第26卷第4期	力 学 学 报	Vol. 26, No.4	ł
1994 年 7 月	ACTA MECHANICA SINICA	July, 1994	ł

# 化学非平衡边界层壁面边界条件研究

魏叔如 (中国科学院力学研究所,北京 100080)

V211.22

竹 搞要 通过理论分析导出了化学非平衡边界层,化学反应壁面边界条件的一般性提法,并对其具体应用进行了研究.在壁面完全催化时,可利用传递系数法使烧蚀壁面条件 计算与边界层计算解耦,给出了一般计算方法。

高超声速化学非平衡边界层的知识,不仅在再入航天器的热防护和通讯中衡研 究中异常重要,而且可为战略弹头的突防和反突防设计中的弹头尾迹目标特性研 究,提供必要的上游条件。

边界层问题是两点边值问题,边界条件提法的正确与否对边界层方程的解有很 大影响,对于人们感兴趣的高超声速小钝锥外形绕流,用非平衡流管法可以简单有 效地确定有熵吞效应的化学非平衡边界层的外缘条件,本文的目的是研究有化学反 应的壁面边界条件,先导出一般情况下的壁面边界条件,而后对其具体应用进行研 究,

#### 一、化学反应壁面边界条件的一般提法

对于有质量添加和壁面化学反应的边界层,其连续、动量和能量守恒方程的壁 面边界条件可以直接写出为

$$y = 0, \ u = 0, \ v = v_w$$

$$T = T_w \ \bar{\Re} \ H_T = h_w = \sum_i K_{iw} (\int_{T_0}^{T_w} C_{pi} dT + h_i^0)$$
(1)

在此边界条件中出现壁面气体组元质量分数 K<sub>iw</sub>,它们由组元连续方程控制,而求 解组元连续方程所需的壁面边界条件不能直接写出,需要作一些研究.

图 1 是气固 (液) 交界面组元质量流平衡示意图. i 组元气体以 ( $-j_{iw}$ ) 的通量向 壁面扩散,同时,以 ( $\dot{m}_w K_{iw}$ ) 从壁面向气体层和以 ( $\dot{m}_g K_{ig}$ ) 的通量从深部向壁面对 流,因此,由壁面化学反应产生的 i 组元的净质量流  $J_{iw}$  为

$$J_{iw} = j_{iw} + \dot{m}_w (K_{iw} - \gamma K_{ig}) \tag{2}$$

1) 国家自然科学基金资助项目。

607-415

本文于 1993 年 3 月 26 日收到第一稿, 1993 年 10 月 8 日收到修改稿,

力	学	学	报	(1994 年)	第 26 巻
 			. <u> </u>		





式中, γ≡m<sub>g</sub>/m<sub>w</sub>, K<sub>ig</sub> 为引射 (热解) 气 体中 i 组元的质量分数. (2) 式对所有组 元求和得

$$\sum_{i} J_{iw} = \dot{m}_w (1 - \gamma) \equiv \dot{m}_c \tag{3}$$

是壁面反应中壁面材料的质量损失率,若 (2) 式全式乘以 α<sub>ki</sub>(i 组元中 k 元素的质量 分数) 并对所有组元求和,得到 k 元素的 质量平衡为

$$\dot{m}_{\mathrm{c}}\tilde{K}_{k\mathrm{c}}= ilde{j}_{kw}+\dot{m}_{w}( ilde{K}_{kw}-\gamma ilde{K}_{kg})$$
 (4)

式中:  $\tilde{j}_{kw} = \sum_{i} j_{iw} \alpha_{ki}, \tilde{K}_{kw} = \sum_{i} K_{iw} \alpha_{ki}, \tilde{K}_{kg} = \sum_{i} K_{ig} \alpha_{ki}, \quad \overline{m} \sum_{i} \alpha_{ki} J_{iw} = \tilde{m}_{c} \tilde{K}_{kc}, \tilde{K}_{kc}$ 为壁面材料中 k 元素的质量分数,因为在壁面反应中,除壁面材料所含元素外,其 余元素的生成率均等于零.

