

上海光源储存环光子吸收器布局设计

陈丽萍 蒋迪奎 殷立新 徐毅 陈永林 卢裕

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 电子束经过储存环弯转磁铁发生偏转时,产生总功率~435 kW 的同步辐射光,其中仅有一小部分被引入光束线、实验站,其余须在储存环中被光子吸收器吸收处理,并准直引出光束。本文对上海光源(SSRF)储存环同步辐射光的处理方法进行了讨论,并介绍了光子吸收器的布局、结构、性能及运行状况。

关键词 加速器,同步辐射,热负载,光子吸收器

中图分类号 TL76

上海光源(SSRF)由 150 MeV 直线加速器、3.5 GeV 增强器和 3.5 GeV 储存环组成。电子储存环周长 432 m,有 40 块弯转磁铁,电子束经过这些弯铁时,产生总功率~435 kW 的同步辐射光(SR),其中~15%被引出,供光束线和实验站使用,大部分在储存环中吸收处理。距光源点 2 m 处的垂直入射表面上的热负载功率密度,高达 50 W/mm²。

由于储存环同步辐射光的高功率、高功率密度特性,在有限空间内安全、有效地吸收、转移同步辐射热负载,是储存环物理设计、真空系统设计和安全联锁设计中的重要环节。本文介绍储存环同步辐射吸收基本方案、光子吸收器的布局、结构、性能,以及在线运行情况。

1 储存环光子吸收器布局

1.1 同步辐射吸收方案

国内外同步辐射装置上处理同步光的方式有:(1)分布式吸收同步光,即在真空室侧壁上设计水冷结构吸收同步光功率,如合肥光源等;(2)集中式吸收同步光,即在储存环里设置独立的水冷光子吸收器,如瑞士 SLS^[1]等;(3)同时采用上述两种吸收器,如英国 Diamond^[2]、德国 ANKA^[3]等。

在同期建设的第三代光源中,上海光源电子能量高、周长短,在尽量预留较长直线节的前提下,磁聚焦结构紧密,磁铁间空间狭小,给同步光吸收器布局设计带来一定难度。采用真空室侧壁分布式吸收同步光法,确可解决空间狭小、难以布置独立水冷光子吸收器等问题,但 SSRF 对束流位置稳定性要求较高,侧壁分布式吸收器有诸多不利因素:(1)同步光照到真空室体上引起的温升,会影响真空

室的机械稳定性;(2)光致解吸出气区域增大,在束流通道截面小的储存环中,真空泵使用效率降低;(3)沿环分布的反射光子和次级粒子将干扰束流元件的测量结果;(4)大面积的不锈钢和无氧铜的复合结构,增大了制造工艺难度。综合考虑相关因素,我们的方案是,采用独立分布的光子吸收器,吸收不用的弯铁辐射光、并准直引出光束。

1.2 光子吸收器布局设计原则

一个储存环标准单元有 2 块弯转磁铁、10 块四极磁铁、7 块六极磁铁和 7 块校正磁铁(图 1)。磁铁占据的空间无法布置吸收器,故放置吸收器的空间十分有限。同时,吸收器的布局还需兼顾如下几点:

(1)吸收器尽量远离光源点,以降低表面功率密度,从而降低表面温度,提高吸收器使用可靠性和寿命。

(2)吸收器放置需考虑布泵的空间,集中、有效地处理光致解吸气载。

(3)须考虑束流轨道偏移及真空室、吸收器制造安装误差,保证下游非热吸收真空元件处于光阴影区。

(4)吸收器尽量不插入束流通道,以确保真空室束流通道的连续性,降低真空阻抗。若定须插入,则应考虑吸收器端部或真空室局部平滑过渡结构的设计,并确保电子束不会打到吸收器或真空室上。

