

变推力液体火箭发动机 烧蚀推力室的设计计算

狄连顺

摘 要

液体火箭发动机推力室的烧蚀冷却是一种新的冷却技术。本文介绍了烧蚀冷却的机理、变推力火箭发动机推力室中换热系数的计算、烧蚀速率和侵蚀速率的计算、室壁中温度的计算以及由于烧蚀冷却所引起的性能损失的计算等,可供设计烧蚀冷却推力室作参考。

一、引 言

随着航天事业的发展,液体火箭发动机中应用了许多先进的冷却技术。有些小的变推力火箭发动机不再适合采用再生冷却,膜冷却等技术。如果发动机安装在飞行器内,则辐射冷却技术也难以采用,这时采用烧蚀冷却技术是合适的。

烧蚀冷却技术是:当发动机工作时,推力室壁面上的内衬材料逐渐进行各种物化反应,由于这些反应消耗了燃气传给壁的热量的绝大部分,余下少量的热量用来提高室壁的温度。所以烧蚀冷却是一种质量转移性的冷却方式。

二、烧 蚀 冷 却 的 机 理

酚醛-硅化物模压塑料为内衬的推力室的烧蚀冷却,烧蚀过程可以分为三个阶段。第一阶段从发动机开始工作到材料温度达到树脂的分解温度为止,时间约零点几秒钟。第二个阶段为树脂的分解阶段。温度约为 $600\sim 1200\text{K}$ 。分解反应是个吸热的过程,生成大量的气体(如 CO_2 , H_2 , H_2O , CH_4 ……等),它们在壁中内压的作用下,由分解区经过多孔性的碳化层向内壁面上的燃气附面喷射,使壁面得到冷却,同时也降低了换热系数,使换热强度有所下降。

当壁面温度超过 2000K 时,碳化层(主要是 C 和 SiO_2)会被熔化和侵蚀,这是烧蚀过程的第三阶段。碳化层熔化也是个吸热过程。熔融状态的 SiO_2 ,在燃气的冲刷下、被带走,这就是壁面的侵蚀过程。碳化层侵蚀速率受到熔化速率的限制,在平衡状态时,二者应相等。如果温度超过 3000K ,则碳有强烈的还原作用,它也是吸热的。

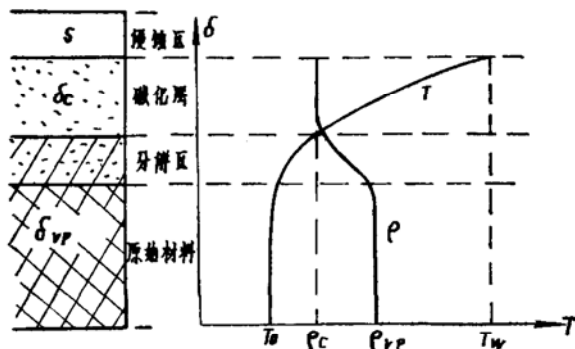


图1 烧蚀过程的物理模型

综合上述各点, 可知树脂的分解、分解气体的离解及喷射、 SiO_2 的熔化以及碳的还原作用都是吸热过程, 因而消散了燃气传给室壁热量的绝大部分, 只有少量热量留在料料中, 用来慢慢地提高室壁的温度, 这就是烧蚀冷却的机理。烧蚀过程的物理模型及参数的变化图见图 1。

三、变推力烧蚀冷却推力室中的传热系数

推力室中对流换热系数可用以下的Bartz公式计算

$$hg = \frac{0.026}{D_t^{0.2}} \cdot \frac{\mu^{0.2} c_p}{Pr^{0.6}} \left(\frac{\rho_c^*}{\beta} \right)^{0.8} \left(\frac{D_t}{R} \right)^{0.1} \left(\frac{A_t}{A} \right)^{0.9} \cdot \sigma \quad (1)$$

式中 σ 是变特性因子, 它是

$$\sigma = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{0.12} / \left[0.5 \frac{T_w}{T_c} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) + 0.5 \right]^{0.6} \quad (2)$$

