

小功率电弧等离子体发动机试验及性能分析^{*}

汤海滨, 张正科, 刘 宇, 戴梧叶

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 电弧等离子体发动机 (Arcjet) 因其高比冲、高推力/功率比等特点成为当前国际上电火箭研究和应用的热点。介绍了小功率 Arcjet 实验研究系统的主要组成, 分析了实验方案, 对 4 种不同结构尺寸的发动机进行了性能实验, 给出初步的发动机工作性能参数及实验结果分析。实验结果表明小喷管喉径及氮作为推进剂的发动机性能较好。所得结论对小功率 Arcjet 发动机的优化设计具有参考价值。

关键词: 电弧喷射发动机; 等离子体发动机; 发动机试验; 性能分析

中图分类号: V439.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2001) 03-0233-05

Experiment and performance analyse on low power arcjet

TANG Hai-bin, ZHANG Zheng-ke, LIU Yu, DAI Wu-ye

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Arcjet is the highlight of investigation and application in world because of its high specific impulse, high ratio of thrust and power. This paper introduces primary constitution of experiment system on low power Arcjet and analyzes experiment projects. Four types of thruster were employed to present performance test, primary operation performance parameters and experiment results analysis are presented. The tests results show that thruster performance is better at small constrictor diameter and nitrogen as propellant. The conclusions obtained in this paper provide a reference for the optimization design of low power Arcjet thruster.

Key words: Arc jet engine; Plasma engine; Engine test; Performance analyse

1 引 言

电弧加热等离子体发动机(简称 Arcjet)兼有电热式发动机和等离子发动机的工作特点,通过阴极与阳极之间的直流放电电弧加热推进剂,产生高温等离子体经喷管加速喷出产生推力。它具有高比冲、高推力/功率比、大的推进剂选择范围、结构简单和可靠性高等特点。在各种电火箭中, Arcjet 是最有现实发展前途的电火箭之一,它可以在不同功率范围内发展,适应不同空间推进,如空间站、同步卫星和星际飞行等要求的发动机。

20 世纪 80 年代以来,对空间站和卫星等空间推进技术的要求越来越高,希望能有轻小、低成本和低功耗、高性能的先进推进器,世界各航天大国均竞相开展对 Arcjet 的研究与应用。美国最为重视 Arcjet 的研究, NASA 刘易斯研究中心、火箭研究公司、美国空

军及许多大学和实验室都相应制定了 Arcjet 的研究计划,功率从 1 kW~50 kW,1993 年美国首次将 MR-508 Arcjet (1.4 kW) 用于 Telstar ⑤ 卫星,作南北位置保持,后又陆续应用到 Asiasat 2[#]、国际通信卫星 (11) 和 (11) A 上。1994 年生产 Arcjet 的 RRC 获 53 套订货,每套 130 万美元。德国研制的 750W 氨 Arcjet 已用于 AM-SAT P3-D 卫星上。1998 年总共有 11 颗洛克希德·马丁公司远距离通信和直接广播地球同步轨道卫星,利用不同类型的 Primex 宇航公司生产的电推进系统,其中包括 5 个肼 Arcjet (比冲 5.10 kN·s/kg),4 个改进型 Arcjet (比冲 6.00 kN·s/kg), Primex 宇航公司也完成了为 NASA 数据中继和跟踪卫星研制的一台低功率 Arcjet 的认证^[1~3]。对于脉冲工作的 Arcjet, NASA 资助的 Illinois 等大学正在加大力度研究,尚未实用^[4]。

目前国外的许多大学实验室和研究机构都在进行 Arcjet 的实验及其内部热等离子体工作过程的研

* 收稿日期: 2000-09-25; 修订日期: 2000-11-24。基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50086001)。

