

## 低功率氩电弧加热发动机内传热与流动的数值模拟

贾少霞<sup>1</sup>, 王海兴<sup>1</sup>, 陈熙<sup>2</sup>, 潘文霞<sup>3</sup>

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191;

清华大学工程力学系, 北京 100084;

中国科学院力学研究所, 北京 100190

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

电弧加热发动机是通过阴极和阳极之间直流放电产生的电弧加热推进剂, 产生的高温部分电离气体经喷管加速产生推力。国外早在上个世纪 50 年代就对电弧加热发动机开始研究, 经过几十年努力, 先后攻克了电极烧蚀、电弧稳定等一系列难题, 终于研制成功千瓦量级的用于同步卫星位置保持和姿态调整的推进系统, 并得到了广泛的商业应用<sup>[1]</sup>。目前我国电弧加热发动机的研究还处于起步阶段, 对电弧加热发动机内狭小空间内发生的复杂物理过程、能量转化规律等认识还不完全, 因此通过数值模拟方法对电弧加热发动机内部过程进行模拟, 有助于增加我们对电弧加热发动机内部传热与流动过程的认识, 为发动机的设计提供参考。

本文在对电弧加热发动机内部过程进行模拟时采用能够用于求解可压缩流动与传热的基于SIMPLE的全速度算法<sup>[2]</sup>, 模拟采用的主要假定为 1) 等离子体流动为二维、稳态、轴对称; 2) 等离子体处于局域热力学平衡态; 3) 旋流分量可以忽略。模拟采用中科院力学所设计加工的电弧加热发动机尺寸<sup>[3]</sup>, 计算中采用的网格数为  $89 \times 30$ 。

模拟结果表明电弧加发动机内最高温度出现在阴极附近中心轴线处, 这是因为电弧在阴极表面收缩形成阴极弧点, 从而焦耳热成为该高温区的主要加热机制。沿着中心轴线, 气体温度开始时随着距阴极距离的增加而迅速增加, 然后在等离子体流向喷管出口的过程中, 气体温度逐渐下降。在高温区的作用下, 等离子体气体剧烈膨胀, 轴向速度迅速增加, 气体的热能不断转化为动能, 从而在发动机中段的约束通道内达到声速, 进一步在扩张段加速达到超声速流动状态。从计算获得的 Mach 数分布看, 发动机内部的收缩段、约束通道段和扩张段分别对应于流动的亚声速、跨声速和超声速区。从计算获得发动机内压力分布的结果来看, 尽管在整个发动机内部任意截面处的温度、速度及 Mach 数的径向分布很不均匀, 但径向压力分布基本均匀, 从而通道内的压力分布具有抛物性流动的特点。对于发动机工作电流为 10 A、工作气体(氩)流量为 63 mg/s 情形, 计算获得的发动机比冲为 193 秒, 与测量结果大体相符。

## 参考文献

- [1] M. M. Sabchez, S. A. Miller. "Arcjet modeling: status and prospects", *J. Propulsion and Power*, Vol. 12 (6), pp. 1035-1043, (1996).
- [2] P. Han and X. Chen, "Modeling of the supersonic flow and heat transfer in a DC arc plasma orch", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 21 (2), pp. 249-264, (2001).
- [3] H. J. Huang, W. X. Pan, X. Meng and C. K. Wu, "Development of arc root attachment in an H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> arcjet thruster", Submitted to *Chinese Physics Letter*, (2009).

资助项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50836007)