结构和工质对 ECR 离子源引出束流的影响规律研究

黄文斌, 杨涓, 孟海波, 夏旭, 付瑜亮, 胡展

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:提高离子源引出束流是提高电子回旋共振离子推力器(ECRIT)性能的重要途径,而离子迁移距离、磁路结构和气体工质等因素对引出束流有着密切的影响。利用具有不同栅极安装位置和磁体长度的离子源,通过实验研究,分析磁路、离子的迁移距离以及工质对引出束流的影响。实验结果表明:磁体长度过短会引起 ECR 区的不连续分布从而造成离子源性能大幅度下降,增加磁体长度在高流量下有利于提高栅极引出束流,低流量下会使束流降低;栅极安装环长度对引出束流的影响规律与离子源的磁路结构和工作状态有关,在气体流量较低时,更长的安装环有利于提高引出束流,高气体流量条件下,不同的磁路结构会使栅极安装环对引出束流产生不同的影响规律;氙工质可以明显提高低流量条件下离子源的引出束流和放电稳定性,但在高流量下受进气位置影响,中性粒子过于聚集而造成自由电子能量积累受到影响,从而会出现束流下降的现象。

关 键 词:电子回旋共振;束流引出;磁路结构;栅极安装环;多工质

中图分类号:V439⁺.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2019)06-1095-07

ECRIT 是一种静电型推进装置,它利用微波能量击穿气体形成 ECR 等离子体^[1-3],其中的离子在加速栅极作用下被高速引出产生推力,引出的离子束流再被电子中和。该推力器具有比冲高、无热电极烧蚀、寿命长、电源系统简单等优点,非常适用于长时间工作的空间飞行器。国外 2003 年把这种推力器应用到了返回式深空探测器上,2010 年 6 月探测器成功返回地面。长达 7 年的空间飞行历程证明 ECRIT 是寿命长的等离子体推力器^[4-6]。国内西北工业大学在 ECRIT 研究方面已取得进展,研究出 2 cm 和 10 cm ECRIT^[5-10]。对 10 cm ECR 离子源进行了探针和光谱诊断;建立了等离子体的飘移扩散模型,对 ECR 等离子体特征进行了数值模拟,模拟结果和实验结果相一致;分析了部分结构对离子源性能的影响,分析了其中的机理。

ECR 离子源性能是决定推力器总体性能的重要因素。微波注入方式、等离子迁移扩散空间、磁路

结构、气体供应方式以及工质种类都是影响离子源性能的关键因素。磁路结构^[11]决定了放电室内的磁场分布进而影响了电子能量的获取与等离子体的产生,改进磁路结构是提高离子源性能的重要手段;等离子体迁移扩散过程对源内等离子体的损失有着重要影响。本文通过实验细致分析 10 cm ECR 离子源磁路结构和等离子体迁移扩散空间以及工质对离子源性能的影响规律。出于经济性考虑,实验研究离子源结构对其性能影响时采用氙气。但是氙原子电离能较高同时相对分子质量较低,造成离子源的推进剂利用率较低,引出的束流性能并非最优。氙气具有电离能小、分子量大的优点,国际上成熟应用的推力器都使用氙气作为推进剂工质,因此在氙气实验的基础上进一步开展氙气实验,分析工质改变对离子源性能的影响是必要的,将有助于深入理解 ECR 离子源的工作过程,为提高其性能提供参考。

收稿日期:2018-11-22

基金项目:国家自然科学基金(11475137)资助

作者简介:黄文斌(1993—),西北工业大学硕士研究生,主要从事 ECR 离子推力器研究。

通信作者:杨涓(1963—),女,西北工业大学教授,主要从事 ECR 离子推力器研究。 e-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

1 10 cm ECR 离子源结构与实验系统

1.1 离子源结构和不同磁路结构下的磁场特征

如图 1 所示 ECR 离子源由圆波导、放电室腔体、磁环、耦合探针、栅极组件组成。其中磁环产生合理的磁场形成 ECR 谐振面。微波从圆柱型波导以线偏振电磁波输入,通过喇叭型波导进入等离子体之后,线偏振电磁波分解为 2 个旋转方向相反的圆偏振波,其中右旋圆偏振波的电场矢量以右手法则绕着磁场旋转。而电子在均匀磁场内也按照右手法则旋转。当电子的回旋频率与波频率相等时,在右旋波作用电场力沿着电子的圆形轨道加速电子^[12],使电子在横向(即垂直磁场方向)不停地通过无碰撞加热机制从高频电场获得能量。若电子所获得的能量比中性气体粒子的电离能高,那么粒子受电子碰撞被电离,从而实现气体击穿放电,产生电子回旋共振等离子体。

