两种会切场离子推力器对比研究 *

赵以德，李建鹏，张天平，江豪成，王 亮，郭德洲，杨 威

（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：为了进一步提升离子推力器性能和可靠性，基于30cm环形会切场离子推力器LIPS-300H和30cm柱形会切场离子推力器LIPS-300Z，对比研究了两类会切场离子推力器各自优劣及其机理。首先分析了两种会切场原理，总结给出了两种会切场差异，然后实验对比研究了两种会切场离子推力器束流均匀性、放电效率和寿命。实验结果显示，LIPS-300H相比LIPS-300Z在3kW和5kW工况下束流密度峰值分别降低25%和19%，放电电压分别降低7.8V和6.2V，放电损耗分别增加31W/A和42W/A。此外，LIPS-300H离子推力器在3kW和5kW工况下屏栅预测寿命分别是LIPS-300Z的7.7倍和4.2倍。结果表明：虽然LIPS-300Z比LIPS-300H具有放电损耗低的优点，但其较差的束流均匀性、较高的放电电压和双荷离子比，使其在寿命和可靠性方面劣于LIPS-300H。

关键词：离子推力器；柱形会切场；环形会切场；束流均匀性；效率

中图分类号：V439 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2021）11-2633-08

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 200019

Comparative Study of Two Types of Cusp Field Ion Thruster

ZHAO Yi-de，LI Jian-peng，ZHANG Tian-ping，JIANG Hao-cheng，WANG Liang，GUO De-zhou，YANG Wei

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

Abstract：To further advance the performance and reliability of ion thruster，the advantage and disadvantage of two types of cusp field ion thruster were comparativly studied based on both a diameter 30cm cylindrical-cusp field ion thruster（LIPS-300Z）and a diameter 30cm ring-cusp field ion thruster（LIPS-300H）. Firstly，the principle of two types of cusp field was analyzed，and their difference was summarized. Then，the uniformity of beam current density，the discharge efficiency and the lifetime were evaluated and analyzed. Compared to the experimental results of the LIPS-300Z，the maximum beam current density of LIPS-300H at the 3kW and 5kW mode was decreased by 25% and 19%，and its discharge voltage was reduced by 7.8V and 6.2V，while the discharge loss of the LIPS-300H at two modes increased by 31W/A and 42W/A，respectively. In addition，the lifetime of screen grid of LIPS-300H at the 3kW and 5kW mode was 7.7 times and 4.2 times as long as LIPS-300Z. The results indicated that LIPS-300Z had a low discharge loss，but its uniformity of beam current density was worse，and the discharge voltage and the ratio of doubly-to-singly charged ions in beam were all high. Therefore，the lifetime and reliability of LIPS-300H were better than those of LIPS-300Z.

Key words：Ion thruster；Cylindrical-cusp field；Ring-cusp field；Uniformity of beam current density；Efficiency

* **收稿日期**：2020-01-11；**修订日期**：2020-02-18。

基金项目：甘肃省杰出青年基金（21JR7RA744）；真空技术与物理重点实验室基金（ZWK1703）。

通讯作者：赵以德，博士，高工，研究领域为离子电推进技术与工程应用。

引用格式：赵以德，李建鹏，张天平，等. 两种会切场离子推力器对比研究[J]. 推进技术，2021，42(11)：2633-2640.（ZHAO Yi-de，LI Jian-peng，ZHANG Tian-ping，et al. Comparative Study of Two Types of Cusp Field Ion Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*，2021，42(11)：2633-2640.）

1 引 言

离子电推进作为一种航天器先进推进技术，具有高比冲和高效率、推力大范围精确可调的优点。在电推进技术110多年的历史中，离子电推进的发展始终最具代表性和领先性，当前国际离子电推进的应用范围几乎涉及到了航天任务的各个领域。

自从1959年离子推力器问世，离子推力器的优化改进已经开展了60多年。离子推力器放电室的类型代表了推力器的类型，放电室的改进过程是不断通过磁路改进提高放电效率和放电均匀性的过程。最早的放电室使用均匀磁场，磁力线大致平行于中心轴，它的性能差且束流分布有中心高峰。后期经过不断的改良，先后开发了发散场、径向场、强发射场、多级场、环形会切场和柱形会切场等类型放电室。强发散场、环形会切场和柱形会切场是三种目前应用和研究最为广泛的放电室类型。强发散场相对于会切场，具有磁场结构简单，外形紧凑的优点，但存在放电效率低、束流平直度差等缺点，不适用于大口径离子推力器；会切场把磁场限制在很小的范围，整个放电室大部分区域为近无场区，特别是屏栅极附近的大部分区域接近为无场区，具有放电效率高和束流平直度好优点。