(5)同步光引出光路设计应遵循如下原则:(a)一束引出光由一个吸收器限制;(b)插入件产生的同步光不直接照射吸收器,安全引出;(c)尽量简化吸收器结构。

(6)在吸收器接收的同步光总功率合适的前提下,尽量减少吸收器数量,降低成本。

第一作者:陈丽萍,女,1975 年出生,1998 年毕业于东北大学,现为上海应用物理研究所博士研究生,专业:真空设备与技术

收稿日期:2008-11-07,修回日期:2009-03-11

(7)尽量统一吸收器结构，减少设计工作量和备品量；尽可能采用从真空室侧面 CF63 法兰装入的吸收器，其长度和重量设计要有利于安装并减少其变形。

(8)在磁铁间放置吸收器，减小真空室宽度，在

有条件设置真空室分段之处(图 1 的 PAB-01、PAB-03、PAB-04、PAB-07 和 PAB-08 后)，简化真空室结构，降低真空室加工难度。

(9)吸收器结构方便装拆。

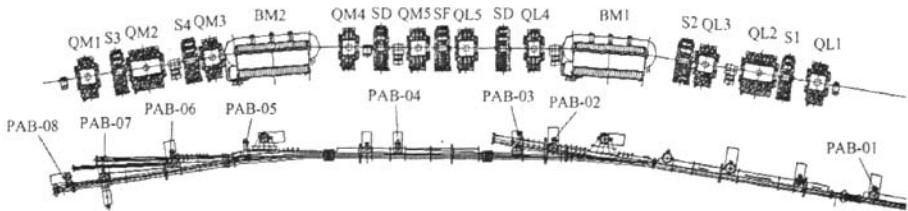


图 1 标准单元磁聚焦结构和光子吸收器布局
Fig.1 Lattice and layout of the photon absorbers in one standard cell of the storage ring at SSRF.

1.3 标准单元光子吸收器布局

在储存环物理设计、磁铁初步结构设计及真空系统方案设计基础上，依据吸收器布局设计原则，进行了储存环单元吸收器布局设计。储存环由 20 个单元组成，分 A、B、C 三种类型，不同类型单元的吸收器布局略有不同；根据引出光的不同要求，个别吸收器的结构在相同布局的单元中也有差别(表 1)。

PAB-02 光子吸收器离光源点最近(1.521 m)，位于弯铁 BM1 与 BM1 后第一个四极铁之间；照到该吸收器上的同步光除来自本单元弯铁外，还有部分来自上一个单元的弯铁 BM2(图 2)；该吸收器接收的同步光热负载平均线功率密度(45.67 W/mm)和平均面功率密度(103.54 W/mm²)最大。PAB-06 光子吸收器接受的同步光热负载功率最大(5482 W)，但由于离光源点较远，表面功率密度不是最大。

表 1 标准单元光子吸收器参数(3.5 GeV 300 mA)
Table 1 Parameters of the photon absorbers in one standard cell the storage ring at 3.5 GeV 300 mA.

吸收器 Absorbers	离光源点距离/m Distance to the source	热负载功率 Power/W	平均线功率密度/W·mm ⁻¹ Average linear power density	垂直入射平均面功率密度/W·mm ⁻² Average normal-incidence power density
PAB-01	8.691	435	8	3.17
PAB-02	14.35	125	4.8	1.153
	1.521	2078	45.67	103.54
PAB-03	1.78	4896	38.3	74.2
PAB-04	3.594	1762	19.35	18.57
PAB-05	6.273	1086	11.08	6.1
PAB-06	2.228	5482	31.96	49.46
PAB-07	2.865	2888	24.05	28.95
PAB-08	3.342	652	20.76	21.42

PAB-02 光子吸收器设计有同步光引出口，限制插入件光引出通路，该插入件光还经过 PAB-03 上的开口(图 2)；PAB-06 上的两个同步光引出口分别限制以弯铁 1°和 3.1°为中心的两条光引出通路。为避免高功率密度的插入件光直接照射到该吸收器上，在引出光口尺寸确定时考虑了可能的最大束流轨道偏移^[4]。

为集中有效地抽除动态光致解吸气载，每个吸收器位置都设置了大抽速泵(图 2)，PAB-02 的正上

方设置了 1000 L/s 的钛升华泵，正下方设置了由 200 L/s 离子泵和一个非蒸散型吸气剂(NEG)组件组成的复合泵。该处泵的设置正好利用弯铁和四极铁的空间，但该处有校正铁，复合泵只能偏心设置；有的吸收器的正上方或正下方虽无空间设泵，但可利用邻近的泵抽除其的动态解吸气载，如图 1 中位于弯铁 BM2 处的光子吸收器 PAB-05。