作者简介: 汤海滨 (1970—), 男, 博士生, 工程师, 主要研究领域为航空宇航推进理论与工程。

究和分析^[5~7], 各国政府及相关部门每年均制定相应的研究和发展计划^[2,8]。

2 实验系统

建成的小功率 Arcjet 实验系统包括: 电源及点火系统(电源处理单元 PPU)、小推力测量系统、测量控制系统、真空系统、推进剂供给系统及发动机本体。

实验用电源为采用先进的 IGBT(绝缘栅双极晶体管)功率模块研制开发的 Arcjet 发动机逆变电源(PPU), 其功用为: 可靠地对发动机点火, 根据发动机实验参数的要求为发动机供电, 使发动机稳定工作。由于发动机运行电压低($< 100\text{ V}$), 此电压不足以使电极间产生击穿而引发放电。为使发动机正常工作, 必须采取一定的引弧措施确保在一定的电极距离和推进剂流量范围内击穿推进剂, 产生电弧放电。引弧(点火)的方式有很多, 这里采用可靠的高频($300\text{ kHz} \sim 500\text{ kHz}$)、高压($2\,000\text{ V} \sim 3\,000\text{ V}$)方法点火。

专门为实验设计加工了一套精密天平推力测量系统。利用电磁反馈补偿方法使天平工作在随遇平衡状态(或接近于随遇平衡状态), 可大大提高普通天平的计量性能和精度, 从而准确地测量出微小推力, 测量误差小于满量程的 2%^[9]。

推进剂供给系统包括气瓶、减压阀、电磁阀、质量流量控制器、压力表及管路等部件。最关键的是质量流量控制器。由于推进剂的流量不大($10\text{ mg/s} \sim 100\text{ mg/s}$), 它必须能测量很小的流量并具有保证供给的推进剂流量正确、稳定、可调节和可控制的性能。实验采用 D07-7A/ZM 质量流量控制器, 可以满足使用要求。

测量控制系统是一套微机数据采集控制与处理系统, 可实现对被测工作参数自动采集、处理、绘制曲线及打印并实现对推进剂供给系统的自动控制。实验测量的初步参数包括: 发动机工作推力、电弧电压和电流、推进剂质量流率、真空系统真空度和推进剂进口压力。

全部实验在 $\phi 1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的真空系统中进行, 真空机组选用 K-400 系统, 配 2X-30 机械泵, 最高真空度可达 10^{-3} Pa 。初始工作真空度为 $2 \times 10^{-3}\text{ Pa}$, 发动机实验时, 真空室内的工作真空度在 $20\text{ Pa} \sim 100\text{ Pa}$ 范围内。

3 Arcjet 实验技术方案分析

Arcjet 发动机本体是主要的研究对象, 实验需要

了解和研究的内容包括: (1) 各零部件的材料, 特别是耐高温、耐电弧烧蚀的电极材料和高温密封材料的使用; (2) 电极, 特别是电弧室的结构、形状和尺寸, 及对发动机性能的影响; (3) 不同种类的推进剂对发动机性能的影响; (4) 推进剂进气方式对电弧稳定、发动机性能的影响。

针对所研究的内容, 制定了不同 Arcjet 实验研究方案。

3.1 电极、密封及绝缘材料

对于辐射冷却的小功率 Arcjet, 其工作温度非常高(电弧中心温度可达几万度), 对电极、密封及绝缘材料的要求非常高。实验分别使用不锈钢、纯钨和铈钨(含 2% 铈)作为发动机阴极、阳极材料; 使用氮化硼和云母陶瓷作为发动机绝缘材料; 使用柔性石墨纸压制的柔性石墨垫片作为密封材料。通过对不同材料的发动机的实验, 考核其工作状态。

作为电极材料, 不锈钢的耐高温、耐电弧烧蚀性能及引弧、稳弧和维弧性能都较纯钨和铈钨差, 但其经济性和加工性能较好; 氮化硼和云母陶瓷都可作为热绝缘材料, 前者的密度和热膨胀系数较后者小; 柔性石墨材料可耐 $3\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温, 可以满足发动机工作的热密封性能。

3.2 阴极、阳极喷管及电弧室结构

阴极、阳极喷管及电弧室结构尺寸对发动机的性能影响很大^[10]。实验根据不同的喷管喉道直径设计了 4 种不同结构尺寸的发动机, 见图 1 和表 1, 并考核其工作性能。喷管膨胀比根据以下公式决定:

$$\varepsilon = \frac{A_e}{A_t} = \frac{\sqrt{k} \left| \frac{2}{k+1} \right|^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{\left| \frac{p_e}{p_c} \right|^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \left| 1 - \left| \frac{p_e}{p_c} \right|^{\frac{k-1}{k}} \right|}$$

