

Effect of Tunnel Plasma Environment on Wall Erosion of Stationary Plasma Thruster

Huijun Cao¹, Zhihao Zhang²

¹School of Mechanical and Automation Engineering, Xiamen City University, Xiamen Fujian

²College of Materials, Xiamen University, Xiamen Fujian

Email: huijun@xmcu.cn, zhzhang@xmu.edu.cn

Received: Nov. 18th, 2017; accepted: Dec. 5th, 2017; published: Dec. 13th, 2017

Abstract

The tunnel plasma environment can affect the distribution of high energy ion beam, and then the sputter-induced wall erosion. In this paper, the effects of preionization on the physical characteristic distributions and the wall erosion are investigated. The results indicate that the preionization do not affect the main physical characteristic in the discharge channel. While the wall erosion will be aggravated by the extra sputter plasma which is introduced by the preionization process. The effects of charge-exchange collision on the physical characteristic distributions and the wall erosion are also investigated. The results show that the ion density decreases and the wall erosion alleviates after taking the charge-exchange collision into consideration.

Keywords

Wall Erosion, Preionization, Charge-Exchange Collision, Stationary Plasma Thruster

通道等离子体环境对稳态等离子体推进器壁面腐蚀的影响

操慧珺¹, 张志昊²

¹厦门城市职业学院, 机械与自动化工程系, 福建 厦门

²厦门大学, 材料学院, 福建 厦门

Email: huijun@xmcu.cn, zhzhang@xmu.edu.cn

收稿日期: 2017年11月18日; 录用日期: 2017年12月5日; 发布日期: 2017年12月13日

摘要

稳态等离子体推进器工作过程中通道的等离子体环境参数会影响高能粒子束的分布, 进而影响离子对壁

面溅射的情况。本文就加入预电离腔及考虑电荷交换碰撞对壁面腐蚀的影响进行了研究。通过调整模型中预电离率参数, 研究了预电离率大小对通道物理特性分布及对通道壁面常规腐蚀的影响。结果表明预电离不会影响通道内主要物理特性, 但由预电离引入的额外等离子体会加剧壁面的常规腐蚀。通过加入蒙特卡洛碰撞模块得到了电荷交换碰撞对通道各项物理参数分布和壁面常规腐蚀的影响。结果表明当考虑电荷交换碰撞后, 通道内高能离子密度减少, 壁面常规腐蚀情况有所减缓。

关键词

壁面腐蚀, 预电离, 电荷交换碰撞, 稳态等离子体推进器

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航天科技的不断发展及人类探索太空领域的不断深入, 电推进系统作为一种为航天器提供动力的推进装置也在不断发展[1] [2] [3] [4]。电推进系统较传统化学推进系统具有更长的寿命、更大的比冲、更高的控制精度、能反复启动并且推力适当, 以上种种优点使得电推进装置成为航天推进装置中的研究热点[3] [4] [5]。

稳态等离子体推进器(Stationary Plasma Thruster, SPT)是基于霍尔效应的一类典型的电推进装置[6] [7], 其结构如图 1 所示。推进器工作时, 位于通道外部的空心阴极发射大量电子, 这些电子进入环形通道并在正交的电磁场 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 作用下形成周向的霍尔漂移。同时工质氙气从阳极喷入推进器通道, 并在通道中与电子发生电离碰撞生成离子。理论上通道中电子会在正交的电磁场作用下作稳态的霍尔漂移, 但是由于上述碰撞和其他传导机制使得电子不断向阳极迁移, 进而在通道内实现了稳定的等离子放电过程。另一方面, 离子被认为基本不受磁场影响只是被通道内的电场加速, 并在通道出口与阴极发出的部分电子中和成高速的中性等离子体向外喷出, 对推进器形成持续稳定的推力[2] [7] [8] [9]。

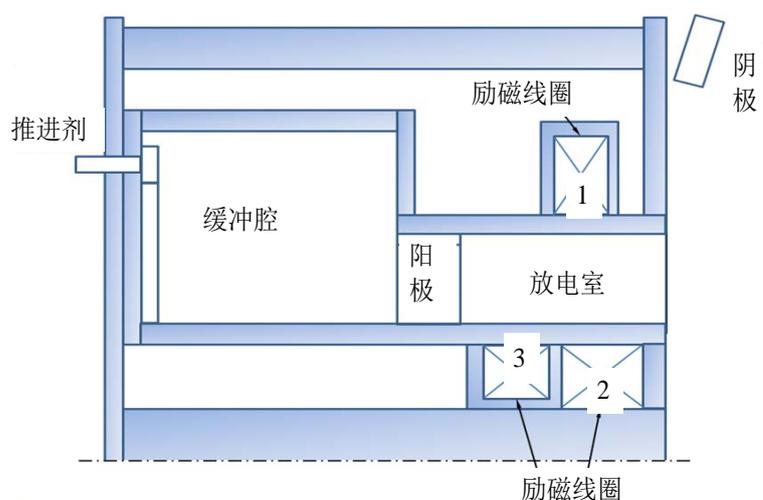


Figure 1. The schematic of an Aton-type stationary plasma thruster

图 1. Aton 型 SPT 推进器示意图

在 SPT 工作过程中, 放电电流一直都维持着频率为几十 kHz 的低频振荡。这一现象对推进器的运行特性和电源处理单元的设计都有较大影响[10] [11] [12] [13]。为了改善低频振荡现象, 莫斯科科学院设计研发了第二代 Aton 型 SPT 推进器[14] [15], 此种推进器在工质分配器和阳极之间加入了缓冲均化工质的缓冲腔, 如图 1 所示阳极前段设置的空腔。