式中符号可以参看文献[1、2]。

对于变推力发动机, 由于室压大幅度的变化, 而特征速度或综合参数又与室压有密切的关系。因此, 换热系数必须考虑推力变化引起的室压变化的影响。Sternfeld^[1]建议对 Bartz 公式作以下的修正。

$$\eta_c = c^*/c_{th}^* \quad (3)$$

即

$$c^* = \eta_c \cdot c_{th}^* \quad (4)$$

式中 c^* , c_{th}^* 分别是实际和理论的特征速度。

由此得

$$hg = k' \left(\frac{\rho_c^* g}{\eta_c \cdot c_{th}^*} \right)^{0.8} \quad (5)$$

$$\text{式中 } k' = \frac{0.026}{D_t^{0.2}} \left(\frac{\mu^{0.2} c_p}{Pr^{0.6}} \right) \left(\frac{D_t}{R} \right)^{0.1} \left(\frac{A_t}{A} \right)^{0.9} \cdot \sigma \quad (6)$$

对于烧蚀冷却的推力室, 由于分解气体的喷射, 使换热系数有所减小。Hildalgo^[2]推荐用以下公式进行修正:

$$hg = \frac{c_p}{c_{p0}} k' \left(\frac{\rho_c^* g}{\eta_c \cdot c_{th}^*} \right)^{0.8} \Omega \quad (7)$$

式中

$$\Omega = \left[1 - \frac{1}{5} \left(\frac{\bar{M}_g}{\bar{M}_{dp}} \right)^{\delta} \cdot \frac{\Delta r_c}{\Delta \theta} \rho_v f_r f_v c_{p0} \right] \quad (8)$$

式中符号参看文献[2]。

公式(7)是用来计算变推力烧蚀冷却推力室中换热系数的公式。

四、烧蚀速率及侵蚀速率

酚醛树脂——硅化合物材料的烧蚀过程是极其复杂的, 所以影响烧蚀速率的因素也是很多的, 它们有: 喷注器的结构、特性和效率、推进剂及其组元比、燃烧室的参数、发动机的工作时间等。实验证明: 室压越高, 则烧蚀速率越大。如室压为 $(6 \sim 8) 10^5 \text{Pa}$ 时, 其烧

蚀速率为 $0.060\sim 0.085\text{mm/s}$ ；室压为 $(8\sim 11)10^5\text{Pa}$ 其它条件近乎一致时，其速率为 $0.072\sim 0.105\text{mm/s}$ 。另外，工作时间越短，则速率越大，反之亦然，但当工作时间超过 15s 后，烧蚀速率近似一个常数。由实验研究，我们总结出以下经验公式

$$\dot{r}_a = \left(0.0135 + \frac{0.2}{15t}\right) \cdot (10^{-5} \cdot p_c)^{0.8} e^{-\frac{1}{15t}} \quad (9)$$

式中 t 为工作时间，(s)， p_c 为室压，(Pa)。

上式求得的速率是工作时间内的平均值。它适用于：(1)室压 $(5\sim 11) \cdot 10^5\text{Pa}$ ；(2)推进剂为硝酸-27/偏二甲肼；(3)组元比为 $0.4\sim 1.10$ （余氧系数）；(4)工作时间为 $10\sim 100\text{s}$ ；(5)同轴互击式可变截面喷注器，(6)燃烧室特征长度为 0.5m 左右。

烧蚀速率与室压和工作时间的关系如图2, 3所示。

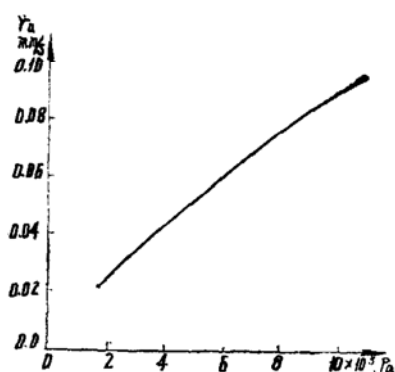


图2 烧蚀速率与室压的关系

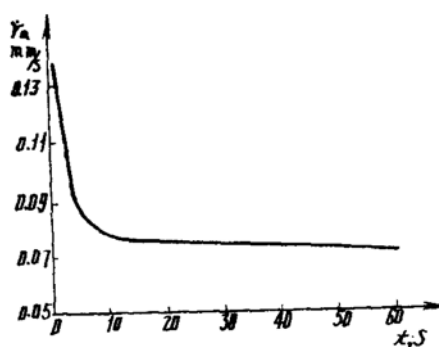


图3 烧蚀速率与工作时间的关系 ($p_c = 8 \times 10^5\text{Pa}$)