方程 (2) 亦可由组元连续方程在 -0 与 +0 之间进行积分来得到,其中, $J_{iw} = \int_{-0}^{+0} \dot{w}_i dy$ .为了得到  $J_{iw}$  的具体形式,考虑如下壁面反应

$$\sum_{i} \alpha_{ri} X_{i} + W \stackrel{k_{fr}}{\rightleftharpoons}_{k_{br}} \sum_{i} \beta_{ri} X_{i} + W$$
(5)

这里指的壁面反应包括气固复相反应,升华(或蒸发)反应,及受壁面催化的气相反 应(如空气组元的离解复合反应,烧蚀产物间及它们与空气组元间的反应). α<sub>ri</sub>,β<sub>ri</sub> 和 k<sub>fr</sub>,k<sub>br</sub> 分别是第 r 个壁面反应的化学计量系数和以单位表面积表示的反应速率 常数; W 表示壁面材料,它可以是单纯的催化体,也可在升华或与气体发生复相反 应的同时兼作气相反应的催化体,根据唯象理论<sup>[1,2]</sup>,在单位壁面面积上,i组元 的反应生成率写成

$$J_{iw} = \sum_{\tau} \left[ -k_{f\tau} \Pi_i (\rho K_i)_{w}^{\alpha_{\tau_i}} + k_{b\tau} \Pi_i (\rho K_i)_{w}^{\beta_{\tau_i}} \right]$$
(6)

若定义反应平衡常数  $K_{cr} = k_{fr}/k_{br}$  和反应级数  $n_{fr} = \sum_{i} \alpha_{ri}$  和  $n_{br} = \sum_{i} \beta_{ri}$ ,则方程 (6) 可写成

$$J_{vw} = -\sum_{\tau} k_{f\tau} [(\rho K_i)_{w}^{n_{f\tau}} - \frac{1}{K_{c\tau}} (\rho K_i)_{w}^{n_{b\tau}}]$$
(7)

根据定义、平衡常数 Ker 还可表示为

$$K_{cr} = \Pi_i (\rho K_i)_{w,E}^{\beta_{r_i}} / \Pi_i (\rho K_i)_{w,E}^{\alpha_{r_i}}$$

$$\tag{8}$$

下标 "E" 表示平衡值. 考虑到气固复相反应和升华产生的质量流常写成与方程(7) 右边稍为不同的形式 (见后),若将其从中分列出来并用 J<sub>m</sub> 表示,则

$$J_{gi} \equiv -\sum_{r} k_{fr} [(\rho K_{i})_{w}^{n_{fr}} - \frac{1}{K_{cr}} (\rho K_{i})_{w}^{n_{br}}]$$
(9)

将只包括气相反应产生的质量流,而(7)式变成

$$J_{iw} = J_{hi} + J_{gi} \tag{10}$$

将(10)式代入(2)式,即得到组元连续方程壁面边界条件的一般形式

$$j_{iw} + \dot{m}_w (K_{iw} - \gamma K_{ig}) = J_{hi} + J_{gi}$$

$$\tag{11}$$

若所有组元扩散系数假设相等,则扩散质量流  $j_{iw}$ 由 Fick 定律有  $j_{iw} = -(\rho D_{12} \frac{\partial K_i}{\partial y})_w$ ,将其代入 (11) 式后得到壁面辺界条件的另一个一般形式为

$$-(\rho D_{12}\frac{\partial K_i}{\partial y})_w + \dot{m}_w (K_{iw} - \gamma K_{ig}) = J_{hi} + J_{gi}$$
(12)

#### 二、化学反应壁面边界条件的具体应用

壁面边界条件 (1) 和 (11) 或 (12) 适用于有各种不同类型壁面反应和质量添加形式的化学非平衡黏性绕流、由于条件 (1) 的形式不随这些类型变化,因此,将集中讨论条件 (11) 或 (12),而为了简单 (并不失一般性),只讨论 (12) 的具体应用.

