

# 用于空间电推进系统真空环境模拟的氙泵和氪泵

赵月帅\* 龚洁 周盈 邵容平 汪志伟 李征  
(北京卫星环境工程研究所 北京 100094)

## Xenon Cryopump and Krypton Cryopump for Vacuum Simulation in Space Electric Propulsion Systems

ZHAO Yueshuai\*, GONG Jie, ZHOU Ying, SHAO Rongping, WANG Zhiwei, LI Zheng  
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract** Electric propulsion technology using inert gases such as Xe/Kr as propellant has been increasingly applied in spacecraft, and these propulsion systems should undergo experimental verification in ground test facilities. In these facilities, dedicated xenon pumps/krypton pumps demonstrate significant advantages over conventional vacuum generating equipment, including higher pumping speed and superior ultimate vacuum levels. This paper investigates the pumping speed, thermal load, and cooling processes of xenon/krypton pumps through theoretical analysis and CFD numerical simulations, discussing the impacts of cold plate geometry, material selection, and the growth of xenon ice and krypton ice on vacuum pump performance. Additionally, a test system was established to measure the pumping speed of xenon/krypton pumps, revealing a calculation error below 5% between theoretical predictions and experimental measurements.

**Keywords** Cryogenic pumping, Electric propulsion, Xenon cryopump, Krypton cryopump

**摘要** 以Xe/Kr等惰性气体为推进工质的电推进技术在越来越多的航天器中得到应用,这些推进系统必须在地面试验设备中进行试验验证。在这些测试设备中,采用专用的氙泵/氪泵相较于常规真空获得设备具有抽速大、极限真空度高等优势。文章通过理论分析及CFD数值仿真的方式对氙泵及氪泵的抽速、热负荷、降温过程进行了研究,讨论了冷板的形状、材料、氙/氪冰的成长等对真空泵性能的影响。同时,建立了测试系统对氙泵/氪泵的抽速进行了测试,理论计算抽速和实测抽速的结果,计算误差低于5%。

**关键词** 低温抽气 电推进 氙泵 氪泵

中图分类号: TB752<sup>+</sup>.53

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202411014

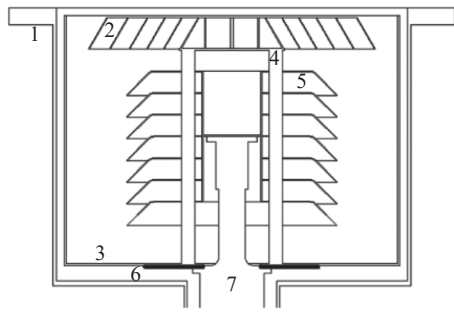
以氙气/氪气等惰性气体为推进工质的霍尔推进器在中国空间推进领域占有重要的地位。氙气因其高原子量、低电离能和高储存密度,成为传统电推进的首选工质,而氪气凭借成本低,比冲大的优势成为越来越多航天器的选择<sup>[1-2]</sup>。

为了验证电推进系统的性能,这些推进系统必须在地面试验设备中进行测试和验证。与常规的空间环境模拟器不同,用于获得空间电推进系统真空环境的真空泵应具有抽气速度大、工作真空度高、设备可靠性高等特点。随着未来对大功率推进技

术的研究,较高等离子体密度带来的大气体流量、严重的热负荷、溅射增强问题等对地面试验的真空获得和维持带来更高的挑战<sup>[3-4]</sup>。

在电推进试验设备中,相比于分子泵、油扩散泵等高真空获得设备,低温泵获得了更广泛的应用<sup>[5]</sup>。标准低温泵结构如图1所示。其中冷屏和障板,主要抽除水蒸气;二级冷阵的外表面主要用于抽除可凝性气体;二级冷阵的内表面粘有活性炭,用于吸附He、Ne、H<sub>2</sub>等不凝性气体<sup>[6]</sup>。

标准低温泵可以对空气中的所有组分进行抽



1.泵壳, 2.障板, 3.冷屏, 4.导热柱, 5.二级冷阵, 6.导热板, 7.制冷机

图1 标准低温泵结构图

Fig. 1 Structure of standard cryopump

除, 相同口径下的抽速大, 极限真空度高, 清洁无油, 且能够在高溅射污染的情况下可靠运行, 在各种空间环境模拟器中广泛应用。在标准低温泵中, 用于降低冷板热负载的障板结构降低了气体的 50% 流导几率, 进入低温泵的分子仅有部分被冷凝或者吸附, 剩余的分子又重新返回了真空腔室。考虑到标准低温泵通常采用两级吉福特-麦克马洪(Gifford-McMahon, 简称 G-M)制冷机作为冷源, G-M 制冷机的二级功率通常为 10–20W@20 K, 直接增大障板的流导也是不可行的, 因为因此而增大的热辐射可能超过制冷机的制冷能力。

同时, 由于氙气和氦气的分子量比较大, 在相同工况和结构的条件下, 分子量越大, 低温泵对该气体的抽速越小。

从表 1 可看出, 标准低温泵对氙气和氦气的抽速仅为同口径下对氮气抽速的 46% 及 57.7%。

表 1 常见可凝气体抽速比率

Tab. 1 Proportions of pumping speeds for common condensable gases

| 气体种类              | $K$   |
|-------------------|-------|
| Air( $N_2, O_2$ ) | 1.0   |
| Xe                | 0.462 |
| Kr                | 0.577 |

在电推进系统中, 综合考虑到氙气和氦气的冷凝温度较高, 可以采用价格更低的单级大冷量商用 G-M 制冷机直接冷却低温冷板, 在去掉障板的同时, 大幅提高对氙气和氦气的抽速, 是更优的方案。最佳的配置方式就是利用分子泵和标准低温泵建立基础压力, 而使用不带障板的内置式的氙/氦泵等特定优化的低温泵来保证工艺压力。

