

# 钨钨空心阴极等离子体放电模式实验研究

张 岩, 康小录

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 主要通过实验的手段, 系统研究了钨钨空心阴极的等离子体放电特性及其工作模式。实验中, 使空心阴极工作在三极管构型下, 调节相应的放电参数, 详细分析钨钨空心阴极放电特性的变化规律、存在的放电模式及其转化规律。最后得到结论: 钨钨空心阴极放电表现为羽毛状、亮斑状和弥漫状等 3 种典型的工作模式; 不同放电模式可以用放电电流、放电电压及其振荡特性进行判定和区分; 随着放电参数的变化, 几种放电模式之间可以相互转化。

**关键词:** 钨钨空心阴极; 等离子体放电; 工作模式

**中图分类号:** V439-33    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0029-07

## Experimental investigation on plasma discharge modes of BaW hollow cathode

ZHANG Yan, KANG Xiao-lu

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

**Abstract:** The plasma discharge characteristics and different discharge modes of BaW hollow cathode are systematically studied via experiment in this paper. During the experiment, the relevant discharge parameters of hollow cathode working in triode configuration were adjusted, and the discharge characteristics, the possible discharge modes and the transition between different discharge modes of BaW hollow cathode were analyzed in detail. The conclusions that the BaW Hollow cathode has three distinct discharge modes (plume mode, spot mode and diffuse mode) were acquired at the end. The three modes can be clearly distinguished by the change of discharge current, discharge voltage and their oscillation characteristics. Furthermore, the transition among the three modes can be realized as the discharge parameter changes.

**Keywords:** BaW hollow cathode; plasma discharge; discharge mode

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-05-06

作者简介: 张岩 (1976—), 男, 工程师, 研究领域为航天发动机测控技术

## 0 引言

空心阴极是高效电子源,可用于霍尔电推进、离子电推进、等离子体接触器、等离子体减阻和隐身等领域<sup>[1-5]</sup>。不同应用场合,空心阴极的作用存在一定的差异。应用于离子推力器和霍尔推力器它的作用是启动放电和中和束流离子<sup>[1-2]</sup>;应用于等离子体接触器它的作用是建立阴极地与已充电表面的电连接桥<sup>[3]</sup>;对于等离子体减阻和隐身应用它的作用是建立具有一定密度和范围的等离子体<sup>[4-5]</sup>。因此,不同的应用领域对空心阴极的工作性能也有不同的要求。

空心阴极因结构和工作参数的不同,其等离子体放电存在几种不同的放电模式,如羽毛状模式(Plume mode)和亮斑状模式(Spot mode)。空心阴极工作在不同的放电模式,不仅影响空心阴极本身的放电性能和寿命,而且会因与被应用对象的耦合情况差异,对应用目标产生影响<sup>[6]</sup>。

国外在空心阴极放电模式研究方面开展了诸多工作<sup>[1,7-8]</sup>。Mandell 和 Katz 描述了空心阴极的两种工作模式:羽毛状模式和亮斑状模式<sup>[7]</sup>。Matthew 和 Callimore 等经实验研究提出:空心阴极工作在亮斑状模式下时,阴极的工作性能较好,功率消耗较小<sup>[8]</sup>。日本东京京都大学的 Shunsuke Sakai 通过空心阴极的三极结构类型试验,提出了一种新的空心阴极放电模式——弥漫状模式(Diffuse mode)<sup>[9]</sup>。研究空心阴极的工作模式,对分析阴极放电的内部物理过程、确定阴极工作点、进一步优化阴极与应用对象的等离子体耦合等都具有重要的意义。

本文对钡钨空心阴极开展放电模式实验研究,通过改变工作参数,观察阴极的放电特点,研究不同阴极放电模式下的电特性及其转化规律,为空心阴极的应用奠定基础。

## 1 空心阴极及其实验装置

### 1.1 空心阴极

本文实验中使用的空心阴极是上海空间推进

研究所研制的钡钨型空心阴极。其主要组件包括:发射体、阴极管、加热器、阴极顶板和触持极等。

空心阴极的发射体呈圆筒形,紧贴阴极管内壁和阴极顶板,由多孔钨浸渍铝酸盐经特殊工艺制造而成,其中 BaO, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比例为 4:1:1,该种发射体工作温度为 1100 ℃ 左右,发射电流密度最大可达 10 A/cm<sup>2</sup>。

