5 \text{ m},$$

式中: R_s ——弧矢方向聚焦半径;

R_m ——子午方向聚焦半径;

p ——光源点至镜子距离 (物距);

q ——镜子至聚焦点距离 (像距);

θ_i ——入射角。

该柱面镜利用四点压弯聚焦机构, 将反射柱面压为类似轮胎内表面的超环面 (Toroidal), 从而达到

到水平和垂直方向的聚焦。该压弯机构 (如图 3) 主要具有两个功能：一为聚焦镜压弯功能，通过压弯驱动顶内的驱动步进电机和行星齿轮减速器，使梯形螺纹轴直线位移，向外侧推动摆杆，驱使真空室内夹持柱面镜的 U 型座绕柔性轴作微小旋转产生弯曲。压弯过程中，压力值通过压力传感器显示，梯形螺纹轴直线位移由软件根据驱动步进电机实际行走步数计算显示；它的另一功能是聚焦镜姿态

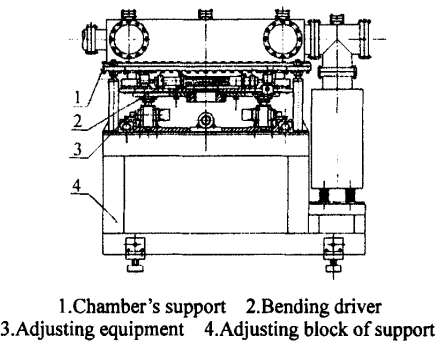


图 3 压弯机构结构示意图

Fig.3 Diagram of the four-point bender

调整，这一功能通过调节姿态调整装置 (步进电机驱动的蜗轮蜗杆装置) 以及通过调节支架底座调节块来实现。调节支架底座调节块可以将压弯机构整体大致调节至水平，然后通过调节姿态调节装置，精调柱面镜的垂直升降 (T_z)，横向移动 (T_x)，镜面相对光束纵轴的倾角 (R_x)、(R_y)，从而达到聚焦

镜姿态调整。

2 压弯机构机械性能测试

BSRF-3B3 所用聚焦镜从法国进口，价格昂贵，所以在该项性能测试中，我们特意另外加工了一个模拟聚焦镜。该模拟聚焦镜材料是硬铝，外形尺寸与进口聚焦镜完全相同。采用模拟聚焦镜测试压弯机构性能，一方面可以将各运动部件运行到极限 (机构设计指标均大于实际要求)，而不必担心聚焦镜受到损坏；另一方面避免了镜面受到污染而降低聚焦性能。

设计中，聚焦镜的压弯和姿态调整运动相互独立，设计的调节范围和精度技术参数见表 1。

在测试中，我们首先分别运行压弯电机以及三个姿态调整电机，经测试各项性能指标均达到设计要求，并且压力传感器和数显光栅显示正常；然后反复多次压弯、放松聚焦镜，通过记录压力传感器读数，发现压弯运行重复性很好；另外，我们分别采用分步运行 (梯形螺纹轴每次行走 0.25 mm) 以及连续运行，均得到大致相同的运行轨迹；最后，采用激光入射到镜面，初步观察聚焦效果，发现该机构聚焦效果明显。

通过压弯机构性能测试，我们对压弯机构特性有了具体的了解，并总结操作经验，为聚焦镜性能测试做好充分的前期准备。

表 1 聚焦镜调节范围和精度技术参数

Table1 Design parameters of the four-point bender

运动类型 Type	功能 Function	运动范围 Range	调整精度 (分辨率) Resolution	驱动方式 Driver
R_y	改变光束对镜子的入射角 Adjust incident angle	$\pm 0.65^\circ$	$\pm 0.01''$	自动减速器 Motor
R_z	调整子午面平行入射平面 Adjust mirror's pose	$0 \pm 5^\circ$	$\pm 5''$	手动螺纹副 Manual
T_z	调整镜面照射区纵向位移 Adjust vertical position of mirror	$\pm 5 \text{ mm}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	自动减速器 Motor
T_x	调整镜面照射区横向位移 Adjust horizontal position of mirror	$\pm 7.5 \text{ mm}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	手动螺纹副 Manual
B_x	改变镜子子午曲率半径 Adjust morror's R_m	$0\text{--}360 \mu\text{rad}$	$1.5 \mu\text{rad}$	精密压弯机构 Linear driver

