

52.上海光源光束线真空系统

陈明* 刘俊男 刘腾飞 薛松

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

*通讯作者: chenming01@sinap.ac.cn

Vacuum system for SSRF Beamlines

Chen Ming, Liu Junnan, Liu Tengfei, Xue Song

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

Abstract Thirteen beamlines have been built at SSRF. The vacuum system is very important for a beamline. It is designed to transport synchrotron radiation X-ray. In this paper the vacuum system at SSRF will be introduced, including vacuum requirement, design, and pressure test result with and without electron beam current in the storage ring.

Keywords Vacuum system, Beamline, SSRF

摘要 上海光源已建成 13 条光束线。真空系统是同步辐射光束线的重要组成部分。本文介绍了上海光源光束线的真空系统,包括光束线真空要求,设计计算和真空调试结果。

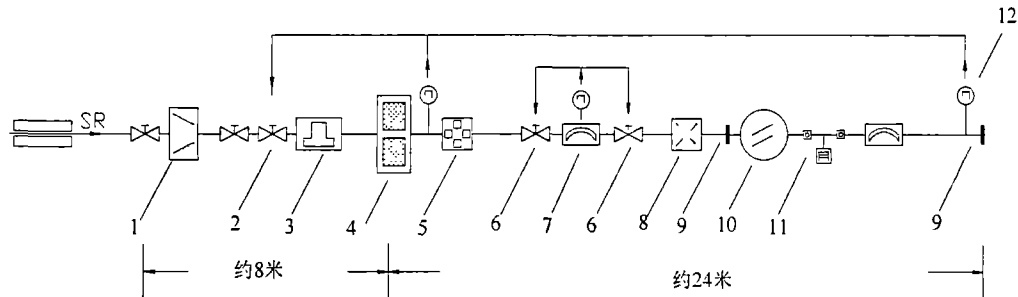
关键词 真空系统, 光束线, 上海光源

上海光源(SSRF)是一台第三代同步辐射装置,电子储存环设计能量 3.5GeV,最大流强 300mA(多束团模式),发射度 3.9nm.rad。储存环有 20 个直线节和 40 块弯转磁铁,预计有 18 个直线节用于建造插入件装置,约 20 块弯转磁铁可用于引出光束,每块弯铁可分别自 1°、3.1° 引出两条光束线,因此共计可建造约 60 条光束线。目前已建成 13 条光束线,16 个实验站。2007 年 SSRF 开始一期 7 条光束线工程的建造。其中 3 条由波荡器(Undulator)引出,2 条由扭摆器(Wiggler)引出,2 条由弯铁(BM)引出。2009 年 4 月光束线陆续调试成功,并向用户开放。2011 年 9 月,完成 BL08Ua 的升级改造项目——软 X 射线干涉光刻分支线站。2013 年,SSRF 完成了梦之线项目和蛋白设施项目的光束线建造。梦之线项目是建设一条基于双 EPU 插入件的宽能段、超高能量分辨率的软 X 射线光束线,实验站有两个:角分辨光电子能谱(ARPES)和光电子显微镜(PEEM)。蛋白项目包含 5 条光束线,其中复合物晶体结构光束线和 X 射线小角散射光束线共用一个前端区,BL01B 为红外光束线,含两个实验站。目前,梦之线项目和蛋白项目的光束线正处于调试过程中。

光束线是一套将同步辐射 X 射线传输至样品的光学、真空系统。真空系统是同步辐射光束线的基础工程,只有在真空环境中运行,光学元件才能够将同步辐射光传输到实验站。真空工程的主要目标就是获得和维持合理的真空度,保证光束线的稳定运行。

一、 光束线布局和真空要求

反射镜和单色器是光束线的关键部件，此外还安装有其他功能部件，如光阑、狭缝和光位置探测器等。如图 1 所示。光束线一般为 30 多米长。



1、光阑；2、快阀；3、安全光阑；4、屏蔽墙；5、狭缝；6、气动门阀；7、反射镜箱；
8、光位置探测器；9、铍窗；10、单色器；11、差分泵站；12、真空规

图 1 光束线布局示意图

由于光束线各部件真空腔体内部均装有元件，如电机、反射镜和支架等，结构复杂且均不相同，因此，光束线的压强分布不可能做到均匀。一般而言，光束线的压强分布需满足以下三个方面的要求：一、光束线与储存环相连，要求接口处与储存环的真空度保持一致，即静态真空（无束流） $5 \times 10^{-8} \text{Pa}$ ，动态真空（有束流）优于 $5 \times 10^{-7} \text{Pa}$ ，残余气体中大分子量成分含量尽量低，CO 应低于 20%^[1]；二、光学反射镜需工作在好于 $5 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 的真空环境，如果压强过高，反射镜上将粘附有碳氢化合物，同步辐射光在镜面上诱发的光电子将碳氢化合物裂解成碳，沉积在镜面上，这将逐步降低镜面的光学反射率，会严重影响碳边能量范围内的实验；三、残余气体会吸收 X 射线，其对光通量的影响应控制在实验的本底范围内，因此对真空度有一定的要求。压强不同的真空段之间常采用差分泵或者窗的形式隔离。