阴极顶板中间开孔,发射体发射的电子在电场的作用下,经由阴极顶小孔向空心阴极外运动。阴极顶板紧靠阴极管端部侧面,可以减少等离子体对阴极管和发射体的直接溅射轰击。

加热器嵌套于阴极管的下端,用于加热发射体,使其达到足够高的温度,以产生热电子发射。为提高加热效率,在加热器外围加装数层热屏蔽钼箔。

最外部为封闭型的触持极结构,其作用是建立激发阴极等离子体放电的电场。封闭式触持极可以减小放电等离子体对阴极顶小孔、顶板和加热器的溅射腐蚀。触持极的开孔与阴极顶小孔同轴,直径相对较大。

该结构的空心阴极,发射电流可调节,范围为 1~10 A,点火电压和加热功率均较低,有良好的工作性能。

### 1.2 实验装置

实验系统配置如图 1 所示。

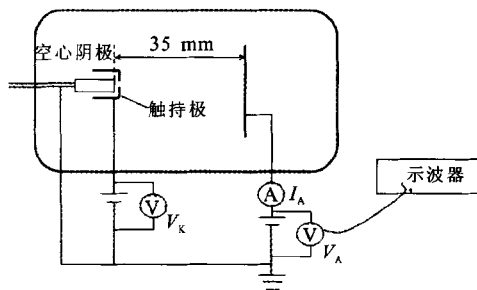


图 1 空心阴极实验系统示意图

Fig. 1 Schematic for experimental system of hollow cathode

实验中,空心阴极置于圆柱形不锈钢真空中。真空室长 1.2 m,直径 0.6 m。抽气采用 1 台抽速为 3000 L/s 的低温泵作为主泵,1 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 (氙气质量流量为 0.8~4.0 sccm) 的真空度约为  $7.5 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^{-2}$  Pa。

圆形钨阳极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 2 所示。

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调节模式; 使用泰克型示波器采集放电电压的波形, 采样率为 500 MHz; 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  $\pm 1\%$ 。

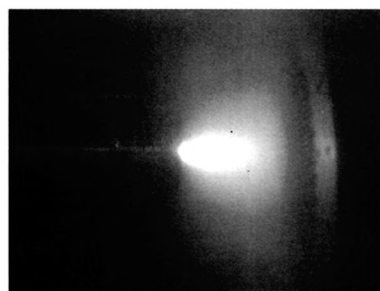
实验中, 主要采集不同阴极流率下, 放电电压值及其波动幅度随放电电流变化的波形, 放电电压的振荡频率随电流的变化。

阴极流率的调节范围为 0.8~4.0 sccm; 放电电流的调节范围为 0.5~10 A。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 空心阴极的放电现象

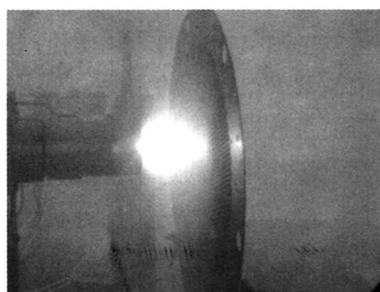
如图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)所示是本文实验得到的空心阴极放电的 3 种代表性的方式, 为了便于进行比较, 图 2(d)给出了实验配置情况。根据放电图像的特点, 通常将空心阴极的放电模式分别命名为羽毛状模式、亮斑状模式和弥漫状模式。



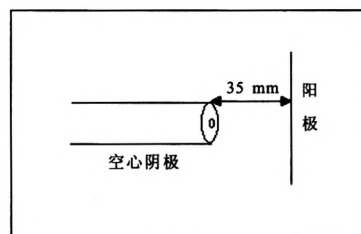
(a) 羽毛状模式



(b) 亮斑状模式



(c) 弥漫状模式



(d) 结构示意图

图 2 空心阴极不同放电模式的图像

Fig. 2 Different discharge modes of hollow cathode

当空心阴极的放电如图 2(a)时, 主放电亮区呈羽毛状, 并在阴极-阳极间隙内大范围扩展, 其放电伏安特性呈现高电压小电流特点。阴极工作在此模式, 较高的放电电压, 获得了较低的放

