

霍尔推力器不同壁面侵蚀对低频振荡特性影响研究^{*}

韩 轲¹, 汪 颖¹, 鲁海峰²

(1. 哈尔滨商业大学 计算机与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 基于霍尔推力器一维准中性流体模型, 对放电壁面侵蚀对低频振荡特性的影响进行了数值模拟研究。通过改变霍尔推力器放电通道的横截面积, 研究了霍尔推力器寿命期内通道受离子溅射后, 放电电流振荡特性变化。研究结果显示, 横截面积从25cm²增大到37cm²时, 放电电流振荡幅值增加, 振荡频率基本不变; 继续增加横截面积, 放电电流振荡幅值减小, 振荡频率增加。理论分析表明: 通道侵蚀面积增大, 导致离子碰撞频率变化, 进而引起振荡特性变化。

关键词: 霍尔推力器; 横截面积; 低频振荡; 壁面侵蚀; 一维准中性流体模型

中图分类号: V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 06-1434-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190408

Effects of Different Wall Erosion on Low Frequency Oscillation Characteristics of Hall Thruster

HAN Ke¹, WANG Ying¹, LU Hai-feng²

(1. School of Computer and Information Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Numerical simulation study on the effects of discharge wall erosion on low frequency oscillation characteristics was carried out based on a one-dimensional quasi-neutral fluid model of a Hall thruster. The oscillation characteristics of discharge current in a Hall thruster was studied after ion sputtering in the channel during its lifetime by changing the cross-sectional area of the discharge channel. The results show that when the cross-sectional area increases from 25cm² to 37cm², the oscillation amplitude of discharge current increases and the oscillation frequency almost remains unchanged. If the cross-sectional area continues to increase, the oscillation amplitude of discharge current decreases and the oscillation frequency increases. Theoretical analysis shows that the increase of channel erosion area will lead to the change of ion collision frequency, which will further lead to the change of oscillation characteristics.

Key words: Hall thruster; Cross-sectional area; Low frequency oscillation; Wall erosion; One-dimensional quasi-neutral fluid model

1 引言

霍尔推力器(Hall thruster, HT)作为一种先进的

空间电力推进装置,具有高效能、高比冲、小推力等良好的综合性能,适用于航天器姿态控制和轨道位置控制等任务^[1-2]。随着我国航天技术的发展,航天

^{*} 收稿日期: 2019-06-17; 修订日期: 2019-07-31。

基金项目: 国家自然科学基金(51477035); 黑龙江省自然科学基金(E201452)。

通讯作者: 韩 轲, 博士, 副教授, 研究领域为电推进技术。E-mail: thruster@163.com

引用格式: 韩 轲, 汪 颖, 鲁海峰. 霍尔推力器不同壁面侵蚀对低频振荡特性影响研究[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1434-1440. (HAN Ke, WANG Ying, LU Hai-feng. Effects of Different Wall Erosion on Low Frequency Oscillation Characteristics of Hall Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6):1434-1440.)

器任务的复杂化,对电推进装置的要求也随之增加,目前延长霍尔推力器的工作寿命是研究的关键问题。在霍尔推力器放电通道内,部分离子束因受到电场和磁场等各种因素的影响而发散,从而会溅射到放电通道绝缘器壁表面,长期的溅射会导致放电通道侵蚀的积累。随着侵蚀的加剧,推力器出口磁极暴露,破坏了磁场位型,导致推力器无法继续工作,霍尔推力器通道器壁的侵蚀问题是影响霍尔推力器寿命主要的限制因素之一^[3-4]。在霍尔推力器工作时所使用的是直流电源,但在实验中仍可以看到放电电流的振荡现象,大幅值放电电流的变化会导致放电电压的波动,这对于直流电源来说会造成不良影响,进而不利于航天器供电系统的正常工作,因此放电电流的波动对推力器系统的可靠性具有重要影响。

