

加速栅电压对双级加速离子光学系统栅极性能的影响

贾连军, 张天平, 刘明正, 陈娟娟, 贾艳辉

兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000

摘要 离子推力器的加速栅电压对加速栅截获电流的大小有影响。目前, 离子推力器加速栅电压值是通过实验多次调节确定的, 理论计算只能给出加速栅电压最大值。针对兰州空间技术物理研究所研制的双级加速离子推力器开展了加速栅电压的优化设计, 利用质点网格法和蒙特卡洛碰撞法(PIC-MCC)开展了 8000 s 比冲条件下 5 种加速栅电压(-150, -180, -200, -250, -300 V)对离子运动轨迹、束流发散角、交换电荷(CEX)截获的数量和能量以及加速栅溅射速率的影响研究, 根据研究结果确定了最佳加速栅电压为-250 V。最后开展了验证实验, 结果表明加速栅电压为-250 V 左右时, 加速栅电流较小, 验证了数值仿真的正确性。

关键词 测量; 双级加速离子光学系统; 加速栅电压; 质点网格法和蒙特卡洛碰撞法; 交换电荷

中图分类号 V1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051202

Influence of Accelerator Grid Voltage on Grid Performance of Dual Stage Ion Optical System

Jia Lianjun, Zhang Tianping, Liu Mingzheng, Chen Juanjuan, Jia Yanhui

Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract The accelerator grid voltage of the ion thruster has an impact on the intensity of the current of accelerator grid. At present, the accelerator grid voltage is chiefly determined through multiple experiments, and the theoretical calculation can only provide the maximum value of accelerator grid voltage. In this paper, the optimum design of the accelerator grid voltage for a dual-stage accelerator ion thruster developed by Lanzhou institute of physics is carried out. Using particle-in-cell method and Monte-Carlo collision method (PIC-MCC method), the effects of five accelerator grid voltages (-150, -180, -200, -250, -300 V) on ion trajectory, beam divergence angle, number and energy of the impingement charge exchange (CEX) ion, and accelerator grid sputtering rate are studied with the specific impulse of 8000 s. The results show that the best accelerator grid voltage is -250 V. Finally, the verification experiment is carried out. The results show that when the accelerator grid voltage is around -250 V, the current of the accelerator grid is small, which verifies the correctness of the numerical simulation.

Key words measurement; dual stage ion optical system; accelerator grid voltage; particle-in-cell method and Monte-Carlo collision method; charge exchange

OCIS codes 120.3620; 350.4990; 350.5400

1 引言

双级加速离子推力器是近几年提出的新型推力器, 与传统离子推力器相比主要是离子光学系统发生了改变^[1-3]。双级加速离子光学系统由 4 个栅极组

成, 屏栅和引出栅构成引出级, 引出栅和加速栅构成加速级, 第 4 个栅极为减速栅。双级加速技术的最大特点是将离子的引出过程和加速过程分别在引出级和加速级完成, 加速级的电压不再受到限制, 因此双级加速离子推力器的比冲和推力得到大幅提高, 功率

收稿日期: 2017-11-08; 收到修改稿日期: 2017-11-26

基金项目: 真空技术与物理国防科技重点实验室基金(9140C550206150C55)

作者简介: 贾连军(1977—), 男, 博士, 工程师, 主要从事空间电推进技术方面的研究。E-mail: jlj1323962@126.com

也达到兆瓦级,适合于深空探测任务^[4-8]。双级加速离子推力器是未来大功率电推进的发展方向之一。

双级加速离子推力器的加速电压较高,离子具有较大的动能,若轰击到栅极表面造成的腐蚀较严重,因此需要开展双级加速系统的优化设计。双级加速技术最早应用在地面粒子加速器上,用于获得高能离子,相关的优化设计包括栅极结构优化设计和电参数优化设计。Kim等^[9]开展了双级加速系统的屏栅极孔径、引出级间距、加速级间距与引出级间距比值等关键几何参数对束流发散角、束流引出能力及离子运动轨迹等的影响研究和优化设计,另外还开展了加速级电势与引出级电势值对束流引出能力、束流发散角的影响研究和优化设计。Meixner等^[10]开展了不同屏栅极结构、引出栅极结构对束流性能的影响研究和优化设计。Ohara^[11]开展了双级加速系统引出级与加速级电场关系对束流性能影响的研究和优化设计。Coletti等^[12-14]开展了栅极几何参数对束流性能和寿命的影响规律的研究,根据研究结果开展了双级加速系统设计。Bramanti等^[15]开展了射频源双级加速离子推力器的实验研究,实验主要针对屏栅电压、引出栅电压及气体流率参数进行优化。另外,研究人员还在双级加速系统产生交换电荷离子及栅极截获交换电荷(CEX)离子的数量和能量影响因素方面开展了研究^[16-17]。

