

磁屏蔽霍尔推力器技术的发展与展望

徐亚男¹, 康小录^{1,2}, 余水淋^{1,2}

(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: 磁屏蔽霍尔推力器技术是近年来霍尔推进领域最具影响的创新突破, 对于拓展霍尔推力器的应用范围, 提高推力器的寿命具有重要意义。介绍了磁屏蔽霍尔推力器的原理及优缺点, 从磁屏蔽的提出与验证、不同功率量级霍尔推力器的磁屏蔽技术以及磁屏蔽霍尔推力器热设计、背景压力敏感性、振荡模式转换等方面介绍了磁屏蔽的研究现状, 并对未来磁屏蔽霍尔推力器技术的发展进行了展望。

关键词: 霍尔推力器; 壁面腐蚀; 磁屏蔽; 研究现状

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)04-0354-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.04.005

引用格式: 徐亚男, 康小录, 余水淋. 磁屏蔽霍尔推力器技术的发展与展望[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 354-360.

Reference format: XU Y N, KANG X L, YU S L. Development and prospect of magnetically shielded hall thruster[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 354-360.

0 引言

霍尔推力器经过半个多世纪的发展, 已经大量应用于地球轨道卫星和深空探测飞行器的位置保持、轨道转移等空间任务, 展现出良好的综合性能和应用优势^[1]。随着航天活动在更远的深空逐渐开展, 比如未来探测远太阳系行星及建设行星基地等航天任务, 要求速度增量大幅度提高, 而推力器寿命是影响速度增量的因素之一。然而目前霍尔推力器的寿命仅几千到一万小时, 远不能满足要求, 制约霍尔推力器寿命的主要因素是放电室通道壁面以及磁极表面的腐蚀, 源于等离子体与两者之间的相互作用^[2]。为了减轻壁面腐蚀, 延长推力器寿命, JPL首次提出了磁屏蔽(Magnetic shielding, MS), 研究表明磁屏蔽使6 kW的霍尔推力器壁面腐蚀速率下降了3个数量级, 效果显著, 且对其性能没有造成明显改变, 因此具有良好的发展前景。

1 霍尔推力器磁屏蔽原理

减弱壁面腐蚀方面的研究可追溯至20世纪60年代, 霍尔推力器发明者俄罗斯科学家Morozov和Savelyev在研究霍尔推力器的基本理论时就指出向阳极方向凸出的磁场构形有利于减轻壁面腐蚀^[3]。但当时只是指出了有这样一种趋势和现象, 并未从实验和机理上对这一问题进行系统论述。实质上仅凭这一点并不能有效控制放电室壁面附近的电场进而达到预期效

果。之后JPL提出了磁屏蔽, 在Morozov理论的基础上着重强调了壁面附近的磁力线必须近乎等势才能发挥减轻壁面腐蚀的作用, 并且在2009年从理论上提出了第一准则^[4]。

图1(a)中等离子体电势 ϕ 、电子温度 T_e 沿未磁屏蔽霍尔推力器放电室壁面分布曲线与沿放电室通道中心(图2曲线)的分布随轴向变化一致, 而图1(b)曲线图中, 磁屏蔽改变了两者的分布, 使沿放电室壁面的 ϕ 与 T_e 接近于常数。相比较于图1(a)磁力线与壁面相交、沿磁力线有电场分量的磁场构形, 图1(b)表示的是理想的磁屏蔽构形, 它的磁力线紧贴壁面并没有与之相交; 壁面处磁力线向阳极延伸, 且保持等势, 表现出恒定不变的高电势、低电子温度的特点。

磁屏蔽的显著效果依赖于霍尔推力器的放电特性。霍尔推力器放电室内周向电子稳定漂移的条件是电子数密度足够小, 否则过强的碰撞行为就会阻碍其形成, 因此电子霍尔参数很大($\beta = \omega_{ce}/\nu_e \gg 1$)。根据广义欧姆定律

$$\vec{\sigma} \vec{E} = \vec{j} + \vec{j} \times \vec{\beta} \quad (1)$$

在垂直于磁力线方向上有

$$E_{\perp} = \sqrt{1 + \beta^2} j_{\perp} / \sigma \quad (2)$$

平行于磁力线方向上有

$$E_{\parallel} = j_{\parallel} / \sigma \quad (3)$$

由式(3)能够知道 E_{\perp} 比 E_{\parallel} 大得多。而电场的形成与电子的运动有关,因此电子在平行于磁力线方向上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——磁力线绝热特性

$$\frac{d}{dz}(n_e k T_e) = -n_e e E_{\parallel} \quad (5)$$

在平行于磁力线方向上

$$E_{\parallel} = -\frac{k T_e}{e n_e} \nabla_{\parallel} n_e = -\frac{k T_e}{e} \nabla_{\parallel} \ln(n_e) \quad (6)$$

