一种新型大抽速 CP1250Xe 复合低温泵

王君^{1*} 杨杨¹ 曾环^{1,2} 邓家良^{1,2} 陆广宝¹ (1. 安徽万瑞冷电科技有限公司 合肥 230088; 2. 中国电子科技集团第十六研究所 合肥 230043)

New High-Speed CP1250Xe Composite Cryopump

WANG Jun^{1*}, YANG Yang¹, ZENG Huan^{1,2}, DENG Jialiang^{1,2}, LU Guangbao¹ (1. Anhui Vacree Technologies Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. The 16 th Institute of CETC, Hefei 230043, China)

Abstract In this study, a novel large pumping speed CP1250Xe composite cryopump has been successfully designed. Through structural optimization, the pumping speed of Xe has been significantly increased, and it is capable of effectively pumping out conventional gases such as N_2 and H_2 . The experimental results show that the pumping speed of Xe for this cryopump is as high as 65000 L/s, and the pumping speeds for N_2 and H_2 reach 60000 L/s respectively. The hydrogen pumping capacity is 150 L. These achievements confirm the remarkable advantages of the novel large pumping speed CP1250Xe composite cryopump in enhancing the pumping speed of xenon gas, solving the problem that the Xe pumping speed of traditional cryopumps fails to reach the desired value, and meanwhile, it has the ability to pump conventional gases, providing strong technical support for vacuum acquisition.

Keywords Cryopump, Xe Pumping speed, Vacuum acquisition

摘要 文章成功设计了一种新型大抽速 CP1250Xe 复合低温泵,通过结构优化显著提高了 Xe 抽速,并能够有效抽除 N₂、 H₂等常规气体。实验结果表明,该低温泵的 Xe 抽速高达 65000 L/s,对 N₂和 H₂的抽速也分别达到了 60000 L/s,抽氢容量为 150 L。这些成果证实了新型大抽速 CP1250Xe 复合低温泵在提升氙气抽速方面的显著优势,解决了传统低温泵 Xe 抽速无法 达到理想抽速的问题,同时具备常规气体的抽气能力,为真空获得提供了强有力的技术支持。

关键词 低温泵 抽氙速度 真空获得

中图分类号:TB752⁺.53 文献标识码:A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202411017

随着航天技术的快速发展,电推进系统因其高 比冲和长寿命等优势,在现代航天器上得到了日益 广泛的应用。特别是在深空探测和地球同步轨道 卫星位置保持等领域,电推进技术已成为关键技术 之一^[1]。电推进系统中,氙气因其高分子量、低电离 能和良好的电推进性能,被广泛用作推进剂^[2]。然 而,电推进系统在工作过程中会向其所处环境排放 大量氙气,这对真空系统的抽气能力提出了更高的 要求。

传统的真空泵,如分子泵和扩散泵,虽然在某 些应用中表现良好,但在处理氙气时存在效率低下 或可能造成污染的问题。因为分子泵的抽速往往 无法满足电推进系统的要求,而扩散泵在使用过程

收稿日期:2024-11-28

*联系人: E-mail: 709856962@qq.com

中可能产生油蒸气,对敏感的航天器设备造成损害^[3-4]。因此,开发一种能够有效抽除氙气的真空泵,同时 避免油污染,成为电推进系统地面测试和空间应用 中的一个技术挑战。

低温泵因其无油、高效率和清洁的抽气特性, 成为解决上述问题的理想选择。特别是专门设计 的氙低温泵,能够有效地抽除氙气,同时保持系统 的高真空度^[5]。近年来,国内外研究机构对氙低温 泵进行了大量研究,不断优化其结构设计。国内研 究机构近年来在氙低温泵领域也取得了显著进展。 2015年,柏树等^[6]通过优化冷板设计,研发出大口 径氙气低温泵,其抽氙有效抽速达 28000 L/s,较同 口径低温泵抽气速率提升 1.4 倍。2018年,李培印

