

微波等离子推力器真空实验研究^{*}

韩先伟, 何洪庆, 毛根旺, 屈 崑, 唐金兰, 杨 涓

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 微波等离子推力器 (MPT) 具有寿命长、效率高和比冲高特点, 具有广泛的应用前景。通过对 MPT 真空实验系统, 以及中 (~ 1kW)、低 (~ 100W) 功率 MPT 结构的介绍, 重点论述了 MPT 在真空环境下的启动和稳定工作特性, 并对实验结果进行了分析和讨论, 给出了 MPT 初步性能参数。实验结果表明, 在 30W~ 1kW 功率范围内, MPT 真空环境下启动可靠, 工作稳定; 氦气 (He) 的比冲远高于氩气 (Ar) 的比冲。

关键词: 微波等离子推力器; 谐振器; 圆柱体; 同轴谐振腔; 真空试验

中图分类号: V439.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 03-0208-04

Experimental investigation of microwave plasma thruster in vacuum

HAN Xianwei, HE Hongqing, MAO Genwang, QU Kun, TANG Jinlan, YANG Juan

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: Microwave Plasma Thruster (MPT) is a new type of electrothermal thruster. Its characteristics include light weight, long lifetime, high efficiency and high specific impulse. Both types of MPT 100W and 1kW incident power at frequency of 2.45GHz and vacuum experimental system are introduced. The characteristics of MPT under vacuum condition are emphatically described. Results of experiment demonstrate that they can reliably start up and steadily operate from 30W to 1kW incident power under vacuum condition. The specific impulse of helium (He) propellants is higher than that of Argon (Ar).

Key words: Microwave plasma thruster; Resonator; Cylindrical body; Coaxial resonator; Vacuum test

1 引 言

自 20 世纪 60 年代电推进首次应用起, 在航天器上的应用越来越广泛。2001 年末, 在轨运行的航天器达 160 个, 使用电推力器 400 余台^[1~3]。微波等离子推力器(MPT)具有推力范围宽、效率较高、比冲适中、羽流污染小、结构简单可靠和寿命长等优点。美国的一些研究机构从理论和试验方面加紧 MPT 的研究, 取得了重大突破。先后研制了功耗为 4.0kW, 2.0kW, 1.0kW 和 0.1kW 一系列推力器的样机, 并进行了氩气(Ar)、氦气(He)、氮气(N₂)、氨气(NH₃)、水(H₂O)等多种推进剂的实验^[4,5]。其中 0.1kW 样机比冲为 14000 N·s/kg, 总效率为 0.54^[6]; 1.0kW 样机, 推进剂为水, 比冲为 8000 N·s/kg, 效率达 0.72^[7]。目前美国正在进行以通讯卫星应用为目标的小型化 MPT

系统和空间应用研究。西北工业大学也突破了多项关键技术, 地面原理样机研制成功, 目前正在进行真空实验研究和小型化研究。

2 MPT 结构

MPT 主要包括微波单元、推进剂贮存输送装置和推力器(微波谐振腔)三部分。微波子系统主要由电源处理单元(PPU)、微波功率源、微波传输元件(波导和同轴电缆)等组成; 推进剂贮存与输送子系统主要由气瓶、减压器、电磁阀、管路、质量流量控制器(MFC)等组成; 推力器主要包括耦合探针、隔板和腔体等^[8,9]。

为保证 MPT 在较宽的功率范围内工作, 根据不同谐振腔的特点, 设计了两种不同结构形式。低功率

^{*} 收稿日期: 2002-07-01; 修订日期: 2002-09-24。基金项目: 国家“八六三”基金(863-2-2-12), 国防基础科研项目(J1400D001), 西北工业大学博士论文创新基金资助项目。