目前国内外针对氙泵研究较多<sup>[7-10]</sup>, 而氦泵研究

较少, 国内外均没有成熟的抽气方案。本文基于单级大冷量商用 G-M 制冷机, 提出了兼顾氙气/氦气抽除的低温泵方案, 在获得同样氙气/氦气抽速的情况下, 使用本文方案所产生的购置成本、安装复杂性以及运行成本可大幅降低。

## 1 国内外电推进低温抽气技术

目前, 国内外用于电推进的商用低温泵主要是针对氙气的, 国外 Edwards、Leybold、HSR, 国内博开、万瑞等公司生产有专门设计的大口径氙泵。

其中, 图 2(a)中 HSR 和图 2(e)万瑞的氙泵是在标准低温泵的基础上改进而成, 该种类型的低温泵通过大幅加大一级制冷功率, 从而降低障板的温度, 使得障板温度低于 50 K, 使得障板能够冷凝氙气。这种氙泵在保留了标准低温泵对空气的抽气能力的基础上大幅增加了对氙的抽气能力, 如标准 DN1250 口径低温泵对氙气的抽气能力约为 31000 L/s, 同口径氙泵的抽气能力可达 65000 L/s, 但与此同时对制冷机的冷量需求和成本也大幅增加(从 3 台制冷机

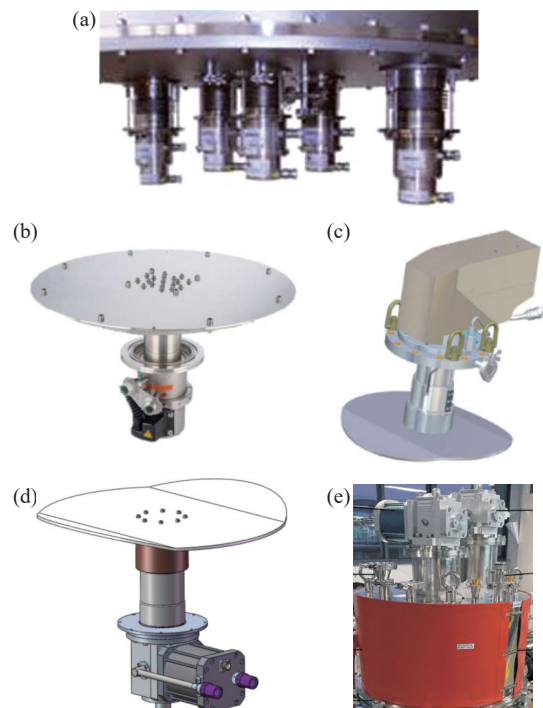


图2 典型的商品氙泵。(a)HSR, 65000 L/s(Xe), (b)Leybold, 18000 L/s(Xe), (c)Edwards, 17000 L/s(Xe), (d)Bokai, 15000 L/s(Xe), (e)Vacree, 10500 L/s(Xe)

Fig. 2 Typical commercial xenon cryopumps. (a)HSR, 65000 L/s(Xe), (b)Leybold, 18000 L/s(Xe), (c)Edwards, 17000 L/s(Xe), (d)Bokai, 15000 L/s(Xe), (e)Vacree, 10500 L/s(Xe)

增加到 5 台制冷机), 额外增加的 2 台制冷机使得低温泵对氙气的抽速增加了 34000 L/s, 这和单独利用两个冷头制成独立的氙泵效果相当, 而后者在高真空下才开始工作, 同时可以有效的回收昂贵的高纯氙气。更重要的是这种低温泵对氙气的抽气能力是不稳定的, 标准低温泵的结构决定了其传热路径是较长的, 同时标准低温泵障板主要是用于抽除系统中的水气。而障板上的水冰会极大的改变障板的发射率进而增大热负载, 在经过一段时间的运行之后, 温度升高后冷凝的氙气可能会释放再次被二级冷阱冷凝, 这个时候非常容易产生压力波动和对氙气抽速的大幅下降。

图 2(b)Leybold、图 2(c)Edwards 和图 2(d)博开公司的氙泵采用了不带障板的设计, 采用单级冷头作为氙泵的冷源, 在相同口径下大幅提高了对氙气的抽速, 如 DN500 口径的低温泵对氙抽速约为 4600 L/s, 氙泵抽气能力可大于 15000 L/s。这种泵专为抽氙气设计, 低温泵无法抽除其他空气的主要成分的, 如氧气、氮气和氩气等。该类氙泵采用内置安装方式, 可以布置在真空腔体内部的各个位置; 氙泵冷板温度 50 K, 安装使用环境存在热源时, 需要做适当的热屏蔽防护; 氙泵冷板采用防腐蚀涂层设计, 满足特定的实验工艺需求。氙泵对氙气抽速在不同工况下会有所变化, 随着氙气捕集量的增加, 抽速也会逐渐减小。

针对氮气的抽除, 目前尚没有专用的低温泵。部分氙泵对氮气具有一定的抽气能力, 但是由于制冷能力的不足, 当冷板覆盖低温冰之后, 表面温度逐渐上升, 随着低温表面温度达到 40–50 K 之后, 真空腔室内的真空度会快速上升。目前随着商业卫星领域的大发展, 我国国内空间电推进系统对氙/氮等电推进工质的大抽速设备或者解决方案需求有了快速的增长, 探索更有效和经济的实现相关电推进工质的抽除方法就有了重要的工程意义。

## 2 设计理论与计算模型

### 2.1 抽速

低温表面的抽速计算公式<sup>[8, 11]</sup>:

$$S_{th} = 3.64A \sqrt{\frac{T}{M}} \left( \alpha_c - \frac{p_f}{p} \sqrt{\frac{T}{T_f}} \right) \quad (1)$$

