

推进剂组分对电弧加热推力器性能的影响

黄河激 潘文霞 孟显 吴承康

(中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 实验研究了以纯氮、纯氢、氨气以及不同体积比氮氢混合气、氨氢混合气作为推进剂时, 千瓦级电弧加热推力器的性能。结合理论分析, 获得了推进剂组分对推力器性能的影响规律。结果表明, 推进剂有效分子量和比热比对推力器冷态性能影响显著。热态下, 推进剂组分的热力学性质以及输运性质是影响推力器比冲和效率的关键因素。

关键词 电弧加热推力器; 推进剂组分; 比冲; 比功率; 效率

中图分类号: V439 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)05-0896-03

Effect of Propellant Composition on the Performance of Arcjet Thrusters

HUANG He-Ji PAN Wen-Xia MENG Xian WU Cheng-Kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Beijing 100190, China)

Abstract Using nitrogen, hydrogen, ammonia and their mixtures as the propellants, the dependence of arcjet thruster performance on the propellant composition was studied. Results show that the cold performance of the arcjet is drastically affected by the effective molecular weight and the adiabatic index of the propellant. On the other hand, the hot performance of the arcjet is mainly affected by the thermodynamic and transport properties of the propellant.

Key words arcjet thruster; propellant composition; specific impulse; specific power; efficiency

0 引言

与传统化学推进相比, 已实用的电推进系统通常具有高比冲、小推力的特点^[1]。采用电推进系统有利于提高飞行器有效载荷、增加任务时间、提高推进控制精度。在诸多电推进方案中, 电弧加热推力器在卫星姿态与轨道控制等应用中有其独特的优势, 在国际上已有大量应用实例^[2]。

推力、比冲和效率是推力器最重要的性能参数。电弧加热推力器点火工作时, 输入的电功率首先转化为推进剂内能, 再通过气动喷管将内能转化为动能。因此, 为提高推力器性能, 必须一方面着眼于提高可输入推进剂的电功率密度, 另一方面尽可能在有限的喷管尺度范围内将推进剂携带的内能有效地转化为动能。这两方面都与推进剂的种类密切相关。本文实验研究了纯氮、纯氢、氨气以及不同体积比氮氢混合气作为推进剂时, 千瓦级电弧加热推力器的性能。结合理论分析, 获得了推进剂组分对推力器性能的影响规律。

1 实验方法

本文实验在力学所空天等离子体动力学实验平

台上进行, 实验真空舱直径 2 m, 长 4 m, 极限真空 10^{-4} Pa。实验所用的电弧加热推力器为自行设计, 采用自然辐射冷却圆锥喷管。喷管喉道直径为 0.7 mm, 扩张比为 205:1。分别采用纯氮、纯氢、氨气以及不同体积比的氮氢混合气、氨氢混合气作为推进剂。推进剂流量由多路质量流量计精确控制, 质量流量范围为 12~59 mg/s。氨通过流量计前已完全气化。弧电流为 8~12 A。实时测量推力器弧电压、弧电流、推力等参数。其中推力利用冲击平板法测量^[3]。

2 结果与讨论

2.1 冷推力

推力器不点火, 即冷态下将一定流量的推进剂供入推力器时, 推进剂经过喷管膨胀加速后也会产生推力, 称为冷推力。考虑一维、定常、等熵流动, 将喷管出口静温 T 与总温 T_0 关系代入, 可得冷推力 F_0 的表达式为:

$$F_0 = \dot{m}v = \dot{m}Ma\sqrt{\frac{\gamma R_0 T}{M}}$$

收稿日期: 2012-12-15; 修订日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (No.50836007; No.11175226; No.10921062)

作者简介: 黄河激 (1976-), 男, 四川成都人, 副研究员, 主要从事应用等离子体物理学研究

$$= \dot{m} Ma \sqrt{\frac{\gamma R_0 T_0 / M}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2}} \quad (1)$$

