

文章编号: 1001-2486 (2001) 01-0019-04

载人飞船等离子体鞘电子密度分布的数值计算*

曾明, 柳军, 瞿章华

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研究高温空气的不同物理模型对载人飞船返回舱等离子体鞘电子密度的影响, 包括热力平衡的化学非平衡模型与热力、化学都是非平衡的模型比较, 以及七组元模型与十一组元模型比较。采用 NND 格式和时间预处理技术, 得到了非平衡流全 NS 方程的时间渐近解, 计算了载人飞船等离子体鞘电子密度的典型结果。与飞行试验及有关文献数值计算结果之比较表明, 本文的计算结果是可信的。

关键词: 等离子体鞘; 黑障; 载人飞船; 非平衡流; 数值研究

中图分类号: V211 文献标识码: A

Numerical Study of Electron Density in the Plasma Sheath over the Capsule

ZENG Ming, LIU Jun, QU Zhang-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The effects of different high temperature air models on electron density in the plasma sheath of the reentry capsule are studied, including the comparison between chemical non-equilibrium model and thermochemical non-equilibrium model, as well as that between 7 species model and 11 species model. The NND scheme and time preconditioning technique is applied to solve the full Navier-Stokes equations of non-equilibrium flow. Typical results of electron density in the plasma sheath are obtained. The numerical results are good compared with the flight measurement and other numerical results.

Key words: plasma sheath; blackout; capsule; non-equilibrium flow; numerical study

高超声速飞行器再入大气层时, 由于高温空气电离, 在飞行器周围构成等离子体鞘, 它的等离子体振荡频率就是无线电截止频率, 其值取决于鞘套内电子密度分布。载人飞船返回舱的通讯中断特性是评估飞船性能的一个重要指标^[1]。另外, 再入弹头的等离子体鞘也会对透过天线窗的微波信号发生作用, 从而影响其命中精度^[2]。国外为了搞清等离子体鞘电子密度分布, 专门组织了飞行试验 (RAM-C), 并进行了数值模拟^[3]。国内在 20 世纪 80 年代初由中科院力学所等单位开展了再入通讯可行途径的地面试验, 取得了显著成果^[4]。文献 [5] 采用粘性激波层简化模型得到了再入飞行器等离子体鞘电子密度分布的初步结果。由于当时计算条件的限制, 计算的物体外形和采用的气体模型都比较简单。本文则采用较精细的热化学模型计算载人飞船返回舱等离子体鞘电子密度分布。

1 理论公式

1.1 热化学模型

本文分别采用热力平衡的化学非平衡模型 (单温度模型) 和热力与化学都是非平衡的模型 (双温度模型)^[6]。高温空气组元模型分两类, 即 11 组元模型 (N_2 、 O_2 、 N 、 O 、 NO 、 NO^+ 、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 N^+ 、 O^+ 、 e^-) 和 7 组元模型 (N_2 、 O_2 、 N 、 O 、 NO 、 NO^+ 、 e^-)。

研究热力非平衡的化学动力过程时, 需要建立相应的化学-振动耦合模型。在双温度近似下, 不同的反应采用不同的控制温度。如离解反应由平动温度 T 和振动温度 T_v 共同作用, 反应特征温度为 $T_d = \sqrt{TT_v}$ 。振动松弛时间采用 Park 修正的 Millikan 和 White 振动松弛模型^[7]。

1.2 控制方程和壁面条件

轴对称化学非平衡流的 NS 方程为

* 收稿日期: 2000-06-27

基金项目: 中科院力学所 LHD 基金资助项目 (No. 2000-10); 湖南省自然科学基金资助项目 (00JJY1001)

作者简介: 曾明 (1971-), 女, 讲师, 硕士。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \mathbf{H} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial y} + \mathbf{H}_v \right) + \mathbf{W} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{U} = (\rho C_1, \rho C_2, \dots, \rho C_{ns}, \rho u, \rho v, E)^T$, $\mathbf{W} = (\dot{w}_1, \dot{w}_2, \dots, \dot{w}_{ns}, 0, 0, 0)^T$ 其中 C_i 是 i 组元的质量分数, \dot{w}_i 是化学反应源项。

