

氦气工质霍尔推力器束聚焦特性研究*

夏国俊, 宁中喜, 欧阳磊, 王亚楠, 黎润, 于达仁

(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: 以研究氦气替代氙气作为霍尔推力器工质时, 等离子体束发散程度大等束聚焦特性问题为目的, 通过以霍尔推力器磁场参数、放电电压和阳极工质流量分别作为单一变量进行实验研究, 考察其对推力器等离子体束聚焦影响情况。使用 HET-P70 霍尔推力器进行相关实验, 通过改变磁场参数来研究磁场位形对氦气工质推力器性能的影响, 最终发现合适磁场位形形成的磁聚焦状态, 即实验一中的工况 3, 可以使羽流发散角达到 11.5° , 此时推力器放电电压在 400V, 阳极工质流量 3mg/s。另外, 通过实验二和实验三, 考察阳极工质流量和放电电压对氦等离子体束聚焦的影响机理, 发现两个放电参数的变化主要改变了中性气体主电离区位置, 进而影响等离子体束聚焦状态。电离位置在设定工况下外移 9%, 会使得羽流发散半角增大约 12° 。所以, 磁场位形和中性气体的电离位置是影响氦等离子体束聚焦的重要因素, 在对氦气霍尔推力器进行设计优化时应予重点考虑。

关键词: 氦气; 霍尔推力器; 束聚焦; 磁聚焦

中图分类号: V439.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2017) 03-0700-10

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2017. 03. 029

Research on Beam Focusing Characteristics of Krypton Hall Thruster

XIA Guo-jun, NING Zhong-xi, OUYANG Lei, WANG Ya-nan, LI Run, YU Da-ren

(Plasma Propulsion Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: For the purpose to study the problems of plasma beam focusing, like bad spreading state of plasma beam, when krypton is used to replace xenon as the propellant of the electric propulsion, regarding magnetic field parameters, discharge voltage and propellant flow of anode as a single variable respectively, three experimental researches have been carried out to investigate their effects on beam focusing of the thruster. Experiments was made by the HET - P70 hall thruster to study the effects of magnetic field configuration on krypton thruster performance by changing the parameters of magnetic field, finally finding that the appropriate field configuration can form magnetic focusing state, as case 3 of the first experiment, it can make the plume divergence angle to be 11.5° . And the discharge voltage is 400V, while the propellant flow of anode is 3mg/s at the moment. In addition, the influencing mechanism of propellant flow of anode and discharge voltage on krypton plasma beam focusing was studied through the second experiment and third experiment, finding the change of two parameters mainly changed the location of neutral gas ionization area, then affecting the state of the plasma beam focusing. When ionization area moved 9% of setting condition outward, the half angle of the plume divergence increased about 12° . Thus the magnetic field configuration and gas ionization position are the important factors that affect the krypton plasma beam focusing. During the optimization design of krypton hall thruster, they should be given priority.

Key words: Krypton; Hall thruster; Beam focusing; Magnetic focusing

* 收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2015-12-21。

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC61571166)。

作者简介: 夏国俊, 男, 硕士生, 研究领域为电推进。E-mail: xiaguojun90@163.com

1 引言

目前,电推进主要使用氙气作为推进工质。而空气中氦气含量是氙气的十倍,制备价格是后者的六分之一^[1]。氦气工质不仅仅具有低成本的优点,因其相对于氙气有更低原子质量,使其理论比冲要比氙气工质高出 25%^[2]。HET(霍尔推力器)在采用氦气工质时具有比冲高、功率大和研制运行成本低等特点,在未来的长寿命高轨卫星平台、深空探测和低成本小卫星方面具有广阔的应用前景。基于此,氦工质 HET 已被欧美等国列为电推进研究的重点发展方向之一。经过近几年的研究,虽然氦气工质利用率在几十千瓦的大功率 HET 上已经得到了有效的改善^[3],但在小功率低流量条件下仍未得到有效改善,并且氦气等离子体的磁透镜聚焦技术也是亟待解决的难题,这些也都是各航天大国正在继续深入研究的热点问题。

使等离子体在 HET 内向通道中央具有良好聚焦特性,是减少离子轰击壁面,提高 HET 性能和使用寿命的重要方法。前苏联时期的 Bugrova A I 确定了产生等离子体束发散的主要原因在于通道内空间电势分布的不合理,而产生这种不合理电势分布的主要原因是 HET 通道内磁场位形不佳^[4]。为此 Morozov 提出了采用自己发展的磁透镜理论来解决这个问题^[5],而 Bugrova 则真正实现了这一设计意图,这就是第二代的稳态等离子体发动机 SPT-ATON。虽然在使用氙气时 SPT-ATON 实现了较好的等离子体束聚焦,但在氦工质条件下却没有达到这个效果^[6],表明等离子体在 HET 上的磁聚焦问题还有待继续深入研究。在第二代 SPT 出现之后,等离子体磁透镜聚焦技术的巨大进步又重新刺激了 MIREA 的“等离子体光学”实验室在变工质方面研究,缓冲腔结构的出现也为气体完全电离提供了更大的空间尺度和设计自由度。因此 MIREA 采用 SPT-A3 实验模型,按照供气质量流量不变的原则,进行了氦气条件下的性能和参数分布测量实验,并与氙气条件下的相应参数进行了对比^[6]。结果表明,使用氦气的 SPT-A3 在效率、羽流发散半角等方面的性能都低于氙气。通过探针法对通道内部等离子体参数的测量研究可以确认,采用氦气工质时由于其电离能高电离截面小,而导致了电离区加长,电势分布趋缓的结果,使等离子体的磁透镜聚焦变得更加困难,羽流发散角增大。但此后 MIREA 并未对氦气条件下气体的电离及等离子体束聚焦等相关性问题进行更深入的研究和总结。