作者简介: 韩先伟(1969—), 男, 博士, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

(~ 100W) 条件下采用同轴谐振腔, 中功率(~ 1kW) 条件下采用圆柱谐振腔。MPT 设计参数见表 1。

Table 1 Construction parameters of MPT				
Content	Symbol	Unit	Parameter	
Incident power	P_{in}	W	1, 200	120
Efficiency of PPU	η_{PPU}		0. 92	0. 92
Propellant			He (Ar)	
Specific power	SP	MJ/kg	34	40
Resonator pressure	p_c	MPa	0. 3	0. 4
Pressure at nozzle exit	p_e	Pa	40	50
Throat diameter	d_t	mm	1. 0	0. 4
Area ratio	ε		153	165
Mass flow	q_m	mg/s	35. 3	3. 0

100W MPT 同轴谐振腔采用 TEM 谐振模式, 微波频率为 2. 45GHz。其优点是结构尺寸小, 重量轻, 调节方便, 启动和工作可靠。推进剂径向进入谐振腔, 微波在周向 90° 一侧径向进行激励, 采用探针激励。

1kW MPT 圆柱谐振腔采用 TM_{011} 谐振模式, 微波频率为 2. 45GHz。其电磁场分布为轴对称分布, 最强处位于谐振腔的轴线上, 且一点靠近喷管出口处。微波与推进剂耦合形成的等离子体呈自由悬浮体, 使得高温等离子体不与谐振腔壁接触, 减少了热损失, 降低了对材料的要求。同时推进剂为切向进气, 进一步冷却壁面, 稳定等离子体, 提高工作稳定性和效率。采用微波低损耗材料将谐振腔隔离成前后两部分, 只在后腔形成高温等离子体, 探针所在的前腔不发生电离, 避免了探针烧蚀, 增加了工作可靠性和寿命。

3 真空实验系统

MPT 真空实验系统主要包括 MPT、真空子系统、推进剂贮存供应子系统和虚拟仪器测控子系统四部分, MPT 真空试验系统框图见图 1。真空子系统包括真空机组和真空实验舱。真空机组包括两台 ZJP1200 罗茨泵、两台 ZJP300 罗茨泵和两台 2X-70 旋片机械泵; 真空实验舱尺寸为 $\phi 1. 2m \times 3. 0m$ 。系统极限真空可达 $5. 0 \times 10^{-2} Pa$, MPT 工作真空度为 $5. 0 \times 10^{-2} Pa \sim 2. 0 Pa$ 。推进剂贮存和供应子系统包括气瓶、减压阀、电磁阀、质量流量控制器(MFC)、压力传感器及管路等部件。其中最关键的是 MFC, 由于推进剂的流量较小(3mg/s~ 400mg/s), 它必须具有测量、调节和控制微小流量的功能。选用 D07-7A/ZM MFC 和 D08-2A/ZM 流量显示仪。为适应 100W 和 1000W MPT 不同推进剂流量, 测量范围 0~ 5SLM 和 0~ 10SLM 两个量程。

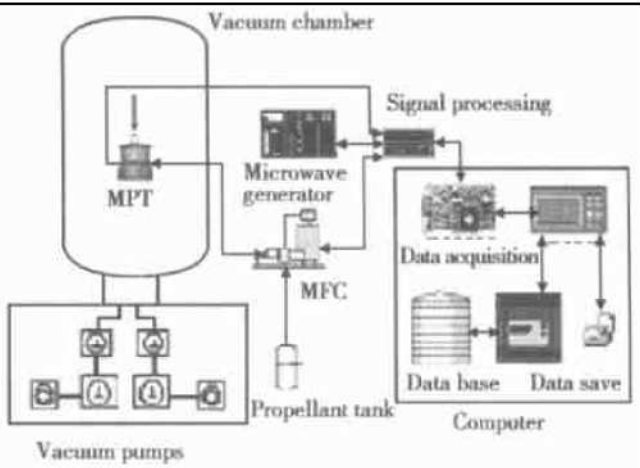


Fig. 1 Schematics of MPT vacuum experimental system

虚拟仪器测控子系统主要包括: 计算机硬件、计算机软件、数据采集硬件和外部传感器与仪器模块组成。以计算机为核心, 利用计算机强大的图形界面、数据处理能力和控制功能提供对测量数据的显示、分析和对外部传感器和仪器模块的操作。软件设计采用 Measurement Studio 的 LabWindows/CVI 作为开发平台。它能够支持串行接口、GPIB、VXI 等标准总线和多种数据采集板, 还可以驱动许多仪器公司的仪器。

