

## 泰氟隆烧蚀产物对电子密度的影响\*

石于中,王毛彦,尹乐,陈伟芳

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要** 采用 WNND 格式,对有泰氟隆烧蚀产物引射的化学非平衡 NS 方程进行了数值模拟。采用 7 组元纯空气化学反应和 19 组元、28 种反应的空气—泰氟隆化学反应系统,对照计算了壁面有泰氟隆烧蚀产物引射和纯空气绕流两种流场,研究了泰氟隆烧蚀产物对电子密度的影响。

**关键词** 烧蚀;化学非平衡;数值计算

中图分类号:V211.4 文献标识码:A

## The Effect of Wall Injection of Teflon Ablating Material on Electron Number Density

SHI Yu-zhong, WANG Mao-yan, YIN Le, CHEN Wei-fang

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

**Abstract** The chemical non-equilibrium flows over a teflon ablative wall are calculated numerically by solving NS equations with pure-air and teflon-air chemical reaction system. The overall teflon-air chemical system used consists of 19 species and 28 reactions. The effect of wall injection of teflon ablating material on electron number density are discussed.

**Key words** ablation; chemical non-equilibrium; numerical simulation

高速飞行器再入大气层时,由于表面热流的作用,热防护材料发生烧蚀。烧蚀产物引射到激波层中,与来流空气发生化学反应,改变了流场中组元浓度、电子数密度和流场特性。这些产物流入尾流将改变尾流光电特性,引起研究者的高度重视。在烧蚀流场研究方面,Greenberg<sup>[1]</sup>研究了泰氟隆烧蚀平板层流边界层,进入 20 世纪 90 年代,Bhutta<sup>[2]</sup>利用抛物化 NS 方程的数值迭代方法研究了流过泰氟隆烧蚀表面的化学非平衡粘性流。本文采用 WNND 格式<sup>[3]</sup>,对有泰氟隆烧蚀产物引射的化学非平衡 NS 方程进行了数值模拟,得到了速度、温度、密度、压力和组元浓度等物理量分布及壁面热流等参数分布,对泰氟隆烧蚀产物引射对电子密度的影响进行了对比分析。

### 1 NS 方程

在柱坐标系  $(x, r, \theta)$  中,经变换后<sup>[3]</sup>控制轴对称流动的无量纲 NS 方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\tilde{U}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\xi_x \tilde{E} + \xi_r \tilde{F}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\eta_x \tilde{E} + \eta_r \tilde{F}}{J} \right) + \frac{\tilde{G}}{J} \\ & = \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\xi_x \tilde{E}_v + \xi_r \tilde{F}_v}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\eta_x \tilde{E}_v + \eta_r \tilde{F}_v}{J} \right) + \frac{\tilde{G}_v}{J} \right] + \frac{\tilde{S}}{J} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:

\* 收稿日期 2004-03-28

作者简介:石于中(1956—)男,副教授,博士。

$$\tilde{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho C_i \end{pmatrix}, \quad \tilde{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (p + \rho E)u \\ \rho u C_i \end{pmatrix}, \quad \tilde{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ (p + \rho E)v \\ \rho v C_i \end{pmatrix}, \quad \tilde{G} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (p + \rho E)v \\ \rho v C_i \end{pmatrix}, \quad \tilde{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{w}_i \end{pmatrix}$$

$$\tilde{E}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ (2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial r} + \lambda \frac{v}{r} \\ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \lambda \frac{u}{r} \\ \left[ (2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial r} + \lambda \frac{v}{r} \right] u + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) v + q_x + \sum_{i=1}^{n_s} \rho D_i h_i \frac{\partial X_i}{\partial x} \\ \rho D_i \frac{\partial X_i}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$\tilde{F}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ (2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \frac{\partial v}{\partial x} \\ \left[ (2\mu + \lambda) \frac{\partial v}{\partial r} + \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{v}{r} \right] v + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) u + q_r + \sum_{i=1}^{n_s} \rho D_i h_i \frac{\partial X_i}{\partial r} \\ \rho D_i \frac{\partial X_i}{\partial r} \end{pmatrix}$$

$$\tilde{G}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ 2\mu \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \\ \left[ (2\mu + \lambda) \frac{\partial v}{\partial r} + \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{v}{r} \right] v + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) u + q_r + \sum_{i=1}^{n_s} \rho D_i h_i \frac{\partial X_i}{\partial r} \\ \rho D_i \frac{\partial X_i}{\partial r} \end{pmatrix}$$

