

EPDM 的烧蚀模型^{*}

何洪庆 严 红

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 作为固体火箭发动机燃烧室壁面绝热层的 EPDM 是一种炭化型热防护材料, 受热时形成炭化层和热解层, 在燃气和粒子冲蚀下不断减薄并带走热量, 有效地保护燃烧室壁。采用气动热化学烧蚀机理, 扩散和化学动力学双控制机制, 并计入气流与粒子的侵蚀, 建立了 EPDM 的烧蚀模型; 同时将烧蚀与移动边界下的传热相耦合进行烧蚀率预示。根据模型预示的烧蚀率与试验结果吻合很好。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 防热, 隔热涂层, 烧蚀性能

分类号: V435.14

ABLATION MODEL OF EPDM

He Hongqing Yan Hong

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) is used as the insulation on chamber wall of SPRM. It is a good protective material of charring type. During being heated it formed the charring and pyrolytic layers. Under ablation and attack of gas and particle, it gradually thinned out and took off great quantity of heat, and the chamber wall was effectively protected. The ablation model of EPDM was built using the aerodynamic-thermochemical ablation mechanism and the double control mechanism of diffusion and chemical dynamics. The erosion of gas and particle is regarded also. Simultaneously, the ablative rate was predicted by coupling of ablation with heat conduction under moving boundaries. The predicted ablative rate by the model is good agreement with test results.

Subject terms: Solid propellant rocket motor, Thermal protection, Barrier coating, Ablation property

1 引 言

EPDM 是固体火箭发动机燃烧室段重要的绝热材料。EPDM 的配方大同小异, 是以三元乙丙为基体, 掺入 SiO_2 和石棉, 并与酚醛调匀后压制固化而成的一种炭化型材料, 烧蚀试验后的剖析表明, 它在高温下热解, 形成炭化层、热解层和原材料基体层。燃气主流、EPDM 的热解气体、炭化层中的 C 和 SiO_2 等发生化学反应, 使 EPDM 产生一定的材料消耗, 即为气动热化学烧蚀。含 Al_2O_3 的燃气流冲刷 EPDM 的炭化层, 使之逐渐剥落, 即为气流与粒子的侵

^{*} 收稿日期: 1998-07-27, 修回日期: 1998-10-28, 本课题系航天基础性研究基金资助项目 (XG9209)

蚀。

烧蚀和侵蚀造成 EPDM 材料消耗, 带走大量的热, 有效地保护了基体, 同时热量向深层传导, 使 EPDM 的炭化层和热解层向深层推移, 造成移动边界。因此, 燃气与 EPDM 的相互作用, 是在移动边界下的传热和传质的动态平衡, 并维持一定的温度分布。本文根据这一 EPDM 烧蚀机理与物理模型, 计算了在一定分布温度下气动热化学烧蚀和粒子侵蚀的速率, 以预示烧蚀率。

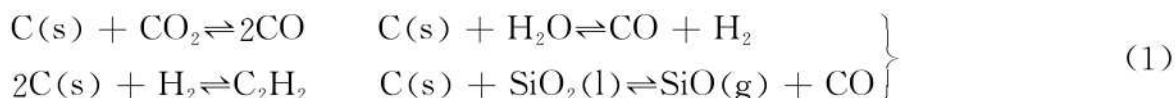
2 EPDM 的气动热化学烧蚀计算

假设: (1) 主流按轴对称二相湍流计算; (2) 化学反应在壁面上进行; (3) $Pr=Le=1$, 由 $Le=1$ 可得无量纲质量输运系数等于无量纲热输运系数, 即 $C_M=C_H$ 。

2.1 烧蚀表面的化学反应

EPDM 参与化学反应的主要成分是 C, CO_2 , H_2O , H_2 , SiO_2 。燃气中参与化学反应的主要成分是 CO, CO_2 , H_2O , H_2 , 其余气体组分折合为惰性气体 N_2 。

SiO_2 在 1 600 K 时开始逐渐软化熔融, 由于含量较少, 不能形成连续的液体层, 而呈液态分散体, 高温下与 C 发生硅碳反应。缺氧条件下烧蚀表面发生的主要化学反应为



上式中 s, l, g 分别表示固、液、气态。这样, 化学反应后从表面逸出的气体为 H_2O , CO_2 , H_2 , CO, C_2H_2 , N_2 和 SiO, 分别对应用 $i=1, 2, \dots, 7$ 表示。