等⁷⁷ 深入剖析氚泵工作原理,首次定量揭示冷板空 间布局与系统抽速的关联规律,指出冷板越分散, 氙泵抽速越大。2024年,武义锋等^[8]设计了了一种 500 mm 口径的大抽速氙气泵。该泵对氙气和氮气 的抽速可达到10500 L/s,是传统低温泵的两倍,抽 速性能显著提升。国外机构通过早期技术预研已 形成显著的技术储备优势。1996年, Garner C 等^[9] 针对氚气低温泵提出优化方案,利用单级 GM 制冷 机冷却冷板,实现了15000 L/s的抽速,达到全部理 论抽速,奠定了早期技术基础。2014年,Ling G L 等^[10]设计了一种氙气抽速测试系统,双低温泵的有 效抽速为 52000 L/s,实际抽速低于其理论抽速,平 均泵效为 0.83。2020 年, Lausberg S^[11] 对氙气推进 器测试中面临的真空维持难题,创新性提出了一种 多级低温吸附阵列方案,以应对高流量氙气排放与 极低压力的兼容性挑战。2024年, Neumann A 等^[12] 建立一套模型,实现对系统的尺寸和结构的优化, 优化18台氙泵的布局,实现276000 L/s的氙气抽速。 然而,当前技术体系仍存在明显局限。专用氙泵无 法兼顾多组气体抽取,复合泵虽具备多气体处理能 力,但其氙气抽速普遍较低,严重制约了电推进技 术的应用拓展。基于上述研究背景,本研究在现有 设计范式的基础上展开深入探索,成功研制出新型 CP1250Xe复合低温泵。该泵创新性地通过精确控 制一级温度在 50 K 以下的工作区间,实现了氙气抽 速的显著提升,达到理想抽速水平,显著提升了低 温泵的综合抽气性能。

1 抽气原理

低温泵通过低温冷凝、捕集两种方式,达到真 空获得的目的^[13]。传统的低温泵通常由泵壳、冷屏、 障板、吸附阵等组成。如图1所示,为传统低温泵 的结构。低温泵冷屏和障板由GM制冷机一级冷 却到100K以下,抽除H₂O等气体。吸附阵由二级 冷头冷却到15K以下,其冷凝板抽除N₂、Ar、O₂等 气体,而冷凝板上粘接的活性炭吸附He、Ne、H₂等 气体。

而氙复合低温泵是一种专门设计用于抽除氙 气的设备,同时具备传统低温泵对其他气体的抽气 功能。在电力推进实验中,推进器运行时所需要的 工作压力通常为10⁻³-10⁻² Pa 左右^[12]。由式(2)可知, 为了满足氙复合低温泵达到氙气的理想抽速,低温



泵被抽气体的压力要至少大于气体饱和蒸气压两 个数量级且冷凝系数为1才能达到理想抽速。对于 氙气而言,在温度低于50K时,其饱和蒸气压为1× 10⁻⁶ Pa,其远远小于推进器运行时真空腔最大压力 10⁻³ Pa。为了实现氙气理想抽速,低温泵的一级温 度应当被控制在50K以下。

在分子流状态下,温度为*T*,分子量为*M*,平均 速度为**v**的气体分子全部被冷凝在深冷面上时,冷 凝面单位面积的理想抽速应为^[13-14]:

$$S_0 = \frac{1}{4}\overline{\nu}_g = \sqrt{\frac{RT_g}{2\pi M}} = 3.64\sqrt{\frac{T_g}{M}} \qquad (1)$$

式中: S_0 为冷凝面单位面积的理想抽速, L/(s·cm²); \bar{v}_g 为平均速度, cm/s; R 为气体常数, J/(mol·K); T_g 为 被抽气体温度, K; M 为摩尔质量, g/mol。

$$S = \alpha \cdot S_o \left(1 - \frac{p_s}{p_g} \right) \tag{2}$$

式中:S为单位面积抽速, $L/(s \cdot cm^2)$; α 为氙气凝结系数; p_g 为被抽气体压力,Pa; p_s 为冷凝面的温度下,被抽气体的蒸气压力,Pa。