国内外的研究人员对推力器通道的器壁侵蚀开展了大量的研究工作,Absalamov等对SPT-100推力器进行了地面真空实验,实验历时4000h,主要是测量推力器的器壁和航天器部件的侵蚀情况,得到不同时刻下通道的形貌变化^[5];美国NASA格林研究中心对大功率推力器做了寿命实验,其推力器的使用寿命约为4800h^[6]。Hiroyuki等提出了推力器的二维混合PIC模型,对壁面侵蚀效应进行了预测^[7];哈尔滨工业大学于达仁等采用PIC模拟方法,计算了通道长度对阳极层霍尔推力器性能的影响,得出适当缩短通道长度可以提高推力器使用寿命的结论^[8]。在低频振荡研究方面,研究人员也进行了大量的实验及理论建模分析。低频振荡是霍尔推力器放电电流的固有特性,在实验中均能观察到这一现象。霍尔推力器的创始人Morozov为降低放电电流的振荡强度,设计了“SPT-ATON”第二代霍尔推力器;在建模方面,Morozov利用电子传导机制建立一维准中性流体模型,可以观察低频振荡情况,他在一维流体模型上加入了离子动能方程和电子能量方程,得到混合一维模型,更好地说明电子的热传导在推力器运行中的作用。波兰学者Barral对霍尔推力器放电电流的低频振荡问题颇有研究,他通过扰动数学模型研究推力器的振荡情况,得到影响低频振荡的原因,通过对线性数学模型的简化分析指出“呼吸”振荡机制的起因,从数学角度得出了放电电压与低频振荡的振幅和频率的关系。此外,Barral还研究了不同器壁材料对低频振荡的影响。国内关于低频振荡的研究主要集中在研究所以及哈尔滨工业大学等少数的高校,于达仁等在推力器的物理机制及如何保持低频

振荡的稳定性等方面进行一系列研究^[9-11]。

通道的侵蚀问题是影响推力器寿命的主要因素,而低频振荡对推力器系统的可靠性有影响。本文基于HT的一维准中性流体模型,通过改变通道的横截面积,模拟推力器通道壁面受离子侵蚀的形貌变化,研究不同壁面侵蚀下的放电电流振荡特性变化,进而分析寿命期内推力器放电低频振荡变化的机理。

2 计算模型

2.1 一维准中性流体模型的建立

HT会产生几十千赫兹的低频振荡,即回路电流会产生变化,电压会随之变化,这对航天器的电源工作造成不良影响,同时对HT的传导机制、陶瓷壁面的侵蚀、放电稳定性以及卫星通讯均有不同程度的影响,进而影响霍尔推力器的寿命、比冲和效率。HT模型的建立是研究低频振荡问题的关键,其中流体模型最为简单。本文研究的问题主要集中于工质气体的传播和离子的运动,这两类运动基本是沿轴向的,因此建立的模型仅考虑轴向一个维度,即HT一维准中性流体模型^[12]。

将放电通道方向设为 x 轴,通道阳极入口处为 $x=0$,通道出口处为 $x=L$,假设放电通道的等离子体是呈准中性的,则通道内的电子密度、离子密度被认为处处相等。而原子运动的连续方程可描述为

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} + V_a \frac{\partial n_a}{\partial x} = -\beta n n_a \quad (1)$$

式中 V_a 表示原子速度,m/s, $V_a=\text{const}>0$; β 为电离速率, m^3/s ; n 表示离子密度, m^{-3} ; n_a 表示原子密度, m^{-3} 。

模型方程还包括离子连续方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nV}{\partial x} = \beta n n_a \quad (2)$$

式中 V 表示离子速度,m/s。

离子动量方程

$$\frac{\partial nV}{\partial t} + \frac{\partial nV^2}{\partial x} = \frac{en}{M} E + \beta n n_a V_a \quad (3)$$

式中 e 是基本电荷,C; E 是电场强度,V/m; M 表示单个离子或者原子的质量。

对于以上方程中的电场 E 及初始条件均是由稳态方程来求解,而对于不同的电场,低频振荡都是稳定的,固定电场的形式不同,系统的稳定点随之发生变化,因此HT工作过程中,电场是动态变化的。采

用简单的电子传导的形式来引入变化的电场形式,认为电子传导只和磁场强度有关,于是可以得出

$$E = \frac{I/A - enV}{\sigma(x)} \quad (4)$$

式中 A 表示放电通道的横截面积, m^2 ; I 表示放电电流, A ; $\sigma(x)$ 是电子电导率, S/m 。

放电回路方程

$$L_c \frac{dI}{dt} + RI + \int_0^L E dx = U \quad (5)$$

式中 L_c 表示电感, H ; R 表示电阻, Ω ; U 表示电源电压, V 。

对电源电压为 300V 的情况进行仿真,设定模型放电通道的长度为 3cm,原子密度边界值 n_{a0} 为 $2.6 \times 10^{19} m^{-3}$,离子密度边界值 n_0 取原子的 0.001 倍,出口处的磁场为 0.02T,电离率 $\beta = 5 \times 10^{-14} m^3/s$ [13]。

