

工质流量对 ECR 离子源束流影响研究

牟浩¹, 耿海², 吴先明², 蒲彦旭², 谈人玮¹, 杨涓¹

(1.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;
2.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 栅格进气道电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 离子源推进剂供给压强低、无阴极, 有应用于吸气式电推进系统的潜力。流量对离子源的束流影响显著, 当流量超过临界流量时, 离子束流的增长受到抑制。为明晰限制离子束流增长的根本原因, 开展不同流量下氙工质栅格进气道 ECR 离子源的 Langmuir 探针诊断实验, 并基于诊断结果计算了寻常 (ordinary, O) 波截止区和电子获能指标的分布。研究表明, 当流量低于临界流量时, 随着流量增加, 离子密度快速增加, 限制离子束流增长的主要因素是中性气体密度。当流量超出临界流量时, O 波截止区几乎覆盖整个等离子体产生区域, 这导致电子能量获取效率下降了一个数量级。此时, 限制离子束流增长的主要因素转变为电子温度。

关键词: 电子回旋共振离子源; 等离子体诊断; 流量; 吸气式电推进

中图分类号: V439+.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2024)05-0793-08

卫星运行于超低地球轨道 (very low Earth orbit, VLEO, <250 km) 具有发射成本低、通信损耗小和对地观测精度高等优势^[1-3]。然而, VLEO 面临着较大的大气阻力, 维持轨道需要不断地消耗推进剂。这限制了卫星在该轨道的长期驻留^[4]。为解决这一问题, 使用轨道稀薄大气作推进剂的吸气式电推进 (atmosphere breathing electric propulsion, ABEP) 技术被提出。VLEO 大气主要由氮分子和氧原子组成, 氧对阴极的腐蚀是 ABEP 研究的一个关键挑战^[5]。电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 离子源采用无碰撞的 ECR 机制产生等离子体, 无需热阴极, 有应用于 ABEP 的潜力^[6]。在前期研究中, 为降低推进剂供给压强, 本课题组提出了一种栅格进气道 ECR 离子源^[7]。研究表明, 该进气道的推进剂供给压强仅为传统小孔进气道的 0.26。

流量对 ECR 离子源的离子束流影响显著。国内外 ECR 离子源的研究经验表明存在临界流量^[8-10], 当流量低于临界流量 (简称“临界流量前”)

时, 离子束流随流量的增加而快速增加; 当流量高于临界流量时 (简称“临界流量后”), 随流量增加, 离子束流会趋于饱和或快速下降。Tani 等^[9] 通过磁路优化提高了临界流量, 进而将离子源的束流提高了 16%。Tsukizaki 等^[11-12] 通过光学探针诊断了不同流量下离子源轴线处的电场和激发态氙密度的分布。研究表明, 临界流量后, 圆波导内电场和激发态氙密度高于临界流量前; 等离子体对微波的衰减可能是限制离子束流增长的主要因素。

上述研究仅限于氙工质 ECR 离子源, 且激发态氙的密度分布与等离子体的密度分布并不完全等同, 但其为揭示限制离子束流增长的内在机理指明了方向——等离子体诊断。Langmuir 探针可应用于低气压、非平衡等离子体的诊断, 能够在宽泛的实验条件下获得局部等离子体的参数分布。Funaki 等^[13] 使用 Langmuir 探针诊断了氙工质 ECR 离子源内的等离子体。但是, 受限于磁场对诊断结果的影响, 仅得到了离子饱和电流和悬浮/空间电势。保持探针轴线与磁力线垂直, 可将磁场对诊断结果的影响降到最低^[14-16]。基于这一理论, 文献[17-18] 采用弯曲的 Langmuir 探针研究了磁路对 2 cm 和 10 cm ECR 离子源内等离子体分布的影响。

收稿日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12375252) 资助

作者简介: 牟浩 (1994—), 博士研究生

通信作者: 杨涓 (1963—), 教授 e-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

针对 VLEO 大气的主要成分氮气,基于前述栅格进气道 ECR 离子源,本文开展其在临界流量前后的弯曲 Langmuir 探针诊断实验,并进一步探究了临界流量前后限制 ECR 离子源离子束流增长的主要原因。

1 ECR 离子源的结构和 Langmuir 探针诊断实验

1.1 ECR 离子源的结构

如图 1 所示,栅格进气道 ECR 离子源主要由进气道、进气栅格、圆波导、球形天线、放电室、内外磁环和栅极系统组成。进气栅格安装于进气道和圆波导之间,兼顾进气和防止微波能量泄漏的功能^[7]。球形天线安装于圆波导内部,微波从此处注入离子源。内、外磁环嵌入放电室内壁,它们在离子源内产生一定的磁场,形成 ECR 区。实验使用的微波频率为 4.2 GHz,对应 ECR 区的磁通密度为 0.15 T。栅极系统由屏栅和加速栅组成,具体可见文献^[7]。

