第16卷 第1期　　力 学 学 报　　Vol. 16, No. 1
1984 年 1 月　　ACTA MECHANICA SINICA　　Jan., 1984

具有 $Le_f \neq 1$ 的反应面理论及其在氧化-升华耦合过程研究中的应用

钟家康
(浙 江 大 学)

提要 本文对有质量引射和化学反应的局部相似层流边界层作出反应面理论分析. 它导出 $Le_f \neq 1$ 情形下的一些传质、传热关系式. 作为反应面理论的一个应用,对表面材料的氧化-升华耦合过程进行了研究,阐明了氧化和升华过程从速率控制到扩散控制的过渡机理和转变条件,揭示了速率升华寓于氧化扩散控制区之中这一现象,对石墨驻点烧蚀作了计算,并与实验资料作了比较,两者定量地符合.

符　　号

a_E	凝结系数
c_i	组元质量分数
C_{pi}	组元等压比热
C_{pf}	$\sum c_i C_{pi}$, 冻结比热
D_i	等或有效二元扩散系数
E	活化能
$f(\eta)$	简化流函数
h_i	$\int_0^T C_{pi} dT + h_i^0$, 组元焓
h_i^0	组元生成焓
h	$\sum_i c_i h_i$, 混合焓
h_s	$h + \frac{1}{2} u^2$, 总焓
h_{T_s}	$h_s - \sum_i c_i h_i^0$, 冻结总焓
k_0	表面氧化速率常数
S_c	$\mu/\rho D_i$, Schmidt 数
$\bar{S}_c$	$S_c/(1 + a\beta)$
T	温度
u, v	x, y 方向速度分量
$\dot{w}_i$	化学质量生成率
α_{Ki}	$\nu_K M_K/\nu_i M_i$, 计量关系
β	$2d \ln u_e/d\ln\xi$
ΔQ_{J_2}	$h_J^0 - h_{J_2}^0$, 离解热
ΔQ_{CJ}	$h_J^0 - \frac{M_{CJ}}{M_J} h_{CJ}^0 + \frac{M_C}{M_J} h_C^0$, 反应热
ΔQ_E	$h_C^0 - h_E^0$, 分解热
λ_E	升华组元 E 的升华分数
μ	粘性系数
ν	计量系数
ρ	质量密度
K_f	冻结热传导系数
l	$\rho\mu/\rho_e\mu_e$
$\bar{l}$	$l/(1 + a\beta)$
Le_f	$\rho D_i C_{pf}/K_f$, 冻结 Lewis 数
L_E	$h_E - h_E$(固),升华热
M_i	组元分子量
$\bar{M}$	$\left[\sum_i (c_i/M_i)\right]^{-1}$,平均分子量
p	压力
Pr_f	$C_{pf}\mu/K_f$, 冻结 Prandtl 数
$\bar{Pr}_f$	$Pr_f/(1 + a\beta)$

本文于 1982 年 3 月 17 日收到.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

r 迴转半径
R 通用气体常数
R_b 驻点头部半径

上 标

$*$ 反应面上条件
$'$ 对 η 的导数

下 标

E 升华组元或表面材料元素
e 边界层外缘条件
eq 平衡条件
i 组元
K 元素
s 驻点
w 壁面

已有较多文献(例如文献[1],[2])对化学边界层中的反应面理论作过研究. 在以往的报告中,大多考虑常流体特性或假定 Lewis 数等于 1. 本文利用 Blasius 函数来解特征反应面,对有质量引射和化学反应的局部相似层流边界层作出反应面理论分析. 它导出 $Le_f \neq 1$ 情形下的一些传质、传热关系式,这些关系式在工程应用上是方便的. 作为反应面理论的一个应用,对表面材料的氧化-升华耦合过程进行了研究,阐明了氧化和升华过程从速率控制到扩散控制的过渡机理和转变条件,揭示了升华速率寓于氧化扩散控制区之中这一物理现象. 对石墨驻点烧蚀作了计算并与实验数据作了比较,两者定量地符合.

