

## 多模式离子推力器栅极系统三维粒子模拟仿真\*

陈茂林<sup>1)†</sup> 夏广庆<sup>2)</sup> 毛根旺<sup>1)</sup>

1)(西北工业大学, 固体火箭发动机燃烧、热结构与内流场国防科技重点实验室, 西安 710072)

2)(大连理工大学, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

(2014年4月15日收到; 2014年5月8日收到修改稿)

栅极系统是离子推力器推力产生的主要部件, 推力器的性能和寿命都与栅极系统密切相关. 对于具有多种工作模式的离子推力器, 基于电流电压输入的仿真可以有效评估推力器的工作状况. 采用三维粒子模拟方法对两栅极系统等离子体输运过程进行了仿真, 获得了不同模式下的推力器性能参数, 对比NSTAR的在轨测试参数, 验证了模型的正确性; 分析了工作模式变化对栅极区域电场分布和束流状态的影响以及离子推力器多模式设计需求. 分析结果表明: 远离栅极系统的外凸型屏栅鞘层和内凹型零等势面、低鞍点电势值和平缓的下游电势分布, 有利于提高栅极系统离子通过率, 抑制电子返流, 减小Pits-and-Grooves腐蚀, 是离子推力器工作模式的设计方向; 提高束流电压会导致发散角损失增大, 但可扩展栅极工作电流范围, 在束流强度较大的模式下, 使束流具有较好的聚焦状态, 有利于减小Barrel腐蚀. 研究结果为多模式离子推力器工作模式设计提供了参考.

关键词: 粒子模拟, 离子推力器, 栅极系统, 等离子体模拟

PACS: 29.27.-a, 02.70.Ns, 31.15.-p

DOI: 10.7498/aps.63.182901

## 1 引言

20世纪90年代以来, 以XIPS-13, XIPS-25, NSTRA-30, T6和 $\mu$ -10为代表的离子推力器实现了航天器姿轨控动力的大规模应用<sup>[1-3]</sup>. 随着航天技术的发展和任务的多样性需求, 多模式工作逐渐成为离子推力器主流设计方向, 其中NASA的NSTRA-30便具有112种工作模式<sup>[4]</sup>, 兰州空间技术物理研究所正在研制的LIPS-300离子推力器也设计了大、中、小三种典型的推力模式.

由于栅极系统是离子推力器产生推力的主要部件, 栅极系统的正常工作与否决定离子推力器的性能和寿命. 由于栅极系统实验成本和周期过长等因素, 研究人员针对离子推力器栅极系统开展了大量的仿真工作. 1979年, 美国橡树岭国家实验室便开始了离子推力器栅极系统的粒子模拟(PIC)仿

真研究<sup>[5]</sup>, 早期的工作主要是二维的模拟, 研究栅极系统的电场分布和离子束流运动轨迹; 近年来, 大量关于栅极系统的PIC仿真工作重点集中在新型高精度算法的研究、栅极腐蚀的模拟、电子返流、截止电流以及负离子引出过程的模拟, 以期为后续高效、长寿命、多模式栅极系统的改进设计提供参考依据<sup>[6-9]</sup>; 弗吉尼亚理工大学的Lin和Wang提出了离子推力器栅极模型的浸入式有限元求解方法; 密西根大学的Emhoff建立了NEXT离子推力器的二维栅极腐蚀模型; 科罗拉州立大学开发了用于离子推力器栅极仿真的三维柱坐标igx程序和ffx程序, 并采用ffx对NASA的大功率电推进计划离子推力器的栅极系统进行了仿真; 北京航空航天大学Zhong等<sup>[10]</sup>、刘畅等<sup>[11]</sup>, 哈尔滨工业大学杜军<sup>[12]</sup>, 西北工业大学孙安邦<sup>[13]</sup>, 兰州空间技术物理研究所贾艳辉等<sup>[14]</sup>分别开展了离子推力器二维/三

\* 国家自然科学基金(批准号: 51276147, 11105023, 11275034)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 3102014KYJD005)、西北工业大学基础研究基金(批准号: NPU-FFR-JC20120201)和工业装备结构分析国家重点实验室开放基金(批准号: GZ1101)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chenmaolin@nwpu.edu.cn

维PIC的仿真研究工作, 计算了不同推力器栅极系统的屏栅透明度、离子引出路径等与性能评价相关的参数和加速栅溅射腐蚀、屏栅溅射腐蚀等与寿命评价相关的参数.

上述研究工作主要是针对某一固定工作模式下的栅极系统, 对于多模式的栅极系统的仿真研究, 特别是多模式栅极系统工作模式设计的分析未见报道.

本文针对多模式离子推力器栅极系统, 开发了三维PIC仿真程序, 针对多模式需求, 改进了栅极入口条件设置. 以30 cm NSTRA离子推力器为仿真对象, 模拟了不同模式下的电势分布和离子运动状态, 从鞘层结构、下游零等势面位置、轴线电势分布、离子撞击加速栅几率、屏栅离子通过率、发散角损失等方面分析了工作模式设计过程中需要考虑的问题, 研究结果可为多模式离子推力器工作模式优化设计提供理论指导.

## 2 模型及模拟过程

### 2.1 仿真区域

由于栅孔结构的对称性, 仅取1/4个栅孔区间作为计算区域, 如图1所示. 图1(a)是单个完整

栅孔的三维结构, 计算区域取为ABCD-A'B'C'D'; 图1(b)为计算区域的左视图; 图1(c)为计算区域的对称结构; 图1(d)为单孔完整视图.

根据栅极结构尺寸, 对计算区域进行结构化网格划分, 考虑放电室等离子体密度在 $10^{16}$ — $10^{17}$  m<sup>-3</sup>, 网格空间步长取为 $5 \times 10^{-5}$  m.