电子温度采用单位eV,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

$$\phi_{\parallel} = \phi_0 + T_{e0} \ln(n_{e0} / n_e) \quad (7)$$

其中下标“0”代表放电室通道中心的参数。

由式(7)可见沿磁力线电势并不是常数,因为电子数密度在变化,而电子温度有限恒定,造成 $T_{e0} \ln(n_{e0} / n_e)$ 变化不可忽视,进而引起电势变化明显。若要实现磁力线等势,就要尽量弱化该项对于电势大小的影响^[5]。通过将壁面附近的磁力线向阳极延伸,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电子温度,则该项变化趋向于零,此时有 $\phi_{\parallel} \approx \phi_0$ 。同时在放电室通道尾段加工倒角且使壁面附近的磁力线尽量与之平行,则离子就会沿垂直于壁面的方向加速远离,进一步减少离子与壁面的相互作用。

磁屏蔽从多个方面影响了壁面腐蚀速率。离子撞击壁面时,若固体壁面中的晶格粒子接受的来自于离子的能量足以克服固体的束缚则会从壁面发射,造成壁面腐蚀。腐蚀速率是垂直入射到壁面的离子流 $j_{i\perp}$ 与溅射系数 Y 的函数

$$\varepsilon = j_{i\perp} Y \quad (8)$$

垂直入射到壁面的离子流 $j_{i\perp}$ 与离子数密度 n_i 以及离子垂直入射的速度 $v_{i\perp}$ 有关,而放电室通道材料溅射系数 Y 与离子能量 ϕ_i 和离子入射的角度 θ_i 有关。磁屏蔽减小了壁面附近的离子数密度 n_i ,进而减小了 $j_{i\perp}$;大幅降低了壁面附近与阳极之间的电势降,通过降低壁面附近电子温度减小了鞘层势能,所以减小了离子入射到壁面上的能量 ϕ_i ,进而使 Y 变小,最终从理论上减小了腐蚀速率。

2 磁屏蔽研究现状

2.1 磁屏蔽的提出与验证

美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)首次提出了磁屏蔽的概念,在总时长10.4 kh的磨损实验中XR-5(BPT-4000前身)5.6 kh后达到了零腐蚀状态。之后JPL通过改造比冲为2 000 s、功率6 kW、电压300 V的H6霍尔推力器,对比施加磁屏蔽实验样机H6MS与未施加磁屏蔽的H6US的仿真和实验结果来验证磁屏蔽的机理,实验与仿真结果都很好验证了