## 2 边界条件

切向速度壁面边界条件为无滑移条件,由于有物质引射,故壁面处法向速度由质量引射率确定。壁面上的温度边界条件与组元边界条件可以通过烧蚀机理求出。泰氟隆在高温下不液化,直接热分解为气体,热解后不留残渣。泰氟隆烧蚀壁面无复相反应,热解气体主要是  $C_2F_4$  气体。为了与纯空气绕流进行比较,在计算时,壁温是给定的,壁面条件是:

$$u = 0, \quad \rho v = \dot{m}_w \quad (2)$$

$$T = T_w, \quad C_i = C_{ie} \quad (3)$$

上式中,  $C_{ie}$  采用平衡常数法计算,质量引射率的计算公式如下<sup>[4]</sup>:

$$\dot{m}_w = \rho \frac{\alpha_p B \exp(-E/RT_w)}{E/RT_w(1 - T_0/T_w)}$$

驻点线由流场的对称性条件给出

$$v = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial \rho}{\partial r} = \frac{\partial C_i}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

在本文研究的 Teflon-air 化学反应系统中,考虑了 19 种组元,它们是  $O, O_2, N, N_2, NO, C, C_2, C_3, CO, CO_2, F, F_2, CF_2, CF_4, COF_2, C_2F_4, NO^+, F^-, e^-$ , 并考虑了 28 个气相化学反应。

### 3 数值离散

采用物理分裂方法<sup>[5]</sup> ,将对流扩散方程和化学反应方程分裂为 :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + G = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial E_v}{\partial \xi} + \frac{\partial F_v}{\partial \eta} + G_v \right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = S \tag{6}$$

采用隐式 WNND 格式 ,

$$K \delta U_{ij}^{n+1} - \frac{\Delta \tau}{\Delta \xi} [\bar{A}_{i-1,j}^+ \delta U_{i-1,j}^{n+1} + \bar{A}_{i-2,j}^+ \delta U_{i-2,j}^{n+1}] - \frac{\Delta \tau}{\Delta \eta} [\bar{B}_{i,j-1}^+ \delta U_{i,j-1}^{n+1} + \bar{B}_{i,j-2}^+ \delta U_{i,j-2}^{n+1}] = \Delta \tau (RHS)_{ij}^n$$

$$K \delta U_{ij}^{n+1} + \frac{\Delta \tau}{\Delta \xi} [\bar{A}_{i+1,j}^- \delta U_{i+1,j}^{n+1} + \bar{A}_{i+2,j}^- \delta U_{i+2,j}^{n+1}] + \frac{\Delta \tau}{\Delta \eta} [\bar{B}_{i,j+1}^- \delta U_{i,j+1}^{n+1} + \bar{B}_{i,j+2}^- \delta U_{i,j+2}^{n+1}] = K \delta U_{ij}^{n+1}$$

$$\delta U^{n+1} = U^{*n+1} - U^n$$

$$K = I + \frac{\Delta \tau}{\Delta \xi} \lambda_{max}^A + \frac{\Delta \tau}{\Delta \eta} \lambda_{max}^B$$

$$\lambda_{max}^A = \max(|\lambda_1^A|, |\lambda_2^A|, \dots, |\lambda_m^A|)$$

$$\lambda_{max}^B = \max(|\lambda_1^B|, |\lambda_2^B|, \dots, |\lambda_m^B|)$$

$\lambda_1^A \dots \lambda_m^A$  和  $\lambda_1^B \dots \lambda_m^B$  分别为矩阵  $A = \frac{\partial E}{\partial U}$ 、 $B = \frac{\partial F}{\partial U}$  的特征值。

