

# 磁屏蔽霍尔推力器磁场设计及实验验证

徐亚男<sup>1</sup>, 康小录<sup>1,2</sup>, 余水淋<sup>1,2</sup>, 黄浩<sup>1,2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘要:**磁屏蔽能够有效减缓等离子体对霍尔推力器放电室壁面的腐蚀,是延长推力器寿命的有效途径,可以将霍尔推力器的寿命提高至满足长寿命航天任务要求的水平,有巨大的发展潜力。对磁屏蔽技术原理进行了分析,以口径120 mm的霍尔推力器为对象进行了磁场设计和验证实验。提出了一种壁面磁力线向阳极弯曲程度最大且与壁面尽量不相交的磁场构形,是该实验样机壁面磁力线等势程度最高的构形,10 h点火后磁屏蔽构形壁面腐蚀状况与传统构形壁面相比,全部壁面被沉积的黑色物质覆盖,显著减少了离子对放电室壁面的腐蚀。验证了该磁屏蔽磁场构形的显著效果,并对该磁屏蔽霍尔推力器的性能进行了初步研究,阳极流量62 sccm、放电电压300 V下的最优效率为54.23%,对应的羽流状态为“长筒状”。

**关键词:**磁屏蔽; 磁场设计; 壁面腐蚀

中图分类号: V439 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374(2019)05-0059-07

## Magnetic field design and experimental verification of magnetic shielded Hall thruster

XU Yanan<sup>1</sup>, KANG Xiaolu<sup>1,2</sup>, YU Shuilin<sup>1,2</sup>, HUANG Hao<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Space Engine Engineering Research Center, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** Magnetic shielding can effectively reduce the erosion of plasma on the wall of Hall thruster discharge chamber. It is an effective way to prolong the life of the thruster, which can improve the life of Hall thruster to meet the requirements of long-life space missions. So it has great potential for development. In this paper, the principle of magnetic shielding technology was analyzed, and the magnetic field design and verification experiments were carried out for a 120 mm Hall thruster. A magnetic field configuration with the maximum bending degree of the near-wall magnetic line to the anode and the maximum disjunction with the wall was proposed, which is the configuration whose near-wall magnetic line is the highest isopotential in the experimental prototype. The erosion of the wall of the magnetic shielding configuration was compared with that of traditional configuration after 10 hours of ignition. The former is covered by deposited carbon powder, which shows that magnetic shielding can significantly reduce the ion

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2019-01-16

基金项目: 航天装备基金(6141B061405)

作者简介: 徐亚男(1994—), 女, 硕士, 研究领域为空间电推进, 磁屏蔽霍尔推力器

erosion on the wall of the discharge chamber. The remarkable effect of the magnetic shielding field configuration was verified. Then the performance of the magnetic shielding Hall thruster was preliminarily studied. The optimum efficiency of the thruster is 54.23% at 62 sccm anode flow and 300 V discharge voltage, which corresponds to plume state "long cylinder".

**Keywords:** magnetic shielding; magnetic field design; wall corrosion

## 0 引言

霍尔推力器凭借其可靠性高、比冲范围合适等优点广泛应用于地球轨道卫星和深空探测飞行器的姿态调整、位置保持以及轨道转移等空间推进任务<sup>[1]</sup>。随着人类空间活动愈加频繁,比如空间站的运行、全电卫星的发展以及远地航天任务的开展等,对推力器寿命的要求随之提高。然而目前霍尔推力器的寿命仅几千到一万小时,远不能满足将来任务的需求,其中制约推力器寿命的主要因素就是放电室壁面的腐蚀。

美国喷气推进实验室(JPL)在对 BPT-4000 霍尔推力器进行寿命验证实验时,发现 5 600 h 后放电室达到了壁面“零腐蚀”的稳定状态<sup>[2]</sup>。通过对这一稳定状态的物理本质进行数值仿真研究,提出了“磁屏蔽”的概念。随后在 6 kW 的霍尔推力器上进行了实验验证,结果表明推力器的壁面腐蚀速率减小了 3 个数量级,且推力器的推力、比冲、效率等性能没有明显的下降<sup>[2]</sup>。因此从大幅度延长霍尔推力器寿命方面考虑,磁屏蔽技术在不同功率、不同尺寸霍尔推力器上的应用有着广泛的前景。