### 2.2 PIC/MCC模型

PIC方法是模拟低温等离子体的一种常用数值方法, 它是粒子的运动和自洽电场的耦合求解方法<sup>[15,16]</sup>. 蒙特卡罗碰撞(Monte Carlo collision, MCC)是用来描述粒子间碰撞的常用方法, 本文用MCC方法来求解带电粒子与中性粒子间的碰撞.

#### 2.2.1 离子的运动

离子的运动遵循牛顿-洛仑兹定律, 其运动方程如下:

$$M \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}. \quad (2)$$

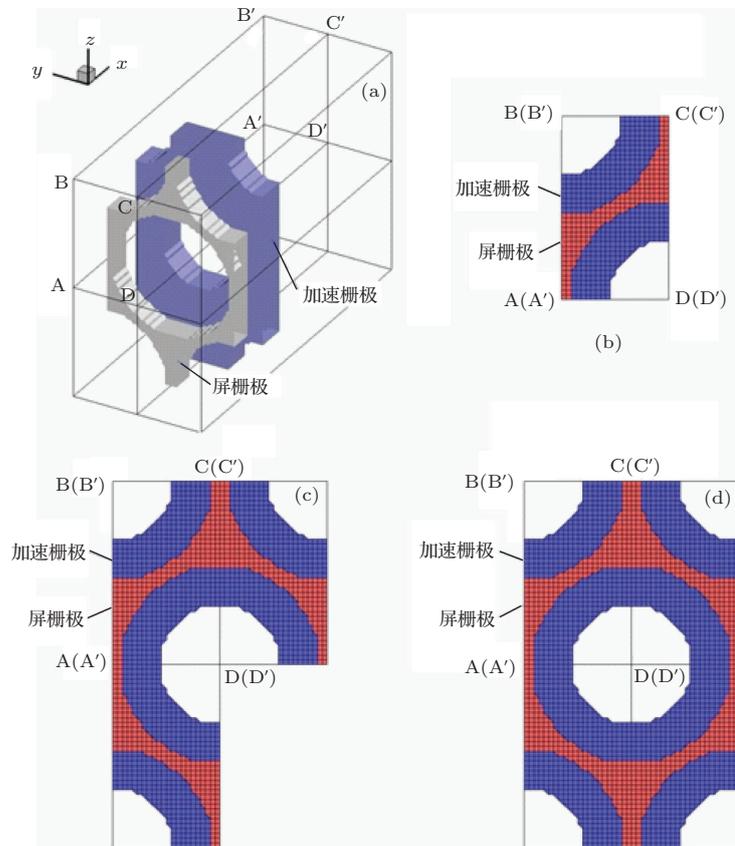


图1 计算区域 (a) 三维空间结构; (b) 左视图; (c) 对称结构; (d) 完整视图

### 2.2.2 电子数密度

对于电子而言,其质量较轻、运动速度较快,若采用粒子描述,其时间步长的选取要比离子低约三个数量级,大大增加了计算量.因此,本模型假设电子为流体,数密度服从 Boltzmann 分布.模型中电子主要由以下两部分组成,一是上游放电鞘层区域内的高能电子,二是下游羽流区域中和器发射出的中和电子.

在屏栅孔及其上游区域:

$$\begin{aligned} n_e &= n_0 \exp\left(\frac{\phi - \phi_0}{T_{e0}}\right) \quad \phi \leq \phi_0 \\ &= n_0 \left(1 + \frac{\phi - \phi_0}{T_{e0}}\right) \quad \phi > \phi_0, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $n_0$ ,  $\phi_0$  和  $T_{e0}$  分别为上游放电腔内等离子体参考数密度、电势以及温度.

在加速栅下游区域:

$$\begin{aligned} n_e &= n_\infty \exp\left(\frac{\phi - \phi_\infty}{T_{e\infty}}\right) \quad \phi \leq \phi_\infty \\ &= n_\infty \left(1 + \frac{\phi - \phi_\infty}{T_{e\infty}}\right) \quad \phi > \phi_\infty, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $n_\infty$ ,  $\phi_\infty$  和  $T_{e\infty}$  分别为下游羽流区域等离子体参考数密度、电势以及温度.

### 2.2.3 电场求解

电场由泊松方程求解:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e}{\epsilon_0}(n_i - n_e), \quad (5)$$

将 Boltzmann 方程和泊松方程耦合求解,即有

$$\nabla^2 \phi + \frac{en_i}{\epsilon_0} - \frac{en_{e,\text{ref}}}{\epsilon_0} \exp\left\{\frac{e[\phi - \phi_{\text{ref}}]}{k_B T_{e,\text{ref}}}\right\} = 0. \quad (6)$$

对上式进行线性化处理<sup>[12]</sup>后,可用超松弛迭代(SOR)方法进行求解.

## 2.3 边界条件

### 2.3.1 入口边界

如图 1 所示, ABCD 为入口边界面.根据鞘层理论,取入口处离子进入速度为 Bohm 速度,即

$$v_{\text{Bohm}} = \sqrt{\frac{k_B T_{e0}}{m_i}}. \quad (7)$$

入口离子数密度和离子通量常常根据放电室等离子体密度计算<sup>[3,5,11-13]</sup>,本文考虑到多模式的工作情况,以及放电室等离子体密度的空间分布差异,采用离子推力器束流  $J$  作为入口条件来计算离

子数密度和离子通量,得到的结果可更方便地进行验证.

对应的单个栅孔的离子束流为

$$J_b = 2.0 A_{\text{ABCD}} J / A_G, \quad (8)$$

式中,  $A_{\text{ABCD}}$  为计算区域入口面面积,也即半个栅孔对应的入口面积;  $A_G$  为有效栅极面积.

