

中性束注入器低温冷凝泵性能测试

欧阳峥嵘, 谢远来, 胡纯栋, 王绍虎

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 中性束注入器(NBI)是一套用来产生高能带电粒子并进行中性化的设备。优良的动态真空特性是 NBI 获得高的束传输效率的重要保证。对布置于 NBI 主真空室的低温冷凝泵进行了低温抽气特性测试, 结果表明, 使用该泵能获得满足 NBI 要求的动态真空。

关键词: 性能测试; 低温冷凝泵; 中性束注入器; 真空系统

中图分类号: TB655

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2004)04-0198-04

PERFORMANCE TEST OF CRYOCONDENSATION PUMP FOR NEUTRAL BEAM INJECTOR

OUYANG Zheng-rong, XIE Yuan-lai, HU Chun-dong, WANG Shao-hu

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The neutral beam injector is a set of equipment that is used to produce energetic particles and then neutralize them. Excellent dynamic vacuum performance is the key factor for getting high beam transmission efficiency. The performance of the cryocondensation pump mounted in main vacuum vessel is tested. The results indicate that the required dynamic vacuum can be met by using the cryocondensation pump.

Key words: performance test; cryocondensation pump; neutral beam injector; vacuum system

1 引言

中性束注入加热被国际聚变界公认为是磁约束等离子体的最有效加热手段之一, 它利用注入的高能中性粒子束在等离子体中的电离、热化, 把能量转化成等离子体的内能来提高等离子体温度。大型聚变装置如 TFTR、DIII-D 以及未来的 ITER 等都采用中性束注入加热技术来提高等离子体的温度^[1,2]。中科院等离子体物理研究所于 2002 年 9 月正式通过立项, 开始了束参数为 60 A、50 keV、300 ms 的中性束注入器(NBI)的研制工作。

中性束注入器是一套用来产生高能带电粒子并进行中性化的设备。为了提高中性化效率, 降低再电离损失, 要求维持中性化室内的压力在 10^{-1} Pa 量级, 漂移管道内的压力在 10^{-4} Pa 量级。针对这一要求, 设计了差分式低温真空抽气系统。布置于主真空室对氢抽速为 400 000 L/s 的 4.2 K 液氮低温冷凝泵是整个抽气系统的核心部件, 其性能是影响束中性化效率的关键因素, 为此, 对该泵进行一系列的性能测试, 并在该泵的支持下进行了离子源起弧实验, 获得了高品质弧流。

2 中性束注入器的真空系统

作者正在研制的中性束注入器的原理图如图 1 所示。由离子源产生的离子, 经引出电极引出并经加速电极的加速, 成为能量达几十乃至上百千电子伏的高能离子束。高能离子束进入中性化室, 与中性化室中的

收稿日期: 2004-08-14.

作者简介: 欧阳峥嵘(1970—), 男, 湖南省平江县人, 博士, 硕士生导师, 从事大型低温氦系统及超导磁体技术研究。

气体分子相互作用实现中性化,从而将其中的一部分转化为高能中性粒子束。中性粒子束经漂移管道输送

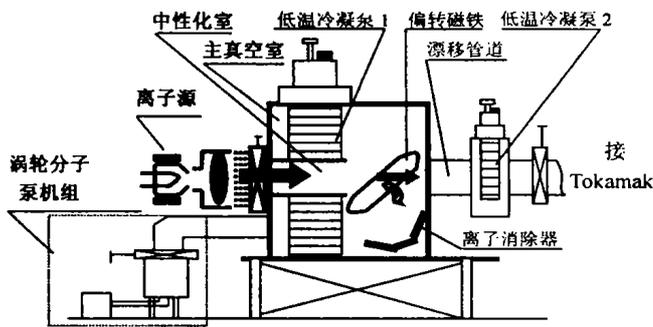


图 1 中性束注入器原理简图

到 Tokamak 装置,对 Tokamak 内的等离子体进行加热。未中性化的部分在经过偏转磁铁时,在磁场力的作用下发生偏转,最后打到离子消除器上,被离子消除器吸收^[3]。从中性束产生的角度考虑,要求维持中性化室内的压力在 10^{-1} Pa 量级;从束流传输的角度考虑,应将再电离损失降到最低,真空度则越低越好,考虑到和 Tokamak 装置内的真空度相匹配,故漂移管道内的压力为 10^{-4} Pa 量级。

