

栅极热变形对离子推力器工作过程影响分析

陈茂林 夏广庆 徐宗琦 毛根旺

Analysis on the effects of optics thermal deformation on the ion thruster operation

Chen Mao-Lin Xia Guang-Qing Xu Zong-Qi Mao Gen-Wang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094104 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094104

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094104>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多环涡旋光束的实验研究

Experimental study on multiple-ring vortex beams

物理学报.2014, 63(24): 244103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244103>

运动物体在颗粒物质中的动力学过程及最大穿透深度仿真研究

Simulation of the projectile dynamics in granular media

物理学报.2013, 62(13): 130204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.130204>

离轴拉盖尔-高斯涡旋光束传输中的光斑演变

Change of the off-center Laguerre-Gaussian vortex beam while propagation

物理学报.2012, 61(6): 064103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064103>

Pb液滴在Ni基底润湿铺展行为的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of the wetting behavior of Pb droplet on Ni substrate

物理学报.2013, 62(12): 120203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.120203>

接触角与液固界面热阻关系的分子动力学模拟

A molecular dynamics simulation on the relationship between contact angle and solid-liquid interfacial thermal resistance

物理学报.2013, 62(11): 110204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.110204>

栅极热变形对离子推力器工作过程影响分析*

陈茂林^{1)†} 夏广庆²⁾ 徐宗琦²⁾ 毛根旺¹⁾

1) (西北工业大学燃烧、热结构与内流场重点实验室, 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9月26日收到; 2014年11月13日收到修改稿)

栅极热变形是影响离子推力器性能和寿命的重要因素. 采用三维粒子方法对栅极系统等离子体输运过程进行模拟, 对比、分析栅极热变形前后栅极系统的电子返流限制、导流系数限制、离子通过率和发散角损失. 结果表明: 栅极热变形增大了屏栅离子通过率和推力器推力值, 并由于加速栅截止电流阈值的提高拓展了推力器工作电流区间, 但电子返流阈值的明显降低对栅极系统可靠工作造成了不利影响.

关键词: 离子推力器, 栅极系统, 热变形, 等离子体模拟

PACS: 41.85.-p, 02.70.Ns, 31.15.-p

DOI: 10.7498/aps.64.094104

1 引言

静电离子推力器是一种通过高速喷射离子束流产生推力的高性能动力装置. 以 XIPS-13, XIPS-25, NSTAR-30, T6 和 μ -10 为代表的离子推力器是新型长寿命卫星、小行星探测器和深空探测器等航天器推进系统的主要发展方向之一^[1-3]. 栅极系统是离子推力器关键部件, 离子在栅极电场作用下加速喷出产生推力. 离子推力器工作过程中, 栅极系统在热应力作用下发生形变, 非工作状态下的栅极称为冷栅极 (cold grids), 工作状态下发生形变的栅极称为热栅极 (hot grids)^[4]. 放电腔内外流场参数的差异, 会使得屏栅和加速栅受到的热应力及产生的形变也会有很大差异, 并造成屏栅和加速栅间距的变化, 进而引起栅极电场位型发生改变, 进一步影响离子推力器的工作状态、性能参数和寿命.

栅极的热应力和热变形在离子推力器研制初期便引起研究人员的关注. 早在上世纪 70 年代, 离子推力器概念提出者 Kaufman 便提出了栅极热变形会对离子推力器的工作状态, 特别是导流系数和

电子返流阈值产生影响^[5]. 随着离子推力器在航天领域的成功应用, 研究人员开始了离子推力器栅极热变形的研究: Soulas^[4] 和 Bundesmann^[6] 分别完成了 NSTAR 离子推力器不同工作模式下栅极热变形量的实验测量; Noord^[7] 和郑茂繁^[8] 等采用热应力计算和数值模拟的方法计算了不同栅极系统的热变形量; Wirz 等^[9] 采用半经验公式计算了不同功率下栅极变形后的电子返流限制阈值, 并与测量值进行了对比.

上述研究工作在离子推力器栅极热变形的测量方面取得了丰硕的成果, 热变形量对离子推力器的工作过程影响的定性分析也开展了卓有成效的研究, 但少有热变形对离子推力器性能影响的定量研究.

