

氙离子推力器束流双荷离子特性及诊断

孔令轩, 顾左, 郭德洲, 王蒙, 郭宁

(中国空间技术研究院 兰州空间技术物理研究所

真空技术与物理国家级重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 为了对离子推力器束流中双荷离子比例进行快速评估, 采用放电室经验理论模型通过实验参数获得放电室等离子体参数, 根据单、双荷氙离子的不同产生过程, 计算得到束流中双/单荷离子密度比。针对兰州空间技术物理研究所 20 cm 氙离子推力器进行了实验, 使用 E×B 探针束流诊断系统获取了束流中双/单荷离子的平均比率。结果表明: 在额定工况下理论计算值为 0.071 与测试结果为 0.077 符合良好。

关 键 词: 氙离子推力器; 放电室; 束流; 双荷离子; 质谱诊断

中图分类号: V439.4

文献标志码: A

Characterization and measurement of doubly charged ions in xenon ion thruster beam

KONG Ling-xuan, GU Zuo, GUO De-zhou, WANG Meng, GUO Ning

(Science and Technology on Vacuum and Physics Laboratory,

Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to evaluate the proportion of double ion ratio in ion engine beam rapidly, discharge chamber parameters were obtained through empirical theory, ratio of doubly/singly charged ions in beam was derived based on different generating processes of singly and doubly charged xenon ions. 20 cm xenon ion thruster of Lanzhou Institute of Physics was tested and average fraction of doubly charged ions was acquired through E×B spectrometer. Xe^{++}/Xe^{+} ratio under standard condition was measured to be 0.077, which was in good agreement with the analysis result of 0.071.

Key words: xenon ion thruster; discharge chamber; ion beam; doubly charged ion; mass spectrometry measurement

在 Kaufman 型 Xe 离子推力器放电室中, 电子与中性原子可能发生的碰撞类型有弹性碰撞、激发、电离。理想的放电室中, 原初电子与中性原子发生一次电离产生 Xe^{+} 与低能的麦氏电子。然而如果电子在静电场和磁场作用下达到 Xe 及 Xe^{+} 二次电离能量, 则会导致 Xe^{++} 产生速率提高。

根据推进剂利用率的定义式^[1], 当双荷离子比例提高时, 导致推进剂利用率下降。高能的 Xe^{++} 不断轰击推力器栅极、触持极及阳极表面易形成薄膜, 薄膜由于受热不均匀而脱落至放电室内, 阻碍直流放电过程, 严重时导致推力器寿命终结。其中屏栅极在高速离子溅射作用下, 将导致

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 真空技术与物理国家级重点实验室基金(9140C550206150C55013)

作者简介: 孔令轩(1988—), 男, 博士生, 主要从事宇航推进技术研究。E-mail: lxxkong@foxmail.com

通讯作者: 顾左(1964—), 男, 研究员、博士生导师, 博士, 主要从事空间电推进技术研究。E-mail: guuzuu@sohu.com

引用格式: 孔令轩, 顾左, 郭德洲, 等. 氙离子推力器束流双荷离子特性及诊断[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 970-975. KONG Lingxuan, GU Zuo, GUO Dezhou, et al. Characterization and measurement of doubly charged ions in xenon ion thruster beam[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 970-975.

屏栅开孔切角增大,进而至使离子束直接轰击加速栅极,此时判定屏栅极失效,随着束流中双荷离子比例增大,栅极寿命降低^[2].