国外对磁屏蔽霍尔推力器有着一定程度的研究,包括美国的喷气推进实验室(JPL)<sup>[2-4]</sup>、密歇根大学<sup>[5]</sup>、加州大学<sup>[6-10]</sup>、NASA<sup>[11-14]</sup>、意大利<sup>[15-16]</sup>、法国<sup>[17]</sup>等各方。国内北京航空航天大学申请了关于磁屏蔽低功率霍尔推力器的专利<sup>[18]</sup>,大连海事大学进行了 ATON 型霍尔推力器不同磁屏蔽磁场位形的仿真研究<sup>[19]</sup>。目前虽然有如上关于磁屏蔽的诸多研究,但是距磁屏蔽霍尔推力器的应用还有很多研究有待开展。

本文拟通过对磁屏蔽基本理论的分析,探讨何种磁屏蔽磁场构形能够实现全壁面磁屏蔽,利用磁场仿真得到了磁屏蔽霍尔推力器的磁场构形,利用

120 mm 口径的霍尔推力器对该磁屏蔽磁场设计结果的有效性进行必要的验证。最后初步探究了磁屏蔽霍尔推力器的性能。

## 1 磁屏蔽原理

霍尔推力器内电磁场和等离子体的行为相互影响,从传统霍尔推力器的电磁场对等离子体的影响理解磁屏蔽减轻腐蚀的原理。由广义欧姆定律可知,霍尔推力器内垂直于磁力线的电场分量为  $\sqrt{1 + \beta^2} j_{\perp} / \beta$ , 其中  $\beta$  为无量纲的霍尔参数;  $j_{\perp}$  为垂直于磁力线的电流密度,  $A/m^2$ 。平行于磁力线电场分量为  $j_{\parallel} / \sigma$ , 其中  $j_{\parallel}$  为平行于磁力线的电流密度,  $A/m^2$ ;  $\sigma$  为电导率,  $S/m$ 。由霍尔推力器放电室内霍尔参数  $\beta = \omega_{ce} / v_e \gg 1$  ( $\omega_{ce}$  为回旋频率,  $Hz$ ;  $v_e$  为碰撞频率,  $Hz$ ) 能够知道电子在平行于磁力线方向上运输热量和质量的阻抗远小于垂直于磁力线方向上的阻抗,由此可以得出磁力线的第一个特性,即磁力线绝热特性

$$\nabla_{\parallel} T_e \approx 0 \quad (1)$$

式中  $T_e$  是电子温度,  $eV$ 。

由电子动量方程可得平行于磁力线方向上的电场分量,从通道中心到壁面沿磁力线进行积分可以得到沿磁力线的电势

$$\varphi_{\parallel} = \varphi_0 + T_{e0} \ln(n_{e0} / n_e) \quad (2)$$

式中:  $\varphi_{\parallel}$  为平行于磁力线的电势,  $V$ ;  $n_e$  为电子数密度,  $1/m^3$ ; 下标 0 为放电室通道中心线上的值。

由于沿磁力线电子数密度在变化,而电子温度有限且恒定,造成  $T_{e0} \ln(n_{e0} / n_e)$  变化不可忽视,如图 1(a) 的传统霍尔推力器放电室通道放电特性和磁场构形所示,壁面沿轴向的电子温度呈单峰状变化,壁面电势沿轴向一直下降,磁力线与放电室壁面相交,沿磁力线存在电场分量  $E_{\parallel}$  (单位  $V/m$ ) 将离子加速碰撞到放电室壁面产生严重的溅射,所以