Morozov 等人通过实验手段测量了缓冲腔内氙离子光谱和腔内的电势, 数据表明在缓冲腔内一定数量的氙原子被电离为氙离子, 并且在腔内有大约 1V 的电势降[16]。于达仁等人的研究则表明缓冲区内预电离现象能减低低频振荡幅值, 并且随着预电离率的增加, 低频振荡幅值降低[14] [17]。以上对预电离的研究焦点都集中在预电离对低频振荡的影响方面, 虽然预电离作用被证实能有效抑制低频振荡, 使推进器获得更稳定的工作性能, 但是缓冲腔及预电离的引入对推进器其他方面的影响, 特别是壁面溅射腐蚀的影响至今还鲜有研究。

另一方面, SPT 工作过程中粒子间会发生相互碰撞, 进而影响通道放电参数分布, 并进一步影响溅射壁面的离子分布。之前的模拟工作大多数集中在通道内部物理特性的模拟, 只考虑了原子间的碰撞, 电子与原子间的弹性碰撞、激发碰撞、一价电离碰撞, 而忽略了离子与原子间的碰撞。通道中离子与原子间的碰撞最典型和最易发生的类型为电荷交换碰撞(Charge-Exchange (CEX) Collision) [18]。CEX 碰撞过程为高速的离子与低速的原子碰撞后将其所带电荷转移给原低速原子, 自身变为电中性的高速原子, 原低速原子变为低速离子: $Xe_{slow} + Xe_{fast}^+ \rightarrow Xe_{fast} + Xe_{slow}^+$ 。由于此种碰撞能显著改变通道内溅射壁面的高能离子分布, 所以 CEX 碰撞对推进器寿命的影响是不可忽略的。

2. 仿真算法及模型设置

2.1. 全粒子 PIC 算法

由于真实情况下等离子体中的微观粒子数目是非常大的, 粒子模拟(Particle-In-Cell, PIC)方法通过统计平均大量巨粒子的运动数据来得到接近真实的等离子体流动特性和规律, 其在模拟等离子体物理问题中的突出贡献使其成为与实验研究和理论研究作用相当的第三种等离子体研究手段[18]。

全粒子算法则是将等离子体中的离子、电子均当做粒子来研究, 两种带电粒子的密度与通道电场间满足泊松方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\nabla \cdot \epsilon \nabla \Phi = q_e (n_i - n_e) \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; q_e 为电子电荷量; n_i 为离子数密度; n_e 为电子数密度。

粒子的分布由当前粒子位置决定, 而位置和速度则满足受力方程和运动方程:

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v} \quad (3)$$

式中: \mathbf{F} 为粒子受力; q 为粒子所带电量; \mathbf{v} 为速度矢量; \mathbf{x} 为位置矢量。

2.2. SPT 通道仿真模型

图 2 给出了 P70 型 SPT 推进器通道主束流平面的物理模型, 模型包含了推进器从阳极开始的整个放电通道和一部分近场羽流区。鉴于推进器的柱形结构, 本模型是在二维轴对称坐标下建立起来的, 模型各项尺寸和物理参数如表 1 所列[19] [20]。

模型中阳极给定放电电压 $V_a = 300 \text{ V}$, 阴极给定放电电流 3 A , 电势 $V_c = 0 \text{ V}$, 除此两部分为固定

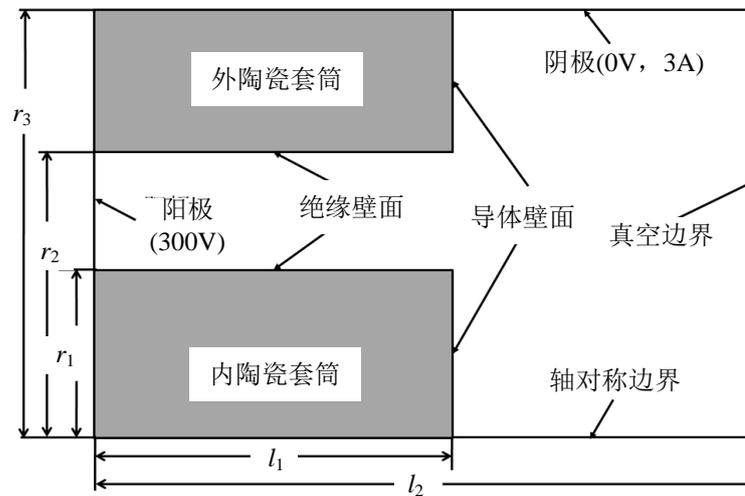


Figure 2. Computational region and boundaries conditions used in the model
图 2. 计算模型及边界说明