根据方程(1),(2),(3),(5),在 Simulink 中搭建仿真模型 [14]。Simulink 积分算法众多,选择使用自适应变步长 2 阶 3 级龙格库塔法进行计算。建立仿真模型后开始对 HT 进行动态仿真,在 Simulink 平台实时观察放电电流的动态变化过程,经过一段时间的计算,放电电流形成稳定的振荡。仿真过程中,电场强度、离子密度等参数均是在各个时刻以向量的方式输出,为显示不同时刻的空间分布,建立 S-函数,显示各向量的动态分布,在仿真过程中观察各个参量随时间和空间的动态变化。根据文献[15-16]可知该一维准中性流体模型与实验结果相符,具有一定的合理性。

离子的运动主要是受到电场的影响,电场强度和离子密度的变化均会影响放电振荡特性。

根据放电电流是电子电流和离子电流之和,电子数密度与离子数密度相等,可以得到电子沿通道轴向的动量方程(式(6)),从式(6)中看到,电子的电导随磁场的增大而降低,电子和中性气体的碰撞、壁面的碰撞有利于电子的传导。

$$E_1 = -\frac{en_e v_{ex}}{m_e n_e V_m} B^2 = \frac{I/A - env}{m_e n_e (v_{col} n_n + v_{wall})} B^2 \quad (6)$$

式中 $en_e v_{ex}$ 表征电子电流密度, $m_e n_e V_m/B^2$ 表征电子电导率, v_{col} 表征电子与中性气体的碰撞频率, v_{wall} 表征电子与壁面的碰撞频率, n_n 表征中性气体数密度, n_e 表征电子数密度, m_e 表征电子的质量。

根据文献[17]及方程(4),(6)表明,低频振荡特性主要受电离和加速两个过程的影响,数值模型主要体现在电离系数和电子传导模型,不同的模型在

引入电场后会表现出低频振荡现象。根据电场方程得知离子动量的变化会导致电场重新分布,电场变化又会引起离子动量变化。此外,电场分布的影响因素也包含通道内电导的分布,进而影响低频振荡特性。本文利用电场强度和离子密度进一步分析 HT 不同壁面侵蚀下放电电流振荡特性变化的机理。

2.2 参数的改进

HT 一维准中性流体模型主要是模拟 HT 放电低频振荡的静态特性和动态特性。此模型的放电通道参数均设置为常数。本文基于 HT 一维准中性流体模型,通过改变放电通道横截面积的大小,进行仿真对比试验,从理论上得出侵蚀后横截面积增大时放电振荡特性的变化。由文献[18]可知,通道内外壁面的侵蚀速率数量级为 1nm/s,其中通道出口内壁面的最大侵蚀速率为 1.7nm/s,外壁面的最大侵蚀速率为 1.5nm/s,根据侵蚀速率来设定放电通道横截面半径的大小,即

$$A = 2\pi(R^2 - r^2) \quad (7)$$

式中 R 是通道外半径, r 是通道内半径。

放电通道的初始横截面积设置为 $25cm^2$,在运行过程中通道渐渐侵蚀,且靠近通道出口处侵蚀得最严重,即运行的时间越长,侵蚀的程度越深,通道的横截面积越大。经计算,初始横截面积为 $25cm^2$,推力器工作 1296h 后,横截面积达到 $37cm^2$,推力器继续工作 371h,横截面积达到 $41cm^2$,推力器再工作约 555h,横截面积达到 $46cm^2$ 。

3 仿真结果与对比分析

图 1 是放电通道不同横截面积时放电电流的低频振荡及频谱分析图。图 1(a)~(d)的横截面积分别是 $25cm^2$, $37cm^2$, $41cm^2$, $46cm^2$,从图中均可以观察到低频振荡现象,对比四个频谱分析图可知,面积为 $25cm^2$, $37cm^2$ 时,振荡频率基本不变,振幅随面积的增加而增大,当面积超过 $37cm^2$ 时,振荡频率明显增大,振幅减小。

