

应用于同步辐射光源的涡旋干泵综合性能测试平台设计

黄化岩, 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 201204)

摘 要 :涡旋干泵是世界范围内同步辐射光源应用较多的真空获得设备,为满足同步辐射光源真空系统清洁、稳定和排气量大的需求,对涡旋干泵极限压力、抽气速率和清洁度三个性能有很高的要求。设计了一套涡旋干泵性能测试的综合平台并通过实际干泵测试来检验平台的设计。测试结果表明,综合性能平台能有效得测试上述涡旋干泵性能指标,为应用于同步辐射光源的涡旋干泵选泵工作提供测试手段和平台。

关 键 词 :同步辐射光源 ;涡旋干泵 ;性能测试

中图分类号 :TB79

文献标识码 :B

文章编号 :1002-0322(2017)02-0014-05

doi :10.13385/j.cnki.vacuum.2017.02.04

The design of dry scroll pump testing device used in synchrotron radiation

HUANG Hua-yan, CHEN Ming, LIU Jun-nan, LIU Teng-fei, XUE Song

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Science, 201204, China)

Abstract : Dry scroll pump is widely used in worldwide synchrotron radiation light source. In order to satisfy the requirement of vacuum system in synchrotron radiation light source, Which pumping system need clean, stability and high pumping speed. We designed a texting system for testing limit pressure, pumping speed and residual gas. As a result, the texting system designed succeed in accomplishing test items above, which also provides the testing means and platform for the dry scroll pump selection of the synchrotron radiation light source.

Key words : the synchrotron radiation dry scroll pump performance test

作为先进的第三代中能同步辐射光源,上海光源同步辐射装置(SSRF 以下用简称代替)的主要性能指标居国际前列。SSRF 产生的同步辐射光覆盖从远红外到硬 X 射线的宽广波段。利用低发射度的中能强流电子束和国际上插入件技术发展的新成就,在用途最广泛的 X 射线能区(光子能量为 0.1 keV ~ 40 keV)产生高耀度和高通量的同步辐射光,使其基本性能在许多重要方面位于目前世界上光源的前列。SSRF 是生命科学、材料科学、环境科学、地球科学、物理学、化学、信息科学等众多学科研究中不可替代的先进手段和综合研究平台,也是微电子、制药、新材料、生物工程、精细石油化工等先进产业技术研发的重要手段^[1]。

SSRF 主要部件如储存环、前端区和光束线

都需求清洁无油的低、高甚至超高真空环境。尤其是光束线真空系统对残气成分要求严格,过高的碳氢化合物会造成光学元件反射率下降等一系列问题,降低光束品质影响实验结果。从大气压至几帕斯卡范围内的低真空获得如果采用油封式机械泵来做粗抽,不可避免的会出现真空系统返油现象,对整个 SSRF 各个部件真空系统造成污染。系统中的光学元件如果长时间工作在碳氢分子分压过高的真空环境下传输效率会下降 1 至 2 个数量级^[2],更严重的是,如果在光学元件上形成碳层会使得信噪比剧烈下降,从而影响了—定能量范围内的实验^[3-4]。为了保证光束线性能需要经常更换被污染的光学元件,增加了光束线维护和人力成本,因此清洁的真空系统对 SSRF 而言非常重要。

收稿日期 :2016-05-29

作者简介 :黄化岩(1987)男,湖北省荆门市人,助研。

涡旋干泵在机械结构的设计上同油封式机械泵相比有明显差异,抽气系统的定子和转子直接接触介质气体,使得涡旋干泵不需要油的冷却和密封。目前,世界各地同步辐射光源均采用涡旋干泵作为前级泵使用^[5-6]。然而国外涡旋干泵产品价格昂贵,国内相关涡旋干泵产品存在极限真空度差、稳定性和耐腐蚀性差等问题。为满足 SSRF 对涡旋干泵性能的需求^[7],对极限真空度、抽速和残气情况的测试工作显得尤为重要。为了测试选用的涡旋干泵是否能够满足在同步辐射装置应用的条件,本文设计了测试涡旋干泵性能的综合平台。平台包含的测试项目有:极限真空度、有效抽气速率和洁净程度的测试。

