

文章编号 1004-924X(2003)04-0359-04

BEPC 束测系统同步光引出镜设计

温 利^{1,2}, 夏绍建², 周仁魁¹, 罗长洲¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068;
2. 中国科学院 上海原子核研究所, 上海 201800)

摘要:根据北京正负电子对撞机(BEPC)改造对同步光束流测量系统提出的最新性能指标,提出了全新的同步光引出镜的设计方案。该引出镜采用 GidCop 作为基底材料,可引出波长 210~488 nm 的同步光,成像质量可靠,能承受 7.8 W/mm² 的高热负载,能够在原位进行准直、维护以及更换,其真空室结构与两端相邻的真空室结构相吻合,静态真空度优于 6.7 × 10⁻⁷ Pa,无直接的水-真空焊缝。该同步光引出镜设计方案将应用于 BEPC 储存环改造。

关键词: BEPC; 同步光; 束流测量; GidCop; 高热负载

中图分类号: TM383.6 **文献标识码:** A

Design of SR extraction mirror for BEPC synchrotron light measurement system

WEN Li^{1,2}, XIA Shao-jian², ZHOU Ren-kui¹, LUO Chang-zhou¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068, China;
2. Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The design of a SR extraction mirror for BEPC synchrotron light measurement system is presented and discussed in detail according to the latest request. The mirror employs GidCop as its substrate can extract synchrotron light at 210~488 nm with reliable image quality. It can withstand a hot load of 7.8 W/mm², and be collimated and maintained or replaced without leaving its position, the static vacuum being better than 6.7 × 10⁻⁷ Pa.

Key words: BEPC; synchrotron light; beamline measurement; extraction mirror

1 引言

加速器束流测量系统对于优化机器参数、保证加速器正常运行十分重要,是加速器物理学家和调束人员的“眼睛”。利用同步光进行束流测量具有以下优点:(1)电子束团在储存环内接近光速运动,同步光脉冲的长度及横截面尺寸几乎同电子束团相同^[1];(2)采用同步光测量束流截面,对运动着的束流无任何阻拦,能准确、真实地反映束团中的电荷分布,能直接获得电子束团的时间结

构,便于研究束流纵向和横向不稳定性及相干振荡^[2];(3)采用同步光测量束流强度,由于自然的光电隔离,抗干扰能力强,灵敏度很高;(4)对于储存环工作在不同能量模式时,具有同样稳定的监测效果^[3]。

2 BEPC- 同步光束测系统的描述

北京正负电子对撞机(BEPC-)是一台用

于高能物理实验及同步辐射应用研究的大型实验装置。BEPc- 除了保持目前储存环 区和 区 B10 处的两个同步光测量点外,还将在 区和 区的外环各增加一个同步光测量点,该测量点位于束流色散大的地方,以便测量束流能散度。现有的两套同步光束测系统也要进行改造以满足 BEPC- 的要求。新设计的同步光束测系统原理如图 1 所示。

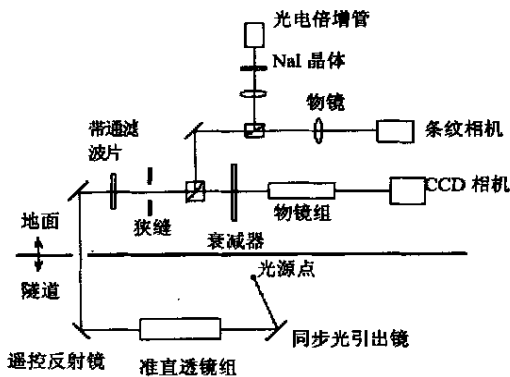


图 1 BEPC 同步光束测系统原理图

Fig. 1 Schematic optical path of BEPC beamline measurement system

该系统的测量原理如下:来自光源点的同步光在引出镜表面形成被测光斑,由准直透镜组将光束准直为平行光,并中继成像在遥控反射镜上,平行光束经窄带滤波片和可调狭缝后^[4],由分光棱镜分为两路:一路经衰减器后由接收透镜组成像在面阵 CCD 靶面上,进行束团横截面尺寸测量、束团强度测量和束团位置监测;另一路由物镜成像在条纹相机狭缝处,进行束团纵向长度的测量,该光束的另一支路由物镜成像在光电倍增管的象面上,进行弱电流测量^[5]。

3 同步光引出镜设计

同步光引出镜将同步光反射并引出储存环,位于 BEPC 储存环 区和 区 B10 弯转磁铁出口端 1 355.4 mm 处,距光源点 1 723.35 mm。

BEPC- 储存环改造后,束流强度大幅度增加,同步光功率密度也大大提高。在垂直照射时,同步光引出镜要承受很高的热负载,由此产生的表面形变将影响成像的质量。为了缓和镜子的热变形及氧化,对镜子的材料、冷却方式、结构、光学