2.2 烧蚀表面的质量守恒方程

设 $(\rho V)_w K_{iw}$ 为烧蚀后离开壁面的总质量流率, $(\rho D) \partial K_i / \partial y$ 是燃气主流通过附面层向壁面上扩散的质量流率, $(\rho V)_{-\infty} f_{iw}$ 是 EPDM 热解层内部向壁面方向流去的热解气体质量流率, $\dot{\omega}_i$ 是在壁面上由异相化学反应产生的质量流率。其中 D 是扩散系数, K 是组分浓度, f_i 是热解气体的百分含量; 下标 w 表示壁面, $-\infty$ 表示材料内部。因此, 壁面上的质量守恒关系为

$$(\rho V)_w K_{iw} = \rho D \frac{\partial K_i}{\partial y} + \dot{\omega}_i + (\rho V)_{-\infty} f_{iw} \quad (2)$$

燃气通过附面层的扩散方程为

$$\bar{\rho} \tilde{u} \frac{\partial \tilde{K}_i}{\partial x} + \bar{\rho} \tilde{V} \frac{\partial \tilde{K}_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{S_c} \right)_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{K}_i}{\partial y} \right] \quad (3)$$

式中带“—”的量表示时间平均量, 带“~”的量表示质量加权平均量, S_c 为施密特数, μ 为气流粘性系数; 下标 eff 表示有效值。

通过工程上实用的扩散方程与能量方程的类比解, 得到附面层中 i 组分的浓度为

$$K_i = K_{iw} + (K_{ig} - K_{iw}) \frac{h_s - h_w}{h_{sg} - h_w} \quad (4)$$

式中 h 为焓, 下标 s 为附面层中任一点处。将式 (4) 代入式 (2), 得

$$(\rho V)_w K_{iw} = \rho D \frac{K_{ig} - K_{iw}}{h_{sg} - h_w} \left(\frac{\partial h_s}{\partial y} \right)_w + \dot{\omega}_i + (\rho V)_{-\infty} f_{iw} \quad (5)$$

因假设 $Le=1$, 即 $\rho D=k/C_p$ (这里 k 是导热系数), 并根据 S_c-C_H 定义, 则式 (5) 变为

$$(\rho V)_w K_{iw} = \rho_g U_g C_H (K_{ig} - K_{iw}) + \dot{\omega}_i + (\rho V)_{-\infty} f_{iw} \quad (6)$$

定义无量纲烧蚀率和总气化分数分别为

$$B = (\rho V)_{-\infty} / (\rho_g U_g C_H) \quad f = (\rho V)_w / (\rho V)_{-\infty} \quad (7)$$

显然

$$fB = (\rho V)_w / (\rho_g U_g C_H) = (\dot{m}_c + \dot{m}_g) / (\rho_g U_g C_H) \quad (8)$$

式中 $\dot{m}_c$ 和 $\dot{m}_g$ 分别为碳的消耗率和烧蚀气体流出率。则烧蚀表面统一质量守恒方程为

$$(1 + fB)K_{iw} = K_{ig} + Bf_{iw} + \dot{\omega}_i / (\rho_g U_g C_H) \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (9)$$

3 EPDM 的双控制烧蚀计算方法

EPDM 的气动热化学烧蚀,一方面受化学反应速率的控制,称为化学动力学控制;另一方面受燃气组分通过附面层向壁面扩散速率的控制,称为扩散控制^[2]。反应方程(1)的反应物中,由化学动力学控制的组分为 H_2O , CO_2 , H_2 和 SiO_2 , 其消耗率由 Arrhenius 定律确定,为

$$\dot{\alpha}_{chi} = A_i e^{-E_i/RT_w} p_{iw} \quad (i = 1, 2, 3, 7) \quad (10)$$

由扩散控制的质量流率及在双控制下组分的消耗率为

$$\dot{\alpha}_{di} = \rho_g U_g C_M K_{ig} \quad (i = 1, 2, 3, 7) \quad (11)$$

$$\dot{\alpha}_i = \frac{1}{(1/\dot{\alpha}_{chi}) + (1/\dot{\alpha}_{di})} \quad (i = 1, 2, 3, 7) \quad (12)$$

化学反应的质量生成率,根据化学反应方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= -\dot{\alpha}_1, \dot{\omega}_2 = \dot{\alpha}_2, \dot{\omega}_3 = M_3/M_1 \dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\omega}_4 &= 2M_4/M_2 \dot{\alpha}_2 + M_4/M_1 \dot{\alpha}_1, \dot{\omega}_5 = M_5/M_3 \dot{\alpha}_3, \dot{\omega}_6 = 0, \dot{\omega}_7 = \dot{\alpha}_7 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 M 为相对分子质量。表面 C 的消耗率和气动热化学线烧蚀率为

$$\dot{m}_c = M_c/M_1 \dot{\alpha}_1 + M_c/M_2 \dot{\alpha}_2 + 2M_c/M_3 \dot{\alpha}_3 + M_c/M_7 \dot{\alpha}_7 \quad (14)$$