对于氙离子推力器中双荷离子,学者使用E×B探针测量手段进行了大量的研究,George等^[3]测量了30 cm和40 cm氙离子推力器羽流中双荷离子的比例,发现随着阳极功率提高束流中双荷离子的比例增大,并根据一定假设条件建立了屏栅腐蚀预估模型,为离子推力器寿命评估提供了重要依据;北京理工大学谢侃等^[4-5]研究发现,当放电室工作在性能曲线“膝点”位置时,放电损耗急剧增加,同时双荷离子比例也大幅提高,通过测量放电室内不同位置处双荷离子密度发现相比单荷氙离子,双荷离子更易产生于出口附近。

对离子推力器束流双荷离子计算的研究中, Peters 和 Wilbur^[6-7]曾针对汞离子推力器进行了理论计算,然而由于两种工质电离特性并不完全一致,其方法不适用于目前主流的环切场氙离子推力器;较为完善的 Goebel 等^[8]放电室理论模型中假设电子是单能的,忽略了双荷离子的产生;近年来学者通常采用数值模拟的手段研究离子推力器栅极组件的腐蚀作用,北京航空航天大学刘畅、钟凌伟、任军学等^[9-11]使用粒子网格单元(PIC)方法研究了羽流参数及加速栅腐蚀;Nakano^[12]对离子推力器束流引出过程数值模拟进行补偿修正,研究了双荷离子对栅极的腐蚀作用.

由此可见,目前尚缺乏一种能够通过代入氙离子推力器设计参数及工作参数进行理论计算,快速得到束流中双/单荷离子密度比,进而对推力器及其工作状况进行评估的方法.论文基于 Kaufman 型离子推力器经验模型,使用推力器实验获得宏观参数,推导计算出放电室内中性原子、原初电子、麦氏电子密度等等离子体参数,根据单、双荷氙离子的不同产生过程,计算得到束流中双/单荷离子密度比.在束流诊断实验中采用 $E \times B$ 探针获得双/单荷离子密度比与理论计算结果符合良好.

1 等离子体参数理论计算

Kaufman 型离子推力器工作时,空心阴极自持放电向放电室内发射高能原初电子,原初电子同放电室内的中性原子发生碰撞电离,低能的麦氏电子由阳极吸收,带正电的氙离子由栅极系统引出形成束流产生推力,图 1 简化表征了离子推力器放电室中正负电荷的行为走向。直流放电物理过程满足电荷守恒、氙质子守恒和能量守恒关

系. 由上述守恒关系配合氙气非弹性碰撞截面、放电反应速率常数以及实验得到电参数等便可推导出得到放电室内等离子体特征参数.

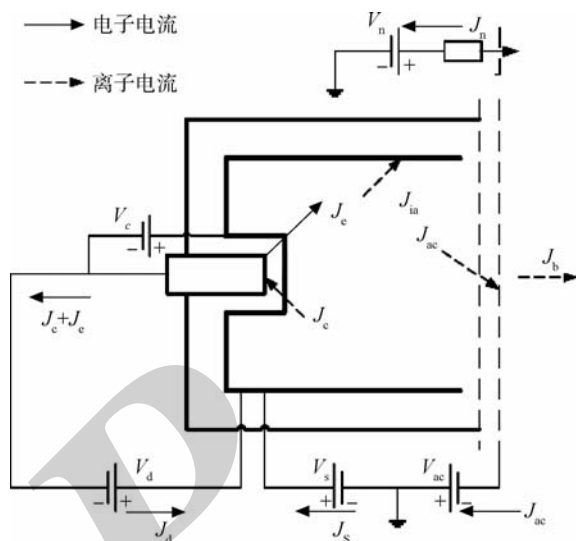


图 1 离子推力器放电室电流平衡示意图

Fig. 1 Current flow in discharge chamber of ion thruster

1.1 原初电子密度

原初电子进入放电室后以 3 种形式消耗: 直接损失于阳极, 电离后成为低能麦氏电子, 与中性原子碰撞使之达到激发态, 即 $J_e = J_1 + J'_p + J'_{ex}$. 式中 4 项分别代表阴极发射电流、损失于阳极的原初电子流、电离电流以及氙原子激发当量电流. 碰撞过程由式(1)和式(2)表达, 直接损失于阳极的原初电子电流满足式(3)中比例关系, 放电区域等离子体离子产生成本如式(4)所示. 式中 n_0, n_p 分别为放电室中性原子密度和原初电子密度; v_p 为原初电子速度; V 为放电区域体积; σ'_+, σ'_{ex} 分别代表碰撞电离截面、中性原子激发总截面, 非弹性碰撞总截面为两者之和; l_e 为原初电子在放电室内平均自由程; ε_n^* 为等离子体产生成本基质.

