

国内外加速器极高真空技术进展

杨晓天¹⁾

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了国内外要求在极高真空条件下运行的部分粒子加速器概况; 极高真空系统材料选择和处理工艺方面的进展; 真空获得设备的选择和抽气方法的创新性进展; 极高真空条件下的检漏方法研究及极高真空度的测量和校准现状.

关键词 粒子加速器 极高真空 气载

1 引言

加速器的真空度决定了束流寿命. 随着粒子加速器对束流寿命要求的进一步提高, 加速器真空技术也从超高真空跨越发展到极高真空 ($P \leq 10^{-10}$ Pa). 限于本人的工作范围、接触面及篇幅的限制, 仅对我所了解的国内外部分加速器系统极高真空系统的概况及极高真空技术的进展做一简要介绍.

2 国内外加速器极高真空系统实例

2.1 LHC束流真空系统

为了获得更高磁场、减小磁铁体积、降低能耗和运行经费, 许多高能粒子加速器都采用了低温超导技术, 其中欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 (LHC) 最具代表性. LHC 的两个碰撞能量为 7 TeV 的质子储存环被放置在一个磁轭中, 环周长 26.7 km, 超导磁铁约占全环长度的 75%, 因此绝大部分真空系统运行在低温条件下, 部分直线段和实验区为常温真空系统. LHC 低温真空系统^[1] 分为三部分: 与低温系统之间的隔离真空系统; 与液氦供应线之间的隔离真空系统和束流真空系统. 隔离真空系统的真空度要求达到 10^{-4} Pa 即可, 而束流真空系统需要保证 100 h 的束流寿命和极低的实验本底, 因此对真空度的要求要高得多. 束流真空管道置于超导线圈中心, 直接浸泡在 1.9 K 的超流体液氦中, 在这个温度下, 真空管道变成了能够吸附几乎所有可凝气体的极有效的均布低温泵, 从而可获得极高真空 (超低温下的真空度一般体现为 H_2 等效气体密度, 束流寿命为 100 h 和低实验本

底所要求的 H_2 等效气体密度低于 $10^{13\sim 15} H_2 m^{-3}$)^[1].

低温条件下所产生的任何一点微小的热量都会导致大量的功率损耗 (大约是常温下的 1000 倍^[2]). 为了大规模地降低低温系统能量消耗, 在束流管道内设计了束流屏蔽管以吸收由于同步辐射、核散射和电子云等产生的热量. 束流屏蔽管为跑道形, 利用上下空间放置 LHe 冷却管道, 工作温度为 5—20 K. 屏蔽上下平面开许多狭长小孔, 约占总面积的 4%. 束流碰撞产生的气体通过狭长小孔冷凝到 1.9 K 的束流管道, 这样束流管道既起到抽气作用, 又不会直接被有能量的粒子碰撞而升温.

2.2 FAIR 真空系统

德国重离子研究中心 (GSI) 即将建造的反质子和重离子研究装置 (FAIR) 由 2 个同步加速器, 4 个储存环以及高能束流传输系统等组成^[3]. 同步加速器 SIS100 和 SIS300 周长同为 1084 m, 并上下重叠地安装在同一个位置, 设计真空度为 5×10^{-10} Pa. 与 LHC 相同, SIS100 和 SIS300 中近 80% 的部分采用低温超导磁铁, 不同的是其椭圆形的束流真空室工作在 LHe 温度下 (4—15 K) 并直接与束流接触. 20% 的常温真空系统需要 300°C 的在线烘烤; 4 个环分别是收集环 (CR, 211 m)、累积环 (RESR, 245 m)、新实验储存环 (NESR, 222 m) 和高能储存环 (HESR, 574 m). 几个环的设计方案中既有低温超导系统, 又有常温烘烤系统, 还有超导磁铁+常温真空室系统, 大部分系统要求 $P \leq 5 \times 10^{-10}$ Pa; 高能束流传输系统总长 2.5 km, 要求 $P = 1 \times 10^{-7}$ Pa, 与环和同步加速器相连的部分要求 $P \leq 5 \times 10^{-10}$ Pa.

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: yangxt@impcas.ac.cn

2.3 HIRFL-CSR 真空系统

兰州重离子冷却储存环(HIRFL-CSR)全长约500m,由主环(CSRm)、实验环(CSR_e)和两条束运线组成,均为常温真空系统.两环的设计真空度为 3×10^{-9} Pa,需要250°C的在线烘烤;束运线设计真空度为 1×10^{-7} Pa,但与两环相连约20m的部分真空度要求与两环相同.

