

小型感性耦合射频等离子体中和器的实验研究^{*}

贺建武^{1,2}, 马隆飞^{1,2}, 薛森文^{1,2}, 章 楚^{1,2}, 段 俐^{1,2}, 康 琦^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘 要: 为了研究适用于百瓦级电推力器的离子束流中和技术, 基于电子鞘层模型、射频等离子体最优放电技术和通过插入探针实现快速点火的方法, 设计了一套小型感性耦合射频等离子体中和器(RF plasma neutralizer, RPN)。实验研究了RPN中和器的稳定工作条件和电子引出特性, 实现了RPN中和器稳定工作和电子有效引出。实验结果表明: 电子引出特性主要取决于发射孔附近阳极斑的形成与否, 而阳极斑的形成又主要受结构设计、工质流量和偏置电压等运行条件的影响; 通过对RPN运行条件的优化试验, 获得了55~150mA可调电子束流范围和较高的工质利用系数(3.9~10.5), 满足离子束流中和需求; 另外, 实验中还观察到了电子束流随工质流量或偏置电压的迟滞现象。

关键词: 感性耦合等离子体; 中和器; 离子推力器; 空心阴极; 电子源

中图分类号: 439*.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 07-1673-08

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2018. 07. 028

Experimental Study of a Mini Inductively Coupled Radio-Frequency Plasma Neutralizer

HE Jian-wu^{1,2}, MA Long-fei^{1,2}, XUE Sen-wen^{1,2}, ZHANG Chu^{1,2}, DUAN Li^{1,2}, KANG Qi^{1,2}

(1. National Micro Gravity Laboratory, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the ion beam neutralization technology which is applicable to the electric thruster at the level of 100W, the mini inductively coupled radio-frequency plasma neutralizer(RPN) was developed. Electron sheath model and the optimal discharge techniques of RF plasma are used to design the neutralizer's structures and stable operating parameters, and the fast ignition is achieved by inserting a floating probe. Then, the electron-extraction characteristics of RPN neutralizer were studied experimentally. Thus, the RPN neutralizer achieve a better working stability and electron-extraction performances. The experimental results show that the electron-extraction performances mainly depend on the formation of anode-spot near the emission hole. However, the formation of anode-spot is mainly affected by the structural design, mass flow rates and bias voltage and other operating conditions. Through the optimization experiments of RPN neutralizer, the electron-extraction range of 55~150mA and working gas utilization factor of 3.9~10.5 are obtained. This satisfies the requirements of design. In addition, the hysteresis of electron-extraction current is observed with the regulation of mass flow rate or bias voltage.

Key words: Inductively coupled plasma; Neutralizer; RF ion thruster; Hollow cathode; Electron source

^{*} 收稿日期: 2017-06-26; 修订日期: 2017-08-26。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项B类(XDB23030300); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04078600)。

作者简介: 贺建武, 男, 博士生, 研究领域为电推进技术。E-mail: javehe@imech.ac.cn

通讯作者: 康 琦, 男, 博士, 研究员, 研究领域为微重力实验流体与电推进技术。E-mail: kq@imech.ac.cn

1 引 言

随着电推进技术的快速发展,电推力器已广泛应用于通信卫星平台、对地观测和空间科学探测等领域。同时,高效微型电推进技术也获得了微纳卫星的青睐,满足微纳卫星姿态与轨道控制、编队飞行和无拖曳控制等任务需求。由于多数电推进技术都采用加速带正电离子的方式获取更高的推进性能。这就需要电子源装置(中和器)发射电子中和电推力器的离子束流,以保证卫星和电推进系统的正常工作。且考夫曼离子推力器和霍尔离子推力器等还需要电子源来实现等离子体的维持^[1]。因此,中和器是此类电推力器在轨运行的技术保障。

离子推力器、霍尔推力器和其它电推力器通常采用空心阴极作为其电子源和中和器^[1,2]。但空心阴极的缺点也很明显,其寿命严重受内置发射体材料腐蚀和蒸发速率的影响,对工质的纯度有严格的要求^[3]。此外,空心阴极的启动需要预先加热,通常超过两分钟,限制了推力器的快速点火,不符合某些空间任务对推力器快速点火的要求^[4,5]。当然,近年来也有多个研究团队发展了无加热器空心阴极,解决了电推力器迅速启动问题,大大提高了电推进系统的响应特性^[6]。但空心阴极在小电流模式工作时的性能并不理想,针对百瓦级及以下的电推力器,需要考虑其它中和技术^[7,8]。