英国从20世纪70年代开始一直坚持发散场离子电推进技术的研究和产品研制工作，先后发展了T1～T6系列发散场离子推力器。目前T6离子推力器代表了发散场离子推力器的最高水平，有75mN，100mN，125mN和145mN共4种工作模式[1]。已应用于“贝皮科伦布号（BepiColombo）”水星探测任务中[2]，2018年12月～2019年2月，T6离子电推进系统完成检查和各类预处理，并进行了点火性能测试，推力与地面实验一致[3]。国内兰州空间技术物理研究所先后发展了8cm汞发散场离子推力器和10cm氙发散场离子推力器，其中10cm氙发散场离子推力器为推力可连续调节，将应用于重力梯度测量卫星。

20世纪80年代，Sovey等提出了环形会切场离子推力器，并在美国得到了不断发展和完善，先后研制了XIPS-13，XIPS-25，NSTAR，NEXT，NEXIS等产品，其中XIPS-25广泛应用于通信卫星和全电卫星中，在轨数量超过百台；NSTAR成功完成了两次深空探测任务[4-5]；NEXT地面寿命试验超过五万小时，创地面试验最长记录[6-7]。除美国外，中国和日本也开展了环形会切场离子电推进技术的研究和产品研制工作。日本开发了IE-35离子推力器[8]，中国开发了LIPS-300H[9]和LIPS-400[10-11]产品，其中LIPS-300H产品即将完成在轨飞行验证。

柱形会切场离子推力器由发散场离子推力器衍化而来。俄罗斯和中国开展了该类型推力器相关研究和产品开发工作，俄罗斯开发了IT-200[12]和IT-500[13-14]产品。中国开发了LIPS-200[15-18]和LIPS-300Z[19]产品，其中LIPS-200产品在2012年完成在轨验证，2017年实现在轨应用，地面验证寿命超过12000小时。

随航天器太阳能技术的不断提升，航天器供电能力不断增加，中、高功率离子推力器成为目前离子推力器主要需求产品，而会切场又非常适合于中高功率离子推力器产品，因此会切场离子推力器技术研究和产品开发成为热点。环形会切场离子推力器和柱形会切场离子推力器作为会切场离子推力器的两种类型，各国针对某一种类型场离子推力器开展了各方面的研究，但目前尚未见对两种会切场离子推力器的对比研究，尤其是实验对比研究。

本文基于兰州空间技术研究所开发的两种会切场30cm离子推力器LIPS-300Z和LIPS-300H，开展了环形会切场和柱形会切场两种类型会切场对比实验研究，介绍两种会切场磁路原理，分析给出两种会切场在结构上差异性，实验对比研究了两种会切场效率、束流均匀性、双荷离子比等性能参数。

2 实验设备与方法

实验所采用的离子推力器为兰州空间技术物理研究所研制的环形会切场30cm离子推力器[9]（LIPS-300H）和柱形会切场30cm离子推力器[19]（LIPS-300Z）初样产品。两款离子推力器除放电室及支撑结构外，其余关键部组件完全相同。阴极为20A石墨触持极六硼化镧空心阴极，栅极为三栅极离子光学系统，中和器为5A石墨顶触持极六硼化镧中和器。实验在兰州空间技术物理研究所TS-7B真空设备系统中进行，该设备真空舱由直径4.5m，长度10m的主舱和直径2m，长度1.5m的副舱组成，其真空抽气系统、供电系统、氙气供气系统具体参数详见文献[10]。

30cm离子推力器设计有两种工作模式，分别定义为3kW工况和5kW工况。由于前期称谓以及习惯，工作模式名称通过功率定义，但其实这些工况通过束电压、束电流和总流率三个参数确定，每个工况下无修正理论推力和比冲一定。本文为了便于交流仍沿用原来的名称。30cm离子推力器两种工作模式下的主要参数如表1所示。

束流均匀性测试通过束流平直度测试装置完成，该装置由二维移动系统、信号采集和放大系统、法拉第探针组成。束流均匀性测试中法拉第探针端面距离栅极外端面的距离为50mm，扫描步长为2mm，每个步进点采集100个数值，剔除最大值和最小值后的平均值作为该测试点的测量值。测试时为减小电子对离子电流密度的影响，法拉第收集盘和防护套均加-20V偏置电压。

采用$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$探针测量束流中双荷离子比（二价氙离子数与一价氙离子数之比），$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$探针主要由准直套、电磁场、飘移管、离子接收器组成[20]。经准直套进入电磁场区的离子速度方向平行于探针轴线。电场、磁场和离子速度相互正交。离子受到电场力和洛仑兹力的作用，两个力方向相反，对于给定速度的离子可以通过调节两电极板间电压差使离子受力为零，离子不改变方向地通过电磁场区被离子接收器接收形成探针电流。双荷离子比测试点为推力器前端面轴向中心1m处，信号电流通过吉时利皮安表6487进行测量。

Table 1　Main parameters of 30cm ion thruster

Operating mode	3kW mode	5kW mode
Beam voltage/V	1450	1200
Beam current/A	1.68	3.68
Accelerator voltage/V	-220	-400
Total flow rate/(mg/s)	2.551	5.831