将方程(6)离散 ,得到

$$(I - \Delta \tau D^n) \delta U_{ij}^{n+1} = \Delta \tau S_{ij}^{*n+1}$$

其中 ,

$$\delta U^{n+1} = U^{n+1} - U^{*n+1}, \quad D = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)^{*n+1}$$

### 4 计算结果及分析

计算了纯空气及有泰氟隆烧蚀产物引射的球锥绕流流场。算例条件为 ,飞行高度  $h = 68\text{km}$  ,来流马赫数  $M = 20$  ,雷诺数  $Re = 395\,000$  ,半锥角  $\theta = 8^\circ$ 。图 1 给出了剖面上最大电子数密度沿壁面曲线坐标的变化曲线。对应的壁面温度分别为 800K 和 900K ,对应的组元壁面条件分别为有泰氟隆烧蚀产物引射平衡催化壁、纯空气完全催化壁和非催化壁三种情况。由图可见 ,不同催化壁条件对电子数密度的影响大于壁面温度和是否有烧蚀产物引射的影响。在本算例中 ,壁面温度的改变本身不大。给定壁面温度条件下 ,烧蚀产物引射的影响主要是对电子的吸附作用。图 2 ~ 图 4 是在 900K 壁面温

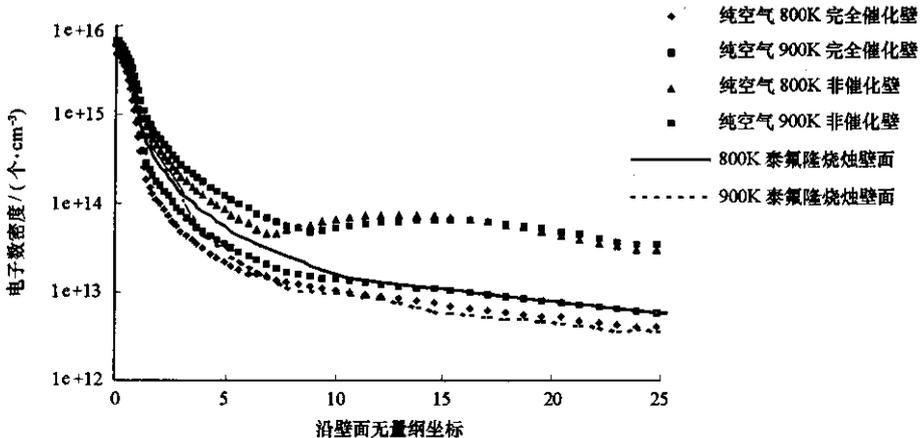


图 1 最大电子数密度

Fig. 1 Electron number density

度、泰氟隆烧蚀产物引射平衡催化壁条件下的计算结果。图 2 给出了最大离子数密度沿壁面曲线坐标的变化曲线。由图可见,组元  $F^-$  最大数密度平均比  $NO^+$  低 6 个数量级。因此在给定壁面温度条件下,烧蚀产物引射对电子数密度的影响很小。图 3 给出的是电子数密度等值线。图 4 为驻点线组元质量分数。可以看出,烧蚀产物引射的影响局限于壁面附近。

