

文章编号: 1001-2486 (2001) 05-0027-04

不同热化学模型对表面传热影响的数值分析*

曾明, 冯海涛, 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: 研究不同热化学模型及壁面催化条件对表面传热的影响, 包括: (1) 不同组元的高温空气模型(7组元、11组元)的比较; (2) 热力非平衡(双温度)的化学动力过程与热力平衡(单温度)的化学动力过程的比较; (3) 不同壁面催化条件的比较。

关键词: 高超声速流; 热化学模型; 传热; 数值研究

中图分类号: O6-04 **文献标识码:** A

Numerical Analysis of the Effects for Different Thermo-chemical Models on Heat Transfer

ZENG Ming, FENG Hai-tao, QU Zhang-hua

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

Abstract: The effects of different thermo-chemical air models and surface catalytic conditions on surface heat transfer are analyzed numerically. They include (1) the comparison of different high temperature air models (7 species and 11 species), (2) the comparison of chemical nonequilibrium flow with thermo-nonequilibrium (two temperature model) and thermo-equilibrium (one temperature model), (3) the comparison of different surface catalytic condition.

Key words: hypersonic flow; thermo-chemical model; heat transfer; numerical study

气动热力学模型的选取与飞行器的设计要求密切相关。飞行环境、设计精度是选择物理模型的重要因素。通常计算成本随物理模拟精度的增加而增加。近二十年来国内外对非平衡条件下再入飞行器的气动力、气动热和气动物理问题开展了广泛的研究^{1~4}], 但综合分析的文章所见不多。本文以高焓风洞模型实验为研究对象, 分别采用不同组元数的高温空气模型、热化学非平衡模型, 进行了不同壁面催化条件下的传热计算, 并对壁面传热结果作了初步分析。

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)。11组元模型^{5]}的化学组分为: N_2 、 O_2 、 N 、 O 、 NO 、 NO^+ 、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 N^+ 、 O^+ 、 e^- ; 7组元模型的化学组分为: N_2 、 O_2 、 N 、 O 、 NO 、 NO^+ 、 e^- 。

研究热力非平衡的化学动力过程时, 空气化学反应的特征时间和振动松弛的特征时间是可以比拟的, 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^{6]}。

1.2 控制方程

轴对称化学非平衡流的 NS 方程为

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

* 收稿日期: 2001-04-15

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(00JJY1001), 中科院力学所 LHD 开放课题项目(No. 2000-10)

作者简介: 曾明(1971-), 女, 硕士, 讲师。

式中 $U = (\rho C_1, \rho C_2, \dots, \rho C_{ns}, \rho u, \rho v, E)^T$, $W = (\dot{w}_1, \dot{w}_2, \dots, \dot{w}_{ns}, 0, 0, 0)^T$, 其中 \dot{w}_i 是化学反应源项³¹。

热力非平衡时, 在双温度近似下控制方程组中要增加振动能量方程。这时

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

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

式中 E_v 为总振动能, S_v 为振动能生成率。

分子组元的振动比热为

$$C_{v,vi}(T_v) = \frac{R}{M_i} \left(\frac{\theta_{vi}}{T_v} \right)^2 \frac{\exp\left(\frac{\theta_{vi}}{T_v}\right)}{\left[\exp\left(\frac{\theta_{vi}}{T_v}\right) - 1 \right]^2} \quad (4)$$

分子组元的振动热传导系数为

$$k_{vi} = \mu_i C_{v,vi} \quad (5)$$

式中 θ_{vi} 为 i 组元的振动特征温度, μ_i 为 i 组元的粘性系数。

1.3 传热计算

壁面传热由平动热传导、振动热传导及扩散传热组成。无量纲热流为

$$q = \frac{1}{Pr} \left(k \frac{\partial T}{\partial n} + k_v \frac{\partial T_v}{\partial n} \right) + \sum_{i=1}^{ns} h_i \frac{Le_i k_{\text{总}}}{Pr C_{p, \text{总}}} \frac{\partial C_i}{\partial n} \quad (6)$$

斯坦顿数 St 为

$$St = \frac{k \frac{\partial T}{\partial n} + k_v \frac{\partial T_v}{\partial n} + \sum_{i=1}^{ns} h_i \frac{Le_i k_{\text{总}}}{C_{p, \text{总}}} \frac{\partial C_i}{\partial n}}{Re (T_{aw} - T_w) Pr} \quad (7)$$

其中

$$T_{aw} = T_{\infty} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \sqrt{Pr} M_{\infty}^2 \right) \quad (8)$$

2 数值计算方法

本文采用 NND 格式^[7]求解轴对称热化学非平衡 NS 方程组, 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, 简述如下:

对原始的控制方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + H = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + H_v \right) + W \quad (9)$$

采用时间预处理方法后, 求下式的时间渐近解

$$S \frac{\partial U}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial G}{\partial y} - H + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + H_v \right) + W \quad (10)$$

