

磁零点及通道宽度对霍尔推力器 性能影响的数值研究 *

段 萍, 姜博瑞, 孙少娟, 陈 龙, 胡 翔, 宋继磊, 李文庆

(大连海事大学 理学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 磁场位形和通道尺度会改变霍尔推力器等离子体放电过程, 影响推力器的宏观放电特性。为分析磁场和通道宽度对推力器放电性能的影响规律, 针对霍尔推力器轴对称通道结构和放电物理过程建立了 2D3V 物理模型, 采用粒子模拟方法研究了霍尔推力器磁零点磁场位形不同通道宽度的电势、粒子数密度、电子温度、电离速率、比冲及推功比的变化规律。结果表明: 在具有磁零点磁场位形下, 随着通道宽度增加, 通道出口处电势降增加, 加速区缩短, 离子径向速度减少, 壁面腐蚀降低; 当磁零点位置在内壁面, 推力器通道宽度由 14mm 增加到 16mm 时, 推力器比冲和推功比增大, 推力器放电效率提高; 当磁零点位置在通道中轴线或外壁面, 且通道宽度 > 14mm 时, 推力器比冲增大, 推功比减小, 推力器效率下降。

关键词: 霍尔推力器; 粒子; 磁场; 放电特性; 数值模拟

中图分类号: O539 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2021) 09-2152-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200294

Numerical Study on Effects of Zero Magnetic Region and Channel Width on Hall Thruster Performance

DUAN Ping, JIANG Bo-rui, SUN Shao-juan, CHEN Long, HU Xiang, SONG Ji-lei, LI Wen-qing

(School of Science, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The magnetic field configuration and channel size can change the plasma discharge process of Hall thruster and affect the macro discharge characteristics of the thruster. In order to analyze the effects of magnetic field and channel width on the discharge performance of thruster, a 2D3V model is established based on the axisymmetric channel structure and discharge physical process of Hall thruster. By using particle-in-cell simulation, the variation of potential, particle number density, electron temperature, ionization rate, specific impulse and thrust to power ratio in different channel widths in Hall thruster with zero magnetic field region are studied. The results show that when the zero magnetic field region exists, with the increasing channel width, the potential drop at the exit grows, acceleration zone shortens, ion velocity on the radial direction reduces along with the corrosion. When the zero magnetic field region is located near the inner wall, with the increase of channel width from 14mm to 16mm, the specific impulse and thrust to power ratio of the thruster increase by a certain amount, the

* 收稿日期: 2020-05-07; 修订日期: 2020-08-10。

基金项目: 国家自然科学基金 (11975062; 11605021); 辽宁省自然科学基金 (201601074); 中央高校基本科研业务费专项资金 (3132018234)。

作者简介: 段 萍, 博士, 教授, 研究领域为霍尔推力器等离子体数值模拟。

通讯作者: 陈 龙, 博士, 讲师, 研究领域为霍尔推力器等离子体数值模拟。

引用格式: 段 萍, 姜博瑞, 孙少娟, 等. 磁零点及通道宽度对霍尔推力器性能影响的数值研究[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 2152-2160. (DUAN Ping, JIANG Bo-rui, SUN Shao-juan, et al. Numerical Study on Effects of Zero Magnetic Region and Channel Width on Hall Thruster Performance[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9): 2152-2160.)

discharging efficiency of the thruster is enhanced. When the zero magnetic field region is located near the central axis or the outer wall, while the channel width exceeds 14mm, the specific impulse increases, but the thrust to power ratio of the thruster decreases along with the efficiency.

Key words: Hall thruster; Particle; Magnetic field; Discharge characteristics; Numerical simulation

1 引言

霍尔推力器又称稳态等离子体推力器,其具有质量轻、体积小、比冲高、寿命长和控制精度高等特点,现已广泛应用于航天器姿态控制、位置保持和轨道转移等需要高精度控制的空间推进任务^[1-4]。霍尔推力器具有轴对称结构(图1),主要由三部分构成:环状阳极和置于推力器外侧适当位置的阴极;内外磁极等导磁材料组成的磁路;位于阳极下游的通道放电区域^[5]。霍尔推力器的工作原理为:电子从外置空心阴极发射而出,被交叉的电磁场捕获后在推力器放电通道内做霍尔漂移运动,与从阳极进入的推进剂分子发生碰撞电离后形成等离子体,其中的离子在轴向电场作用下加速喷出并产生推力^[6-7]。影响推力器性能的主要有阳极电压^[8]、磁场位形^[9]、通道壁面材料及通道尺寸等因素^[10]。

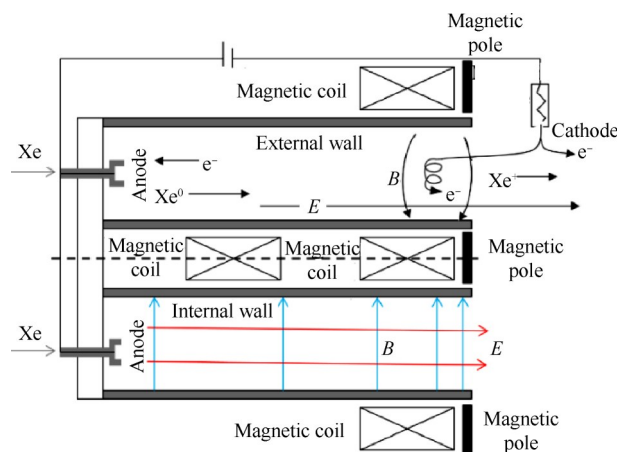


Fig. 1 Two-dimensional profile and schematic diagram of the Hall thruster

霍尔推力器的通道尺寸会显著影响其放电特性和性能参数。2002年,Bugrova等^[11]首次提出了推力器放电通道宽度参数设计要求的相似准则数 $\alpha \equiv mb/S$,其中 m 是质量流量, S 是通道横截面积, b 是通道宽度。2005年,Raitses等^[12-13]利用嵌套陶瓷套筒的方法设计了不同通道宽度的推力器,实验测量了两种通道宽度等离子体电势分布,发现电势分布影响离子加速区的位置。霍尔推力器数值模拟方面,PIC(Particle-in-cell)粒子模拟得到广泛的应

