

氢电弧加热发动机能量转化过程比较研究

耿金越¹, 王海兴¹, 陈熙², 潘文霞³

(1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084;

3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(Tel: 010-82339631, E-mail: whx@buaa.edu.cn)

摘要: 本文对低功率氢电弧加热发动机内的传热与流动过程进行了数值模拟, 研究了工作参数对发动机内能量转化过程的影响。模拟结果表明, 工作参数对电弧加热发动机内的能量转化过程有一定影响。当发动机弧电流不变时, 随着入口总压增加, 发动机内气体推进剂的动能通量、焓通量和动能通量/焓通量之比均随之增大; 当入口总压不变时, 随着弧电流的增加, 发动机内气体的焓通量增大, 气体动能通量变化较小, 因而动能通量/焓通量之比减小。计算获得的典型工况下发动机内沿轴线和出口平面上的轴向速度径向分布与文献报道的实验测量结果大体相符。

关键词: 电弧加热发动机; 等离子体; 工作参数; 能量转化; 数值模拟

0 引言

电弧加热发动机是一种典型的电热式空间电推进装置。由于电弧加热发动机能够提供比传统化学推进(火箭)和电阻加热发动机更高的比冲, 且具有系统兼容性好、推力适中等特点, 在美国等国家已被成功应用于同步卫星南北位置保持和姿态调整^[1]。

在电弧加热发动机内, 从上游供入的气态推进剂在阴极尖和约束通道附近被直流电弧加热, 形成高温部分电离气体(等离子体), 此时电能转化为推进剂的热能, 推进剂的比焓迅速增加; 被加热后的气体随后在发动机喷管的扩张段迅速膨胀加速, 同时温度不断下降, 气体的热能转化为动能; 推进剂最终以超声速射流形式喷出从而产生推力。整个能量转化过程不仅与发动机的结构尺寸和推进剂种类相关, 还与电弧加热发动机工作参数有关。电弧加热发动机内的物理过程异常复杂且各种过程强烈耦合, 发动机喷管的尺寸小, 参数梯度大, 使电弧加热发动机内部过程的实验或理论研究变得颇为困难。虽然过去已有大量研究结果发表, 至今人们对电弧加热发动机狭小空间内所发生的复杂物理过程、能量转化规律等的认识还远未完善。通过电弧加热发动机的数值模拟研究, 将有助于增进对其内部传热与流动过程的了解, 为发动机的设计与改进提供参考。

1 数值模拟方案

本文数值模拟中采用的基本假定包括: (1) 发动机内部气体的流动为定常、轴对称、层流流动; (2) 等离子体处于局域热力学平衡状态, 对辐射为光学薄; (3) 工作气体为氢, 其等离子体的热力学物性及输运物性为压力和温度的函数; (4) 忽略浮力和重力,

忽略周向流动。模拟中采用如下的控制方程组^[2]:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + j_r B_\theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u v)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] - 2 \mu \frac{v}{r^2} - j_z B_\theta \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v h)}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + u \frac{\partial p}{\partial z} + v \frac{\partial p}{\partial r} \\ &+ \Phi + \frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left(\frac{j_z}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{j_r}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - U_r \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

此处 u 、 v 分别是轴向(z -)、径向(r -)速度分量; p 与 ϕ 是压力与电位; ρ 、 h 、 μ 、 k 、 c_p 、 σ 和 U_r 分别是依赖于温度与压力的等离子体密度、比焓、粘性系数、热导率、定压比热、电导率以及单位体积辐射功率, 模拟中采用预先编制的数据库加以计算; Φ 为粘性耗散项^[2]。考虑到电磁场的影响及可压缩效应, 轴向及径向动量方程(2)与(3)中引入了 Lorentz 力项, 能量方程(4)中引入了焦耳热项, 粘性耗散及压力功项; 其中电流密度分量 j_r 和 j_z 由 $\mathbf{j} = -\sigma \nabla \phi$ 计算, 而自感应磁场的磁感强度由 $B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z \xi d\xi$ 计算^[2]。

数值模拟中采用 NASA Lewis 中心所设计的 kW 级辐射冷却电弧加热发动机的结构尺寸^[3]。发动机喷管扩张段的扩张半角为 20° , 约束通道直径为 0.635 mm , 长度为 0.25 mm , 喷管出口与喉部的面积比为 225 ^[3]。在发动机入口, 给定入口总压为 P_0 , 在迭代过程中每一步, 均根据所求出的入口网格点处的当地静压, 由可压缩流动等熵关系式计算入口处的轴向速度并由此确定气流量。喷管上游阳极端面温度取为 1300 K , 钨阳极-喷管外壁面处采用辐射边界条件, 钨的辐射系数取为 $\varepsilon = 0.3$; 沿发动机轴线, 采用轴对称条件; 喷管出口截面处的温度与速度均由上游外推获得。在阴极上游端面温度给为 1000 K , 并给定电流密度, 阳极外壁面电位取为 0 , 其它边界处电位梯度均取为零。数值模拟采用 89×30 的计算网格, 以全速度 SIMPLE 型算法进行方程组(1)–(5)的求解。