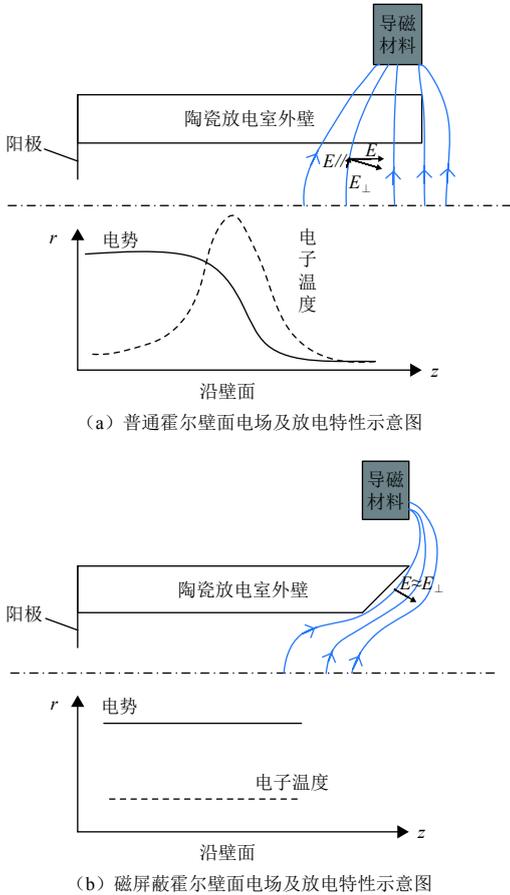


图1 放电室中心特性示意图

Fig. 1 Basic features of accelerator and typical profiles along centerline

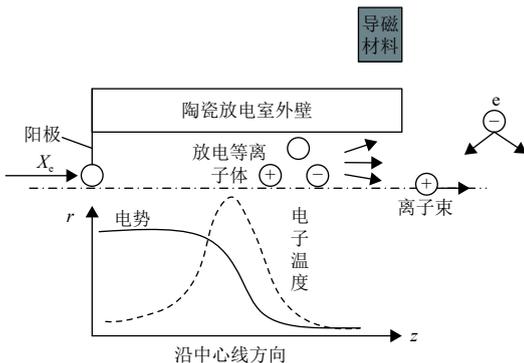


图2 施加磁屏蔽前后的原理示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of unshielded Hall thruster (US) and magnetically shielded Hall thruster (MS)

$$\nabla_{\parallel} T_e \approx 0 \quad (4)$$

在平行于磁力线的方向上忽略碰撞,电子动量方程为

磁屏蔽的第一准则理论,如图3和图4所示,发现磁屏蔽可以使H6的腐蚀速率降低3个数量级。

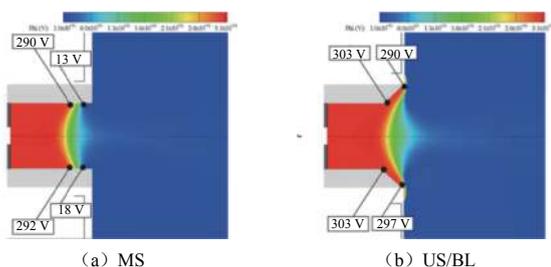


图3 MS与US/BL等离子体电势对比^[4]

Fig. 3 Comparison of plasma potential in MS and US thruster configurations^[4]

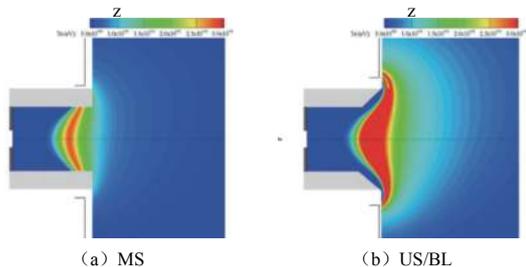
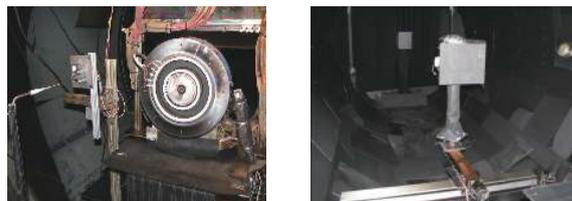


图4 MS与US/BL电子温度对比^[4]

Fig. 4 Comparison of electron temperature in MS and US thruster configurations^[4]

如图5所示此次JPL通过探针测量放电室参数以及CMM测量腐蚀的方法对磁屏蔽进行初步研究发现:从视觉上,相较于US,MS放电室内等离子体与壁面之间的间隙更明显,实验后MS陶瓷壁几乎被回溅的碳全部覆盖,而US陶瓷壁仍有白色的部分,说明MS壁面腐蚀的速率小于碳回溅的速率;性能上施加磁屏蔽后效率由63.5%减到62.4%,比冲由1950 s到2000 s,推力由401 mN到384 mN^[6],可见磁屏蔽相较于会切场推力器、无壁霍尔推力器减轻壁面腐蚀的方法对推力器性能影响不大;放电电流振荡方面,呼吸模式时,MS的频率是8 kHz,幅度1 A,US频率14 kHz,幅度0.8 A,MS有US没有的80 kHz的高频振荡,说明磁屏蔽可能使推力器不稳定性增加;热特性方面,放电室通道后30%温度减少了60~80℃(12%~16%),有利于改善霍尔推力器热设计;实验测量表明最强磁场位置向下游移动,等离子体的位置也向下游移动,造成了电子温度与等离子体电势在放电室通道中心沿轴向的分布随之向下游移动,如图6(a)和图6(b)所示,会引起背景压力敏感性增加;从近场羽流特性方面,羽流发散角增加,这可能导致某些性能参数的下降以及磁极腐蚀的加重;从远场等离子体特性方面,MS高价氩离子比例增加,有利于电流利用率的提高,进而改善性能。