$$\dot{r} = \dot{m}_c / \rho_c \quad (15)$$

方程(10)中组分的分压为

$$p_{iw} = M_{gw} p_g / M_i K_{iw} \quad (16)$$

壁面上各组分分压之和应与主流中的燃气静压相等,因此有

$$\sum_{i=1}^7 p_{iw} = p_g \quad (17)$$

方程(9)~(17)的9个方程中有 K_{iw} , M_{gw} , B 和 T_w 等10个未知数,必须与热守恒方程耦合求解。

4 粒子侵蚀计算公式

粒子对 EPDM 的侵蚀,受粒子流速 V_p 、粒子对 EPDM 的撞击角和粒子半径 R_p 的影响,很难通过完全的理论计算来确定。工程上一般通过试验,总结出经验公式来计算粒子的侵蚀。同时,气流的侵蚀和粒子的侵蚀是同时发生的,很难分开,一般在粒子侵蚀计算公式中综合包含了气流流速产生的侵蚀因素。

炭化和热解层的推移速率与燃气流速,包括粒子的流速关系很大,它们反映在流动、热解、烧蚀和侵蚀速率的计算之中。燃气流速增大,EPDM 的烧蚀率增大。

经试验和回归分析,得到粒子侵蚀比质量系数的关联式为

$$G = 2.988 \times 10^{-5} R_p^{0.2} V_p^{1.296} (\sin \alpha)^{1.2} \quad (18)$$

式中各参数由流动计算得到。粒子侵蚀的线烧蚀率为

$$\dot{r}_e = G \dot{m}_p / \rho_p \quad (19)$$

式中 $\dot{m}_p$ 为粒子的质量流率。

5 轴对称导热方程

对于多层结构的导热问题, 可以用统一形式的当量热容导热方程来描述

$$-C_K \partial T / \partial x = \nabla q \quad (20)$$

式中, q 为热量, C_K 为当量热容, 下标 $K = 1, 2, \dots$, 依次表示 EPDM 材料的炭化层、热解层、原材料层, 以及壳体等。对于热解层, 考虑热解效应时有

$$C_2 = C'_2 + \frac{\rho_3 - \rho_1}{T_E - T_S} \Delta H_p \quad (21)$$

式中 C'_2 为热解层的当量热容, ρ_1, ρ_3 分别为原材料层和炭化层的材料密度, T_S, T_E 分别为热解材料热解开始和结束时的温度, ΔH_p 为热解时的分解热。

方程 (20) 的解法为: 通过坐标变换将物理平面上的烧蚀边界移动问题, 转换为计算平面上的固定边界问题; 热流矢量包括燃气与壁面的对流换热与烧蚀中的热效应, 在代入热流矢量以后, 用隐式差分格式求解, 可以得到壁面温度和结构内部的温度分布^[3]。

6 计算与试验结果

烧蚀计算依赖壁温 T_w , 导热计算应考虑烧蚀的热效应和边界移动, 因此需建立热守恒方程, 将传热和传质耦合求解, 详见文献[1]。

计算条件与试验条件一致: 燃烧室压强为 6 MPa, 复合推进剂含铝 13%, 燃烧温度 3 500 K。燃烧室壁热防护层典型位置的计算和试验结果如图 1 所示。EPDM 试片试验后观测: 炭化层为灰黑色, 厚 1.9 mm, 热解层为灰色, 厚 0.37 mm; 平均烧蚀率为 0.145 mm/s。

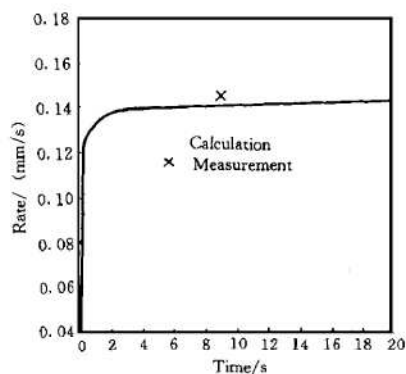


Fig. 1 Results of test and calculation

计算和试验都表明: EPDM 对高温低流速的固体火箭发动机燃烧室段是很好的热防护材料。

参 考 文 献

- 1 何洪庆. 固体火箭喷管烧蚀和传热的基本问题. 推进技术, 1993, 14(3)
- 2 何洪庆, 周旭. 固体火箭喷管中的烧蚀控制机制. 推进技术, 1993, 14(4)
- 3 周旭, 何洪庆. 固体火箭复合结构喷管传热的隐式计算方法. 推进技术, 1993, 14(2)