

阳极结构对电弧加热发动机性能和稳定性的影响^{*}

侯凌云¹, 沈 岩², 刘政胤¹

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084 2 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘 要: 为了解决电弧加热发动机在低功率和低流量下工作稳定性差导致性能下降的问题, 以氮气为推进剂, 比较了两种阳极结构对发动机性能的影响, 采用原有阳极结构, 在低功率时推力比冲性能较差, 在低流量时效率较低; 而在收缩段采用绝缘体代替原有钨阳极的新结构后, 可使发动机的推力、比冲和热效率等性能和稳定性均有明显提高, 说明通过阳极结构的改进可以人为控制弧点位置, 对于低功率电弧发动机性能具有较大的影响。

关键词: 阳极结构; 电弧加热发动机; 性能; 稳定性

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2008) 03-0381-04

Effect of anode structure on the performance of arcjet

HOU Ling-yun¹, SHEN Yan², LIU Zheng-yin¹

(1. School of Aerospace Tsinghua Univ., Beijing 100084 China

2 Beijing Inst. of Control Engineering Beijing 100080 China)

Abstract The instability of arcjet under low power and flow rate leads to the decrease of performance. Using nitrogen as propellant, experiments under different conditions are compared between the new and old anode structure. For the old arcjet, thrust and impulse are low at low power, thermal efficiency is reduced at low mass flux. While for the new arcjet, it is clear that arc voltage, thrust, specific impulse, efficiency and stability are all improved remarkably. So the improvement of anode structure can control the place of the arc anode attachment which has the effect on the low power arcjet.

Key words Anode structure; Arcjet; Performance; Stability

1 引 言

电弧加热发动机结构简单, 具有比冲高、可以使用多种推进剂、系统简单和容易控制等特点。各国纷纷进行了相关的研究。在美国, 电弧加热发动机已经大量投入使用^[1], 德国^[2]和日本^[3]研制的电弧加热发动机也已经计划投入使用。在中国, 1992年才正式开展实验研究, 并取得了初步的进展^[4~6]。

在电弧加热发动机的研究中, 其稳定性问题关系到发动机是否能在更宽广的工作参数范围内获得高性能的重要问题。特别是对于低功率电弧加热发动机, 当降低发动机功率, 往往也会导致发动机性能的下降, 发动机更不易稳定^[7]。另外为了提高比冲, 最常用的方法是通过降低流量来提高比功率, 但这时对电弧的气动约束力就减少了。因此如何在确保性能

的前提下降低发动机的功率和流量, 提高工作稳定性是低功率低流量电弧加热发动机面临的难题。

国外的稳定性研究大多关注稳定的几何结构参数和工作参数, 比如减小阴阳极间距能使发动机更加稳定^[8]; 漩流进气也能稳定电弧^[9]。国内电弧加热发动机的研究过程中也发现不稳定现象, 刘宇等人的研究中发现发动机工作时常有三种不稳定现象: 一是弧压高低摆动, 射流不断伸缩; 二是电弧旋转; 三是电弧电压, 电流, 射流出现高频抖动^[10]。

为防止射流的伸缩和抖动, 提高发动机性能和稳定性的关键是控制弧点位置。弧点控制可采用气动力和阳极结构改进的方法, 1994年 Sankovic 和 Curran^[11]采用低烧蚀起弧技术通过气动力将阳极弧点迅速从收缩段转移到扩张段, 从而降低在起弧过程中在阳极收缩段的烧蚀速度, 但该技术仅适用在起弧阶

^{*} 收稿日期: 2007-01-08 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金 (60574031)。

作者简介: 侯凌云 (1972—), 女, 副教授, 研究领域为先进推进动力热研究。

段,对于长期在低功率低流量状态的电弧发动机不适用。Horisawa等人^[12 13]对超低功率(低于 100 W)的电弧发动机通过改变阳极结构材料获得较高的性能,但没有针对稳定性以及性能提高的机理展开研究。

