

# 低功率电弧加热推力器阳极弧根行为研究

黄河激, 潘文霞, 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(Tel:010-82544218, Email:huang@imech.ac.cn)

**摘要** 弧根行为对电弧加热推力器的效率和寿命有重要影响。本文选用氮离子谱线干涉滤光片, 采用滤光成像, 实时观测了从点火到稳态工作时千瓦级电弧加热推力器阳极弧根贴附行为的变化过程。实验结果发现, 点火时, 阳极弧根为集聚型, 随着喷管温度升高, 弧根向扩散型转变, 同时弧根贴附位置向喷管扩张段下游移动。弧根贴附位置的变化规律与弧电压的变化规律相吻合。

**关键词** 电弧加热推力器; 弧根行为; 效率和寿命

## 0 前言

与传统化学推进相比, 已实用的电推进系统通常具有高比冲、小推力的特点[1]。采用电推进系统有利于提高飞行器有效载荷、增加任务时间、提高推进控制精度。在诸多电推进方案中, 电弧加热推力器在卫星姿态与轨道控制等应用中有其独特的优势, 在国际上已有大量应用实例[2]。而在我国, 电弧加热推力器至今没有得到实际应用的主要瓶颈是电弧加热推力器的效率和寿命问题。一方面, 电弧加热推力器启动和运行过程中的电极烧蚀与机体过热乃至推力器失效会影响推力器的可靠性和使用寿命, 是限制其进一步发展和应用的关键因素; 另一方面, 目前以肼分解产物为推进剂的电弧加热推力器的能量利用效率不高, 通常只有 30-35% 的输入电功率实际用于产生推力[3]。电弧加热推力器的寿命与效率和推力器内部复杂的传热与流动以及能量转换过程密切相关, 而电弧与电极的相互作用是其中重要的一环。电弧在电极表面的贴附及运动方式, 即弧根行为, 是影响电极烧损以及推力器内部能量转换过程的重要因素。然而, 低功率电弧加热推力器喷管尺寸通常很小, 喉道直径为毫米量级, 对其弧根行为的实验观测非常困难。本研究尝试采用滤光拍照的方法, 实验观测低功率电弧加热推力器阳极弧根的贴附行为, 获得推力器工作参数对其弧根行为的影响规律。

## 1 实验方法

本文实验在力学所空天等离子体动力学实验平台上进行。实验所用的电弧加热推力器采用再生冷却喷管, 其尺寸和结构在文献[4]中有详细描述。喷管喉道直径为 0.7mm, 扩张半角为 15°, 扩张比为 258:1。采用混合比为 2:1 的氢-氮混合气作为电弧加热推力器推进剂, 以模拟肼推进剂分解产物。氢和氮由两路质量流量计分别供给, 在供入推力器前混合, 总的推进剂流量为 36mg/s。用测量范围为 600-2000°C 的单色红外测温仪测量喷管外壁面温度。电弧加热推力器工作时的弧电流、弧电压由计算机实时采集。实验系

统如图 1 所示，主要利用喷管出口下游 45° 放置的水冷铜镜，将推力器工作时喷管内部情况反射出真空腔体，同时用长焦摄像机拍摄喷管内部图像。获得的图像由从喷管下游仰视得到的多个同心圆构成[4]。

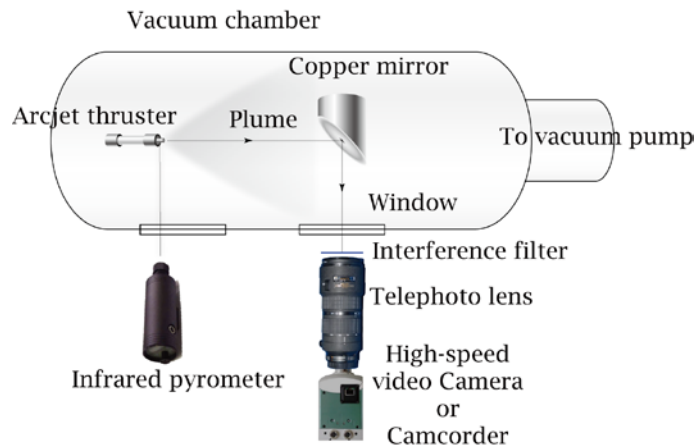


图 1 实验系统示意图

电弧加热推力器工作时，等离子体电弧及羽流有强烈发光。若从喷管出口下游直接拍摄，即便采用减小光圈、缩短曝光时间等手段也很难获得亮度适中、对比度良好的照片（图 2（a））。考虑电弧及弧根贴附区域温度远高于羽流，该区域内推进剂气体电离度大，离子数密度高。选用合适波长的滤光片，可滤去部分羽流发光干扰，使高温下数密度较高的特定离子谱线透过。