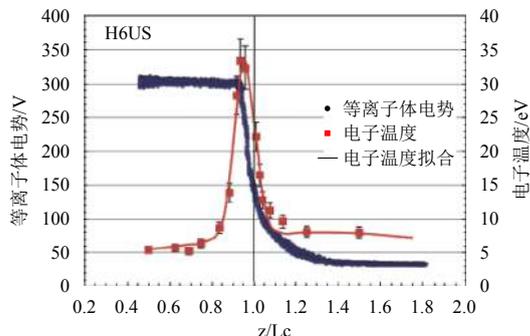


(a) H6 实验装置

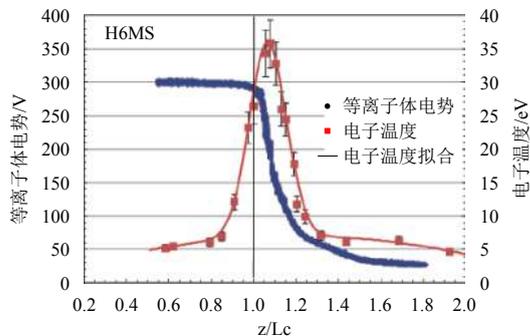
(b) 远场探针

图5 H6实验图

Fig. 5 Experimental devices of H6



(a) H6US 放电室中心等离子体电势与电子温度^[6]



(b) H6MS 放电室中心等离子体电势与电子温度^[6]

图6 H6US与H6MS放电特性测量值对比

Fig. 6 Plasma potential (relative to cathode) and electron temperature measured on the channel centerline in the US and MS configurations

2.2 大功率霍尔推力器磁屏蔽

深空探测以及载人航天等任务的陆续提出对霍尔推力器提出了大功率、长寿命等要求。大功率对霍尔推力器意味着更高的电子温度、更严重的壁面腐蚀以及磁饱和等问题,探究磁屏蔽霍尔推力器在大功率下的效果是必要的。目前磁屏蔽大功率霍尔推力器的研究主要包括JPL联合美国国家航空航天局(NASA)研制的12.5 kW的HERMeS、意大利5 kW的HT5K LL、密歇根大学联合JPL研究9 kW的H9以及上海空间推进研究所的5 kW磁屏蔽霍尔推力器。

HERMeS是为NASA一系列探月探火任务研发的高级电推进系统中的磁屏蔽霍尔推力器单元,采用中心安装阴极,设计比冲为3000 s,寿命50 kh^[7]。对其不同的设计构型制定了包括推进剂均匀性测试、磁屏蔽特性测试、性能测试、热特性测试、背景压力敏感性

测试、磨损测试、电结构设计测试、加速区特性测试、磁极腐蚀测试以及环境测试各方面的研究计划^[8]。在7次短期(约200 h)磨损试验中,采用SLA方法量化腐蚀,由于采用了磁屏蔽技术,HERMeS各技术研发单元在不同放电电压、磁场强度以及背景压力下均未出现明显的壁面腐蚀;当中心安装的阴极触持极与内磁极端面齐平的时候,其腐蚀对于放电电压不敏感,随场强增加而加重,其位置向上游设置会改善腐蚀状况^[9]。

磁屏蔽带来的羽流发散角增大会使磁极腐蚀加重,另外采用内部安装阴极也会加重内磁极腐蚀,因此对内磁极腐蚀进行重点研究。数值仿真发现其端面腐蚀随振荡的幅度增大而加重,500 V和600 V时较300 V和400 V振荡幅度大^[10]。对HERMeS内磁极端面腐蚀随工况变化的研究发现,其速率对于放电电压变化不敏感,随磁场强度变大单调增加,随背景压力升高而减小;内磁极腐蚀一部分可能来源于阴极羽流产生的高能离子,且对比内磁极前端覆盖钼与石墨的腐蚀速率发现入射的离子角度较大^[11]。数值仿真由于将阴极羽流看作单独的流体,其离子能量在石墨的溅射阈值之下,并不能体现出阴极羽流对于内磁极的明显腐蚀,与实验结果不符。但JPL对磁屏蔽H6磁极腐蚀的机制研究发现磁极的腐蚀主要由低速、高速两种离子撞击产生,低速离子包括阴极羽流的低能离子以及放电室内壁附近的低能等离子体通过交换电荷产生的离子;高速离子主要是推力器羽流边缘的离子,在高电势等离子体和磁极前端之间存在电势较大的静电通路使这部分撞击在磁极上的高能离子数增多,并加剧了近场羽流振荡使高能离子入射角增大^[12]。因此消除高电势等离子体和磁极前端的静电通路可减轻磁极腐蚀,HERMeS选择将推力器主体与阴极导通,可消除推力器主体的较大负电势。综合上述研究,关于磁极腐蚀的机理仍需要深入研究。