用^[14-15]。Sydorenko等^[16-17]利用粒子模拟方法研究了壁面二次电子发射效应,发现当通道宽度连续变化时,二次电子发射系数和电子温度等参数的变化都是非单调的。李杰等^[18]研究了霍尔推力器不同的通道宽度对等离子体电离特性的影响,发现当宽度增加到一倍以后,电离主要发生在放电通道的中部区域。目前,为减少推力器自身体积,提高推功比及航天器的有效载荷和机动灵活性,研究推力器不同通道宽度对等离子体放电特性的影响是十分必要的^[19-21]。此外,霍尔推力器中磁场对放电过程具有主导作用,磁场通过约束放电通道中的电子分布影响电导率,进而控制电场分布和离子运动轨迹及加速效果。在对磁场位形的研究中,Garrigues等^[22]通过数值模拟方法研究了不同磁场位形下推力器的放电特性,结果表明,放电通道的磁场位形具有零磁场区时,放电电流更加稳定,离子对壁面轰击作用更小。Fruchtman等^[23]研究了磁场曲率与羽流发散角的关系,研究表明,当电离区位于磁零点附近时,羽流发散角显著减小。日本大阪工业大学针对THT-IV型霍尔推力器的研究发现,在磁场形状固定条件下,通道长度对放电特性影响显著,当通道长度为20mm,通道出口处的磁场强度为0.015T时,放电通道中的离子加速效果好,推力器性能最优^[24]。综上所述,目前针对霍尔推力器通道宽度的模拟研究主要是探索其电离和二次电子发射特性的影响,而对于通道磁零点不同磁场位形下通道宽度与推力器放电特性关系的研究也相对集中于实验研究。因此,本文针对ATON-P70霍尔推力器通道不同宽度和不同磁零点位置的磁场位形,采用粒子模拟方法研究推力器等离子体放电过程及其性能参数变化规律。

ATON-P70霍尔推力器采用三个励磁线圈共同产生磁场,在阳极附近形成带有磁零点的磁场位形,这种凸向阳极的磁场具有很大的磁场梯度和曲率半径,有利于离子向通道中心线聚集。本文针对ATON-P70推力器放电通道宽度和磁场磁零点位置进行优化设计,根据推力器实际尺寸及通道等离子体放电物理过程建立2D3V轴对称物理模型,研究不同磁零点位置推力器不同通道宽度的电势、粒子数密度、电

子温度、电离速率、比冲及推功比的变化规律,分析不同通道宽度对推力器放电特性的影响。

2 物理模型和磁场位形

2.1 模拟区域和磁零点磁场

根据霍尔推力器放电通道的轴对称结构特点,建立二维空间坐标 (z,r) 和三维速度坐标 (v_r,v_θ,v_z) 的物理模型, z 和 r 分别代表通道轴向和径向位置, v_r,v_θ 和 v_z 分别代表径向、角向和轴向速度。图2表示推力器不同放电通道宽度模拟区域示意图,其中 r_n 为内壁面半径, r_w 为外壁面半径, Δr 为通道宽度,即 $\Delta r=r_w-r_n$ 。P70霍尔推力器放电通道宽度通常为14mm,内外铁磁材料构成的磁极距离为21.5mm^[25]。在保持通道中轴线位置不变情况下,取五种不同通道宽度 $\Delta r_1=10\text{ mm},\Delta r_2=12\text{ mm},\Delta r_3=14\text{ mm},\Delta r_4=16\text{ mm},\Delta r_5=18\text{ mm}$ 。考虑内外陶瓷壁面本身具有宽度,故最大通道宽度取18mm。在数值模拟中,采用了增大真空介电常数的方法来加快收敛速度,通过增加介电常数,选取小于德拜长度的0.5mm作为轴向和径向的空间步长,时间步长取 $0.1\omega_p^{-1},\omega_p$ 为等离子体回旋频率,阳极电压 $U_d=400\text{ V}$,通道长度 $z=30\text{ mm}$ 。当模拟结果达到稳定后,通过对最后一千个步长的数据进行平均,得到推力器的推力、比冲和阳极效率等参数值。推力 F 可通过统计一定时间内通道出口喷出离子的轴向动量(根据牛顿动量定理)得到。比冲 $I_{sp}=F/(\dot{m}g)$,其中 $\dot{m}$ 代表放电工质质量流量, g 代表重力加速度。阳极效率 $\eta_d=F^2/(2\dot{m}U_dI_d)$, U_d 和 I_d 分别代表放电电压和电流。

表1表示推力器不同通道宽度氮化硼壁面内外径及氙工质的流量。实验中,推力器通道宽度为14mm时,工质流量1.56~5.47mg/s,因为当流量<1.56mg/s时推力器不能点火,流量>5.47mg/s时通道陶瓷壁面变红,推力器过热^[25]。在此范围内选取工质流量2.5mg/

s,并通过计算得到了稳定放电。由表1可知当通道宽度增加时工质流量也相应增加,以保持通道工质密度相同。

Table 1 Inner and outer diameters and propellant mass flow rate of the thruster

$\Delta r/\text{mm}$	r_n/mm	r_w/mm	$\dot{m}/(\text{mg/s})$
10	23.5	33.5	1.79
12	22.5	34.5	2.14
14	21.5	35.5	2.50
16	20.5	36.5	2.86
18	19.5	37.5	3.21