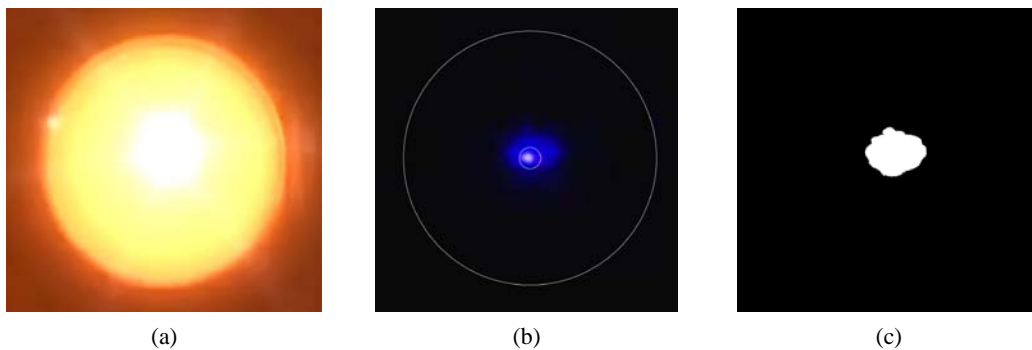


图 2  $H_2-N_2$  电弧加热推力器稳态工作时喷管端视照片。(a) 直接拍摄获得的照片；(b) 采用 460nm 干涉滤光片滤光时的照片（大小两个白色圆环为人为添加、分别代表喷管出口及喉道尺寸）；(c) 按一定阈值将照片转换为二进制图后的情形。

本研究中选择在长焦镜头前加装波长 460nm、带宽 15nm 的干涉滤光片。在该波长范围内，主要透过的是氮离子的 5 条谱线。加装 460nm 干涉滤光片后获得的喷管端视图如图 2（b）所示。图中人为添加的两个白色同心圆分别代表喉道及喷管出口边缘。从图中可以看出喉道内部有明显的亮点，说明阴极尖附近氮离子浓度很高。在喉道出口下游也有相对较高的氮离子分布，该区域的大小可在一定程度上反应弧根贴附区域的大小。利用 ImagJ 图像处理软件，设定合适的阈值，将图像转换为二进制图片，如图 2（c）所

示，其中白色区域代表弧根贴附区域。同时利用软件计算该区域面积，获得弧根贴附区域大小随推力器参数的变化情况。

## 2 结果与讨论

图 3 为单色红外测温仪测得的电弧加热推力器喷管外壁面温度随时间的变化情况。其中时间零点为点火点。在电弧加热推力器点火初期，弧电流及推进剂流量有一定调节。图 3 给出的是电弧加热推力器输入参数稳定后的喷管温度变化情况。从图 3 可以看出，在输入电流 8A 时，随着时间增加推力器喷管温度单调增加。由于采用再生冷却喷管，即冷推进剂在进入喷管压缩段被放电电弧加热之前先流经喷管外壁面，在对喷管进行冷却的同时得到预热，因此，喷管温度上升速度并不快。从推力器点火后 45 秒到 200 秒，喷管外壁面温度从 840℃ 逐渐增加到 1270℃。

在这一时间段内的弧电流和弧电压变化规律示于图 4 中。从图 4 中可以看出，弧电流稳定在 8A，而弧电压随着喷管温度升高略有上升。弧电压的大小等于电极鞘层电压降 ( $V_e$ ) 加上弧柱区电场强度 ( $E$ ) 和弧柱长度 ( $L$ ) 的乘积：

$$U = V_e + EL \quad (1)$$

而电场强度  $E$  是当地电流密度与电导率之比：

$$E = \frac{j}{\sigma} \quad (2)$$

对于电弧加热推力器而言，由于采用的是热阳极，电弧与喷管之间边界层较薄，阳极喷管通道对电弧的压缩主要由几何尺寸决定。在弧电流一定、几何尺寸不变的情况下，电场强度  $E$  不会发生明显变化。因此，弧电压的上升意味着弧柱长度增加，即弧根贴附位置应向喷管下游移动。

对滤光成像拍摄的录像进行分析，每隔 1 秒时间间隔选取 1 帧，如图 2 所示进行图像变换，并计算弧根贴附区域的面积，可定性获得弧根贴附区域大小随时间的变化规律。实验结果示于图 5 中。