欧美等国也对该问题进行深入的研究。Fruchtman 从理论上分析了等离子体透镜与羽流发散角的关系,确认了弯曲磁场对等离子体的聚焦作用。早在 20 世纪 90 年代 Michigan 大学就使用氦气在 SPT-100 上进行了性能实验,并利用多种探针测量了其羽流特性。通过与氙气条件下发动机的性能参数对比发现,使用氦气时 SPT-100 的羽流形式虽然变化不大,但发动机的推力、效率参数却因工质利用率的下降,而急剧降低。即使把供气流量提高 18%,并通过磁场优化将氦气利用率由 48% 提高到 93%,但比冲仍下降了 7%,效率仅 22%,表明除工质利用率之外,羽流形式也是影响发动机性能的重要因素,然而研究过程中也确认了通过增加供气流量可以提高工质利用率的方法。美国密西根大学 Linnell 通过分析发现,采用氦气工质时羽流发散角过大是导致 HET 性能下降的重要原因^[7],并针对 NASA-173MV 发机构造了通道内具有零磁场区的磁场位形。实验表明,利用这种等离子体磁透镜技术可以加强氙气等离子体向通道中央的聚焦效果,但采用氦气时的羽流发散半角仍然接近 50°^[8]。

通过对近年来有关磁聚焦技术的研究分析可见,虽然很多学者都认识到了等离子体束的磁透镜聚焦,对 HET 的性能有着非常重要的影响,但有关它的许多本质性问题都还没有进行深入研究。国内哈尔滨工业大学等离子推进技术实验室针对磁聚焦与推力器腐蚀之间的关系进行了相关研究,总结出不同聚焦状态下腐蚀特征的变化规律^[9]。通过磁场改进,在 HET-P70 上率先获得了氦等离子体非常好的聚焦特性,为这个问题的深入研究提供了良好的平台。本文针对氦气工质霍尔推力器的工作特点,利用磁聚焦技术对其性能进行优化研究,并考察阳极工质流量及放电电压对其等离子体束聚焦的影响。通过实验研究分析,得到各个参量对氦气工质霍尔推力器性能影响程度,并对产生影响的机理进行研究,为对其性能进行进一步优化提供参考。

2 氦气工质霍尔推力器磁聚焦特性的实验研究

2.1 实验设备及测量方法简介

2.1.1 霍尔发动机装置

实验中采用的霍尔推力器为 HET-P70,如图 1 所示,它是基于第二代稳态等离子体发动机 A-4^[10]的改进型。HET-P70 保留了原有 A-4 的缓冲腔结构和阳极与气体分配器分离的设计特点,主要结构

变化在于磁极位置和线圈尺寸, HET-P70 仍然保留了内外共三个励磁线圈的结构。为了完成后面通道内的光谱分布信息测量, HET-P70 的外磁极沿轴向开了条宽度为 4mm 的窄缝, 并做薄了线圈 1 的厚度。实验结果表明, 其对发动机等离子束聚焦过程的影响可以忽略不计。将其安装在实验室真空罐^[11]中进行相关实验。

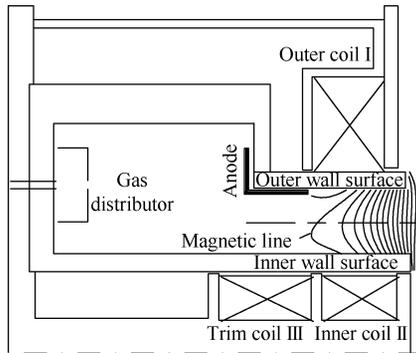


Fig. 1 Experimental thruster of HET-P70

2.1.2 空心阴极

本论文实验中所采用的空心阴极使用了螺旋钨丝和直流方式进行持续加热, 以便发射体能够达到足够的温度。空心阴极加热功率利用直流电源可在 0~350W 的范围内自由调节^[12], 发射体的材料为多晶 LaB6, 工作气体为氩气。实验过程中可以通过改变空心阴极加热功率和供气流量来调节发射体的电子发射能量, 改变它与 HET 之间的耦合关系。

2.1.3 HET 定向离子束流密度分布测量方法

为了尽量减小探针尺寸对羽流参数及空间分辨率的影响, 同时在考虑尺度相对偏差的基础上, 所以选择直径为 0.5mm 钨丝端面作为离子收集器, 并放置于陶瓷管内, 以保证所接受的离子电流仅来自于测点。定向离子探针在使用时将安装在真空罐内的可移动平台上, 高度位于 HET 的轴线上。探针上加有低于测点空间电势的负偏压 U , 实验表明, 在羽流区当 $-25V < U < -5V$ 时所测的离子电流密度值变化小于 0.5%, 因此实验中选定 $U = -20V$ 。探针所收集的离子电流均通过 RC 模块 ($R=1k\Omega$, $C=0.01\mu F$) 来滤除 100kHz 以上的噪声干扰, 并利用 Tektronix TPS2024 隔离示波器来记录探针电流在径向空间的分布情况^[13]。

2.1.4 HET 通道内工质电离分布的光谱测量

为了能够获得发动机稳态工作时光谱强度沿整个通道的轴向分布, 针对 HET 的结构进行了改进, 在外陶瓷管壁上沿轴向开了一条宽度为 1.5mm 的通缝。为了消除外励磁线圈的周向连续性对测量区域

的干扰, 将线圈厚度减薄。光谱信息的采集使用 AvaSpec621 光谱仪^[14]。实验过程中为保证所采集光谱全部来自于某一较窄的轴向截面, 利用了一个陶瓷管作为聚光管, 以保证光谱仪采集到的光线来自于被测点沿线的较窄区域。

2.2 氩工质霍尔推力器束聚焦特性实验研究

2.2.1 氩工质霍尔推力器放电特性

图 2 则给出了 HET-P70 优化状态时, 在不同供气流量下推力、比冲、效率和羽流发散半角等积分特性随放电电压之间的变化关系。由图 2(a) 可见随着放电电压的增加, 各流量下的推力是增大的, 表明离子的有效加速电压也在增大, 这是直接导致发动机比冲增大的原因。如图 2(b), 最大比冲出现在 600V 的放电电压条件下, 为 3095s。但 HET-P70 的效率却并不是一直增大的, 如图 2(c), 特别是在 3mg/s 的供气流量条件下, 发动机的效率在放电电压 400V 左右出现最大值 55%, 而后下降。如图 3(a) 所示, 这可能与发动机过热导致放电电流迅速增大有关。因为 HET-P70 使用氩气时的设计功率为 1.2kW, 当使用氩气时能达到 1.7kW, 而此时的实际功率则已经接近 2kW, 发动机的陶瓷通道也已经发红。在较低的供气流量条件下, HET-P70 的效率不高的原因则很可能与此时的工质利用率偏低 (正常氩气工质利用率能够达到 90% 以上^[15]) 和羽流发散半角增大有关, 如图 3(b)。观察图 3(c) 和图 3(d), 羽流发散半角在供气流量 3mg/s, 放电电压 400V 时达到最小, 为约 $\alpha_{0.95} = 11.5^\circ$ ($\alpha_{0.95}$ 为通过计算 95% 的总离子通量获得^[13]), 此时发动机的效率也接近最佳值。放电功率达到约 1.7kW, 但发动机在工作中没有表现出过热的状态, 表明降低羽流发散半角对于减小壁面热量沉积起到了非常重要的作用。而降低供气流量和放电电压都会导致羽流发散半角的迅速增大, 说明其中必有非常重要的物理过程影响着等离子体在 HET 通道内的运动。

