双阳极磁增强真空弧推力器性能试验研究

田 恺,史 楷,郭德洲,赵 勇,陈新伟

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室,兰州 730000)

摘要:为了提高真空弧推力器的工作寿命,研制了一款能够提供三种放电模式的双阳极磁增强真空弧推力器(Bi-Anode MVAT)。开展了引弧试验、不同放电模式下推力性能比较试验、失效模式验证试验和寿命考核试验研究。试验结果表明,双阳极放电模式下外界注入脉冲能量对推力器元冲量的平均转化率为1.7 μN·s/J,10 Hz下连续放电超过5.2×10⁶次脉冲,是LVAT-1放电脉冲数的3倍,热失效是影响Bi-Anode MVAT放电寿命的首要因素。

关键词:双阳极;真空弧推力器;磁增强;放电寿命;热失效

中图分类号:V439 文献标志码:A 文章编号:1006-7086(2021)05-0501-07 DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2021.05.015

Performance Experiment of Bi-Anode Magnetically Enhanced Vacuum Arc Thruster

TIAN Kai, SHI Kai, GUO Dezhou, ZHAO Yong, CHEN Xinwei

 $(Science \ and \ Technology \ on \ Vacuum \ Technology \ and \ Physics \ Laboratory \ ,$

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A Bi-Anode magnetically enhanced vacuum arc thruster (Bi-Anode MVAT) providing 3 discharge modes was developed in order to prolong the vacuum arc thruster's operational lifetime. Arc ignition test, comparison test of thrust performance under different discharge mode, verifications test of failures mode and thruster lifetime test have been carried. It is shown that the average conversion rate of external injected pulse energy to impulse bit of thruster is 1.7 μ N·s/J for bi-anode discharge mode, and the continuous discharge at 10 Hz can be triggered up to 5.2×10^6 pulse which is 3 times of LVAT-1's discharge pulses, and the failure caused by heat is the primary factors affecting the discharge lifetime for Bi-Anode MVAT.

Key words: Bi-Anode; vacuum arc thruster; magnetically enhanced vacuum arc thruster; discharge lifetime; failure caused by heat

0 引言

真空弧推力器(Vacuum Arc Thruster,VAT)以阴 极为推进剂,基于无触发引弧原理,在阳极和阴极 间加几十到数百伏的脉冲电压即可在微阴极表面 诱发真空电弧放电。放电过程中阴极表面熔融物 质伴随热、场发射电子喷射到阴极与绝缘体导电膜 之间的间隙中,并发生碰撞电离,再通过气动加速、 电子-离子摩擦碰撞等机制使离子加速,形成高速 等离子体射流,产生微牛级推力。VAT广泛应用于 微纳卫星微小推力控制,传统VAT放电脉冲次数在 百万次量级^[1-2],寿命问题仍然是限制其空间应用的 主要因素。

磁增强真空弧推力器(Magnetically Enhanced Vacuum Arc Thruster, MVAT)是在VAT器头部加装

收稿日期:2021-06-07

基金项目:甘肃省科技计划资助项目(18JR3RA412)

作者简介:田恺,高级工程师,主要从事空间微电推进技术研究。E-mail:tiankay@163.com。

引用本文:田恺,史楷,郭德洲,等.双阳极磁增强真空弧推力器性能试验研究[J].真空与低温,2021,27(5):501-507.

TIAN K, SHI K, GUO D Z, et al. Performance experimental of Bi–Anode magnetically enhanced vacuum arc thruster[J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(5):501–507.

轴向磁场,通过磁场约束羽流等离子体,以降低推 力损耗和羽流污染;同时,阴极斑在离子电流与磁 场作用下沿 $J \times B$ 方向旋转,促进了阴极表面的均 匀烧蚀,延长了推力器寿命。按照电极排列方式, MVAT 通常分为环形和同轴结构^[3]。美国阿拉米达 应用科学公司(Alameda Applied Sciences Corporation)联合NASA JPL^[4]于2005年研制的首款MVAT为 同轴型VAT外加电磁线圈结构,在22 A峰值电流下 可以激发0.05 T磁场,推力器平均元冲量2.7 μN·s, 相比没有磁场时的推力提高了50%。2019年,美国 华盛顿大学与俄罗斯 Tomsk 州立大学联合研制了一 款基于永磁铁的环形电极高推功比 MVAT^[5],该推力 器质量80g,功耗16W,设计磁场0.2T,平均推力 0.21 mN,比冲3 400 s,推功比达到 15 μN/W。国 内报导的MVAT^[6]元冲量为0.26 μN·s,比冲为518 s, 寿命为1.12×10°次[7]。

