

离子推力器放电室阳极壁面电流密度分布特性研究^{*}

宋莹莹, 顾左, 王蒙, 赖承祺, 郭伟龙

(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: 为了准确掌握离子推力器放电室阳极壁面电流密度分布特性, 并深入理解阳极壁面处等离子体运动特性, 设计了近阳极壁面等离子体诊断的具体实施方案, 并基于LIPS-200离子推力器开展了近阳极壁面处等离子体诊断试验研究, 得到了主要磁极附近壁面等离子体参数, 并得到阳极壁面吸收电流密度分布特性。试验结果表明: LIPS-200离子推力器阳极壁面处主要磁极附近的等离子体密度范围为 $8.07 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} \sim 3.96 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 测试点的电子温度范围为 $0.82 \text{ eV} \sim 1.45 \text{ eV}$, 壁面电流密度范围为 $12 \text{ A/m}^2 \sim 829 \text{ A/m}^2$; 柱段壁面电子温度相对锥段较低, 但电流密度较大, 尤其在中间极靴位置电流密度最大, 约为阴极极靴处电流密度的3倍, 约为屏栅极靴处电流密度的2倍, 阳极电流主要在放电室中间极靴处发生损失。

关键词: 离子推力器; 阳极壁面; 电流密度分布; 等离子体诊断

中图分类号: V439+.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2019) 11-2633-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.180696

Studies on Distribution Characteristics of Current Density on Anode Wall of Ion Thruster

SONG Ying-ying, GU Zuo, WANG Meng, LAI Cheng-qi, GUO Wei-long

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

Abstract: In order to accurately grasp the current density distribution characteristics on the anode wall surface of the ion thruster discharge chamber, and to deeply understand the plasma motion characteristics near the anode wall, a specific implementation scheme for the near-anode wall plasma diagnosis was designed. Based on LIPS-200 ion thruster, plasma diagnostic test near the anode wall was carried out. The plasma parameters near the main magnetic pole were obtained, and the wall current density characteristics near the main magnetic poles were also obtained. The test results show that the plasma characteristics near the main magnetic pole at the anode wall of the LIPS-200 ion thruster are as follows: the plasma density range is from $8.07 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ to $3.96 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, the electron temperature ranges from 0.82 eV to 1.45 eV , and the wall current density ranges from 12 A/m^2 to 829 A/m^2 . The electron temperature of the wall of the cylinder section is lower than that of the cone section, but the current density is higher, especially at the position of the middle pole piece, which is 3 times of the current density at the cathode pole piece and 2 times of the current density at the screen pole piece. The anode current is mainly lost at the middle pole piece of the discharge chamber.

Key words: Ion thruster; Anode wall; Current density distribution; Plasma diagnosis

^{*} 收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2019-01-08。

作者简介: 宋莹莹, 硕士, 研究领域为空间电推进技术与工程。E-mail: songyzly@163.com

通讯作者: 顾左, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究领域为空间电推进技术与工程。E-mail: guozuo@sohu.com

引用格式: 宋莹莹, 顾左, 王蒙, 等. 离子推力器放电室阳极壁面电流密度分布特性研究[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2633-2640. (SONG Ying-ying, GU Zuo, WANG Meng, et al. Studies on Distribution Characteristics of Current Density on Anode Wall of Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(11): 2633-2640.)

1 引 言

放电室是 Kaufman 型离子推力器核心部组件,是离子推力器维持放电并产生等离子体的区域。放电室工作时其内部存在的不同种类的粒子,在多种物理场作用下进行复杂的运动与碰撞,造成了放电室内部等离子体环境的复杂性。开展 Kaufman 离子推力器放电室阳极壁面电流密度分布特性研究,一方面有助于深入理解放电等离子体在阳极壁面处的物理运动过程,另一方面为进一步研究离子推力器放电室性能一致性、放电稳定性以及热分布特性提供事实支撑和理论依据。