$$J'_p = n_o n_p e \sigma'_+ \quad \forall v_p \quad (1)$$

$$J'_{\text{ex}} = n_o n_p e \sum_j \sigma'_j \forall v_p \quad (2)$$

$$\frac{J_1}{J_e} = \exp[-(\sigma'_+ + \sigma'_{\text{ex}})n_o l_e] \quad (3)$$

$$\epsilon_p = \frac{V_d J_e}{J_p} \left(1 + \frac{V_c}{V_d} \right) = \frac{\epsilon_p^*}{1 - \frac{J_l}{J_e}} \quad (4)$$

将以上关系综合整理即可得到放电室内原初电子密度的表达式(5). 式中 n_0 根据 Xe 质子数守恒关系, 即进入放电室的 Xe 数目为束流与通过离子光学系统逃逸的中性 Xe 之和, 由 $n_0 = 4m \cdot (1 - \eta_u) / v_0 A_b \Phi_0 e$ 计算得到. 其中 Φ_0 为离子光学

系统对中性原子的透明度, m 为放电室工质流量当量电流, A_b 为引出区域面积, η_u 为工质利用率. v_p 取决于阳极于阴极的电位差, 考虑到等离子体鞘层电位, 其值可由 $v_p = [2e(V_d - V_c - 2)/m_e]^{0.5}$ 计算得到.

$$n_p = \frac{J_p \epsilon_p^*}{(V_d + V_c) e (\sigma'_+ + \sigma'_{ex}) n_o v_p \forall} \quad (5)$$

显然, 式(5)中中性原子流量和原初电子利用系数无关, 对于特定的离子推力器放电室, 在固定工质流率和放电电压下, n_p 可作为常数对待. 由于 J_p 表征所有离开等离子体放电区的离子流(包括流向屏栅极、触持极、离子在屏栅极上的复合速率、加速栅极上的电流), 在进行实验时, 可根据 Kirchhoff 定律测试得到, 如式(6)所示.

$$J_p = J_s + J_c + J_{is} + J_{ac} \quad (6)$$

根据 Sengupta^[13] 建议, 在环切场离子推力器中, J_c 一般略大于离子流的 1%, 而 Wirz^[14] 对 XIPS-30 推力器分析后认为, 在放电损耗为 170 W/A 时, $J_c \leq 0.05 J_p$, 本文取 $J_c = 0.04 J_p$. J_{is} 可由栅极系统对离子的透明度 $\Phi_{is} = J_b / (J_{is} +$

$$\frac{n_p}{n_m} = \frac{n_p / n_i}{1 - n_p / n_i} = \frac{0.15 e \epsilon_p^* v_{bohm} A_b^2 \Phi_o \Phi_{is} v_o \eta_u}{(V_d + V_c) \sigma_i v_p \forall m f_b (1 - \eta_u) - 0.15 e \epsilon_p^* v_{bohm} A_b^2 \Phi_o \Phi_{is} v_o \eta_u} \quad (10)$$

1.3 双/单荷离子密度比

放电室等离子体产生区域电离主要有如下几种形式, 而碰撞电子又存在原初电子和麦氏电子两种形式. 前文中离子产生速率简化为单值计算, 在推导双荷离子比例时引入 6 种电离分别对应的速率常数, 如式(11)和式(12)所示.

$$\begin{aligned} & \text{Xe} + e^- \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e^- \\ & \text{Xe}^+ + e^- \rightarrow \text{Xe}^{++} + 2e^- \\ & \text{Xe} + e^- \rightarrow \text{Xe}^{++} + 3e^- \\ & J_p^+ = (n_o n_p P_o^+ + n_o n_M Q_o^+) e \forall \quad (11) \\ & J_p^{++} = (n_o n_p P_o^{++} + n_o n_M Q_o^{++} + \\ & n_+ n_p P_+^{++} + n_+ n_M Q_+^{++}) 2e \forall \quad (12) \end{aligned}$$

