

基于4 K制冷机的低温泵抽气单元性能分析

江耀^{1,2} 谢远来^{1,2*} 田焜¹ 王蛟龙³ 连振午³ 汪谦旭^{1,2} 洪慧慧^{1,2} 潘卓^{1,2} 王昉^{1,2}

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 合肥 230026; 3. 合肥工业大学 合肥 230009)

Performance Analysis of Pumping Units of Cryopump Based on 4 K Cryocooler

JIANG Yao^{1,2}, XIE Yuanlai^{1,2*}, TIAN Kun¹, WANG Jiaolong³, LIAN Zhenwu³,

WANG Qianxu^{1,2}, HONG Huihui^{1,2}, PAN Zhuo^{1,2}, WANG Fang^{1,2}

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract In this paper, neutral beam injection experimental unit system debugging and small size prototype verification test need vacuum environment support, according to the experimental gas load properties and vacuum requirements, exploring the development of an external refrigerator cryogenic pump. A cryogenic pump based on a 4 K cryocooler was designed, and the performance of the pumping unit was analyzed. ANSYS thermal analysis method was used to study the thermal performance of the pumping unit, and the temperature distribution under different gas thermal loads was obtained. The results showed that difficult-condensing gases such as H₂ and He could be effectively extracted when the temperature of the pumping surface was about 5 K. MOLFLOW was used to simulate the gas particle movement of the cryogenic pump connected to the pumping speed test system, the rationality of the pumping unit design was verified, and the trapping coefficient was 0.409. The influence of gas load on the pumping performance is investigated. The results show that the pumping speed of the pump fluctuates less under the influence of temperature rise, and the pumping performance is superb. Research methods and results provide a useful reference for the development of cryopumps for the NBI experimental test.

Keywords Neutral beam injection, Cryopump, Vacuum, 4 K cryocooler

摘要 中性束注入实验单元系统调试和小尺寸样机验证测试需要真空环境支持, 针对实验气体负载性质与真空要求, 探索研制外置式制冷机低温泵。设计了一种基于单台4 K制冷机的低温泵并开展抽气单元性能分析, 采用ANSYS热分析方法研究抽气单元热学性能, 得到了不同气体热负载下的温度分布, 结果表明, 抽气面温度处于5 K左右, 能够有效抽除H₂、He等难凝性气体。采用MOLFLOW对连接抽速测试系统的低温泵进行了气体粒子运动模拟, 验证了抽气单元设计的合理性, 并模拟得到气体捕获系数为0.409; 探究了气体负载对抽气性能的影响, 结果表明, 受温升影响, 泵的抽速波动较小, 抽气性能良好。研究方法与结果为实验用制冷机低温泵的研制提供了有益参考。

关键词 中性束注入加热 低温泵 真空 4 K 制冷机

中图分类号: TB65

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312020

中性束注入加热(neutral beam injection, 简称NBI)是受控核聚变稳态运行的一个重要辅助加热手段^[1-2], 为了在聚变堆实验装置上进行高水平实验研究, 等离子体物理研究所设计建立了NBI综合实验测试台, 对聚变堆实验运行中出现的物理现象和

问题开展针对性的研究, 以了解物理现象背后的原因并探索相关问题解决办法^[3]。在束流的产生和传输过程相关实验中, 需要真空环境支持, 对于NBI相关的小尺寸实验样机验证测试以及未来NBI各单元模块实验测试^[4], 其对抽速的要求并不高, 采用

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(NO.2017YFE0300103); 国家重大科技基础设施项目(2018-000052-73-01-001228)