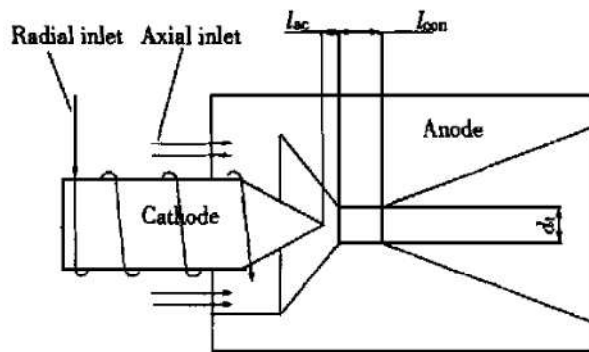


Fig. 1 Structural dimension of Arcjet nozzle tested in the experiment

Table 1 Dimensions and material of tested Arcjets

Arcjet		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
Electrode material	Cathode	Stainless steel	Cerium tungsten	Cerium tungsten	Cerium tungsten
	Anode	Stainless steel	Tungsten	Cerium tungsten	Cerium tungsten
d_i/mm		1.0	0.8	0.7	0.5
l_{con}/mm		1.0	1.0	1.2	1.0
l_{ca}/mm		0.8	0.8	0.4	0.8
ε		225	200	130	225
Propellant inlet mode		Axial inlet	Axial inlet	Axial inlet	Radial inlet

其中 ε 为喷管膨胀比; A_e 为喷管出口截面积; A_i 为喷喉面积; p_e/p_c 为喷管进出口压强比; k 为比热比。

初步实验所测得的进口压强为 60 kPa~ 300 kPa, 工作真空度为 30 Pa~ 80 Pa, 根据推进剂的流量、喷喉尺寸和推进剂种类的不同而变化。喷管扩张半角和收敛半角分别为 15° 和 45°。

3.3 推进剂的选择及进气方式

实验分别使用 Ar、N₂ 和 H₂ 作为推进剂, 进气方式为轴向进气和径向进气两种。

Arcjet 内部气体流动的能量主要来源于电场对所形成的热等离子体的加热, 使用电离能大、热焓值高的双原子气体可增大电场强度和电流密度, 更充分地利用电能, 使等离子体达到更高的温度, 从而使更多的热能转换为流动动能, 明显提高发动机的性能; 采用径向和旋向的推进剂进气方式, 考核电弧工作的稳定性。

4 实验结果与性能分析

4.1 电流、电压特性分析

对 4 种发动机进行了改变推进剂的类型和流量的多次实验。实验表明, 当推进剂的流量和电源电流不变时, 采用热导系数和电弧最小可维持功率高的 N₂ 较 Ar 及使用小喷管喉道直径和钨钨材料的电极可获得较高的放电电压和发动机工作功率(功率为电流和电压的乘积)。在相同流量下, 喷管喉道直径 d_i 小, 弧室前可建立更高的压力, 使压缩在电弧室的电弧充分发展, 达到较长的电弧长度, 并附着在阳极喷管的扩散段部分, 电弧有较高的弧柱电阻, 并提高发动机的工作功率。图 2 为不同流量下 Ar 和 N₂ 为推进剂的 4 种发动机正常工作的电流和电压值。另外, 实验发现当对于同一结构尺寸的发动机, 推进剂流量增大至某一数值后, 发动机电弧和工作电压值会变得不稳定, 甚至引起断弧, 分析认为这主要是由于弧室前压力过高, 电弧不能稳定地附着在阴极尖和阳极扩散段; 当推进剂流量过小, 对于大的直径, 弧室前压力

过低, 电弧不能拉出电弧室至扩散段而只能附着于弧室前的收敛段, 发动机工作电压低, 为非正常工作状态。阴、阳极采用钨及钨钨材料的 2[#]、3[#] 和 4[#] 发动机比不锈钢材料的 1[#] 发动机更容易起弧和保持电弧稳定, 电流、电压值也较稳定。

