

# 钨钨空心阴极放电等离子体特性实验研究

张 岩, 康小录, 乔彩霞  
(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 空心阴极作为电推力器的核心部件之一, 其放电等离子体特性对空心阴极的性能和可靠性具有决定性的作用。采用实验的方法, 使用朗缪尔静电探针置于钨钨空心阴极放电出口处, 诊断和分析了钨钨空心阴极出口处的放电等离子体特性随阴极推进剂流量和放电电流的变化规律, 结果表明: 阴极推进剂流量和放电电流对空心阴极放电等离子体特性具有比较明显的影响, 各等离子体参量随阴极推进剂流量和放电电流均有明显的变化, 其中, 电子数密度随阴极推进剂流量和放电电流的增大而上升, 等离子体电势随阴极推进剂流量和放电电流的增大而下降, 电子温度随阴极推进剂流量的增加而下降, 随放电电流的增大有略微升高, 而且, 放电电流对放电等离子体特性具有更显著的影响。

**关键词:** 电推力器; 钨钨空心阴极; 朗缪尔静电探针; 等离子体特性

**中图分类号:** V439<sup>+</sup>.2-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 05-0055-06

## Experimental investigation for discharge plasma properties of BaW hollow cathode

ZHANG Yan, KANG Xiao-lu, QIAO Cai-xia

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** As a key part of electric thruster, its hollow cathode discharge plasma properties decide its performance and reliability. In the experiments, a Langmuir Probe was placed at the BaW hollow cathode orifice to diagnose and analyze the variation of discharge plasma properties at the BaW hollow cathode orifice with the propellant flow and discharge current. The experiment results show that the propellant flow and discharge current have an obvious effect on discharge plasma properties, and each plasma parameter has an obvious change with the propellant flow and discharge current. Concretely speaking, the electron density increases with the increase of propellant flow and discharge current, the plasma potential decreases with the increase of propellant flow and discharge current, and the electron temperature reduces with the increase of propellant flow but increases a little bit with the increase of discharge current. The discharge current has more obvious effect on the plasma properties.

**Keywords:** electric thruster; BaW hollow cathode; Langmuir probe; plasma property

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-05-29

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY12)

作者简介: 张岩 (1988—), 男, 工学硕士, 研究领域为空间电推进技术

## 0 引言

电推力器由于具有较高的比冲和较大的推力功率比,在美国、俄罗斯和欧洲等国得到越来越多的应用,主要执行 GEO 卫星的位置保持和深空探测主推进等任务<sup>[1-5]</sup>。空心阴极作为电推力器核心部件之一,一方面为电推力器的点火和稳定放电提供源源不断的电子,同时用来中和推力器喷出的放电羽流。不仅空心阴极的放电性能对电推力器的性能有重要影响,而且空心阴极的寿命和可靠性,对电推力器的工作寿命和可靠性也具有决定性的作用<sup>[6-7]</sup>。而空心阴极的放电羽流会对其放电电极和内部结构长期溅射腐蚀,成为制约空心阴极寿命的关键因素。美国 NASA 格林研究中心进行的 2 000 h 寿命试验也验证了这种论断<sup>[8]</sup>。

虽然自 20 世纪 60 年代已开始空心阴极的研究<sup>[9]</sup>,但对空心阴极的内部放电物理机理的认识仍然有限。研究空心阴极的放电等离子体特性,不仅有助于进一步认识空心阴极的放电物理机理,而且可以深入研究放电羽流对放电电极和内部结构的溅射腐蚀机理。国外对空心阴极放电等离子体特性的研究比较早,美国的 Siegfried 和 Wilbur 于 1978 年便对汞推进剂空心阴极的放电等离子体特性进行了较为全面的实验研究,得到了空心阴极内部、触持极和阴极之间的区域内等离子体电势、电子温度和电子数密度的分布和变化<sup>[10]</sup>。1999 年,美国的 Williams 实验测量了空心阴极的放电羽流中氙离子的能量和速度分布特性,并对阴极的溅射腐蚀机理进行了分析<sup>[11]</sup>。2005 年,美国 NASA 联合推进实验室的 Kristina 使用两种空心阴极,1/4" NSTAR 主放电阴极和 1.5 cm NEXIS 主放电阴极,实验研究了空心阴极内部、外部放电羽流以及周围环境中的等离子体特性随空心阴极放电参数的变化<sup>[12]</sup>。但国内尚没有对空心阴极放电等离子体特性进行系统研究的公开报道。