Table 1. Parameters of P70 Stationary Plasma Thruster
表 1. P70 型 SPT 推进器各项参数

参数名	参数值
通道长度 l_1	0.040 m
羽流区长度 $l_2 - l_1$	0.035 m
模拟区域总长度 l_2	0.075 m
通道内径 r_1	0.021 m
通道外径 r_2	0.035 m
推进器外径 r_3	0.050 m
阳极放电电压 V_d	300 V
阴极放电电流 I_d	3 A
阴极电压 V_c	0 V
阳极工质质量流量	3×10^{-6} kg/s
导体壁面电容	10^{-8} F

电势外, 其余的区域场边界均满足第二类边界条件。粒子运动到边界的处理方式参考自文献[18]。

2.3. 预电离模型

文献[15] [17]对于预电离率 β_{pre} 的定义为:

$$\beta_{pre} = \frac{n_i v_i}{n_i v_i + n_a v_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中: n_i , v_i 是缓冲腔出口处离子的密度和速度; n_a , v_a 是缓冲腔出口处工质原子的密度和速度。

通常对预电离率的调节是通过改变附加电压或是缓冲腔磁场分布来实现的。附加电压即是加在推进剂入口和阳极之间的一个电压, 而由于附加电压是整个放电电压的一部分, 故附加电压不能取得过大。根据文献[21]结果可知, 附加电压调节范围一般在 0V~10V, 此时对应的预电离率变化范围在 0.8%~1.6%。

因此本节选取五组不同的弱电电离率: 0%, 0.1%, 0.5%, 1.0%和 1.5%, 来分析弱电电离率的改变对 SPT 推进器通道壁面腐蚀的影响。

2.4. 蒙特卡洛碰撞

蒙特卡洛碰撞(Monte Carlo Collision, MCC)方法适用于碰撞粒子速度远大于背景粒子速度的情况, 因此该方法通常被用于电子-原子之间以及离子-原子之间的碰撞。MCC 方法具体处理方式: 假设发生碰撞的粒子 i 与背景粒子之间存在 N_c 种碰撞, 则该粒子总碰撞频率 ω_{tot} 为[18]:

$$\omega_{tot} = v_i Q_{tot} n_{back} = \sum_{j=1}^{N_c} \omega_j = \sum_{j=1}^{N_c} v_i Q_j n_{back} \quad (5)$$

式中: v_i 为粒子 i 的速度; Q_{tot} 为总的碰撞截面, $Q_{tot} = \sum_{j=1}^{N_c} Q_j$; n_{back} 为背景粒子的密度。

对上述两种碰撞而言, 背景气体都是原子, 故背景气体密度即是原子密度: $n_{back} = n_a$ 。每种碰撞发生的概率为:

$$P_j = 1 - \exp(-\omega_{max} dt), \quad j = 1, 2, \dots, N_c \quad (6)$$

粒子 i 发生哪种碰撞或者不发生任何碰撞取决于系统生成的随机数 R_F 与第 j 种碰撞概率的比较结果。而如果在计算时对每一个碰撞粒子都计算其每种碰撞的概率会使计算量变得很大, 因此本文引入了 Vahedi 提出的空碰撞方法[22]。在程序的每次循环中, 计算以最大速度的碰撞粒子和最大背景原子密度为参数下的最大碰撞概率 P_{max} :

$$P_{max} = 1 - \exp(-\omega_{max} dt) = 1 - \exp(-v_{max} n_{a,max} Q_{max} dt) \quad (7)$$

式中: ω_{max} 为最大碰撞频率; v_{max} 为碰撞粒子的最大速度; $n_{a,max}$ 为背景原子的最大密度; Q_{max} 为最大碰撞截面。

将上面得到的 P_{max} 与系统生成的随机数 R_{F1} 比较, 如果 $R_{F1} < P_{max}$, 则认为两种粒子会发生碰撞, 之后系统生成另一个随机数 R_{F2} , 对每种碰撞截面进行比较以确定该粒子 i 是发生何种碰撞。如果 $R_{F2} < Q_1/Q_{tot}$, 则发生第一种碰撞, 而如果 $Q_1/Q_{tot} < R_{F2} < (Q_1 + Q_2)/Q_{tot}$, 则发生第二种碰撞, 依次类推直至所有的碰撞种类都判断完成。