一、反应面理论

在边界层方程中引入 Blasius 函数 G 作为新的独立变量,G 定义作

$$G(\eta; f_w, Z) = G'(0; f_w, Z)\int_0^\eta e^{-z\int_0^\eta f d\eta}\, d\eta \tag{1.1}$$

其中

$$G'(0; f_w, Z) = 1\Big/\int_0^\infty e^{-z\int_0^\eta f d\eta}\, d\eta \tag{1.2}$$

假定边界层内气相反应限制在无限薄的间断面(反应面)上进行,而反应面两侧的流动是化学冻结的. 据此,从多组元反应气体边界层方程[3]可导致以下对应的反应面方程($j=0$ 为平面流,$j=1$ 为轴对称流):

动量方程

$$f' = G_1 \tag{1.3}$$

扩散方程

$$\frac{c_{ie}-c_i^*}{1-G_2^*} - \frac{c_i^*-c_{iw}}{G_2^*} = -\frac{\bar{S}_c}{G_2^{*\prime}}\bar{w}^* \tag{1.4}$$

能量方程

$$\frac{(h_{T_s})_e - h_{T_s}^*}{1-G_3^*} - \frac{h_{T_s}^* - h_{T_w}}{G_3^*} = \frac{\bar{P}_{r_f}}{G_3^{*\prime}}\sum_i \bar{w}_i^* h_i^0 \tag{1.5}$$

其中

$$\xi = \int_0^x \rho_e\mu_e u_e r^{2j} dx, \quad \eta = \frac{u_e r^j}{\sqrt{2\xi l}}\int_0^y \rho dy \tag{1.6}$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\bar{w}^* = \frac{2\xi}{\rho_e \mu_e u_e^2 r^{2j}} \frac{\dot{w}_w^*}{\rho^*} \tag{1.7}$$

以及 $G_1 = G(\eta; f_w, 1)$，$G_2 = G(\eta; f_w, \bar{S}_c)$ 和 $G_3 = G(\eta; f_w, \bar{P}r_f)$.

函数 $G(\eta; f_w, Z)$ 已有精确数值结果[4]可利用．上面我们已经作了以下假设：(1)流动是局部相似的；(2)忽略各组元比热之间的微小差别；(3) l, Pr_f 和 S_c 都是常数；(4)忽略能量方程中的耗散项（耗散效应可以放在恢复焓中计及）；(5)考虑动量方程中的压力梯度项，但采用以下近似：$\beta[(\rho_e/\rho) - f'^2] \simeq a\beta ff''$，其中 a 为选择常数，可取 $a = 1 + 2.6(T_w/T_e)$[5].

借助引进质量交换参数 B 和 θ_i，分别定义作

$$(\rho v)_w = \alpha_c(0; f_w)B, \qquad (\rho_i v_i)_w = \theta_i(\rho v)_w \tag{1.8}$$

其中

$$\alpha_c(0; f_w) = \frac{\sqrt{\bar{l}}}{\bar{S}_c} \frac{\rho_e u_e u_e r^j}{\sqrt{2\xi}} G'(0; f_w, \bar{S}_c) \tag{1.9}$$

则表面处组元质量分数可写作

$$c_{iw} = \frac{c_i^* + G_2^* \theta_i B}{1 + G_2^* B} \tag{1.10}$$

联合(1.4)和(1.8)，反应面上浓度关系可有

$$c_i = \frac{(1 + G_2^* B)c_{ie} + (1 - G_2^*)\theta_i B}{1 + B} + \frac{(1 - G_2^*)(1 + G_2^* B)}{1 + B} \frac{\bar{S}_c}{G_2^{*\prime}} \bar{w}_i^* \tag{1.11a}$$

或元素质量分数为

$$\tilde{c}_K = \frac{(1 + G_2^* B)(\tilde{c}_K)_e + (1 - G_2^*)\tilde{\theta}_K B}{1 + B} \tag{1.11b}$$

其中

$$\tilde{c}_K = \sum_i \alpha_{Ki} c_i \quad 和 \quad \tilde{\theta}_K = \sum_i \alpha_{Ki}\theta_i$$