式中, \dot{m} 为推进剂质量流量, Ma 为喷管出口马赫数, γ 为比热比, R_0 为通用气体常数, M 为推进剂分子量。从式 (1) 中可以看出, 冷推力 F_0 与推进剂质量流率 \dot{m} 成正比。在相同的质量流率条件下, 推进剂组分对冷推力的影响主要体现在比热比 γ 和分子量 M 上, 较小的分子量有助于提高冷推力。当 Ma^2 大于 2 时, 较小的 γ 也有助于提高冷推力。同时, 从式 (1) 可以看出, 当 $\frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \gg 1$ 时, 马赫数对 F_0 的影响变得有限。对于常见的比热比范围, 可以认为高超声速流动下 ($Ma > 5$), 冷推力与马赫数相关性不大, 此时可将式 (1) 简写为:

$$F_0 \approx \dot{m} \sqrt{\frac{2\gamma R_0 T_0}{(\gamma - 1)M}} \quad (2)$$

本文所用喷管设计马赫数为 8, 满足式 (2) 适用条件。此时用式 (2) 计算冷推力的误差约 5%。图 1 给出了由公式 (2) 计算得到的冷推力与实验数据的对比。计算时 T_0 设为 300 K, γ 取为 1.4。

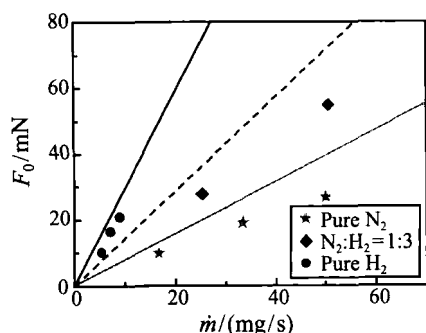


图 1 不同配比氢氮混合气冷推力实验与理论预测对比
图中点为实验数据, 线为理论预测值

Fig. 1 Comparison of experimental (dots) and theoretical predictions (lines) of the cold thrust with different hydrogen-nitrogen mixtures

图 1 中实验值均低于理论预测值, 其绝对差值随质量流量增大而增大, 但相对比值变化不大, 实验值比理论值约为 70%~75%。这主要是因为实际流动为不可逆非等熵流动, 上述理论计算时未考虑黏性耗散和壁面摩擦导致的能量损失, 即喷管效率。考虑采用式 (2) 近似计算结果已经偏大 5%, 因此本研究中所用喷管在冷态下的喷管效率约为 75%~80%。图 1 中线性关系的斜率为 $\frac{F_0}{\dot{m}} = \sqrt{\frac{2\gamma R_0 T_0}{(\gamma - 1)M}}$, 即为冷比冲。从图中可以看出, 随着推进剂分子量的减小, 冷比冲显著增大。

2.2 推力器热态性能

推力器点火工作时, 电弧的主要作用即是加热推进剂, 使其具有更高的总温 T_0 , 从而提高比冲。从上一节的分析可以看出, 当推力器出口马赫数很大时 (如超过 5), 比冲与马赫数无关。此时, 推进剂喷出的绝对速度已达到极限, 马赫数的提高是通过声速的降低来实现的, 对推力性能没有正面作用。因此, 电弧加热推力器喷管设计时不需要追求高马赫数。总温的提高主要通过提高比功率 P_{sp} 来实现。 $P_{sp} = P/\dot{m}$, 代表输入单位质量流量推进剂的电功率。式中 P 为输入电功率, 其值等于测得的弧电流和弧电压的乘积。本研究中计算推力效率时摒除冷推力的影响, 推力效率 $\eta = \frac{F^2 - F_0^2}{2\dot{m}P}$, 式中 F 为实验测得的热态推力。由比冲的定义 $I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g}$, 代入效率 η 以及冷推力 F_0 (式 (2)) 可得:

$$I_{sp} = \frac{1}{g} \sqrt{2\eta P_{sp} + \frac{2C\gamma R_0 T_0}{(\gamma - 1)M}} \quad (3)$$

