

液体火箭发动机烧蚀冷却推力室 室壁温度响应的计算

雷建南 谭松林

(航天技术系)

摘要 本文对液体火箭发动机烧蚀冷却推力室的冷却机理进行了分析,较为全面地考虑了影响温度场的主要因素,利用六点中心差分建立了离散数学模型,并对室壁温度响应进行了计算,得到了烧蚀速率和侵蚀速率等。所得结果可供设计推力室时参考。

关键词 液体火箭发动机, 烧蚀冷却, 温度响应计算

符号表

ρ	材料密度	ε_V	外壁黑度
C	材料比热	T_V	环境温度
λ	材料导热系数	σ	辐射常数
τ	时间	ΔH_F	树脂分解热
h	步长	ΔH_Y	碳化层熔化热
h_2	玻璃钢厚度	α	对流换热系数
r	半径	T_e	绝热壁温度
\dot{Q}	内热源	T	燃气温度
C_Y	熔化物比热		

1. 引言

随着火箭技术的发展,烧蚀冷却技术在空间小型液体火箭发动机上已被广泛应用。目前,还没有比较完善的理论分析和通用计算程序来预估喷管壁的温度分布,有关这方面的研究还不够完善,且计算结果与实验相差较大。本文力求建立更完善的物理模型,编出一个通用计算程序。计算结果在工程上具有一定的实用价值。

2. 机理简述

碳化型材料的烧蚀过程可以分为两个阶段：

1> 吸热升温阶段：这是个物理过程，高温燃气以对流和辐射的方式加热喷管壁，使其温度升高。

2> 分解、碳化、侵蚀阶段：当温度升高到 300°C 左右时，材料中的树脂开始分解，产生大量气体，最终形成高熔点的多孔性碳化层。由于分解反应是在一定温度范围内进行($300\sim 750^{\circ}\text{C}$)，因而相应存在一个分解反应区。这个分解区不断向外移动，使得碳化层厚度不断增加，当温度大于 1470°C 时，碳化层开始熔化，逐渐地被高速气流冲刷掉。

在这一系列过程中，冷却作用主要表现在如下几方面：

- a. 树脂分解吸热；
- b. 分解气体在内压作用下，穿过温度较高的多孔性碳化层时，带走了一部分热量，况且它还要发生二次分解(2000K时，大分子气体在高温激励下发生的离解)，这无疑会吸收部分热量；
- c. 在内边界处，喷射气体扰乱了燃气边界层，使对流换热有一定的削弱；
- d. 在形成碳化层过程中，C和 SiO_2 发生一系列反应吸收了一部分热量，所形成的碳化层是一种高热阻物质，能起很好的隔热作用；
- e. 高熔化潜热的碳化层的熔化和高热容的熔化物的流失都有效地阻止了热量向壁内传导。