反应面上焓的表达式可从(1.4)、(1.5)和(1.10)给出，为

$$h_{T_s} = G_3^*(h_{T_s})_e + (1 - G_3^*)h_{T_w} + I^* G_3^* \Delta h_{ch} \tag{1.12}$$

其中

$$\Delta h_{ch} = \sum_i h_i^0[c_{ie} - (1 + B)c_{iw} + \theta_i B] \tag{1.13}$$

$$I^* = Le_f G_2^{*\prime}(1 - G_3^*)/G_3^{*\prime}(1 - G_2^*) \tag{1.14}$$

反应面上的温度可根据 $h_{T_s}^*$ 值计算，即

$$C_{pf}^* T^* = h_{T_s}^* - \frac{1}{2} u_e G_1^{*2} \tag{1.15}$$

利用(1.12)，从边界层传给表面的热流可表示为

$$-q_w = \alpha_h(0; f_w)\left[(h_{T_s})_e - h_{T_w} + I^* \Delta h_{ch} + I(0)B \sum_i h_i^0(c_{iw} - \theta_i)\right] \tag{1.16}$$

其中

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\alpha_h(0;f_w)=\frac{\sqrt{l}}{Pr_f}\frac{\rho_c\mu_c u_c\gamma'}{\sqrt{2\xi}}G'(0;f_w,Pr_f) \tag{1.17}$$

$$I(0)=Le_f G'(0;f_w,\bar{S}_c)/G'(0;f_w,Pr_f) \tag{1.18}$$

根据 B 的定义和 $-f_w$ 的边界条件关系式，可找到两者之间的关系

$$-f_w=G'(0;f_w,\bar{S}_c)B/\bar{S}_c \tag{1.19}$$

在传质和传热计算中，需要知道 $G'(0;f_w,Z)$ 的数值．对于工程应用，用以下逼近公式来计算引射量 $(-f_w)$ 对 $G'(0;f_w,Z)$ 的影响是方便的：

$$G'(0;f_w,Z)=G'(0;0,Z)-\zeta_1(-f_wZ)+\zeta_2(-f_wZ)^2 \tag{1.20}$$

其中

$$G'(0;0,Z)=0.47Z^{\frac{1}{3}} \tag{1.21}$$

常数 ζ_1 和 ζ_2 值列在表 1，它们与 Z 有关．经与精确数值结果[4]比较，这个公式具有很好的精确性．因此，将 (1.19) 代入 (1.20) 可给出 $G'(0;f_w,Z)$ 对 B 的关系的二次方程

$$a[G'(0;f_w,\bar{S}_c)]^2+bG'(0;f_w,\bar{S}_c)+G'(0;0,\bar{S}_c)=0 \tag{1.22}$$

其中 $a=\zeta_2B$ 和 $b=-(1+\zeta_1B)$.

表 1 ζ_1 和 ζ_2 值

Z	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0
ζ_1	0.770	0.757	0.753	0.745	0.732	0.702
ζ_2	0.0971	0.163	0.172	0.193	0.192	0.203

而 $G'(0;f_w,\bar{S}_c)$ 与 $G'(0;f_w,\bar{P}r_f)$ 之间存在以下近似关系

$$\frac{G'(0;f_w,\bar{S}_c)}{G'(0;f_w,\bar{P}r_f)}=Le_f^n \tag{1.23}$$

其中指数 n 与引射量有关，给出如下

$-\sqrt{2}f_w$	0	0.5	0.75	1.0
n	$-1/3$	0	1/2	1

此外，密度-粘性积对传质和传热的影响是以 $\sqrt{l}=\sqrt{\rho\mu/(\rho_c\mu_c)}$ 的形式表现出来．我们可用参考温度法去估计 l 值，或者取 $l=(\rho_w\mu_w/\rho_c\mu_c)^{0.2}$[6].

