

泰氟龙烧蚀对黏性激波层电子密度的影响¹⁾

唐锦荣 彭世镠

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 采用黏性激波层基本方程组对有无泰氟龙烧蚀两种情况下的钝锥体化学非平衡绕流作了数值求解, 以研究泰氟龙烧蚀对流场电子密度的影响规律. 算例结果表明: 泰氟龙烧蚀确有降低流场电子密度的效应. 平衡催化壁工况下这种效应的强度, 显著大于非催化壁工况下的强度; 远下游截面处的这种效应的强度, 显著大于驻点区的强度. 此外, 通过计算结果分析, 对形成上述影响规律的原因作了初步讨论.

关键词 泰氟龙烧蚀, 黏性激波层, 电子密度, 非催化壁, 平衡催化壁

引 言

泰氟龙(聚四氟乙烯)的烧蚀产物具有亲电子特性, 能与高温气体中的自由电子结合生成负离子组元, 因而可用来降低再入飞行器绕流场及其尾迹中的自由电子数密度(简称电子密度), 以降低雷达反射截面, 对提高飞行器再入性能有重要意义. Bhutta 等人^[1]采用 PNS 方法研究了给定壁温情况下泰氟龙烧蚀的化学非平衡绕流. 该文成功地处理了非平衡化学反应引起的刚性问题, 但采用的泰氟龙烧蚀率计算方法不够合理(我们将在另文中对此加以评述); 魏叔如等人^[2]对有泰氟龙烧蚀的化学非平衡边界层问题作了数值研究, 提供了适用于 70 km 以下再入高度范围的实用计算方法. 本文采用黏性激波层基本方程组数值分析有泰氟龙烧蚀的钝锥体绕流问题, 以研究泰氟龙烧蚀对较高空再入段电子密度等流场参数的影响规律, 并提供边界层方法不适用的高空连续介质区域的实用计算方法.

1 基本方程和边界条件

1.1 基本方程

设 x 和 y 分别为沿物面和垂直物面的坐标, 则二维和轴对称无量纲化黏性激波层方程组可写成下列统一形式^[3]

连续方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(r^j \rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(r^j (1 + \kappa y) \rho v) = 0 \quad (1)$$

x 向动量方程

$$\frac{1}{1 + \kappa y} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\kappa}{1 + \kappa y} \rho uv + \frac{1}{1 + \kappa y} \frac{\partial p}{\partial x} = \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\kappa u}{1 + \kappa y} \right) \right] + \varepsilon^2 \mu \left(\frac{2\kappa}{1 + \kappa y} + \frac{j \cos \theta}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\kappa u}{1 + \kappa y} \right) \quad (2)$$

2001-08-20 收到第一稿, 2002-01-07 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金(19885209)资助项目.

y 向动量方程

$$\frac{1}{1+\kappa y} \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\kappa}{1+\kappa y} \rho u^2 + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1+\kappa y} \rho u C_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{1}{1+\kappa y} u \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial y} = \\ & \varepsilon^2 \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(\frac{\kappa}{1+\kappa y} + \frac{j \cos \theta}{r} \right) k \frac{\partial T}{\partial y} - \sum_{i=1}^{NS} J_i C_{pi} \frac{\partial T}{\partial y} + \right. \\ & \left. \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\kappa u}{1+\kappa y} \right)^2 \right] - \sum_{i=1}^{NS} \dot{w}_i \dot{w}_i \end{aligned} \quad (4)$$

组元连续方程

$$\frac{1}{1+\kappa y} \rho u \frac{\partial C_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_i}{\partial y} = \dot{w}_i - \varepsilon^2 \left[\frac{\partial J_i}{\partial y} + \left(\frac{\kappa}{1+\kappa y} + \frac{j \cos \theta}{r} \right) J_i \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots, NS \quad (5)$$

状态方程

$$P = \left(\frac{R^*}{M^* C_{p\infty}^*} \right) \rho T \quad (6)$$

其中

$$r = r_w + y \cos \theta \quad (7)$$

$$j = \begin{cases} 1, & \text{轴对称问题} \\ 0, & \text{二维问题} \end{cases} \quad (8)$$

$$\varepsilon = [\mu_{ref}^* / (\rho_{\infty}^* u_{\infty} R_n^*)]^{1/2} \quad (9)$$

上标“*”表示有量纲, R_n 为物体端头曲率半径. 其它符号为黏性激波层方法中常用符号, 其说明和有关辅助公式见文献 [3].