本文以氮气工质为研究对象,对 100~500 W 范围内的低功率电弧加热发动机阳极结构进行了相应改进,并对其性能和稳定性进行了对比试验。

2 发动机结构和实验系统

2.1 发动机结构

电弧加热发动机本身由阴极、阳极以及二者之间的密封和绝缘装置构成,其中阳极通常也是加速喷管。工作时,由阴极和阳极之间的电弧加热推进剂,推进剂受热膨胀后,经过阳极喷管加速喷出,形成反作用推力。同时,部分推进剂电离为等离子体以维持电弧。电弧中心温度可达 20 000 K 以上,大大高于化学火箭发动机内部工作温度,因而发动机可以得到较大的比冲。在电弧加热发动机工作中,阳极弧点位置对发动机性能和稳定性的影响很大,特别在小流量和低功率时,阳极喷管出口的羽流很微弱,电弧主要游动在阳极收缩段和喉部的上游,电压脉动很大,工作不稳定,而且此时由于收缩段的热载荷较高造成较高的热烧蚀速度。因此为使电弧工作稳定和性能提高,本文采用改进阳极结构的办法将弧点稳定在阳极扩张段。

图 1 所示为本文研究中改进前后发动机阳极结构示意图,图 1(a)中阳极采用钨,既是一个阳极,又是一个收扩喷管,起到加速产生推力作用;图 1(b)是为提高性能和稳定性而采取的改进措施,在收缩段采用绝缘体代替部分阳极,人为地强制阳极的弧点落在喉部的远端或扩张段,从而达到提高性能和稳定性的目的。

2.2 实验系统

整个实验装置由真空模拟系统、电源系统、推进

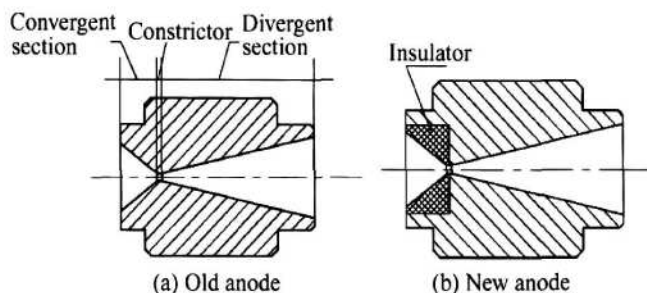


Fig 1 Schematics of anode structure for the old and new arcjet

剂供给系统、参数测量系统和发动机本体构成。其中发动机,支架和推力测量秤放置在真空室中。真空模拟系统由真空室和真空机组构成,发动机在真空室内工作时,真空室真空度维持在 10 Pa 左右。参数测量系统测量的参数包括气体质量流量、发动机的电流、电压、弧室压力、真空室压力和推力。

3 性能试验结果与分析

图 2 是在阳极喉部直径为 0.6 mm,阴阳极间距为 1.0 mm 时结构改进前后的电弧伏安特性对比(图中质量流量单位均为 mg/s,图例中“W”代表原有结构,“BN”代表改进结构,下同)。在图中可以明显看出,阳极收缩段替换成氮化硼材料之后,同样推进剂流量和弧电流的工况下,弧电压有明显的升高,这种趋势符合改进方案设计的预期,是人为拉长电弧的必然结果。值得注意的是,在一些流量和电流都较低的工况下,原有结构的电弧主要分布在阳极喉部的上游,弧电压较低,而采用改进结构后,电弧被强制拉长至喉部下游,弧电压升高更加明显。这说明这样的结构改进会对发动机的低功率性能有较大的影响。

图 3 显示了结构改进后,推力与功率的关系与改进之前的对比。阳极加入绝缘体之后,在同等流量和弧电流的工况下,因为弧电压的增加,功率有一定的提升,但在图中比较相同流量的工况曲线,推力水平均有明显上升。