研究者在双级加速系统几何结构设计和部分电参数设计上取得了大量的成果,同时在提高双级加速系统栅极寿命设计方面也开展了大量研究。但上述研究中不包括加速栅电压对双级加速系统性能和寿命影响的研究。加速栅施加的是负电压,不同的加速栅电压会在其周围形成不同位形的等势面,由于引出离子的运动轨迹垂直于等势面,因此加速栅电压的改变会直接影响到引出离子的运动轨迹,必然存在一定的加速栅电压使得离子的运动轨迹最佳。另外,由于加速栅是负电压,更容易受到低能交换电荷离子的轰击,研究加速栅电压对截获交换电荷离子数量和能量的影响,有助于正确选择加速栅电压,提高栅极系统寿命。大量的离子推力器实验测试也表明,不同的加速栅电压会影响加速栅截获电流的大小,目前加速栅电压的最佳值是通过多次实验测试获得的,理论计算只能给出加速栅电压最大值。本文尝试采用数值仿真方法开展加速栅电压对束流性能影响的研究,根据计算结果确定加速栅电压,并开展实验研究,验证数值仿真结果的正确性。

本文利用质点网格法和蒙特卡罗碰撞法(PIC-

MCC)开展了不同加速栅电压对离子运动轨迹和束流发散角的影响研究;针对不同加速栅电压,统计了一定时间内加速栅截获的交换电荷离子数量和能量分布,计算了加速栅交换电荷溅射腐蚀率,根据仿真结果确定了最佳加速栅电压。最后利用研制的双级加速离子推力器进行了实验验证。

2 电子返流半经验分析模型

2.1 电子返流半经验模型

离子光学系统中加速栅为负电位,由于栅极孔的轴对称性,孔中心线上存在负电势最小值,称为鞍点电势,鞍点电势可以阻止栅极下游电子返流进入放电室。推力器工作时,交换电荷离子不断轰击加速栅孔壁,造成小孔孔径不断增大,使得中心轴线上鞍点电势不断增大,当增大到小于下游电子动能时,电子会越过该势垒,进入放电室,出现电子返流失效。鞍点电势为:

$$V_{sp} = V_{bp} + T_{ev} \ln \left[\frac{2I_e}{I_b} \sqrt{\pi \left(\frac{m_e}{m_i} \right) \left(\frac{V_{dp} - V_{bp}}{T_{ev}} \right)} \right], \quad (1)$$

式中 V_{bp} 为中和面附近束流电势,近似为0; V_{dp} 为放电室等离子体电势,是放电电压与屏栅电压之和,放电电压一般为几十伏,这里取30V; T_{ev} 为减速栅极下游的电子能量,其值由实验测得,通常取1.5eV; I_e 是电子返流电流; I_b 是束电流; m_e 和 m_i 分别为电子的质量和离子的质量。通常情况下 I_e/I_b 值不能超过0.001。假设交换电荷对加速栅极小孔的轰击是均匀的,那么小孔在径向上的增加是一样的。根据模拟程序统计出交换电荷离子对加速栅极小孔材料溅射的质量损失速率 \dot{m} ,得到体积腐蚀率为 \dot{V} :

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{Mo}}, \quad (2)$$

式中 ρ_{Mo} 为钼的密度。假设腐蚀在孔内是均匀的,则小孔半径的增加率 \dot{r} 为体积腐蚀率除以孔面积:

$$\dot{r} = \frac{\dot{V}}{2\pi r_a t_a}, \quad (3)$$

式中 r_a 为加速栅小孔半径, t_a 为加速栅厚度。

2.2 加速栅电压计算

加速栅电压的大小由束流引出时最小鞍点电势确定,该电势与空间电荷分布有关。加速栅电压最大值为:

$$V_a = \frac{V_{sp} - \Delta V - BV_{dp}}{1 - B}, \quad (4)$$

式中 V_{sp} 为束流引出时最小鞍点电势,其大小由(1)式给出; ΔV 为束流电荷存在时,加速栅孔轴线与孔壁之间的电势差; B 为栅极的几何因子。 ΔV 和 B 的公式为:

$$\Delta V = \frac{I_b}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{m_e}{2q(V_{dp} - V_{sp})}} \left[\frac{1}{2} - \ln \frac{r_b}{r_a} \right], \quad (5)$$

$$B = \frac{r_a}{\pi l_e} \left[\frac{1}{2} - \frac{t_a}{r_a} \arccos \left(\frac{r_b}{r_a} \right) \right] \exp \left(-\frac{t_a}{d_a} \right), \quad (6)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, r_b 为束流半径,一般取 $r_b = 0.7r_a$, r_a 为加速栅小孔半径; t_a 为加速栅厚度, l_e 为前两个栅的等效间距, d_a 为加速栅小孔直径。

为了确定加速栅电压,首先需要根据设计的束流值和栅极几何参数求出加速栅最大电压。为了防止加速栅极溅射腐蚀过早出现电子返流,加速栅电压要小于最大加速栅电压。关于加速栅电压的选择,一般认为只要小于最小加速栅电压即可,在离子推力器实际应用中则是通过多次实验来确定最佳加速栅电压。

3 计算模型

3.1 计算区域

由于栅极孔具有轴对称性,可以采用二维轴对称模型研究。栅极中心孔引出的离子电流密度最高、电流最大,腐蚀最厉害,因此选择栅极系统中心孔为研究对象。图1为计算区域和边界条件。

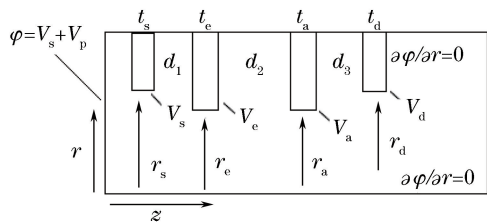


图1 计算区域和边界条件

Fig. 1 Calculation area and boundary conditions

图1中 V_s 、 V_e 、 V_a 、 V_d 、 V_p 分别为屏栅电位、引出栅电位、加速栅电位、减速栅电位和放电室内等离子体电位; t_s 、 t_e 、 t_a 、 t_d 分别为屏栅、引出栅、加速栅、减速栅的厚度; r_s 、 r_e 、 r_a 、 r_d 分别为屏栅、引出栅、加速栅、减速栅的半径; d_1 、 d_2 、 d_3 依次为屏栅与引出栅、引出栅与加速栅、加速栅与减速栅的间距; ϕ 为上游等离子体总电势大小。

3.2 PIC-MCC 模型

PIC-MCC 仿真模型普遍用于栅极系统束流离子引出过程的研究。PIC 模块具体流程为:1) 根据计算区域划分网格;2) 在离子进入计算区域前,利

用差分法求解静电场泊松方程,根据边界条件获得静电场分布;3) 采用面积权重法将离子所带电量分配到相邻网格点上,通过求解泊松方程得到各节点上的电势和电场,利用插值法获得粒子所在位置的电场强度;4) 利用牛顿第二定律加速粒子,对不同边界处的粒子进行处理;5) 求解新的电场分布。

离子由左边界进入计算区域,进入数量满足 Child-angmuir 定律,即每个时间步长进入计算区域的离子数 ΔN 为:

$$\Delta N = n_0 \left(\frac{kT_e}{m} \right)^{1/2} \pi r_s^2 \exp \left(-\frac{1}{2} \right) d_t, \quad (7)$$

式中 n_0 为屏栅极上游离子密度, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, m 为离子质量, d_t 为时间步长。

计算区域内电子密度服从玻尔兹曼分布。屏栅上游区域电子密度为:

$$n_e = n_0 \exp \left(\frac{\Phi - \Phi_u}{T_{eu}} \right), \quad \Phi \leq \Phi_u, \quad (8)$$

$$n_e = n_0 \left(1 + \frac{\Phi - \Phi_u}{T_{eu}} \right), \quad \Phi \geq \Phi_u, \quad (9)$$

式中 Φ 为电子所在位置电势, Φ_u 为放电室电势, T_{eu} 为放电室电子温度。

在加速栅下游区域,电子密度可以表示为:

$$n_e = n_\infty \exp \left(\frac{\Phi - \Phi_\infty}{T_{e\infty}} \right), \quad \Phi \leq \Phi_\infty, \quad (10)$$

$$n_e = n_\infty \left(1 + \frac{\Phi - \Phi_\infty}{T_{e\infty}} \right), \quad \Phi \geq \Phi_\infty, \quad (11)$$