近年来,无内置发射体等离子体阴极得到快速地发展。等离子体阴极首先需要在放电室内形成等离子体,然后在偏置电压的作用下,电子被引出发射孔。等离子体的产生方法也具有多样性,国际上研究较多的主要有容性耦合射频等离子体(Capacitively coupled plasma, CCP)^[9]、感性耦合射频等离子体(Inductively coupled plasma, ICP)^[10~14]、微波等离子体(Electron cyclotron resonance, ECR)^[15~17]和螺旋波等离子体等^[5]。其中,ICP射频等离子体密度要高于CCP,效率也比ECR要高,而且无内置发射体材料和永磁装置,其寿命有可能比空心阴极更长。此外,没有预加热的过程,可以实现快速点火,从而大大缩短了电推进系统进入稳定工作状态的时间。感性耦合射频等离子体的产生方法非常简单,结构紧凑、可操作性强,且能在较小的功耗和工质流量下产生高密度等离子体,被认为是比较理想的等离子体产生方法^[14]。然而,国外关于射频中和器的研究主要集中在大电子束流(>1A)的引出方面。对于小型射频中和器的研究相对较少,且存在功耗偏高、效率偏低等

问题。

射频等离子体中和器(RF plasma neutralizer, RPN)的关键技术在于快速与可靠的点火技术、射频等离子体最优放电技术和电子有效引出机制研究。本文提出插入悬浮探针并利用离子加速电源击穿工质气体的方法实现快速、可靠的点火。根据研制射频离子微推力器的经验和已掌握的射频等离子体最优放电技术,给出了RPN中和器最优放电参数,并进行了实验验证。本文研究的重点是在射频等离子体形成之后,深入研究电子引出机制,电子束流出现突变、饱和及迟滞等现象的原因。

2 感性耦合射频等离子体中和器原理

感性耦合射频等离子体是一种仅靠吸收从射频线圈耦合而来的射频能量即可维持自持放电的等离子体源。在低功率和小工质流量时也能维持自持放电,且等离子体的密度高达 $10^{16} \sim 10^{18} \text{m}^{-3}$,具有较高的电子束流抽出密度,其工作原理如图1所示。一般来说,射频中和器的点火方式主要是通过施加较高的射频功率和较大的气流量,当达到射频E型放电的要求时即可点火成功,并迅速转换到H型放电模式^[18]。待等离子体稳定工作后,在离子收集极和阳极板间施加偏置电场后,等离子体中的电子将被高速喷出,而离子向收集极加速运动,并与收集极表面碰撞,发生复合反应。复合后的中性原子进入鞘层或等离子体区域后将会被再次电离,周而复始。这也是中和器的工质利用率能够达到百分之几百到几千的原因,即单个中性原子从进入放电室到离开放电室的过程中可以被重复电离几次到几十次之多。实验中,图1所示的阳极板被用来代替离子推力器的离子束流。当中和器电子发射孔接近离子束时,在两者之间将会形成等离子体桥,即电子将从中和器中被加速抽出,进入离子束羽流区,起到中和离子束流的作用。因此射频中和器也被称之为射频等离子体桥中和器。

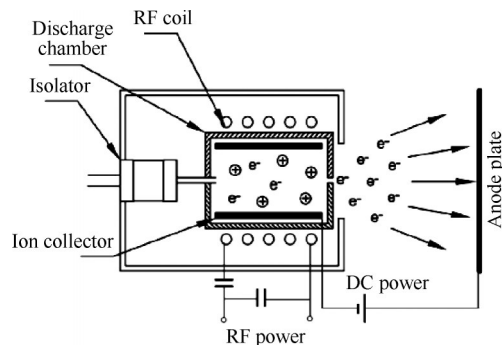


Fig. 1 Schematic of ICP neutralizer

射频中和器的电子发射能力主要取决于等离子体部分和发射孔及加载在阳极板上的偏置电压,文献[13]从理论上详细分析了等离子体部分和偏置电压对电子发射特性的影响。当施加偏置电压后,电子被抽出的同时,等离子体的密度、电势分布和电子温度都将改变。随着偏置电压的增加,电子出射口形成很薄的一层辉光放电区,使得电子发射量也随之增加。当偏置电压增加到一个临界点时,等离子体状态发生突变,电子束流随之突变至一个较大的值。在电子发射孔上游将形成一近球形的高密度辉光等离子体区域,被称之为阳极斑^[19]。这意味着在放电室内部形成了两种等离子体,一种为射频等离子体(主等离子体),另一种为靠近电子出射孔的辉光等离子体,即阳极斑。阳极斑与主等离子体之间的鞘层结构有可能是电子鞘层也有可能是双鞘层,主要取决于阳极斑的大小。主等离子体区域的电子通过该鞘层结构进入阳极斑区域,再经过发射孔发射。这表明电子发射有效面积突然变成了阳极斑的表面积,而阳极斑的表面积远大于发射孔截面积,因此电子发射量会急剧增加^[20]。文献[13]对形成阳极斑后的等离子体和阳极斑电势分布进行了描述,如图2所示。