可以预估，由内壁至外壁，温度变化越来越缓慢。

3. 物理模型

通过对冷却作用的各方面的权衡和对喷管结构的分析，特作如下假设：

1. 燃气温度不随时间变化；
2. 不考虑气体的二次分解以及C与 SiO_2 的反应；
3. 只有径向传热；

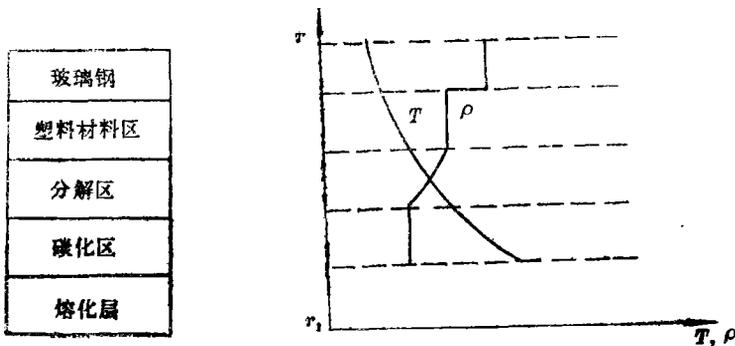


图 1

4. 各物性参数不随温度变化。

根据烧蚀机理和喷管结构，物理模型如图1。

在本文的差分格式建立中，都采用这样的模型：周向绝热，横截面积1个单位，截面上温度分布均匀，只有沿 r 向传热，如图2。

4. 数学模型建立

根据物理模型，可把整个过程概括成一个普适控制方程：

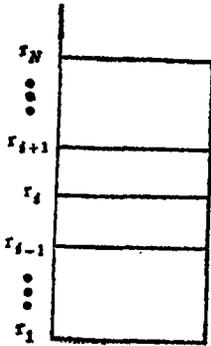


图 2

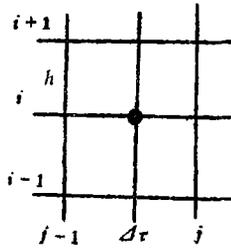


图 3

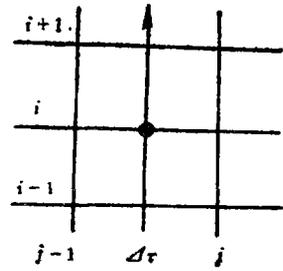


图 4

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{Q} \left(\tau, r, \frac{\partial T}{\partial r}, \frac{\partial T}{\partial \tau} \right)$$

其中：

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{i,j} &= \frac{\frac{T_{i+1,j-1} + T_{i+1,j}}{2} - \frac{T_{i-1,j-1} + T_{i-1,j}}{2}}{2h} \\ &= \frac{1}{4h} (T_{i+1,j} - T_{i-1,j} + T_{i+1,j-1} - T_{i-1,j-1}) \end{aligned}$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right|_{i,j} = \frac{1}{2h^2} (T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j} + T_{i+1,j-1} - 2T_{i,j-1} + T_{i-1,j-1})$$

边界及各分界处 $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ ：

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{i,j} = \frac{1}{2\Delta r} (T_{i,j} + T_{i-1,j} - T_{i,j-1} - T_{i-1,j-1})$$

区域内部各点 $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ ：

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{i,j} = \frac{1}{\Delta r} (T_{i,j} - T_{i,j-1})$$

$T_{i,j}$ 按台劳公式展开:

$$T_{i,j}^4 = T_{i,j-1}^4 + 4T_{i,j-1}^3(T_{i,j} - T_{i,j-1})$$

即
$$T_{i,j}^4 = 4T_{i,j-1}^3 T_{i,j} - 3T_{i,j-1}^4$$

(一) 原始塑料区 ($T_i < 573.15\text{K}$)

1. 区域内部

控制方程
$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

差分方程:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\lambda_1}{4r_i} - \frac{\lambda_1}{2h} \right) T_{i-1,j} + \left(\frac{\rho_1 c_1 h}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_1}{h} \right) T_{i,j} - \left(\frac{\lambda_1}{4r_i} + \frac{\lambda_1}{2h} \right) T_{i+1,j} \\ & = \left(\frac{\lambda_1}{2h} - \frac{\lambda_1}{4r_i} \right) T_{i-1,j-1} + \left(\frac{\rho_1 c_1 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_1}{h} \right) T_{i,j-1} + \left(\frac{\lambda_1}{4r_i} + \frac{\lambda_1}{2h} \right) T_{i+1,j-1} \end{aligned}$$

2. 内边界

控制方程
$$c_1 \rho_1 h \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_1 = \alpha (T_e - T_1) + \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{2-\frac{1}{2}} + \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_1^4)$$

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{c_1 \rho_1 h}{\Delta \tau} + 4\varepsilon \sigma T_{1,j-1}^4 + \alpha + \frac{\lambda_1}{2h} \right) T_{1,j} - \frac{\lambda_1}{2h} T_{2,j} \\ & = \left(\frac{c_1 \rho_1 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_1}{2h} \right) T_{1,j-1} + \alpha T_e + \varepsilon \sigma (T_e^4 + 3T_{1,j-1}^4) \\ & \quad - \frac{\lambda_1}{2h} T_{2,j-1} \end{aligned}$$

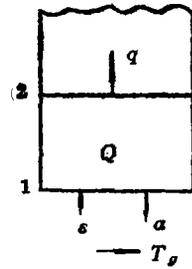


图 5

说明
$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_1} + 1}$$

ε_g : 燃气黑度
 ε_1 : 壁面材料黑度

在计算中取:

$$\varepsilon_g = 0.5 - 0.018 \times (T - 226.85) / 200$$

$$\varepsilon_1 = 0.4 + 0.38 \times 10^{-3} T$$

(上述关系式依《传热学》，杨世铭著及《传热传质手册》中有关黑度曲线拟合而成。)