2.2.2 氩工质霍尔推力器束聚焦特性研究

大量的实验研究表明, 放电通道内的磁场位形、供气流量、低频振荡等许多种因素都会对其中的等离子体束聚焦过程产生很大的影响。羽流发散角、电离区位置和磁场参数等可以用来表征束聚焦特性。通过对 HET-P70 放电电压、供气流量、磁场以及空心阴极工作状态等的优化调节, 最终在特定的参数范围内获得了非常好的等离子体束聚焦状态。

当等离子体达到束聚焦时, 其等离子体流近似平行流, 发散角度很小。羽流发散角最能直观表现

束聚焦状态,当其最小时,说明束聚焦状态最好。观察图2(d),可以发现氦气等离子体羽流发散半角与阳极工质流量和放电电压有关:相同放电电压下,工质流量越大,羽流发散角越小;较低工质流量下,放电电压越高,其羽流发散半角也越小,但是较高工质流量,如3mg/s的工况,存在最合适的放电电压使得羽流发散角最小,当放电电压过高时羽流发散角反而变大。观察图3(b),不同的工质流量下,放电电压过高会使工质利用率偏低。这充分证明了阳极工质流量和放电电压对氦等离子体束聚焦影响较大。通

过氦气工质霍尔推力器的优化设计经验^[6],可以发现通过调节磁场位形形成的磁聚焦磁场对等离子体束聚焦作用明显,所以对于氦气工质而言,磁场位形的设计也是影响其束聚焦的重要因素。因此,对于氦气工质等离子体束聚焦的研究,需要重点考察磁场位形、阳极工质流量和放电电压的影响机制。

2.3 磁场位形对氦等离子体束流特性的影响

本节将重点研究优化状态下HET-P70通道内的磁场位形对等离子体束聚焦性能的影响。通过分析不同实验工况下,随着磁场位形变化,推力器性能参

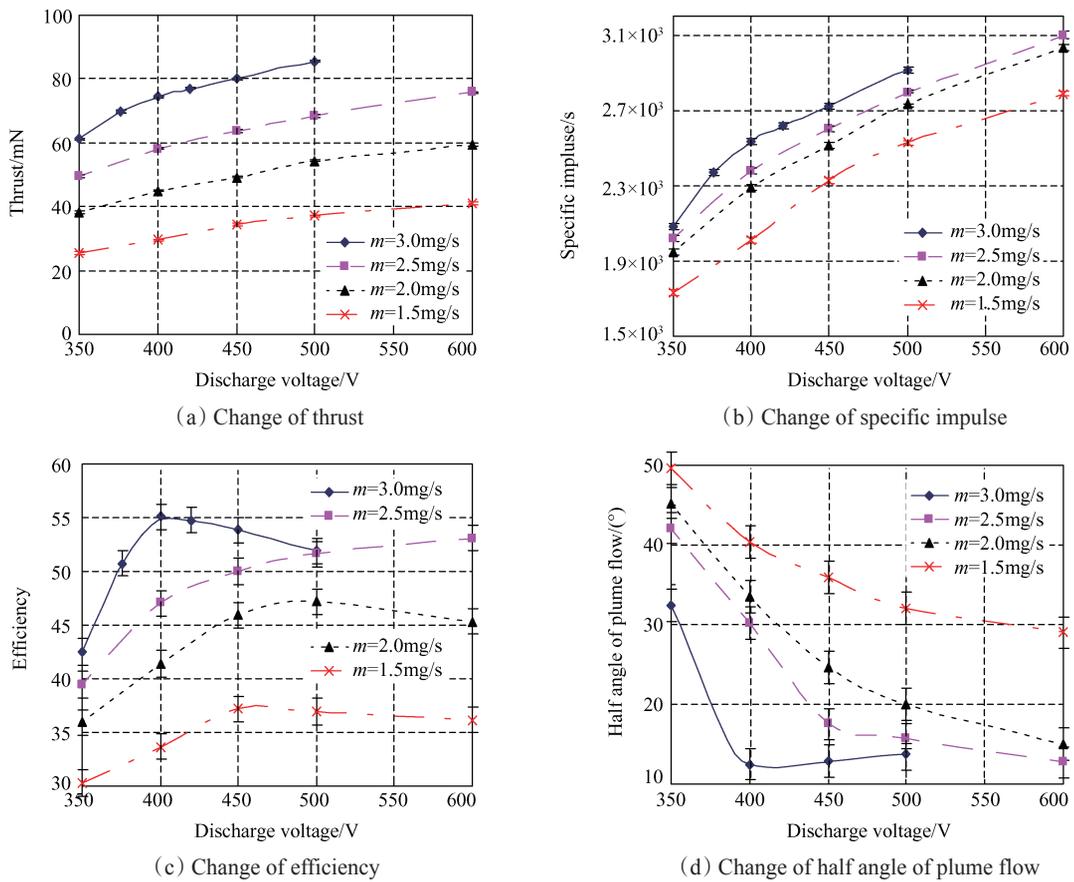


Fig. 2 Parameters with the change of the discharge voltage under different gas flow rate in the HET-P70