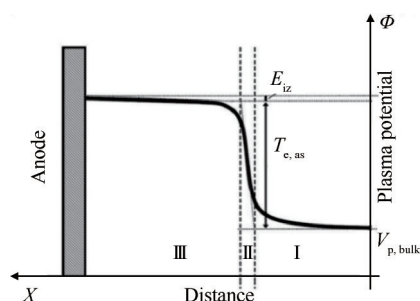


Fig. 2 Potential distribution between plasma and anode spot^[13]

从等离子体源到阳极板可分为三个区域,即等离子体区域、鞘层区域和阳极斑区域。等离子体区域的电势 $V_{p, bulk}$ 随等离子体密度的增加而变大,一般高于收集极(接地)电势 20V 以上,这也是偏置电压必须加到 20V 以上时中和器才有可能发射大量电子的原因。在双鞘层区域,当电子在此区域加速后获得大于工质第一电离能 E_{iz} 时,将会发生辉光放电现象,因此也称作辉光放电区域。而在阳极斑区域,其电势接近阳极板电势,这是因为在辉光放电区域和阳极板之间形成了等离子体桥,等离子体桥中电子温度为 $T_{e, as}$,因此等离子体的电势可以表示为

$$V_{p, bulk} = V_{anode} - E_{iz} - T_{e, as} \quad (1)$$

主等离子体的悬浮电位还可以表示为^[21]

$$V_{p, bulk} = -\frac{T_{e, bulk}}{e} \ln \sqrt{2.3 m_e / M_i} \quad (2)$$

式中 $T_{e, bulk}$ 为主等离子体电子温度, m_e 为电子质量, M_i 为离子质量。当阳极斑与主等离子体之间为双鞘层结构时,联合式(1)和式(2)可知,主等离子体区域内的电子温度随阳极电压的增加而升高,使得主等离子体密度和阳极斑变大,电子发射量随之增加。当阳极斑与等离子体之间为电子鞘层时,偏置电压对主等离子体电位的影响极小^[21]。

3 点火方案与实验装置

3.1 点火方案

感性耦合射频等离子体仅需几瓦到十几瓦的射频功耗和极小的工质流量即可维持自持放电,满足小型电推进系统对中和器电子发射的需求。然而,感性耦合等离子体的 E 型放电通常需要几个 mL/min (Standard-state cubic centimeter per minute) 的工质流量和几十瓦的射频功率输出才能点火成功^[12],这就对电源模块和流量控制模块的小型化带来困难。因此,必须改进感性耦合射频等离子体的点火方式。

本文提出一种基于高压击穿放电的方法,实现感性耦合等离子体在较低的射频功率和小工质流量情况下快速点火。如图3所示,在放电室进气端的适当位置插入一根钨丝探针,外置的一端连接高压电源。设定好工质流量和射频功率后,给钨丝探针施加一脉冲高压,当探针与接地离子收集极间击穿时将有大量的电子产生,在射频能量的驱动下即可瞬间实现感性耦合等离子体的点火。中和器点火后,将探针并联一个电容,电容一端接地,另一端接万用表,形成电位悬浮探针,用以判断中和器电子发射口附近等离子体鞘层从离子鞘层到双鞘层或电子鞘层的转变过程。此外,高压电源可直接利用电推进系统离子加速用的正高压或负高压电源,不需额外添加点火电源模块。中和器点火成功后,高压电源切换至离子推力器栅极系统,并引导中和器发射的电子进入离子推力器放电室进行点火。

3.2 实验系统

根据 Baalrud 等^[21]对电子轰击式等离子体源中阳极斑的形成条件,将 RPN 中和器的电子发射孔设计成满足电子鞘层条件的孔径。尽管两种等离子体的产生方式不同,并且阳极板的放置位置也不同,但

对于电子发射的过程大致相同,具有一定的参考价值。

阳极板附近鞘层的分类^[21]为

离子鞘层

$$\frac{A_E}{A_W} \geq \left(\frac{0.6}{\mu} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