式中时间预处理矩阵 S 取为

$$S = I - \Delta t DW \quad (11)$$

其中

$$DW = \text{diag} \left(\frac{\partial \dot{w}_1}{\partial \rho_1}, \frac{\partial \dot{w}_2}{\partial \rho_2}, \dots, \frac{\partial \dot{w}_{ns}}{\partial \rho_{ns}}, 0, 0, 0, 0, \frac{\partial S_v}{\partial E_v} \right) \quad (12)$$

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。(10)式的时间渐近解即为(9)式的解。

3 算例

3.1 验证性计算

为验证本文模型及计算方法的正确性，首先对文献 [8] 算例进行了传热计算。算例外形为一球锥，半锥角 10.5° ，头部半径 0.2m 。算例条件为高度 $H=50\text{km}$ ， $M_\infty=17.94$ ， $Re_\infty=71323$ ，壁温 $T_w=1500\text{K}$ 。由于非平衡流具有尺度效应，对于头部半径较小的球锥，即使在 $H=50\text{km}$ 的高度，非平衡效应仍是显著的^[9]。MacCormack 和 Candler^[8]采用 5 组元多温度模型在催化壁面条件下进行了传热计算。本文对该算例采用 7 组元双温度模型进行传热计算。图 1 中列出了 MacCormack 和 Candler 及本文算得的 St 数沿物面分布曲线。

本文计算结果与文献结果接近，但有偏离。造成偏差的原因可能是所选取的热化学模型不同，文献 [8] 采用 5 组元模型，并且有三个振动温度和一个移动温度，而本文是 7 组元双温度模型。另外，本文的计算在壁面附近采用了简化的数值边界条件，近似取邻近壁面两点的压力沿法向不变 ($p_1=p_2$)，从而降低了壁面附近的计算精度。但是这种简化并不改变温度剖面和浓度剖面的总趋势。

3.2 不同热化学模型及壁面条件下的传热计算

本文算例外形为一球锥，半锥角 9° ，头部半径 0.05m 。算例为高焓风洞条件：来流速度 $V_\infty=4430\text{m/s}$ ， $\rho_\infty=1.1\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$ ， $T_\infty=872\text{K}$ ， $Re_\infty=6379.9$ ， $T_w=300\text{K}$ 。

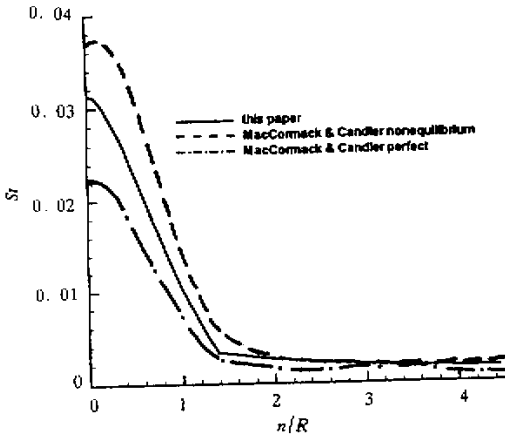


图 1 本文计算与文献 [8] 结果曲线

Fig.1 Comparison of present computation result with reference [8]

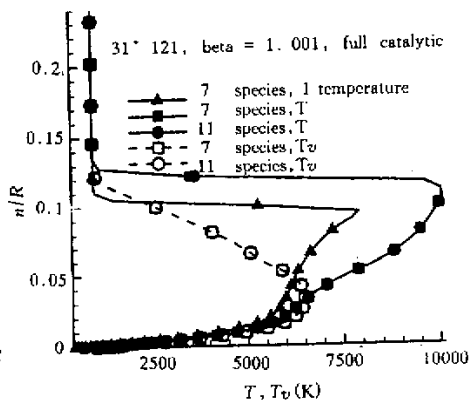


图 2 不同热化学模型时驻点线温度剖面

Fig.2 Temperature profile on stagnation line for different thermo-chemical models

作为传热计算的前提，图 2 给出了不同热化学模型的驻点线平动温度 T 和振动温度 T_v 剖面，图 3 (a)、图 3 (b) 为 11 组元热化学非平衡模型驻点线组元质量分数剖面。计算网格节点数均为 31×121 ，网格拉伸系数 $\beta=1.001$ ，壁面采用全催化条件。

图 4 反映了不同热化学模型对传热的影响。分别为采用 7 组元化学非平衡（单温度）、7 组元热化学非平衡（双温度）及 11 组元热化学非平衡模型计算的壁面 St 数曲线，壁面采用全催化条件。由图可见，该计算条件下不论单温度模型与双温度模型，或是 11 组元模型与 7 组元模型，所得 St 数都非常接近。

图 5 反映了不同壁面催化条件对传热的影响，采用 11 组元热化学非平衡模型。由图可见，在驻点附近壁面催化时的传热比非催化时高近 50%，往下游催化与非催化差别减小。

本文还采用不同的法向网格数 (31×61 与 31×121) 和不同网格拉伸系数 ($\beta=1.01$ 、 $\beta=1.001$ 、 $\beta=1.0005$ 、 $\beta=1.0001$) 进行计算，发现 St 数的变化不大，在计算精度范围之内。