在双温度近似下, 热力非平衡的控制方程组中要增加振动能量方程。这时

$$\mathbf{U} = (\rho C_1, \rho C_2, \dots, \rho C_{ns}, \rho u, \rho v, E, E_v)^T \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = (\dot{w}_1, \dot{w}_2, \dots, \dot{w}_{ns}, 0, 0, 0, S_v)^T \quad (3)$$

式中 E_v 为总振动能, S_v 为振动能生成率:

$$S_v = \rho \frac{e_v(T) - e_v(T_v)}{\tau_v} + \sum_{i=\text{mol}} \dot{w}_i e_{vi} \quad (4)$$

其中 e_v 为单位质量振动能, τ_v 为振动松弛时间, $\sum_{i=\text{mol}}$ 代表对分子组元求和。

考虑热化学非平衡后, 除了常规的速度温度壁面条件以外, 增加了组元的壁面条件。文中取 (1) 完全催化壁条件, $C_{i\text{壁}} = C_{i\text{平衡}}$, 在低壁温条件下, $C_{i\text{壁}} = C_{i\infty}$ (2) 非催化壁条件, $\left(\frac{\partial C_i}{\partial n} \right)_{\text{壁}} = 0$ 。在双温度模型下, 还需给出振动温度的壁面条件, 取 $T_{v\text{壁}} = T_{\text{壁}}$ 。

2 数值计算方法

本文采用 NND 格式^[8]求解非平衡的全 NS 方程。为了解决化学源项与振动源项给计算带来的 Stiff 问题, 采用时间预处理技术, 对原始的控制方程改求下式的时间渐近解

$$\mathbf{S} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} - \mathbf{H} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial y} + \mathbf{H}_v \right) + \mathbf{W} \quad (5)$$

式中时间预处理矩阵 \mathbf{S} 取为

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} - \Delta t \mathbf{D} \mathbf{W} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \mathbf{D} \mathbf{W} = \text{diag} \left(\frac{\partial \dot{w}_1}{\partial \rho_1}, \frac{\partial \dot{w}_2}{\partial \rho_2}, \dots, \frac{\partial \dot{w}_{ns}}{\partial \rho_{ns}}, 0, 0, 0, \frac{\partial S_v}{\partial E_v} \right) \quad (7)$$

式中 $\frac{\partial S_v}{\partial E_v}$ 是热力非平衡时振动项的贡献。

可以证明, 作了时间预处理后, 流体力学量、化学组元量及振动能各自以流动特征时间、化学特征时间和振动特征时间推进, 解决了各特征时间之间巨大差异而引起的刚性问题。(5) 式的时间渐近解与原方程 (2) 式的解一致。

3 算例

3.1 验证性计算

作为验证, 首先进行 RAM-C (无线电衰减测量实验飞行器) 流场的电子密度计算。RAM-C 外形为一球锥, 半锥角 9° , 头部半径 0.1524m, 总长 1.295m。算例条件为高度 81km, 速度 7650m/s, $M_\infty = 28.3$, $Re = 1590$, 壁温 1500K。文献 [9] 给出了试验测得数据, 另外 Candler 和 MacCormack^[3] 分别采用五组元和七组元多温度模型在非催化壁面条件下进行了电子密度计算。

本文则分别采用七组元、十一组元双温度模型进行电子密度计算, 并比较不同壁面催化条件的影响。图 1、图 2 中列出了实测值、Candler 与 MacCormack 计算结果及本文结果曲线。

由图可见壁面采用非催化条件时, 本文七组元模型计算的电子密度峰值与文献 [3] 的计算值及实测值都很接近, 两种计算的电子密度剖面形状均与实测值不一致。本文用十一组元模型计算的电子密度峰值结果比七组元模型结果高了 1~2 个量级, 与实测值相距很远, 但改用全催化条件计算后, 电子密度峰值和剖面形状均与实测值非常接近。可见选取十一组元模型同时选用壁面全催化条件更为

