

NEG 泵抽气性能仿真模拟与测试系统设计

王姣龙¹ 王国栋¹ 刘霄¹ 蔡洋洋¹ 张峰¹ 陈长琦¹ 谢远来^{2*}

(1. 合肥工业大学 机械工程学院 合肥 230009; 2. 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)

Simulation and Design of Test System for the Pumping Performance of NEG Pump

WANG Jiaolong¹, WANG Guodong¹, LIU Xiao¹, CAI Yangyang¹, ZHANG Feng¹, CHEN Changqi¹, XIE Yuanlai^{2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institute of Physical Science, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract The sintered non-evaporable getter (NEG) pump HV400 has a high affinity for hydrogen and hydrogen isotopes, and the getter material can operate at room temperature. In order to pump under the working conditions of EAST Tokamak neutral beam injector, then the HV400 was studied. The Molflow software was used to analyze the pressure distribution and extraction performance under different intake amounts at working temperature. The linear relationship between the system equilibrium pressure and intake volume and the curve of pumping speed changing with the equilibrium pressure were obtained. It was found that the pumping speed of the three gases fluctuated slightly but not significantly at $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Pa, indicating that the performance of HV400 on H_2 , CO_2 and N_2 pumping speed is basically stable. Compared with the actual pumping speed, the error of the evaluation results are 1.95%, 3.13% and 2.09% respectively, which meets the requirements of the test system and shows the design of system are feasible. Based on the pumping speed test principle of standardized flow-meter method, a pumping speed test system was designed and the test was carried out. The experiment results and simulation have verified the feasibility of the system design, and the best hydrogen extraction effect is at the level of 10^{-3} Pa, which provides theoretical basis and technical support for the design of vacuum system for NBI.

Keywords Non-evaporable getter pump, Neutral beam injector, Single-dome speed measuring, Molflow

摘要 烧结型非蒸发吸气剂(NEG)泵 HV400 具有对氢及氢同位素有很高的亲和力,即使室温状态下也能发生吸附效应。为了适用于 EAST 托卡马克中性束注入器工作条件下稳定抽气,针对 HV400 的抽气性能开展了模拟仿真和实验研究。采用 Molflow 软件仿真分析了工作状态下不同进气量的压力分布规律与抽气性能,得到了系统平衡压力与进气量以及抽速随着平衡压力而变化的特性曲线,发现三种气体在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Pa 时抽速有微小起伏,表明 HV400 对 H_2 、 CO_2 和 N_2 抽气性能稳定,评估结果与实际抽速相比误差分别为 1.95%、3.13% 和 2.09%,均在合理误差范围内。基于标准化流量计法完成了 NEG 泵抽速测试系统设计与平台搭建,并进行了抽速性能测试实验,实验结果与仿真模拟都验证了系统设计的可行性,且在 10^{-3} Pa 量级下抽氢效果最好,为 NEG 泵在中性束注入器的真空系统设计提供了理论依据和技术支持。

关键词 非蒸发吸气剂泵 中性束注入器 抽速测试罩 Molflow

中图分类号: TH36

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202304010

EAST 是国际上第一个建成的全超导托卡马克,具有类似国际热核聚变实验堆(ITER)的长脉冲高参数等离子体放电能力,探索未来聚变堆相关的物

理和工程问题^[1]。目前大部分中大型托卡马克装置中都配备了中性束注入系统,在四种辅助加热方式中,中性束注入加热的物理过程最为清晰,也最为

收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (NO.2017YFE0300103)

* 联系人: E-mail: Laurence@ipp.ac.cn

高效,为等离子体加热提供支持。中性束注入器的真空系统对抽速和抽气容量方面有严格的要求,目前中性束注入器的主真空获得设备一般采用低温泵,因工作环境的恶劣和复杂的空间结构,低温泵的抽速难以得到进一步提高,烧结型非蒸散吸气剂的出现为进一步提高中性束注入真空系统的抽速提供了新的思路。非蒸散吸气剂(NEG)泵 HV400 是一种新型吸气剂泵,为检验 HV400 在抽速、抽气容量和激活再生等特性方面是否满足中性束注入器真空系统的工作需求,本文针对 HV400 设计了一套抽气性能测试系统。