式中 P_o^+ , Q_o^+ 分别为原初电子与麦氏电子、中性原子碰撞产生 Xe^+ 的速率常数; P_o^{++} , Q_o^{++} , P_+^{++} , Q_+^{++} 分别为原初电子与中性原子、麦氏电子与中性原子、原初电子与 Xe^+ 、麦氏电子与 Xe^+ 碰撞产生 Xe^{++} 的反应速率常数. 上述值使用对应原初电子(麦氏电子)温度带入表 1 所示的拟合 Arrhenius 函数计算得到. 麦氏电子温度根据 Williams 等^[19] 经验公式 $T_M = \ln(V_d/20)/0.09$ 给定.

假设双荷离子被引出的比例同单荷离子相同, 即有 $J_b^{++}/J_b^+ = J_p^{++}/J_p^+$, 由式(12)比式(11)得到双荷束流同单荷束流之比. 另外存在比例

$J_{ac} + J_b$) 定义式求得, Φ_{is} 取值采用文献[15]中经验公式计算, $\Phi_{is} = 0.781 + 0.084 (V_{tot}/1000) - 0.062 J_b$, 其中 V_{tot} 表示栅极之间电压差. 上述结果代入式(7)得到 J_p .

$$J_p = 1.042 J_b \left(\frac{1}{\Phi_{is}} + \frac{J_{ac}}{J_b} \right) \quad (7)$$

1.2 原初电子与麦氏电子密度比

束流中离子的平均密度 n_i 使用 Foster 等^[16] 提出的经验公式(8)处理, 对于环切场离子推力器放电室引出离子的波姆速度, 根据文献[17-18]中, 取 1913 m/s.

$$J_b = 0.6 e n_i v_{bohm} \Phi_{is} A_b \quad (8)$$

在放电室准中性的情况下, 平均离子密度等于平均原初电子密度与平均麦氏电子密度之和, 另外由 $J_b = m \eta_u$, 配合式(5)和式(8), 得到原初电子与总电子密度平均比率如式(9)所示, 进而得到原初电子与麦氏电子密度比率计算表达式(10), 式中 f_b 表示引出束离子份额 J_b/J_p .

$$\frac{n_p}{n_i} = \frac{0.15 e \epsilon_p^* v_{bohm} A_b^2 \Phi_o \Phi_{is} v_o \eta_u}{(V_d + V_c) \sigma_i v_p \forall m f_b (1 - \eta_u)} \quad (9)$$

表 1 Xe 电离速率常数

Table1 Rate factors of Xe ionization	
碰撞类型	速率常数/ $10^{-14} (\text{m}^3/\text{s})$
$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e$	$P_o^+ = 462.8 T_e^{-0.58} \exp\left(\frac{-48.5}{T_e}\right)$
$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^{++} + 3e$	$P_o^{++} = 46950 T_e^{-1.5} \exp\left(\frac{-220}{T_e}\right)$
$e + \text{Xe}^+ \rightarrow \text{Xe}^{++} + 2e$	$P_+^{++} = 144525.6 T_e^{-1.72} \exp\left(\frac{-153.75}{T_e}\right)$
$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^{++} + 3e$	$Q_o^{++} = 1.419 T_e^{0.337} \exp\left(\frac{-35.8}{T_e}\right)$
$e + \text{Xe}^+ \rightarrow \text{Xe}^{++} + 2e$	$Q_+^{++} = 3.3 T_e^{0.373} \exp\left(\frac{-23.8}{T_e}\right)$
$e + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e$	$Q_o^+ = 9.677 T_e^{0.23} \exp\left(\frac{-15.21}{T_e}\right)$

$J_b^{++}/J_b^+ = 2^{0.5} n_b^{++}/n_b^+$, 推导得到束流中双荷离子同单荷离子的密度比表达式如式(13), 该表达式为关于原初电子与麦氏电子密度比、电子温度、工质利用率等参数的函数.