降低  $E_{||}$  的影响是减轻壁面腐蚀的核心,即要实现磁力线等势。

$T_{e0} \ln(n_{e0}/n_e)$  的变化是导致电势沿磁力线变化的原因<sup>[20]</sup>,若要实现磁力线等势,就要尽量弱化该项对于电势的影响<sup>[20]</sup>。通过将壁面附近的磁力线向近阳极区延伸,利用磁力线绝热的特点使壁面附近的电子温度等于阳极附近较低的电子温度,则壁面磁力线上的电子温度  $T_{e0} \rightarrow 0$ ,进而有  $\varphi_{||} \approx \varphi_0$ 。同时在出口加工倒角使磁力线与壁面尽量贴合,形成的磁屏蔽磁场构形如图 1(b) 所示。与传统霍尔推力器磁场构形造成的电子温度和电势沿壁面的分布相比,磁屏蔽霍尔推力器电子温度沿壁面一直维持一个较小数值不变,沿壁面一直维持阳极的高电势不变。

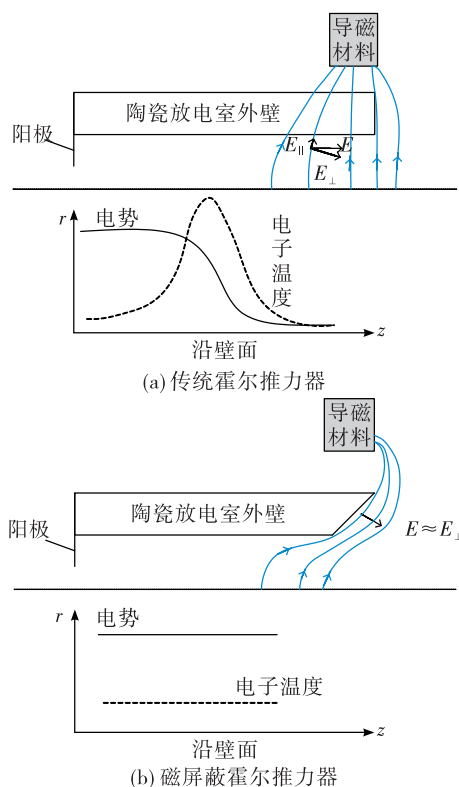


图1 磁屏蔽与传统霍尔推力器壁面电磁场及放电特性比较

Fig. 1 Comparison of electromagnetic field and discharge characteristics near the wall between magnetic shielding and baseline configuration

腐蚀速率是垂直入射到壁面的离子流密度  $j_{i\perp}$  (单位  $A/m^2$ ) 与溅射系数  $Y$  的函数

$$\varepsilon = j_{i\perp} Y \quad (3)$$

而  $j_{i\perp}$  是离子电荷  $q_i$  (单位 C)、离子数密度  $n_i$  (单位  $1/m^3$ ) 和离子入射到壁面速度的垂直分量  $u_{i\perp}$  (单位  $m/s$ ) 的函数,  $Y$  是离子入射能量  $K_i$  (单位 V) 和入射角度  $\theta$  (单位 rad) 的函数。磁屏蔽将壁面附近的离子驱使远离,降低了入射到壁面上的  $n_i$ ,从而减小了  $j_{i\perp}$ ;使得壁面电子温度减小,鞘层势能随之减小,壁面离子的  $K_i$  减小,从而降低了  $Y$ ;壁面与阳极间的电势差减小,离子从等离子体到壁面途中速度增量减小,即减小了  $u_{i\perp}$  和  $K_i$ ,从而降低了  $j_{i\perp}$  和  $Y$ 。通过以上方面磁屏蔽最终大幅减小了壁面腐蚀速率。

## 2 磁屏蔽磁场仿真

为了使贴近壁面的磁力线尽量向阳极弯曲,而放电室通道中心磁力线接近于径向,以保证壁面离子远离、而中心处磁场依旧加速离子喷出,最终在全部壁面上实现磁屏蔽,本节进行了磁屏蔽霍尔推力器的磁场仿真。

图 2 是口径为 120 mm 实验样机的传统磁场构形的仿真结果,在近出口处磁力线接近于径向,放电室壁面相交。磁屏蔽磁场构形需要壁面磁力线尽量向阳极弯曲以求近乎等势,图 3 中多条磁力线与壁面相交,下游的磁力线由于向阳极弯曲的程度不够<sup>[21]</sup>,则电子温度较高,该磁力线不能保持等势,壁面离子能量较高,若超过能量阈值将沿平行于该磁力线的电场分量加速冲向壁面,从而发生溅射<sup>[22]</sup>。壁面与磁力线相交的面积越多,出口壁面磁力线越容易不等势。