1 非蒸散吸气剂泵 HV400

非蒸散吸气剂泵 HV400(吸气剂材料由钛、锆、钒和铝等按一定比例研制的烧结型非蒸散吸气剂 ZAO)可以在 $20^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 下稳定工作,抽气容量的大小会随着温度的升高而增大,可以反复激活再生,恢复抽气性能,并且无法兰连接,可适用于作中性束注入器真空抽气系统的主抽泵,如图 1(a),相关尺寸如图 1(b)^[2]。目前,非蒸散吸气剂泵已成功应用在一些聚变装置上,如同步辐射光源、仿星器(LHD)偏滤器和加速器等,但 EAST 托卡马克中性束注入器中还尚未应用^[3-5]。

根据 [2] 提供的相关资料(HV400 Wafer Module)显示 H_2 在整个吸附过程中吸附量略微减小,在 200°C 下的实际抽速为 390 L/s ;而 N_2 和 CO_2 在 200°C 下的实际抽速分别为 105 L/s 和 130 L/s 。由此可见 HV-400 对 H_2 具有非常高的亲和力以及非常大的吸附容量,对 N_2 和 CO_2 吸附一段时间后,吸附量会随着温度的升高而增大。同时, HV400 Wafer Module 中给出了相关参数,如表 1 所示,为系统设计提供了理论数据。

2 抽气性能测试系统的可行性分析

2.1 抽速测试罩的设计

抽速测试罩是抽气性能测试系统中最基本最重要的部件,测试罩主要有两种,流量计法适用于压力大于 $1\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 或者流量大于 $2\times 10^{-2}\text{ Pa}\cdot\text{L/s}$;小孔流导法适用范围与之相反^[6]。 H_2 在中性束注入器真空系统中作为主要的被抽气体,而 H_2 在温度为 4.2 K 时的饱和蒸汽压为 10^{-4} Pa ^[7]。为了确保测试罩进气流量符合要求,需要采用图 2 所示的流量

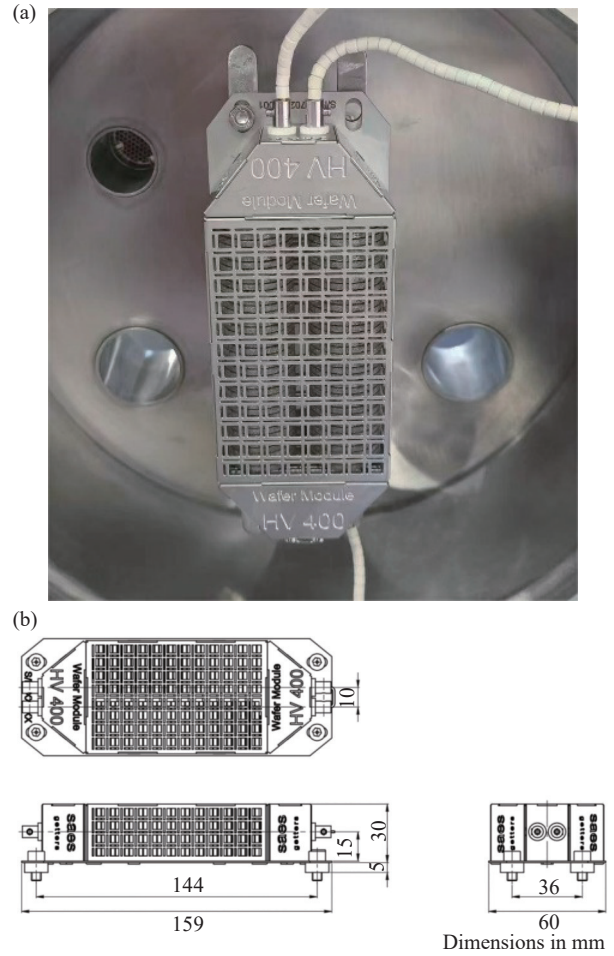


图1 HV400。(a)实物图,(b)三视图

Fig. 1 HV400. (a) picture of real products, (b) three views

表 1 HV400 相关参数

Tab. 1 HV400 relevant parameter

操作类型	温度	电参数
激活	550°C	$24\text{ V } (150\text{ W})$
工作	200°C	$6\text{ V } (15\text{ W})$