$$\frac{n_b^{++}}{n_b^+} = \frac{J_p^{++}}{\sqrt{2} J_p^+} = \frac{Q_o^{++} + \frac{n_p}{n_m} P_o^{++}}{\sqrt{2} \left(Q_o^+ + \frac{n_p}{n_m} P_o^+ \right)} + 0.293 \frac{v_o}{v_{bohm}} \cdot \frac{\Phi_o}{\Phi_{is}} \left[\frac{Q_+^{++} + \frac{n_p}{n_m} P_o^{++}}{Q_o^+ + \frac{n_p}{n_m} P_o^+} \right] \frac{\eta_u}{1 - \eta_u} \quad (13)$$

2 束流双荷离子诊断

2.1 20 cm 氙离子推力器

束流双荷离子诊断实验在兰州空间技术物理研究所自主研发的 20 cm 氙离子推力器上进行. 该推力器采用 3 级环形会切磁场构型, 采用钼金属制备的屏栅-加速栅凸面栅结构, 其额定推力为 40 MN, 输入功率 ≤ 1 kW, 额定比冲 $\geq 3\,000$ s.

实验依托 TS-6 电推进性能实验设备进行, 该设备为 $\Phi 2\text{ m}\times 5$ 的 Kaufman 离子推力器专用真空系统, 系统极限真空度为 0. 000 05 Pa; 采用两台 K- $\Phi 800$ TD 的低返油高真空油扩散泵, 单泵对空气的极限真空度为 0. 000 02 Pa, 对大气的抽速为 25 000 L/s, 对氙气的抽速为 14 000 L/s; 两台 ZJP-600 罗兹真空泵、4 台 2X-70A 机械泵共同组成抽气系统.

2.2 束流诊断系统

为了进行束流特性测试, 采用由法拉第探针、 $E\times B$ 探针及数据采集系统组成的束流诊断系统. 测试位置选择离子推力器中心轴线上某一

个固定位置, 保持探针轴线与推力器中心轴重合. 测试过程中手动调整扫描电压, 计算机自动记录测试数据.

$E\times B$ 探针主要结构包括: 准直套、电磁场区、漂移管、离子接收器. 其工作原理如图 2 所示, 入射离子平行于探针轴线方向通过准直套进入正交均匀的电磁场区域, 离子在该区域受到静电场力和洛伦兹力. 对于给定速度的离子, 可以通过调节两电极板间电压差使其所受静电场力和洛伦兹力大小相等方向相反, 离子不改变方向地通过电磁场区. 对于离子推力器束流中的离子, 所经历的加速电压相同, 不同荷质比的离子具有不同的速度, 应用 $E\times B$ 探针给定不同的电压, 即可通过收集电流获取单一双荷离子电流之比.

20 cm 离子推力器屏栅电压为 1 kV, 因此设计探针扫描电压范围为 0~500 V, 磁场由扁平型铁氧体永磁铁产生, 磁感应强度为 0. 16 T, 此时对应双荷离子与单荷离子扫描电压差为 63. 5 V^[20]. 图 3 所示为实验中采用双荷离子测量探针.

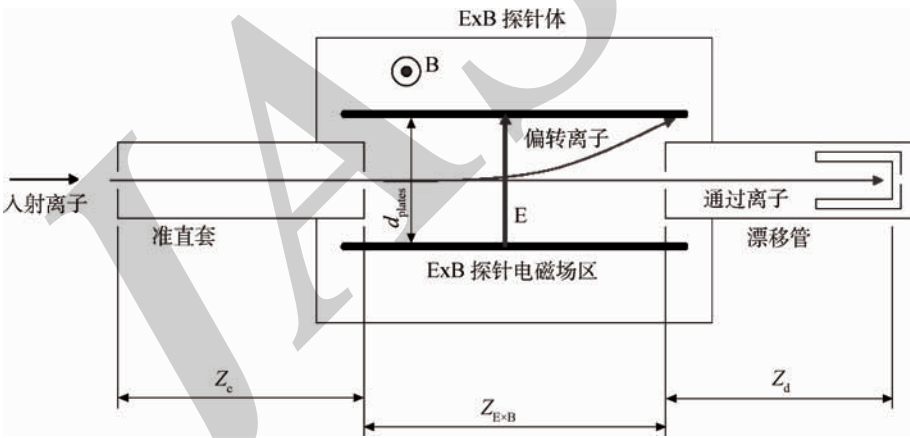


图 2 $E\times B$ 探针工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of $E\times B$ spectrometer

