超大功率霍尔推力器放电参数影响仿真及试验*

王尚民¹,刘 超¹,郭 宁¹,刘星宇²,李 鸿²,丁永杰²,陈新伟¹, 郭伟龙¹,耿 海¹,李 沛¹,何 非¹

(1. 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;2. 哈尔滨工业大学 等离子体推进技术实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:针对超大功率霍尔推力器放电参数特性评估,开展放电电压和流量等参数变化对性能影响的仿真及试验研究,以确定推力器设计最优匹配的放电电压及放电电流工况。建立了Particle-in-Cell (PIC)数值仿真模型,并搭建了HET-450大功率霍尔推力器试验平台;针对变放电电压、变流量下推力器放电特性,仿真计算给出了放电通道内原子密度、电势以及电子温度等分布,探究了推力器电离和加速运行机理,进一步,结合试验,开展了放电电流、推力等比对分析。结果表明:放电电压从300V 增加至500V过程中,电离效率逐渐提升,因而放电电流、推力以及阳极效率均递增,而继续增加放电电压则会导致过热场的产生,离子与壁面作用增强导致电离出的离子再次复合,工质利用率下降的同时壁面损失增加,宏观表现为阳极效率的下降。此外,仿真与试验所获得放电电流、推力等结果符合良好,说明建模合适;在500V,80mg/s条件下,推力达2.1N、阳极效率60%,达到设计要求,表明设计合理有效。

关键词:深空探测;大功率电推进;霍尔推力器;性能评估;放电特性
中图分类号: V439.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 06-2208057-11
DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2208057

Simulation and Experiment on Effects of Discharge Parameters on Performance of Super Power Hall Thruster

WANG Shang-min¹, LIU Chao¹, GUO Ning¹, LI Xing-yu², LI Hong², DING Yong-jie², CHEN Xin-wei¹, GUO Wei-long¹, GENG Hai¹, LI Pei¹, HE Fei¹

(1. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics,

Lanzhou 730000, China;

2. Plasma Propulsion Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at evaluating the discharge parameter characteristics of super power Hall thruster, the simulation and experimental study of the effects of discharge voltage and flow rate on the performance were carried out to determine the discharge voltage and current condition matched best in the progress of thruster design. The PIC numerical simulation model was established and the HET-450 high power Hall thruster test platform was built. In view of the thruster discharge characteristics under variable voltage and flow rate, the distribution of atomic density, electric potential, electronic temperature and the ionization and acceleration mechanism of thruster are explored. Further, the discharge current and thrust are compared and analyzed in combination with

^{*} 收稿日期: 2022-08-20; 修订日期: 2022-10-12。

基金项目:国家自然科学基金青年基金(12005087);载人四批预研项目。

作者简介: 王尚民, 博士, 高级工程师, 研究领域为空间电推进技术。

通讯作者: 郭 宁, 博士, 研究员, 研究领域为空间电推进技术。E-mail: guoningaa@163.com

引用格式: 王尚民,刘 超,郭 宁,等. 超大功率霍尔推力器放电参数影响仿真及试验[J]. 推进技术, 2023, 44(6):
 2208057. (WANG Shang-min, LIU Chao, GUO Ning, et al. Simulation and Experiment on Effects of Discharge
 Parameters on Performance of Super Power Hall Thruster[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(6):2208057.)

the test. The results show that: with the discharge voltage increasing from 300V to 500V, the ionization efficiency increased gradually, so the discharge current, thrust and anode efficiency are increasing, while continuing to increase the discharge voltage will lead to the generation of overheating field, the enhancement of the interaction between ions and wall surface will lead to the recombination of ionized ions, the decrease of working medium utilization and increase of wall loss, which is macroscopically manifested as the decline of anode efficiency. In addition, the simulated thrust and discharge current are in good agreement with the measured ones at the same working condition, indicating that the simulation model is suitable. At the discharge voltage of 500V and the anode mass flow rate of 80mg/s, the thrust reaches 2.1N and the anode efficiency 60%, which meet the design requirements, indicating that the design is reasonable and effective.