2.5. 电荷交换模型

当快速的氦离子与速度较慢的氦原子碰撞时, 氦离子失去一个正电荷变为快速的氦原子, 相应的氦原子得到一个正电荷变为低速的氦离子。新产生的原子将继承原离子的速度和位置, 而发生碰撞的原子则变为离子, 新产生的离子同样继承原原子的速度和位置。碰撞过程以蒙特卡洛碰撞的形式加到全粒子 PIC 程序中, 对于一个以速度 v_i 运动的氦离子, 假设背景氦原子的速度为 v_a , 密度为 n_a , 该氦离子与背景氦原子发生电荷交换碰撞的频率为[23]:

$$\omega_{cex} = c_r Q_{cex} n_a \quad (8)$$

式中: Q_{cex} 为电荷交换碰撞的碰撞截面; c_r 为两个粒子间的相对速度, $c_r = |v_i - v_a|$ 。

Rapp 认为同种物质的离子与背景原子发生电荷交换的碰撞截面是离子速度的函数, 并给出了相应的表达式[24]:

$$Q_{cex} = (k_1 \ln v_i + k_2)^2 \quad (9)$$

Roy 给出了氦离子与氦原子电荷交换碰撞情况下上式对应的参数值, $k_1 = -0.8821 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 以及

$k_2 = 15.1262 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ [25]。

2.6. 壁面腐蚀估算模型

对于二维坐标下的离子溅射腐蚀问题, 假设离子束沿 $-y$ 方向入射, 则溅射腐蚀速率可写为:

$$q = \frac{J_i Y(E_i, \theta_i) \cos \theta_i}{N_{sub}} \quad (10)$$

式中: J_i 为入射离子束流量; E_i 为入射离子能量; θ_i 为入射离子角度; $Y(E_i, \theta_i)$ 为溅射产额; N_{sub} 为被溅射基材的原子密度。

Sigmund 通过理论推导证明了入射离子能量 E_i 和角度 θ_i 对溅射产额 Y 的影响是相互独立的, 即溅射产额满足[26]:

$$Y(E_i, \theta_i) = Y(0)Y(\theta_i) \quad (11)$$

式中: $Y(0)$ 为离子束垂直入射时的能量溅射产额系数; $Y(\theta_i)$ 为角度溅射产额系数, $-\pi/2 < \theta_i < \pi/2$ 。

将式(11)带入式(10), 则溅射腐蚀速率 q 可进一步表示为:

$$q = \frac{J_i Y(0) \cos \theta_i}{N_{sub}} Y(\theta_i) \quad (12)$$

Katardjiev 等人给出了二维坐标下两个方向的特征速度分量[27]:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{dx}{dt} = \kappa \left(Y(\theta_i) - \frac{dY(\theta_i)}{d\theta_i} \sin \theta_i \cos \theta_i \right) \\ V_y &= \frac{dy}{dt} = \kappa \frac{dY(\theta_i)}{d\theta_i} \cos^2 \theta_i \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\kappa = \frac{J_i Y(0)}{N_{sub}}$ 。

Carter 认为在二维轴对称坐标下, 轴向 z 和径向 r 的特征速度分量依然满足上式[28]。对于 SPT 推进器而言, 其壁面的溅射腐蚀模型通常是氩离子溅射轰击氮化硼陶瓷表面, Cheng [29]给出了此种情况下的能量溅射产额系数公式:

$$Y(0) = \frac{AE_i^{0.474}}{1 + BE_i^{0.3}} \left(1 - \sqrt{\frac{E_{th}}{E_i}} \right)^{2.5} \quad (14)$$

式中: A, B 为拟合参数; E_{th} 为溅射能量阈值。综合文献结果本文选区溅射能量阈值 $E_{th} = 40 \text{ eV}$, 对应的拟合参数 A, B 分别为 0.000436831 和 -0.133966 [29]。

对于角度溅射产额系数 $Y(\theta_i)$, Yamamura 通过总结和拟合大量实验数据给出了计算 $Y(\theta_i)$ 的经验公式[30]:

$$Y(\theta_i) = x^f \exp[-\Sigma(x-1)] \quad (15)$$

式中, $x = 1/\cos \theta_i$, Σ 和 f 满足 $\Sigma/f = \cos \theta_{opt}$, θ_{opt} 为最优溅射角度。Yamamura 给出的经验公式计算出的角度溅射曲线[30]。拟合值与实验值在取最小方差时对应的参数 f 和最优溅射角度 θ_{opt} 分别为: $f = 2.23$, $\theta_{opt} = 67.9^\circ$ 。本文在对运动到陶瓷壁面的粒子进行相应处理的同时, 积累下了此种溅射粒子的个数、能力及角度。将这些参数带入到上述公式中即能算出相应的溅射腐蚀量。

3. 仿真结果及讨论

3.1. 预电离对 SPT 推进器壁面腐蚀的影响

图 3(a)和 3(b)是五组不同的预电离率对应的通道中心线上电势和电子温度的分布。当预电离率变化时,电势和电子温度的变化并不明显,而电子温度的分布直接反映通道里的电离过程,电子温度基本不变说明了通道内由电离产生的等离子体初始的状态和密度基本不变,电势变化不大则说明等离子体后续运动状态变化不大。由以上结果和分析可以认为预电离的引入对通道内各项物理特性的影响不大。

