

低功率水电弧加热发动机的初步研究

沈 岩, 魏延明, 赵文华
(北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘 要: 本文研究了以水为推进剂的电弧加热发动机。其中电弧加热发动机的流量为 15mg/s、电流为 8A, 此时平均电压为 80.5V、功率约为 640W、平均推力为 0.0975N, 以此计算得到比冲为 650s 左右、效率为 55%~60%。成功地验证了水做为电弧加热发动机的推进剂、产生推力的能力。

关键词: 水; 电弧加热发动机; 电推进

中图分类号: V439.4

文献标识码: A

文章编号: (2006) 06-0023-05

Elementary research on low power arcjet with water propellant

Shen Yan, Wei Yanming, Zhao Wenhua
(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)

Abstract: Water is an absolutely necessarily material for any manned spacecraft, and it's also a clean propellant for electrical propulsion which could be obtained from other planet or the air conditioning system of spacecraft. Therefore the research is quite meaningful for manned spacecraft and deep space probe mission. Principle research on Arcjet system is introduced in this paper. According to current experimental results, at the power of 600W and the voltage of 80.5V, the average specific impulse and thrust is 650s and 0.975mN respectively. Thus the capability of arcjet with water as propellant is successfully verified.

Key words: water, arcjet, electrical propulsion

收稿日期: 2006-04-30; 修回日期: 2006-06-28。

作者简介: 沈岩 (1978—), 男, 博士, 研究领域为电推进技术、推进理论及等离子体技术。

万方数据

1 引言

水是空间站和一切有人参与的空间探索的必备资源,也是除地球以外其它星球目前唯一可以直接使用的资源,近年来的空间探测更显示了在月球及火星上有水存在。如果以水作为推进剂,不仅能够解决推进剂在空间的补给问题,可以从其他有水的星球或彗星中取水,还可以与航天器的其他与水有关的系统共享贮存系统,从而大大节约成本和占用空间。另一方面,水电弧加热发动机还能够以经过处理的中水为推进剂,从而大大提高水资源的利用率。

目前的电推进方式中,只有在电阻加热推进系统中进行过以水为推进剂的研究。但是电阻加热由于自身加热机理的限制,不可能达到很高的比冲,目前的研究主要针对小卫星和微小卫星的姿态控制。

从工作机理的角度考虑,电弧加热发动机对推进剂的要求没有太大的限制,而且在前人的工作中也有过在其他场合以水为电弧等离子体发生器的工质的先例,因此我们尝试以水为推进剂进行电弧加热发动机的研究。另外,由于电弧加热发动机的推进剂可以是液体,也可以是气体,这样它不仅能够利用航天器上的废水,也能利用航天器上的废气,如人体呼出的二氧化碳等,因此它是一种环保的发动机。此外,与其它种类的电推进系统相比,电弧加热发动机在电能供应、技术难度、系统兼容性及商业价值等方面也具有较大优势。

总之,不管应用在空间实验室、大型空间站及其他空间有人照料航天器上,还是用于其他卫星上替代现有的化学推进系统,电弧加热发动机都是一种非常理想的推进方式。

2 水电弧加热发动机的设计

通常的电弧加热发动机内部工作过程具有如下特点:

(1) 物理过程复杂多样并且各种过程强烈耦合,数据

合;

(2) 空间狭小,使得各种物质和能量运输过程极其剧烈;

(3) 发动机的喷管中空间尺度小、气体流速高、滞留时间短、压力低,喷管内的流动明显偏离化学与热力学平衡。

以水为推进剂时,电弧加热发动机除了具有上述特点外,还具有其自身的特殊性:

(1) 水在常温下为液态,推进剂在发动机中经过相变过程;

(2) 与试验中常采用的 Ar、H₂、N₂ 等推进剂相比,水为三原子分子,由两种元素构成,分子结构比较复杂,分解和电离时系统内的组分也比较复杂;