2020年,兰州空间技术物理研究所研制的首款 真空弧推力器 LVAT-1完成在轨验证,元冲量为 0.68~0.83 μ N·s,满足 <1 μ N·s 的设计要求^[8]。 LVAT-1为无磁场约束的同轴型VAT。地面寿命试 验发现,阴极烧蚀只发生在阴极边缘1 mm宽的环 域内,阴极中心部分未参与烧蚀放电,10 Hz工况下的寿命为1.7×10°次。

本研究综合环形 MVAT 和同轴型 MVAT 的技术 优势对 LVAT-1进行优化,增加磁场结构,研制一款 圆柱型内阳极与环形外阳极混合构型的双阳极磁 增强真空弧推力器(Bi-Anode MVAT),并在本所 TS-6E 真空系统上进行引弧试验、不同放电模式推 力性能比较试验、失效模式验证和寿命考核等试验 研究,以期为后续长寿命真空弧推力器的改进和应 用提供依据。

1 结构设计

Bi-Anode MVAT 由 VAT 和磁场两部分组成。 VAT保留了 LVAT-1的环形阳极(外阳极),将阴极 优化为空心筒结构,空心部分增加柱状阳极(内阳极) 和内绝缘体。阴极尾部连接馈送弹簧;将钐钴磁 铁安装在羽流出口附近,以提供磁场;阴极为Ti,阳 极为Cu,绝缘体为Al₂O₃陶瓷,壳体为不锈钢,如图1 所示。整个Bi-Anode MVAT包络尺寸为D21 mm× 35 mm,质量30 g,功耗12 W@30 Hz。设计为三种 放电模式:内阳极放电、外阳极放电和双阳极(内阳 极+外阳极)放电,三种模式可以自由切换。





(c) Bi-Anode MVAT实物

图 1 LVAT-1和Bi-Anode MVAT示意图及Bi-Anode MVAT实物照片 Fig. 1 Schematic and photograph of LVAT-1 and Bi-Anode MVAT

磁场设计通常采用电磁线圈或永磁体。已有的 仿真结果表明,MVAT最佳磁场强度为0.1~0.3 T^{9-11]}。 电磁线圈的优点是可通过调节电流来调节磁场强 度。采用电源处理单元 PPU 储能电感激发电流给 电磁线圈供电,25 A激励电流产生的磁场强度分布 如图2所示。

从图2可以看出,当激励电流为25 A时,线圈 内部轴向最大磁场出现在线圈中间,约0.034 T, 线圈两极最弱,约0.018 T。如果选择Ti作为骨架 材料,则该电磁线圈的质量为20 g。如果考虑采用 磁线圈供电模块,总体积、功耗和质量还须增加。

筒状钐钴磁铁(质量 22.9 g)的磁场分布如 图 3 所示,筒内的轴向磁场在 0.13~0.28 T之间, 分布均匀,符合 0.1~0.3 T的设计要求。综合比 较,本设计采用钐钴磁铁作为 Bi-Anode MVAT 的 磁极。



图 2 25 A时电磁线圈磁场分布图 Fig. 2 Magnetic field distribution of electromagnetic coil at 25 A







2 试验系统

所有的试验研究都在兰州空间技术物理研究 所电推进实验室TS-6E真空系统进行。TS-6E的真 空舱直径0.8 m,长1.5 m,工作压力低于2×10⁻⁵ Pa。 试验仪器包括程控电源(TDK)、高压脉冲电源 (TSP3090)、空心电感、示波器和上位机,如图4所 示。TDK电源主要为高压脉冲电源的光纤输出端 提供 20~25 V的偏置电压, 精度 ±0.1%。 TSP3090 脉冲专用电源由光纤输入、光纤输出、脉冲高压输 出和接地等四模块组成,配合空心电感(346 µH), 为 MVAT 提供 0~10 kV 连续可调, 脉宽 300 ns~ 1.6 ms, 频率 1~50 Hz 的脉冲电压。示波器为 DSOX3024T, CH1 通道接差分电压探头, 探头红色 端和黑色端分别接TSP3090高压输出正极和负极, 用来监测 MVAT 放电脉冲电压; CH2 通道接电流 探头,监测VAT阴极回路的脉冲电流。示波器采 集的数据通过网线传输到上位机,上位机使用 LabVIEW 2012软件实现对放电波形及特征数据的 采集和存储。