3　结果与讨论

3.1　两种会切场原理分析

柱形会切场，放电室典型结构如图1(a)所示，其磁路由多个圆柱形永磁体、环形极靴及配套结构件组成，在两个环形极靴间均布多个柱形永磁体，极靴将永磁体磁场引入放电室，形成类似C型磁场沿中心轴旋转一周所形成的磁路，在放电室内形成会切场。图1(a)给出了LIPS-300Z离子推力器示意图，其放电室由四个环形极靴（后极靴、锥段极靴、中间极靴、前极靴）、三种规格圆柱形永磁体、放电屏蔽筒（也称屏栅筒）、阳极等组成。与放电室等离子体直接接触的电极有屏栅极、阴极、阳极、四个极靴和放电屏蔽筒，除阳极外其余电极均为阴极电位。

环形会切场又称为环形永磁体会切场，放电室典型结构如图1(b)所示，其磁路由环形永磁体及其固定结构件组成。环形永磁体一般由小磁块拼接而成，有径向充磁和轴向充磁之分，充磁方向和磁体大小由放电室磁场的具体构型和磁场强度决定。LIPS-300H离子推力器放电室（如图1(b)所示）磁极数为四极，分别位于柱段阳极两端，锥段阳极中部和锥段阳极底部，从放电室出口向后依次被称为前磁环、中间磁环、锥段磁环和后磁环。与放电室等离子体直接接触的电极有屏栅极、阴极和阳极，其中屏栅极和阴极为阴极电位。

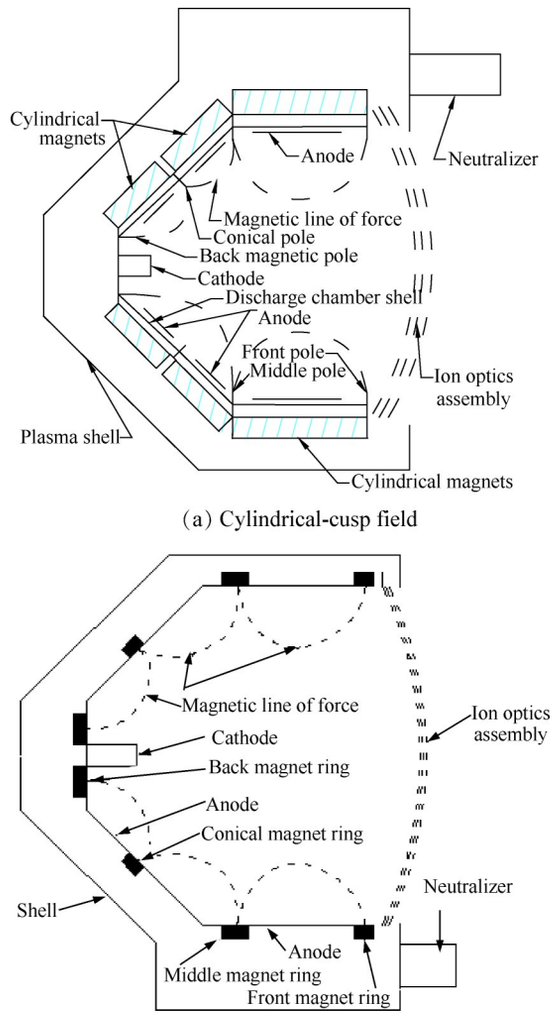


Fig. 1　Schematics of two types of cusp field ion thruster

通过以上论述，可总结得到两种会切场差异性如下：

(1)磁路结构形式不同。柱形会切场磁体一般是圆柱状，圆柱的两端分别和相应的极靴接触，通过极靴导磁形成放电室磁场，而环形会切场磁体是环状，根据磁体整体大小、加工和充磁能力等设计为整体式或分段式，放电室磁场直接由环形磁体形成，无极靴。

(2)磁源形式不同。柱形会切场磁源很容易用

电磁铁实现，即其磁源可以是永磁体，也可以是电磁铁，环形会切场由于结构上的限制，磁源只能是永磁体。

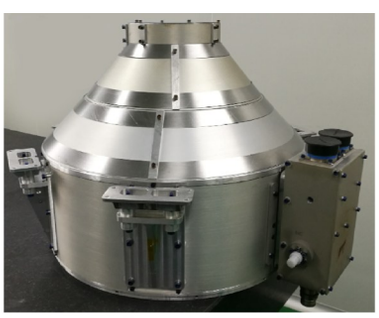
(3)充磁方向不同。柱形磁体只能是轴向充磁，装配时根据磁场的设计需要可以随意改变磁极的磁性方向，而环形磁体的充磁方向可以是轴向充磁，也可以是径向充磁，径向一旦完成充磁，相应磁极的磁性方向便不可改变。