电电流, 对应的电子输出较少, 则作为电子源的阴极效率就低, 要获得大的电子输出, 就要维持更高的电压, 从而使得阴极与应用目标的耦合电位升高, 如作为霍尔推力器的应用, 阴极工作在

此模式, 离子的加速效率将会下降。

当空心阴极的放电如图 2(b) 时, 主放电亮区呈明显的亮斑状, 并且在阴极-阳极间隙内明显收缩, 其放电伏安特性呈现低电压大电流特点。阴极工作在此模式, 较低的放电电压就能获得较大的放电电流, 对应电子输出较多, 阴极与应用目标的耦合电位也较低。如对于霍尔推力器的应用, 工作在此模式下的离子加速效率较高, 是霍尔推力器阴极的最佳工作模式。

当空心阴极的放电如图 2(c) 时, 主放电亮区变得模糊, 并且放电弥漫于整个真空室, 其放电伏安特性呈现高电压大电流的特点。空心阴极工作在此弥漫状模式, 有利于等离子体对应用目标的包覆, 对于像等离子体减阻和隐身等方面的应用, 将具有一定的优势。

## 2.2 空心阴极工作模式的转变

实验所得到的空心阴极放电的伏安特性曲线如图 3 所示。

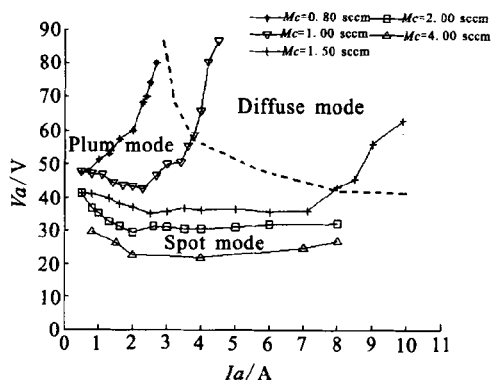


图3 钨钡空心阴极的伏安特性曲线

Fig. 3  $V-I$  characteristics of BaW hollow cathode

从图 3 可看出空心阴极放电伏安特性因推进剂流率的不同而呈现的不同的变化规律: 当推进剂流率足够大时, 即使放电电流大范围地变化, 放电电压也基本稳定在较低的电压值, 即阴极放电一直处于亮斑状模式; 而当推进剂流率较低时, 随着放电电流的稍微增加, 放电电压急剧升高, 阴极放电除起始小电流段为亮斑状模式外,

基本上处于羽毛状模式; 当推进剂流率介于上面两种情况之间时, 阴极放电在小电流区域表现为亮斑状模式, 在大电流区域则表现为弥漫状模式。

### 2.2.1 羽毛状模式到弥漫状模式的转变

图 4 给出了空心阴极推进剂流率为 1.00 sccm 时, 其等离子体放电由羽毛状模式向弥漫状模式转变的过程, 图 4(a) 截取的是不同放电电流下阴极放电的图象, 图 4(b) 是对应放电电压的波形。

由图 4 可见, 在保持推进剂流率不变的情况下, 随着放电电流的增加, 阴极的放电区逐渐扩展, 并且逐渐向阴极——阳极间隙外扩散, 最终弥漫到整个真空室。在从羽毛状模式向弥漫状模式转变的过程中, 放电电压值越来越高, 波动幅度也越来越大。

图 5 给出了放电电压振荡频率随放电电流的变化情况, 当空心阴极工作在羽毛状模式时, 振荡主频率均较低, 一般低于 100 kHz; 在由羽毛状模式向弥漫状模式的过渡区内, 振荡主频率明显升高, 达到 140 kHz 左右; 当空心阴极进入弥漫状模式后, 振荡主频率继续上升, 大多在 140 kHz 以上, 振荡比较严重。