Key words: Deep space exploration; High power electric propulsion; Hall thruster; Performance evaluation; Discharge characteristics

1 引 言

大功率霍尔电推力器凭借其推功比大、结构简 单、大热流下无需主动散热,技术成熟度高等突出优势,特别适用于大型货物运输、大型深空探测以及飞 行器大范围轨道转移等空间任务,已成为当前国内 外空间电推进技术研究的热点方向之一^[1-4]。

俄罗斯、美国等航天强国已开发了近十余款大 功率霍尔推力器产品,比较典型为:SPT-290(氙气工 质,功率25~30kW,最高比冲3000s,最大推力1.5N)^[5]、 VHITAL-160(铋工质,功率25~36kW,比冲6000~ 8000s,推力650~700mN)^[6]、NASA-457M(氙气工质, 功率72kW,推力3N,比冲2930s、效率57%;氦气工 质,放电电压可加载至1kV,比冲4500s)^[7]以及 NASA-400M^[8]、NASA-300M^[9]和X3(最大功率 102kW,最大放电电流260A,最大推力5.4N,达到迄 今最高水平)^[10]。欧洲开发了20kW量级的PPS-20K^[11]和HT-20K^[12]。

在大功率霍尔推力器技术发展中,为不断拓宽 其航天任务应用范围,更高比冲和更大推力一直是 技术追求的主要目标,为达到目标比较直接的方法 是提高放电电压、增大工质流量。在中低功率霍尔 推力器中,已开展了放电电压升高和流量变化的相 关研究^[13-14]。研究发现随着流量的变化,存在一个 最优放电电压范围,超出范围进一步增加放电电压, 能量损失大幅增加,致使推力器效率下降,分析很可 能是在高电压下,电子传导增大,导致能量损失增 加,为解决该问题,提出优化放电电压和磁场的匹 配,并提高磁场强度来限制高电压下电子向阳极的 传导^[15-16]。大功率霍尔推力器放电电压与工质流量 变化范围较中低功率推力器明显提升,在更宽泛的 放电参数域如何匹配放电电压与流量以使推力器在 额定功率水平下达到最优性能值得进一步深入 研究。

霍尔推力器最优的磁场强度与放电电压、流量 呈正相关,传统中低功率等级霍尔推力器流量变化 范围小使得其磁场设计更加依赖于对放电电压的选 取,弱化了工质流量对需求磁场的影响。而在霍尔 推力器大功率化的过程中,放电电压(约300~700V) 变化的幅度远小于放电电流提升的幅度(约为数安 培~百安培量级),可以预见随着霍尔推力器功率等 级的提升最佳工作磁场区间设计也有了变化,并且 大功率推力器放电腔口径尺寸数倍甚至数十几倍于 中低功率,这极大影响了工质气体分布,进而改变电 离分布,导致推力器放电特性的不同;文献[17]也指 出了较之中低功率,大功率霍尔推力器若不能工作 在稳定高效率的放电状态更容易出现离子热能化、 溅射腐蚀增强以及热负荷严重等问题,解决上述问 题的主要途径就是提升推力器的放电性能从而减少 热功率输出。由此可见,霍尔推力器中低功率研究 结果并不能够完全支持大功率下的情况。然而,基 于上文描述,目前大功率霍尔推力器研究,多为测试 性能报道[5-12],仅给出性能指标,缺少像中低功率霍 尔推力器数值仿真和试验验证等全面而细致机理分 析,尤其大功率霍尔推力器在不同放电电压、流量等 工况下的电离和加速等微观运行过程探究和试验验 证研究报道更为欠缺。

为此,基于HET-450推力器,兰州空间技术物理 研究所和哈尔滨工业大学联合开展针对大功率霍尔 推力器放电电压、工质流量等放电参数改变对推力 器性能影响的研究,以期实现大功率下的高性能放 电。主要研究思路为开展数值仿真,探寻大功率霍 尔推力器微观运行机制,同步进行试验测试,与仿真 结果比对分析,加以验证,从而通过这种数值仿真和 试验相结合的研究方式,考察大功率下放电参数(放 电电压、流量等)变化时的推力器放电特性,明确运 行机理。

2 研究方法

2.1 大功率霍尔推力器

基于潜在应用背景,开发了50kW级大功率霍尔 推力器的原理样机HET-450,见图1。



Fig. 1 Thruster configuration

为HET-450大功率霍尔推力器研制,对陶瓷放 电室、磁路组件等核心组件进行了针对性设计。考 虑到 0.5m量级放电室口径大以及高热承(近十几千 瓦热耗)所带来的大尺寸下的陶瓷放电室一次成型 和热应力大等技术难点,提出了一种基于柔性连接 的大功率霍尔推力器放电室组件设计,规避了高难 度加工且释放了热应力,确保了推力器稳定可靠工 作^[18]。另外,将磁路组件也进行优化设计,提出一种 轮辐射构型,即外导磁罩和内导磁柱,通过轮辐射骨 架连接,实现了磁路组件整体轮辐射构型,该结构能 够提供相对均匀的磁场,规避了对放电室和阳极等 高温组件工作时热量良好导出,降低了高热量向磁 路的传导,提升了磁路的稳定性,进而保证了性能的 稳定。