国外学者开展了不同形式的离子推力器放电室等离子体诊断研究。Arakawa 等^[1]利用单探针测量放电室阳极壁面附近的等离子体密度,进而得到损失在阳极壁面的离子份额,通过实验数据验证了阳极壁面等离子体鞘层理论模型的正确性。2004~2009 年, Sengupta 等^[2-3]利用单平面探针测量 NSTAR 离子推力器的四种磁场位形下的放电室等离子体参数,研究了磁场位形对放电室等离子体约束与等离子体均匀性的影响,并提出了放电室磁场设计与优化建议。2003 年, Herman 等^[4]使用双探针技术研究 30cm 离子推力器 DCA 附近区域等离子体电子温度分布。2005 年, Herman 等^[5]针对 NEXT 型离子推力器开展了离子推力器放电室等离子体电势发射探针诊断工作,通过试验证实了放电阴极与主要等离子体区之间存在双层电势结构。2012~2016 年, Yamamoto 等^[6-7]使用 LTS 对 30W 微型微波离子推力器等离子体电子温度、密度、电子能量分布函数多个参数进行诊断。Williams 等^[8]为了研究离子推力器空心阴极附近高能离子对触持极腐蚀机理,采用 LIF 测量空心阴极羽流区的高能离子能量分布。国内开展放电室等离子体诊断研究较少,影响了对放电室的进一步优化,开展放电室等离子体研究已迫在眉睫。

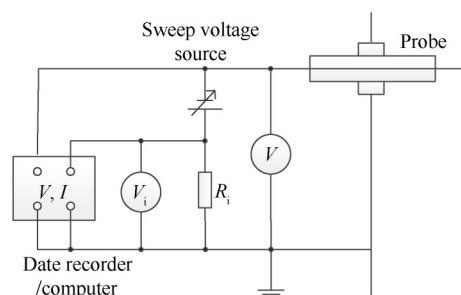
朗缪尔探针诊断技术相对于光学诊断技术操作简单,仪器容易制造,成本相对较低,成为等离子体实验中常用的诊断手段^[9-10]。且单探针与其它类型的静电探针相比,空间分辨率高,单探针理论发展较为完善,通过分析其 I/V 特性曲线能够获得较多等离子体参数。本文选用平面探针开展阳极壁面等离子体特性研究,设计了阳极壁面等离子体诊断的具体实施方案,并基于 LIPS-200 离子推力器开展阳极壁面等离子体诊断试验,采集了阳极壁面不同位置等离子体特性数据,计算得到壁面主要磁极附近位置

的电流密度分布,并提出了放电室优化建议。

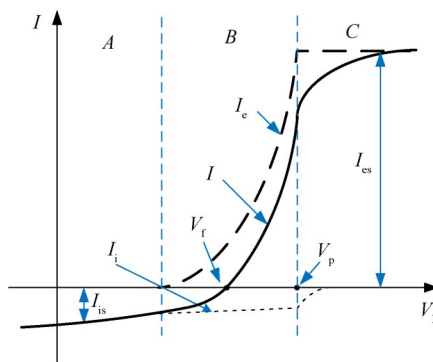
2 试验设计及准备

2.1 静电探针理论

静电探针^[11]是利用等离子体中的静电现象,通过将金属探针插入等离子体中,并对其相对另一金属电极施加正或负的偏置电压以收集电子或离子电流。图 1 给出了典型的测量探针的 I/V 特性的简单装置及理想状态下 Langmuir 探针 I/V 特性曲线。电压扫描电源(通常电压扫描范围为 $\pm$ 电压扫描)用于偏置探针电压,数据采集处理设备可以采用示波器、电流、电压记录仪、电压表或计算机。探针相对地的悬浮电压为 V_f , 等离子体电势为 V_p , 探针扫描电压为 V_B , 离子电流为 I_i , 电子电流为 I_e , 探针电流为 I , 饱和电子电流为 I_{es} , 饱和离子电流为 I_{is} 。



(a) A simple probe device



(b) I/V curve of planar probe

Fig. 1 Experimental setup for single Langmuir measurements and typical I/V curve

当探针电压 $V_B = V_p$ 时,探针处于与等离子体相同的电位,此时它收集到的电流主要来自运动速度较快的电子,在这里指定该电流的方向为正(即从探针流向等离子体的电流方向为正)。当增加 V_B 并使其超过 V_p 时,电流将趋于饱和而达到电子饱和电流值,但是电流会因为探针有效收集面积的增加而随电压增加。当 $V_B < V_p$ 时,根据玻尔兹曼关系式,电子

将被排斥,当偏压减小到 V_f 时,探针电位相对于等离子体电位足够负,从而使电子电流和离子电流相等,即 $I=0$ 。当 $V_B < V_f$ 时,离子电流逐渐变为探针电流的主要来源,探针电流区域离子饱和电流值,由于离子的质量远远大于电子,所以离子的饱和电流远小于电子饱和电流。

平面探针收集面积和探针表面积的关系^[9]为

$$A_s = \pi r_p^2 \left(1 + \frac{a}{r_p}\right) \quad (1)$$

式中 A_s 为平面探针收集面积, r_p 为平面探针半径, a 为鞘层厚度,平面探针半径 $r_p \gg a$,所以它的收集面积 A_s 基本上不随 a 变化。

