

## HT-7U 真空室抽气窗口设计

朱 武<sup>1</sup>, 鲍立曼<sup>1</sup>, 姚达毛<sup>2</sup>, 宋云涛<sup>2</sup>

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

**摘 要:** HT-7U 超导托卡马克装置是大型可控热核聚变实验装置, 其内外真空系统是该装置的重要外部设备, 内真空抽气系统为等离子体放电提供必要的清洁的真空条件, 外真空系统为超导纵场线圈和极向场线圈及电流引线罐提供绝热真空。该文介绍了真空室及其抽气窗口的结构设计原则, 根据装置运行的物理要求和抽气过程计算, 设计组建了内外真空室的抽气机组, 它们由主泵、预抽泵、前级泵、管道和阀门及其它附件组成, 经试验运行表明, 该设计是合理的。

**关键词:** HT-7U 超导托卡马克装置; 真空室; 抽气窗口

**中图分类号:** TL612.11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-5060(2003)01-0108-03

## Design of vacuum vessel pumping system in HT-7U device

ZHU Wu<sup>1</sup>, BAO Li-man<sup>1</sup>, YAO Da-mao<sup>2</sup>, SONG Yun-tao<sup>2</sup>

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The HT-7U superconducting tokamak is an advanced device for the physical experiment on steady-state plasma. The vacuum pumping system is one of the important components of the HT-7U device. The inner vacuum pumping system provides essential clear vacuum condition for plasma charging and the outer one provides insulated vacuum space for the superconducting toroidal and poloidal field coil. In this paper, some key technology during the design and manufacture of the vacuum pumping system is investigated. The structure and design principle of the vacuum vessel and pumping windows are described. According to the physical demand and pumping process of the device, the vacuum pumping system has been constituted which includes main pump, roughing pump, back pump and some accessories. All structure analysis and mechanical test have been finished. It has been proved that the present vacuum pumping system design is reasonable.

**Key words:** HT-7U superconducting tokamak device; vacuum vessel; pumping window

HT-7U 超导托卡马克装置是大型可控热核聚变实验装置, 其真空室作为装置的关键部件, 是等离子体直接运行的场所, 并提供适当的等离子体高真空运行环境<sup>[1,2]</sup>。真空室结构必须符合设计要求, 尽量采用薄壁结构, 以加快磁场的快速渗透, 从而有效控制等离子体的平衡和位形<sup>[3~5]</sup>。对诊断和实验而言, 真空室应允许有大的穿透率, 并且提供抽气、加热、注入、诊断及支撑等所需的窗口<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2002-09-23

作者简介: 朱 武(1952—), 男, 安徽潜山人, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师。

## 1 HT-7U 超导托卡马克装置的真空室结构

HT-7U 装置真空室窗口布置,如图 1 所示。为尽可能有效地利用装置中心平面内的空间和降低制造难度,HT-7U 真空室由 16 个 D 形截面的扇形全硬段焊接而成,每个 D 形扇段由 1 个直线段和 5 个圆弧段组成,每 4 个 D 形扇段经真空室小截面上边缘的筋板,组焊成一个 1/4 组件,2 个 1/4 组件组成一个半环。为有效降低氙运行时聚变中子及伽马粒子在超导纵场磁体中的核热沉积,同时也因环境保护的要求,HT-7U 真空室设计为非等厚、非圆截面的夹层结构,夹层内充入浓缩的硼( $B^{10}$ )化水,以起到对中子的慢化及屏蔽作用<sup>[4,5]</sup>。

根据物理设计要求,真空室的顶部、底部及外水平面上共开有 48 个窗口供抽气、充气、诊断、加热、电流驱动、注入及冷却通道用。其中,在真空室的顶部开有 16 个标准垂直窗口,在真空室的底部开有 4 个标准垂直窗口、8 个支撑窗口和 4 个小窗口,在真空室的外水平面上开有 14 个标准水平窗口及 2 个对称分布的切向窗口。

