



推进技术
Journal of Propulsion Technology
ISSN 1001-4055, CN 11-1813/V

《推进技术》网络首发论文

题目: 1A 级射频感性耦合等离子体中和器电子引出特性研究
作者: 付佳豪, 马隆飞, 贺建武, 罗军, 康琦, 段俐
DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2306074
网络首发日期: 2023-12-21
引用格式: 付佳豪, 马隆飞, 贺建武, 罗军, 康琦, 段俐. 1A 级射频感性耦合等离子体中和器电子引出特性研究[J/OL]. 推进技术.
<https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2306074>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

1A 级射频感性耦合等离子体中和器电子引出特性研究*

付佳豪^{1,2}, 马隆飞¹, 贺建武^{1,2}, 罗军¹, 康琦^{1,2}, 段俐^{1,2}

1. 中国科学院力学研究所中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 为解决低轨道吸气式离子电推力器的电中和问题, 设计了一套抗氧化能力强、长寿命的 1A 级氙工质感性耦合等离子体中和器, 实验研究了发射孔径对其电子引出特性的影响。实验结果表明: 发射孔径的变化, 会对中和器电子引出电压、饱和电流和工质利用系数产生较大的影响, 且在部分孔径下发现了电子束流随引出电压上升时出现二次跃变现象, 根据工质利用系数和电子引出功耗比确定出中和器最优发射孔径为 1.5 mm; 电子束流引出为 1 A 时, 工质利用系数达到 27.7, 电子引出功耗比为 94.6 W/A。同时, 测试了中和器温度对工作稳定性的影响, 中和器热平衡状态下与点火初期相比中和器电子引出性能下降约 10%。

关键词: 离子推力器; 电推进系统; 中和器; 感性耦合等离子体; 发射孔径; 电流跃变
中图分类号: V439.1 **文献标识码:** A

DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.2306074

Electron extraction characteristics of a 1A-level RF inductively coupled plasma neutralizer

FU Jiahao^{1,2}, MA Longfei¹, HE Jianwu^{1,2}, LUO Jun¹, KANG Qi^{1,2}, DUAN Li^{1,2}

- (1. Micro Gravity Key Laboratory, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China ;
2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problem of electric neutralization of low-orbit air-breathing ion thruster, a set of 1A-levelXe inductively coupled plasma neutralizer with strong oxidation resistance and long life was designed. The influence of emission aperture on its electron extraction characteristics was experimentally studied. The experimental results show that the change of the emission aperture will have a great influence on the electron extraction voltage, saturation current and working medium utilization coefficient of the neutralizer, and it is found that the electron beam current has a secondary jump

基金项目: 国家重点研发计划 National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202800); 力学研究所优秀青年人才培养计划 Excellent Young talents training Program of the Institute of Mechanics (E1Z1030201)。

作者简介: 付佳豪, 硕士生, 研究领域为空间推进技术。

通讯作者: 段俐, 博士, 研究员, 研究领域为空间实验流体、精密测量物理。E-mail: duanli@imech.ac.cn

phenomenon when the extraction voltage rises under some apertures. According to the working medium utilization coefficient and the electron extraction power consumption ratio, the optimal emission aperture of the neutralizer is determined to be 1.5 mm. When the electron extraction beam current is 1 A, the utilization coefficient of the working fluid reaches 27.7, and the power consumption ratio of the electron extraction is 94.6 W/A. At the same time, the influence of the neutralizer temperature on the working stability was tested. The electron extraction performance of the neutralizer in the thermal equilibrium state decreased by about 10% compared with the initial ignition.