高硅氧酚醛树脂材料当它的温度达到 2000K 以上，材料中的 SiO_2 开始熔化，以一定的速率被侵蚀。因此，侵蚀速率也是设计计算时需要解决的问题。我们也建立了估算公式。思路是：当温度超过 SiO_2 熔点后（约 2000K ），燃气给室壁的热量主要用来使 SiO_2 熔化，树脂分解和增加材料的热焓。在忽略分解气体和熔融物带走的热量的条件下，得

$$\dot{r}_f = \{h_{eff}(T_{aw} - T_w) - (\dot{r}_a + \frac{1}{2R_c} \dot{r}_a t) \cdot \rho_{vp} f_r \Delta H_{dp}\} / \rho_c \Delta H_f \quad (10)$$

式中 T_w —— 燃气边壁面温度，K；
 T_{aw} —— 燃气的绝热壁温，K；
 ΔH_{dp} —— 树脂的分解热，J/kg；
 ΔH_f —— SiO_2 的熔化热，J/kg；
 t —— 开始熔化以后发动机的工作时间，s；
 R_c —— 燃烧室的内半径，m；
 $\dot{r}_a$ —— 烧蚀速率，m/s；
 $\dot{r}_f$ —— 侵蚀速率，m/s。

上述公式有一定的近似性，因为它忽略了：(1)分解气体带走的热量；(2) SiO_2 熔化物带走的热量；(3)忽略了C与 SiO_2 的还原反应吸收的热量等。

知道了烧蚀速率 $\dot{r}_a$ 和侵蚀速率 $\dot{r}_f$ 之后，就可以知道所需材料的厚度及工作之后剩余的材料厚度。

材料需要厚度为

$$\delta = n \dot{r}_a t \quad (11)$$

式中 n —— 是安全余量系数， $n = 1.2\sim 1.5$ 。

工作后的剩余厚度为

$$\Delta\delta = (n\dot{r}_a - \dot{r}_f)t \quad (12)$$

五、室壁中温度分布的计算

本问题是属于有理化反应的不稳定导热问题，它的精确解无法得到。我们只是在以下的假设和图4所示的模型下，导出近似的差分数值解公式。

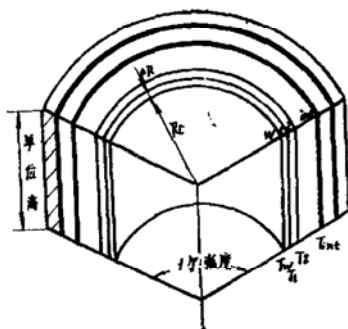


图4 计算模型

简化假设如下：1. 忽略C与SiO₂的还原反应，
2. 忽略分解气体带走的热量；3. 忽略分解气体的离解，4. 忽略SiO₂熔化物带走的热量。由能量守恒方程导得以下公式

1. 燃气边壁面温度

$$T_w' = \left\{ NR_c T_{aw} + \left[\frac{M}{2} \left(R_c - \frac{\Delta R}{4} \right) - NR_c - \left(R_c + \frac{\Delta R}{2} \right) + A \right] T_w \right.$$

$$\left. + \left(R_c + \frac{\Delta R}{2} \right) T_1 - B \right\} / \left[\frac{M}{2} \left(R_c + \frac{\Delta R}{4} \right) + A \right] \quad (13)$$

