

玻璃纤维增强泰氟隆烧蚀理论

魏叔如 王策

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

摘要 本文给出了玻璃纤维增强泰氟隆材料的理论模型和计算方法。得到了有液层机械流失的传质参数的关联公式, 利用此公式可对此材料的驻点与非驻点烧蚀性能进行预测。

关键词 烧蚀理论, 玻璃纤维, 泰氟隆。

符 号

A, B 常数	v 烧蚀速率
$B' \equiv \dot{m}_w / \rho_e U_e C_M$	X_i i 组元摩尔分数
$B'_0 \equiv \dot{m}_w / \rho_e U_e C_{H_0}$	α_p 塑料热扩散率
$B'_i \equiv \dot{m}_i / \rho_e U_e C_M$	γ_1 泰氟隆质量分数
C_{ki} i 组元中 k 元素的原子数	下标
K_i i 组元质量分数	e 边界层外缘
\tilde{K}_k k 元素总质量分数	i i 组元
K_{ji} i 组元生成反应的平衡常数	k k 元素
\dot{m} 质量流率	L 液态层
M_i i 组元分子量	w 壁面

引 言

玻璃纤维增强泰氟隆(即玻璃纤维增强聚四氟乙烯, 俗称硅氟四), 是一种较新型的烧蚀材料。它既保留了泰氟隆低温烧蚀和亲电子特性, 又有玻璃纤维的增强, 使其烧蚀和机械特性得到提高, 是高性能弹头天线窗和中近程弹头或雷达罩防热的理想材料。在国外, 虽然作为高级弹头的天线窗材料已使用多年^[7], 但却没有相应的烧蚀理论, 实验数据也不多见。本文建立了烧蚀理论模型并发展了相应的烧蚀理论。

一、理论模型

纯泰氟隆是低温热解升华型材料, 烧蚀表面的后退由其热解动力学控制, 后退率表示为^[1]

本文于1992年2月15日收到, 8月6日收到修改稿。

$$v_s = \left[\frac{\alpha_s B \exp(-E/RT_w)}{\frac{E}{RT_w} \left(1 - \frac{T_0}{T_w}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

纯玻璃是高温熔化蒸发型材料,烧蚀表面的后退,由熔化后形成的溶态层在气动力作用下的流失与表面蒸发控制,后退率可表示为^[2]

$$v_s = v_w + \frac{2\delta_L^2}{\mu_L} (\tau_{wx} - 2P_{sx}\delta_L) \quad (2)$$

$$\delta_L = \lambda_L (T_w - T_0) / n(-q_w - q_r)$$

$$\mu_L = \exp(a/T - b), n = a/T_w$$

由于泰氟隆的热解温度远低于玻璃纤维的熔化温度,因此当硅氟四受热后,其中的泰氟隆先热解成气体,随着热解向深部推进,在烧蚀表面留下的玻璃纤维残渣熔化后形成液态层,即硅氟四的烧蚀可以看作是深部有气体逸出的玻璃类材料烧蚀。

由于液态边界层方法在处理非驻点烧蚀时非常复杂,文献[3]在预测 Apollo 热防护烧蚀性能时,曾通过对实验数据的分析和关联得到适用于硅/酚醛塑料烧蚀的传质参数关联公式

$$B'_i \sqrt{p_e} = A \exp(-E_a/RT_w) \quad (3)$$

$$A \equiv 4.24, E_a \equiv 79496 \text{ J/mol}$$

但迄今还没有可用的硅氟四烧蚀的实验数据,因此不能从实验得到类似的公式。然而由于玻璃纤维含量较高时,在驻点将肯定形成连续的液态层,而对于驻点液态层烧蚀的计算,则已有许多较成熟的方法^[2,4],因此本文利用驻点烧蚀计算结果的关联来得到类似的公式,然后再利用所得公式预测非驻点的烧蚀参数。