(4)阳极结构不同。柱形会切场有阳极筒和屏栅筒，屏栅筒与极靴紧密结合用于密封放电室中性气体和等离子体，阳极筒为分段筒形结构；而环形会切场只有阳极筒而没有屏栅筒，阳极筒除与阴极和栅极的连接口外为整体密封结构，既充当阳极，又密封放电室中性气体和等离子体。

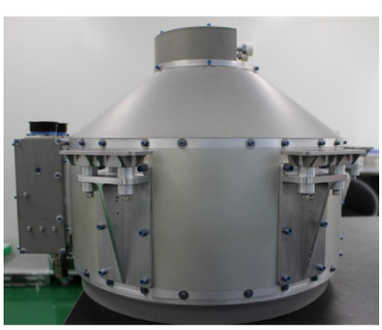
(5)与等离子体接触电极不同。柱形会切场有阳极筒、屏栅筒、极靴、阴极和屏栅极；而环形会切场只有阳极筒、阴极和屏栅极。

3.2 30cm 离子推力器重量对比

离子推力器作为航天产品，对其重量有严格的限制，通过降低离子推力器重量可减小电推进系统重量，从而可提高航天器载荷比。图2给出了两种会切场30cm离子推力器的实物照片。两款推力器为了与同一电推进系统配套，二者外形尺寸和对外接口完全相同。在相同阴极组件、栅极组件、气路电绝缘器组件、电连接器等部组件，以及相同永磁体材料和结构件材料下，LIPS-300H 比 LIPS-300Z 离子推力器重量轻约2kg。因此，在重量方面环形会切场较柱形会切场存在优势，其主要原因是柱形会切场相比环形会切场增加了屏栅筒和极靴，又由于极靴一般为软磁材料，密度较大，如合金4J29的密度是结构件钛合金TC4的1.8倍。



(a) LIPS-300Z

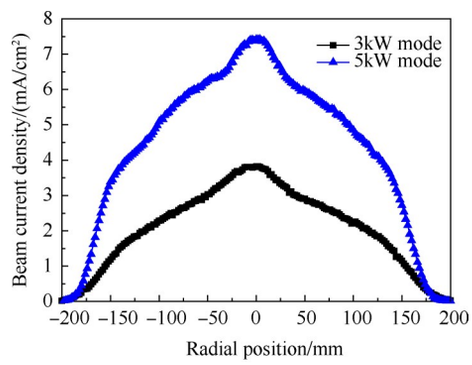


(b) LIPS-300H

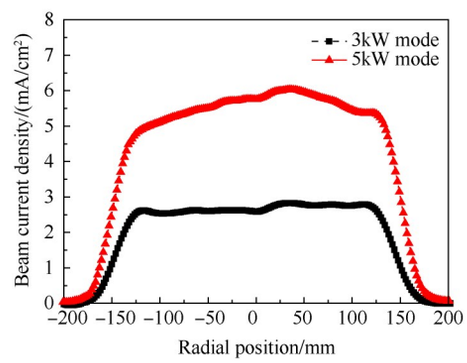
Fig. 2 Photographs of two types of 30cm cusp field ion thruster

3.3 30cm 离子推力器束流均匀性对比

束流均匀性是中高功率离子推力器的一个关键指标。在最大输入功率下，大推力的实现要求离子推力器需引出较大的束流，如果束流均匀性较差，中心存在峰值，在栅极引出最大束流密度限制下，平均束流密度较低，在一定束口径下可引出束流较小[21]，推力达不到设计要求；其次，功率宽范围调节需要在一定几何参数栅极下正常聚焦引出不同束流，如果束流均匀性较差，推力器中心轴线上的束流密度偏高，而周边的束流密度偏低，则在大束流密度下在栅极中心易造成束流欠聚焦，小束流密度下在栅极边缘易造成束流过聚焦。过聚焦和欠聚焦均会造成离子对加速栅和减速栅的直接轰击溅射，使推力器寿命大幅缩减[22-23]。最后，栅极寿命与束流密度成正比关系[24]。在同样束流下，束流越均匀，束流密度峰值越小，栅极寿命越长。图3给出了LIPS-300Z和LIPS-300H离子推力器在3kW工况和5kW工况下束



(a) LIPS-300Z



(b) LIPS-300H

Fig. 3 Beam current density profiles of two types of cusp field ion thruster

流密度径向分布测试结果，LIPS-300Z 离子推力器束流密度分布呈山峰形，边缘束流小，中心束流大；而 LIPS-300H 离子推力器束流密度分布曲线基本为平顶形，束流均匀性较好。LIPS-300H 相比 LIPS-300Z 离子推力器在 3kW 和 5kW 工况下束流密度峰值分别降低 25% 和 19%。