合理。

3.2 飞船等离子体鞘电子密度计算

本文算例条件为 FIREII 飞船（大钝头倒锥体）在再入 1634s 时飞行条件，高度为 76.54km，速度为 11 370m/s。计算网格由代数方法生成，节点数为 71×61 。

图 3、图 4 为采用不同热化学模型计算的电子密度曲线。图 3 为轴向各点电子数密度峰值，图 4 为驻点线电子数密度剖面。由图可见该计算条件下单温度模型与双温度模型结果非常接近，而十一组元模型所得结果比七组元模型高 2~3 倍。壁面全催化条件比非催化条件的电子数密度低，在头部低 1~2 倍，其余区域二者结果较接近。

另外发现，在对 RAM-C 的计算中，压力在 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 达到 10^{-2} 量级后就收敛，而电子数密度在 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 达到 10^{-4} 量级后才收敛。但在 FIREII 飞船计算中，电子数密度在 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 达到 10^{-2} 量级后也基本收敛了。这可能是因为在 RAM-C 和 FIREII 飞船两种算例条件下，正离子组元所占百分比不同造成的。如果正离子组元所占百分比为小量，化学反应气体混合物密度的收敛不足以代表正离子组元密度的收敛，从而不能代表电子数密度的收敛。

4 结论

- (1) 在不同的计算条件下，气动力收敛与气动物理的收敛要求可能是不同的。
- (2) 采用不同组元模型对电子密度计算有较大影响，与实测结果比较表明，十一组元模型更为合理。
- (3) 在流动非平衡特性强的情况下，壁面催化可以大大降低电子密度，从而减小无线电截止频率值，有利于在高空推迟进入黑障区。

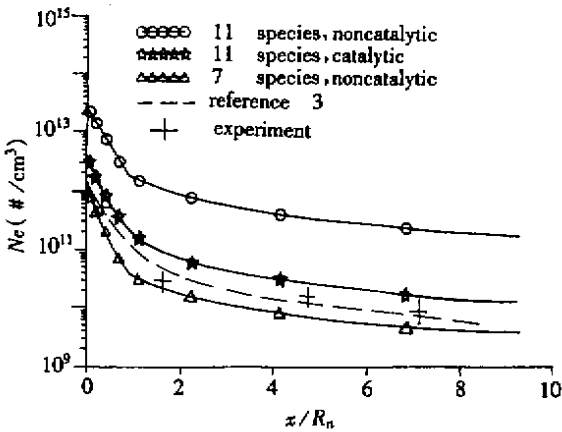


图 1 RAM-C 轴向各点电子密度峰值

Fig.1 The maximum electron density distribution along x-axis for RAM-C

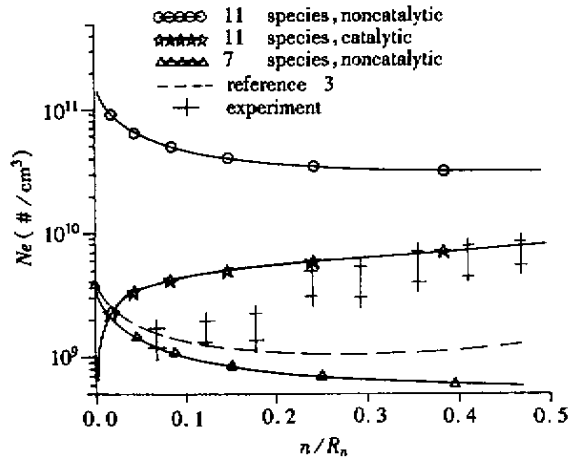


图 2 RAM-C 电子密度剖面 ($x/R_n = 8.1$ 处)

