

# 上海 EBIT 装置低温超导段超高真空系统

张海鸥<sup>1</sup>, 李 炜<sup>1</sup>, 郭盘林<sup>1</sup>, 安双利<sup>1</sup>, 陈永林<sup>1</sup>, 朱希凯<sup>1</sup>, 路 迪<sup>2</sup>, 邹亚明<sup>2</sup>

( 1.中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800; 2.复旦大学 现代物理研究所, 上海 200433)

摘 要: 介绍了上海电子束离子阱实验装置(EBIT)低温超导段常温和低温的真空获得系统设计, 通过溅射离子泵和低温冷面的冷凝抽气系统达到了所需真空要求。系统的真空调试结果表明, 常温下极限真空达到  $10^{-6}$  Pa, 液氮低温下在离子阱外围区域测量值是  $5 \times 10^{-8}$  Pa。离子阱区的压力是通过建立区域气体流动模型计算得到。结果预示, 在离子捕集区真空度能达到  $10^{-10}$  Pa 的设计指标。

关键词: 超高真空; 低温抽气; EBIT

中图分类号: TB751

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2006)04-0207-03

## UHV SYSTEM IN SHANGHAI EBIT CRYO- SUPERCONDUCTION CHAMBER

ZHANG Hai-ou<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, GUO Pan-lin<sup>1</sup>, AN Shuang-li<sup>1</sup>, CHEN Yong-lin<sup>1</sup>,  
ZHU Xi-kai<sup>1</sup>, LU Di<sup>2</sup>, ZOU Ya-ming<sup>2</sup>

( 1.Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China;  
2.Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The vacuum system design of Shanghai EBIT cryo-conduction segment is reported. Sputter ion pump and condensation surface are desirable to serve as pumping system. Vacuum system test results indicates ultimate pressure in outermost region achieve  $10^{-6}$  Pa in warm condition and  $10^{-8}$  Pa in cold condition. Pressure in the ion trap is evaluated by establishing gas flow model. It is predicated to be  $10^{-10}$  Pa that meet physical demands.

Key Words: UHV; cryogenic pumping; EBIT

## 1 引 言

上海超导 EBIT( Electron Beam Ion Trap) 是一台专门用来产生和研究高电荷态离子及 X 光谱的实验装置, 是世界上建造的第八台离子阱专用装置, 另外七台在美、德、日、英等国的相关实验室。与同样可以产生高电荷态离子的大型加速器相比, EBIT 装置具有体积小, 造价和运行费用较低的优势。上海 EBIT 设计指标接近国际上同类装置已达到的最好实际指标, 例如电子束能量 200 keV, 束流强度 200~250 mA, 束流密度  $5\ 000\ \text{A}/\text{cm}^2$ , 磁场强度 5 T, 液氮消耗量 0.2 L/h。

EBIT 的主要功能是用高能量、高密度的电子束将工作离子如  $\text{Ar}^{n+}$ 、 $\text{Kr}^{n+}$  等的核外电子逐步剥离, 形成高电荷态离子团, 通过超导强磁场和轴向电场将这些高态离子约束在离子捕集阱中。在离子阱的赤道面上开 8 个水平窗口, 用来观察高电荷态离子及产生的 X 射线光谱。为了减少离子阱区域高电荷态离子与杂质气体分子的碰撞, 提高电子束对工作离子的电离效率, 所以在离子阱区应该保持尽量低的杂质气体分子密度<sup>[1]</sup>。

上海 EBIT 对真空系统提出的设计指标, 是低温状态下在离子阱区域真空度达到  $10^{-10}$  Pa, 在其余处真空达到  $10^{-8}$  Pa。对于如此高的真空度要求, 上海 EBIT 采用低温冷凝抽气系统来达到。国际上大多数 EBIT 装

收稿日期: 2006-07-14.