图 1 10 cm ECR 离子源结构图

ECR 离子源的电离主要发生在放电室部分,故主要分析该段的磁场特征。放电室为回转对称结构,建立二维轴对称模型进行不同磁体长度的静磁场分布模拟。图 2 给出了通过有限元方法计算得到的磁体长度分别为 h_1, h_2, h_3, h_4 ($h_1 < h_2 < h_3 < h_4$) 条件下的静磁场分布结果,由图可知当内外磁环的磁体长度增加时,永磁铁附近的磁感应强度增大,ECR 区范围增加,ECR 区的分布更靠近向轴线。同时可以发现在磁块长度为 h_1 的情况下,放电室内出现了内外磁环生成的 ECR 区没有相交的情况。

图 2 离子源不同磁体长度的静磁场计算结果

1.2 实验系统

引出实验装置如图 3 所示,包括真空舱、抽气机组、离子源、栅极电源、隔直器、气体供应装置、微波源、环行器和功率计。微波源输出频率 4.2 GHz,相应的离子源内 ECR 谐振面磁感应强度为 0.15 T。微波源输出功率通过环形器、隔直器输入到离子源,反射微波功率通过环形器传输到功率计以测量从离子源反射出的功率。离子源屏栅和加速栅分别由独立电源供电。离子源屏栅和加速栅分别由独立电源供电。

图 3 实验装置系统图

实验条件为:离子源入射微波功率分别为 20 W 和 32 W;以氩气为工质时,流量 1~5.5 mL/min;束流引出时维持真空度在 5×10^{-3} Pa 以下;屏栅施加电压 1 300 V,加速栅施加电压-300 V。

2 实验结果与分析

2.1 磁路结构对氩气工质离子源放电和束流引出的影响

图 4 给出了在 32 W 微波输入功率条件下 4 个放电室腔体的引出束流随气体流量变化的规律。由图可知,随着气体流量增加,离子源引出束流也随之增加,虽然对于不同结构的离子源对应的增加趋势略有不同。但从图可以看出 1,2,3 号放电室腔体离子源引出束流都有 3 个阶段:①1~2.5 mL/min 气体流量下,引出束流出于快速爬升阶段;②2.5~5 mL/min 气体流量下,引出束流随着流量增长缓慢;③5 mL/min 以后,引出束流再次随着气体流量的增长快速爬升。0 号放电室腔体的离子源只有引出离子束流快速爬升和缓慢 2 种工作状态,在高气体流量的情况下并未出现引出束流再次快速增加的阶段。

图 4 不同磁路结构离子源引出束流随氩气流量变化(微波功率 32 W)

离子源因为放电室腔体磁路结构的不同对引出束流的变化规律产生不同的影响。对比磁体长度不同的 0,1,2 号放电室腔体可以发现随着磁体长度的增加离子源的最大引出束流也随之增加。3 号放电室腔体的引出束流反常的原因是束流引出实验过程中栅极系统出现了欠聚焦现象导致束流下降。由实验结果可知放电室腔体磁体长度的增加有利于提高离子源在高气体流量条件下的引出束流。对比 4 个腔体在低流量条件下的引出束流变化可以发现:0 号放电室腔体的引出束流依旧低于其他 3 个腔体;气体流量低于 3.5 mL/min 条件下,1,2,3 号腔体引

出束流的变化规律与高气体流量下的规律相反,具有较短磁体长度的放电室腔体反而具有更大的引出束流。

0 号离子源在束流引出实验过程中表现规律与其他 3 个源差别明显,引出束流明显小于其他 3 个腔体。根据静磁场模拟结果图 2 可以发现,0 号放电室腔体由于磁体长度较短形成的 ECR 区出现了不连续的情况。这种静磁场分布使有效 ECR 区减小,影响了自由电子的获能。远离轴线位置的 ECR 区分布造成电子向轴线区域的移动受到了限制,从而影响了电子加热机制从 ECR 加热机制向高混杂

加热机制的转变,最终造成 0 号放电室腔体引出束流较低。对比 1,2,3 号放电室腔体静磁场分布可以发现磁体长度较长的腔体内磁场强度更强,ECR 区的分布更靠近轴线。在低气体流量条件下离子源内的等离子体密度较小,较强的磁场强度对等离子体的约束更强,限制了电子在腔体内的运动,从而影响了等离子体的生成。因此低流量条件下磁体长度越长反而会使引出束流下降。在高流量条件下,等离子体更容易挣脱磁场的约束。所以较长的磁体不仅使 ECR 区靠近轴线,同时也使等离子体向轴线附近聚集,有利于等离子体向栅极扩散后在栅极表面的分布更均匀,有利于引出的离子束流提高。所以在高流量情况下,较长的磁体长度有利于提高离子源的引出束流。