#### 1. 纯空气化学非平衡边界层

对于纯空气边界层,  $m_w = J_{hi} = 0$ ,又由于在一般再入飞行器壁温条件下,壁 面平衡空气分子浓度远大于原子浓度,若反应 (5)正向定为复合反应,则对于空气 原子或离子组元, (9)式方括号中第二项由于  $K_{cr}$  极大 (由 (8)可见),而可以略去 不计、这样,由 (9)和 (12)式有

$$(\rho D_{12} \frac{\partial K_i}{\partial y})_w = \sum_r k_{fr} (\rho K_i)_w^{n_{fr}}$$
(13)

这是纯空气化学非平衡边界层组元连续方程壁面边界条件的一般形式. 在 Goulard<sup>[3]</sup> 的简单化的 "空气原子" 和 "空气分子" 的二组元模型中, 方程 (13) 还原为 Goulard 的方程 (5), 即

$$(\rho D_A \frac{\partial K_A}{\partial y})_w = k_f (\rho K_A)_w^{n_f} \tag{14}$$

两个极端情况,对于非催化壁,由 kfr→0,方程 (13) 变成

$$\left(\frac{\partial K_i}{\partial y}\right)_w = 0 \tag{15}$$

对于完全催化壁 (即平衡催化壁) ,  $k_{fr} \rightarrow \infty$  ,由于方程 (12) 左边扩散质量流为有限 值,因此,  $J_{gi}$ (方程 (9)) 方括号中的值必须为零,由此得到方程 (8) 形式的化学平衡 关系,这些关系加上元素守恒条件可以确定给定壁温下的组元平衡成分,由此得到 所需的边界条件.

#### 2. 发汗冷却的化学非平衡边界层

在发汗冷却边界层中,不发生气体与多孔固壁间的复相反应,因此, $J_{hi} = 0$ , 又因  $\dot{m}_w = \dot{m}_a$ ,这样、方程 (12) 变成

$$-(\rho D_{12}\frac{\partial K_i}{\partial y})_w + \dot{m}_w (K_{iw} - K_{ig}) = J_{gi}$$
<sup>(16)</sup>

现存的主要困难是没有有效的多孔介质壁面对气相反应催化特性  $k_{fr}$  的数据.两个极端情况,对于非催化壁,由  $k_{fr} \rightarrow 0$ ,  $J_{gi} = 0$ , 方程 (16) 为

$$(\rho D_{12} \frac{\partial K_i}{\partial y})_w = \dot{m}_w (K_{iw} - K_{ig}) \tag{17}$$

对于平衡催化壁情况,与纯空气边界层时的讨论一样,由化学平衡关系和元素守恒 可以确定壁面气体的平衡成分,用作所需的边界条件,

#### 3. 化学非平衡烧蚀边界层

根据烧蚀壁面后退控制因素的不同,烧蚀材料被类分成由塑料热解动力学控制 的泰弗隆类材料,由气动力机械迁移表面熔化层起控制作用的硅基类材料及由壁面 升华和气固复相反应起控制作用的碳基类材料.

对于泰弗隆类材料,塑料热分解后不留残渣,因而, $\gamma = 1.0.$ 又由泰弗隆烧蚀 机理分析知道<sup>[4]</sup>,烧蚀壁面无复相反应且热解气体主要成分是 C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>,因而,其边 界条件只需在 (12) 式中,令  $J_{hi} = 0$ ,及对于 C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> 组元,令  $K_{ig} = 1.0$ ,其它组元, 令  $K_{ig} = 0$  即得.例如, i 代表 C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> 时有

$$-(\rho D_{12}\frac{\partial K_i}{\partial y})_w + \dot{m}_w(K_{iw} - 1.0) = J_{gi}$$
<sup>(18)</sup>

参照前面的讨论,可以得到两个极端情况下的壁面边界条件,

对于烧蚀壁面后退由熔化层的机械流失和表面蒸发控制的硅基材料,其总质量引 射率 m<sub>w</sub> 还包括由深部热解和碳硅反应产生的气体质量流,表面的蒸发率由 Langmuir 关系有<sup>[5,6]</sup>

$$J_{hi} = \beta_i \sqrt{\frac{M_i}{2\pi R T_w}} (P_{i,E} - P_i)_w \tag{19}$$

其中, β, 为蒸发系数, P<sub>i,E</sub> 和 P<sub>i</sub> 分别为 i 组元的平衡蒸气压和分压.将其代入 (12) 即得到所需的边界条件.在玻璃表面蒸发可以略去时, J<sub>hi</sub> = 0, 其壁面边界条件 的形式与发汗冷却时相同.玻璃类材料表面常被看作非催化壁的典型.至少对离解 空气组元的复合反应是如此.