为了对两种磁路下束流均匀性差异进行分析，采用 Ansoft 软件对 LIPS-300Z 和 LIPS-300H 离子推力器放电室内部磁感应强度分布进行了计算，结果如图 4 所示。从图 4 可见，两种磁场结构放电室 50Gs 闭合磁感应强度等值线均呈马蹄形，但 LIPS-300H 靠近栅极的柱段放电室磁感应强度沿半径指向中心方向比 LIPS-300Z 衰减更快，即梯度很大。LIPS-300H 放电室中心较大区域磁场强度几乎为零，而 LIPS-300Z 只有在柱段与锥段放电室连接处出现极小零场区域，放电室大部分区域磁场强度大于 10Gs；同时，在柱段阳极表面附近 LIPS-300H 磁感应强度等值线几乎与阳极平行，而 LIPS-300Z 磁感应强度等值线在两磁极中部附近向放电室内部鼓出。

由于放电室中磁场强度不足以磁化离子，离子运动本不受磁场约束，但是电子的运动行为受到靠近放电室边界的强磁场区的约束，磁化电子通过电场影响放电室边界处的离子输运。离子在两磁极间阳极壁面处的运动为垂直磁场的双极扩散。离子运动到阳极的速率由公式(1)表示。可见，LIPS-300Z 凸入放电室的磁场减小了离子径向移动速率，导致 LIPS-300Z 放电室出口附近边缘离子较少造成束流密度分布中心高，边缘低。

$$v_i = \frac{1}{2}\sqrt{\left[\frac{el}{m_i\mu_e}\left(1+\mu_e^2B^2-\frac{\nu_{ei}}{\nu_e}\right)\right]^2+\frac{4T_{eV}}{m_i}} - \left[\frac{el}{2m_i\mu_e}\left(1+\mu_e^2B^2-\frac{\nu_{ei}}{\nu_e}\right)\right] \tag{1}$$

式中 e 为电子电量，1.602×10^{-19}C；m_i 为氙离子质量，2.180×10^{-25}kg；B 为磁感应强度，T；μ_e 为电子迁移率，$m^2/(V\cdot s)$；T_{eV} 为电子温度，eV；碰撞频率 $\nu_e = \nu_{en} + \nu_{ei}$，$\nu = \nu_{en}/\nu_{ei}$，$\nu_{en}$ 和 ν_{ei} 分别为电子与原子和离子的碰撞频率，Hz。l 表示磁极间离子沿着径向穿越磁力线过程中所走过的路径，m。

3.4　30cm 离子推力器放电效率对比

放电效率是离子推力器的一个重要指标，高的放电效率不仅能实现较高的推力器总效率，而且会降低大功率下推力器自身发热造成的高温，从而降低对离子推力器热敏感元件(如永磁体、电连接器等)使用温度要求[9]。放电效率通过放电损耗来表征，放电损耗为放电功率与束电流之比，放电损耗越小放电效率越高。

表 2 给出了 LIPS-300Z 和 LIPS-300H 离子推力器在 3kW 和 5kW 工况下的放电室工作参数。在同样总流率和束电压下引出相同的束流，LIPS-300Z 放电电压和放电电压峰峰值高于 LIPS-300H，但放电电流和放电损耗较低。较低的放电损耗说明 LIPS-300Z 比 LIPS-300H 具有较高的放电效率。随放电电压增加，离子推力器放电室电离效率增加，因此，高的放电电压是造成 LIPS-300Z 较高放电效率的原因之一。但是高的放电电压会增加双荷离子比，双荷离子不仅会造成推力损失，而且还会增加离子对放电室阴极电位电极的溅射刻蚀速率[25]。采用 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 探针对 LIPS-300Z 和 LIPS-300H 离子推力器双荷离子比进行了测量。图 5 给了 LIPS-300H 离子推力器在 3kW 工况下 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 探针测量得到扫描电压与探针电流关系曲线，该曲线中第一个峰为一价氙离子电流峰，第二个峰为二价氙离子电流峰。利用图 5 采用峰值之比方法[26-27]求得双荷离子电流比，再根据式(2)计算得到，LIPS-300H 离子推力器在 3kW 工况下双荷离子比为 5.50%。利用同样的方法得到，LIPS-300H 离子推

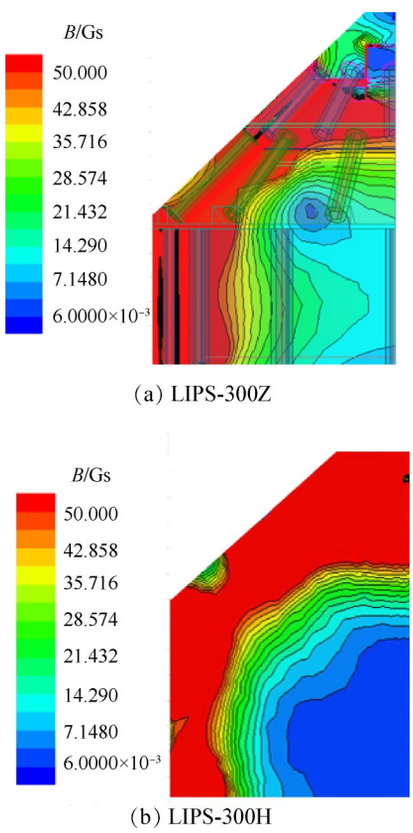


Fig. 4　Magnetic field contours in two types of cusp field ion thruster discharge chamber