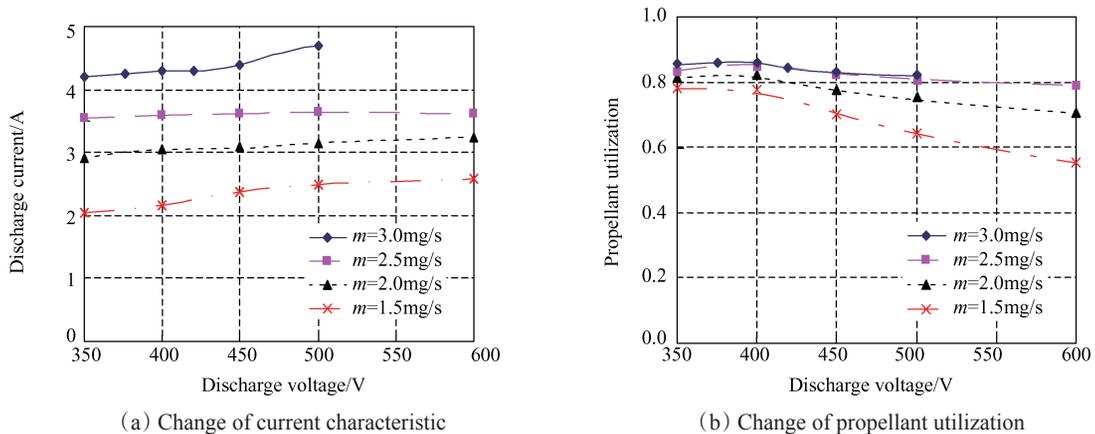


Fig. 3 Change current characteristic and propellant utilization with different gas flow rate in the HET-P70

数变化特点,来研究磁场位形对等离子体束聚焦状态和羽流发散半角的影响,总结形成等离子体束距角时的磁场位形设计规律,并用于指导 HET 磁场位形设计。

2.3.1 实验条件

实验一:为了能够非常清晰地反映出磁场位形对等离子体束聚焦程度的影响,在使用羽流发散半角最小时的工况(1.7kW, 400V)作为基准的基础上,通过调节线圈的励磁电流,来改变通道内的磁场位形和羽流形式。除励磁电流外发动机的其它工作参数为:放电电压 $U_p = 400V$, 阳极供气流量 $\dot{m}_a = 3mg/s$, 阴极供气流量 $\dot{m}_k = 0.3mg/s$, 阴极耦合电压 $U_s = 17.5V$, 并保证这些工作参数在整个磁场位形变化实验过程不变。每组磁场位形下,在测量羽流区定向离子电流密度分布的同时,也利用光谱法监测通道内工质的电离分布,以判断电离区位置和宽度等参数和磁场位形之间的关系。

通道内的静态磁场位形,可以通过线圈匝数和发动机工作时的励磁电流,利用 FEMM 软件和所构建的发动机磁极模型计算得到。实验研究和磁场计算均发现:对于 ATON 型霍尔推力器,线圈 1 和线圈 2 的主要作用是形成通道内出口区附近的磁场位形,并提供足够的磁场强度和正梯度,增加线圈 1 和减小线圈 2 的励磁电流对于改变磁场位形来讲具有几乎相同的作用。因此实验过程中仅通过变化线圈 1 的励磁电流用来改变通道内的磁场位形。

2.3.2 实验结果及分析

观察图 4 中不同磁场位形下羽流区离子电流密度分布及其变化情况。可见,与最优工况 3 相比,减小外线圈 1 的励磁电流,将导致发动机羽流发散半角的明显增加,并在羽流近场内会形成一个清晰可见的长条形,密度相对较高的定向离子交汇区,这应该是环形通道内等离子体束发散后有一部分会相交于羽流近场区内造成的,也就是有关文献中提到的“辐条”型羽流^[16]。而如果增加励磁电流,则等离子体束会因为过矫而倾向于在近场区重新进行汇聚,再次形成一个相对密度较高的定向等离子区。但与发散时不同的是,这种羽流形式开始时并无太大的发散,而是在汇聚区之后才出现较大的扩张,形成了一个独特的“燕尾”形等离子体束流结构。汇聚区的定向等离子体密度,也会随着汇聚程度的增加而相对地增大。但羽流发散半角随着汇聚程度的增大而迅速增加,这是由于等离子体束在汇聚区后继续向前运动而造成的发散。由此可见,对于 HET 的羽流特性,

平行射流应该是一种最佳的工作状态。

为便于研究磁场特性,定义磁场弯曲方向 γ_m 和曲率 K_m 为磁场空间分布参数,微分表达式为

$$\gamma_m(r, z) = \arctan \frac{B_z}{B_r} = \arctan \frac{dz}{dr} \quad (1)$$

$$K_m(r, z) = \frac{1}{\rho_m} = \frac{d\varphi_m}{dS_m} \quad (2)$$

各参数空间关系如图 5 所示, γ_1 和 γ_2 为选取的磁力线微元内外节点处弯曲角度。在工质电离径向均匀的假设条件下,磁场的弯曲方向 γ_m 和曲率 K_m 沿轴向的分布可用如下积分式表达

$$\gamma_m(z) = \frac{\int \gamma_m(r, z) dr}{h} \quad (3)$$

$$K_m(z) = \frac{\int K_m(r, z) dr}{h} = \left| \frac{\sin \gamma_{m_w} - \sin \gamma_{m_n}}{h} \right| \quad (4)$$

这里使用了微弧条件下 $d\varphi = dy$ 和 $dS = dr \sqrt{1 + \tan^2 \gamma}$ 的近似等价关系。 γ_{m_w} 和 γ_{m_n} 分别是磁力曲线在陶瓷通道外壁面和内壁面处的弯曲角度, h 为通道宽度。这样在以工质电离分布函数 $q(z)$ 为统计权重下的磁场平均参数则可表达为

$$\bar{K}_m = \frac{\int q(z) K_m(z) dz}{\int q(z) dz} \quad (5)$$

$$\bar{\gamma}_m = \frac{\int q(z) \gamma_m(z) dz}{\int q(z) dz} \quad (6)$$

表 1 列出了实验过程中所选的五种工况,以及磁场位形的主要表征参数。图 4 给出了五种工况中三种工况下通道内的磁场位形分布,可见随着外线圈 1 励磁电流的增加,外壁面附近的磁力线有明显向出口处收紧的趋势,而内壁面附近的磁力线则有向阳极散开的趋势,这很可能会导致磁场弯曲方向有较大的变化。其中工况 3 为最优的基准工况。这说明磁力线弯曲方向是影响束聚焦特性的重要参数,为达到较好的束聚焦特性,调整适宜的磁场位形很重要。

3 其他放电参数对磁聚焦的影响

3.1 供气流量对等离子体束聚焦特性的影响

阳极供气流量的变化主要是影响霍尔推力器通道内的粒子数密度,进而改变电子与中性气体之间的碰撞频率,这将使整个通道内的电离加速过程都跟着发生变化,影响发动机的性能指标。因此有必要深入研究阳极供气流量,对中性气体在通道内的电离加速以及等离子体束聚焦过程的影响,给出能够形成等离子体束聚焦时的阳极供气流量的选取范

