

射频等离子体中和器的设计与实验研究

徐宗琦^{1*} 田雷超^{2,3} 王平阳¹ 杭观荣^{2,3}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240

2. 上海空间推进研究所 上海 201112

3. 上海空间发动机工程技术研究中心 上海 201112)

Design and Experimental Study on Radio Frequency Plasma Neutralizer

XU Zongqi^{1*}, TIAN Leichao^{2,3}, WANG Pingyang¹, HANG Guanrong^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China

3. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract With the development of electric propulsion technology, there is an increasingly urgent need for neutralizers with high toxicity resistance. For this reason, based on the fundamental principle of radio frequency discharge, a radio frequency plasma neutralizer that can use various working media and has high toxicity resistance is designed, and a vacuum experiment system is built for experimental research. The curve of the emission current varied with radio frequency power and xenon flow is acquired. After the working gas is ionized, ions are collected by a graphite negative electrode placed in the discharge chamber, and electrons are extracted by a metal plate positive electrode outside the discharge chamber outlet. The results show that the radio frequency plasma neutralizer can effectively emit electrons to form a current, and the increase of radio power and xenon flow rate can increase the current. When the radio frequency power exceeds 220W and the flow rate reaches or exceeds 4 mL/min, the emission current of the neutralizer can reach 1A or more. Thus, the radio frequency plasma neutralizer served as an ion neutralization device for electric thruster plume has certain research value and application prospects.

Keywords Electric propulsion, Radio frequency discharge, Ion neutralization device, Research value, Application prospects

摘要 随着电推进技术的发展,对具有高抗中毒性中和器的需求日益紧迫。为此,基于射频放电基本原理,设计了一款可采用多种工质且具有高抗中毒能力的射频等离子体中和器,搭建了真空实验平台进行试验研究,获得了发射电流随射频功率和氙气流量的变化曲线。工质气体电离后,离子被置于放电室内的石墨柱负电极收集,电子被置于放电室出口外的金属板正电极引出。研究表明,该射频等离子体中和器能有效地发射电子形成电流,且增大射频功率和氙气流量可以提高电流。当射频功率达到220 W,流量达到或超过4 mL/min(标准状态)时,中和器发射电流达到1 A以上。因此,射频等离子体中和器作为电推力器羽流离子中和装置具有一定的研究价值和应用前景。

关键词 电推进 射频放电 离子中和装置 研究价值 应用前景

中图分类号:V439.4

文献标识码:A

doi:10.13922/j.cnki.cjvst.202011029

相比化学推进,电推进以其比冲高、寿命长、结构紧凑等优势受到国内外研究机构广泛关注。在所有电推进系统中,霍尔推进和离子推进技术较为成熟,相应的霍尔推力器和离子推力器也得到广泛

应用,尤其以中功率霍尔和离子推力器为代表的电推力器已被诸多卫星搭载作为动力装置,并成功完成各种空间任务。然而,霍尔与离子推力器受自身等离子体放电机理限制,均需在放电室下游出口位

收稿日期:2020-11-26

* 联系人:E-mail: xuzongqi@sjtu.edu.cn

置配置中和器释放电子,维持其正常工作并与羽流离子中和,以避免离子沉积于航天器表面对电子器件造成损坏。因此,中和器直接制约推力器的使用寿命,甚至影响卫星能否正常完成空间任务。根据使用目的,能够发射电子的物体或装置均可称作中和器^[1]。随着科学技术的发展,以采用钨钨和六硼化钨材料为代表的空心阴极得到广泛研究与应用,但是发射体材料制备困难且其抗中毒能力差,高温条件下极易与活性气体反应而失去发射电子能力,阴极工作前需要较长时间预热,阴极工作时发射体材料损耗较大,阴极工作后需要较长时间冷却,所以制作成本高、使用寿命受限且很难短时间内切换工作模式。射频放电具有结构简单,功率消耗低,等离子体密度高等特点。

利用射频耦合放电方式激发产生等离子体并引出电子或离子的方法在工业领域有着诸多应用,如材料表面改性及表面刻蚀等。基于该等离子源能够产生并引出高密度电子的特性,可将其作为离子中和器而应用于电推进领域。