图 4 是 SPT 推进器工作 500 小时后五组不同的预电离率对应的内壁面的腐蚀形貌。虽然预电离对电势和电子温度的影响不大,但是随着预电离率的增加,通道壁面的腐蚀程度有明显的增加趋势。为了明确腐蚀程度增加的原因,图 5(a)和 5(b)给出了五组不同的预电离率对应的内壁面上溅射离子的角度和数目分布。结果表明预电离对离子溅射角度的影响很小,这也与图 3(a)的结果相呼应,当通道电势分布基本不变时,离子束的发散情况也基本保持一致,故溅射到壁面的离子角度分布也基本保持不变。而对应不同预电离率下的溅射数目则有较大区别,随着预电离率的增加,溅射壁面的离子数目也在不断增加。从没有预电离率到预电离率增加至 1.5% 的过程中,溅射离子数目增加幅度超过 40%。

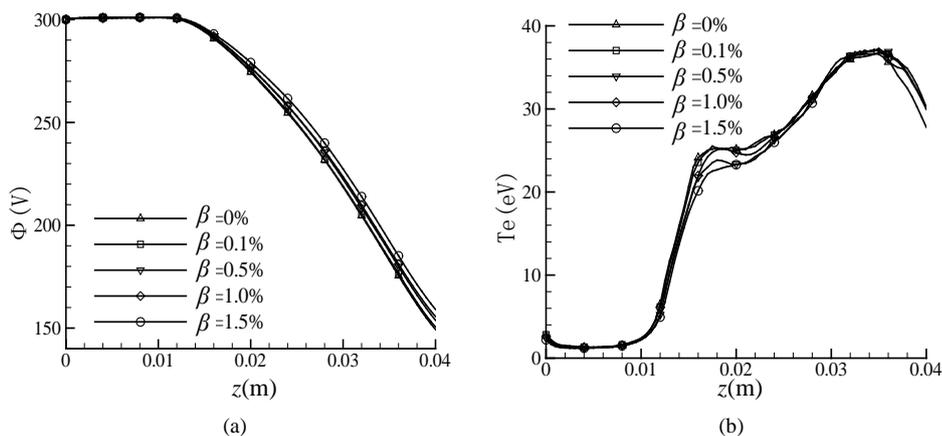


Figure 3. Axial distribution of the physical properties with different pre-ionization ratios

图 3. 不同预电离率下物理特性沿通道中心线的分布。(a) 电势分布; (b) 电子温度分布

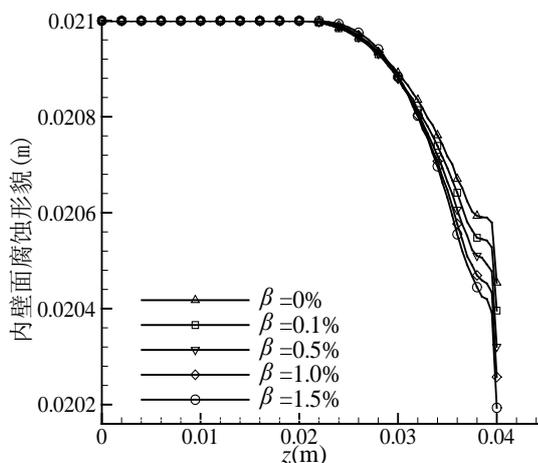


Figure 4. The erosion profiles of channel walls with different pre-ionization ratios

图 4. 不同预电离率下内壁面的腐蚀形貌

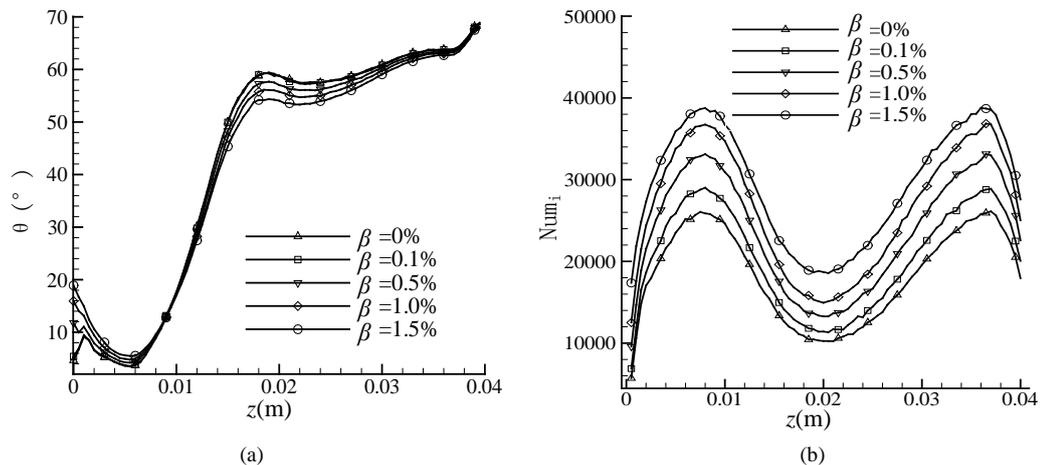


Figure 5. Incidence parameters along the inner wall with different pre-ionization ratios
图 5. 不同预电离率对应的内壁上溅射参数分布。(a) 溅射角度分布; (b) 溅射数目分布

