

中性束注入器漂移管道用低温泵的设计

陈长琦^{1*} 葛锐¹ 王君¹ 聂金良¹ 欧阳峥嵘² 胡纯栋²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Design of Cryopump Installed in Drift Tube of Neutral Beam Injector

Chen Changqi^{1*}, Ge Rui¹, Wang Jun¹, Nie Jinliang¹, Oyang Zhengrong² and Hu Chundong²(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China;
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academic of Science, Hefei, 230031, China)

Abstract A novel type of 20 000 L/s cryopump has been successfully developed and installed in the drift tube of neutral beam injector, based on our earlier success in the lab-built cryocondensation pump with a pumping speed of 400 000 L/s of the main vacuum chamber. The stringent technical requirements of the drift tube on cryopump and some design considerations of the pump structure and the temperature distribution of the condensation plate were also discussed.

Keywords Neutral beam injector, Drift tube, Cryopump, Temperature distribution

摘要 随着中性束注入器研究的深入开展,我们在成功地设计了一台真空室用的 400 000 L/s 低温泵的基础上又对漂移管道用的 20 000 L/s 的低温泵进行研制。本文在详细分析漂移管道特点及其对低温泵结构的特殊要求的基础上,对低温泵的结构及冷凝板的温度分布进行具体的分析。设计了一台符合中性束注入器漂移管道特殊要求的液氦低温泵。

关键词 中性束注入器 漂移管道 低温泵 温度分布

中图分类号: TB752+.53

文献标识码: A

文章编号: 1672-7126(2005)02-0154-05

中性束注入加热技术由于具有加热原理简单、技术理论成熟、注入功率高等优点而日趋成为一些大型核聚变装置主要加热手段。它由以下几个主要部分组成,即离子源、中性化室、磁偏转系统及漂移管道,如图 1 所示。在主真空室的真空度降至 10^{-6} Pa 时,将 H_2 充入离子源,经过电离产生的 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 离子经电场的加速作用形成能量为几十甚至几

百 keV 的高能离子束进入中性化室,在中性化室内与补充的 H_2 相互碰撞产生 H^0 、 H^+ ,其中 H^0 粒子束即为高能中性束,经漂移管道注入 Tokamak 装置内部, H^+ 离子则在偏转磁铁作用下打在离子吞食器上^[1]。漂移管道介于主真空室和 Tokamak 之间。由于主真空箱体内部的动态真空度为 10^{-3} Pa 量级,而 Tokamak 装置内部的真空度为 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Pa。为了解决二者之间真空度的不匹配,在漂移管道内装有一台抽速为 20 000 L/s 低温泵,它能把伴随 H^0 粒子束从主真空室传输过来的 H_2 迅速抽除,起到差分抽气的作用,从而防止高质量成分的杂质粒子注入等离子体区,污染等离子体。

本文在主真空室用抽速为 400 000 L/s 液氦低温泵成功研制的基础上^[2],为漂移管道设计一台抽速为 20 000 L/s 液氦低温泵,为将来研制用于 EAST 上更大的低温泵的设计提供物理和工程参数,同时

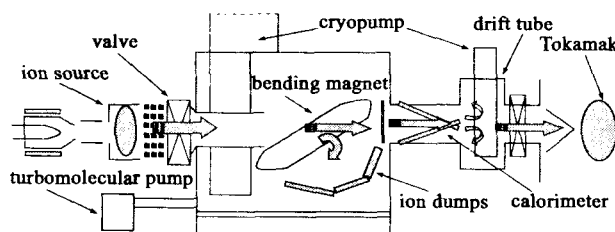


图 1 中性束注入器结构示意图

Fig.1 Schematic representation of the neutral beam injector

收稿日期: 2004-08-11

基金项目: 中科院十五择优资助(中科院 SYKXD04)