3 聚焦镜的安装与姿态调整

由于聚焦镜是极其精密的光学元件，其镜面要做到绝对清洁，所以在安装过程中要做到万无一失。

在实际操作中，我们选择在夜间安装，因为此时工作现场人员较少；安装人员均穿上清洁的隔离服，戴上真空棉手套以及口罩；在安装现场，尽量避免非安装人员走动。在安装中，拆下的真空室内部件均需专人用酒精清洗，安装人员所带手套一旦污染

立即更换。安装过程步骤如下：

- 1、清洗所有工具，将压弯机构完全放松；
- 2、拆开真空室，取下模拟聚焦镜；
- 3、拆开聚焦镜包装，取出聚焦镜；
- 4、将聚焦镜放入夹持机构，逐次研磨压弯垫片，直到八块垫片与聚焦镜完全紧密结合，并保证上下各四块垫片受力基本相同；
- 5、密封真空室，检漏，整理现场。

聚焦镜安装过程中，聚焦镜的姿态仅仅依靠调整八块垫片与聚焦镜的间隙来实现，操作过程中完全依靠安装人员的经验、通过判断 8 块垫片受力大小与配合间隙来大致地调整聚焦镜姿态，这一方法不可避免地造成较大的误差。所以，聚焦镜安装结束后，有必要设计一种测试方法，在调整聚焦镜姿态调节机构同时，观测聚焦镜姿态，使得聚焦镜达到理想的姿态。

在 BSRF-3B3 聚焦镜姿态调整中，我们设计了一套测试方法：采用具有一定发散角的激光以与水平面夹角 1.1° 入射到镜面，通过观察像斑位置从而判断聚焦镜姿态。具体方法、步骤如下：

- 1、调节光源点（激光发生器）高度至 1438 mm；
- 2、将压弯机构中心移置距离光源点 14.25 m 处，并将聚焦镜离地面高度粗调至 1165 mm；
- 3、在离光源点 28.50 m 处设置光屏，并保证光源点、压弯机构、光屏中心大致在同一铅直平面内（选用激光多线仪铅直线做基准）；
- 4、开启激光电源，调节光束以与水平面夹角 1.1° 入射至聚焦镜，根据光屏光斑形状调节压弯机构高度以及聚焦镜姿态，具体如下：



图 4 聚焦镜高度调节光路图

Fig.4 Optical path for adjusting the cylindrical mirror's height



图 5 光屏上光斑

Fig.5 Focused beam spot on the screen

首先，我们调节聚焦镜高度至 1165 mm，光路图如图 4 所示。光束以与水平面夹角 1.1° 入射至聚焦镜，经过聚焦镜反射光束在光屏上成像，聚焦镜位于光屏与光源点连线中心。在调整过程中，根据

测量像斑中心高度，我们可以确定聚焦镜高度，当聚焦镜高度为 1165 mm 时，光屏上像斑中心位置也应当为 1438 mm。具体操作时，我们控制 3 个支撑步进电机运动来调整聚焦镜高度，并观察光斑的升降。实际调试结果：光屏上 1438 mm 处像斑如图 5 所示，表明聚焦镜高度达到指定高度 1165 mm。

接着，调节聚焦镜倾斜 0.55° ，光路图如图 6 所示。调节 3 个支撑步进电机高度，使得聚焦镜倾斜，由于掠入射，所以光束一部分经过镜面准直，直接入射至光屏 1165 mm 处形成准直光斑，另一部分经过聚焦镜反射，水平入射到光屏 1384 mm 处形成反射光斑。由于三点调节，如果并排的两个步进电机高度不相等时，那么聚焦镜镜面将产生微量的扭曲，镜面的扭曲可以通过光屏上的准直光斑形状来判断：如图 7(a)、7(c)中，当镜面扭曲时，准直光斑将偏离中心，只有准直光斑左右对称时才表明聚焦镜姿态合适（如图 7(b)）。实际操作时最终光斑形状如图 8 所示：反射光斑与准直光斑中心位于同一铅垂线上。