对比图 1 所示四条曲线及其频谱图,改变放电通道的横截面积,放电电流的低频振荡现象存在明显差异。横截面积是 $25cm^2$ 时,频率为 25.033kHz,横截面积是 $37cm^2$ 时,频率为 24.387kHz。由图 2 更直观地看出,横截面积在 $37cm^2$ 以内,振荡频率基本处于 25kHz,随着横截面积的增加,振荡频率快速增大,横截面积大于 $40cm^2$ 时,振荡频率稳定在 32kHz。为了进一步解释侵蚀产生横截面积增大后振荡幅度的变化,绘制放电电流振幅的标准差与横截面积之间的

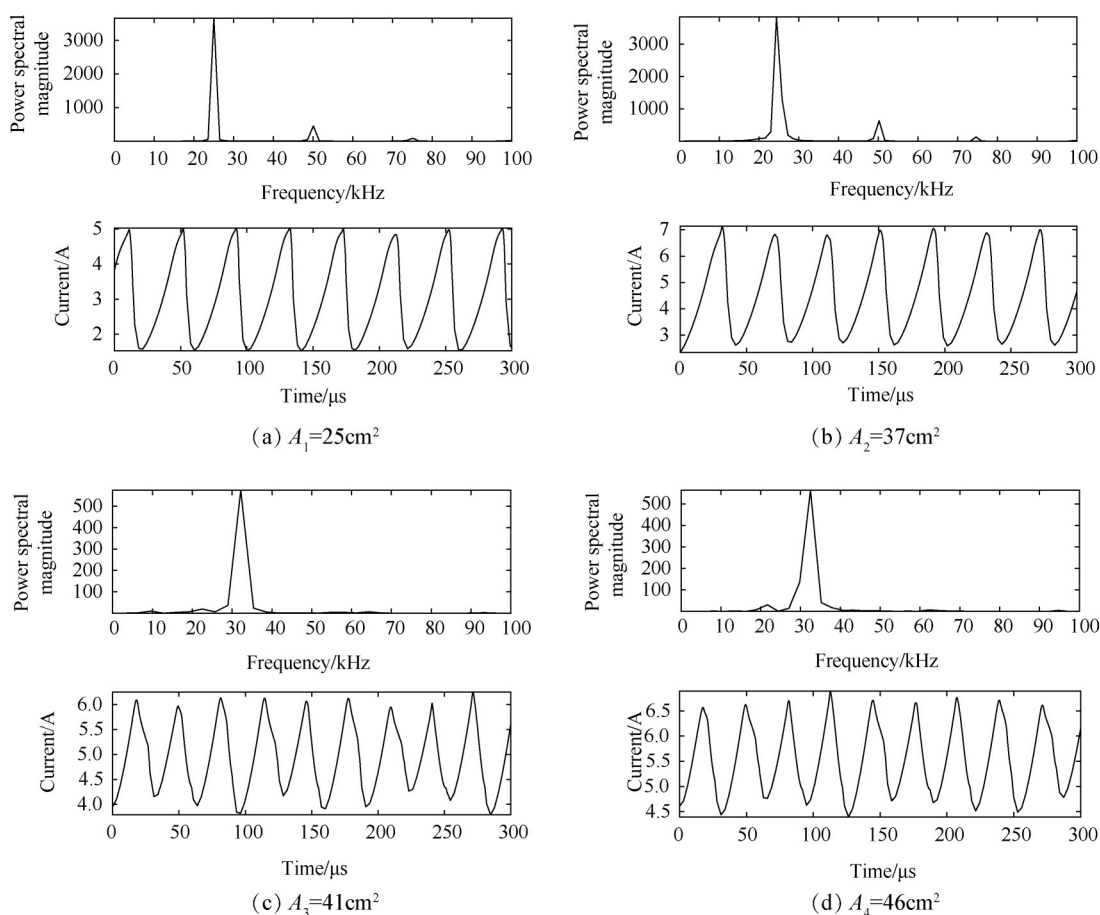


Fig. 1 Time evolution of discharge current in the periodic regime and spectral analysis diagram under different cross-sectional areas

关系见图3。标准差反映了不同横截面积下放电电流振幅的离散程度。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