Key words: Ion thruster; Electric propulsion system; Neutralizer; Inductively coupled plasma; Transmitting aperture; Current jump

1 引言

随着电推进技术的快速发展,在航天器动力系统行业占比逐年递增^[1-2]。在非自中和型电推进系统中,以霍尔推进系统和离子推进系统为例,推力器通过引出阳离子产生推力,需要配置一台中和器通过引出电子实现电推进系统电中和。目前,部分学者开展了自中和型电推进技术研究,但带电粒子的引出特性不尽相同,电推进系统电子学复杂度高^[3]。因此,中和器仍是电推进系统中不可或缺的部组件之一。

目前,具有大电流($\geq 1\text{A}$)发射能力的中和器类型主要为空心阴极,发射体材料主要为钨钨、六硼化镧和钛等,在富氧环境下容易发生中毒,导致中和器失效^[4-5],因此空心阴极对工质气体要求极高,国内外普遍采用高纯度(99.999%)氙气,价格昂贵。射频中和器放电室内部无需发射体,适用于多种气体工质和空间任务,如低轨道吸气式电推进系统,其主要应用于 150~350 km 轨道^[6],此轨道空间气体成分主要为氧原子和氮气分子^[7],空心阴极即使采用氙气作工质,周围空间气体也会对其造成一定影响。在吸气式电推进中由于氮氧作为工质效率会比较低,通常会加入少量的氙气或氦气来提高效率,而中和器所需工质量相对推力器来说非常少,可以达到其氙气或氦气使用量的 1/10 以内,

即使中和器使用氙气作为工质并不会对总体比冲以及工质寿命造成太大影响。根据射频中和器中的等离子体形成原理,可分为容性耦合等离子体中和器^[8-10]和感性耦合等离子体中和器^[11-13],其中感性耦合等离子体中和器在低功率下等离子体密度更高,实现电子引出量更多,因此本文研究的射频中和器是基于感性耦合等离子体。此外,无内置发射体的中和器还有微波等离子体中和器^[14]和螺旋波等离子体中和器^[15]等。

射频中和器的发射孔径是影响放电室内气压的因素之一,在相同工况下,改变发射孔径将伴随着放电室内等离子体密度的变化,进而影响中和器性能。SinaJahanbak-hsh 等^[16]实验测试发现在高质量流速下,较大的孔口直径增加了提取电子电流,较小的孔口长度会减小提取电子电流。贺建武^[17-18]将阳极板理论引入射频中和器,认为发射孔径和内部收集极面积的比值的不同会导致出口处鞘层的不同进而影响引出电子的特性。李兴达等^[19]实验发现孔径的大小会对引出电子羽流大小以及电子饱和电压产生影响。

本文主要开展射频中和器发射孔径对电子引出电压、饱和电流和工质利用系数等性能影响研究,获得最优孔径,并根据其发射电子特点,进一步提升中和器综合性能。

2 工作原理及实验平台

2.1 工作原理

射频中和器基于感性耦合等离子体放电原理,如图 1 所示,在真空环境下,气体工质通过进气管道流入放电室,柱形线圈加载的射频电流在放电室内形成电磁场,电子在周向电场中获得能量后与中性气体粒子碰撞,完成等离子体自持放电。当放电室内收集级加载负电压或发射孔前端阳极板加载正电压模拟推力器离子羽流电位时,放电室内的电子将从发射孔被引出,而离子通过收集极获得电子,复合成中性粒子。由于中性粒子会出现多次电离及复合,所以一个中性粒子可以重复释放出多个电子,导致中和器的工质利用系数通常是大于 1 的。中和器理想的工作状态为全局非双极流模式^[20],即全部电子均损失在阳极板上,而全部离子都损失在收集极上。

在射频中和器引出电子过程中,当电子引出电压达到阈值电压时,发射孔上游将产生一个尺寸远大于孔口直径的明亮光斑,即阳极斑^[21]。阳极斑处的等离子体密度比周围高出近一个数量级^[22]。阳极斑的形成对于内部等离子体与外部离子羽流之间建立起等离子体桥起着关键作用。

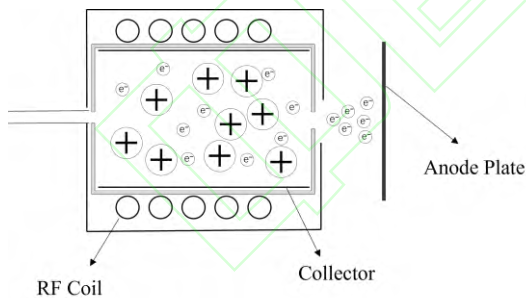


Fig. 1 Working principle of radio frequency plasma bridge neutralizer

2.2 实验平台

实验平台由真空系统、测控系统和射频中和器系统组成。真空系统包含方形主真空室、圆柱形过渡室、2 台机械泵和 3 台分子泵等组成,射频中和器工质为氙气,工作时真空度优于 10^{-3} Pa,满足实验所需真空环境。基于 Labview 软件和 NI 多功能采集卡搭建了一套射频中和器测控系统,可实现工质气体流量、射频频率、射频功率和电子引出电压