由此,可得入口处的离子数密度为

$$n_i = J_b / v_{\text{Bohm}} / \eta, \quad (9)$$

$\eta$  为屏栅的离子通过率,一般为 0.85—0.90 之间,可先设为 0.85 后,通过仿真结果进行调整.

对应放电室等离子体密度,即上游参考等离子体密度为  $n_0 = n_i / 0.605$ ;上游参考等离子体电势为  $\phi = \phi_{\text{sc}} + \phi_p - \phi_w$ ,  $\phi_{\text{sc}}$  为屏栅电势,  $\phi_w = \frac{T_e}{2} \ln\left(\frac{m_i}{2\pi m_e}\right)$  为壁面相对于预鞘的电势,  $\phi_p = T_e / 2$  为预鞘的电势降,即等离子体内部与预鞘边界之间的电势差.

### 2.3.2 出口边界

如图 1 所示,  $A'B'C'D'$  为出口边界面.

出口边界面电势按下游等离子体电势取

$$\phi_{\text{down}} = \frac{T_{e\_down}}{2} + \frac{T_{e\_down}}{2} \ln\left(\frac{m_i}{2\pi m_e}\right),$$

$T_{e\_down}$  为下游电子温度.

$A'B'C'D'$  的粒子边界条件为:当离子运动离开出口边界时,按逸出处理,删除粒子信息.

### 2.3.3 对称边界

如图 1 所示,  $AA'BB'$ ,  $AA'DD'$ ,  $BB'CC'$ ,  $C-C'DD'$  为对称边界面.

对称边界面上,沿对称面法向电场为 0,即  $AA'BB'$  和  $CC'DD'$  面上,  $E_y = 0$ ;  $AA'DD'$  和  $B-B'CC'$  面上,  $E_z = 0$ ;对称面交界线  $AA'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$  和  $DD'$  面上,  $E_y = 0$ ,  $E_z = 0$ .

对称边界上的粒子处理方式:当离子运动越过对称面,按镜面反射处理.

### 2.3.4 固壁边界

栅极系统为计算中的固壁边界,对于栅极固壁,电势为恒定值  $V_{\text{sc}}$ ,  $V_{\text{acc}}$ ;栅极内部电场为 0.

粒子的固壁边界为:当离子撞击到栅极表面时,按吸收处理,即删除粒子信息.

### 2.4 算例与模型验证

本文采用NASA的30 cm NSTAR离子推力器栅极结构作为计算依据, 栅极结构参数见表1<sup>[4]</sup>. 计算了不同工作模式(电流/电压)下的推力, 并与NSTAR在轨实测结果进行了对比, 如表2所示.

由表2可以看出, 采用本文仿真模型计算出的推力值和在轨测量值基本一致, 验证了仿真模型和数值方法的准确性.

表1 栅极结构参数

结构参数	值/mm
屏栅孔直径 $d_s$	1.91
屏栅厚 $t_s$	0.38
加速栅孔直径 $d_a$	1.14
加速栅厚 $t_a$	0.51
屏栅-加速栅间距 $g$	0.58
孔间距 $l$	2.21

## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 关键电势分布

#### 3.1.1 鞘层

合适的鞘层结构是栅极系统高效工作的重要保障. 仍采用NSTAR的典型栅极结构, 束流电压取为  $V_{beam} = 1100$  V (即屏栅电势  $\phi_{sc} = 1074$  V),

加速栅电势取为  $\phi_{acc} = -150$  V, 计算了不同束电流强度  $J$  时的鞘层结构如图2所示.

由图2可见, 当束电流值  $J$  非常小的时候, 屏栅鞘层为近似平面结构; 随着  $J$  的增大, 屏栅鞘层呈外凸形结构, 并逐渐向屏栅靠近;  $J$  继续增大, 鞘层将进一步发展并进入屏栅孔内, 导致栅极系统效率降低.

#### 3.1.2 零等势面

下游零等势面位置, 是推力器工作模式设置是否合理的另一个重要判据. 针对不同束电流密度  $J$ , 进行了栅极等离子体仿真, 计算条件同上, 获得的零等势面位置如图3所示.

对于零等势面, 当束电流值非常小的时候, 下游零等势面为近似平面结构, 如图3(a); 随着束电流的增大, 下游零等势面呈内凹型结构, 并逐渐向加速栅靠近; 束电流值继续增大, 鞘层进一步发展并进入加速栅孔. 当零等势面贯通加速栅孔后, 如图3(h), 将形成电子返流, 导致栅极失效.

离子推力器工作模式设置过程中, 需要预留一定的裕量, 保证零等势面和加速栅极有一个合适的距离, 避免电子返流的发生.

下游电势分布的设计除了需要考虑电子返流外, 还需要考虑电荷交换(CEX)碰撞产生的低能离子撞击加速栅的反向加速作用. 将在下面进一步讨论.