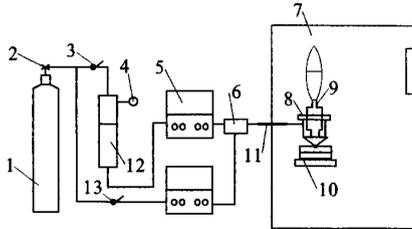
(3) 与工程应用中常采用的推进剂 N₂H₄ 相比,N₂H₄ 虽然也是以液态储存,但是由于其分解反应为放热反应,应用中先催化分解为高温气体后再送入发动机中,而水作为推进剂时气化和分解都要吸收能量,因此不能采用类似的方法。

以水为推进剂时具有的这些特殊性,对发动机的设计和性能都有较大的影响。为此,我们设计了几种初步的发动机结构方案,并通过一些试验比较,确定了以水为推进剂的水电弧加热发动机的结构和工作方案:使工质水通过一段布置在阳极外壁上的金属管后,再供入到推力器中。由于发动机在工作时,外壳和阳极喷口处在很高的温度下,推进剂通过这些高温区时,利用这些高温区的热量加热水使之气化,一方面解决了水的气化问题;一方面降低了阳极的温度,有利于提高发动机寿命,同时也可以回收热量,提高能量的利用率。在启动时,首先用其它气体作为推进剂使发动机工作一段时间,预热发动机,然后供水使其经过发动机高温区、发生气化。于是,在试验系统中,不需要单独设置汽化装置,而发动机也可以采用与气体为推进剂时类似的结构。

3 试验系统

为了进行水电弧加热发动机的相关试验,我们建立了水电弧加热发动机试验台,除了电弧加

热发动机本身外，还包括真空设备、推进剂供给装置、发动机电源、小推力测量装置以及其它的管路、接口和仪表，可以支持发动机的工作，并且能够改变发动机工作时的推进剂流量和功率等参数，系统结构如图 1 所示。其中发动机、支架和推力测量秤放置在真空中。



1-高压气瓶； 2-减压阀； 3-球阀； 4-压力表；
5-流量显示和控制仪； 6-工质输入阀； 7-真空室；
8-支架； 9-发动机模型； 10-电子秤； 11-软管；
12-蓄水罐； 13-球阀

图 1 发动机试验工作台
Fig.1 Experimental setup

真空室的直径为 800mm，总长度 1000mm。真空室壁面上除了设有与真空机组连通的管路、推进剂供入接口以及放气阀外，真空室的壁面上还设有两个光学观察窗，可以在试验过程中观察发动机的工作情况，同时也为羽流的光谱诊断系统预留的光路通道。采用机械-罗茨泵真空机组，在发动机工作时，真空度为 6~10Pa。发动机的推力测量采用以高精度的电子秤为核心的测量装置，其精度为 10mg，测量范围 0~5000mN，测量误差不超过标称值的±0.02%。

4 试验结果及讨论

4.1 射流形貌

以水为推进剂时，在电流 8A、流量 15mg/s 时，得到了如图 2 (a) 所示的射流 (由于观察视角的限制，射流的上部被遮住)。为了便于比较，在图 2 (b) 中给出了相同摩尔流量下以氩气为推进剂时的射流。从图中可以看到，在相同的电流和摩尔流量下，以水为推进剂时，射流明显比以氩气为推进剂的射流强。同时，在试验过程

中观察到，以水为推进剂时，射流不够稳定，存在明显的强弱变化。



(a) 以水为推进剂



(b) 以氩气为推进剂

图 2 射流形貌

Fig.2 Plume appearance

4.2 发动机工作参数和性能

以水为推进剂时，在电流 8A、流量 15mg/s 时，数据采集得到的电弧电压如图 4 所示。从图 3 中可以看到，此时电弧电压为 80V 左右，采集得到的数据绝大部分在 70~90V 之间，平均值为 80.5V，与以氩气为推进剂时得到的数据相比，在相同的电流与摩尔流量下，以水为推进剂时电压远比以氩气为推进剂时高。同时，电压在平均值 10V 左右的范围内变化。观察局部时间段的电压变化可以发现，射流中存在低频电压变化，我们利用定性试验，初步验证了这种低频振荡主要是由于供给管路中的流量不稳定引起的。在上述工况下，推力峰值可以达到 0.126N；此时峰值比冲为 840s；平均推力为 0.0975N，以此计算得到比冲为 650s 左右；效率为 55%~60% (为了保证试验的可重复性，在该工况下进行了多次推力、流量、电特性测量)。

