

## 30 cm 离子推力器栅极组件寿命预估及试验验证\*

孙明明, 耿海, 杨俊泰, 岳士超

(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:**为了预估30 cm离子推力器现有三栅极组件的整体寿命,采用有限元分析和PIC-MCC方法分别对栅极组件的热态平衡间距以及栅极不同区域的刻蚀速率进行了模拟和计算。结果显示,推力器达到热平衡状态时,减速栅整体变形呈现中心局部凹陷特征,加速栅整体变形呈均匀突起;在直径0~70 mm内的中心区域,两栅间距平均缩小0.057 mm;在直径70~140 mm内的环形区域,两栅间距平均增大0.129 mm;减速栅边缘区域小孔在1 500 h内的刻蚀速率达到 $6.25 \times 10^{-14}$  kg/s,而5 700 h的栅孔刻蚀速率相比1 500 h的降幅达到了15.4%;5 700 h的加速栅中心和边缘以及减速栅中心区域小孔的刻蚀速率相比1 500 h的降幅分别达到了8.0%、4.1%和3.6%。5 700 h的寿命试验结果显示,减速栅中心孔、加速栅中心和边缘孔的刻蚀基本呈线性,仿真与试验结果的比对误差均在10%以内。

**关键词:**离子推力器;栅极组件;寿命预估;试验验证

中图分类号:V439.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)06-232-09



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Life estimation and experimental verification for the grids assembly of 30 cm diameter ion thruster

SUN Mingming, GENG Hai, YANG Juntai, YUE Shichao

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

**Abstract:** In order to estimate the overall life of the existing three gate module of 30 cm diameter ion thruster, the grid gap under thermal equilibrium state and the erosion velocity of different regions of the grids were simulated and calculated by FEM (finite element method) and PIC-MCC (particle-in-cell-Monte Carlo collision) method respectively. The results show that when the thruster reaches the thermal equilibrium, the overall deformation of the decelerator grid presents central area depression characteristics, and the overall deformation of the accelerator grid presents a uniform protruding. In the center area of the grids with the diameter of 0~70 mm, the mean gap between the two grids decreases by 0.057 mm. Meanwhile, in the annular region with the diameter of 70~140 mm, the mean gap between the two grids increases by 0.129 mm. The erosion velocity of the apertures at the edge of the decelerator grid reaches  $6.25 \times 10^{-14}$  kg/s within 1 500 h, and which of the aperture at 5 700 h decreases 15.4% compared with 1 500 h. The erosion velocity of the apertures at the center and edge of the accelerator grid, and the apertures at the center of the decelerator grid decreases 8.0%, 4.1% and 3.6%, respectively. The results of 5 700 h life test show that the erosion of the apertures at the center of the decelerator grid, and the apertures at the center and edge of the accelerator grid are basically linear, and the comparison error between the simulation and test is within 10%.

**Keywords:** ion thruster; grids assembly; life estimation; experimental verification

30 cm离子推力器是兰州空间技术物理研究所针对DFH-5卫星平台所研制的长寿命、高比冲、大推力离子推力器,其具有5 kW和3 kW两种工作模式,高功率即5 kW工作模式主要用于卫星入轨阶段的轨道转移及姿态调整,而低功率即3 kW工作模式则用于卫星在轨阶段的轨道维持<sup>[1-2]</sup>。2019年12月,30 cm离子推力器搭载DFH-5平台首发星SJ-20卫星入轨并开展工

作,截至目前推力器已工作约900 h。根据SJ-20卫星在轨服役全周期要求<sup>[3]</sup>,推力器的整体设计寿命需满足20 000 h(5 kW工况要求工作5 000 h,3 kW工况为15 000 h)。前期大量的研究证明<sup>[4-5]</sup>,栅极组件的工作寿命基本决定了推力器在轨服务周期,而离子对栅极的刻蚀效应<sup>[6]</sup>是造成栅极最终失效的决定性因素。因此分析并预估当前设计状态下的栅极组件在现有工作参数

\* 收稿日期:2021-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61901202,11702123)

作者简介:孙明明(1985—),男,陕西咸阳人,高级工程师,博士,E-mail:smmhappy@163.com

下的整体寿命,对评价推力器能否满足卫星在轨 20 000 h 的寿命需求,以及寿命提升优化具有重要理论和工程价值。

对于离子推力器栅极组件的寿命预估,国内外研究途径主要是建立单个或数个栅孔的数值分析模型,计算刻蚀速率并同步开展寿命试验,根据试验结果以及试验现象修正模型,以得到较为准确的栅极预估寿命。栅孔数值分析模型的建立方法主要包括较早的半经验方法、流体方法以及目前应用广泛的粒子网格蒙特卡罗碰撞模拟 (particle-in-cell - Monte Carlo collision, PIC-MCC) 方法。2006 年, NSTAR 离子推力器<sup>[7]</sup>的栅极寿命预估采用了半经验方法,即在计算得到栅极上游等离子体密度后,按照试验测定比例估计栅极下游电荷交换 (charge exchange, CEX) 离子密度,并结合栅极电势分布得到相应的材料溅射产额,最后根据栅孔扩大率和栅极厚度变化情况估算栅极寿命。同步进行的寿命试验结果显示,在 30 352 h 试验后, CEX 离子引起的加速栅“坑 - 槽”腐蚀已导致栅孔间的“孔筋”穿透,最终造成加速栅失去聚焦能力且脱落小环引起栅间短路从而导致推力器失效,但仿真结果与试验结果存在一定误差且未能反映栅极的刻蚀趋势。2010 年,日本研究人员采用 PIC-MCC 方法建立  $\mu - 10$  离子推力器栅极寿命模型<sup>[8-9]</sup>,获得了栅孔壁面随时间的刻蚀形貌变化,但计算过程并未考虑栅极间距自身变化所造成的影响。随后开展的 18 000 h 寿命试验结果显示,在试验前期 (1 000 ~ 1 500 h),栅孔径刻蚀增幅呈现非线性,束流的欠聚焦状态是造成这一现象的主要因素,而在试验后期,栅孔的变化则呈现均匀趋势。德国 RIT - 22 射频离子推力器栅极寿命预估模型同样采用 PIC-MCC 方法,在固定栅极间距的条件下,对栅极进行了分段寿命预估。相应的寿命试验结果显示<sup>[10]</sup>,栅极组件在前期 (0 ~ 2 500 h) 呈现快速刻蚀特点,而之后的栅孔径刻蚀则呈明显线性增大趋势,前期的刻蚀速率近似为线性段刻蚀速率的 5 倍,仿真与试验结果较为接近。针对试验现象,经分析认为在寿命试验的早期阶段,栅极初始装配的栅孔对中性基本都会存在一定偏差 (越远离中心越明显),使得束流直接轰击栅孔的概率大幅提升,而在经过一段时间后,栅孔对中偏差被离子刻蚀消失后,栅孔的刻蚀主要由 CEX 离子造成,此时的刻蚀速率远小于前期的刻蚀速率。