对于深度负偏压区域 A ,电子几乎不能进入探针,探针测得的离子饱和电流 I_{is} 为

$$I_{is} = -en_s v_{Bohm} A_s \quad (2)$$

式中 n_s 为鞘层边界的密度, v_{Bohm} 为波姆速度, v_{Bohm} 由下式(在 $T_i \ll T_e$ 条件下)给出

$$v_{Bohm} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} \quad (3)$$

根据玻尔兹曼关系式,知鞘层边界处与等离子体内部的电子密度之间的关系为

$$n_s = n_b e^{-V_p/T_e} \quad (4)$$

式中 n_b 为在预鞘层和主等离子体交界处的离子密度。

在正偏压较高的区域 C ,由于离子不能进入探针,探针测得电子的饱和电流 I_{es} 为

$$I_{es} = \frac{en_e \bar{v}_e A_s}{4} \quad (5)$$

式中 n_e 为等离子体密度。

在区域 B ,电子电流 I_e 为

$$I_e = \frac{en_e \bar{v}_e A_s}{4} \exp\left(\frac{V_B - V_p}{T_e}\right) \quad (6)$$

上式求对数得

$$\ln\left(\frac{I_e}{I_{es}}\right) = \frac{V_B - V_p}{T_e} \quad (7)$$

在过渡区域 B 段,离子电流相对电子电流很小,可忽略不计。根据式(7)知,探针 I/V 特性曲线的过渡区 $\ln|I|$ 与 V_B 呈线性关系,该直线斜率即为等离子体的电子温度 T_e 的倒数,因此求出过渡区 $\ln|I| - V_B$ 的斜率,即可求出 T_e 。当 V_B 太小时,会给测量 I_e 带来一定的误差;当 V_B 太大时,由于电子电流趋于饱和,玻尔兹曼指数关系式不再正确,因此可用于测量斜率的电压范围^[9]为

$$\frac{|\Delta V_B|}{T_e} \approx \ln\left(\frac{m_i}{2\pi m_e}\right) \quad (8)$$

对于氩等离子体其值约为5.3,范围足够宽,过渡区拟合直线与等离子体饱和电子电流段拟合直线的交点处确定等离子体电势。

2.2 探针布局设计

为了获取离子推力器阳极壁面电流密度分布,需要对放电室阳极壁面进行合理的探针布局。根据相关研究^[12-13]知,电子电流是阳极电流最主要成分,占总放电电流约90%的成分,而电子由于磁镜效应大部分在磁极处发生损失,因此阳极壁面测量点主要选取在靠近各磁极附近的位置。探针在阳极壁布局示意图如图2所示,控制信号和测量电流/电压信号通过舱内同轴电缆由穿舱法兰实时传输至舱外数据采集分析系统,通过分析探针的电压-电流特性曲线,得出放电室内对应位置处的等离子体基本特性参数。

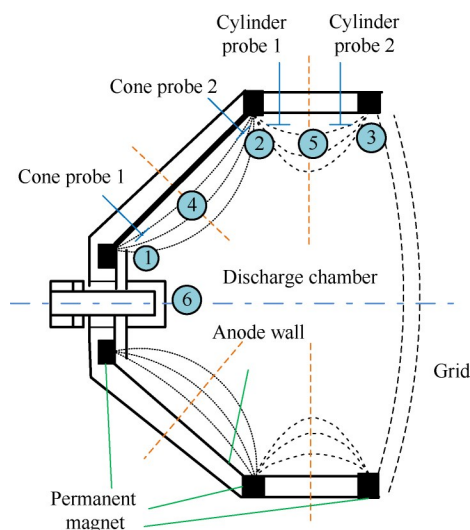


Fig. 2 Diagram of probe layout on anode wall

由于阳极壁面处的等离子体密度较低,为了获取较为精确的壁面电流密度分布,降低试验误差,选取平面探针进行诊断。一方面平面探针具有较大的表面积,使得探针电流信号较大,进而降低系统误差;另一方面在等离子体诊断中,鞘层的厚度直接影响探针对等离子体接收面积的计算,而鞘层厚度很难正确预估,较小尺寸的探针鞘层厚度若不能准确估计,会使所得结果不可信甚至错误,而平面探针的鞘层理论较为简单,且鞘层厚度相对于探针直径的大尺寸可以忽略。理论上在保证探针的预鞘不超出均匀等离子体的范围时,探针尺寸越大,诊断误差越小,因此使用平面探针比其他形式的朗缪尔探针误