* 联系人: E-mail: Laurence@ipp.ac.cn

内置式方式启动周期长且铺设管道较为复杂,因此需要一个灵活的真空抽气系统,考虑使用外置式制冷机低温泵抽气系统。

NBI 实验测试气体负载为 H_2 及其同位素以及涉及到 He, 主要通过低温吸附进行抽除, 吸附剂的吸附能力随吸附面温度的降低而增强, 为有效抽除气体负载, 对 H_2 及其同位素需要将温度降到 15 K 以下, 对 He 甚至更低。在面对实验测试的高功率以及长脉冲目标下, 气体热负载对泵的抽气性能影响很大, 传统商用低温泵抽气面易于温升过高甚至超过饱和温度从而导致抽速下降甚至气体解吸, 对 He 的抽除更是能力有限, 不利于真空。考虑完成实验运行目标时稳定的抽气性能需求和涉及 He 的抽除, 以及随着低温制冷技术的发展, 国内外已有商用 4 K 制冷机系列和大冷量的单级制冷机系列产品, 为研制 NBI 相关实验测试用的外置式制冷机低温泵提供了技术基础。本文立足于实验运行环境 and 应用要求, 首先开展基于 4 K 制冷机的小型低温泵抽气单元的性能研究。

1 实验系统结构与真空要求

NBI 实验系统结构以及工作原理决定了其气体负载性质, 也是确定低温泵功能设计的依据之一。如图 1 所示为 NBI 实验系统总体结构示意图, 包括束源产生及束流传输相关部件, 在进行 NBI 测试试验时, 在离子源处, 系统提供气体通过放电产生源

等离子体并经过电极引出及加速形成高能束流再经截止靶进行功率测量, 而未被电离的气体则扩散进入真空腔室, 因此真空室内的气体负载主要来源于离子源处的扩散气体以及因功率沉积而产生的气体。在考虑中性化的实验中, 在中性化室补充充气形成气体靶, 将高能离子束转换成高能中性束, 因此气体负载还来源于中性化器内的补充气体。气体负载大小取决于离子源的气体利用效率、引出束流以及中性化室的补充充气量等^[5], 气体负载温度与 NBI 内部各部件壁面温度也有关联, 气体粒子在等离子体室的温度为 630 K, 在传输过程中与各壁面发生碰撞并交换热量, 其温度也随之改变, 在长脉冲实验以及脉冲间隔期间, 各部件壁面温度不断变化, 其温度处于室温至 630 K^[6]。在束源调试的实验中, 要求真空室内压力在脉冲期间快速恢复至 10^{-5} Pa 左右; 在考虑气体靶的实验中, 要求真空室内满足典型压力梯度分布, 即在中性化室区域要求 10^{-2} Pa 的真空压力, 而在磁偏转区域要求 4×10^{-3} Pa 的真空压力。

为方便 NBI 单元测试及束源调试实验系统的搭建与维护, 对系统结构尺寸的控制很有必要, 这就要求低温泵在紧凑的结构下保持抽气功能的稳定以及提高抽气速率和容量, 以满足系统对抽速和真空压力的要求, 因此研究低温泵抽气单元的抽气性能对泵的设计具有重要意义。