国内近年来开展了少量栅极寿命仿真分析,但模型尚不具备边界修正功能,即栅孔形貌无法

随刻蚀量改变,且推力器进行的寿命试验次数较少。2017 年,兰州空间技术物理研究所对 30 cm 离子推力器工程样机进行了 1 500 h 的寿命试验<sup>[11]</sup>。试验结果显示,在 5 kW 模式下,减速栅中间区域 (中心和边缘的环形区域) 刻蚀程度最为明显,大部分区域栅孔出现了“断筋”现象;加速栅的刻蚀程度次之,但在靠近加速栅中心区域,部分加速栅孔出现了明显的“坑 - 槽”腐蚀现象,证明栅孔的对中性改变引起了束流的聚焦状态变化,从而导致在试验早期出现严重刻蚀;屏栅孔的刻蚀程度相对较轻,孔径基本无明显变化。

综上所述,栅极组件是影响离子推力器寿命的关键,本文首先采用有限元分析对栅极热平衡状态下的间距进行计算,在获得较为精确的热态栅间距基础上,采用 PIC-MCC 方法预估在 5 kW 工况下、不同时间段内、栅极不同区域的刻蚀速率,并结合已完成的 5 700 h 寿命试验结果进行对比,最后对栅极的整体寿命进行预估,并评价推力器在轨服务能力。

## 1 栅极热态平衡间距

离子推力器在工作过程中会在不同部件形成热量沉积效应,导致栅极组件自身发生热变形并产生相对位移,引起栅极间距的变化,而栅极间距的变化会直接引起束流聚焦特性及 CEX 离子分布和刻蚀速度的改变,因此获得 30 cm 离子推力器热态平衡间距是开展寿命预估的前提。本文采用有限元分析方法对 5 kW 工况下的栅极热态间距进行模拟。

30 cm 离子推力器采用三栅极组件,由内至外分别为屏栅、加速栅和减速栅。为了降低栅极组件的离子刻蚀效应,在栅极设计过程中采取了变孔径设计,即将栅极表面开孔区域进行人为分区,划分为不同区域。其中,30 cm 离子推力器的栅极表面最大开孔区域为 290 mm,在设计过程中,以栅极几何中心为原点,直径 70 mm 以内的栅极面积定义为区域 1,直径 70 ~ 140 mm 内的栅极环形面积定义为区域 2,直径 140 ~ 230 mm 内的栅极环形面积定义为区域 3,之后的直径每增加 10 mm 的环形区域定义为新区域,由此,对总开孔区域为 290 mm 的栅极表面一共划分为 9 个不同孔径区域,如表 1 所示。对于推力器的热分析过程,课题组前期已进行过研究<sup>[12-13]</sup>,本文中不再进行建模以及热边界条件的介绍,而直接给出推力器热平衡状态下 (工作 4 h 后) 的栅间距仿真结果,如表 1 所示,表中负值表示二者间距拉

大,正值表示间距缩小。其次,为反映栅极整体热形变情况,表 1 数据为在相应区域内,沿半径方向取 20 个点后计算得到的平均值。

表 1 热平衡状态下的减速栅与加速栅间距变化平均值

Tab. 1 Gap between the decelerator grid and the accelerator grid under thermal equilibrium state

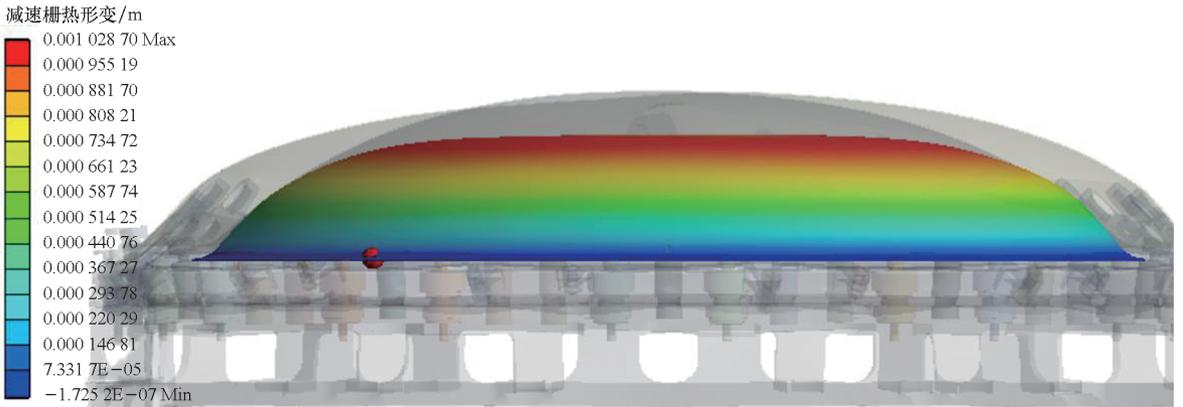
区域	减速栅	加速栅	栅间距变化量
1	0.124	0.181	0.057
2	0.612	0.483	-0.129
3	0.864	0.821	-0.043
4	0.983	1.093	0.110
5	1.006	1.297	0.291
6	0.979	1.436	0.457
7	0.938	1.507	0.569
8	0.933	1.545	0.612
9	0.921	1.530	0.609