式 (3) 中根号内第一项为热态项, 第二项为冷态项。冷态项中系数 C 代表喷管效率。由图 1 的结果, 在本文中 C 取为 0.8。由式 (3) 可知, 当不考虑推进剂种类对推力效率的影响时, 气体组分 (有效分子量和比热比) 主要影响冷推力的大小。在较低输入功率时, 比冲主要由冷推力提供, 因此气体组分的影响较大。而在较高输入功率时, 热态推力远大于冷推力, 冷推力的影响相对减弱。

从式 (3) 中可以进一步看出, 提高热态比冲主要可从两方面入手, 一是提高比功率, 二是提高推力效率。一般情况下, 将二者同时提高难以实现, 通常希望能在尽量不损失推力效率的前提下提高比功率, 从而提高推力器性能。

图 2 显示的是在不同推进剂流量下, 测得的弧电压与弧电流的比值, 即电阻的变化情况。图中实心点是纯氮、纯氢以及氮氢混合气的实验数据, 空心点是纯氮和氮氢混合气的实验数据。除图中标注电流的实验点外, 其余点对应的弧电流均为 12 A。由于弧电压的测量包含了电极固体部分的电压, 因此图 2 中显示的电阻实际包括三部分, 分别为电弧弧柱区电阻、电极边界层内的电弧电阻以及电极电阻。其中电极电阻由金属电极以及测量引线材料的电阻率和尺寸决定, 在本文实验条件下约为 $10^{-2} \Omega$, 与其余两部分相比为小量, 因此图中所示的电阻可近似认为即是电弧电阻。由欧姆定律, 可将电弧电阻 R 近似写为: $R = \int_0^L \frac{1}{A\sigma} dl$, 式中 L 为电弧长度、 A 为电

弧横截面积, σ 为电导率。从图 2 中可以看出, 随着推进剂流量增大, 电弧总电阻增加。这是由于在一定的电流下推进剂流量增加增强了电弧约束 (减小 A), 拉长了电弧 (增大 L) 以及降低了电导率 σ , 这三者的变化均使电阻增加。对于同一种推进剂, 在相似的推进剂流量时, 较小的弧电流下可获得较高的弧电压, 即伏安特性为负。推进剂组分对电弧电阻影响明显, 将比功率表达式写为 $P_{sp} = I^2 \frac{R}{\dot{m}}$, 可知, 在同样的输入电流下选择 $\frac{R}{\dot{m}}$ 值更高的推进剂可有效提高比功率。从图 2 中可以看出, 在相近的质量流量和弧电流下氢的电阻最大。在相似的流量、电流以及氢-氮体积比下, 氨氢混合气比氮氢混合气有更高的电阻。这与氨在分解时吸热, 氨氢混合气的热力学和运输性质不同于氮氢混合气有关。

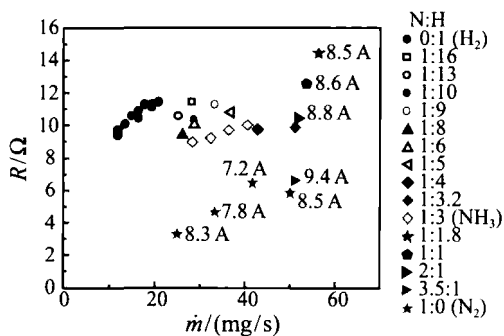


图 2 推进剂组分和质量流量对弧电阻的影响。图中未标注电流的实验点对应弧电流均为 12 A

Fig. 2 Effects of propellant composition and mass flow rate on the resistance of the arc. The unmarked arc current is 12 A