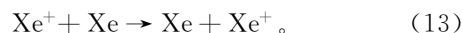
式中 n_∞ 、 Φ_∞ 、 $T_{e\infty}$ 分别为栅极下游中和面的电子密度、电势及电子温度。

电场根据泊松方程求解:

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e), \quad (12)$$

式中 e 为电子电量, ϵ_0 为真空介电常数, n_i 为离子密度。为了提高电场计算收敛速度,采用超松弛(SOR)方法求解。

MCC 模块主要处理粒子间的碰撞,包括离子和原子之间的交换电荷碰撞。交换电荷碰撞(CEX)为快速的氙离子(Xe_{f+})与慢速氙原子(Xe_s)碰撞而产生交换电荷,交换电荷过程可以表示为:



离子与密度为 n_n 的中性原子发生碰撞的几率为:

$$P = 1 - \exp(-\sigma n_n v_i \Delta t) \quad (14)$$

式中 σ 为碰撞截面, v_i 为离子速度, Δt 为时间步长。

研究采用 PIC-MCC 对栅极系统离子引出过程、交换电荷离子产生过程及栅极表面溅射腐蚀过程进行数值模拟。计算流程如图2所示。

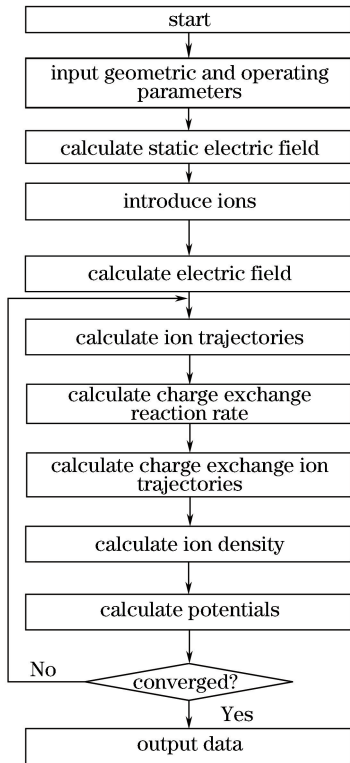


图2 仿真计算流程

Fig. 2 Flow chart of simulation calculation

表1 双级加速离子光学系统栅极几何参数和束流设计值

Table 1 Screen grid geometrical parameters and beam current of duel stage accelerating ion optical system

Screen grid aperture radius /mm	Extraction grid aperture radius /mm	Extraction stage gap /mm	Accelerator grid aperture radius /mm	Beam current /mA
1.0	0.7	1.0	0.7	100

表2 双级加速离子推力器电气参数

Table 2 Operating parameters of duel stage accelerating ion thruster

Screen grid voltage /V	Extraction grid voltage /V	Accelerator grid voltage /V	Anode propellant mass flow rate / $(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$	Cathodes propellant mass flow rate / $(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$
6820	4820	-150, -180, -200, -250, -300	0.2	0.05

势线方向,不同位形的等势线导致离子的运动轨迹也不相同,因此,不同的加速栅电压会影响离子的运动轨迹。必然存在最佳的加速栅电压使得离子的准直性能最好。

利用 PIC 对单个离子运行轨迹进行跟踪,计算中随机选取了 30 个离子作为样本,图 4 为统计的离子运动轨迹。模拟结果表明,加速电压对引出离子的运动轨迹有影响,加速栅电压在 -250 V 时,离子的聚焦、准直性能较好。

2) 束流发散角计算

利用 PIC 模块对右边界引出的离子的轴向速度和径向速度进行统计,并利用反三角函数求出每

4 仿真结果及验证

4.1 仿真结果

利用兰州空间技术物理研究所自主研发的双级加速离子推力器^[18]为研究对象,将该推力器实验参数作为模型输入条件。表 1 为双级加速离子光学系统栅极几何结构参数和束流设计值。

将表 1 中的栅极参数和束流值代入(1)、(4)、(5)和(6)式,可以得到加速栅最大电压值为 -102 V 。实验中加速栅电压值要小于 -102 V ,研究选取了 $-150, -180, -200, -250, -300 \text{ V}$ 五种加速栅电压作为仿真计算的输入,根据计算结果确定最佳的加速栅电压值。表 2 列出了双级加速离子推力器电参数和气参数。