单位:mm

从表 1 结果来看,减速栅在 1~2 中心区域形

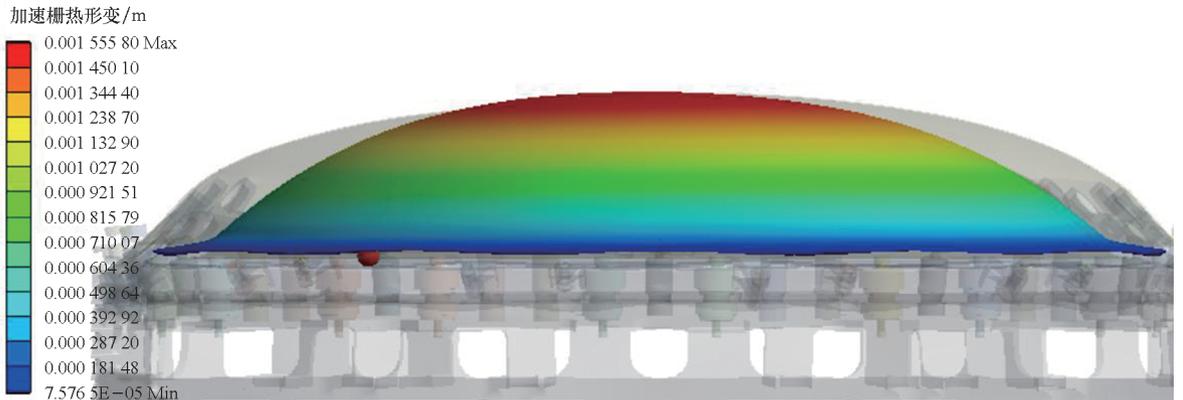
变量较小,而 3~5 区域变形较大但形变量较为均匀,越往边缘区域,即 6~9 区域减速栅形变量逐渐降低,由此导致的结果为,减速栅整体变形呈现明显的中心局部凹陷特征,如图 1(a)所示。加速栅同样在 1~2 中心区域变形较小,而在 3~8 区域内,形变量为均匀增加,因此加速栅整体变形基本呈现均匀突起特征,如图 1(b)所示。

由于图 1(a)和图 1(b)所示减速栅和加速栅截然不同的热形变趋势,两栅中心区域(直径 0~70 mm)的热态平均间距变化较小(形变量仅有 0.057 mm);在 2~3 区域,由于减速栅的实际变形要大于加速栅,因此二者间距实际是拉大的(表 1 所示间距变化为负值);而越向边缘区域延伸,加速栅变形要大于减速栅,因此二者间距愈小。为验证分析结果的准确性,结合前期栅极热态间距测量试验<sup>[2]</sup>,试验过程为在栅极几何中心点粘贴陶瓷探针,并采用高分辨率相机获取试验过程中的栅极间距变化。试验结果为:推力器达到热平衡后,屏栅和加速栅间距实际缩小



(a) 减速栅形变量

(a) Deformation of decelerator grid



(b) 加速栅形变量

(b) Deformation of accelerator grid

图 1 减速栅和加速栅的热形变位移

Fig. 1 Thermal deformation of the decelerator grid and the accelerator grid

0.36 mm, 而加速栅和减速栅间距实际缩小 0.19 mm。由于表 1 所列仿真结果为平均值, 因此给出根据图 1 得到的不同栅极几何中心点的间距随时间的变化量, 如表 2 所示。试验结果与

表 2 所示 14 400 s 后的屏栅和加速栅的 0.25 ~ 0.35 mm 实际缩小量, 以及加速栅和减速栅 0.15 ~ 0.25 mm 实际缩小量的比对误差较小, 证明仿真结果具有较好准确度。

表 2 栅极中心点的间距变化量(5 kW 工况下)

Tab.2 Hot gap change of central point of the grids (in 5 kW work mode)

单位:mm

栅极部件	初始间距	500 s	1 000 s	2 000 s	3 000 s	4 000 s	5 000 s	10 000 s	14 400 s
屏栅 - 加速栅	0.85 ~ 0.95	0.55 ~ 0.65	0.6 ~ 0.7	0.55 ~ 0.65	0.25 ~ 0.35	0.2 ~ 0.3	0.26 ~ 0.36	0.33 ~ 0.43	0.25 ~ 0.35
加速栅 - 减速栅	0.75 ~ 0.85	0.35 ~ 0.45	0.25 ~ 0.35	0.22 ~ 0.32	0.25 ~ 0.35	0.25 ~ 0.35	0.22 ~ 0.32	0.21 ~ 0.31	0.15 ~ 0.25

## 2 寿命预估方法及仿真模型

全寿命周期预估方法为: 结合寿命试验数据和仿真结果进行全寿命周期预测, 基于栅孔溅射腐蚀模型(一般采用 PIC-MCC 方法), 计算栅孔质量刻蚀速率, 并根据模拟时长片段的分析结果(30 cm 推力器寿命试验取 300 h 为一小节), 对模型边界条件进行修正, 重新计算栅孔质量刻蚀速率, 最终给出每小节完成后的预计寿命。过程如图 2 所示。

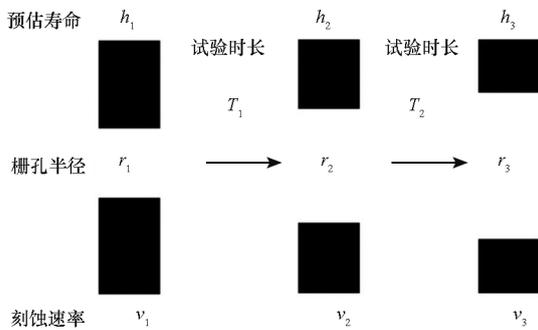


图 2 全寿命周期预估方法示意图

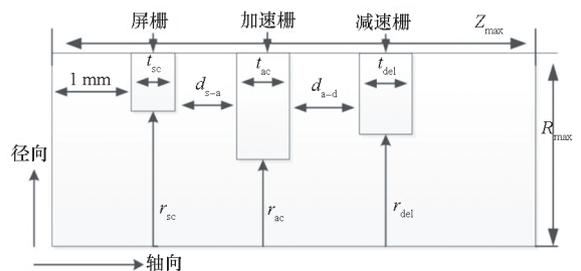
Fig.2 The whole life estimate method of the grids