电子鞘层

$$\frac{A_E}{A_W} \leq \mu \quad (4)$$

式中 A_E 指阳极板表面积,但在本文中 A_E 则指电子发射孔截面积, A_W 为放电室内表面积, $\mu = 2.3m_e/M_i$, 是电子与离子质量之比。由此可知,鞘层的类型还与工质类别有关。当 A_E/A_W 处于两个条件之间时,发射孔附近区域既不是单一的离子鞘层也不是单一的电子鞘层,而是形成了一种双鞘层结构,用以维持等离子体的准电中性特性。依据以上鞘层形成的分类和德国吉森大学对射频离子微推力器研究的经验总结^[22],并考虑到电子束流量的实际需求,中和器放电室尺寸设计为 $\Phi 10\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的陶瓷圆筒,电子发射孔径为 1mm ,并将其命名为 RPN-1。其发射孔面积与放电室内表面积之比满足形成电子鞘层的条件,可以形成阳极斑,从而实现较大电子束流的发射。

本实验研究所使用的真空罐可分为主舱和过渡舱。主舱尺寸为 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的方形罐体,安置了三台抽速为 2000L/s 的复合分子泵。过渡舱尺寸为 $\Phi 400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的圆筒,与主舱之间安装一插板阀,可以实现实验工况快速变更。中和器装在过渡舱,可通过电动位移台运送至主舱。中和器工作时,真空系统可维持 10^{-4}Pa 量级的真空度,完全满足实验要求。

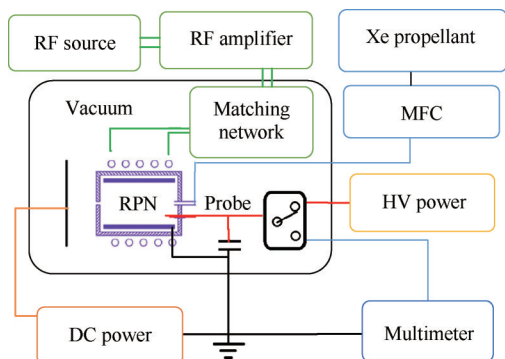


Fig. 3 Schematic of experimental system

射频等离子体中和器的实验系统如图3所示,射频电源系统为德国R&S公司生产的射频信号源、功率放大器和通过式功率计,输出功率 $1 \sim 200\text{W}$ 连续

可调,频率范围为 $9\text{kHz} \sim 250\text{MHz}$ 。自主研发的L型半自动匹配网络放置在真空罐内,以减少射频功率在电缆上的损耗,同时可通过远程计算机控制其匹配性能。L型匹配网络主要由两个可变电容组成,如图1所示,可采用先并后串的方式进行匹配。此时,仅有一个电容有谐振电流通过,热损耗较小。

本实验中使用Xe气作为工质,工质的高精度控制选用美国Alicate公司的微流量控制器,流量调节范围为 $0 \sim 1\text{mL/min}$,分辨力为 0.001mL/min 。探针通过双刀开关分别连接 $0 \sim 2\text{kV}$ 高压电源和6位半台式万用表,用以实现中和器在较低的射频功率和小工质流量下进行快速点火,并监测放电室内部等离子体鞘层的转变过程。偏置电源使用多台直流电源串联而成,可提供 $0 \sim 100\text{V}$ 电压输出,最大电流为 3A 。

4 实验结果与讨论

4.1 点火与稳定工作条件

感性耦合射频等离子体源的点火借助了射频离子微推力器的正高压电源。正高压电源通过双刀开关连接到悬浮探针,探针与离子收集极的间距设置为 1.5mm 。击穿电压与放电室内部压强有关,即工质流量越大,击穿电压越小。工质流量大于 0.02mL/min 时,等离子体都能够维持自持放电。而为了降低击穿电压以免损坏探针、收集极和高压电源,点火时可选则较高的工质流量。当工质流量为 0.2mL/min 时(中和器正常工作流量),击穿电压约为 500V 。一旦发生击穿就会瞬间产生大量的电子,在射频能量的驱动下迅速进入自持放电状态。若事先设置好稳定工作参数,则点火后立即进入稳定工作状态,但如何保证射频功率的耦合效率,达到最优放电性能,就需要从射频线圈的制作、射频频率和匹配网络设计等方面进行优化分析。

射频线圈采用直径为 2mm 的紫铜空心管绕制5圈,线圈的品质因素直接影响射频功率耦合效率。射频频率是影响射频功率耦合效率的一个关键因素,射频等离子体的趋肤深度随频率的升高而变小,即射频电磁波的穿透深度减小。过高的射频频率会导致较低的穿透深度,从而降低射频功率的耦合效率。穿透深度一般取放电室半径的一半左右为佳,文献[22]建议 1cm 射频离子微推力器的射频频率应选用 8MHz 。在本实验中也证实当射频频率在 8MHz 左右时的放电性能要优于 6.5MHz 和 9MHz 。