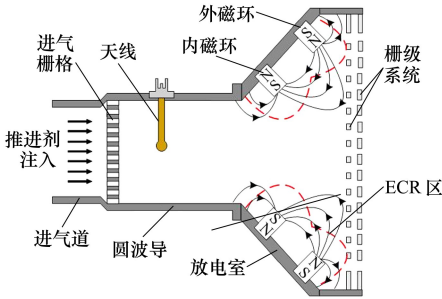


图 1 栅格进气道 ECR 离子源

1.2 Langmuir 探针诊断实验

1.2.1 诊断实验系统

如图 2a) 所示,诊断实验系统主要由固态微波源、环形器、衰减器、功率计、ECR 离子源、Langmuir 探针、2D 坐标架和扫描电源组成。实验前对离子源的人射微波功率进行校准,反射功率通过功率计测量^[8]。将探针插入带有高电压的栅极系统来诊断离子源内的等离子体是困难的^[13]。因此,实验在不引出离子束流(栅极接地)的条件下进行,并采用如图 2b) 所示的开槽栅极代替栅极系统以便探针通过和移动。开槽栅极的结构参数如表 1 所示。如图 2b) 所示,Langmuir 探针由陶瓷管和钨丝组成,电流收集段钨丝的直径和长度分别为 0.2 和 7 mm;2D 坐标架控制探针在 x, z 方向逐步移动。诊断点位于

如图 2c) 所示网格的格点处, x, z 方向相邻诊断点的间距均为 5 mm。图中的红色线和带箭头的黑色线分别代表 ECR 区、磁力线,其分布通过 COMSOL Multiphysics 软件计算获得。

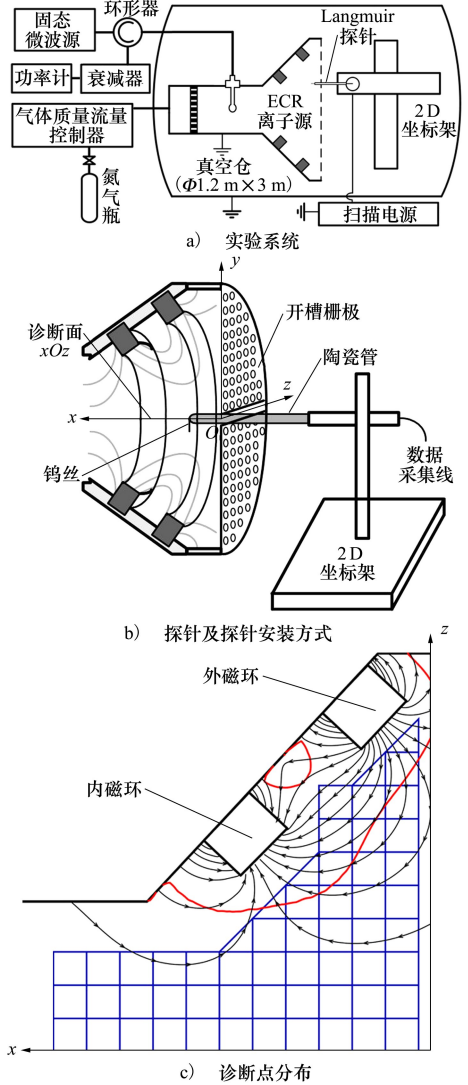


图 2 诊断实验系统

表 1 开槽栅极的结构参数

直径(槽宽)/mm	槽长/mm	厚度/mm	数目
3		2	364
3	50	2	1

图 3 为典型的 Langmuir 探针 I-V 曲线。该曲线可被探针悬浮电势 V_f 、等离子体电势 V_p 分为三段。其中, V_f 为收集电流为 0 的点; V_p 为电子电流段曲线