光子吸收器 PAB-01、PAB-03、PAB-04、PAB-07、PAB-08 吸收体端部都不同程度地伸至 13 mm 高光

束狭缝处。这些吸收器位置的共同点,就是后续真空室都通过 CF100 或 CF150 法兰收口,因此要求这些吸收器阻挡尽可能多的光(图 2, PAB-03 伸进光束狭缝 17 mm)。由于各吸收体没有插入水平 ± 34 mm 的束流室,不破坏束流通道的连续性,因此不会增加束流通道的阻抗(图 3 的 PAB-04)。

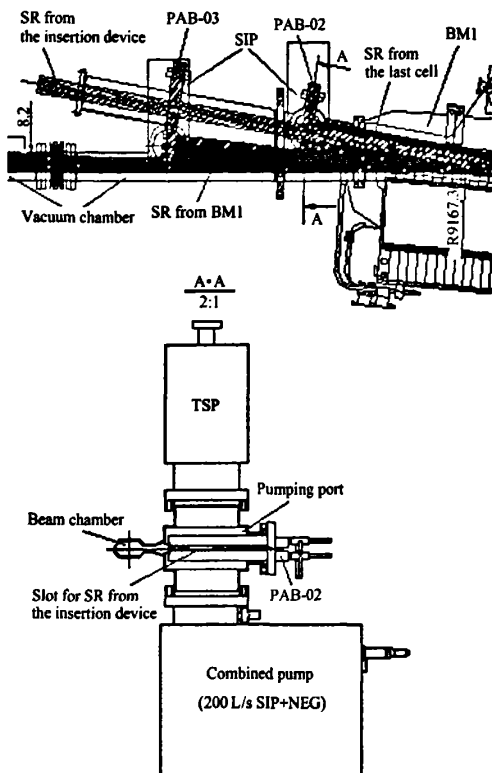


图 2 BM1 后光子吸收器布局和同步辐射分布
Fig.2 Partial drawing of the photon absorbers and the SR distribution after BM1.

光子吸收器 PAB-01、PAB-02、PAB-03、PAB-04、PAB-06 都通过泵站侧面的 CF63 接管法兰装入真空室。PAB-02、PAB-03 和 PAB-06 吸收体端部都止于位于抽气前室的泵站直管,吸收体尺寸整体一致(图 2);吸收器 PAB-01、PAB-04 端部将有部分在 13 mm 高光束狭缝内,高度为 10 mm,由于离光源点远,功率密度低,局部可以无水冷(图 3)。

储存环运行时,电子束流轨道与理想轨道存在一定偏差。大流强运行时,须启动束流轨道联锁保护系统,为真空系统提供保护。联锁保护域值为:

(1) 直线节两端束流位置探测器: $X_{\max} = \pm 2.5$ mm, $Z_{\max} = \pm 0.5$ mm。

(2) 弯铁两端束流位置探测器: $X_{\max} = \pm 2.5$ mm, $Z_{\max} = \pm 1.0$ mm。

束流轨道会产生一定偏移,真空室、吸收器也有安装误差,为使同步光不照到非挡光真空元件上,吸收器布局使两相邻吸收器水平方向有 10 mm 的挡光重叠区,则同步光穿过真空室时,在水平方向上离真空内元件最小距离 > 8 mm(图 2 为 8.2 mm)。

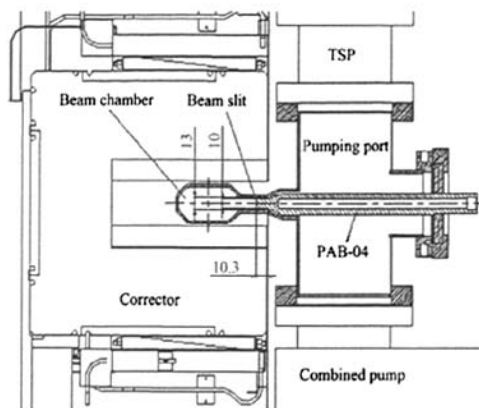


图 3 校正铁、真空室与吸收器 PAB-04 图示
Fig.3 Schematics of the corrector, vacuum chamber and the PAB-04 photon absorber.