针对射频等离子中和器的研究,国内外均有学者做过相关工作。日本东京都立大学的 Hiroki Watanabe 等^[2]为离子推力器设计了感应耦合等离子体阴极,并开展了实验研究工作后发现,在射频功率 100 W、氙气流量 2 mL/min(标准状态)靶电压 40 V 条件下,阴极发射电流达到 2.1 A。随后,该研究团队又将射频等离子体阴极直接作为阳极层霍尔推力器的中和器进行放电实验^[3],结果发现,在射频功率 140 W、氙气流量 0.3 mg/s 条件下,阴极发射电流达到 3.3 A。德国莱布尼茨表面改性研究所 Scholze 等^[4]设计的感应耦合射频等离子体桥中和器在射频功率 300 W、氙气流量 0.2 mL/min 条件下,获得最大电子流为 1.6 A,另外,他们还发现采用氙气作为工质的电子流小于氙气。美国普林斯顿大学等离子体物理实验室 Valery 等^[5]在实验中发现感应耦合等离子体最大电子发射效率超过微波和螺旋波等离子体,同时,该研究机构还做了诸多射频控制空心阴极点火的研究^[6-8]。土耳其海峡大学机械工程系 Jahanbakhsh 等^[9-10]研究了射频阴极引出电子流与工质气体流量、引出小孔直径以及射频功率之间的关系。国内中科院力学所的贺建武等^[11]发现感应耦合射频中和器的电子引出特性由阳极斑决定并在优化实验中获得 55-150 mA 可调电子束流。兰州空间技术物理研究所李兴达等^[12]针对射频电

子源的数值仿真与实验比较发现,引出电子流与收集电压、小孔直径、工质流率以及射频功率均相关,且仿真与实验结果较为一致。

国内外研究的感应耦合射频等离子体中和器放电室中,均装有离子收集器,而离子收集器的设计形状以及材质并未做出详细说明,但离子收集器决定离子收集效率,对引出电子具有重要影响。本文在此基础上,设计了一款带有圆柱形离子收集器的感应耦合射频等离子体中和器,并实验研究了引出电流与工质流量以及馈入功率的关系。

1 射频等离子体中和器工作原理

射频等离子中和器通常采用 ICP 模式作为放电等离子体源,感应耦合放电是一种无电极的射频放电,射频源能量经过匹配网络以电流的形式传递给线圈,通过线圈的射频电流在放电室中感应出涡旋电场,工质气体获得馈入的射频能量发生电离,产生高密度等离子体。典型的射频放电频率为 13.56 MHz,随着天线输入功率增加,感应耦合等离子放电存在容性耦合(E模式)到感应耦合(H模式)的模式跳变,等离子体密度突然变大。当放电趋于稳定之后,放电室内的离子被收集器吸收,电子在外加偏置正电压的作用下,加速喷出形成电子流。被吸收的离子在收集器表面发生复合反应,生成的中性原子在鞘层或等离子体区域与电子发生碰撞被再次电离^[13]。理论上,射频等离子体中和器工质利用率能达到百分之百,即所有流入放电室的中性粒子最终均被电离,相应的电子被全部引出。因此,将该等离子体发生装置作为霍尔和离子推力器中和器原理可行。

射频等离子体中和器的工作过程主要包括电子的产生与引出两个过程。电子来源于工质气体的电离,因此需要高密度的等离子体和高效的离子收集器。为保证放电室内具有较高的气压使放电在较低射频功率条件下实现,电子引出小孔直径远小于放电室直径。离子收集器接电源负极作为收集极,并尽量增大收集器表面积,使离子与其充分接触。放电室出口外的金属板接电源正极作为触持极,电子在触持极的作用下,高速喷出形成电子束流。能量平衡方程可表示为

$$P_{\text{abs}} = eu_{\text{B}}n_0A_{\text{eff}}E_{\text{T}} \quad (1)$$

其中, P_{abs} 为电离吸收功率, e 为单位电荷量, u_{B} 为玻姆速度, n_0 为等离子密度, A_{eff} 为粒子损耗区有效截面

积, E_T 为每形成的一个电子-离子对所消耗的能量。引出电流可表示为

$$I_e = \frac{1}{4} e A n_s v_e \quad (2)$$

式中, A 为电子引出截面积, n_s 为鞘层中等离子体密度, v_e 为电子运动的平均速度。可以看出, I_e 与 A 、 n_s 和 v_e 均成正比, n_s 和 v_e 可通过几何结构和外加电磁参数计算或实际测量等离子体参数获得。