的拐点,可通过计算 I-V 曲线的二阶导数确定^[19]。根据轨道运动限制方法,离子密度和电子温度可分别通过(1)~(2)式获得^[20-22]。

$$n_i = \frac{\pi^2}{2A_p^2 e^2} \frac{M}{|e|} \frac{dI_i^2}{d|V|} \quad (1)$$

$$kT_e \approx \left| \frac{d(eV)}{d(\ln I_i)} \right| \quad (2)$$

式中, A_p, e, k, M, I_i 和 I_i 分别为探针表面积、电子电荷量、玻尔兹曼常数、离子质量、离子饱和区的收集电流、过渡区域的收集电流。

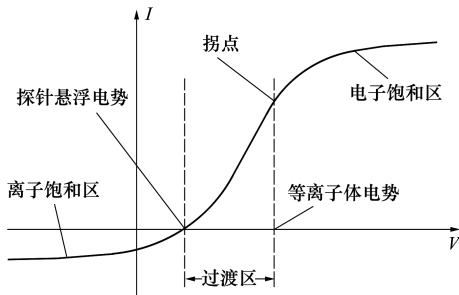


图 3 Langmuir 探针的 I-V 曲线

1.2.2 诊断实验工作参数设置

屏栅电压 1 350 V、加速栅电压-350 V 时,不同微波功率下,离子束流随流量的变化如图 4 所示。

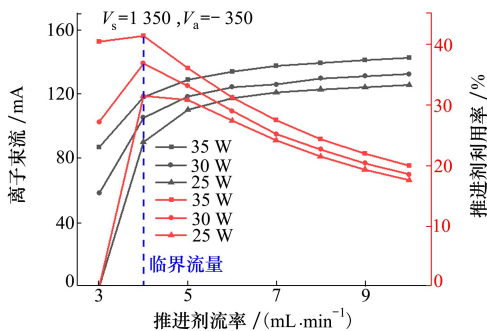


图 4 离子束流和推进剂利用率随推进剂流量的变化

令 P_i, q 分别为微波功率和推进剂流量。当 $P_i = 25 \text{ W}, q = 3 \text{ mL/min}$ 时,离子源可以正常启动,但无法维持设定电压下的离子引出,因而离子束流和推进剂利用率记为 0。不同微波功率下,离子束流和推进剂利用率随流量的变化趋势相近。当 $q \leq 4 \text{ mL/min}$ 时,离子束流和推进剂利用率随着流量的增加而增加;当 $q > 4 \text{ mL/min}$ 时,随着流量增加,离子束流缓慢增加、趋于饱和,而推进剂利用率则快速下降。综上所述,氮工质栅格进气道 ECR 离子源的

临界流量在 4 mL/min 附近。

诊断实验工作参数如表 2 所示。

表 2 诊断实验工作参数

名称	值
微波功率/W	25,35
推进剂流率/(mL·min ⁻¹)	3(低于临界流量) 6,9(高于临界流量)

实验在不引出离子束流的条件下进行,并使用开槽栅极代替栅极系统。因此,相同流量下诊断实验和引出实验所对应的离子源内氮气分子数密度 n_n 并不相等。为了验证诊断实验设置的流量是否落在预期区间,即 3,6 和 9 mL/min 分列临界流量工况两侧,(3)~(4)式被联立以求得不同流量对应的 n_n ^[23],计算结果如图 5 所示。

$$n_n = \frac{4(N_{in} - I_b/e)}{v_n A_g C} \quad (3)$$

$$C = \left[1 + \left(\frac{3}{16} \frac{LH}{A} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, $N_{in}, v_n, I_b, A_g, C, L, H, A$ 分别为单位时间进入离子源的分子数、分子热运动速度、离子束流、栅格开孔面积、栅格流导、栅孔周长、栅孔厚度、栅孔面积。

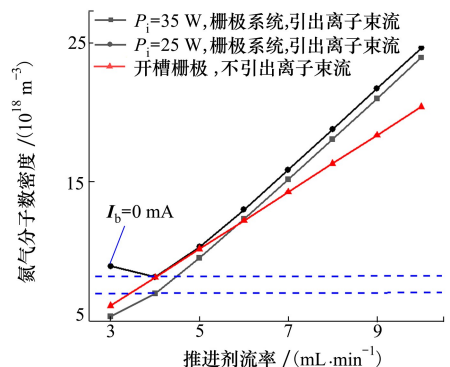


图 5 离子源内氮气分子数密度随推进剂流量的变化

图 5 中 2 条蓝色虚线从上到下依次为图 4 中 $P_i = 25 \text{ W}, P_i = 35 \text{ W}$ 时临界流量 4 mL/min 所对应的 n_n 。从图中可以看出,诊断实验使用 3 mL/min 流量时,其 n_n 始终处于 2 条蓝色虚线的下方,离子源处于临界流量前的状态;使用 6,9 mL/min 流量时,其 n_n 始终处于 2 条蓝色虚线的上方,离子源处于临界流量后的状态。综上所述,诊断实验的流量