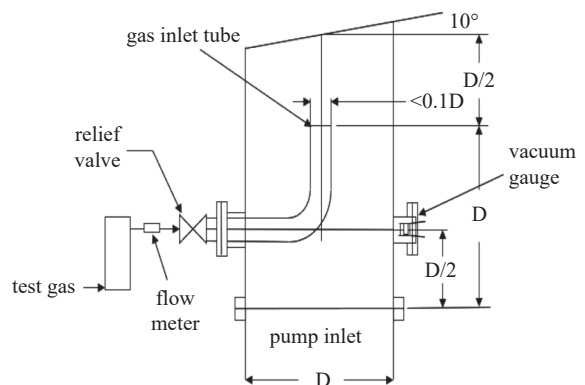


图2 流量计法测试罩示意图

Fig. 2 Vacuum chamber for testing HV400

计法测试罩来进行有效仿真。

通过蒙特卡洛模拟可以知道抽速测试罩内的压力分布情况,测试罩顶部的斜度、全量程规管的安装位置和进气管直径与测试罩直径之比等性能及参数都是影响测量系统准确测量的主要因素,而全量程规管的安装位置是最主要的影响因素^[8]。直径最小的进气管在流量分布中具有最高的轴向分量,且进气管直径越小具有更高浓度的分子击中泵的中心,因此进气管直径与测试罩直径的比值应小于 0.1;法兰距离全量程规管的位置为 $D/2$;测试罩顶部斜度取 10° ,如图 2 所示。按照测试罩尺寸结构设计,测试值接近于真实值。

根据 HV400 的尺寸大小,选取标准口径为 250 mm 的抽速测试罩,法兰距离全量程规管的位置为 125 mm,进气管直径为 6.35 mm,测试罩顶部与水平夹角为 10° 。

2.2 测试原理

美国真空协会推荐的流量计法测试罩抽速测试原理可以用式(1)表示^[9]:

$$S = \frac{Q}{p - p_0} \quad (1)$$

式中 S 为 HV400 有效抽速, L/s; Q 为进气量,由 MFC 精确控制与测量, $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$; p 为全量程规管所在处的平衡压力, Pa; p_0 为抽速测试罩的本底压强, Pa。

2.3 参数设定

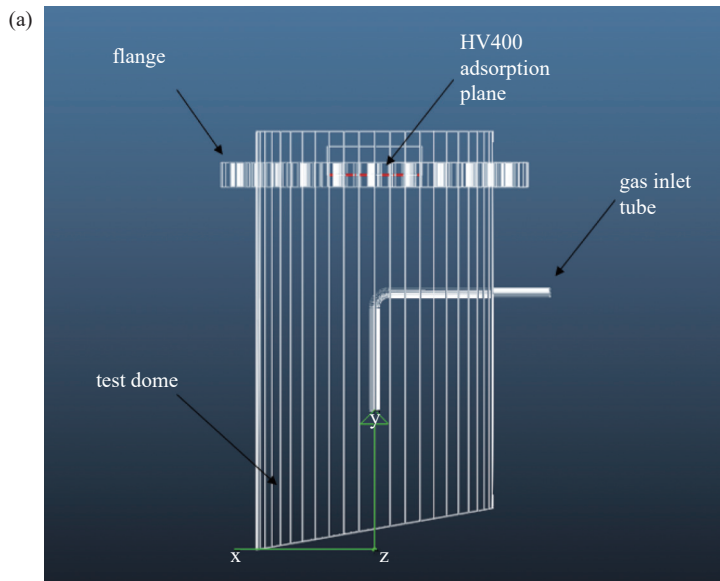
在加工相关零部件并进行装配之前,需要将 Solidworks 软件建立的三维模型以 STL 的格式导入

