

EAST 装置上差分抽气测量系统的设计

潘浩¹, 黄明^{1,2}, 赵胜波^{1,2*}, 庄会东¹, 余耀伟¹, 左桂忠¹, 胡建生^{1*}
(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 在托卡马克装置运行过程中, 装置内壁吸附的杂质粒子会释放到内真空室, 影响等离子体的平稳运行。因此需要在放电前对装置进行壁处理清洗。设计了差分抽气测量系统, 可以在保持内真空室气体比例不变的前提下降低压力, 实现四极质谱仪的正常工作, 检测壁处理清洗期间的气体成分。整个设计过程围绕关键部件小流导法兰的流导设计展开, 采用粒子平衡法计算出小流导法兰的设计参数。可以在分子流流态下将待测腔室的气压从 10 Pa 降低至约 0.01 Pa。设计结果为类似高压条件下气体成分监测设备的设计提供参考。

关键词: 壁处理; 残气分析; EAST

中图分类号: TB771

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)03-0238-05

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.03.002

Design of Differential Extraction Measurement System on EAST

PAN Hao¹, HUANG Ming^{1,2}, ZHAO Shengbo^{1,2*}, ZHUANG Huidong¹, YU Yaowei¹, ZUO Guizhong¹, HU Jiansheng^{1*}
(1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: During the operation of the Tokamak device, impurity particles adsorbed on the first wall are released into the inner vacuum chamber, affecting the smooth operation of the plasma. Therefore, it is necessary to perform wall treatment on the device before discharge. A differential extraction measurement system is designed that can reduce gas pressure while maintaining the same proportion of gas in the inner vacuum chamber, achieve the normal operation of a quadrupole mass spectrometer, and monitor gas composition during wall treatment. The entire design process is carried out around the conductance design of the key component a small conductance flange, and the gas balance method is used to calculate the design parameters of the small conductance flange. It is possible to reduce the pressure of the test chamber from 10 Pa to about 0.01 Pa in the molecular flow state. The results provide reference for the design of gas composition monitoring equipment under similar high-pressure conditions.

Key words: wall treatment; residual gas analysis; EAST

0 引言

东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)是全球首个全超导托卡马克

核聚变实验装置, 于 2006 年建成并实现首次放电, 其设计目的是高功率长脉冲等离子体的运行^[1]。作为拥有大拉长非圆截面等离子体位形全超导托卡

收稿日期: 2023-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE03130000, 2022YFE03100003); 中国科学院合肥大科学中心高端用户培育基金(2021HSC-UE013)

作者简介: 潘浩, 本科, 助理工程师, 主要从事真空技术研究。E-mail: panhao@ipp.ac.cn

通信作者: 赵胜波, 博士研究生, 主要从事托卡马克物理实验研究。E-mail: shengbo.zhao@ipp.ac.cn

胡建生, 博士, 研究员, 主要从事托卡马克壁处理、真空技术研究。E-mail: hujs@ipp.ac.cn

引文信息: 潘浩, 黄明, 赵胜波, 等. EAST 装置上差分抽气测量系统的设计[J]. 真空与低温, 2024, 30(3): 238-242.

PAN H, HUANG M, ZHAO S B, et al. Design of differential extraction measurement system on EAST[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(3): 238-242.

马克装置, EAST 装置将为国际热核聚变实验堆工程(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)提供设计与运行经验^[2]。

在类似 EAST 的托卡马克装置的运行过程中,其装置内壁吸附的杂质粒子会进入纯净的等离子体中,破坏高温等离子体的运行的稳态,影响长脉冲等离子体放电的实现^[3]。因此,在放电实验前需对装置进行壁处理清洗,降低面向等离子体的第一壁吸附杂质的含量^[4]。壁处理期间装置内真空室的压力最高可达 10 Pa,最高压力远超过普通四极质谱仪的最高工作压力(约 5×10^{-2} Pa),常规的原位质谱测量方法无法直接使用^[5]。因此,需要对装置内的气体进行差分取样,即在保持气体组分比例不变的前提下降低压力,然后再通过质谱仪对壁处理期间的气体成分进行监测^[6]。