3 试验

3.1 引弧试验

Bi-Anode MVAT继承LVAT-1硬质Ti 膜无触发 引弧机制,内、外阳极与阴极的初始电阻分别为2.6 Ω 和22.6 Ω。由于初始电阻较小,引弧试验通常在大 气下完成,大气分子参与电离有助于VAT引弧。起 弧后再将 Bi-Anode MVAT移入真空系统进行性能 试验。三种放电模式中,内阳极引弧相对容易,其 次为双阳极和外阳极引弧。



图 4 Bi-Anode MVAT试验系统示意图 Fig. 4 Schematic of test system for Bi-Anode MVAT

引弧脉冲参数为:注入脉冲能量0.1 J,放电频 率5 Hz,引弧3000次,如果引弧成功,试验结束, 否则,须提高脉冲能量,设置同样频率和放电次 数,直至引弧成功。引弧流程如图5所示。选用 3个Bi-Anode MVAT样机进行引弧试验,结果如表 1所列。



图 5 Bi-Anode MVAT引弧流程国 Fig. 5 Process of igniting arc for Bi-Anode MVAT

	表 1	Bi-Anode MVAT 引弧放电参数
Tab. 1	Ignit	ing arc parameters for Bi-Anode MVAT

样品 编号	放电 模式	引弧脉冲 能量阈值/J	放电频 率/Hz	引弧 时间/s	弧光 强度
1#	双阳极引弧	0.3	5	30	弧光较弱
2#	内阳极引弧	0.2	5	10	弧光强劲
3#	外阳极引弧	0.3	5	30	弧光微弱

从表1可以看出,内阳极引弧的能量阈值最低, 为0.2 J,引弧时间为10 s,双阳极和外阳极放电阈 值能量为0.3 J,引弧时间为30 s。图6为Bi-Anode MVAT内阳极放电模式下初次引弧脉冲放电波形。 从图中可以看出,引弧电压为540 V,脉冲峰值电流 37.0 A,脉冲积分电量为1.25 mC,脉宽在120 μs左 右。引弧成功后重新测量阳极和阴极间的电阻,内 阳极与阴极间电阻为2.0 kΩ,外阳极与阴极间电阻 为26.9 Ω,说明内阳极易于引弧,放电能量集中,能 使膜层电阻迅速增大。



图 6 Bi-Anode MVAT 引弧放电波形



3.2 不同放电模式推力性能比较试验

Bi-Anode MVAT 的推力性能由元冲量 $I_{\text{bit}}^{[12]}$ 描述,其理论评估公式为:

$$I_{\rm bit} = \mathbf{k}Q_{\rm d} \tag{1}$$

式中:k为常数,表示电离单位库伦电量的离子所产 生的冲量, μ N·s/C,k = $C_1 \frac{m_i f_i u_i}{e \dot{Z}}$,其中 C_1 为与阴极 形状相关的推力修正系数, m_i 为阴极材料的离子质 量, u_i 为离子速度, f_i 为离子电流与总放电电流比, $e \dot{Z}$ 为离子平均电荷量。Bi-Anode MVAT 的阳极和阴 极共面, C_1 值为0.67^[13], m_i , u_i , f_i 和 \dot{Z} 都是由Ti 阴极材 料决定的基本特性参数^[12],结合 LVAT-1 在轨验证 结果^[8],本试验取k = 218.9 μ N·s/C。 Q_a 为单次放电 脉冲的积分电量,单位为C,可通过示波器脉冲电流 对时间的积分运算直接读取。

改变高压脉冲电源对 Bi-Anode MVAT 注入脉冲能量,可以评估不同放电模式下注入脉冲能量转化为推力器输出元冲量的转化率。图7为1 Hz放电频率下 Bi-Anode MVAT 不同放电模式的脉冲能量-元冲量转化率。从图7可以看出:

(1)三种放电模式下,推力器输出的元冲量与 外界注入脉冲能量均呈正相关。内阳极放电模式 产生的元冲量与注入的脉冲能量的线性度较好,平 均转化率为0.9 μN·s/J;在0.5 J以下,外阳极放电 模式产生的元冲量与注入脉冲能量具有较好的线 性度,但随着注入能量的增加,元冲量趋于饱和,平 均转化率为1.4 μN·s/J;双阳极放电模式下的元冲 量与注入能量始终有较好的线性关系,平均转化率 为1.7 µN・s/J。