2.2 数值模型

2.2.1 推力器模型

基于霍尔推力器轴对称特点,忽略周向等离子体的变化,因而可只考察在轴向(z)与径向(r)推力器放电参数的变化,由此形成了建立在(z,r)平面上的计算模型。模拟区域包括了推力器的放电通道和近羽流区,整个计算区域分为四块,区域尺寸依据HET-450推力器结构参数来设置,r=0为推力器的轴线,放电通道内、外径及长度分别为159mm,223mm,54mm。计算区域的总长度和高度分别为154mm,289mm,见图2,设计磁场位形如图3所示。



Fig. 2 Simulation domain of the HET-450 Hall thruster



Fig. 3 Magnetic field configuration and intensity distribution for simulation

2.2.2 Particle-in-Cell模型

本文研究使用的 PIC 数值模拟程序由哈尔滨工 业大学开发,模型假定放电参数沿周向(θ)是均匀分 布的,只考察其在轴向(z)与径向(r)组成的轴截面上 的变化。与此同时,计算粒子能量等参数必须考虑 周向速度,因此,模型中考虑了粒子的周向运动速 度,该速度是在各类碰撞后重新分布获得的。因此, 本文所用的 PIC 模型是一个建立在(z,r)平面上的 2D3V 模型。在模型中,原子流动按照自由分子流处 理。电子被磁化,其运动行为要同时受到电场与磁 场的影响;离子非磁化,只考虑电场的加速作用。利 用 Buneman 所提出的二阶精度蛙跳格式对带电粒子 的运动进行求解(电子和离子同时求解)。模型考虑 了包含了弹性碰撞、激发以及一价电离等过程的电 子与原子之间的碰撞,碰撞截面数据主要来源于Szabo建立的PIC模型^[19]。利用蒙特卡洛(MCC)和Vahedi 创立的 NULL-collision 方法^[20]开展电子碰撞的计 算过程的优化提升,主要是在电子发生碰撞后,仅经 过一次对碰撞概率的判断,就可实现对其发生碰撞 形式的确定,发生电离碰撞后新产生的离子继承了 原子的位置和速度。模型考虑了 Bohm 反常传导,忽 略感生磁场影响,利用 Poisson 方程来求解出电势分 布,并采用有限体积法在柱坐标系下对泊松方程(1) 进行离散差分。

$$\oint_{S} \varepsilon_{0} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \int_{V} \rho \mathrm{d}V + \oint_{S} \sigma \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$
(1)

式中 ε_0 为真空介电常数;dS为表面微元; ρ 为控制体 积内的电荷密度;dV为体积微元; σ 为控制体表面的 静电荷密度。离散之后的电势差分方程使用DADI 算法进行求解。

气体分配器与阳极边界是本仿真研究中的 通道内计算区域的左边界(该边界的电势设置 为与放电电压相同的值),即工质气体从该边界注 入到通道内,并且注入时的速度 u 服从麦克斯韦分 布,即

$$f(u_z) = u_z \exp\left(-\beta^2 u_z^2\right) \tag{2}$$

$$f\left(u_{r}\right) = \exp\left(-\beta^{2}u_{r}^{2}\right) \tag{3}$$

$$f(u_{\theta}) = u_{z} \exp\left(-\beta^{2} u_{\theta}^{2}\right) \tag{4}$$

式中下标 θ 代表周向; $\beta = \sqrt{2eT_a/m_a(T_a)$ 阳极温度, m_a) 为原子质量)。

放电电流计算涉及到电子和离子,电子碰到阳极后便删除,而离子碰到阳极之后复合为原子,返回放电通道,该过程中会产生损失能量,能量损失模型 公式为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 - \alpha(\varepsilon_0 - T_\alpha) \tag{5}$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1, & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{00} \\ \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{00}}{\varepsilon_{01} - \varepsilon_{00}}, & \varepsilon_{00} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{01} \\ \alpha_2, & \varepsilon_0 \geq \varepsilon_{01} \end{cases}$$

式中

式中 ε_1 为复合原子的出射能量; ε_0 为离子入射能量; α 为表征与固体表面交换能量的居住系数,它与离子 入射能量之间具有分段线性关系(α_1 =0.6, α_2 =0.77, ε_{00} =140eV, ε_{01} =400eV)。