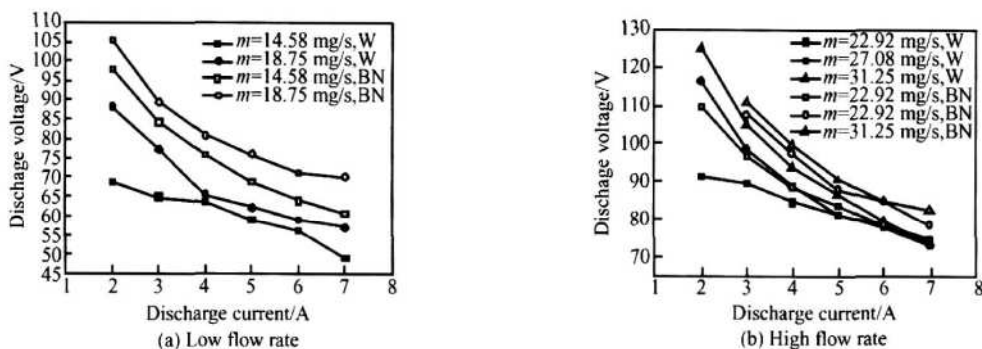


Fig 2 Comparison of discharge current-voltage characteristics

从图 4 中可以明显看到, 结构改进后, 发动机在各工况下的比冲都有了很大的提高。比冲的数值由原来的 135.77~210.88 s 提高到 223.42~274.56 s。除弧电压提高的影响之外, 钨的热导率 ($170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 与氮化硼的热导率 ($1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 之间的较大差异也使得加入氮化硼之后的阳极降低了散热, 减少了发动机的热损失。

图 5 是热效率与功率的关系在结构改进前后的对比。其中热效率的计算式为: $\eta = \frac{(F - F_{\text{col}})^2}{2m\dot{P}_{\text{in}}}$

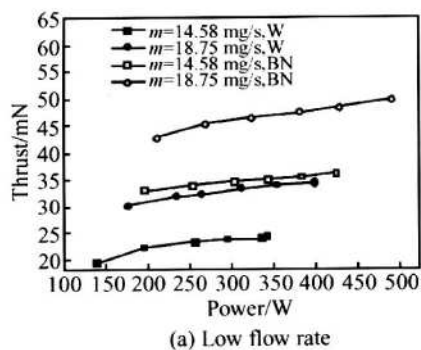
式中 F 为热态推力, F_{col} 为相同流量下的冷态推力, m 为推进剂质量流量, P_{in} 为输入功率。在阳极中加入了氮化硼填充体, 使得电弧被拉长的同时, 弧柱与流经阳极流道的推进气体在喉部附近的相互作用加强, 从而电源的输出功率转化成推力的比例增加, 热损失减小发动机效率随之提高。热效率由改进前的 5.82%~21.04% 提高到 10.51%~25.82%, 在较低功率和较低流量下此趋势更为明显。

从以上的实验结果和分析中可以看出, 将阳极的收缩段替换成氮化硼材料以后, 发动机的推力、比冲、效率等各项性能指标均有了较大的提高, 尤其是发动机在低功率状况下的运行性能。这说明阳极结构的改进思路是正确的。

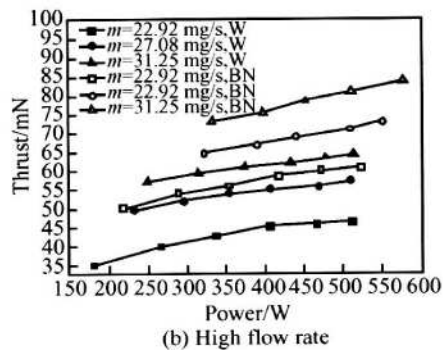
4 稳定性的初步试验结果与分析

判断发动机工作稳定性的标准很多。较为直观的是观察发动机的射流形貌, 研究弧光的颜色、明暗、抖动和烧蚀产物的喷溅情况。另外, 发动机工作时, 其弧电压和推力测量值 (射流抖动) 一般会有一定同步的脉动, 其脉动幅度的大小均可以作为工作状况稳定性的判断依据。