为深入理解空心阴极的放电物理机理,本文针对国际上使用较为广泛的钡钨空心阴极,采用实验的方法,使用朗谬尔静电探针,测量并分析空心阴极的放电等离子体特性随阴极推进剂流量

和放电电流的变化。

## 1 空心阴极及实验装置

### 1.1 空心阴极

本文实验研究中使用的空心阴极是由上海空间推进研究所研制的钡钨空心阴极,其结构示意图如图 1 所示,主要组件包括发射体、阴极管、加热器、中间开孔的阴极顶板和触持极等。

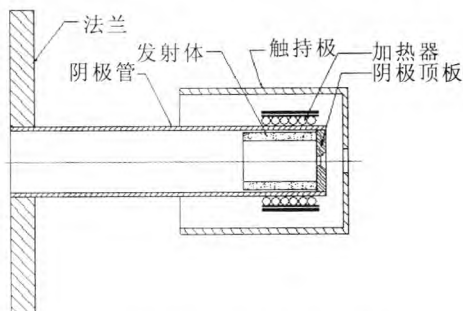


图 1 钡钨空心阴极结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of BaW hollow cathode

钡钨阴极的发射体由多孔钨浸渍铝酸盐,经特殊工艺制造而成,其中 BaO, CaO 和  $Al_2O_3$  的比例为 4:1:1,该种发射体工作温度为 1 100 ℃左右,发射电流密度最大可达 10 A/cm<sup>2</sup>。钡钨阴极的点火电压较低,所需加热功率较小,在点火电压为 100 V,加热功率约为 60~80 W,推进剂(氙)质量流率为 3.50 sccm 时,即可顺利点火,点火后很快进入稳定工作状态,放电电流可在 1~10 A 范围内调节。

### 1.2 朗谬尔静电探针

本实验中使用朗谬尔静电单探针对空心阴极放电等离子体的电子温度、电子数密度和等离子体电势进行诊断。朗谬尔单探针的典型结构如图 2 所示。探针电极直径为 0.8 mm 的钨棒,裸露在等离子体中长度为 10 mm,其余部分则被陶瓷或玻璃等包覆,电极导线从探针后端引出。

在实验中,朗谬尔单探针固定在空心阴极触持极小孔外部距离 6 mm 处。在进行等离子体诊断时,探针电极电位在 -30~+60 V 间变化,记录探针电极收集到的电流值。最终得到探针的伏安特性曲线,通过对探针的伏安特性曲线进行处理,

即可得到空心阴极放电等离子体的电子温度、等离子体电势和电子数密度。下面将给出等离子体参量的具体计算方法。

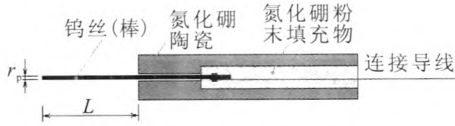
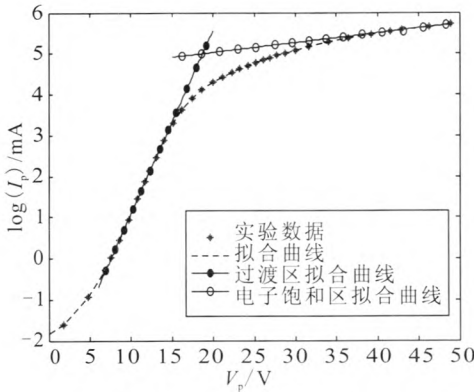
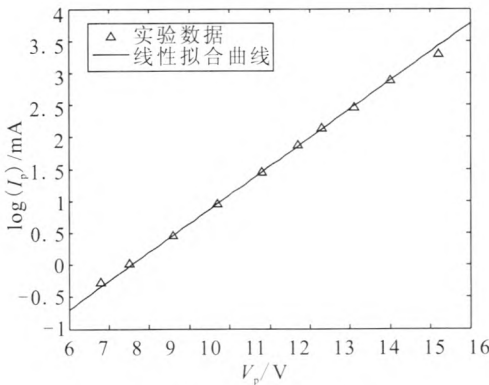