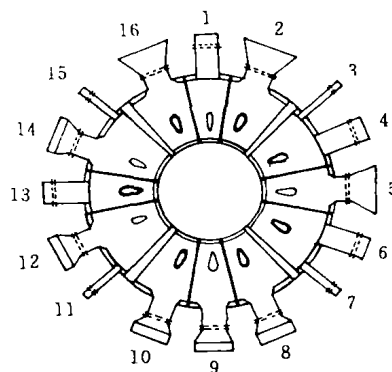


图 1 HT-7U 装置真空室窗口布置俯视图

## 2 HT-7U 真空室抽气窗口设计

HT-7U 等离子体离子数密度在稳态放电时设计指标为  $1 \times 10^{19} \sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,在辅助加热及高参数运行时是  $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ,比大气离子数密度小  $10^5 \sim 10^6$  倍,因此,真空室内的本底气压必须很低,另外杂质含量也必须尽可能低,放电才能得到良好的效果。抽气系统是在等离子体放电前提供尽可能好的本底真空,以满足等离子体对纯净环境的要求,而放电时应具有较强的杂质抑制能力,从而提高放电参数。在第一壁处理过程中(泰勒放电、辉光放电、感应烘烤和离子回旋放电清洗),气压较高时具有较大体积流量,以便抽除水蒸汽和杂质气体。因为 HT-7U 是 D-D 运行,要考虑中子屏蔽,故抽充气系统的泵、阀配置应考虑采用远距离自动控制 and 现场手动控制双重控制方式。

### 2.1 主要技术指标

(1) 内真空室:① 体积  $V=38 \text{ m}^3$ 。② 内表面积为  $200 \text{ m}^2$ 。③ 极限真空  $<1.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。④ 两次放电间真空  $<5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。⑤ 烘烤运行时最高气压为  $10^{-3} \text{ Pa}$ 。⑥ 有效体积流量为  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。⑦ 总出气率  $<4 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (抽极限时)。

(2) 外真空室:① 体积  $V=180 \text{ m}^3$ 。② 低温下极限真空  $<5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ,常温下真空  $<1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。③ 室温下总漏放率  $<1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;在液  $N_2$  和液 He 管道,总漏放率  $<1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。④ 抽到  $10^{-1} \text{ Pa}$  允许时间  $<8 \text{ h}$ 。⑤ 内、外夹层总漏率  $<1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

### 2.2 内、外真空室主抽气机组的选配

(1) 内真空抽气机组拟用 4 台  $\phi 400$  的立式涡轮分子泵为主泵,每台的名誉体积流量为  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,每台泵口上方设置  $\phi 400$  电动/手动双向超高真空阀,分子流状态与真空室的连接管道流导损失较大,一般有效体积流量仅为名誉体积流量的一半,故 4 台泵的有效体积流量仅为  $6 \sim 7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为增加压缩比,内真空的 4 台分子泵机组中的 2 台应串接体积流量较小的分子泵,并加装旁通管道和旁通阀门,每台泵之间用  $\phi 100$  管道和  $\phi 100$  电动蝶阀连接,管道上留有检漏仪接口。

(2) 外真空机组主泵用 4 台  $\phi 250$  的立式分子泵,每台体积流量为  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,前级用 2XZ-15 型直连旋片泵,体积流量为  $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ ,机组对外真空室的有效体积流量为  $2 \sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。外真空预抽机组为 4 台

0.6 m<sup>3</sup>/s 的罗茨泵机组,前级为 4 台 0.07 m<sup>3</sup>/s 的 2X-70 型机械泵,罗茨泵上方共加 4 台 20 L 容积的液 N<sub>2</sub> 冷阱。

### 2.3 抽气窗口结构

如图 2 所示,按照抽气系统要求,抽气窗口设计为喇叭形水平窗口,该窗口在装置外真空杜瓦窗口界面中心处向真空室内的最大张角为 29.5°,有效通径为 970 mm×528 mm。窗口颈管壁厚为 10 mm,方形窗口法兰,厚度为 30 mm,采用平面金属丝密封,厚度为 2 mm。为了适应装配和热胀冷缩要求,在窗口颈管上设计安装有两截波纹管。