综合以上结果, 我们可以认为预电离率的增加虽然不改变通道内原有的物理特性, 如电势分布, 电子温度分布甚至是离子发散角等, 但是预电离带来的额外等离子体会导致更多的离子溅射到壁面上, 增加壁面通道的腐蚀。因此, 缓冲腔伴随的预电离效应虽然能够有效的抑制低频振荡, 保证 SPT 推进器的稳定运行, 但是预电离却能显著的增加壁面腐蚀程度, 进而降低推进器的工作寿命。因此在实际工程应用上, 通过增加预电离率来减小电流低频振荡的做法还需进一步斟酌。

3.2. CEX 碰撞对 SPT 推进器壁面腐蚀的影响

图 6 是考虑 CEX 碰撞后, CEX 离子密度与束流离子密度的比率(n_{cex}/n_i)在整个模拟区域内的分布结果, 可以看到在通道出口处两者的比值接近 10%, 这个结果也与 Yokota 等人得到的结果[31]一致。可以设想在靠近通道出口处数密度约为 10^{16} m^{-3} 量级的慢速 CEX 离子, 在通道电场和最高能达到几十伏的壁面鞘层作用下, 其对壁面的溅射腐蚀效果是不可忽视的。本节我们将以此结果为依据讨论 CEX 离子对通道壁面腐蚀的影响。

本节模拟分析了考虑 CEX 碰撞和不考虑 CEX 碰撞两种情况下的通道物理特性的变化, 图 7(a) 和 7(b) 是两种情况下的通道中心线上电势和等离子体密度分布对比结果。从图中可以看到考虑 CEX 碰撞后通道内的电势降更大, 但是等离子体密度整体都有所下降, 并且等离子体密度峰值向阳极移动。这是因为在电离区离子密度最高的地方, 原子密度也接近最大, 大部分的 CEX 碰撞都发生在这一区域, 同时考虑 CEX 碰撞后通道内离子的速度降低, 即有更多的低速离子滞留在通道内, 故原电离区的电离率降低, 等离子体密度峰值降低, 整体密度分布向阳极移动。

图 8 是考虑 CEX 碰撞和不考虑 CEX 碰撞两种情况下, SPT 推进器工作 200 小时后内壁面的腐蚀形貌。由图可知当通道内存在 CEX 碰撞后, 壁面腐蚀形貌与不发生 CEX 碰撞相似, 但是腐蚀程度有所减轻。这是因为存在 CEX 碰撞之后, 通道内离子密度减小, 并且离子能量也有所减小, 因此溅射壁面的离子能量和流量都将减小, 故工作相同时间后存在 CEX 碰撞时通道壁面的溅射腐蚀程度更轻。

4. 结论

本文在建立 SPT 推进器主束流方向上的二维轴对称全粒子模型的基础上, 引入了预电离和电荷交换碰撞仿真模块, 增加了壁面腐蚀预测过程, 分析了预电离和电荷交换碰撞对推进器通道壁面溅射情况的影响。

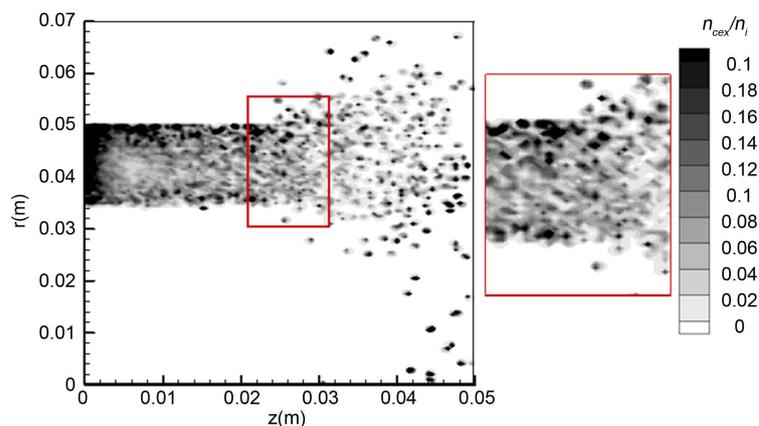


Figure 6. Distribution of the ratio of CEX ions to beam ions (n_{cex}/n_i)