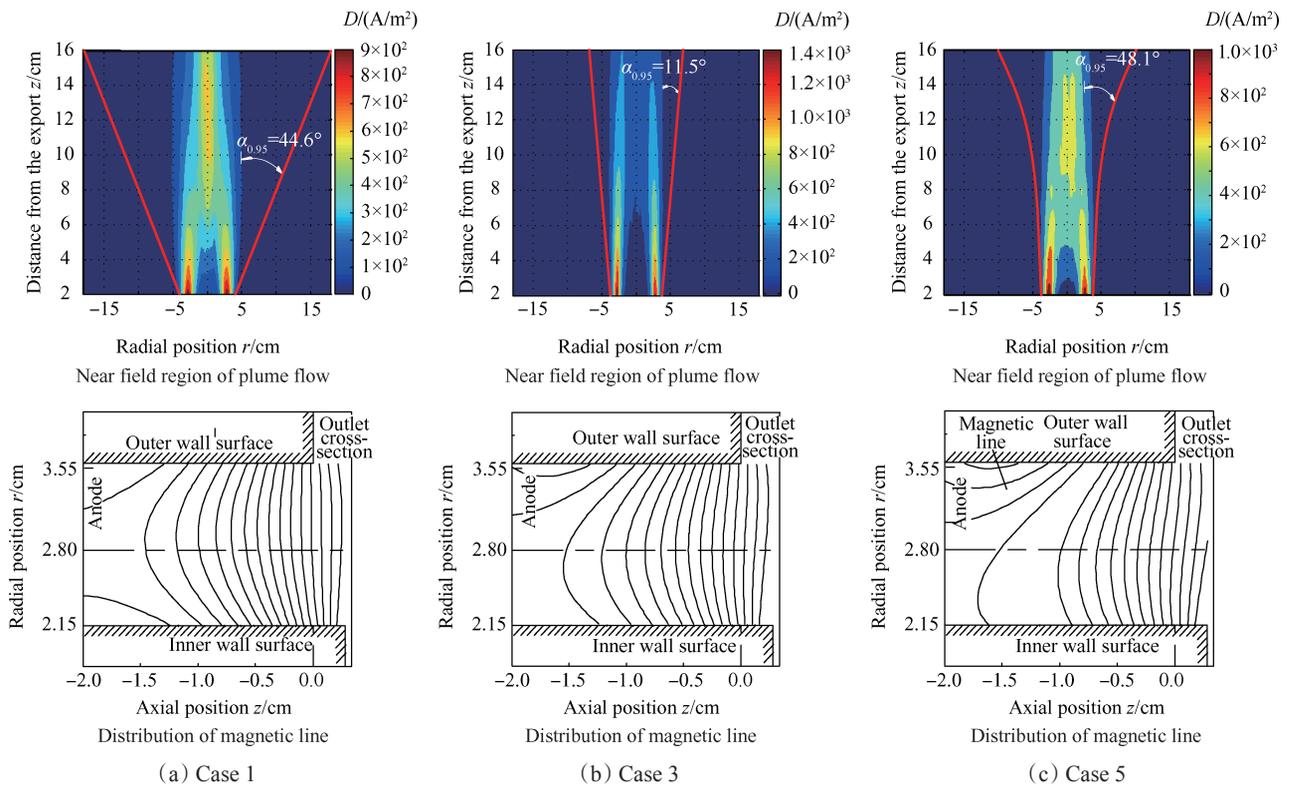


Fig. 4 Comparison of directional ion current density at the near field region of plume flow under different magnetic configurations in HET-P70

围,以便为日后发动机的设计和性能优化提供有益的指导。

3.1.1 实验条件

实验二:实验过程中工况的选取原则是以 HET-P70 的最优状态为基准,通过 AFC-50D 流量计来调节阳极供气,使其质量流量能在 1.5~3.2mg/s 变化,并测量不同工况下通道内的工质电离分布、羽流近场区定向离子密度和放电振荡等参数的变化。

根据上面的调节原则,选定发动机的基本工况为:放电电压 $U_p = 400V$,阳极供气流量 $\dot{m}_a = 3mg/s$,阴极供气流量 $\dot{m}_k = 0.3mg/s$,阴极耦合电压 $U_s = 17.5V$ 。除阳极供气流量外,上述参数在整个实验过程中均保持不变,但线圈的励磁电流则需根据供气流量的不同做较大的调整,这是由发动机的磁安特性^[15]所决定的。这样,通道内的磁场位形等参量也会随之发生较大的改变,表 2 根据实际的励磁电流,给出了流量调节过程中磁场及其它宏观参数的变化数据。

3.1.2 实验结果及分析

图 6 是阳极供气流量分别为 3.2mg/s 和 1.5mg/s 时,在各自磁场优化条件下得到的近场区定向离子电流密度分布。与最优工况下的测量结果(图中的工况 3)相比,变化阳极供气流量,羽流区的定向等离

子体密度和羽流发散半角都会发生显著的改变。增大阳极供气流量,羽流发散半角虽稍有增加,但变化不大。减小阳极的供气流量,却会引起 HET-P70 羽流发散半角的迅速增大,其羽流形式也将由聚焦型转变为明显的外发散型。可见对于优化的羽流形式,实际上存在一个最优的临界供气流量或者说是中性气体粒子数密度。为了保证能在实验中获得较好的羽流形式和较低的羽流发散半角,阳极供气流量必须高于该临界值。根据实验结果,对于氦气工质 HET-P70 阳极供气流量的临界值可取为 $\dot{m}_{ac} = 2.8mg/s$ 。此时通道内中性气体密度为

