

## EAST 超导托卡马克装置真空抽气系统

李加宏, 胡建生, 王小明, 王玲, 陈跃, 余耀伟, 王厚银, 吴金华, 左贵忠, 唐明, 庄会东

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:**真空系统在 EAST 全超导托卡马克装置中是非常重要的组成部分,它主要由内真空室抽气系统和外真空室抽气系统组成。内真空室抽气系统主要由主抽系统、偏滤器抽气系统、低杂波抽气系统组成,主要为等离子体的稳定运行提供清洁的超高真空环境;外真空室抽气系统主要由主抽系统、电流引线抽气系统及低温阀箱抽气系统组成,主要为超导磁体的正常运行提供真空绝热条件。EAST 真空抽气系统经过三轮物理实验的不断改造和完善,目前基本满足了等离子体物理实验的需要。

**关键词:**抽气系统;真空;EAST

中图分类号:TB75;TB79

文献标识码:B

文章编号:1002-0322(2010)01-0011-04

### Vacuum pumping system for experimental advanced superconducting tokamak(EAST)

LI Jia-hong, HU Jian-sheng, WANG Xiao-ming, WANG Ling, CHEN Yue, YU Yao-wei, WANG Hou-yin,  
WU Jin-hua, ZUO Gui-zhong, TANG Ming, ZHUANG Hui-dong

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

**Abstract:** The vacuum pumping system as a very important integral part of EAST is mainly composed of the inner and outer vacuum pumping subsystems. The former mainly includes three pumping systems, i.e., the major one and the other two for flow diverter and lower hybrid wave part, separately. It provides and maintains the clean and high vacuum environment for steady plasma operation. The latter keeps superconducting magnet adiabatic, which is basically made up of the three pumping systems for cryostat vacuum vessel, current lead tanks and cryogenic valve box, separately. After the reform and improvement in three rounds of physical test, the EAST vacuum pumping system can meet the requirements for further plasma physical experiments nowadays.

**Key words:** pumping system; vacuum; EAST

以开发聚变能,为人类解决干净、丰富能源为研究目标的可控热核聚变,是当代自然科学中一项具有战略意义的前沿科学。磁约束聚变是受控热核反应研究的主要途径之一,以实现氘氚聚变能的和平利用为目的,并将实现氘氚等离子体的自持燃烧及将这种燃烧持续下去作为实现聚变能的研究途径。托卡马克装置是目前主要的磁约束装置之一<sup>[1-2]</sup>,其基本原理是在一个超高真空环形真空室中,充入原料气体,如 D、T,并击穿形成等离子体,采用强磁场将等离子体约束起来,加热等离子体并实现聚变反应。

为了获得高品质的等离子体,必须降低等离子体中的杂质。而在即将进行的准稳态高参数等离子体运行的全超导托卡马克装置中,如 EAST、

ITER,除了完成杂质限制外,还需要解决真空室里的氢同位素的滞留。为了减低装置内杂质和氦水平<sup>[3]</sup>,需要采用大抽速抽气系统进行抽气,并利用壁处理技术来获得良好的真空环境和器壁状态。

实验的、先进的非圆截面的 EAST 超导托卡马克核聚变实验装置是国家九五重大科学工程之一,也是世界上第一个具有 ITER 相似结构的全超导托卡马克。EAST 主要的研究目标主要是包括先进的准稳态运行模式下相关物理,和为未来聚变反应堆——全超导托卡马克装置提供技术基础。在 2006 年,完成了 EAST 装置建设,并成功进行了工程调试及等离子体实验运行,获得了高温等离子体放电,并成功实现大拉长偏滤器位

收稿日期:2009-09-04

作者简介:李加宏(1983-),男,江苏省盐城市人,大学,研究员。联系人:胡建生,研究员,博导。

型放电。

真空系统在整个 EAST 装置中是非常重要的组成部分,外真空室为低温超导提供绝缘环境,内真空室为高温的等离子体聚变提供了清洁环境。随着等离子体物理实验的进行,EAST 的真空抽气系统也在不断的改造和完善,为 EAST 等离子体放电提供了良好的真空环境和器壁状态,满足等离子体放电物理实验的需要。本文主要介绍了当前 EAST 装置的真空抽气系统现状及其运行情况。