图 2 典型的朗缪尔单探针结构

Fig. 2 Structure of a typical Langmuir probe



(a) 探针半对数特性曲线



(b) 过渡区线性拟合曲线

图 3 朗缪尔单探针半对数特性曲线

Fig. 3 Semi-log characteristics of Langmuir probe

对得到的探针电流值取自然对数, 变换得到的伏安特性曲线, 称为探针的半对数特性曲线, 如图 3(a)所示。对探针的半对数特性曲线的过渡段进行线性拟合, 拟合直线如图 3(b)所示, 可以得到电子温度, 具体计算公式为

$$\frac{d(\ln I_p)}{dV_p} = \frac{e}{kT_e} \quad (1)$$

式中:  $I_p$  为探针电流;  $V_p$  为探针偏置电压;  $e$  为单位电荷;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T_e$  为电子温度。

在得到电子温度之后, 通过公式 (2), 可计算得到等离子体电势

$$V_p = V_i - \frac{T_e}{2e} \left[ \ln \left( 2\pi \frac{m_e}{m_i} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

式中:  $V_p$  即为等离子体电势;  $V_i$  为探针悬浮电位, 即探针收集电流为 0 时的探针偏置电压;  $m_e$  和  $m_i$  分别为电子和离子的质量。

在计算电子数密度时, 需要先得到电子饱和电流值  $I_{e0}$ , 该电流值可由图 3(a)所示的探针半对数特性曲线得到。在得到电子饱和电流值之后, 即可通过公式(3)计算得到电子数密度。

$$n_{e0} = \frac{I_{e0}}{eA} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{KT_e}} \quad (3)$$

### 1.3 实验装置

本实验所使用的实验系统配置示意图如图 4 所示。实验中, 均将空心阴极置于圆柱形不锈钢真空室中。真空室长 1.2 m, 直径 0.5 m。抽气采用一台抽速为 3 000 L/s 的低温泵作为主泵, 一台抽速为 4 L/s 的直连式机械泵作为前级泵的抽气方案。真空测量采用电阻规-电离规复合真空计, 测量范围从低真空到高真空。系统的空载极限真空度最高可达  $10^{-4}$  Pa。空心阴极工作时 (氩气质量流量为 0.5~6.0 sccm), 系统真空度约为  $7.5 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^{-2}$  Pa。

圆形阳极的材料为钨, 板置于空心阴极下游, 与空心阴极同轴, 阳极板和触持极间的距离为 35 mm, 如图 4 所示。

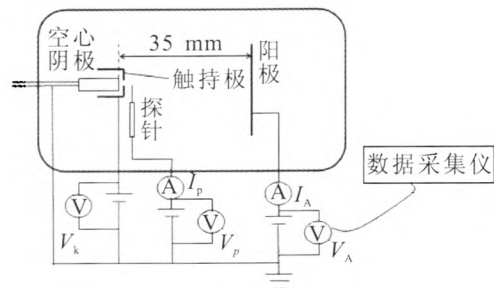


图 4 空心阴极实验结构示意图

Fig. 4 Experiment configuration of hollow cathode

空心阴极点火和工作所需的加热器电源、点火电源和阳极电源均使用恒压恒流源,所有电源均工作在恒电流模式;朗缪尔单探针扫描电源采用电流显示精度为 1 mA 的高精度稳压稳流源;实验使用氙气作为推进剂,纯度达到 99.998%;气体流量控制采用北京建中机器厂的 D07 系列高精度流量控制仪,测量控制范围为 0~10 sccm,精度为 $\pm 1\%$ 。