磁屏蔽H6可在300~700 V较大电压范围实现较好的效果,但是在800 V、9 kW的工况下出现了内磁极饱和^[13],于是承袭H6的中心安装六硼化镧阴极、阳极分配器以及放电室结构,对磁路重新设计,外磁线圈采用单个线圈,采用石墨做磁极前端保护材料,将推力器主体与阴极导通并在推力器主体上安装正方形片作为散热片,设计了磁屏蔽H9。研究了阳极流量均匀性、磁场构形、性能以及远场测量,其在4.5~9 kW、300~800 V条件下,推力291~436 mN,最大总效率63.4%,最大比冲2 950 s^[14]。

在5 kW磁屏蔽霍尔推力器的研究上,意大利的V.Giannetti在16 mT、20 mT、25 mT磁场强度、250~500 V、2.5~7.5 kW以及内外安装阴极不同的条件下对HT5K LL进行了研究,250 h的磨损试验后利用

ADE(电子显微镜)系统测量腐蚀发现磁屏蔽方法使腐蚀速率下降了一个数量级,性能最大值下降了3%^[15]。上海空间推进研究所对磁屏蔽技术进行了尝试,初步观察到陶瓷放电室壁面被碳覆盖的现象,证明其有减轻壁面腐蚀的效果。

2.3 小功率霍尔推力器磁屏蔽

小霍尔(<500 W,<7 cm)比冲高、推力与功率之比大、尺寸小,但是其通道面积与体积之比大,会导致腐蚀速率快、壁面电子损失严重、容易达到磁饱和、发热严重等问题,使寿命短成为其一大缺点。

以加州大学Ryan W. Conversano为首的(联合JPL)团队基于样机MaSMi-40(300 W)和MaSMi-60(500 W)进行小霍尔磁屏蔽的研究。MaSMi-40采用海博科高导磁铁钴合金来代替铁作为导磁体,双室阳极结构改善推进剂分配均匀性,设计如图7所示的大面积散热器改善小霍尔受热严重的问题,在275 V、325 W下,由于磁饱和和内壁没有实现完全磁屏蔽^[16]。之后进行了改善设计了MaSMi-60,保证放电室通道足够宽,保持双室阳极不变,成功实现了完全磁屏蔽^[17]。在160~750 W、200~400 V下对MaSMi-60进行一系列的实验研究后发现:寿命可至少延长10倍;扩散段出现了过屏蔽,磁极腐蚀严重,且不稳定性增加;最佳性能表现为推力33 mN、比冲1 370 s,效率29%,不如大功率霍尔推力器磁屏蔽实现效果好^[18]。其二维仿真显示沿通道中性粒子密度没有明显下降,说明有很多氦原子没有经过电离就喷出了推力器;还发现有20%电离发生在放电室之外^[19],结合羽流诊断分析总结其原因可得:较小的径向磁场对电子束缚不够,引起电流利用率减小;放电室短以及阳极分配不够均匀,电离平均自由程相对于电离区过长,氦原子来不及电离就被喷出,减小了推进剂利用效率;磁屏蔽扩散段以及等离子体向下游转移引起束发散角增加。最后给出了改善方法:增强磁场强度,改进阳极设计,改善壁面下游过屏蔽的情况。

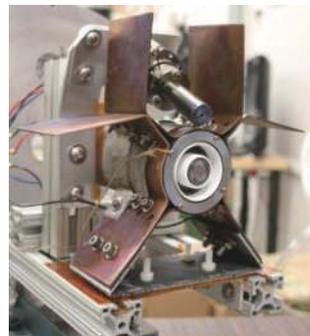


图7 小霍尔实物图^[16]

Fig. 7 Miniature Hall thruster^[16]

2014年Conversano在150~300 V、1~2.3 A工作条件下进行实验,在275 V、1.2 A下发现MaSMi随温度变化有jet以及diffuse两种不同的工作模式,放电室温度的升高改变了磁场进而使工作模式由jet向diffuse不可逆转换。低温下是jet模式,推力12~13 mN,阳极效率24%,电流振荡波峰幅度是平均电流的2.5~4倍,波谷幅度为10%平均电流(进入暂时关机状态);370~390 °C时,出现了diffuse模式,推力11~12 mN,阳极效率21%,振荡幅度是平均电流的20%^[20],图8是两种模式放电电流振荡对比图。jet模式由于磁屏蔽作用较强,高价离子的比例增加,如图9所示,视觉上diffuse模式相对于jet模式羽流光辉更暗,沿轴向延伸距离短,更发散一些。且Diffuse模式由于内磁极磁饱和和磁屏蔽的效果较差,壁面腐蚀更严重;磁场对于电子的束缚不够,轴向上更多的电子向阳极移动,导致了阳极温度的上升。