2.2 栅极安装环长度对氩气工质离子源束流引出的影响

图 5 给出了 4 个离子源在 32 W 不同栅极安装

图 5 不同栅极安装环长度下离子源引出束流变化规律(微波功率 32 W)

改变栅极安装环长度对离子迁移距离有明显的影响,栅极安装环长度越长则离子迁移距离就越大。0 号离子源由于磁路结构的原因其 ECR 区的范围较小,所以 0 号放电室腔体内的等离子生成效率低于另外 3 个腔体。在低流量条件下,短栅极安装环造成栅极的离子抽取速度远大于离子生成速度,所以 0 号腔体会出现引出束流下降为 0 的现象。在高流量条件下,离子源内的等离子体密度增加,栅极安装环的抽取能力小于该功率和流量下的离子生成速率,栅极的引出不会破坏等离子体的平衡状态,迁移过程中离子的损失和生成成为影响引出的主要因素。0 号离子源受磁路结构限制,磁体长度过短造成 ECR 区分布不连续,不连续的 ECR 区分布使离子生成效率降低限制了等离子体生成,导致离子迁移过程中碰撞复合反应占主导。迁移距离愈大,离

环长度($L_{\text{case1}} > L_{\text{case2}} > L_{\text{case3}} > L_{\text{case4}}$)对离子源引出束流的影响。低流量(气体流量小于 2.5 mL/min)条件下,0,2,3 号放电室腔体都表现出相似的规律,引出束流随着栅极安装环长度的增加而增加,1 号腔体存在不同的现象,其 case2 安装环的引出束流大于 case1 安装环。在高流量(气体流量大于 2.5 mL/min)条件下,栅极安装环长度对引出束流的影响因为放电室腔体磁路结构的不同存在着差异。由图 5a) 可知,0 号离子源使用较短的栅极安装环 case3, case4 时引出束流明显大于使用较长的 case1, case2 安装环。安装环 case3 具有最高的引出束流。分析图 5b) ~ 5d) 可以发现对于 1,2,3 号放电室腔体引出束流随着栅极安装环长度改变的变化趋势是一致的,栅极安装环长度从 case4 增加到 case1 的过程中,引出束流具有明显上升的趋势。

子损失愈多,因此引出束流随着栅极安装环长度的增加而下降。2,3 号腔体在低流量条件下离子的产生效率低于栅极的抽取效率,所以引出束流随着栅极安装环长度的增加而增加。1 号腔体在低流量条件下表现出不同的现象,原因可能是 1 号腔体由于磁路结构不同,其离子生成效率更高。case4, case3 栅极安装环较短,栅极抽取能力大于离子生成能力,引出束流随着栅极安装环长度的减小而下降。case2, case1 栅极安装环较长,栅极抽取能力较弱不足以破坏等离子体状态的平衡性,在这种流量下碰撞复合反应占主导,因此引出束流随着栅极安装环长度的增加而下降。在高流量条件下,1,2,3 号腔体表现出相同的规律,引出束流随着栅极安装环长度的增加而增加,原因是高流量情况下离子源内的离子迁移过程中激发电离反应的效率大于碰撞复合

反应,对于长的栅极安装环,气体的激发电离概率随着离子迁移距离的增加而增加,使得长栅极安装环可以引出比较高的离子束流。

改变栅极安装环结构对引出束流的影响规律与离子源的磁路结构和工作状态有关。低流量情况下,离子源内的等离子生成效率低,短的栅极安装环会使栅极抽取效率大于等离子生成效率,从而导致引出束流下降。在高流量情况下栅极的引出不会破坏等离子体的平衡状态,对于 ECR 区连续等离子生成效率高的离子源,电子加热模式从单纯的 ECR 加热转变为 ECR 加热和高混杂加热共同作用。高混杂共振的条件是 $\omega_{\text{HU}} = \sqrt{\omega_{\text{pe}}^2 + \omega_{\text{ce}}^2}$,高混杂共振面随等离子体密度增长向弱磁场区扩展。长栅极安装环带来更大的源内空间有利于提高电子加热的范围,从而提高栅极表面等离子体密度和引出束流。对于 ECR 区不连续等离子生成效率较低的离子源,电子加热方式依然以 ECR 加热为主。短的栅极安装环带来更短的离子迁移距离有利于降低复合反应的碰撞频率,从而提高栅极表面等离子体密度和引出束流。因此离子源栅极安装环长度选取应该综合考虑离子源的磁路结构和工作情况。