### 1 EAST 真空室及其基本要求

EAST 真空室主要由内真空室、外真空室、低温阀箱真空室三个相互独立部分组成。

内真空室是由 16 个 D 型截面的扇形全硬段焊接而成<sup>[4]</sup>,最大能够承受 13 个大气压差,因而能够与其它真空室分开独立运行。主体材料为 316L 不锈钢,面向等离子体的第一壁为表面镀有约 100um SiC 涂层的 GBST1308 (B 1%、Si 2.5%、Ti 7.5%、C 89%)掺杂石墨材料<sup>[5-6]</sup>,体积约 40 m<sup>3</sup> (含窗口管道),内表面积约 162 m<sup>2</sup> (包括窗口管道,未考虑石墨)。

外真空室主要包括装置主机部分和电流引线段真空室。主机部分包含超导线圈和内外冷屏等复杂的低温系统部件,体积约 160 m<sup>3</sup>。电流引线段是由两个电流引线罐和传输线部分组成,体积约 22 m<sup>3</sup>。

不同的真空室有着不同的真空要求,内真空室主要为等离子体的稳定运行提供清洁的超高真空环境,极限真空度需要高于  $2 \times 10^{-5}$  Pa。外真空室主要为超导磁体的正常运行提供真空绝热条件,其设计指标要求在室温下真空度高于 0.1 Pa,在超导态下真空度高于  $5 \times 10^{-4}$  Pa。电流引线罐和传输线真空度需要高于  $5 \times 10^{-4}$  Pa。

### 2 EAST 抽气系统

#### 2.1 内真空室抽气系统

EAST 内真空抽气系统为等离子体放电提供必要的清洁环境。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,放电时抽气系统具有很强的杂质抑制能力,从而提高放电参数,在第一壁处理过程中(烘烤、辉光放电和离子回旋放电清洗<sup>[7]</sup>)气压较高时也具有大抽速以便抽除水蒸汽和杂质气体。

根据 EAST 装置内真空室的结构特点和热

核聚变装置对真空系统的要求,内真空室抽气系统由主抽气系统、偏滤器抽气系统和低杂波抽气系统组成,如图 1 所示。

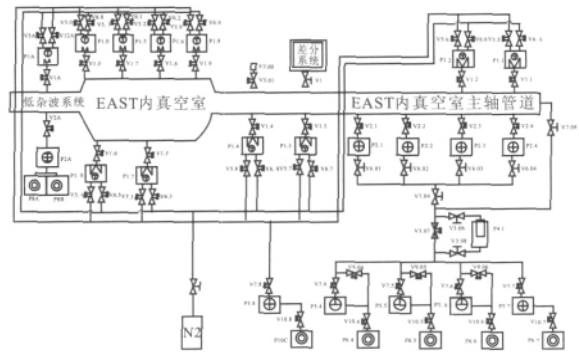


图 1 EAST 超导托卡马克装置内真空室抽气系统配置结构图  
Fig.1 Configuration of pumping systems in vacuum chamber of EAST

主抽气系统设计为前级汇总式三级抽气,安装在 EAST 装置的水平窗口的主抽管道  $\Phi 0.8$  m,长约 6 m,配备了 3 台 F-400 型,名义抽速为 3.5 m<sup>3</sup>/s 的涡轮分子泵和 1 台 3K-T 型,名义抽速为 2.5 m<sup>3</sup>/s 的复合分子泵做为主抽分子泵。分子泵前级出口通过波纹管、气动蝶阀汇总到  $\Phi 0.2$  m 的前级管道,在前级管道中配备了台 0.07 m<sup>3</sup> 的液 N<sub>2</sub> 冷阱。前级抽气由四套机组并联而成,其中三套为名义抽速为 0.6 m<sup>3</sup>/s 的 ZJ-600 罗茨真空泵和名义抽速为 0.07 m<sup>3</sup>/s 的 2X-70 旋片式机械泵串联,以提供粗抽及辉光清洗时所要求的大抽速;另外一套为名义抽速为 0.6 m<sup>3</sup>/s 的 FB-600 复合分子泵机组,提供具有高压比、高真空度的前级真空,在装置抽极限和等离子体放电中使用。另外在主抽管道上还配备了 4 台外置低温泵,每台的名义抽速为对 H<sub>2</sub> 为 13 m<sup>3</sup>/s,对 H<sub>2</sub>O 为 17 m<sup>3</sup>/s,对空气为 5.8 m<sup>3</sup>/s。