表面加工精度等都要给予细致的考虑,并进行严格的热分析计算。因为相对于可见光和真空紫外光来说,X 射线是造成同步光引出镜发热的主要原因,因此有效地屏蔽、吸收 X 射线可以极大地降低同步光引出镜的热变形^[6]。

3.1 总体要求

BEPC- 同步光束测系统的总体设计参数如下:

储存环能量:1.89 GeV

流强:1 A

二极磁铁曲率半径:10.345 m

辐射功率:18 W/mrad

辐射功率密度:7.8 W/mm² (@1 723.35 mm, ~46°入射)

监测光波长:210~488 nm

监测光自然半张角:1.68~2.24 mrad

光源点束流包络:~2 mm(H) × 0.2 mm(V)

轨道偏移:±10 mm

同步光引出镜的设计要遵循以下原则:

·可靠的成像质量

·能承受高热负载

·能原位准直、维护、更换

·其真空室结构与两端相邻真空室吻合

·静态真空度优于 6.7×10^{-7} Pa

·尽可能小的阻抗

·无直接的水-真空间焊缝

以上原则涵盖了三个基本范畴:光学要求、真空要求和机械要求。

3.2 光学设计要求

引出镜成像表面镀 0.1 mm 厚的无电性镍(9%硫磺,180 池温)。可靠的成像是以严格的表面质量为前提的,其中包括表面形状、倾斜误差以及表面粗糙度。镜面抛光后其表面形状以平面度表示应保证优于 $1/40$ (均方根),用氦-氛激光干涉仪检测;倾斜误差不能大于 $5 \mu\text{rad}$ (均方根);表面粗糙度应保证小于 1 nm(均方根)。

3.3 真空要求

对于 6.7×10^{-7} Pa 的超高真空系统,BEPC- 要求选用特定的材料,其洁净度标准应相当于 100 K 级洁净室,并且无直接的水-真空间焊缝,只有这样才能确保真空系统的可靠运行。如果需要,冷却水管的焊接或钎焊可采用空气层使之与真空系统隔离。

3.4 机械设计要求

同步光引出镜的机械设计应满足以下要求:

1) 有效地处理高热负载,以确保成像质量;2) 真空室的过渡要尽可能减小阻抗;3) 镜子的安装调整精度要保证同步光的接收、传送。

3.4.1 材料选择

对于承受热负载的镜子,其基底材料的选用主要取决于材料的三个特性:热传导系数、热膨胀系数和屈服强度,另外也必须考虑材料的加工工艺要求,如材料焊接、机加工性能及光学性能等。

GidCop(用精细氧化铝粒子渗透强化的铜)、钼、铍和铜都是考虑选择的对象。钼有很高的屈服强度,热膨胀系数低,但加工、焊接困难;铍具有相对低的热膨胀系数,但屈服强度低,且机加工时需特殊处理;铜具有良好热传导性(优于GidCop),但与GidCop相比,铜钎焊后的屈服强度很低。

综合考虑材料的以上特性,同步光引出镜的基底材料最终选用GidCop,因其具有相对高的热传导系数和屈服强度,并且易于加工,其机械性能如表1所示。

表 1 GidCop 的机械性能

Tab. 1 Mechanical properties of GidCop

热传导系数	365 W/(m·°C)
热膨胀系数	$1.66 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
屈服强度(1hr @1 000 °C)	303 MPa
弹性模量	131 GPa

3.4.2 引出镜结构设计

引出镜表面尺寸的确定考虑了引出镜距光源点的距离、辐射光的发散角、光源点束流包络、束流轨道偏移、光斑形状、相邻真空室的屏蔽以及安装余量等因素,最终确定镜面尺寸为 $35 \times 35 \text{ mm}^2$ 。

引出镜对所吸收热量的缓释是结构设计的关键。在热功率、光入射角、材料及表面光洁度已经确定的情况下,水冷结构将直接影响引出镜的温度梯度、应力及表面变形,最终决定成像的质量。用ANSYS进行有限元热分析和结构分析,帮助优化镜子形状、冷却水道数量、内径、长度、深度等结构参数。最终得到的最佳设计为:镜子形状为中空长方体,4条管径为3 mm的纵向平行水冷通道,水冷通道距镜子成像表面3 mm。图2所示为该结构的ANSYS分析图,分析中使用的参数为:功率密度 5 W/mm^2 ,对流换热系数 $0.8 \text{ W/(cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$,冷却水温度 35°C ,冷却水流速 3 m/s 。虽然该结构