图 2 所示方法可简述为: 假设初始孔径为  $r_1$ , 在此边界条件下( $r_1$  时的电场、磁场)的模型预估刻蚀速率为  $v_1$  (根据最大可刻蚀质量预估得到预估寿命  $h_1$ ); 经过  $T_1$  时长的试验后, 孔径变为  $r_2$ , 此时重新计算模型边界条件( $r_2$  对应的电场、磁场), 计算得到经过  $T_1$  时长的试验后的栅孔刻蚀速率  $v_2$  (根据最大可刻蚀质量减去已刻蚀质量, 以剩余质量得到预估寿命  $h_2$ ); 再经过  $T_2$  时长的试验后, 孔径变为  $r_3$ , 再次修正模型并计算预估刻蚀速率  $v_3$  以及预估寿命  $h_3$ , 以此类推。

栅孔腐蚀模型的构建思路是基于栅极不同区

域的栅孔尺寸和热平衡间距, 以及电场分布和上游等离子体密度等初值条件, 计算该区域栅孔的离子溅射腐蚀速率, 并将栅极单孔近似为圆孔以便于进行寿命预估。保守寿命预估方法为当加速栅孔径等于屏栅孔径后, 即认为寿命终结; 拓展寿命预估方法为当栅孔发生“断筋”现象, 且“断筋”的标准为当栅孔的溅射腐蚀程度达到原始孔径的 90%, 即发生结构失效则认为寿命终结。本文采用拓展寿命预估方法。

对于栅孔腐蚀模型, 本课题组前期已开展过相应研究<sup>[14-15]</sup>, 本文不再进行 PIC-MCC 算法介绍, 仅给出模型的建立和边界条件设置过程。模型计算区域如图 3(a) 所示, 图中  $d_{s-a}$  和  $d_{a-d}$  分别为屏栅与加速栅间距、加速栅与减速栅间距(计算中根据表 1 和表 2 所给出的栅极不同区域的间距值进行选取), 其余参数定义如表 3 所示。图 3(b) 为计算区域的边界条件设置, 其中左边界为等离子体入口, 右边界即减速栅下游区域为等离子体出口; 三个栅极表面均设置为等离子体吸收边界, 下边界由于是计算区域的对称轴, 因此设置为反射边界, 并且栅极间距区域同样设置为反射边界, 即当一个离子进入计算区域的同时, 原计算区域的一个离子脱离计算区域。



(a) 计算区域

(a) Calculation region

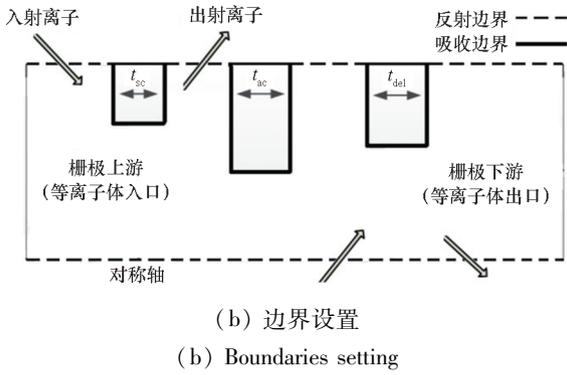


图 3 三栅极组件的计算区域示意图及边界设置

Fig. 3 Calculation region and boundaries setting of the triple grid

表 3 为采用 PIC-MCC 方法的计算区域参数设置。其中  $r_{sc}$ 、 $r_{ac}$  和  $r_{del}$  分别为屏栅、加速栅和减速栅的栅孔半径,  $t_{sc}$ 、 $t_{ac}$  和  $t_{del}$  分别为屏栅、加速栅和减速栅厚度,  $V_{acc}$ 、 $V_{sc}$  和  $V_{del}$  分别为加速栅、屏栅及减速栅电压,  $N_m$  为栅极上游的最大离子密度(根据前期研究结果<sup>[16]</sup> 取为  $6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ),  $T_i$  为离子温度(近似认为离子温度与放电室温度一致<sup>[17-18]</sup>),  $V_p$  为等离子体电势,  $T_{eu}$  为栅极上游区域电子温度(该区域电子主要来源为阴极发射以及放电室电离产生),  $T_{ed}$  为栅极下游区域电子温度(该区域电子主要来源为中和器发射以及羽流区电离产生)<sup>[19-21]</sup>。

表 3 计算区域的参数设置

Tab. 3 Parameters setting of the calculation regions

参数	数值	参数	数值
$r_{sc}/\text{mm}$	0.95	$V_p/\text{V}$	37
$r_{ac}/\text{mm}$	0.55	$T_i/\text{K}$	600
$t_{sc}/\text{mm}$	0.40	$T_{eu}/\text{eV}$	4.5
$t_{ac}/\text{mm}$	0.50	$T_{ed}/\text{eV}$	1.50
$V_{acc}/\text{V}$	-450	$N_m/\text{m}^{-3}$	$6 \times 10^{18}$
$r_{del}/\text{mm}$	0.65	$V_{sc}/\text{V}$	1 200
$t_{del}/\text{mm}$	0.5	$V_{del}/\text{V}$	0

在得到溅射刻蚀速率后,为预估寿命,需计算栅孔的最大可刻蚀质量。其中最大可溅射质量以栅孔 90% 的腐蚀程度进行考虑。最大可溅射质量可根据图 4 所示栅孔的结构等效来进行预估。图 4 所示六边形为取各相邻栅孔中线(即孔筋)构成,  $S_1$  以及  $S_2$  分别为内孔圆面积以及外孔圆面积,其中内孔圆半径与栅孔半径一致,外孔圆半径为圆心至六边形顶点距离的 90%。由于栅孔是同步发生刻蚀,因此所有相邻等效圆的半径同时