其中:  $S_{th}$  为理论抽速;  $A$  为低温表面面积;  $T$  为被冷凝气体的平均温度;  $M$  为被冷凝气体的分子量;  $\alpha_c$

为冷凝几率;  $T_f, p_f$  为冷凝面温度及被冷凝气体在冷凝面温度下的饱和蒸汽压;  $p$  为被冷凝气体的压力。

在低温下, 空气中的各组分的饱和蒸汽压如图 3 所示。

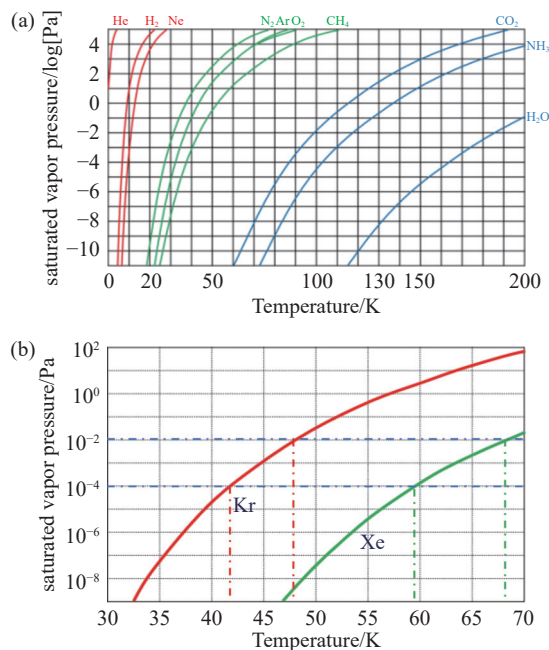


图3 各种气体的饱和蒸汽压<sup>[7]</sup>。(a)不同温度下, 空气中各气体组分的饱和蒸汽压, (b)不同温度下, 氙气/氙气的饱和蒸汽压

Fig. 3 Saturated vapor pressures of various gases<sup>[7]</sup>. (a) The saturated vapor pressures of various gas components in the air at different temperatures, (b) the saturated vapor pressures of krypton/xenon at different temperatures

对于可凝性气体,  $\alpha_c$  接近于 1, 根据式 1, 在不同压力下, 不同温度的冷板对氙气和氮气的抽气性能如图 4 所示。

由图中可以看出, 当抽气压力为  $1 \times 10^{-2}$  Pa 时, 对于氙泵, 当冷板温度达到约 54 K 时, 抽气性能开始下降, 约 67 K 时, 抽速接近于 0; 对于氮泵, 当冷板温度达到 44 K 时, 抽气性能开始下降, 约 56 K 时抽速接近于 0。当抽气压力为  $1 \times 10^{-4}$  Pa 时, 对于氙泵, 当冷板温度达到约 47 K 时, 抽气性能开始下降, 约 57 K 时, 抽速接近于 0; 对于氮泵, 当冷板温度达到约 37 K 时, 抽气性能开始下降, 约 47 K 时, 抽速接近于 0。

当  $p_f \ll p$  时,  $\alpha_c$  接近于 1 时, 式 1 可简化为:

$$S_{th} = 3.64 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2)$$

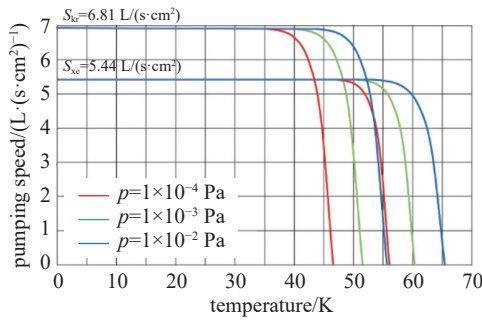


图4 不同抽气压力下,不同温度的冷板对氙气和氪气的抽气性能(20℃)

Fig. 4 Pumping performance of cold plates at different temperatures for xenon and krypton under different pumping pressures (at 20℃)

因此,对于 a,b 两种气体,有

$$\frac{S_{th,a}}{S_{th,b}} = \sqrt{\frac{M_b}{M_a}} \quad (3)$$

由式 2 计算出,室温(20℃)下,单位面积的冷板对氙气的理论抽速约为 54400 L/s,对氪气的理论抽速约为 68100 L/s。但要达到这个理论抽速冷板必须维持在一定的温度区间,一旦温度过高,氙泵或者氪泵的抽速会快速的大幅下降。

由此图 4 可以看出,根据工作压力的不同,氙泵的冷板温度应控制在 47 K–54 K 之下,而氪泵的冷板温度应控制在 37 K–44 K 之下。

由式 2 也可以看出,低温泵的理论抽速还和气体的温度有关,以氙气为例,室温的氙气在 1 m² 的低温冷板上有着接近 54400 L/s 的抽速。抽速随着被抽氙气的温度的降低而降低,如果氙气被 80 K 液氮障板完全预冷,每平方米面积低温泵的抽速降低为约 27500 L/s。图 5 给出了单位面积下,不同气体温度下,氙气和氪气的理论抽速。

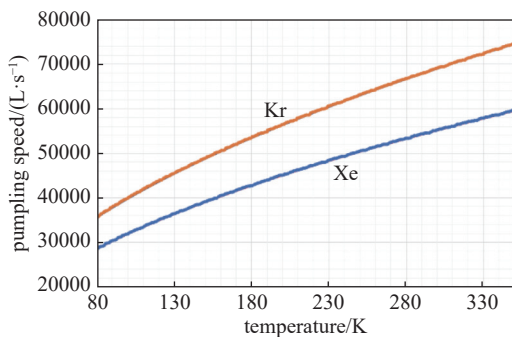


图5 在不同气体温度下的氙气和氪气的单位面积理论抽速

Fig. 5 Theoretical pumping speed per unit area for xenon and krypton at different gas temperatures