力器在5kW工况下双荷离子比为8.38%，LIPS-300Z离子推力器在3kW和5kW两种工况下，双荷离子比分别为13.60%和10.87%。在3kW和5kW工况下，LIPS-300Z离子推力器双荷离子比分别是LIPS-300H的2.5倍和1.3倍。

Table 2 Operating parameters of two types of cusp field ion thruster

Mode	3kW mode		5kW mode	
	LIPS-300Z	LIPS-300H	LIPS-300Z	LIPS-300H
Discharge voltage/V	37.0	29.2	35.2	29.0
Discharge voltage U_{p-p}/V	8	7	15	7
Discharge current/A	6.8	10.4	15.6	24.4
Discharge loss/(W/A)	151	182	150	192

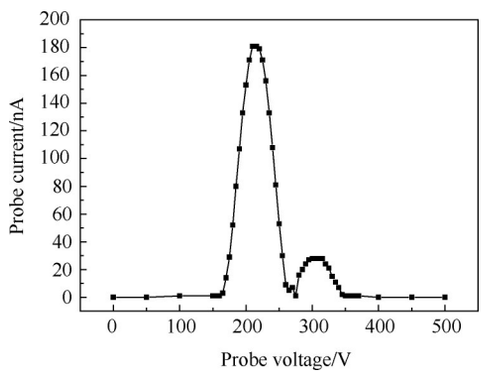


Fig. 5 *E×B* probe spectra of LIPS-300H at 3kW mode

E×B探针测量中双荷离子电流比与双荷离子比关系为

$$\frac{n^{++}}{n^{+}}=\frac{1}{2^{3/2}}\frac{J^{++}}{J^{+}} \tag{2}$$

式中n^{++}/n^{+}为双荷离子比，J^{++}/J^{+}为双荷离子电流比。

为排除双荷离子对放电效率评价的影响，将二价离子视为一价离子，放电损耗计算公式近似为公式(3)，计算得到LIPS-300Z离子推力器在3kW和5kW工况下放电损耗分别为184W/A和177W/A；LIPS-300H离子推力器在3kW和5kW工况下放电损耗分别为199W/A和219W/A。可见LIPS-300Z比LIPS-300H存在放电损耗低的优势。分析认为造成这种现象的原因是：首先由于LIPS-300Z放电电压较高，电离率相对较高；其次由于LIPS-300Z离子推力器阳极表面磁场强度相对更强，离子和电子在阳极表面的损失速率更低；最后由于LIPS-300Z放电室磁极处电位为阴极电位，在阴极电位势垒作用下，只有高能且在磁镜损失锥内电子被磁极吸收。

双荷离子修正后放电损耗计算公式为

$$\varepsilon\approx\frac{1+\dfrac{I^{++}}{I^{+}}}{1+\dfrac{1}{2\sqrt{2}}\dfrac{I^{++}}{I^{+}}}\frac{U_{\mathrm{d}}I_{\mathrm{d}}}{I_{\mathrm{b}}} \tag{3}$$

式中I^{+}为一价离子束电流，A；I^{++}为二价离子束电流，A；U_{d}为放电电压，V；I_{d}为放电电流，A；I_{b}为束电流，A。

3.5 30cm离子推力器预测寿命对比

寿命是离子推力器的另一个重要指标，其决定了离子推力器的在轨服役时间和总冲。影响离子推力器寿命的因素很多，其中栅极寿命是其寿命短板，目前一般栅极寿命代表了推力器寿命。栅极中三栅极系统由屏栅、加速栅和减速栅组成，其中屏栅寿命主要取决于束流密度、放电电压、双荷离子比和束流平直度，由公式(4)可以预测[28-29]。由式(4)计算得到LIPS-300H在3kW和5kW下屏栅寿命分别是LIPS-300Z的7.7倍和4.2倍。LIPS-300Z离子推力器较高的双荷离子比和放电电压，较低的束流平直度是造成其屏栅寿命较短主要原因。另外，LIPS-300Z离子推力器放电室处于阴极电位的电极较多，而这些电极将遭受放电室离子的溅射刻蚀，刻蚀物将在放电室内形成多余物，造成电极搭接短路等故障，影响推力器工作可靠性。