2 涡旋干泵综合性能测试平台设计

2.1 设计思路

鉴于同步辐射光源各个部件真空系统主要抽出气体为空气,温度在 25℃ 上下。因此极限真空度抽气对象选择为空气。抽气速率测试需要输入定量的气体因此对象选取为 N₂,温度 25℃。对于某些冷却管道的真空夹层和实验站而言,10⁻¹Pa 左右的真空度已经可以满足,用涡旋干泵作主泵即满足系统要求。对于主要的储存环、加速器和光束线真空系统而言往往需求 10 × 10⁻⁷Pa 甚至 10 × 10⁻⁸Pa 清洁的超高真空,这时则需要以溅射离子泵为主泵。因此需要测试清洁度的情况有:以涡旋干泵为主泵的真空系统和以涡旋干泵为前级泵的溅射离子泵真空系统。为了满足上述测试需要,平台应具备测量、真空获得和气体输送等功能。

平台需要对中、低真空段和高真空段进行测量。因此选用测量范围在 0.1Pa~100Pa,测量精度(低于 1Pa 时)5%的皮拉尼规测量低真空段;选用测量范围 2 × 10⁻⁹Pa 至 10 × 10⁻²Pa 精度为 3% 左右的热阴极电离规测量高真空段真空度。为了测试清洁度平台应具备获得高真空甚至超高真空的抽气能力,根据同步辐射光源真空系统的获得设备选择原则,本文设计中真空获得设备采用涡旋干泵(供测试与低真空获得)、干式分子泵(中、高真空获得)和溅射离子泵(超高真空获得)。选用四极杆质谱仪作为平台的残气分析设备。根据主流残气分析仪的工作压力(5 × 10⁻³Pa 左右)和涡旋干泵为主泵系统的极限真空度(1Pa 至 10Pa)应设计相应的差分系统。有效抽速的测量必须知道一定时间内干泵抽除的气体流量,在

气体输送上平台选用了 0-100sccm 的质量流量计输送干燥氮气。根据上述条件设计元素关系图如下:

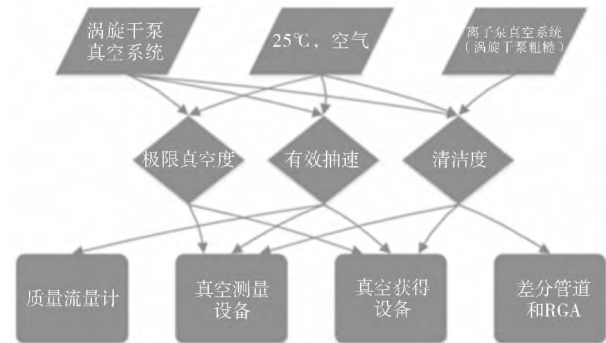


图 1 涡旋干泵性能测试平台设计思路关系图

Fig.1 The designscheme diagram for the dry scroll pump testing platform

2.2 主腔体和差分管道设计计算

由图 1 可知,在主腔体上需要安装皮拉尼规,冷阴极规,RGA 抽气管道和若干 CF35 管道接口。平台要对多台干泵反复测试,为降低测试中抽空时间因此主腔体内表面积和体积在满足上述接口加工的情况下应尽可能小。已知相同赤道周长的情况下球形腔体的表面积和容积要小于相对应的立方体腔体。因此主腔体设计为内径 350mm 赤道位置均匀分布 5 个 CF35 接口(朝向各不相同)的球形不锈钢真空腔体。设主腔体内表面积 A , 体积 V 为:

$$A = \pi D^2 = 38.465 \text{cm}^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{4\pi R^3}{3} \approx 0.18 \text{L} \quad (2)$$