图3表示推力器不同通道宽度的三种磁场分布,通过仿真软件FEMM改变推力器励磁线圈的安匝数、调节磁场的磁零点位置得到。图3中三种磁场位形分布的磁零点位置分别靠近推力器通道内壁面、中轴线及外壁面,依次设为磁场I,磁场II及磁场III。

表2表示推力器不同磁场分布励磁线圈匝数和电流参数。在表2中, N_n,N_w 及 N_l 分别表示内线圈匝数、外线圈匝数及辅助线圈匝数。 I_n,I_w 及 I_l 分别表示内线圈电流大小、外线圈电流大小及辅助线圈电流大小。由表2可知,可通过调节内外线圈安匝数使电流 I_n 增大, I_w 减小,辅助线圈匝数使电流 I_l 先减小再增大,依次得到不同磁零点位置的磁场分布磁场I,磁场II和磁场III。三种磁场分布通道出口中轴线处磁场强度均为280G。

2.2 物理模型及边界条件

在霍尔推力器放电通道内,等离子体自洽产生的磁场远小于外加磁场,可以忽略。静电模型粒子满足泊松方程

$$\nabla^2\Phi=-\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(1)

式中 ρ 和 ϵ_0 分别表示电荷密度和真空介电常数,

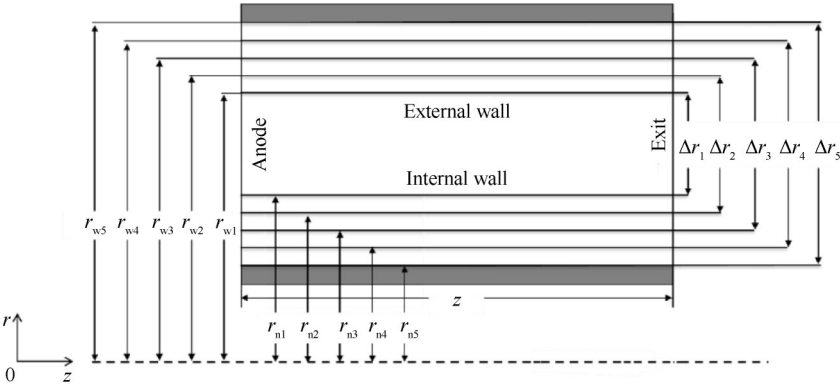


Fig. 2 Diagram of simulation area with different discharge channel widths

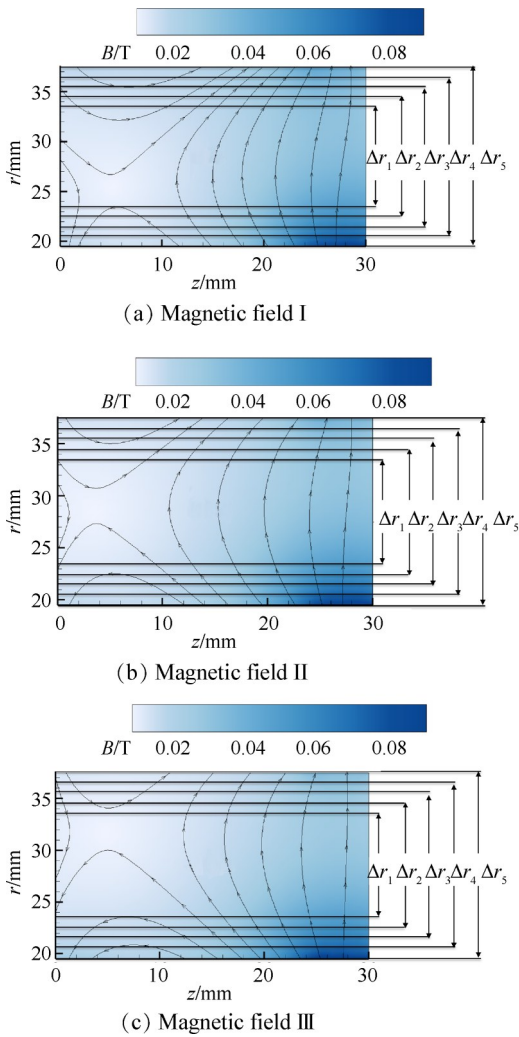


Fig. 3 Magnetic field configurations in the channel with different channel widths

Table 2 Excitation coil turns and current parameters of the different magnetic field configurations

Magnetic field	N_n	I_n/A	N_w	I_w/A	N_f	I_f/A
I		1.65		5.60		4
II	250	1.90	65	3.95	16	2
III		2.25		2.80		5

Φ 表示电势。由于霍尔推力器放电通道为轴对称结构,故采用二维柱坐标系表示,包含轴向 z 和径向 r 的二维泊松方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \quad (2)$$

式中 n_i 和 n_e 分别表示离子和电子数密度, e 表示单位电荷。在平行于 z 和 r 方向上分别以等空间步长划分网格,用 i, j 分别表示 z 和 r 方向上的网格计数,对式(2)采用中心差分法化简,可得

$$\begin{aligned} & \frac{(\Delta r)^2}{(\Delta z)^2} (\Phi_{i+1j} + \Phi_{i-1j}) - 2 \left(1 + \frac{(\Delta r)^2}{(\Delta z)^2} \right) \Phi_{ij} + \\ & \left(\frac{r_{ij+\frac{1}{2}}}{r_{ij}} \Phi_{ij+1} + \frac{r_{ij-\frac{1}{2}}}{r_{ij}} \Phi_{ij-1} \right) = -\frac{(n_i - n_e)_{ij}}{\epsilon_0} (\Delta r)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)求解较为困难,因此引入虚拟时间 t' ,将式(2)变为抛物形方程^[26]为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t'} = \nabla^2 \Phi - s \quad (4)$$