影响射频等离子体中和器性能的因素主要有放电室几何参数, 包括直径、长度、天线圈数和小孔直径等, 以及工作参数, 包括工质气体种类、流量、压强和输入功率等。而等离子体物性参数, 包括等离子体密度、电子温度、德拜长度以及电势等可通过仿真计算或探针诊断获得。本文仅初步研究射频功率以及工质气体流量对射频等离子体中和器发射电流大小的影响。

2 实验装置及实验方案

2.1 实验装置

电子发射能力作为衡量中和器性能的重要标准是本实验关注的对象。感应耦合等离子在低气压、低功率、低流量条件下即可自持, 而点火过程需要较大流量和功率。中和器自持放电的过程中, 收集极对离子吸收能力决定电子引出的数量和稳定性。图1为日本京都大学设计的射频中和器实验系统^[14], 其中阳极板代替推力器喷出的离子流。

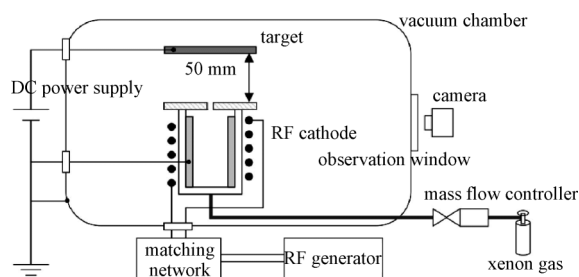


图1 射频中和器实验系统

Fig.1 Experimental system of RF plasma neutralizer

本实验系统与图1类似, 不同在于研究的是一款带有圆柱形离子收集器的射频等离子体中和器, 并进行放电实验, 通过观察电源电流大小判断中和器发射电子能力, 其结构如图所示, 收集器位于放电室中心, 该设计的优势在于对射频能量无屏蔽作用, 使其能够充分馈入到放电室内, 射频匹配网络均为 π 型, 中和器结构如图2所示。

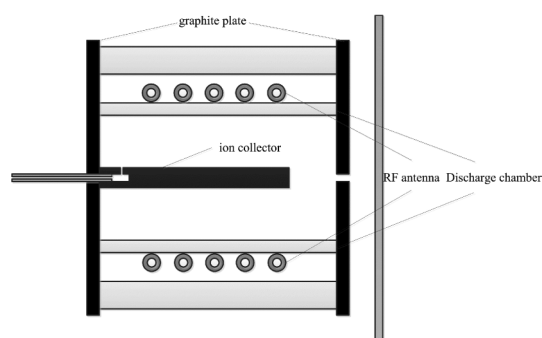


图2 带有圆柱形离子收集器的射频等离子体中和器

Fig.2 RF plasma neutralizer with columnar ion collector

射频等离子体中和器实验系统由射频电源、匹配网络、放电室、感应线圈、集电极以及触持极等组成。其中, 射频电源具有水冷功能, 频率为 13.56 MHz; 匹配网络可根据负载变化自动调节电容和电感使传输线上阻抗最小; 放电室为圆柱形结构, 内径为 40 mm, 长度为 76 mm, 电子引出小孔直径为 2 mm, 深度为 2 mm, 侧面由氧化铝陶瓷制成, 气体入口所在底面为不锈钢, 电子出口所在底面为石墨; 感应线圈匝数为 5, 考虑到高频传输电流的趋肤效应, 线圈采用外径为 5 mm, 内径为 3 mm 的空心铜管; 集电极分别采用由石墨制成的带缝隙管状结构和带通气小孔的柱状结构, 与直流稳压电源负极相连; 触持极为不锈钢板, 与直流稳压电源正极相连, 带正电位。图3为射频等离子中和器三维设计图。