## 2.2 热负荷

氙/氪泵设计的核心在于对低温冷板的设计,在专用的氙/氪泵中,对电推进工质的抽速和低温冷板的面积是正相关的,而氙/氪泵的冷板是直面常温壁面的,如何尽可能的降低低温冷板的无效热负载是提高抽速的关键。

通常而言,低温冷板应该具有较低的表面发射率,用于反射来自真空腔室常温壁面的红外辐射,对于不抽气的部分应当添加多层隔热材料,从而在相同的制冷量的情况下采用更大的氙板面积,从而增大抽速。但随着气体的冷凝,冷板会显示出较大的温度梯度。如果冷板的温度尤其是边缘温度过高可能造成气体冰的汽化和脱落,进而造成测试设备中压力的波动。

低温冷板的热平衡方程如下:

$$q_r + q_l - q_c = 0 \quad (4)$$

式中,  $q_r$  为单位面积辐射热流量;  $q_l$  为单位面积冷凝热;  $q_c$  为制冷机的制冷量。

对于封闭腔内平板的辐射传热公式<sup>[8]</sup>为:

$$q_r = \frac{\varepsilon_p \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_p^4)}{\varepsilon_c + \frac{A_p}{A_c} (1 - \varepsilon_c) \varepsilon_p} \quad (5)$$

$\varepsilon_p$  为冷板外表面的发射率;  $\varepsilon_c$  为容器内表面的发射率;  $A_p$  为冷板的外表面积;  $A_c$  为容器内表面积;  $T_p$  为冷板的温度;  $T_c$  为容器的温度;  $\sigma$  为波尔兹曼常数。

电推进环境模拟系统的真空腔室的内表面积要比低温冷板的面积大的多,即  $\frac{A_p}{A_c} \rightarrow 0$ , 则式 5 可简化为:

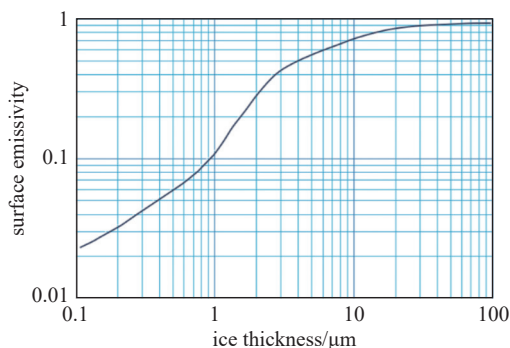
$$q_r = \varepsilon_p \sigma (T_c^4 - T_p^4) \quad (6)$$

影响冷板的热负荷的核心要素是冷板的表面发射率,一般而言,冷板表面发射率的影响因素主要由两点:

(1) 气体尤其是水分在冷板表面的凝结导致的冷板表面发射率的变化;

氙/氪泵的冷板通常表面镀镍,表面发射率低于 0.1。低温霜凝结之后,在冷板表面凝结的气体会极大地改变冷板表面的发射率,尤其是水气。凝结于低温表面的水冰可以使冷板表面的发射率接近于 1,冷板上的热负荷轻易增加 2 至 10 倍以上。

图 6 中展示了低温表面不同厚度的水冰的表面发射率,可以看出当水冰厚度达到 100 μm 之后,表面发射率接近于 0.9。

图6 低温表面的不同厚度的水冰的表面发射率<sup>[12]</sup>Fig. 6 Surface emissivity of water ice with different thicknesses on a cryogenic surface<sup>[12]</sup>

其他气体的霜层影响不那么大, Garner C 等<sup>[8]</sup>证明在抽气的初始阶段, 氙冰的表面发射率更接近于 0.6, 但一方面电推进系统内不可避免的含有水, 随着水气的冷凝, 冰层的表面发射率趋于增加, 另一方面, 冰层厚度的也在不断的增加, 当氙冰和氪冰足够厚的时候发射率也趋于增加。当系统压力维持  $5.0 \times 10^{-3}$  Pa 时, 只需要约 10 h 氙冰的厚度就将达到 100  $\mu\text{m}$ , 抽气速度更快的氪只需约 7 h, 氪冰的厚度将达到 100  $\mu\text{m}$ 。这些因素都会导致随着抽气的进行, 低温表面的发射率将趋近于 0.9。

(2) 电推进系统的溅射沉积对冷板表面发射率的影响;

和气体冷凝不同, 溅射沉积会使沉淀物凝结在冷板和冷头上, 这些沉积并不会通过再生改善, 有些沉积物可以用布擦拭, 有些沉积物更像表面涂层并不容易去除。非常干净且反射率低的冷板不会持续太久。如果真空室不能经常打开清理, 那么冷板表面的发射率会持续提高, 性能持续下降。

综上所述, 对于氙/氪冷板的设计, 对于额定的抽气工况, 低温表面的发射率取为 0.9, 室温 20℃ 条件下, 低温表面的热负荷约为 376.2 W/m<sup>2</sup>。

通常而言, 低温冷板的冷凝热<sup>[8]</sup>可表达为:

$$q_1 = \dot{m} \cdot h \quad (7)$$

其中,  $\dot{m}$  为质量流量,  $h$  为潜热。

冷板的冷凝热如图 7 所示。

从图中可以看出在典型的工作压力条件 ( $10^{-4}$  Pa– $10^{-2}$  Pa) 下, 冷板主要受到辐射热的影响, 冷凝热的影响低于 0.85%, 但随着压力的升高, 冷凝热的影响不断增大。

制冷机选用德国莱宝公司的大功率的单级 G-M 制冷机 CP250MD。50 Hz 时, 最低温度可达 25 K, 40 K 时功率可达 120 W, 如图 8 所示。