式中 s 为方程(3)中右端的源项,式(4)通过空间差分后采用 DADI(Dynamic alternating direct implicit)方法求解。当 $t' \rightarrow \infty$, $\frac{\partial \Phi}{\partial t'} = 0$ 时,求得电势 Φ ,进而求得电场。粒子运动采用 Boris 算法计算。对中性粒子的分布采用流体模拟方法描述,即在假定通入的气体速度后,使用连续性方程描述中性粒子的运动,其中源项考虑电离和复合的动态过程,求得原子在通道内的粒子密度分布。模拟中考虑了电子与原子的一价电离、激发和弹性碰撞,以及原子间的碰撞。采用蒙特卡洛(Monte Carlo collision, MCC)方法处理电子与原子的碰撞,采用直接蒙特卡洛(Direct simulation of Monte Carlo, DSMC)方法处理原子间的碰撞。

模拟中阳极为导体边界,使用第一类边界条件,电势固定为 400V,从阳极表面发射的所有粒子均服从半麦克斯韦分布。电子与阳极发生碰撞,认为其进入外部回路;离子与阳极碰撞,则被电子复合成原子。出口处使用第一类边界条件,电势取 0,所有粒子到达出口视为喷出。

推力器通道壁面的电势满足第二类边界条件,是通过表面电荷密度求解垂直于壁面电场,边界条件可以表示为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (5)$$

式中 σ 为电荷密度。推力器通道壁面为氮化硼绝缘材料,采用改进后的 Morozov 二次电子发射模型^[26-30],能量为 ϵ 的入射电子打到绝缘壁面时可能出现壁面沉积、弹性反射、打出一个二次电子、打出两个二次电子四种情况。

电子在壁面沉积的概率为

$$W_0(\epsilon) = P_0 \exp \left(-\frac{\epsilon^2}{\alpha_0} \right) \quad (6)$$

电子发生弹性反射的概率为

$$W_r(\epsilon) = P_r \exp \left(-\frac{\epsilon^2}{\alpha_r^2} \right) \quad (7)$$

打出两个二次电子的概率为

$$W_2(\varepsilon) = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{\alpha_2^2}\right) \quad (8)$$

打出一个二次电子的概率为

$$W_1(\varepsilon) = 1 - W_0(\varepsilon) - W_r(\varepsilon) - W_2(\varepsilon) \quad (9)$$

氮化硼材料二次电子发射参数为 $P_0 = 0.5, \alpha_0 = 43.5, P_r = 0.5, \alpha_r = 30, \alpha_2 = 127.9$ 。

3 模拟结果与讨论

3.1 电势、电子温度及电离率分布

推力器放电通道中的正交电磁场将电子约束在通道出口附近区域做周向的电漂移运动,电子向阳极方向的传导过程决定了通道内的电势分布。图4表示三种磁场位形不同通道宽度情况中轴线电势分布,由图可知,随着通道宽度的增加,电势峰值呈逐渐升高的趋势,离子在加速电场中获得更高能量;电势峰值位置随着通道宽度增加向通道出口处移动,加速区逐渐缩短。这是因为当推力器通道宽度增加时,壁面附近的磁感应强度增大,对电子的束缚变强,电子做周向霍尔漂移运动的区域更靠近出口处;同时推力器面容比减小,电子与壁面相互作用减弱,降低了近壁电导率,导致电势降区域向通道出口移动,离子束流聚焦效果好,羽流发散角减小。在三种磁场位形下,电势分布规律基本相同,表明磁零点位

置对电势轴向分布的影响较小。

图5所示为三种磁场位形下不同通道宽度的电子温度分布。由图可知,三种磁场位形下,随放电通道宽度增加,电子温度峰值大小呈现非单调变化,而峰值位置随通道宽度增加均向出口处移动。当磁零点位于轴线上时,通道中心位置两侧壁面二次电子发射减少,低能量电子数量减少,导致电子温度较高。电子温度峰值位置直接影响原子电离过程,使电离区向通道出口移动。由图4电势分布可知随通道宽度增加,出口附近电势梯度增加,电子获得能量更快,故电子温度峰值位置更靠近出口。电子温度峰值大小出现非线性变化趋势,这与Sydorenko等^[16-17]关于通道宽度连续变化时电子温度非单调变化的实验结果相一致。

推力器放电通道氙原子的电离率主要受电子温度及电子数密度的影响,电离率的分布状态反映了电离区的长度和位置,图6所示为三种磁场位形下不同推力器通道宽度的电离率分布。由图可知,在三种磁场位形下,随放电通道宽度增加,电离率峰值区域变窄且向通道出口方向移动,峰值大小仍呈现非线性变化。主要原因一方面通道宽度增加后面容比减小,电子与壁面间作用减弱,二次电子数量减少,通道整体电子温度升高,与原子碰撞电离截面变大,碰撞平均自由程变短,离子加速区被压缩,电离