所以当以 2l/s 涡旋干泵为主泵时的抽气时间为 t_1 , 设 2l/s 涡旋干泵系统极限压力为 P_2 , 初始抽气压力为 P_1 。易知处于低真空状态,以长 0.5m, 直径 25mm, 平均压力 10Pa 计算得泵管道流导约为 40l/s 大于 2l/s, 可见抽至极限真空度附近时管道不影响干泵的抽速, 因此抽气时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{V}{S_p} \ln \frac{P_1}{P_2} \approx 119 \text{s} \quad (3)$$

t_1 在 2min 左右, 对于反复测试多个涡旋干泵的极限真空度性能而言。 t_1 的大小适当, 满足设计需求。

四极质谱仪的工作真空度必须好于 5 × 10⁻³Pa, 当倍增器开启时应好于 5 × 10⁻⁴Pa 设为 P_3 , 涡旋干泵极限压力只在 1Pa 量级设为 P_4 , P_4 值距离四极质谱仪的启动真空度还有至少 3 个量级的差距, 因此需要差分系统辅助达到目标。其中使用 80l/s 分子泵组作为 P_3 处的获得设备。已知系统

稳定时候流经系统任意横截面的流量 Q 与 P_3 、 P_4 、差分管道流导 C 的关系为：

$$C = \frac{Q}{P_4 - P_3} \tag{4}$$

计算得 $C \approx 1.21 \times 10^{-3} \text{L/S}$ 。根据圆截面长管分子流态下流导计算公式：

$$C = 121 \frac{d^3}{L} \tag{5}$$

其中 d 是管道直径、 L 是管道长度。本平台中差分管道 d 设计为 1mm, L 为 100mm, 可知 $L > 20d$, 且满足公式(5)使用情况。根据平台所选分子泵在 $10 \times 10^{-5} \text{Torr}$ ($1 \text{Torr} = 133 \text{Pa}$) 左右的有效抽速 70l/s 可知, P_3 上升量 $P_3' \approx 1.7 \times 10^{-7} \text{Torr} \ll P_3$, 即不会影响到四极质谱仪的正常工作。

2.3 设计结果

涡旋干泵性能测试平台有效得集成了测试极限真空度、抽速和残气情况。整个测试平台包括：内径 350mm 赤道位置均匀分布 5 个 CF35 接口(朝向各不相同)的球形不锈钢真空腔体、一个皮拉尼规、超高真空热阴极规、四极质谱仪、一台 200l/s 溅射离子泵、一台 80l/s 分子泵、一套分子泵组、若干阀门和一段内有直径 1mm 长 100mm 的差分管道。图 1 为本文设计的涡旋干泵测试平台设计图,图 2 为平台效果图,右侧为获得设备和规计的控制器放置柜。

