

微波等离子推力器喷管流动数值模拟^{*}

肖应超¹, 汤海滨¹, 杨 涓², 毛根旺², 王长辉¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了准确把握微波等离子推力器喷管流动的机理与特点, 采用冻结流和非平衡流两种模型对其进行对比数值模拟分析。非平衡流模型考虑了流动过程中的分解反应、电离反应和复合反应, 化学动力学模型为4组分、4反应的有限速率化学反应模型, 采用二阶精度NND格式数值求解耦合化学反应源项的N-S方程组。数值模拟的结果揭示了喷管内的流场结构, 反映了喷管内的离解电离状况, 得到了推力器的推力和比冲。分析表明, 数值方法有效, 计算结果合理, 具有工程应用价值, 能为相关研究提供参考。

关键词: 微波等离子推力器⁺; 喷管; 流动分布; 数值仿真

中图分类号: V237 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 03-0263-04

Numerical simulation for the flow fields within microwave plasma thruster nozzle

XIAO Ying-chao¹, TANG Hai-bin¹, YANG Juan², MAO Gen-wang², WANG Chang-hui¹

(1. School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: To realize the mechanism and characteristic of the flow within Microwave Plasma Thruster(MPT) nozzle, numerical simulation and analysis were achieved by developing both frozen and non equilibrium flow models for it. The factors of decomposition, ionization and composition, which affect the flow, were taken into account in non equilibrium flow model. Four-ingredient and four-step finite-rate chemical reaction model was adopted in the chemical kinetics model. Non-oscillatory and Non-free parameters Dissipative finite difference scheme with two order accuracy was used to solve Navier-Stokes equations numerically. The results of numerical simulation display the flow distribution, decomposition and ionization within the nozzle, and predict the thrust and specific impulse of the thruster. Analyses of the results demonstrate that the numerical method is effective, the results are reasonable, and the conclusions are helpful to work concerned.

Key words: Microwave plasma thruster⁺; Nozzle; Flow distribution; Numerical simulation

1 引 言

国外对微波等离子推力器(MPT)已经进行了一些相关的实验和数值研究^[1~4], 其中喷管数值研究的重点是单原子惰性气体的非平衡流动过程, 只考虑了原子、离子和电子三种组分, 没有对双原子气体的喷管流动过程进行冻结流和非平衡流的对比数值模拟分析, 国内对MPT的研究也进入了试验阶段, 但还没有对其喷管流动过程进行过数值模拟研究。为了跟踪

和补充国外先进技术, 重点是配合国内的实验研究工作, 本文对以氮气为工质的MPT喷管流动过程进行了冻结流和非平衡流的对比数值模拟, 以揭示MPT喷管流场结构, 并预计其推力和比冲。

2 模型的建立

由于结构质量的要求和小推力的要求, 微波等离子推力器喷管的结构尺寸极其微小, 这给喷管型面的加工带来了非常大的困难。本文选用加工相对容易

^{*} 收稿日期: 2003-06-17; 修订日期: 2003-10-28。

基金项目: 国家重点实验室基金 (51470030103HK0301); 国家“八六三”基金资助项目 (863-2-2-5-12); 国防基础科研计划项目 (J1400D001)。

作者简介: 肖应超 (1979—), 男, 博士生, 研究领域为电推进技术。

的锥形喷管, 喷管的结构尺寸如图 1 所示, 其中: $r = 0.30\text{mm}$, $r_i = 0.20\text{mm}$, $r_e = 2.225\text{mm}$, $L = 7.1\text{mm}$, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 20^\circ$ 。

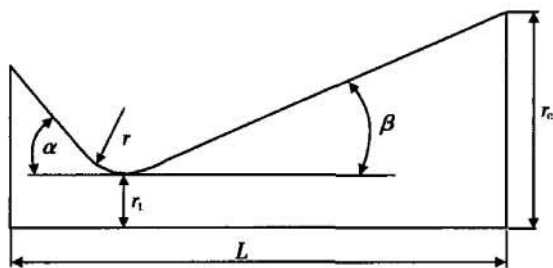


Fig. 1 Geometry of nozzle

由于 MPT 喷管流动过程比较复杂, 为了简化计算本文模型基于如下假设:

(1) 微波作用范围在喷管以前, 不考虑电磁场对喷管流动的影响, 进口处所有网格点上的总温、总压一致。

(2) 高温气体在流动过程中处于热力学平衡状态, 存在热分解、电离和复合反应。

(3) 质量扩散采用双组元气体模型, 对带电粒子采用双极扩散系数。

(4) 考虑粘性作用, 流动为二维轴对称有粘层流流动。

(5) 高温气体与壁面无热交换, 忽略辐射效应和彻体力的影响。

以氮气为工质, 考虑氮气分子 N_2 , 氮原子 N , 氮离子 N^+ 和电子 e^- 四种组分, 各反应方程式如下:



反应通式为

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_{ij} A_i \rightleftharpoons \sum_{i=1}^4 \beta_{ij} A_i, j = 1, 2, 3, 4$$

A_i 为 i 组分的化学式, α_{ij} , β_{ij} 为第 j 个基元反应中 i 组分的化学当量系数。 i 组分的生成率为:

$$\dot{\omega}_i = M_i \sum_{j=1}^4 (\beta_{ij} - \alpha_{ij}) \left| \frac{\rho}{M} \right|^L \cdot \left| Kf_j \prod_{i=1}^4 \left| \rho \frac{f_i}{M_i} \right|^{\alpha_{ij}} - Kb_j \prod_{i=1}^4 \left| \rho \frac{f_i}{M_i} \right|^{\beta_{ij}} \right|$$

式中 L 为常数, 当反应中包含对反应有影响但又不实际发生化学变化的第三者时, $L = 1$, 否则 $L = 0$; Kf_j , Kb_j 分别为第 j 个反应的正逆反应速率常数, 各反应的反应速率常数见参考文献[5]。

控制方程参见参考文献[6], 由对流项、粘性项和化学反应源项三部分组成, 冻结流模型中无化学反应

源项。热物性的计算参见文献[5, 7]。

3 数值方法

控制方程中的粘性项采用二阶精度的中心差分格式进行离散, 对流项采用二阶精度的 NND 格式进行离散, 详见文献[8]; 采用显示时间推进法求解。

初始条件: 初始组分分布按由平衡关系计算得到的进口组分给定, 流动参数由一维等熵流的气体动力学公式计算, 其它参数利用相应的公式计算得到。

边界条件: 在进口处给定总压 p_e , 总温 T_e , 流动角及由特征相容关系得到的第四个补充边界条件, 各组分质量分数由平衡关系计算给出; 对于超声速出口外推 p, T, u, v , 对于亚声速出口外推 T, u, v , 给定反压 p_a , 各组分质量分数外推得到; 轴线上 $v = 0$, 外推 u, p, T , 各组分质量分数外推得到; 壁面上 $u = 0, v = 0$, 外推 p, T , 各组分质量分数外推得到。

4 计算结果及分析

本文计算了 MPT 喷管内不考虑化学反应时的冻结流动情况和考虑化学反应时的非平衡流动情况, 计算条件均为 $p_e = 0.403\text{MPa}$, $T_e = 8800\text{K}$, $p_a = 0.0\text{MPa}$, 其中 p_e, T_e, p_a 分别为总压、总温和环境压力。

4.1 不考虑化学反应时的计算结果

不考虑化学反应时的真空推力和真空比冲分别为 81.6mN , $4840.5\text{N} \cdot \text{s}/\text{kg}$, 流动参数分布情况见图 2 和图 3。

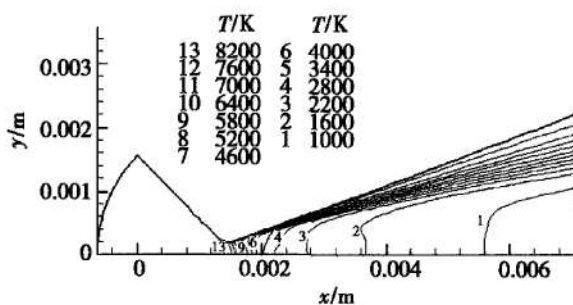


Fig. 2 Temperature contours for frozen flow

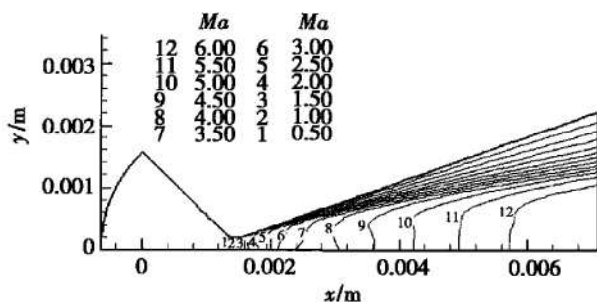


Fig. 3 Mach number contours for frozen flow

4.2 考虑化学反应时的计算结果

考虑化学反应时的真空推力和真空比冲分别为 81.6 mN , $4865.9 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$, 流动参数分布情况及组分参数分布情况见图 4 和图 5。