本文针对 NASA 的 NSTAR 离子推力器栅极系统, 进行 3 维粒子模拟, 研究栅极未变形和变形后等离子体输运过程及栅极电场分布, 定量分析离子通过率, 交叉电流和截止电流, 电子返流限制阈值, 发散角损失等参数的变化, 结果可为离子推力器性能和寿命评估及栅极系统的优化设计提供参考.

* 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, 3132014328) 和西北工业大学基础研究基金 (批准号: NPU-FFR-JC20120201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenmaolin@nwpu.edu.cn

2 计算模型

2.1 物理模型与模拟区域

计算主要针对 NASA 的 30 cm NSTAR 离子推力器栅极结构, 栅极结构参数见表 1 [10].

表 1 栅极结构参数
Table 1. Structural parameters of optics.

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

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 [11]. 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) 为单个栅孔的左视图; 图 1 (c) 为计算区域的左视图; 图 1 (d) 为单个栅孔区域的俯视图.

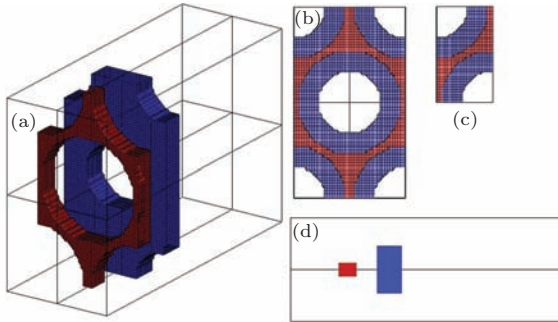


图 1 (网刊彩色) 计算区域 (a) 单孔三维空间结构; (b) 单孔左视图; (c) 计算区域左视图; (d) 单孔俯视图

Fig. 1. (color online) The calculation region. (a) 3D view of one grid hole; (b) left view of one grid hole; (c) left view of simulation region; (d) vertical view of one grid hole.

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^{-3} , 网格空间步长取为 5×10^{-5} m.

2.2 模拟方法

粒子网格法 (particle in cell, PIC) 是模拟低温等离子体的一种常用数值方法, 它是粒子运动和自洽电场的耦合求解方法 [12]. 蒙特卡洛碰撞 (Monte Carlo collision, MCC) 是用来描述粒子间碰撞的常

用方法, 本文用 PIC/MCC 方法模拟离子束流在栅极电场作用下的输运过程.

PIC 模型中, 离子运动遵循牛顿-洛伦兹定律, 其运动方程如下 [13]

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

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v},$$

式中, M 为粒子质量, e 为单位电荷 (模型中仅考虑一价离子, 故离子带电量为单位电荷), \mathbf{v} , \mathbf{x} 分别为粒子的速度和位置矢量, \mathbf{E} , \mathbf{B} 分别为粒子所在位置处的电场和磁场强度.

电子视为流体, 数密度服从 Boltzmann 分布:

$$n_e = n_{e,\text{ref}} \exp\left(\frac{\phi - \phi_{\text{ref}}}{T_{e,\text{ref}}}\right), \quad \phi \leq \phi_{\text{ref}},$$

$$= n_{e,\text{ref}} \left(1 + \frac{\phi - \phi_{\text{ref}}}{T_{e,\text{ref}}}\right), \quad \phi > \phi_{\text{ref}},$$

式中 ϕ 为电子所在位置电势值, n_e 为电子数密度, $n_{e,\text{ref}}$, ϕ_{ref} 和 $T_{e,\text{ref}}$ 分别为参考点等离子体数密度、电势以及电子温度. 对于加速栅上游电子数密度计算, 参考点为放电腔内部; 对于加速栅下游电子数密度计算, 参考点为下游羽流中中和面.

电场值由泊松方程求解:

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

式中, ϵ_0 为真空介电常数, n_i 为离子数密度. 将 Boltzmann 方程和泊松方程耦合求解, 即有

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

式中, k_B 为玻尔兹曼常数. 对上式进行线性化处理 [14] 后, 可用超松弛迭代方法进行求解.

MCC 模型中, 目标粒子 (氙离子) 与背景粒子 (氙气分子) 之间的碰撞可以用碰撞概率 P 描述. 在 Δt 时间内, 碰撞概率 P 为

$$P = 1 - \exp(-n_t v_{\text{inc}} \sigma_T(\epsilon_{\text{inc}}) \Delta t),$$

式中, n_t 表示目标粒子的数密度, v_{inc} 表示目标粒子的速度, $\sigma_T(\epsilon_{\text{inc}})$ 代表粒子之间的碰撞总截面积, ϵ_{inc} 代表目标粒子的能量.