屏栅寿命预测计算公式为

$$L_{\mathrm{sg}}=\frac{t_{\mathrm{s}}\phi_{\mathrm{i}}e\rho F_{\mathrm{B}}A_{\mathrm{g}}\left(1-\phi_{\mathrm{s}}\right)\left(1+R^{++}\right)}{I_{\mathrm{b}}m\left(1-\phi_{\mathrm{i}}\right)\left(Y^{+}+\dfrac{1}{2}R^{++}Y^{++}\right)} \tag{4}$$

式中L_{sg}为屏栅寿命，h；t_{s}为屏栅厚度，m；ϕ_{i}为栅极组件离子透明度；ρ为屏栅材料密度，kg/m^3；F_{B}为束流平直度；A_{g}为栅极开孔区域面积，m^2；R^{++}为束流中双荷离子比；I_{b}为束电流，A；m为屏栅材料原子质量，kg；ϕ_{s}为屏栅几何透明度；Y^{+}和Y^{++}分别为一价和二价氙离子对钼的溅射产额。

加速栅或减速栅寿命主要取决于交换电荷离子密度，而交换电荷离子密度与束流密度呈正比关系，因此加速栅或减速栅交换电荷离子刻蚀速率与束流密度成线性关系[30-31]。依据该关系，利用3.3节中束流均匀性测试结果，计算得到LIPS-300H离子推力器在3kW和5kW下加速栅或减速栅寿命分别是LIPS-300Z离子推力器的1.3倍和1.2倍。

此外，5kW工况下LIPS-300Z离子推力器放电电压振荡峰峰值是LIPS-300H离子推力器的2倍多，高

的放电电压会产生高能离子[32]，加剧对放电室屏栅上游表面和阴极触持极的溅射刻蚀，影响推力器寿命。同时，溅射物将在推力器放电室内形成多余物，造成短路等故障，影响推力器工作可靠性。

4 结　论

基于30cm环形会切场离子推力器LIPS-300H和30cm柱形会切场离子推力器LIPS-300Z，对比研究了当前两类主要会切场离子推力器主要优缺点。得到如下结论：

(1)LIPS-300H离子推力器比LIPS-300Z重量轻约2kg。由于柱形会切场相比环形会切场增加了屏栅筒和极靴，又由于极靴一般为软磁材料，密度较大，因此环形会切场离子推力器具有轻量化优势。

(2)LIPS-300H离子推力器相比LIPS-300Z在3kW和5kW工况下束流密度峰值分别降低25%和19%。环形会切场相比柱形会切场离子推力器放电室磁空区更大，束流均匀性更好。

(3)LIPS-300Z离子推力器在3kW和5kW工况下双荷离子修正后放电损耗分别为184W/A和177W/A；LIPS-300H离子推力器在3kW和5kW工况下双荷离子修正后放电损耗分别为199W/A和219W/A。柱形会切场离子推力器比环形会切场离子推力器放电损耗更低，比较适合于功率短缺，对效率要求较高的任务。

(4)LIPS-300H离子推力器在3kW和5kW工况下屏栅预测寿命分别是LIPS-300Z的7.7倍和4.2倍。LIPS-300Z离子推力器较高的双荷离子比和放电电压，较低的束流平直度是造成其屏栅寿命较短的主要原因。

(5)LIPS-300H离子推力器在3kW和5kW工况下加速栅或减速栅预测寿命分别是LIPS-300Z离子推力器的1.3倍和1.2倍。LIPS-300Z离子推力器较低的束流平直度是造成其加速栅或减速栅寿命较短主要原因。环形会切场比柱形会切场在寿命和可靠性方面更优，比较适合于对可靠性要求较高、寿命较长的任务。

针对两种会切场离子推力器差异性，后续采用数值模拟计算和放电室内部等离子体诊断试验，进一步深入开展机理研究。

致　谢：感谢甘肃省科技计划杰出青年基金，真空技术与物理重点实验室基金和中国空间技术研究院杰出青年人才基金的资助。

参考文献

[1] Clark S, Randall P, Lewis R, et al. BepiColombo-Solar Electric Propulsion System Test and Qualification Approach[R]. *IEPC*-2019-586.

[2] Wallace N C, Mundy D H, Fearn D G, et al. Evaluation of the Performance of the T6 Ion Thruster[R]. *AIAA* 99-2442.

[3] Randall P N, Lewis R A, Clark S D, et al. BepiColombo-MEPS Commissioning Activities and T6 Ion Thruster Performance During Early Mission Operations [R]. *IEPC*-2019-615.

[4] Rawlin V K, Sovey J S, John H A. An Ion Propulsion System for NASA's Deep Space Missions[R]. *AIAA* 99-4612.

[5] Brophy J R, Mareucei M G, Ganapathi C B, et a1. The Ion Propulsion System For Dawn[R]. *AIAA* 2003-4542.

[6] Shastry R, D Herman A, Soulas G C, et al. Status of NASA's Evolutionary Xenon Thruster (NEXT) Long-Duration Test as of 50000h and 900kg Throughput [R]. *IEPC*-2013-121.