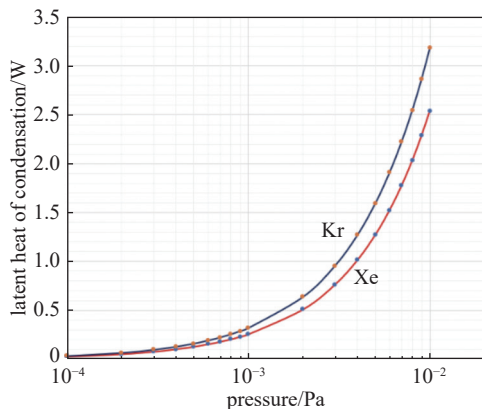


图7 不同抽气压力下, 单位面积冷板氪气和氙气的冷凝热

Fig. 7 Condensation heat of xenon and krypton on the cold plate per unit area under different pumping pressures

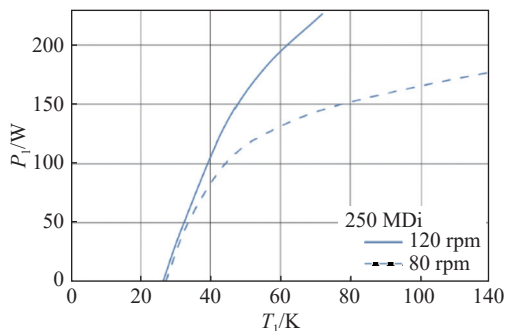


图8 典型的大功率单级商用制冷机

Fig. 8 Typical high-power single-stage commercial refrigerators

### 2.3 数值仿真模型

为了进一步确定低温冷板的温度分布情况, 对低温冷板的换热情况进行仿真建模。低温冷板放置于真空腔体的内部, 低温冷板安装在大功率单级冷头上(对于单面抽气的模型, 在冷板面向真空腔壁面的方向安装有多层), 冷板和真空腔体的辐射换热, 由低温冷板的发射率、冷凝层、多层以及真空腔体的特性所决定。

在模型中, 低温冷板冷冻并且捕获气体, 同时受到真空腔室的内部辐射。在模拟低温捕获的过程中, 考虑冰层的变化导致冰层发射率的变化。考虑冷头和冷板的温度通常非常接近, 忽略冷头和低温板的接触热阻。

建立的物理模型如图 9。

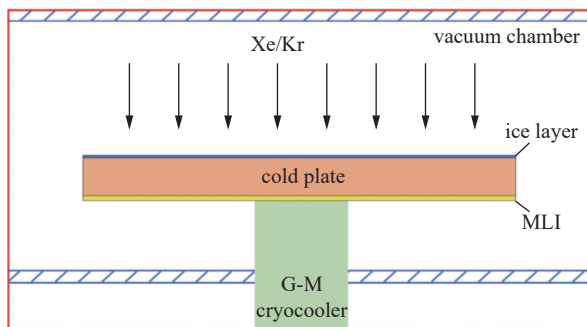


图9 氙/氪冷板的抽气结构模型

Fig. 9 Pumping structure model of the xenon/krypton cold plate

### 3 分析和讨论

#### 3.1 冷板材料及结构的影响

由图 10 可以看出, 制冷机的温度越低其制冷量越低。在受到相同热负荷的情况下, 冷板中心和边缘的温差越小越好, 即导热系数越低越好。

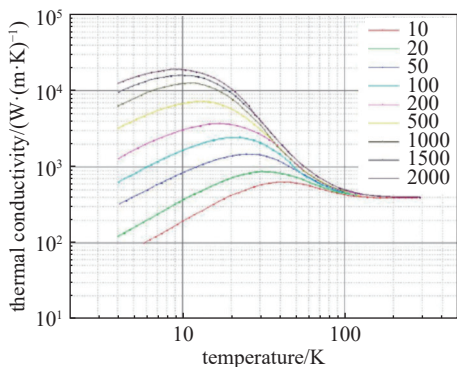


图10 不同纯度的无氧铜在低温下的导热系数

Fig. 10 Thermal conductivity of oxygen-free copper with different purities at cryogenic temperatures

为了获得最高的导热性, 使用的铜必须非常纯净且无氧。这种纯度可以通过残余电阻率比(RRR)来表征。图 11 显示了各种纯度等级的铜的导热系数。可以看出, 使用非常纯的铜(RRR=2000)可以提高一个 60 K 时为 1.5 倍, 40 K 时为 2 倍, 20 K 时甚至为 15 倍<sup>[13-14]</sup>。

Lausberg S 等<sup>[3]</sup> 对比了不同纯度的无氧铜的导热率, 试验表明在低温下纯度高于 99.9% 的无氧铜导热率均接近或优于 800 W/(m.K)。中国的 TU1 及 TU2 无氧铜的纯度均高于 99.9%, TU0 无氧铜的纯度高于 99.99%。

氙泵/氦泵的冷板结构设计一般有两种考虑, 如图 12 所示, 一种是在冷板靠近真空腔壁面的一侧添

加多层以降低辐射热载, 增大面向真空室的面积, 从而提高抽气面积; 另一种是两面均为抽气表面, 同时受到冷头的长度的限制, 一般冷板距离真空腔比较近, 为了降低流导损失这种冷板通常会将冷板的两侧折边, 形成“翼型”以降低流导损失, 从而降低冷板的质量, 减少降温 and 再生的时间。

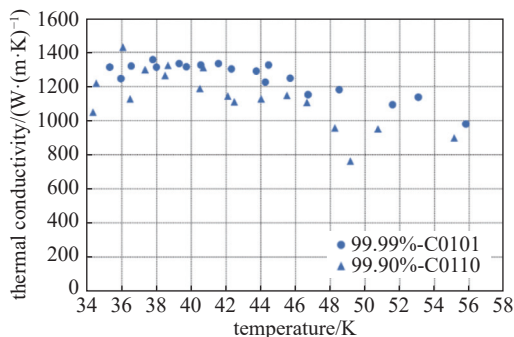


图11 在低温下, 不同纯度的无氧铜的导热率

Fig. 11 Thermal conductivity of oxygen-free copper with different purities at cryogenic temperatures