负载的阻抗在点火前后会稍有变化,需要通过微调匹配网络使之匹配。点火前,通过矢量网络分

析仪调试匹配网络,使负载在确定的频率下匹配至 50Ω 。点火后,放电室内产生的高密度等离子体与负载线圈形成互感电路,负载阻抗发生变化,因此需要再次微调匹配网络。但在实际应用中,携带可调电容是不大现实的,而负载阻抗又受等离子密度和电子束流等工作参数的影响,所以在后期实验中设计了另一种基于调频的射频功率匹配技术。这种技术仅需事先选定某一适中工况下匹配的电容值,然后通过自动匹配算法微调射频频率即可实现射频功率的自动匹配。

4.2 阳极斑形成条件

在射频等离子体进入稳定工作阶段后,给阳极板施加偏置电压 V_{Bias} 引出电子。电子束流首先随偏置电压的升高而缓慢增加,当 V_{Bias} 升至某一临界点时,电子束流突变到原来的几倍甚至十几倍。这是因为发射口附近的电子能量达到了工质电离能,将产生大量辉光放电现象,从而在发射口附近形成阳极斑。在阳极斑区域伴有闪亮的辉光,代表其等离子体密度远高于主等离子体密度。图4(b)和(c)所示的白色光斑即为辉光等离子体沿发射孔外延而形成的高密度辉光等离子体区域,这也可以作为判断阳极斑形成与否的标志。

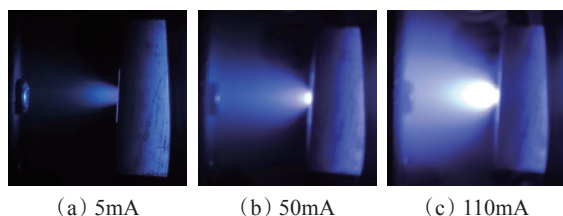


Fig. 4 RPN-1 electron beam current emission

从较弱的辉光放电突变成阳极斑的偏置突变电压 $V_{\text{C,Bias}}$ 与工质流量 Q 成反比关系,即发射口处的气压越高,偏置突变电压越低,如图5所示。因为随着气压的增加,辉光放电区域的电离速率加快,当此区域的离子密度与电子密度大致相等时即可形成新的等离子体。

在给定射频功率和偏置电压时,增加工质流量至某一临界值,电子束流 I_e 突然增至原来的10~20倍,如图6所示(“+”代表工质流量上升模式,“-”代表工质流量下降模式)。因为在电子发射孔附近形成了阳极斑,因此电子束流发生突变。持续增加工质流量时,电子束流稍有增加,因为等离子体中电子密度会随放电室气压的升高而变大。而工质流量增加至 0.2mL/min 以上时,电子束流逐渐趋于饱和

($\sim 110\text{mA}$)。这是因为在有限的射频功率下,离子生成速率已经达到极限,等离子体密度不可能再高,甚至在更大的工质流量下,饱和电子束流值会减小。

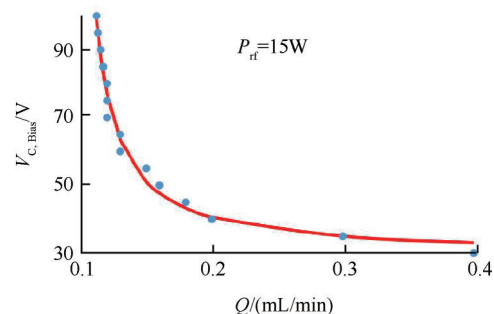


Fig. 5 Critical condition for the anode spot formation at RF power 15W

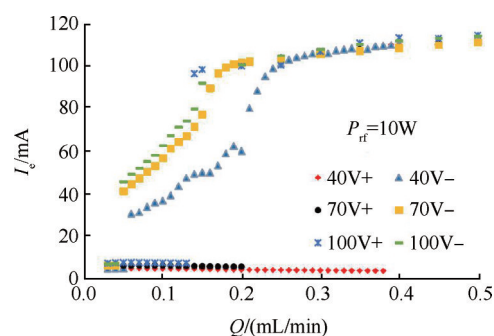


Fig. 6 Influences of mass flow rate and DC bias voltage on anode spot formation

阳极斑形成后,将工质流量下调至临界条件以下时,阳极斑还能维持,一直到小于 0.06mL/min 时,阳极斑才消失,且电子束流随工质流量的下降而减小。这种电子束流与工质流量的迟滞现象可用于控制电子束流大小,以节约工质。此外,图6中实验结果表明,放电室气压足够大时,电子束流饱和值不随偏置电压的增加而变大,偏置电压的增加也不影响阳极斑的消失,仅影响阳极斑的形成。