2 数值模拟结果与讨论

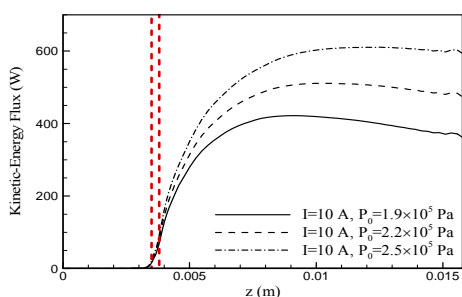
图 1 比较了不同工作参数下电弧加热发动机内推进剂的动能通量、焓通量和动能通量/焓通量比沿着轴向的变化。发动机内推进剂的焓通量和动能通量由如下积分式计算:

$$H = \int_0^{r_0} (\rho u h) 2\pi r dr, \quad E_k = \int_0^{r_0} \rho u \left[\frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right] 2\pi r dr \quad (6)$$

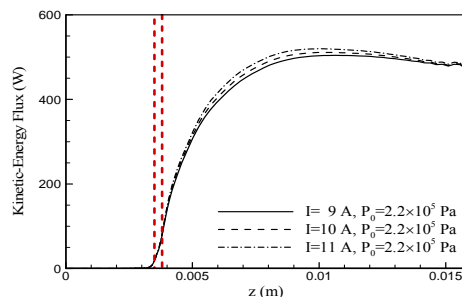
此处 r_0 为从发动机中心轴线到阳极内表面的径向距离。图 1 中两条竖线之间表示发动机约束段所在位置。由图 1 可知, 不同工作参数下, 电弧加热发动机内能量转化的变化规律基本相同。在阴极尖和约束通道附近由于焦耳加热, 推进剂比焓与焓通量值迅速增加,

在喷管扩张段由于热能转化为动能，推进剂比焓与焓通量值下降，动能通量随之增加。

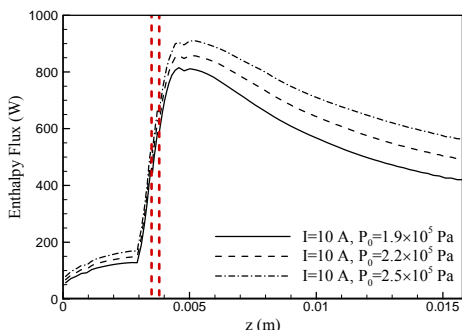
图 1 比较了不同发动机入口总压或弧电流时计算得到的推进剂动能通量、焓通量和动能通量/焓通量比值沿轴向变化情况。由图 1(a)、(c)和(e)看出，当弧电流固定为 10 A，入口总压分别为 1.9×10^5 、 2.2×10^5 、 2.5×10^5 Pa 时，发动机内任意横截面处气体的动能通量、焓通量和动能通量/焓通量比均增大；其主要原因是，随着发动机入口总压的提高，发动机流量由 11.5 mg/s 增加到 17.2 mg/s，弧电压从 101 V 增加到 113 V，即气体流量及输入功率均在增加，因而气体推进剂的动能通量、焓通量以及它们的比值随之增加。由图 1(b)、(d)和(f)可以看出，当入口总压固定为 2.2×10^5 Pa，弧电流分别为 9、10 和 11 A 时，发动机内气体的焓通量增大，气体动能通量变化不大，而动能通量/焓通量比值反而减小；这是因为改变发动机弧电流对发动机流量影响较小，动能通量变化不大，弧电流增加所输入的额外能量主要用于增加气体的比焓，导致动能通量/焓通量比减小。