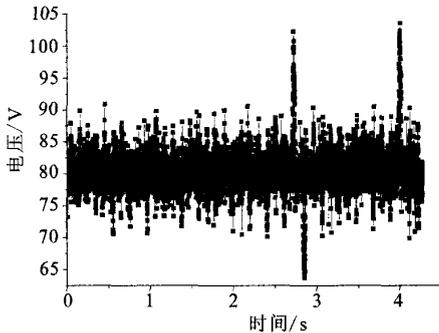


图3 以水为推进剂时的电弧电压
(电流8A、流量15mg/s)

Fig.3 Arc voltage with water propellant (8A 15mg/s)

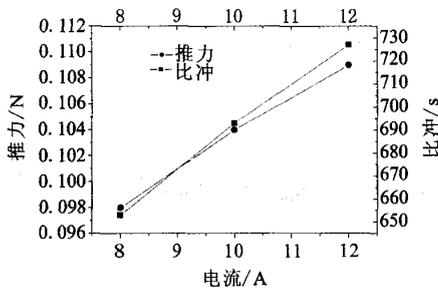


图4 水为推进剂时电流与推力和比冲的关系 (15mg/s)

Fig.4 Relationship between thrust/specific impulse and current (15mg/s)

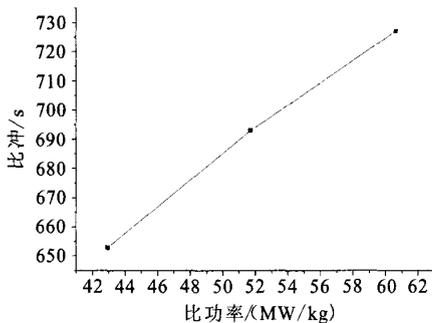


图5 水为推进剂时比功率和比冲的关系 (15mg/s)

Fig.5 Relationship between specific power and specific impulse (15mg/s)

通过改变电流，我们得到了不同工作参数下的发动机性能（由于发动机的射流不稳定，且由于阳极烧蚀喉部的尺寸发生了变化，因此在试验数据主要是推力测量中存在一定程度偏差，根据万方数据

多次试验结果观察，偏差幅度在25%以内；由于液体流量调节时会产生较大偏差，下述试验均在相同流量，即15mg/s时进行。得到的试验结果如图4、图5所示。

从图中可以看到，与氩气相比，改用水作为推进剂时，在相同的摩尔流量和电流下，电弧电压、功率、比功率及比冲都有了很大的提高，而参数之间的相互影响的关系则与氩气为推进剂时类似。

4.3 试验结果分析

上面以水为推进剂得到的试验结果显著高于一些文献中报道的采用其它推进剂的相关试验结果。为了研究以水为推进剂时比冲提高的机理，我们把以水为推进剂时得到的数据与氩气相对比进行分析。

以一个典型的工况（下文中写为工况1）为例，氩气流量为42.1mg/s；电流为8A时，电弧电压为20V左右、比冲为160s、效率约为32%。在相同的电流和近似的摩尔流量，以水为推进剂时，质量流量为15mg/s；此时电弧电压为80V左右；比冲峰值可达到840s；平均值为650s；效率为55%~60%。可以看到，比冲和效率都有较大的提高，我们认为其主要原因为以下三点：

(1) 电弧电压提高、输入功率增大

在工况1时，以氩气为工质的功率为200W，以水为推进剂的功率为800W，即功率提高为氩气的4倍。

工质得到的动能

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m} u_e^2 = \eta \cdot P_{in}$$

式中， \dot{m} 为推进剂的质量流量； u_e 为出口速度； P_{in} 为输入功率； η 为发动机效率。

发动机的比冲与出口速度有如下关系：

$$I_{sp} \propto u_e$$

因此，在发动机的其它条件不变的前提下

$$I_{sp} \propto \sqrt{P}$$

即假如发动机的其它条件不变，则由于功率提高了4倍，比冲 I_{sp} 会相应提高2倍。而由于推进剂由氩气转变为水时，输入功率增加而电流不变，

这还会给发动机的效率带来其它的影响。考虑电源的输入功率 P_{in} 可以写为:

$$P_{in} = IV = I \cdot (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

式中, V 为整个电路上的电压降; V_1 为阴极上的电压; V_2 为电弧上的电压; V_3 为阳极上的电压; V_4 为损失在电路中的电压; P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 对应的功耗。