设计的中性束注入器的真空系统由辅助真空系统与主真空系统构成。辅助真空系统由 15 L/s 的旋片式机械泵和 1 400 L/s 的涡轮分子泵组成;主真空系统由布置于中性化室部位的对氢抽速为 400 000 L/s 的 4.2 K 液氮低温冷凝泵和布置于漂移管道的对氢抽速为 40 000 L/s 的 4.2 K 液氮低温冷凝泵组成。辅助真空系统承担着对中性束注入系统进行真空预抽和在低温泵再生期间抽除低温泵解吸气体的任务;主真空系统则起着快速稳定中性束注入系统动态真空度的作用。由于管道流导的限制,所以在中性束注入器脉冲式工作期间,主真空室与漂移管道段形成差分式抽气模式,两者真空度相差一个量级。

3 性能测试实验

低温泵作为 NBI 的关键部件之一,担负着为 NBI 提供洁净真空和瞬时大抽速的任务。洁净的真空和优良的动态真空特性是 NBI 获得高的束传输效率的重要保证。根据计算,须在中性化室部位布置一台对氢抽速为 400 000 L/s 的 4.2 K 贮槽式液氮低温冷凝泵^[3]。如此大抽速的低温冷凝泵在国内尚属首次研制和应用。对该泵的低温抽气特性进行实验研究,无疑对当前及今后大型低温抽气技术的应用都有重要的意义。

3.1 温度测量

低温冷凝泵是利用低温冷凝面将气体分子冷凝而达到抽气目的的真空获得设备^[4]。冷凝面温度对抽速和真空度具有极为关键的作用,是影响低温泵性能的关键因素,须加以监测。低温泵的温度测量分为两大部分:氮侧温度测量与氦侧温度测量。对于氮侧,在两组人字形挡板上共设置了 8 个温度监测点,左右各 4 个。温度测量采用 Pt100 型热电阻温度计,它们分别布置在每片挡板外侧上、下 1/3 处。低温泵氦侧温度测量采用铈铁温度计,3 个监测点分别布置在两低温冷凝板的中部及杜瓦的底部中心。实验过程中通过计算机监控程序实时采集各测点的温度变化。实验结果表明,人字型挡板温度满足最高不超过 90 K 的设计要求,而低温冷凝板的温度在达到液氮温区后未发生明显波动。低温泵氦侧各测点温度变化如图 2 所示,从图中可以看出,冷凝板温度在从 13:00~18:00 点近 5 h 里基本维持在 4.3 K 以下,这为低温泵能达到设计抽速提供了有力保证。

3.2 真空度测量

为了监测低温泵工作期间主真空室内真空度的变化,在主真空室上设置了 2 个监测点,它们分别布置在主真空室后部的离子源的上方以及主真空室左侧中上部。真空度的测量采用 ZJ-12 型 B-A 规,测量数据通过计算机监控程序实时采集,采样时间间隔为 1 s。主真空室内真空度的监测以布置在主真空室后部的离子源上方的 B-A 规为主,布置在主真空室左侧中上部的 B-A 规数据则起对照作用。以下引用的测量数据均为由布置在离子源上方的 B-A 规测得。

3.2.1 降温过程主真空室内的压力变化

在开始降温前首先启动辅助真空系统(涡轮分子泵机组)对 Tank 进行初抽,初抽至低于 0.01 Pa 量级时

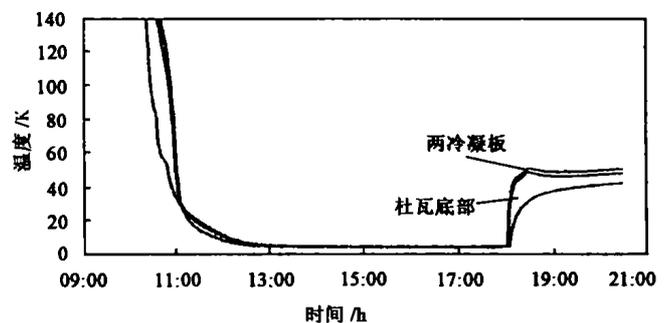


图 2 氦侧各测点温度变化曲线

开始对低温泵进行降温,降温过程中 Tank 内压力变化曲线如图 3 所示(未进行烘烤处理)。从降温曲线上可以看出,在整个低温泵氮侧全部顺利进入 LN₂ 温区后, Tank 内压力为 3.0×10^{-4} Pa; 在 LN₂ 维持挡板温度稳定并超过 12 h 后,开始向低温泵的氮侧充注 LHe,直至低温泵的氮侧全部顺利进入液氦温区,此时 Tank 内的压力达到 7.2×10^{-6} Pa,并能稳定维持。从降温实验结果可看出,在 Tank 未进行烘烤处理的情况下,利用低温泵仍能获得满足 NBI 要求的极限真空度。