1.4 特殊直线节光子吸收器布局

储存环有 4 个 12 m 的长直线节、16 个 6.5 m 的短直线节,其中 1 个长直线节放置超导高频腔、1 个长直线节放置注入系统。由于在高频和注入长直线节中设备特殊且复杂,吸收器布局需要特别设计。

1.4.1 超导高频直线节光子吸收器布局

超导高频直线节安装三台超导高频腔(SC)组件,腔间由过渡段、阀门、波纹管等相连,束流室截面为不同直径的圆形,设计中采用特殊结构的水冷真空室壁进行挡光。

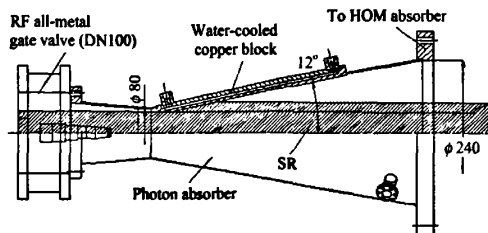


图 4 超导高频直线节光子吸收器挡光示意图
Fig.4 Schematics of the photon absorber blocking the SR in the straight section of superconducting RF.

超导高频腔工作在低温状态,对真空环境要求很高,需单独进行老练,因此每个高频腔两端都需设置高频屏蔽全金属门阀。高频腔出入口都是 $\phi 240$ mm 的大口径,考虑门阀重量、价格及束流室阻抗,选用 DN100 mm 的比较合适。为了门阀的安全,必须在其上游设置吸收器挡光(图 4)。

由图 5，每个高频腔前都设有光子吸收器。第一个高频腔前的吸收器结构和其余单元同样位置的吸收器相同(如图 1 中的 PAB-08)，放置时，由于挡光需要，伸入束流室 6 mm，束流室局部设计平滑过渡结构以保持束流通道连续性。另三个吸收器位

于每个超导腔组件下游(图 4)。吸收器采用室壁型结构，即在过渡锥管侧面钎焊 12°倾斜的水冷无氧铜条来挡光，其中最大吸收功率仅 200 W。吸收器下游的真空元件离同步光最近距离都大于 10 mm，以确保安全。

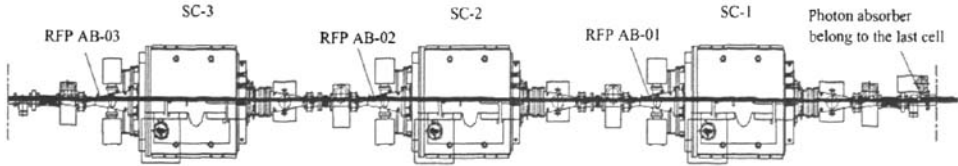


图 5 高频直线节光子吸收器布局及同步辐射分布图
Fig.5 Layout of the photon absorbers and the SR distribution in the RF straight section.

1.4.2 注入直线节光子吸收器布局

注入直线节元件为一块切割磁铁(在切割铁真空室里)、四块冲击磁铁(包括陶瓷真空室)、一些束测元件及泵站真空室等。图 6 为注入直线节光子吸收器布局图，整个直线节共设置 6 个吸收器，以保护陶瓷真空室等设备不受同步光照射。由于空间限制，第一个吸收器 ZRPAB-01 设计成特殊结构无氧铜真空室，利用其过渡侧面挡光(图 7)，根据注入束流物理要求，该直线节中束流通道截面为水平 90 mm、高度 26 mm 跑道型，在标准截面吸收器和下

游跑道型截面真空空间设置有截面平滑过渡段。后续五个吸收器分别位于五个泵站处，均采用从侧面 CF63 法兰装入真空室的独立结构，各吸收器结构、尺寸相同，由于挡光需要，五件吸收器都不同程度地插入束流通道内，在真空室局部束流通道设计有平滑过渡结构。

整个注入直线节光子吸收器在 3.5 GeV、300 mA 时处理总功率 303 W，各吸收器上沉积的热负载很小。

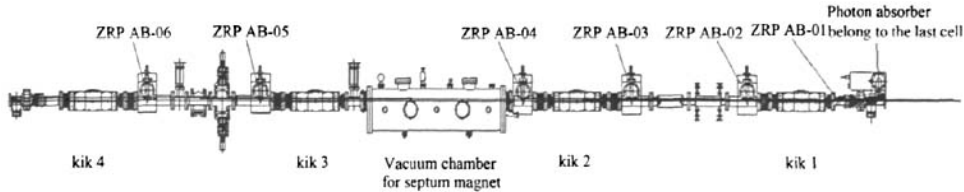


图 6 注入直线节光子吸收器布局图
Fig.6 Layout of the photon absorbers in the straight section for injection.