扩大,即当内孔圆半径扩大至与外孔圆半径相等时,则认为发生“断筋”。单孔最大可溅射腐蚀质量可表述为式(1),式中  $M_s$  为最大可溅射腐蚀质量,  $\rho$  为材料密度(栅极采用 Mo 材料加工制成, Mo 材料的密度为  $10.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ),  $h_1$  为孔壁厚度。通过计算得到,加速栅孔的最大可溅射质量为  $4.6 \times 10^{-6} \text{ kg}$ , 减速栅孔的最大可溅射质量为  $3.9 \times 10^{-6} \text{ kg}$ 。

$$M_s = \rho h_1 (S_2 - S_1) \quad (1)$$



图 4 栅孔最大可刻蚀质量计算

Fig. 4 The largest erosion mass of the grid apertures

根据得到的 30 cm 离子推力器栅孔离子质量溅射速率以及最大可刻蚀质量,则可以对每小节后的寿命进行预估。

### 3 栅极寿命预估

结合 2017 年完成的 30 cm 离子推力器工程样机的 1 500 h 寿命试验结果<sup>[11]</sup>,对于栅极刻蚀过程,最值得关注的区域为靠近减速栅边缘的环形区域 3 内的刻蚀(在 1 500 h 寿命试验中该区域出现大量“断筋”现象)。根据表 1、表 2 分析结果和表 3 的边界设置,栅极组件区域 3 内的加速栅和减速栅间距增大 0.043 mm,变为 0.893 mm,屏栅对加速栅的间距则缩小了 0.35 mm。本文采取的全寿命周期预估方法是将 300 h 作为更改边界条件的时间步长,由于 300 h 的时间间隔过短,从计算结果几乎无法看出栅孔径变化,并且限于篇幅,本文仅给出减速栅区域 3(为便于对比,文中统一将该区域称为边缘区域)栅孔在 1 500 h、3 300 h 和 5 700 h 后的刻蚀情况仿真分析图,如图 5 所示,加速栅和屏栅其他区域的刻蚀速率均以数值结果给出,如表 4 所示。

从图 5 结果来看,3 300 h 的减速栅边缘孔径相比 1 500 h 有明显变化,结合表 4 所示栅孔刻蚀速率来看,0 ~ 3 300 h 内的刻蚀速率较高,且 1 500 h 内的刻蚀速率最高达到了  $6.25 \times 10^{-14} \text{ kg/s}$ ,而 5 700 h 的刻蚀速率相比 1 500 h 内的有大幅降低,降幅达到了 15.4%。同样的现象在加速栅中心和边缘,以及减速栅中心区域均有出现,5 700 h 内的加速栅中心和边缘及减速栅中心区域相比 1 500 h 内的降幅分别达到 8.0%、4.1% 和 3.6%。出现上述现象的原因可结合图 4

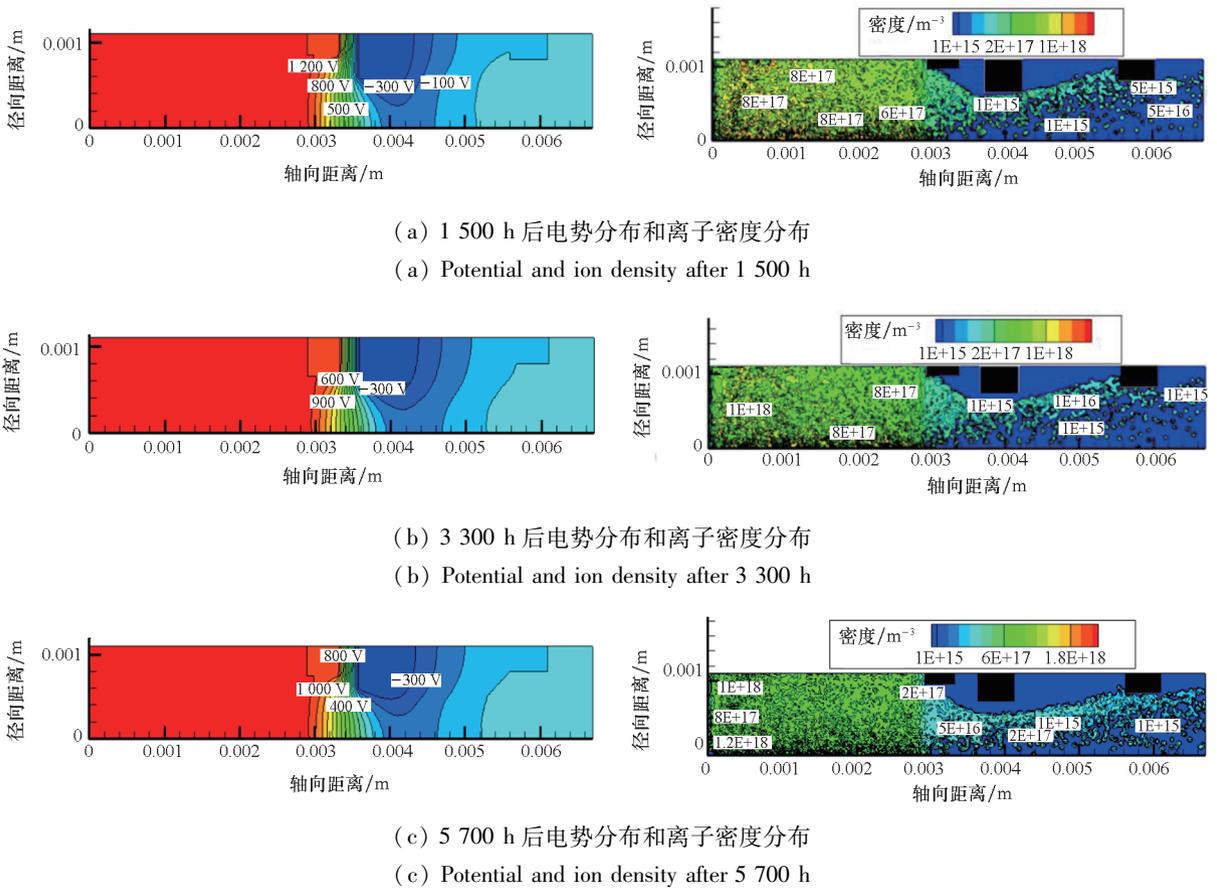


图5 减速栅区域3栅孔变化后的电势以及离子密度分布

Fig.5 Electric potential and ion density distribution after the variation of the diameter of the apertures in region 3 of the decelerator grid