栅极计算中, 主要考虑离子和中性分子的弹性碰撞和电荷交换碰撞 (charge exchange, CEX), 氙离子和氙气分子弹性碰撞截面 $\sigma_{\text{in,el}}$ 和 CEX 碰撞截面 $\sigma_{\text{in,cex}}$ 分别为 [14-16]

$$\sigma_{\text{in,el}} = \frac{6.42 \times 10^{-16}}{v_r},$$

$$\sigma_{\text{in,cex}} = (-23.30 \log_{10} v_r + 142.21)$$

$$\times 0.8423 \times 10^{-20},$$

式中, v_r 表示表示氦离子和氦气分子的相对速度.

整个PIC/MCC的求解过程, 如图2所示 [14,17].

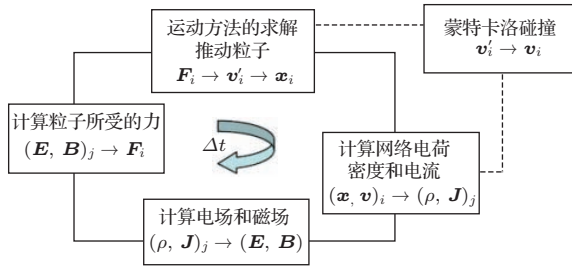


图2 PIC/MCC求解流程图
Fig. 2. Flow chart of PIC/MCC.

3 模拟结果与讨论

3.1 屏栅离子通过率 η_{sc}

离子通过率 η_{sc} 是栅极效率的一个重要考核参数, 一般指通过屏栅孔的离子电流 J_b 与来流离子电流 J_0 的比值, 即 $\eta_{sc} = J_b/J_0 = J_b/(J_b + J_c)$, 其中 J_c 为屏栅离子电流, 即撞击在屏栅上的离子产生的电流.

离子通过率 η_{sc} 主要由鞘层结构和栅极电场分布决定. 计算了30 cm NSTAR离子推力器栅极系统热变形前后的离子通过率, 如图3所示.

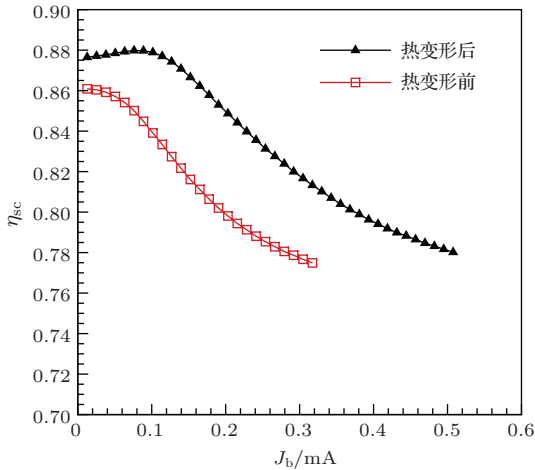


图3 (网刊彩色) 离子通过率 η_{sc} 随栅孔电流 J_b 的变化
Fig. 3. (color online) Ion through rate η_{sc} with the beam current J_b .

由图3可见, 随着栅孔电流 J_b 的增大, 离子通过率 η_{sc} 均呈现出先缓慢变化后迅速减小的趋势. 这主要是由鞘层结构决定的, J_b 较小时, 鞘层远离屏栅, 对离子数通过率影响较小, 随着 J_b 增大, 鞘

层逐渐靠近屏栅并进入屏栅孔内, 鞘层影响区域随之减小, 受鞘层作用的离子比例减小, 离子通过率降低.

此外, 对比热变形前后的离子通过率 η_{sc} 可知, 热变形后加速栅和屏栅间距变小, 相同栅孔电流 J_b 条件下的鞘层影响区域增大, 离子通过率增大. 鞘层影响区域的变化可由等势线的变化情况, 如图4所示.