本文设计了针对 EAST 装置的差分抽气测量系统,可以满足在壁处理期间高压条件下的托卡马克内真空室气体组分检测。相关分析测试结果对需要在高压条件下检测真空室气体组分的同类装置提供了设计参考。

1 理论设计

对于压力较大,不利于进行残余气体分析的腔体,可以将其与一个小的真空腔体相连。两腔体之间通过流导较小的管路相连,小腔体单独配置真空

泵组。在小流导管路的作用下,小腔体内的压力相比大腔体内的压力下降了一定比率,但气体成分比例仍与大腔体保持一致。再对小腔体进行残余气体组分分析,通过换算就可得到大腔体的残余气体组分。

图 1 为 EAST 装置上差分抽气测量系统设计方案的基本结构。差分真空室通过一个小流导管与 EAST 装置内真空室相连,经过小流导管的气体将保持原有组成比例,并且压力下降至四极质谱仪的工作压力范围。这样通过分析计算即可获得装置内各气体的分压数据。阀 1 是手动插板阀,直接与 EAST 装置相连。阀 2 是气动插板阀,在差分系统工作时处于常闭状态。本质上,阀 2 的存在与否并不会影响差分系统正常工作,其设计目的在于作为一种备用的原位质谱监测手段。在装置现有原位质谱仪发生故障时,可将阀 2 开启。此时,与主通路相比小流导 C_m 可忽略不计,整个差分测量系统失去降压作用,变为原位质谱测量系统,可在需要时替代原有的原位质谱测量系统。可以看出,整个差分测量系统最为关键的就是小流导 C_m 的设计。差分真空室的气体平衡方程为^[7]:

$$\frac{dp_2}{dt}V = (p_1 - p_2)C_m - S_p p_2 \quad (1)$$

式中: V 为差分真空室的体积; p_2 为差分真空室内的压力; p_1 为 EAST 装置内真空室压力; S_p 为差分系统泵组的抽速; t 为时间。

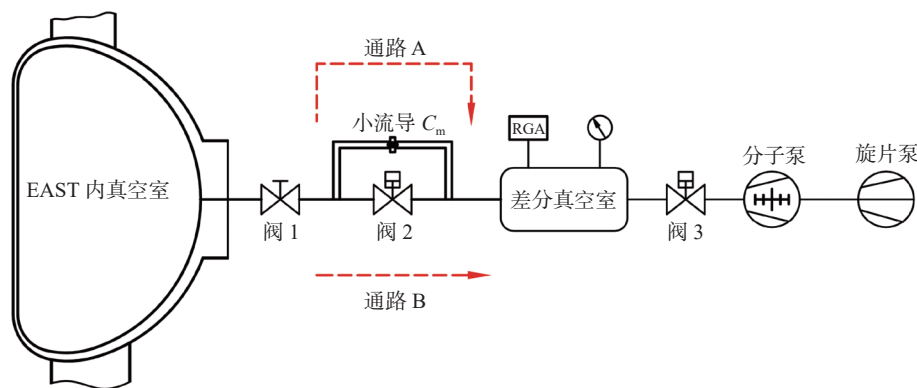


图 1 差分抽气测量系统的基本结构

Fig. 1 structure of differential extraction measurement system

稳态时,差分真空室内压力达到动态平衡,则有:

$$(p_1 - p_2)C_m = S_p p_2 \quad (2)$$

则小流导可表示为:

$$C_m = \frac{p_2}{p_1 - p_2} S_p \quad (3)$$

p_2 是差分真空室内的压力,因其直接与四极质

谱仪相连,故压力理想值为 5×10^{-2} Pa 左右。 p_1 是 EAST 装置进行壁处理清洗时的压力,最高可达 10 Pa 量级,计算流导时取 p_1 压力数值的两倍做冗余安全设计。差分系统要求真空本底较好,在满足应用条件的前提下选择较为常用的抽气机组,分子泵选用中科科仪 FF-100/300 型涡轮分子泵,其对 He

抽速为 250 L/s^[8], 前级泵选用沈阳纪维 GWSP150 无油涡旋真空泵, 额定抽速为 2 L/s, 极限真空约为 6 Pa^[9]。

根据式(3)可以计算出所需流导为:

$$C_m = \frac{p_2}{p_1} S_p = \frac{5 \times 10^{-2}}{20} \times 250 = 6.25 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