表4 不同区域栅孔的刻蚀速率

Tab.4 Erosion velocity of the grids holes in different regions

区域	时间/h	刻蚀速率 (kg/s)	区域	时间/h	刻蚀速率 (kg/s)
加速栅中心 (区域1~2)	1 500	$5.85 \times 10^{-14}$	加速栅边缘 (区域3)	1 500	$5.13 \times 10^{-14}$
	3 300	$5.44 \times 10^{-14}$		3 300	$5.07 \times 10^{-14}$
	5 700	$5.38 \times 10^{-14}$		5 700	$4.92 \times 10^{-14}$
减速栅中心 (区域1~2)	1 500	$5.82 \times 10^{-14}$	减速栅边缘 (区域3)	1 500	$6.25 \times 10^{-14}$
	3 300	$5.69 \times 10^{-14}$		3 300	$5.54 \times 10^{-14}$
	5 700	$5.61 \times 10^{-14}$		5 700	$5.29 \times 10^{-14}$

结果以及德国 RIT-22 射频离子推力器的寿命试验现象来说明<sup>[10]</sup>:在推力器寿命试验初期(一般在 2 000 h 以内),CEX 离子对栅孔的刻蚀并非主要影响(CEX 离子刻蚀一般在栅极寿命的中后期),而束流对栅孔的直接刻蚀占主要地位,尤其是栅极边缘区域的栅孔(栅孔对中性在热形变影响下发生改变),是受到束流直接刻蚀的最主要部位。这一结论在日本  $\mu-10$  离子推力器寿命试验结果中得到了证实<sup>[8-9]</sup>, $\mu-10$  离子推力器(双栅结构,加速栅处于最外层)加速栅边缘孔在试

验前期(约 1 500 h 内)呈现梯形刻蚀(出口处刻蚀更严重),而没有出现 CEX 离子造成明显的栅极“坑-槽”刻蚀。试验中后期,加速栅边缘孔的孔径基本呈线性扩大,刻蚀速率相比前期明显降低,且变化较小,而栅极中心区域的“坑-槽”刻蚀(导致厚度降低)现象则非常明显。图 5 和表 4 的孔径刻蚀仿真结果也基本呈现同样特点,如 5 700 h 的刻蚀速率相比 3 300 h 的变化较低,因此可认为,对于采用栅极实现离子加速引出功能的同类型离子推力器来说,最外层栅极的边缘孔

刻蚀呈现早期快速非线性变化和后期缓慢线性变化的特点是普遍现象。

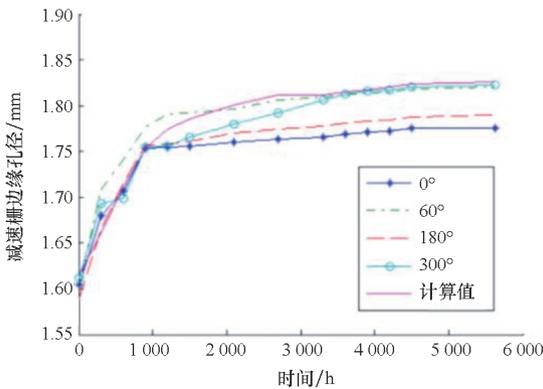
### 4 试验验证

为了验证图 5 和表 4 的孔径刻蚀仿真结果的准确性,以及证明本文得到的栅孔刻蚀呈现早期非线性和后期线性的特点是普遍现象的这一结论,结合 2018—2020 年开展的 30 cm 离子推力器 8 000 h 寿命试验结果进行验证。由于主要关注的是栅极从非线性刻蚀进入线性刻蚀时间段内的几何改变,因此本文仅给出 5 700 h 内的试验数据进行仿真结果验证。试验结果比对前,首先将仿真计算得到的质量刻蚀速率表述为孔径变化率,即:

$$r_2 = 2\,000 \sqrt{r_1^2 + 1.08 \times 10^6 v / (\pi \rho d)} \quad (2)$$

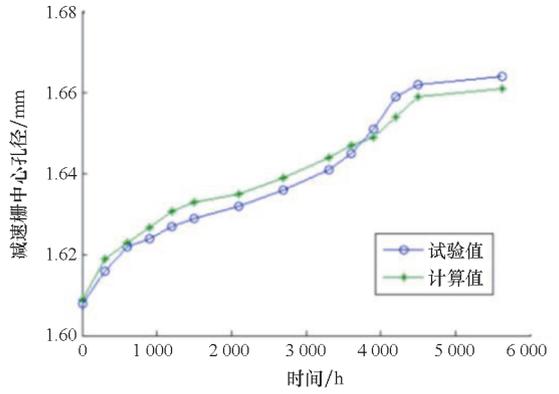
式中,  $r_1$  和  $r_2$  分别为上一阶段孔径值和现阶段孔径值,  $d$  为栅孔厚度,  $v$  为质量溅射速率。根据式(2)可得到现阶段孔径值。仿真和实测比对结果如图 6 所示,其中图 6(a)和图 6(c)分别为区域 3 内减速栅和加速栅的边缘孔径变化,图中所示的  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $180^\circ$ 和  $300^\circ$ 分别为以栅极中心为原点,  $x$  轴线顺时针转动的不同角度方向上的栅孔径平均值,以获得整个栅面边缘孔的刻蚀情况。图 6(b)和图 6(d)分别为区域 1 内减速栅和加速栅的中心孔径变化的试验值与计算值的比对曲线。

从图 6 的比对结果来看,减速栅中心、加速栅中心和边缘孔径的仿真结果与试验结果符合性较好,误差均小于 10%,并且试验得到的栅孔刻蚀趋势与仿真结果基本一致。如图 6(b)~(d)所示,在整个 5 700 h 的试验时长内,减速栅中心孔、加速栅中心和边缘孔的扩大基本可看作线性变化,并在整个寿命试验过程中均保持这一变化趋势。图 6(a)的试验结果显示减速栅边缘孔在经