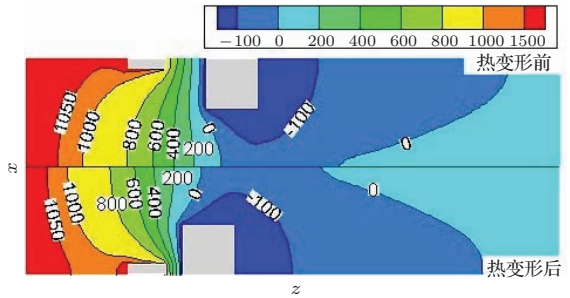


图4 (网刊彩色) 电势分布对比

Fig. 4. (color online) Comparison of potential distribution.

由图4可见, 热变形后, 加速栅距屏栅间距更近, 鞘层等势线整体左移, 远离屏栅极, 使得受鞘层作用的离子增多, 离子通过率 η_{sc} 增大.

3.2 加速栅离子通过率 η_{acc}

离子推力器工作过程中, 部分离子在电场作用力驱动及CEX碰撞作用下, 会直接撞击在加速栅表面, 产生加速栅电流. 单孔束电流较小时, 束流中部分离子受电场作用穿过轴线, 撞击在加速栅表面, 产生交叉电流, 此情况称为欠聚焦状态; 单孔束电流较大时, 束流中部分离子未能进入加速栅孔便直接撞击在加速栅表面, 产生截止电流, 此情况称为过聚焦状态. 过大的交叉电流和截止电流, 均是由于离子撞击加速栅产生的, 使得加速栅离子通过率 η_{acc} 降低, 并造成Barrel侵蚀, 影响栅极系统的寿命.

加速栅离子通过率 η_{acc} 一般较大(约为99%), 为了更清晰的分析热变形对 η_{acc} 的影响, 定义离子撞击加速栅概率 $P_{acc} = 1 - \eta_{acc}$.

模拟中, 可统计加速栅上游区域和加速栅孔内撞击到加速栅表面的离子电流 J_a , 则离子撞击加速栅概率 P_{acc} 也可表示为 $P_{acc} = J_a/J_b$.

计算了30 cm NSTAR离子推力器栅极结构热变形前后, P_{acc} 随单孔束电流 J_b 的变化如图5所示.

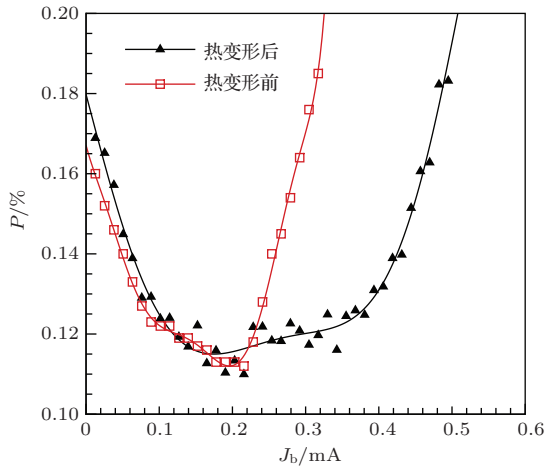


图5 (网刊彩色) 离子撞击加速栅概率
Fig. 5. (color online) The probability of ion impacting with accelerator grids.

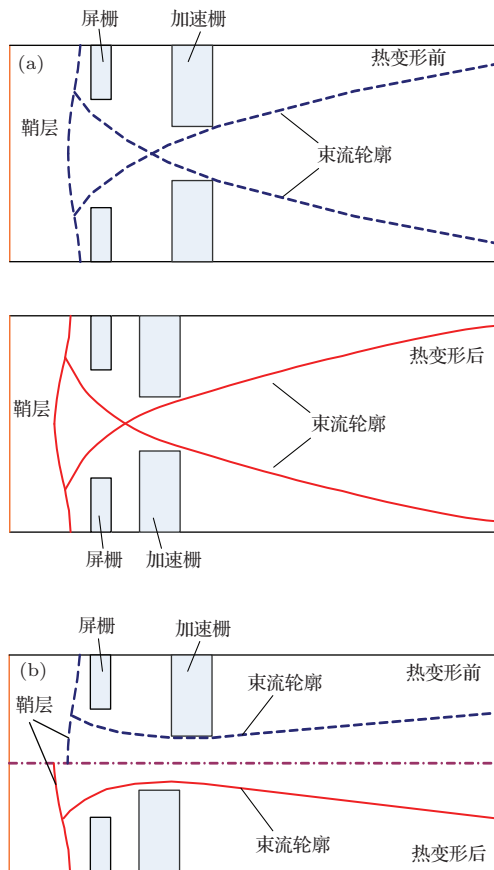


图6 束流轮廓 (a) 交叉电流限制; (b) 截止电流限制
Fig. 6. Beam profile. (a) Crossover limit; (b) perveance limit.