二、传递系数

传递系数法可使烧蚀计算与气体边界层计算解耦。传递系数有传热(C_H)和传质(C_M)系数,分别由壁面热流 $[-q_w]$ 和 K 元素扩散质量流 $-\tilde{j}_k$ 定义

$$[-q_w] = \rho_e U_e C_H (H_r - h_w) \quad (4)$$

$$q_0 = \rho_e U_e C_{H0} (H_r - h_w) \quad (5)$$

$$-\tilde{j}_{kw} = \rho_e U_e C_M (H_r - h_w) \quad (6)$$

其中, q_0 是非烧蚀热流。文献[5,6]根据化学反应边界层和烧蚀耦合计算结果,用 C_M/C_{H0} 、 C_H/C_{H0} 与 B'_0 进行关联,关联公式为^[6]

$$\frac{C_M}{C_{H0}} = \frac{2\lambda_m B'_0}{e^{2\lambda_m B'_0} - 1} \quad (7)$$

$$\lambda_m = (1.012 + 0.018B'_0 + 0.0814B_0'^2)(1.0 - F_1)$$

$$F_1 = (0.238 + 0.038B'_0) \left(\frac{F_2 - 0.95}{0.6} \right)^{0.71}$$

$$F'_i = \begin{cases} 0.95 & \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_c} \leq 0.95 \\ \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_c} & 0.95 < \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_c} < 1.55 \\ 1.55 & \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_c} \geq 1.55 \end{cases}$$

$$\frac{C_H}{C_{H0}} = \psi = 1.0 - 0.65B'_0 + 0.018B'_0{}^2 + 0.064B'_0{}^3 - 0.011B'_0{}^4 \quad (8)$$

上述 ψ 关联公式, 我们已作过修改, 使其与文献[5]中图 7 的泰氟隆耦合计算结果更符合。

三、烧蚀体内的质量和能量平衡

由图 1 的烧蚀表面元素质量平衡有

$$\dot{m}_e \tilde{K}_{k_s} + \dot{m}_s \tilde{K}_{k_s} - \tilde{j}_{kw} - \dot{m}_w \tilde{K}_{kw} - \dot{m}_L \tilde{K}_{kL} = 0 \quad (9)$$

将(6)代入并考虑到无凝相反应, $\tilde{K}_{k_s} = \tilde{K}_{kL}$ 有

$$\tilde{K}_{kw} = \left[\tilde{K}_{k_c} + \frac{B'}{\gamma} (\gamma_1 \tilde{K}_{k_s} + \gamma_2 \tilde{K}_{kL}) \right] / (1 + B') \quad (10)$$

由烧蚀体内和烧蚀表面的能量平衡(图1)有

$$[-q_w] - \dot{m}_w h_w - q_r - \dot{m}_L h_L + \dot{m}_\infty h_\infty = 0 \quad (11)$$

其中, $h_\infty = \gamma_1 h_i^0 + (1 - \gamma_1) h_L^0$, $h_L = \int_{T_0}^T C_{pL} dT + h_{c,p}^0 + h_L^0$, h_i^0 和 h_L^0 分别为泰氟隆和玻璃纤维的生成焓。将其与方程(4)~(6)一起代入(11)式有

$$\begin{aligned} & \frac{C_H}{C_{H0}} - B'_0 \left(h_w + \frac{1 - \gamma}{\gamma} h_{c,p} - \frac{\gamma_1}{\gamma} h_i^0 \right) / (H_r - h_w) \\ & - q_r / \rho_c U_c C_{H0} (H_r - h_w) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

上述方程中, 烧蚀表面混合气体焓 h_w 为

$$h_w = \sum_i (K_i h_i)_w = \sum_i K_{i,w} \left(\int_{T_0}^T C_{p,i} dT + h_i^0 \right) \quad (13)$$

它与壁面气体成分有关。根据所论问题性质, 考虑了 O, O₂, N, N₂, NO, C, CO, CO₂, F, F₂, FN, CF, CF₂, CF₃, CF₄, CFN, COF₂, C₂F₂, C₂F₄, 及 Si, SiO 和 SiO₂ 等共 22 个组元, 经计算表明, 玻璃纤维蒸发的影响极小, 故在以后的计算中就不再考虑, 而确定 19 个气体成分的计算方程是元素守恒(4个)

$$\tilde{K}_{kw} = \frac{M_k}{M_w} \sum_i C_{k,i} X_{i,w} \quad (14)$$

化学平衡关系(15个)