Fig.2 The electron density profile at $x/R_n = 8.1$ for RAM-C

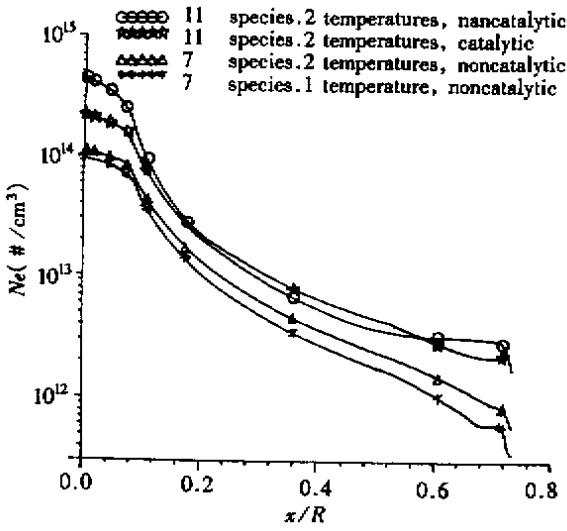


图3 FIREII 飞船轴向各点电子密度峰值

Fig.3 The maximum electron density distribution along x-axis for FIRE II

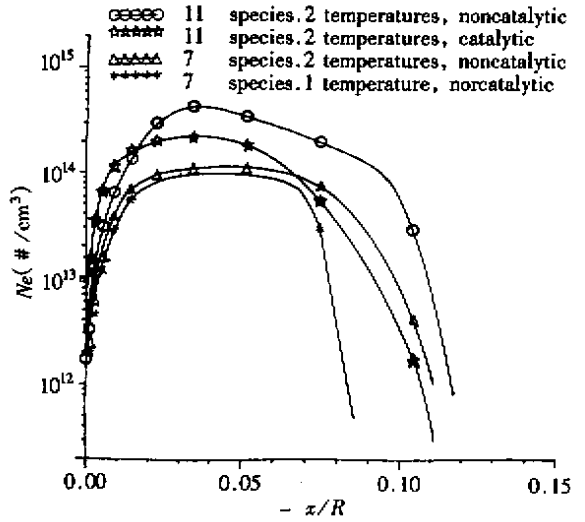


图4 FIREII 飞船驻点线电子密度剖面

Fig.4 The electron density profile at stagnation line for FIRE II

参考文献：

[1] 唐伟. 欧洲天地往返运输系统返回舱的气动特性初探 [A]. 第十届全国高超声速气动 (热) 学术交流会论文集 [C], 1999 : 233-238.

[2] Pollin I. Control of Electron Density Distribution on Hypersonic Vehicle [J]. HDL-TR-1592, April, 1972.

[3] Candler G V, McCormack R W. The Computation of Hypersonic Ionized Flows in Chemical and Thermal Nonequilibrium [J]. AIAA 88 - 0511, 1988.

[4] 吴承康, 卞荫贵等. 再入通讯可行途径研究 [A]. 空气动力学获奖成果汇编 (主编乐嘉陵), 1991.

[5] 沈建伟, 瞿章华. 电离非平衡粘性激波层低雷诺数钝体绕流 [J]. 空气动力学学报, 1986, 4 (4).

[6] Gupta R N et al. A Review of Reaction Rates and Thermodynamic and Transport Properties for an 11-species Air Model for Chemical and Thermal Non-equilibrium Calculations to 30000K [J]. NASA RP 1232, 1990.

[7] Park C. Problems of Rate Chemistry in Flight Regime of Aeroassisted Orbital Transfer Vehicles [J]. Progress in Aeronautics and Astronautics, 1985, 96 : 511-537.

[8] 张涵信. 无波动、无自由参数耗散差分格式 [J]. 空气动力学学报, 1989, 6 (2).

[9] Grantham W L. Flight Results of A 25000 Foot Per Second Reentry Experiment Using Microwave Reflectometers to Measure Plasma Electron Density and Standoff Distance [J]. NASA TN D-5615, 1970.

