

流过泰氟隆烧蚀表面的化学非平衡粘性激波层数值研究*

石于中 郑忠华 吴其芬

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 本文对有泰氟隆烧蚀的化学非平衡粘性激波层流场进行了数值模拟。应用空间推进与总体迭代相结合的求解方法,采用19组元、29种反应的空气—泰氟隆化学反应系统,对化学非平衡粘性激波层流场与泰氟隆壁面烧蚀传热过程进行耦合求解,研究了平衡催化壁和非催化壁条件对粘性激波层烧蚀流场的影响。

关键词 烧蚀, 化学非平衡, 粘性激波层

分类号 V211

On chemical Non-equilibrium VSL Flow over a Teflon Ablative Wall

Shi Yuzhong Zheng zhonghua Wu Qifen

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

Abstract The chemical non-equilibrium viscous shock layer flows over a teflon ablative wall are calculated numerically. The coupled solutions of the chemical non-equilibrium viscous shock layer flows and the teflon ablative procedures are obtained through space-marching and global iterations. The overall teflon-air chemical system used consists of 19 species and 29 reactions. The effects of the equilibrium catalytic and the noncatalytic wall conditions on the ablative flows are discussed.

Key words ablation, chemical non-equilibrium, viscous shock layer

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^[1]研究了泰氟隆烧蚀平板层流边界层;进入90年代,Bhutta^[2]利用抛物化N. S. 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。本文首次采用粘性激波层方程与泰氟隆壁面烧蚀耦合数值计算研究了泰氟隆烧蚀球锥绕流流场,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烧蚀温度和泰氟隆烧蚀速率等壁面参数分布,对不同催化壁条件下的结果进行了对比分析,结果是合理的。

1 粘性激波层方程

粘性激波层的概念最早由Davis^[3]提出,并得到了激波层内边界层区域和无粘流动区域一致有效的控制方程。本文计算的控制方程是多组元化学非平衡粘性激波层方程^[4]为:

$$\frac{\partial}{\partial s}[(r + y \cos \Phi) \rho u] + \frac{\partial}{\partial y}[(1 + ky)(r + y \cos \Phi) \rho v] = 0 \quad (1)$$

$$= \epsilon^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{ku}{1 + ky} \right) \right] + \epsilon^2 \mu \left[\frac{2k}{1 + ky} + \frac{\cos \Phi}{r + y \cos \Phi} \right] \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{ku}{1 + ky} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{k}{1 + ky} u^2 - \frac{1}{1 + ky} \rho u \frac{\partial p}{\partial s} - \rho v \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

* 1998年6月3日收稿

第一作者:石于中,男,1956年生,副教授

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1+ky} \rho u C_p \frac{\partial T}{\partial s} + \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{u}{1+ky} \frac{\partial p}{\partial s} - v \frac{\partial p}{\partial y} \\ & = \epsilon^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \epsilon^2 \left[\frac{k}{1+ky} + \frac{\cos \Phi}{r+y \cos \Phi} \right] k \frac{\partial T}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & - \epsilon^2 \sum_{i=1}^{ns} J_i C_{pi} \frac{\partial T}{\partial y} + \epsilon^2 \mu \left[\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{ku}{1+ky} \right] - \sum_{i=1}^{ns} h_i w_i \\ & \frac{1}{1+ky} \rho u \frac{\partial C_i}{\partial s} + \rho v \frac{\partial C_i}{\partial y} = w_i - \epsilon^2 \frac{\partial J_i}{\partial y} - \epsilon^2 \left[\frac{k}{1+ky} + \frac{\cos \Phi}{r+y \cos \Phi} \right] J_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$p = \frac{\rho R T}{M^* C_p} \quad (6)$$

其中 $J_i = -\frac{\mu}{Pr} Le_i \frac{\partial C_i}{\partial y}$, $C_i = \rho_i / \rho$, $C_p = \sum_{i=1}^{ns} C_i C_{pi}$, $M = 1 / \sum_{i=1}^{ns} \frac{C_i}{M_i^*}$

在薄激波层近似并激波形状给定的条件下, 上述控制方程具有双曲抛物型性质。本文采用空间推进加总体迭代方法求解。

2 定解条件

求解区域如图1, 其外边界是绕流物体头部前方形成的且向远后方延伸的弓形激波。采用贴体坐标系, s 坐标起点为驻点线, y 坐标沿物面法线, u 和 v 分别为切向和法向速度分量。图中, R_n 和 θ 分别为钝头半径和半锥角。

激波波后物理量由 Rankine-Hugoniot 关系式给出。

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, 而是直接热分解为气体, 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, 因此壁面条件是:

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ \rho v &= \dot{m}_w \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{cases} -q_w + \dot{m}_w (h^w - h^s) = 0 \\ -\rho D_i \frac{\partial C_i}{\partial y} + \dot{m}_w (C_i - 1) = 0 \quad i = C_2F_4 \\ -\rho D_i \frac{\partial C_i}{\partial y} + \dot{m}_w C_i = 0 \quad i = C_2F_4 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{非催化壁} \\ \text{平衡催化壁} \end{array} \quad (10)$$

$$C_i = C_{ie} \quad \text{平衡催化壁} \quad (11)$$

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^[5]:

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

3 非平衡化学反应模型

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, O₂, N, N₂, NO, C, C₂, C₃, CO, CO₂, F, F₂, CF₂, CF₄, COF₂, C₂F₄, NO⁺, F⁻, e⁻, 并考虑了 29 个气相化学反应。

4 计算结果与分析

本文计算了流过泰氟隆烧蚀壁面的粘性激波层流场。算例条件为: 飞行高度 $h = 65\text{km}$, 来流马赫数 $M = 20$, 雷诺数 $Re = 616$, 半锥角 $\theta = 6^\circ$ 。图 2~4 分别给出了泰氟隆壁面烧蚀率、壁面温度和驻点

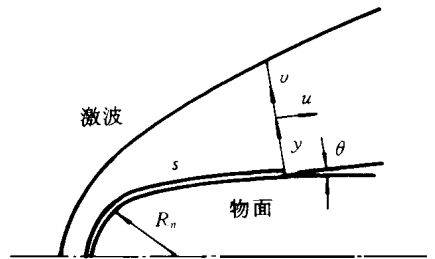


图1 求解区域和贴体坐标系

Fig. 1 Coordinate system.