* 联系人: 教授, E-mail: chencq47@yahoo.com.cn

也可用在受控核聚变研究其它需要抽气的方面。

1 低温泵的结构设计

为了减少中性化室过来的高能中性粒子束在漂移管道再电离或电荷交换引起损失,要将漂移管道沿束流方向距离做的尽可能短,且漂移管道内装有功率测量靶,这样留给低温泵空间就非常有限。在综合比较贮槽式低温泵、单一液氮工质低温泵和插板式低温泵后,我们采用了如图 2 所示的新型插板式液氮低温泵。液氮杜瓦通过颈管焊接在上盖上,液氮杜瓦及冷板由吊杆吊装在液氮杜瓦上,4.2 K 低温冷凝面由紫铜板经过两次折弯呈 U 字形,中性束流从 U 字型冷板中间穿过。这样就可以通过增加底部的有效抽气面积来减少束流方向冷板的宽度,从而减小漂移管道的轴向距离,达到减少高能中性束再电离或电荷交换引起损失的目的。此结构与其它结构相比较,在相同的束流轴向尺寸下,体积要小一些,亦可减少制冷剂消耗量,能有效抽除漂移管道中的氢气。

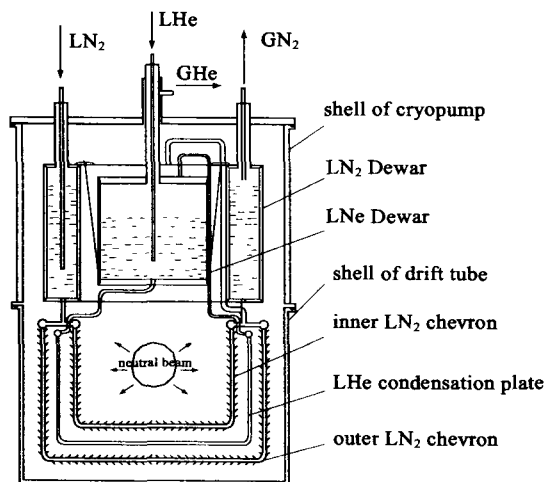


图 2 低温泵结构示意图

Fig.2 Schematics of the cryopump

我们正在研制的中性束注入器的束参数为 60 A、50 keV、300 ms。为了防止注入中性束和逃逸等离子体的高能粒子直接轰击冷凝面以及高能中性束直接辐射冷凝面和屏蔽漂移管道内壁对冷凝面的热辐射,以减少 4.2 K 低温冷凝面的热负荷,在冷凝面的内外两侧分别布置了由液氮冷却的人字型挡板,同时,在液氮杜瓦上下部分别安装金属挡板,以防止液氮杜瓦直接受到高温辐射。

2 低温阵列设计

2.1 低温阵列的结构及选材

低温泵的低温阵列由内外液氮人字型挡板和中间液氦冷凝面(板)三部分组成,见图 3。三块冷板均采用左边管道与杜瓦底部相连,右边与杜瓦顶部相连,液体沿左边管道向下流入一根母管,分三路向下呈 U 字型流动进入右边母管,分别回流至液氮和液氦杜瓦。低温板材料应满足热传导率高、机械强度高、发射率低、成本低四个方面要求。同时,还要考虑到加工工艺要求。根据对目前常用低温材料的比较,采用紫铜作为低温阵列的材料,以简单可靠的银铜焊焊接工艺来保证低温阵列的性能。

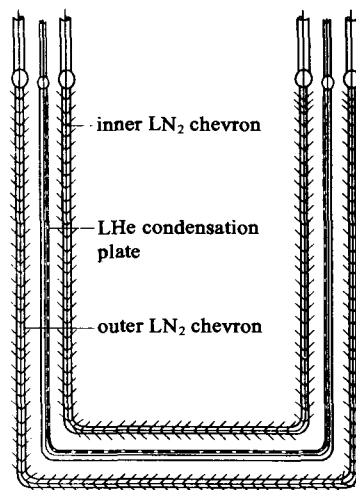


图 3 低温阵列结构

Fig.3 Schematics of the cryo array

2.2 液氮冷板的设计

为防止(1)热辐射,(2)注入中性束或逃逸等离子体的高能粒子轰击冷却面^[3]带给冷凝面热量,在冷凝面前设置液氮冷却的挡板。为了提高低温泵的有效抽气,挡板的结构设计应能满足适合抽速要求的气体传输几率和光学屏蔽。但对于束参数为 60 A、50 keV、300 ms 的中性束注入器来说,低温泵工作环境中许多温度极高的中性粒子,因此挡板又要具有良好的不透光性,在综合比较多种形状挡板后,选择了人字型挡板,它不仅具有较高的通导几率还具有具有良好的光学屏蔽效果。