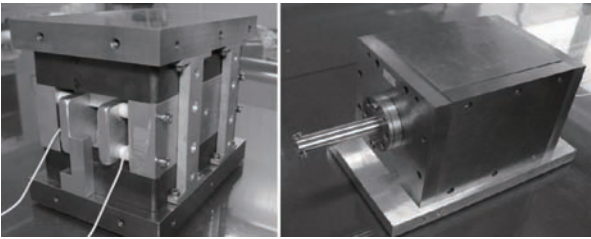


图 3 20 cm 离子推力器束流诊断 $E\times B$ 探针

Fig. 3 $E\times B$ spectrometer for 20 cm xenon thruster

2.3 实验结果及分析

如图 4 所示为 20 cm 离子推力器在实验仓中,

在实验工况下, 屏栅电压 1 kV, 真空仓真空度为 0. 005 Pa, 主阴极、阳极、中和器阴极流量比为 1 : 8 : 1, 总流量为 14. 17 mL/min. 表 2 为推力器在额定工况下的实验结果, 在引出束流 0. 8 A 条件下, 其推力达到 39. 8 mN, 比冲为 3 983 s, 放电室工质利用率为 0. 89, 对应束离子产生成本为 172. 3 W/A.

图 5 为实验中 $E\times B$ 探针束流扫描结果, 单、双荷离子所对应的探针峰值电压为 169. 16 V 及 240. 36 V, 去除测试装置本底电流后, 分别对应的收集电流为 117 nA 和 9 nA, 由此直接计算束电流中双/单荷离子流之比为 0. 077.