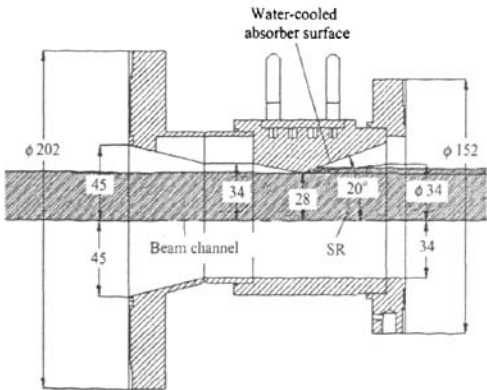


图 7 注入直线节光子吸收器 PAB-01 挡光示意图
Fig.7 Schematics of the PAB-01 photon absorber in the straight section for injection.

2 储存环光子吸收器结构

储存环光子吸收器在线安装 177 件，依据尺寸和结构的不同，共 24 种，归三大类：侧壁光子吸收器(图 8a)、水平光子吸收器(图 8b)、特殊光子吸收器(图 8c)。侧壁光子吸收器是指从抽气前真空室侧面法兰装入的吸收器；水平光子吸收器是指从抽气前真空室上方法兰装入的吸收器；特殊光子吸收器是指和真空室做成一体、利用真空室上的过渡侧面挡光的光子吸收器。

整个储存环共有侧壁吸收器 129 件，其中单片型侧壁吸收器 65 件，双片型侧壁吸收器 64 件。图 8(a)显示的是双片型光子吸收器。双片吸收器的上下两片无氧铜吸收体的吸收面上设计了互相咬合的齿型结构；正常挡光时，光交替照到上下两片的齿

上,有利于功率稀释、降低反射光及释放热应力。在吸收体内直接加工冷却水通道进行冷却。侧壁吸收器大部分位于标准单元和直线节。

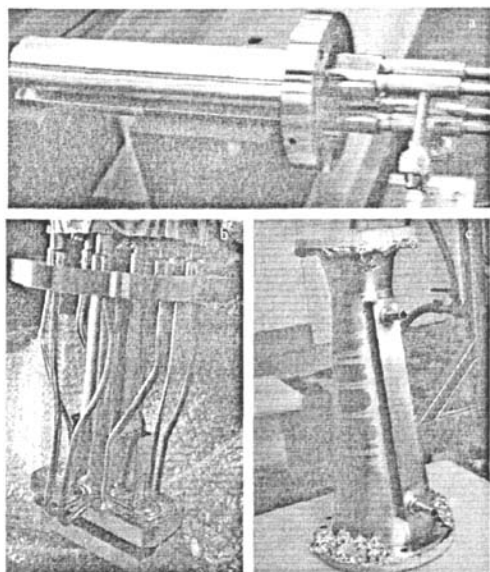


图 8 储存环光子吸收器结构
a.侧壁式吸收器, b.水平吸收器, c.特殊吸收器
Fig.8 Structure of the three types of photon absorbers in the storage ring.
a. wall-mounting absorber, b. horizontal absorber, c. special absorber

水平光子吸收器共 40 件,位于每个单元的最后两个吸收器位置(如图 1 中的 PAB-07 和 PAB-08)。吸收体部分由上下两片互相咬合的齿型结构无氧铜块通过螺钉联接形成。通过在吸收体背面钎焊冷却水管道进行冷却。

整个储存环共有 8 件特殊光子吸收器,主要用于超导高频直线节、注入直线节及插入件直线节。

储存环光子吸收器的结构设计考虑了多种因素,如功率负载的稀释、冷却效率、焊接结构、真空特性等,同时用有限元程序进行了热与结构的分析计算,以确保设计的可靠性。

由于该光子吸收器处于储存环超高真空系统,制造过程中按规范严格执行每一道工序,并对首件进行了真空性能测试,表面出气率为 $9.5 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,无污染。