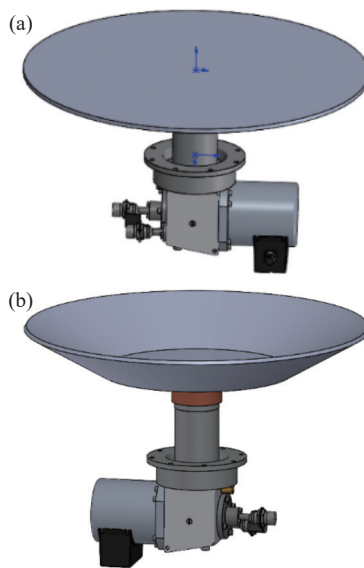


图12 单面抽气型及两面抽气型。(a)单面抽气型(冷板 I), (b)两面抽气型(冷板 II)

Fig. 12 Single-sided pumping type and double-sided pumping type. (a) Single-sided pumping type (cold plate I), (b) double-sided pumping type (cold plate II)

在本文针对相同抽气面积的两类型的冷板进行了建模, 冷板 I 为两面抽气冷板, 直径为 450 mm, 抽气面积约为 0.32 m<sup>2</sup>, 辐射热载约为 120 W。冷板 II 为单面抽气冷板, 直径为 640 mm, 抽气面积约为 0.32 m<sup>2</sup>, 辐射热载约为 120 W。

从图13的仿真结果可以看出,采用双面抽气的冷板设计的温度均匀性要优于单面抽气的冷板,但在考虑到在40 K时高导无氧铜的导热率已经很高可达约800 W/(m.K),这两种抽气形式的冷板的边缘温度相差不大。

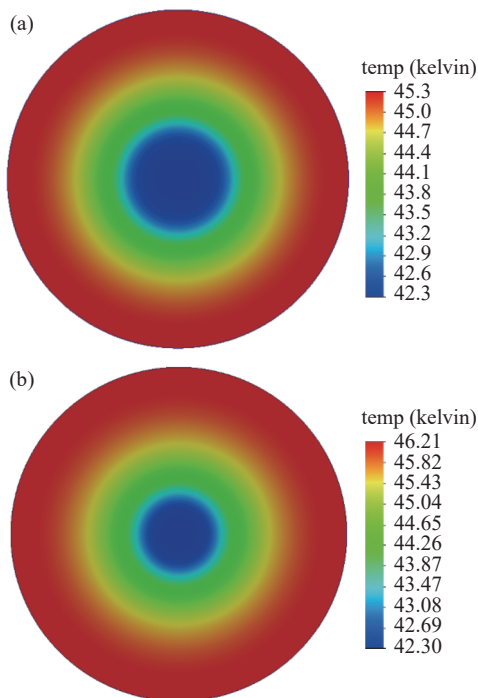


图13 不同结构抽气冷板的温度分布。(a)冷板 I 温度分布, (b)冷板 II 温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of different structured pumping cold plates. (a) Temperature distribution of cold plate I, (b) temperature distribution of cold plate I

采用相同的冷板厚度时,冷板 II 的质量是冷板 I 的两倍,其降温时间和再生时间均大幅增加了。但是采用冷板 I 的氙泵或者氦泵其抽气能力和其在系统中的安装位置有关,如果真空容器较大、安装空间受限的情况下,冷板 I 的实际抽速可能受到流导的限制和标称抽速相差较大,而冷板 II 则不存在以上问题。

### 3.2 氙冰/氦冰成长分析

假设压力为  $5 \times 10^{-3}$  Pa, 理论抽速条件下,假设冰层均匀分布,氙冰和氦冰的成长如图14所示,含冰冷板的温度分布情况如图15、图16所示。

随着冰层的增加,氙冰和氦冰的表面发射率不断地增加,在1 h时,氙冰约10  $\mu\text{m}$ ,氦冰约13  $\mu\text{m}$ ,这时表面发射率接近于0.6,当10 h时,氙冰约100  $\mu\text{m}$ ,氦冰约130  $\mu\text{m}$ 时,表面发射率就接近于0.9。

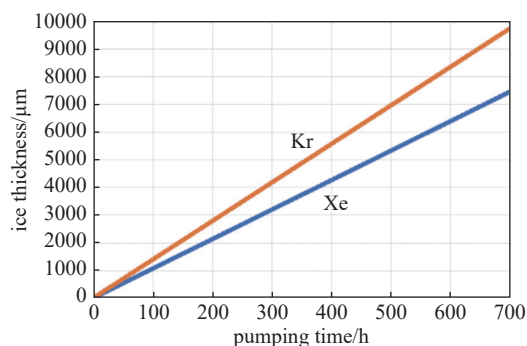


图14 氙冰和氦冰的厚度

Fig. 14 The thickness of xenon ice and krypton ice

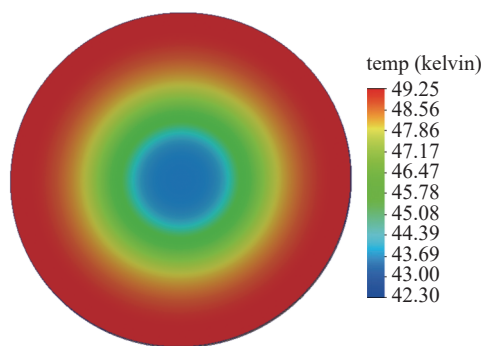


图15 冷板 I 在抽氙气 10 h 后温度分布情况

Fig. 15 Temperature distribution of cold plate I after 10 hours of xenon gas extraction