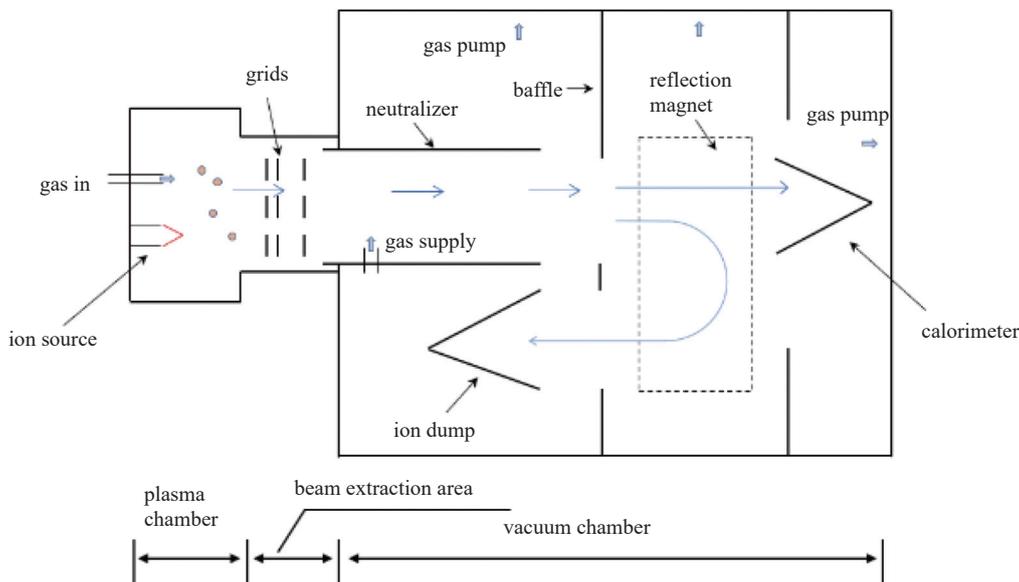


图1 NBI 实验系统总体结构示意图

Fig. 1 Diagrams of NBI gas source distribution and vacuum pressure distribution.

2 抽气单元性能影响因素分析及研究方法

低温泵的设计目标是在给定的冷量供应和尺寸限制条件下实现抽气速率的最大化。基于实验气体负载特性,抽气阵列采用低温面粘附活性炭吸附气体^[7],其抽气原理主要是通过低温介质将抽气面冷却到一定温度下,气体粒子被结合在吸附剂上,且两者之间的结合力大于气体分子在凝结状态下的结合力,因此即使抽气面温度高于气体的露点温度,气体依然可以通过吸附而被抽除,这使得 H₂、He 等难以冷凝的气体可以被有效抽除^[8]。

在抽气面温度稳定的情况下,依据文献 [9],单位面积上对气体分子的抽速可由式(1)表达:

$$S' = c \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \left(1 - \frac{P_{ep}}{P} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_s}} \right) \quad (1)$$

式中, c 为抽气面对气体的捕获系数,其值取决于气体粒子到达吸附面的传输几率以及吸附剂表面对气体粒子的吸附系数; p_{ep} 为吸附平衡压强; T_s 为吸附剂表面温度。则低温泵的设计抽气速度可由式(2)得出:

$$S = A \cdot S' \quad (2)$$

式中, A 为低温泵的入口面积。综合上述公式可知,

影响低温泵抽气性能的因素不仅仅是泵的入口面积,泵的结构、抽气单元温度以及被抽气体种类等同样决定着低温泵的抽气能力。抽气单元温度主要是由制冷机决定的,基于住友企业 RDK-415D 4 K 制冷机,设计泵体结构与抽气阵列,采用数值模拟的方法,探究抽气单元在抽除气体时的温度分布以及对 H₂ 等气体抽除性能的影响,并计算其捕获系数,为低温泵的设计提供数值依据。

3 模拟仿真分析

3.1 建立几何模型

依据 RDK-415D 4 K 制冷机外形尺寸(一级冷头直径 125 mm、距离二级冷头 243 mm),设计泵体口径 250 mm,冷屏长度 300 mm、口径 236 mm,参考低温泵相关设计^[10-11],挡板(图 2(a)所示)采用人字形结构,吸附阵列(图 2(b)所示)采用无氧铜粘附活性炭并固定到导热板上,相关部件及其尺寸参数如表 1 所示。建立物理模型并进行简化,如图 2(c)所示,挡板和冷屏通过连接杆相连,为吸附阵列提供热辐射屏蔽,制冷机一级冷头连接冷屏底座,二级冷头连接吸附阵金属导热板,为抽气单元提供冷量。