HIRFL-CSR工程即将竣工,其主环(CSR_m)的平均静态真空度达到了 5×10^{-10} Pa.在有束流的情况下,真空度变化不大,如在加速氦离子束时的动态平均真空度还能保持在 8×10^{-10} Pa的水平.

3 材料选择和处理

真空材料的选择和处理是极高真空系统设计中的重要环节.所采用的材料除了满足加速器物理的要求外,还要求材料具有极低的出气率.不锈钢、铝和铜是最常用的真空系统材料,各有优缺点,可根据粒子加速器不同的用途和要求进行选择和处理,在此不再赘述.低温超导束流真空室的材料需要满足出气率低、在低温和焊接条件下仍保持低导磁率($\mu \leq 1.005$)、机械性能稳定、热膨胀系数低及价格适中要求.高锰奥氏体不锈钢P506是比较理想的材料,LHC的束流屏蔽管道和FAIR的低温超导束流管道都选择了这种特殊材料.LHC的P506束流屏蔽管道内表面还采用层压技术与75 μ m的无氧铜皮压制成一体的减小束流阻抗;钛金属属于非磁性材料,具有重量轻、易加工、出气率低、热膨胀系数小及残余放射性低等优点.且钛金属的屈服强度是不锈钢的3倍^[2],从而可以采用更薄的壁厚,因此近年来已受到加速器研究领域的重视和应用(如英国的同步辐射光源SRS,日本J-PARC的RCS等).为降低钛金属的出气率,采用机械-化学抛光工艺使光滑的表面形成约10nm的氧化层,能够有效地阻止表面出气.如再结合真空炉除气来排除材料内部的H₂(除气温度600—650°C,保温8—9h),出气率可达 7×10^{-14} Pa·l·s⁻¹·cm⁻²,比同样方法处理的不锈钢材料低2个数量级^[4];置于快交变磁场中的真空室可以用陶瓷材料制做(如日本的J-PARC、中国的CSNS、HIRFL-CSR的凸轨真空室等),以免在金属材料中产生大量的涡流热损耗和引起附加磁场干扰.陶瓷真空室强度高、抗辐射能力强,经除气处理后的出气率可低于 10^{-12} Pa·l·s⁻¹·cm⁻².陶瓷管由高纯度的氧化铝粉通过等静压法成型后高温烧制而成.对于较长的陶瓷真空室,尤其是弧形真空室,需要分段,然后再钎焊成一体.由于陶瓷是绝缘材料,为使束流通过时产生的高频镜向电流也能够通过,必须在陶瓷室内或外表面镀一层金属膜(一般镀TiN),

这层膜还能够减小二次电子发射.

4 极高真空获得设备选择和研究进展

极高真空排气系统要尽可能地采用无油蒸气污染的吸附泵,如溅射离子泵(SIP)、钛升华泵(TSP)、非蒸发吸气剂泵(NEG)和低温泵等.极高真空环境中残余气体的主要成份为H₂,约占90%以上.TSP和NEG对H₂和CO、CO₂等活性气体抽速很大,但对惰性气体却完全没有抽速,配合使用SIP抽除残余气体中少量的Ar和CH₄,使系统获得极高真空.如CERN的LEP全环采用分布式NEG抽气,大约每20m放置1台SIP,真空度达到 10^{-11} Pa;兰州的HIRFL-CSR采用TSP和SIP作为系统主泵,结合清洗、除气、烘烤的材料处理工艺降低气载,从而获得 10^{-10} Pa的极高真空度;低温超导系统中1.9K—4.5K的超低温环境等于为束流真空管道提供了非常理想的均布低温泵,可使系统轻松获得极高真空.

真空泵的工作模式有整体泵和分布泵,采用分布泵可以使系统的压力分布趋于平缓.许多同步加速器用铝合金(LEP、美国的APS、日本的Spring-8等)和无氧铜(日本KEK的B-Factory、美国的PEP II等)制成束流-抽气双通道室,在抽气通道放置均布NEG吸气剂带或均布离子泵,获得均匀的压力分布;近期由CERN发展起来的在管道内镀Ti-Zr-V非蒸发吸气剂膜的技术^[5]使加速器真空管道从负载变为抽气泵,管道各处抽速相同,系统压力分布近似为一条直线,为束流运行提供了更加稳定的真空环境.Ti-Zr-V薄膜的再生激活温度只有180°C,是目前所研究的各种镀膜材料中最低的,这样利用真空系统的烘烤温度就可以实现激活,这项新技术对于烘烤温度不能超过200°C的铝真空室尤其重要.另外,NEG薄膜能够减小气体解吸和二次电子发射,因此被各加速器广泛采用.如LHC有6km的常温区束流管道被镀Ti-Zr-V薄膜,经实验测试真空度可达 10^{-11} Pa^[5];德国GSI对原有的SIS 18进行改造,分批对所有的真空室进行Ti-Zr-V镀膜,以获得 5×10^{-10} Pa的真空度,同时计划对FAIR工程中的常温段真空室进行镀膜;另外瑞典MAX实验室的同步加速器、美国Brookhaven国家实验室的RHIC等多个加速器真空管道都进行了Ti-Zr-V镀膜尝试,并获得了理想的结果.