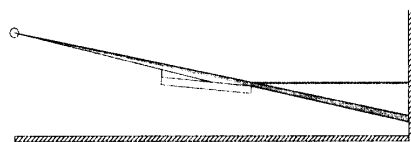


图 6 聚焦镜倾斜度调节光路图

Fig.6 Optical path for adjusting of cylindrical mirror's gradient

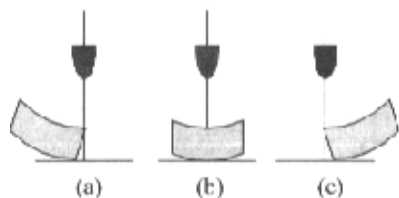


图 7 光屏上光斑相互位置示意图

Fig.7 Different relative positions of the focused beam spot



图 8 光屏上光斑

Fig.8 Focused beam spot on the screen

4 聚焦镜成像规律测试

在进行聚焦镜成像规律测试时,我们采用激光模拟同步辐射光,该模拟光源如图 9 所示。激光发生器产生波长为 682.3 nm 的平行光束,经焦距为 1.1m 的凸透镜聚焦,在焦点处放置孔径为 0.3 mm 的小孔,光束经小孔后产生发射角约为 5—6 mrad 的光束,这条光束以 1.1° 的角度入射至聚焦镜,下游光路和图 4 所示相同。

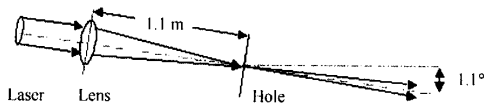


图 9 模拟激光产生图

Fig.9 Schematic of the simulated laser source

该激光光束物理尺寸与同步辐射光基本相同,我们用此光束模拟经反射镜反射后的在线同步光,通过观察测量经聚焦镜聚焦反射出的水平光束在光屏上所成的像斑,从而定性地分析压弯机构的压弯性能,并摸索出压弯聚焦规律,为在线调试提供参考。

由于这种光路产生的激光光束经小孔后强度减弱,所以我们选择在夜间进行操作,这样光屏上光斑变化过程清晰可见。在测试前压弯机构完全放松时,光屏上反射光斑如图 10 所示。测试开始时,纪录初始状态时压力传感器读数,并初始化压弯电机,在压弯机构控制程序中选择手动输入模式,控制压弯电机运动,每次输入 5000 步 (0.25 mm)。每次电机运行结束,纪录压力传感器读数,观察光屏上光斑变化规律。

测试中我们发现随着压弯电机运行,光屏上光斑尺寸逐步聚焦缩小、亮度变强,当电机运行至五万步左右时光束聚焦于 28.50m 处,光屏上光斑已经缩小至一亮点 (见图 12),光束在焦点前后光斑如图 11、13 所示。之后,我们又压弯运行了 10000 步,结果聚焦点明显前移 (焦距缩短)。

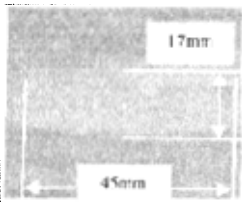


图 10 镜子松弛状态距光源 28.50 m 处光斑

Fig.10 Focused beam spot on the screen (at 28.50 m, before loading)

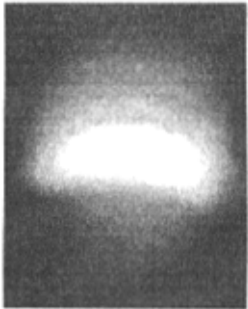


图 11 压弯五万步后距光源点 26.50m 处光斑

Fig.11 Focused beam spot on the screen (at 26.50m, before loading)

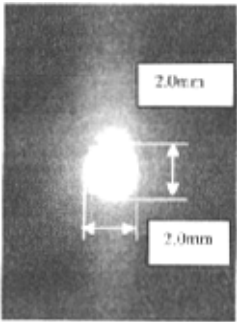


图 12 压弯五万步后距光源点 28.50 m 处光斑

Fig.12 Focused beam spot on the screen (at 28.50 m, after loading)



图 13 压弯五万步后距光源点 30.50 m 处光斑

Fig.13 Focused beam spot on the screen (at 30.50 m, after loading)