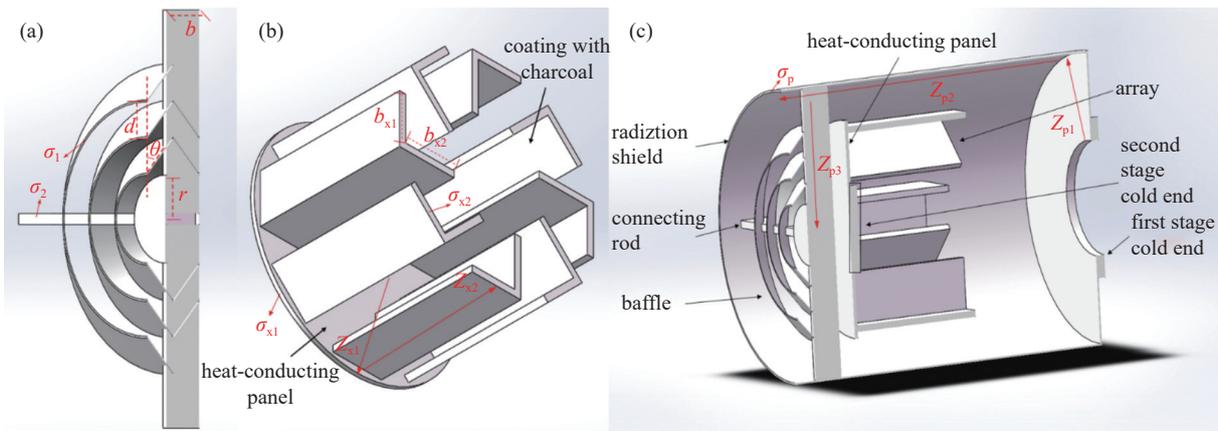


图2 几何模型示意图。(a)挡板结构剖面图,(b)吸附阵列结构图,(c)泵体简化模型剖面示意图

Fig. 2 Profiles of geometric model. (a) Structure profile of baffle, (b) structure profile of adsorption array, (c) schematic profile of simplified model section of pump body

3.2 模拟仿真

3.2.1 抽气单元热学性能模拟

热负荷是影响抽气单元性能的重要因素之一,抽气单元的热负荷主要来源于真空室和低温泵体壁面的辐射热以及气体热,对于真空腔内剩余气体的导热则可以忽略不计。采用 ANSYS 热分析模块,

导入模型,冷屏、挡板以及吸附阵低温板材料均为无氧铜,无氧铜材料的热导率与温度有关,在低温下具有很高的热导率,如图 3 所示^[12],制冷机功率由生产厂商提供的冷头功率曲线图可得(图 4 所示^[13])。定义材料热力学参数,假设低温泵各部件表面均为灰体表面,表面发射率依据材料表面处理对泵体内

表 1 低温泵部件及尺寸

Tab. 1 Components and dimensions of cryopump

部件	参数符号	尺寸
挡板	与泵口平面夹角 θ	45°
	间距 d	20 mm
	挡板厚度 σ_1	1 mm
	支撑架厚度 σ_2	6 mm
	支撑架宽度 b	25 mm
	中间挡片半径 r	24 mm
	导热板半径 Z_{X1}	85 mm
吸附阵列	导热板厚度 σ_{X1}	2 mm
	低温板长度 Z_{X2}	115 mm
	低温板厚度 σ_{X2}	1.5 mm
	低温板宽度 b_{X1}	35 mm
	低温板宽度 b_{X2}	40 mm
	底座环面半径 Z_{P1}	70 mm
冷屏	冷屏高度 Z_{P2}	300 mm
	冷屏入口半径 Z_{P3}	113.5 mm
	冷屏厚度 σ_P	1.5 mm