差更小。

2.3 磁场对探针诊断的影响分析

由于平面探针布局在磁极附近,为了确定磁极附近磁场对平面探针诊断产生的影响,需要对测量点磁场强度进行分析。根据调研^[14-15],采用探针相对尺寸(探针的线度和离子拉莫半径的比值 $\beta = \frac{r_p}{r_i}$)用来表征磁场效应^[16],当 $\beta \ll 1$ 时,磁场所引起的粒子运动的各向异性可以忽略,探针特性可以用无磁场理论来近似;反之,当 $\beta \gg 1$ 时,在探针的尺度上,粒子运动是极端各向异性的,需要考虑磁场效应,从而对结果进行校正。选取了6个典型位置处的磁场位形特征点进行磁场测量,选取点见图2。经测量得到放电室特征点磁感应强度如表1所示。

Table 1 Measurements of magnetization at characteristic points of discharge chamber

Number	Characteristic points	Magnetization/Gs
1	Upstream magnetic pole boot	150
2	Middle magnetic pole boot	90
3	Downstream magnetic pole boot	40
4	Middle of cone anode	140
5	Middle of the cylinder anode	60
6	Top of main cathode	140

根据测量结果知,阳极壁面磁感应强度范围在0~150Gs,探针的相对尺寸与磁场强度、离子拉莫尔半径有关,因此需要对放电室等离子体环境做相应的估算。离子在磁场作用下的拉莫尔半径计算^[17]如式(9)所示,其中 $v_{\perp}$ 为垂直于磁力线的运动速度, B 为磁场强度。

$$r_i = \frac{m_i v_{\perp}}{q|B|}$$

(9)

阳极壁面附近等离子体离子速度以波姆速度运动^[17],大约为 $1.9 \times 10^3 \text{m/s}$ 。在壁面磁场强度为150高斯时,离子拉莫尔半径为0.17m;当壁面磁场强度低于150高斯时,离子拉莫尔半径 $>0.17\text{m}$ 。为了诊断局部等离子体参数,平面探针尺寸不宜过大,一般平面探针直径在几个mm到几十个mm之间。因此 $\beta \ll 1$,磁场所引起的粒子运动的各向异性可以忽略,探针特性可以用无磁场理论来近似。

2.4 探针设计

选择平面探针设置直径为12mm,设计探针厚度0.05mm,面探针直径与厚度之比设计为240,可以忽

略探针边缘效应。放电室阳极壁面处等离子体密度大约在 $5 \times 10^{15} \text{m}^{-3} \sim 5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 量级,电子温度约为0.5eV~5eV。等离子体德拜半径计算^[18]见式(10),预估阳极壁面处等离子体的德拜半径 λ_D 在0.06mm~0.22mm之间,对于平面探针等离子体鞘层厚度^[9]约为 $a \approx \lambda_D$,对于平面探针直径 $r_p = 12\text{mm}$,满足 $A_s \gg a$, $A_s \gg \lambda_D$ 的探针设计要求。

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}$$

(10)

探针示意图如图3所示,探针头部为金属钨片,钨片焊接在一个直径为平头M2螺钉上,螺钉外侧为陶瓷管,绝缘陶瓷之间由绝缘密封胶粘接固定,双陶瓷绝缘结构使得探针对等离子体引起的扰动最小,且保证螺钉与阳极壁面之间良好的绝缘性能,阳极壁开孔直径为3.5mm,开孔中心位置为距离磁极边14mm位置处。

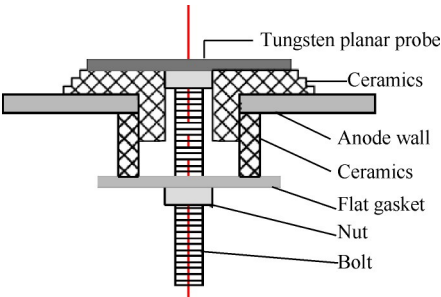


Fig. 3 Schematic diagram of probe

2.5 试验准备

2.5.1 20cm 离子推力器

LIPS-200离子推力器是由兰州空间技术物理研究所自主研发,面向全电推进卫星平台应用的离子推力器。20cm推力器由三个磁极靴环组成,永磁铁固定在磁极靴环之间,通过在磁极靴环之间不同的磁极性排列,形成三级环形会切磁场^[19]。永磁体为圆柱型钕钴磁体,磁极靴环为良好的导磁材料,离子光学引出系统采用双栅结构,阴极采用LaB₆空心热阴极。LIPS200离子推力器磁环结构图如图4所示。