等参数的控制和采集。射频中和器系统包含中和器、工质气体贮供单元、射频信号源、功率放大器、射频匹配网络和直流电压源等,如图 2 所示。根据射频中和器工作原理和 1A 级电子束流值需求,放电室内径和长度均设计为 40mm,材料为可加工陶瓷。在放电室内壁,选取 100mm 长、40mm 宽、0.3mm 厚钼片制作 C 型柱面收集极,可避免形成法拉第屏蔽,有效提高射频功率耦合效率。放电室外侧缠绕的射频线圈采用 5 匝外径为 4mm、内径为 3mm 的空心紫铜管。电子引出孔深为 2mm,孔直径 ϕ 设计为多个尺寸: 1mm、1.5mm、2mm、3mm、3.5mm 以及 4mm。中和器最外面采用铝合金金属外壳来屏蔽电磁辐射信号。

射频中和器工作频率为 1.6MHz,阻抗匹配采用 L 型匹配电路。本文采用高电压击穿放电的方式点火^[17],放电室内设计了放电针,在加载射频功率和通入工质气体前提下,放电针加载高电压,当形成电弧放电时即可形成感性耦合自持放电。随后将放电针连接串联 21 k Ω 电阻,通过 NI 采集卡来实时监测等离子体电位变化。实验中,在距离发射孔 20mm 处放置钼板作为阳极板,并施加正电位 U_{anode} 模拟电推力器的离子羽流,以实现电子的引出,并通过控制电子引出电压 U_e 得到电子束流最大值。

$$U_e = U_{\text{anode}} - U_{\text{collector}} \quad (1)$$

$U_{\text{collector}}$ 为收集极施加的电压值。

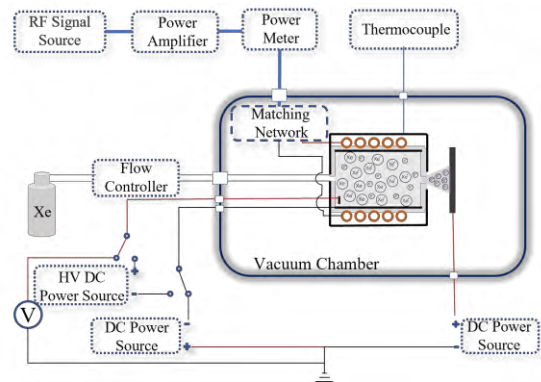


Fig. 2 Experimental schematic diagram

3 结果与讨论

3.1 电子束流跃变特性

针对 2mm 的发射孔开展了引出电压对电子束流的影响研究, 结果如图 3 所示, 射频输入功率 (P_{RF}) 为 55 W 时, 分别在 0.4 mL/min、0.5 mL/min 和 0.6 mL/min 工质流量 (Q) 下测试引出电子电流和引出电压的关系, 发现当工质流量和射频功率等参数不变的情况下, 随着电子引出电压的增加, 电子束流值也逐渐上升, 但是工质流量为 0.5 mL/min 和 0.6 mL/min 的工况下, 电子束流值发生了两次跃变, 而工质流量为 0.4 mL/min 时, 只观察到一次电子束流值跃变, 为了进一步分析两次跃变现象, 将放电针作为探针测量等离子体电位 U_p 变化^[20]:

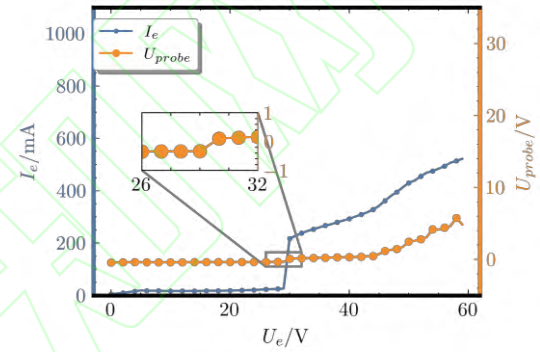
$$U_p = -\frac{T_e}{e} \ln(\mu) + U_f \quad (2)$$

其中 U_f 为放电针悬浮电位, $\mu = \sqrt{2.3m_e/M_i}$, m_e 为电子质量, M_i 为离子质量, T_e 为电子温度。

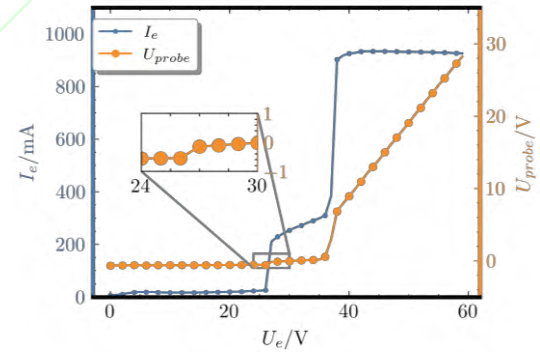
从图 3 (b)、(c) 可以看出, 当电子束流值发生第一次跃变时, 放电针测得的电位增加了约 1V。随着电子引出电压增加, 电位基本保持不变。此时工作状态如图 4 (a) 所示。当电子束流值发生第二次跃变时, 放电针测得的电位同时产生 5-8V 的增加, 并且随着电子引出电压的持续增加, 该电位也随之上升, 电子束流快速进入饱和状态, 而阳极板和放电针的电位差保持不变, 中和器进入稳定工作状态, 如图 4 (b) 所示。可以看出, 由于在整个过程中收集极一直施加的是零电位, 在第二次电子电流跃变之前等离子体电位是受收集极主导的, 当发生第二次电子电流的跃变发生之后, 阳极板和放电室内部等离子体之间形成稳定的等离子体桥, 内部等离子体的电位是受阳极板电压主导的。对比不同的流量下的工作状态可以看出, 当工质流量足够大的时候, 阳极板和放电室内部等离子体之间才可以建立起稳定的等离子体桥。

根据对等离子体电位的监测可以大致推断出发射孔和阳极板之间的电离状态, 在第一次跃变前, 少量电子在热运动及电场作用下逸出, 随着阳极板电压不断上升, 逸出电子能量不断增加, 达到 Xe 的第一电离能时则会使外部中性气体电离。电离形成的离子质

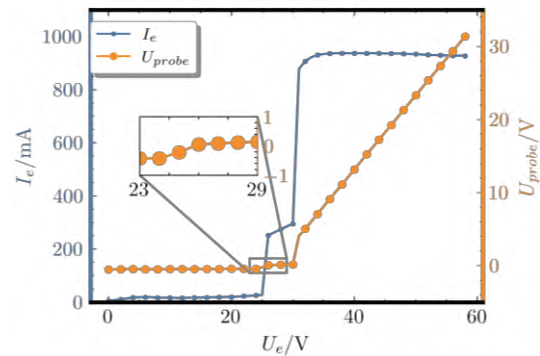
量要比电子大的多, 电子迅速向阳极板移动孔口附近的正离子则会增强对放电室内等离子的吸引, 进而增大引出电子束流完成第一次跃变。继续增大阳极板电压则会使发射孔口和阳极板间的等离子体密度不断增加, 直至形成通路将阳极板与放电室内部等离子体连通, 即建立等离子体桥。稳定的等离子体桥一旦建立继续增大阳极板电压会增大等离子体与收集极的电势差, 造成更强的收集极溅射腐蚀, 并且也造成更多的电能损耗, 所以在中和器工作时应当将引出电压维持在电子束流饱和和电压附近。