3. 与玻璃钢交界处

本文认为壳体与塑料间紧密接触，无接触热阻，如图6。

控制方程
$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{M-\frac{1}{2}} + \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{M+\frac{1}{2}} = \rho_1 c_1 h_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{M-\frac{1}{2}} + \rho_2 c_2 h_2 \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{M+\frac{1}{2}}$$

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho_1 c_1 h_1}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_1}{h_1} \right) T_{M-1,j} + \left(\frac{\lambda_1}{h_1} + \frac{\lambda_2}{h_2} + \frac{\rho_1 c_1 h_1}{\Delta \tau} + \frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} \right) T_{M,j} - \left(\frac{\lambda_2}{h_2} - \frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} \right) T_{M+1,j} \\ &= \left(\frac{\lambda_1}{h_1} + \frac{\rho_1 c_1 h_1}{\Delta \tau} \right) T_{M-1,j-1} - \left(\frac{\lambda_1}{h_1} + \frac{\lambda_2}{h_2} - \frac{\rho_1 c_1 h_1}{\Delta \tau} - \frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} \right) T_{M,j-1} \\ & \quad + \left(\frac{\lambda_2}{h_2} + \frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} \right) T_{M+1,j-1} \end{aligned}$$

(二) 外壁面

本文计算中, 玻璃钢层作为一个差分格子。如图 7。

1. 外边界绝热

由能量平衡: 导进热量 = 贮存热量

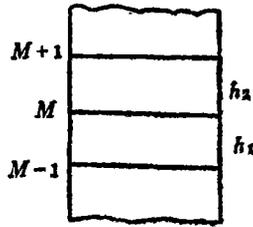


图 6

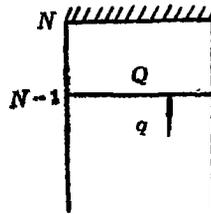


图 7

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_2}{h_2} \right) T_{N-1,j} + \left(\frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_1}{h_1} \right) T_{N,j} \\ &= \left(\frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_2}{h_2} \right) T_{N-1,j-1} - \left(\frac{\lambda_2}{h_2} - \frac{\rho_2 c_2 h_2}{\Delta \tau} \right) T_{N,j-1} \end{aligned}$$

2. 边界层有热辐射

由能量平衡: 导进热量 - 导出热量 = 贮热

差分方程即在上个式子右边加与辐射换热有关的项“ $-\epsilon_V \sigma_V (T_{N,j-1}^4 - T_V^4)$ ”。 $\epsilon_V = 0.9$ (依《简明传热手册》)

(三) 分解区

在分解区, 气体流经某截面流量公式:

$$\dot{m}_{g,i} = \int_{r_i}^r F(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} f_r(T) f_{r,a} \rho_3 dr \quad (*)$$

其中: $F(T)$ 为相对分解速率 ($1/K$); $f_r(T)$ 为 r 处该时刻材料中树脂分数; $f_{r,a}$ 为分解物中可蒸发份数。

1. 树脂热分解速率实验数据见表 1。

利用拉格朗日插值: $F(T) = \sum_{j=1}^{10} \prod_{i=1, i \neq j}^{10} [(T - T_i) / (T_j - T_i)] \cdot F_j$

2. 碳一酚醛热失重曲线 (图 8)

表 1

试验点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度(°K)	623	673	723	773	823	873	923	973	1043	1100
相对分解速率	0.0000	0.0004	0.0008	0.00134	0.00234	0.00530	0.0054	0.0036	0.00072	0.0000

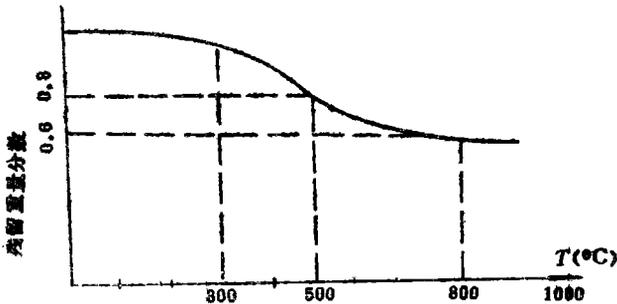


图 8

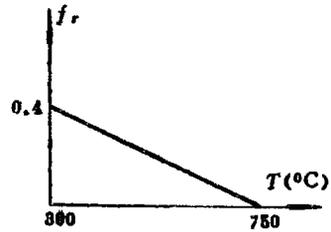


图 9

对其中弯曲部分作直线拟合 (图9)

$$f_r(T) = f_{r0} \left(1 - \frac{T - 300}{750 - 300} \right), \quad f_{r0} = 0.4$$

