

石墨喉衬热化学烧蚀计算

姜贵庆 吴景福

摘 要

本文讨论了石墨喉衬材料烧蚀机理,认为在固体火箭发动机燃气流条件下,石墨碳与燃气中的水和二氧化碳的化学反应,是最主要的热化学烧蚀反应,其过程是动力学控制的;有关的动力学参数与石墨材料的结构与工艺有关,应由地面试验结果确定。据此假设,本文提出工程计算方法,其计算结果与例举的发动机地面试车后喉衬扩大量实测数据基本接近、与实际过程颇为吻合,有一定的精度。

符 号 表

B_w	无因次质量损耗系数	$\dot{m}_{w2}$	反应式(1)中碳的质量损耗率
C	组元质量浓度	q_{or}	冷壁对流换热热流
E	活化能	q_i	热流量
h_r	恢复焓	T	温度
ΔH_{v1}	C与CO ₂ 反应,式(2)的反应热,	T_r	恢复温度
ΔH_{v2}	C与H ₂ O反应,式(1)的反应热,	C_p	材料碳层比热
K	材料碳层导热系数	ρ	材料碳层密度
K_o	频率因子。	ψ	引射系数
R	通用气体常数, $R = 1.98 \times 10^{-3}$	下标:	
	千米/克分子·度	e	附面层外缘参数
$\dot{m}_w$	壁面材料的气态质量损耗率	w	壁面参数
$\dot{m}_{w1}$	反应式(2)中碳的质量损耗率		

一 引 言

在固体火箭发动机发展初期,喷管喉衬的烧蚀计算并没有引起人们重视,设计者往往是通过一系列的地面试验,去验证和确定热防护设计方案。随着固体火箭发动机技术及其应用的发展,这种方法就很难适应设计人员的需要。为此,美国空军火箭推进试验室(AFRPL),从七十年代初起,开始对喷管的烧蚀热防护问题进行系统研究,其主要研究成果发表于参考文献[1~6]中。1980年起,我们对此也作了一些探讨。在文献[7]中,作者讨论了高硅氧酚醛玻璃钢、碳纤维增强酚醛玻璃钢和石墨三种烧蚀热防护材料在固体火箭发动机燃气流加热条件下的烧蚀机理,并给出了相应的工程计算公式和计算结果。在此,仅对碳基材料喉衬在燃气流条件下的烧蚀机理及其工程计算方法进行介绍。

二、烧蚀机理的一般讨论

在探讨各种材料的烧蚀机理时,必须遵循两个基本原则、即质量守恒和能量守恒。前者主要确定材料质量损失率与环境参数、材料性能参数之间的关系,后者主要确定环境给予材料的气动加热和辐射加热与各种因素吸热量之间的关系。

在高热流传输条件下,材料的质量损失可以由物理化学因素引起,亦可以由力学因素引起。物理化学反应过程如相变反应(材料的蒸发与升华),异相反应(材料与燃气成份之间的反应),材料内部各组成之间的反应(如碳-硅反应)等。力学损失如熔融层的流失,材料的微粒状剥蚀和块状崩落,以及热应力破坏等。不同组成的烧蚀材料在不同的加热环境下,其质量损失机理并不完全一致,这是烧蚀机理研究的一项重要内容。确定烧蚀性能的另一项重要内容,是确定不同质量损失因素的吸热机理,这不仅是为了确定这些材料在特定环境下的质量损失率,而且亦是为材料烧蚀性能的进一步改进指明努力方向。

三、石墨喉衬热化学烧蚀计算

众所周知,固体火箭发动机采用复合推进剂时,其燃气组成基本上是还原性的。而石墨的唯一成份就是碳。因此我们认为碳仅与燃气中的 H_2O 和 CO_2 发生化学反应,其过程是动力学控制的。即



动力学研究表明,化学反应(1)和(2)具有相似的性质^[8],可以认为具有相同的反应级数和相同的动力学参数。假定化学反应(1)和(2)均为一级反应,且为不可逆的,则可写出动力学反应公式:

$$\dot{m}_{CO_2} = K_1 P_{CO_2w} \quad (3)$$

$$K_1 = K_0 e^{-E/RT} \quad (4)$$

本文中 K_0 和 E 的具体数值由地面试验结果确定。

利用倍比定理:

与燃气中 CO_2 反应所消耗的碳质量损失率为:

$$m_{w1} = \frac{M_c}{M_{CO_2}} \cdot \dot{m}_{CO_2} = \frac{M_c}{M_{CO_2}} K_1 P_{CO_2w} = \frac{M_c}{M_{CO_2}} K_1 \frac{\bar{M}}{M_{CO_2}} P_e C_{CO_2w} \quad (5)$$

