

阳极层霍尔推力器的阳极分段形式 对内磁极刻蚀速率的影响^{*}

许 丽^{1,2}, 王世庆^{1,2}, 赵 杰^{1,2}, 李 建^{1,2}, 李平川², 张 帆²

(1. 成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614007; 2. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 推力器内径向电势和等离子体的分布会影响轰击推力器器壁的离子运动, 本文通过阳极的不同分段形式来改变推力器内电势分布, 进而研究推力器阳极的不同分段形式对内磁极刻蚀速率分布的影响。利用等离子体注入控制技术(PIC)方法研究了入射离子的数量和能量分布, 对内磁极内表面和上表面的刻蚀速率进行仿真计算。由结果可知: 入射到内磁极两个面上的离子数量和能量都是在三分段阳极时达到最大值, 其它三种情况偏低。对于内磁极内表面和上表面的刻蚀速率也是在三分段阳极时最大, 其次是单阳极, 二分段阳极和四分段阳极的刻蚀速率最小。将单阳极和二分段阳极时刻蚀速率的试验结果进行了对比, 验证了此研究结果的正确性, 为下一步提高推力器的寿命研究提供了参考数据和研究方法。

关键词: 等离子体; 阳极层霍尔推力器; 刻蚀速率; PIC模拟; 分段阳极

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2021) 08-1915-06

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200037

Effects of Anode Segmented Form of Anode Layer Hall Thruster on Etching Rate of Inner Magnetic Pole

XU Li^{1,2}, WANG Shi-qing^{1,2}, ZHAO Jie^{1,2}, LI Jian^{1,2}, LI Ping-chuan², ZHANG Fan²

(1. Engineering and Technical College, Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China;

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Due to the radial potential and plasma distribution in the thruster, the motion of ions that bombard the thruster wall will be affected. The potential distribution in the thruster is changed by different segments of the anode, and then the etching rate distribution of the internal magnetic pole is studied by different segments of the anode. First, plasma injection control (PIC) method is used to study the number and energy distribution of the incidence ions, and then the etching rate of the inner and upper surfaces of the inner pole is simulated. It can be seen from the results that the number and energy of the ions incidence on the two sides of the inner magnetic pole reach the maximum value when the anode is divided into three sections, while the other three cases are relatively low. The etching rate of the inner surface and the upper surface of the inner magnetic pole is also the largest in the three-segment anode, followed by the single anode, and the two-segment anode and the four-segment anode have the smallest etching rates. Finally, by comparing the experimental results of etching rate of single anode and two segmented anode, the correctness of the research results is verified, which provides reference data and

^{*} 收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2020-02-27。

基金项目: “西物创新行动”项目(191RCZJ037); 四川省科技厅项目(2019YJ0705)。

通讯作者: 许 丽, 硕士, 讲师, 研究领域为电推进及电气自动化。E-mail: 595874272@qq.com

引用格式: 许 丽, 王世庆, 赵 杰, 等. 阳极层霍尔推力器的阳极分段形式对内磁极刻蚀速率的影响[J]. 推进技术, 2021, 42(8): 1915-1920. (XU Li, WANG Shi-qing, ZHAO Jie, et al. Effects of Anode Segmented Form of Anode Layer Hall Thruster on Etching Rate of Inner Magnetic Pole[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(8): 1915-1920.)

research methods for the next step of improving the life of thruster.

Key words: Plasma; Anode layer Hall thruster; Etching rate; PIC simulation; Segmented anode