小流导 C_m 的实现方式是在图 1 中的通路 A 上添加一个法兰, 法兰中心开一个毫米级小孔。因此选择尺寸较小的 CF16 法兰, 厚度为 7 mm, 去除刀口轴肩高度, 小孔有效长度为 5 mm。为得到小孔直径的合适值, 对其流导进行计算校验。首先需要判断差分真空室中的流态。

氦原子平均自由程:

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 \bar{p}} = 1.9 \text{ mm} \quad (5)$$

式中: k 是玻尔兹曼常数; T 为温度, 式中取室温 293.15 K; d 为氦原子直径取 0.218 nm; $\bar{p}$ 为管路中的平均气压, 取可能的最高气压为 10 Pa, 即 $(p_1 - p_2)/2$ 。

克努曾数:

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{D} = 0.78 \quad (6)$$

式中: D 为流管特征直径, 取 2.5 mm。

根据克努曾分子流判别式: $Kn > 1/3$ ^[10], 式(6)计算结果为 0.77, 大于 0.33, 因此认为法兰小孔内的流态为分子流。

分子流态下, 圆柱短管道的流导的计算公式为:

$$U_f = \alpha U_{o.f} \quad (7)$$

式中: $U_{o.f}$ 为圆孔流导; α 为克劳辛系数, 其与短管道的长径比相关。

$$U_{o.f} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} A_0 = \sqrt{\frac{T}{M}} d^2 \quad (8)$$

式中: M 为气体的相对原子质量; d 为管道直径; R 为摩尔气体常数; A_0 为圆孔的面积。

根据式(8), 计算得出当 d 为 2.5 mm 时, 其流导 U_f 大小为:

$$U_f = \alpha U_{o.f} = 0.359 \times 0.9 \sqrt{\frac{T}{M}} d^2 = 5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (9)$$

在壁处理清洗时有 He 与氖气(D_2)两种可选的工作气体, D_2 的计算过程与 He 类似, 且二者分子质量相同, 表 1 给出两种气体的物理性质的计算结果。

根据式(9), 管道的 U_f 与设计值 C_m 基本一致, 最高承压约为 50 Pa, 满足 EAST 装置的使用要求。所以, 该小孔流导的最终设计参数直径为 2.5 mm,

长度为 5 mm。

表 1 壁处理清洗的工作气体的物理性质

Tab. 1 Physical properties of working gas for wall treatment

名称	相对原子质量	动力学直径/nm	平均自由程/mm	克努曾数判据比值
He	4	0.218	1.9	0.78
D ₂	4	0.275	1.2	0.49

2 系统构建

根据理论计算结果, 设计了适用于 EAST 装置差分抽气测量系统, 如图 2 所示。

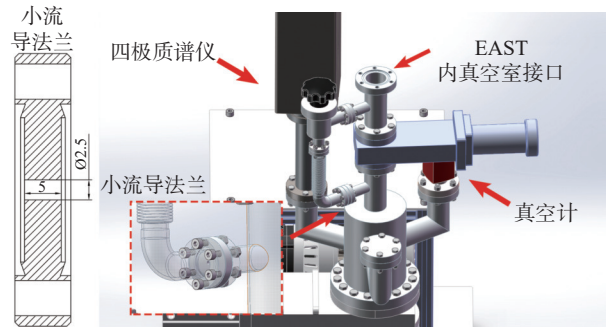


图 2 差分测量系统三维模型

Fig. 2 3D model of differential extraction measurement system

该系统通过顶部的一个 CF35 法兰与 EAST 装置的内真空室相连。左侧 C 型管路即为差分系统的工作通路。小流导法兰的设计安装采用三层堆叠的方式, 左侧与波纹管末端固定联接的 CF16 法兰相接, 右侧与差分真空固定联接的 CF16 法兰相接。差分真空室为圆柱形, 内径为 100 mm, 深为 160 mm, 容积约为 1.6 L。差分真空室四周焊接有三个 L 形取样管, 间隔 120°。取样管连接端为 CF35 刀口法兰, 分别用于真空计、四级质谱仪安装以及其他功能配件备用。本系统使用的四级质谱仪为美国 SRS 公司的 RGA100 质谱仪, 质量检测范围为 1~100 amu, 分辨率优于 0.5 amu, 最大工作压力为 5×10^{-2} Pa^[11]。真空计采用的是德国普发公司的 PKR 361 真空计, 测量范围为 $10^{-9} \sim 10^3$ hPa^[12]。差分真空室下端通过 CF100 刀口法兰与涡轮分子泵机组连接。