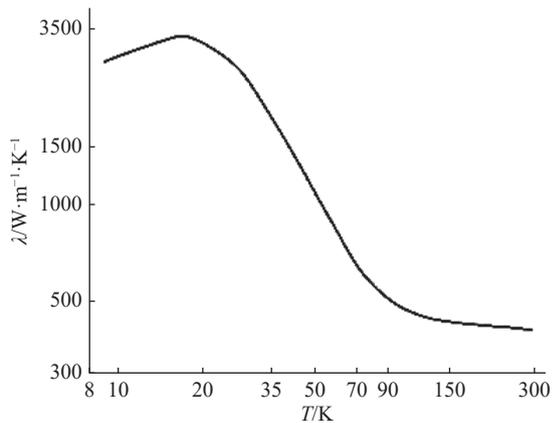


图3 铜的低温热导率变化曲线

Fig. 3 Thermal conductivity of copper at low temperature

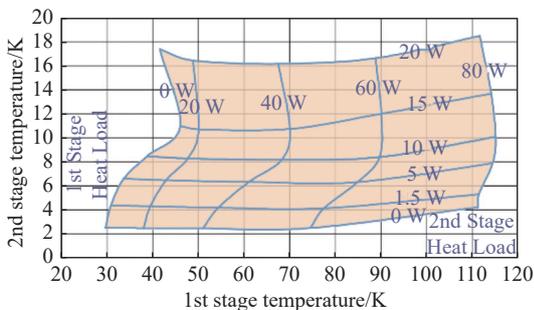


图4 RDK-415D 制冷机冷量曲线图(50 Hz)

Fig. 4 RDK-415D cold head capacity map (50 Hz)

壁面(抛光)取 0.1, 挡板表面(镀镍)取 0.25, 冷屏外壁面(镀镍)取 0.25, 冷屏内壁面(低温黑漆)取 0.9,

吸附阵表面取 0.9, 划分网格, 调整网格质量。

模拟实验运行状态, 气体负载考虑单一 H_2 , 气体温度 300 K ~ 630 K, 脉冲放电期间, 随进气量的调试改变, 真空室压力为 10^{-2} Pa ~ 10^{-1} Pa。在不同粒子负载情况下, 抽气单元所受到的气体凝结热也随之改变, 其温升情况如图 5 所示(图中横坐标表示部件与制冷机冷头的距离), 由图 5(a)知, 在实验运行状态范围, 抽气面温升不超过 0.5 K, 温度处于 5 K 左右, 满足有效抽除 H_2 、He 等气体的要求。由图 5(b)知, 对于一级冷阵, 在空载状态下整体温升为 3 K 左右; 在长脉冲运行期间, 最大温升为 8 K 左右, 因导热路径过长使得挡板温度最高, 而冷屏温升过大也影响着挡板的温度, 且随着气体热负荷的增加, 温升更为显著, 因此优化挡板导热方式、减小冷屏温升是优化抽气单元热学性能的有效途径。

3.2.2 抽气单元粒子行为模拟

为了解分子流状态下吸附阵列的低温抽气情况, 采用 MOLFLOW 软件模拟(MOLFLOW 是由欧洲核子研究中心开发的一款模拟软件, 可以计算气体粒子运动轨迹以获得稀薄气体流动特性^[14]), 将建立的三维模型保存成 STL 文件格式导入到 MOLFLOW 中, 如图 6 所示, 与低温泵连接的是口径为 250 mm 的抽速测试罩(省略法兰等与气体流动模拟无关的部件), 对物理模型做出假设: (1) 进入测试罩内的气体粒子运动速率遵循 Maxwell-Boltzmann 分布, 运动方向遵从余弦定律; (2) 气体粒子与腔体壁面发生碰撞后离开时的方向遵从余弦定律、速率遵循 Maxwell-Boltzmann 分布, 其平均动能受壁面温度影响。

设置进气面气体为 H_2 (质量分数设置为 2), 气体入射方向为余弦分布; 设置测试罩、低温泵体壁面温度为 293.15 K; 设置抽气单元温度, 吸附面在 4 ~ 6 K 温区内的吸附系数可设置为 0.62。在 1 ~ 15 Pa·L/S 的进气量下, 对测试罩内压力分布以及低温泵内粒子运动行为进行模拟分析, 从而反映低温泵的抽气性能。

为验证抽气单元设计的合理性, 以 5 Pa·L/S 的进气量为例, 取泵体中心平面作为基准面, 划分网格并模拟计算粒子行为轨迹, 模拟结果得到气体粒子在泵腔内的密度梯度和空间分布(图 7 所示), 揭示了气体粒子在泵腔内运动行为的扩散物理机制。由图 7(a)可观察到, 室温气体粒子经辐射挡板进入