基金项目: 国家杰出青年科学基金(10125520) 资助。

作者简介: 张海鸥(1972-), 女, 安徽省合肥市人, 副研, 从事真空系统研制工作。

置也采取相同的措施。为了降低液氮的消耗,上海 EBIT 用制冷机冷却的双层冷屏代替其他装置常用的单层液氮冷屏,这项措施同时也增大低温面的抽速,有利于获得较高真空度。

低温冷凝抽气的突出特点是大抽速和完全无油,冷凝系统能达到的极限真空度与冷面温度有关,即与气体分子的饱和蒸气压相关,冷面温度越低,气体饱和蒸气压越低,能得到的极限压力也就越低。当  $T=4.2\text{ K}$  时,除了  $\text{H}_2$  和  $\text{He}$  以外,其他气体如  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  等的饱和蒸气压  $p_s$  远小于  $10^{-11}\text{ Pa}$ <sup>[2]</sup>。同时可凝性气体在低温表面形成的孔隙状冷凝霜层能吸附  $\text{H}_2$  和  $\text{He}$  等非可凝气体。

## 2 EBIT 低温超导段真空系统

EBIT 主体真空室由电子枪段、低温超导段和收集器段 3 个大腔体分段组成,3 个真空室之间分别用银丝密封法兰联接。电子枪段腔内部件是 Pierce 热阴极型电子枪;收集器段腔内主要部件是各种电极组成的电子收集器、补偿线圈和聚焦线圈;低温超导段是 EBIT 的主要工作区,离子捕集阱、超导磁体、诊断光谱窗口等都在此区域。

低温段真空室内部组件轴对称结构,漂移管组件在中心部位,分上中下三段,中间段是离子捕集区。环形的不锈钢液氮储槽将漂移管包围其中,其内圆周面的低温冷凝吸附将维持离子捕集区的极高真空,超导氦姆霍兹磁体浸泡在液氮储槽中。液氮储槽与室温真空室之间有两层无氧铜冷屏,用 20 K 制冷机冷却,阻挡外界的热负载,同时做冷凝抽气面。低温下为了减少从电子枪真空腔和收集器真空腔进入低温超导段真空室的气载,在真空室的顶端和底部用大面积的隔板限制此处的气体流动。

### 2.1 常温真空获得

常温真空获得系统配置如图 1 所示。选用离子泵作为主泵,其无油、无震动、极限真空度高的特点能满足 EBIT 的使用环境和要求。常温态下超导段真空室的气载主要来自于真空室内的部件表面热脱附气载,有真空室内表面、冷屏表面、液氮容器表面等。对各种表面积进行统计的结果:不锈钢表面的总面积  $A_{SS}=4.67\text{ m}^2$ ;无氧铜表面的总面积  $A_{OHC}=7.80\text{ m}^2$ ;常温下放气率<sup>[2,3]</sup>分别取  $q_{SS}=1.3\times 10^{-8}\text{ Pa}\cdot\text{L}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$  和  $q_{OHC}=2.1\times 10^{-8}\text{ Pa}\cdot\text{L}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ ;总气载  $Q=2.2\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{L}/\text{s}$ 。如果要获得平衡压力  $5\times 10^{-6}\text{ Pa}$ ,所需要的离子泵有效抽速是  $S=343\text{ L}/\text{s}$ ,实际配置 1 台 400 L/s 的离子泵。同样,电子枪段和收集器段的真空腔各安装 1 台 400 L/s 的离子泵。

### 2.2 低温真空获得

低温段内部 2 层冷屏被 20 K 制冷机冷却,实际达到的平衡温度是 120 K 和 40 K,工作时液氮储槽表面温度 4.2 K。低温状态下气载主要来自于真空室室温外壳的表面热脱附。2 层冷屏在平衡温度下冷凝抽速分别达到每秒上万升,可以保证在外围区达到  $10^{-8}\text{ Pa}$  的压力。离子捕集区被液氮储槽包围,要求压力小于  $5\times 10^{-10}\text{ Pa}$ ,则必需要有足够的冷凝表面积和抽速。图 2 中区域 是真空室的外围区;区域 是离子捕集区;区域 和 是中间冷屏区域。由于水平方向窗口面积远大于垂直方向窗口面积,因此在估算低温态下气载时只考虑通过水平方向的通光口的进气量。在压力很低的环境下,区域 的气体分子具有足够长的自由程,因而避免了分子之间的碰撞,直接穿过冷屏和液氮储槽的出光口进入捕集区。冷屏间隙区域 和 的压力很低,忽略从此处进入捕集区的气载。当进入的气载都被有效冷凝时,离子阱区可以保持一定的真空度。