到 Molflow 软件中,以验证测试系统设计的可行性。 Y 轴负方向作为气体分子运输方向,导入 Molflow 软件中简化后的三维模型图,如图 3(a)所示。

设定进气面的气体相对原子质量分别为 $2(\text{H}_2)$ 、 $28(\text{N}_2)$ 和 $44(\text{CO}_2)$,温度为 293.15 K,气体分子解吸遵循余弦定理(Cosine),在抽速测试罩内气体分子运动速度的概率分布遵循麦克斯韦-玻尔兹曼分布,设定吸附面的温度为 473.15 K,且吸附面对 H_2 、 N_2 和 CO_2 的粘滞系数分别设定为 0.12、0.12 和 0.18。为了便于观察进气管和测试罩内部的压力分布,对抽速测试系统进行模拟分析,以 $10 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 的进气量为例。压力纹理图以 Y 轴、 Z 轴为截面方向,截面设置时选择 2Sided,不透明度为 0,气体分子自由通过截面,如图 3(b);从图 3(b)中清晰可见在三种气体进气管内压力均逐渐减小,根据所记录的最大值,与气体通过减压阀后的压力相比较,进气管中的气压满足进气压力要求;由于设计的测试罩体积比较小,图中测试罩内压力分布趋于均匀;可以观察到测试罩内顶部颜色较深,压力局部较高,顶部气体分子背离吸附面,无法及时被吸附;同时也可以观察 HV400 内部的压力分布,由于不断地吸附气体,压力会相对减小,均与实际情况相符;图 3(c)是抽速测试罩内压力稳定时的梯度纹理图,同时记录压力的最大值与最小值。

2.4 平衡压力与进气量的变化关系

从图 4 中可以看出三种气体在 $1 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ — $10 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 进气量下,进气量 Q 与平衡压力 p 呈现出



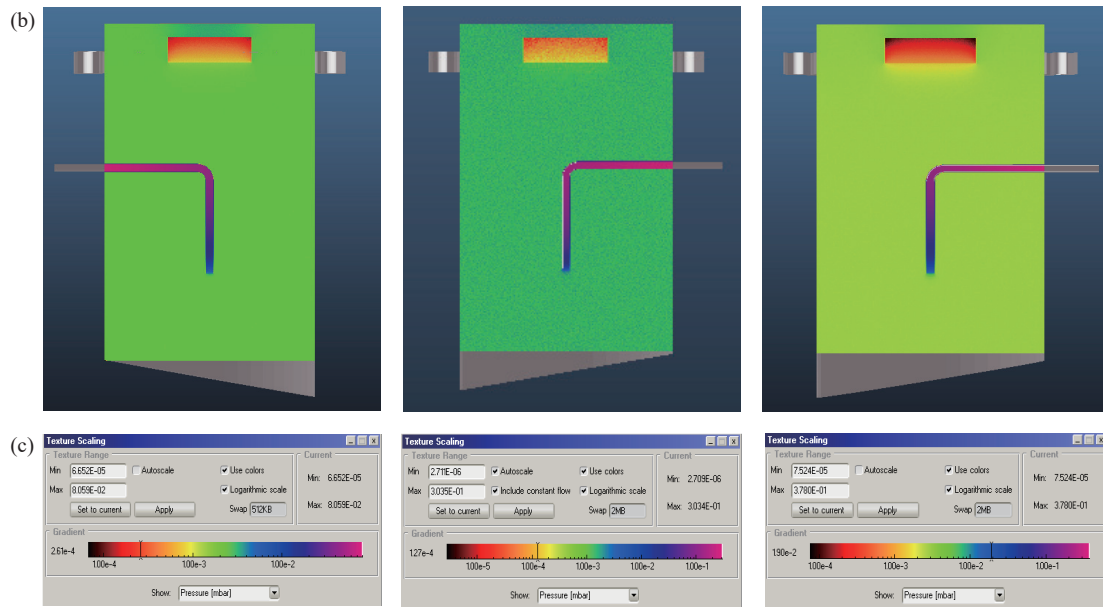


图3 Molflow 模拟中的三维模型。(a)抽速测试罩三维模型图,(b) H_2 、 N_2 和 CO_2 的压力纹理图,(c)纹理中压力梯度图

Fig. 3 3D model in Molflow simulation. (a) 3D model diagram of pumping test dome, (b) pressure texture of H_2 、 N_2 and CO_2 , (c) texture of pressure gradient