二、氧化-升华耦合过程研究

应用上述结果研究表面材料的氧化-升华(或蒸发)耦合过程．为了方便，规定边界层中氧气与表面材料(用元素 E 表示)反应仅生成 EO 以及升华组元 E(可以是单原子、双原子和多原子蒸气) 与氧和氮的分子和原子反应仅生成双原子分子 EO 和 EN．假定升华组元与空气的反应是快反应(例如碳蒸气与空气的反应)，则存在一个完全反应面，在此面上 $(c_O+c_{O_2})^*=0$ 和 $\sum_E c_E^*=0$，完全反应面的位置是

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$G_2^* = (B - B_0)/B(1 + B_0) \tag{2.1}$$

其中

$$B_0 = (M_E/M_O)(c_O + c_{O_2})_e + (\epsilon/(1+\epsilon))(M_E/M_N)(c_N + c_{N_2})_e,$$

以及 $(M_{EN}/M_N)\epsilon = c_{EN}^*/(c_N + c_{N_2})^*$. ϵ 是碳氮反应耗碳量.

我们把氧化过程和升华过程分开来处理，而用升华比 λ（由升华引起的质量损失/总质量损失）建立两者之间的联系，不论氧化过程或升华过程，都由两个基过程所组成：一是表面化学动力学过程，一是反应物（氧气）向表面输送或升华物从表面流失的对流-扩散过程. 在这两个基过程中，速率较慢的那个起着主导作用. 特别当其中一个基过程的速率远远小于另一基过程的速率时，较慢的那个基过程就起着控制整体过程（氧化或升华）的作用. 此时，表面质量损失率实际上等于较慢那个基过程的数值.

在氧化过程中，$B \leqslant B_0$，完全反应面在表面处. 由壁面动力学因素和边界层内对流-扩散因素共同决定的表面质量损失率可以表达为

$$(1-\lambda)(\rho v)_w = \frac{[(c_O + c_{O_2})_e + (\epsilon/1+\epsilon)(M_O/M_N)(c_N + c_{N_2})_e]/(1+B)}{(1/\bar{\alpha}_{ch}) + (1/\alpha_{d_1})} \tag{2.2}$$

其中

$$\bar{\alpha}_{ch} = (M_E/M_O)(1+B)^{1-n}(B_0 - B)^{n-1}k_0 e^{-E/RT_w}(\bar{M}_w/M_O)^n p^n,$$
$$\alpha_{d_1} = (M_E/M_O)(1-\lambda)(1+B)\alpha_c(0; f_w)$$

分别称为氧化速率系数和当量对流-扩散速率系数. 前者表征表面材料在一定氧气浓度下进行氧化反应的快慢程度；后者表征氧气向表面输送的慢快程度，是一个与边界层因素有关的复杂函数.

在低表面温度处（$\bar{\alpha}_{ch} \ll \alpha_{d_1}$），方程（2.2）可导致氧化速率控制的极限情况：

$$B \to 0,\ (c_O + c_{O_2})_w \to (c_O + c_{O_2})_e,\ (\rho v)_w \to k_0 e^{-E/RT_w}\left(\frac{\bar{M}_w}{M_O}p\right)^n (c_O + c_O)_e^n \tag{2.3}$$

在较高表面温度处（$\bar{\alpha}_{ch} \gg \alpha_{d_1}$），可导致氧化扩散控制的极限情况：

$$B \to B_0,\ (c_O + c_{O_2})_w \to 0,\ (\rho v)_w \to \alpha_c(0; f_w)B_0 \tag{2.4}$$

在升华过程中，由表面升华动力学因素和对流-扩散因素共同决定的表面质量损失率是

$$\lambda(\rho v)_w = \sum_E \frac{c_{E,eq,w}}{1/(\alpha_v)_E + (1/\alpha_{d_2})} \tag{2.5}$$

其中 $(\alpha_v)_E = a_E\bar{M}_w p/\sqrt{2\pi R M_E T_w}$ 称为升华组元 E 的升华速率系数，表征表面在一定蒸气浓度下进行升华反应的快慢程度；

$$\alpha_{d_2} = [(1+G_2^*)B/G_2^*]\alpha_c(0; f_w) = [(1+B)B/(B - B_0)]\alpha_c(0; f_w)$$

为另一当量对流扩散速率系数，表征升华物从表面消失的快慢程度，也是一个与边界层因素有关的复杂函数.