1.2 壁面边界条件 (无滑移)

$$u = 0 \quad (10)$$

$$v = \begin{cases} 0, & \text{无烧蚀情况} \\ \dot{m} / \rho_w, & \text{有烧蚀情况} \end{cases} \quad (11)$$

$$T = \begin{cases} T_w, & \text{无烧蚀或定壁温烧蚀情况} \\ T_w(\dot{m}, q_w), & \text{准定常烧蚀情况} \end{cases} \quad (12)$$

无烧蚀情况壁面平衡催化条件

$$C_i = C_{ieq}(T_w, P_w) \quad (13a)$$

有烧蚀情况壁面平衡催化条件

$$C_i = C_{ieq}(T_w, P_w, \text{壁面元素浓度}) \quad (13b)$$

无烧蚀情况壁面非催化条件

$$\frac{\partial C_i}{\partial y} = 0 \quad (14a)$$

有烧蚀情况壁面非催化条件

$$J_{iw} = \dot{m}(\lambda_i - C_{iw}) \quad (14b)$$

其中, \dot{m} 为烧蚀质量速率, λ_i 为烧蚀材料中含 i 组元的质量分数, 下标 eq 和 w 分别表示“平衡”和“壁面”。

1.3 无滑移激波关系式

黏性激波层方法通常采用激波装配法计算外缘处激波, 外缘边界条件的激波关系式为^[4]

$$\rho_s \tilde{u}_s = -\sin \alpha \quad (15)$$

$$\tilde{u}_s = \cos \alpha / (1 - \varepsilon^2 \mu_s \kappa' / \sin \alpha) \quad (16)$$

$$p_s = p_\infty + \sin^2 \alpha + \tilde{u}_s \sin \alpha \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{NS} C_{i\infty} (h_{is} - h_{i\infty}) = \frac{1}{2} [(\tilde{u}_s - \cos \alpha)^2 + \sin^2 \alpha - \tilde{v}_s^2] \quad (18)$$

$$C_{is} = C_{i\infty} \quad (19)$$

$$\tilde{u}_s = u_s \cos(\alpha - \theta) + v_s \sin(\alpha - \theta) \quad (20)$$

$$\tilde{v}_s = -u_s \sin(\alpha - \theta) + v_s \cos(\alpha - \theta) \quad (21)$$

式中, κ' 为激波曲率, 顶标“ \sim ”表示“激波面坐标系”。

1.4 泰氟龙烧蚀计算方法

将近似分析所得的泰氟龙烧蚀过程中材料内部的近似温度分布, 代入泰氟龙热解化学动力学速率公式而导出的泰氟龙烧蚀速率近似公式为^[5]

$$\dot{m} = \frac{\rho_p^* v_p^*}{\rho_\infty^* u_\infty^*} \quad (22)$$

$$v_p^* = \sqrt{\frac{\alpha_p^* B^* e^{-E^*/R^* T_w^*}}{(E^*/R^* T_w^*)(1 - T_0^*/T_w^*)}} \quad (23)$$

其中, $\rho_p^* = 1.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, T_0^* 为泰氟龙材料初始温度或未受热区温度, 本文取为 300 K, 其他参数值见文献 [5]。

当采用给定壁温 T_w 的计算方法时, 利用公式 (22) 和 (23) 即可确定泰氟龙烧蚀速率 \dot{m} 。

当采用准定常烧蚀算法时, 需增加壁面准定常烧蚀能量守恒关系式, 以便和式 (22) 及 (23) 一起耦合求解 \dot{m} 和 T_w 。略去固壁和气体辐射热流, 壁面泰氟龙准定常烧蚀能量守恒关系式为

$$-q_{tw} - \sum_{i=1}^{NS} (J_i h_i)_{wg} - \dot{m} h_{wg} + \dot{m} h_p(s, T_0) = 0 \quad (24)$$

其中, q_{tw} 为热传导热流, h_{wg} 和 $h_p(s, T_0)$ 分别为壁面处混合气体静焓和固态泰氟龙在初始温度 T_0 时的“静焓”。

采用文献 [6] 中有关公式导出的固态泰氟龙以 $T = 0\text{K}$ 为基准的静焓计算公式为

$$h_p^*(s, T_0) = -8.357E6 + 4.1868E3 \times (15.44T_0^* + 0.0125T_0^{*2})/M_{C_2F_4} \quad (25)$$

式中, $h_p^*(s, T_0)$ 的单位为 J/kg , T_0^* 的单位为 K , $M_{C_2F_4}$ 为单分子 C_2F_4 的分子量.