在空心阴极放电中, 由于放电电压主要加于放电区域之间, 在放电电源工作在恒电流模式的情况下, 放电电压则主要与放电区域内的等离子体的等效电阻有关, 而等离子体的等效电阻是与区域内微观带电粒子的密度、输运特性等直接相关的, 而且放电电流也是由放电产生的带电粒子在极间电场作用下的运动形成的。因此, 放电电压、放电电流等的振荡, 均可归因于放电等离子体中的振荡。在放电等离子体中, 由于电子的运动速度远大于离子的运动速度, 因此等离子体中的低频振荡主要是由低速运动的离子产生的, 也称为离子振荡波。大量研究表明<sup>[1,9-10]</sup>: 等离子体振荡频率与离子温度的平方根成正比, 与等离子体的几何尺度成反比。在空心阴极由羽毛状模式过渡到弥漫状模式的实验中, 由于放电等离子体区的尺寸明显变大, 因此等离子体振荡频率升高的原因应该是离子温度升高所致。

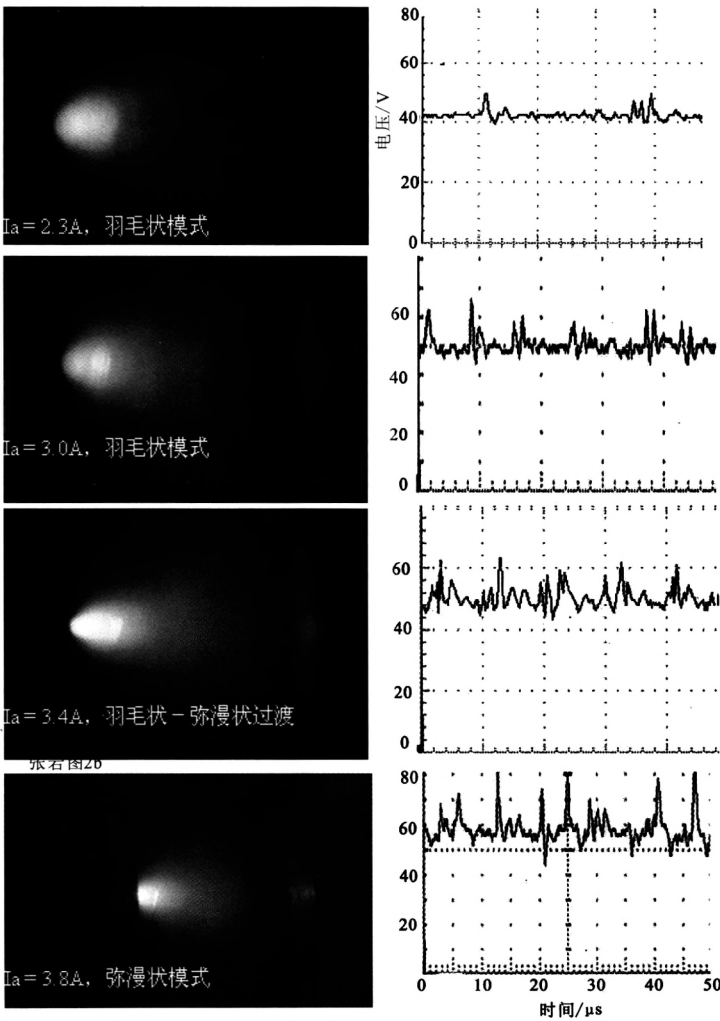


图 4 空心阴极由羽毛状模式向弥漫状模式转变

Fig. 4 Transition from plume mode to diffuse mode and corresponding discharge voltage characteristics

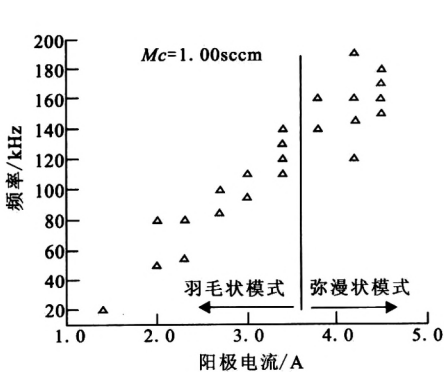


图 5 放电电压振荡频率随放电电流的变化

Fig. 5 Variation of discharge voltage oscillation frequency with discharge current