2.5.2 真空系统及地面设施

试验在兰州空间技术物理研究所TS-6A电推进试验设备上开展,地面试验设备主要包括真空舱、地面供配电及其控制调节装置、地面推进剂供给与调节装置。电源系统可提供试验的12路供电需求;推进剂供给系统可提供试验的供气需求;操作控制系统可对电流、电压、流率和设备真空度、温度等参数进行实时监测。

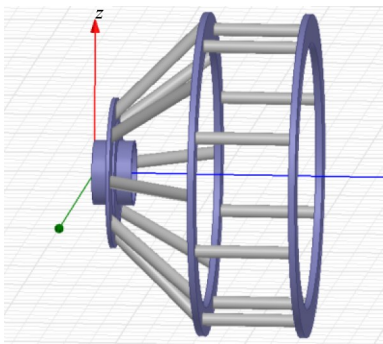


Fig. 4 Structure chart of magnetic ring of LIPS-200 ion thruster

2.5.3 阳极壁面探针诊断系统

阳极壁面平面探针实物图如图 5 所示,探针头部为直径为 12mm 的钨片,由直径 2mm 的螺钉螺接连接插件,接插件另一端连接探针信号线,输出诊断电流。选取 LIPS-200 离子推力器磁极附近四个测量点,为了方便安装探针装置,测量点距离相应极靴 14mm,探针上表面距离阳极壁面距离为 0.4mm,在选取点进行打孔,探针信号线由阳极壁侧面所打孔的位置引出,阳极壁与连接线之间使用陶瓷隔离。离子推力器供电线与探针信号线均由真空舱壁的法兰盘接出,探针信号线由数据采集系统进行采集。

图 6 为探针扫描电源及数据采集系统,阳极回线(屏栅)作为离子推力器的阴极地,与扫描电源的负端连接,使得扫描电源悬浮在屏栅电势之上,扫描电源正端与平面探针连接,测量平面探针输出电流信号,因此放电室外电路、探针、等离子体构成了一个

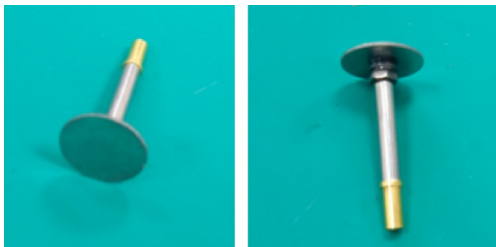


Fig. 5 Photos of the anode wall planar probe



(a) Scanning power supply (b) Data acquisition system

Fig. 6 Probe scanning power supply and data acquisition system

电流回路。数据采集系统可以设置扫描电压范围,扫描时间,将探针诊断的电压信号和电流信号采集入计算机系统,形成探针 I/V 特性曲线。

3 试验结果与分析

3.1 试验开展

试验以 LIPS-200 的额定工况为基准,并同时开展阳极壁面等离子体诊断工作。试验过程真空舱真空度保持在 10^{-3}Pa 以上,试验流程为:

(1)真空舱抽到合适真空度后,对阴极进行预处理,然后将主阴极流率设置为 0.096mg/s ,阳极流率设置为 0.833mg/s ,对放电室进行预处理。

(2)设置阳极电流为 4.8A ,放电室点着之后,使用探针扫描电源采集平面探针的 I/V 特性曲线,放电室工况参数如表 2 所示。

Table 2 Working conditions of LIPS-200 ion thruster discharge chamber

Parameters	Value
Main anode flow rate/(mg/s)	0.833
Main cathode flow rate/(mg/s)	0.096
Anode voltage/V	36
Anode current/A	4.8
Keeper voltage/V	14
Keeper current/A	0.6

3.2 数据处理与分析

为了降低探针的波动干扰影响,保证测试数据的可信度与准确性,本文选择同一工况下测量的五组数据的平均值进行曲线拟合,并使用误差棒表示五组数据的偏差情况。试验获取阳极壁面探针的 I/V 特性曲线如图 7 所示。