复合原子的出射速度服从公式(2)~(4)。若有 中性原子碰到阳极,将会以漫反射形式且与供气原 子的相同速度分布返回放电通道。绝缘壁面边界是 通道内计算区域的上下边界,当原子碰到该壁面,以 漫反射的形式返回通道内,并且沿壁面法线、切线方 向的返回速度分量分布分别服从公式(2)和公式 (3),(4)。此时,可利用壁面温度T_{*}与原子质量m_a计 算得到最概然速率。离子与绝缘壁面和阳极表面两 者碰撞的处理方式相同。电子与绝缘壁面碰撞处理 则依据 Morozov提出的二次电子发射模型,并根据 BN 陶瓷二次电子发射特性的试验结果拟合获得数据, 完成模型中参数值设定。电子在与绝缘壁面碰撞 后,会发生积累在壁面上、非弹性反射、释放出一个 二次电子、释放出两个二次电子等四种可能的过程。 对应的概率为

$$P_{0}(\varepsilon) = 0.5 \exp\left(-\frac{\varepsilon^{2}}{43.4592^{2}}\right)$$

$$P_{r}(\varepsilon) = 0.5 \exp\left(-\frac{\varepsilon^{2}}{30^{2}}\right)$$

$$P_{2}(\varepsilon) = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon^{2}}{127.8958^{2}}\right)$$

$$P_{1}(\varepsilon) = 1 - P_{0}(\varepsilon) - P_{r}(\varepsilon) - P_{2}(\varepsilon)$$
(6)

式中 P_0 为壁面沉积的概率; P_r 为非弹性反射的概率; P_1 为释放出一个二次电子的概率; P_2 为释放出两个二 次电子的概率; ε 为电子能量。

二次电子发射与原子漫反射的速度分布一致, 并采用二次电子能量 T_{see} 与电子质量 m_e 计算得到最 概然速率。另外,将绝缘壁面处给定法向电场 $E_n =$ $-\sigma/2\varepsilon_0$ 作为边界条件,进行电势分布求解。采用电容 边界来设置通道出口的内外磁极端面,并取C=10nF为电容值。羽流下边界(即通道轴线)为对称边界 (边界电场 $E_0=0$),粒子穿过该边界将被镜面反射回 到模拟区域。羽流上边界与右边界是自由边界(电 势给定为0),粒子穿过该边界之后删除;采用统计从 自由边界消失的离子通量与动量信息的方式,计算 获得工质和电流利用率以及推力等性能参数;此外, 通过添加电子,使自由边界上正负电荷粒子密度相 等,保证自由边界同时也为电中性边界。

2.2.3 参数统计

在开展HET-450推力器数值模拟时,诸如放电

电流 I_{d} 、推力T、阳极效率 η_{a} 、工质利用率 η_{u} 以及速度 比冲 I_{sus} 等推力器性能参数可以通过公式(7)得出。

$$I_{d} = (eN_{e,\Delta t}^{A} - q_{i}N_{i,\Delta t}^{A})/\Delta t$$

$$T = m_{i}\sum_{j=1}^{N_{i,\Delta t}^{0}} u_{ixj}/\Delta t$$

$$\eta_{a} = T^{2}/(2\dot{m}_{A}U_{d}I_{d})$$

$$I_{i} = q_{i}N_{i,\Delta t}^{0}/\Delta t$$

$$\eta_{u} = m_{i}I_{i}/(q_{i}\dot{m}_{A})$$

$$\eta_{1} = \frac{I_{i}}{I_{d}}$$

$$I_{uu} = \sum_{j=1}^{N_{i,\Delta t}^{0}} u_{uu}/\Delta t$$
(7)

式中 $N_{e,\omega}^{A}$ 与 $N_{i,\omega}^{A}$ 分别为 Δt 时间间隔内,与阳极相碰撞 的电子和离子个数; q_i 为离子电荷,仅考虑一价电离, 由此 $q_i = e; N_{i,\omega}^{A}$ 为 Δt 时间间隔内,从下游开放边界所 喷射出的离子个数; m_i 和 \dot{m}_A 分别离子质量、阳极工质 流量; $u_{i,j}$ 为出射离子的轴向速度; U_d 和 I_i 分别为放电 电压、离子电流。

内、外壁面温度均设置为800K,阳极温度900K, 内、外磁极温度均设置为600K,二次电子发射温度为 1eV。模型中玻姆传导系数根据经验系数选择,通道 内、外壁分别设置为1/256和1/64。