根据给出的参数和条件进行仿真计算,当程序总离子数稳定并满足收敛精度时,对离子的微观参数进行统计并输出结果。模拟中,程序计算达到稳态后的离子总数目约为 1000000 个。

1) 离子运行轨迹计算

不同的加速栅电压将导致其附近电势位形发生改变,如图 3 所示。由于离子的运动轨迹垂直于等

个离子的偏转角度。根据束流发散角定义,统计出总离子数中 95% 的离子对应的最大发散角,即为束流发散角。图 5 为统计的不同加速栅电压对束流发散角的影响,计算结果表明,加速栅电压对束流发散角有一定影响,在 -250 V 时,该双级加速系统的聚焦、准直性能较好。

3) 交换电荷离子截获

交换电荷离子截获数量的多少直接影响到栅极系统寿命,是评价栅极系统性能的重要指标之一。图 6 为加速栅电压对碰撞交换电荷数量与能量影响的数值仿真结果。结果显示,加速栅电压对截获的交换电荷数量和能量均有影响,随着加速栅电压的

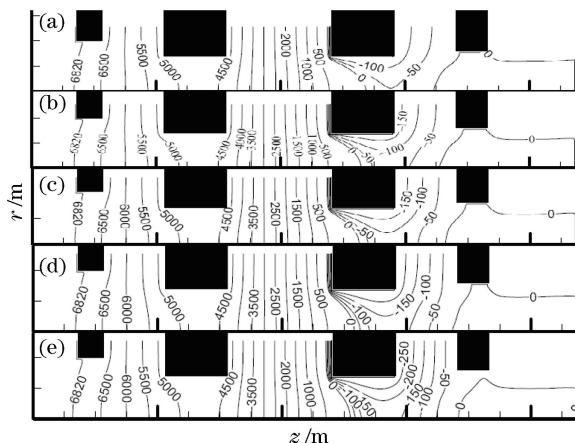


图3 不同加速栅电压时的等势线图。(a) -150 V ;
(b) -180 V ;(c) -200 V ;(d) -250 V ;(e) -300 V

Fig. 3 Equipotential line graph under different accelerator grid voltages. (a) -150 V ;
(b) -180 V ;(c) -200 V ;
(d) -250 V ;(e) -300 V

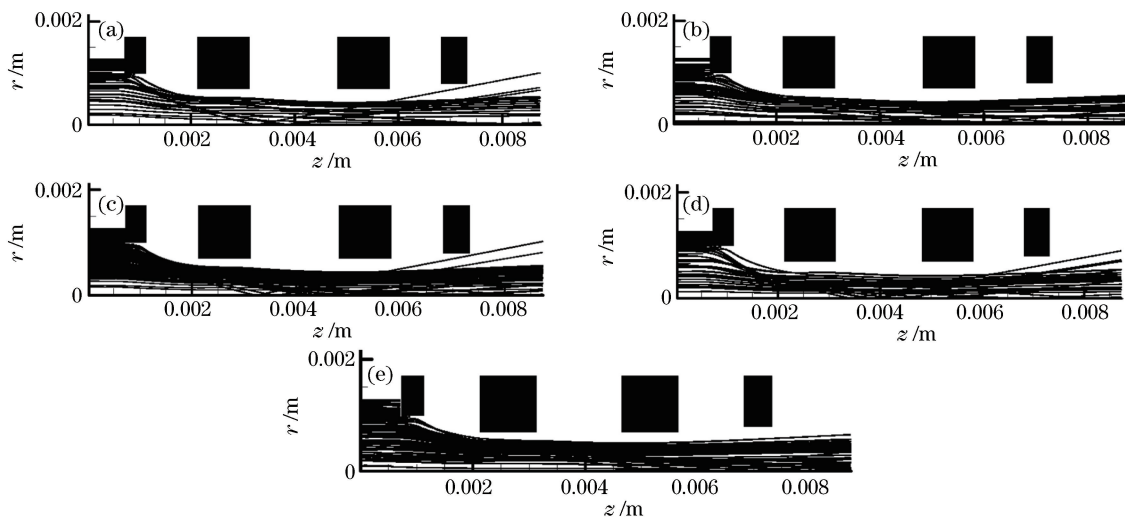


图4 束流离子空间位置分布。(a) -300 V ;(b) -250 V ;(c) -200 V ;(d) -180 V ;(e) -150 V

Fig. 4 Space position distribution of beam ions. (a) -300 V ;(b) -250 V ;(c) -200 V ;(d) -180 V ;(e) -150 V