式中 T_w, T_w' ——时间 t 和 $t + \Delta t$ 时的壁面温度，

$$M = C\rho\Delta R^2/\lambda\Delta t, N = h_{eff}\Delta R/\lambda,$$

C, λ, ρ ——材料的比热，导热系数和密度，

ΔR ——每等分材料肉厚，

Δt ——时间间隔。

下注角 $w, 1, 2 \dots n \dots int \dots 0$ 表示计算位置的标号。公式(13)适用于以下四种情况

(1) 树脂尚未分解的情况

这时 $M = M_{vp}, N = N_{vp}, A = B = 0$ ，“vp”表示尚未分解的材料。

(2) 树脂正在分解的情况

这时 $M = M_{dp}, N = N_{dp}, A = F(T_w) \frac{M_{dp} f_r}{2} \frac{\Delta H_{dp}}{C_{dp}} \times \left(R_c + \frac{\Delta R}{4} \right) \frac{\rho_{vp}}{\rho_{dp}}, B = 0$ 。F(T)是

树脂热分解的相对速率函数，1/K。“dp”表示正在分解。

(3) 树脂已分解完，但尚未熔化的情况

这时 $M = M_c, N = N_c, A = B = 0$ 。“c”表示碳化。

(4) 碳化层已开始熔化的情况

这时 $M = M_c, N = N_c, B = \frac{\rho_{vp}\Delta R^2\Delta H_f}{2\lambda_c\Delta t} (1 - f_r) \left(R_c + \frac{\Delta R}{4} \right), A = 0$ 。树脂的分解参

数 $C_{dp}, \lambda_{dp}, \rho_{dp}$ 建议用插值公式计算

$$\begin{cases} C_{dp} = C_{vp} + \frac{T - T_B}{T_E - T_B} (C_c - C_{vp}) \\ \lambda_{dp} = \lambda_{vp} + \frac{T - T_B}{T_E - T_B} (\lambda_c - \lambda_{vp}) \\ \rho_{dp} = \rho_{vp} + \frac{T - T_B}{T_E - T_B} (\rho_c - \rho_{vp}) \end{cases} \quad (14)$$

式中 T_B, T_E ——是树脂分解开始和终止的温度。

2. 材料中各点上的温度

$$T'_n = \left\{ \left(R_n - \frac{\Delta R}{2} \right) T_{n-1} + [R_n(M-2) + P] T_n + \left(R_n + \frac{\Delta R}{2} \right) T_{n+1} - Q \right\} / [MR_n + P] \quad (15)$$

上式也适用于以下四种情况

(1) 树脂尚分解的情况

这时, $M = M_{vp}, P = Q = 0$ 。

(2) 树脂正在分解的情况

这时, $M = M_{vp}, P = F(T_n) R_n \frac{\Delta R^2 \rho_{vp}}{\lambda_{dp} \Delta t} f_r \Delta H_{dp}, Q = 0$ 。

(3) 树脂已经碳化, 但尚未熔化的情况

这时, $M = M_c, P = Q = 0$ 。

(4) 碳化层开始熔化的情况

这时, $M = M_c, P = 0, Q = R_n \frac{\Delta R^2 \rho_{vp}}{\lambda_c \Delta t} (1 - f_r) \Delta H_f$ 。

3. 不同材料交界面上的温度

假设不同材料接触良好, 不计接触热阻, 温度是连续的。

$$\begin{aligned} T'_{int} = & \left\{ \left(R_{int} - \frac{\Delta R_i}{2} \right) T_{int-1} + \left[\frac{M_i}{2} \left(R_{int} - \frac{\Delta R_i}{2} \right) + \right. \right. \\ & \left. \frac{M_{i+1}}{2} \left(R_{int} + \frac{\Delta R_{i+1}}{4} \right) \cdot \pi - \left(R_{int} - \frac{\Delta R_i}{4} \right) - \pi \left(R_{int} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\Delta R_{i+1}}{2} \right) \right] \cdot T_{int} + \pi \left(R_{int} + \frac{\Delta R_{i+1}}{2} \right) T_{int+1} \left. \right\} / \left\{ \frac{M_i}{2} \right. \\ & \left. \times \left(R_{int} - \frac{\Delta R_i}{4} \right) + \frac{M_{i+1}}{2} \pi \left(R_{int} + \frac{\Delta R_{i+1}}{4} \right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $\pi = \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_i} \cdot \frac{\Delta R_i}{\Delta R_{i+1}}$ 。