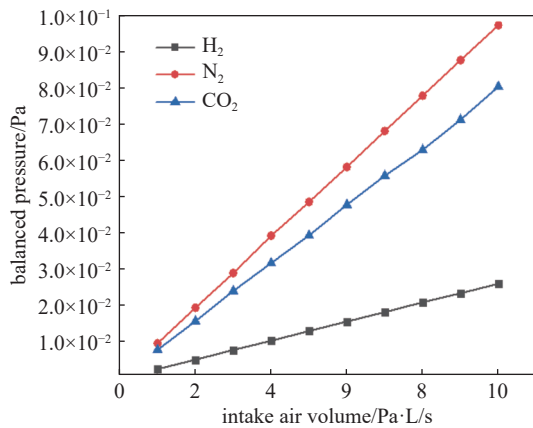


图4 进气量与平衡压力的关系变化图

Fig. 4 The relationship between intake volume and balance pressure

近似的线性关系,抽速测试罩内的平衡压力(也称气体负载)随着进气量的增加而增大;HV400 对氢气的抽速最大,对氮气的抽速最小,且抽气相对稳定。

2.5 抽速与平衡压力的变化关系

由图 5 可知在 $1 \text{ Pa} \cdot \text{L/s} \sim 10 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 进气量下, HV400 对 H_2 、 CO_2 和 N_2 的理论抽速分别在 $379.75 \text{ L/s} \sim 384.62 \text{ L/s}$ 、 $124.48 \text{ L/s} \sim 127.19 \text{ L/s}$ 和 $101.78 \text{ L/s} \sim 103.45 \text{ L/s}$ 范围内,它们的平均抽速分别为 382.41 L/s 、 125.93 L/s 和 102.81 L/s 。与实际抽速相比,误差分别为 1.95%、3.13% 和 2.09%,与文

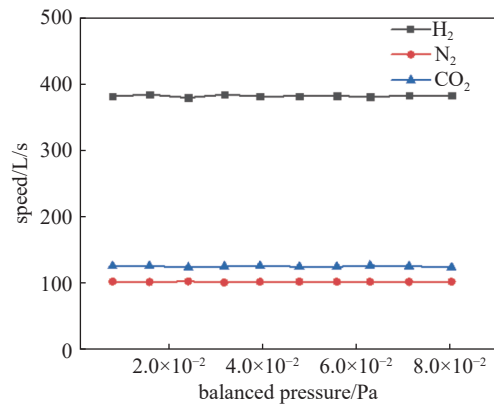


图5 抽速与平衡压力的关系变化图

Fig. 5 Speed change with balance pressure

献 [8] 分析的结果相吻合,说明了系统设计的合理性,且可有效评估 HV400 的抽气性能。

3 HV400 抽气性能测试系统的设计

HV400 抽气性能测试系统是以测试罩为基础建立的,而抽速测试罩则是该系统中至关重要的一个组成部分,也是其满足抽速测量进气系统、辅助抽气系统、测量与控制系统和激活再生系统等集成设计建立,如图 6。