$$n_{ac} = \frac{\dot{m}_{ac}}{AM_1V_a} = 4 \times 10^{19} m^{-3} \quad (7)$$

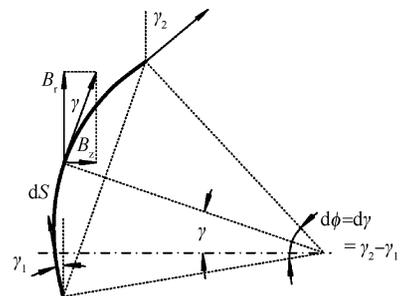
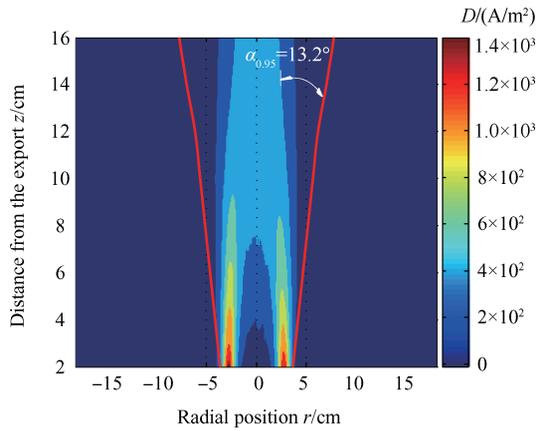
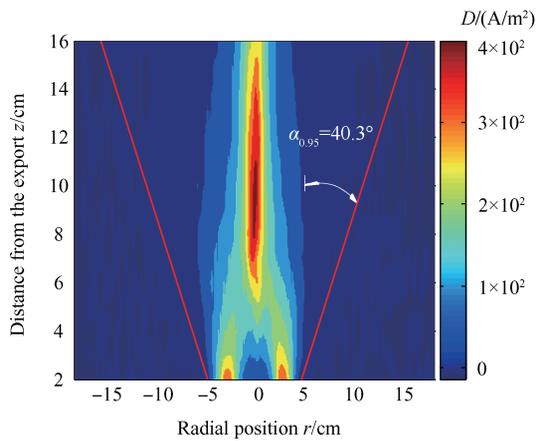


Fig. 5 Schematic diagram of magnetic line of force infinitesimal analysis



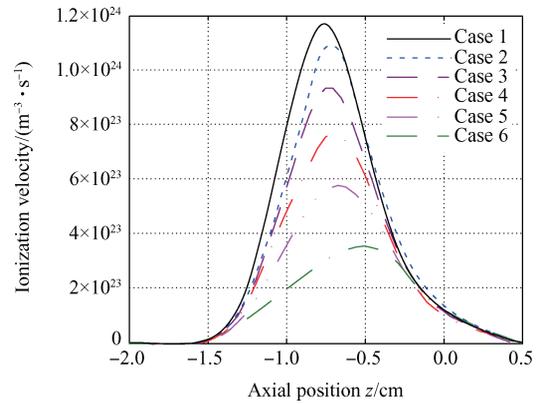
(a) Directional plasma density at the near region of plume flow at case 1



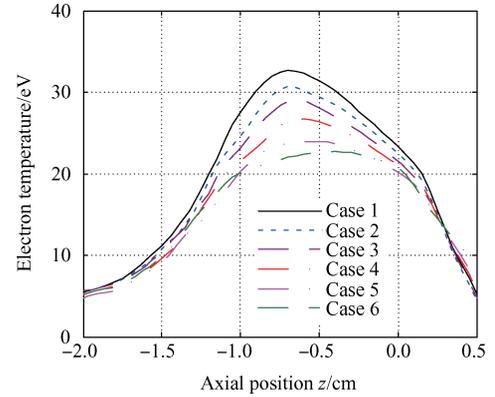
(b) Directional plasma density at the near region of plume flow at case 6

Fig. 6 Comparison of directional plasma density at the near region of plume flow at case 1 and case 6

如图7,可见随着阳极供气流量的降低,主电离区位置在向出口缓慢移动的同时,最大的电离速率



(a) Change of ionization velocity



(b) Change of electron temperature

Fig. 7 Comparison of ionization velocity and electron temperature under different gas flow rate in discharge channel

Table 1 Primary parameter of the magnetic configuration in different working condition

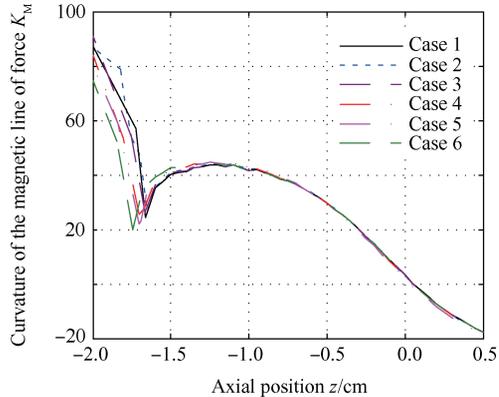
Case	I_p/A	Coil current $J_1, J_2, J_3/A$	B_{max}/G	$\nabla B_{max}/(G/m)$	\bar{K}_M/m^{-1}	$\bar{\gamma}_M/(\circ)$
1	4.6	2.8, 3.4, 0	226.2	144.7	32.9	5.20
2	4.41	3.3, 3.5, 0	242.3	155.2	33.5	2.22
3	4.2	4.4, 3.5, 0	264.3	162.2	32.9	-3.78
4	4.25	4.8, 3.5, 0	282.5	171.9	31.7	-5.65
5	4.36	5.5, 3.6, 0	303.0	179.3	31.4	-8.23

Table 2 Effects of gas flow rate on the magnetic focusing in HET-P70

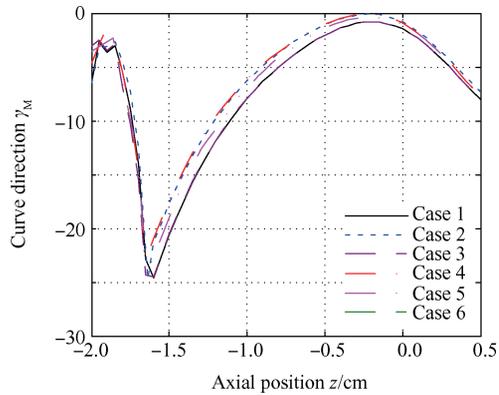
Case	$\dot{m}_a/(mg/s)$	I_p/A	Coil current $J_1, J_2, J_3/A$	B_{max}/G	$\nabla B_{max}/(G/cm)$	Oscillation/%
1	3.2	4.58	4.57, 3.5, 0	272.4	168.1	15.5
2	3.0	4.2	4.4, 3.5, 0	264.3	162.2	8.1
3	2.8	3.9	4.1, 3.13, 0	247.1	153.0	12.8
4	2.5	3.5	3.5, 2.83, 0	219.0	136.4	12.9
5	2.0	2.84	2.5, 2.9, 0	196.7	125.1	12.5
6	1.5	2.03	2.6, 2.0, 0	160.2	98.3	12.2