2 数值解法

无烧蚀情况黏性激波层数值解法与文献 [3] 的类似, 为克服细长体远下游推进求解的困难, 本文方法中连续方程和法向动量方程是耦合求解的. 对压力梯度的差分处理和激波形状光滑也作了改进. 本节主要说明有烧蚀时数值解法的某些变化.

有烧蚀时的壁面平衡催化情况, 必须求解元素连续方程. 由于通常采用二组元扩散近似, 无烧蚀情况下流场中元素浓度不变, 任一点处某一元素的浓度值等于来流相应元素的浓度值, 为已知量. 有烧蚀时流场中的元素浓度是随 O_2 , N_2 , O , N , NO , NO^+ 和 e^- 空间变化的, 为未知量. 为确定壁面化学平衡状态下的组元浓度, 以提供壁面平衡催化边界条件, 在有烧蚀情况下需要解元素连续方程 (可由组元连续方程导出) 求出壁面处的元素浓度. 在采用二组元扩散近似情况下, 可利用原空气的元素浓度间比例不变, 原烧蚀材料的元素浓度间比例不变, 以及所有元素浓度和等于 1 (本文中“浓度”指的是质量分数) 等代数关系式来减少需要求解的元素连续方程数目. 对于泰氟龙烧蚀情况, 本文只求解了 F 元素的连续方程, 其他元素浓度由上述代数关系式确定. 设 NEL 为元素数, 则求出元素浓度后, 只需求解 (NS-NEL) 个组元连续方程和 NEL 个元素守恒代数关系式即可确定 NS 个组元浓度.

本文计算中采用了的 7 组元纯空气模型, 有泰氟龙烧蚀情况增加了 C_2F_4 , F_2CO , CF_4 , CF_2 , CO_2 , CO , F_2 , F , F^- , C , C_2 和 C_3 等 12 个组元, 共 19 个组元. 由于有烧蚀时组元数目多, 本文采用了通用性好和适合复杂化学反应系统的最小自由能法 [7] 来求解壁面化学平衡状态的组元浓度, 以提供壁面平衡催化边界条件.

3 算例和结果讨论

在计算烧蚀算例前本文作了考核程序计算. Bhutta 等人在文献 [1] 中采用 PNS 方法计算了无烧蚀情况球锥体壁面热流, 其接近化学平衡流动情况的低空计算结果与飞行试验结果符合较好. 本文程序不适合计算接近化学平衡流动情况, 只对该文献的高空情况算例作了计算, 图 1 中给出了结果比较 (Z 为球锥体对称轴). 尽管计算方法和输运系数计算公式不同, 本文结果与该文献结果基本一致.

为研究泰氟龙烧蚀对流场电子密度的影响, 本文对 70 km 再入高度, 来流马赫数为 20, 球锥体头部半径为 0.1 m, 半锥角为 9° 的有无泰氟龙烧蚀两种情况作了计算. 计算中考虑了非催化壁和平衡催化壁两种工况. 为计算简便, 本文采用给定壁温 T_w 的计算方法, 对于算例中的所有工况, T_w 均给定为 800 K.