采用 AT-MIO-16E-10 多功能数据采集卡。它是一种即插即用多功能无跳线接口板, 具有 A/D 转换和 D/A 转换功能, 另外也有数字输入/输出通道和定时器, 256K 字的内存, 并支持 DMA 和中断操作。

微波功率测量包括正向和反向功率。微波正向功率采用霍尔电流传感器, 它具有响应时间快、温度漂移小、线性度高、结构简单外, 还具有过电流保护、输入和输出隔离测量以及直流和交流电的连续测量的特点。微波反向功率使用衰减器来将微波能量衰减到毫瓦级, 进入检波器, 而检波器输出直流信号。在小信号条件下, 检波器输出的直流电压与微波功率成正比, 因此可用直流电流表在方便地测量检波器输出的电压, 再将其换算得到微波功率的大小。

实验测量参数包括: 微波入射功率、微波反射功率、推进剂质量流量、真空度、推进剂入口压强、系统真空度、壁面温度等。

4 实验研究与分析

4.1 真空启动特性

通过对不同输入功率、不同推进剂质量流量和不同真空度对启动影响的实验研究, 获得了 MPT 可靠启动的最佳条件和极限工况。试验表明, 点火前后谐

振腔最佳长度有所差异。点火前谐振腔内为中性气体,点火后谐振腔内为等离子体,因此点火前后谐振腔内介质的介电常数、导电率和导热率等参数发生明显变化,导致谐振特性发生变化。通过实验研究,获得了 MPT 在真空条件下既能可靠启动,又能稳定工作的最佳谐振点(微波反射功率最小)。

在固定结构下,MPT 启动可靠、工作稳定。在其它条件相同时,Ar 比 He 更容易启动。对于 Ar,可靠启动的比功率(微波功率 P_m /推进剂流量 q_m)为 6MJ/kg;而 He 可靠启动的比功率要求为 120MJ/kg。

功率和真空度一定时,推进剂质量流量大于一定值后,MPT 启动出现延迟;而当流量进一步增大时,MPT 无法启动。实验表明,在一定功率下,谐振腔内的推进剂浓度越稀薄,越利于启动。推进剂质量流量和真空度一定时,当输入功率小于一定值后,MPT 启动出现延迟;而当输入功率进一步减小时,MPT 无法启动。实验表明,在一定质量流量下,输入功率越高,越利于启动。推进剂质量流量和输入功率一定时,真空度在 $5.0 \times 10^{-2} \text{ Pa} \sim 2400 \text{ Pa}$ 范围内变化,真空度越低,越容易启动。

4.2 稳定工作实验

MPT 的比功率和效率计算关系为

$$P_{\text{forward}} = P_{\text{input}} \cdot \eta_{\text{PPU}} \cdot \eta_{\text{trans}} \tag{1}$$

式中 P_{forward} 是正向微波功率, W; P_{input} 是输入功率, W; η_{PPU} , η_{trans} 分别是 PPU 和微波传输部分的效率。

$$P_{\text{cavity}} = P_{\text{forward}} - P_{\text{reflected}} \tag{2}$$

式中 P_{cavity} 是输入谐振腔的微波功率, W; $P_{\text{reflected}}$ 是反向微波功率, W。

$$SP = P_{\text{cavity}} / q_m \tag{3}$$

式中 SP 为比功率, MJ/kg。 q_m 为推进剂质量流量, kg/s。

$$\eta_{\text{cc}} = P_{\text{cavity}} / P_{\text{forward}} \tag{4}$$

式中 η_{cc} 为谐振腔微波与等离子体耦合效率。

MPT 启动后,逐步调节推进剂质量流量,达到额定流量,MPT 在真空条件下稳定工作,真空度范围为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ Pa} \sim 10 \text{ Pa}$ 。当 P_{input} 在 30W~ 100W,谐振腔压强 $p_{\text{resonator}}$ 在 $5.0 \times 10^{-2} \text{ Pa} \sim 4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 范围内,100W MPT 均稳定工作。当 P_{input} 在 200W~ 1kW,谐振腔压强 $p_{\text{resonator}}$ 在 $5.0 \times 10^{-2} \text{ Pa} \sim 2.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 范围内,1kW MPT 均稳定工作。