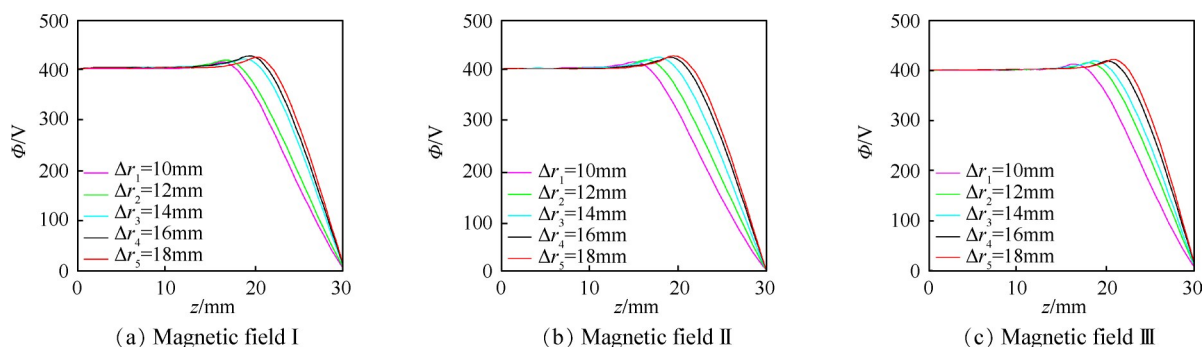


Fig. 4 Potential distribution on the central axis with different magnetic fields and channel widths

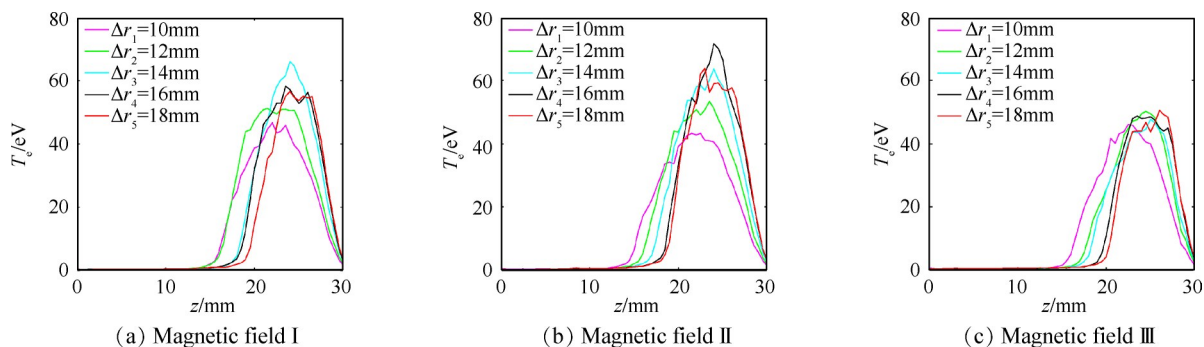


Fig. 5 Electron temperature distribution on the central axis with different magnetic fields and channel widths

率峰值变窄;另一方面电子温度峰值的非线性变化引起了电离率峰值非线性变化。由于离子主要从加速区获得能量,加速区越短,则更有效减少离子在加速过程中在径向上的能量损耗,可有效降低壁面腐蚀,延长推力器寿命。

3.2 离子数密度、径向速度及粒子与壁面碰撞频率

霍尔推力器放电通道内等离子体会与壁面产生相互作用,不同通道宽度会导致电子与壁面碰撞损耗的能量发生变化,进而影响通道等离子体的放电特性。图7表示推力器不同磁场位形和通道宽度中轴线上离子数密度分布。由图7可知,随通道宽度增加,离子在通道轴线上聚集效果明显,数密度峰值逐渐增大且向通道出口方向移动。这是由于当通道宽度增加时,电离区变窄且向通道出口方向移动,导致

离子数密度较高区域在通道中心线处向通道出口处偏移,使得推力器通道出口处离子聚焦明显,羽流发散角减小。

离子径向速度直接影响推力器壁面腐蚀速度,特别是通道出口附近腐蚀达到一定程度时,推力器通道电磁场位形发生变化,放电过程均会受到较大影响,导致推力器不能正常工作。图8表示三种磁场位形不同通道宽度在通道出口处离子径向速度分布。由图8可知,在通道近出口处($z = 25 \sim 30 \text{ mm}$),随通道宽度增加,磁场I, 磁场II和磁场III的离子径向速度都显著下降,这意味着通道内径向离子流入射速度显著下降,通道壁面腐蚀显著减小。三种磁场位形下径向离子速度对比发现:当磁零点位于通道中心位置时,通道内外壁上离子径向速度均较大,腐

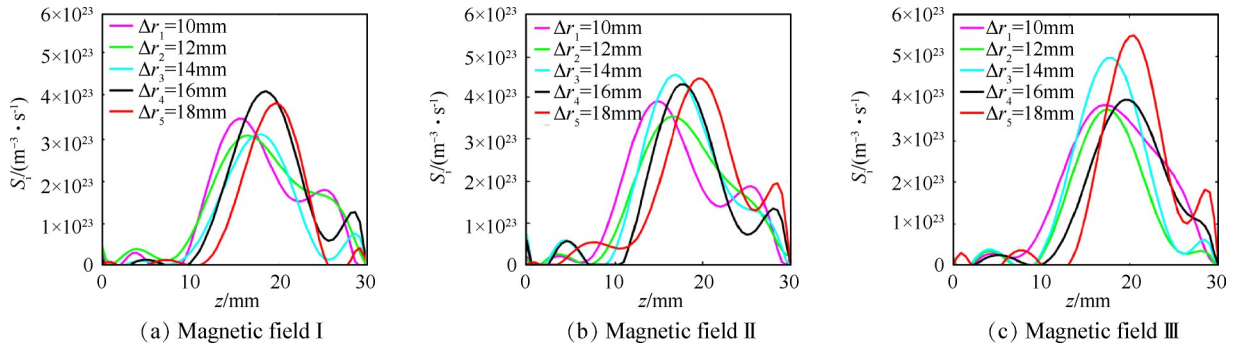


Fig. 6 Ionization rate distribution on the central axis with different magnetic fields and channel widths