设置与表 2 中的预期相符。

2 结果与讨论

2.1 诊断实验结果

$P_i = 35 \text{ W}$ 时,离子源的诊断结果如图 6 所示。图中酒红色线所包围的区域为寻常(ordinary, O)波截止区,其截止条件为 $\omega \leq e \sqrt{\frac{n_e}{\epsilon_0 m_e}}$ 。其中, ω, ϵ_0, m_e 分别为微波频率、真空介电常数和电子质量。受磁场影响,从 Langmuir 探针的 I-V 曲线获得准确的电子数密度是困难的^[14]。因此,在计算中使用准中性假设,以离子数密度代替电子数密度。由于诊断区域远离壁面,这一假设是合理的,并不会给截止区的计算带来显著差异。对于右手螺旋偏振波和异常波的截止区,计算发现这两者随流量变化并不显著,因此图中并未给出。

从图 6 可以发现,不同流量下,离子和热电子主要分布于与 ECR 区相交且磁力线闭合的磁场区域,这个区域可定义为“主等离子体产生区 (main plasma production area, MPPA)”。在 MPPA 中,电子受磁镜约束,可以多次穿越 ECR 区获得能量^[18,24]。同时,ECR 离子源中的电离主要由热电子引发^[25],所以离子和热电子的分布合理。从图 6 中还可以发现,电子温度随流量增加呈现逐渐下降的趋势,其中 MPPA 电子温度的下降速度远高于其他区域。O 波截止区以及离子密度随流量增加的变化趋势是非单调的。当流量由 3 mL/min 增加至 6 mL/min, O 波截止区由栅极一侧几乎扩展至整个 MPPA;离子密度呈现爆发性增长,密度峰值由 $3.38 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 增长至 $5.35 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。当流量进一步增加至 9 mL/min, O 波截止区向内磁环一侧收缩;离子密度小幅下降,峰值降至 $4.70 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 。

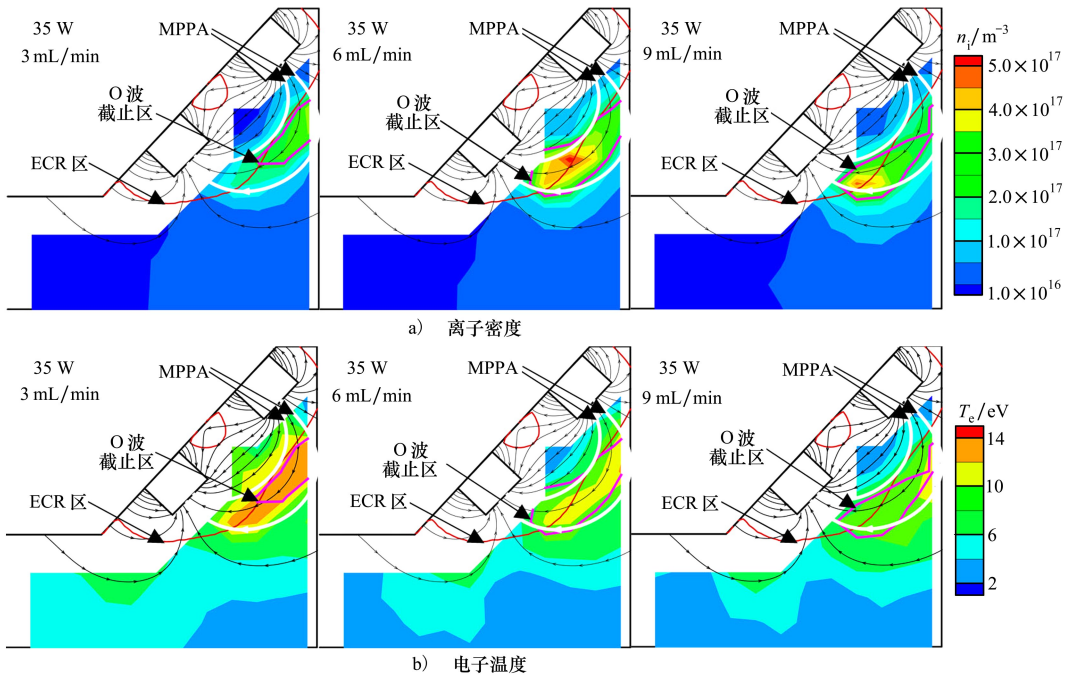
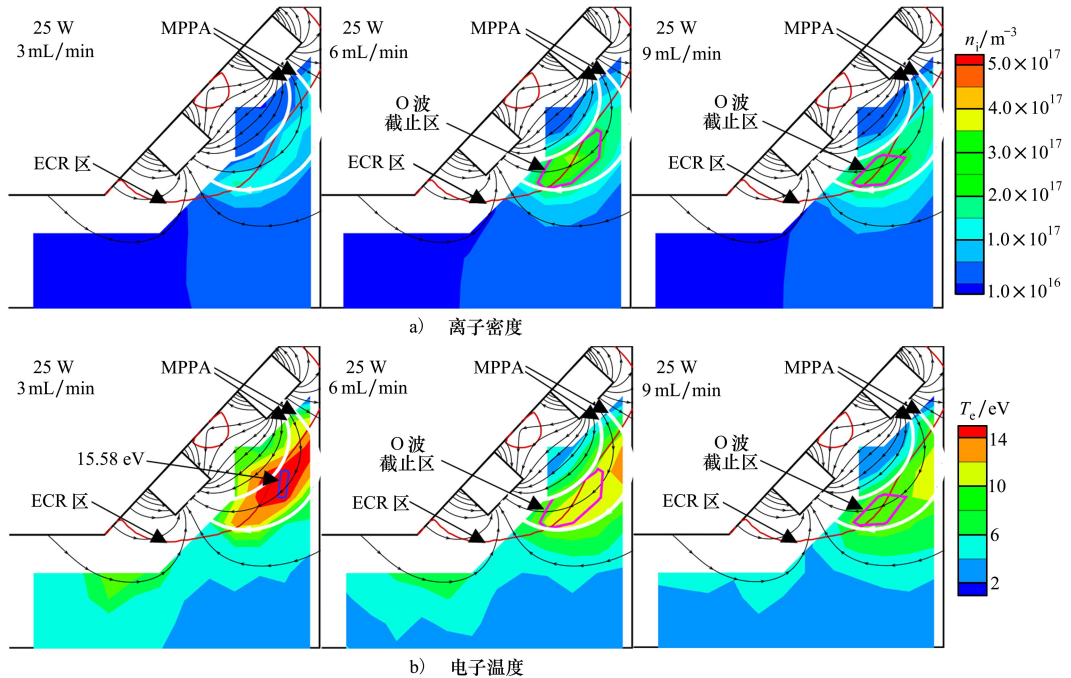