表2 仿真结果与NSTAR实测结果对比

工作模式(屏栅电势/加速栅电势/束电流)	实测推力 <sup>[4]</sup> /mN	计算推力/mN	误差/%
624 V / -150 V / 0.51 A	20.797	20.348	2.16
1074 V / -150 V / 0.61 A	31.766	32.409	2.02
1074 V / -150 V / 0.91 A	47.298	48.251	2.01
1074 V / -180 V / 1.21 A	62.227	63.116	1.43
1074 V / -180 V / 1.40 A	72.561	73.561	1.38
1074 V / -180 V / 1.49 A	77.388	77.885	0.64

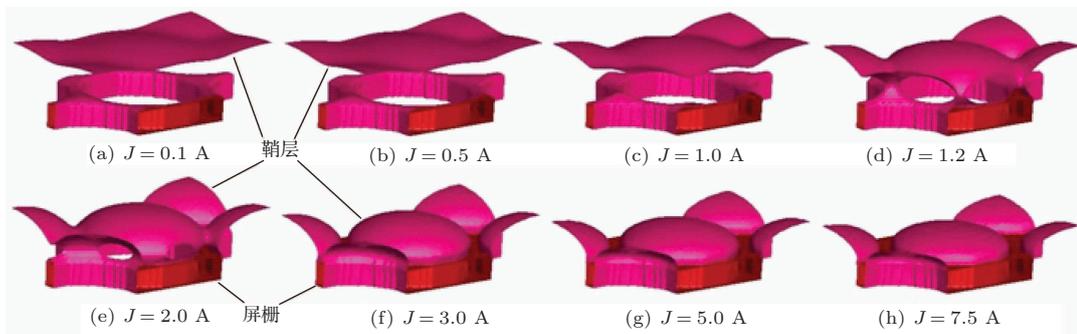


图2 (网刊彩色) 不同  $J$  对应的鞘层分布

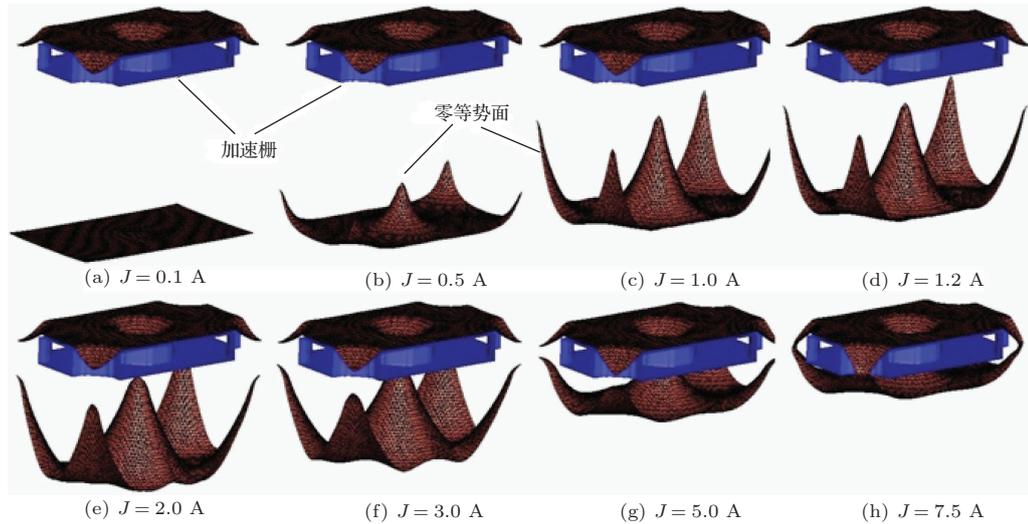


图3 (网刊彩色) 不同  $J$  对应的下游零等势面位置

### 3.1.3 轴线电势

由于中性气体分子会逸出离子推力器的放电室和栅极系统, 在栅极系统及其下游都会有一定的中性气体分子分布. 束流离子在运动过程中会与该部分中性气体分子发生碰撞. 部分离子-中性气体分子会发生 CEX 碰撞, 产生低能离子, 下游低能离子会在栅极反向电场的作用下加速撞击加速栅极, 形成所谓的 Pits-and-Grooves 腐蚀. 合理的下游电势分布设计, 可以使 CEX 离子在栅极电场中获得的能量更少, 以减小 Pits-and-Grooves 腐蚀. 图4为根据 30 cm NSTAR 推力器的工作模式, 计算3个典型电势分布情况下栅极系统轴线电势随  $J$  的变化. 图中 1100 V/−150 V, 1100 V/−180 V 和 1800 V/−180 V 分别表示束流电压  $V_{\text{beam}}$  ( $V_{\text{beam}} = \phi_{\text{plasma}} + \phi_{\text{sc}} \approx \phi_{\text{sc}}$ ,  $\phi_{\text{plasma}}$  为鞘层电势) 和加速栅极电势  $\phi_{\text{acc}}$ .

由图4(a), (b), (c) 可见, 下游电势分布表现为一个马鞍形分布, 存在一个电势最低点, 称为鞍点. 随着  $J$  的增大, 鞍点逐渐左移, 靠近加速栅, 这和零等势面左移的结果一致; 另一方面, 随着  $J$  的增大, 下游位置的整体电势升高,  $J = 3.0$  A 时的下游电势高达 100 V,  $J = 5.0$  A 时的下游电势高达 200 V, 过高的下游电势会使 CEX 离子获得更多的反向动能, 加剧加速栅的破坏, 故对于 30 cm NSTAR 离子推力器, 典型的  $J$  均在 2.0 A 以下.

图4(d) 为不同栅极电势设定,  $J = 1.2$  A 和  $J = 5.0$  A 两种工况条件的下游电势分布对比. 通过对比可以发现, 加速栅电势  $\phi_{\text{acc}}$  的降低可以使鞍点电势值更低; 而束流电压  $V_{\text{beam}}$  (或屏栅电势  $\phi_{\text{sc}}$ ) 的提高则会使鞍点电势增大, 但另一方面又使得下

游整体电势降低.

在推力器工作模式设计时, 需要在保证鞍点电势满足抑制电子返流的基础上, 尽可能地降低下游整体电势, 以减小 CEX 离子对加速栅极的 Pits-and-Grooves 腐蚀.

综上, 远离栅极系统的外凸型屏栅鞘层和内凹型下游零等势面是较好的栅极工作状态, 合适的鞍点电势和下游整体电势分布均为推力器工作模式设计时需要考虑的因素.