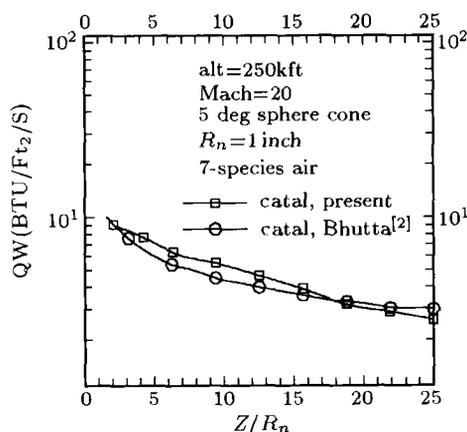


图 1 球锥体锥面热流比较

Fig.1 Wall heat-flux on the sphere-cone

图 2 和图 3 中分别给出了驻点区和远下游 $X/R_n = 25$ 处的电子密度剖面¹⁾。计算结果表明：在驻点区，泰氟龙烧蚀对非催化壁情况的电子密度影响不大，有无烧蚀两种情况的电子密度值，只有倍数的差别，在采用对数纵坐标的图 2 中两条曲线基本重叠在一起；对于平衡催化壁情况，在靠近壁面约 1/3 激波层厚度内有泰氟龙烧蚀时的电子密度已有明显降低。在远下游 $X/R_n = 25$ 处，非催化壁情况下，几乎在整个激波层范围内，有泰氟龙烧蚀时的电子密度值都明显低于无烧蚀时的相应值；催化壁情况下，无烧蚀时激波层横剖面的大部分区域电子密度仍保持在 $10^{10}(\text{cm}^{-3})$ 以上，而有泰氟龙烧蚀时的电子密度已被剧烈降低达 4 个数量级以上，在剖面中心狭小区域的峰值也只有 $10^6(\text{cm}^{-3})$ 。

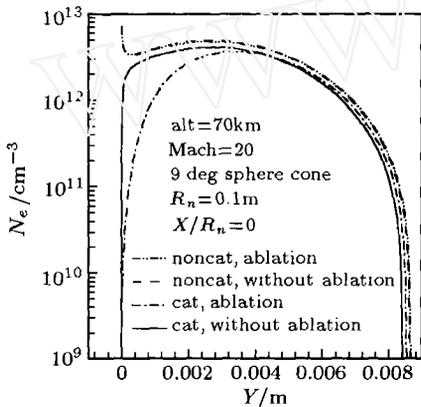


图 2 驻点电子密度剖面

Fig.2 Electron number density at $X/R_n = 0$

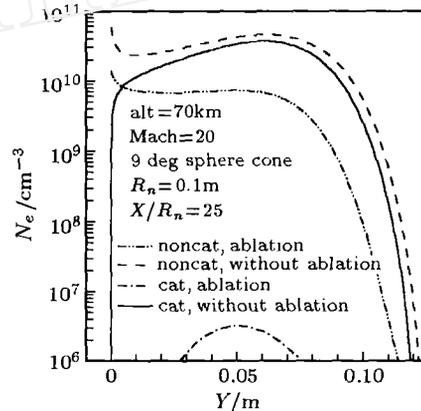


图 3 $X/R_n = 25$ 处电子密度剖面

Fig.3 Electron number density at $X/R_n = 25$

在本文的化学模型中，与电子密度增减有直接关系的化学反应为电离反应 $N + O \rightleftharpoons NO^+ + e^-$ ，亲电子反应 $F_2 + e^- \rightleftharpoons F + F^-$ 和 $F + e^- + M_9 \rightleftharpoons F^- + M_9$ ，其中 M_9 为第 3 体组元。混合气体中带电组元共 3 个，其摩尔浓度 \tilde{X}_i 满足电中性条件 $\tilde{X}_{NO^+} = \tilde{X}_{e^-} + \tilde{X}_{F^-}$ (无烧蚀情况 $\tilde{X}_{F^-} \equiv 0$)。算例的有关结果表明，泰氟龙烧蚀产物能降低流场电子密度的主要原因，第一是，其中的 F_2 和 F 组元能与电子组元 e^- 发生上述亲电子反应生成负离子组元 F^- ，从而降低 \tilde{X}_{e^-} 使得 $\tilde{X}_{e^-} < \tilde{X}_{NO^+}$ ；第二是，与无烧蚀情况相比，有烧蚀时与 NO^+ 组元连续方程中电离反应速率项、扩散项和对流项有关的流场参数或其梯度的大小大都发生了变化，其综合影响使得 \tilde{X}_{NO^+} 变小了，因而，由电中性条件可知 \tilde{X}_{e^-} 值也降低了。

在非催化壁情况下，烧蚀产物都是以 C_2F_4 组元的形式脱离壁面进入气相流场的， F_2 和 F 及其它与烧蚀产物有关的组元都是由流场内部区域的气相反应生成的，在算例的 70 km 再入高度条件下，流场中气体的密度较低，因而流场内部的气相反应的速率较小，反应生成物中的 F_2 和 F 组元的浓度也就较小，即使在 $X/R_n = 25$ 的下游剖面上， F_2 和 F 组元的质量分数 C_{F_2} 和 C_F 的最大值分别只为 0.9×10^{-10} 和 0.007，由此两组元参与亲电子反应生成的 \tilde{X}_{F^-} 很小，从而使得 \tilde{X}_{NO^+} 和 \tilde{X}_{e^-} 的数值很接近，而 \tilde{X}_{F^-} 的数值要小约 4 个数量级，即由上述第一原因引起的降低电子密度作用很微弱。在 $X/R_n = 25$ 剖面上，与相应的无烧蚀情况相比，有烧蚀时与 NO^+ 组元连续方程有关的流场参数或其梯度变化的综合影响，使得 \tilde{X}_{NO^+} 变小约 1 个数量