[7] Shastry R, D. Herman A, Soulas G C, et al. End-of-Test Performance and Wear Characterization of NASA's Evolutionary Xenon Thruster (NEXT) Long-Duration Test[R]. *AIAA*-2014-3617.

[8] Kitamura S, Miyazaki K, Hayakawa Y, et al. Performance Improvement of 150mN Xenon Ion Thrusters[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52: 11-20.

[9] Zhao Yide, Zhang Tianping, Wu Zonghai, et al. Performance Evaluation of the 30cm Ring-cusps Ion Thruster [C]. *Shanghai*: *7th CSA/IAA Conference on Advanced Space Technology*, 2017.

[10] 赵以德，张天平，黄永杰，等. 40cm离子推力器宽范围调节实验研究[J]，推进技术，2018，39(4)：942-947. (ZHAO Yi-de, ZHANG Tian-ping, HUANG Yong-jie, et al. Experimental Study of 40cm Ion Thruster over a Wide Range of Input Power[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(4): 942-947.)

[11] 赵以德，张天平，李　娟，等. 40cm离子推力器设计与性能测试[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2192-2199.

[12] Lovtsov A S, Shagayda A A. Ion Thrusters Development for a Transport and Power Generation Module Project [R]. *IEPC*-2015-291.

[13] Koroteev A S, Lovtsov A S, Muravlev V A, et al. Development of Ion Thruster IT-500[J]. *The European Physical Journal D*, 2017, 71(120): 1-10.

[14] Lovtsov A S, Selivanov M Y, Kostion A N, et al. Qualification Status of High Power Ion Thruster and Flow Control Unit and Its 2000-hour Lifetime Test[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 109-120.

[15] 杨福全，江豪成，张天平，等. 20cm离子推力器飞行试验工作性能评价[J]. 推进技术，2016，37(4)：783-

787. (YANG Fu-quan, JIANG Hao-cheng, ZHANG Tian-ping, et al. Flight Test Performance Evaluation of 20cm Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(4): 783-787.)

[16] 郑茂繁, 江豪成. 改善离子推力器束流均匀性的方法[J]. 推进技术, 2011, 32(6): 762-765. (ZHENG Mao-fan, JIANG Hao-cheng. Method of Improving Beam Current Profile for Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(6): 762-765.)

[17] Zhang T P. Initial Flight Test Results of the LIPS-200 Electric Propulsion System on SJ-9A Satellite [R]. *IEPC*-2013-47.

[18] Zhang T P. The LIPS-200 Ion Electric Propulsion System Development for the DFH-3B Satellite Platform[R]. *IAC*-13-*C*4.4, 2013.

[19] 王 亮, 张天平, 江豪成, 等. LIPS-300离子推力器放电室设计及实验研究[J]. 真空与低温, 2016, 22(6): 344-349.

[20] 唐福俊, 张天平. 离子推力器羽流测量*E*×*B*探针设计及误差分析[J]. 真空与低温, 2007, 13(2): 77-80.

[21] 赵以德, 张天平, 郑茂繁, 等. 高推力密度离子推力器研究[J]. 真空, 2017, 54(1): 14-16.

[22] Jonathan V N. NEXT PM1R Ion Thruster Wear Test Results[R]. *IEPC*-2009-163.

[23] Emhoff J W, Boyd I D. Progress in NEXT Ion Optics Modeling[R]. *AIAA* 2004-3786.

[24] Sengupta A. Experimental and Analytical Investigation of a Modified Ring Cusp NSTAR Engine[R]. *IEPC*-2005-160.

[25] Rosenberg D, Wehner G K. Sputtering Yields for Low Energy He^+, Kr^+, and Xe^+ Ion Bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 33(5): 1842-1845.

[26] Rohit S, Hofer R R, Bryan M R, et al. Method for Analyzing ***E***×***B*** Probe Spectra from Hall Thruster Plumes[R]. *AIAA* 2008-4647.

[27] Hofer R R. Development and Characterization of High-Efficiency, High-Specific Impulse Xenon Hall Thrusters [D]. *Michigan*: *The University of Michigan*, 2004.

[28] Brophy J R. Ion Engine Service Life Validation by Analysis and Testing[R]. *AIAA* 96-2715.

[29] Rawlin V K. Status of Ion Engine Development for High Power, High Specific Impulse Missions [R]. *IEPC*-2001-096.

[30] Anderson J, Katz I, Goebel D. Numerical Simulation of Two-Grid Ion Optics using a 3D Code[R]. *AIAA* 2004-3782.

[31] Brophy J R. The Ion Population System on NASA Space Technology 41 Champollion Comet Rendezvous Mission [R]. *AIAA* 99-2856.

[32] Farnell C C, Williams J D. Comparison of Hollow Cathode Discharge Plasma Configurations[J]. *Plasma Sources Science Technology*, 2011, 20(2).

(编辑:朱立影)