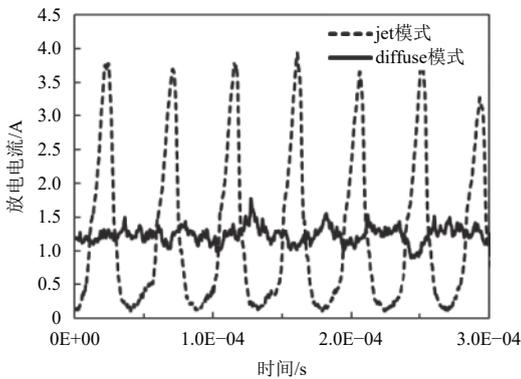
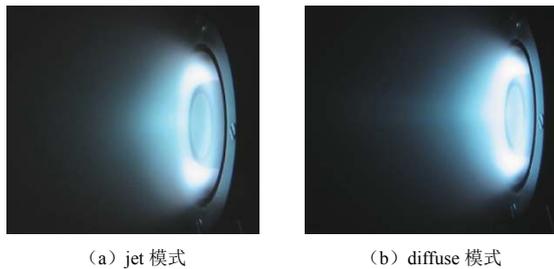


图8 jet与diffuse模式放电电流振荡^[20]

Fig. 8 Comparison of the discharge current oscillations measured during operation of the MaSMi Hall thruster in the low-temperature jet mode and the high-temperature diffuse mode^[20]



(a) jet 模式 (b) diffuse 模式

图9 275 V, 1.2 A下的MaSMi羽流图^[20]

Fig. 9 MaSMi's plasma discharge while operating at 275 V and 1.2 A^[20]

2017年,意大利研究了平均直径小于5 cm、功率小于300 W的磁屏蔽小功率霍尔推力器MSHT100^[21],从推力器的推力性能、磁屏蔽放电室通道壁的改进以及采用氦做推进剂等方面进行了研究,将总冲从75 kNs

提高到了200 kNs。Lou Grimaud等人设计并研究了200 W的ISCT200-MS,以在小霍尔上验证磁屏蔽的概念,利用LIF技术比较离子速度分布并计算电场,同时测量离子流密度以计算发散角和效率,研究发现磁极仍有腐蚀;推进剂利用效率下降,其它性能变化不大;LIF测量表明壁面附近离子密度、能量下降^[22]。

2.4 磁屏蔽霍尔推力器对热设计的影响

Ira Katz等人提出磁屏蔽可能对热设计也产生影响,经过与未施加磁屏蔽的基本构形(BL)的对比发现磁屏蔽大幅度减少了通道下游以及附近推力器表面的热负载,但是由于通道下游面积占推力器内所有承受热负荷的面积的比例小,其作用较小^[23];除此之外的阳极、放电室通道上游磁屏蔽都使热负荷增加。

2.5 磁屏蔽霍尔推力器振荡模式转换

Michael J. Sekerak等利用样机H6MS以及NASA300MS-2对磁屏蔽霍尔的振荡模式进行了研究,定义了模式一呼吸振荡,模式二阴极振荡以及模式三电离振荡^[24]。研究发现磁场强度的大小变化会引起模式的转换,随场强增大振荡模式由一转换到二,再到三;辐条状波动在场强较大的振荡模式中出现,推测其产生可能源于磁路的饱和;阴极振荡优化了T/P和阳极效率;电离振荡中推力达到峰值,若场强减小,推力将下降5%~6%;辐条状波动以及强烈的阴极振荡不会互相影响也不会影响放电电流;对于磁屏蔽霍尔,振荡的模式转换会对其性能产生影响。

2.6 磁屏蔽霍尔推力器振荡背景压力敏感性

由于地面实验不能完全实现太空中的真空状态,舱内压力会对于推力器性能产生影响,而由于磁屏蔽霍尔的等离子体向下游转移,对其影响更甚。Richard R.Hofer^[25]等研究了磁屏蔽霍尔的背景压力敏感性,将阴极放置在 $R/R_m = 0$ 、 $R/R_m = 2.64$ 、 $R/R_m = 4.9$ (R_m 表示放电室平均半径)3个不同的位置,每个位置下分别恒定流量或者放电电流,多个工况下研究推力、振荡RMS值、放电电流、阴极耦合、电荷交换随舱内压力的变化。研究发现:如图10所示,内部安装阴极的情况下对压力最不敏感;磁屏蔽改善了霍尔腐蚀对压力的敏感性,因为未施加磁屏蔽时压力变化引起的等离子体向下游转移会导致腐蚀区也向下游移动,但是磁屏蔽中磁力线特性不会随压力变化,即腐蚀不会受压力影响;放电室内电子传导机制可能会对霍尔推力器的背景压力敏感性产生影响,高压(> 20 uTorr-Xe)下交换电荷作用将增加该机制,具体机理需要进一步进行羽流实验测量和仿真确定。