由文献 [15] 可知, 在低于 60 K 的情况下, 氙气的冷凝系数 α =1。同时 $p_s << p_g$, 根据式 (2)得 S = 5.5 L/(s·cm²)。CP1250Xe 低温泵冷凝面面积为 11882 cm², 通过上式计算可得抽氙气抽速为 65352 L/S, 优于 65000 L/s 的设计要求。如表 1 所示, 为低温泵 的设计要求。

| cal specification | s of cryopullip |
|-------------------|--|
| 型号 | |
| 极限压力/Pa | |
| Xe | ≥65000 L/s |
| N_2 | ≥60000 L/s |
| H_2 | ≥60000 L/s |
| H_2 | ≥150 L |
| | Pa Xe N ₂ H ₂ H ₂ |

| | 表1 | 低温泵技术规格 |
|-------|---------|----------------------------|
| Tab 1 | Technic | al specifications of groom |

2 仿真

为了控制低温泵冷屏和障板的温度不高于 50 K,需要对冷屏和障板的三维结构进行优化。解 决措施:增加膨胀机数量,优化膨胀机布局;增加加 障板和冷屏的接触面积。如图 3 所示,为优化后的 冷屏障板结构。障板中心处的温度最低,为 48.49 K, 满足设计要求所需的 50 K 以下。





如图 4 所示, 为吸附阵仿真云图, 吸附阵的温度整体温差不超过 1 K, 满足低温泵设计要求。



图4 吸附阵仿真云图 Fig. 4 Simulation cloud map of adsorption array

3 试验

为了评估低温泵的性能,本研究依据 JB/T 11081-2011《真空技术 制冷机低温泵》行业标准,构 建了一套测量系统,如图 5 测试罩设计和图 6 测试 平台搭建^[16]。如图 5 所示,为测试罩三维剖面图。 该测试罩专为 1250 mm 口径低温泵设计。测试罩 集成了 1 个真空规接口和 2 个进气接口,用于精确 测量低温泵的抽速和抽气容量。



图5 测试罩剖面图 Fig. 5 Sectional diagram of test chamber

如图 6 所示,本研究构建了 CP1250Xe 泵的测 试平台,该平台由以下组件构成:泵体、4 台 GM1100 冷头、1 台 GM415 冷头、5 台 C100W 压机、真空规 以及温度采集仪。这些组件共同构成了一个测试 系统,用于泵性能的全面评估。

当低温泵降到底温时,将气体质量流量控制器 与测试罩进气接口相连。待真空压力稳定下来时, 开始测试,通过调节气体质量流量控制器的通气大 小,实现对抽速的测量。抽速计算公式如下式:

$$p_{\rm S} = \frac{Q_{\rm S} \times 10^{-3} \times 101325}{p_{\rm TD} \times 60} \tag{3}$$

式中, p_s =低温泵抽速, L/s; Q_s =气体流量, mL/min; p_{TD} =测试腔体的工作气体压力, Pa。



Fig. 6 CP1250Xe cryopump testing platform

如图 7 所示,为 CP1250Xe 低温泵 Xe 抽速图。 通入气体流量从 2-10 mL/min,步长为 1 mL/min。 此时,低温泵为分子流状态, Xe 速度为 65000 L/s。



如图 8 所示,为 CP1250Xe 低温泵 N₂ 抽速图。 通入气体流量从 10-200 mL/min,步长为 10 mL/min。 在 3×10^{-3} pa 以下,抽速随着压力的升高而抽速增 加。在 3×10^{-3} -6×10⁻³ Pa 之间,此时低温泵为分子流 状态,抽速与压差无关,抽速为常数。此时 N₂ 抽速 为 65000 L/s,远超设计要求 60000 L/s。

如图 9 所示,为 CP1250Xe 低温泵 H₂ 抽速图。 通入气体流量从 10-200 mL/min,步长为 10 mL/min。 在 4×10⁻³ pa 以下,抽速随着压力的升高而抽速增加。 在 4×10⁻⁴ Pa 时,此时低温泵为分子流状态,抽速与



压差无关, 抽速为常数, 此时 H₂ 抽速为 73000 L/s, 远超设计要求 60000 L/s。

N₂和 H₂ 抽速超过设计要求, 分析是低温泵一级温度偏低, 降低了对二级的热负荷。会导致二级 温度偏低, 提升了冷凝板对 N₂ 的冷凝系数和吸附阵 对 H₂ 的吸附效果^[17]。