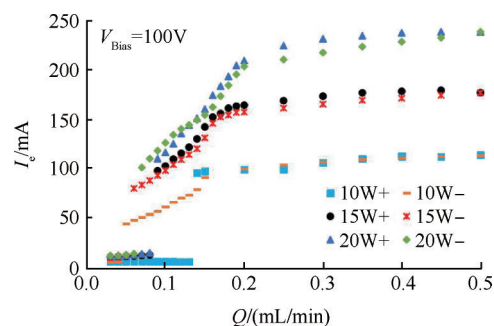


Fig. 7 Influences of RF power on anode spot formation and electron-extraction performance

电子束流会随工质流量的增加达到饱和,主要原因是等离子体源所吸收的功率受到限制,那么增

加射频功率应该能够获得更高的电子束流饱和值。如图7所示,给定偏置电压为100V,射频功率输出分别设置为10,15和20W时,电子束流与工质流量的关系。实验结果表明,工质流量足够大时电子束流饱和值与射频功率成线性关系,饱和值分别为114,177和239mA。此外,射频功率越高,阳极斑形成的临界工质流量越低,阳极斑消失和电子束流出现饱和所对应的工质流量却变大。

4.3 I - V 特性

在等离子体形成后,随着偏置电压的增加,电子发射孔附近最先形成很薄的一层辉光放电区域。当偏置电压增至 $V_{c,Bias}$ 时,辉光放电区域一下突变为一个球状辉光等离子体源,它从主等离子体区域抽取电子,并通过发射孔发射出去。新的等离子体源一旦形成后仅需鞘层电势差达到第一电离能即可维持,这就是 I - V 特性图中阳极斑随偏置电压上升、下降时出现迟滞现象的原因。如图8所示,在工质流量为0.15mL/min和0.2mL/min时都有明显的迟滞现象,而较低的工质流量需要更高的偏置电压才有可能形成阳极斑,所以在图中没有体现出迟滞现象。

在阳极斑形成后,电子束流随偏置电压的上升线性增加,因此同样可以通过调节偏置电压来改变电子束流的大小。当偏置电压高于某一临界值(与等离子体密度相关)时,电子束流逐渐趋于饱和,是因为电子密度和阳极斑尺寸的限制,使得进入阳极斑区域的电子达到饱和。此时,可通过增大工质流量和射频功率来提高电子密度,从而获得更大的电子束流。

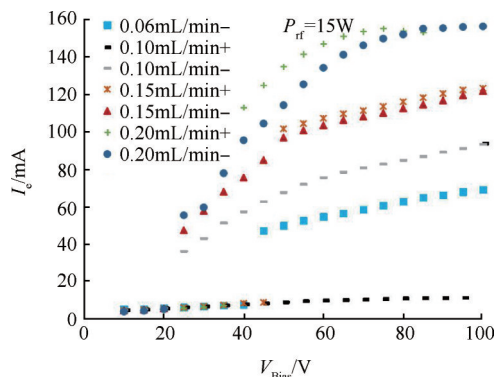


Fig. 8 I - V characteristics for RPN-1 at different propellant mass flow rate

4.4 工质利用系数与电子发射功耗

工质和电能太空中都是有限的资源,所以中和器的工质利用系数和总功耗就成了评价其性能的关键参数。工质利用系数即指Xe原子在放电室内被

电离与复合的平均次数,而1mL/min 氙气的当量电流约为71.4mA,所以对于氙气,工质利用系数可以表达为

$$\eta_m = \frac{I_e [\text{mA}]}{71.4 [\text{mA}/(\text{mL}/\text{min})] \cdot Q [\text{mL}/\text{min}]} \quad (5)$$

工质利用系数和偏置电压及射频功率的关系如图9所示。在阳极斑将要消失时的工质利用系数最大,且随射频功率和偏置电压的增加而变大。这也表明对于定量的电子束流,工质利用系数越高,总功耗 P_{total} (射频功率与偏置电源输出功率之和)越大,因此需要根据任务需求合理选择电子束流引出特性参数。选择工质流量为0.2mL/min和射频功率为15W时,调节偏置电压(25~75V)可获得55~150mA可调电子束流范围(见图10),满足百瓦级离子推力器离子束流中和任务需求。此时,中和器总功耗为16.4~26W,工质利用系数为3.9~10.5。