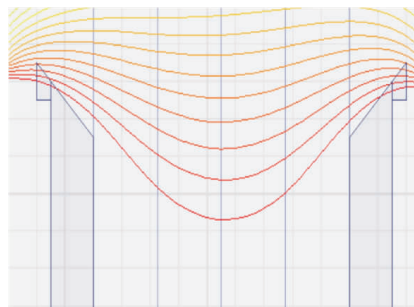


图2 传统磁场构形仿真结果

Fig. 2 Simulation results of baseline magnetic field configuration

为追求该实验样机全部壁面能够实现磁屏蔽,在实验样机整体结构尺寸的限制下能够达到的理论效果最优的磁屏蔽磁场仿真结果如图 4 所示,最贴近壁面的磁力线在向阳极弯曲同时与壁面完全不相交,等势的程度最高。但是最终壁面的离子能量实际造成溅射的程度未知,因此该磁屏蔽构型能否最终实现全部壁面的磁屏蔽需要通过长时间的点火实验进行验证。

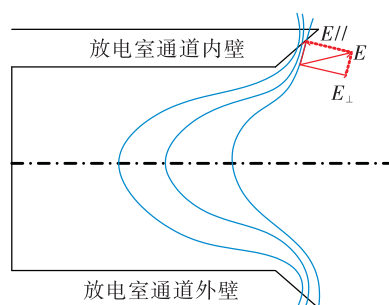


图 3 磁力线与出口壁面相交示意图

Fig. 3 Diagram of the intersection of the magnetic flux line with the exit wall

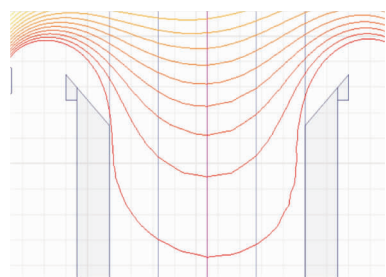


图 4 磁屏蔽构形仿真结果

Fig. 4 Simulation results of magnetic shielding configuration

图 5 表示的是磁屏蔽磁场构形和传统磁场构形在放电室通道中心线上的标准化磁场强度分布,其中无量纲数  $B_c$  表示的是标准化磁场强度,无量纲数  $Z_c$  表示标准化轴向位置,  $Z_c = 1$  是放电室出口。可以看出磁屏蔽磁场构形磁场强度轴向分布较传统磁场构形向下游移动,代表电离加速区的轴向位置也向下游移动。JPL 关于等离子体在放电室通道内的轴向位置与壁面腐蚀速率对应规律表示,等离子体轴向位置越向下游则腐蚀速率越小<sup>[4]</sup>,此次静磁场仿真结果佐证了这一点。

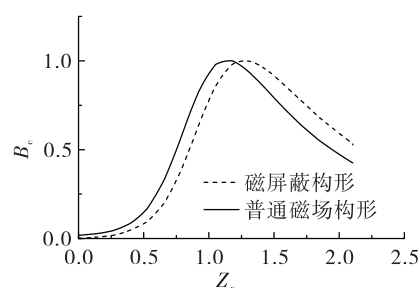


图 5 磁屏蔽与传统磁场构形放电室通道中心  
标准化磁场强度轴向分布

Fig. 5 Axial distribution of standardized magnetic field intensity along discharge chamber center of magnetic shielding and baseline configuration

### 3 磁屏蔽效果验证及性能分析

#### 3.1 磁屏蔽效果验证方法

磁屏蔽验证实验的目的在于验证上文确定的磁屏蔽磁场构形能否实现磁屏蔽,大幅减小壁面腐蚀速率。由于磁屏蔽霍尔推力器入射到壁面上的离子能量较低,导致腐蚀速率很小,若要放电室壁面呈现较为明显的腐蚀状貌需要进行上百甚至上千小时的点火,否则壁面轮廓的测量将会存在很大的误差。但这种衡量壁面腐蚀状况的方法需要消耗巨大的时间和成本,因此提出了一种较为简便、节省的检验方法。