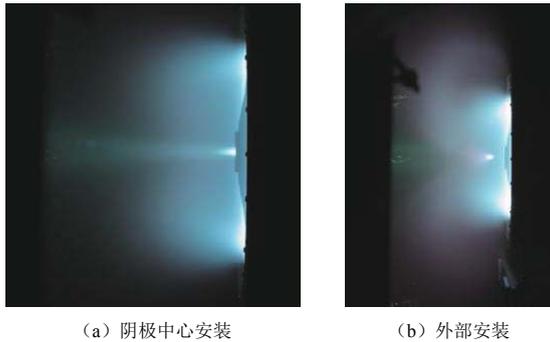


图10 阴极中心安装/外部安装羽流^[54]

Fig. 10 Photographs of an 8 kW commercial Hall thruster operating at 500 V, 16 A with an internal cathode or an external cathode^[54]

3 总结及展望

磁屏蔽技术显著地减小了霍尔推力器的壁面腐蚀,有利于延长其寿命,但是同时也带来不利。并且作为一项新技术,磁屏蔽与推力器各个方面的作用规律仍有待研究,基于目前的研究现状对其未来发展方向提出几点建议:

1) 探究磁屏蔽的作用机理以及其如何影响放电室等离子体、羽流以及推力器的腐蚀状况,做好理论研究工作,以指导其更加成熟的发展。

2) 为将磁屏蔽技术广泛应用到各种霍尔推力器上,全面提高各类霍尔推力器寿命,可针对不同类型霍尔推力器的磁屏蔽设计制定工程准则,提高磁屏的技术成熟度,加快其广泛应用的步伐。

3) 磁屏蔽霍尔推力器是一项系统工程,需要考虑磁屏蔽的实现与霍尔推力器本身的性能、热特性、结构设计、环境适应性等等各方面的关系,对此进行系统研究并总结规律以实现霍尔推力器设计最优化。

4) 实现磁屏蔽的过程中会造成磁极腐蚀加剧、性能略有下降等问题,需要更深入地研究找出改善以上问题的方法。

5) 小霍尔推力器磁屏蔽技术的实现是难点,可针对此方面进行着重研究。

6) 目前国内关于霍尔推力器磁屏蔽技术的研究成果公开发表的较少,仍需要大量试验及测试,从而得出霍尔推力器磁屏蔽技术设计的总结性规律以及配套的实验测量设备和评估腐蚀状况的方法。

参 考 文 献

[1] 康小录,杭观荣,朱智春.霍尔推进技术的发展与应用[J].火箭推进,2017,43(1):8-17.
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.

[2] ROY S, PANDEY B P. Plasma wall interaction inside a Hall thruster[J]. Journal of Plasma Physics, 2002, 68(4): 305-319.
[3] MORZOVA, SAVELYEV V. Fundamentals of stationary plasma thruster theory [J]. Reviews of Plasma Physics, 2000, 21: 203-391.
[4] MIKELLIDES I, KATZ I, HOFER R. Design of a laboratory Hall thruster with magnetically shielded channel walls, phase I: numerical simulations[C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2013.
[5] MIKELLIDES I, KATZ I, HOFER R, et al. Design of a laboratory Hall thruster with magnetically shielded channel walls, phase III: comparison of theory with experiment[C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2012.
[6] MIKELLIDES I, KATZ I, HOFER R. Design of a laboratory Hall thruster with magnetically shielded channel walls, phase II: experiments[C]// 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2012.
[7] HOFER R R, KAMHAWI H. Development status of the 12.5 kW HERMeS Hall thruster for the solar electric propulsion technology demonstration mission[C]// AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2015.
[8] HUANG W S, WILLIAMS G J. Plasma plume characterization of the HERMeS during a 1722-hr wear test campaign[C]// International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA: Georgia Institute of Technology, 2017.
[9] GILLAND J H, PETERSON P Y. Trends of the HERMeS Thruster as a function of throttle point[C]// International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA, Georgia Institute of Technology, 2017.
[10] 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)[C]// International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA, Georgia Institute of Technology, 2017.
[11] POLK J E, ROBERT L. Front pole cover erosion in the 12.5 kW HERMeS Hall thruster over a range of operating conditions[C]// International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA: Georgia Institute of Technology, 2017.
[12] JORNS B A, DODSON C. Mechanisms for pole piece erosion in a 6-kW magnetically-shielded Hall thruster[C]// 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2016.
[13] MIKELLIDES I G, HOFER R. The effectiveness of magnetic shielding in high-isp Hall thrusters[C]// 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2013.
[14] HOFER R R, Cusson S E. The H9 magnetically shielded Hall thruster[C]// International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA: Georgia Institute of Technology, 2017.
[15] GIANNETTI V, PIRAGINO A. Development of a 5 KW low-erosion Hall effect thruster[C]// International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA: Georgia Institute of Technology, 2017.
[16] CONVERSANO R W, DAN M G, 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.
[17] CONVERSANO R, HOFER R, MIKELLIDES I, et al. Magnetically shielded miniature Hall thruster: design improvement and performance analysis[C]// International Electric Propulsion Conference. Hyogo-Kobe Japan: Japan Aerospace Exploration Agency, 2015.