将探针的 I/V 特性曲线的 y 轴用对数刻度显示,在过渡段对曲线 $\ln|I| - V_B$ 进行最小二乘法拟合。阳

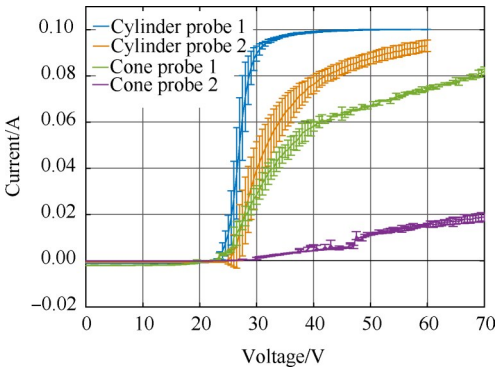


Fig. 7 I/V characteristic curves of four probes near anode wall

极壁面探针的 I/V 特性曲线及过渡区最小二乘法拟合
如图 8 所示。

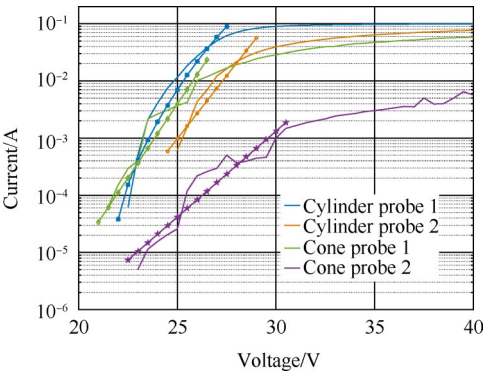


Fig. 8 Volt-ampere characteristics of the four probes and their least squares fitting curves

探针 I/V 特性曲线过渡区范围的选择会对等离子体电子温度的计算带来影响, I/V 特性曲线过渡区为 $V_f \sim V_p$, V_f 即为 $I = 0$ 处对应的电压值, 过渡区曲线斜率相对较大, 一般通过确定曲线的拐点确定 V_p 值。另外, 根据公式(8)知, 对于氩等离子体, 选取的范围满足 $\frac{|\Delta V_B|}{T_e} \approx 5.3$ 。结合以上两个原则, 尽可能降低因过渡区范围选取带来的计算误差。另外, 根据过渡区拟合直线与等离子体饱和电子电流段拟合直线的交点确定等离子体电势。由于测量饱和离子电流较小, 选择饱和电子电流段进行等离子体密度的求解计算, 即根据式(5)计算等离子体密度。选取探针电势为阳极壁面电势(放电电压)时的一组 (V, I) 值用来求解电流密度分布, 根据曲线计算得到阳极壁面各探针诊断等离子体参数如表 3 所示。

本试验选取阳极壁面 4 个主要特征点进行等离子体诊断, 测试得到 LIPS-200 离子推力器阳极壁面处主要磁极附近的等离子体密度范围为 $8.07 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} \sim 3.96 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 测试点的电子温度范围为 $0.82 \text{ eV} \sim 1.45 \text{ eV}$, 壁面电流密度范围为 $12 \text{ A/m}^2 \sim 829 \text{ A/m}^2$, 等离子体电势为 30V 左右。

锥段探针 1 处等离子体密度较其他位置高, 电子

能量也高, 对应壁面处的电流密度相比于柱段小, 这是由于放电室上游极靴处磁场强度较高, 其位置距离阴极顶较近, 从阴极出口发射的原初电子很容易被此处的强磁场约束, 能量较高的原初电子与中性原子电离, 使得此处等离子体密度相对较高。

锥段探针 2 处的电子能量较高, 但是等离子体密度偏低, 对应壁面处的电流密度很小, 表明此处壁面磁场将原初电子和二次电子较好地约束在阳极壁面。另外, 通过观察锥段探针 2 的 I/V 特性曲线发现, 当加在探针上的电压不断增加时, 电子电流并没有表现出明显的饱和趋势, 探针吸收饱和电流明显较其他三个探针低, 且过渡区的曲线存在较大的波动, 五组数据之间存在较大的偏差。分析原因一方面放电室锥段区域磁空区较小, 磁极强度较柱段高, 锥段近壁面磁场线与放电室对称轴存在夹角, 此处多种物理场耦合的作用下, 等离子体在锥段边界处运动过程较为复杂, 等离子体分布较为不均匀, 等离子体对探针产生较大的干扰; 另一方面可能是此处的探针表面受离子溅射较为严重, 探针受到污染。探针收集饱和电子电流较小, 分析原因可能是由于平面探针相对于壁面平行放置, 平面探针主要收集来自非平行壁面的的等离子体, 由于电场作用, 等离子体由锥段向栅极运动, 在锥段部分存在较大的横向漂移分量, 导致此处收集电流密度较小。

柱段存在较大的磁空区, 等离子体密度分布较为均匀, 柱段探针 1 处壁面的电流密度出现最大峰值, 柱段探针 2 处壁面的电流密度出现较大峰值, 而柱段等离子体电子温度相对锥段较小, 说明在柱段阳极壁面区域发生损失的电流主要是二次电子电流, 放电电流主要损失在中间极靴处, 电流密度较高区域产生更高的功耗, 产生更多焦耳热, 需要在中间极靴处加强部位的热防护。另外, 在屏栅极附近饱和离子电流较高, 这是由于放电室电场作用, 使得屏栅处离子密度较高。