当表面温度不太高（$(\alpha_v)_E \ll \alpha_{d_2}$）时，我们有

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B \to B_0,\ c_{E,w} \to 0,\ \lambda(\rho v)_w \to \sum_E (\alpha_v)_E c_{E,eq,w} \tag{2.6}$$

这是升华速率控制的极限情形．在这个区域中，完全反应面仍保持在表面，升华组元立即在表面被完全燃尽；输运到达表面的氧气，部分被升华组元消耗，剩余部分再与固壁发生氧化反应．表面质量损失率等于氧化扩散控制的数值，这表明，在氧化-升华耦合过程中，速率升华寓于氧化扩散控制区之中，而其中速率升华部分随温度升高而逐渐增大，以致达到表面质量损失率全部由升华造成 ($\lambda = 1$)． 升华比由下式确定

$$\lambda = \sum_E (\alpha_v)_E c_{E,eq,w} / \alpha_c(0;\ f_w) B_0 \tag{2.7}$$

当表面温度足够高 ($(\alpha_v)_E \gg \alpha_{d_2}$) 时，有

$$B \to \left(\sum_E c_{E,eq,w} + B_0\right) \Big/ \left(1 - \sum_E c_{E,eq,w}\right),\ c_{E,w} \to c_{E,eq,w},$$
$$(\rho v)_w \to \alpha_c(0;\ f_w) B \tag{2.8}$$

这是升华扩散控制区，相当于由于边界层内输运很慢，升华气体来不及从表面流走，壁面保持平衡升华的极限情形．这时，由于完全反应面已离开表面，固壁氧化反应已不再存在 ($\lambda = 1$)．

三、结果和讨论

作为例子，讨论碳类材料的表面氧化和升华． 图 1 为非平衡氧化过程中质量交换参数 B 随表面温度 T_w 的变化． 表面氧化动力学数据取：(1) "慢反应"： $n = \frac{1}{2}$，$E =$ 42.3 千卡/克分子，$k_0 = 2.18 \times 10^4$ 克/厘米^{2}秒 (大气压)$^{1/2}$；(2) "快反应"： $n = \frac{1}{2}$，$E = 44.0$ 千卡/克分子，$k_0 = 3.28 \times 10^8$ 克/厘米^{2}秒(大气压)$^{1/2}$．前者相当于热解石墨，后者相当于普通商业石墨[7]．通过定义一个 Damköheler 数 $D_m = \alpha_{d_1}/\alpha_{ch}$ 可确定控制区的转变条件．例如取 $D_m = 100$ 和 0.01 (对应的 B 值分别为 0.00173 和 0.171) 作为非平衡过渡区的界限值，则对于驻点流动，当 $R_b = 10$ 厘米时，对于"快反应"其温度界限值分别为770K 和 1000K，对于"慢反应"分别为 1100K 和 1700K (图 1)． 在驻点流动这一特殊情况下，由于反应级数取 $n = \frac{1}{2}$，因此温度界限值仅取决于头部半径和表面氧化动力学数据，而与压力无关．计算中边界层外缘处空气浓度取 $(c_O + c_{O_2})_e = 0.23$ 和 $(c_N + c_{N_2})_e = 0.77$． 图 2 作出了非平衡和平衡升华过程中 B 对 T_w 的曲线，碳蒸气的主要成分假定为 C，C_2，C_3，C_4 和 C_5． 升华组元的平衡浓度可通过平衡蒸气压 $p_{E,eq}$ 计算，即 $c_{E,eq} = M_E p_{E,eq}/\bar{M}p$． 而各种碳组元的平衡蒸气压给出在 JANAF 热化学表中[8]，可通过以下拟合公式计算

$$\log_{10} p_{E,eq} = a + b/T(\mathrm{K}) \tag{3.1}$$

常数 a 和 b 值列在表 2．表 2 中还列出了碳蒸气的凝结系数 a_E 值，它取自文献 [9]．

图 2 作出了假定 $a_E = 1$ 的曲线．可以看到，$a_E = 1$ 的结果非常接近于平衡值，而 a_E 取表 2 值的则偏离较大．

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　碳蒸气的凝结系数 a_E 和平衡常数公式中的 a 和 b 值