$$(p_2 - p_1) C - p_1 \cdot S_0 \cdot A = 0$$

式中  $C$  是从外围区进入核心区的流导;  $S_0$  是单位面积的比抽速,质量  $M$ 、温度  $T$  的分子的抽速  $S_0=3.64\sqrt{T/M}$ <sup>[2]</sup>;  $p_1$ 、 $p_2$  是捕集区和外围区的压力。

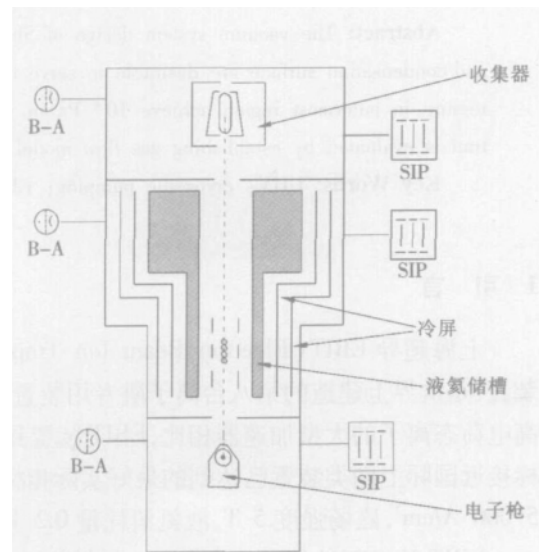


图 1 上海 EBIT 低温超导段真空室简图

计算得到的结果是冷面面积要大于 190 cm<sup>2</sup>, 实际液氮冷槽包围捕集区的实际表面积是 306 cm<sup>2</sup>, 满足了抽速要求。

### 2.3 极限真空测试

对系统在常温和低温情况下进行了极限真空的测试。常温测试过程中对真空室进行 100 的 20 h 真空烘烤, 在 EBIT 超导段的外围区域安装 B-A 规 (Varian 公司) 测量真空度。启动离子泵 30 h 后系统真空度达到 7.4 × 10<sup>-6</sup> Pa, 对离子泵做 12 h 烘烤后, 系统真空可达到 2.1 × 10<sup>-6</sup> Pa。

系统接近或达到室温下的极限真空后, 开启制冷机进行冷屏降温。外层冷屏温度下降到 100 K 后, 用液氮或氦气预冷液氮储槽, 为灌装液氮作准备。图 3 中可以看到冷屏温度趋于平衡后, 外围真空度达到 2.1 × 10<sup>-7</sup> Pa。图 4 是液氮输入过程外围真空度的变化。液氮输入过程中压力下降速度总体较快, 其中在 20 K 附近时压力急剧下降, 随后缓慢趋于极限压力, 达到 5.6 × 10<sup>-8</sup> Pa。