图 6 $P_i = 35 \text{ W}$ 时离子源诊断实验结果

$P_i = 25 \text{ W}$ 时,离子源的诊断结果如图 7 所示。当 $q = 3 \text{ mL/min}$ 时,离子源内离子密度峰值仅为 $1.62 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$,不足以截止 O 波;蓝色线包围区域电子温度超出氮气电离能 (15.58 eV),这表明当前流量下氮气密度是限制等离子体产生的主要因素。随流量增加,离子源内等离子体参数分布和 O 波截止

区的变化规律与 $P_i = 35 \text{ W}$ 的工况基本一致。结合图 6 和图 7,可以发现,对于 MPPA 以外的区域,高、低功率离子源电子温度无明显差异;在 MPPA 中,低功率离子源电子温度明显更高,且更高的区域主要分布在两者 O 波截止区覆盖存在差异的区域。

图 7 $P_i = 25$ W 时离子源诊断实验结果

2.2 讨论

离子束流取决于离子源的引出能力和等离子体产生能力。其中,引出能力由推力器头部尺寸和栅极电压共同决定,流量对其影响可以忽略不计。因此,流量对离子束流的影响等同于其对等离子体产生能力的影响。等离子体产生能力可通过电离反应速率来评估。电离反应速率定义为

$$v = N_e n_n \sigma_{\text{ion}} c_{\text{ref}}$$

式中: N_e , σ_{ion} , c_{ref} 分别为电子数目、电子和氮气分子的电离碰撞截面、电子和氮气分子的相对运动速度; σ_{ion} , c_{ref} 仅为电子温度 T_e 的函数。流量对等离子体产生能力的影响可分解为其对 N_e , n_n , T_e 3 个参数的影响。

达到临界流量前,限制离子源等离子体产生的主要因素为 n_n 。如图 4 所示,临界流量前,推进剂利用率随流量增加而增加。如图 6~7 所示,临界流量前, $P_i = 35$ W 和 $P_i = 25$ W 的工况中, MPPA 内大部分区域的电子温度在 12~14 eV、12~16 eV 范围内。假设电子温度服从麦克斯韦分布,则这些区域能量超出氮分子电离能的电子占比分别为 0.27~0.34, 0.27~0.40。这两者表明,临界流量前的等离子体产生中,氮气分子密度过低。