3 测试方法及结果

3.1 极限压力测试方法及结果

极限真空度测试：如图 1 所示,关闭微调阀、当阀门 1,阀门 3,阀门 4 和微调阀关闭时,阀门

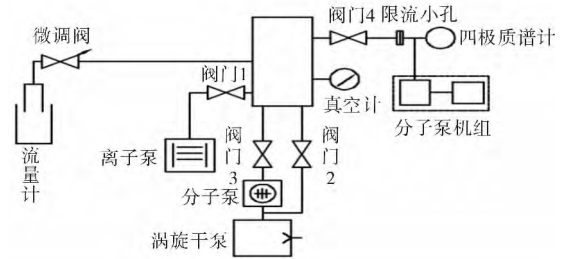


图 2 涡旋干泵性能测试平台设计图

Fig.2 The testingdiagram for the dry scroll pump testing platform

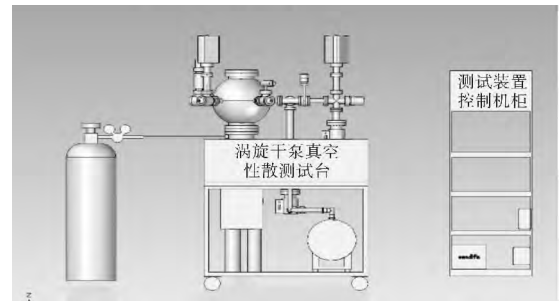


图 3 涡旋干泵性能测试平台效果图

Fig.3 The stereogramfor the dry scroll pump testing platform

2 打开,仅涡旋干泵对测试腔体抽气,通过真空计的读数,进行涡旋干泵的极限压强的测量。如此相当于涡旋干泵直接接在了试验罩之下,在平衡温度下测试罩内的压力值,取这个值为测试泵的极限压力值。需要注意的是,为了消除系统内水蒸气对极限真空度的影响在记录测试罩压力值前需保持干泵在开启气镇运转情况下至少 1 小时,然后再关闭气镇运转 1 小时在读数稳定之后记录。如此连续三次测量结果无明显变化,表明测试值为测试泵的极限真空度(保留两位小数)。本文测试了一款极限压力 2Pa 的涡旋干泵,遵照上述测试流程,结果如下：

表 1 某涡旋干泵极限真空度测试结果

Table 1 Thetest result of ultimate pressure for a dry scroll pump

日期(月日)	时间	气镇开启状态	环境温度(℃)	环境温度(℃)	泵的转速	皮拉尼规读数(Pa)	备注
6.27	10:10	开	27	27	1400	1.50	漏率在 10e-10 以下 检漏 OK 湿度 65%
	11:30	关	—	—	—	1.40	
	12:20	—	—	—	—	1.30	
	13:00	—	—	—	—	1.30	
	13:30	—	—	—	—	1.30	
6.29	14:00	—	—	—	—	1.40	湿度 50%
	12:00	开	26	26	1400	1.50	
	13:35	关	—	—	—	1.30	
	14:30	—	—	—	—	1.10	
	15:00	—	—	—	—	1.10	
7.1	15:30	—	—	—	—	1.10	湿度 65%
	9:00	开	21	21	1400	1.50	
	10:00	关	—	—	—	1.40	
	11:00	—	—	—	—	1.20	
	11:30	—	—	—	—	1.20	
	12:00	—	—	—	—	1.20	

由表 1 可见 ,3 次测试结果在 1.1Pa~1.3Pa 之间 ,具体极限压力值跟当天测试时空气湿度有关 ,表现为湿度大极限压力差。这是因为空气中水汽含量增加造成。总体来说平台测试结果满足预期。

3.2 抽速测试方法及结果

抽速测试方法 :如图 1 所示 ,关闭微调阀 ,开泵运转 ,带气镇的泵充分气镇 ,关气镇阀 ,以 1 小时压力不进一步下降 ,泵达到本底真空。然后阀门 2 打开 ,阀门 1、3 和 4 关闭 ,打开微调阀 ,通过微调阀和流量计调节进入测试腔体的气体量 ,在测试腔体内建立一个设定的平衡压力 P ,通过流量计测定气体的流量 q ,按照式(6)计算该压力下的抽气速率 S 。

$$S = \frac{q}{P} \tag{6}$$

质量流量调节器单位为 sccm 即一个标准大气压下 1ml/min。测试及计算结果如下表 2

表 2 某涡旋干泵抽速测试结果

Table 2 The pumping speed result for a dry scroll pump

序号	流量(sccm)	压力(Pa)	抽速(L/s)
1	173.47	161	1.82
2	318.95	275	1.99
3	460.46	386	2.01
4	615.82	496	2.09
5	2162.36	1605	2.27
6	4000.00	2874	2.35