透射系数和通导几率是衡量挡板性能的两个重要参数,它们是相互矛盾的,设计时必须综合考虑。挡板的最佳结构设计要保证分子传输几率足够大,

光的透射系数尽可能小,图4(a)是人字型挡板的结构,当叶片角度为 120° 、分子传输几率有极大值^[4],透射系数也相对较小,因此被认为是最佳角度。采用此结构的人字型挡板可使分子的传输几率达到0.25,透射率仅为0.18%。图4(b)为U形状人字型挡板的侧视图,一根管道布置在叶片中间,两边管道对称布置在叶片的左右1/6处。

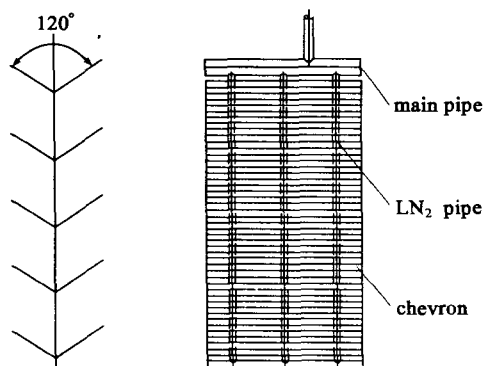


图4 (a)人字型叶片简图 (b)人字型挡板侧视图

Fig.4 Schematics of the chevron baffle(a) and side view of chevron baffle(b)

2.3 液氮冷凝面的设计

2.3.1 抽速的确定

中性束注入器漂移管道对低温泵抽速的要求主要取决于气体负载的大小和系统对动态真空度的要求。气体负载主要是从主真空室过来的气体,其成分是:离子源输出的未电离的氢气、为调节中性化室内气体靶厚而进行的补充氢气以及高能粒子轰击器壁的放气。因此漂移管道内的气体负载 Q_s 可由

$$Q_s = (P_1 - P_2) \times U \quad (1)$$

求出。式中: Q_s 单位 $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$; P_1 为主真空室动态真空度 $5.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$; P_2 为漂移管道内动态真空度 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$; U 为主真空室与漂移管道联接管内的流导,连接管道的长度为 $l = 200 \text{ mm}$,直径为 $d = 300 \text{ mm}$,通过连接管道流导为^[5]:

$$U = a \cdot U_{o,f} \quad (2)$$

$$U_{o,f} = 0.9d^2 \cdot (T/M)^{(1/2)} \quad (3)$$

式中: $a = 0.6$ 为克劳辛系数, $U_{o,f}$ 为分子流时圆孔的流导, $T = 150 \text{ K}$ 为等效氢气温度^[6], $M = 2 \text{ kg/kmol}$ 为氢气摩尔质量。由此可得 $U = 350 \text{ L/s}$, $Q_s = 1.89 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

在平衡状态下,根据抽速与气体负载和压强的关系可以求出泵的抽速 $S = 18\,900 \text{ L/s}$ 。

2.3.2 液氮冷凝面面积的确定

冷凝面面积是根据泵的有效抽速和各部件的流导来确定的。面向气源和背对气源的冷凝面所提供的有效抽速是不同的。由于本结构中背对气源冷凝面与漂移管道的内壁间隙较小,其抽气能力也较小。因此,本泵只考虑冷凝面向气源的抽速。根据抽速与面积的计算公式:

$$S = 3.64 T_m \cdot A \cdot (T/M)^{(1/2)} \quad (4)$$

式中: S 以 $20\,000 \text{ L/s}$ 计, $T_m = 0.25$ 为通过人字型挡板气体分子传输几率。由此可求得液氮冷凝面面积为 $A = 0.35 \text{ m}^2$ 。