式中 $\bar{X}$ 是平均值。

由图3可见,横截面积在 37cm^2 以内,随着横截面积增加,放电振荡的标准差随之增加,即放电振荡的振幅增加;横截面积为 39cm^2 时,标准差为1.2879;横截面积为 40cm^2 时,标准差为0.6543。面积大于 37cm^2 时,标准差明显下降,即放电振荡幅值减小。当面积超过 40cm^2 时,标准差又缓慢增加,即振荡幅值增加。例如,当横截面积为 46cm^2 时,标准差为0.6869,与横截面积为 40cm^2 时的标准差相比,缓慢增加。

由上述数据分析可知,放电通道横截面积的变化会引起放电电流振荡特性变化,横截面积越大即遭受的侵蚀程度越严重,振荡特性发生变化越大。电场强度和离子密度变化会导致放电振荡特性变化。图4和图5分别是不同横截面积下,在一个周期内,电场强度和离子密度在不同时刻沿放电通道的分布。

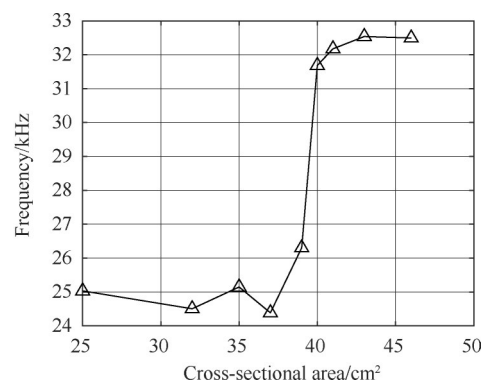


Fig. 2 Curve of frequency with cross-sectional areas

由图4可见,在一个周期内,电场强度从开始时刻 t_1 呈现指数增长,越靠近通道出口,电场强度越大,随着时间的推移电场强度会有大的起伏且往通道出口推移,直至电场强度再次呈现指数增长,一个周期结束。对比图4(a)~(d)可以得出,在开始时刻 t_1 和结束时刻 t_5 的电场强度均在 $0\sim 50\text{kV/m}$ 区间呈指数增长,在中间时刻电场强度的变化波动基本一致,因此由图4分析得出横截面积的变化并不会引起电场强度的显著变化。

由图5可见,在一个周期内, t_1 时刻的通道入口处,有一个平滑的凸起,随着位置的推移,离子密度

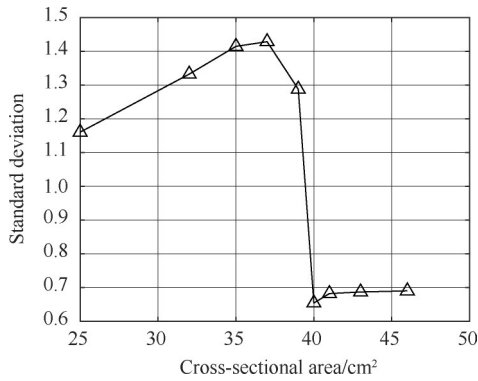
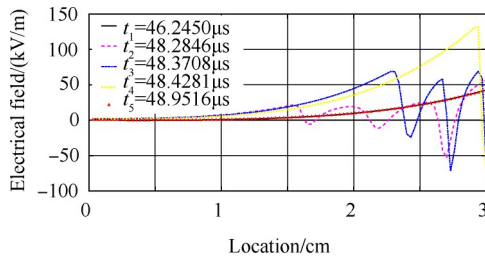
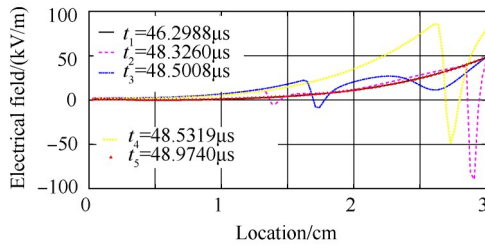


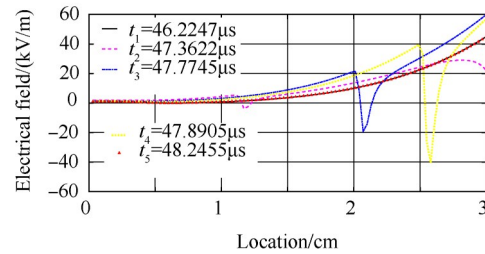
Fig. 3 Curve of standard deviation with cross-sectional areas



