

11 组元化学反应气体粘性激波层钝体绕流数值计算*

张巧芸 瞿章华

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 本文采用 11 组元化学模型对双曲面粘性激波层化学非平衡绕流流场进行了数值计算, 给出了压力、温度、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 N^+ 、 O^+ 和 NO^+ 摩尔浓度及 e^- 数密度在驻点的分布, 并与 7 组元、5 组元的计算结果作了比较。

关键词 化学非平衡, 粘性激波层, 高超声速

分类号 V411.4

Numerical Solution of Viscous Shock Layer Flow of 11-Species Chemical Reacting Air over Blunt Bodies

Zhang Qiaoyun Qu Zhanghua

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, 11-species Air Model is used for calculating the chemical non-equilibrium viscous shock layer flow over hyperboloids. The stagnation streamline distributions of pressure, temperature and N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ , NO^+ and e^- number density are given and compared with the results of 7-species, 5-species models.

Key words chemical non-equilibrium, viscous shock layer, hypersonic flow

1 引言

再入飞行器以高超声速再入大气层时, 由于激波层内的高温, 空气发生离解和电离反应。对应于飞行器飞行走廊的不同高度和速度, 空气离解和电离的程度是不同的, 这种不同体现在空气的组元数目上^[1]。在对再入飞行器周围流场进行数值模拟时, 必须计及所采用的组元数目即化学模型对流场性质的影响。国内进行再入飞行器流场数值模拟时, 一般采用 7 组元或 5 组元化学模型, 这对于计算气动力、气动热是方便的, 但在要考虑流场的光电特性时, 需要用 11 组元的模型才能给出 N^+ 、 O^+ 、 N_2^+ 、 O_2^+ 的密度分布, 因而得到的电子数密度也更准确。

本文运用 Gupta 等^[1]研究总结得到的 11 组元化学反应速率、热力学性质和输运性质的计算方法来求解 11 组元化学非平衡粘性激波层钝体绕流流场。由于采用了比较高精度的计算公式, 计算的结果更加准确可靠。

2 控制方程及边界条件

2.1 控制方程

控制方程采用化学非平衡粘性激波层方程, 方程具体形式见文献 [2]。

2.2 边界条件

在壁面和激波处不考虑速度滑移和温度跳跃, 壁面为完全催化壁面。壁面处, $u = 0, v = 0, T = T_w$, $C_{iw} = C_{ieq}(T_w)$; 激波处, 边界条件由 Rankine-Hugoniot 关系式给出。

* 国家部委基金项目资助
1998 年 5 月 26 日收稿
第一作者: 张巧芸, 女, 1974 年生, 硕士

K_v, K_{int} 分别是冻结热传导系数的移动分量和来自分子内部激发能的分量。

4 计算结果与讨论

本文分别计算了 (a) $U = 9\text{km/s}, H = 75\text{km}$, (b) $U = 6\text{km/s}, H = 75\text{km}$, (c) $U = 9\text{km/s}, H = 85\text{km}$ 三种条件下, 头部半径为 0.2m 、半顶角为 30° 的双曲体粘性激波层流场。图 1 给出了三种条件下电子数密度沿驻点线的分布, 从图中可以看到: 条件 (a) 下电子数密度最大; 速度不变、高度增高时电子数密度减小; 高度不变、速度减小时电子数密度也有所降低。

实际上, 在计算结果中我们发现: O^+ 摩尔百分比随高度和速度的变化也有同样的规律, 如图 2 所示。而且 O^+ 的摩尔含量相对于其它离子较大, 这可以从图 3 中给出的在速度为 9km/s 、飞行高度为 75km 条件下各离子摩尔百分比在驻点线上的分布看到。因此可以说电子数密度大小主要受 O^+ 数密度影响。