考虑到本文的设计, 在 $P_1 \sim P_4$ 中, P_1 、 P_2 主要用于加热推进剂, P_3 中部分用于加热推进剂, 部分则以热辐射的形式损失了, 而 P_4 则完全没有得到利用。Scott Alan Miller 的研究结果表明, 在电极上损失的功率主要与电流直接相关。因此, 当推进剂改变为水时, 由于电流不变, 所以对 P_1 、 P_3 和 P_4 不会产生直接影响, 也就是说, 此时功率的提高, 直接体现在 P_2 的提高上。因此在电源增加的输出功率主要是直接用于加热推进剂的功耗 P_2 , 所以发动机的热效率会有所提高。

另一方面, 水的这种高电弧电压特性还有利于提高发动机的寿命。上面已经谈到, 假如以氩气为推进剂, 要把功率提高 4 倍则必须把电流提高 4 倍以上, 因此在阴极和阳极上消耗的电功率 P_3 也会大幅度的增加, 从而导致电极温度升高, 易于发生烧损; 而使用水时则可以在较低的电流下达到较高的功率, 从而有利于保护电极, 提高发动机的寿命。

(2) 工质分子量变化及化学反应

$$u_e = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{R_0}{m} T_t \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

式中, k 为比热比; T_t 为流动的定性温度; p_c 、 p_e 分别为喷管的进出口压力。对推进剂本身, 在比热比 k 和定性温度不变的情况下, 分子量 m 决定出口速度, 即推进剂的出口速度正比于 $\sqrt{1/m}$ 。由于氩气容易被电离击穿起弧, 工作稳定, 操作较为简单, 对于研究认识发动机的工作过程和性能十分方便, 因此本文工作先选用氩气为推进剂。但 Ar 的分子量较大, 为 40, 因此其比冲是较低的; 而水的分子量为 18。因此以水为推进剂时, 比冲会高一些。

此外, 当以水为推进剂时, 由于电弧室内的

高温高压条件, 会导致水分子的进一步分解和电离。假定电弧室内压力为 10^5Pa , 气体的平均温度为 4000K , 气体处在化学平衡态, 可以计算得到气体的平均分子量约为 10。可见, 由于水在高温下的分解反应, 导致平均分子量的进一步减小, 从而使水作为推进剂时比冲有所提高。

(3) 再生冷却, 提高了能量利用率

前面已经提到, 使推进剂通过缠绕在阳极上的不锈钢线圈进入发动机中, 在气化水的同时, 起到预热工质、回收能量的作用, 因此有利于提高发动机的效率。换热计算得到, 在推进剂进入不锈钢管内约 20mm 处即被加热为 1073.2K 水蒸气。用不锈钢管道出口处的 1073.2K 水蒸气与入口处 293.2K 水的焓值之差来估算管道回收的能量, 得到回收的功率为 61W , 约为总输入功率的 7.6%。

5 总结

本文设计了以水为推进剂的水弧加热发动机, 通过试验验证了以水为推进剂的水弧加热发动机的可行性。在电流为 8A 、水流量为 15mg/s 时, 电弧电压平均值为 80.5V , 推力峰值可以达到 0.126N , 由此推算峰值比冲为 840s , 平均推力为 0.0975N , 以此计算得到平均比冲为 650s 左右, 效率为 $55\% \sim 60\%$ 。通过氩气的试验结果和水的试验结果的对比, 我们对以水为推进剂时水弧加热发动机比冲和效率的提高的原因从功率提高、分子量减小和发动机的热量回收的三方面设计进行了解释。

参考文献:

- [1] 周利军. 50kW 水稳等离子体发生器的研制和实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1991.
- [2] 廖宏图, 吴铭岚, 汪南豪. 电弧喷射推力器内部工作工程研究综述[J]. 推进技术. 1999, 20(3).
- [3] 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.

(编辑: 马 杰)