1) 图中非催化壁工况下，无泰氟龙烧蚀的结果用 noncat, without ablation 表示，有泰氟龙烧蚀的结果用 noncat, ablation 表示。cat, ablation 表示催化壁工况下有泰氟龙烧蚀的结果。cat, without ablation 表示催化壁工况下无泰氟龙烧蚀的结果。

级。因此，图 3 中 $X/R_n = 25$ 剖面上有无烧蚀两种情况电子密度相差 1 个数量级左右的结果，主要是上述第二个原因引起的。

在平衡催化壁情况下，与无烧蚀情况相比，有烧蚀时 $X/R_n = 25$ 剖面上与 NO^+ 组元连续方程有关的流场参数或其梯度变化的综合影响，使得 \bar{X}_{NO^+} 也变小近 1 个数量级。平衡催化壁情况下壁面组元浓度为对应的壁面温度、压力和元素浓度条件下的化学平衡组元浓度，在 $X/R_n = 25$ 剖面上， C_{F_2} 和 C_{F} 的最大值分别为 0.33 和 0.15，显著大于非催化壁有烧蚀情况的相应浓度值，由此两组元参与的亲电子反应生成的 F^- 组元的 \bar{X}_{F^-} 值与 \bar{X}_{NO^+} 值很接近，使 \bar{X}_{e^-} 小约 3 个数量级或更多。因此，图 3 中 $X/R_n = 25$ 剖面上，平衡催化壁条件下有无烧蚀两种情况的电子密度相差约 4 个数量级以上，是上述两种主要原因共同起作用的结果。

定性地说，泰氟龙烧蚀的降低电子密度效应在下游区比在驻点区显著是合理的。因为对于任一下游截面来说，在它上游的所有壁面上的烧蚀产物都要流经该下游截面，因而如图 4，图 5 所示，在 $X/R_n = 25$ 时的下游截面处，泰氟龙烧蚀产物（元素 C 和 F）在激波层中的浓度值显著高于在驻点区截面中的相应值。同时，下游剖面上烧蚀产物沿壁面的平均流动时间比上游的长，因而下游剖面上 F 和 F_2 组元的吸附电子反应比上游的进行得更充分。

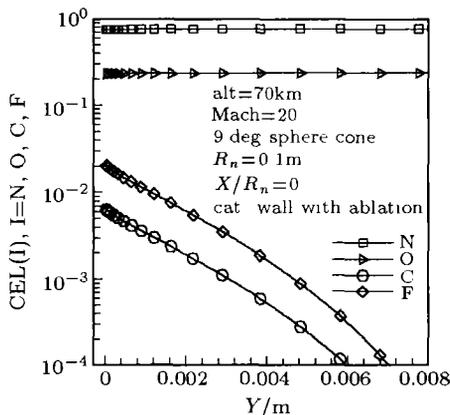


图 4 驻点区元素浓度剖面

Fig.4 Element mass fraction at $X/R_n = 0$

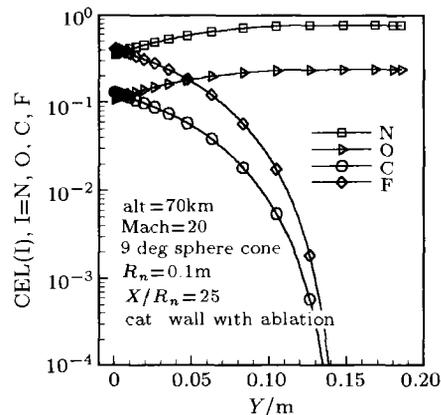


图 5 $X/R_n = 25$ 处元素浓度剖面

Fig.5 Element mass fraction at $X/R_n = 25$

4 结 论

算例结果表明，泰氟龙烧蚀确有降低流场电子密度的效应。在球锥体绕流场的驻点区，对于非催化壁工况上述降低电子密度效应较弱，而催化壁工况下此效应已较显著。在远下游区截面上，泰氟龙烧蚀能剧烈降低电子密度，催化壁工况下尤为显著。因此，在实际的工程应用问题中评估泰氟龙烧蚀降低流场电子密度效应时，必须考察不同催化壁条件下的全流场情况，不能只根据非催化壁条件下在驻点区流场中泰氟龙烧蚀降低电子密度的效应较弱，就下结论否定泰氟龙烧蚀的降低电子密度作用。