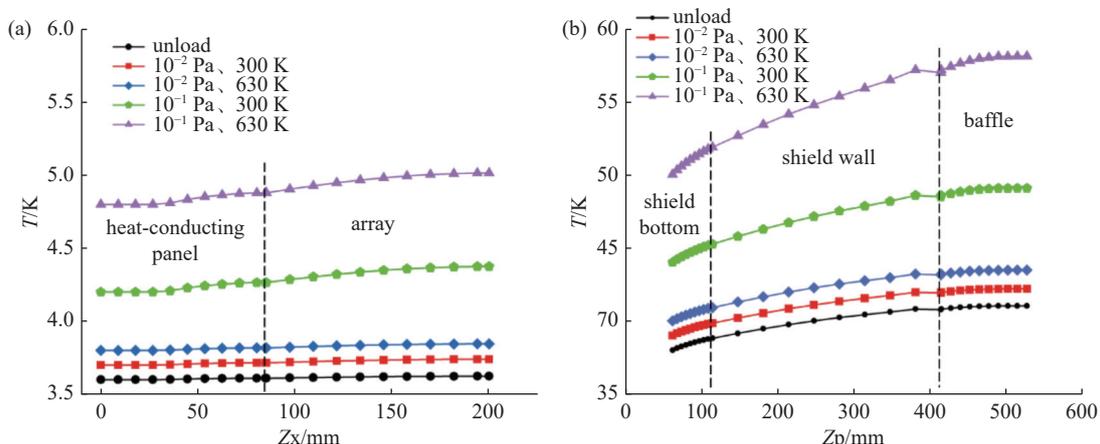


图5 抽气单元温度分布。(a)抽气面温度分布,(b)冷屏和挡板温度分布

Fig. 5 Diagrams of temperature distribution of pumping units. (a) Adsorption array, (b) shield and baffle

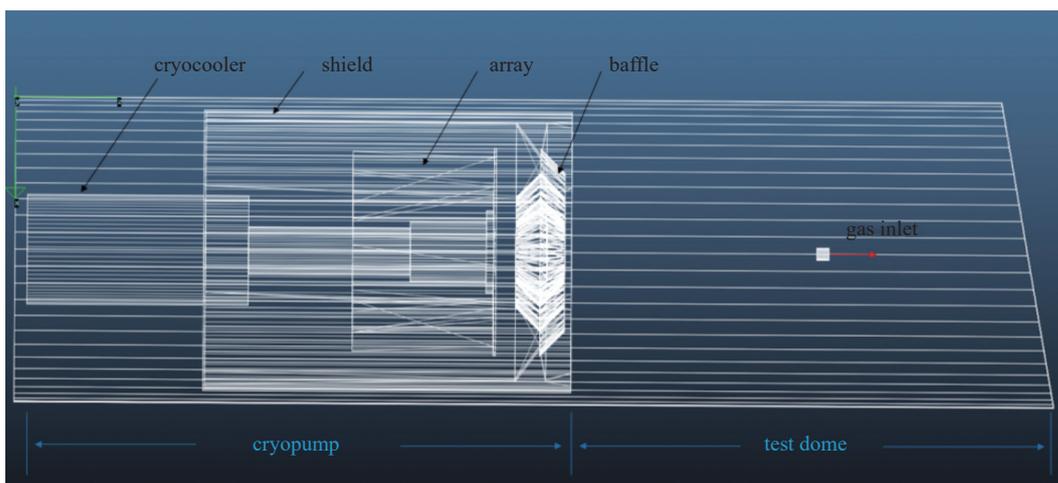


图6 MOLFLOW 中连接标准测试罩的低温泵简化模型图

Fig. 6 Simplified model diagram of a cryogenic pump connected to a standard test dome used in MOLFLOW simulation

时,因其传输几率损耗在挡板处停留聚集较多,可凝性气体被冷屏和挡板凝结,少数气体以及难凝性气体在与挡板、冷屏碰撞并交换能量后在泵腔内扩散迁移形成制冷机二级冷头低温吸附冷阵空间粒子高密度分布,可实现瞬时有效吸附抽气能力。