由于在偏滤器位形等离子体放电过程中,粒子被特殊的磁场位形约束进入偏滤器室,为了提高偏滤器粒子排除能力(密度控制、杂质控制、聚变产物-He 的排除),防止粒子返流,需要大抽速的抽气系统。偏滤器抽气系统包括均匀布置在装置上下窗口的 6 台外置低温泵和 1 套内置式低温泵,内置式低温泵的基本结构与安装位置如图 2 所示。在内置式低温泵运行的时候,内管和外管分别流通着液 He 和液 N<sub>2</sub>。温度冷却到 7.5 K 大概需要 3 h,内置式低温泵对 D<sub>2</sub> 的抽速约为 75 m<sup>3</sup>/s,饱和气载量约为 2500 Pa·m<sup>3</sup>。升温到 80 K 的再生过程大概需要 0.5 h。

由于低杂波天线内有大量的波纹管,表面积相当大,需要单独抽气,以防止其影响主真空室真空,同时也可以防止在高功率低杂波注入时天

线馈口击穿打火。低杂波抽气系统包括 1 台名义抽速为 3.5 m<sup>3</sup>/s 的 F-400 型的涡轮分子泵和 1 台外置低温泵,基本实现低杂波系统的电流线圈及其核心部件对超高真空环境的要求。

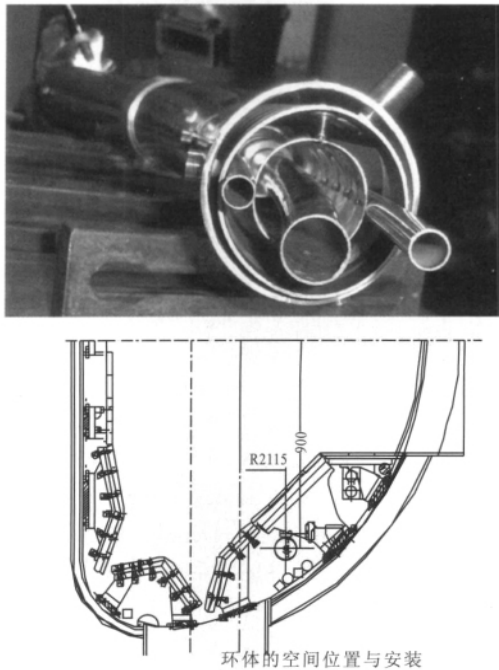


图 2 EAST 装置内置式低温泵基本结构与安装位置

Fig.2 Main construction of built-in cryopump and its position in EAST

### 2.2 外真空室及低温阀箱抽气系统

外真空室及低温阀箱主要是为超导磁体的正常运行提供真空绝热环境。其抽气系统主要包括装置主外真空室(CVV)抽气系统、电流引线段(CLT)抽气系统<sup>[8]</sup>,如图 3 所示。

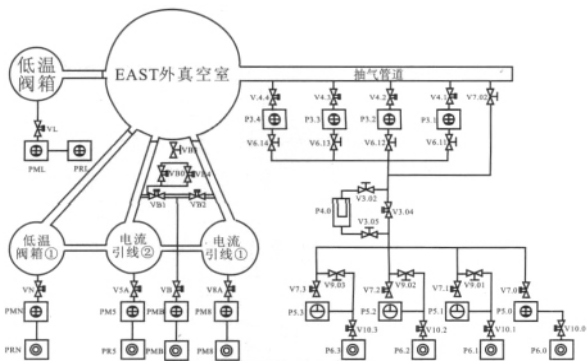


图 3 EAST 超导托卡马克装置外真空室及低温阀箱抽气系统配置结构图

Fig.3 Configuration of pumping systems for outer chamber vacuum and cryogenic valve box of EAST

装置主外真空室抽气系统部分如内真空抽气前级汇总式三级抽气,分子泵为四台名义抽速为 1.5 m<sup>3</sup>/s 的 F-250 型涡轮分子泵,前级粗抽气机组配置与内真空室前级机组相似。在外真空室降温后,5 K 的超导磁体和 80 K 的冷屏就相当于一个巨大的低温泵,大约能提供大

于 3.6 m<sup>3</sup>/s 的抽速。

电流引线段和低温阀箱(CVB)部分主要是常规电线至超导电线间的过渡部分,其也是在真空低温环境下,所有抽气机组均采用双级式抽气结构,为名义抽速为 0.6 m<sup>3</sup>/s 的复合分子泵机组组成。