达到临界流量后,限制离子源等离子体产生的主要因素为 T_e 。如图 4 所示,临界流量后,推进剂

利用率随流量增加而下降。如图 6~7 所示,临界流量后, MPPA 中离子密度骤升,电子温度骤降。这两者表明,临界流量后的等离子体产生中,氮气分子和电子充足,但电子温度过低。

流量对电子温度的影响主要体现在电子能量的损失与获得。一方面,随着流量增加,电子和氮气分子的各类碰撞加剧,电子能量损失频率升高。另一方面,随着流量增加,达到临界流量前等离子体产生的限制被解除,离子密度快速增加,并在离子源内形成截止区阻碍电子能量的获得。这也解释了 MPPA (O 波截止区主要存在区域) 中更大的电子温度下降幅度,以及低功率离子源在高低功率离子源 O 波截止区覆盖存在差异区域更高的电子温度。

令人困惑的是, O 波是一种微波电场与静磁场方向平行的波,并不直接参与电子的加热。为验证 O 波截止区对电子温度的影响是否有效,有必要计算不同工况下的电子获能。电子单次穿越 ECR 区

获得的平均能量可通过 $W = \frac{\pi e E_{\perp}^2}{v_{\parallel} \cdot \left| \frac{\partial B}{\partial s} \right|_{\text{ECR}}}$ 计算, E_{\perp} ,

v_{\parallel} , $\left| \frac{\partial B}{\partial s} \right|_{\text{ECR}}$ 分别为电场垂直磁力线方向的分量、电子速度平行磁力线方向的分量、ECR 区磁场关于磁

力线的梯度。 $\frac{E_{\perp}^2}{\left| \frac{\partial B}{\partial s} \right|_{\text{ECR}}}$ 仅与离子源结构和工作参数

有关,常用作衡量电子获能的指标。其中, E_{\perp} 可基于冷等离子体假设采用文献[18]的计算方法得到。

电子获能指标计算结果如图 8 所示。临界流量前,低功率工况,不存在 O 波截止区,内外磁环中间区域电子获能指标最高;高功率工况,不存在 O 波截止区的内磁环区域电子获能指标最高。当流量增加至 6 mL/min 时,高、低功率离子源中,O 波截止区

大幅扩张,电子获能指标平均值大幅下降,分别由 1.53×10^8 , 1.92×10^8 降至 2.75×10^7 , 3.32×10^7 。当流量进一步增加至 9 mL/min 时,高、低功率离子源中, O 波截止区小幅缩小,电子获能指标平均值小幅上升,分别升至 4.06×10^7 , 8.97×10^7 。上述结果表明,O 波截止区对电子获能指标的影响显著,区域的扩张和收缩分别对应电子获能指标平均值的下降和升高。电子获能指标决定了电子的能量获取效率,对 T_e 的影响重大。因此 O 波截止区对 T_e 的影响是切实有效的。