Sengupta 等^[2-3]使用单探针对 30cm NSTAR 型离子推力器放电室内部较大区域径向等离子体进行诊

Table 3 Calculations of plasma parameters near anode wall

Probe	Cone probe 1	Cone probe 2	Cylinder probe 1	Cylinder probe 2
Plasma density/ m^{-3}	3.25×10^{16}	8.07×10^{15}	3.96×10^{16}	3.52×10^{16}
Electron temperature/eV	0.84	1.45	0.82	0.99
Plasma potential/V	28	32	28	29
Wall current density/ (A/m^2)	267	12	829	401
Floating potential/V	19.56	22.48	19.61	22.56

断。推力器放电室为3磁极磁场设计,最大磁场闭合线为50Gs。探针安装如图9所示,探针从阳极壁侧面进入放电室,定位在阴极顶下游1cm,2cm,3cm,4cm,6cm的锥段区域和10cm和14cm处的柱段区域。诊断结果见图10,NSTAR离子推力器阳极壁面处的等离子体密度相比于放电室中轴线上的阴极出口附近低2个数量级,在阳极壁面处等离子体密度一般为 $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} \sim 2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$,阳极壁面等离子体温度范围为1.5eV~3.5eV,试验误差来源主要为电子温度诊断的不确定度引起的,误差范围为20%~35%。

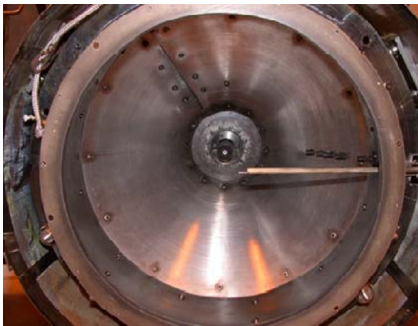


Fig. 9 Photograph of probe installation

通过与国外诊断结果进行比较,本次开展 LIPS-200 离子推力器放电室阳极壁面等离子体诊断试验结果与国外结果在量级上基本一致,本次试验诊断结果等离子体密度较 NSTAR 离子推力器阳极壁面稍高,电子温度稍低,分析原因主要为两者推力器口径存在差异、试验工况不同,且本次等离子体诊断试验选择磁极处,由于磁场约束作用,等离子体密度相对非磁极处高,磁镜作用使得测试点电离较多,从而电子温度较低。总体来说,诊断结果与国外具有一致性。

3.3 试验误差分析

试验误差主要包括系统误差、测量误差、数据处理误差三个部分。系统误差和测量误差主要来源于探针直径的测量误差、信号采集系统干扰误差等,此部分误差较小,控制在5%范围内;数据处理误差大约为10%~30%,主要是在对探针 I/V 特性曲线过渡区进行直线拟合的过程中,拟合直线斜率的倒数即是电子温度,拟合直线斜率对拟合范围选取比较敏感,而过渡区范围的选取,存在一定的不确定度,进而影响电子温度的计算结果。放电室阳极壁面等离子体诊断试验的测量不确定度如表4所示。

根据曲线计算得,在拟合残差内电子温度变化最大为0.4eV,等离子体密度的不确定性是由电子温

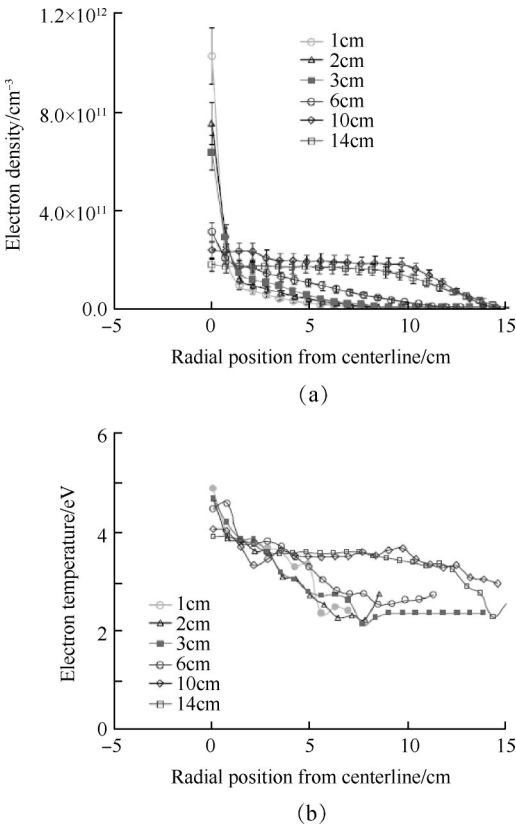


Fig. 10 Distribution of plasma parameters in discharge chamber of NSTAR ion thruster