为评测平台抽速测量结果的准确度 ,本文对比了某名义抽速 2l/s 的干泵测试值和产品抽速曲线上取值 ,如下

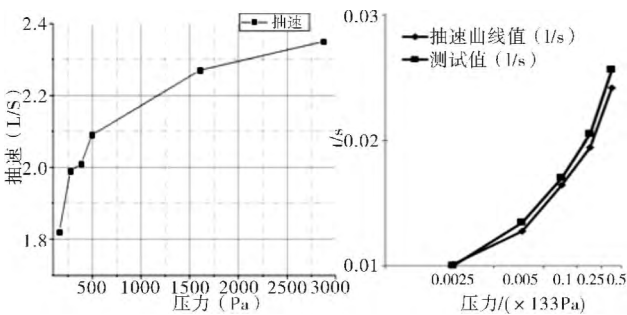


图 4 某涡旋干泵抽速测试结果 Fig.4 The pumping speed result for a dry scroll pump

图 5 平台测试值与抽速曲线取值对比 Fig.5 Testing data and actual pumping speed

由图 2 可以看出由平台测试出的抽速值与产品官方抽速曲线取值趋势一致 ,数值大小基本相同。由表 3 可以看出 ,平台测试值在高压范围偏离度逐渐变大 ,造成这个结果的原因可能

是平台采用的是最大 100sccm 的质量流量计 ,在最大调节流量时会有系统误差。

表 3 某涡旋干泵抽速测试值和抽速曲线对比

Table 3 Testing data and actual pumping speed

压力(Pa)	抽速曲线值(l/s)	测试值(l/s)	偏离%
0.3325	1.01	1	-1
0.665	1.27	1.34	5.223881
13.3	1.64	1.7	3.529412
33.25	1.94	2.05	5.365854
66.5	2.42	2.56	5.46875

3.3 清洁度测试方法及结果

如图 1 所示 ,当阀门 2 打开 ,阀门 4 打开 ,其他阀门关闭时 ,通过四极质谱计的谱图 ,可以记录涡旋干泵工作时 ,测试腔体内气体的成分 ,以判断洁净程度。

根据相关规范 [7]SSRF 要求的清洁真空指标为质量数大于 44 的残气成分低于 10×10^{-10} Amps。经测试某名义抽速 4l/s 的残气谱图如图 3 所示。谱图中 ,横坐标为区别不同气体的粒子质量数与粒子带电荷数之比 ,纵坐标为该质量数的气体分子电流信号强度(可看做气体分压大小)。

由图 6 可以看出 ,质量数大于 44 的气体分子(浅蓝色柱)分压力约为 8×10^{-12} Torr ,且与在线测量的真空系统谱图吻合 [8](主要残气成分和分压大小)。证明本平台具备涡旋干泵清洁度测试功能。

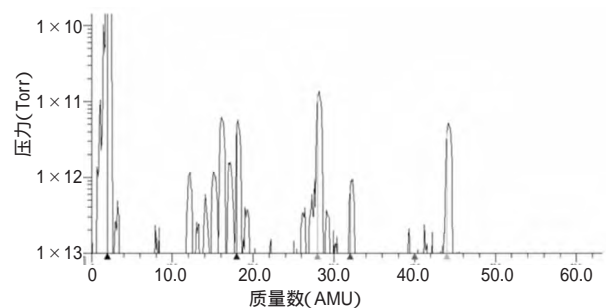


图 6 名义抽速 4l/s 的某干泵残气谱图

Fig.6 Mass spectrum of the residual gas in a dry scroll pump with pumping speed of 4l/s

4 结论

根据同步辐射光源对涡旋干泵性能的需求 ,设计了能测试包括极限真空度、抽气速率和清洁度的涡旋干泵综合性能测试平台。经过一系列测试工作证实了平台能完成上述测试功能。其中 ,通过进行平台测试值和干泵出厂标定的极限真空度值对比得出 :极限真空度测试值无明显误

差；通过和干泵出厂抽气曲线数据对比可知，抽气速率误差小于 5.5%；通过和同步辐射在线真空系统残气分析谱图对比可知，清洁度测试功能可用。

参考文献

[1] 陈明,刘俊男,刘腾飞,等. 上海光源光束线真空系统 [J]. 第八届华东三省一市真空学术交流会论文集,2013.

[2] 殷立新. 同步辐射电子储存环超高真空系统物理设计与实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,1997.

[3] Fischer G E, Mack R A. Vacuum design problems of high-current electron storage rings [R]. Cambridge Electron

Accelerator, Mass, 1964.

[4] Hermle S, Heidenreich G, Einfeld D, et al. Layout of the absorbers for the synchrotron light source ANKA[J]. 1999.