通过对不同 He 和 Ar 的实验,在不同功率、不同质量流量情况下的实验,He 的比功率远高于 Ar 的比

功率,实验数据见表 2 和表 3。

Table 2 Ar performance data (1kW MPT)

$P_{\text{forward}}/\text{W}$	$P_{\text{reflect}}/\text{W}$	$p_{\text{resonator}}/\text{kPa}$	$q_m/(\text{mg/s})$	$T_w/^\circ\text{C}$
300.0	65.0	68.2	122.4	188.0
420.0	48.0	70.8	122.4	340.0
515.0	45.0	71.7	122.4	450.7
600.0	48.0	78.0	122.4	427.0
800.0	45.0	79.0	122.4	456.0
515.0	48.0	46.4	61.2	470.0
500.0	46.0	66.8	102.0	452.1
510.0	47.0	86.0	142.8	400.0
510.0	48.0	105.0	183.6	345.0
520.0	65.0	124.7	224.4	275.0
520.0	48.0	134.0	285.6	237.0
520.0	48.0	146.4	326.4	215.0
520.0	45.0	155.2	367.2	518.0
520.0	48.0	164.0	408.0	494.0

Table 3 He performance data (100W MPT)

$P_{\text{forward}}/\text{W}$	$P_{\text{reflect}}/\text{W}$	$p_{\text{resonator}}/\text{kPa}$	$q_m/(\text{mg/s})$	$SP/(\text{MJ/kg})$
30.0	3.0	168.0	8.16	3.680
40.0	4.5	177.0	8.16	4.902
50.0	6.0	181.0	8.16	6.188
60.0	22.0	184.0	8.16	7.353
70.0	7.7	88.6	8.38	8.353
69.5	3.4	378.1	20.6	3.047
69.6	4.6	306.8	16.6	4.193
70.0	5.9	236.7	12.6	5.556
70.0	7.7	188.6	8.38	8.353
70.0	11.8	98.5	3.21	21.81
70.0	12.6	78.2	2.12	33.02
69.7	13.7	34.3	1.08	64.53

稳定工作工程中,由于 Ar 和 He 的等离子体特性相差较多,例如:He 的导热率、电离能和比热分别为 $0.325 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 24.6 eV 和 $5200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;而 Ar 为 $0.0427 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 15.8 eV 和 $519.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。在 MPT 工作过程中,谐振腔的谐振特性、等离子体温度和谐振腔壁面温度也存在差异。He 的谐振长度略小于 Ar,Ar 比 He 更容易稳定,用 He 作推进剂时,壁面温度高于 Ar 的壁面温度 T_w 。从试验现象看,He 的火焰比 Ar 的火焰颜色更亮,长度更长。这主要是氦气的分子半径远小于氩气,氦气的电离能大于氩气。

在微波功率一定时,随着推进剂流量的增加,反射功率减小;当流量大于一定值后,反射功率基本不变,此时反射功率最小,壁温最高;如果进一步增加流量,壁温下降,谐振腔内等离子体出现不稳定现象。

在推进剂流量一定的情况下,随着微波功率的增

加, 谐振腔压强升高, 壁温增加。

实验表明 He 的比功率远大于 Ar, 当比功率从 2.0MJ/kg 到 35MJ/kg 范围内变化时, MPT 均能工作, 由于目前没有推力测量, 无法判定 MPT 性能, 但从火焰颜色和长度及壁温判断, He 的平均比功率为 20MJ/kg, Ar 为 7.0MJ/kg。可见 He 的比冲远高于 Ar。

由于 MPT 的喷管喉部直径较大, 而微波功率源的输出功率有限, 在一定功率下, 当处于最佳工作状态时, 推进剂质量流量较小, 谐振腔压强较低。当谐振腔压强较高时, 由于推进剂质量流量大, 而微波功率有限, 达不到推进剂最佳比功率, 火焰温度较低。