## 3 真空抽气系统的运行

### 3.1 运行模式

EAST 抽气系统一般操作程序为:首先启动机械泵并对液氮冷阱充液氮,从旁通阀(V7.09)对主真空室进行抽气,当真空到达 1000 Pa 时,启动罗茨泵并关闭旁通阀,打开(V7.04),当真空到达 10 Pa 左右启动主分子泵。在内真空室真空到达 10<sup>-2</sup> Pa 时,启动外置低温泵抽气,并抽极限;当主真空室压强低于 10<sup>-3</sup> Pa,可以采用采用复合分子泵机组(P5.7、P6.7)作为前级。在等离子体放电期间根据需要启动内置式低温泵。在检漏和壁处理时,一般仅采用分子泵抽气。外真空室内的超导磁体处于常温状态时,一般采用外真空室主抽气系统抽气,并达到真空度高于 0.1 Pa,低温系统开始对磁体、冷屏等降温,由于外真空室外低温部件温度降到工作温度时,真空度可以维持高于 5 × 10<sup>-4</sup> Pa,保证真空绝热条件和防止气体高压击穿。

### 3.2 运行过程

在 EAST 真空系统的改造升级后,成功的完成了第三轮 EAST 物理实验任务。在装置窗口密封完毕后,采用三套罗茨泵机组对内真空室粗抽。启动机械泵抽气,经过约 90 min,真空度可达 1000 Pa,此时启动罗茨泵抽气,经过约 20 min 后,真空度达到 10 Pa,此时即启动分子泵抽气。整个抽气过程如图 4 所示。

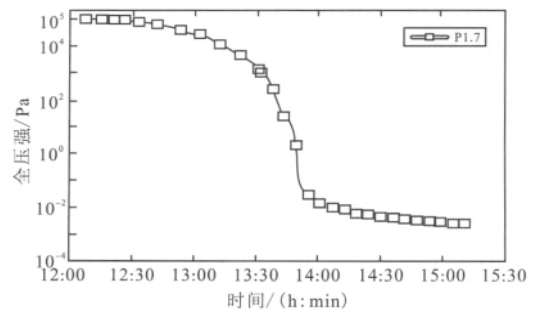


图 4 内真空室抽气曲线图(P1.7 为内真空室测量规管)  
Fig.4 Time-dependent pressure characteristic due to pumping in inner vacuum chamber(P1.7:by gauge)

在完成对装置检漏后,开始对装置进行高温烘烤,此时外置式低温泵开始投入使用。当

H<sub>2</sub>O 分压低于  $1 \times 10^{-4}$  Pa 时 ,开始进行 He- GDC。在经过约 10 天的 200℃ 烘烤和约 100 h 的 He- GDC ,内真空室真空度可达  $3.1 \times 10^{-6}$  Pa。图 5 为内真空室抽气与烘烤及 GDC 期间残余气体变化曲线。

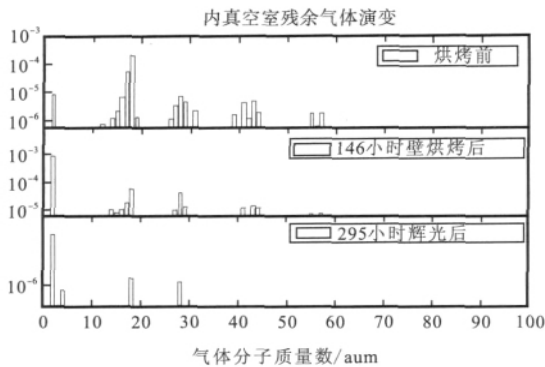


图 5 EAST 装置抽气与烘烤以及 GDC 期间残气变化

Fig.5 The evolutions of partial pressure during pumping, baking and GDC of EAST

对于大型真空系统 ,一般采用静态定容法<sup>[9]</sup>测试漏放率 ,EAST 内真空室的总的漏放气率  $Q$  同样也是使用此方法 ,先将真空室抽至本底真空度 ,再关闭所有阀门 ,隔断抽气系统 ,静态升压测试其总漏放气率 ,如图 6 所示。