在线安装时,光子吸收器与其所在的大型真空室作为一个整体进行调节,吸收器的机械位置作为准直的一项重要参数进行控制。在储存环上吸收器的最终位置精度达到水平 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 、垂直 $\pm 1 \text{ mm}$ 的指标,保证了布局设计的实现。

3 光子吸收器在线运行状况

储存环于 2007 年 12 月安装完成并开始调束运行,运行过程中,对每个单元中 PAB-02、PAB-03、PAB-06(图 1)三件吸收器的吸收体上下片各一路冷却水的回水,采用三线制 PT100 测温,温度值可读取监测,并加入联锁保护系统。目前,储存环调束进行到 3.5 GeV 200 mA 阶段,对于水温升最高的 PAB-03,计算冷却水温升为 4.6°C ,实际测出的温升最大为 4.8°C ,最小为 2.5°C ,这与两个因素有关:

(1) 计算时假定吸收器总功率在每一路冷却水上均匀分配,但实际上并不能如此,这与同步光斑在表面的着落位置有关。正常光斑位置时,同一片吸收体上,离光斑近的水路,冷却水温度会高一点,反之,会低一点;光斑位置相对吸收体位置有偏差时,也会造成一片吸收体多挡光,从而造成水温不一致。

(2) 测温探头采用卡箍箍在回水不锈钢管上,实际测出的温度跟卡箍与不锈钢管的贴合程度有关。冷却水的测温还待继续改进,以求最后能得到水温升的准确值,从而判断同步光在吸收器上的位置。

储存环上每个吸收器中的各分水路并联连接,总回水路设置流量开关,可读取流量值,并设置预警和报警联锁,目前各吸收器的实际冷却水流量与设计值基本一致。

储存环机器联锁保护系统包括了每个单元的真空度值。除直线节部分外,每个单元内设置 3 个真空度测量点,其中有两个在光子吸收器附近(图 1 中的 PAB-03 和 PAB-07 处)。储存环动态气载主要来源为光子吸收器吸收体上及附近真空室壁被同步光直接或间接激发出的气体。每个单元内装有真空计的点处,真空最差点在吸收器 PAB-03 位置。图 9 显示了调束初期,在束流能量为 3 GeV、流强为 100 mA 时,一个 B 型单元中光子吸收器 PAB-03 的真空度随束流累积剂量的变化关系。由图 9,束流累积剂量为 1.6 Ah 时,真空度为 $1.86 \times 10^{-6} \text{ Pa}$,随着同步光对吸收体表面的清洗,束流累积剂量为 20 Ah 时,真空度已变为 $2.66 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 。目前,在束流能量为 3.5 GeV、流强为 100 mA 运行时,该单元 PAB-03 位置真空度在束流累积剂量 189.8 Ah 时为 $1.73 \times 10^{-7} \text{ Pa}$,整个单元的平均真空度为 $7.7 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 。

图 10 显示了束流能量 3.5 GeV、累积剂量 203.465 Ah 时,流强从 0~200 mA 时真空度变化相对于一个标准 B 型单元内各吸收器位置的分布,图

中各吸收器处真空度值是通过最近离子泵的离子流换算得到的。真空度变化最大点在直线节的 PAB-01 处(3.68×10^{-7} Pa), 因为该处比别处少了钛升华泵, 如在上方空位加上钛升华泵, 真空度变化将变小; 真空度变化最小点在 PAB-08 处(2.93×10^{-8} Pa), 因为该处离子泵到吸收器处通过了一细长管道, 吸收器处的真空度变化将比泵口处大。因此忽略最大和最小真空度变化处的吸收器, 其余吸收器处真空度变化差异较小, 且基本在 1.33×10^{-7} Pa 附近, 说明吸收器布局比较合理, 吸收器附近有足够空间布泵以及时抽除动态光致解吸气载。

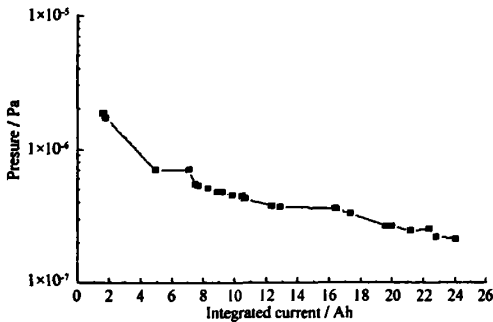


图9 调束初期真空度和束流累积剂量关系
Fig.9 The changes in vacuum at different integrated doses in early stage of the storage ring commissioning.