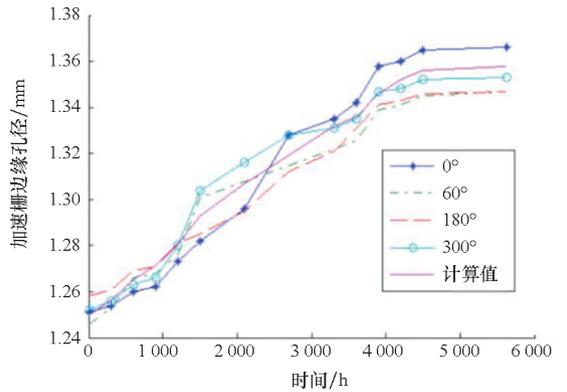
(a) 减速栅边缘区域

(a) Edge area of the decelerator grid



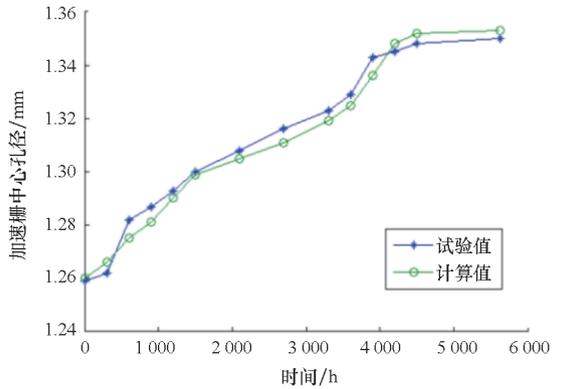
(b) 减速栅中心区域

(b) Center area of the decelerator grid



(c) 加速栅边缘区域

(c) Edge area of the accelerator grid



(d) 加速栅中心区域

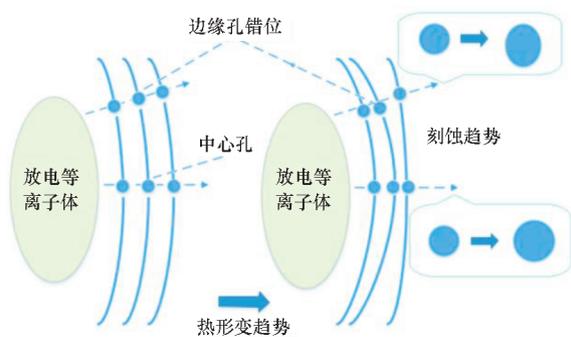
(d) Center area of the accelerator grid

图 6 不同区域孔径实测与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of the test results and the simulation results in different regions

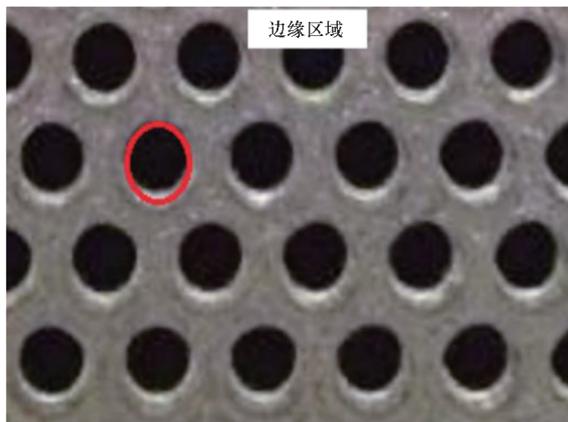
过 1 000 ~ 1 500 h 的快速刻蚀后进入缓慢变化状态;仿真结果显示,在经过 2 000 ~ 2 500 h 的快速刻蚀后,减速栅边缘区域孔径才处于缓慢线性增长阶段,且计算值要明显高于试验测量结果。分析误差来源:根据表 1 和图 1 的模拟结果来看,减速栅边缘区域热形变位移导致栅孔对中性发生改变(栅孔的小幅度错位),在束流高能粒子轰击作

用下,前期出现快速刻蚀的可能性非常高,而PIC-MCC模型尚无法就栅孔对中性改变进行调整,其次栅极热形变有限元仿真结果的精确性也是造成误差的主要来源。整个刻蚀过程可以用图7(a)进行解释。在热应力作用下,栅极整体发生热位移且形变趋势如图1和表1所示,由此导致边缘区域栅孔的对中性有了大幅改变并发生错位,如图7(a)所示,错位会导致边缘栅孔在试验前期出现快速刻蚀,且刻蚀呈现椭圆形刻蚀,并且由于中心区域等离子密度更高,因此刻蚀方向朝向圆心。而中心区域栅孔受栅极间距的影响较小,因此只出现孔径逐渐刻蚀扩大的特性(类似于线性变化)。图7(b)所示为采用三维轮廓仪测量得到的5700 h后的区域3内的减速栅边缘孔变化,栅孔呈现明显椭圆形刻蚀,并且越朝向中心区域的刻蚀越明显,这一现象也验证了前述的分析结论。



(a) 减速栅孔的刻蚀过程

(a) Erosion process of the aperture of the decelerator grid



(b) 5700 h后的减速栅边缘孔

(b) Edge aperture of decelerator grid after 5700 h

图7 减速栅孔的刻蚀过程以及5700 h后的边缘孔刻蚀形状

Fig.7 Erosion process and erosion shape of the aperture of the decelerator grid after 5700 h

成5 kW工况的5700 h累计工作时长后,需继续开展3 kW工况的在轨工作。因此,本文在图5(c)的栅孔刻蚀形貌基础上,进一步模拟3 kW工况栅极热态间距,并设置相应3 kW工况下的电、气参数以及上游等离子体密度等边界条件,得到栅极不同区域的刻蚀速率(假设此时栅极处于线性刻蚀,且刻蚀速率恒定),限于篇幅,本文仅给出计算结果。在5 kW工况累计5700 h后,3 kW工况下加速栅中心和边缘、减速栅中心和边缘的刻蚀速率分别为 $4.16 \times 10^{-14}$  kg/s和 $5.62 \times 10^{-14}$  kg/s、 $4.08 \times 10^{-14}$  kg/s和 $5.11 \times 10^{-14}$  kg/s。结合栅孔最大可溅射质量计算得到,在上述区域,栅极还能分别继续刻蚀24234 h、18332 h、19723 h和16014 h,均满足SJ-20卫星寿命要求。

## 5 结论

通过对影响30 cm离子推力器寿命的关键部件即栅极组件进行寿命预估以及基于推力器的5700 h寿命试验结果比对,得到以下结论:

1) 减速栅整体变形呈现明显的中心局部凹陷特征,加速栅整体变形呈现为均匀突起,加速栅和减速栅中心区域(直径0~70 mm)的热态平均间距变化较小,缩小量为0.057 mm,而二者几何中心点的间距缩小量为0.15~0.25 mm。区域2内的两栅平均间距增大0.129 mm,而越向边缘区域延伸,加速栅变形大于减速栅导致二者间距愈小。