实验中,空心阴极对阳极板放电,调节空心阴极的放电参数,在固定的放电电流下,采集不同推进剂流量下的朗缪尔单探针伏安特性曲线,固定推进剂流量下,采集不同的放电电流下的朗缪尔单探针伏安特性曲线。对朗缪尔单探针的伏安特性曲线进行处理,得到空心阴极放电等离子体的各个特征参量随阴极推进剂流量和放电电流的变化曲线。空心阴极推进剂流量的调节范围为 0.8~5.5 sccm,放电电流的调节范围为 0.5~6 A。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 空心阴极等离子体特性随推进剂流量的变化

固定钨钨空心阴极的放电电流为  $I_a=2.5$  A,测得的空心阴极的放电等离子体特性随推进剂流量的变化如图 5 所示。

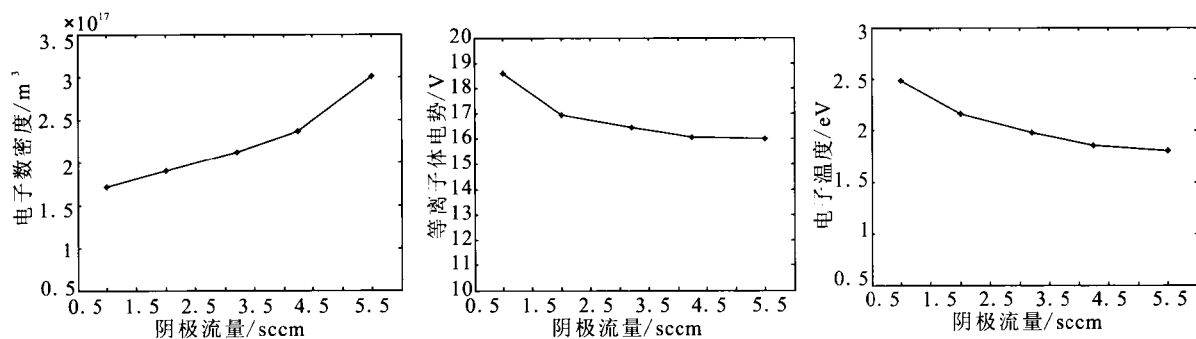
由图 5 可见,在固定的放电电流下,钨钨阴极的放电等离子体参量随推进剂流量的变化分别表现出了不同的趋势。

图 5(a)中的电子数密度随推进剂流量的增加而增大,但变化幅度较小,始终保持在  $10^{17} \text{ m}^{-3}$

量级。电子数密度增大的原因在于,推进剂流量增大,电子与中性气体原子的碰撞几率增大,碰撞电离效率增强。因此,阴极出口处的放电等离子体密度增大,电子数密度也相应增加。

图 5(b)中的等离子体电势随推进剂流量的增加而缓慢下降。等离子体电势与阳极收集的电子电流相适应的:放电电流不变时,阳极收集的电子电流也不变,推进剂流量增大,导致放电等离子体中的电子数密度增加;它一方面直接拉低了等离子体电势,另一方面由于放电电压会随推进剂流量的增大而降低;为收集到足够大的电子电流,等离子体电势就必须相应地降低,以利于电子通过等离子体向阳极运动。

图 5(c)的电子温度随推进剂流量的增大而降低。推进剂流量的增大,使电子与低速运动的中性气体原子的碰撞几率增加,电子的平均碰撞自由程减小,造成电子的能量损失较严重,从而使电子温度降低;另一方面,在推进剂流量较低时,电子与中性原子的碰撞几率较小,电离效率较低,阴极发射的大量电子在阴极出口附近集聚,形成空间电荷效应,空间电荷效应将抑制电子向阳极的运动,只有热运动速度足够大的电子才能越过该限制,因而在低推进剂流量时测得的电子温度较高,推进剂流量增大,电子与中性原子的碰撞电离效率增大,产生的离子束流足以中和上述空间电荷,使得热运动速度较低的电子也能够运动到下游等离子体中。因此,此时测得的电子温度就比较低。