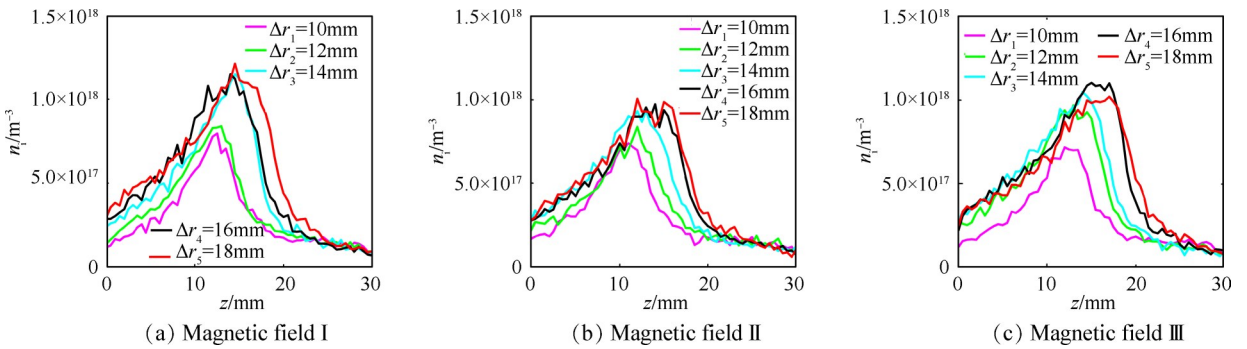


Fig. 7 Distribution of ion density on the central axis with different magnetic fields and channel widths

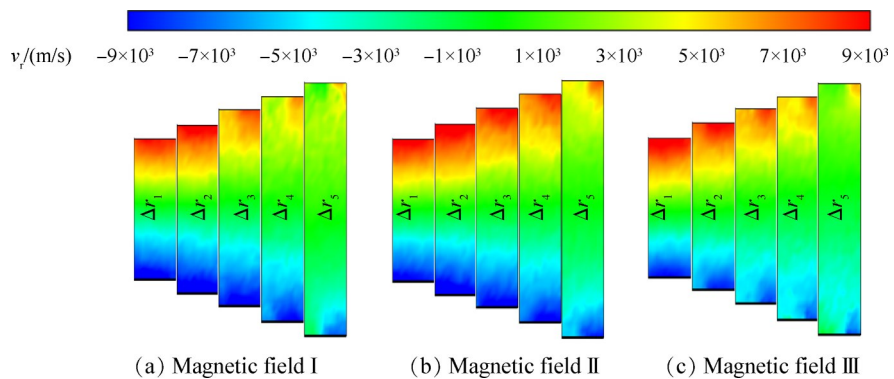


Fig. 8 Radial velocity distribution of ions near the exit with different magnetic fields and channel widths

蚀偏高,当磁零点偏向内或外壁面时,离子径向速度降低,其中磁零点靠近内壁面情况下腐蚀最小。

图9表示推力器不同磁场和通道宽度对粒子与壁面碰撞频率的影响。由图9(a)可知,在三种磁场分布情况下,随通道宽度增大,离子与壁面碰撞频率显著降低,这是因为通道宽度增加时出口附近的离子径向速度减小,离子在通道轴线上聚集明显,位于壁面附近的离子显著变少,使得离子径向束流减小,离子与壁面碰撞频率下降。由图9(b)可知,三种磁场分布的电子与壁面碰撞频率也随通道宽度增加而下降,这是由于通道宽度增加,导致推力器面容比变小,电子与壁面间相互作用降低,这表明在通道宽度增加的情况下,可以有效减少壁面二次电子数量,通道电子温度升高,工质电离率增大,推力器放电效率提升。通过不同磁场位形下碰撞频率的纵向对比可知,磁零点位置对离子与壁面碰撞频率的影响较小,而对电子壁面碰撞频率有影响。当磁零点靠近外壁面时,电子与壁面碰撞最剧烈,故在磁场III情况下壁面二次电子发射较高,导致通道内部电子温度降低,

这与图5中磁场III情况下电子温度较低的结果相吻合。

3.3 比冲、推功比及阳极效率

图10表示推力器不同磁场和通道宽度对比冲和推功比的影响。由图10(a)可知,在三种磁场分布情况下,比冲随放电通道宽度增加而增大,这是由于宽度增加时通道内电势峰值升高,离子在加速区获得更大能量,通道出口处推力增大,使比冲增加。由图10(b)可知,在磁场I位形分布中,当推力器通道宽度由14mm增加至16mm时,推功比增大,与传统霍尔推力器的通道宽度(14mm)相比,比冲提高5.03%,推功比提高1.77%,推力器性能提高。而在磁场II和磁场III位形分布中,随通道宽度增加推功比减小,推力器消耗单位功率电能产生的推力减小。可见,在磁场I位形时(磁零点位置靠近内壁面),增加通道宽度至16mm处,推力器比冲和推功比增加,离子与壁面碰撞频率降低,寿命延长。在磁场II及III位形时(磁零点位置分别靠近推力器通道中轴线和外壁面),虽然离子与壁面碰撞频率降低,壁面腐蚀减小,但由于推