3.1 进气系统

进气系统是为真空腔室提供气源的装置如图 7。选择高纯度的氢气,氢气通过减压阀后的压力达到 MFC 对进气压力的要求;为了精确控制进气量,选

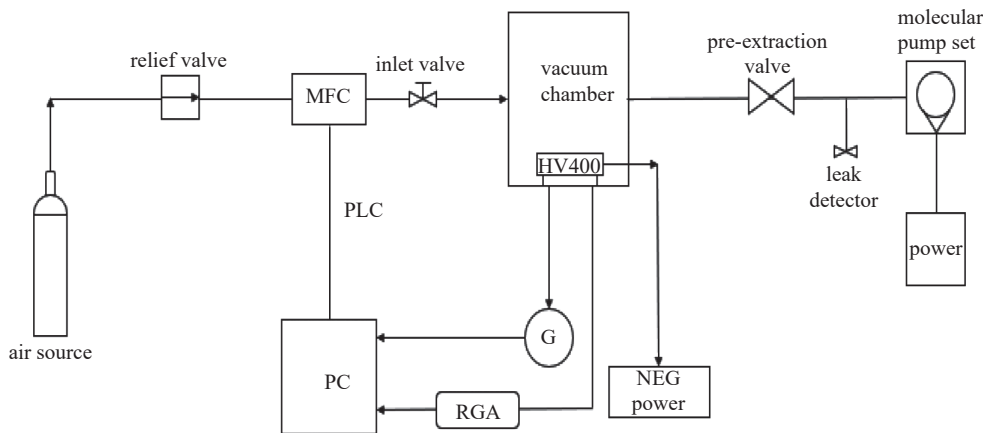


图6 抽气性能测试系统总示意图

Fig. 6 General schematic diagram of air extraction performance test system

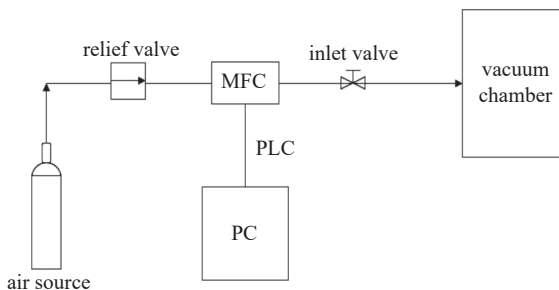


图7 进气系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the intake system

用了 Swagelok FU 型号通用针阀和 MFC 进行测量与控制。选用的 MFC 流量规格为 $0 \sim 50 \text{ mL/min}$, 满量程精度为 $0.08\% \text{FS}$, 响应时间小于 1 s 。

3.2 辅助抽气系统

辅助抽气系统是为真空腔室提供满足实验基本要求的真空辅助抽气装置, 且具有抽出 HV400 激活再生期间解吸的气体功能。辅助抽气系统主要是一台小型分子泵组, 品牌型号选用中科科仪公司的 FJ-700F 分子泵组, 连接管道选用 KF25 接口的波纹管, 分子泵组连接着电源, 并且在真空腔室和分子泵组之间安装了预抽阀和检漏口, 如图 8 所示。

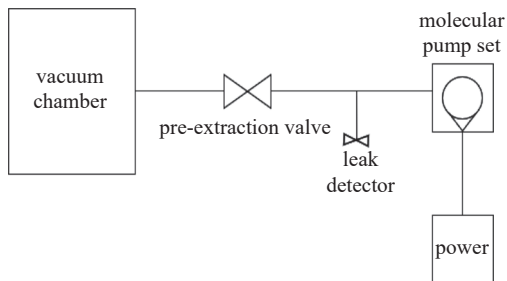


图8 辅助抽气系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the auxiliary pumping system

3.3 测量与控制系统

测量与控制系统主要是对整个真空系统实验测试信号进行实时测量与控制。如图 9 所示。

实验测试信号分别有流量、压力、残余气体分析和温度信号等, 流量信号和压力信号分别由 MFC 和全量程规管与 PC 连接, 通过 RS485 接口和 PLC 线进行数据采集; 残余气体分析仪对各个阶段的真空腔室中剩余气体进行了分析; 通过在模块的盒表面安装热电偶以监控 HV400 的温度, 再通过 NEG power 温度调节模式实现控制吸附面温度的大小。

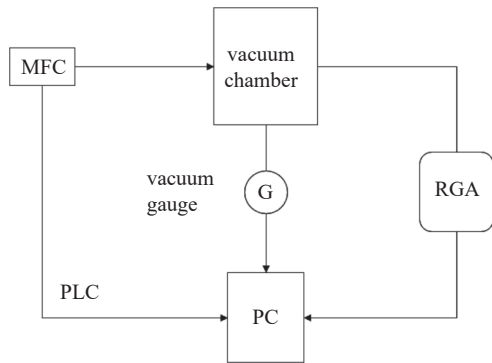


图9 测量与控制系统示意图

Fig. 9 Diagram of measuring and control system

3.4 激活再生系统

激活再生系统是为了恢复 HV400 的抽气性能。在 HV400 抽气过程中, 不同气体会被吸附在钛镉钒铝合金吸气剂的表面, 由于不断地吸附气体, 吸气剂表面被相对稳定的固溶物所覆盖, 气体难以再与吸气剂表面相结合, 从而 HV400 的抽速开始下降^[10]。HV400 的激活再生温度为 500°C , 持续高温加热会