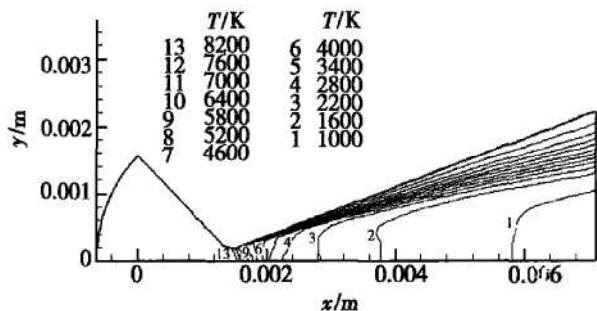


Fig. 4 Temperature contours for non-equilibrium flow

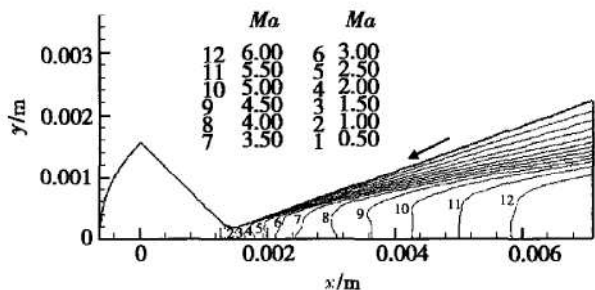


Fig. 5 Mach number contours for non-equilibrium flow

4.3 结果分析

(1) 考虑化学反应时与不考虑化学反应时的流动参数分布情况大体上差不多, 只是在细节上略有不同。考虑化学反应时由于高温气体的膨胀加速, 其温度逐渐降低而复合反应逐渐加强, 复合反应释放出化学能, 导致在喷管内的相同位置(尤其是在靠近喷管出口和轴线的地方)上, 考虑化学反应时的气体温度较高(见图 2 和图 4), 而马赫数则较低(见图 3 和图 5)。

(2) 图 6~ 图 9 的各组分质量分数分布情况可看出: 随着温度的降低, 电离反应减弱, N^+ 和 e^- 的质量分数减小, 分解反应的减弱程度大于电离反应的减弱程度, N 的质量分数也减小, 而 N_2 的质量分数增大, 符合化学动力学规律。

同时可以看出: N_2 , N 组分占了绝大部分份额, 但在流动过程中质量分数变化很小(1% 左右); 在流动过程中 N^+ , e^- 组分质量分数变化较大, 但是所占份额非常微小(N^+ 质量百分比仅仅约为 $0.04\% \sim 0.06\%$); N 原子复合成 N_2 分子的反应是影响喷管性能的主要化学非平衡因素。冻结流与化学非平衡流

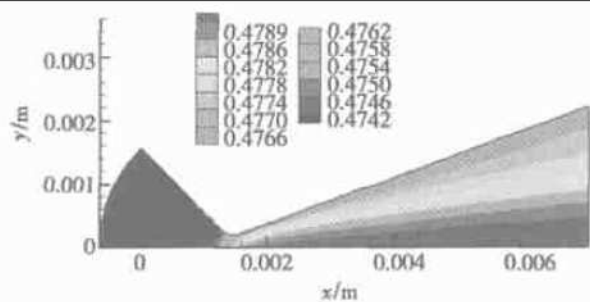


Fig. 6 Mass fraction distribution of N_2

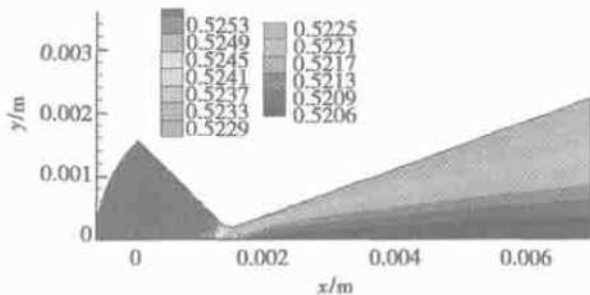


Fig. 7 Mass fraction distribution of N

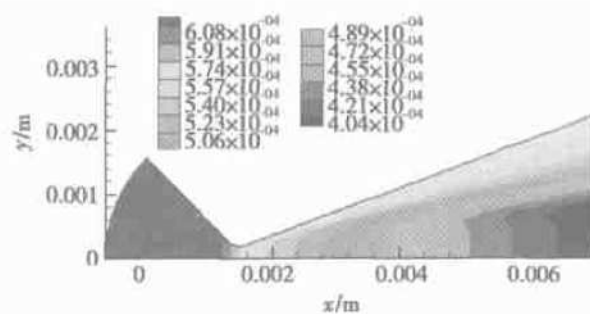


Fig. 8 Mass fraction distribution of N^+

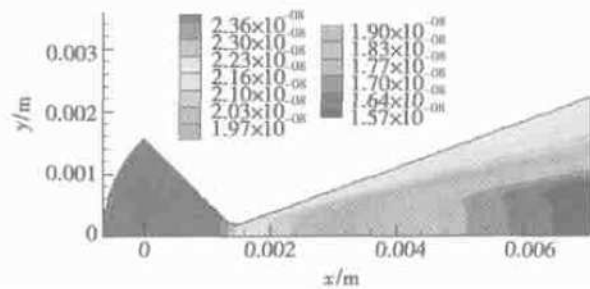


Fig. 9 Mass fraction distribution of e^-

的差别不大, 可以认为喷管流动基本冻结, 分析其原因主要是由于喷管尺寸极其微小而流动速度比较大, 这样气体动力学特征流动时间很短, 另外在本文的温度范围内各反应进行得还并不是特别强烈, 化学动力学特征弛豫时间相对较长。这在宏观性能上表现为