E	C	C_2	C_3	C_4	C_5
a_E	0.24	0.50	0.023	0.25	0.0019
a	8.096	9.607	9.627	10.013	10.464
b	−3.709	−4.262	−3.960	−4.889	−4.927

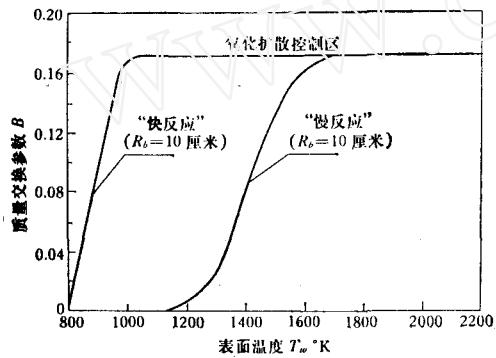

图 1　氧化过程中 B 随 T_w 的变化

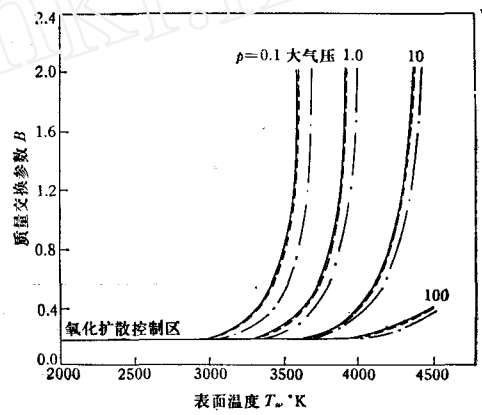

图 2　升华过程中 B 随 T_w 的变化

平衡升华——

非平衡升华 (R_b = 10 厘米)

$a_E = 1$ -----

a_E 取表 2 值——

根据气-固交界面处能量平衡关系并利用 (1.16)，传入固体内部的热流 q_b 可表示为

$$q_b = \alpha_h(0; f_w)[(h_{T_s})_e - h_{T_w} + I^*\Delta\bar{h}_{ch} - I(0)B\bar{L}_v] + \alpha q_{rg} - \varepsilon\sigma T_w^4 \tag{3.2}$$

其中

$$\Delta\bar{h}_{ch} = -\sum_{J=0,N}[(c_{J_2})_e - (1+B)(c_{J_2})_w]\Delta Q_{J_2} + \sum_{J=0,N}[(c_J + c_{J_2})_e - (1+B)(c_J + c_{J_2})_w]\Delta Q_{CJ} + \sum_{E=C_2}^{C_5}[(1+B)c_{E,w} - \lambda_E B]\Delta Q_E \tag{3.3}$$

$$\bar{L}_v = (1-\lambda)L_c - \sum_{E=C}^{C_5}\lambda_E L_E \tag{3.4}$$

表 3　反 应 热(卡/克)

气 相 反 应 热		升 华 热	
$\Delta Q_{O_2} = 3700$	$\Delta Q_{C_2} = 6100$	$L_C = 14200$	$L_{C_4} = 4600$
$\Delta Q_{N_2} = 8000$	$\Delta Q_{C_3} = 9200$	$L_{C_2} = 8100$	$L_{C_5} = 3700$
$\Delta Q_{CO} = 1600$	$\Delta Q_{C_4} = 9600$		
$\Delta Q_{CN} = 12500$	$\Delta Q_{C_5} = 10500$	$L_{C_3} = 5000$	

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量 αq_{rg} 和 $\epsilon\sigma T_w^4$ 分别表示热气体辐射传给壁面的和壁面向外辐射所损失的能量．各种反应热列在表 3，从 (3.2) 看到，反应面通过因子 $I^*\Delta h_{ch}$ 直接影响 q_b 值，当 $I^*=I(0)$，即反应面在壁面上时，(3.2) 可简化成 Lees[6] 的冻结边界层的结果．