4 结论

本研究通过对新型大抽速 CP1250Xe 复合低温 泵的深入分析,得出了氙泵的抽气机理和温度要求。 通过仿真优化结构设计,提升低温泵 Xe 抽速。试 验测得氙泵的抽速为 65000 L/s,与理论计算仅差 0.5%。N₂和H₂的抽速分别是 65000 L/s 和 73000 L/s, 抽气容量为 150 L,极限真空度< 9×10⁻⁷ Pa。这些内 容对后续的氙泵研究提供一定的重要的理论依据 和实践指导。

参考文献

[1] Vorontsov V V, Kostin A N, Lovtsov A S, et al. Develop-

ment of KM-60 based orbit control propulsion subsystem for geostationary satellite[J]. Procedia Engineering, 2017, 185: 319–325

- [2] Chen Y, Yan Z, Jia Z, et al. Modeling and simulation of xenon storage and supply system for electric propulsion system based on fundamental equation of state[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 249: 123296
- [3] Amano S, Fielden S D P, Leigh D A. A catalysis-driven artificial molecular pump[J]. Nature, 2021, 594(7864): 529–534
- Kobayashi S, Otake H. The experimental research on the back-streaming of oil vapor of an oil diffusion pump[J].
 Vacuum, 1959, 9(1): 73–73
- [5] Chu X X, Zhang M M, Zhang D X, et al. Cryogenic system with GM cryocooler for krypton, xenon separation from hydrogen-helium purge gas[C]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2014, 1573(1): 1638-1644
- [6] Bai S, Yan C L, Yang J B, et al. Large-aperture xenon evacuation cryopump: CN201510419303.1[P]. 2015-11-11 (柏树, 颜昌林, 杨建斌, 等. 一种大口径抽除氙气低 温泵: CN201510419303.1[P]. 2015-11-11 (in Chinese))
- [7] Li P Y, Lin B Y, Lv J F, et al. Design of xenon pump[J].
 Vacuum, 2018, 55(4): 5 (李培印, 林博颖, 吕剑锋, 等. 氙 泵系统设计 [J]. 真空, 2018, 55(4): 5 (in Chinese))
- [8] Wu Y F, Zeng H, Wang J, et al. Study on optimal design of xenon air pump with high pumping speed[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2023, 51(5): 78-84 (武义锋, 曾环, 王君, 等. 大抽速氙气泵优化设计研究 [J]. 低温与 超导, 2023, 51(5): 78-84 (in Chinese))
- [9] Garner C, Polk J, Brophy J, et al. Methods for cryopuming xenon[C]. 32nd Joint Propulsion Conference and Ex-

hibit. 1996: 3206

- [10] Ling G L, Wei L J, Cai G B. Pumping speed of cryopump for xenon[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1731–1736
- [11] Lausberg S. Vacuum challenges for ion thruster testing: advanced cryogenic solutions for xenon pumping[J]. Vakuum in Forschung und Praxis, 2020, 32(4): 22–28
- [12] Neumann A, Brchnelova M. Modelling of cryopumps for space electric propulsion usage[J]. aerospace, 2024, 11(3): 1638–1644
- Park J, Ko J, Kim H, et al. Development of a large capacity cryopump equipped with a two-stage GM cryocooler[J].
 Applied Thermal Engineering, 2022, 217: 119217
- [14] DA D A. Vacuum design manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 416-420 (达道安. 真空设 计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 416-420 (in Chinese))
- [15] Levenson, Leonard L. Condensation coefficients of argon, krypton, Xenon, and Carbon Dioxide measured with a quartz crystal microbalance[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1971, 8(5): 629–635
- [16] Vacuum Technology. JB/T 11081-2011 Vacuum technology-Refrigerator cooled cryopumps[S]. Beijing: China Machine Press, 2011 (全国真空技术标准化技术委员会. JB/T 11081-2011 真空技术 制冷机低温泵 [S]. 北京: 机 械工业出版社, 2011 (in Chinese))
- [17] Li Z. Studies on the preparation of coconut shell activated carbon monolith and its application in cryopanels[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024 (李朝. 块体椰壳活性炭的制备及其在低温冷凝板 中的应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024 (in Chinese))