### 3.2 离子通过率

工质利用率是栅极效率的一个重要考核参数, 主要由栅极的几何透过率和离子通过率  $\eta$  决定. 其中几何透过率由栅极结构决定, 表征中性气体分子穿过栅孔的几率; 离子通过率则主要由鞘层结构和栅极电场分布决定. 较高的离子通过率和较低的几何透过率可获得较高的工质利用率.

栅极的几何透过率由栅极设计结构决定, 变化不大 (屏栅一般在 67% 左右, 加速栅在 20% 左右), 且与栅极电位和束电流  $J$  等工况无关, 故不再详细讨论, 本文将深入讨论离子通过率的影响因素.

3个典型电势分布情况下离子通过率  $\eta$  随  $J$  的变化如图5所示.

由图5可见, 随着束电流强度  $J$  的增大, 离子通过率呈现出先缓慢变化后迅速减小的趋势. 分析认为, 离子的通过率主要受屏栅鞘层结构影响:  $J$  较小时, 鞘层结构在屏栅孔外, 绝大多数离子在鞘层区域内受鞘层电场加速进入屏栅孔, 离子通过率较高; 随着  $J$  的增大, 鞘层向屏栅靠近, 鞘层覆盖区域减小, 受鞘层加速的离子缓慢减少, 离子通过率

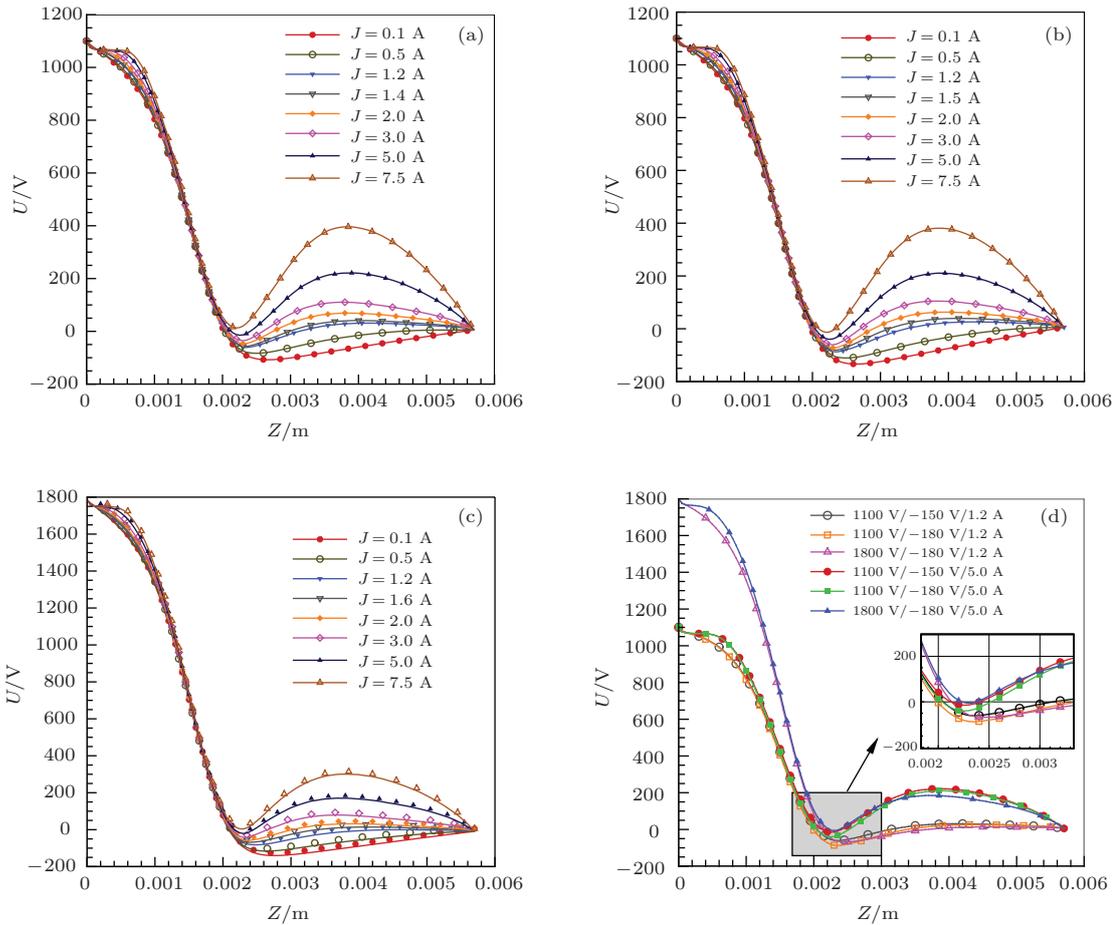


图4 轴线电势分布随  $J$  的变化 (a)  $V_{\text{beam}} = 1100 \text{ V}$ ,  $\phi_{\text{acc}} = -150 \text{ V}$ ; (b)  $V_{\text{beam}} = 1100 \text{ V}$ ,  $\phi_{\text{acc}} = -180 \text{ V}$ ; (c)  $V_{\text{beam}} = 1800 \text{ V}$ ,  $\phi_{\text{acc}} = -180 \text{ V}$ ; (d) 典型工况对比

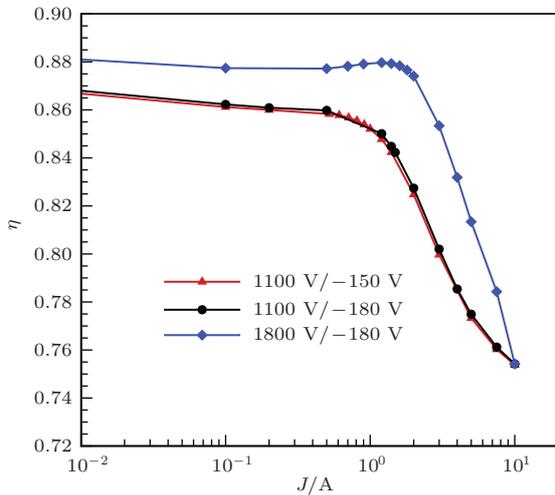


图5 离子通过率  $\eta$  随  $J$  的变化

随之下降;  $J$  进一步增大, 鞘层逐渐嵌入屏栅孔内 (如图 2(e), (f), (g) 所示), 大量离子不再受鞘层电场作用, 进入屏栅孔的几率减小, 离子通过率迅速降低.