对于烧蚀壁面后退由壁面气固复相反应和升华控制的碳基材料,若壁面复相反 应只考虑氧化而不考虑氮化 (但考虑碳蒸气与氮的气相反应) 和忽略 C<sub>6</sub> 及 C<sub>6</sub> 以上 的碳蒸气组元. 且复相氧化引起的碳净质量损失率表示为 [6,7]

$$\begin{array}{c} \dot{m}_{c}^{(\widehat{U})} = K_{w1}(P_{0}^{n_{1}} - P_{0,E}^{n_{1}})_{w_{1}} & (C^{*} + O \rightarrow CO) \\ \dot{m}_{c}^{(\widehat{U})} = K_{w2}(P_{O_{2}}^{n_{2}} - P_{O_{2},E}^{n_{2}})_{w_{1}} & (2C^{*} + O_{2} \rightarrow 2CO) \end{array} \right\}$$
(20)

其中, K<sub>w1</sub>, K<sub>w2</sub> 是反应速率常数, n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub> 是反应级数, P, 是 i 组元分压, 下标 "E" 表示平衡值, 碳升华质量损失率为

$$\dot{m}_{ci} = \beta_{c_i} \sqrt{\frac{M_{ci}}{2\pi R T_w}} (P_{ci,E} - P_{ci})_w$$
(21)

则碳的总质量损失率为

$$\dot{m}_{c} = \dot{m}_{c}^{(\bar{1})} + \dot{m}_{c}^{(\bar{2})} + \sum_{i=1}^{5} \dot{m}_{ci}$$
(22)

壁面总质量引射率 mw 为

2

$$\dot{m}_w = \dot{m}_c + \dot{m}_g \tag{23}$$

1

在壁面边界条件中,对于碳蒸气组元,  $J_{hi} = -\dot{m}_{ci}$ ;对于参与复相反应的 CO 组 元,  $J_{hi} = (\dot{m}_c^{(1)} + \dot{m}_c^{(2)}) \frac{M_{c0}}{M_c}$ ,氧原子组元,  $J_{hi} = -\dot{m}_c^{(1)} \frac{M_0}{M_c}$ ,氧分子组元,  $J_{hi} = -\dot{m}_c^{(2)} \frac{M_0}{M_c}$ ,

现存的主要问题仍然是不了解烧蚀壁面对气相反应的催化特性,但一些研究者 认为<sup>[8-10]</sup> 碳表面对气相反应趋向于完全催化,当然,根据前面的讨论,要得到两个 极端情况下的壁面边界条件是很容易的,

#### 三、特殊情况下烧蚀壁面边界条件的确定

一般情况下, 在三 -3 节给出的烧蚀壁面边界条件关系必须与烧蚀体内的热和 化学过程及气体边界层耦合求解才能最后确定烧蚀壁面参数. 虽然, 准定常烧蚀假 设可以使问题与烧蚀体内的过程解耦, 但壁面与边界层仍在耦合中. 在化学平衡边 界层计算中, 曾用传递系数法使两者解耦<sup>[11,12]</sup>,现在的问题是, 在化学非平衡边界 层计算中, 这个方法是否还适用? 通过分析研究我们得出, 只要烧蚀壁面对气相反 应是完全催化的, 则这个方法是适用的.

我们知道,先前所用的传递系数关联公式是由化学平衡边界层与烧蚀耦合计算的结果拟合得到的<sup>[11]</sup>公式中,传热( $C_H$ )和传质( $C_M$ )系数被表示为非烧蚀传热系数( $C_{H_0}$ )的关系;我们又知道,纯空气(非烧蚀)化学非平衡(甚至冻结)边界层完全催化壁的传热系数与平衡边界层的传热系数相差极小<sup>[7,13]</sup>、因此,我们可以推论,在有质量添加时,这两种状况下的传热系数也相差极小.既然,两种状况下的 $C_{H_0}$ 和 $C_H$ 分别相差极小.那么 $C_B/C_{H_0}$ 及 $C_H/C_{H_0}$ 的关联公式也应相差极小.换句话说,先前由平衡边界层耦合计算结果推出的传热系数与联公式适用于现在的化学非平衡边界层完全催化壁的情况,又由于传质系数与传热系数颇为接近(在  $Le = Pr \approx 1.0$ 