在 5 Pa·L/S 的进气量下,模拟得到泵入口平面的平均压力与气体流量之比为 0.1114 s/m³,则其抽气速率为 8.96 m³/s,单位时间内室温气体粒子通过泵入口平面的理论体积为 21.89 m³,则得到泵的捕获系数为 0.409。

测试罩内的平衡压力与进气量的关系可以反映出气体负载对低温泵抽气性能的影响(图 8 所示),忽略气体负载引起的抽气单元温升情况,平衡压力与进气量大致呈线性关系,表明低温泵抽速性能稳定;考虑抽气单元的温度变化,随进气量的增加,曲

线斜率几乎保持不变,而当温升过高时,曲线斜率有所增大。一定程度上,平衡压力与进气量关系曲线斜率的倒数反映了低温泵抽速的大小,表明抽气单元温升会导致抽气速度有所下降,而总体波动较小,抽速性能较好。

4 总结

本文针对 NBI 测试实验运行环境与真空要求,探索一种基于 4 K 制冷机的低温泵设计。对制冷机低温泵抽气速率进行理论分析,探究出泵结构、抽气单元温度以及被抽气体种类等影响低温泵的抽气能力。开展以单台 4 K 制冷机提供冷量的低温泵抽气单元性能分析,利用 ANSYS 对抽气单元进行温度分布模拟,考虑了材料在低温下的导热性能,得到了抽气单元在不同气体热负载下的温度分布,其中,抽气面温度处于 5 K 左右,能够有效抽除 H₂、

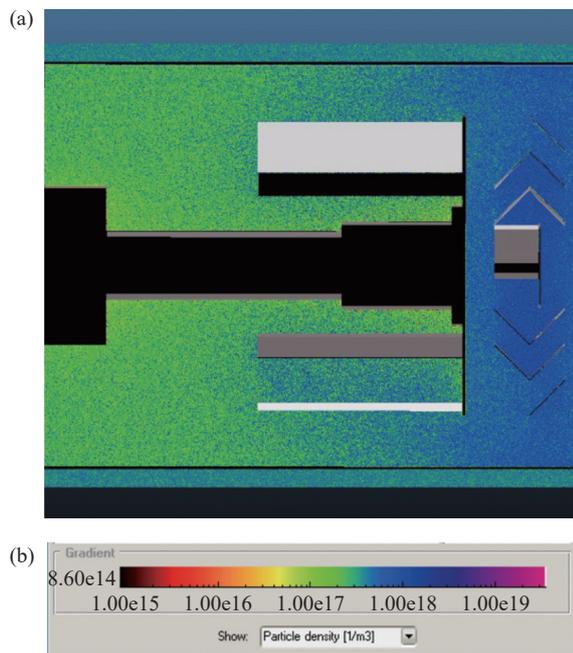


图7 泵体中心平面气体粒子分布云图。(a)气体粒子运动分布, (b)气体粒子密度梯度

Fig. 7 Diagrams of gas particle distribution on a plane of pump body center. (a) Gas particle density gradient, (b) gas particle density profile

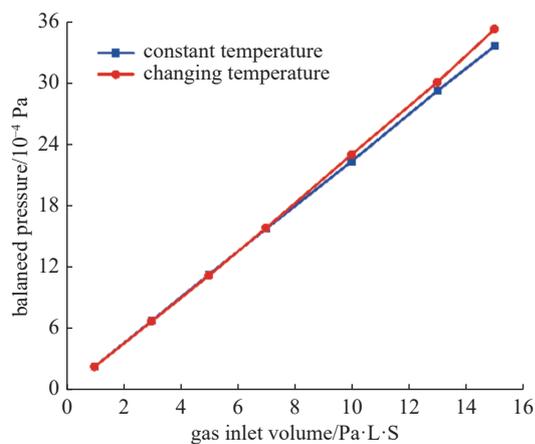


图8 进气量与平衡压力变化曲线

Fig. 8 Relation between gas inlet volume and balanced pressure

He 等气体; 一级冷阵温升在 10 K 以内, 且随气体热负载增加, 温升更为显著, 优化导热方式可以减小温升。最后将低温泵连接抽速测试系统, 并利用 MOLFLOW 进行气体粒子运动模拟, 分析发现, 气体粒子在挡板处有较多停留, 交换能量后扩散迁移至吸附阵表面, 验证了抽气单元设计的合理性, 并得到泵入口平面抽气速率为 $8.96 \text{ m}^3/\text{s}$, 其捕获系数为 0.409; 探究了平衡压力的变化与进气量之间的关