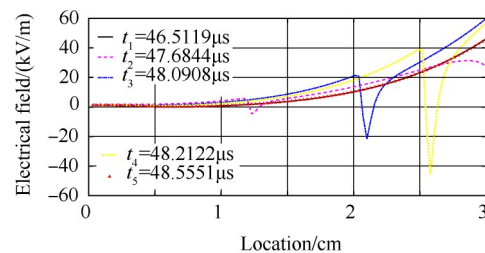
(a) $A_1 = 25 \text{ cm}^2$



(b) $A_2 = 37 \text{ cm}^2$



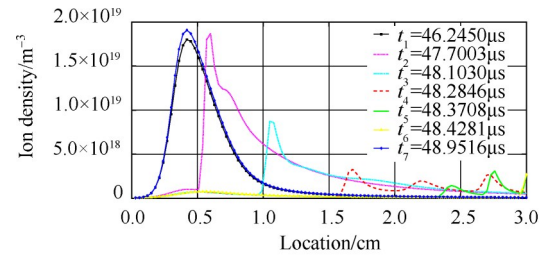
(c) $A_3 = 41 \text{ cm}^2$



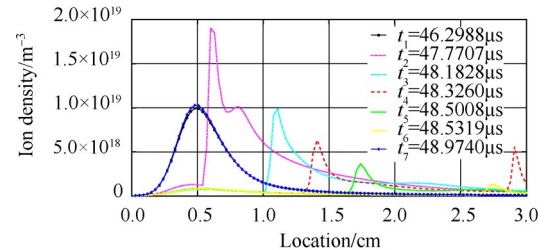
(d) $A_4 = 46 \text{ cm}^2$

Fig. 4 Spatial profiles of the electrical field intensity under different cross-sectional areas at different time

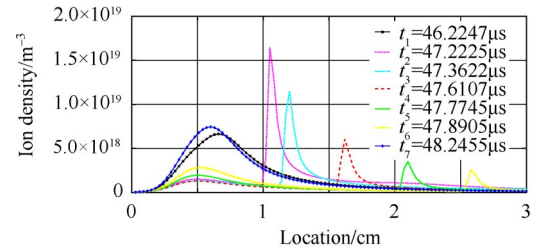
减小,直至为0,随着时间的推移,离子密度的凸起也向通道出口处推移,凸起的程度变得尖锐且幅度减小,在 t_7 时刻又呈现 t_1 时刻相同的凸起,但幅值比 t_1 时刻稍大。对比图5(a)和5(b)可知,横截面积为 25 cm^2 的离子密度在 t_1 和 t_7 时刻远远大于横截面积为 37 cm^2 的离子密度,且密度的最大值会随着横截面积的增加向通道出口推移,中间时刻离子密度最大值也随横截面积增加向通道出口处推移。对比图5(c)和5(d)可知,横截面积为 41 cm^2 的离子密度在 t_1 和 t_7 时刻大于横截面积为 46 cm^2 在同时刻的离子密度,但变化程度较小,且离子密度的最大值会随着横截面积的增加向通道出口推移,中间时刻离子密度最大值也随横截面积增加向通道出口处推移。



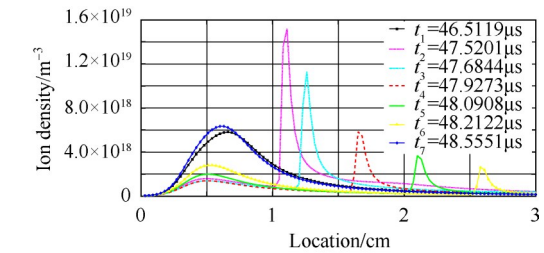
(a) $A_1 = 25 \text{ cm}^2$



(b) $A_2 = 37 \text{ cm}^2$



(c) $A_3 = 41 \text{ cm}^2$



(d) $A_4 = 46 \text{ cm}^2$

Fig. 5 Spatial profiles of the ion density under different cross-sectional areas at different time

图6和图7分别是电场强度、离子密度在一个周期开始和结束时刻随着横截面积变化而发生变化的过程。由图6可知,电场强度随横截面积的变化不显著;由图7可知,随着横截面积的增加,离子密度会减少,且其峰值会向通道出口推移。