1 引 言

典型的霍尔等离子体推力器是一种在具有同轴通道的交叉电磁场放电装置,其离子被静电加速而离开放电等离子体区域^[1-3]。反映推力器性能的离子速度、电离效率和束流的汇聚性能等都受到推力器内电场和磁场强度的影响。推力器加速区的长度及其相对于磁场分布的位置主要取决于电子的迁移率,并且会受到通道壁材料特性和等离子体与壁相互作用的强度影响^[4-6]。如果更换通道壁材料(比如从陶瓷到金属),即使不改变推力器的性能,也可能导致推力器内离子处于不同的加速状态,或推力器内等离子体的不同空间分布^[7-8]。这是由于在给定的放电电压下不同的放电通道壁材料,整个通道壁的二次电子发射系数和导电性能发生了变化,引起了离子到达壁面的通量变化。但是整个推力器的离子壁面损失和整体特性没有实质性差异^[9-10]。霍尔推力器的通道通常是由陶瓷或金属制成,对于稳态等离子体推力器来说分段电极沿陶瓷壁分段放置。文献[11]对分段电极的稳态等离子体推力器进行了详细的研究,在传统的陶瓷或金属制成通道基础上,使用沿陶瓷通道放置的发射电极或低发射电极来达到控制电极间电场和离子加速度的目的。分段电极情况下的羽流比没有分段电极情况的降低了20%^[12]。Raitses等^[13]对于分段电极中的等离子体电势分布进行了详细的研究,并且对影响推力器特性的工作条件和分段电极的结构进行了分析。结果表明,等离子体电势分布对电极电势的变化几乎没有影响,但与磁场分布和电极位置有关。Alex等^[14]对2kW的分段电极霍尔推力器的特性和离子能量分布进行了研究,使用铍做工质情况下,分段电极结构下的推力器的比冲、推力和性能没有太大的变化,使用铍作为工质的推力器可以使用分段阳极进行操作和热控制,而不会对性能产生显著影响。

对于阳极层霍尔推力器来说,整个放电室内壁为金属壁,且随放电电压的增加阳极上电子电流过大,导致阳极过热而发红的现象。另外,内磁极由于受到离子的长时间的入射,很大程度上降低了推力器的寿命,并且还与推力器的稳定运行有重要的关系。文献[15]对不同推力器阳极的分段形式下的束流特性进行了详细的研究。

本文主要利用仿真和实验手段来研究不同的阳极分段(没有分段的单阳极、两分段阳极、三分段阳极以及四分段阳极)情况下内磁极刻蚀速率的分布,在相同的工况下,分析哪种阳极分段形式有助于提高推力器的寿命。

2 阳极分段形式与仿真方法

2.1 阳极分段形式

阳极层霍尔推力器的结构示意图如图1所示,其中A为内磁极的上表面,B为内磁极的内表面。阳极位于内外磁极之间,其具体的分段形式如图1所示,其中a为没有分段的阳极,b为两分段阳极,c为三分段阳极,d为四分段阳极, αx 为沿径向方向的分段缝隙。在内外磁极之间形成一个环形的磁镜场分布^[16-17],与放电室内的电场分布共同形成交叉的电磁场,在其作用下形成霍尔电流。由于不同的阳极层分段形式导致了电位分布的变化,也就引起了放电室内的霍尔电流的分布不同。进而影响入射到内磁极上的离子数量和能量,直接导致其刻蚀速率的分布存在不同。通过对两分段阳极和无分段阳极的轮辐效应进行的初步研究,得到阳极的分段形式直接会影响到轮辐效应的形式和频率,其等离子体的震荡形式也不相同,震荡形式的不同来源于其内部电磁场分布的变化^[18]。由此也会影响到入射到内磁极的离子特性,进而影响到刻蚀速率的变化。

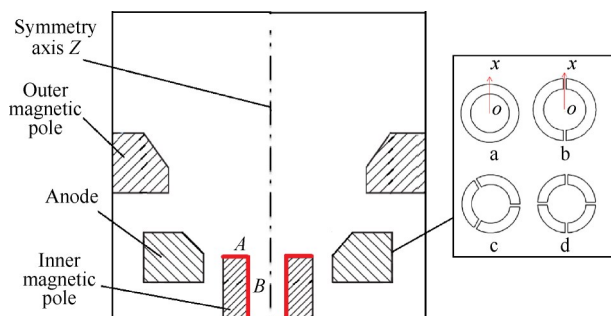


Fig. 1 Simulation area and segmented anode

2.2 仿真方法

首先对阳极层霍尔推力器进行三维几何建模,整个仿真区域的范围是个边长为80mm的正方体区域(如图1所示的仿真区域)。利用PIC粒子模拟方法对其进行三维粒子仿真模拟,其中要把阳极层霍尔推力器的磁场分布数据和三维几何模型导入到