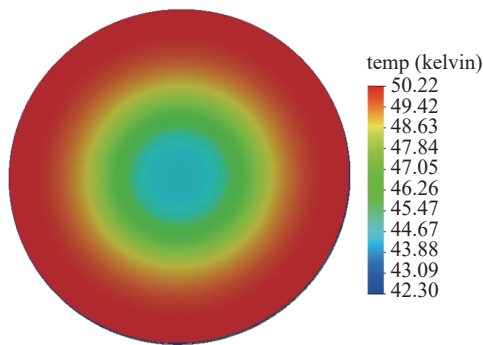


图16 冷板 I 在抽氙气 100 h 后温度分布情况

Fig. 16 Temperature distribution of cold plate I after 100 hours of xenon gas extraction

## 4 试验与测试

为了测试氙泵/氦泵的性能,采用流量法对其的抽气能力进行测试<sup>[15-16]</sup>。测试系统按照 ISO 21360-6:2023 搭建,测试装置由测试罩、粗抽泵、真空管道阀门、流量计、真空规/计、测温装置等组成,如图17(a)所示,其中流量计采用热式质量流量计,流量测量范围0.1 mln/min–200 mln/min,流量计读数误差0.8%,测试精度为0.2%FS,流量计采用氮气标定,使用时,采用厂家给定的校准系数修正。测试真空规采用

超高真空离子规, 量程为  $2 \times 10^{-9}$  Pa–1 Pa, 读数误差为  $\pm 2\%$ 。真空规计及流量计均由北京东方测试计量研究所计量。

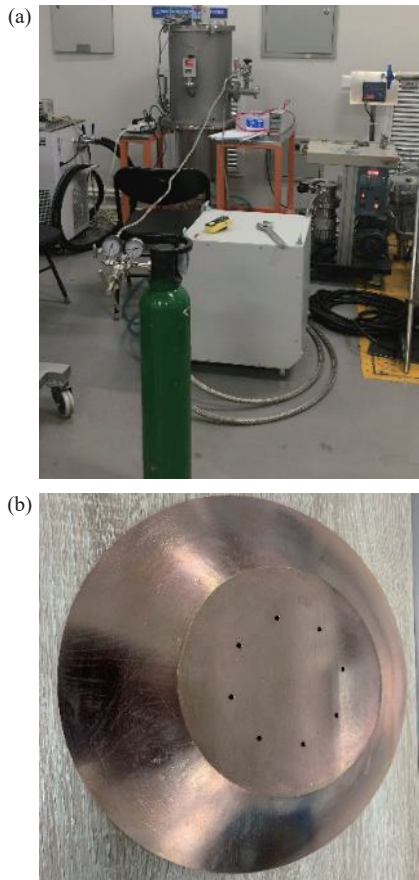


图17 冷板和测试系统(冷板面积  $0.32 \text{ m}^2$ )。 (a)测试系统, (b)冷板

Fig. 17 The cold plate and the test system (cold plate area:  $0.32 \text{ m}^2$ ). (a) The test system, (b) the cold plate

低温泵的抽速由下式计算:

$$S = \frac{q}{p} \quad (8)$$

式中,  $S$  为低温泵抽速,  $q$  为流量,  $p$  为测试罩压力。

冷板布置了 4 个测温点, 均采用 Lakeshore DT670 硅二极管测温传感器, 2 个布置在冷板的边缘和 2 个布置在冷板的中心。硅二极管以及低温仪表由中科院低温中心计量。

图 18 给出冷板在抽除氙气和氦气时的测试结果。可以看出当冷板最高温度达到 35 K 以下时, 对氙气和氦气都有较大的抽速, 其中对氦气的抽速在 23000 L/s–22000 L/s 之间, 对氙气的抽速在 17500 L/s–18500 L/s 之间。平均抽速之比约为 1.25, 符合理论抽气预期, 实测抽速和理论计算抽速误差

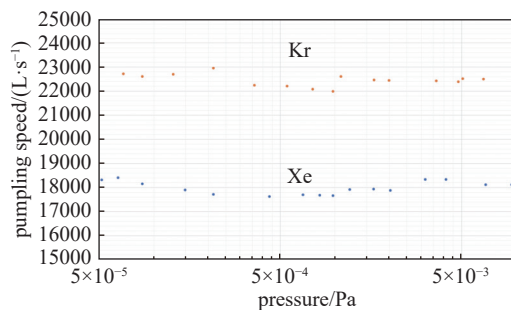


图18 抽速测试结果

Fig. 18 Test results of pumping speed

小于 5%。

图 19 给出了冷板降温曲线, 其中 a, b 曲线代表了冷板边缘的温度, c, d 曲线代表了冷板中心的温度, 可以看出随着温度的降低由于冷板的导热系数的增大, 中心和边缘的温差减小, 最终冷板温度的最大温差低于 4.5 K。冷板的最低温度约为 33 K, 边缘温度约为 37.5 K, 在该温度下, 制冷机的功率约为 75 W, 热负载低于仿真计算时预估的功率 120 W, 这可能是由于在本项目中, 用于抽速测试的标准测试容器, 其内表面发射率为 0.1, 且面积和待测冷板的面积比约为 5 : 1, 达不到实际氙泵/氦泵使用工况时, 电推进舱内表面积远大于冷板面积的程度, 另外, 也可能是由于测试时间较短, 没有使氙冰/氦冰达到足够厚进而使得表面发射率发生改变的程度, 同时也证明了采用本文设定参数去设计氙泵/氦泵具有一定的保守性和可靠性。