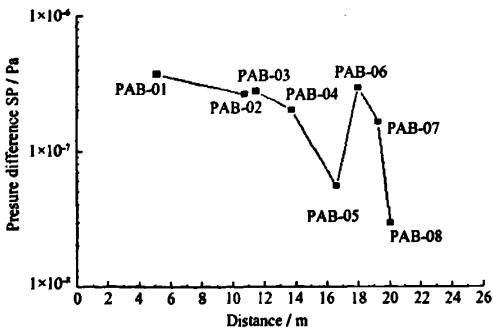


图10 流强为 0~200 mA 时单元内各吸收器附近的真空分布

Fig.10 Pressure distribution nearby the absorbers at beam current of 0~200 mA.

每个单元真空室表面都贴了若干 PT100 测温贴片, 位置在同步光可能会直接照到的区域或光子吸收器附近。这些温度值同样加入机器联锁保护系统, 在温度超过设定值时, 报警踢束。加速器运行时, 真空室表面在光子吸收器附近的温度贴片有明显温升, 主要原因是光子吸收器的散射光照到真空室上; 其余同步光可能直接照到的区域测温贴片即使在

3.5 GeV、200 mA 时也几乎没有温升, 说明同步光没有穿越两相邻吸收器的缝隙漏到真空室上, 光子吸收器布局合理。

光子吸收器散射光在真空室上引起的温升与光子吸收器的结构有关, 在双片的光子吸收器 (PAB-02、PAB-03、PAB-06 和 PAB-07) 附近比较低, 在 3.5 GeV、200 mA 时, 温升不超过 6℃; 真空室上温度比较高的点在单片的吸收器 (PAB-04、PAB-05 和 PAB-08) 附近, 其中 PAB-04 附近最高, 在 3.5 GeV、200 mA 时达到 70℃。储存环运行的最终指标为 3.5 GeV、300 mA, 真空室的最终温度能达到多少有待进一步观察。

4 结论

以 SSRF 储存环物理设计和主体设备结构设计为基础, 在同步辐射吸收和光子吸收器布局设计中, 充分考虑了各相关因素, 确定了合理的设计原则。结合真空系统设计, 完成了储存环光子吸收器布局设计, 并提出了对制造和安装的精度要求。在设备制造和安装中, 通过对工艺过程的严格控制, 保证了定位精度的实现。

目前, SSRF 储存环在 3.5 GeV 能量下实现了 200 mA 束流储存, 真空系统经受了大流强、高功率的初步检验, 运行正常。处于光子吸收器挡光阴影区的真空元件无异常温升, 说明储存环光子吸收器布局合理, 结构设计正确, 制造达到技术指标要求, 在线安装到位, 为 2009 年上海光源正式投入使用创造了条件。

参考文献

- 1 Zelenika S, Kramert R, Rivkin L, *et al.* Mechanical Design of the SLS Storage Ring. Proc. MEDSI 2000, ISSN 1019-6447
- 2 Herbert J D, Malyshev O B, Middleman K J, *et al.* Design of the Vacuum System for Diamond, the UK 3rd Generation Light Source. Diamond Green Book, CCLRC, 2002, 1-3
- 3 Hermle S, Einfeld D, Huttel E. Layout of the absorber for the synchrotron light source ANKA. Proceedings of the 1999 particle accelerator conference, New York, 1999, 1360-1062

Layout of photon absorbers in the SSRF storage ring

CHEN Liping JIANG Dikui YIN Lixin XU Yi CHEN Yonglin LU Yu

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract There are 40 bending magnets in the 432-m storage ring of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). A total power of 435 kW is delivered by synchrotron radiations when the electron beams pass through the bending magnets. Only a small part of the radiation is extracted into the beamlines and the experiment stations, and the rest has to be absorbed and transferred out of the storage ring. Photon absorbers are placed at different points of the storage ring to intercept the unused synchrotron radiation and align the extracted light. In this paper, the radiation treatment method is discussed and layout of the absorbers is described in detail. The structure of the absorbers, the manufacture and assembly, and performance of the absorbers are introduced.

Key words Accelerator, Synchrotron radiation, Thermal load, Photon absorber

CLC TL76