对(*)式离散化:

$$\Delta m_{gk} = F(T_k) \frac{T_{k,j} - T_{k,j-1}}{\Delta \tau} f_r(T_k) f_{ra} \rho_3 h = \Delta m_{gk} \frac{T_{k,j} - T_{k,j-1}}{\Delta \tau}$$

$$\Delta m_{gk} = F(T_{k,j-1}) f_r(T_{k,j-1}) \rho_3 h$$

$$m_{gi} = \sum_{k=i}^J \Delta m_{gk} \quad I \text{ 是烧蚀线格子号}$$

3. 分解区域内:

$$\text{控制方程} \quad \rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{Q}_m - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_a$$

$$\text{其中: } \dot{Q}_m = \frac{c_g m_{gi} (T_{i+1,j} + T_{i,j})}{2h}$$

$$\dot{Q}_{out} = \frac{c_g m_{gi} (T_{i,j} + T_{i-1,j})}{2h}$$

$$\dot{Q}_a = \frac{\Delta m_{gi} \Delta H_F (T_{i,j} - T_{i,j-1}) / \Delta \tau}{h} \quad (\text{气体分解吸热})$$

差分方程:

$$\left(\frac{\lambda_3 - \lambda_3}{4r_i} + \frac{c_g m_{gi}}{2h} \right) T_{i-1,j} + \left(\frac{\rho_3 c_3 h}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_3}{h} + \frac{\Delta m_{gi} \Delta H_F}{\Delta \tau} \right) T_{i,j} - \left(\frac{\lambda_3}{2h} + \frac{\lambda_3}{4r_i} + \frac{c_g m_{gi}}{2} \right)$$

$$T_{i+1,j} = \left(\frac{\lambda_3 - \lambda_3}{2h} + \frac{\lambda_3}{4r_i} \right) T_{i-1,j-1} + \left(\frac{\rho_3 c_3 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_3}{h} + \frac{\Delta m_{gi} \Delta H_F}{\Delta \tau} \right) T_{i,j-1}$$

$$+ \left(\frac{\lambda_3}{2h} + \frac{\lambda_3}{4r_i} \right) T_{i+1,j-1}$$

其中 Δm_{gi} , m_{gi} 的计算用前一时刻温度求, 下同。

4. 分解区与原始材料区边界处

$$\begin{aligned} \text{控制方程: } & h\rho_3c_3 \left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{i-\frac{1}{2}} + \rho_1c_1h \left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{i+\frac{1}{2}} \\ & = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{i-\frac{1}{2}} + \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{i+\frac{1}{2}} - \Delta m_{gi} \left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_i \Delta H_F \end{aligned}$$

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho_3c_3h}{\Delta\tau} - \frac{\lambda_3}{h} \right) T_{i-1,j} + \left(\frac{\rho_3c_3h}{\Delta\tau} + \frac{\rho_1c_1h}{\Delta\tau} + \frac{\lambda_3}{h} + \frac{\lambda_1}{h} + \frac{2\Delta m_{gi}\Delta H_F}{\Delta\tau} \right) \cdot T_{i,j} \\ & + \left(\frac{\rho_1c_1h}{\Delta\tau} - \frac{\lambda_1}{h} \right) T_{i+1,j} = \left(\frac{\lambda_3}{h} + \frac{\rho_3c_3h}{\Delta\tau} \right) T_{i-1,j-1} + \left(\frac{\rho_1c_1h}{\Delta\tau} - \frac{\lambda_1}{h} + \frac{\rho_3c_3h}{\Delta\tau} - \frac{\lambda_3}{h} \right. \\ & \left. + \frac{2\Delta m_{gi}\Delta H_F}{\Delta\tau} \right) T_{i,j-1} + \left(\frac{\rho_1c_1h}{\Delta\tau} + \frac{\lambda_1}{h} \right) T_{i+1,j-1} \end{aligned}$$

5. 分解状态内边界

$$\begin{aligned} \text{控制方程 } & \rho_3c_3h \left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{1+\frac{1}{2}} = \alpha(T_e - T_{1,j}) + \dot{Q}_{in}h \\ & - \dot{Q}_{out}h + \lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{1+\frac{1}{2}} + \varepsilon\sigma(T_e^4 - T_1^4) - \dot{Q}_a h \end{aligned}$$