当压弯电机压弯运行至 60000 步后,我们停止压弯,然后反向运行 (放松) 压弯电机,每次恢复 5000 步,并纪录压力传感器读数,直至完全放松。测试中发现:随着聚焦镜放松恢复,光束聚焦点逐步后移,当完全放松时,光束几乎平行。如此反复压弯恢复压弯机构 (总行程 50000 步),观察光屏上光斑变化规律,并记录测试数据。

分析测试结果表明:该压弯机构压弯性能良好,当压弯电机压弯运行 50000 步左右时,光束聚焦于 28.50 m 处;并且观察多次光斑变化过程,可看出光斑按一定规律稳定聚焦,并且最终聚焦处相同。图 14 是根据测试数据绘制的压弯机构压弯恢复测试曲线。从图中可看出,该机构压弯、放松过程具有一定规律、稳定、重复性好。在图中我们也发现压弯与放松过程之间存在一定的延迟性。为此,我们多次进行实验测试,结果发现造成这种现象原因是:每次压弯或放松运行后,精度在微米量级的压弯机构需要一定时间释放扭转应力才能达到稳定状态,而由于时间限制,我们在测试时,每次当运行一结束就纪录压力传感器读数,所以相同位置时压力读数有所延迟。

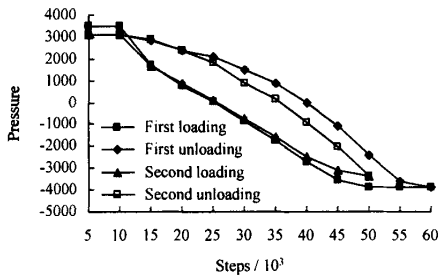


图 14 压弯机构压弯恢复测试曲线图

Fig.14 Testing curve of the bender's loading and unloading movement

5 小结

经过反复多次测试,我们可以定性地对该机构

做出以下结论:该聚焦镜压弯机构运行稳定,各项参数指标均达到设计要求;该机构聚焦性能满足实际实验需要,焦点处光斑缩放比达到几百倍;压弯机构对聚焦镜压弯达到微米量级分辨率;聚焦镜压弯机构压弯放松重复性好。虽然由于实验条件限制,我们未能定量地分析该机构性能,但是从测试结果我们可以看出该机构性能完全可以满足实际实验需求。

本文所介绍的测试方案存在许多可以改进的地方,例如可以采用 CCD 获取光斑信号传输给计算机,计算机将聚焦前后的光斑进行图像处理,从而定量地分析该机构聚焦性能;压力传感器信号也可直接传输给计算机,存储在数据库中,并由计算机控制压弯放松过程,同时进行实时监控,减少人为误差。

参考文献

- 1 夏绍建,朱佩平,崔明启.中能 X 射线光束线技术设计报告,BSRF-3B3 工程项目组,2001
XIA Shaojian, ZHU Peiping, CUI Mingqi. Design Report of BSRF-3B3 Beamline. 2001
- 2 刘绍义,徐朝银,等.核技术,2001,24(7): 571—574
LIU Shaoyi, XU Chaoyin, et al. Nuclear Techniques, 2001, 24(7): 571—574
- 3 徐朝银,等. X 射线衍射和散射光束线的环面聚焦镜设计,全国第二届同步辐射学术年会,1999
XU Chaoyin, et al. Design of the Toroidal Focusing Mirror for the XRD Beamline, unpublished (1999)

Testing of four-point bender for cylindrical mirror of BSRF-3B3 beamline

ZHU Yi¹ FU Yuan¹ WANG Naxiu¹ XIA Shaojian¹ ZHU Peiping² Zhou Sizhong³

¹ (Shanghai Institute of Applied Physics, Shanghai 201800)

² (Beijing Synchrotron Radiation Laboratory, Beijing 100039)

³ (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710068)

Abstract The toroidal mirror coated with nickel on the fused silica substrate is an important part at the BSRF-3B3 beamline, which focuses a beam of synchrotron radiation from the bending magnet on the sample in both vertical and horizontal directions, and a four-point bender is used to bend the mirror. In this paper, a new method to test the four-point bender is introduced. Using a laser beam instead of a beam of synchrotron radiation, we have tested the performance of the four-point bender, and groped for the imaging rule by observing images of the beam focused.

Key words Beamline, four-point bender, Imaging

CLC TL505