从同一储存环引出的多条光束线，由于实验站研究领域不同，从而工作真空度不同，有的还需经常暴露大气；另外各光束线的结构非常复杂，突然暴露大气的灾难性真空事故在所难免。因此为了保证各光束线的操作不影响储存环的运行和其他线站工作，光束线不工作时，挡光器和真空阀门将储存环与光束线进行真空隔离。快阀和真空阀门在突然暴露大气的事故时，在涌入的空气冲击波前峰冲入储存环前快速关闭，进行真空保护。

二、 光束线真空系统设计计算

1、残余气体对光通量影响的计算

同步辐射光子在光束线传输过程中，会与真空环境中的残余气体碰撞而被吸收，从

而造成光通量的损失。X 射线实验要求残余气体对光通量的损失小于十万分之一。

与残余气体相互作用后的光通量的表达式为，

$$I=I_0e^{-\mu\rho d} \quad (1)$$

其中 I 为传输后的 X 射线通量， I_0 为传输前的 X 射线通量， μ 为质量吸收系数 ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)， ρ 为气体分子密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)， d 为 X 射线传输的距离 (cm)。

计算中，考虑氮气对 X 射线的吸收的影响。

SSRF 硬 X 光束线站的能量范围为 3.5KeV~几十 KeV，取 3.5Kev 时， $\mu_N=100 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ，X 射线传输的距离 $d=100\text{cm}$ ，带入式 (1)，得压强 $P=8.6\times 10^{-2}\text{Pa}$ 。

SSRF 软 X 光束线站的能量范围为 100eV~2000eV，取 100eV 时， $\mu_N=50000 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ，X 射线传输的距离 $d=100\text{cm}$ ，带入式 (1)，得压强 $P=1.7\times 10^{-4}\text{Pa}$ 。

可见，软 X 射线对真空有更高的要求。

2、热解吸气载

热解吸气载是在热平衡条件下由于温度的作用，单位时间从真空室壁上解吸并进入空间的气体量。它是同步辐射装置真空系统静态时的主要气体来源，决定着系统的静态真空。材料热出气率的大小取决于材料种类及材料的表面处理。光束线由于兼有光学、真空、安全防护、X 射线位置探测等多种功能，所以涉及的材料较多。从超高真空角度考虑，选材要满足以下条件：1、出气率低；2、足够的强度、焊接性能；3、限制易挥发元素含量；4、合适的表面处理。

光束线主体真空室选用不锈钢 304 或 316L。挡光器和光阑要承受来自弯铁或插入件的较大热负载的同步辐射光，所以选用了高热传导性的无氧铜或者 Glidcop 作为热缓释材料。不锈钢和无氧铜是真空元件的常用材料。放气率约为 $5\times 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。光阑用于阻挡 X 射线以确保人身安全，材料选用特种钨合金。荧光探测器和丝扫描探测器使用了薄的碳片作为低能光子的吸收材料。经过充分的真空烘烤，钨合金和碳片可达到与不锈钢相当的出气率^[3]。晶体单色器内径约 1 米，采用了氟橡胶作为密封材料，暴露于真空内表面积约为 3600cm^2 ，这构成了单色器的最主要的气源。

在受光元件的光照射表面，正常情况下温度在 80~150 度范围内^[3]，放气率约为 $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

为了降低热解吸气载，首先必须确定合理、有效的表面处理工艺。材料经表面抛光后，其出气率可降低一个数量级；不锈钢经高温真空处理可以得到很低的出气率；烘烤可以降低出气率 2-4 个数量级。为了在短时间内获得超高真空，一般都采用中温烘烤的方法来降低出气率。

3、光电解吸气载。

光电解吸气载是同步辐射装置中特有的气载，它一般将大大超过真空室内的热气载

和漏气载，主导光束线真空系统的动态真空。在光束线真空系统的设计中，必须对光电解吸气载进行合理的估算，然后才能确定所需的总排气抽速，为真空系统的设计提供理论依据。

同步辐射装置中的气体解吸经历了一个二次过程：首先，高速电子产生的同步辐射光在照射到真空室表面时，通过光电效应从器壁材料中激发出具有一定能量的二次光电子；其次，这些光电子以可观的能量轰击真空室器壁表面，引起表面吸附气体成分的解吸。

对于光电解吸气载的计算，可以根据光电解吸基本原理首先计算出光束线接收的光子数，再求出光子所激发的光电子数，然后用实验得到的光电子解吸系数来计算光电解吸气载。

3.1 光束线接收的光子数

对于电子储存环，单位时间内产生的，能量为 ϵ 的光子在单位能量范围内的光通量为：

$$\frac{d^2 N}{d\epsilon dt} = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \frac{W}{\epsilon_c^2} \int_x^\infty K_{5/3}(y) dy \quad (1)$$