PIC粒子模拟程序之中。为了与实验数据相对比,仿真中设定放电电压为700V,工作气压为0.01Pa,工质气体为氙气。应用蒙特卡洛碰撞来描述粒子的碰撞过程,电子与中性气体的碰撞中考虑了弹性碰撞、激发、电离以及电子和离子的复合几种情况。网格宽度为1mm,共有 5.12×10^5 个网格,初始时刻给了86400个宏电子,这些作为种子的宏电子初始均匀分布。并且设定边界条件为狄拉克边界条件,其时间步长 t_n 设为 1×10^{-10} s,共计算了20万步。由此得到入射到内磁极上的离子能量和入射角以及入射离子数量等参数。之后利用PIC方法得到等离子体物理参数,刻蚀速率 v_s 的计算公式为

$$v_s = \frac{J_b \cdot \cos\theta}{N \cdot q} \cdot \text{Int} \left[\log_2 \frac{E_d + \frac{2m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_0 \cos\theta}{E_d} \right] \quad (1)$$

式中 $\cos\theta$ 为入射角余弦值, E_0 是入射离子的能量, J_b 是以入射角 θ 入射到内磁极表面的离子束流密度, m_1 和 m_2 分别为入射离子的质量和内磁极靶材原子的质量, N 是内磁极靶材的单位体积内的原子数, q 是离子的带电量, E_d 是内磁极材料的能量阈值。

时间步长为 Δt , n 为时间步长的个数,利用刻蚀速率公式 v_s 得到 $\Delta t \cdot n$ 时间内的平均刻蚀速率 $\bar{v}_s$ 为

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n v_{si}}{n \cdot \Delta t} \quad (2)$$

根据 n 个时间步长内的平均刻蚀速率 $\bar{v}_s$ 得到其刻蚀深度,并且以此为基础再次利用PIC粒子模拟得到此时入射到内磁极上的离子能量和角度等参数。如此反复迭代最终计算出20万步时的刻蚀速率的分布情况,具体的计算流程如图2所示。

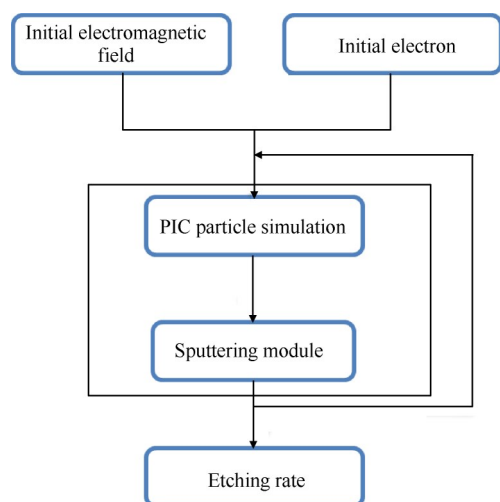


Fig. 2 Process of simulation

3 结果分析

根据文献[19-20]对阳极层霍尔推力器的磁极刻蚀研究可知,入射离子主要分布在内磁极的上表面和内表面,部分入射到外磁极表面。其内磁极的刻蚀程度要高于外磁极的刻蚀,所以首先对入射到内磁极上的离子数量和能量来进行分析。图3为四种不同阳极分段形式下,入射到内磁极内表面(图1中的B面)和上表面(图1中的A面)上的离子数量分布,并且入射到内磁极上的离子数量随着阳极分段数量的增加而增加,在三分段时达到最大值,四分段阳极时入射离子的数量有所回落。

图4为入射到内磁极两个面上的离子能量概率分布,三分段时的入射离子能量比单段阳极时平均高出50eV。而两分段阳极和四分段阳极时的入射离子能量分布基本相同,并且比单段阳极时低了45eV。所以从阳极分段数量对入射量子能量的影响来看,阳极三分段情况下的高能离子略微偏多,其次是单阳极下的高能离子数量较多些。而对于两分段阳极和四分段阳极下的低能入射离子能量数量相对较多。