系, 考虑抽气单元的温升, 表明了泵的抽气速率受温升影响较小, 抽气性能良好。本文的研究方法和所得结果为 NBI 单元测试实验用制冷机低温泵的研制提供了理论依据和设计参考。

参 考 文 献

- [1] Hu J S, Cao Z, Zuo G Z, et al. Progress of engineering design of CFETR vacuum systems[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2022, 177: 113058
- [2] Chen C, Wang G D, Chen C Q, et al. Design of 4.5 K high pumping speed cryo-pump for china fusion engineering test reactor torus[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 39(05): 381–386 (陈晨, 王国栋, 陈长琦, 等. CFETR 内真空室 4.5 K 大抽速低温冷泵的设计 [J]. *真空科学与技术学报*, 2019, 39(05): 381–386(in chinese))
- [3] Xie Y L, Hu C D, Cheng B, et al. Design of cryo-vacuum system for NBI test facility[J]. *Vacuum*, 2014, 51(02): 5–8 (谢远来, 胡纯栋, 程斌, 等. NBI 综合测试台低温真空系统设计 [J]. *真空*, 2014, 51(02): 5–8(in chinese))
- [4] Xie Y H, Wei J L, Gu Y M, et al. The negative beam source with single driver for CRAFT NNBI: design and conditioning results[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18(No.7): C07017
- [5] Hu C D, Lang J Q, Xie Y L, et al. Cryo-vacuum system of EAST-NBI[J]. *Vacuum*, 2018, 55(04): 1–5 (胡纯栋, 郎嘉琪, 谢远来, 等. EAST-NBI 低温真空系统 [J]. *真空*, 2018, 55(04): 1–5(in chinese))
- [6] Briefi S, Fantz U. Spectroscopic investigations of the ion source at BATMAN upgrade[J]. *AIP Conference Proceedings*. 2018, 2052(1): 040005(1–7)
- [7] Xie Y L, Wang M M, TAO L, et al. Performance test of activated coconut carbon for cryo-adsorption pump[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2010, 38(01): 13–16 (谢远来, 汪明明, 陶玲, 等. 低温吸附泵用椰壳活性炭的性能测试 [J]. *低温与超导*, 2010, 38(01): 13–16(in chinese))
- [8] 高香院. 现代低温泵 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- [9] 达道安. 真空设计手册 [M]. 北京: 国家工业出版社, 2004
- [10] Jiho P, Junseok K, Hyobong K, et al. Development of a large capacity cryopump equipped with a two-stage GM cryocooler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119217
- [11] Zeng H, Deng J L, Sun Z H. Design of the 250 mm cal-

- iber cryopump[J]. *Vacuum*, 2020, 57(02): 13–16 (曾环, 邓家良, 孙志和. 250 mm 口径低温泵设计 [J]. *真空*, 2020, 57(02): 13–16(in chinese))
- [12] Li K, Ran S N, Jia C Y, et al. Measurement of low temperature thermal conductivity of pure Cu with helium refrigerator[J]. *Physics Experimentation*, 2009, 29(10): 27–30+33 (李科, 冉书能, 贾春燕, 等. 用氦制冷机测量纯铜低温热导率 [J]. *物理实验*, 2009, 29(10): 27–30+33(in chinese))
- [13] www.shicyogenics.com/wp-content/uploads/2020/09/RDK-415D_Capacity_Map.pdf
- [14] Kersevan R, Pons T L. Introduction to MOLFLOW plus: New graphical processing unit-based Monte Carlo code for simulating molecular flows and for calculating angular coefficients in the compute unified device architecture environment[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2009, 27(04): 1017–1023