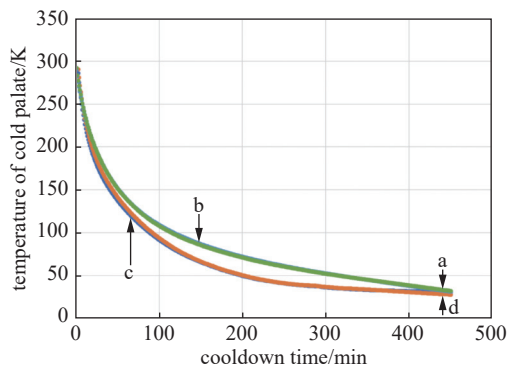


图19 降温时间测试结果

Fig. 19 Test results of cooldown time

## 5 结论

本文通过理论计算和数值仿真的方法对空间电推进环境模拟系统中氙/氦气体低温抽气关键技术进行了研究和讨论, 主要分析了低温抽气冷板的

理论抽速、热负荷、制冷机的选择、低温冷板的结构和温度分布等要素的影响,得到以下结论:

(1) 当饱和蒸气压远低于工作压力时,低温冷板对氙气和氮气的抽速符合公式3所展示的规律,理论计算抽速和实测抽速的结果,误差低于5%;

(2) 根据工作压力不同,氙泵的冷板温度应控制在47 K–54 K之下,而氮泵的冷板温度应控制在37 K–44 K之下,一旦温度过高,氙泵或者氮泵的抽速会快速的大幅下降,低温冷板的温度尤其是边缘温度下的饱和蒸气压能否低于抽气压力两个数量级是低温冷板对氙气和氮气的抽速能否达到理论抽速的关键;

(3) 电推进系统典型的工作压力在 $10^{-4}$  Pa– $10^{-2}$  Pa之间,在这个压力条件下,冷板主要受到辐射热的影响,冷凝热的影响低于0.85%,但随着压力的升高,冷凝热的影响不断增大;

(4) 采用双面抽气的冷板设计的温度均匀性要略优于单面抽气的冷板,同时单面抽气的冷板要比双面抽气的冷板要重,降温和再生时间长于单面抽气的冷板,但单面抽气的冷板的抽气能力不受安装空间的影响;

(5) 低温冷板的表面发射率随着冷板表面冰层厚度的增加而增大,水冰对低温冷板表面发射率有重要的影响,长时间运行之后冷板可能有4℃–5℃的温升;

(6) 采用高导无氧铜可以大幅提高低温冷板的导热系数,从而降低低温冷板中心到边缘的温差,提高大功率制冷机的冷量利用效率;

(7) 实测时,根据制冷机功率图反推的热负载75 W低于理论计算的热负载120 W,这主要是由于标准测试罩的较好的内表面积和较低的表面发射率限制导致辐射热较低,但在实际使用中,应更加接近于理论值,根据本文设定的参数设计氙/氮泵具有一定的保守性和可靠性。

#### 参考文献

- [1] Xia G J. Reserch on high specific impulse hall thruster wih krypton[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (夏国俊. 高比冲氙工质霍尔推力器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020 (in Chinese))
- [2] Zhang G C, Ren J X, Tang H B, et al. Plasma diagnosis inside the discharge channel of a low-power hall thruster working on Xe/Kr mixtures[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 204: 389–401
- [3] 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
- [4] Jovel D R, Cabrera J D, Walker M L R. Current pathways model for hall thruster plumes in ground-based vacuum test facilities: measurements and observations[J]. *Journal of Electric Propulsion*, 2024, 3(1): 35
- [5] Wang J W, E D M, Li Q, et al. Research on configuration strategy of vacuum system in electric propulsion environmental test[J]. *Vacuum*, 2015, 52(3): 37–41 (王军伟, 鄂东梅, 李强, 等. 电推进地面试验真空系统配置策略与研究 [J]. *真空*, 2015, 52(3): 37–41 (in chinese))
- [6] Zhao Y S, Sun L C, Shao R P, et al. Thermal design and evaluation of cryopump: a simulation and experimental study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(6): 443–449 (赵月帅, 孙立臣, 邵容平, 等. 基于CFD方法的低温泵热力学设计与数值仿真研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(6): 443–449 (in chinese))
- [7] Neumann A, Brchnelova M. Modelling of cryopumps for space electric propulsion usage[J]. *Aerospace*, 2024, 11(3): 177
- [8] Garner C, Polk J, Brophy J, et al. Methods for cryopumping xenon[C]//Proceedings of the 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Lake Buena Vista: AIAA, 1996
- [9] Li P Y, Lin B Y, Lv J F, et al. Design of xenon pump[J]. *Vacuum*, 2018, 55(4): 21–25 (李培印, 林博颖, 吕剑锋, 等. 氙泵系统设计 [J]. *真空*, 2018, 55(4): 21–25 (in chinese))
- [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] Baechler W G. Cryopumps for research and industry[J]. *Vacuum*, 1987, 37(1-2): 21–29
- [12] Johnson V J. Properties of materials at low temperature (Phase 1). National bureau of standards, cryogenic engineering laboratory[M]. New York: Pergamon Press, 1961
- [13] Viges E A, Jorns B A, Gallimore A D, et al. University of Michigan's upgraded large vacuum test facility[C]//Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference, Vienna: University of Vienna, 2019
- [14] Gangradey R, Mishra J, Mukherjee S, et al. Experimental investigation of thermal properties of materials used to develop cryopump[J]. *Fusion Science and Technology*, 2021, 77(5): 333–339
- [15] Welch K M, Andeen B, de Rijke J E, et al. Recommended practices for measuring the performance and characteristics of closed-loop gaseous helium cryopumps[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1999, 17(5): 3081–3095
- [16] ISO 21360-6: 2023 Vacuum technology—standard methods for measuring vacuum-pump performance—part 6: cryogenic vacuum pumps[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2023