其中: $\dot{Q}_{in} = \frac{c_g m_{g2} T_{2,j}}{h}$

$$\dot{Q}_{out} = \frac{c_g m_{g2} T_{1,j}}{h}$$

$$\dot{Q}_a = \frac{\Delta m_{g1} \Delta H_F}{2h\Delta\tau} (T_{1,j} - T_{1,j-1} + T_{2,j} - T_{2,j-1})$$

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\Delta m_{g1} \Delta H_F}{2\Delta\tau} + \frac{\rho_3c_3h}{\Delta\tau} + \alpha + \frac{\lambda_3}{2h} + 4\varepsilon\sigma T_{1,j-1}^3 + c_g m_{g1} \right) T_{1,j} \\ & - \left(\frac{\lambda_3}{2h} + c_g m_{g2} - \frac{\Delta m_{g1} \Delta H_F}{2\Delta\tau} \right) T_{2,j} \\ & = \left(\frac{\rho_3c_3h}{\Delta\tau} - \frac{\lambda_3}{2h} + \frac{\Delta m_{g1} \Delta H_F}{2\Delta\tau} \right) T_{1,j-1} + \left(\frac{\lambda_1}{2h} + \frac{\Delta m_{g1} \Delta H_F}{2\Delta\tau} \right) T_{2,j-1} \\ & \quad + \alpha T_e + \varepsilon\sigma (T_e^4 + 3T_{1,j-1}^4) \end{aligned}$$

(四) 碳化区域 ($T > 1023.15 \text{ K}$)

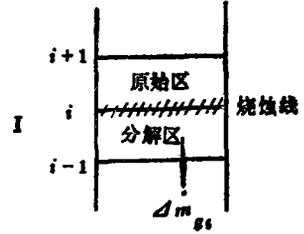


图 10

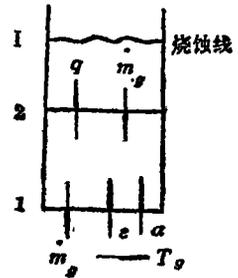


图 11

1. 区域内部

$$\text{控制方程} \quad \rho_4 c_4 \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_i = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{Q}_m - \dot{Q}_{out}$$

$$\text{其中: } \dot{Q}_{in} = \frac{c_g m_{gJ} (T_{i+1,j} + T_{i,j})}{2} \quad \dot{Q}_{out} = \frac{c_g m_{gJ} (T_{i-1,j} + T_{i,j})}{2h}$$

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\lambda_4}{4r_i} - \frac{\lambda_4}{2h} + \frac{c_g m_{gJ}}{2} \right) T_{i-1,j} + \left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_4}{h} \right) T_{i,j} \\ & - \left(\frac{\lambda_4}{2h} + \frac{\lambda_4}{4r_i} + \frac{c_g m_{gJ}}{2} \right) T_{i+1,j} = \left(\frac{\lambda_4}{2h} - \frac{\lambda_4}{4r_i} \right) T_{i-1,j-1} \\ & + \left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_4}{h} \right) T_{i,j-1} + \left(\frac{\lambda_4}{2h} + \frac{\lambda_4}{4r_i} \right) T_{i+1,j-1} \end{aligned}$$

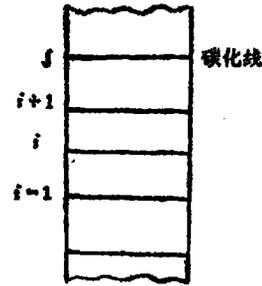


图 12

2. 内边界上

$$\begin{aligned} \text{控制方程: } \rho_4 c_4 h \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_1 &= \alpha (T_e - T_{1,j}) + \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_1 + m_{gJ} c_g (T_{2,j} - T_{1,j}) \\ &+ \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_{1,j}^4) \end{aligned}$$

差分方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} + \alpha + \frac{\lambda_4}{2h} + \varepsilon \sigma T_{1,j-1}^4 + c_g m_{gJ} \right) T_{1,j} \\ & - \left(\frac{\lambda_4}{2h} + c_g m_{gJ} \right) T_{2,j} = \left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_4}{2h} \right) T_{1,j-1} + \frac{\lambda_4}{2h} T_{2,j-1} \\ & + \alpha T_e + \varepsilon \sigma (T_e^4 + 3T_{1,j-1}^4) \end{aligned}$$