进一步分析不同束流电压  $V_{\text{beam}}$  和栅极电势的

影响. 对于相同的  $V_{\text{beam}}$  情况 (1100 V/-150 V 和 1100 V/-180 V), 离子通过率随着  $J$  的变化曲线基本重合. 由于栅极系统的等离子体电势远小于屏栅电势, 束流电压  $V_{\text{beam}}$  近似等于屏栅电势  $\phi_{\text{sc}}$ . 在  $\phi_{\text{sc}}$  确定的情况下, 栅极等离子体的鞘层结构便仅与等离子体密度相关, 而等离子体密度又由  $J$  确定. 所以, 相同的  $V_{\text{beam}}$  和相同的  $J$  工况下, 栅极结构的离子通过率基本相等,  $\phi_{\text{acc}}$  的变化对离子通过率的影响不明显. 对于相同的  $\phi_{\text{acc}}$  (1100 V/-180 V 和 1800 V/-180 V), 较高的  $V_{\text{beam}}$  或  $\phi_{\text{sc}}$  会使得离子通过率更高, 并且离子通过率迅速下降的拐点也会更大. 离子通过率增大的原因是,  $V_{\text{beam}}$  增大会使得屏栅外侧的鞘层覆盖区域更广, 影响更多的离子; 而拐点增大的原因则是高  $V_{\text{beam}}$  会使得鞘层的整体电势升高, 鞘层缩入栅极孔内需要更大的等离子体密度, 即更大的束电流强度  $J$ .

$V_{\text{beam}}$  对离子通过率的影响结果表明: 当离子推力器工作在较大束电流模式下时, 更高的  $V_{\text{beam}}$  或  $\phi_{\text{sc}}$  可保持较高的离子通过率.

### 3.3 发散角损失

离子推力器的推力损失包括很多因素,与栅极系统相关的损失主要是发散角损失  $\varepsilon_{\text{div}}$ . 发散角损失的原因是,在栅极电场驱动下,部分离子会存在偏离轴向的运动速度,造成轴向推力损失. 3个典型电势分布情况下,发散角损失  $\varepsilon_{\text{div}}$  随束电流的变化如图6所示.

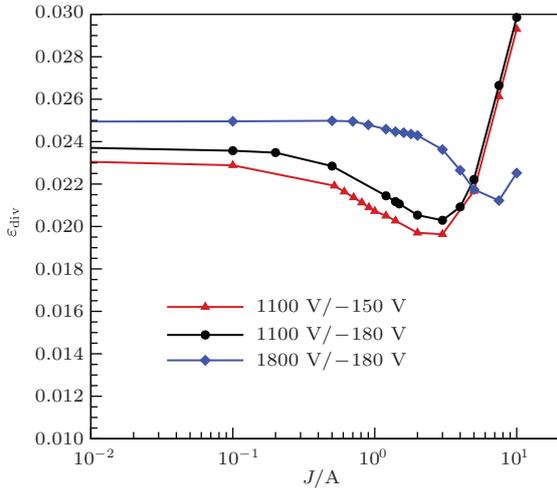


图6 发散角损失  $\varepsilon_{\text{div}}$  随束电流变化

离子推力器的束流发散角主要受栅极系统对离子束流的聚焦状态影响. 当聚焦状态良好时,束流离子具有较好的准直性,发散角最小;当处于欠聚焦状态时,束流离子的运动轨迹会有轻微偏转,存在一个较小的发散角;当束流处于过聚焦状态时,束流离子会具有明显的径向速度,发散角迅速增大.

图6中,随着  $J$  的增大,栅极系统对束流的聚焦状态从欠聚焦、聚焦逐渐转变成过聚焦过程中,发散角损失也呈现出先减小、后迅速增大的趋势.

对比  $V_{\text{beam}} = 1800 \text{ V}$  和  $V_{\text{beam}} = 1100 \text{ V}$  的发散角损失,高  $V_{\text{beam}}$  会导致更高的发散角损失,但其过聚焦状态会更晚出现. 这表明:  $J$  较小时,采用低  $V_{\text{beam}}$  可以减少发散角损失,而  $J$  较大时,更高的  $V_{\text{beam}}$  可以使得束流保持较好的聚焦性,减小由于过聚焦导致的发散角损失.

对于单模式离子推力器来说,良好的聚焦状态是设计目标;对于多模式离子推力器,栅极结构不可调整,需要保证大部分模式工作在聚焦状态.

### 3.4 加速栅溅射腐蚀

加速栅极由于溅射腐蚀,导致栅孔变大是离子推力器失效的主要因素之一. 加速栅的溅射腐蚀主

要来自两个方面: CEX碰撞产生的低能离子反向加速溅射 (Pits-and-Grooves 腐蚀) 和聚焦状态不佳的离子对栅极的直接撞击 (Barrel 腐蚀). 前文已经讨论过下游电势分布对 Pits-and-Grooves 腐蚀的影响,这里将进一步讨论 Barrel 腐蚀. 计算了3个典型电势分布情况下,不同模式下的束流离子撞击加速栅几率  $P$  如图7所示.