(a) 电子数密度随推进剂流量的变化 (b) 等离子体电势随推进剂流量的变化 (c) 电子温度随推进剂流量的变化

图 5 钨钨阴极的等离子体特性随推进剂流量的变化

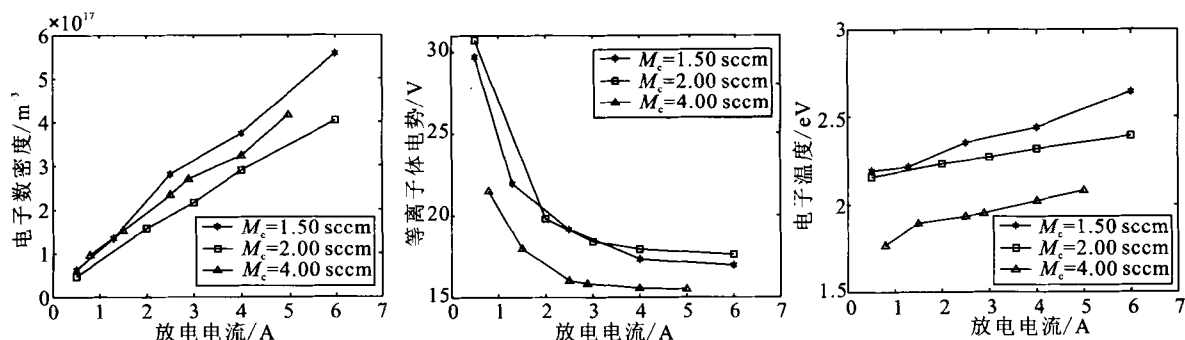
Fig. 5 Variation of BaW hollow cathode plasma properties with propellant flow

通过以上分析,可以发现,空心阴极放电等离子体参量受阴极推进剂流量的影响比较明显,电子数密度随阴极推进剂流量的增加而上升,同时,等离子体电势和电子温度则随阴极推进剂流量的增加而下降。

## 2.2 空心阴极等离子体特性随放电电流的变化

分别使钡钨空心阴极工作在流量 1.50 sccm, 2.00 sccm 和 4.00 sccm, 得到的空心阴极放电等离子体特性随放电电流的变化如图 6 所示。

由图 6 可见,当固定在不同的阴极推进剂流



(a) 电子数密度随放电电流的变化 (b) 等离子体电势随放电电流的变化 (c) 电子温度随放电电流的变化

图 6 钡钨空心阴极等离子体特性随放电电流的变化

Fig. 6 Variation of BaW hollow cathode plasma properties with discharge current

量点,空心阴极的各个放电等离子体参量随放电电流的变化规律是一致的,这也证明了2.1节中各等离子体参量随阴极流量变化的结论。因此,在以下分析空心阴极放电等离子体参量随放电电流的变化时,均在同一种阴极流量下进行。

如图6(a)所示,在推进剂流量固定的情况下,电子数密度随着放电电流的增大而上升,基本呈线性关系,变化幅度较大,但仍保持在 $10^{17} \text{ m}^{-3}$ 量级。放电电流增大,气体电离效率升高,等离子体密度也越来越高,因此电子数密度也就越来越大。

图6(b)中的等离子体电势随着放电电流的增大而下降,变化幅度较大,且在小电流阶段下降较快,电流较大时,则下降趋于平缓。原因在于,随着放电电流的增大,电子与中性原子碰撞电离次数增加,电离效率逐渐升高,等离子体中的电子数密度增大,从而使等离子体电势下降,特别在小电流阶段,放电等离子体较稀薄,随着放电电流增大,电子数密度增加相对较明显,因此在初始阶段等离子体电势下降较快;而放电电流较大时,放电等离子体密度较高,电子数密度增加则相对较不明显,而且,虽然电子与中性原