### 2.4 抽气时间计算

设 4 台粗抽机组的有效体积流量仅为名誉体积分流量的 1/5,即  $0.07 \times 4/5 = 0.056$  m<sup>3</sup>/s,其大气压  $p_0 = 1 \times 10^5$  Pa,由于内外真空室总体积  $V = 220$  m<sup>3</sup>,抽到罗茨泵可工作的气压为  $p_1 = 1\ 000$  Pa,若总漏放率和放气率低于  $10^{-2}$  Pa·m<sup>3</sup>/s,则从  $p_0$  抽到  $p_1$  所需时间按抽气方程<sup>[7]</sup>为

$$t_1 = \frac{V}{q_e} \ln \frac{p_0}{p_1} = \frac{220}{0.056} \ln \frac{1 \times 10^5}{1 \times 10^3} = 2.02 \times 10^4 = 5.6 \text{ h} \quad (1)$$

从  $p_1$  开始,罗茨泵起动运行,设 4 台罗茨泵经流导损失后有效体积流量  $q_e' = 0.55$  m<sup>3</sup>/s,则抽到  $p_2 = 2 \times 10^{-1}$  Pa 所需时间为

$$t_2 = \frac{V}{q_e'} \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{220}{0.55} \ln \frac{1\ 000}{0.2} = 4.3 \times 10^3 = 1.2 \text{ h} \quad (2)$$

故从大气抽到  $2 \times 10^{-1}$  Pa (以后可以启动内、外主抽机组)所需时间为

$$t = t_1 + t_2 = 6.8 < 8 \text{ h (符合设计要求)} \quad (3)$$

## 3 结束语

HT-7U 超导托卡马克放电真空室是整个装置主机的关键部件之一,其设计制造质量直接影响装置运行时等离子体的各项参数,从整个工程装置的安全可靠及优质高效出发,设计了真空室、抽气窗口及真空机组。经一系列结构性能仿真计算和试验运行测试分析,对真空室在各种复杂工况下的稳定性能进行评定,结果表明,结构设计合理,抽气机组选配得当,达到了预期目标。

### [参 考 文 献]

- [1] 姚达毛. HT-7U 超导托卡马克真空室[J]. 真空科学与技术, 1999, 19(5): 342-346.
- [2] Zhao Q C. HT-7U superconducting tokamak stable operating region[J]. J Plasma Fusion Res Series, 1998, (1): 277-280.
- [3] Higashigima S. Impurity and particle recycling reduction by boronization in JT-60U[J]. J Nucl Mater, 1992, (2): 191-194.
- [4] 杜世俊. HT-7U 装置环向场线圈涡流损耗分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2001, 24(4): 517-522.
- [5] 陈文革, 李登啸, 潘引年, 等. HT-7U 装置纵场线圈的稳态及瞬态传热分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(2): 166-172.
- [6] 宋云海. 核聚变装置真空室材料的要求和发展[J]. 材料工程, 2000, (4): 35-38.
- [7] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 558-581.

(责任编辑 吕杰)

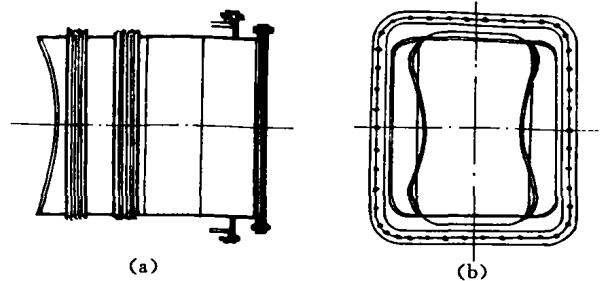


图 2 HT-7U 装置真空室抽气窗口结构图