图 6. CEX 离子密度与束流离子密度的比率(n_{cex}/n_i) 分布

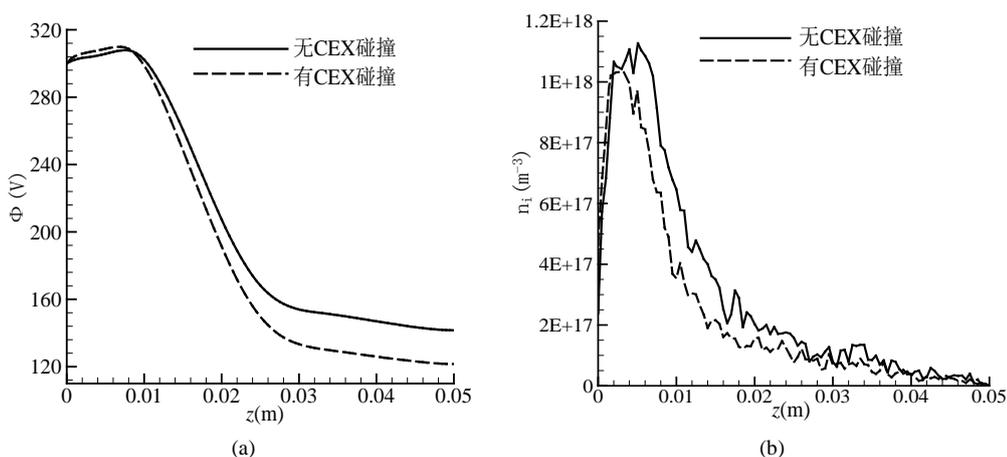


Figure 7. Comparison of results with and without CEX collision

图 7. 考虑 CEX 碰撞和不考虑 CEX 碰撞的稳态结果。(a) 电势沿轴向中心线分布 (b) 等离子密度沿轴向中心线分布

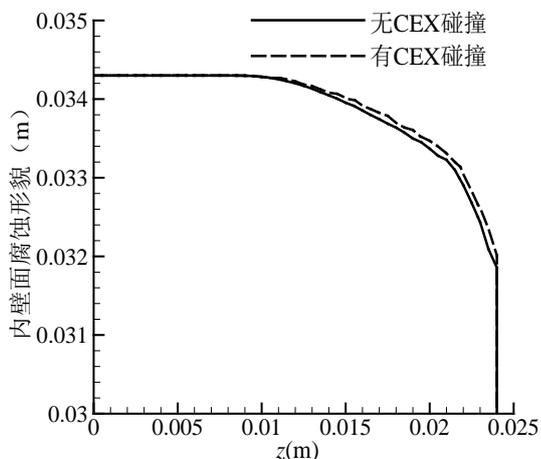


Figure 8. Comparison of inner wall erosion profiles with and without CEX collision

图 8. 考虑 CEX 碰撞和不考虑 CEX 碰撞的内壁面腐蚀结果

首先, 本文分析了预电离过程对 SPT 推进器通道主要物理参数的影响, 特别是预电离的引入对壁面常规腐蚀的影响。结果表明引入预电离对通道内的电势和电子温度分布影响很小, 也没有明显改变离子束流的发散角, 但是预电离的引入会增加通道内等离子体的密度, 因此由离子溅射引起的壁面腐蚀程度也将更显著。

其次, 本文就电荷交换碰撞对 SPT 推进器通道内物理特性分布的影响进行了对比研究, 结果表明通道内 CEX 离子占束流离子的比率在出口区接近 10%, 通道内部最高达到 20%。考虑电荷交换碰撞后推力器内电势降略有上升, 但是等离子体密度整体下降且峰值向阳极移动, 综合可知 CEX 碰撞对等离子体分布的影响是两方面的: 降低通道等离子体密度, 降低离子速度。对壁面常规腐蚀的研究结果表明 CEX 碰撞的存在能够减轻常规腐蚀。

基金项目

福建省高校杰出青年科研人才培养计划(项目号: JAT160835); 福建省中青年教师教育科研项目计划(项目号: JAT160831)资助。

参考文献 (References)