也在迅速的下降,但工质电离的全宽却基本没有变化,这可能与约束电子运动的强磁场区宽度变化不大有关。可见,随着阳极供气流量的降低,工质电离的集中程度应该是发生了明显的下降。

图8给出了不同阳极供气流量下,磁场曲率和弯曲方向在通道内的分布对比。从对比结果可见,不同供气流量下磁场位形的差别并不大,也就是说即使供气流量不同,但参照放电电流最小的原则优化磁场,则磁场位形实际上是不变的,不论是磁力线的弯曲程度还是其曲率方向,这为优化工况下的磁场位形设计带来了很大的便利。但这里需要注意的是每个工况的磁场曲率和弯曲方向角沿通道轴向的差异却是非常大,而供气流量变化恰恰改变了离子产生位置的分布比例,这很有可能是导致发动机羽流形态发生较大变化的重要原因。



(a) Change of curvature of the magnetic line of force



(b) Change of curve direction

Fig. 8 Comparison of curvature of the magnetic line of force and curve direction under different gas flow rate in discharge channel

综上所述,HET-P70在供气流量变化时,羽流形态实际上发生了很大的变化,表明通道内的一些基本物理过程发生了较大的改变。通过前面简单的分析可见,改变阳极供气流量后虽然通道内的磁场位形几乎没有变化,但电离区的位置、宽度和电离速率峰值却发生了显著的改变,这会导致生成的离子所占有的非均匀磁场参数范围改变。后续工作将对此进行进一步研究。

3.2 放电电压对等离子体束聚焦的影响

放电电压是决定等离子体束的离子平均运动速度,即比冲的大小。其主要机理是通过增强轴向电场,使离子获得更大的喷出速度。但在磁力线等势化的作用下,通道内的径向电场也会增强。轴向和径向的电场变化有可能通过影响离子的运动轨迹,来改变等离子体束的聚焦状态。因此,有必要较为细致地讨论一下,放电电压变化对通道内径向电场及等离子体束流运动的影响。

3.2.1 实验条件及工况选择

实验三:为了能够保证判定性地反映出放电电压对等离子体束聚焦状态的影响,实验过程中除放电电压之外,需要尽量保证供气流量、磁场位形、振荡、空心阴极状态等都不变。

实验时以 $U_p=400V$, $m_a=3mg/s$ 时的优化状态为基准工况,在保持磁场位形、阴极耦合电压和低频振荡等参数基本不变的情况下,放电电压仅调节到了420V和382V,但此时羽流的形态已经发生了较大的变化。在这两个放电电压下,记录发动机的工作状态,测量了通道内的工质电离和电子能量沿通道的分布,以及羽流近场区的定向等离子体密度分布等参数,用来反映等离子体束的聚焦特性。实验中三种工况下HET-P70的放电特性数据可参见表3。

3.2.2 实验结果及分析

图9分别给出了420V和382V放电电压条件下,羽流近场区定向等离子体密度的探针测量结果。可见,提高放电电压,等离子体束出现了过聚焦的现象,而降低放电电压则呈现发散的趋势。在没有改变磁场,HET-P70低频振荡变化又不大的前提下,很可能是通道内的电离和加速过程发生了重要变化,

Table 3 Effect of discharge voltage in the HET-P70

Case	U_p/V	I_p/A	$SH_p/\%$	$\alpha_{0.95}/(^{\circ})$	$\alpha_{0.9}/(^{\circ})$	Z_s/mm	L_{ion}/mm
1	420	4.4	12.5	23.7	19.9	0.1	11.9
2	400	4.2	8.3	11.5	10.0	0.9	10.9
3	382	4.3	15.7	33.4	27.5	0.8	12.6

才导致了上述实验结果的出现。

图 10 给出了通道内工质电离和电子能量分布的光谱测量结果。观察发现在变化放电电压时,电离位置和电子能量都有较大的变化。电离宽度在放电电压提高时变化不大,而电离峰值位置则向阳极移动,整个通道内的电子能量也在提高,特别是在出口区。降低放电电压,电离峰值位置则向出口移动,两种情况下因发动机振荡增加,出口附近工质的电离量也有所增大。电离位置的这种变化应该是导致等离子体束聚焦程度改变的重要原因。根据此时的磁场位形分析结果可知,电离区靠近阳极,其结果就出现了类似于图 4 中工况 5 的羽流,即形成了过聚焦的等离子体束。而电离区的外移则恰恰相反形成了类似于图 4 中工况 1 的发散结果。

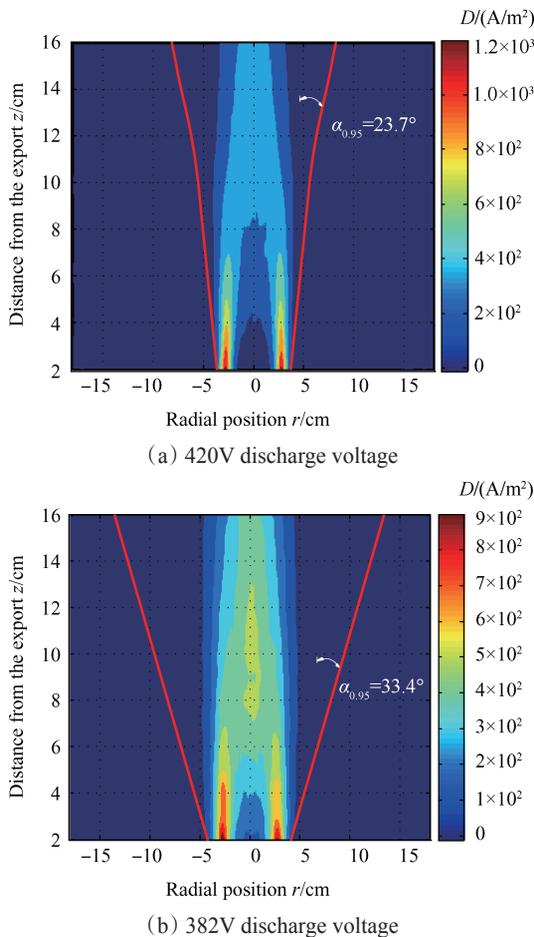


Fig. 9 Distribution of directional plasma density in the plume flow near region under different discharge voltage