2.2.4 模型的收敛

霍尔推力器实际放电过程中其放电参数均存 在低频振荡现象,仿真中同样存在类似的现象,如 图4所示,从仿真初始时刻开始电子个数就在一定 范围内周期性地波动,宏观参数从点火瞬间开始也 随之呈现周期性地波动,随着时间的推移,最终宏 观参数稳定在一定范围内波动,当参数振荡的幅度 稳定之后,则认为收敛。因此,后文中的结果都是 对收敛之后一段时间的数据进行统计平均获得的 时均值。

2.3 试验平台

HET-450 推力器吊装于舱内顶壁,见图5 左图, 以此样机开展试验研究分析。HET-450 推力器在兰 州空间技术物理研究所自主设计搭建的TS-7A 低 温真空试验平台上开展了点火试验,系统连接关系 图见图6;该真空系统主舱尺寸为 φ4500mm(内径)× 10000mm(直段);副舱尺寸为 φ2000mm(内径)× 2500mm(直段);抽速为 2.5×10⁵L/s。

放电电压采用 Tektronix 高压探头采集,放电电流采用霍尔电流探头测量霍尔推力器放电电流。测量获得的电流信号和电压信号输入到高存储数字示波器(Tektronix DPO 3034)进行记录与分析。

束流中的离子电流密度通过自制法拉第探针



Fig. 4 Temporal variation of discharge current and number of electrons during simulation



Fig. 5 Cabin hoisting drawing and Faraday probe

(见图5右图)监测,测试电路板将法拉第探针电流 信号转换为供计算机采集的0~5V电压信号,测试 计算机为工业控制计算机,用于数据采集和对数据 的分析处理,并显示测试结果,测试过程中偏置电 源为法拉第探针提供-20V的工作电压,该电源为 恒压电源。法拉第探针舱内可以左右、前后二维 移动。

推力测量系统采用单摆测力原理测量推力,系 统连接见图6,激光干涉仪和固定于推力器尾部靶 标反射镜两者联合可获得推力器微小位移。在试 验开始前,通过不同重量的校准砝码,获得"力-位 移"曲线;而后在试验中,激光干涉仪测出推力器工 作产生推力时所形成的位移,比对分析获得推力 数值。



Fig. 6 Connection diagram of experimental devices

3 结果与讨论

3.1 变电压情况分析

分别选择300,400,500,600V放电电压进行变电 压数值模拟研究;流量设置为80mg/s,各个电压使用 实验过程中调节的磁场强度,磁场位形及其他参数 保持不变。主要考察不同工况下的电离、加速等推 力器微观运行过程。

3.1.1 电离情况

HET-450 推力器放电室口径尺寸大,会极大影 响工质气体分布,进而改变电离分布,尤其是工作时 其分布特性,能够体现出推力器运行时的微观机理, 为此,数值模拟计算给出300~600V放电电压下,放电 通道内电离前后的原子密度分布云图,具体见图7, 图中白色区域为非计算区域。从中可以得知,近阳 极区放电通道中心位置均存在一个低原子密度区 域,而近阳极区放电通道上下壁面附近原子密度高 于中心,呈现出"双峰"分布,说明放电通道中心区域 的强电离过程大量消耗了工质原子,进而在通道中 心附近形成低原子密度区,同时也表明壁面附近存 在工质电离不充分的现象,使得一部分工质会沿壁 面泄漏。对比不同放电电压下近壁处的原子密度分 布,发现随着放电电压增加至500V,出口附近的原子 密度明显逐步降低,证明有更多的原子在通道内部电 离,图7给出的工质利用率统计结果也证实了这一点。

进一步结合不同电压下的电子温度分布结果 (如图8所示)分析不同电压下电离差异的内部机理。 首先,从通道中心上的电子温度整体分布来看最高 电子温度位于放电通道外部,这与磁场峰值位置外 移到通道外的设计目的一致,能够有效降低通道内 部电子与壁面作用产生的能量损失。其次,随着放



Fig. 7 Atomic density distribution at different discharge voltages (80mg/s)

电电压增加,整体电子温度提升,因此当放电电压较 低时(300V),由于通道内部整体电子温度水平偏低, 虽然通道上游原子密度更高但是电子温度较低没能 形成有效的电离,导致电离起始位置过于靠近出口 附近的高电子温度区域,而该位置原子密度较通道 上游明显下降,因此导致电离的不充分。对于上述 现象,分析认为放电电压低,电场较弱,对电子的加 热较差,导致电子温度较低,而较低的电子温度无法 保证有效工质电离,工质利用率也较差,印证了图9 所述自500V放电电压逐步降低,工质利用率降低的 变化趋势。而随着放电电压提升至400V及以上,通 道内部电子温度整体提升,达到原子电离的需求,使 得通道上游的高原子密度区域发生高效电离,从而 较 300V 大幅提升了电离效率(图7所示)。原子在放 电通道内过早地电离会导致离子与壁面作用加剧带 来壁面损失的增加(如图10所示),同时离子与壁面 作用有一定概率会与电子复合重新变成原子,导致 从通道内加速喷出的离子数量降低,这也是图7中 600V较500V电离效率降低的原因。