子的碰撞次数增加,但由于等离子体密度较大,电子的平均自由程较小,碰撞电离的效率反而下降,因此等离子体电势的下降逐渐趋于平缓,基本稳定。

图6(c)中的电子温度随着放电电流的增大而缓慢升高,但受放电电流的影响较小,电子温度的变化幅度仅为0.4 eV。等离子体的电子温度是与放电电压和电子的平均自由程密切相关的,根据气体放电理论,电子的平均碰撞自由程约为真空室中中性气体平均碰撞自由程的5.7倍<sup>[13]</sup>,而中性气体的平均自由程又与真空室内的气体密度成反比<sup>[14-15]</sup>。本实验过程中,推进剂流量固定不变,真空室内的真空度则保持不变,因此,电子在中性气体中的平均自由程基本保持不变,影响电子温度的主要因素便为放电电压,而放电电压随放电电流的增大,有上升趋势,使得电子受到的加速电压相应增大,电子的平均热运动速度升高,因此电子的温度也就相应有平缓的上升。由于放电电压在放电电流变化范围内,比较平稳,变化比较平缓,因此,电子温度的变化也就比较小。

通过以上分析,可以发现,放电电流对空心

阴极放电等离子体参数的影响也是比较明显的,而且比阴极推进剂流量的影响更加显著。

### 3 结论

通过实验的手段,诊断并详细分析了空心阴极出口处附近的放电等离子体特性随阴极推进剂流量和放电电流的变化规律。通过对实验结果进行分析,得出以下结论:

1) 阴极推进剂流量和放电电流对空心阴极的放电等离子体特性均具有比较明显的影响,各等离子体参数均有比较明显的变化;

2) 放电电流对空心阴极放电等离子体参数的影响比阴极推进剂流量的影响更加显著。

#### 参考文献:

- [1] WILLIAMS G J. Near-field plasma characteristics of a 15 A hollow cathode via laser diagnostics, AIAA-2002-2192 [R]. USA: AIAA, 2002.
- [2] GÉRARD O, BERGER G. Eurostar E3000 in-flight experience, AIAA-2006-5380[R]. San Diego, USA: AIAA, 2006.
- [3] GOEBEL D M, MARTINEZ-LAVIN M. Performance of XIPS electric propulsion in on-orbit station keeping of the Boeing 702 spacecraft, AIAA-2002-4348[R]. USA: AIAA, 2002.
- [4] RENAULT H, SILVI M, BOHNHOFF K, et al. Electric propulsion on ARTEMIS: a development status, ESA SP-398[R]. Noordwijk, Holland: ESA, 1997.
- [5] KHODNENKO V P. Activities of VNIIE in EPT field history, our days and prospects, IEPC-2013-65[R]. USA: IEPC, 2013.
- [6] DEL AMO J G. European space agency activities in electric propulsion, IEPC-2013-37[R]. USA: IEPC, 2013.
- [7] HOSKINS W A, CASSADY R J, MYERS R M, et al. 30 years of electric propulsion flight experience at aerojet rocketdyne, IEPC-2013-439[R]. USA: IEPC, 2013.
- [8] DOMONKOS M T. Investigation of keeper erosion in the NSTAR ion thruster, IEPC-01-308[R]. USA: IEPC, 2001.
- [9] DOMONKOS M T. Evaluation of low-current orificed hollow cathodes[D]. Michigan, US: The University of Michigan, 1999.
- [10] SIEGFRIED D, WILBUR P. An investigation of mercury hollow cathode phenomena, AIAA-1978-0705[R]. USA: AIAA, 1978.
- [11] WILLIAMS G J, Jr. Characterization of the FET-2 discharge cathode plume, IEPC-99-104[R]. USA: IEPC, 1999.
- [12] JAMESON K K, GOEBEL D M. Hollow cathode and thruster discharge chamber plasma measurements, IEPC-2005-269[R]. USA: IEPC, 2005.
- [13] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [14] 丘军林. 气体电子学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [15] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.

(编辑: 陈红霞)