以弧电压的脉动幅度为稳定性的判定依据讨论结构的改进对发动机稳定性的影响。图 6 是在不同流量下, 改进后的发动机 (BN 表示) 在不同电流值时的弧电压脉动幅度与改进前 (W 表示) 的比较。从这张图中可以明显看出, 改进结构后的发动机, 其各个工况下的弧电压脉动幅度均比改动前要小, 且流量越低, 则弧电压脉动幅度就越悬殊。因流量越低, 气动压力不足将电弧吹至扩张段, 在喉部左右移动, 导致产生强烈的不稳定性, 但采用改进结构后, 将电弧强制稳定在扩张段, 在试验中观测到羽流吹出。在当流量保持不变时, 电流减小, 弧电压脉动幅度仍然会增大, 但是当流量为 14.58 mg/s 时, 弧电流减小到 3 A 时, 弧电压的脉动仅为 2 V 左右, 发动机的稳定性已经处于较理想的水平。这说明, 采用阳极收缩段填充绝缘体的办法, 使发动机在低流量、低电流的工况下的稳

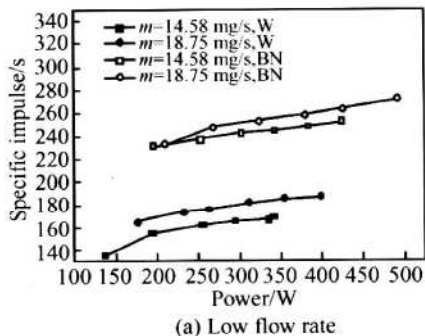


(a) Low flow rate

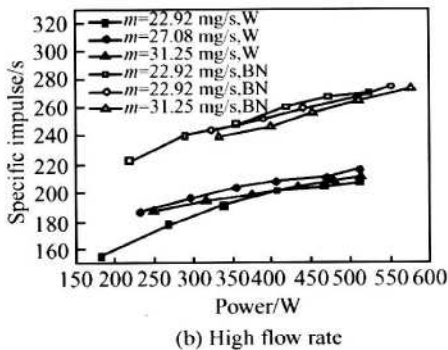


(b) High flow rate

Fig. 3 Comparison of thrust

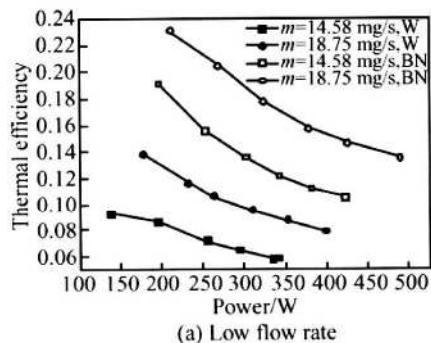


(a) Low flow rate

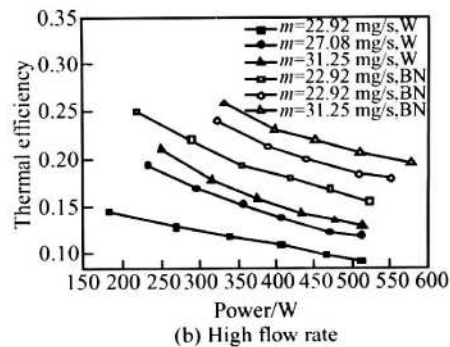


(b) High flow rate

Fig. 4 Comparison of specific impulse



(a) Low flow rate



(b) High flow rate

Fig. 5 Comparison of thermal efficiency

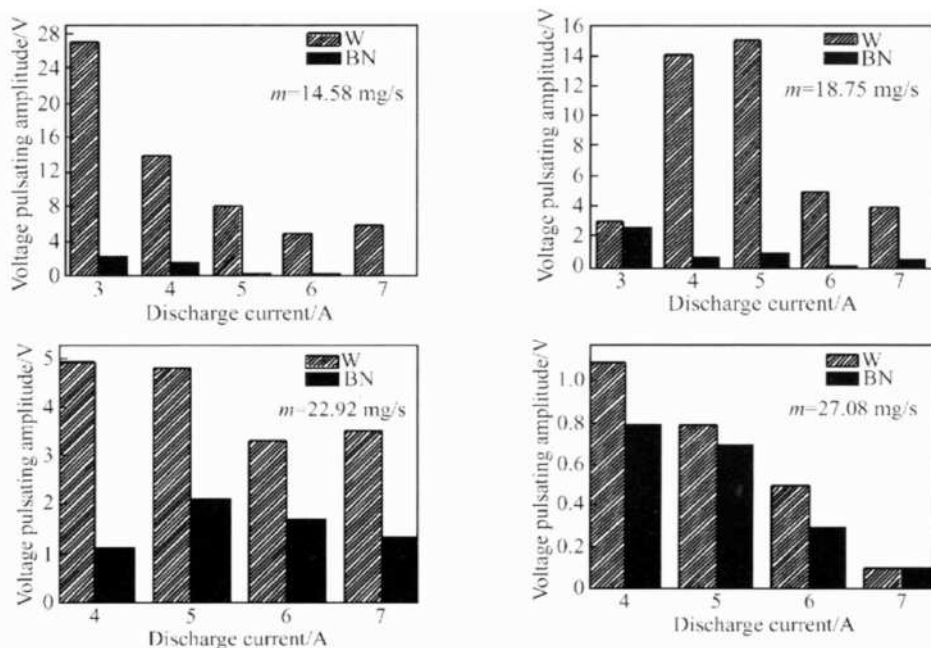


Fig 6 The comparison of discharge voltage pulsating amplitude at different flow mass rates

定性得到了彻底的改善。

5 结 论

本文对发动机阳极的结构进行了改进,采用绝缘体替换了阳极收缩段,并进行了相应的性能实验和稳定性分析。得出结论如下:

(1)结构改进后与改进前相比,相同工况下,弧电压提高了 10% 左右,比冲提高了 30% 左右,热效率增加了 20% ~ 50%;

(2)结构改进后,发动机稳定性,尤其是在低功率状况下的稳定性得到了显著提高。发动机稳定工作的推进剂流量范围变大了。

参考文献:

- [1] Lichtin D A. An overview of electric propulsion activities in US industry-2005[R]. AIAA 2005-3532
- [2] Wagner H P, Kurtz A. Low-thrust electric propulsion for small satellite lunar exploration[R]. AIAA 03-S 4 04, 2003