Fig. 8 Electron temperature distribution along the channel centerline at different discharge voltages (80mg/s)



Fig. 9 Variation of propellant utilization efficiency with discharge voltage (80mg/s)



Fig. 10 Ion wall loss at different discharge voltages (80mg/s)

3.1.2 加速情况

基于电离情况研究,进一步分析HET-450推力 器运行时加速特性,考察不同电压下通道中心线上

的电势分布以及离子速度分布情况,见图11。整体 而言,高电势区主要集中在HET-450推力器放电通 道内,而电势降大部分发生在放电通道外部(图11 (a)),这也意味着加速过程主要在通道外完成(图11 (b)),有效地降低了高能离子对壁面的轰击,从而避 免了超大功率下容易出现的离子热能化、溅射腐蚀 以及热负荷严重等问题,符合设计预期目标。进一 步地,对比不同电压下的电势分布特性(图11(a)), 发现随着放电电压增加通道内部电势拐点逐渐向着 阳极移动,这主要是因为霍尔推力器电离加速过程 耦合在一起,如3.1.1节中分析的随电压增加电离区 逐渐内移,而原子电离后即被加速进而产生电势降。 相应地通道内部的离子轴向速度随着放电电压增加 而整体提升,500V和600V下离子过早地在通道内部 加速导致其与壁面作用强度有一定程度的增加,进 而在通道出口附近损失了部分能量,离子速度在通 道出口附近也有一个缓变的平台。总体来看,离子 加速比较充分,在远场羽流区达到最大速度。综上 所述,500V为最优放电电压,电压过低时通道内部电 子能量不足导致电离效率低下,继续增加放电电压



Fig. 11 Potential and axial ion velocity distribution along the center line of the channel at different discharge voltages (80mg/s)

则会导致过热场的产生,近阳极区电子温度过高导 致电离更多发生在通道上游,从而在通道内部产生 过多的电势降,进而导致通道内离子能量及壁面损 失增加,同时,离子与壁面过强的作用导致离子与壁 面复合,进而导致电离效率的降低。

3.1.3 仿真和试验对比

为验证建模合理性以及深入获得放电参数对性 能影响,进行仿真和试验数据比对分析。其中,整个 试验过程中,遵循最小放电电流以及束流离子电流 最大的原则调节磁场;并按照阶梯式逐步提高放电 电压和阳极工质流量,实现HET-450推力器的大功 率加载;最后,在目标放电电压和流量下,待放电稳 定一段时间后,进行推力测量。

试验考核范围与仿真相匹配,即固定流率80mg/s, 分析在 300~600V 的放电电压下的放电电流、推力等 性能参数变化,见图12所示,从中可以看出仿真和试 验数据符合性良好,表明数据可信能够支持机理分 析,其中仿真与试验得到的放电电流和推力相对误 差均在3%以内,考虑霍尔推力器放电过程中电子传 导模型的复杂性,在目前国际上关于该问题也没有 得到统一的普适性模型,因此这样的误差是可以被 接受的。分析不同电压下的试验及仿真结果可以发 现,随放电电压的增大,放电电流和推力呈现增长趋 势,其中,300V逐步增加至500V时,放电电流增速基 本是线性,而500V,600V时的放电电流接近,并且 300~500V电压内的阳极效率随电压升高而增大,然 而 500V 增加至 600V 过程中, 阳极效率反而降低。 究 其原因,上文已述 600V 离子壁面损失大,进一步分 析,600V电场较强,对电子的加热过度,使得电子温 度较高,电子更容易受电场影响向阳极传导,即电子 更易被电场捕获,从而加速运动至阳极,明显降低电 子在通道内滞留时间,因而电子电流增加,造成阳极 功耗损失增加,进而阳极效率降低。

3.2 变流量情况分析

在 HET-450 推力器变流量数值模拟研究中,保 持阳极电压 500V,磁场强度、位形及其他条件不变, 改变阳极工质流量,分别为40,60和 80mg/s。

3.2.1 电离情况

图 13 给出了不同流量下 HET-450 放电通道内的 原子密度分布,从中可以看出,不同流量下分布情况 相似,呈现"双峰"结构,即近阳极区附近中心处存在 一个低密度区,低于两侧壁面附近原子密度,这主要 是由电离集中于通道中心所致。同时,随着流量逐 步减小,通道内的原子数密度更低,因此随流量的减