(2)相同注入脉冲能量下,内阳极放电模式输出的元冲量最小,双阳极放电模式输出元冲量最大,外阳极放电模式输出的元冲量要明显大于内阳极放电输出的元冲量;0.5 J以下,双阳极放电输出的元冲量。5.5 J以下,双阳极放电输出的元冲量;当注入能量大于0.5 J时,双阳极输出的元冲量明显大于外阳极输出的元冲量。造成上述放电差异的主要原因是外阳极和内阳极的结构不同,外阳极的放电面积远大于内阳极的放电面积。

(3)当脉冲注入能量>1.0 J时,推力器周围有 可见的熔融液滴喷出,这些液滴主要为内绝缘体烧 熔物,对推力无贡献,图7中外阳极的试验曲线也说 明了这一点;当注入脉冲能量增大时,推力器输出 的元冲量有饱和的趋势,说明注入的脉冲能量只有 一部分用于阴极放电,其余能量转化为内能使绝缘 体陶瓷烧融变成液态喷出。

(4)注入能量在 0.1~0.4 J时, 阴极斑以单点的 形式随机出现, 斑点很小, 弧光微弱, 如果观测时间 足够长, 斑点沿环形阴极表面呈顺时针分布; 当注 入能量为 0.5 J时, 斑仍为单点, 弧光覆盖 25% 阴极 表面, 强度沿顺时针方向减弱; 注入能量从 0.6 J增 大到 0.9 J时, 弧光覆盖 50% 阴极表面, 呈蓝色; 注 入能量达到 1.0 J时, 多阴极斑连成片, 弧光覆盖 70% 的阴极表面, 呈紫色。图 8为 Bi-Anode MVAT 在 0.9 J时的放电波形, 从图中可以看出, 引弧电压 为 840 V, 积分电量达到 6.25 mC, 对应 1.4 μN·s的 元冲量。









3.3 失效模式验证试验

(1) 短路和开路故障模式验证

由于导电膜过度沉积引起的短路和烧蚀损耗 造成的开路是VAT两种基本的失效模式。对这两 种基本故障模式进行试验验证,得到相应波形,如 图9和图10所示。图9是典型的阳极短路故障波 形,这种情况下放电主要发生在阳极与壳体(地)之 间,脉冲持续时间长,达到1.6 ms以上,虽然能够抓 到放电波形,但阴极表面无电弧。图10是典型寿命 末期的开路放电失效波形,主要特征是引弧电压 高,脉宽特别短,通常在50 μs以下,积分电量小于 1 mC。











(2) 热失效故障模式

外界注入的脉冲能量只有一部分使阴极表面 蒸发的材料电离,其余能量以热的形式耗散掉。Bi-Anode MVAT的散热路径主要有:内阳极-信号线、 外阳极-信号线、阴极-弹簧-壳体和阴极-信号线。 如果耗散热量集中在阳极,会导致信号线与阳极之 间的焊点熔化;如果耗散热量集中在阴极,会导致 阴极信号线焊接熔化或馈送弹簧失效;严重情况 下,还会导致阴极、阳极、绝缘体材料过度烧蚀,缩 短推力器寿命。

设计了放电频率对热失效故障模式的影响试验。试验采用双阳极放电模式,外界注入脉冲能量0.5 J,放电频率为1 Hz、5 Hz、10 Hz、15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz,每个频率放电10 min,试验结果如图11所示。





从图11可以看出,放电频率从1 Hz增大到20 Hz 过程中,元冲量从0.32 µN·s减小到0.20 µN·s,当频 率达到25 Hz时,推力器输出元冲量突然增大到 0.59 μN·s,是20 Hz时的近3倍,主要原因是高频 放电下阴极表面处于超热态,阴极斑增多,等离子 体发射成倍增大,脉冲积分电量随之增大。从试验 现象看,此时阴极表面发红,阴极斑覆盖整个阴极 表面,羽流呈蓝紫色连续喷射状态,当频率增大到 30 Hz时,推力器输出元冲量降至0.50 µN·s。试验 还发现,陶瓷熔融颗粒随放电频率的增加而增加, 说明高频放电下热效应已非常明显,内阳极和内绝 缘层已出现严重烧蚀。30 Hz放电持续20 min后, 弧熄灭,内、外阳极与阴极电阻分别大于20 MΩ和 400 Ω,说明内阳极已处于开路状态。开舱检查发现, 内阳极尾部信号线已烧熔脱落,阴极尾部馈送弹簧 性能良好,但阴极头部与内、外绝缘体已熔焊在一