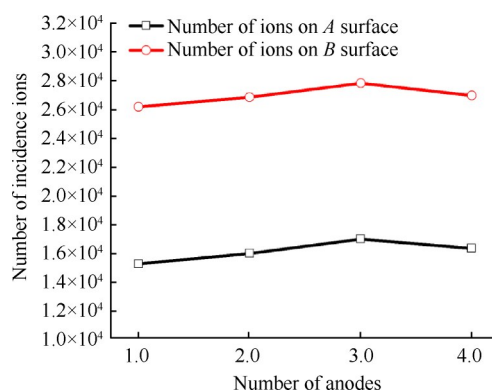


Fig. 3 Change in the number of incidence ions on A and B surface

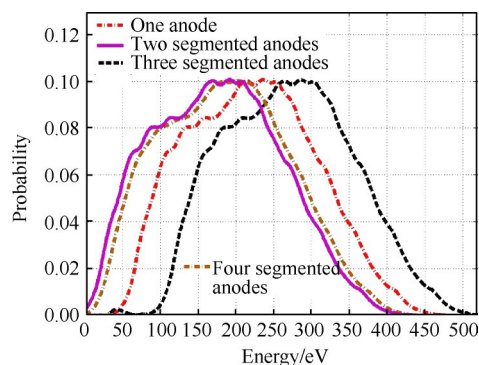


Fig. 4 Probability distribution of incidence ion energy on inner pole

图5为内磁极内表面刻蚀速率的分布,整体来看三分段时的刻蚀速率最大。在轴向坐标 $-6\text{mm}\sim 1\text{mm}$ 的范围内,三分段阳极时的刻蚀速率最大,其余三种情况下的刻蚀速率基本相同。而在轴向 $1\text{mm}\sim 4.5\text{mm}$ 的范围内,三分段刻蚀速率最大,其次是单阳极形式,两分段阳极和四分段阳极的刻蚀速率分布基本上相同。同样由图6可知不同阳极分段形式下的内磁极上表面的刻蚀速率分布,三分段时刻蚀速率最大,其次是单阳极,两分段阳极和四分段阳极基本相同。可见不同的阳极分段形式对内磁极的两个面上刻蚀速率的分布影响是一致的。因为离子径向能量与离子径向运动速度成正比,而离子的径向运动速度是受到径向电势梯度变化的影响。由于在图1的阳极分段空隙上有一个沿着 ox 方向的径向电位分布,在阳极层霍尔推力器放电室的阳极上表面上,对于两分段阳极、三分段阳极、四分段阳极都存在这样的电势起伏,见文献[15]。