图 3 为实验测得的不同推进剂时, 推力器比冲与比功率的关系。图中的阴影区域为 $\gamma=1.4$, 推力效率介于 20% 和 45% 的纯氮理论比冲包络, 该包络也可定性判断以其他组分气体为推进剂时的推力器效率。与图 2 一样, 图中实心点为纯氮、纯氢以及氮氢混合推进剂的实验数据, 而空心点则是氨和氨氢混合推进剂的实验数据。从图 3 中可以看出, 在实际工况下, 当气体组分变化时, 推力效率也会变化, 从而影响推力器热态性能。以纯氮为推进剂, 弧电流在 8 A 附近, 流量为 25~50 mg/s 时, 弧电压仅有 27~50 V, 比功率很低, 获得的推力主要来源于冷推力, 推力效率也相应很低, 仅为 10% 左右。而当加入氢气后, 弧电压显著升高, 输入比功率提升, 推力器比冲也增大。图 3 中纯氢和纯氮的比冲-比功率曲线显示, 在本文的实验条件下, 对同一种推进剂, 随着比功率增大推力效率下降, 比冲增加幅度减缓。这是因为在本文实验中, 对同一种推进剂其比功率的增大主要通过降低质量流量来实现。在这种情况下, 随

着推进剂流量的降低, 气体温度升高带来的热损失和冻结流动损失占输入功率的比例均增大, 使得推力效率降低。在相同氮氢体积比下, 由式 (2) 算得的氨的冷推力小于氮氢混合气的冷推力。但从图 3 中可以看出, 在相似的氮氢体积比以及比功率条件下, 以氨氢混合气比以氮氢混合气为推进剂时推力器性能更好, 这可能是由于氨分解吸热使得相似比功率下, 含氨的电弧温度相对较低, 推力效率较高。从图 3 还可发现, 当只采用氮氢或氨氢混合气时, 推力器性能随着氢含量的增高而提升。

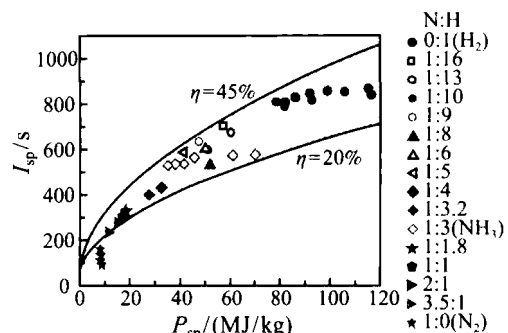


图 3 不同推进剂时推力器比冲和比功率的关系。图中阴影区域为 $\gamma=1.4$, 推力效率介于 20% 和 45% 的纯氮理论比冲包络

Fig. 3 Relationship between the specific impulse and the specific power with different propellants. The hatched area outlines the theoretical specific impulse range of pure nitrogen with $\gamma=1.4$ and $20% < \eta < 45%$

3 结 论

以纯氮、纯氢、氨以及不同体积比的氮氢、氨氢混合气为推进剂时, 千瓦级电弧加热推力器性能有较大差异。当推进剂有效分子量低、比热比低时, 在相同的质量流量下可以获得更大的冷推力。推力器热态比冲正比于比功率和推力效率乘积开方。采用氢含量高的推进剂易于获得高的输入功率, 有助于获得高比冲。推进剂的热物性参数显著影响电弧加热推力器中能量输入及转化过程。在本文实验条件下, 采用同一种推进剂时, 推力效率随比功率的增大而有所降低; 在相同的氮氢体积比下, 采用氨氢混合气比采用氮氢混合气更易获得好的推力性能。

参 考 文 献

- [1] Martinez-Sanchez M, Pollard J E. Spacecraft Electric Propulsion - an Overview [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 688-699
- [2] Wilson F C. Recent Advances in Satellite Propulsion and Associated Mission Benefits [R]. AIAA 2006-5306, 2006
- [3] WU Chengkang, WANG Haixing, MENG Xian, et al. Aerodynamics of Indirect Thrust Measurement By the Impulse Method [J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 27(2): 152-163