- [3] Yamada T, Shimizu Y, Toki K, et al Thermal analysis and thrust performance of a low power arcjet thruster[R]. AIAA 90-2581
- [4] 吴汉基,冯学章,刘文喜,等. 电弧加热发动机的实验研究[J]. 中国空间科学技术, 1997, 8: 41~48
- [5] 肖应超,汤海滨,刘 宇. 低功率电弧喷射推力器实

验研究[J]. 推进技术, 2005, 26(6). (ZHAO Ying-chao, TANG Han-jin, LIU Yu. Experimental investigation of low power arcjet thrusters[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(6).)

- [6] 沈 岩. 低功率水电弧加热发动机的实验研究[D]. 北京:清华大学, 2004
- [7] Lichon P G. Development and demonstration of a 600-second mission-average I_{sp} arcjet[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(6): 1018~1025
- [8] Curran F M, Samiento C J. Low power arcjet performance characterization[R]. AIAA 90-2578
- [9] Izumisawa H, Yukutake T, Andoh Y, et al Operational condition and thrust performance of a low power arcjet thruster[R]. ISTS 96-a-3-23p, 1996
- [10] 刘 宇,张振鹏,吴汉基,等. 电弧等离子体发动机初步研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(3).
- [11] Sankovic J M, Curran F M. A low-erosion starting technique for high-performance arcjets[R]. AIAA 94-2867
- [12] Horisawa H, Kimura I. Characterization of a very low power arcjet[R]. AIAA 99-2435
- [13] Horisawa H, Kimura I. Influence of constrictor size on thrust performance of a very low power arcjet[R]. AIAA 98-3633

(编辑:朱立影)