时,两者相等、即  $C_H = C_M$ ),因此,有理由认为,原先的传质系数关联公式,在现在情况下也适用,此外,在传递系数法中出现的混合气体壁焓  $h_w$ ,在完全(平衡)催化壁条件下,通过计算壁面气体平衡成分亦可得到,至此,在化学非平衡边界层完全催化壁条件下的烧蚀壁面参数计算,就与先前平衡边界层<sup>[11,12]</sup>时的完全相同了.

上述三类烧蚀材料的计算,除控制壁面后退的方程不同外,其它方程包括壁面能量平衡、质量平衡、化学平衡等方程在形式上完全相同<sup>[11,12,14]</sup>,需要指出的是,对于由复相反应和升华控制烧蚀壁面后退的碳基材料,当复相反应和升华达到平衡时,表征非平衡烧蚀的方程 (22) 需用上述反应中的任一个平衡关系 (如用 C\*→C,  $k_{p_e} = X_e$ )代替,就象先前考虑的平衡烧蚀时所做的那样 <sup>[12]</sup>.下面列出各类烧蚀材料的计算方程.

#### 1. 传递系数关联公式

根据传热系数定义,  $[-q_w] = \rho_e u_e C_H (H_r - h_w)$ 和  $[-q_w]_{0e} = \rho_e u_e C_{H_0} H_r$ , 由文献 [11,12] 有

$$\frac{C_H}{C_{H_0}}(1 - h_w/H_r) = \psi(1 - h_w/H_r) + \Delta H_c/H_r$$
(24)

及

$$\psi = 1.0 - 0.6563B'_{0} + 0.01794B'^{2}_{0} + 0.06365B'^{3}_{0} - 0.01125B'^{4}_{0}$$
(25)  
$$\Delta H_{c}[J/g] = \begin{cases} 0 & B'_{0} \le 0.17 \\ -1394.7 + 3668.0(B'_{0} - 0.87)^{2} + 1169.2(B'_{0} - 0.87)^{3} & 0.17 < B'_{0} \le 0.87 \\ -1394.7 + 1871.2(B'_{0} - 0.87)^{2} - 425.4(B'_{0} - 0.87)^{3} & 0.87 < B'_{0} < 1.85 \\ 0 & B'_{0} \ge 1.85 \end{cases}$$

这里,  $B'_0 \equiv \dot{m}_w / \rho_e u_e C_{H_0}$ , 对于石墨、碳 / 碳或泰弗隆材料  $\Delta H_e = 0$ , 且对于泰弗 隆, 若对方程 (25) 稍作修正,可以使其与耦合计算结果符合得更好一些 [14].

传质系数采用元素总质量流的定义,因为,引射(包括热解)气体的元素组成比 组元组成更易确定.由定义, $-\tilde{j}_{kw} = \rho_e u_e C_M (\bar{K}_{ke} - \bar{K}_{kw}) 有 [11,12]$ 

$$C_M/C_{H_0} = B'_0/B' = \varphi_m/(e^{\varphi_m} - 1)$$
 (26)

$$\varphi_{m} \equiv 2\lambda_{m} B_{0}'$$

$$\lambda_{m} = (1.012 + 0.018 B_{0}' + 0.0814 B_{0}'^{2})(1.0 - F_{1})$$

$$F_{1} = (0.238 + 0.038 B_{0}')(\frac{F_{2} - 0.95}{0.6})^{0.71}$$

$$F_{2} = \begin{cases} 0.95 \quad \overline{M}_{w}/\overline{M}_{e} \leq 0.95 \\ \overline{M}_{w}/\overline{M}_{e} \quad 0.95 < \overline{M}_{w}/\overline{M}_{e} < 1.55 \\ 1.55 \quad \overline{M}_{w}/\overline{M}_{e} \geq 1.55 \end{cases}$$

$$(27)$$

其中, B'≡mw/peueCM. 将上述代入元素质量流平衡关系式 (4) 得到

$$\tilde{K}_{kw} = \frac{\tilde{K}_{ke} + B'_c \tilde{K}_{kc} + B'_g \tilde{K}_{kg}}{1 + B'}$$
(28)