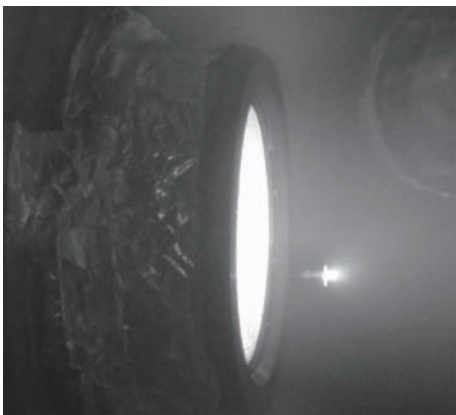


图 4 20 cm 氙离子推力器工作状态

Fig. 4 20 cm xenon ion thruster under operation

表 2 20 cm 氙离子推力器实验结果

Table 2 Results of 20 cm xenon thruster experiment

位置	电压/V	电流/A
阳极	30	4.2
主阴极触持	18	0.6
屏栅	1000	0.8
加速栅	−180	0.005 5
中和器触持	20	1.6

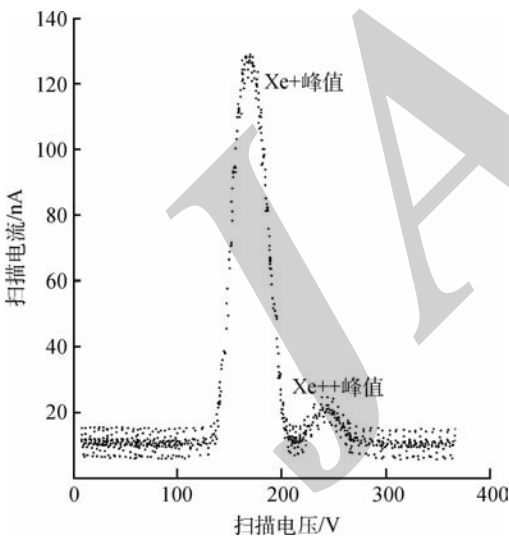


图 5 E×B 探针扫描图

Fig. 5 Scanogram of E×B spectrometer

根据表 2 中离子推力器实验外部输出结果,使用上文中理论经验方法可以计算出推力器在该工况下放电室内等离子体特性参数如表 3 所示.计算中,放电区域体积 V 根据 20 cm 推力器构型为 3.106 mm^3 ; 等离子体区域包络面积 Ω 为 0.094 m^2 ; 20 cm 离子推力器栅极系统 Φ_0 为 0.223; 单值的离子产生速率根据文献[21-22]中数据给定.

束流中双/单荷离子密度比最终计算结果为 0.071,实验测试值为 0.077,两者基本吻合.由于双/单荷离子密度是理论计算中最终输出结果,证明了使用离子推力器外部参数通过理论计算的方法评估放电室等离子体参数科学有效.

表 3 20 cm 氙离子推力器放电室特性参数

Table 3 Discharge chamber parameters of 20 cm

xenon ion thruster	
参数	理论计算结果
中性原子密度/ 10^{18} m^{-3}	1.204
原初电子密度/ 10^{17} m^{-3}	1.257
放电室产生离子电流/A	1.01
麦氏电子温度/eV	5.22
原初电子/麦氏电子密度比	0.223
束流双/单荷离子密度比	0.071

在后续实验中,保持工质流率不变的情况下调节阳极功率,通过束流诊断系统观察了束流中双/单荷离子密度比的变化,得到测量值和计算值变化曲线如图 6 所示,与文献[3]中结果相符,随着阳极功率的增大,束流中双荷离子比例不断升高.以阳极功率在 126 W 和 195 W 两处工况进行分析,在阳极功率上升 40% 后,束流中双荷离子比例提高 320%.通过理论计算分析发现,放电室内麦氏电子温度从 5.22 eV 提高到 9.25 eV,这直接导致表 1 中 Q_+^+ 提高 4 倍, Q_+^{++} 和 Q_+^{++} 分别提高 24 倍和 9 倍,这表明有大量的 Xe^+ 经高能麦氏电子碰撞后生成了 Xe^{++} ,单荷离子电流下降,导致工质利用率下降.阳极功率提高后,双荷离子对栅极 Mo 材料的溅射产额提高了 2 倍,表明栅极寿命将大幅降低.

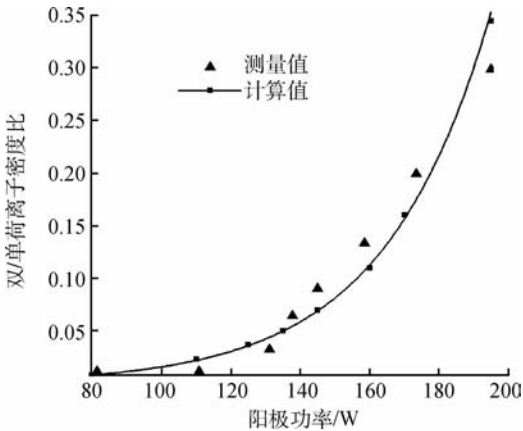


图 6 束流中双荷离子比例随阳极功率变化曲线

Fig. 6 Doubly charged ion ratio at different anode power

3 结 论

结合 Kaufman 型离子推力器放电经验理论,分析了双荷氙离子在放电室产生及引出的过程;输入离子推力器几何参数和电参数对放电室内等离子体特性参数如原初电子密度、麦氏电子密度等进行了推导计算,最终输出双/单荷离子密度比的表达式;使用基于 $E \times B$ 探针的束流诊断系统对 20 cm 氙离子推力器束流中双荷离子比例进行了测量.

在 20 cm 离子推力器额定工况下,双/单荷离子密度比理论计算值为 0.071,实验测量值为 0.077,两者符合良好.随着阳极功率的增大,双荷离子比例大幅升高,对栅极的溅射腐蚀作用加重.通过理论计算能够为推力器固定参数设计和工况选择提供一定指导,双荷离子诊断则为推力器及其所处工况进行有效评价.