如图 6(a) 所示,推力器在地面实验舱内工作时,等离子体加速喷出推力器后部分羽流与真空舱内壁碰撞,而真空舱壁主要有 Te, C, Ni 等成份,这些黑色物质被等离子体轰击掉落后会随时间逐渐沉积在放电室壁面上,但是沉积的速度很慢,大功率霍尔推力器沉积的速度大约为  $0.001 \sim 0.01 \mu\text{m}/\text{h}$ <sup>[23]</sup>;同时放电室壁面还承受着来自电离加速区等离子体的溅射,如图 6(b) 所示。如果等离子体对放电室壁面溅射程度相较沉积程度更高,则放电室壁面呈现陶瓷本来的白色,证明腐蚀速率至少比沉积速度大;反之放电室壁面就会沉积一层黑色物质从而呈现黑色,说明壁面腐蚀速率比沉积速度更小,腐蚀很少。这一方法能以肉眼可见的形式比较出磁屏蔽对于减轻壁面腐蚀的显著效果。

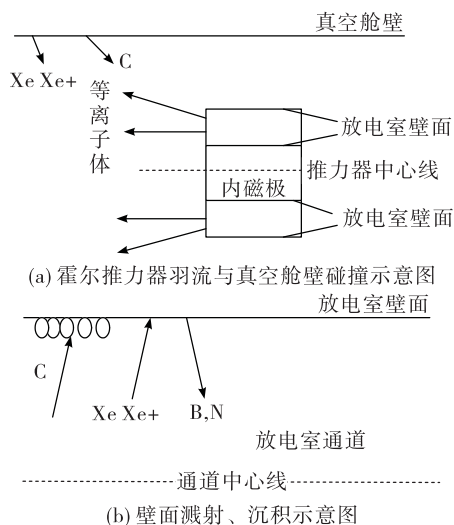


图6 霍尔推力器壁面溅射和碳沉积示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sputtering and carbon deposition on Hall thruster wall

### 3.2 腐蚀实验结果及分析

采用前文设计的磁屏蔽磁场,在功率为1.5 kW、放电电压为300 V、内外磁线圈电流6.5 A/2.8 A最优工况的条件下,口径为120 mm的样机进行了长达10 h的点火实验。磁屏蔽霍尔推力器放电室壁面溅射、沉积状况如图7(a)所示,可以看出壁面完全被从舱壁溅射回的碳粉覆盖,说明磁屏蔽霍尔推力器壁面腐蚀速率较低。传统磁场构形下霍尔推力器工作10 h的放电室壁面溅射、沉积状况如图7(b)所示,虽然采用了壁面倒角,但是由于没有采用磁屏蔽的磁路设计,放电室尾段依旧腐蚀得比较厉害,呈现白色,证明腐蚀速率大于沉积的速率。综上所述,前文设计的磁屏蔽磁场构形明显大幅降低了口径为120 mm的霍尔推力器放电室壁面的腐蚀速率,实现了全部壁面的磁屏蔽,无溅射带。证明了该磁屏蔽磁场构形设计的正确性。

磁屏蔽构形主要依靠壁面磁力线等势在霍尔推力器出口壁面处建立了垂直于壁面指向背离壁面方向的电场力,驱使壁面离子远离进而大幅降低了腐蚀速率。腐蚀速率比碳沉积速率还小,所以壁面才会沉积一层碳膜而呈现黑色。而传统构形的径向磁场因为存在指向壁面的电场分量,加速离子与壁面碰撞造成了出口的严重腐蚀。同时根据图5的标准化磁场强度在放电室通道中心的分布可以推测电离加速区的外移减少了等离子体与壁面的

作用,此为腐蚀速率降低的原因之一。



(a) 磁屏蔽磁场构形



(b) 传统磁场构形

图7 点火10 h后磁屏蔽与传统构形下的放电室壁面对比

Fig. 7 Comparison between walls of Hall thrusters with magnetic shielding and baseline configuration after 10 hours of operation