Fig. 12 Variations of discharge current, thrust and anode efficiency with discharge voltage (80mg/s)

少电离速率整体大幅度降低,具体见图14。由于 HET-450推力器放电通道较宽,达到70mm,且直径 达到了0.5m量级,并且电离集中在通道中心区域,原 子更易从通道近壁面处泄漏,由图13所示,流量越低 通道出口附近近壁区剩余原子密度相对越高,也就 是说原子通过壁面泄漏越多,从而导致工质利用率 变低,具体见图15。此外,图14的电离分布结果显 示,随着流量增加电离速率的半高宽明显增加,这说 明电离区的轴向展宽有所增加,有利于提升原子电 离的概率,进而增加电离效率。综上所述,随着阳极 流量由40mg/s提升至80mg/s通道内部整体原子数密 度水平提升,达到充分电离条件,通道内部电离区范 围变大,原子电离效率得到提升,而低流量下电离不 充分会导致部分未电离工质原子沿壁面泄漏。







Fig. 14 Ionization rate distribution along the center line of the channel (500V)



Fig. 15 Variation of propellant utilization efficiency with anode mass flow rate (500V)

3.2.2 加速情况

继续考察在变流量下HET-450推力器离子加速 情况,集中关注于沿通道中心线电势和电子温度分 布,仿真结果见图16。从图中可以发现,整体而言电 势降大部分分布于羽流区,因而加速过程主要位于 通道外部。当放电电压维持500V不变,逐步升高流 量至40~80mg/s时,近阳极区电势降的起始位置逐渐 向通道出口移动,说明电离加速区逐渐向通道外移 动,从而降低了等离子体壁面损失,更加充分地加速



Fig. 16 Potential and electron temperature distribution along the center line of the channel (500V)

离子喷出。同时出口处的空间电势逐渐增大,说明 随流量提升离子在通道内部加速获得的能量降低, 有利于降低离子对壁面的轰击溅射。当流量达到 80mg/s时,在放电通道内部电势降的比例较低,对电 子的加热效应弱,因而电子能量低于40mg/s和60mg/s, 同时大流量下原子密度高电离更加充分,也消耗了 更多电子能量,从而使得在较大流量下,电子温度峰 值更远离通道出口,见图 16(b)所示。进一步分析 500V不同流量下的离子速度分布,如图 17 所示,发 现随着流量增加,喷出的高能离子更加集中于通道的中心区域,可见离子加速效率较高,发散产生的动能损失更少。

基于上文论述,分析其运行机理,虽然三种流量 下主电离区域位置基本一致,但电离区展宽及所在 位置对应的电势不同,最终导致加速效率不同,高流



Fig. 17 Ion velocity distribution at different anode mass flow rates (500V)

量时的电离区所在位置的电势较高,这也使得对离 子的加速效率高,从而离子速度也较高,且高能离子 更加集中于环形放电通道下游正对的羽流区,发散 损失降低,进而提升了整体放电效率。综上所述,在 研究的流量范围内最优阳极流量为80mg/s,既能保证 充分电离又能使得离子在获得充分加速的同时避免 过多的发散动能损失。

3.2.3 仿真和试验对比

继续开展固定电压流量影响性能分析,固定放 电电压 500V,流量从 40mg/s 增加至 80mg/s,推力器放 电电流、推力、阳极效率随之增加,如图 18 所示。结 合上文,无论是变放电电压,还是变流量,同工况下 的数值仿真和试验结果符合度良好,表明数值计算 物理模型设置合理,微观运行机理展示贴近实际,同 时也体现出了设计的合理性。最终,推力器在 500V 放电电压和 80mg/s 流量下,实现推力 2.1N,阳极效率 60%,达到了设计要求。



Fig. 18 Variations of discharge current, thrust and anode efficiency with anode mass flow rate (500V)

4 结 论

本文基于 HET-450 大功率霍尔推力器开展了 PIC 仿真计算和试验研究,结论如下:

(1)在大功率推力器放电室口径大情况下,放电 电压(300V)和流量(40mg/s)过低,均会使推力器工 质电离不充分,并且放电主要集中于通道中心,致使 部分阳极工质沿放电室陶瓷壁泄漏,使得在近出口 处出现较高的中性粒子数,导致工质利用率降低;同 时还影响近出口处电势分布,电势和电势梯度均变 低,导致离子加速效果降低离子速度小。