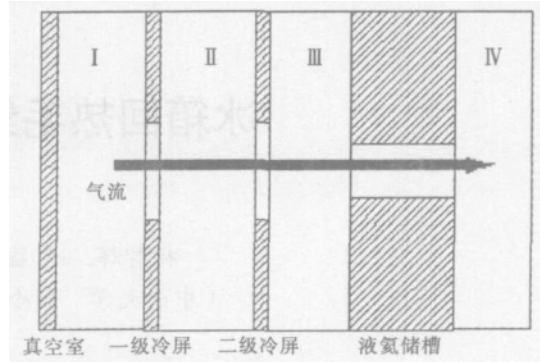


图 2 进入捕集区气路图

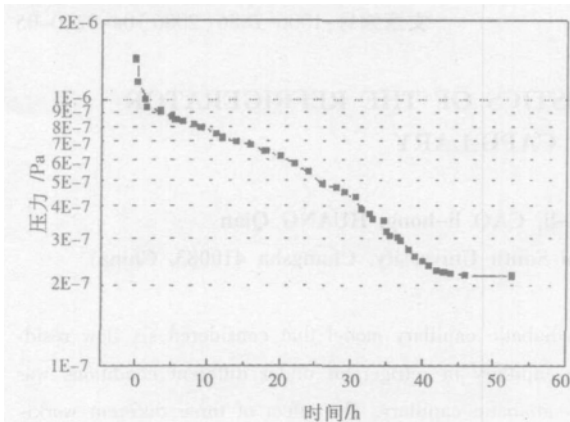


图 3 冷屏降温过程真空变化

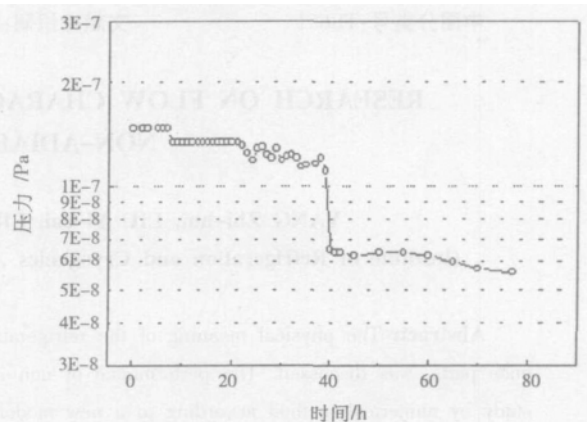


图 4 液氮降温过程真空变化

### 3 离子捕集区真空度

离子捕集区由于特殊的位置, 不能用常规方法测量。目前在其他 EBIT 装置上大概有 2 种方法来推算这里的压力: 测量某种电荷态的离子光谱, 根据一定的关系, 推测核心区的压力; 或者根据气体运动学的有关方法来计算区域压力。由于在上海 EBIT 上目前还无法开展相关的光谱实验, 因此采用后一种方法推测捕集区真空度, 在 EBIT 内部区域建立气体流动模型, 根据压力平衡方程, 计算出包括核心区的压力。

如图 5 所示, 将 EBIT 低温超导区分成 10 个区域, 相邻区域之间有一定的流导连接, 进入捕集区的气体来自于水平方向的出光口和垂直方向的孔。垂直方向孔径很小, 约为 6 mm, 大部分气体通过水平方向直径 28 mm 的出光口进入核心区。图中箭头指示气流方向。

当区域内气流达到平衡时, 压力保持稳定, 有

$$\sum C_i (p_i - p_{i-1}) + Q_i - S_i p_i = 0$$

式中  $p_i, p_{i-1}$  分别是本区域以及相邻区域的平衡压力;  $C_i$  是本区域与相邻区域的连接流导;  $Q_i$  是区域内的真空表面出气量;  $S_i$  是区域有效抽速, 面积为  $A$  的冷凝面的有效抽速  $S_i = S \cdot A$ 。

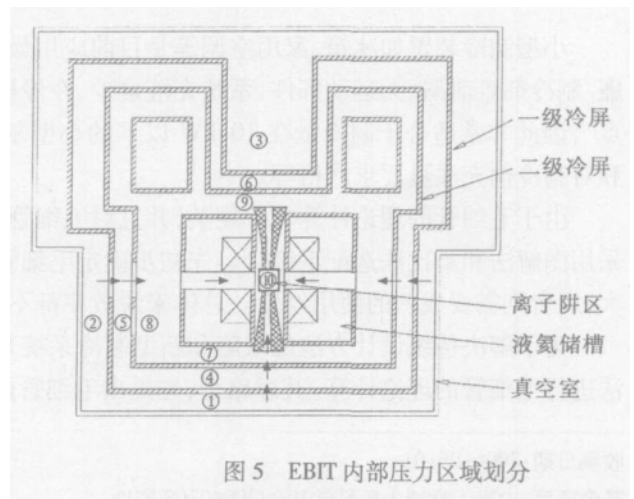


图 5 EBIT 内部压力区域划分

(下转第 230 页)