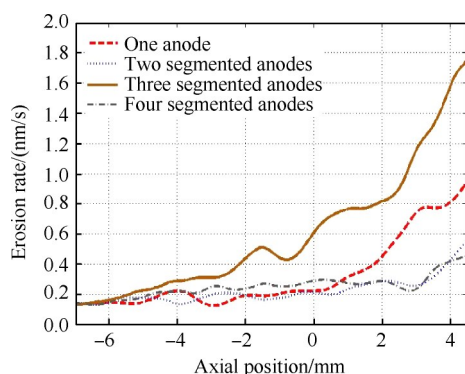


Fig. 5 Etching rate distribution of inner surface of inner pole

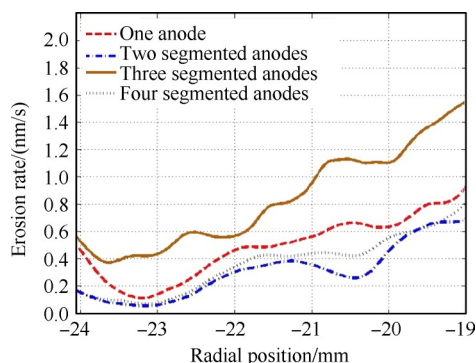


Fig. 6 Etching rate distribution on the top surface of inner pole

图7给出了第20万步时,阳极层霍尔推力器横截面(图1中垂直于 Z 轴的阳极上表面)上的电子密度分布,在图7(a)单阳极时电子在周向的 A, B, C, D

四个区域附近存在一定量的电子聚集,而两分段阳极时的图7(b)电子的聚集区域增多,相对单阳极时的周向分布要均匀一些;图7(c)为三分段阳极时的电子在轴向主要集中在 E 和 F 两个区域,相对于单阳极来说电子分布更趋向集中,周向分布更加不均匀;而由图7(d)可知四分段时的电子密度周向分布比单阳极和三分段阳极时都均匀的多。不同的阳极分段形式,会存在周向上不同的电子密度分布,由此直接导致阳极表面形成不同的电势分布。而内磁极又紧靠阳极,所以必然会引起入射到内磁极上的离子能量的变化。因为推力器结构上的轴对称性,所以两分段阳极和四分段阳极的分段空隙电势分布具有轴对称性。反映到离子的运动情况上来,就是离子运动时的受力具有轴对称性,直接导致了入射离子的能量偏低。而三分段时的入射离子的受力不存在对称性,而导致运动离子的能量偏高。同样从图3入射到内磁极表面的离子数量变化与刻蚀速率大小变化也是一致的。故此得到阳极的偶数分段情况下的刻蚀速率要比奇数分段下的刻蚀速率要小。但是也不能使阳极的分段数量太大,因为这样一方面增加了设计的困难,还有可能带来推力器内轮辐效应不稳定性分布,以及电子的振荡加剧等问题。

为验证此仿真方法的正确性,利用直接快速刻蚀的实验方法。通过真空磁控溅射镀膜技术,基材的厚度为 0.5mm ,在与内磁极形状一样的基材上镀一层纯铜,之后再把内磁极镀膜样品精确地安装在内磁极上。对单阳极形式的阳极层霍尔推力器和两分段阳极的阳极层霍尔推力器进行刻蚀实验测试。推力器的放电电压为 700V ,工质气体质量流量为 1.4mg/s ,工作气压为 0.01Pa ,稳定运行 300min 。通过测定实验前内磁极样品的膜厚 h_1 ,运行一定的时间后在此测定膜的厚度 h_2 。膜的厚度变化 $h=h_1-h_2$ 。再通过内磁极内表面和上表面上的膜厚度变化量 h 计算平均刻蚀速率的大小,由此给出内磁极两个面上的刻蚀速率分布。

$$v = \frac{h_1 - h_2}{t} \quad (3)$$

图8给出了实验得到的刻蚀速率计算结果,整体来看内磁极两个面上的实验结果与仿真结果具有很好的一致性。由于内磁极上表面(图1的 A 面)径向长度只有 5mm ,内磁极的内表面(图1的 B 面)轴向长度为 15mm ,在上表面和内表面分别设置了8个采集点和9个采集点,实验结果是由这些数据采集点的刻