(2)在300~500V电压范围内,随着放电电压的增加,放电电流、推力以及阳极效率随之提升,而继续增加放电电压则会导致过热场的产生,近阳极区电子温度过高导致电离更多发生在通道上游,从而在通道内部产生过多的电势降,进而导致通道内离子

能量及壁面损失增加,同时离子与壁面过强的作用 导致离子与壁面复合,进而导致电离效率的降低。

(3)试验与仿真结果数据对比分析,显示两者所获得推力、放电电流等结果符合良好,表明物理仿真建模合理,所展示的推力器运行过程与实际较为吻合;在500V放电电压和80mg/s流量下,推力达到2.1N、阳极效率为60%,达到了设计要求,表明设计合理有效。

后续研究将考察 HET-450 推力器的性能拉偏, 并探索其运行机理。

致 谢:感谢国家自然科学基金青年基金、载人四批预 研项目的资助。

参考文献

[1] MikellidesI G, Ortega A L. 2D(r-z) Numerical Simulations of the Plasma and Channel Erosion in a 100kW
 Class Nested Hall Thruster [J]. Plasma Sources Science

and Technology, 2018, 27: 075001

- [2] Becatti G, GoebelD M. 500-A LaB6 Hollow Cathode for High Power Electric Thrusters[J]. Vacuum, 2022, 198: 110895.
- [3] ChaplinV H, JornsB A, Ortega A L, et al. Laser-Induced Fluorescence Measurements of Acceleration Zone Scaling in the 12.5kW HERMeS Hall Thruster[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124: 183302.
- [4] 王少宁,王润福,陈昶文,等.超大功率电推进电源 处理单元关键技术研究[J].推进技术,2022,43 (10):210114.(WANG Shao-ning, WANG Run-fu, CHEN Chang-wen, et al. Key Technology of Super Power Electric Propulsion Power Processing Unit[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(10):210114.)
- [5] Zurbach S, Lasgorceix P, Cornu N. A 20kW High Power Hall Effect Thruster for Exploration [C]. Prague: 61st International Astronautical Congress, 2010.
- Semenkin A V, Zakharenkov L E, Solodukhin A E. Feasibility of High Power Multi-Mode EPS Development Based on the Thruster with Anode Layer[C]. Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011.
- [7] Jacobson D T, Manzella D H. 50kW Class Krypton Hall Thruster Performance[R]. AIAA 2003-4550.
- [8] Jacobson D T, Manzella D H, Hofer R R, et al. NASA's 2004 Hall Thruster Program [R]. AIAA 2004-3600.
- [9] Kamhawi H, Haag T W, Jacobson D T, et al. Performance Evaluation of the NASA-300M 20kW Hall Effect Thruster[R]. AIAA 2011-5521.
- [10] Hall S J, Cusson S E, Gallimore A D. 30-kW Performance of a 100-kW Class Nested-Channel Hall Thruster
 [C]. Huogo-Kobe: 34th International Electric Propulsion Conference, 2015.

- [11] Zurbach S, Cornu N, Lasgorceix P. Performance Evaluation of a 20kW Hall Effect Thruster [C]. Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011.
- [12] Piragino A, Leporini A, Giannetti V, et al. Characterization of a 20kW-Class Hall Effect Thruster [C]. Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- [13] 陈杰,康小录,赵震,等.高比冲霍尔推力器点 火特性[J].中国空间科学技术,2020,40(4):22-28.
- [14] 吉林桔,丁永杰,王真容,等. 霍尔推力器变电压下电子能量平衡机制[J]. 高电压技术,2013,39(7): 1729-1737.
- [15] Mazouffre S, Dannenmayer K, Blank C. Impact of Discharge Voltage on Wall-Losses in a Hall Thruster [J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 064501.
- [16] 刘星宇.高电压霍尔推力器能量损失分析及改进[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [17] 康小录,张 岩,刘 佳,等.大功率霍尔电推进研究现状与关键技术[J].推进技术,2019,40(1):1-11. (KANG Xiao-lu, ZHANG Yan, LIU Jia, et al. Research Status and Key Technologies of High-Power Hall Electric Propulsion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(1):1-11.)
- [18] 王尚民,郭 宁,李 沛,等.一种基于柔性连接的大功率霍尔推力器放电室组件[P].中国:201911350858.X,2021-4-20.
- [19] Szabo J J. Fully Kinetic Numerical Modeling of a Plasma Thruster[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [20] Vahedi V, Surendra M. A Monte Carlo Collision Model for the Particle-in-Cell Method: Applications to Argon and Oxygen Discharges [J]. Computer Physics Communications, 1995, 87(1/2): 179-198.

(编辑:朱立影)