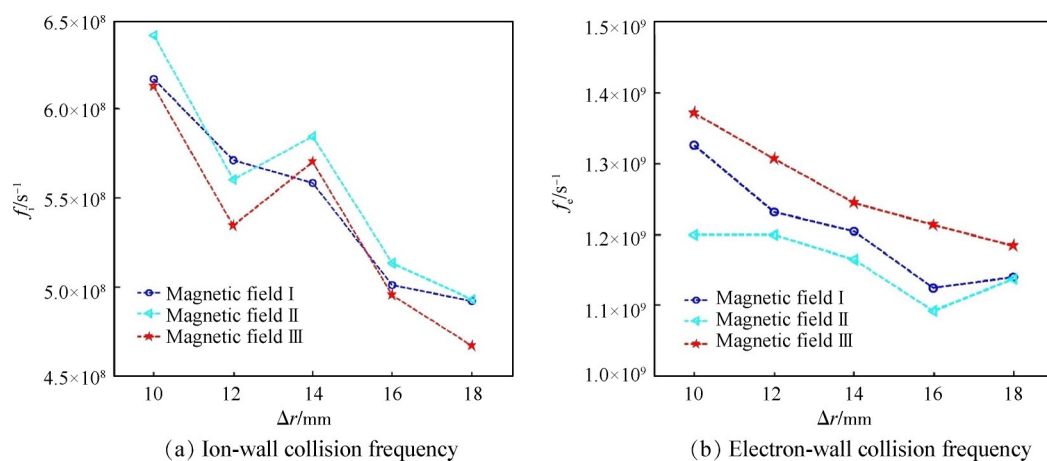


Fig. 9 Effects of different magnetic fields and channel widths on particle-wall collision frequency

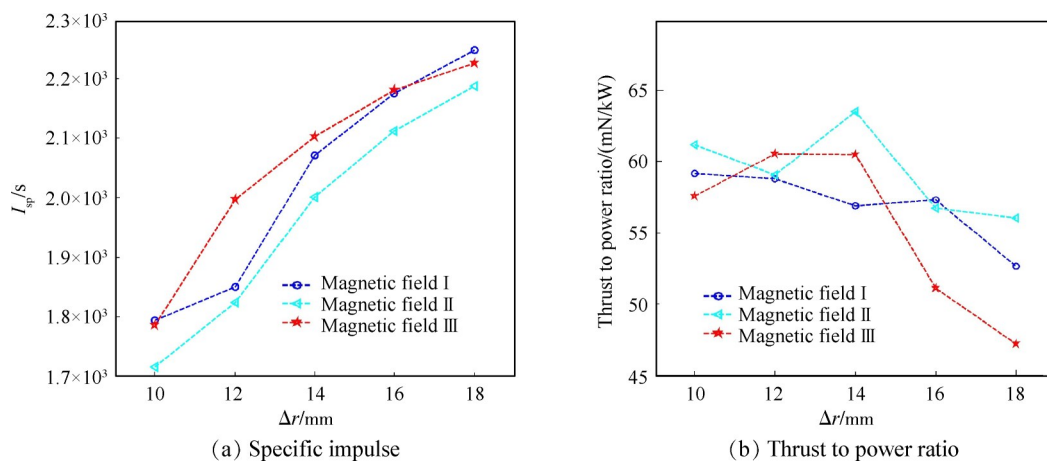


Fig. 10 Effects of different magnetic fields and channel widths on specific impulse and thrust to power ratio

功比减小,导致推力器性能降低。

图11表示推力器不同磁场和通道宽度对阳极效率 η_a 的影响。由图11可知,当通道宽度 $\Delta r > 14\text{mm}$ 时,推力器的效率在 $\Delta r = 16\text{mm}$ 有最大值61.1%。在磁场I中, $\Delta r = 16\text{mm}$ 时,相对于ATON型P70推力器正常的通道宽度($\Delta r = 14\text{mm}$),推力器比冲提高5.03%,推功比提高1.77%,离子与壁面碰撞频率降低10.2%。因此在本文设定的参数条件下,16mm为通道宽度的最优值。

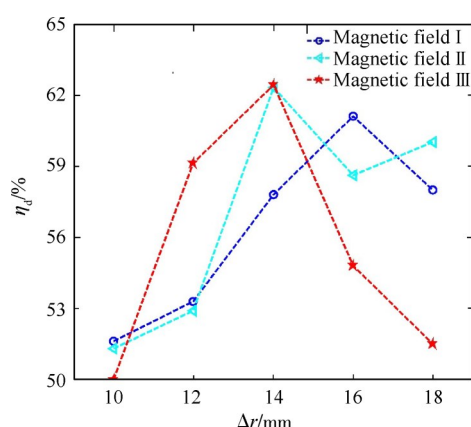


Fig. 11 Effects of different magnetic fields and channel widths on anode efficiency

4 结 论

通过本文研究,得出如下结论:

(1)当推力器通道宽度增加时,通道电势轴向峰值增大,且峰值位置向出口方向移动,加速区逐渐缩短。电子温度峰值位置也呈现与电势峰值分布相同的变化规律。当通道宽度增加时,壁面附近的磁感应强度增大,对电子的束缚变强,电导率较低的位置向通道出口处靠近,出口附近电势梯度增加使得电子获得能量更快,磁零点位置对电势分布影响较小。

(2)随着推力器通道宽度增加,通道内部离子数密度增大,位于壁面附近离子的径向速度逐渐减小。通道宽度较大时壁面附近离子密度和径向速度均较小,离子与壁面碰撞频率减小,壁面腐蚀降低。磁零点位于中轴线上时,壁面电子碰撞频率较低,通道电子温度较高。