由图5可见, 在一定的单孔束电流 J_b 条件下, P_{acc} 较小, 且变化缓慢; 但存在两个阈值 J_{cro} 和 J_{per} , J_{cro} 和 J_{per} 分别为交叉电流限制阈值 (crossover limit) 和截止电流限制阈值 (perveance limit). 栅极的主要工作区间为 $J_{cro} < J_b < J_{per}$.

当 $J_b < J_{cro}$ 时, 会产生较大的交叉电流, 而 $J_b > J_{per}$ 则会产生较大的截止电流, 这两种情况下, P_{acc} 均会迅速变大, 并导致推力器性能降低, 寿命减小.

对比栅极变形前后, 栅极变形前后, 交叉电流限制阈值 J_{cro} 基本不变, 约为 0.1 mA, 可认为栅极间距对 J_{cro} 无影响; 而截止电流限制阈值 J_{per} 在栅极变形后大幅提高, 从 0.2 mA 提高到 0.4 mA, 表明栅极间距对 J_{per} 影响明显, 栅极间距越小, J_{per} 越大. 产生这种现象的原因是: 热变形后栅极间距变小, 鞘层面曲率增大, 束流加速聚焦, 如图6所示. 对于交叉电流, 由于聚焦焦点和加速栅同时左移, 束流离子撞击加速栅产生的加速栅电流 J_a 变化不大; 而对于截止电流, 相同束电流条件下, 束流加速聚焦会压缩束流半径, 使之明显减小, 束流边界距加速栅间距减小, 减小了离子撞击加速栅的概率, 从而显著增大截止电流限制阈值 J_{per} .

由计算结果和分析, 对于 30 cm NSTAR 离子推力器栅极设计结构, 热变形可将单孔束电流限定范围从 0.1—0.2 mA 扩展到 0.1—0.4 mA, 减小了大电流工作模式下的 Barrel 腐蚀, 有利于离子推力器多模式工作.

3.3 发散角损失 ϵ_{div}

发散角损失 ϵ_{div} 是离子推力器的推力损失的重要组成部分, 栅极结构的热变形会导致离子输运路径发生变化, 进而影响发散角损失. 图7为热变形前后, 发散角损失随单孔束电流的变化.

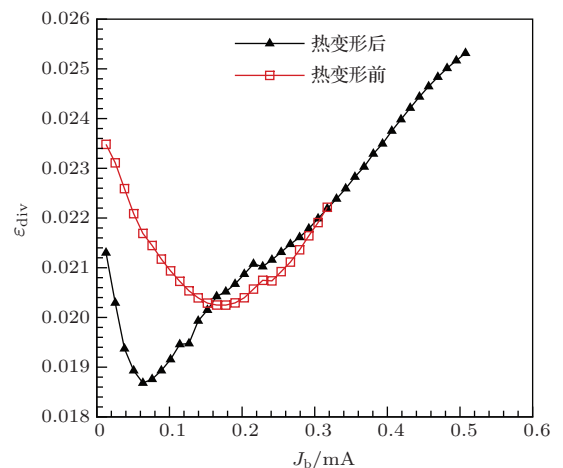


图7 (网刊彩色) 发散角损失 ϵ_{div} 随栅孔电流 J_b 的变化
Fig. 7. (color online) The divergence loss ϵ_{div} with the beam current J_b .

对比热变形前后的发散角损失可见,热变形前栅极系统的发散角损失变化相对平缓,在0.05—0.3 mA的单孔束电流范围内,发散角损失约为0.02—0.022;而变形后栅极系统具有更低发散角损失值,在0.03—0.14 mA的单孔束电流范围内,发散角损失约为0.0185—0.02,但发散角损失随着单孔束电流增大迅速增加,当 $J_b > 0.14$ mA时,发散角损失比变形前略大.通过束流区域离子数密度分布分析产生这种现象的原因,图8(a)和(b)分别为热变形前后 $J_b = 0.089$ mA和 $J_b = 0.24$ mA情况下的离子数密度分布.由图可见,束流较小时,栅极变形后束流主体的准直性相比变形前更好;而束流较大情况下,栅极变形后束流主体准直性与变形前相当,但束流边缘部分的发散性更甚.