3.2.2 离子源起弧实验阶段主真空室内压力变化

离子源起弧实验的目的是在低温泵投入运行后拉出一定流强与脉宽的稳定弧流,并据此找出弧流与灯丝电流、弧压、进气等参数的定量关系。与 NBI 的真实运行状态相比,此实验中没有等离子体的引出,但对于低温泵而言,其所处的工作环境完全相同;在目前的起弧实验中使用的氣體是高纯度的氢,和下一步 NBI 运行实验中使用的氣體相同;工作氣體以脉冲方式从中性化室出口进入 NBI 的主真空室,此氣體是低温泵应抽除的氣體负载。通过观察离子源起弧实验阶段主真空室内真空度的变化,可以了解该低温冷凝泵在将要进行的 NBI 运行实验中的工作特性。低温泵投入运行后,离子源起弧实验阶段主真空室内压力变化典型曲线如图 4 所示。图 4 中左侧的曲线在 1 650 s 前后记录的分别是获得 500 A/120 ms 与 200 A/1 300 ms

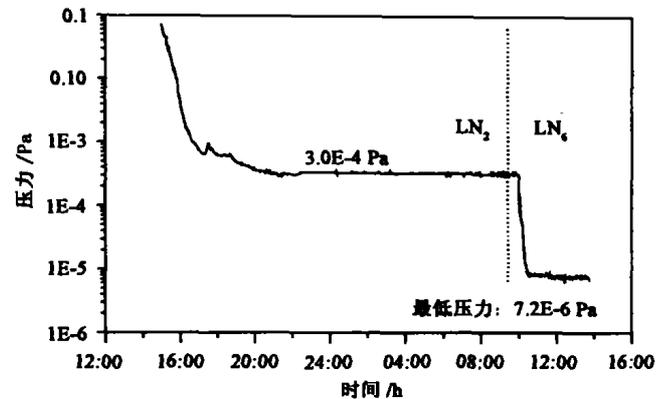


图 3 降温阶段 Tank 内压力变化曲线

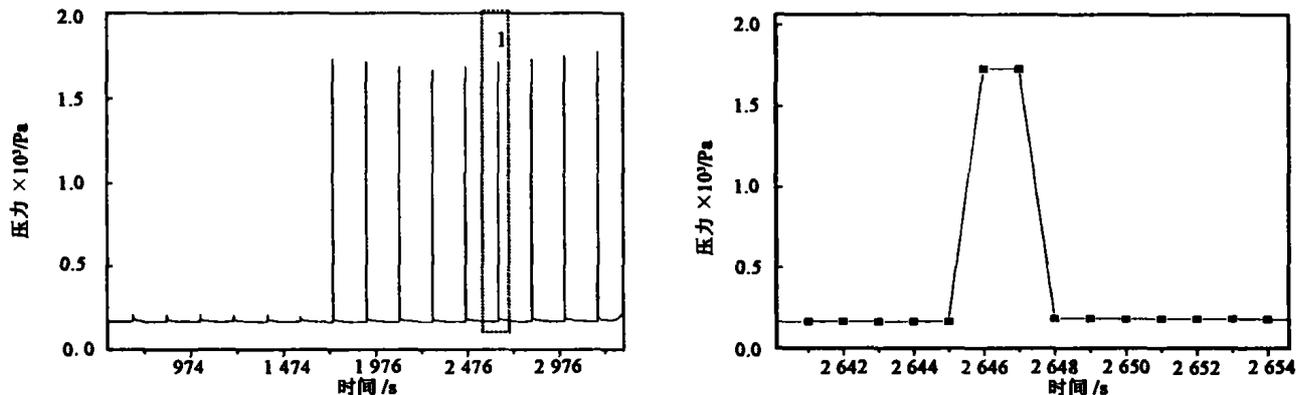


图 4 离子源起弧实验阶段主真空室内压力变化典型曲线

弧流过程中 NBI 主真空室内真空度的变化,与弧流相对应的进气量分别为 $3\ 000\text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 与 $960\text{ Pa} \cdot \text{L/s}$; 右侧的曲线是左侧所标记部分 1 的放大。从图 4 可以看出,此低温冷凝泵能为离子源起弧实验提供良好的动态真空支持,且具有良好的动态真空特性。