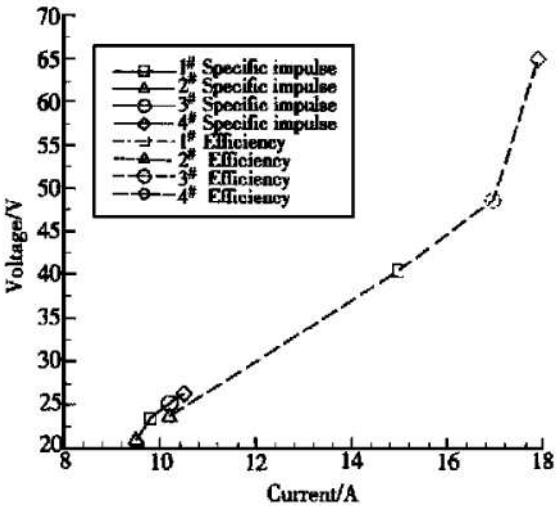


Fig. 2 Discharge current-voltage characteristics

4.2 推进性能及结果分析

对于目前地面实验发动机, 反映推进性能的参数主要是比冲 I_{sp} 和推力效率 η , 由以下公式计算:

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m} g}; \eta = \frac{F^2 - F_c^2}{2\dot{m} IV}.$$

其中 F 为总推力; F_c 为冷流射流推力。

图 3 为 N₂ 为推进剂时 4 种不同尺寸发动机在不同流量下的比冲和效率曲线。图中显示, 使用喷管喉道直径小的 3[#] 和 4[#] 发动机可以达到较高的比冲和推力效率值, 在相同的流量下, 发动机的工作推力也较大。其中 3[#] 和 4[#] 发动机在流量为 20 mg/s 时为最佳工作状态, 比冲大于 4.5 kN·s/kg 效率大于 0.25, 接近国外指标。另外实验曲线显示, 对于不同结构尺寸的发动机, 均存在一个使发动机达到最佳工作性能的最佳推进剂流量。从实验现象也可看出, 在此工作状

态下, 阳极喷管喷出的火焰较长、较粗, 但径向和轴向的推进剂进气方式对发动机电弧的工作影响并不是十分明显。图 4 为 3[#] 发动机分别使用 N₂ 和 Ar 为推进剂在不同流量下的比冲和效率曲线, 图中可看出, N₂ 作为推进剂的发动机性能明显高于 Ar 作为推进剂的性能。