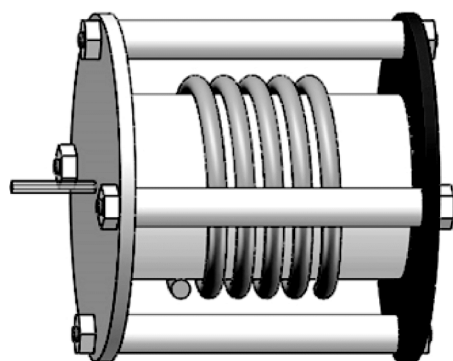


图3 射频等离子体中和器三维设计图

Fig.3 Three-dimensional design of RF plasma neutralizer

实验中采用长 3.36 m, 直径 1.25 m 的真空舱, 配置两台油扩散泵作为主泵抽高真空, 两台旋片式机械泵作为前级泵抽低真空, 扩散泵与机械泵均有水冷。空载极限真空度可达到 5×10^{-4} Pa, 射频等离子体中和器工作状态下的真空度约为 4×10^{-3} Pa, 满足点火条件。

2.2 实验方案

在中和器原理样机放电实验中,存在一些影响射频放电以及电子引出的关键因素,包括射频馈入连接线尽量短,从而减小阻抗,缩短匹配时间;射频天线应与射频源和射频匹配网络以最短路径良好接地;射频连接线应被屏蔽,防止射频能量向空间发散造成能量损失以及电磁干扰等。在现有实验条件下,组装射频等离子体中和器并置于真空舱内,在达到极限真空附近进行点火实验。改变工质流量以及射频功率等工作参数,观察并记录中和器发射电子流饱和状态下的大小。由于采用自动匹配网络,射频放电开始阶段,匹配器内的电容和电感自动调节使传输线网络总阻抗最小,实验时记录匹配稳定后的结果。射频等离子体中和器原理样机如图4所示。

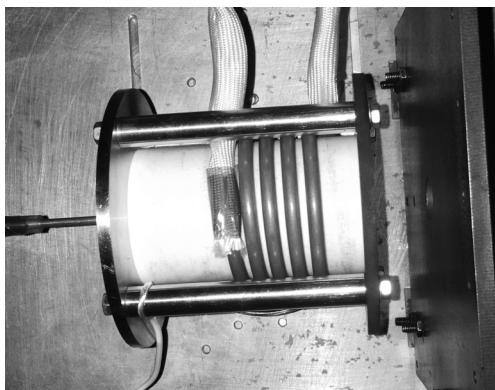


图4 射频等离子体原理样机

Fig.4 Principle prototype of RF plasma neutralizer

实验中,采用圆柱形收集器进行放电实验,中和器能够发射稳定电流,氙气点火现象如图5所示。

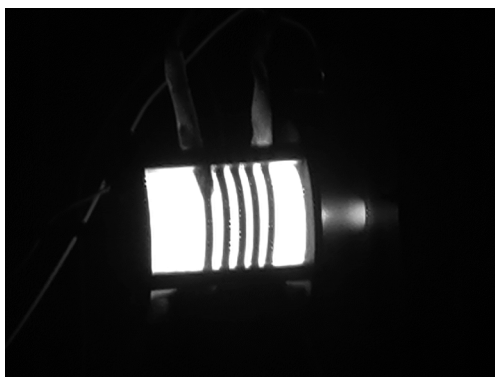


图5 射频等离子体中和器点火

Fig.5 Ignition of RF plasma neutralizer

3 实验结果及分析

实验中,保持放电室通道外金属板上电压恒为50 V,改变射频馈入功率及氙工质流量,待反馈功率自动调节为零,即能量全部耦合到射频线圈后,观察并比较中和器发射电流大小。

将氙工质气体流量从3调节至4 mL/min,再调节至5 mL/min。在每个流量下,射频馈入功率缓慢从50调节至240 W,每隔10 W记录发射电流大小,结果如图6所示。