对上式进行积分计算，可得同步辐射光均匀分布在弯转磁铁段，单位时间、水平张角为 θ (mrad) 的同步辐射光的光子数为^[4]：

$$N_{ph} = 1.28 \times 10^{14} EI\theta \quad (2)$$

上海光源弯铁光束线第一个光阑（前置光阑）距离光源点为 4.451 米，出口水平尺寸为 20.5 毫米，经计算其水平张角为 4.6mrad。接收的光子数为 6.18×10^{17} pho/s。

插入件光束线不同于其他常规弯铁光束线，它将接收两类光子的照射。一类为常规弯铁发出的同步辐射，另一类是从 Wiggler 或 Undulator 发出的辐射，从而导致光致解吸气载大于其他光束线。

3.2 光束线产生的光电子数

平均每个光子所激发的二次电子数定义为二次发射系数 q (electron/photon)。它与器壁材料、入射光子能量及光子入射到壁上的角度 ϕ 等因素有关。实验表明，光子在到达和离开壁时均能激发光电子。用不同能量的光子轰击不锈钢、铝和铜等材料的真空室壁，测出光子法向入射时的 q 值 q_n 。发现 q_n 值均小于 0.1。因此，计算时选 $q=0.1$ ，在工程设计上将是保守可靠的。 q 值和光子入射壁的角度也有一定的数量关系。令入射角为 ϕ 时的 q 值为 q_ϕ ，当 $10^\circ < \phi < 90^\circ$ ， $q_\phi \propto q_n / \sin \phi$ ；当 $\phi < 10^\circ$ 时， $q_\phi < q_n / \sin \phi$ 。上海光源引出的同步光的总功率和功率密度均较大，因此，受光元件如光阑等均采用掠入射，使得热负载得以缓释。同步光照射在光学镜面也均是掠入射的形式，入射角度大约 $1 \sim 3^\circ$ ，

这样光束线产生的光电子数是很客观的。

3.3 光电解吸气载

光电解吸系数 η 表示每个光电子所解吸的气体分子数，它与电子能量、真空室材料、表面预处理等有关，并随被照射面接收的光子剂量的增加而降低——束流清洗作用。计算中，选取经过 100A.h 的剂量清洗后的 η 约为 2×10^{-6} molecules/phoele^[5]。

4、同步辐射光束线的真空获得设备和测量设备配置。

光束线以溅射离子泵为主泵，无油分子泵作为粗抽泵，装有冷阴极电离规和残气分析仪。根据上述气载分析和计算，离子泵主要配置在光致解吸气载较大的部件处，如光阑、反射镜箱等，由于环内安装空间的限制，光阑等部件处配置了尺寸较小的 100L/s 溅射离子泵，同时在挡光器、光阑和安全光闸处各配有 300L/s 的 NEG。

三、光束线真空系统调试

表 1 SSRF 一期 7 条光束线第一个电离规（最靠近储存环）的压强值

	BL08U	BL13W	BL14W	BL14B	BL15U	BL16B	BL17U
0mA	3.5×10^{-10}	4.6×10^{-10}	3.8×10^{-10}	2.9×10^{-10}	3.1×10^{-10}	4.0×10^{-10}	3.8×10^{-10}
100mA &1Ah	2.3×10^{-8}	4.3×10^{-8}	1.8×10^{-8}	9.7×10^{-9}	6.8×10^{-9}	1.2×10^{-8}	1.2×10^{-8}
100mA &20Ah	4.9×10^{-9}	8.6×10^{-9}	4.1×10^{-9}	1.8×10^{-9}	2.0×10^{-9}	5.0×10^{-9}	4.0×10^{-9}
200mA &832Ah	9.8×10^{-10}	1.6×10^{-9}	1.1×10^{-9}	6.5×10^{-10}	6.7×10^{-10}	6.7×10^{-10}	1.1×10^{-10}

如表 1 所示，在最初调试时，同步辐射光子会产生较大的气载，如第三行所示。经过 20Ah 的剂量清洗后，腔体内壁形成了新鲜的表面，光电解吸气载降低，经过 832Ah 的束流清洗后，光束线能在满足设计指标的真空度下运行。

参考文献

- [1] 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:239-284
- [2] 陈明. 上海光源光束线石墨薄片材料的真空性能实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(7):661-664
- [3] 王纳秀, 刘石磊, 徐中民, 等. SSRF 活动光子挡光器的模拟与实验结果比较[J]. 核技术, 2011, 34(3):165-168
- [4] O Grobner. Studier of photon induced gas desorption using synchrotron radiation [J]. Vacuum, 1983, 33(7):397-406