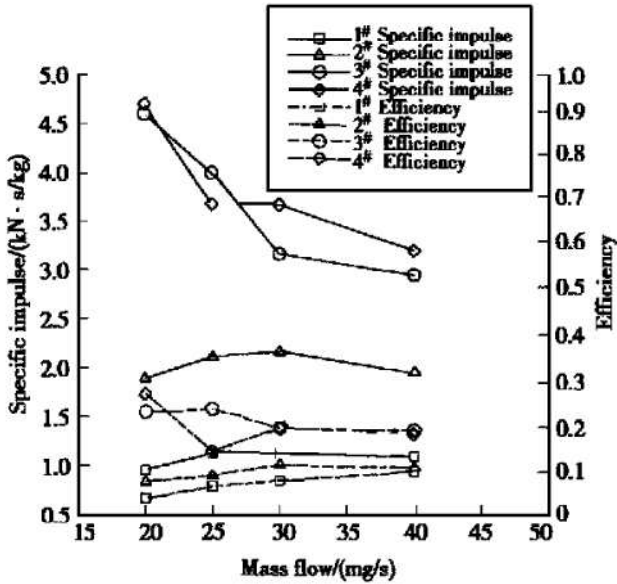


Fig. 3 Performance curve at nitrogen as propellant

表 2 为发动机稳定工作 30 s 后的实验数据, 数据表明以 Ar 作为推进剂的 Arcjet 发动机工作性能普遍

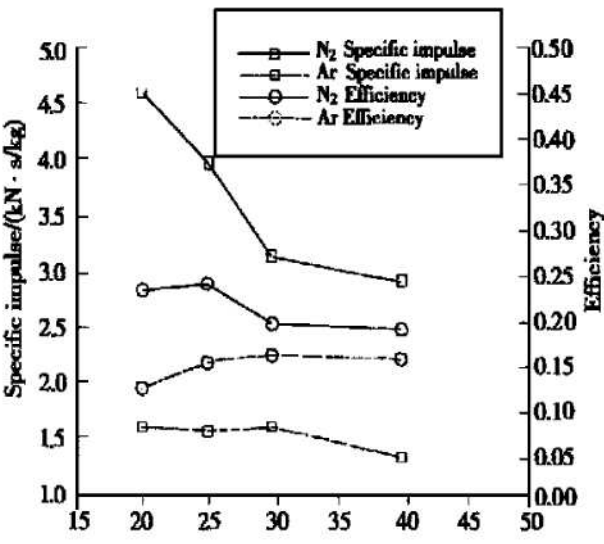


Fig. 4 Performance curve at nitrogen and argon as propellant

偏低, 不适合作为 Arcjet 的工作推进剂。Ar 流量为 40 mg/s 时, 4[#] 发动机推力效率达到 0.4, 但其比冲值仅为 2 kN·s/kg, 此时推进剂流量过大, 电弧未充分加热推进剂, 为非正常工作状态。为与卫星上单组元或双组元作推进剂的化学推进剂系统的贮箱和管路共用, 国外实用的 Arcjet 发动机普遍使用肼作为推进剂, 实验室则采用 N₂+ 2H₂ 模拟肼作为推进剂进行实验。

Table 2 Typical experiment data

Propellant and performance parameters		N ₂				Ar			
		Thrust/ mN	Specific impulse/ (kN·s/kg)	Power/ W	Efficiency/ %	Thrust/ mN	Specific impulse/ (kN·s/kg)	Power/ W	Efficiency/ %
Arcjet1 [#] mass flow/ (mg/s)	20	19.4	0.97	235.0	4.0	18.2	0.91	212.5	2.90
	25	28.5	1.140	241.7	6.72	25.2	1.008	197.4	5.43
	30	34.0	1.133	242.0	7.96	33.0	1.100	199.0	7.12
	40	44.0	1.100	241.0	10.0	39.0	0.975	197.8	7.61
Arcjet2 [#] mass flow/ (mg/s)	20	38.0	1.900	465.0	7.76	32.0	1.600	200.0	11.8
	25	53.0	2.120	607.5	9.25	38.0	1.520	256.0	11.3
	30	65.0	2.167	610.0	11.5	50.0	1.667	232.0	17.0
	40	78.0	1.950	706.0	10.8	58.5	1.462	273.0	14.7
Arcjet3 [#] mass flow/ (mg/s)	20	92.0	4.600	901.0	23.5	33.5	1.675	220.0	11.7
	25	100.0	4.000	826.2	24.2	41.0	1.640	216.0	14.6
	30	95.0	3.167	760.4	19.8	50.2	1.673	257.0	15.3
	40	118.0	2.950	910.0	19.2	56.4	1.410	252.0	14.8
Arcjet4 [#] mass flow/ (mg/s)	20	94.0	4.700	800.0	27.6	51.0	2.550	170.0	34.9
	25	92.0	3.680	1170	14.7	56.2	2.248	213.0	27.6
	30	110.0	3.667	1020	19.8	68.6	2.287	276.0	26.4
	40	128.0	3.200	1105	18.5	88.0	2.000	225.0	40.0

4 结 论

(1) 采用的脉冲微型反应色谱系统, 可快速筛选结焦抑制剂, 探讨结焦机理。但此法更侧重于研究燃料初期结焦行为, 离实际应用尚有一段距离。

(2) 三苯基磷处理的反应器表面形成稳定钝化膜。如果在吸热型碳氢燃料热裂解同时处理表面, 钝化膜的形成受到表面催化结焦作用的不利影响, 且三苯基磷存在于燃料中在高温时会对钝化膜有破坏作用, 所以反应器表面可在热裂解前用三苯基磷处理, 而燃料中不必再投入三苯基磷。

(3) 含硫化合物类抑制剂效果优于含磷化合物及碱金属化合物。但燃料中硫含量过高会腐蚀金属部件。本实验三种复合剂乙酸钾, 三苯基磷, 亚磷酸三苯酯的加入能降低燃料中硫含量, 在取得相同抑制效果时, 乙酸钾对硫含量降低幅度最大。