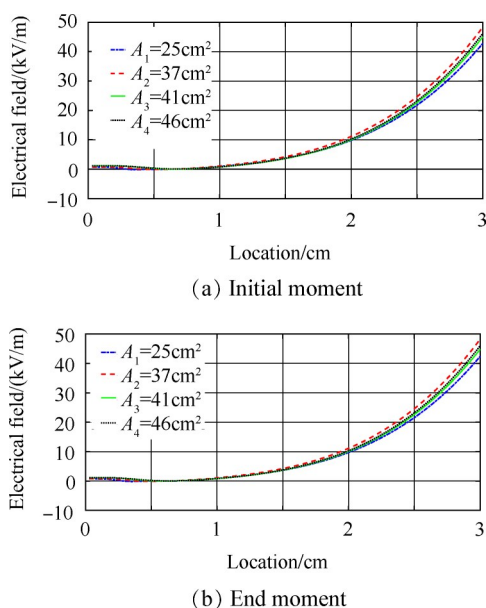


Fig. 6 Spatial profiles of the electrical field in the steady-state regime under different cross-sectional areas

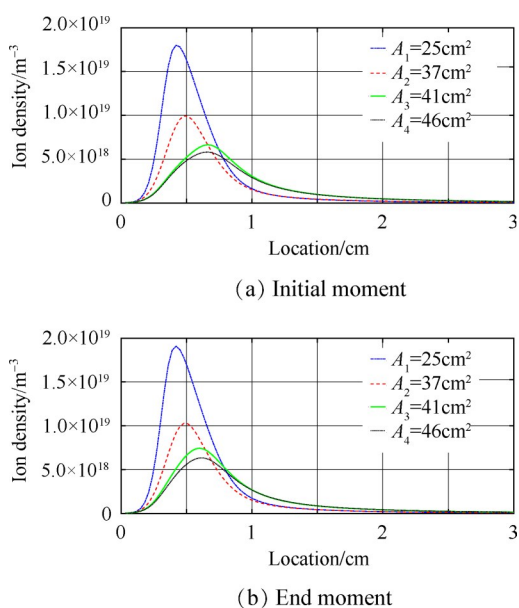


Fig. 7 Spatial profiles of the ion density in the steady-state regime under different cross-sectional areas

由对比试验可知,通道形貌变化后,离子密度发生了一些变化。根据HT的放电过程,可以将放电通道分成三个部分,分别是近阳极区、电离区和加速区。在HT运行过程中,不同的区域有不同的物理过程,对推力器本身会产生不同的影响^[20]。HT通道内

等离子体包括电子、离子和原子等多种粒子,粒子间相互碰撞对通道内等离子体的产生及离子的加速喷出均会产生影响^[20]。例如中性气体到达电离区后,将会与高速运动的电子发生碰撞,如果电子能量大于中性气体的电离能时,中性气体就会发生电离,产生的电子在电场的作用下获得能量,接着利用获得的能量再继续发生碰撞电离,产生一系列连锁反应。HT的电流是由离子电流和电子电流组成,由HT的基本原理可知,电子被磁场束缚,离子被电场加速,电子速度和离子速度受通道形貌影响很小,从图4和图6中也可以得知,电场强度随通道截面的变化很小,因此电流变化主要取决于离子密度和电子密度,而HT通道内基本满足准中性假设,则电子密度和离子密度相等。电子生成主要是依靠电子与通道内中性原子碰撞雪崩电离产生,随着侵蚀的加剧,横截面积增加,在相同中性气体流量的条件下,中性气体密度降低,电子与中性原子发生碰撞的频率降低,因此可以推断,粒子发生碰撞的频率随着横截面积的增加而减小,那么随着碰撞次数的减少,离子密度也会随之减小,与仿真结果图5相符。而HT中等离子体密度和电子温度达到一定程度时,电离就可能在通道的任何位置发生,根据文献[21]可知,放电通道中电离区的轴向位置是可以随着参数的变化(磁场轴向梯度的增加)而向通道出口方向移动,因此可以推断侵蚀的加剧会导致电离区向通道出口推移,与仿真结果图5同样吻合。

4 结论

本文对霍尔推力器不同壁面侵蚀对放电电流低频振荡的影响进行了研究,得出以下结论:

(1)在放电通道长度为3cm时,改变放电通道横截面积,经过对比可知,当通道经过侵蚀导致横截面积增大时,电流振荡幅值增加,振荡频率基本保持在25kHz不变,侵蚀到横截面积达到37cm²后,放电电流振荡幅值减小,振荡频率增加。

(2)HT放电通道内外器壁受离子束溅射后的侵蚀会改变通道内各区域离子密度,但电场强度并不会因为通道侵蚀而产生变化。

(3)HT放电通道内外器壁侵蚀到横截面积达到37cm²后,放电通道内离子碰撞次数急剧减少,离子密度降低,放电电流振荡频率总体有增加,而振荡幅度大幅减小。

致谢:感谢国家自然科学基金、黑龙江省自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Mazouffre S, Dubois F, Albarede L, et al. Plasma Induced Erosion Phenomena in a Hall Thruster[C]. *Istanbul: Proceedings of International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 2003.
- [2] 江滨浩, 赵一男, 魏立秋, 等. 霍尔推力器振荡问题的研究综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2062-2071.
- [3] 李擎宇. 霍尔推进器通道器壁腐蚀的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] Cheng S Y M. Modeling of Hall Thruster Lifetime and Erosion Mechanisms[D]. *Boston: Massachusetts Institute of Technology*, 2007.
- [5] Absalamov S K, Andreev V B. Measurement of Plasma Parameters in the Stationary Plasma Thruster(SPT-100) Plume and Its Effect on Spacecraft Components[C]. *Nashville: 28th AIAA, SAE, ASME, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1992.
- [6] Mason L S, Jankovsky R S, Manzella D H. 1000 Hours of Testing on a 10 Kilowatt Hall Effect Thruster[C]. *Salt Lake City: 37th AIAA Joint Propulsion Conference*, 2001.
- [7] Hiroyuki Koizumi, KimiyaKomurasaki, Yoshihiro Arakawa. Numerical Prediction of Wall Erosion on a Hall Thruster[J]. *Vacuum*, 2008, 83(1): 67-71.
- [8] Cao Xi-feng, Liu Hui, Jiang Wen-jia, et al. Influence of Channel Length on Discharge Performance of Anode Layer Hall Thruster Studied by Particle-in-Cell Simulation[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(8).
- [9] 李照忠. 霍尔推进器放电电流低频振荡特性及性能的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] 张 旭, 魏 鑫, 刘 敏, 等. 霍尔推力器阳极加热机制及设计优化[J]. 推进技术, 2019, 40(3): 699-706. (ZHANG Xu, WEI Xin, LIU Min, et al. Anode Heating Mechanism and Design Optimization of Hall Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(3): 699-706.)
- [11] 李 鸿, 刘 鹏, 于达仁. 霍尔推力器壁面形貌误差的侵蚀演化规律[J]. 中国科技论文, 2015, 10(4): 416-419.
- [12] Kwon K, Walker M L R, Mavris D N. Self-Consistent, One-Dimensional Analysis of the Hall Effect Thruster[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2011, 20(4).
- [13] Wei Li-qiu, Han Liang, Yang Zi-yi, et al. Modulating Action of Low Frequency Oscillations on High Frequency Instabilities in Hall Thrusters [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(5).
- [14] 吴晓鸽. 稳态等离子发动机低频振荡及镇定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [15] Wei Li-qiu, Wang Chun-sheng, Han Ke, et al. Effect of Ionization Distribution on the Low Frequency Oscillations Mode in Hall Thrusters [J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(1).
- [16] Yu Da-ren, Wang Chun-sheng, Wei Li-qiu, et al. Stabilizing of Low Frequency Oscillation in Hall Thrusters [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(11).
- [17] 王春生. 霍尔推力器低频振荡特性及控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [18] 李 敏, 汤海滨, 王立君, 等. 霍尔推力器放电通道溅射腐蚀计算[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(10): 2757-2762.
- [19] Wei Li-qiu, Han Liang, Yu Da-ren, et al. Low-Frequency Oscillations in Hall Thrusters [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(5): 121-130.
- [20] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion; Ion and Hall Thruster[M]. *New Jersey: John Wiley & Sons*, 2008.
- [21] 鄂 鹏, 段 萍, 江滨浩, 等. 磁场梯度对Hall推力器放电特性影响的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7182-7190.

(编辑: 张 贺)