3 测试结果

差分抽气测量系统搭建完成后在实验室进行了台面测试。对差分真空室进行烘烤处理后抽气, 最低压力为 4.8×10^{-6} Pa。测试实验使用一个大型

真空室代替 EAST 内真空室, 将该测试真空室与差分真空室相连后先后通入 N_2 与 He 测试差分抽气测量系统的性能。打开小流导法兰上方的角阀连通两真空室, 向测试真空室充入 N_2 使其压力升至 10 Pa 左右, 此时差分真空室的压力为 1.3×10^{-3} Pa。随后停止充气并打开涡轮分子泵角阀使其压力稳步下降并记录, 完成第一次测试。待两真空室压力下降至本底左右, 随后开始第二次充入 He 测试, 此时测试真空室压力为 1.4×10^{-3} Pa, 差分真空室压力为 9.4×10^{-6} Pa。向测试真空室内通入 He 使压力升至 100 Pa 左右, 重复上述操作完成测试。

整个测试过程中两真空室压力对比如图 3 所示, 可以明显看出两次充气过程中压力的升降变化。可以发现在两次充气过程中, 两真空室的压力呈现明显的相关性。具体地, 测试真空室与差分真空室相比, 压力从 10 Pa 降低至约 0.01 Pa。进一步分析两次充气过程中差分真空室中 N_2 与 He 的压力变化, 可以得到其与理论值的差距, 如图 4 所示。

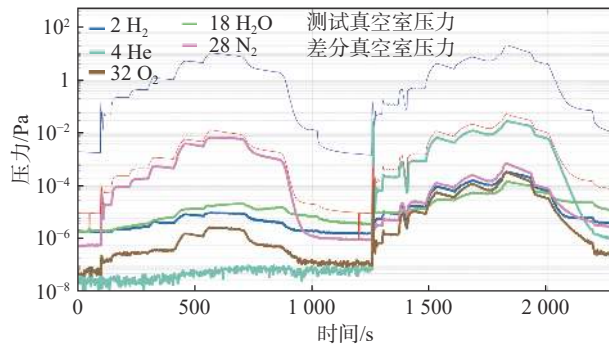


图 3 测试过程两真空室内的总压与分压

Fig. 3 The total pressure and partial pressure in the two chambers during the testing process

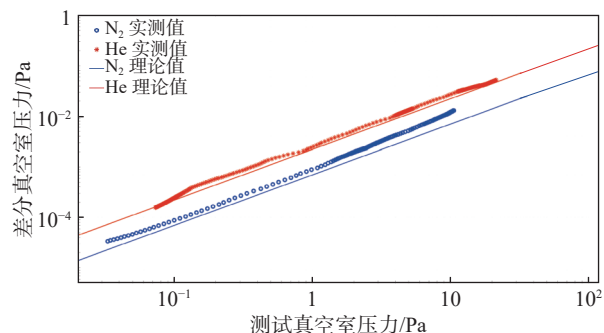


图 4 测试结果与理论值比较

Fig. 4 Comparison between test results and theoretical values

可以发现两种气体实测值与理论值存在一定

误差, 实测值总体略高于理论值, 但差异很小, 在真空计的测量误差范围内。总体上两种气体的实测值线性度较好, 符合设计目标。

设计中该系统添加了原位质谱的功能。如图 1 所示, 打开阀 2, 通路 B 即为差分测量装置提供了一个大的流导, 此时的差分测量系统降压作用减小, 可以接近原位质谱使用。实验中进行了该项测试, 相关结果如图 5 所示。