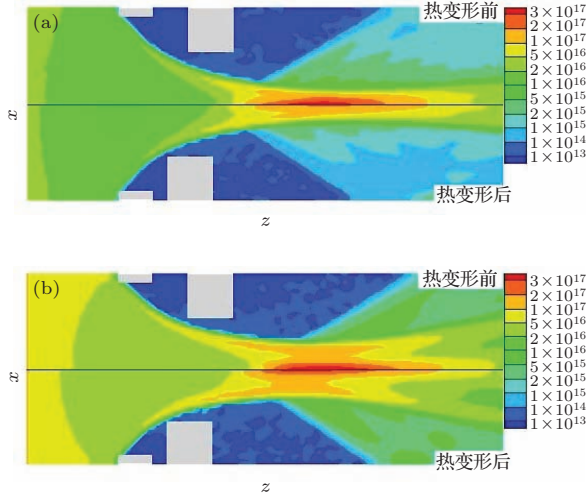


图8 (网刊彩色) 离子数密度分布 (a) $J_b = 0.089$ mA; (b) $J_b = 0.24$ mA
Fig. 8. (color online) The ion density distribution. (a) $J_b = 0.089$ mA; (b) $J_b = 0.24$ mA.

3.4 栅极热变形对推力性能的影响分析

离子推力器的推力 F 可以写为束流质量流率 \dot{m} 和离子平均轴向速度 \bar{u}_z 的乘积,即

$$F = \dot{m} \cdot \bar{u}_z.$$

在放电腔等离子体参数稳定情况下,上游进入栅极鞘层的离子质量流率 \dot{m}_0 恒定,故束流质量流率仅收屏栅离子通过率 η_{sc} 和加速栅离子通过率 η_{acc} 的影响,可写为

$$\dot{m} = \dot{m}_0 \cdot \eta_{sc} \cdot \eta_{acc}.$$

而在栅极电压不变的情况下,离子离开栅极系

统的总速率 u_0 恒定,

$$u_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot U_{acc} \cdot e}{m_{ion}}},$$

式中, U_{acc} 是离子的总加速电压, e 是单位电荷电量, m_{ion} 为离子质量.由于电场作用,离子的速度方向会偏离轴线方向,产生轴向损失.离子轴向平均速度 \bar{u}_z 可由 u_0 和发散角损失 ε_{div} 计算:

$$\bar{u}_z = u_0 \cdot (1 - \varepsilon_{div}).$$

推力公式可改写为

$$F = \dot{m} \cdot \bar{u}_z = \dot{m}_0 \cdot u_0 \cdot \eta_{sc} \cdot \eta_{acc} \cdot (1 - \varepsilon_{div}).$$

故可通过屏栅离子通过率、加速栅离子通过率和发散角损失的变化分析栅极热变形对推力性能的影响.

由前文计算结果可知, η_{sc} 在推力器主要工作区间的值约为0.8—0.88,栅极热变形后, η_{sc} 约增大5%; η_{acc} 在推力器主要工作区间的值约为99.88%,栅极热变形后, η_{acc} 变化幅度不大,只是扩展了工作区间; ε_{div} 在推力器主要工作区间的值为0.02左右,栅极热变形后, $1 - \varepsilon_{div}$ 变化幅度不大.故栅极热变形后,推力的变化主要取决于屏栅离子通过率变化:随 η_{sc} 的增大而增大,模拟结果表明热变形后的推力会比理论预估值高5%左右.

3.5 栅极热变形对栅极寿命的影响分析

影响离子推力器栅极寿命的主要诱因是离子对加速栅的撞击造成加速栅极的腐蚀.加速栅的腐蚀包括两部分: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).由于栅极热变形前后,加速栅下游电场变化非常小(见图4),故对Pits-and-Grooves腐蚀基本无影响,本文主要分析热变形对Barrel腐蚀的影响.由于Barrel腐蚀速度主要受加速栅离子通过率 η_{acc} 影响: η_{acc} 越大,打到加速栅上的高能离子越少,Barrel腐蚀速度越慢,栅极寿命越长.