### 3.3 性能分析

基于前文初步设计的磁屏蔽霍尔推力器,进行了不同磁场强度条件下的推力器性能计算,以对该磁屏蔽霍尔推力器的性能有初步认识。

在寻找磁屏蔽霍尔推力器工作最优工况的过程中发现羽流状况随磁场强度发生了很明显的变化。放电电压为300 V,阳极流量为62 sccm工况下,在磁场强度较小时,羽流呈现略微发散的状态,如图8所示;之后羽流随磁场强度的上升而更加发散;当内外电磁线圈电流为6.27 A/2.7 A时羽流呈现如图9的长筒状;磁场强度继续上升则羽流再次呈现发散状态。

磁场强度上升过程中,推力器的性能变化总结在表1中,阳极流量为62 sccm,放电电压为300 V。放电电流与羽流状态的变化相互对应,在放电电流突降点附近出现了最优效率54.23%,此时内外电



磁线圈电流为 6.5 A/2.8 A,羽流呈现长筒状。可以解释为该磁场强度下磁屏蔽的作用效果最好,因为等离子体受垂直于壁面磁力线的电场分量驱使,远离壁面在放电室通道中心聚集,从而呈现出较为清晰的环柱长筒状羽流。

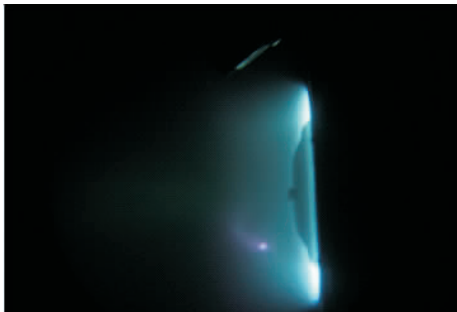


图 8 略发散羽流  
Fig. 8 Slightly divergent plumes

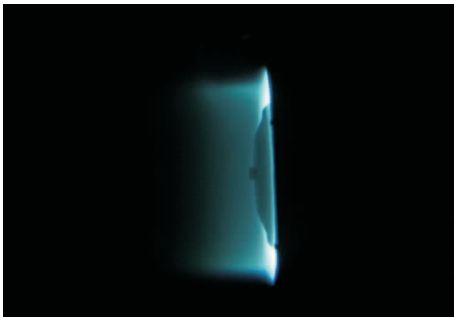


图 9 长筒状羽流  
Fig. 9 Long barrel plume

表 1 磁屏蔽霍尔推力器 300 V 下性能随磁场强度的变化  
Tab. 1 Performance of magnetic shielded Hall thruster at 300 V varies with magnetic field intensity

放电 电压/V	内磁 /A	外磁 /A	放电 电流/A	推力 /mN	比冲 /s	效率/%
300	5.34	2.3	5.9	—	羽流发散	—
300	5.8	2.5	5.9	—	羽流发散	—
300	6.27	2.7	5.3	103.8	1662.72	53.21
300	6.5	2.8	5.11	102.9	1648.3	54.23
300	6.73	2.9	5.13	102.9	1648.3	54.02
300	7.2	3.1	5.23	102.9	1649.6	53.07

经测量,300~450 V 间该磁屏蔽霍尔推力器的最高效率为 54.23%,此时比冲为 1 648.3 s,推力

102.9 mN,放电电压 300 V。

4 结论

本文首先根据磁屏蔽理论进行了磁场结构的研究,构建了磁屏蔽霍尔推力器的磁场构形,选择最优工况长时间点火观察放电室壁面沉积了一层碳而完全呈现黑色,证明实现了磁屏蔽。在此磁屏蔽霍尔推力器基础上对性能进行了初步研究。研究发现:

- 1)磁力线越向阳极弯曲、与壁面相交越少,则壁面上的磁力线越趋向于等势,磁屏蔽效果越好。通过实验验证了壁面磁力线向阳极弯曲且与壁面无相交的磁屏蔽磁场构形对减轻壁面腐蚀确实效果显著。
- 2)磁屏蔽霍尔推力器羽流随磁场强度有明显变化,最优工况出现在“长筒状”羽流状态下。

参考文献:

[1] 康小录, 杭观荣, 朱智春. 霍尔电推进技术的发展与应用[J]. 火箭推进, 2017, 43(1): 8-17, 37.  
KANG X L, HANG G R, ZHU Z C. Development and application of Hall electric propulsion technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1): 8-17, 37.