(a) $Q=0.4$ mL/min

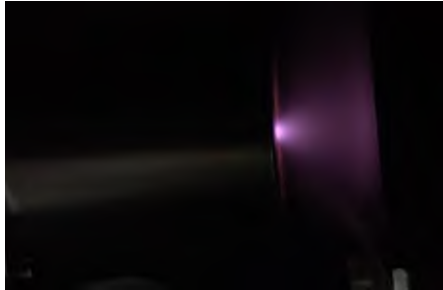


(b) $Q=0.5$ mL/min



(c) $Q=0.6\text{ mL/min}$

Fig. 3 Effect of V_e on extraction current and plasma potential. ($P_{RF}=55\text{ W}$)



(a) The first jump



(b) The second jump

Fig. 4 Working state after two current jumps

3.2 引出电压迟滞效应

分别对 1mm、1.5 mm 以及 2mm 的孔径进行引出电压升高再降低的实验。如图 5 所示，实验发现，当发射孔径为 1.0mm 时，电子引出电压阈值高达 100V，在发射孔处形成阳极斑后，即使降低电子引出电压也能保持阳极斑的稳定，表现出明显的迟滞效应。同样，当发射孔径为 1.5 mm 和 2.0 mm 时迟滞效应只发生在第一次电子束流值跃变点，说明阳极板与发射孔之间的等离子体密度是产生电子引出电压迟滞效应的主要原因。在发生第一次电子束流值跃变前的电子束流值非常小，发射孔和阳极板间的等离子体密度较低。随着电子引出电压的增加，发射孔附近的电子能量达到工质电离能，形成辉光放电产生阳极斑，并导致第一次电子束流值跃变。此时，发射孔和阳极板间形成新的等离子体源，等离子体密度大幅提高，仅需鞘层电势差达到工质的第一电离能便可维持自持放电，

这也是电子引出电压产生迟滞效应的原因。

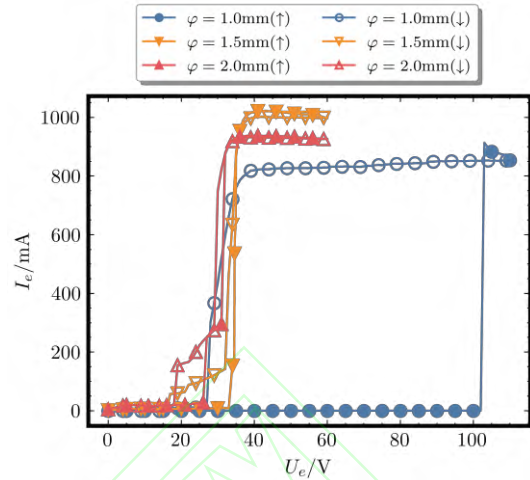
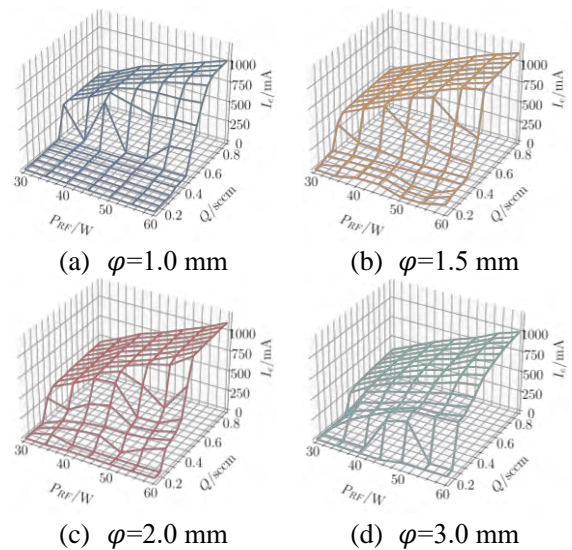
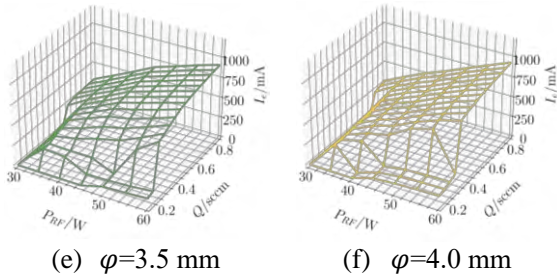