2.3.3 液氮冷凝面的结构设计

冷凝抽气面的结构如图3和图5所示,在U形状的冷板上埋焊三根液氮传输管,这样就可以增加传热面积、提高传热效果,把抽气面降到理想的工作温度。三根管道中,一根管道布置在冷凝面的中间,另两根管道以此管为基准,对称布置在冷凝面左右1/6处。

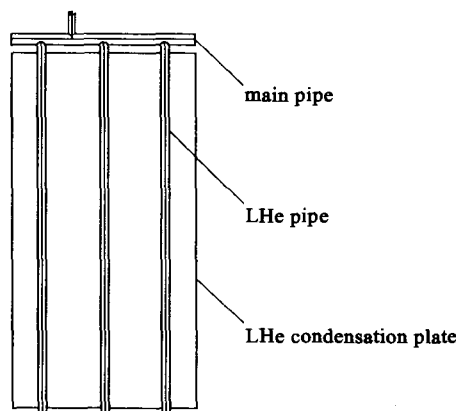


图5 液氮冷凝面侧视图

Fig.5 Side view of LHe condensation plate

3 低温系统热负荷及液位测量

3.1 低温系统的热负荷

低温系统由两部分组成,即液氮系统和液氦系统。其中液氮系统的热负荷包括人字型挡板对冷凝板的热辐射 Q_1 ,液氮杜瓦及上下挡板对液氮杜瓦的辐射 Q_2 ,气体导热 Q_g ,经过人字型挡板的光反射而透过的热量 Q_ζ ,被冷凝气体热负荷 Q_3 ,以及可忽略不计测量导线漏热。

$$Q_1 = E_1 \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4) = 0.38 \text{ W} \quad (5)$$

$$Q_2 = E_2 \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot (T_2^4 - T_1^4) = 0.12 \text{ W} \quad (6)$$

$$Q_\zeta = E_\zeta \cdot \sigma \cdot A_3 \cdot \zeta \cdot T^4 = 0.06 \text{ W} \quad (7)$$

$$Q_g = 0.243a_0 \cdot [(\gamma + 1)/(\gamma - 1)] \cdot P(T_2 - T_1)/(MT)^{(1/2)} = 0.002 \text{ W} \quad (8)$$

$$Q_3 = 0.15 \times 4.18(\Delta q + q) \cdot Q_s = 0.0016 \text{ W} \quad (9)$$

式中: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为波尔兹曼常数, $A_1 = A_3 = 0.35 \text{ m}^2$, $A_2 = 0.3 \text{ m}^2$, $T_1 = 4.2 \text{ K}$, $T_2 = 77 \text{ K}$, $T = 290 \text{ K}$, $a_0 = 0.4$ 为调节系数, $\zeta = 0.18\%$ 为高温辐射对人字型挡板的透射率, $E_1 = e_1 e_2 / (e_1 + e_2 - e_1 e_2)$, 取人字型挡板发射系数为 $e_1 = 0.9$, 液氮冷凝面发射系数为 $e_2 = 0.5^{[7]}$, $E_2 = E_\zeta = 0.2$, $\Delta q = 0.02386 \times 4.1868 \text{ J}/133.322 \text{ Pa} \cdot \text{L}$ 为氢气从 77 K 降至 4.2 K 时的能量变化, 氢气的凝结热 $q = 0.117 \times 4.1868 \text{ J}/133.322 \text{ Pa} \cdot \text{L}$, $\gamma = 1.4$ 为绝热指数。由此即可求出液氦系统总的热负荷 $Q_{\text{He}} = 0.56 \text{ W}$ 。同理, 可求出液氮系统总的热负荷 $Q_{\text{N}_2} = 54.8 \text{ W}$ 。

3.2 低温液体的消耗及杜瓦的设计

当系统充满液氮和液氦, 并投入正常抽氢时, 液氮和液氦的消耗量称为正常消耗量 P_{He} 、 P_{N_2} :

$$P_{\text{He}} = Q_{\text{He}} / (\rho_{4.2} \cdot \gamma_{4.2}) = 0.8 \text{ L/h} \quad (10)$$

$$P_{\text{N}_2} = Q_{\text{N}_2} / (\rho_{77} \cdot \gamma_{77}) = 1.23 \text{ L/h} \quad (11)$$