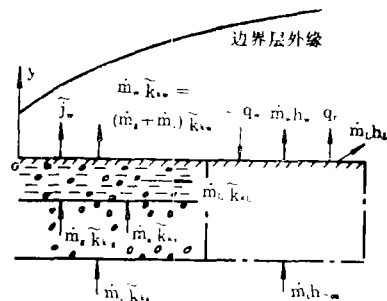


图 1 烧蚀体内的元素质量与能量平衡
Fig.1 Element mass and energy balance in ablator

$$K_{p,i} = X_i / \left[P_c^{(\sum_k c_{ki} - 1)} \prod_k X_k^{c_{ki}} \right] \quad (15)$$

$$\bar{M}_w = \sum_i X_{iw} M_i \quad (16)$$

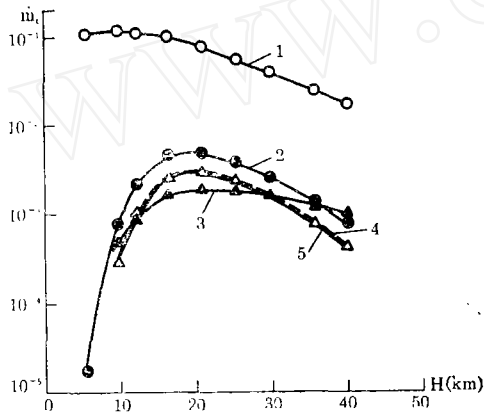
四、计算方程

综上所述, 硅氟四材料烧蚀参数的计算问题, 可以在数学上归结为由方程 (2) [或 (3) 或 (17)], (7), (10) (4个), (12), (13), (14)~(15) (19个) 和 (16) 等 28 个方程求解 $B'_0, B', T_w, \tilde{K}_{kw}$ (4个), X_{iw} (19个), \bar{M}_w 和 h_w 等 28 个未知量的问题, 方程一经求解, 其它参数可由相应关系直接求得。

五、算例、计算结果关联及分析

本文对一钝锥体在再入轨道下进行了计算, 图 2~5 是部分结果。

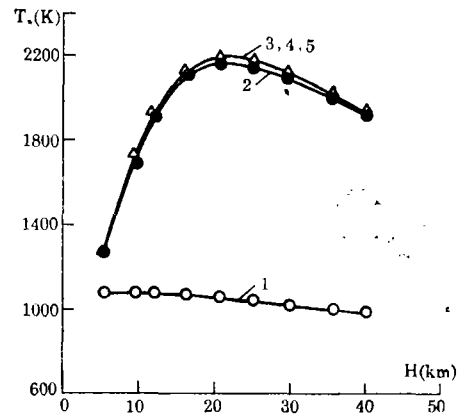
1. 硅氟四材料的烧蚀率在所有飞行高度上都比纯泰氟隆和纯高硅氧低(图 2), 壁温则相反(图 3)。由于硅氟四的烧蚀率随泰氟隆的含量 (γ_1) 增高而降低(图 4), 因此,