Fig. 5 Influence of U_e rise and fall on the extracted electron current

3.3 发射孔径优化

如图 6 所示，分别测试了孔径为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、3.0 mm、3.5 mm 及 4.0 mm 下射频输入功率和工质流量对引出电子电流的影响。结果表明当工质流量足够大时 ($\geq 0.5\text{ mL/min}$)，引出电流和输入功率呈现出良好的线性关系，可以通过调节射频输入功率来很好的控制电子的发射电流。对于工质流量较小的时候，由于阳极板上的电压维持在 60 V 可能无法使其引出电流达到饱和，从而导致其引出电流与功率不能显示出良好的线性关系。





(e) $\varphi=3.5$ mm (f) $\varphi=4.0$ mm

Fig. 6 Electron current is extracted under different apertures, working fluid flow and RF power. ($U_e=60$ V)

另外较小的发射孔孔径和工质流量会导致引出电子电流需要较大的维持电压，如图 7 所示，在工质流量较小时发射口径 1mm 的维持电压显著高于发射口径为 1.5 mm 的维持电压，当工质流量在 0.6 mL/min 以上时则维持电压基本保持一致。这也解释了在图 7 中相同功率和引出电压下，电子电流发生跃变的流量和孔径呈负相关。

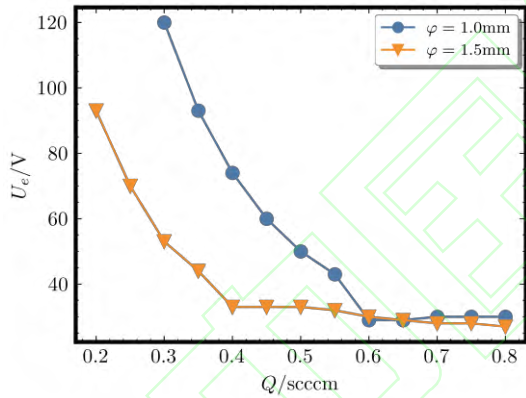


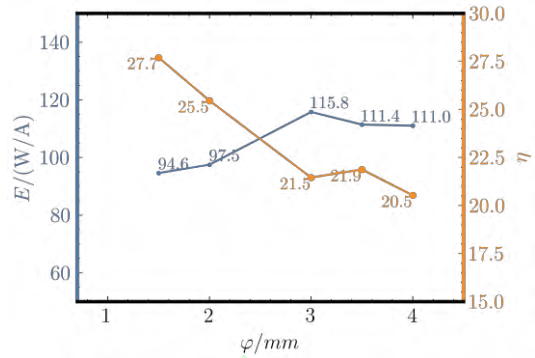
Fig. 7 U_e required to maintain the electron current above 100 mA

除了以上工作特性，评价中和器的性能指标主要包括电子引出功耗比 (E) 和工质利用系数 (η)，其计算公式为：

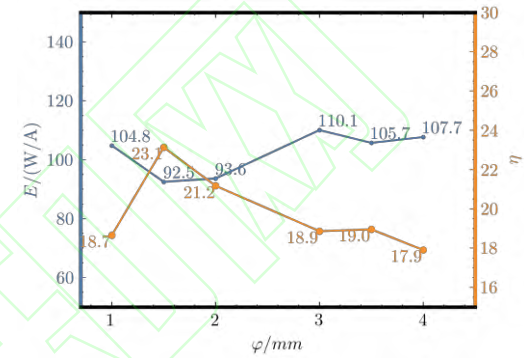
$$E = \frac{I_e V_e + P_{RF}}{I_e} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{I_e}{Q \times 71.4} \quad (4)$$

电子束流值为 1A 时，设定射频功率为 55W，工质流量为 0.5-0.6mL/min，计算不同孔径下对应最优的电子引出功耗比及工质利用系数，如图 8 所示。发现中和器在发射孔径为 1.5 mm 时其电子引出功耗比和工质利用系数都为最优。