同理,与燃气中 H_2O 发生反应所消耗的碳质量损失率为:

$$m_{w2} = \frac{M_c}{M_{H_2O}} \cdot \dot{m}_{H_2O} = \frac{M_c}{M_{H_2O}} K_1 P_{H_2Ow} = \frac{M_c}{M_{H_2O}} K_1 \frac{\bar{M}}{M_{H_2O}} P_e C_{H_2Ow} \quad (6)$$

总的碳质量消耗率则为

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w2} \quad (7)$$

利用壁面浓度的相容性条件^[7],可得出确定碳质量损失率的计算公式:

$$B_{w1} = \frac{\dot{m}_{w1}}{(\psi q_{or}/h_r)} = \frac{\frac{M_C \bar{M}}{M_{CO_2}^2} K_1 P_e \frac{C_{CO_2} e}{\left(\frac{\psi q_{or}}{h_r}\right)(1+B_w)}}{1 + K_1 P_e \frac{\bar{M}}{M_{CO_2} \left(\frac{\psi q_{or}}{h_r}\right)(1+B_w)}} \quad (8)$$

$$B_{w2} = \frac{\dot{m}_{w2}}{(\psi q_{or}/h_r)} = \frac{\frac{M_C \bar{M}}{M_{H_2O}^2} K_1 P_e \frac{C_{H_2O} e}{\left(\frac{\psi q_{or}}{h_r}\right)(HB_w)}}{1 + K_1 P_e \frac{\bar{M}}{M_{H_2O} \left(\frac{\psi q_{or}}{h_r}\right)(1+B_w)}} \quad (9)$$

$$\text{其中 } B_w = B_{w1} + B_{w2} = \frac{\dot{m}_w}{\left(\frac{\psi q_{or}}{h_r}\right)} \quad (10)$$

$$\text{引射系数: } \psi = 1 - 0.2 \frac{\dot{m}_w h_r}{q_{or}} \quad (11)$$

公式(8)、(9)、(10)是决定碳质量损失率 $\dot{m}_w$ 的主要公式, 给定压力 P_e 、壁面温度 T_w 及各组分质量浓度等, 就可以采用凑解的方法, 求解隐函数方程(10)、得出碳的质量消耗率 $\dot{m}_w$ 。但壁面温度 T_w 取决于喉衬内部的温度分布, 因此下面介绍一下求解温度分布的积分方法。

四、材料内部温度分布计算

我们采用文献(8)所提供的积分方法计算喉衬的烧蚀表面温度和内部温度分布。其计算公式如下:

坐标系如图1

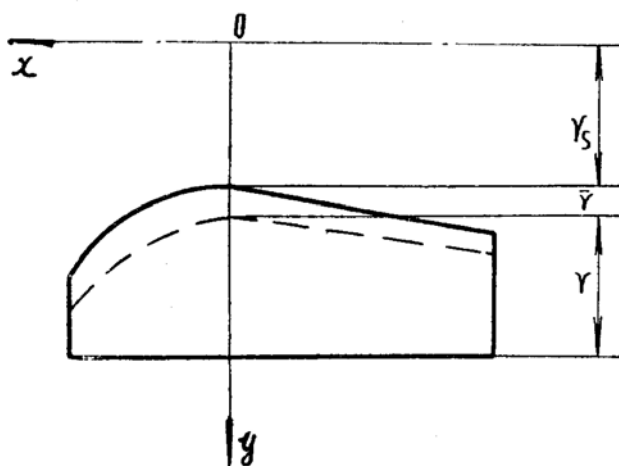


图1 坐标的选取

固定坐标系的中心取在对称轴上

$$y = 0 \quad \text{对称轴}$$

$$y = r_s \quad \text{喉衬的初始表面}$$

$$y = r_s + \bar{r} \quad \text{喉衬的烧蚀移动表面}$$

$$y = r_s + \bar{r} + r \quad \text{喉衬材料与隔热材料的交界面}$$

计算中将 r (烧蚀面至隔热材料交界面的距离、变量) 分成几层, 则每一层的厚度为:

$$r_n = i \frac{r}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

按能量守恒原理, 可以写出:

$$\begin{aligned} \frac{d[(r_s + \bar{r} + r_i)T_i]}{dt} = & \frac{[(r_s + \bar{r} + r_i)q_i] - [(r_s + \bar{r} + r_{i+1})q_{i+1}]}{\frac{1}{2}pc_p\left(\frac{r}{n}\right)} \\ & - \frac{\dot{m}_w c_p [(r_s + \bar{r} + r_i)T_i - (r_s + \bar{r} + r_{i+1})q_{i+1}]}{\frac{1}{2}pc_p\left(\frac{r}{n}\right)} \\ & - \frac{d[(r_s + \bar{r} + r_{i+1})T_{i+1}]}{dt} \\ & (i = 0, 1, 2, \dots, n-1) \end{aligned} \quad (12)$$