### 3.4 由动力学环境引起的过载风险分析

COPVs 的复合层承担大部分甚至是全部的动载荷,在复合层设计时已考虑了动力学环境的影响,比如选用高强度的碳纤维材料,采用 2 倍复合层强度系数等。

动力学环境过载也会导致气瓶失效。传统的经常使用的方法是进行比飞行条件严酷的随机振动试验,并由此确信不会在飞行中产生失效。新研制的 10 L COPVs,需根据要求进行给定的振动量级和加速度的随机振动试验,这样可以确定是否有动力学环境引起的过载风险。

## 4 结 论

通过分析判断表明,兰州物理研究所研制的 COPVs 具有较高的抗应力断裂性能,经分析预测在工作期间不会发生应力断裂。

通过比实际应用严格的试验控制,可以保证 COPVs 不存在内衬泄漏失效和动力学环境引起的过载失效。

产品的设计在抵御撞击损伤能力方面比较强,但仍然需要严格控制生产、试验、搬运等操作过程,杜绝发生撞击来保证其具有足够的撞击损伤可靠度。

### 参考文献:

- [1] SHAFFER J.T. Stress Rupture of Carbon Fiber Composite Materials[C]. 18th International Sample Technical Conference, 1986.
- [2] PHOENIX S, SCHWARTZ P. Statistics for the Strength and Lifetime in Creep-Rupture of Model Carbon/Epoxy Composites [J]. Composites Science and Technology, 1988, 32: 1-4.
- [3] THOMAS D. Long-Life Assessment of Graphite/Epoxy Materials for Space Station Freedom Pressure Vessel [J]. Journal of Propulsion, 1992, 8: 22-25.
- [4] BABEL H, LEDESMA L G. Delta IV COPVs risk mitigation[R]. AIAA 99-2832.
- [5] 杨福全,张天平. 复合材料气瓶的有限元建模与屈曲分析[J]. 真空与低温, 2005, 11( 1) : 40-45.
- [6] BABEL H, VICKERS B, THOMAS D. Sustained load behavior of graphite epoxy metal-lined pressure vessels for long-life space applications [R]. AIAA 89-2644.

( 上接第 209 页)

对每个区域建立方程,联立方程组求解,计算得到的捕集区压力为  $3.6 \times 10^{-12}$  Pa。计算过程中将所有气体作为可凝气体处理,而实际的测量压力是可凝气体与非可凝气体共同产生,因此计算出来的压力值比真实值小,必需对计算结果做适当修正。在外围区计算压力  $7.0 \times 10^{-9}$  Pa,实际压力  $5.4 \times 10^{-8}$  Pa,两者差值即是非可凝气体与可凝气体的数量差,占实际全压的比例约 0.87。对于捕集区,作者认为这个比例相同,根据计算压力和这个比例,推算捕集区实际压力  $2.8 \times 10^{-11}$  Pa。由于捕集区具有更低的冷面温度,非可凝气体量的含量更少,非可凝气体量与可凝气体量的差值占全压的比例应该不大于 0.87,因此捕集区的实际压力应不大于  $2.8 \times 10^{-11}$  Pa。

## 4 结 论

通过常温和低温两级真空系统的抽气作用,上海 EBIT 在常温下达到  $10^{-6}$  Pa 的真空度,低温状态下达到  $10^{-8}$  Pa 的真空度,对离子捕集区气体密度的计算也表达到了  $10^{-11}$  Pa,满足了  $10^{-10}$  Pa 的真空度设计指标。

上海 EBIT 装置建成至今将近两年,真空系统运行稳定可靠。

致谢:上海 EBIT 真空系统的相关工作得到了蒋迪奎研究员的大力指导,作者在此向他表示衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] FREDERICK JOHN CURRELL, JUNJI ASADA, KOICHI ISHII, et al. A New versatile Electron-Beam Ion Trap[J]. J Phys Soc Japan, 1996, 65( 10) : 3186-3192
- [2] 达道安. 真空设计手册(第三版) [M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [3] 张军辉,杨晓天,蒙峻,等. 真空炉高温除气工艺对降低不锈钢出气率的作用[J]. 真空与低温, 2003, 9( 2) : 105-108.