(a) $P_{RF}=55$ W, $Q=0.5$ mL/min



(b) $P_{RF}=55$ W, $Q=0.6$ mL/min

Fig. 8 Optimal working state under different apertures

3.4 稳定性测试

射频中和器工作稳定性除了与射频功率、工质流量和电子引出电压等参数有关外，热平衡也是关键因素之一。中和器工作时产生的热量源自于等离子体吸收射频能量释放的热量、金属外壳感生电流产生的热量，以及射频线圈因欧姆损耗产生的热量。中和器温度升高导致电路欧姆损耗增加，从而导致中和器的性能下降。在真空环境下，中和器产生的热量主要通过热辐射传播，当热辐射能量与产生的热量平衡时，中和器的温度也将达到平衡。在中和器稳定性测试中，设定射频功率为 55W，工质流量为 0.6 mL/min，电子引出电压为 40V，发现随着工作时间的推移，中和器的温度逐渐上升并最终稳定在 245℃ 左右，与此同时，电子束流值也逐渐下降并

达到稳定状态，如图 9 所示。对比中和器点火初期和稳定工作后期的电子束流值，发现电子束流值从 1.05A 降至 0.95A，引出性能下降约 10%。

当射频中和器达到稳定状态后，射频功率、工质流量和电子引出电压的调节对中和器的工作稳定性影响可忽略，实现电子稳定引出。

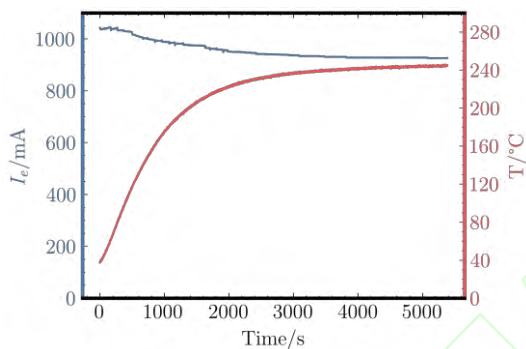


Fig. 9 Temperature and the electron current change with time. ($\varphi=2$ mm; $P_{RF}=55$ W; $Q=0.6$ mL/min; $U_e=40$ V)

3.5 联合推力器工作

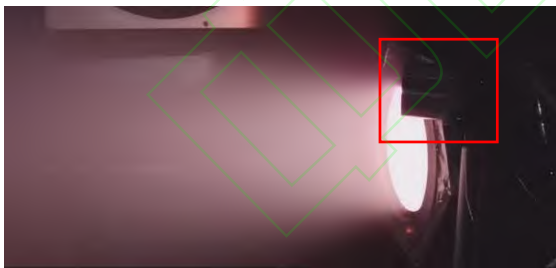


Fig. 10 Neutralizer works in conjunction with RIT-20

中和器与吸气式射频离子推力器 RIT-20 也进行了联合工作，满足 RIT-20 的点火和电中和任务要求。之后针对中和器安装位置的优化以及其寿命测试工作也将逐步展开。

4 结论

本文针对 1A 级的射频中和器，开展了发射孔径尺寸优化研究，观察到了电子束流值二次跃变和电子引出电压迟滞现象，分析了

对中和器工作稳定性的影响测试，得到以下结论：

- (1). 通过对比不同发射孔径下中和器电子引出功耗比和工质利用系数得到发射孔径为 1.5 mm 时，中和器的性能最优。此孔径下，电子束流引出为 1 A 时，工质利用系数达到 27.7，电子引出功耗比为 94.6 W/A；
- (2). 电子引出电压是调节电子束流值的关键因素之一，通过调节引出电压可以将内部等离子体与阳极板建立起等离子体桥，并且一旦建立起稳定的等离子体桥，等离子与阳极板的电位差将恒定不变，无法再通过调整引出电压来增大电子引出电流；
- (3). 当工质流量大于 0.5 mL/min 时，电子束流值和射频功率呈线性关系，可以通过调节射频功率控制电子束流值的大小；
- (4). 随着中和器温度的上升，点火初期到热平衡状态电子引出性能降低 10% 左右。

1A 级的射频中和器的优势是对工质要求低，可采用低纯度工质，降低成本，工质利用系数与常规空心阴极中和器相当，为电推进系统提供了新的选择。但是射频中和器需要更高的能耗，需要进一步优化中和器内部结构，提升电效率。