线电子数密度在平衡催化壁和非催化壁两种条件下的对照计算结果。由图可见，不同催化壁条件对烧蚀速率和壁面温度有显著的影响，平衡催化壁条件下壁面温度和烧蚀速率均比非催化壁大。这是由于组分成分 CF_4 比 C_2F_4 的单位焓值低，在非催化壁条件下，壁面附近主要组分是 C_2F_4 ，而在平衡催化壁条件下，主要组分是 CF_4 。由图 4 可以看出，壁面催化对驻点线电子数密度的影响局限于壁面附近，平衡催化壁条件下，壁面附近由于组分 F^- 相对较多，因此电子数密度相应于非催化壁为低。另外，在非催化壁条件下，壁面上 ($y=0$) 组分 F^- 的浓度为零；由于化学反应，壁面附近组分 F^- 的浓度不为零，导致了壁面附近一薄层内电子数密度随着物面法向坐标 y 增加而减少。图 5 为切向速度剖面图，输出参数的剖面位置分别为 $S/R_n = 0, 9$ 和 43 。值得注意的是，由于壁面存在物质引射，除了驻点线而外，速度剖面曲线存在拐点，这可能诱发分离。

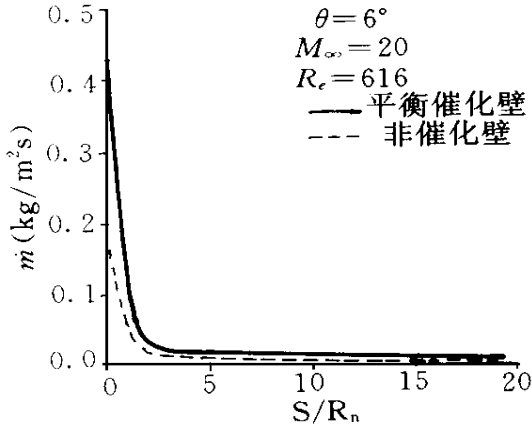


图 2 泰氟隆壁面烧蚀率
Fig. 2 Comparison of predicted surface ablation rate.

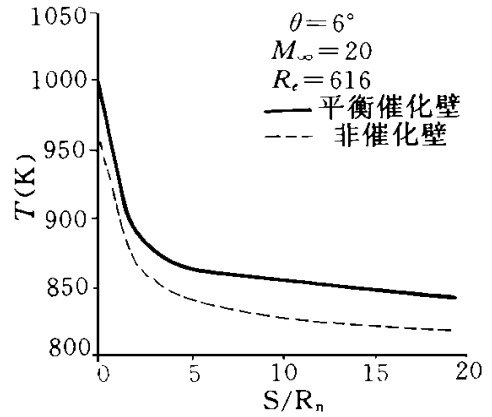


图 3 烧蚀壁面温度
Fig. 3 Comparison of predicted body surface temperature.

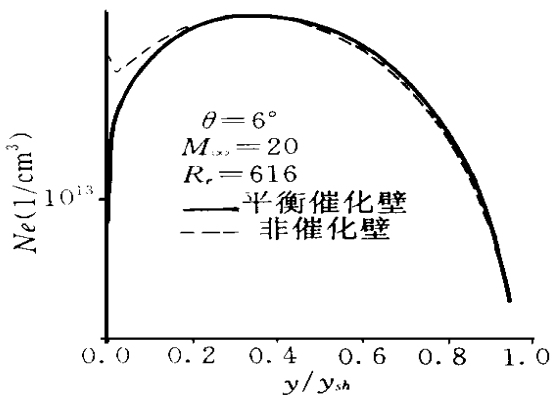


图 4 驻点线电子数密度
Fig. 4 Comparison of predicted electron number density profiles at the stagnation point.

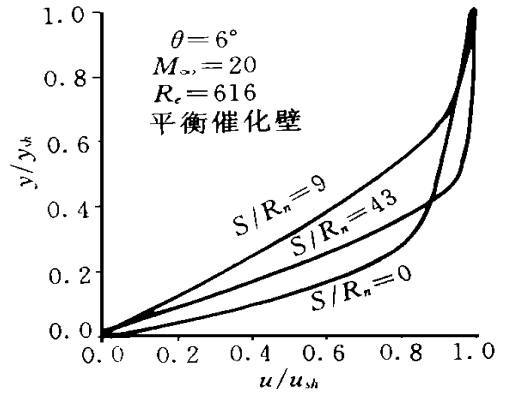


图 5 切向速度剖面
Fig. 5 Tangential velocity profiles.

参考文献

- 1 Greenberg R A. AD-681152, 1968
- 2 Bhutta B A. And Lewis C. H. A new technique for low-to-high altitude predictions of ablative hypersonic flow fields. AIAA-91-1392
- 3 Davis R T. hypersonic flow of a chemically reacting binary mixture past a blunt body. AIAA paper 70-805, 1970
- 4 Miner E W. & Lewis C H. hypersonic ionizing air viscous shock-layer flows over non-analytic blunt bodies. NASA CR-2550, 1975
- 5 卞荫贵, 钟家康. 高温边界层传热. 北京: 科学出版社, 1986