式中: $\rho_{4.2} = 0.124 \text{ kg/L}$ 为 4.2 K 温度时液氮的密度; $\gamma_{4.2} = 5 \times 4.1868 \text{ kJ/kg}$ 为 4.2 K 温度时液氮的气化热。 $\rho_{77} = 0.804 \text{ kg/L}$ 为 77 K 温度时液氮的密度; $\gamma_{77} = 47.76 \times 4.1868 \text{ kJ/kg}$ 为 77 K 温度时液氮的气化热。由 P_{He} 和低温泵所允许的填充液氮的间隔时间 $t(\text{h})$ 以及杜瓦中液氮面允许降低的高度计算液氮杜瓦的容积 $V_{\text{He}}^{[3]}$:

$$V_{\text{He}} = 1.5 P_{\text{He}} \cdot t \quad (12)$$

以 t 为 20 h 计, 可得 $V_{\text{He}} = 30 \text{ L}$ 。同理可得: $V_{\text{N}_2} = 44.3 \text{ L}$ 。由此即可确定液氮和液氮杜瓦的尺寸。

3.3 低温液体消耗的测量

对于液氮消耗量的测量, 采用传统的压差液位计, 即根据液体和气体密度的不同, 通过静压力的大

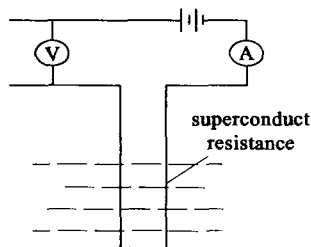


图 6 超导液位计原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the superconducting liquid level indicator

小来测量其液位的高度。而对于液氮消耗量的测量则采用超导液位计, 根据超导材料在超导-常导态特性的转变, 通过测量导线上的电压降来检测液面的高低, 电压的升降信号通过计算机自动采集(图 6)^[8], 提高了液位测量的精度。

4 液氮冷凝面的温度分布

我们为中性束注入器漂移管道设计了一台类似于束流套状的低温泵(图 2), 其抽气性能及运行过程的经济性, 不仅与低温阵列结构设计, 还与低温阵列的热力学性能, 尤其是冷凝面的温度分布有着直接的关系。

4.1 液氮冷凝面温度分布模型

液氮冷凝面是一块长 1200 mm , 宽 300 mm , 厚 4 mm 的铜板, 两边对折成 U 字型(图 3、图 5)。以两管间冷凝面为例来研究其温度分布, 温度分布模型如图 7 所示。其中 $l = 50 \text{ mm}$ 为两管间距离的 $1/2$, 令 $T_a = T_b = 4.2 \text{ K}$ 。液氮冷凝板布置在两组液氮挡板之间, 故其两面吸热量均设定为 q 。根据能量方程, 液氮冷凝面的热平衡微分方程为^[9]:

$$k\delta \frac{d^2 T}{dx^2} = 2\epsilon\sigma T^4 - 2q \quad (13)$$

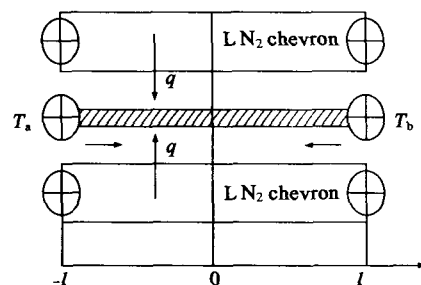


图 7 液氮冷凝面温度分布模型

Fig. 7 Temperature distribution of LHe condensation plate

式中: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为波尔兹曼常数, k -导热系数, δ -冷凝面壁厚, ϵ -两面的热辐射。

$$P(T) = 2\epsilon\sigma T^4 - 2q = h_r(T - T_0) \quad (14)$$

式中 h_r 为热当量系数; $T_0 = (q/\epsilon\sigma)^{1/4}$ 为等效环境温度。给定边界条件 $T_{x=-l} = T_{x=l} = T_p$ 下, 即可求得液氮冷凝面沿 x 方向的温度分布:

$$p(T)/p(T_p) = \frac{\text{ch}[m(x-l)]}{\text{ch}(ml)} \quad (15)$$

式中: $m = h_r/\lambda\delta$, λ 为冷凝面的导热系数。

4.2 matlab 模拟液的氮冷凝面温度分布

根据式(15)的液氮冷凝面沿 x 方向的温度分布

模型,采用 matlab 软件对该模型进行分析,即可模拟出两管间液氮冷凝面的温度分布,如图 8 中曲线所示。同时为了验证理论模拟的准确性,对该泵进行了降温实验:在两管间的液氮冷凝面上布置了 5 个 CernoxTM 温度计,实测的温度与位置的关系如图 8 中的“×”符号所示。可以看出实测的温度分布与模拟的温度分布基本上一致。因此采用紫铜材料的液氮抽气面完全满足低温泵对冷凝面的温度要求。

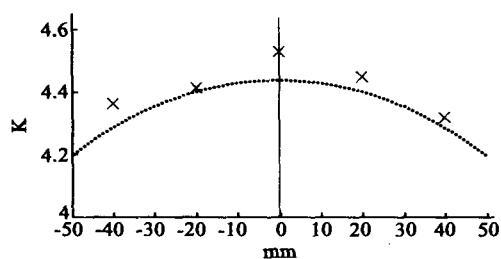


图 8 液氮冷凝面的温度分布

Fig.8 Temperature distribution of LHe condensation plate

5 结束语

概括中性束注入器漂移管道的结构及其对低温泵的特殊要求,通过热力计算、结构分析和模拟液氮冷凝面的温度分布,设计了一台抽速 20 000 L/s 的

低温泵。目前,该泵已试制完毕,经过抽真空、降温等实验,该泵基本上能够满足使用要求。关于低温泵抽气性能以及抽气过程中一些物理现象的研究,还将通过进一步的配套实验验证,从而完善设计。

参 考 文 献

- 1 Menon M M. Proc IEEE69,1981:1012 ~ 1029
- 2 陈长琦,谢远来,欧阳嵘嵘等.用于中性束注入器的 4.2 K 液氮低温冷凝泵的设计.真空科学与技术,2003:23(6):400 ~ 403
- 3 张华顺.离子源和大功率中性束源.北京:能源出版社,1987:488 ~ 520
- 4 高香院.现代低温泵.西安:西安交通大学出版社,1990:93 ~ 137
- 5 达道安.真空设计手册.北京:国防工业出版社,2004:103 ~ 117
- 6 Jinchoon Kim. Vacuum pumping of multimegawatt neutral beam injection lines. USA: American vacuum society, 1984: 1180 ~ 1187
- 7 任家生.真空,1986,(3):30 ~ 35
- 8 徐烈.低温绝热与贮运技术.北京:机械工业出版社,1999:269 ~ 272
- 9 闵桂荣,郭舜.航天器热控制.北京:科学出版社,1988,304 ~ 305

(上接第 153 页)

- 7 Kinoshita K. Recent developments in the study of mechanical properties of thin films. Thin Solid Films, 1972, 12: 17
- 8 Kusaka K, Hanabusa T, Nishida M *et al.* Thin Solid Films [J], 1996, 248: 290
- 9 Shen Y L, Suresh S J. Mat Tes [J], 1995, 10: 120
- 10 何玉平,吴桂芳,李爱侠等.不同厚度溅射 Ag 膜的微结构及光学常数研究. [J] 光学学报, 2002, 22(6): 678 ~ 681
- 11 史红民,王昊等.位错相移技术研究. [J] 光电子·激光, 1998, 9(2): 124 ~ 126
- 12 张国炳,郝一龙等.多晶硅薄膜应力特性研究.半导体学报, 1999, 20(6): 463 ~ 467
- 13 袁守洵.相移法偏振及效果. [J] 石油地球物理勘探, 1994, 29(2): 236 ~ 243
- 14 BCS6341 型电子薄膜应力分布测试仪技术报告,北京光电技术研究所, 2000