非平衡流动的真空推力和真空比冲比冻结流动的真空推力和真空比冲只分别高 0.080% 和 0.52%。

(3) 图 10 和图 11 分别给出了喷管内电子数密度和电子压力的分布。在本文的温度范围内粒子间的碰撞导致的电离反应很弱, 喷管内的电子数密度和电子压力不高, 高温气体是一种弱电离气体。

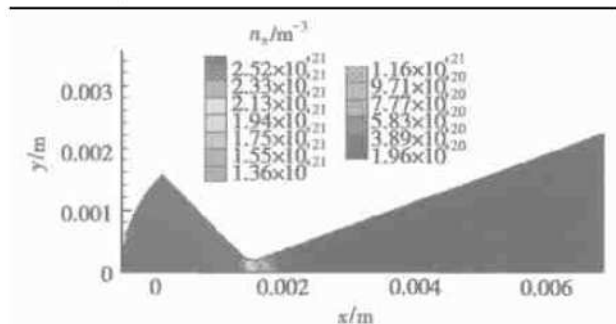


Fig. 10 Electron number density distribution

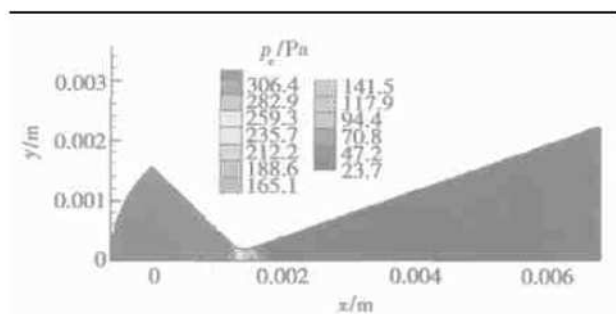


Fig. 11 Electron pressure distribution

(4) 由于忽略了高温气体与壁面之间的热交换, 壁面附近的温度分布与实际情况会存在一定差异(见图 2 和图 4), 其它参数的分布也会随之与实际情况存在一定差异, 但总体来说本文模型比较合理, 能够模拟 MPT 喷管流动过程。

5 结 论

(1) 本文采用冻结流和非平衡流两种模型对 MPT 喷管流动过程进行的对比数值模拟分析, 能揭示推力

器喷管内的流场结构, 并可预计其推力和比冲;

(2) 在本文的温度范围内, 以氮气为工质的 MPT 喷管流动中氮原子复合成氮气分子的反应是影响喷管性能的主要化学非平衡因素, 冻结流与非平衡流的差别不大, 喷管流动基本冻结, 并且在整个流动过程中高温气体都是弱电离气体。

(3) 本文采用的计算方法所得结果符合理论规律, 可为相关研究工作提供参考。

参考文献:

- [1] Chiravalle V P, Miles R B, Choueiri E Y. Numerical simulation of microwave sustained supersonic plasmas for application to space propulsion[R]. AIAA 01-0962.
- [2] Chiravalle V P, Miles R B, Choueiri E Y. Non-equilibrium numerical study of a two-stage microwave electrothermal thruster [C]. IEPC 01-194.
- [3] Venkateswaran S, Merkle C L. Numerical investigation of bluff-body stabilized microwave plasmas[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(2).
- [4] Balaam Philip, Micci Michael M. Investigation of stabilized resonant cavity microwave plasma for propulsion[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(5).
- [5] Gupta Roop N, Yos Jerrold M, Thompson Richard A. A review of reaction rates and thermodynamic and transport properties for the 11-species air model for chemical and thermal nonequilibrium calculations to 30000K[R]. *NASA Technical Memorandum* 101528, 1989.
- [6] 张化照, 梁国柱, 王慧玉. 喷管化学反应粘性流场的数值模拟[J]. *推进技术*, 1998, 19(5). (ZHANG Hua-zhao, LIANG Guo-zhu, WANG Hui-yu. Numerical simulation of reacting viscous flow in nozzle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(5).)
- [7] 廖宏图. 电弧喷射器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1999.
- [8] 汤海滨. 电弧喷射推力器数值模拟与实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001.

(编辑: 王居信)