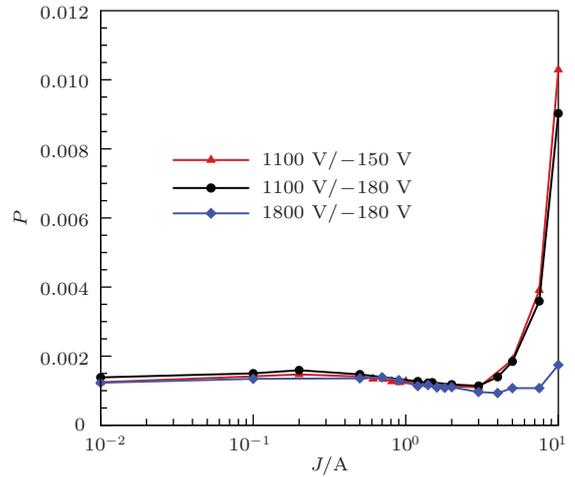


图7 束流离子撞击加速栅几率  $P$  随  $J$  变化

由图7可见,在  $J$  较小时,离子撞击加速栅的几率仅为0.1%—0.15%,随着  $J$  的增大,离子撞击几率呈先减小后增大的趋势,这同样是由于束流的聚焦状态决定的: 聚焦良好时,束流中的离子能最大幅度的通过加速栅孔,从而具有最小的撞击栅极几率;欠聚焦时,部分束流离子无法进入加速栅孔,直接撞击在加速栅上游端面,撞击栅极几率略有增大;而过聚焦状态下,束流离子由于电场力作用,会穿过栅孔对称轴线,撞击到栅孔内表面,随着过聚焦的加剧,部分离子甚至会在进入栅孔前直接撞击在加速栅极上游表面.

对比  $V_{\text{beam}} = 1800 \text{ V}$  和  $V_{\text{beam}} = 1100 \text{ V}$  情况下的离子撞击几率,当  $J$  较小时,不同  $V_{\text{beam}}$  的离子撞击几率相差不大,但随着  $J$  的增大,低  $V_{\text{beam}}$  情况的离子撞击几率会先增大,这是由于低  $V_{\text{beam}}$  先出现过聚焦状态引发的. 对离子撞击几率的分析结果同样表明: 对  $J$  较大的情况,需要较高的  $V_{\text{beam}}$  可以使得束流保持较好的聚焦性,以减小由于离子撞击作用引发的加速栅溅射侵蚀.

在多模式推力器栅极的工作模式设定中,要考虑  $V_{\text{beam}}$  和  $J$  的匹配关系,减小由于聚焦状态不佳引起的 Barrel 腐蚀.

### 3.5 讨论

本文在仿真计算中,模拟了不同电势分布和不同束电流  $J$  条件下的离子推力器栅极等离子体输运过程,获得了不同工作模式下的推力器性能参数、电势分布及离子运动规律.

栅极鞘层结构和下游零等势面位置分析结果表明,远离栅极结构的外凸型鞘层和内凹型下游零等势面是推力器工作模式设计的目标;束电流强度的增加,会使得鞘层和下游零等势面向栅极靠近,甚至嵌入栅孔内,在设计过程中,需要尽量避免或调整栅极电势以匹配束电流  $J$  的变化.

轴线电势分布的研究则表明,鞍点的位置和大小可通过栅极电势调整.降低加速栅电势  $\phi_{acc}$  可实现鞍点电势值的减小,达到抑制电子返流的目的,但航天器总体设计时则希望有尽可能接近  $0\text{ V}$  的加速栅电势,需要统筹考虑.增大屏栅电势  $\phi_{sc}$  则会增大鞍点电势值,影响抑制电子返流效果;另一方面,  $\phi_{sc}$  的增大又会降低下游整体电势分布,实现减小 Pits-and-Grooves 腐蚀的目的.因此,在工作模式设计中,需要综合考虑栅极电势对电子返流抑制及对 Pits-and-Grooves 腐蚀控制的影响.

离子通过率的分析则显示其主要受束电流强度  $J$  和束流电压  $V_{beam}$  (或屏栅电势  $\phi_{sc}$ ) 影响,更大的  $V_{beam}$  可以获得更高的离子通过率,而加速栅电势  $\phi_{acc}$  的变化对离子通过率的影响甚微.结合束流对鞘层结构的影响分析认为,大束流强度  $J$  需要匹配较高的束流电压  $V_{beam}$ , 才可获得更好的鞘层结构,实现较大的离子通过率.

发散角损失和 Barrel 腐蚀研究,都表明较好的束流聚焦状态是工作模式的另一个重要设计目标.与离子通过率不同的是,较大的束流电压  $V_{beam}$  (或屏栅电势  $\phi_{sc}$ ) 会导致更大的发散角损失.另一方面,束流电压  $V_{beam}$  和束电流强度  $J$  的匹配工作是减小发散角损失和 Barrel 腐蚀的主要途径.

### 4 结论

针对多模式离子推力器栅极系统,采用基于电流电压入口的 3D-PIC 模型进行了不同模式下栅极等离子体输运过程模拟,对比 NSTAR 在轨测试数据,验证了模型和仿真方法的可靠性.结合不同模式下的鞘层结构、下游电势分布、离子通过率、束流发散角损失和加速栅溅射腐蚀的仿真结果,分析了多模式离子推力器工作模式设计中需要重点考虑的问题,获得结论如下.