1—纯泰氟隆 2—纯高硅氧 3—按方程 (3) 计算的硅氟四 4—按液态层模型计算的硅氟四
5—按方程 (17) 计算的硅氟四

图 2 驻点烧蚀率随高度的变化

Fig. 2 Ablation rates of stagnation point versus altitudes



1—纯泰氟隆 2—纯高硅氧 3—按方程 (3) 计算的硅氟四 4—按液态层模型计算的硅氟四
5—按方程 (17) 计算的硅氟四

图 3 驻点壁温随高度的变化

Fig. 3 Surface temperatures of stagnation point versus altitudes

某一个 γ_1 值时, 烧蚀率将达到最低, 这与文献 [7] 的实验结果一致。

2. 适用于硅/酚醛烧蚀的关联公式 (3), 不能直接用来关联硅氟四烧蚀的计算结果 (图 2, 4), 但通过大量计算, 却得到了与其形式相似的关联公式

$$B'_i P_e^{0.25} = A \exp(-E_a/RT_w) \quad (17)$$

$$E_a = 156945.94 \text{ J/mol}$$

$$A = 618.01 \exp(-1.2098\gamma_1^{0.72})$$

上述的关联公式有很高的精度, 用它算出的烧蚀率 \dot{m}_i , 一般情况下, 误差不大于 4%, 壁面温度的误差小于 1% (图 2, 3, 4)。

3. 公式(3)和(17)分别由实验和理论结果关联得到,尽管对不同的烧蚀材料,系数不同,但却有相同的形式(有液态层的机械流失),因此有理由认为,凡是在烧蚀中有液态层机械流失的材料,其烧蚀传质参数均可用这一形式的公式去关联,从而,为这类材料的非驻点烧蚀预测提供了简便可靠方法。图5是用公式(17)计算的硅氟四烧蚀率沿物面的分布。

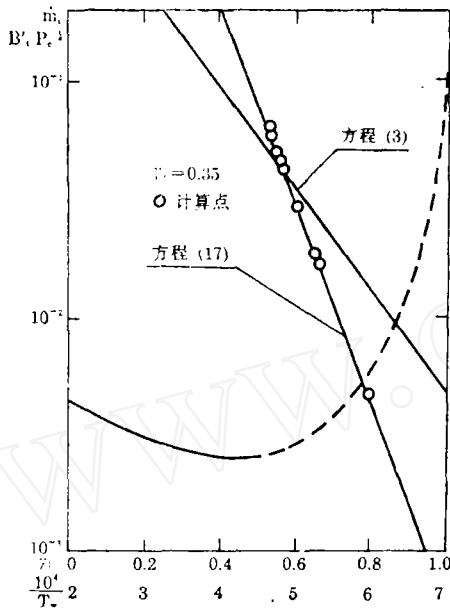


图4 烧蚀率随泰氟隆含量的变化和计算结果用 $B_1' P_e^{0.25}$ 进行关联

Fig. 4 Ablation rates versus mass fractions of teflon and correlation of computing results in terms of $B_1' P_e^{0.25}$

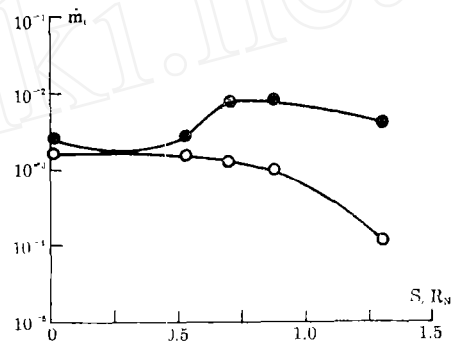


图5 烧蚀率沿物面的分布

Fig. 5 Ablation rates around surface of body

参 考 文 献

- 1 Nelson W C. The High Temperature Aspect of Hypersonic Flow, Oxford, Pergamon Press, 1964, 629~680
- 2 Bathe H A, Adams M C. A Theory for the Ablation of Glassy Materials, JAS, 1959, 26(6): 321~328
- 3 Bartlett E P et al., An Evaluation of Ablation Mechanism for the Apollo Heat Shield Material, JSR, 1971, 8(5): 463~469
- 4 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
- 5 Bartlett E P et al., Heat-Shield Ablation at Superorbital Re-Entry Velocities, JSR, 1971, 8(5): 456~463
- 6 Putz K E, Bartlett E P. Heat-Transfer and Ablation-Rate Correlations for Reentry Heat-shield and Nosetip Application, AIAA paper 72-91, 1972.
- 7 Letson K N. Influence of Fiber Loading on Thermal Ablation of PTFE. 79-ENAS-3, 1979.

Ablation Theory for the Fiberglass Reinforced PTFE

Wei Shuru Wang Ce

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract The ablation theory model and the calculation methods for the fiberglass reinforced PTFE (polytetrafluoroethylene or teflon) are given. The correlative formulae of mass transfer parameter with mechanical removal of the liquid layer are obtained which can be used to predict the ablation properties of considered material including the stagnation point and away from the stagnation point.

Key words ablation theory, fiberglass, teflon.

www.cnki.net