2.3 氦和氙工质下离子源束流引出的影响

根据氙气工质条件下实验结果,从启动性能、放电特性等方面综合考虑,选取 1 号放电室腔体进行氙气工质条件下的引出束流实验。不同工质下,1 号放电室腔体结合不同栅极安装环的引出束流变化如图 6 所示。从图中可看出,氙工质条件下 1 号放

电室腔体在 4 种栅极安装环条件下引出束流随气体流量变化呈现出相同的规律:随着气体流量增加,引出束流会先经历一个爬升段(0.5~2 mL/min),在 2 mL/min 情况下达到引出束流的最大值,随后引出束流反而随着气体流量的增加而下降。

当气体流量小于 2 mL/min 不管是从引出束流的大小还是束流引出的稳定性来看,采用氙气工质的离子源性能明显优于氦气工质。因为氙气的相对分子质量大且电离能量小,相同流量情况下,氙气更易电离,所以在低流量下氙气工质离子源内的等离子密度要高于氦气工质离子源,最终导致引出束流的增加。当气体流量高于 2 mL/min 后,氙气工质的引出束流随气体流量增加开始出现下降,而氦气工质的引出束流则继续随流量的增加而增加。造成这一现象的原因可能是随着气体流量增加,源内中性粒子的密度增加,氙气分子由于本身相对分子量较大扩散能力不强,受进气位置的影响大量氙气分子聚集在 ECR 共振区附近。过高的中性粒子密度和更大分子体积加大了电子与中性粒子之间的碰撞频率,大量自由电子与中性粒子发生激发碰撞而不是电离碰撞,所以 ECR 共振区的中性粒子电离受到了抑制,最终影响等离子体的产生降低了引出束流,同时提高氙气的流量也会使栅极间的中性粒子密度上升,加剧了离子在栅极间的损失。氙气分子具有更好的扩散性和较小的体积并没有出现碰撞频率过大的问题,所以引出束流继续随着气体流量增加而增加。

图 6 不同工质下离子源引出束流对比

3 结 论

本文研究了不同磁体长度和栅极安装环长度对

离子源引出性能的影响。得出以下结论:

1) 增加磁体长度有利于 ECR 区向离子源轴线方向扩展但同时会使磁场强度增强,对等离子体的约束也随之增加。从具有不同磁体长度 4 个离子源的束流引出实验可以发现:ECR 离子源引出束流随

流量变化的曲线中存在不同的阶段。不同阶段下,束流大小随气体流量变化的速率存在明显不同。磁体长度的改变会影响离子源的 ECR 区分布造成离子生成效率的改变最终影响离子源引出束流随流量变化的曲线形态。磁体长度过短时会引起 ECR 区的不连续分布从而造成离子源性能大幅度下降。在保证 ECR 区连续的情况下,在高流量情况下较长的磁体长度使 ECR 区更靠近轴线有利于等离子体向栅极扩散从而提高栅极引出束流,在低流量情况下,较长的磁体长度对等离子体的约束更强,限制了电子的运动,从而影响了等离子体的生成,最终导致引出束流下降。

2) 栅极安装环长度对引出束流的影响受到磁路结构和工作状态的共同作用。低流量情况下,离子源内的等离子生成效率低,短的栅极安装环会使栅极抽取效率大于等离子生成效率,从而导致引出束流下降。高流量情况下栅极的引出不会破坏等离

子体的平衡状态,对于 ECR 区连续等离子生成效率高的离子源,长栅极安装环带来更大的离子迁移距离有利于提高电子与中性粒子的碰撞频率,从而提高栅极表面等离子体密度和引出束流。对于 ECR 区不连续等离子生成效率较低的离子源,短的栅极安装环带来更短的离子迁移距离有利于降低复合反应的碰撞频率,从而提高栅极表面等离子体密度和引出束流。因此离子源栅极安装环长度选取应该综合考虑离子源的磁路结构和工作情况。

3) 工质改变对离子源性能的影响较大。氙气分子的质量大且更容易电离,因此使用氙气可以明显提高低流量条件下离子源的引出束流和放电稳定性。但是氙气扩散能力不强,受进气位置影响气体流量较大时会出现中性分子过于聚集,导致中性粒子与自由电子的碰撞过于频繁影响了电子能量的积累,最终影响了电离效率使离子源的引出束流下降。

参考文献:

- [1] IZUMI Takehiro, KOIZUMI Hiroyuki, YAMAGIWA Yoshiki, et al. Performance of Miniature Microwave Discharge Ion Thruster for Drag-Free Control[R]. AIAA-2012-4022
- [2] NISHIYAMA I, TSUKIZAKI R, NISHIYAMA K, et al. Experimental Study for Enhancement Thrust Force of the ECR Ion Thruster $\mu 10$ [R]. AIAA-2014-3913
- [3] NISHIYAMA Kazutaka, KUNINAKA Hitoshi, NAKAI Tatsuya. Two-Dimensional Characterization of Microwave E-Fields and Beam Profiles of the ECR Ion Thruster $\mu 20$ [R]. IEPC-2007-25
- [4] KAWAHARA Hiroki, ASAKAWA Jun, YAGINUMA Kazuya, et al. Ground Experiment for the Small Unified Propulsion System: I-COUPS Installed on the Small Space Probe: PROCYON[R]. IEPC-2015-460p
- [5] YANG Juan, SHI Feng, JIN Yizhou, et al. Experiment Study of an Electron Cyclotron Resonant Ion Source Based on a Tapered Resonance Cavity[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(12): 123505-123507
- [6] YANG Juan, SHIGERU Yokota, RYOTARO Kaneko, et al. Diagnosing on Plasma Plume from Xenon Hall Thruster with Collisional-Radiative Model[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(10): 103504-103508
- [7] YANG Juan, XU Yingqiao, MENG Zhiqiang, et al. Effect of Applied Magnetic Field on a Microwave Plasma Thruster[J]. Physics of Plasmas, 2008, 15(2): 023503-023507
- [8] YANG Juan, XU Yingqiao, ZHU Bing, et al. Experimental Study on the Characteristics of Low Power Microwave Plasma Jet within Local Vacuum Environment[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(9): 093508-093510
- [9] 汤明杰. 微型电子回旋共振离子推力器电磁计算分析和束流引出实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016
TANG Mingjie. Electromagnetic Calculation Analysis and Ion Extraction Experiment of Micro Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster[D]. Xi'an, Northwestern Polytechnical University, 2016 (in Chinese)
- [10] 汤明杰, 杨涓, 金逸舟, 等. 微型电子回旋共振离子推力器离子源结构优化实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 215202-215207
TANG Mingjie, YANG Juan, JIN Yizhou, et al. Experimental Optimization in Ion Source Configuration of a Miniature Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 215202-215207 (in Chinese)
- [11] 金逸舟, 杨涓, 冯冰冰, 等. 不同磁路结构电子回旋共振离子源引出实验[J]. 物理学报, 2016, 65(4): 045201-045209
JIN Yizhou, YANG Juan, FENG Bingbing, et al. Ion Extraction Experiment for Electron Cyclotron Resonance Ion Source with

Different Magnetic Topology[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 045201-045209 (in Chinese)

[12] 利伯曼迈克尔 A. 等离子体放电原理与材料处理[M]. 蒲以康,译,北京:科学出版社,2011

Lieberman Michael A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing[M]. PU Yikang, Translator, Beijing, Science Press, 2011 (in Chinese)

Study on Effect of Structure and Propellant on Beam of ECR Ion Source

HUANG Wenbin, YANG Juan, MENG Haibo, XIA Xu, FU Yuliang, HU Zhan

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To increase the ion current from the ion source is an important way to improve the performance of the electron cyclotron resonance ion thruster (ECRIT). The ion migration distance, magnetic topology and propellant have a close influence on the extracting ion beam. This influence is studied through both magnetic circuit structure calculation and experiments, by using an ion source with different gate mounting positions and magnet lengths. Experimental results show that the distribution of the ECR region will be discontinuous when the length of the magnet is too short. This will greatly reduce the performance of the ion source. To increase the length of the magnet is beneficial to the beam emission at high gas flow rate, but it reduces the beam emission at low gas flow rate. The effect of the ion migration distance on the ion beam is related to the plasma density in the ion source. When the gas flow rate is low, a longer gate mounting ring is beneficial to increase the ion current. When the gas flow rate is high, the different magnetic topology will cause the gate mounting ring which influences on the ion current. At low gas flow conditions, xenon gas can significantly improve the discharge stability of the ion source and increase the ion current. However, at high gas flow rate, the concentration effect of the neutral particles is too strong that affects the energy accumulation process of the free electrons. This would cause the decrease in the ion current.

Keywords: electron cyclotron resonance; ion beam extraction; magnetic topology; gate mounting ring; various propellants