1) 鞘层结构决定栅极系统的离子通过率,远离屏栅的外凸型鞘层是理想的工作模式.鞘层结构主要由束电流强度  $J$  (上游等离子体密度) 和束电压  $V_{beam}$  决定,随束电流强度  $J$  增大,鞘层逐渐向屏栅靠近;而提高束电压  $V_{beam}$  则会减缓鞘层向屏栅靠近的速度,并提高离子通过率.考虑到电势调节的难度,在离子推力器工作模式设计中,束电压  $V_{beam}$  需随束电流强度  $J$  阶跃式递增.

2) 电子返流的限制主要通过栅极电势设置来调控.远离加速栅的零等势面位置和降低加速栅电势有利于降低轴线电势分布曲线的鞍点,实现抑制电子返流的目的;而提高屏栅电势则会对应增大鞍点电势值,但同时又会降低加速栅下游整体电势分布,从而减小栅极的 Pits-and-Grooves 腐蚀.合理的屏栅电势  $\phi_{sc}$ 、加速栅电势  $\phi_{acc}$  和束电流值  $J$  的匹配设计需要在抑制电子返流的基础上尽可能减小 Pits-and-Grooves 腐蚀.

3) 束流聚焦状态是影响离子推力器发散角损失和加速栅 Barrel 腐蚀的主要因素.对于设定栅极电势情况,束流的聚焦状况随束电流的增大先后呈欠聚焦、聚焦和过聚焦状态:欠聚焦情况下,发散角损失和 Barrel 腐蚀略大;聚焦状态下,发散角损失和 Barrel 腐蚀最小;过聚焦情况下,发散角损失和 Barrel 腐蚀会迅速增大,这是离子推力器工作模式设计中必须避免的状况.

### 参考文献

- [1] Sovey J S, Rawlin V K, Patterson M J 2001 *J. Propuls. Power* **17** 517
- [2] Patterson M J, Sovey J S 2013 *J. Aerospace Engineer.* **26** 300
- [3] Yamamoto N, Tomita K, Yamasaki N, Tsuru T, Ezaki T, Kotani Y, Uchino K, Nakashima H 2010 *Plasma Sources Sci. Technol.* **19** 045009
- [4] Wang J, Polk J, Brophy J, Katz I 2003 *J. Propuls. Power* **19** 1192
- [5] Whealton J H, Whitson J C 1980 *Particle Accelerators* **10** 235
- [6] Wheelock A, Cooke D L, Gatsonis N A 2004 *Comput. Phys. Commun.* **164** 336
- [7] Miyasaka T, Kobayashi T, Asato K 2010 *Vacuum* **85** 585
- [8] Miyamoto K, Okuda S, Hatayama A, Hanada M, Kojima A 2013 *AIP Conference Proceedings* **1515** 22
- [9] Miyamoto K, Okuda S, Hatayama A, Hanada M, Kojima A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 023512
- [10] Zhong L W, Liu Y, Li J, Gu Z, Jiang H C, Wang H X, Tang H B 2010 *Chin. J. Aeronaut.* **23** 15

- [11] Liu C, Tang H B, Gu Z, Jiang H C 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1193 (in Chinese) [刘畅, 汤海滨, 顾佐, 江豪城 2006 强激光与粒子束 **18** 1193]
- [12] Du J 2009 *M. S. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [杜军 2009 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [13] Sun A B 2010 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [孙安邦 2010 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [14] Jia Y H, Li Z M, Zhang T P, Li J 2012 *Chin. Space Sci. Technol.* **32** 72 (in Chinese) [贾艳辉, 李志明, 张天平, 李娟 2012 中国空间科学技术 **32** 72]
- [15] Wang H Y, Jiang W, Sun P, Kong L B 2014 *Chin. Phys. B* **23** 035204
- [16] Hu W P, Sang C F, Tang T F, Wang D Z, Li M, Jin D Z, Tan X H 2014 *Phys. Plasmas* **21** 033510

## Three-dimensional particle in cell simulation of multi-mode ion thruster optics system\*

Chen Mao-Lin<sup>1)†</sup> Xia Guang-Qing<sup>2)</sup> Mao Gen-Wang<sup>1)</sup>

1) (*Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

( Received 15 April 2014; revised manuscript received 8 May 2014 )

### Abstract

The optics is one of the main components of an ion thrust, which influences the performance and thruster lifetime. The operation of ion thruster can be evaluated by numerical simulation based on the current-voltage entrance condition, especially for thruster with a variety of operating modes. The plasma transport process is simulated with 3D-PIC (particle in cell) method for a two-grids optic. The performances of the NSTAR thruster under different operating modes are calculated and compared with the results of in-orbit test, verifying the correctness of the simulation mode. The influences of operation modes on the electric field distribution and the beam state are analyzed, and the requirements of multi-mode design for ion thruster are discussed. The results show that a convex sheath and concave zero equipotential surface away from the optic, low value of "saddle point", and gentle downstream potential distribution, which help to improve ion pass rate, suppress electronic reflux and reduce Pits-and-Grooves corrosion, are the target of ion thruster mode design. Increasing beam voltage will result in a high loss caused by the divergence angle, and extend the beam current range for a good operation condition. For a large beam current mode, high beam voltage will make the beam have a better "focus" state, and reduce the Barrel corrosion. The results will provide a reference for the operation mode design for the multi-mode ion thruster.

**Keywords:** particle in cell, ion thruster, optic, plasma simulation

**PACS:** 29.27.-a, 02.70.Ns, 31.15.-p

**DOI:** 10.7498/aps.63.182901

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51276147, 11105023, 11275034), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 3102014KYJD005), the NPU Foundation for Fundamental Research, China (Grant No. NPU-FFR-JC20120201), and Open Project of State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, China (Grant No. GZ1101).

† Corresponding author. E-mail: chenmaolin@nwpu.edu.cn