其中,  $B'_c = (1 - \gamma)B', B'_g = B' \cdot \gamma.$ 

#### 2. 确定壁面气体组元成分的方程

由于烧蚀壁面对所有气相反应都是完全催化的,因此,用元素守恒和化学平衡 关系可以确定 I 个组元成分 (其中有 K 个 "元素"组元),这些关系是

元素守恒 (K-1)个<sup>[12]</sup>

$$\tilde{K}_{kw} = \frac{M_k}{\overline{M}_w} \Sigma C_{ki} X_{iw}$$
<sup>(29)</sup>

另一个关系由  $\sum_{i} X_{iw} = 1.0$  给定,有电离时,这一关系由电荷平衡提供具有更高的 计算精度 [12].

独立的化学平衡关系 (I – K) 个

$$K_{pi} = X_{iw} / [P_e^{\sum_{k} \Pi_k} X_{K_w}^{C_{ki}}]$$
(30)

其中

$$\overline{M}_{w} = \Sigma X_{iw} M_{i} \tag{31}$$

#### 3. 交界面能量平衡

图 2,从交界面一直延伸至烧蚀体深 部控制体的能量平衡得到

$$[-q_w] - \dot{m}_w h_w - q_r - \dot{m}_l h_l + \dot{m}_s h_{-\infty} = 0 \quad (32)$$

其中,  $\dot{m}_{s}$  是总质量烧蚀率,  $\dot{m}_{l} = \dot{m}_{s} - \dot{m}_{w}$ 是熔化层机械流失率 (表达式见后),  $h_{l}$ 是熔化层的壁焓,  $h_{-\infty}$  是原始材料生成 焓, 若令  $\dot{m}_{w} = \Gamma \dot{m}_{s}$ , 并将 (24) 代入 (32) 得

$$\psi + \Delta H_c / (H_r - h_w)$$
  
-B'\_0(h\_w +  $\frac{1 - \Gamma}{\Gamma} h_l - \frac{1}{\Gamma} h_{-\infty}$ )/(H\_r - h\_w)  
-q\_r / \rho\_e u\_e C\_{H\_0}(H\_r - h\_w) = 0 (33)

y Boundary layer edge [-q\_] q, m\_h\_ c interface n,h\_ Bl 2 交界面能量平衡示意图



其中,气体壁焓  $h_w$ 的定义见方程 (1).

### 4. 控制烧蚀壁面后退的方程

如前所述,控制烧蚀壁面后退的方程是因材料而异的.对于壁面后退由不留残 渣的热解动力学控制的泰弗隆类材料,总质量烧蚀率为<sup>[7,14]</sup>

$$\dot{m}_{s} = \rho_{s} v_{s} = \rho_{s} \left[ \frac{\alpha_{p} B \exp(-E_{a}/RT_{w})}{E_{a}/RT_{w}(1-T_{0}/T_{w})} \right]^{1/2}$$
(34)

且  $\dot{m}_s = \dot{m}_w \cdot \alpha_p$  为塑料热扩散系数、  $B, E_a$  为热解动力学参数 [4,7,14]. 对于硅基材料有 [14,15]

.

$$\dot{m}_s = \rho_s v_s = \dot{m}_w + \dot{m}_l \tag{35}$$

其中,  $\dot{m}_w = \dot{m}_g + \dot{m}_v$ ,  $\dot{m}_v$ 为表面蒸发率、由方程 (19) 给定. 而

$$\begin{split} \dot{m}_l &= \frac{2\rho_l \delta_l^2}{\mu_l} (\tau_{wx} - 2P_{xx} \delta_l) \\ \delta_l &= \lambda_l (T_w - T_0) / n (-q_w - q_r) \\ \mu_l &= \exp(a/T - b), \ n = a/T_w \end{split}$$