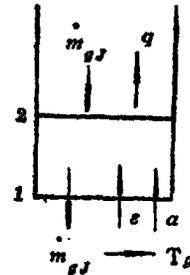


图 13

3. 在碳化区与分解区边界上 (如图14)

$$\begin{aligned} \text{控制方程} \quad \rho_3 c_3 h \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{i+\frac{1}{2}} + \rho_4 c_4 h \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{i-\frac{1}{2}} &= -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{i-\frac{1}{2}} + \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{i+\frac{1}{2}} \\ &- \Delta m_{gi} \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{i+\frac{1}{2}} \Delta H_F + (\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}) h \end{aligned}$$

$$\text{其中: } \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \frac{c_g m_{gi}}{2h} (T_{i+1,j} - T_{i-1,j})$$

$$\begin{aligned} \text{差分方程} & \left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_4}{h} + c_g m_{gi} \right) T_{i-1,j} + \left[\frac{(\rho_4 c_4 + \rho_3 c_3) h}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_3 + \lambda_4}{h} \right. \\ & \left. + \frac{2\Delta m_{gi} \Delta H_F}{\Delta \tau} \right] T_{i,j} + \left(\frac{\rho_3 c_3 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_3}{h} - c_g m_{gi} \right) T_{i+1,j} \end{aligned}$$

$$= \left(\frac{\lambda_4}{h} + \frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} \right) T_{i+1,j-1} + \left(\frac{\rho_3 c_3 h}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_3}{h} \right) T_{i+1,j-1} \\ + \left[\frac{2\Delta m_{gi} \Delta H_F}{\Delta \tau} + \frac{h(\rho_3 c_3 + \rho_4 c_4)}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_3 + \lambda_4}{h} \right] T_{i,j-1}$$

(五) 侵蚀区 ($T > 1743\text{K}$)

由于内边界移动, 但为了计算方便, 采用这样的简化处理: 把熔化吸收的热量归结成内界面上的一个“热汇”, 而认为内界面不移动, 且以后各点 ($T > 1743\text{K}$ 的点) 统统

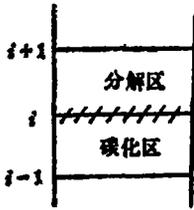


图 14

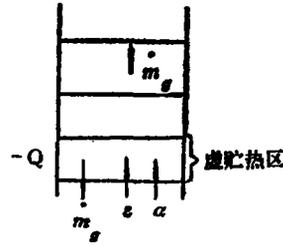


图 15

按碳化区方法计算。

这样, 内边界条件就成为:

$$\rho_4 c_4 h \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_1 = \alpha(T_e - T_{1,j}) + \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_1 - Q + \dot{Q}_{in} h + \epsilon \sigma (T_e^4 - T_{1,j-1}^4)$$

这里: $Q = \Delta H_Y \dot{\gamma} \rho_4 + c_Y \rho_4 \dot{\gamma} T_1$ $\dot{\gamma}$ 表示侵蚀速率

注: 上式右边本应还有一项 $-\dot{Q}_{out} h'$, 但由于本方法隐地产生了一个虚贮热区, 即本已被冲刷掉的碳化层, 仍在贮热。为了抵消这一项, 边界方程中未列写出 $-\dot{Q}_{out} h'$ 一项。本文假设这两项是同量级且近似相等。

差分方程

$$\left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} + \alpha + \frac{\lambda_4}{2h} + 4\epsilon \sigma T_{1,j-1}^3 + c_Y \dot{\gamma} \rho_4 \right) T_{i,j} - \left(\frac{\lambda_4}{2h} + c_g m_{g,j} \right) T_{2,j} \\ = \left(\frac{\rho_4 c_4 h}{\Delta \tau} - \frac{\lambda_4}{2h} \right) T_{1,j-1} + \frac{\lambda_4}{2h} T_{2,j-1} + \alpha T_e + \epsilon \sigma (T_e^4 + 3T_{1,j-1}^4) - \Delta H_Y \dot{\gamma} \rho_4$$

(六) 总体模型

所有域内及分界处方程都可写成:

$$A_i T_{i-1,j} + B_i T_{i,j} + C_i T_{i+1,j} = D_i T_{i-1,j-1} + E_i T_{i,j-1} + F_i T_{i+1,j-1} + G_i$$