参考文献:

[1] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2008.

[2] Brophy J R. The ion population system on NASA space technology 41 Champollion Comet Rendezvous Mission [R]. AIAA 99-2856, 1999.

[3] George J, Williams J R. Measurement of doubly charged ions in ion thruster plumes[R]. IEPC-01-310, 2001.

[4] Xie K, Martinez R A, Williams J D. Current-voltage characteristics of a cathodic plasma contactor with discharge chamber for application in electrodynamic tether propulsion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47 (15): 494-500.

[5] Xie K, Xia Q, Williams J D, et al. Extracted current, bias voltage, and ion production of cathodic hollow-cathode-driven plasma contactors [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(4): 1181-1192.

[6] Peters R, Wilbur P J. Mercury ion thruster doubly charged ion model[R]. AIAA 76-1010, 1976.

[7] Peters R. Double ion production in mercury thrusters [R]. NASA CR-135019, 1976.

[8] Goebel D M, Wirz R E, Katz I. Analytical ion thruster discharge performance model[R]. AIAA-2006-4486, 2006.

[9] 刘畅, 汤海滨, 张振鹏, 等. 离子发动机加速栅极腐蚀深度的 DFF 测量与数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 574-579.

LIU Chang, TANG Haibin, ZHANG Zhenpeng, et al. Numerical simulation and DFF measurement of ion thruster accelerator grid erosion depth [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 574-579. (in Chinese)

[10] 钟凌伟, 刘宇, 任军学, 等. 离子发动机栅极系统中束流离子的三维模拟 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 2125-2131.

ZHONG Lingwei, LIU Yu, REN Junxue, et al. Three-dimensional simulation of beam ions in ion thruster optics system [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 2125-2131. (in Chinese)

[11] 任军学, 顾左, 郭宁, 等. 离子发动机羽流特性的数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1372-1379.

REN Junxue, GU Zuo, GUO Ning, et al. Numerical simulation of characteristics of ion thruster plume [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1372-1379. (in Chinese)

[12] Nakano M. Doubly charged ion effect on life prediction accuracy of ion acceleration grid system [J]. Vacuum, 2013, 88(1): 70-74.

[13] Sengupta A. Experimental and analytical investigation of a modified ring cusp NSTAR engine [R]. IEPC-2005-160, 2005.

[14] Wirz R E. Discharge plasma processes of ring-cusp ion thrusters [D]. Pasadena, California: California Institute of Technology, 2005.

[15] Poeschel R L, Beattie J R. Primary electric propulsion technology study [R]. NASA CR-159688, 1979.

[16] Foster J E, Patterson M J. Internal plasma properties and enhanced performance of an 8 cm ion thruster discharge [R]. NASA TM 1999-209386, 1999.

[17] Farnell C C, Williams J D, Wilbur P J. Numerical simulation of ion thruster optics [R]. IEPC 03-0073, 2003.

[18] Boyd I, Crofton M. Computational study of extraction grid erosion through ion impact [R]. AIAA 2000-3664, 2000.

[19] Williams G J, Smith T B, Gallimore A D. 30 cm ion thruster discharge cathode erosion [R]. IEPC-2001-306, 2001.

[20] 唐福俊, 张天平. 离子推力器羽流测量 $E \times B$ 探针设计及误差分析 [J]. 真空与低温, 2007, 13(2): 77-80.

TANG Fujun, ZHANG Tianping. Analysis and design of $E \times B$ probe for measurement of ion thruster plumes [J]. Vacuum and Cryogenics, 2007, 13(2): 77-80. (in Chinese)

[21] Brophy J R, Garner C E, Goodfellow K D. Electric propulsion system technology [R]. NASA CR-194100, 1990.

[22] Katz I, Gardner B M, Mandell M J, et al. Model of plasma contactor performance [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1997, 34(6): 824-828.

(编辑: 叶 青)