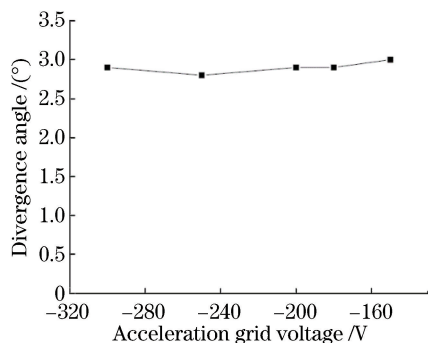


图5 加速栅电压对束流发散角的影响

Fig. 5 Effect of accelerator grid voltage on beam divergence angle

图7为数值计算得到的5种不同加速栅电压

降低,截获的交换电荷离子数量逐渐增加,从仿真结果上看,加速栅电压为 $-150, -180, -200, -250\text{ V}$ 时,交换电荷离子截获数量和能量相差不明显。

表3给出了不同加速栅电压下载获的交换电荷离子总数、平均能量以及高能交换电荷离子所占的百分比。从表3可以看出,随着加速栅电压的降低,截获的交换电荷离子数目逐渐增加,但在 -250 V 时,截获的交换电荷离子数目稍有减少,与 -150 V 时相当,说明在该电压时部分交换电荷离子被引出;计算交换电荷离子的平均能量,并统计能量超过 1 keV 的交换电荷离子所占百分比,得出加速栅电压为 -300 V 时,交换电荷平均能量最高,为 508 eV ,能量超过 1 keV 的交换电荷离子的百分比最大,约为 16% ;加速栅电压为 -250 V 时,交换电荷离子平均能量最低,为 504 eV ,截获的能量超过 1 keV 的交换电荷离子的百分比最小,约为 15.1% 。

下的交换电荷总电流。统计结果显示,相比加速栅上、下表面,孔壁更容易受到交换电荷离子的轰击溅射。

图8为数值计算得到的不同加速栅电压下交换电荷离子对加速栅孔壁的溅射产额及质量溅射速率。溅射产额定义为平均每个人射离子溅射出的固体表面的原子个数。计算结果表明,溅射产额和加速栅孔壁质量溅射速率与加速电压的变化趋势相同,加速电压为 -300 V 时溅射产额最大, -250 V 时溅射产额最小。