最后，为了考察理论的准确性，我们对离解空气中轴对称驻点的石墨烧蚀作了计算．离解空气驻点流动的传热系数 $\alpha_h(0;0)$ 可近似表达为

$$\alpha_h(0;0)=0.113\sqrt{p_s/R_b}\ \text{克/厘米}^2\text{秒} \tag{3.5}$$

其中 p_s 用大气压，R_b 用厘米．由于输运系数的不定性，我们取以下两种数值：(a) $Pr_f\doteq(Pr_f)_{N_2}=0.7$ 和 $S_c\doteq(S_c)_{N_2}=0.965$；(b) $S_c=0.965$ 和 $Le_f=1$．假定升华是平衡的．理论值与实验资料[10]的比较列在表 4．在低压环境下，石墨基本上是热化学烧蚀，可以看到，理论值和实验数据间的符合是定量的．

在边界层方程中用湍流输运系数代替层流输运系数并利用 Reynolds 比拟，这个方法可以推广到湍流边界层．

表 4 理论与实验的比较

p_s atm.	T_w K	$(\rho v)_w\sqrt{R_b/p_s}$ (克/厘米²)(厘米/大气压)$^{1/2}$		
		理论值		测量值
		(a)	(b)	
0.12	2500	0.0140	0.0174	0.017(2520—2620K)
	2600	0.0141	0.0175	
0.12	3600	0.0751	0.0931	0.069—0.077 (3650K)
	3700	0.0803	0.0995	0.122—0.135 (3700K)
0.32	2500	0.0140	0.0173	0.018 (2520—2700K)
	2700	0.0141	0.0175	
0.30	3000	0.0150	0.0185	0.017 (3000—3200K)
	3200	0.0169	0.0209	
0.32	3600	0.0389	0.0482	0.037—0.052 (3600K)
	3700	0.0573	0.0709	0.062—0.066 (3710K)

(a) $Pr_f\doteq(Pr_f)_{N_2}=0.7$ 和 $S_C\doteq(S_C)_{N_2}=0.965$
(b) $S_C=0.965, Le_f=1$

本文初稿在 1976 年写成，曾受到中国科学院力学研究所卞荫贵教授的指导，谨致谢意．

参 考 文 献

[1] Williams, F. A., Combustion Theory, Addsion-Wesley (1965).
[2] Williams, F. A., *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **3** (1971), 171—188.
[3] 钟家康，力学与实践，2，(1981)，15—21.
[4] Mickley, H. S., Ross, R. C., Squyers, A. L. and Stewart, W. E., NACA, TN 3208 (1954).
[5] Moore, F. K., *J. Aerospace Sci.*, **28**, 10 (1961), 753—762.
[6] Lees, L., Third Combustion and Propulsion Colloquium, AGARD, Pergamon Press, New York, (1958), 451—497.
[7] Nolan, E. J. and Scala, S. M., *ARS J.* **32**, 1(1962), 26—35.
[8] JANAF Thermochemical Tables, 2nd. ed., **37** June (1971).
[9] Dolton, T. A., Goldstein, H. E. and Maurer, R. E., Thermal Design Principles of Spacecraft

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and Entry Bodies, Ed. by Bevans, J. T., Progress in Astronautics and Aeronautics, Academic Press, New York 21, (1969), 169—201.
[10] Wakefield, R. M. and Peterson, D. L., AIAA Paper-72-88 (1972).

THEORY OF THE REACTION SURFACE WITH $Le_f \neq 1$ AND ITS APPLICATION TO INVESTIGATION OF OXIDATION-SUBLIMATION COUPLING PROCESS

Zhong Jiakang
(*Zhejiang University*)

Abstract

This paper presents a theoretical analysis of the reaction surface for the locally similar laminar boundary layer with addition of mass and chemical reactions, Heat-transfer and mass-transfer correlations for $Le_f \neq 1$ are obtained. As an application the oxidation-sublimation coupling process is investigated. The transition mechanism from rate-controlled to diffusion-controlled regimes is described. The Phenomenon that the rate-sublimation is involved in diffusion-controlled oxidation regime is displayed. Comparisons with the experimental data are made for the case of graphite stagnation ablation and quantitative agreement is found.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net