两个边界方程形式:

$$A_1 T_{1,j} + B_1 T_{2,j} = D_1 T_{1,j-1} + E_1 T_{2,j-1} + G_1$$

$$A_N T_{N-1,j} + C_N T_{N,j} = D_N T_{N-1,j-1} + E_N T_{N,j-1} + G_N$$

写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{N-1} & B_{N-1} & C_{N-1} \\ A_N & B_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ \vdots \\ T_{N-1,j} \\ T_{N,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & E_1 \\ D_2 & E_2 & F_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{N-1} & E_{N-1} & F_{N-1} \\ D_N & E_N \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T_{1,j-1} \\ T_{2,j-1} \\ \vdots \\ T_{N-1,j-1} \\ T_{N,j-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{N-1} \\ G_N \end{pmatrix}$$

这可以用追赶法求解，方程中出现的 α 按巴兹公式计算， γ 先按经验设初值然后迭代。

5. 算例结果分析

现对具有如下参数的喷管喉部进行了计算

喉 径	树脂厚度	玻璃钢厚	燃气总温	燃烧室总压
0.02m	7×10^{-3} m	2×10^{-3} m	2850K	9.8×10^5 N/m ²

所用的大部分物性参数取自《液体火箭发动机传热学》（长沙工学院编），并根据其变化范围在相应温度区间取平均值。

根据计算结果绘出图16—图20。

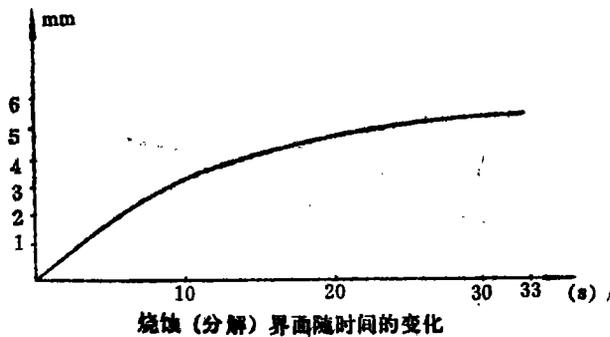


图 16

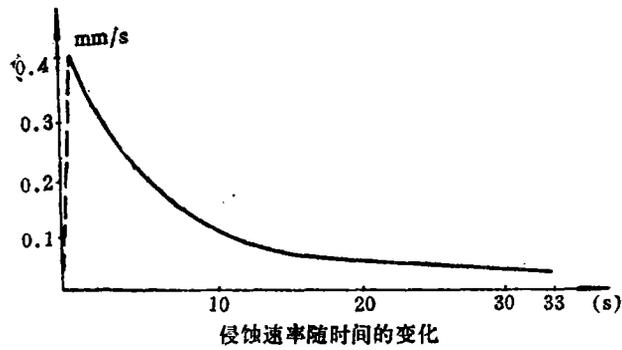


图 17

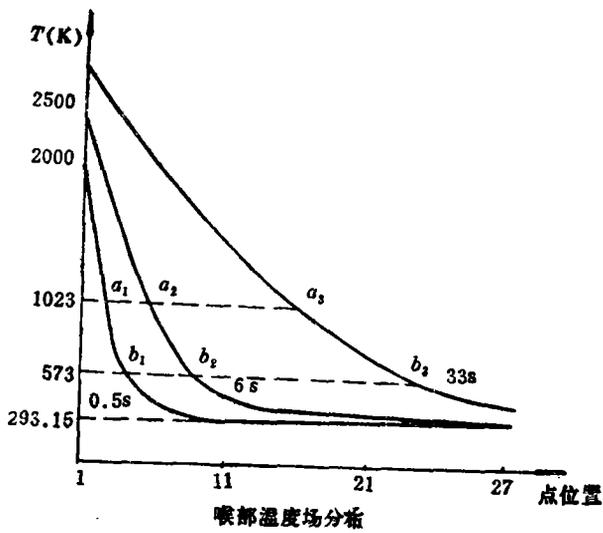


图 18

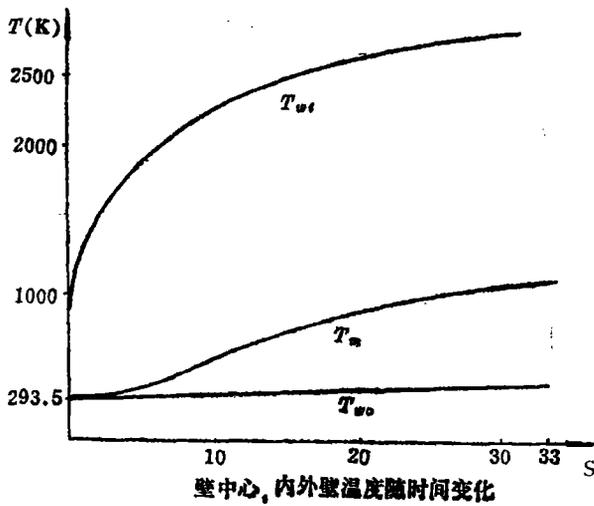


图 19

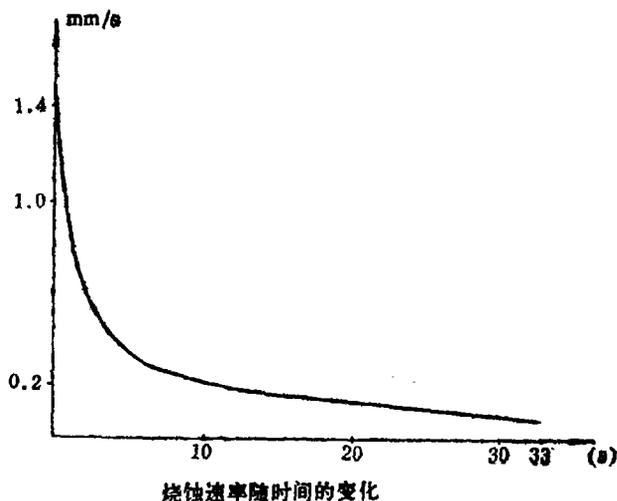


图 20

图18有如下特点:

i) 图中 $\widehat{a_i b_i}$ ($i=1, 2, 3$) 曲线段代表了分解区。随着时间的推移, 它们分别从左向右移动, 而且 $\widehat{a_i b_i}$ 在水平轴上的投影长度增加。这不仅说明了分界面的移动性, 而且也反映了分解层和碳化层厚度的增加性。

ii) 曲线随位置的变化而趋于平缓, 说明温度梯度从内到外是逐渐减小的。这些变化正和前面的机理分析相符。