4.2 实验验证

以表2中电气参数为输入条件进行了双级加速离子推力器性能测试实验,如图9所示。实验中束

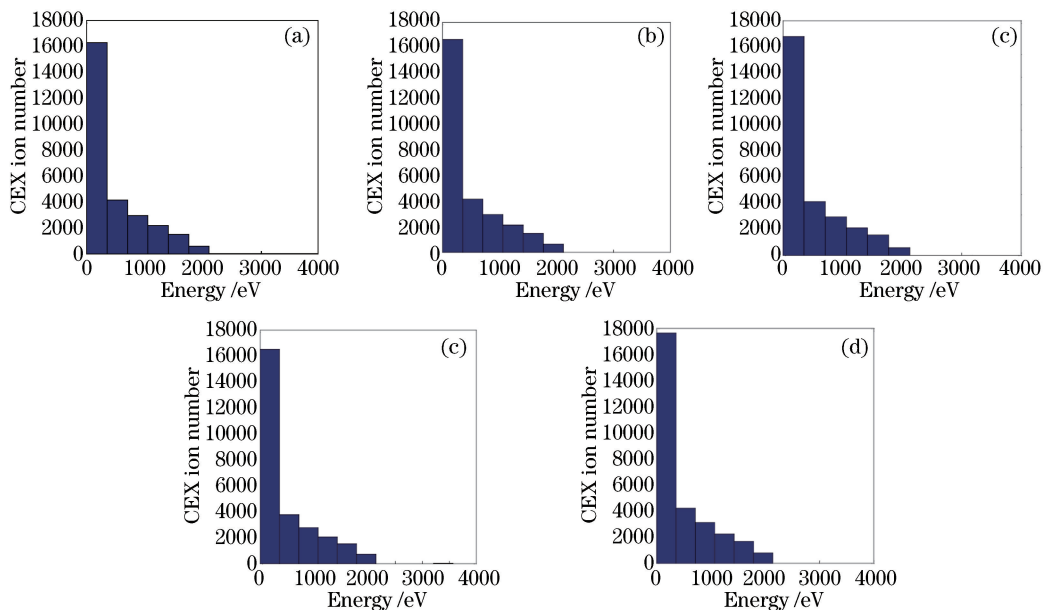


图 6 加速栅电压对截获的交换电荷离子数量的影响。(a) -150 V ; (b) -180 V ; (c) -200 V ; (d) -250 V ; (e) -300 V

Fig. 6 Effect of accelerator grid voltage on impingement CEX ion number. (a) -150 V ; (b) -180 V ; (c) -200 V ; (d) -250 V ; (e) -300 V

表 3 加速栅孔壁截获交换电荷离子仿真结果

Table 3 Simulation results of acceleration grid impingement CEX ion in the hole wall

Accelerator grid voltage / V	Impingement CEX ion number	CEX ion average energy / eV	Percent of CEX ion with energy over 1 keV / %
-150	27749	506	15.6
-180	28051	505	15.3
-200	28176	504	15.3
-250	27815	504	15.1
-300	29764	508	16.0

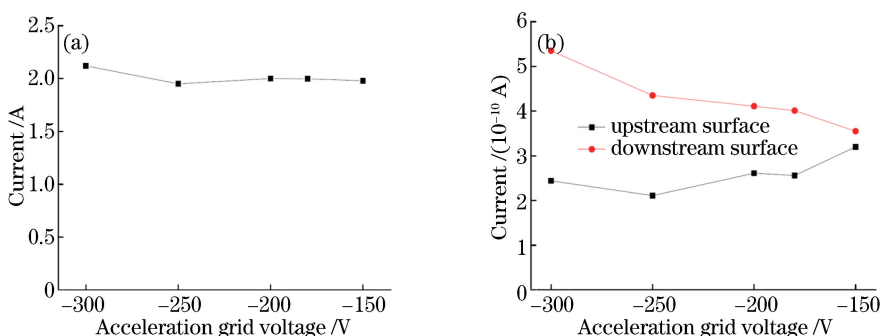


图 7 不同加速栅电压下的交换电荷总电流。(a) 孔壁; (b) 加速栅上、下表面

Fig. 7 Effect of acceleration grid voltage on impingement CEX ion current.

(a) Wall of hole; (b) upstream and downstream surface of accelerator grid

流稳定后,测得其值为 98 mA 。分别在 5 种加速栅电压下进行了加速栅截获电流的测量,测量精度为 0.1 mA 。测试结果为:加速栅电压为 -150 V 时,加速栅电流为 0.1 mA ;加速栅电压为 -180 V 和 -200 V 时,加速栅电流为 0.3 mA ;加速栅电压为

-250 V 时,加速栅电流显示为 0.1 mA ;而在加速栅电压为 -300 V 时,加速栅电流显示为 0.5 mA 。利用其他离子推力器开展实验,不同的加速栅电压会导致不同的加速栅电流,但均存在最佳的加速栅电压使得加速栅截获电流最小。不同的束流值对应的

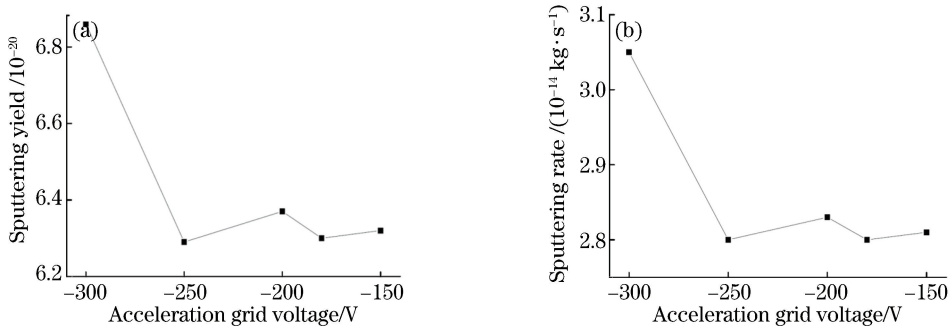


图8 不同加速栅电压下的(a)溅射产额和(b)溅射率

Fig. 8 (a) Sputtering yield and (b) sputtering rate under different accelerator grid voltages