Table 4 Uncertainty of measurement in plasma diagnostic experiment

Measuring parameters	Uncertainty
Probe current/mA	±0.1
Ion saturation current/mA	±0.01
Bias voltage/V	±0.1
Probe diameter/mm	±0.05
Discharge current/A	±0.1
electron temperature/eV	±0.4

度求解所带来的,等离子体电势的确定是由饱和电子电流段拟合直线与过渡段拟合直线的交点所确定,因此过渡段拟合范围的选取间接对等离子体电势的确定构成影响。

4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

- (1)在阴极极靴处,从阴极出口发射的原初电子很容易被锥段阴极极靴处的强磁场约束,原初电子大量聚集,使得锥段处等离子体电子能量相对较高。
- (2)在柱段区域,电流密度较高,而电子温度相对锥段较低,主要原因是在柱段阳极壁面的电子损失主要为二次电子。在柱段中间极靴位置,电流密

度出现较大的峰值,在屏栅磁极处电流密度达到第二个峰值,此处电流密度约为中间磁极处的50%。

(3)由于磁镜效应,电子主要在磁极处发生损失,且放电电流主要成分为电子电流,根据试验知柱段中间磁极处电流密度最高,因此阳极电流主要在放电室中间磁极附近发生损失,而电流密度较高区域产生更高的功耗,产生更多焦耳热,需要在该区域附近加强部件的热防护,防止推力器性能下降及寿命缩减。

参考文献:

- [1] Arakawa Y, Hamatani C. Analysis of Plasma Loss in a Ring-Cusp Ion Thruster[R]. *AIAA* 87-1079.
- [2] Sengupta A, Goebel D, Fitzgerald D, et al. Experimentally Determined Neutral Density and Plasma Parameters in a 30cm Ion Engine[R]. *AIAA* 2004-3613.
- [3] Sengupta A, Goebel D, Owens A G. Langmuir Probe Studies of Magnetic Confinement in an Ion Thruster Discharge Plasma[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 387-396.
- [4] Herman D A, Gallimore A D. Comparison of Discharge Plasma Parameters in a 30cm NSTAR Type Ion Engine with and Without Beam Extraction[R]. *AIAA* 2003-5162.
- [5] Herman D A, Gallimore A D. Discharge Chamber Plasma Potential Mapping of a 40cm NEXT-Type Ion Engine[R]. *AIAA* 2005-4251.
- [6] Yamamoto N, Tomita K, Sugita K, et al. Measurement of Xenon Plasma Properties in an Ion Thruster Using Laser Thomson Scattering Technique[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7).
- [7] Yamamoto N, Iwamoto M, Morita T, et al. Measurement of Electron and Neutral Atom Density Downstream of an Electric Propulsion[R]. *AIAA* 2016-5036.
- [8] Williams G J Jr, Smith T B, Domonkos M T, et al. Laser-Induced Fluorescence Characterization of Ions Emitted from Hollow Cathodes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(5): 1664-1675.
- [9] 叶超, 宁兆元, 江美福, 等. 低气压低温等离子体诊断原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] 王晓冬, 张杨, 王庆, 等. 朗缪尔探针低温低压等离子体诊断[J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(10): 995-997.
- [11] 菅井秀朗. 等离子体电子工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] Mahalingam S, Menart J A, Yongjun Choi, et al. Fully Coupled Electric Field/PIC-MCC Simulation Results of the Plasma in the Discharge Chamber of an Ion Engine[R]. *AIAA* 2011-6071.
- [13] Menart J A, Godar T, Ren Junxue, et al. Computational Speed-Up Techniques for a PIC-MCC Computer Model for Use in Modeling the Plasma in an Ion Engine Discharge Chamber[R]. *AIAA* 2014-3613.
- [14] 邹秀. 低温等离子体磁鞘特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [15] 邹秀, 刘惠平, 谷秀娥. 磁化等离子体的鞘层结构[J]. *物理学报*, 2008, 57: 5111-5116.
- [16] 吴立其. 弱磁场中探针特性实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.
- [17] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters[M]. *Pasadena: Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology*, 2008.
- [18] Lieberman M A, Lichtenberg A J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing[M]. *Hoboken: John Wiley & Sons*, 1976.
- [19] 顾左. 20cm Kaufman 氙离子推力器优化设计[D]. 兰州: 兰州空间技术物理研究所, 2008.

(编辑: 朱立影)