在缺少泰氟龙材料壁面催化性质的实验数据情况下，本文采用非催化壁和平衡催化壁两个极限条件的数值分析结果表明，该材料的壁面催化性质对其烧蚀产物降低流场电子密度的效果影响很大，因此十分必要开展该材料的壁面催化性质实验研究。

本文的计算程序，为边界层方法不适用的高空连续介质区域的有泰氟龙烧蚀绕流问题，提供了有效的实用计算方法。

参 考 文 献

- 1 Bhutta BA, Lewis CH. A new technique for low-to-high altitude predictions of ablative hypersonic flow fields. AIAA Paper 91-1392, June 1991
- 2 魏叔如, 吴荣生. 流过氟龙烧蚀表面的化学非平衡边界层数值研究. 力学学报, 1996, 28(2): 143~150 (Wei Shuru, Wu Rongsheng. Numerical study of chemical nonequilibrium boundary layer flow around a ablated Teflon surface. *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, 1996, 28(2): 143~150 (in Chinese))
- 3 Miner EW, Lewis CH. Hypersonic ionizing air viscous shock layer flows over nonanalytic blunt bodies. NASA CR-2550, 1975
- 4 Tang Jinrong. Shock slip-relations for thermal and chemical nonequilibrium flows. *Acta Mechanica Sinica (English series)*, 1996, 12(2): 117~123
- 5 卞荫贵, 钟家康. 高温边界层传热. 北京: 科学出版社, 1986 (Bian Yingui, Zhong Jiakang. Heat Transfer of High Temperature Boundary Layer. Beijing: Science Press, 1986 (in Chinese))
- 6 Kemp NH. Surface recession rate of an ablating polymer. *AIAA J*, 1968, 6(9): 1790~1791
- 7 White WB. Numerical determination of chemical equilibrium and the partitioning of free energy. *J Chem Phys*, 1967, 43(11)

THE EFFECT OF TEFLON ABLATION ON THE ELECTRON DENSITY IN VISCOUS SHOCK LAYER¹⁾

Tang Jinrong Peng Shiliu

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract In this paper, the viscous shock layer governing equations for non-equilibrium gas flows over sphere-cone with and without Teflon ablation are solved numerically to investigate the effect of Teflon ablation on electron density in the flow fields. The case considered here is a 10 deg half-angle sphere-cone with nose radius of 0.1 m at altitude of 70 km and Mach number of 20. The wall temperature is kept fixed at 800 K. The chemical system used consists of 7 species (O_2 , N_2 , O , N , NO , NO^+ and e^-) for clean-air and of 19 species (C_2F_4 , F_2CO , CF_4 , CF_2 , CO_2 , CO , F_2 , F , F^- , C , C_2 , C_3 and the 7 clean-air species) for Teflon-air gas mixture. In order to investigate an effect of wall catalysis, the two extreme cases, namely the case of non-catalytic wall and the case of equilibrium-catalytic wall, are considered. The results of the solutions show that the Teflon ablation has the effect of reduction of electron density indeed. Furthermore, the intensity of this effect in the case of equilibrium catalytic wall is significantly greater than that in the case of non-catalytic wall, and the intensity of this effect in a far downstream section is significantly greater than that in the stagnation region. An analysis of the concerned results of the solutions shows that there are two main factors for reduction of electron density of the flow fields by Teflon ablation. The first is the reactions of attachment of electron to species F_2 or F forming the negative ion F^- ; the second is that in comparison with those in the case without ablation the flow parameters or their gradients which are concerned with the species conservation equation of species NO^+ are changed numerically resulting in reduction of NO^+ density, and consequently in reduction of electron density due to the electrical neutrality condition. Furthermore, only the second factor is important in the case of non-catalytic wall, whereas in the case of catalytic wall both the factors are significant.

Key words Teflon ablation, viscous shock layer, electron density, non-catalytic wall, equilibrium catalytic wall

Received 20 August 2001, revised 7 January 2002.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19885209).