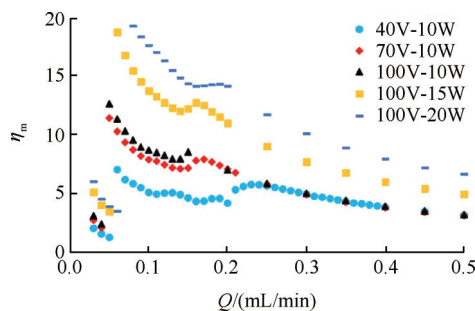


Fig. 9 Propellant utilization factor at different RF power and DC bias voltage

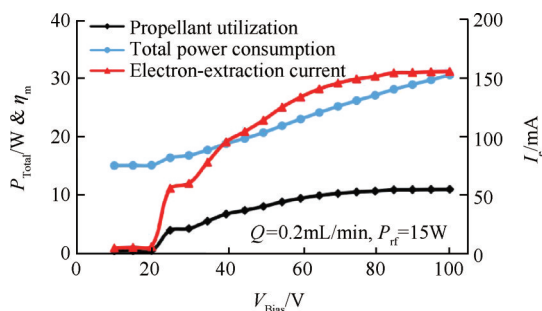


Fig. 10 Relationship between power consumption, electron-extraction current and bias voltage

4.5 悬浮探针电位

等离子体电势与偏置电压有较强的关联性,为使等离子体电势稳定,不随偏置电压的变化而发生较大的增幅,电子发射孔径通常需要设计在一个德拜长度的量级上。而全局非双极流模式是对电子发射孔径与放电室内表面积之比提出的限定要求。大多数情况下,两者往往是不能同时满足的,但本文所

设计的射频等离子体中和器同时满足这两个要求。等离子体在双极流模式和非双极流模式^[19]工作时都非常稳定,电子发射也就稳定,便于精确控制。

本实验中提出的悬浮探针即可以实现快速点火,还可以通过其悬浮电位 V_{probe} 来监测等离子体鞘层结构的转变,如图 11 所示。当电子发射孔前端为离子鞘层时,悬浮探针为负电位,等离子体密度越高,负电位越高,一般在 -1V 以内。而当形成阳极斑时,悬浮探针电位立即变为正电位,且随偏置电压的增加而缓慢变大。这是由于在双极流模式下,损耗在探针上的电子与离子流量基本相等,但由于电子的速度远高于离子,在探针附近的离子鞘层形成时会有更多的电子先损耗在探针上,因此探针的电位偏负值。形成阳极斑后,主等离子体区域内的大部分电子通过鞘层进入阳极斑,而离子几乎都损耗在收集极、器壁和探针上,这时悬浮探针获得的离子流量高于电子流量,因此显示正电位。悬浮探针正电位缓慢增加是由于偏置电压增加导致等离子体内部电子温度略微上浮。然而,悬浮探针的电位相对于偏置电压的变化而言几乎不变,这表明阳极斑与主等离子体区域之间的鞘层结构为电子鞘层。

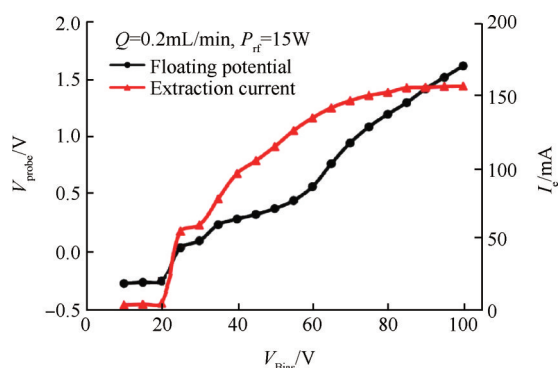


Fig. 11 Potential measurements of floating probe

5 结 论

本文研究了RPN中和器的快速点火技术和稳定工作条件,研制出一套适用于百瓦级离子推力器离子束流中和任务需求的小型RPN中和器试验样机。重点研究了试验样机的电子引出特性,形成结论如下:

(1)电子引出特性主要取决于阳极斑的形成与否,且阳极斑形成时的偏置突变电压与工质流量成反比。

(2)观察到了电子束流突变随工质流量或偏置电压变化时的迟滞现象,以及电子束流随工质流量

或偏置电压的增加而出现饱和的现象。电子束流饱和值随射频功率线性增加,而在阳极斑消失与达到饱和之前,电子束流与工质流量或偏置电压成近线性关系,这可用于电子束流大小的调控。

(3)电子束流未达到饱和之前,工质利用系数随射频功率和偏置电压的增加而变大。而对于定量的电子束流,工质利用系数越高,总功耗越大。

(4)利用悬浮探针不仅实现了感性耦合等离子体的快速点火,还能用以判断阳极斑的形成和消失以及阳极斑和主等离子体之间鞘层结构的类型。实验结果表明,阳极斑与主等离子体区域之间形成了电子鞘层,屏蔽了偏置电压对等离子体电位的影响,使电子束流具有较好的稳定性和可控性。