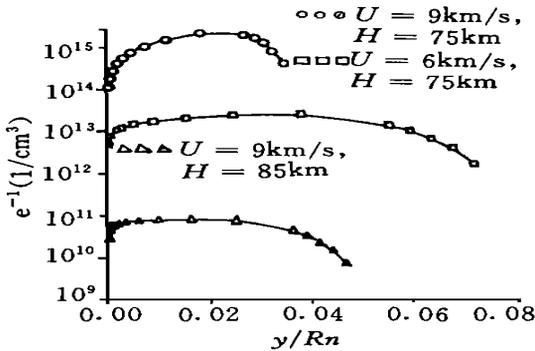


图 1 电子数密度沿驻点线分布
Fig.1 e^- number density

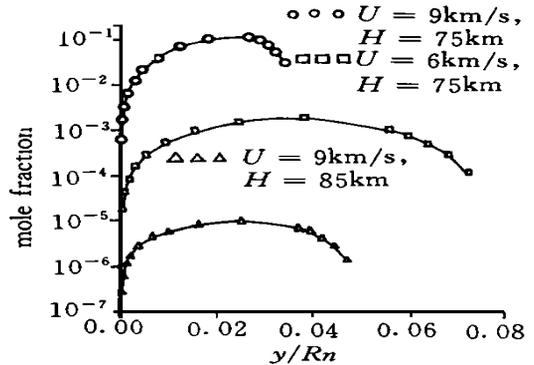


图 2 O^+ 摩尔浓度沿驻点线分布
Fig.2 O^+ mole fraction

为了考虑 11 组元模型计算得到的气动力、气动热及电子密度相对于其它气体模型的变化情况, 我们将来流速度为 9000m/s 、高度为 85km 条件下 11 组元计算得到的压力、温度驻点线分布与相同条件下 7 组元、5 组元的结果作了比较, 如图 4、图 5 所示, 从图中可以看到, 这 3 种气体模型下压力和温度分布几乎完全一样。图 6 比较了同样条件下 11 组元和 7 组元的驻点线电子数密度, 可以看到电子数密度相差 1 个数量级左右, 这是因为 11 组元计及了 7 组元未考虑的电离反应所生成的电子数。由此可见, 计算气动力和气动热, 7 组元或 5 组元模型就可以满足要求, 若计算电子密度, 7 组元还不够精确, 特别是对于较高速度的情况, 需要采用 11 组元模型。

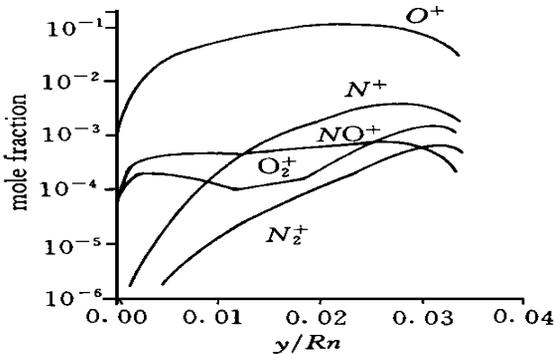


图 3 五种离子摩尔浓度沿驻点线分布
Fig.3 Mole fraction of 5-species

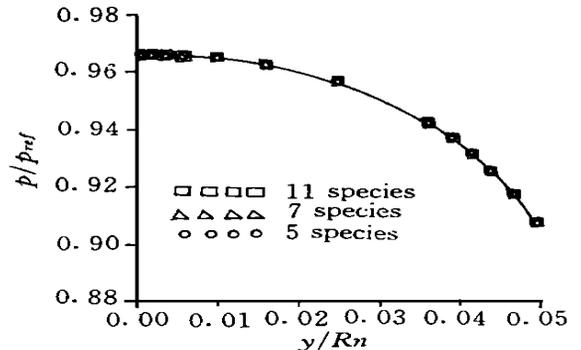


图 4 不同组元时压力沿驻点线分布
Fig.4 The streamline distribution of pressure

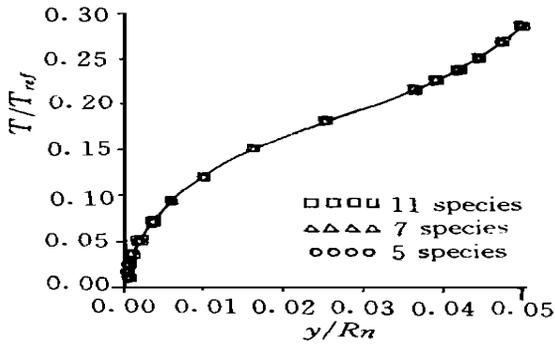


图5 不同组元时温度沿驻点线分布

Fig. 5 The streamline distribution of temperature

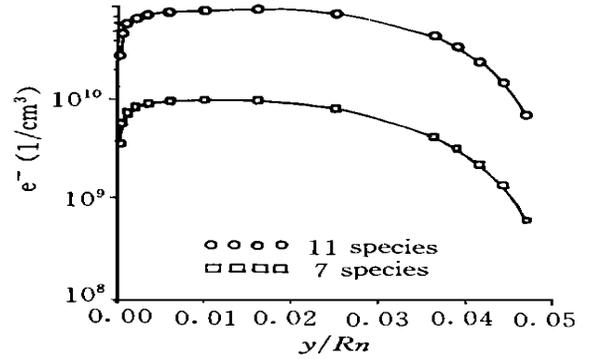


图6 不同组元时电子数密度沿驻点分布

Fig. 6 The streamline distribution of e^- number

5 结论

对于不同速度和高度, 11 组元化学模型计算得到的离子、电子数密度相差较大, 可以相差几个数量级; 特别是 O^+ , 在有些情况下摩尔含量比较高, 若忽略, 必会造成较大误差。因此, 在考虑流场的光电特性时, 必须采用 11 组元化学模型以获得更准确的数据。对于高超声速化学非平衡流场气动力和气动热的计算, 可以不必采用 11 组元模型, 7 组元或 5 组元就可以获得足够准确的结果。

参考文献

- 1 Gupta R N, Yos J M, Thompson R A, Lee K P. 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. NASA RP-1232, 1990
- 2 沈建伟, 瞿章华. 高超声速化学非平衡层流粘性激波层钝头细长体绕流数值计算. 宇航学报, 1988 (3)