起,说明弹簧馈送对同轴型VAT是不适合的。

3.4 寿命考核试验

完成 Bi-Anode MVAT性能验证试验后,进行了 连续放电寿命考核试验。放电参数为:注入脉冲能 量 0.5 J,放电频率 10 Hz。LabVIEW 2012软件每隔 6 min 自动采集存储一次放电波形及其特征数据。 寿命考核试验持续 145 h(放电 520万次)后,推力器 因热失效而终止试验。图 12为Bi-Anode MVAT寿命 试验期间引弧电压随脉冲数的变化曲线,试验初期 引弧电压为 370 V,寿命末期引弧电压为 1965 V。 图中 1000 V台阶以外阳极放电为主,1500 V台阶 为双阳极放电,寿命末期的 2000 V台阶以内阳极 放电为主。





4 结论

Bi-Anode MVAT 是一种改进型长寿命微推力器,能够提供内阳极放电、外阳极放电和双阳极同时放电三种放电模式,可以满足不同的推力需求。

(1)三种放电模式中,内阳极引弧阈值脉冲能量最低,为0.2 J,引弧时间最短,约10 s,典型引弧电压为540 V,脉冲峰值电流37.0 A,脉冲积分电量1.25 mC,脉宽为120 μs。

(2) 三种放电模式中,双阳极放电模式输出的 元冲量最大,注入能量对元冲量的平均转化率为 1.7 μN·s/J;其次为外阳极放电模式,平均转化率为 1.4 μNs/J;内阳极放电模式的平均转化率最小,为 0.5 μN·s/J。

(3) 热失效是 Bi-Anode MVAT 的主要失效模

式。脉冲能量 0.5 J,放电频率大于 25 Hz时,连续 放电 20 min 会导致阴极尾部导线焊点熔化脱落。 高频放电还会导致内阳极和内绝缘体陶瓷烧熔而 喷射熔融物,输出元冲量减小。最佳放电频率为 10 Hz。

(4)10 Hz频率下连续放电寿命超过5.2×10°次, 提高放电寿命的关键在于提高VAT热失效设计能力。

参考文献:

- [1] JOSEPH L, GEORGE T, JONATHAN K, et al. High thrustto-power ratio micro-cathode arc thruster[J]. Aip Advances, 2016,6(2):1-7.
- [2] ZOLOTUKHIND B, KEIDA R M. Optimization of discharge triggering in micro-cathode vacuum arc thruster for CubeSats
 [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018, 27(7): 1–8.
- [3] MICHAEL K, TAISEN Z, ALEXEY S, et al. Micro-cathode arc thruster for small satellite propulsion[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida, 2015.
- [4] TANG B, LUKE I, MICHAEL A, et al. Thrust improvement of the magnetically enhanced vacuum arc thruster (MVAT) [C]// 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, 2005.
- [5] DENIS B Z, KEIR P D, MICHAEL K. Micro-cathode arc thruster improvement by the second MPD stage[C]//36th International Electric Propulsion Conference University of Vienna,

Vienna, Austria, 2019.

- [6]梁轲,韩钰,王平阳,等.同轴型微阴极电弧推力器的设计 及性能测试[J].航天器环境工程,2018,35(5):431-436.
- [7] 王雯倩, 刘向阳, 王帅, 等. 微阴极电弧推力器放电寿命特 性研究[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(3): 26-27.
- [8] 田恺, 吴益善, 张兴民, 等. LVAT-1 研制及在轨验证[J]. 真 空与低温, 2020, 26(4): 259-264.
- [9] MICHAEL A U, JOCHEN S, ANDREW G. Magnetically enhanced vacuum arc thruster (MVAT) [C]//40th AIAA/ASME/ SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, 2004.
- [10] TAISEN Z, ALEXEY S, THOMAS D, et al. Performance characteristics of micro-cathode arc thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(1):29–30.
- [11] TAISEN Z. Micro-cathode arc thruster system for cube satellite [D]. The George Washington University: Taisen Zhuang, 2013.
- [12] JONATHAN L, CRAIG L. Influence of cathode shape on vacuum arc thruster performance and operation[C]//33rd International Electric Propulsion Conference, 2013.
- [13] JAMES E P, MICHAEL J S, JOHN KZ, et al. A theoretical analysis of vacuum arc thruster and vacuum arc ion thruster performance[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5):2619–2670.

(责任编辑:任 妮)