可通过 η_{acc} 的变化分析热变形对Barrel腐蚀及栅极寿命的影响.

由图5可知,在推力器主要工作区间的值约为99.88%,栅极热变形后, η_{acc} 变化幅度不大.故在其工作区间范围内,加速栅的Barrel腐蚀速度基本不变,即栅极热变形基本不影响栅极寿命.

3.6 电子返流阈值 V_{th} 分析

加速栅负偏压是抑制电子返流的常用方法, 通过降低加速栅孔内的束流电位, 阻止下游电子在电场力作用下, 逆向通过加速栅孔进入放电腔内, 造成工作机理破坏. 通常要求加速栅孔轴线电位 $V_{sp} < -|V_{down}|$, V_{down} 为下游等离子电位, 对于常规离子推力器来说, 一般为 5 V 左右, 本文计算中取 $V_{down} = 5$ V. $V_{sp} = -|V_{down}|$ 时加速栅上的负偏压 V_a 称为电子返流阈值, 记作 V_{th} , 也即栅极正常工作的前提是加速栅电势 V_a 低于电子返流阈值 V_{th} .

栅极工作过程中发生热变形, 将导致整个栅极电场分布发生变化, 影响电子返流阈值的大小. 计算了 30 cm NSTAR 离子推力器栅极系统热变形前后的不同束电流条件下的电子返流阈值, 计算方法采用贾艳辉^[18]和 Williams^[19]等的曲线拟合方法, 计算结果如图 9 所示.

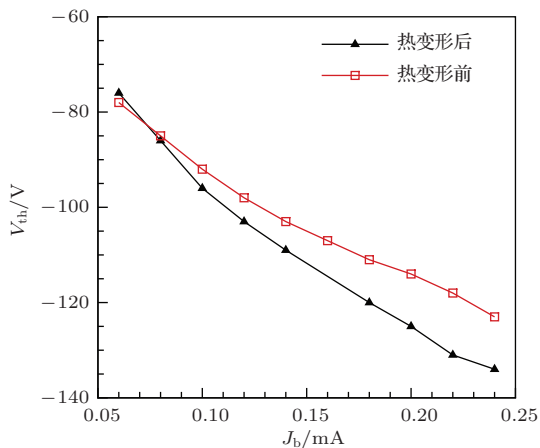


图 9 (网刊彩色) 电子返流阈值 V_{th} 随栅孔电流 J_b 的变化
Fig. 9. (color online) The electron reflux threshold V_{th} with the beam current J_b .

由图可见, 热变形前后, 栅极系统的电子返流阈值发生了明显变化, 在 J_b 较小时, 热变形会导致电子返流阈值 V_{th} 略有上升, 但由于小电流情况下热变形也相对较小, 故影响不明显, 可以忽略; 当 J_b 较大时, 热变形会导致 V_{th} 明显降低, 即需要设置更低的加速栅电压 V_a 来抑制电子返流.

4 结 论

针对离子推力器栅极系统热变形问题, 采用 3D-PIC 方法模拟了栅极系统热变形前后栅极工作过程, 通过屏栅离子通过率、加速栅离子通过率、发

散角损失和电子返流阈值的变化, 分析了热变形对离子推力器性能、栅极寿命和栅极加速栅电位置的影响, 获得结论如下:

1) 栅极热变形会显著增大屏栅离子通过率;

2) 栅极热变形对加速栅的交叉电流限制阈值基本无影响, 但会大幅提高截止电流限制阈值, 即增大推力器的工作电流区间, 在工作电流区间内, 加速栅离子通过率无明显变化;

3) 栅极热变形后, 发散角损失随束电流大小会发生一定的变化, 但总体变化幅度不大;

4) 由于屏栅离子通过率增大, 束流离子质量流量变大, 栅极热变形会使得推力器推力略有上升;

5) 当离子推力器工作在较大束电流模式时, 栅极热变形会导致电子返流阈值 V_{th} 明显降低, 即需要设置更低的加速栅电压来抑制电子返流.