综上所述,改变 HET-P70 的放电电压,使等离子体束的聚焦状态发生了较大改变,通过通道内的光谱测量结果显示,电离区位置和集中度等参数的变化是引起羽流状态变化的根本原因。增加 HET 的放电电压,会使电离区向通道内稍稍移动,而减小放电

电压则情况恰好相反。电子能量与电离速率分布几乎具有相同的规律。

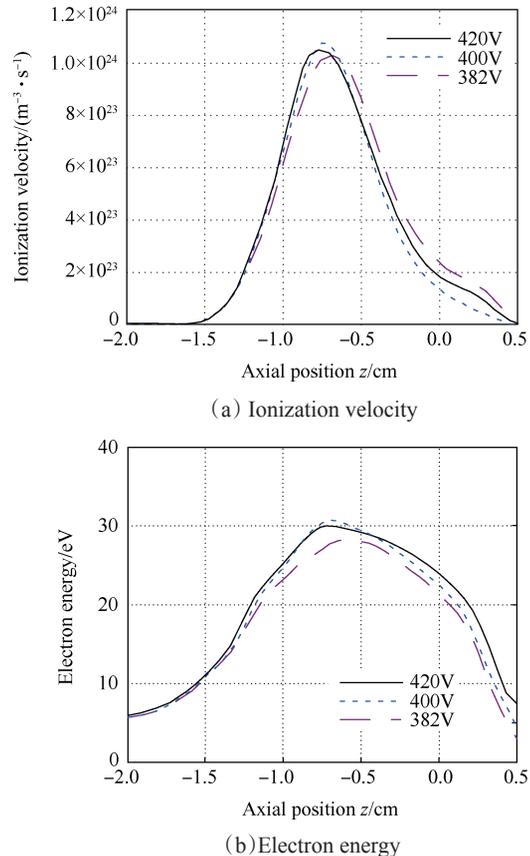


Fig. 10 Effects of discharge voltage on ionization velocity and electron energy

4 结论

本文通过对氩工质 HET-P70 的工况调节,使其在一定的参数范围内获得了优化的等离子体聚焦状态,通过得到的实验数据分析了调节磁场位形和放电电压、阳极工质流量对氩等离子体束聚焦的影响规律。

(1) 磁场位形的变化主要是通过磁力线弯曲方向、曲率来体现的,通过影响等离子体加速运动过程,改变束聚焦状态。相对而言,磁力线弯曲曲率对束聚焦状态影响较小,而磁力线弯曲方向会对离子加速运动方向产生较大的影响,是束聚焦状态变化的最重要因素。调节磁场位形,可以优化选择特定磁场,形成一种适合于氩等离子体的磁聚焦磁场构型,使得其束聚焦达到理想状态,如实验一中工况 3 羽流发散角可以减小到 11.3°。

(2) 离子的产生位置对其射出方向具有非常重要的影响,而阳极供气流量和放电电压的变化会带来中性原子主电离区位置变化。电离产生的等离子体径向运动仅能在恰当的磁场位形下进行矫正,深

入通道和靠近出口都会使等离子体束发散。因此,合理的电离区位置和电离宽度,是实现等离子体束聚焦的关键。

参考文献:

- [1] Linnell J A. An Evaluation of Krypton Propellant in Hall Thrusters [J]. *ProQuest Dissertations and Theses*, 2007, 1105(316).
- [2] Fernandez R C. Theoretical Variations in SPT Performances with the Use of Krypton as Propellant [C]. *Fukuoka: 56th International Astronautical Congress*, 2005.
- [3] Hofer R R. Development and Characterization of High-Efficiency, High Specific Impulse Xenon Hall Thrusters [D]. *Michigan: University of Michigan*, 2004: 1-50.
- [4] Morozov A I, Esipchuk Y V, Kapulkin A M, et al. Effect of the Magnetic Field on a Closed-Electronic-Drift Accelerator [J]. *Soviet Physics Technical Physics*, 1972, 17(3): 482-487.
- [5] Морозов А И, Лебедев С В. Плазмооптика [J]. *Вопросы Теории Плазмы*, 1974, 8: 247.
- [6] Bugrova A I, Lipatov A S, Morozov A I, et al. Global Characteristics of an ATON Stationary Plasma Thruster Operating with Krypton and Xenon [J]. *Plasma Physics Reports*, 2002, 28(12): 1032-1037.
- [7] Linnell J A, Gallimore A D. Internal Plasma Structure Measurements of a Hall Thruster Using Xenon and Krypton Propellant [C]. *Princeton: 29th International Electric Propulsion Conference*, 2005.
- [8] Linnell J A, Gallimore A D. Efficiency Analysis of a Hall Thruster Operating with Krypton and Xenon [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 22(6): 1402-1412.
- [9] 丁永杰, 扈延林, 颜世林, 等. 聚焦磁场及发散磁场对霍尔推力器壁面侵蚀的影响研究 [J]. *推进技术*, 2015, 36(5): 795-800. (DING Yong-jie, HU YAN-lin, YAN Shi-lin. Effects of Focusing and Diverging Magnetic Field Topology on Hall Thruster Channel Wall Erosion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(5): 795-800.)
- [10] Morozov A I, Bugrova A I, Desyatskov A V, et al. ATON-Thruster plasma Accelerator [J]. *Plasma Physics Reports*, 1997, 23(7): 587-597.
- [11] 李 鸿. 霍尔推力器寿命周期内电子近壁传导特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [12] 宁中喜, 于达仁, 魏振磊. 空心阴极加热功率对霍尔推力器性能的影响 [C]. 成都: 第十三届全国等离子体科学技术会议, 2007.
- [13] 宁中喜. 霍尔推力器羽流发散角的定向探针测量方法 [J]. *推进技术*, 2011, 32(6): 895-899. (NING Zhong-xi. Hall Thruster Plume Divergence Angle Directional Probe Measurement Method [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(6): 895-899.)
- [14] Ning Z, Liu H, Yu D, et al. Effects of Ionization Distribution on Plasma Beam Focusing Characteristics in Hall Thrusters [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(22).
- [15] Shastry R, Hofer R R, Reid B M, et al. Method for Analyzing E×B Probe Spectra from Hall Thruster Plumes [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(6).
- [16] Marrese C, Gallimore A D, Haas J, et al. An Investigation of Stationary Plasma Thruster Performance with Krypton Propellant [C]. *San Diego: 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 1995.

(编辑:梅 瑛)