4. 外壁面上的温度

这里可以分两种情况, 即

(1) 绝热壁情况

$$T_o' = \left\{ \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{2} \right) T_{o-1} + \left[\frac{M_o}{2} \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{4} \right) - \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{2} \right) \right] T_o \right\} \div \left[\frac{M_o}{2} \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{2} \right) \right] \quad (17)$$

(2) 辐射壁的情况

$$T_o' = \left\{ \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{2} \right) T_{o-1} + \left[\frac{M_o}{2} \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{4} \right) - \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{4} \right) \right] T_o - \frac{\varepsilon_o}{\lambda_o} C_o \Delta R_o R_o \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right\} \div \left[\frac{M_o}{2} \left(R_o - \frac{\Delta R_o}{4} \right) \right] \quad (18)$$

式中 ε_o ——外表面的黑度； C_o ——辐射常数。

利用上述公式对高硅氧-酚醛树脂模压材料，我们进行了计算，其结果如图5、6所示。

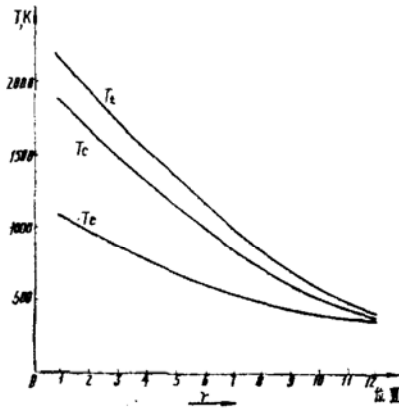


图5 壁温 T_c 、 T_t 、 T_e 随壁厚的变化

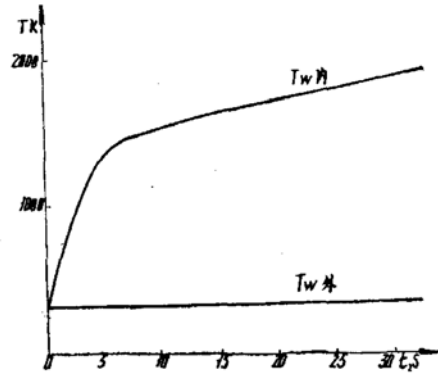


图6 燃烧室末内外壁温随时间的变化

六、烧蚀冷却对推力室比冲的影响

在设计状态下，理论比冲可以写成

$$I_{sp \cdot th} = \sqrt{2g(I_c - I_e)} \quad (19)$$

式中 I_c ——燃烧室中燃气的总焓，等于推进剂的总焓，即

$$I_c = I_p = I_f + KI_o / (1 + K) \quad (20)$$

I_e ——喷管出口燃气的总焓

$$I_e = \frac{1}{\sum \mu_i p_i} \sum I_i p_i \quad (21)$$

式中 μ_i 、 p_i 、 I_i ——是出口面上燃气各成分的分子量，分压和总焓。 K ——是组元比。

当发动机工作时，树脂分解和 SiO_2 熔化要吸收一部分热量，相当于推进剂起始焓有所减低。如

$$I_{c \cdot eff} = I_c - \Delta Q \quad (22)$$

式中 $\Delta Q = \Delta Q_{dp} + \Delta Q_f$ ——过程吸收的热量，

ΔQ_{dp} ——按推进剂秒流量折合的树脂分解吸热量，

ΔQ_f ——按推进剂秒流量折合的 SiO_2 熔化吸热量。

$$\Delta Q_{dp} = \frac{1}{\dot{m}} 2\pi \rho_{vp} f_r \Delta H_{dp} \cdot L \int_0^t \dot{r}_a \left(R_c + \frac{\dot{r}_a t}{2} \right) dt \quad (23)$$

$$\Delta Q_f = \frac{1}{\dot{m}} 2\pi \rho (1 - f_r) \Delta H_f L \cdot \int_0^t \dot{r}_f \left(R_c + \frac{\dot{r}_f t}{2} \right) dt \quad (24)$$