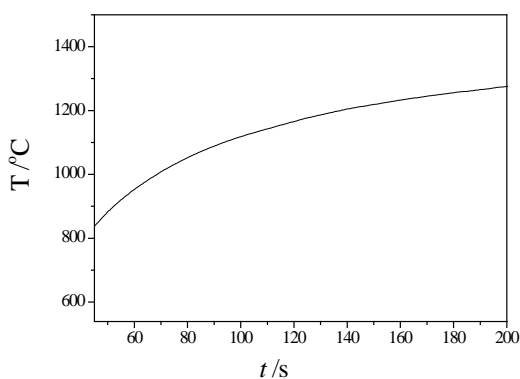


图 3 推力器喷管外壁面温度随时间变化规律

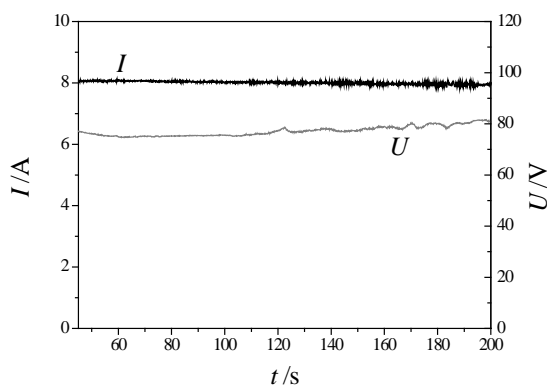


图 4 推力器弧电流和弧电压随时间变化规律

从图 5 可以看出,当电弧加热推力器喷管温度较低时,弧根贴附区域面积跳跃较大,这说明此时弧根表现为集聚型,且贴附点跃动较大。当贴附面积小于  $0.38\text{mm}^2$  (即喉道面积) 时,阳极弧根贴附于喷管喉道上游。随着喷管温度上升,弧根贴附区域面积逐渐增大,并且随时间变化的波动变小,说明此时阳极弧根已转换为扩散型,并且稳定贴附于喷管扩张段。到点火后 200 秒时,对应的贴附面积约  $3.1\text{mm}^2$ 。根据喷管扩张角及喉道尺寸,可知此时阳极弧根贴附于喉道出口下游约  $2.4\text{mm}$  处。阳极弧根贴附位置随着喷管温度上升而向下游移动的规律与上文中关于弧电压变化规律的分析吻合。

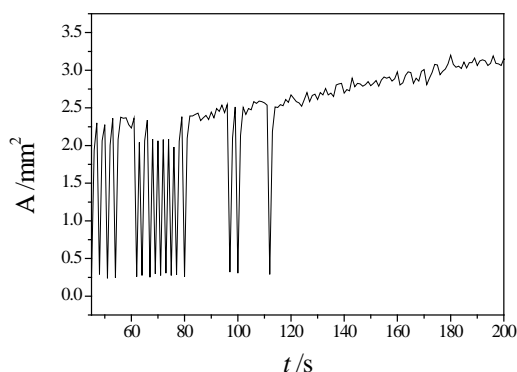


图 5 阳极弧根贴附面积随时间的变化规律

### 3 结 论

采用滤光成像及图像分析的方法获得了低功率电弧加热推力器阳极弧根贴附行为随推力器工作参数的变化规律。实验结果表明,采用氢-氮混合气为推进剂时,选用波长为  $460\text{nm}$  的干涉滤光片能有效获得电弧加热推力器喷管内氮离子浓度分布情况,并可定性判断弧根贴附区域大小。在喷管温度较低时,阳极弧根表现为集聚型,且贴附位置跳跃,有时贴附于喉道上游。随着喷管温度升高,阳极弧根向扩散型转变,同时弧根贴附位置向喷管扩张段下游移动。弧根贴附位置的变化规律与弧电压的变化规律相吻合。本文的研究结果可为进一步深入研究电弧加热推力器效率与寿命问题提供实验参考。

### 参考文献

- [1] M. Martinez-Sanchez, J. E. Pollard, Spacecraft Electric Propulsion – An Overview[J], Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5):688-699
- [2] Fred C Wilson, Recent Advances in Satellite Propulsion and Associated Mission Benefits[C], AIAA 2006-5304
- [3] Roger M. Myers, Overview of Major U.S. Industrial Electric Propulsion Programs[C], AIAA 2004-324
- [4] 黄河激, 潘文霞, 吴承康. 低功率电弧加热发动机喷管扩张段内壁面温度测量[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(7): 1185--1187  
HUANG He-Ji, PAN Wen-Xia, WU Cheng-Kang. Inner Nozzle Surface Temperature Measurement in a Low Power Arcjet Thruster[J], Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(7): 1185--1187