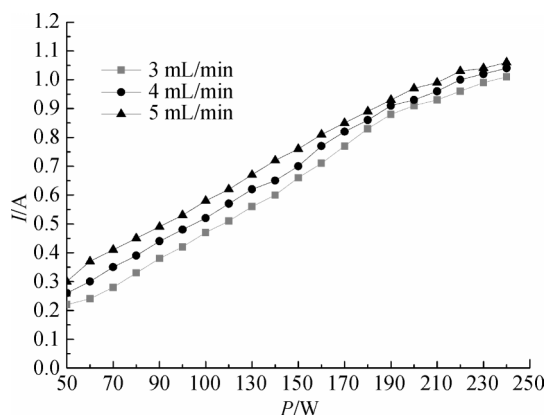


图6 发射电流随射频功率和氙气流量的变化

Fig.6 Emission electron current as functions of RF power and Xe mass flow rate

由图中可以看出,在三个氙气流量条件下,射频等离子体中和器均能有效地发射电流,且在射频功率为50~240 W范围内随工质流量增大而增大。当射频功率达到200 W后,发射电流增大速度减缓,该现象说明在此施加于金属板的正电压下,中和器电子发射能力基本达到极限,及外电场引出电子能力基本达到最大,更多的电子无法从放电室被引出。

同时,在相同的射频功率下,中和器发射电流随氙气流量增大而增大,但增大效果并不明显,此现象说明该中和器能量馈入效率基本达到极限,设计结构及材料有待于进一步优化与改进。

4 结束语

在感应耦合射频等离子体放电原理研究的基础上,研制了带有圆柱形离子收集器的射频等离子体中和器,并使用氙气进行了放电实验。实验结果显示,射频等离子体中和器在射频功率为220 W,氙气流量为4 mL/min时,发射电流能够达到1 A,进一步增大气流量或者射频功率,发射电流能够高于

1 A,由此结果说明该中和器在此工作条件下能够满足低功率霍尔推力器羽流中和的要求。

该中和器无内置发射体,不存在传统空心阴极发射体中毒的风险;同时,由于感应耦合射频等离子体放电方式对工质的可选范围较广,因此该中和器理论上可配置多种工质,包括惰性气体、金属蒸气以及碘蒸气等。

该实验初步验证了射频等离子中和器替代传统空心阴极的可行性和合理性,为深入研究提供参考。目前,该中和器处于地面原理样机实验研究中,减小功率损耗以及优化结构和性能工作将陆续开展。

参 考 文 献

- [1] 曹桂涛. 微型射频等离子体阴极中和器的设计与试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015
- [2] Watanabe H, Okuma T, Aoyagi J, et al, Research and Development on Inductively Coupled Plasma Cathode for Ion Engines [R]. IEPC-2009-027, 2009
- [3] Watanabe H, Miura Y, Ichimura M, et. al. Performance Evaluation of TAL-type Hall Thruster with RF Plasma Cathode[R]. IEPC-2015-217, 2015
- [4] Scholze F, Tartz M, Neumann H. Inductive Coupled Radio Frequency Plasma Bridge Neutralizer[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2): 02B724
- [5] Godyak V, Raites Y, Fisch N J. RF Plasma Cathode-Neutralizer for Space Applications[R]. IEPC-2007-266, 2007
- [6] Plasek M L, Jorns B, Choueiri E Y, et al. Exploration of RF-Controlled High Current Density Hollow Cathode Concepts[R]. AIAA-2012-4083, 2012
- [7] Plasek M L, Wordingham C J, Choueiri E Y. Modeling and Development of the RF-Controlled Hollow Cathode Concept[R]. AIAA-2013-4036, 2013
- [8] Plasek M L, Wordingham C J, Choueiri E Y. Resonant Mode Transition in the RF-Controlled Hollow Cathode [R]. IEPC-2013-205, 2013
- [9] Jahanbakhsh S, Satir M, Celik M. Study of Electron Current Extraction from a Radio Frequency Plasma Cathode Designed as a Neutralizer for Ion Source Application[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(2): 02B922
- [10] Jahanbakhsh S, Celik M. Theoretical Investigation and Modeling of Current Extraction from a Radio-Frequency Cathode[R]. AIAA-2014-3402, 2014
- [11] 贺建武, 马隆飞, 薛森文, 等. 小型感性耦合等离子体中和器的实验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(7): 1673-1680
- [12] 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
- [13] Chabert P, Braithwaite N. Physics of Radio-Frequency Plasma[M]. UK: Cambridge University Press, 2011: 246-253
- [14] Hatakeyama T, Irie M, Watanabe H. Preliminary Study on Radio Frequency Neutralizer for Ion Engine[R]. IEPC-2007-226, 2007