使氢及其同位素从固溶物中重新释放出来,扩散进入测试罩,从而 HV400 抽气性能得以恢复。

4 实验研究

4.1 实验测试

NEG 泵抽气性能实验测试装置如图 10 所示。

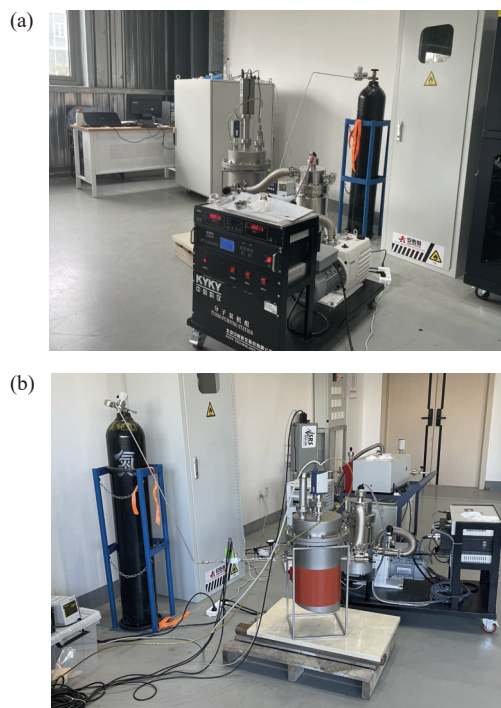


图 10 HV400 泵性能测试系统。(a)实物照片一,(b)实物照片二

Fig. 10 Photo of the experimental facility. (a) Photo 1, (b) Photo 2

实验测试装置搭建并完成调试后,利用氮质谱检漏仪进行检漏,漏率达到 $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,满足实验要求。辅助抽气系统一直处于工作状态,并持续了 3 天温度为 150°C 的烘烤处理,待烘烤结束后,真空腔室空冷至室温。真空腔室在烘烤前后的气体成分变化如图 11 所示,从图中可以看出,真空腔室里的 H_2O 、 N_2 和 CO_2 等杂质气体在烘烤后明显减少。腔室极限真空可抽至 $1.1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,满足实验测试基本要求。

在实验条件的允许下分别进 H_2 、 N_2 和 He ,激活一小时后将温度冷却至室温,启动 HV400 使其处于工作状态,实时监测进气量与真空腔室压力的稳定变化,温度调节和电压控制由本地控制,进气流量与压强远程控制,控制界面如图 12 所示。

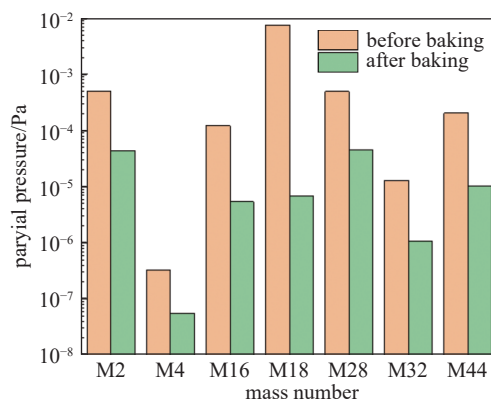


图 11 烘烤前后的气体成分变化

Fig. 11 Changes in gas composition before and after baking

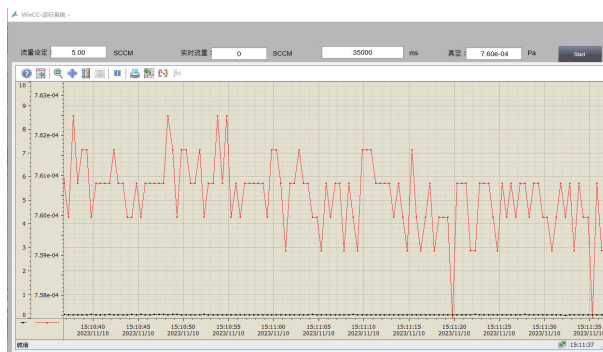


图 12 进气流量与压强控制界面

Fig. 12 Control interface

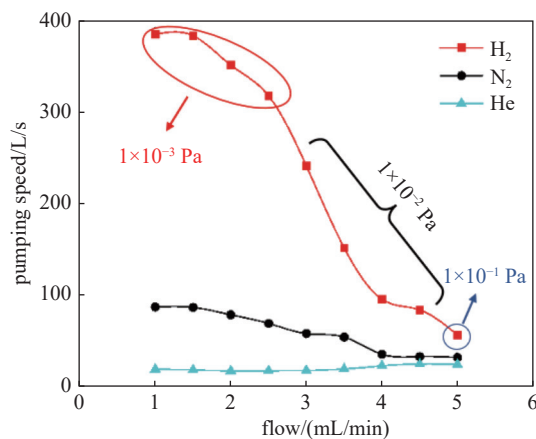


图 13 抽速与进气量的变化关系图

Fig. 13 The relationship between pumping speed and intake volume

4.2 实验结果分析

从实验结果图 13 中可以看出, HV400 对氢气和氮气的抽速会受到气体负载的影响,抽速随着气体负载的增大而减小;而 HV400 对惰性气体氦的抽速非常小,接近于 0,对氮气的抽速在 $87.56 \text{ L/s} \sim$