对于碳基材料有 [6.12]

$$\dot{m}_w = \dot{m}_g + \dot{m}_c \tag{36}$$

对于非平衡复相反应, *m*。由方程 (20)—(22) 给定.对于平衡烧蚀 (复相反应和升华 反应平衡), 方程 (36) 由一个独立的复相或升华反应平衡条件代替, 如取如下升华 反应:

$$C^* \to C, \quad K_{pc} = P_e X_c \tag{37}$$

综上所述,确定特殊情况下烧蚀壁面条件的问题变成在数学上已知物形和外流 条件下,从(I+K+6)个方程中求解(I+K+6)个未知量的问题,具体未知量和方 程见表 1. 其中, I 是系统中气体组元数, K 是元素个数.

利用这些方法、我们已进行碳基材料的平衡烧蚀<sup>[12]</sup>、硅基材料烧蚀<sup>[14,15]</sup>以及 碳基材料和泰弗隆材料的非平衡烧蚀的计算。

	15	the T			
Unknowns		Equations			
Unknowns	Number of unknowns	Equation numbers	Number of equations		
$C_M(  otin B')$ , $C_H$	2	(24), (26)	2		
$\bar{K}_{kw}$	K	(28)	K		
$K_{iw}$	I	(29), (30)	(I-K)+(K-1)+1		
$\widetilde{M}_w, h_w$	2	(31), (1)	2		
$T_{\boldsymbol{w}}$	1	(33)	1		
$\dot{m}_w$ (或 $B'_o$ )	1	(34)(37)中的一个	1		
Total	I+K+6	Total	I+K+6		

**表 1** Table 1

#### 四、结 论

1. 本文通过理论分析导出了化学非平衡黏性流中,化学反应壁面边界条件的一般性提法,它适用于不同类型的壁面化学反应(复相反应、升华、催化反应等)和不同的质量添加形式(烧蚀、发汗冷却等).

 在完全(平衡)催化壁条件下,与化学平衡边界层时一样,可利用传递系数法, 使烧蚀壁面与边界层计算解耦,得到了包括非平衡烧蚀在内的各类烧蚀材料壁面参数的一般计算方法。

#### 参考文献

- 1 Chung P. Advances in Heat Transfer, Vol.2. New York: Academic press, \*1965. 109-270
- 2 Alekseyev BV. NASA, TT F-549, 1967
- 3 Goulard R. Jet Propulsion, 1958, 28(11): 734-745
- 4 Holzknecht B. Int J Heat and Mass Transfer, 1977, (20): 661-668
- 5 Scala SM & Vidale GL. Int J Heat and Mass Transfer, 1960, 1(1): 4-22
- 6 Crowell PG. AD/A-068198, 1979
- 7 下蓢贵,钟家康,高温边界层传热,北京:科学出版社, 1986
- 8 Erdos J, Pallone A. AD-668770, 1968
- 9 Song DJ, Lewis CH. J S R, 1986, 23(1): 47-54
- 10 Blottner FG, NASA N71-21113
- 11 Putz KE & Bartlett, EP. AIAA-72-91
- 12 魏叔如等、电离空气环境中碳化材料的烧蚀。空气动力学学报、1986,4(4):352-360
- 13 Fay JA & Riddell FR JAS, 1958, 25(2): 73-85
- 14 魏叔如,王策, 玻璃纤维增强泰弗隆烧蚀理论, 空气动力学学报, 1993, 11(4): 469-474
- 15 魏叔如 玻璃纤维增强塑料烧蚀理论 空气动力学学报, 1983, 1(4): 30-39

## AN INVESTIGATION OF SURFACE BOUNDARY CONDITIONS FOR CHEMICALLY NON-EQUILIBRIUM BOUNDARY LAYERS

#### Wei Shuru

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract The general formulations of the chemically reacting surface boundary conditions for non-equilibrium boundary layer chemistry are derived from the theoretical analysis and their specific cases are investigated. When the ablation surface is fully catalystic to all gas phase reactions adjacent to it, the transfer coefficient approach is used to simplify the calculations by decoupling the ablating surface procedure from a non-equilibrium boundary layer procedure and a general method for computing the ablation surface parameters is given.

Key Words boundary layer, chemical reaction, non-equilibrium, surface boundary condition, ablation