3.3 抽速测试

抽速是低温泵的一个非常重要的性能参数,是衡量泵抽气能力大小的一个重要指标。为了定量界定低温泵的抽速,作者对低温泵进行了抽速测试。本次抽速测试实验是以现有的 NBI 平台为基础,依据稳态条件式 $S=Q/p$ 来确定的。通过测量在给定的进气流量 Q 下的稳态压力值 p ,就可以算出该低温冷凝泵的实际抽速 S 。在离子源头部以及 2 号阳极部位各安装一个美国 Veeco 公司生产的 PV-10 型压电阀,两压电阀均经过标定^[5],抽速测量实验中的进气量 Q 就是通过控制压电阀的脉冲电压幅值来精确控制的。主真空室内真空度是利用布置在主真空室的后部、离子源上方的 ZJ-12 型 B-A 规来测量,它的测量口位于低温泵附近并远离进气口,测量口朝向和进气方向相同。通过实验确定该低温泵的对氢实测抽速为 $3.89 \times 10^5\text{ L/s}$,和当初的设计值 $4.0 \times 10^5\text{ L/s}$ 相比略显偏小。

4 结 论

通过以 NBI 为实验平台进行低温冷凝泵的性能测试实验,获得了大型低温冷凝泵在实际应用中的特性

参数。通过对实验结果与设计指标的对比,可以发现低温凝聚泵设计中存在的不足,为将来设计用于更大功率的中性束注入器的低温凝聚泵提供了可供借鉴的宝贵经验。

参考文献:

- [1] JINCHON KIM, SCHAUBEL K M, COLLERAINE A P. Helium pumping by argon frosting on a 4.5K surface[J]. J Vac Sci Technol, 1990, A8(3): 3 084~3 087.
- [2] JACQUINOT J. Plasma heating and current drive systems for ITER and future fusion devices[J]. Fusion Engineering, 1997, 1: 399~404.
- [3] 陈长琦, 谢远来, 欧阳嵘, 等. 用于中性束注入器的4.2 K液氮低温凝聚泵的设计[J]. 真空科学与技术, 2003, 23(6): 400~403.
- [4] 王如竹, 汪荣顺. 低温系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000. 293.
- [5] 陈联, 刘智明, 朱武, 等. PV-10型真空压电阀门性能测定实验[J]. 真空, 2003, (6): 34~36.

撰写参考文献须知

为了使本刊编排格式更加规范化,以便于《中国学术期刊(光盘版)》及《中国学术期刊综合评价数据库来源期刊》的收录,更广泛地进行国内外学术交流,本刊要求论著文章中参考文献一律采用我国科学技术书刊中所普遍使用的“顺序编码制”。现将撰写要点简述如下:

一、正文中标注格式:采用顺序编码制时,在对文中所引用的文献,按它们出现的先后顺序依次连续排序,并将序号置于方括号内,标于右上角或作为语句的组成部分。

例如:国内外学者对此进行了长期研究^[1~3]。

按文献[4]提供的参数设计制作出样机。

二、文后参考文献表的撰写格式:在文后撰写参考文献表时,各条文献应按在论著中文献序号顺序排列,文献中项目一定要完整,内容一定要准确。应根据不同的文献类型分别加以著录,并标注文献类型标识。各类文献的标引项及顺序要求为:

- 1) 专著:著者(多名著者时,应标引至少三名著者姓名)。书名。[M](M为专著类文献类型标识)。版本。出版地:出版者,出版年。起止页码。
- 2) 期刊:作者(多名作者时,应标引至少三名作者姓名)。题名[J]。刊名,年,卷(期):起止页码。
- 3) 论文集:作者(多名作者时,应标引至少三名作者姓名)。题名[C]。编者:文集名,出版地:出版者,出版年。起止页码。
- 4) 会议论文:作者(多名作者时,应标引至少三名作者姓名)。题名[C]。会议名称,会址,会议年份。
- 5) 专利:专利申请者。专利题名[P]。专利国别,专利文献种类,专利号。出版日期。
- 6) 学位论文:作者。题名[D]。保存地:保存者,年份。
- 7) 技术标准:起草责任者。标准名称[S]。标准代号。出版地:出版者,出版年。
- 8) 会议报告:作者(多名作者时,应标引至少三位作者姓名)。题名[R]。会议名称,会址,年份。

三、姓名标引:姓名标引时,一律姓前名后;国外作者姓名(包括中国作者姓名使用拼音标引时)一律用大写字母标引。

参考文献是作者写作论著时所参考的文献书目,重点是集中列于文末。标引的规范化,既能提高编排标准,又能提高出版发行效率,这对编者和作者都是有益的。

(本刊编辑部)