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 Engineering* **26** 300
- [3] Moskovitz N A, Abe S, Pan K S, Osip D J, Pefkou D, Melita M D, Elias M, Kitazato K, Bus S J, Demeo F E, Binzel R P, Abell P A 2013 *Icarus* **224** 24
- [4] Soulas G C, Frandina M M <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2004-3961> [2014-11-10]
- [5] Kaufman H R 1974 *Advances in Electronics and Electron Physics* **36** 265
- [6] Bundesmann C, Tartz M, Scholze F, Neumann H, Leiter H J, Scortecci F 2011 *Journal of Propulsion and Power* **27** 532
- [7] Noord J V, Gallimore A, Rawlin V K 2000 *J. Propuls. Power* **16** 357
- [8] Zhen M F 2006 *Vacuum & Cryogenics* **12** 33 (in Chinese) [郑茂繁 2006 真空与低温 **12** 33]
- [9] Wirz R E, Karz I, Goebel D M, Anderson J R 2011 *J. Propul. Power* **27** 206
- [10] Wang J, Polk J, Brophy J, Katz J 2003 *J. Propul. Power* **19** 1192
- [11] Chen M L, Xia G Q, Mao G W 2014 *Acta Phys. Sin* **63** 182901 (in Chinese) [陈茂林, 夏广庆, 毛根旺 2014 物理学报 **63** 182901]
- [12] Wang H Y, Jiang W, Sun P, Kong L B 2014 *Chin. Phys. B* **23** 035204
- [13] Duan P, Qin H J, Zhou X W, Cao A N, Liu J Y, Qing S W 2014 *Acta Phys. Sin* **63** 085204 (in Chinese) [段萍, 覃海娟, 周新维, 曹安宁, 刘金远, 卿少伟 2014 物理学报 **63** 085204]
- [14] 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)]

- [15] Chen M L, Mao G W, Xia G Q, Yang J, Sun A B 2012 *Journal of propulsion technology* **33** 150 (in Chinese) [陈茂林, 毛根旺, 夏广庆, 杨涓, 孙安邦 2012 推进技术 **33** 150]
- [16] Miller J S, Pullins S H, Levandier D J, Chiu Y, Dressler R A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 984
- [17] Sudhakar M, James A M 2010 *J. Propul. Power* **26** 673
- [18] Jia Y H, Zhang T P, Zhen M F, Li X K 2012 *Journal of Propulsion Technology* **33** 991 (in Chinese) [贾艳辉, 张天平, 郑茂繁, 李兴坤 2012 推进技术 **33** 991]
- [19] Williams J D, Goebel D M, Wilbur P J <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2003-4560> [2014-11-10]

Analysis on the effects of optics thermal deformation on the ion thruster operation*

Chen Mao-Lin¹⁾ Xia Guang-Qing²⁾ Xu Zong-Qi²⁾ Mao Gen-Wang¹⁾

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 26 September 2014; revised manuscript received 13 November 2014)

Abstract

Optics thermal deformation is an important factor that impacts the performance and lifetime of ion thrusters. Although some theoretical research concerned with this problem was reported, its mechanism has not been fully understood. In this study, numerical investigations are performed to explain the effect of thermal deformation on the performance and lifetime of ion thrusters. The transient behavior of charged particles is calculated using a particle-in-cell simulation, while the momentum transfer collision and the charge exchange collision are calculated by means of the Monte Carlo method. Electron backstreaming restriction, perveance restriction, ions through rate, and divergence angle losses are compared and analyzed for optics deformed and undeformed. And the influence of these factors on thruster's performance and lifetime is discussed. Results show that the ion through rate of the screen grid increases when optics begin deformed, and the thrust is slightly higher than the theoretical values predicted; the perveance threshold of the accelerator grid increases with optics having thermal deformation, while the crossover limit threshold is little changed, namely the thruster can be operated in conditions of a larger beam current; the electron backstreaming restriction threshold is significantly lower under a high beam current condition with optics deformed, which means that a lower accelerating gate bias is necessary to ensure thruster work. For the less obvious change of accelerating grid current when the beam is focused, there is no more erosion and change of lifetime. Results provide a reference for the optimization design of optics and evaluation of thruster performance and lifetime.

Keywords: ion thruster, optic, thermal deformation, plasma simulation

PACS: 41.85.-p, 02.70.Ns, 31.15.-p

DOI: 10.7498/aps.64.094104

* 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 Nos. 3102014KYJD005, 3132014328), and the NPU Foundation for Fundamental Research, China (Grant No. NPU-FFR-JC20120201).

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