- [1] Cao, H., Li, Q., Shan, K., *et al.* (2015) Effect of Preionization on the Erosion of the Discharge Channel Wall in a Hall Thruster Using a Kinetic Simulation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **43**, 130-140. <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2367524>
- [2] 扈延林, 毛威, 李栋, 等. 面向全电推进卫星的霍尔推进技术[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(1): 73-78.
- [3] Goebel, D.M. and Katz, I. (2008) *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*. John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey, 325-443. <https://doi.org/10.1002/9780470436448>
- [4] 钱中, 康小录, 王平阳, 等. 霍尔推力器等离子体羽流粒子模拟[J]. 上海航天, 2009, 26(4): 43-46.
- [5] 康小录, 杭观荣, 朱智春. 霍尔电推进技术的发展与应用[J]. 火箭推进, 2017, 43(1):8-17.
- [6] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 385-392.
- [7] 毛根旺, 唐金兰. 航天器推进系统及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 262-291.
- [8] 李世忠, 陈虹. 现代小卫星技术与数字地球[J]. 遥感信息, 2000(4): 47-49.
- [9] Martinez-Sanchez, M. and Pollard, J.E. (1998) Spacecraft Electric Propulsion—An Overview. *Journal of Propulsion and Power*, **14**, 688-699. <https://doi.org/10.2514/2.5331>
- [10] Fife, J.M., Martinez-Sanchez, M. and Szabo, J. (1996) A Numerical Study of Low-frequency Discharge Oscillations in Hall Thruster. *33th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA-1997-3052, Seattle, Washington.
- [11] Furukawa, T., Miyasaka, T. and Fujiwara, T. (2005) Control of Low-Frequency Oscillation in a Hall Thruster. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, **44**, 164-170. <https://doi.org/10.2322/tjsass.44.164>
- [12] Tamida, T., Nakagawa, T., Suga, I., *et al.* (2007) Determining Parameter Sets for Low-Frequency-Oscillation-Free Operation of Hall Thruster. *Journal of Applied Physics*, **102**, 043304-1-043304-6. <https://doi.org/10.1063/1.2771039>
- [13] Barral, S. and Ahedo Galilea, E. (2009) Low-Frequency Model of Breathing Oscillations in Hall Discharges. *Physical Review E*, **79**, 046401-1-046401-11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.046401>
- [14] Yu, D.R., Wei, L.Q., Zhao, Z.Y., *et al.* (2008) Effect of Preionization in Aton-Type Hall Thruster on Low Frequency Oscillation. *Physics of Plasmas*, **15**, 043502-1-043502-6.
- [15] 韩轲, 魏立秋, 纪延超. P70 霍尔推力器新型缓冲腔磁路对预电离及放电的影响[J]. 推进技术, 2011, 32(6): 823-827.
- [16] Morozov, A.I., Bugrova, A.I. and Desyatskov, A.V. (1997) ATON-Thruster Plasma Accelerator. *Plasma Physics Reports*, **23**, 587-597.
- [17] Yu, D.R., Wang, C.S., Wei, L.Q., *et al.* (2008) Stabilizing of Low Frequency Oscillation in Hall Thrusters. *Physics of Plasmas*, **15**, Article ID: 113503.
- [18] Szabo, J.J. (2001) Fully Kinetic Numerical Modeling of a Plasma Thruster. Thesis for the Degree of Doctor of Philos-

- ophy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 79-126.
- [19] Parra, F.I., Ahedo, E., Fite, J.M., *et al.* (2006) A Two-Dimensional Hybrid Model of the Hall Thruster Discharge. *Journal of Applied Physics*, **100**, Article ID: 023304. <https://doi.org/10.1063/1.2219165>
- [20] Sommier, E., Scharfe, M.K., Gascon, N., *et al.* (2007) Simulating Plasma-Induced Hall Thruster Wall Erosion with a Two-Dimensional Hybrid Model. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **35**, 1379-1387. <https://doi.org/10.1109/TPS.2007.905943>
- [21] 刘辉, 吴勃英, 鄂鹏, 等. ATON 型 Hall 推力器缓冲区预电离问题研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7203-7207.
- [22] Vahedi, V. and Surendra, M. (1995) A Monte Carlo Collision Model for the Particle-in-Cell Method: Applications to Argon and Oxygen Discharges. *Computer Physics Communications*, **87**, 179-198. [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(94\)00171-W](https://doi.org/10.1016/0010-4655(94)00171-W)
- [23] Kafafy, R.I. (2005) Immersed Finite Element Particle-in-Cell Simulations of Ion Propulsion. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Virginia Polytechnic Institute and State, Virginia, 29-55.
- [24] Rapp, D. and Francis, W.E. (1962) Charge Exchange between Gaseous Ions and Atoms. *Journal of Chemical Physics*, **37**, 2631-2645. <https://doi.org/10.1063/1.1733066>
- [25] Roy, R.I.S., Hastings, D.E. and Gatsonis, N.A. (1996) Ion-Thruster Plume Modeling for Backflow Contamination. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **33**, 525-534. <https://doi.org/10.2514/3.26795>
- [26] Sigmund, P. (1969) Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets. *Physical Review*, **184**, 383-416. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.184.383>
- [27] Katardjiev, I.V., Carter, G. and Nobes, M.J. (1988) Precision Modeling of the Ask-Substrate Evolution during Ion Etching. *Journal of Vacuum Science and Technology*, **A6**, 2443-2450. <https://doi.org/10.1116/1.575570>
- [28] Carter, G. (1997) Huygen's Wavelets and Deterministic Evolution of Surfaces and Interfaces. *Vacuum*, **48**, 925-931. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(97\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(97)00089-4)
- [29] Cheng, S.Y.M. (2007) Modeling of Hall Thruster Lifetime and Erosion Mechanisms. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 39-53.
- [30] Yamamura, Y. (1984) An Empirical Formula for Angular Dependence of Sputtering Yields. *Radiation Effects*, **80**, 57-72. <https://doi.org/10.1080/00337578408222489>
- [31] Yokota, S., Sakoh, D., Matsui, M., *et al.* (2008) Charge Exchange Ion Number Density Distribution in Hall Thruster Plume. *Vacuum*, **83**, 57-60. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2008.03.024>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org