(5)实验中虽然获得了 $55 \sim 150\text{mA}$ 可调电子束流范围和较高的工质利用系数 ($3.9 \sim 10.5$),但相比于常规空心阴极,总功耗偏高,需要从发射孔和离子收集极的几何设计入手,进一步优化,并研究协同离子推力器工作时的中和性能。

参考文献:

- [1] Dan M G, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters [M]. USA: John Wiley & Sons Inc., 2008.
- [2] Oks E. Plasma Cathode Electron Sources: Physics, Technology, Applications [M]. USA: John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [3] Hatakeyama T, Irie M, Watanabe H, et al. Preliminary Study on Radio Frequency Neutralizer for Ion Engine [R]. IEPC-2007-226, 2007.
- [4] Dan L, Alon G, Mikitchuk D, et al. Development of a Low Current Heaterless Hollow Cathode for Hall Thrusters [C]. Hyogo-Kobe: Joint Conference of International Symposium on Space Technology and Science, International Electric Propulsion Conference and, Nano-Satellite Symposium, 2015.
- [5] Longmier B, Hershkowitz N. "Electrodeless" Plasma Cathode for Neutralization of Ion Thrusters [R]. AIAA 2005-3856.
- [6] 张 岩, 康小录, 乔彩霞. 一种无加热器的电推进用空心阴极[J]. 火箭推进, 2014, 40(2): 59-66.
- [7] Domonkos M T, Patterson M J, Gallimore A D. Low-Current, Xenon Orificed Hollow Cathode Performance for In-Space Applications [J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 19(3): 438-443.
- [8] 郭 宁, 唐福俊, 李文峰. 空间用空心阴极研究进展 [J]. 推进技术, 2012, 33(1): 155-160. (GUO Ning,

- TANG Fu-jun, LI Wen-feng. Advances in Spaceborne Hollow Cathode[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(1): 155-160.)
- [9] Weis S, Schartner K H. Development of a Capacitively Coupled Insert-Free RF-Neutralizer[R]. *IEPC-2005-086*, 2005.
- [10] Godyak V, Raitses Y, Fisch N J. RF Plasma Cathode Neutralizer for Space Applications [R]. *IEPC-2007-266*, 2007.
- [11] Temple J. The Radio Frequency Hollow Cathode Discharge Induced by the RF Discharge in the Plasma-Jet Chemical Reactor[J]. *Contributions to Plasma Physics*, 2010, 42(1): 119-131.
- [12] Scholze F, Tartz M, Neumann H. Inductive Coupled Radio Frequency Plasma Bridge Neutralizer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(2).
- [13] Jahanbakhsh S, Celik M. Theoretical Investigation and Modeling of Current Extraction from a Radio-Frequency Cathode[R]. *AIAA* 2014-3402.
- [14] Jahanbakhsh S, Satir M, Celik M. Study of Electron Current Extraction from a Radio Frequency Plasma Cathode Designed as a Neutralizer for Ion Source Applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2).
- [15] Hidaka Y, Foster J E, Getty W D, et al. Performance and Analysis of an Electron Cyclotron Resonance Plasma Cathode[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2007, 25(4): 781-790.
- [16] 梁 雪, 杨 涓, 王雲民. 电子回旋共振中和器内静磁场及微波电磁场的数值计算[J]. *推进技术*, 2014, 35(2): 276-281. (LIANG Xue, YANG Juan, WANG Yun-min. Numerical Computation of Static Magnetic and Microwave Electromagnetic Fields in Electron Cyclotron Resonance Neutralizer [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(2): 276-281.)
- [17] Weatherford B R, Foster J E, Kamhawi H. Electron Current Extraction from a Permanent Magnet Waveguide Plasma Cathode [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(9).
- [18] Chabert P, Braithwaite N. Physics of Radio-Frequency Plasmas [M]. *UK: Cambridge University Press*, 2011: 246-253.
- [19] Baalrud S D, Longmier B, Hershkovitz N. Equilibrium States of Anodic Double Layers[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2009, 18(3).
- [20] Weatherford B R, Barnat E V, Foster J E. Two-Dimensional Laser Collision-Induced Fluorescence Measurements of Plasma Properties near an RF Plasma Cathode Extraction Aperture[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2012, 21(5).
- [21] Baalrud S D, Hershkovitz N, Longmier B. Global Non-ambipolar Flow: Plasma Confinement Where All Electrons Are Lost to One Boundary and All Positive Ions to Another Boundary [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(4).
- [22] Loeb H W, Schartner K. Development of RIT Microthrusters [C]. *Vancouver: 55th International Astronautical Congress*, 2004.

(编辑:史亚红)