2) 寿命全周期预估结果显示,减速栅边缘区域3在0~3300 h内的刻蚀速率较高,且1500 h时的刻蚀速率达到最大,为 $6.25 \times 10^{-14}$  kg/s,而5700 h的刻蚀速率相比1500 h的降幅达到15.4%。5700 h内的加速栅中心和边缘及减速栅中心区域的刻蚀速率相比1500 h内的降幅分别为8.0%、4.1%和3.6%。

3) 在5700 h的寿命试验时长内,减速栅中心孔、加速栅中心和边缘孔的刻蚀基本呈线性变化,并在整个寿命试验过程中均保持这一趋势,且仿真结果与试验结果符合性较好,误差均小于10%。试验结果显示减速栅边缘孔在经过1500 h的快速刻蚀后进入缓慢线性变化,而仿真结果为在2000~2500 h之后,减速栅边缘孔才处于缓慢线性增长阶段。误差经分析认为主要来源于两方面——PIC-MCC模型无法就栅孔对中性改变进行调整,以及栅极热形变有限元仿真结果的精确性。

此外,根据推力器在轨工作方式,即推力器完

仿真及试验结果表明,现有 30 cm 离子推力器的三栅极组件能够满足 20 000 h 的栅极整体设计寿命要求,后续将根据试验结果进一步修正模型,以提高模型计算精度。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵以德, 吴宗海, 张天平, 等. 离子推力器多模式化研究[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 187 - 193.  
ZHAO Y D, WU Z H, ZHANG T P, et al. Research on multi-mode realization of ion thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(1): 187 - 193. (in Chinese)
- [2] 孙明明, 耿海, 龙建飞, 等. 不同环境温度对 30 cm 离子推力器三栅极组件的离子刻蚀速率影响分析[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 121 - 131.  
SUN M M, GENG H, LONG J F, et al. Effects of different ambient temperature on ion erosion rate for triple grid of 30 cm diameter ion thruster[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(1): 121 - 131. (in Chinese)
- [3] SUN M M, ZHENG Y, GENG H. Grid gap variation of ion thruster during startup in orbit [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2): 455 - 461.
- [4] HAYASHI M. Determination of electron-xenon total excitation cross-sections, from threshold to 100 eV, from experimental values of Townsend's A [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983, 16(4): 581 - 589.
- [5] HAAG T. Mechanical design of carbon ion optics [C]//Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005.
- [6] BROPHY J R, KATZ I, POLK J E, et al. Numerical simulations of ion thruster accelerator grid erosion [C]//Proceedings of the 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2002.
- [7] CHIEN K R, TIGHE W, BOND T, et al. An overview of electric propulsion at L-3 Communications, Electron Technologies Inc. [C]//Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006.
- [8] HAYAKAWA Y, YOSHIDA H, MIYAZAKI K, et al. Validation of an ion-thruster grid thermal model with experiments [C]//Proceedings of the 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2010.
- [9] FUNAKI I, NAKANO M, KAJIMURA Y, et al. A numerical tool for lifetime evaluation of ion thruster's ion optics [C]//Proceedings of the 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2011.
- [10] TARTZ M, NEUMANN H. Validated ion thruster grid lifetime simulation [C]//Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006.
- [11] SUN M M, WANG L A, YANG J T, et al. Study of the key factors affecting the triple grid lifetime of the LIPS - 300 ion thruster [J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(4): 045504.
- [12] 陈娟娟, 张天平, 刘明正, 等. LIPS - 200 离子推力器放电室原初电子动力学行为的数值模拟研究 [J]. 推进技术, 2015, 36(1): 155 - 160.  
CHEN J J, ZHANG T P, LIU M Z, et al. Investigation on dynamical behavior of primary electrons in LIPS - 200 ion thruster discharge chamber [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(1): 155 - 160. (in Chinese)
- [13] 孙明明, 张天平, 王亮, 等. 30 cm 离子推力器栅极组件热应力及热形变计算模拟 [J]. 推进技术, 2016, 37(7): 1393 - 1400.  
SUN M M, ZHANG T P, WANG L, et al. Thermal stress and thermal deformation analysis of grids assembly for 30 cm diameter ion thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(7): 1393 - 1400. (in Chinese)
- [14] 郭德洲, 顾左, 陈娟娟, 等. 离子推力器变孔径栅极方案数值研究 [J]. 推进技术, 2018, 39(9): 2136 - 2143.  
GUO D Z, GU Z, CHEN J J, et al. Numerical research on optimized scheme of ion thruster optics system by varying aperture diameters [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(9): 2136 - 2143. (in Chinese)
- [15] 孙明明, 张天平, 高俊, 等. 30 cm 离子推力器三栅极组件设计参数对寿命的影响研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(2): 472 - 480.  
SUN M M, ZHANG T P, GAO J, et al. Effects of three-grids assembly design parameters on estimated lifetime for 30 cm diameter ion thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(2): 472 - 480. (in Chinese)
- [16] SUN M M, JIA Y H, HUANG Y J, et al. Study on the influence of three-grid assembly thermal deformation on breakdown times and an ion extraction process [J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(6): 065509.
- [17] MIKELLIDES I G, KATZ I J, MANDELL M. A 1-D model of the hall-effect thruster with an exhaust region [C]//Proceedings of 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.
- [18] GOEBEL D M, JAMESON K K, WATKINS R M, et al. Hollow cathode and keeper-region plasma measurements using ultra-fast miniature scanning probes [C]//Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004.
- [19] SUN M M, LONG J F, GUO W L, et al. A study of the influence of different grid structures on plasma characteristics in the discharge chamber of an ion thruster [J]. Plasma Science and Technology, 2023, 25(1): 164 - 173.
- [20] CHEN X W, HE B J, GU Z, et al. Investigation into the thermal effect of the LIPS-200 ion thruster plume [J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(7): 29 - 40.
- [21] CHEN J J, JIA Y H, GENG H, et al. Investigation of variable aperture on the performance and lifetime of ion thruster [J]. Plasma Science and Technology, 2021, 23(10): 13 - 23.