[5] Qian Shinan et al. Current Status of HESYRL Lithography Beam Line[J]. Physica Scripta, 1990,40:777~779

[6] Chen J R, Liu Y C. The straight vacuum chambers of the SRRC 1.3 GeV electron storage ring [J]. Vacuum, 1993, 44(5): 545-548.

[7] 吴冠原. SSRF 光束线实验站真空规范 [Z]. 上海:上海应用物理研究所,2004

[8] 吴冠原,王勇. NSRL 电子储存环超高真空系统残余气体分析[J]. 真空,1999 (6): 31-34



TFC'17 全国薄膜技术学术研讨会征集论文通知

全国薄膜技术学术研讨会是中国真空学会薄膜专业委员会的重要学术活动之一,宗旨是推动我国薄膜技术领域的学术交流与合作,提高创新能力,推动相关产业的发展。“TFC’17 全国薄膜技术学术研讨会”由中国真空学会薄膜专业委员会主办,学术研讨会暂定于 2017 年八月中下旬在安徽省合肥市举行,具体时间确定后将于 7 月 15 日左右通知大家。

本次会议将研讨、展示近两年来我国薄膜材料科学与技术的最新成就,邀请在薄膜技术研究领域有资深造诣的院士、专家到会作学术报告,此次会议将进一步推动薄膜技术研究和产业应用的交融。现会议特向全国从事薄膜科学与技术的科技工作者、企事业单位征集论文,热情欢迎有关科研院所、大专院校、企业人士积极投稿,踊跃参会。

一、征文范围:1.当代薄膜科学与技术的展望 2.薄膜物理理论与技术基础 3.薄膜设计、仿真与模拟 4.薄膜制备技术 5.薄膜测试与分析 6.薄膜新技术、新材料 7.薄膜技术新装备 8.薄膜技术应用与产业化。

二、征文要求:

1.征文截止日期为 2017 年 6 月 30 日,请编写 1000 字以内的论文详细摘要小样,论文摘要及全文请采用电子邮件投稿,并注明邮件主题:“TFC’17 全国薄膜技术学术研讨会论文摘要”。

2.论文摘要格式:标题(3 号黑体、标题下空一行、居中),作者、单位(5 号楷体),摘要(小四号宋体),限定为一页 A4 复印纸上(21.0×29.7cm²),行距 1.5 倍,打印范围不得超出(14.5×22cm²),上边距 4.7cm,下边距 3cm,两边各为 3.25cm,不要页码和页眉。

3.论文应重点突出,论据充分,措词严谨,文责自负。已在其他学术会议或刊物上发表过的论文请勿投稿。

4.研讨会将印制论文摘要集,被录用的论文摘要将附在会议正式通知中发出。

5.会议将根据论文质量推荐在《真空科学与技术学报》或《真空》杂志上发表。

三、会议方式:

1.以自荐、推荐和特邀的方式,组织大会学术报告。大会学术报告时间为三十分钟。目前需各方面人士自荐、推荐大会学术报告命题和报告人。

2.分组交流。专题学术论文报告会和专题讨论会。专题学术论文报告会按通常学术交流会的方式进行,包括口头报告(15 分钟)、展板、展示等专题报告分会场(展板展示视会场场地安排)。

3.汇编论文摘要集,与会代表人手一册。

4.组织相关的薄膜产业小型产品展示。

四、会议日程和注册费:

1.会议日程:第 1 天报到,第 2 天大会报告,第 3 天分会场研讨,第 4 天代表离会;

2.会议注册费:¥1200 元/人(学生凭有效证件 600 元/人)。

五、联系方式:

联系人:刘敏强 电话:13910180242 E-mail:jiumq10@163.com

王瑞 电话:13263457400 E-mail:thinfilms@mail.tsinghua.edu.cn

请各位参会代表务必于 6 月 30 日前电子邮件发至刘敏强:jiumq10@163.com 返回参会回执及论文稿件。

(中国真空学会薄膜专业委员会 刘敏强供稿)