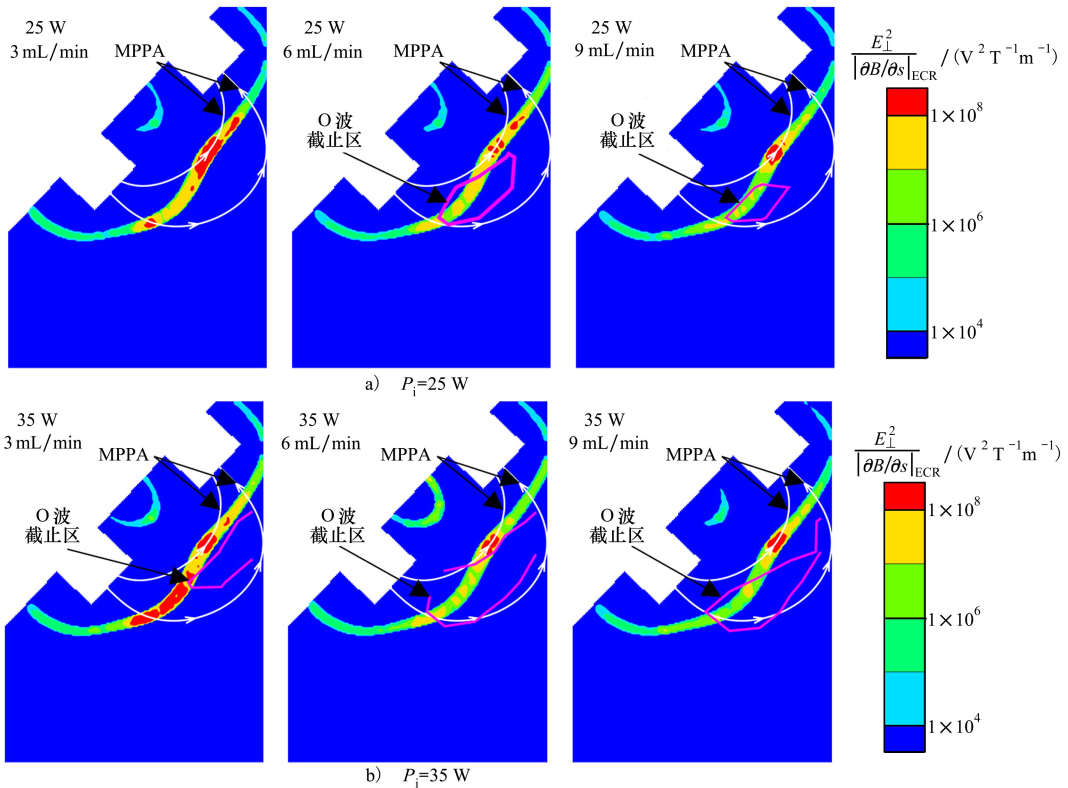


图 8 不同流量下的电子获得指标对比

3 结 论

本文采用弯曲的 Langmuir 探针,测量了临界流量前后氮气工质栅格进气道 ECR 离子源离子密度和电子温度的分布,并分析了限制离子束流增长的主要因素。结论如下:

1) 离子和热电子主要分布于 MPPA,电子温度随着流量的增加而逐渐下降,MPPA 中电子温度的下降幅度远高于其他区域。达到临界流量前,随着

流量增加,离子密度爆发性增长,O 波截止区大幅扩张;临界流量后,随着流量增加,离子密度下降,O 波截止区小幅收缩。

2) 临界流量前后限制离子束流增长的主要因素分别为中性气体密度和电子温度。限制因素的不同是造成离子束流随流量变化趋势改变的根本原因。O 波截止区通过阻碍电子能量获得影响电子温度,这一机制主要作用于临界流量后。此时,对应 O 波截止区的扩张,代表电子能量获取效率的电子获能指标相比临界流量前下降了一个数量级。

参考文献:

- [1] BERTOLUCCI G, BARATO F, TOSON E, et al. Impact of propulsion system characteristics on the potential for reduction of Earth observation missions at very low altitudes cost[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 176: 173-191
- [2] CRISP N H, ROBERTS P C E, LIVADIOTTI S, et al. The benefits of very low Earth orbit for Earth observation missions[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2020, 117: 100619
- [3] JOSEP V L, ROBERTS P C E, ZHOU H, et al. Very low Earth orbit mission concepts for Earth observation benefits and challenges[C]//*Proceedings of the 12th Reinventing Space Conference*, London, 2014
- [4] DRINKWATER M R, FLOBERGHAGEN R, HAAGMANS R, et al. GOCE: ESA's first Earth explorer core mission[J]. *Space Science Reviews*, 2003, 17: 419-432
- [5] ZHENG P, WU J J, ZHANG Y, et al. A Comprehensive review of atmosphere-breathing electric propulsion systems[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 2020: 8811847
- [6] NISHIYAMA K. Air breathing ion engine concept[C]//*Proceedings of the 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation*, Bremen, 2003
- [7] 杨涓, 牟浩, 耿海, 等. 宽进气道电子回旋共振离子源电磁场和中性粒子计算研究[J]. *推进技术*, 2023, 44(7): 2208097
YANG Juan, MOU Hao, GENG Hai, et al. Calculation study of electromagnetic fields and neutral particles of a wide inlet electron cyclotron resonance ion source[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(7): 2208097 (in Chinese)
- [8] 金逸舟, 杨涓, 冯冰冰, 等. 不同磁路电子回旋共振离子源引出实验[J]. *物理学报*, 2016, 65(4): 045201
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 (in Chinese)
- [9] TANI Y, TSUKIZAKI R, KODA D, et al. Performance improvement of the $\mu 10$ microwave discharge ion thruster by expansion of the plasma production volume[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157: 425-434
- [10] BARQUERO S, TABATA K, TSUKIZAKI R, et al. Performance characterization of the $\mu 10$ electron-cyclotron-resonance ion thruster using alternative propellants: Krypton vs Xenon[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 211: 750-754
- [11] TSUKIZAKI R, KOIZUMI H, NISHIYAMA K, et al. Measurement of axial neutral density profiles in a microwave discharge ion thruster by laser absorption spectroscopy with optical fiber probes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(12): 123103
- [12] TSUKIZAKI R, KOIZUMI H, NISHIYAMA K, et al. Plasma diagnostics inside the ECR ion thruster $\mu 10$ by laser absorption spectroscopy with optical fiber probes[C]//*Proceedings of the 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Atlanta, 2012
- [13] FUNAKI I, KUNINAKA H, TOKI K. Plasma characterization of a 10 cm diameter microwave discharge ion thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(4): 718-727
- [14] YANG J, FU Y L, LIU X C, et al. Bended probe diagnostics of the plasma characteristics within an ECR ion source with a rectangular waveguide[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(8): 085402
- [15] DEMIDOV V I, RATYNSKAIA S V, RYPDAL K. An electrostatic probe with end plugs for measurements in a magnetized plasma[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(11): 4266-4269
- [16] SHIKAMA T, KITAOKA H, HASUO M. Detection of electron energy distribution function anisotropy in a magnetized electron cyclotron resonance plasma by using a directional Langmuir probe[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(7): 073510
- [17] XIA X, YANG J, JIN Y Z, et al. The influence of magnetic circuit and operating parameters on the plasma property of 2 cm ECRIT ion source[J]. *Vacuum*, 2020, 179: 109517
- [18] MOU H, JIN Y Z, YANG J, et al. Interaction between plasma and electromagnetic field in ion source of 10 cm ECR ion thruster[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(7): 075202
- [19] LIEBERMAN M A, LICHTENBERG A J. *Principles of plasma discharges and materials processing*[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006
- [20] DEMIDOV V I, RATYNSKAIA S V, RYPDAL K. Electric probes for plasmas: the link between theory and instrument[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(10): 3409-3439
- [21] CHEN F F. Langmuir probe analysis for high density plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 8(6): 3029-3041