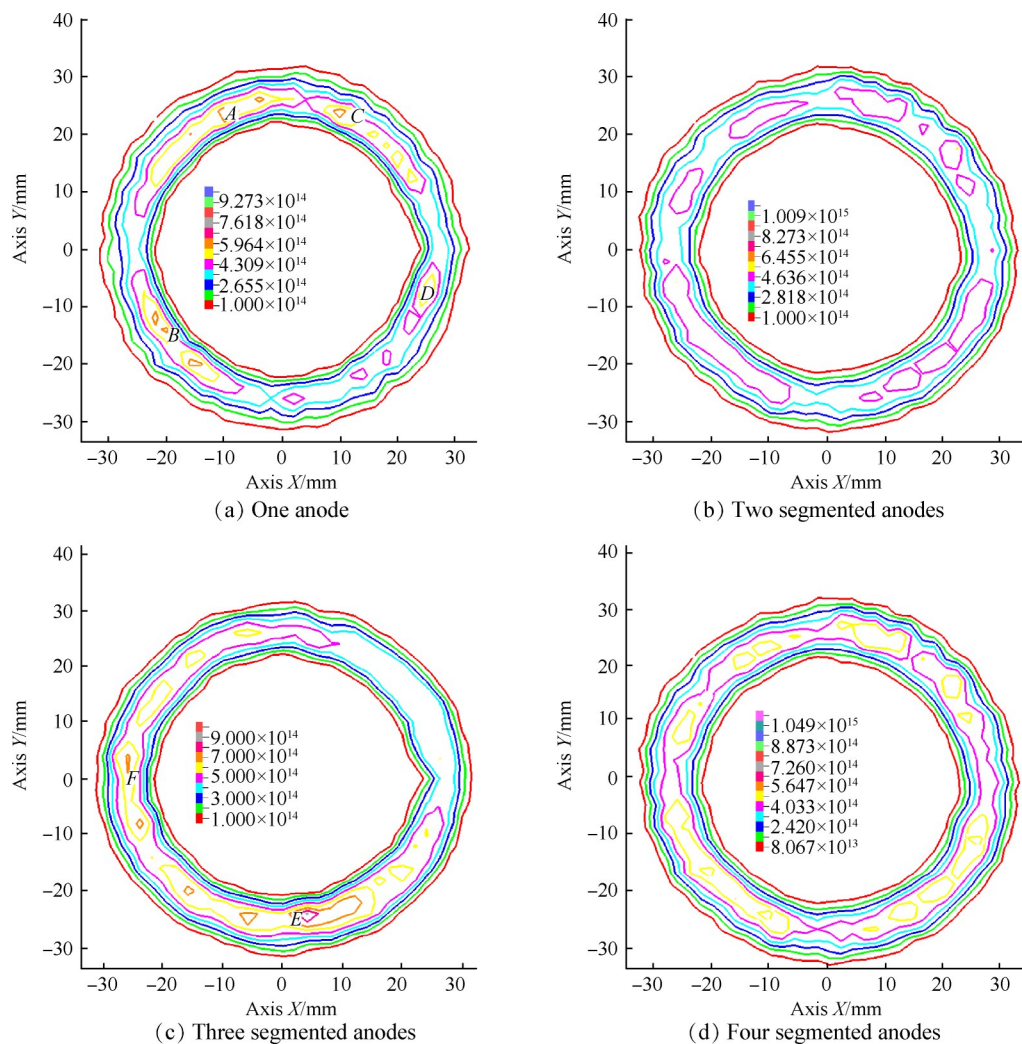


Fig. 7 Electron density distribution on the upper surface of anode

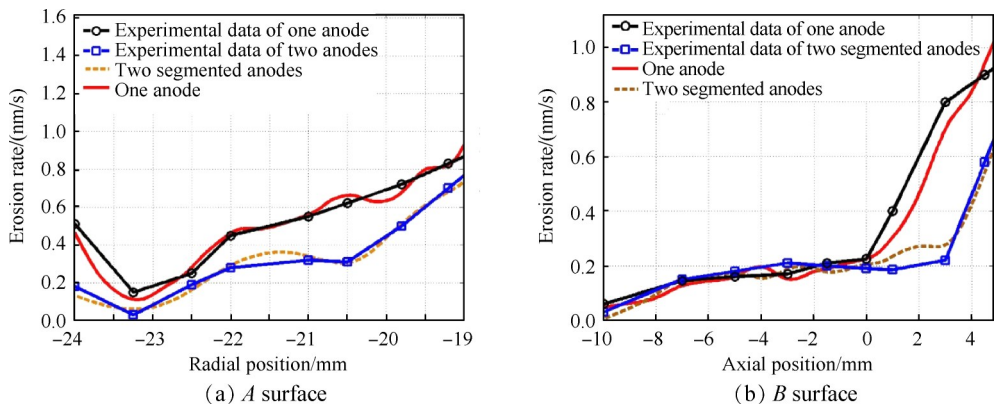


Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results

蚀速率线性拟合得到,故有些区域上与仿真结果存在一定的偏离。但整体刻蚀速率的分布趋势上,两者是一致的。这一方面说明了此刻蚀仿真计算方法的合理性,为阳极层霍尔电推力器寿命评估提供了方便的计算方法;另一方面也为推力器的设计和改进工作提供了可靠的研究方法和数据支持。

4 结 论

通过本文数值仿真和实验研究,得到如下结论:

(1)四种阳极分段形式下,三分段阳极时入射到磁极表面的离子数目最多,入射离子能量也最高;而二分段阳极时入射离子最少,入射能量最低。

(2)内磁极内表面和上表面的刻蚀速率在三分段阳极时最大,其次是单阳极,二分段和四分段阳极时刻蚀速率最小。

(3)实验结果一方面验证了通过仿真得到的二分段阳极下的刻蚀速率最低的结论,同时验证了此仿真方法能够很好地计算刻蚀速率的分布。

致 谢:感谢“西物创新行动”项目和四川省科技厅项目的资助。

参考文献

- [1] Kaufman H R. Technology of Closed-Drift Thruster[J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(1): 78-87.
- [2] Zhurin V V, Kaufmann H R, Robinson R S. Physics of Closed Drift Thrusters[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 1999, (8): 1-20.
- [3] Smirnov A, Raites Y, Fisch N J. Experimental and Theoretical Studies of Cylindrical Hall Thrusters[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(5).
- [4] Morozov A I, Savelev V V. Theory of the Near-Wall Conductivity[J]. *Plasma Physics Reports*, 2001, 27(7).
- [5] Boniface C, Garrigues L, Hagelaar G J, et al. Anomalous Cross Field Electron Transport in a Hall Effect Thruster[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(16).
- [6] Keidar M, Boyd I D, Beilis I I. Plasma Flow and Plasma-Wall Transition in Hall Thruster Channel[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(12): 5315-5322.
- [7] Chesta E, Meezan N B, Cappelli M A. Stability of a Magnetized Hall Plasma Discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(6).
- [8] Bouchoule A, Philippe-kadles C, Prioul M. Transient Phenomena in Closed Electron Drift Plasma Thrusters: Insights Obtained in a French Cooperative Program[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2001, 10(2): 363-377.
- [9] Fruchtmann A, Fisch N J, Raites Y. Control of the Electric-Field Profile in the Hall Thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(3): 1048-1056.
- [10] Choueiri E Y. Fundamental Difference Between the Two Hall Thruster Variants[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(11).
- [11] Fisch N J, Raites Y, Dorf L A. Design and Operation of Hall Thruster with Segmented Electrode[R]. *AIAA* 99-2572.
- [12] Raites Y, Dorf L A, Litvak A A, et al. Effects of Segmented Electrode in Hall Current Plasma Thrusters[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 92(9).
- [13] Fisch N J, Raites Y, Dorf L A, et al. Variable Operation of Hall Thruster with Multiple Segmented Electrodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(4).
- [14] Alex W K, Jerry L R, Dean R M, et al. Performance Characterization and Ion Energy Analysis of a 2kW Hall Thruster with Segmented Anodes[R]. *AIAA* 2006-4997.
- [15] 赵 杰,唐德礼,李平川,等. 阳极层霍尔推进器的阳极分段形式对束流分布的影响[J]. *真空*, 2019, 56(4).
- [16] Tang D L, Zhao J, Wang L S, et al. Effects of Magnetic Field Gradient on Ion Beam Current in Cylindrical Hall Ion Source[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(12).
- [17] Zhao Jie, Tang Deli, Geng Shaofei, et al. Anode Magnetic Shield Effect on Magnetic Field and Ion Beam in Cylindrical Hall Thruster[J]. *Plasma Science and Technology*, 2010, 12(1).
- [18] 赵 杰,唐德礼,李平川,等. 圆柱形阳极层霍尔推进器内轮辐效应的实验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(7): 1676-1680. (ZHAO Jie, TANG De-li, LI Pingchuan, et al. Experimental Study of Rotating Spoke in a Cylindrical Anode Layer Hall Accelerator[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1676-1680.)
- [19] 李宏斌,唐德礼,聂军伟,等. 圆柱形霍尔推进器的三维刻蚀模拟与实验研究[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2015, 35(2).
- [20] 赵 杰,唐德礼,耿少飞. 圆柱形霍尔推力器的内磁极刻蚀研究[J]. *宇航学报*, 2009, 33(2).

(编辑:朱立影)