5 极高真空系统的一些检漏方法

在目前广泛采用的低温超导真空系统中,及时探测到He的泄漏并确定漏点对于保护系统免于“失超”至关重要.当某处存在He泄漏时,He气会以一定的速度向前移动,同时漏点处由于He的逐渐增多而使抽速下降,从而导致压力上升^[6].如果压力超过系

统”失超”临界值时(LHC在1.9K正常运行条件下的临界值为 $7 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$),系统就可能发生”失超”.漏点和漏率可以用安装在系统中的规管和质谱计来探测,但超导系统中往往规管间的距离相距很远,不能及时探测到漏点.用在线的束流损失监测器和冷铁的功率损失监测元件来探测漏点要有效得多.当怀疑某处有漏时,也可以用可移动的辐射剂量探测器来判断,因为剂量随漏率的增大而减小^[6].

常温极高真空系统烘烤后的检漏可以用安装在系统上的四极质谱计进行.首先利用四极质谱计的谱图判断系统烘烤后是否有漏.如果 $\text{N}_2(28)$ 、 $\text{O}_2(32)$ 峰较高,且比例为4:1,则系统肯定有漏.但对于经过彻底烘烤除气的金属真空室,即使有漏, O_2 峰却很小,这是因为干净的真空室壁在很长时间对 O_2 具有抽气作用,因此在扫描谱图上往往看不到 O_2 峰.而28峰有可能是 N_2 ,也可能是CO,因此很难判断系统是否有漏.这时可从谱图中观察Ar峰(40)和 $\text{N}^+(14)$ 是否上升来进行判断,因为空气中含有1%的Ar,而Ar在 10^{-8}Pa 以上的超高/极高真空系统中含量极少;而 N^+ 峰上升说明28峰中 N_2 在增加.在确认系统有漏后,将四极质谱计切换到检漏功能,直到找出漏点并设法排除.

6 极高真空度的测量和校准

极高真空度的测量和校准也是国内外研究的热点之一.规管测量下限主要受X射线光电流和电子激励解吸(ESD)效应的影响.设法降低X射线产生的光电流,或把ESD离子从气相离子中分离出来,可以有效地延伸规管的测量下限.例如用热阴极磁控规、分离规、弯注规等在实验室中测到了 10^{-11} — 10^{-14}Pa 的真空度^[2].但到目前为止,除CERN研制的调制B-A规及日本ULVAC的能量分析器规(UFC070)等在工程应用中测到了 10^{-11}Pa 的真空度外,供商业销售且使用可靠的真空规只有德国莱宝公司的分离规(IE514),测量下限仅为 $2 \times 10^{-10} \text{Pa}$.因此许多系统给出的极限真空度受测量规管的限制,实际获得的真空度应该更高.

规管读数的可靠性一般应得到权威校准机构的认可,但能校准极高真空规管的极高真空校准装置在国际真空计量单位并不普遍.目前只有美国的NASA,德国的PTB和中国的航天部510所建成了 10^{-10}Pa 的极高真空校准装置^[7].

参考文献(References)

- 1 LHC Design Report, CERN, Geneva, 2003
- 2 CAS, CERN, Geneva, 1999
- 3 Kramer A. GSI Vacuum Group, Darmstadt, Germany
- 4 Kurisu H. IVC-17, VST09-IS1, 2007, Stockholm, Sweden
- 5 Chiggiato P, Pinto P C. CERN-TS-2006-001
- 6 Baglin V. Vacuum, 2007, **81**: 803—807
- 7 LI De-Tian, LI Zhen-Hai, GUO Mei-Ru et al. Vacuum Science & Technology, 2007, **26**(2): 92—96

Progress of XHV Technology at Particle Accelerators

YANG Xiao-Tian¹⁾

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Recent vacuum system development with an XHV condition for the particle accelerators is briefly described. The progress of selecting and treatment of the materials used in XHV systems is introduced, and the choice of the main pump for an XHV system and some new pumping method are presented. Some leak detection experiences both for the superconducting and warm vacuum systems are recommended and the status of XHV measurement and the gauge calibration are introduced.

Key words particle accelerator, extreme high vacuum (XHV), gasload