图16、17、20所示曲线都随时间的增加而趋于平缓, 这正是发动机设计所要求的, 也是烧蚀冷却的必然结果。图19表明发动机内壁温度在工作开始时急剧上升, 而后趋于平缓; 外壁温度变化十分缓慢。实际情况也正如此。

由于实验环境比较恶劣, 目前还没有很精确的实验数据供比较, 我们只能拿比较粗糙的实验结果供参考。当喷管灭火, 用热电偶测得外壁温度为 86°C 左右, 而我们计算的结果为 89.9°C ; 计算所得烧蚀厚度最大为 5.88mm , 从解剖的喷管上测量是五点几毫米 (由于侵蚀, 测不很准); 从侵蚀残迹看, 侵蚀厚度不会过 2mm , 而我们的计算结果是 1.56mm 。

总之, 无论从理论分析, 还是从实验结果看, 我们的计算结果都是十分合理的。

结 束 语

本文采取隐式差分格式, 避免了收敛性判断问题, 所编程序具有通用性。本文计算所得烧蚀速率、侵蚀速率、内外壁温度变化及烧蚀界面的移动曲线等结果都对进一步设计和改进烧蚀冷却喷管有很大的指导意义。但要更准确地计算还需对材料的物性及其随温度变化情况, 树脂分解、碳化机理及喷管在有气体喷射下换热系数 α 的计算等问题

做更为细致的工作。

致谢：本工作得到了狄连顺副教授、王祥海讲师的指导，在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 狄连顺, 液体火箭发动机推力室烧蚀冷却近似计算及实验研究, 87年工程热物理学会年会上发表
- [2] E·R·G埃克特, R·M德雷克, 传热传质分析, 科学出版社
- [3] 长沙工学院编, 液体火箭发动机传热学
- [4] 张坪等, 烧蚀中聚合物的分解过程, 纤维复合材料, 1985年, 第3期
- [5] 钱滨江, 伍贻文, 常家芳等, 简明传热手册, 高等教育出版社

Wall Temperature Response Calculation of Ablative Cooling Chamber of LRE

Lei Jianlan Tan Songlin

Abstract

In this paper, the cooling mechanism of the ablative cooling chamber of LRE is analyzed, and the main factors of its response to the temperature field are considered in full. The dispersed mathematical model is founded by using the central difference of six points. The wall temperature response is calculated and the ablative and erosive rate is obtained. The obtained result is for a reference in designing the thrust chamber.

KEY WORDS Liquid Propellant Rocket Engines, Ablative cooling, Temperature response calculation