32.7 L/s 范围内, 对 H_2 的抽速在 384.97 L/s~57.09 L/s 范围内; HV400 在 10^{-3} Pa 量级下抽氢效果比较突出, EAST NBI 中的真空室压力分布要求是在 10^{-3} Pa 量级左右, 则可针对 NBI 真空抽气系统进行 NEG 泵模块化安装设计稳定抽氢及其同位素。

5 总结

中性束注入是核聚变科学中常用的等离子体加热工具之一, 随着聚变领域技术的发展, 中性束注入为未来聚变装置中不可或缺的辅助加热装置。由于非蒸散吸气剂 ZAO 对氢及其同位素具有较高的亲和力, 且能够在复杂恶劣的环境下运行。因此, 通过 Molflow 软件进行分子流模拟仿真, 分析在不同进气量下的压力分布, 计算结果验证了该测试系统中测试罩设计的合理性及可行性, 为 HV400 抽气性能测试系统的设计提供了理论依据。基于标准化流量计法及未来中性束注入器工程运行需求, 完成了非蒸散吸气剂泵 HV400 抽气性能测试系统的设计与平台搭建。为未来中性束注入器真空抽气系统特别是有效的抽除氢及氢的同位素的一种新型抽气方法及技术装备, 提供了理论依据与技术支持。

参 考 文 献

- [1] Wan Baonian, Xu Guosheng, EAST superconducting tokamak[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(23): 2157-2168 (万宝年, 徐国盛. EAST 超导托卡马克 [J]. *科学通报*, 2015, 60(23): 2157-2168(in chinese))
- [2] SAES Getters, <https://www.saesgetters.com>
- [3] Jiang D K, Chen Y L, Chen L P, et al. Vacuum system for SSRF storage ring [C]. EPAC'08, 2007
- [4] Liu Y, Jiang D, Wang Z, et al. The operation of SSRF storage ring vacuum system[J]. *Physics Procedia*, 2012, 32: 297-302
- [5] Motojima G, Murase T, Shoji M, et al. New installation of invessel non-evaporable getter (NEG) pumps for the divertor pump in the LHD. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 143: 26-232
- [6] Zhang Jinxin, Lu Xiangyou, Xie Yuanlai, et al. Design of test system for pumping property of a forced-flow-cooling cryogenic adsorption pump[J]. *Cryogenics \$ Superconductivity*, 2021, 49(08): 44-48 (张进新, 鲁祥友, 谢远来, 等. 迫流冷却式低温吸附泵抽气性能测试系统设计 [J]. *低温与超导*, 2021, 49(08): 44-48(in chinese))
- [7] John G, Weisend II, Handbook of cryogenic engineering [M] Germany: Taylor & Francis Press: 1999: 23-27
- [8] Nesterov S B, Yuri K Vassiliev, Ralph C Longworth. Affect on pumping-speed measurements due to variations of test dome design based on Monte Carlo analysis[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 2001, 19(5): 2287-2293
- [9] Chen Changqi, Wang shaoliang, Xie Yuanlai, et al. Development of pumping performance test platform for NBI cryocondensation pump[J]. *Vacuum*, 2008(02): 26-29 (陈长琦, 王绍良, 谢远来, 等. 中性束注入器低温冷凝泵抽气性能测试平台的研制 [J]. *真空*, 2008(02): 26-29(in chinese))
- [10] Wang Junru, Yu Yaowei, Wu Jinhua, et al. Calibration and evaluation of sintered non-evaporable getter pump made in Italy with lab-built test platform[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(10): 834-838 (王俊儒, 余耀伟, 吴金华, 等. 新型吸气剂泵真空测试系统的搭建与实验研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(10): 834-838(in chinese))