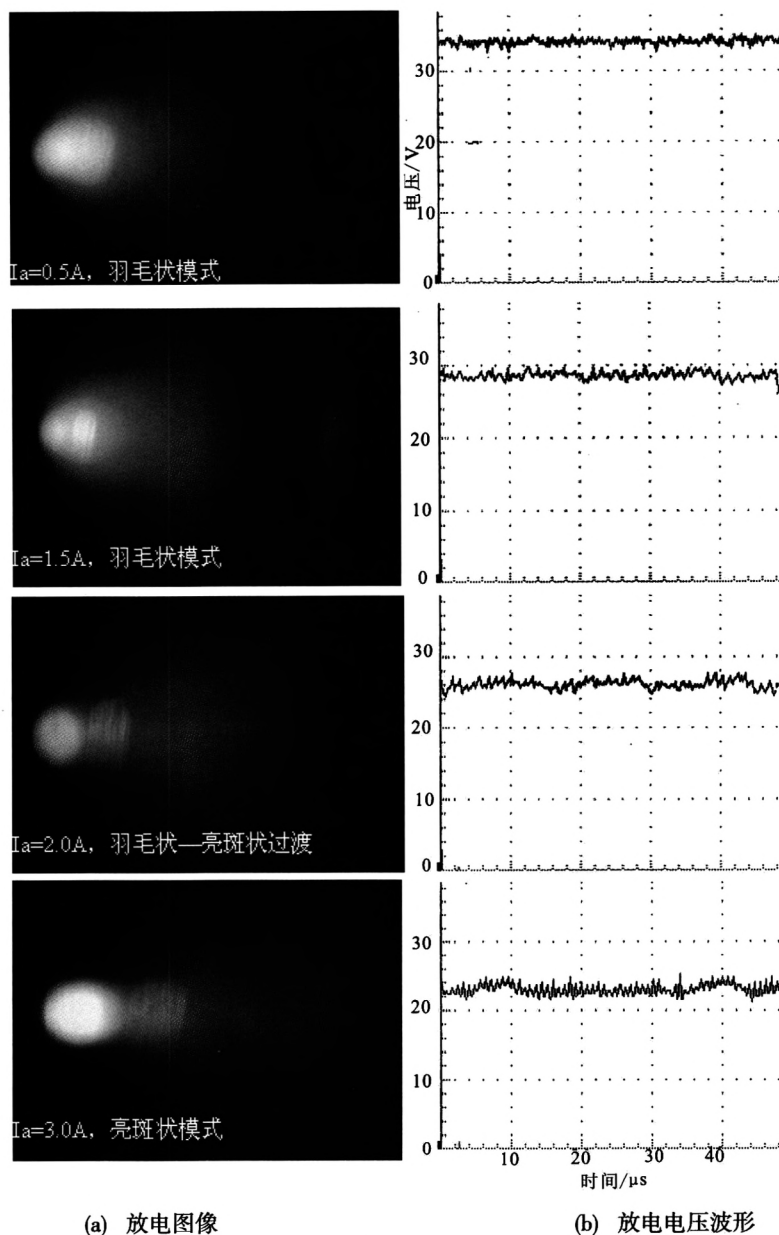
空心阴极弥漫状模式出现的原因至今尚未形成一套公认的理论解释, 但根据气体放电理论、实验数据以及试验现象, 可以推断, 空心阴极工作在弥漫状放电模式时, 是处于气体放电发展中, 由反常辉光放电向弧光放电过渡的阶段中, 在该阶段, 放电电压很高, 而放电电流则比较小, 放电比较不稳定。因此, 等离子体的振荡也就比较严重, 导致电压、电流的振荡都比较严重。该放电阶段的出现与空心阴极工作时的真空环境、放电等离子体的性质以及电极位形等因素密切相关。随着放电电流的增加, 空心阴极由羽

毛状放电模式向弥漫状放电模式过渡时, 等离子体中的离子温度将会进一步提高, 导致离子与中性原子的电离碰撞几率逐步加大, 也更易于挣脱极间电场的束缚向真空室内运动, 最终在具有低电位的真空室壁面与高电位的阳极之间的整个真空室区域产生放电。这可能是空心阴极出现弥漫