(4) 复合剂的抑制结焦性能比单剂大大提高, 结焦量能抑制 99% 以上。

(上接第 236 页)

另外, 采用 H_2 为推进剂进行了实验。实验显示, H_2 为推进剂电弧起弧更为困难, 由于 H_2 在非常小的流量 (5 mg/s) 情况下, 电源电流已处于满负荷, 且真空室背压也非常高 (大于 1 kPa), 发动机处于非设计工作状态, 发动机正常工作需进一步减小喷管喉道直径, 所以目前未对其进行进一步的实验性能研究, 国外目前重点使用 H_2 作为大功率 (大于 30 kW) Arcjet 发动机的推进剂。

5 结论及设想

从对 4 种不同结构尺寸的小功率 Arcjet 发动机在不同工况下进行实验的结果和分析, 可得出以下结论: 对于同类型的推进剂, 小喷管喉道直径的发动机可得到较好的工作性能, 且发动机均对应有一最佳工作流量; 使用 N_2 作为推进剂较 Ar 可得到高的发动机功率并有高的工作性能; 阴、阳极采用钨及铈钨材料较不锈钢材料有更好的起弧和稳弧性能; 推进剂进气方式对发动机的工作性能影响不大。

进一步的设想是: 完善电源系统, 使电源的伏安特性与发动机伏安特性更为匹配, 得到理想的工作电流和电压值; 采用 $N_2 + 2H_2$ 模拟肼作为推进剂进行实验, 以得到更高的发动机性能。

参考文献:

- [1] 高 涵, 李祖光, 厉 刚, 等. 吸热型碳氢燃料催化脱氢的研究述评[J]. 推进技术, 1998, 19(4).
- [2] 朱万良, 潘富敏, 何 龙, 等. 吸热型碳氢燃料的结焦研究 (iy 测焦装置及结焦抑制剂)[J]. 推进技术, 2001, 22(1).
- [3] 李祖光, 高 涵, 厉 刚, 等. 吸热型碳氢燃料的量热研究[J]. 推进技术, 1999, 20(4).
- [4] 娄强昆, 刘惠才. 丙烷裂解反应中的表面效应[J]. 石油学报(石油加工), 1987, 3(34).
- [5] Ghosh K K, Deepak Kunzru. Reduction of coke formation during naphtha pyrolysis using triethyl phosphite[J]. Ind Eng Chem Res, 1988, 27(4).
- [6] 郝 红, 熊国华. 乙烯蒸汽裂解炉结焦抑制剂的研究进展[J]. 石油化工, 1999, 28(52).
- [7] Field E K, Meyerson S. In Organosulfur Chemistry[M]. Janssen, M. J., Ed., Interscience: New York, 1967, 143p.

(编辑: 盛汉泉)

参考文献:

- [1] Rodney L, B Burton R L. Overview of US academic programs in electric propulsion[R]. AIAA 98-3182.
- [2] Thomas R. Overview of major U. S. industrial programs in electric propulsion[R]. AIAA 99-2160.
- [3] Dunning J, et al. NASA's electric propulsion Program[R]. AIAA 98-3180.
- [4] Willmes G F, Burton R L. Performance measurements and energy losses in a 100 Watt pulsed arcjet[R]. AIAA 96-2966.
- [5] Sankovic J, Hopkins J. Miniaturized arcjet performance improvement[R], AIAA 96-2926.
- [6] Hruby V, Kolencik J. Methane arcjet experiments[R]. AIAA 97-2427.
- [7] Monika A K, Thomas G. High power hydrogen arcjet thrusters[J]. Journal of Propulsion And Powers, 1998, 14(5).
- [8] Saccoccia G. European electric propulsion activities and programmes[R]. AIAA 99-2158.
- [9] 汤海滨, 刘宇, 赵宝瑞, 等. 一种电推力器用小推力测量系统[J]. 推进技术, 2001, 1, 22(1).
- [10] Hidevuki H, Itsuro K. Influence of constrictor size on thrust performance of a very low power arcjet[R]. AIAA 98-3633.

(编辑: 盛汉泉)