图9 加速栅电压为-250 V的引束流照片

Fig. 9 Beam flow photo with the accelerator grid voltage of -250 V

最佳加速栅电压不同。

5 结 论

针对兰州空间技术物理研究所正在研制的双级加速离子光学系统,采用 PIC-MCC 开展了不同加速栅电压对束流引出性能及栅极截获交换电荷离子数量和能量的影响仿真研究,同时得到了不同加速栅电压下的溅射速率,根据仿真结果确定了该加速系统的加速栅电压,与实验测试结果进行了对比验证。得到如下结论:

1) 加速栅电压会影响加速栅截获电流的大小,存在最佳的加速栅电压使得加速栅截获电流最小;

2) 加速栅电压会影响束流离子的运动轨迹,对于一定几何参数和电气参数的双级加速系统,存在一个最佳的加速栅电压使得引出离子的聚焦和准直性能相对较好;

3) 加速栅电压对截获的交换电荷离子数量和能量分布有一定的影响,通过合理地选择加速栅电压可以减少交换电荷离子的截获数量,延长加速栅极寿命。

参 考 文 献

[1] Bramanti C, Walker R, Sutherland O, *et al.* The

innovative dual-stage 4-grid ion thruster concept-theory and experimental results [C]. AIAA, 2006: IAC-06-C4.4.7.

[2] Wilbur P J. Limits on high specific impulse ion thruster operation [C]. AIAA, 2004: AIAA-2004-4106.

[3] Fearn D G. The use of ion thrusters for orbit raising [J]. Journal of the British Interplanetary Society, 1980, 33: 129-137.

[4] Marques R I, Gabriel S B. Dual stage four grid (DS4G) ion engine for very high velocity change missions [C]. Michigan: 31st International Electric Propulsion Conference, 2009: 157.

[5] Bramanti C, Izzo D, Samaraee T, *et al.* Very high delta-V missions to the edge of the solar system and beyond enabled by the dual-stage 4-grid ion thruster concept [J]. Acta Astronautica, 2009, 64 (7/8): 735-744.

[6] Casaregoal C, Cesaretti G, Andrenucci M. HiPER: a roadmap for future space exploration with innovative electric propulsion technologies [C]. 31st International Electric Propulsion Conference, 2009: 20-24.

[7] Walker R, Izzo D, Fearn D G. Missions to the edge of the solar system using a new advanced dual-stage gridded ion thruster with very high specific impulse [C]. 25th International Symposium on Space Technology and Science, 2006: k-35.

[8] Fearn D G. The application of gridded ion thrusters to high thrust, high specific impulse nuclear-electric missions [J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2005, 58: 257-267.

[9] Kim J, Whealton J H, Schilling G. A study of two-stage ion-beam optics [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(2): 517-524.

[10] Meixner C N, Menon M M, Tsai C C. Geometrical effects on the beamlet optics of a two-stage ion accelerator [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52

- (3): 1167-1174.
- [11] Ohara Y. Numerical simulation for design of a two-stage acceleration system in a megawatt power ion source[J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(9): 4711-4717.
- [12] Coletti M, Gabriel S B. Dual stage ion optics, a parametric study [C]. 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2011, 2: 780-794.
- [13] Coletti M, Gabriel S B. Dual stage ion optics, a parametric study on performances and lifetime[C]. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011: AIAA-2011-5735.
- [14] Coletti M, Gessini P, Gabriel S B. A 4-gridded ion engine for high impulse mission [C/OL]. http://www.altaspace.com/hiper/publications/SP2010_1842612.pdf.
- [15] Bramanti C, Fearn D G. The design and operation of beam diagnostics for the dual stage 4-grid ion thruster[C]. 30th International Electric Propulsion Conference, 2007: IEPC-2007-050.
- [16] Coletti M, Gabriel S B. Numerical investigation of a dual stage variable isp ion engine [C]. 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011: IEPC-2011-204.
- [17] Coletti M, Gabriel S B. Design of a dual stage ion engine for the Hiper project[C]. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010: AIAA-2010-7113.
- [18] Jia L J, Zhang T P, Chen J J, *et al.* Geometric parametric study of dual stage ion optics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041207. 贾连军, 张天平, 陈娟娟, 等. 双级加速离子光学系统几何参数研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041207.