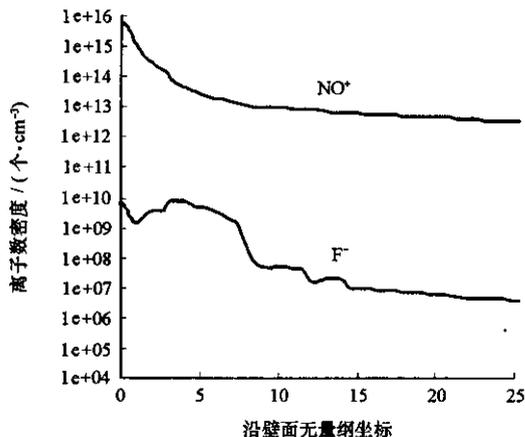


图 2 最大离子数密度

Fig. 2 Electriferous particle number density

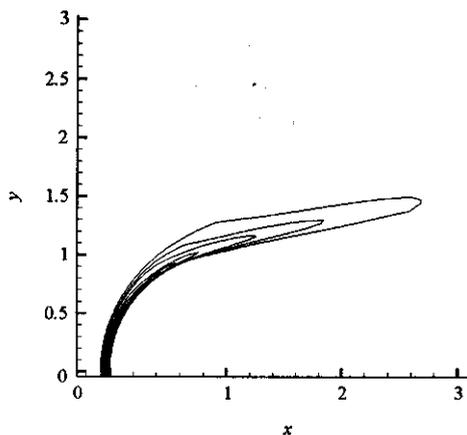


图 3 电子数密度等值线

Fig. 3 Contour of electron number density

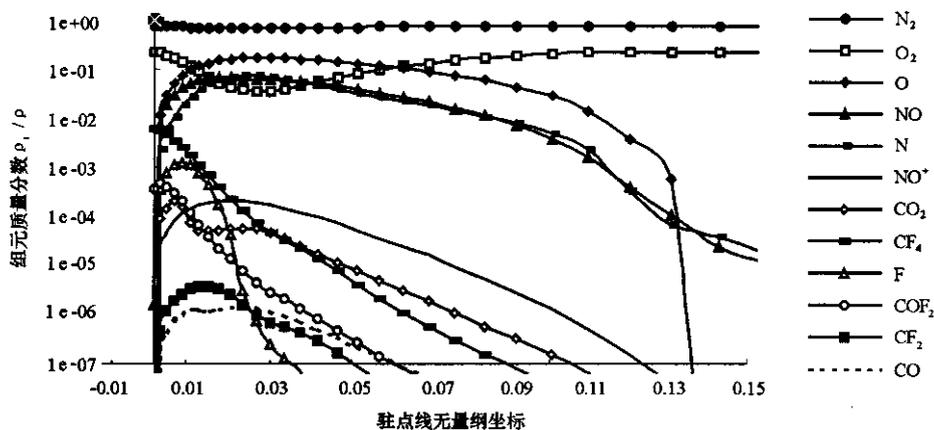


图 4 驻点线组元质量分数

Fig. 4 Species concentration on stagnant line

## 5 结论

采用数值方法模拟了表面有泰氟隆烧蚀产物引射的化学非平衡球锥绕流流场。对照计算了壁面有泰氟隆烧蚀产物引射和纯空气绕流两种情况,研究了泰氟隆烧蚀产物对电子密度的影响。结果表明,在本文所给壁面温度条件下,烧蚀产物引射的影响局限于壁面附近。

## 参考文献:

[ 1 ] Greenberg R A , Kemp N H , Wray K L . Structure of the Laminar Ablating Air-Teflon Boundary Layer [ R ] . AD - 681152 , 1968 .  
 [ 2 ] Bhutta B A , Lewis C H . A New Technique for Low-to-high Altitude Predictions of Ablative Hypersonic Flowfields [ R ] . AIAA - 91 - 1392 , 1991 .  
 [ 3 ] 赵海洋,刘伟,等.高精度差分格式 WND 的构造及数值实验 [ J ] .国防科技大学学报, 2002, 24( 6 ) .  
 [ 4 ] 卞荫贵,钟家康.高温边界层传热 [ M ] .北京:科学出版社, 1986 .  
 [ 5 ] 黎作武.含激波、旋涡和化学非平衡反应的高超声速复杂流场的数值模拟 [ D ] .中国空气动力研究与发展中心研究生部博士学位论文, 1994 .