状放电的较为合理的物理解释。

### 2.2.2 羽毛状模式到亮斑状模式的转变

图6给出空心阴极工作在推进剂流率为3.5 sccm时, 其等离子体放电由羽毛状模式向亮斑状模式转变的过程。图6(a)是不同放电电流下阴极放电的图象, 图6(b)是对应放电电压的波形。



(a) 放电图像

(b) 放电电压波形

图6 空心阴极由羽毛状模式向亮斑状模式转变

Fig. 6 Transition from plume mode to spot mode and corresponding discharge voltage characteristics

由图6(a)可见, 在推进剂流率固定, 放电电流为0.5 A时, 空心阴极的放电羽流为羽毛状等

离子体, 与 $I_a = 1.5\text{ A}$ 时比较, 此时的羽毛状等离子体并不强, 这主要是由于在放电电流较小时,

空心阴极放电尚不充分,没有产生足够的带电粒子来形成高密度的等离子体。正是由于带电粒子数较少,使得许多因碰撞而处于激发态的离子和原子退激发,形成羽毛状等离子体放电羽流。

图6(b)中的放电电压波形,准确地反映了羽毛状模式下低电流、高电压的特征和亮斑状模式下大电流、低电压的特征。但无论是在羽毛状模式的高电压下,还是在亮斑状模式的低电压下,本文实验获得的放电电压振荡幅度均维持在3~6 V的水平。虽然本文实验所使用的阳极电源为恒流源,但电源输出电压自身存在一定程度的振荡,该振荡与等离子体振荡相叠加。由于阴极工作在亮斑状模式下,放电电压的振荡幅值一般都在数百 mV~V 量级<sup>[11]</sup>。因此,图6(b)中的放电电压振荡基本上被电源自身的振荡所主导。要获得亮斑状模式下真实的等离子体振荡数据,必须选择合适的阳极电源。

### 2.3 推进剂流率对阴极放电模式的影响

图7给出了空心阴极放电电压及其振荡随推进剂流率的变化情况。由图7可见,在放电电流固定的情况下,总体上,放电电压及其振荡幅度均随着阴极推进剂流率的增大而相应地减小,而且放电电压和电压振荡幅度的变化规律基本保持一致,各个不同阶段的变化曲线之间也存在比较相近的转折点。

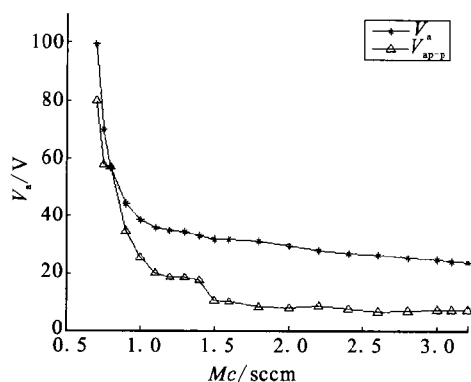


图7 放电电压及其振荡随阴极流率的变化

Fig. 7 Variation of discharge voltage and its oscillation with flow rate of cathode

当阴极推进剂流率小于1.10 sccm时,阴极流率的微小变化,都会使放电电压值大幅度地变化,放电电压的振荡值不仅较大,而且也随阴极流率大幅度地变化,因此,空心阴极此时工作在羽毛状模式。随着阴极流率的继续增大,放电电压降低,但随阴极流率的变化幅度减弱,且存在明显的流率拐点,即当阴极流率大于1.10 sccm时,放电电压值较低,受阴极流率变化的影响也已经很小。同样,当阴极流率大于1.10 sccm时,放电电压振荡幅度受阴极流率的影响变得很小,特别地,当阴极流率大于1.50 sccm时,放电电压振荡幅度一直维持在较低的水平,保持在6 V左右。在2.2节中已经指出,由于电源自身振荡特性,实验中小于3 V的振荡无法分辨。因此,在本文实验条件下,不适合通过放电电压的振荡来判定阴极工作模式的转变。但是,结合之前的分析,根据放电电压及其振荡幅度的变化规律,可以判定,空心阴极在流率为1.50 sccm时已进入亮斑状放电模式。

## 3 结论

本文给出了有关空心阴极等离子体放电特性及其工作模式相互转化的实验研究结果,通过实验研究和分析,可以得出以下结论:

- 1) 空心阴极等离子体放电存在3种典型工作模式:羽毛状模式、亮斑状模式和弥漫状模式;
- 2) 空心阴极在由羽毛状模式向弥漫状模式转变的过程中,放电羽流逐渐弥漫到整个真空室内,放电电压迅速升高,电压振荡越来越严重,振荡频率逐渐增大;
- 3) 空心阴极由羽毛状模式向亮斑状模式转变时,放电电压逐渐减小,并最终保持基本稳定,电压振荡幅度始终维持在较低的水平,放电羽流最终发展为稳定的亮斑状;
- 4) 当放电电流固定,阴极推进剂流率变化时,空心阴极工作模式转变存在明显流率拐点。

(下转第45页)

协调解决。

3) 容积测量中偏差控制措施同样也适用于推进剂加注, 当采用“加满泄出”方案确定加注量时, 加注状态应与容积测量时保持一致, 有利于减小加注量偏差。

#### 参考文献:

- [1] 刘子勇, 郭立功. 容量计量研究方向[J]. 现代测量与实验室管理, 2007(6): 11-13.
- [2] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 周广文. 推进剂贮箱优化设计思考[J]. 导弹与航天运载

技术, 2011(1): 26-28.

- [4] 朱平萍, 刘宪力. 大型贮箱结构及工艺性研究[J]. 航天制造技术, 2011(3): 42-45.
- [5] 陈朝, 黄敏超, 陈志坚. 空间表面张力贮箱结构分析与优化设计[J]. 航天制造技术, 2007(5): 9-12.
- [6] 石晓强. 卫星用推进剂贮箱和高压气瓶封头制造技术[J]. 真空与低温, 2008(3): 184-186.
- [7] MICHAEL JDEBRECENI, WILLIAM D LAY. Propellant tank for an advanced communications satellite, AIAA-2001-3826[R]. USA: AIAA, 2001.
- [8] WALTER H TAM, JIM R TAYLOR. Design and manufacture of a propellant tank assembly, AIAA-97-2813[R]. USA: AIAA, 1997.

(编辑: 王建喜)

(上接第35页)

#### 参考文献:

- [1] SAKAIS, KATAYAMA T. Discharge modes and characteristics of hollow cathode [C]// The 30th International Electric Propulsion Conference. Florence, Italy: IEPC, 2007: 1-7.
- [2] 张天平, 袁子, 田华兵. 电推进系统空心阴极研制试验技术[J]. 真空电子技术, 2007(2): 9-13.
- [3] KAMHAWI H, PATTERSON M J. On the operational status of the international space station plasma contactor hollow cathodes, AIAA2005-3676[R]. USA: AIAA, 2005.
- [4] 孙宗祥. 等离子体减阻技术的研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 87-94.
- [5] 方绍强, 赵尚弘, 余侃民, 等. 飞行器等离子体隐身技术[J]. 现代防御技术, 2005, 33(2): 32-35.
- [6] 于志强, 李季, 邵文生. 应用于离子发动机和霍尔推力器的空心阴极组件的研究[C]. 北京真空电子技术研究所, 第十七届中国电子学会真空电子学会年会军用微波管研讨会论文集(下). 2009.

- [7] MANDELL M J, KATZ I. Theory of hollow cathode operation in spot and plume modes, AIAA 94-3134 [R]. USA: AIAA, 1994.
- [8] DOMONKOS M T, GALLIMORE A D, PATTERSON M J. An evaluation of hollow cathode scaling to very low power and flow rate[C]// The 25th International Electric Propulsion Conference. Cleveland, OH, US: IEPC, 1997: 121-129.
- [9] NISHIYAMA K, SHIMIZU H, FUNAKI K. EMI of microwave discharge neutralizer and hollow cathode[C]// Abstracts of ISAS Space Transport Symposium. Japan: ISAS, 2001: 211-218.
- [10] YOSHIDA H. Four-step double sheath model of a neutralizer hollow cathode[C]// 48th Space Sciences and Technology Conference. Fukui, Japan: SSTC, 2004: 4-6.
- [11] PATTERSON S W, MALIK A K. Noise and oscillatory disturbances in the t6 ion thruster hollow cathode, AIAA 99-2577[R]. USA: AIAA, 1999.

(编辑: 马 杰)