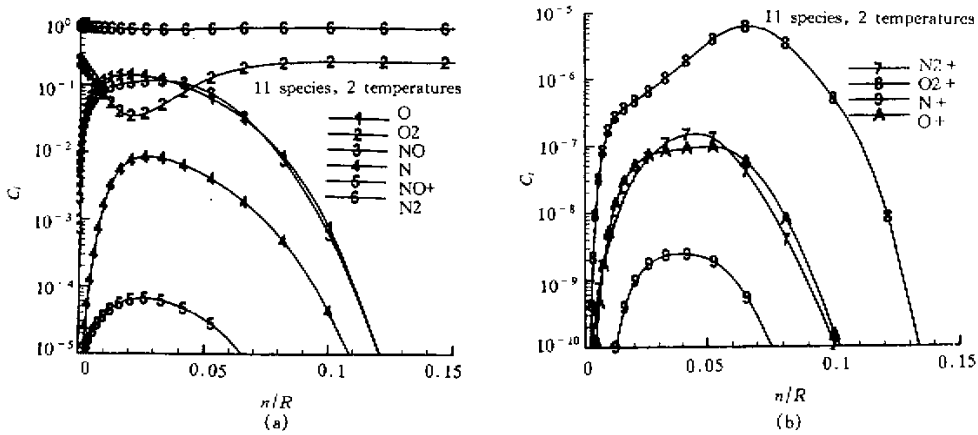


图 3 11 组元热化学非平衡流驻点线组元分布剖面
Fig.3 Species profile on stagnation line for 11 species gas model

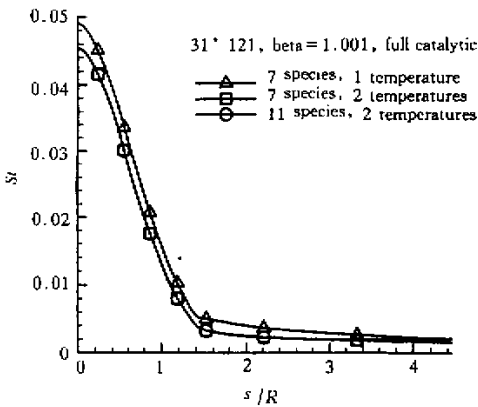


图 4 不同热化学模型时 St 曲线
Fig.4 Surface Stanton number distribution for different thermo-chemical models

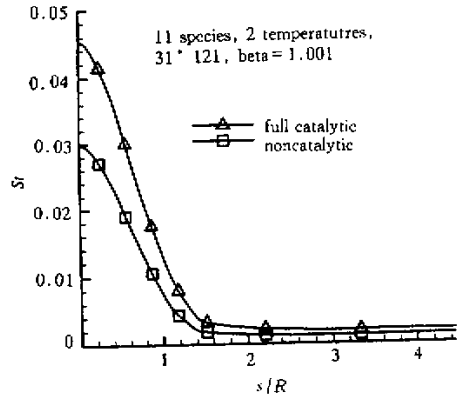


图 5 不同壁面催化条件时 St 曲线
Fig.5 Surface Stanton number distribution for different catalytic conditions

4 结论

(1) 壁面非催化可以使 St 降低达 50%，可以有效地减小表面传热。

(2) 与采用完全气体模型的传热计算^[8]不同，采用各种热化学模型对传热计算结果影响不大，偏差在计算精度范围之内。这是因为在计算条件下激波层温度低于 10000K，11 组元模型中有许多是微量组元；另外，实验段来流密度相当于大气高度为 50km 的密度值，这时碰撞频率较大，壁面附近流场趋于热力平衡。

(3) 当法向网格数为 121、网格拉伸系数 $\beta = 1.001$ 时，可以得到合理的结果。进一步加密和拉伸对传热计算影响不大。

(下转第 16 页)

参考文献：

- [1] Gnoffo P A et al. Computational Aerothermodynamic Design Issues for Hypersonic Vehicle [R]. AIAA 97-2473, 1997.
- [2] 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).
- [3] 欧阳水吾, 苏玉宏. 高超声速有攻角钝头体三维化学非平衡粘性激波层流动数值计算 [J]. 宇航学报, 1992, 3.
- [4] 周学华, 竺乃宜. 高超声速小钝锥尾流非平衡辐射研究 [J]. 空气动力学学报, 1996, 14 (3).
- [5] Gupta R N etc. 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 [R]. NASA RP 1232, 1990.
- [6] Park C. Problems of Rate Chemistry in Flight Regime of Aeroassisted Orbital Transfer Vehicles [J]. Progress in Aeronautics and Astronautics, 1985, 96 : 511-537.
- [7] 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).
- [8] MacCormack R W, Candler G V. The Solution of the Navier-Stokes Equations Using Gauss-Seidel Line Relaxation [J]. Computer & Fluids, 1989, 17 (1): 135-150.
- [9] Anderson J D Jr. Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics [M]. New York : McGraw-Hill Book Company, 1989 : 557-563.