的最大变形为 0.344 mm ,但其受光表面的相对变形量最小,为 $3.8 \mu\text{m}$ 。

冷却通道从镜子背面加工,然后焊上盖板,密封焊缝直接与大气相通,避免了水-真空空间焊缝的直接过渡。

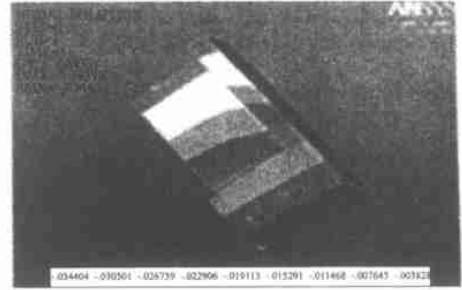


图 2 引出镜的 ANSYS 有限元分析

Fig. 2 FEA of SR extraction mirror

3.4.3 引出镜组件

镜面与光轴的夹角为 $45^{\circ}55'48''$,由引出镜到光源点的距离及后续遥控反射镜的尺寸、位置决定。遥控反射镜距光源点 2228 mm ,当束流偏移 10 mm 时,要在遥控反射镜上接收到引出镜的反射光斑,引出镜与光轴夹角有最大为 36.44° 的调整余量。

减小阻抗的措施是在同步光引出口一侧焊有不影响同步光引出的过渡网,引出镜一侧须与相邻真空室的尺寸、结构相匹配。

引出镜组件按设计要求加工、焊接,保证与CF63法兰的夹角。与真空室连接时用激光进行离线准直,调整达到设计指标,保证引出镜与真空室中心线的距离及夹角,并且引出镜不能进入该处的束流包络。整个部件安装到储存环上时,用部件两端的CF150法兰上的定标进行就位准直。引出镜组件总体结构如图3所示。

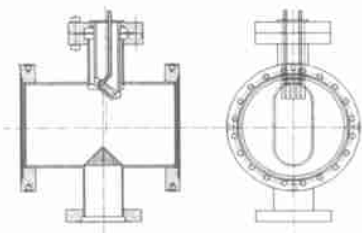


图 3 同步光引出镜总体结构

Fig. 3 SR extraction mirror assembly

4 结束语

概括了同步光束流测量的特点,简单描述了 BEPC- 同步光束测系统,根据 BEPC 改造对同步光束流测量系统提出的最新指标,提出了同步光引出镜的设计方案,并对方案进行了论述。该

引出镜采用 GlidCop 材料,可引出波长 210 ~ 488 nm 的同步光,成像质量可靠,能承受高热负载,能原位准直、维护、更换,其真空室结构与两端相邻真空室吻合,静态真空度优于 6.7×10^{-7} Pa,无直接的水-真空间焊缝。本文的同步光束测系统同步光引出镜设计方案将应用于 BEPC 储存环改造。

参考文献:

- [1] IEIRI T. A real time bunch - length monitor using the beam spectrum and measurements of bunch lengthening [J]. *Nucl Instrum Methods*, 1993,329:371-380.
- [2] OBINA T, KASUGA T, TOBIYAMA M, *et al*. Measurement of the longitudinal bunch structure in the photon factory positron storage ring with a photon counting method [J]. *Nucl Instrum Methods*, 1995, 354(1):204-214.
- [3] HOFMANN A, MEOT F. Optical resolution of beam cross-section measurement by means of synchrotron radiation [J]. *Nucl Instrum Methods*, 1982,203: 483-493.
- [4] MITSUHASHI T, FLANAGAN J W, HIRAMATSU S. Optical diagnostic system for the KEK B-factory [A]. *Proceedings of EPAC 2000, Vienna* [C]. Austria,2000,1783-1785.
- [5] FLANAGAN J W, HIRAMATSU S, MITSUHASHI T. Optical beamlines for the KEKB - factory synchrotron radiation monitors [A]. *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference* [C]. New York, 1999,2120-2122.
- [6] 温利,夏绍建,姚多舜,等. BEPC 储存环同步光束流测量光学系统[J]. *光学 精密工程*, 2002,10(5):513-517.
WEN L, XIA S J, YAO D S, *et al*. Design of the synchrotron light measurement system for BEPC storage ring[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(5):513-517.

作者简介:温 利(1971 -),男,山东人,1997年毕业于中国海洋大学,获硕士学位,现在中科院西安光学精密机械研究所攻读博士学位,主要从事同步辐射光束线设备及技术研究。E-mail: wenli @ssrc. ac. cn