(3)在磁零点位置位于内壁面情况下,当推力器通道宽度由14mm增加至16mm时,推力器比冲和推功比增大,推力器放电效率提高。而当磁零点位置位于通道中轴线时,离子径向速度较大,与壁面碰撞频率较高,壁面腐蚀加重。在磁零点位于外壁面附近,推力器通道宽度 $>14\text{mm}$ 时,推功比和阳极效率均

较低,推力器性能下降。

致 谢:感谢国家自然科学基金、辽宁省自然科学基金和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献

- [1] 任亚军,王小永. 高性能电推进系统的发展及在GEO卫星平台中的应用[J]. 真空与低温, 2018, 24(1): 60-65.
- [2] Ding Y J, Li H, Wei L Q, et al. Overview of Hall Electric Propulsion in China[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(2): 263-282.
- [3] Morozov A I. The Conceptual Development of Stationary Plasma Thrusters[J]. *Plasma Physics Reports*, 2003, 29(3): 235-250.
- [4] 孙小菁,张兴民,天立成,等. 小行星探测及采样返回任务电推进系统方案设计[J]. 真空, 2018, 55(1): 40-45.
- [5] 陈继魏,张天平. 霍尔推力器性能评估技术及概况[J]. 真空与低温, 2012, 18(3): 181-184.
- [6] Morozov A I, Savelyev V V. Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory[J]. *Reviews of Plasma Physics*, 2000, 21: 203-391.
- [7] Grebnev I A, Ivanov G V, Khodnenko V P, et al. The Study of a Plasma Jet Injected by an On-Board Plasma Thruster[J]. *Advances in Space Research*, 1981, 1(2): 153-158.
- [8] 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, 9(7): 1729-1737.
- [9] Liu J W, Li H, Mao W, et al. Experimental Study of Effect of Magnetic Field on Anode Temperature Distribution in an ATON-Type Hall Thruster[J]. *Journal of Physics*, 2018, 51(4): 185-201.
- [10] Grimaud L, Mazouffre S. Performance Comparison Between Standard and Magnetically Shielded 200W Hall Thrusters with BN-SiO₂ and Graphite Channel Walls[J]. *Vacuum*, 2018, 155(9): 514-523.
- [11] 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.
- [12] Raitses Y, Staack D, Keidar M, et al. Electron-Wall Interaction in Hall Thrusters[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(5).
- [13] Raitses Y, Smirnov A, Staack D, et al. Characterization of Plasma in a Hall Thruster Operated at High Discharge Voltage[R]. *AIAA* 2005-4404.
- [14] Taccogna F, Longo S, Capitelli M, et al. Stationary Plasma Thruster Simulation[J]. *Computer Physics Communi-*

- cations, 2004, 164(1): 160-170.
- [15] Cheng S, Santi M, Celik M, et al. Hybrid PIC-DSMC Simulation of a Hall Thruster Plume on Unstructured Grids[J]. *Computer Physics Communications*, 2004, 164(1): 73-79.
- [16] Sydorenko D, Smolyakov A. Kinetic Simulation of Secondary Electron Emission Effects in Hall Thrusters[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(1).
- [17] Sydorenko D, Smolyakov A, Kaganovich I, et al. Plasma-Sheath Instability in Hall Thrusters Due to Periodic Modulation of the Energy of Secondary Electrons in Cyclotron Motion[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(5).
- [18] 李 杰, 宁中喜, 于达仁, 等. 霍尔推力器通道宽度对电离特性的影响[J]. 推进技术, 2011, 32(6): 806-812. (LI Jie, NING Zhong-xi, YU Da-ren, et al. Influences of Discharge Channel Width on Ionization Characteristics in Hall Thrusters[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(6): 806-812.)
- [19] Hamada Y, Bak J, Kawashima R, et al. Hall Thruster Development for Japanese Space Propulsion Programs[J]. *Transactions*, 2017, 60(5): 320-326.
- [20] Kamhawi H, Haag T, Huang W S, et al. High Voltage Hall Accelerator Propulsion System Development for NASA Science Missions[R]. *IEEE* 2013-2577.
- [21] David A, Hani K, Mike P, et al. Status of Propulsion Technology Development under the NASA In-Space Propulsion Technology Program[R]. *AIAA* 2014-3605.
- [22] Garrigues L, Hagelaar G J M, Bareilles J, et al. Model Study of the Influence of the Magnetic Field Configuration on the Performance and Lifetime of a Hall Thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(12): 4886-4892.
- [23] Fruchtman A, Cohen-Zur A. Plasma Lens and Plume Divergence in the Hall Thruster[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(11).
- [24] Hirokazu T, Yohei N, Toshiaki Y, et al. Hall Thruster Research at Osaka University[R]. *AIAA* 99-2570.
- [25] 乔增熙. 100mN HET 的优化设计和原理实验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [26] 刘 辉. 霍尔推力器电子运动行为的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [27] 于达仁, 张凤奎, 李 鸿, 等. 霍尔推进器中振荡鞘层对电子与壁面碰撞频率的影响研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1844-1848.
- [28] Procassini R J, Birdsall C K, Morse E C, et al. A Fully Kinetic, Self-Consistent Particle Simulation Model of the Collisionless Plasma-Sheath Region[J]. *Physics of Plasma*, 1990, 2(12): 3191-3205.
- [29] Hu X, Duan P, Song J L, et al. Study on the Influences of Ionization Region Material Arrangement on Hall Thruster Channel Discharge Characteristics[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(2): 51-59.
- [30] 段 萍, 覃海娟, 周新维, 等. 霍尔推进器壁面材料二次电子发射及鞘层特性[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 288-294.

(编辑:史亚红)