共可写出 n 个方程, 其中

$$q_i = K \frac{(T_{i-1} - T_{i+1})}{2(r/n)} \quad (13)$$

$$q_n = - \frac{K(T_{n-2} + 3T_n - 4T_{n-1})}{2(r/n)} \quad (14)$$

边界条件:

$$\begin{aligned} y = r_s + \bar{r}, \quad q_0 = & \psi q_{or} \left(1 - \frac{T_w}{T_r} \right) + \epsilon_w \partial (T_e^4 - T_w^4) \\ & - \dot{m}_{w1} \Delta H_{v1} - \dot{m}_{w2} \Delta H_{v2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$y = r_s + \bar{r} + r \quad q_n = 0 \quad (16)$$

式(15)中 ϵ_w 为等效辐射系数。 ΔH_{v1} 为方程(2)反应热, ΔH_{v2} 为方程(1)反应热。

采用龙格-库塔方法, 可以求解上述常微分方程组。将该方程组与式(10)联解, 便可得出碳的总质量消耗率, 喉衬表面温度及其内部的温度分布。

五、数值计算结果举例

用本文所提供的方法, 先后对两种发动机喷管喉衬烧蚀后退量进行数值计算, 其结果与地面热试车后喷管喉径扩大量相比, 吻合的相当好。

图2所示的烧蚀后退量随时间的变化曲线, 是某预研用的单室双推力发动机烧蚀后退量的理论计算结果。发动机工作参数是: 第一级工作压力为110公斤/厘米², 燃烧室温度约3600℃; 喉径处对流换热热流为15300千卡/米²·秒; 第二级工作压力为30公斤/厘米², 燃烧

室温度约3500℃，对流换热热流为5211.4千卡/米²·秒；

由图可见，随着热流值大小变化，烧蚀速率的改变十分明显；而在热流稳定的情况下，烧蚀速率几乎保持不变。

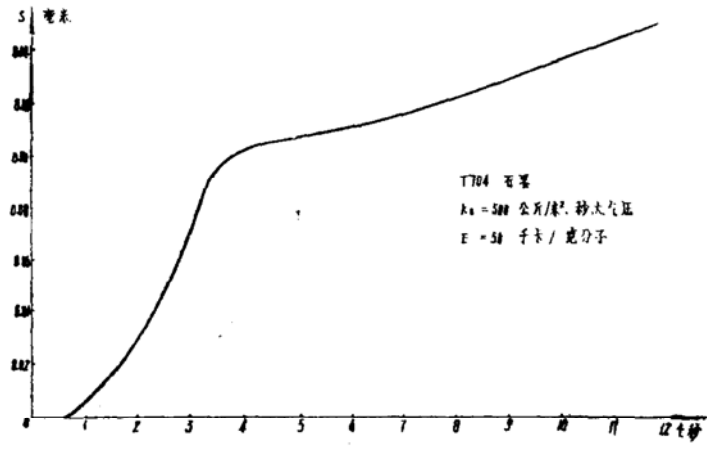


图 2 某发动机喉衬烧蚀后退量随时间的变化

表 1 是对地面试车后该发动机喷管喉衬扩大量，采用内径千分尺测量的结果：

表 1

被测的喉衬序号	1	2	3	4	5
喉径扩大量(毫米)	0.36~0.42	0.42~0.48	0.30~0.32	0.40~0.44	0.44~0.46

其均值为：0.402毫米 方差0.052毫米

对应的烧蚀后退量为0.20毫米。可见与理论计算的结果0.15毫米是相当接近的。理论计算比实测数据稍小的原因，可认为与粒子撞击侵蚀、石墨的点状剥蚀等力学损失有关。

六、结 论

计算结果表明：石墨喉衬热化学烧蚀在固体火箭发动机燃气流条件下，按动力学反应过程进行计算，可以得到相当满意的结果。按本文所提供的方法，烧蚀后退量的理论计算与地面热试车结果基本吻合，能为工程接受。

参 考 文 献

1. Andrewz Murphy Edwardk, Chu, John P Kesselring "AFRPL graphite performance prediction program intexim report", AD A016720
2. User's Manual, Aerotherm graphite surface kinetics computer program Voll-program description and sample problems, AD745446.
3. User's Manual, Aerotherm graphite surface kinetics computer program(GASKETZ) AD A036129.
4. User's Manual, Aerotherm Axi-Symmetric transient heating and material ablation computer program (ASTHMAZ), AD744853.
5. Schaefer, J.W., and Dahm T.J.: "Studies of nozzle ablative material performance for large solid boosters", NASA CR-72080.
6. Clark, K.J., Rindal R.A, Inouye I.M and Kendall R.M "Thermochemical ablation of rocket nozzle insert materils", NASA CR-66632.
7. 姜贵庆等: "FG-X发动机喷管烧蚀计算"内部资料.
8. 姜贵庆: "有加质和化学反应热传导的积分计算"宇航学报1980年第一期.