- [22] 金逸舟, 杨涓, 罗立涛, 等. 离子源内电子回旋共振等离子体诊断与分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 2950-2597
JIN Yizhou, YANG Juan, LUO Litao, et al. Diagnosis of electron cyclotron resonance plasma inside ion source[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 2950-2597 (in Chinese)
- [23] GOEBEL D M, KATZ I. Fundamentals of electric propulsion; ion and hall thrusters[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008
- [24] CORAL G, TSUKIZAKI R, NISHIYAMA K, et al. Microwave power absorption to high energy electrons in the ECR ion thruster [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018, 27(9): 095015
- [25] YAMASHITA Y, TANI Y, TSUKIZAKI R, et al. Numerical investigation of plasma properties for the microwave discharge ion thruster $\mu 10$ using PIC-MCC simulation[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26: 073510
- [26] 夏旭, 杨涓, 金逸舟, 等. 磁路和天线位置对 2 cm 电子回旋共振离子推力器性能影响的实验研究[J]. 物理学报, 2019, 68(23): 235202
XIA Xu, YANG Juan, JIN Yizhou, et al. Experimental study of magnetic circuit and antenna position influence on performance of 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster[J]. Acta Physica Sinica, 68(23): 235202 (in Chinese)

Study on influence of propellant flow rate on ECR ion source beam current

MOU Hao¹, GENG Hai², WU Xianming², PU Yanxu², TAN Renwei¹, YANG Juan¹

(1.School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2.Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The electron cyclotron resonance (ECR) ion source with grid inlet has the characteristics of low propellant supply pressure and no cathode required for operation, so it has the potential for application in atmosphere breathing electric propulsion. The flow rate has a significant impact on the beam current of the ion source. When the flow rate exceeds the critical flow rate, the increase of the ion beam is suppressed. To clarify the determining factors that limit the increase of ion beam flow, this paper conducted Langmuir probe diagnostic experiments on ECR ion sources with grid inlet driven by nitrogen gas at different flow rates, and calculated the distribution of ordinary (O) wave cutoff region and electron energy acquisition indicators based on the diagnostic results. The research results indicate that when the flow rate is below the critical flow rate, the ion density rapidly increases with the increase of flow rate, and the main factor limiting the increase of ion beam is the neutral gas density. When the flow rate exceeds the critical flow rate, the O wave cutoff zone almost covers the entire main plasma production area, which leads to a decrease of one order of magnitude in the efficiency of electron energy acquisition. At this moment, the main factor limiting the increase of ion beams shifts to electron temperature.

Keywords: electron cyclotron resonance ion source; plasma diagnosis; flow rate; atmosphere breathing electric propulsion

引用格式:牟浩, 耿海, 吴先明, 等. 工质流量对 ECR 离子源束流影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(5): 793-800

MOU Hao, GENG Hai, WU Xianming, et al. Study on influence of propellant flow rate on ECR ion source beam current [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(5): 793-800 (in Chinese)