- [18] CONVERSANO R W, DAN M G, HOFER R R, et al. Performance analysis of a low-power magnetically shielded Hall thruster: experiments[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2017, 33(4): 975-983.
- [19] CONVERSANO R W, DAN M G, MIKELLIDES I G, et al. Performance analysis of a low-power magnetically shielded Hall thruster: computational modeling[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2017, 33(4): 992-1001.
- [20] AIAA. Magnetically shielded miniature hall thruster: performance assessment and status update[C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2000.
- [21] DUCCI C, MISURI T. Magnetically shielded HT100 experimental campaign[C]//International Electric Propulsion Conference. Atlanta Georgia USA, Georgia Institute of Technology, 2017.
- [22] LOU G, VAUDOLON J, MAZOUFFRE S, et al. Design and characterization of a 200W Hall thruster in "magnetic shielding" configuration[C]// AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2016.
- [23] KATZ I, MIKELLIDES I G, HOFER R R, et al. Channel wall plasma thermal loads in Hall thrusters with magnetic shielding[C]// 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2011.
- [24] SEKERAK M J, LONGMIER B W, GALLIMORE A D. Mode transitions in magnetically shielded Hall effect thrusters[C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2014.
- [25] HOFER R, ANDERSON J. Finite pressure effects in magnetically shielded Hall thrusters[C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S. l.]: AIAA, 2014.

作者简介:

徐亚男(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向:空间电推进技术,霍尔推力器磁屏蔽技术。

通信地址:上海市闵行区浦江镇万芳路801号(201100)

E-mail: 582432010@qq.com

Development and Prospect of Magnetically Shielded Hall Thruster

XU Yanan¹, KANG Xiaolu^{1,2}, YU Shuilin^{1,2}

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

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

Abstract: The magnetically shielded Hall thruster technology is the most influential innovation and breakthrough in the field of Hall propulsion in recent years. It is of great significance for expanding the application of Hall thrusters and improving the lifespan of the thruster. In this paper, the principle, and the characteristics of the magnetically shielded Hall thruster are introduced. The research status of the Hall thruster magnetic shielding is presented in terms of its proposition and verification, magnetic shielding technology of different power magnitude Hall thrusters, thermal design sensitivity of background pressure, and oscillation mode conversion. The future development of magnetically shielded Hall thruster technology is prospected.

Key words: Hall thruster; wall erosion; magnetic shielding; research status

High lights:

- A systematic summary of the research status of the Hall thruster magnetic shielding technology is presented, including the principle, characteristics and weaknesses, proposition and verification of magnetically shielded Hall thruster, magnetic shielding technology of different power magnitude Hall thrusters, magnetically shielded Hall thruster's thermal design, sensitivity of background pressure, oscillation mode conversion, and etc.
- The studies on the magnetic shielding technology of the Hall thruster show that it has a significant effect on reducing the wall corrosion of the discharge chamber, with great potential.
- According to the current research situation, the possible direction of future magnetic shielding development is advanced, including the realization of magnetic shielding technology of all power magnitude Hall thrusters, improvement of the weakness of magnetic shielding technology, and development of matching methods for measuring the parameters of the magnetically shielded thruster and evaluating the situation of wall erosion.

[责任编辑:高莎,英文审校:朱恬]