4.3 性能分析

推进剂质量流量计算公式

$$q_m = \Gamma p_{\text{resonator}} A_t / \sqrt{T_r} \quad (5)$$

式中: A_t 为喷管喉部面积, m^2 ; T_r 为谐振腔内等离子体平均温度, K;

$$\Gamma = \sqrt{\frac{M\gamma}{R_0}} \left| \frac{2}{\gamma+1} \right|^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

喷管的喷气速度 V_e 为

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R_0}{M} T \left| 1 - \left| \frac{p_e}{p_{\text{resonator}}} \right|^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right|} \quad (6)$$

式中: M 为推进剂分子量; R_0 为通用气体常数, 8314.3J/(mol·K); p_e 为喷管出口截面压强, Pa; γ 为比热比。由表 1 的 MPT 结构参数和真空实验测量参数 $P_{\text{resonator}}$, 可得 MPT 的初步性能参数, 见表 4。

由表 4 可见, He 的喷气出口速度远高于 Ar, 相应其比冲也高于 Ar。由于 100W 和 1kW MPT 的喷管喉部直径大于设计值, 所以最佳比功率对应的谐振腔压强较低。MPT 未在最佳状态下工作, 使得等离子体与微波耦合效率偏低, 导致 MPT 比冲较低。

Table 4 Performance data of 1kW MPT

	Unit	1kW MPT	
Propellant		He	Ar
M		4.0	39.94
γ		1.67	1.4
$\bullet$		0.01594	0.04746
$p_{\text{resonator}}$	kPa	140	132
d_t	mm	1.0	1.0
q_m	mg/s	30.8	122.4
T_r	K	3238	1605
V_e	m/s	5792	1529

5 结 论

通过对 100W 和 1kW MPT 的真空实验, 两种结构的 MPT 在真空环境条件下启动可靠, 工作稳定。在 30W~1kW 功率范围内, He 和 Ar 在 $5.0 \times 10^{-2} \text{ Pa} \sim 4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 谐振腔压强范围内均可稳定工作。

实验表明, He 和 Ar 的启动比功率分别为 120MJ/kg 和 6.0MJ/kg, 稳定工作比功率分别为 20MJ/kg 和 7.0MJ/kg。稳定工作过程中, Ar 比 He 更稳定, 但比冲较低。

由于微波功率源输出功率有限, 而喷管喉部直径大, 在最佳比功率下, 谐振腔压强较低, 使得微波与等离子体耦合效率较低, 导致比冲不高。由于微波功率采用间接方法测量, 存在一定误差, 并且没有测量推力和等离子体温度, 因此无法准确确定 MPT 的性能。

下一步的研究重点是改进谐振腔设计, 提高参数测量精度, 并进行小推力测量; 同时进行 MPT 的小型化研究和系统集成研究。

参考文献:

- [1] Dunning J. NASA's electric propulsion program[R]. AIAA 98-3180.
- [2] Gorshkov O A. Activity of Russian space agency in the field of electric propulsion[R]. AIAA 98-3176.
- [3] Hawley M C, Asmussen J S, Filipus J W. Review of research and development on the microwave electrothermal thruster[J]. *J. Power and Propulsion*, 1989, 5(6).
- [4] Sullivan D J, Micci M M. Performance testing and exhaust plume characterization of the microwave arcjet thruster[R]. AIAA-94-3127.
- [5] Nordling D, Micci M M. Low-power microwave arcjet performance testing[R]. IEPC 97-089.
- [6] Souliez F J, Chianese S G. Low-power microwave arcjet testing: plasma and plume diagnostics and performance evaluation [R]. AIAA 99-2717.
- [7] Oleson S. Advanced propulsion for space solar power satellites [R]. AIAA 99-2872.
- [8] 毛根旺, 韩先伟, 杨 涓, 等. 电推进研究的技术状态和发展前景[J]. 推进技术, 2000, 21(5).
- [9] 毛根旺, 韩先伟, 杨 涓, 等. 微波电热推力器启动与稳定工作的试验观测[J]. 宇航学报, 2000, 21(11)(增刊).

(编辑: 王居信)