[2] MIKELLIDES I, KATZ I, HOFER R. Design of a laboratory Hall thruster with magnetically shielded channel walls, phase I: numerical simulations[C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[3] HOFER R R, GOEBEL D M, MIKELLIDES I G, et al. Design of a laboratory Hall thruster with magnetically shielded channel walls, phase II: experiments: AIAA 2012-3788 [R]. USA: AIAA, 2012.

[4] MIKELLIDES I, KATZ I, HOFER R, et al. Design of alaboratory Hall thruster with magnetically shielded channel walls, phase III: comparison of theory with experiment [C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[5] HOFER R R, CUSSON S E. The H9 magnetically shielded hall thruster: IEPC 2017-232 [R]. USA: IEPC, 2017.

[6] CONVERSANO R W, GOEBEL D M, HOFER R R, et al.

- Development and initial testing of a magnetically shielded miniature Hall thruster[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(1): 103-117.
- [7] CONVEFRSANO R W, HOFER R R, MIKELLIDES I G, et al. Magnetically shielded miniature Hall thruster: design improvement and performance analysis: IEPC 2015-100 [R]. Japan: IEPC, 2015.
- [8] CONVERSANO R W, GOEBEL D M, HOFER R R, et al. Performance analysis of a low-power magnetically shielded Hall thruster: experiments[J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 33(4): 975-983.
- [9] CONVERSANO R W, GOEBEL D M, MIKELLIDES I G, et al. Performance analysis of a low-power magnetically shielded Hall thruster: computational modeling[J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 33(4): 992-1001.
- [10] CONVEFRSANO R W, DAN M G. Magnetically shielded miniature hall thruster: performance assessment and status update: AIAA 2014-3896 [R]. USA: AIAA journal, 2014.
- [11] HUANG W S, WILLIAMS G J, PETERSON P Y, et al. Plasma plume characterization of the HERMeS during a 1722-hr wear test campaign: IEPC 2017-307 [R]. USA: IEPC, 2017.
- [12] GILLAND J H, PETERSON P Y. Wear Trends of the HERMeS Thruster as a function of throttlepoint: IEPC 2017-207 [R]. USA: IEPC, 2017.
- [13] ORTEGA A L, MIKELLIDES I G. Numerical simulations for the assessment of erosion in the 12.5-kW Hall effect rocket with magnetic shielding (HERMeS): IEPC 2017-154 [R]. USA: IEPC, 2017.
- [14] POLK J E, LOBBIA R, BARRIAULT A, et al. Inner front pole cover erosion in the 12.5 kW HERMeS Hall thruster over a range of operating conditions: EPC 2017-409 [R]. USA: IEPC, 2017.
- [15] GIANNNETTI V, PIRAGINO A. Development of a 5 kW low-erosion Hall effect hruster: IEPC 2017-379 [R]. USA: IEPC, 2017.
- [16] DUCCI C, MISURI T. Magnetically shielded HT100 experimental campaign: IEPC2017-372 [R]. USA: IEPC, 2017.
- [17] GRIMAUD L, VAUDOLON J, MAZOUFFRE S, et al. Design and characterization of a 200 W Hall thruster in “magnetic shielding” configuration [C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [18] 汤海滨, 张广川, 任军学, 等. 一种磁场可调的带磁屏蔽效应的低功率霍尔推力器: CN201710438203.2[P]. 2017-09-15.
- [19] 边兴宇. 霍尔推力器放电通道壁面分割及磁屏蔽效应研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [20] 蔡宁泊. 磁聚焦影响霍尔推力器壁面腐蚀的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] MOROZOV A I, SAVELYEV V V. Fundamentals of stationary plasma thruster theory [J]. Reviews of Plasma Physics, 2000, 21(2): 203-391.
- [22] 于达仁. 空间电推进原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [23] POLK J E, DUCHEMIN O B, KOEL B E, et al. The effect of carbon deposition on accelerator grid wear rates in ion engine ground testing: AIAA 2000-3662 [R]. USA: AIAA journal, 2000.

(编辑:马 杰)