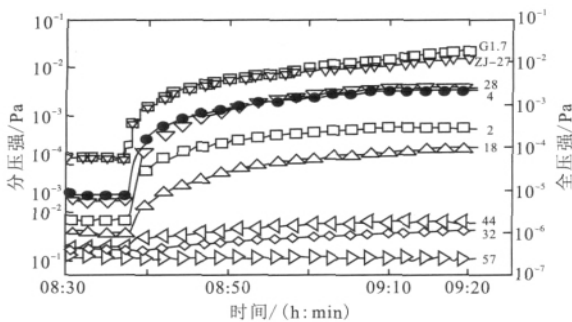


图 6 EAST 内真空室静态压强(全压及分压)上升曲线

Fig.6 Rising curves of total/partial static pressure in inner vacuum chamber of EAST

$$Q = V \frac{\Delta P}{\Delta t} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

式中  $Q$  为总的漏放气率 ; $V$  为真空室体积 ; $\Delta P$  为真空室压强变化值 ; $\Delta t$  为测试时间 ;

## 4 总结

EAST 超导托卡马克装置在 2007 年通过国家验收后 ,其真空抽气系统在实验过程的不断改造和完善 ,目前 EAST 装置内真空室极限真空为  $3.1 \times 10^{-6}$  Pa ,总的漏放率为  $2.5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  ;外真空室真空度达到  $1.9 \times 10^{-4}$  Pa。实验表明 ,EAST 真空抽气系统的性能已完全满足了装置的抽空检漏、烘烤、GDC 和硼化以及等离子体运行等抽气要求 ,为装置的高等离子体参数、先进偏滤器位形的实现提供了良好的技术支持。

## 参考文献

- [1] Wan Y X. Overview progress and future plan of EAST project [C]. 21st IAEA FEC, OV/1- 1, Chengdu, China, 16- 21 October 2006.
- [2] Xiang Gao *et al.*[J]. Nucl. Fusion 47 (2007) 1353.
- [3] Hu J S *et al.*Deposits removal and hydrogen release on exposure co-deposited films to O-ICR and O-GDC plasmas in HT- 7 [J].Plasma Phys. Control. Fusion, 2007,49:421- 434.
- [4] 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.
- [5] 胡建生,李建刚,曾敏,等.HT- 7U 石墨材料在 HT- 7 超导托卡马克装置的先行实验[J].真空科学与技术学报,2001,21(3) :245- 249.
- [6] 王小明,陈俊凌,辜学茂,等. 新型掺杂石墨及其 SiC 涂层材料真空性能评价研究[J]. 真空电子技术,2002, (1) :8- 12.
- [7] Hu J S *et al.*RF wall conditioning in EAST [C].9th ITPA- SOL/Divertor, May 7- 10, 2007,Graching, Germany.
- [8] Yang Y *et al.*Vacuum operation of first divertor campaign on Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) [C]. 17th International Vacuum Congress, Stockholm July 2- 6, 2007.
- [9] 达道安.真空设计手册[M].北京:国防工业出版社, 1999.558- 581.

## 第十八届国际真空大会展览会

中国真空学会将于 2010 年 8 月 23 日 - 27 日在北京承办第十八届国际真空大会暨真空展览会(IVC- 18) ,同时召开的还有第十四届固体表面国际会议(ICSS- 14) ,国际纳米科技会议(ICN+T2010) ,第十五届扫描隧道显微镜及相关技术国际会议(ICSTM- 15) ,第五届亚澳真空与表面会议(VASSCAA- 5)和第 109 次 IUVSTA 国际执委会(ECM- 109)。借此机会 ,中国真空学会将在 IVC- 18 大会上向全世界展示中国是一个人才济济、蓬勃向上 ,科技高速发展的形象和中国真空事业的崭新面貌 ,以此扩大我国真空业的国际影响 ,并在国际组织中进一步增强我国的地位 ,发挥更大的作用。我们热诚欢迎世界各地的朋友们参加本届国际真空界的盛会 ,同时希望得到我国真空科技界、真空企业界及相关人士的大力支持和积极参加。

现将展览会的有关事项 :

展览内容、展会宣传、展厅规定、各项收费、展位选择、报展与交费等有关事宜请与周思平联系。

地址 :北京市石景山路 23 号中础大厦 420 室 中国真空学会 邮编 :100049

电话 :(010)68862429、68878447 传真 :68820348 电子邮箱 :cvcs@chinesevacuum.com

(中国真空学会)