式中 $\dot{m}$ ——推进剂的质量秒流量, kg/s,

L ——燃烧室的长度, m,

$\dot{r}_a$ ——烧蚀速率, 由公式(9)计算,

$\dot{r}_f$ ——侵蚀速率, 由公式(10)计算。

考虑到以上热量损失, 推力室的比冲为

$$I_{sp} = \sqrt{2g[(I_c - \Delta Q) - I_e]} \quad (25)$$

由此造成的比冲损失可写成

$$\Delta I_{sp \cdot dp-f} = \sqrt{2g\Delta Q} \quad (26)$$

树脂分解产生大量气体, 参加膨胀做功, 产生附加推力。若分解气体与燃气是热平衡的, 则可计算如下:

分解气体的质量 Δm

$$\begin{aligned} \Delta m &= \int_0^t 2\pi L \left(R_c + \frac{\dot{r}_a t}{2} \right) \dot{r}_a \rho_{vp} f_r f_v dt \\ &= 2\pi \rho_{vp} L f_r f_v \int_0^t \dot{r}_a \left(R_c + \frac{\dot{r}_a t}{2} \right) dt \end{aligned} \quad (27)$$

分解气体产生的推力为

$$\Delta F = \frac{\Delta m}{t} W_e = \frac{W_e}{t} 2\pi \rho_{vp} L f_r f_v \int_0^t \dot{r}_a \left(R_c + \frac{\dot{r}_a t}{2} \right) dt \quad (28)$$

式中 f_v ——树脂中可蒸发的分量, W_e ——喷管排气速度。

分解气体产生的比冲为

$$\begin{aligned} \Delta I_{sp \cdot dp} &= \Delta F / \dot{m} \\ &= \frac{I_{sp}}{\dot{m} \cdot t} 2\pi \rho_{vp} L f_r f_v \int_0^t \dot{r}_a \left(R_c + \frac{\dot{r}_a t}{2} \right) dt \end{aligned} \quad (29)$$

所以推力室的实际比冲为

$$I_{sp \cdot eff} = I_{sp \cdot th} - \Delta I_{sp \cdot dp-f} + \Delta I_{sp \cdot dp} \quad (30)$$

因此, 烧蚀冷却引起的比冲损失为

$$\Delta I_{sp \cdot a} = \Delta I_{sp \cdot dp-f} - \Delta I_{sp \cdot dp} \quad (31)$$

我们引进烧蚀冷却推力室的比冲系数 φ_{ab} , 则

$$\varphi_{ab} = I_{sp \cdot eff} / I_{sp \cdot fh} \quad (32)$$

举例:

已知: $I_p = -15.13 \times 10^5 \text{J/kg}$, $I_e = -23.1 \times 10^5 \text{J/kg}$, $I_{sp \cdot fh} = 2076.6 \text{m/s}$,
 $\dot{m} = 0.453 \text{kg/s}$, $R_c = 0.045 \text{m}$, $\rho_{vp} = 1700 \text{kg/m}^3$, $f_r = 0.35$, $f_v = 0.80$,
 $\Delta H_{dp} = 16.8 \times 10^4 \text{J/kg}$, $\Delta H_f = 10.4 \times 10^5 \text{J/kg}$, $t = 65 \text{s}$, $L_c = 0.10 \text{m}$ 。

计算结果如下:

1. 分解吸收的热量 $\Delta Q_{dp} = 32.5 \times 10^3 \text{J/kg}$,
2. 熔化吸收的热量 $\Delta Q_f = 120.9 \times 10^3 \text{J/kg}$,
3. 分解, 熔化引起的比冲损失 $\Delta I_{sp.dp-f} = 40 \text{m/s}$,
4. 分解气体产生的比冲 $\Delta I_{sp.g} = 5.5 \text{m/s}$,
5. 烧蚀冷却的比冲损失 $\Delta I_{sp.a} = 34.6 \text{m/s}$,
6. 烧蚀冷却效率为

$$\varphi_{ab} = 0.987。$$

参 考 文 献

- (1) 78-1033, AIAA/SAE, 14th Joint Propulsion Conference.
- (2) J.of Spacecraft and Rockets, V01.2, №3.
- (3) «国防科大学报», 1984, №1.