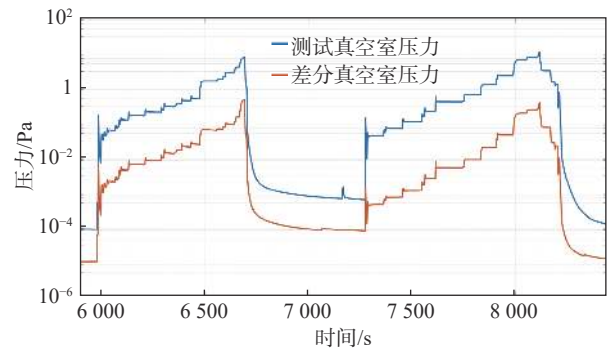


图 5 打开插板阀后的总压对比

Fig. 5 Comparison of total pressure after opening the gate valve

此时, 差分测量系统流导较大, 仅有很小的降压作用, 从测试的大真空室到差分系统的小真空室, 压力从 7 Pa 降低至约 0.5 Pa。原位质谱功能在 EAST 装置内真空室压力较低时可以使用, 可以在一定程度上代替 EAST 装置现有的原位质谱仪测量系统。

4 总结

本文利用粒子平衡法对 EAST 装置的差分抽气测量系统进行了理论分析与设计, 获得了关键部件小流导法兰的设计参数。设计结果表明, 小流导法兰中心长为 5 mm、直径为 2.5 mm 的小孔在分子流态下对 He 的流导为 $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, 差分真空室的设计参数为: 内径为 100 mm、深为 160 mm、容积约为 1.6 L。此时可以很好地解决差分抽气测量系统在 EAST 装置壁处理条件下, 由于高压导致普通四极质谱仪无法工作的问题。测试结果表明, 该装置可以在差分真空室内有效地将测试真空室的压力从 10 Pa 降低至约 0.01 Pa, 可以满足 EAST 装置在壁处理期间对其内真空室气体组分监测的要求, 最高可以在装置内压力达到 50 Pa 时承担测试任务。当 EAST 装置内部压力较低时, 可以将阀 2 打开, 将该装置用作原位质谱仪使用。为 EAST 装

置实验期间的检测、维护以及将来的长脉冲等离子体放电及其他物理实验的开展提供真空方面的硬件支撑。

参考文献:

- [1] HU J, XI W, ZHANG J, et al. All superconducting tokamak: EAST[J]. *AAPPS Bulletin*, 2023, 33(1): 8–32.
- [2] 胡建生, 王亮, 孙震, 等. 托卡马克装置中长脉冲高功率运行模式下钨偏滤器基础物理研究 [J]. *中国基础科学*, 2018, 20(5): 5–10.
- [3] ZUO G Z, HU J S, LI J G, et al. Primary results of lithium coating for the improvement of plasma performance in EAST[J]. *Plasma Science and Technology*, 2010, 12(6): 645–650.
- [4] CAL E D L, GAUTHIER E. Review of radio frequency conditioning discharges with magnetic fields in superconducting fusion reactors[J]. *Plasma Physics Controlled Fusion*, 2005, 47(2): 197–218.
- [5] 曹红梅, 余耀伟, 周德泽, 等. EAST 装置磁场条件下的辉光放电清洗实验研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(11): 835–839.
- [6] 周军, 曹曾, 曹诚志, 等. HL-2A 装置器壁处理质谱分析 [J]. *真空*, 2023, 60(2): 45–50.
- [7] 朱毓坤. 核真空技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
- [8] 中科科仪. FF-100/300 抽气速率 [EB/OL]. [2023-10-20]. https://www.kyky.com.cn/content/details97_820.html.
- [9] 沈阳纪维. GWSP 系列真空泵参数 [EB/OL]. [2023-10-20]. http://www.geowell.com.cn/index.php?m=cn&c=product&a=detail&id=636&parent_id=23&class_id=.
- [10] 王晓冬, 巴德纯, 张世伟, 等. 真空技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [11] SYSTEMSSR.Residualgasanalyzers[EB/OL].[2023-10-20]. <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/catalog/RGAc.pdf>.
- [12] 普发真空. PKR361 技术参数 [EB/OL]. [2023-10-20]. https://webportal.pfeiffer-vacuum.com/global/zh/shop/products/PT_T03_350_010.

(责任编辑: 郭 云)