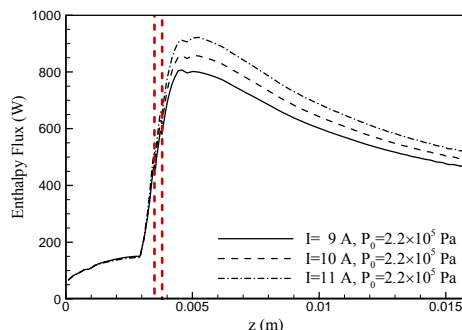
(a) 不同入口总压下动能通量的轴向变化



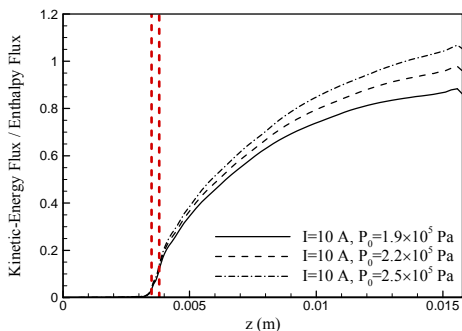
(b) 不同弧电流下动能通量的轴向变化



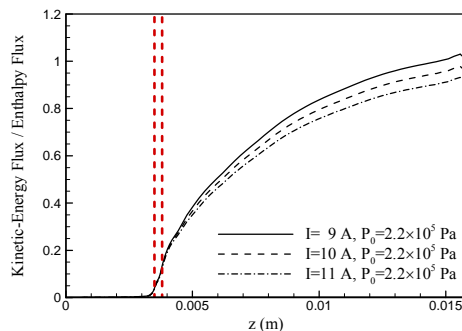
(c) 不同入口总压下焓通量的轴向变化



(d) 不同弧电流下焓通量的轴向变化



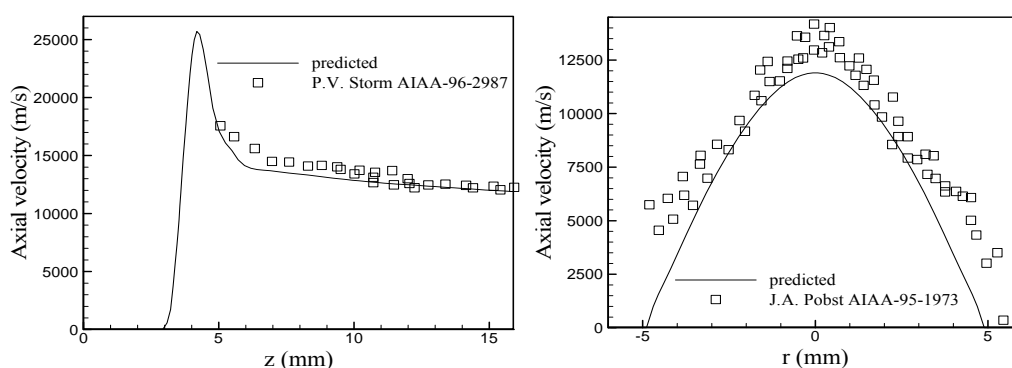
(e) 不同入口总压下动能通量/焓通量比的轴向变化



(f) 不同弧电流下动能通量/焓通量比的轴向变化

图 1 不同工作参数下发动机内气体的动能通量、焓通量和动能/焓通量比的轴向变化

为了检验我们的数值模拟结果, 本文将计算结果与文献中报道的类似工作条件下的实验数据^[3-5]进行比较。图 2 比较了沿发动机轴线的轴向速度变化(a)和出口处的轴向速度径向分布(b)的模拟结果与文献中报道的实验数据。图中实线是以氢为推进剂, 弧电流为 10 A, 质量流量为 14.2 mg/s 条件下的模拟结果。图 2(a)中的实验数据由 Cappelli 等人得到^[3,4], 实验条件为: 以氢为推进剂, 质量流率为 14.2 mg/s, 弧电流为 10 A。实验采用激光诱导荧光法测得轴向速度从约束段下游 1.3 mm 处的约 17.5 km/s 减小到喷管出口处的约 12 km/s, 呈单调降趋势。图 2(a)表明, 模拟得到的轴向速度沿轴线变化与实验测量值良好符合。图 2(b)中的实验数据是 Pobst 等人得到的^[5], 在氢发动机流量为 13.1 mg/s、弧电流为 10 A 的情况下, 采用激光诱导荧光法测量获得的喷管出口下游 0.4 mm 处轴向速度的径向分布。由图 2(b)可以看出, 模拟值和测量值在中心处符合较好, 但是在边缘处实验值高于模拟值, 可能是由于出口附近阳极壁面处存在稀薄气体效应。



(a) 轴向速度沿轴线变化

(b) 出口平面轴向速度沿径向分布

图 2 氢电弧加热发动机轴向速度分布比较

3 结 论

本文采用数值模拟方法对低功率氢电弧加热发动机内的能量转化过程进行了研究。结果表明: 工作参数对电弧加热发动机内的能量转化过程有一定影响, 在弧电流固定情况下, 随着入口总压增加, 发动机内气体推进剂的流量增加, 因而动能与焓的通量和动能通量/焓通量比均随之增大; 当入口总压固定时, 随着弧电流的增加, 发动机内气体推进剂的焓通量增大, 气体动能通量变化不大, 因而动能通量/焓通量比减小。数值模拟预测的典型工况下发动机轴线上的气体轴向速度变化以及出口附近轴向速度的径向分布与文献报道的实验测量结果大体相符。

参考文献

- [1] G. W. Butler, R. J. Cassady, *J. Propulsion and Power*, 1996, 12 (6): 1026-1034
- [2] 陈熙. 热等离子体传热与流动. 北京: 科学出版社, 2009
- [3] P. V. Storm, M. A. Cappelli, *Applied Optics*, 1998, 37 (3): 486-495
- [4] P. V. Storm, M. A. Cappelli, *AIAA Paper No. 96-2987*, 1996
- [5] J. A. Pobst, I. J. Wysong, R. A. Spores, *AIAA Paper No. 95-1973*, 1995