参考文献：

- [1] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术, 2003(5): 385-392. (WU HJ, JIANG YD, ZHANG ZY. Application and development trend of electric propulsion technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003(5): 385-392.)
- [2] 康小录, 张岩. 空间电推进技术应用现状与发展趋势[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 24-34.
- [3] 孙安邦, 李昊霖, 杨谨远, 等. 无中和器离子推力器的发展现状、关键技术及展望[J]. 科学通报, 2023, 68(1): 112-127.
- [4] 郭宁, 江豪成, 高军, 等. 离子发动机空心阴极失效形式分析[J]. 真空与低温, 2005(4): 239-242.
- [5] 赵志伟, 张天平, 冉文亮, 等. 空心阴极耦合放电的寿命损耗机理研究综述[J]. 火箭推进,

2023, 49(1): 1-11.

[6] 于博, 刘佳, 张岩, 等. 一种用于吸气式电推进的新型吸气装置研究[J]. 推进技术: 2023,44(7):68-74. (YU B, LIU J, ZHANG Y, et al. A new structural intake for atmosphere-breathing electric propulsion[J]. Journal of Propulsion Technology:2023,44(7):68-74)

[7] 杨兆伦, 郭宁, 陈学康, 等. 吸气式电推进系统可行条件分析[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(1): 54-59.

[8] 贺柳良, 何锋, 欧阳吉庭, 等. 电压对射频空心阴极放电特性的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(4): 282-289.

[9] 姜鑫先, 王春晓, 何锋, 等. 孔深对射频空心阴极放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3068-3072.

[10] SCHARTNER K H, LÖB H, FEILI D. Development of a capacitively coupled insert-free RF-neutralizer[R]. IEPC-2005-086.

[11] GODYAK V, RAITSES Y, FISCH N J. RF plasma cathode-neutralizer for space applications[C]. Florence: 30th International Electric Propulsion Conference, 2007.

[12] HATAKEYAMA T, IRIE M, Watanabe H, et al. Preliminary study on radio frequency neutralizer for ion engine[C]. Florence: 30th International Electric Propulsion Conference, 2007: 17-20.

[13] CELIK M, KURT H. Ferromagnetic enhanced inductively coupled plasma cathode for thruster ion neutralization[J]. AIP Conference Proceedings, 2011(1): 090022.

[14] WEATHERFORD B, FOSTER J. Improved performance of the ECR waveguide plasma cathode with permanent magnets[C]. Nashville: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010.

[15] LONGMIER B, HERSHKOWITZ N. "Electrodeless" plasma cathode for neutralization of ion thrusters[C]. Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion

Conference & Exhibit, 2005.

[16] SINA J, MURAT C. Study of electron current extraction from a radio frequency plasma cathode designed as a neutralizer for ion source applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(2): 02B922.

[17] 贺建武, 马隆飞, 薛森文, 等. 小型感性耦合射频等离子体中和器的实验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(7): 1673-1680. (HE JW, MA LF, XUE SW, et al. Experimental study of a mini inductively coupled radio-frequency plasma neutralizer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(7): 1673-1680.)

[18] HE J W, MA L F, XUE S W, et al. Study of electron-extraction characteristics of an inductively coupled radio-frequency plasma neutralizer[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(2): 025403.

[19] 李兴达, 张兴民, 李建鹏, 等. 射频电子源数值仿真及实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2394-2400. (LI XD, ZHANG XM, LI JP, et al. Numerical simulation and experimental study of radio frequency electron source[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(10): 2394-2400.)

[20] BAALRUD S D, HERSHKOWITZ N, Longmier B. Global nonambipolar flow: plasma confinement where all electrons are lost to one boundary and all positive ions to another boundary[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(4): 042109.

[21] BAALRUD S D, LONGMIER B, Hershkovitz N. Equilibrium states of anodic double layers[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2009, 18(3): 035002.

[22] WEATHERFORD B R, BARNAT E V, Foster J E. Two-dimensional laser collision-induced fluorescence measurements of plasma properties near an RF plasma cathode extraction aperture[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21(5): 055030.