

点火管流量的确定

国防科技大学 张为华 代绪恒

摘 要

本文就固体火箭发动机中采用的点火管提出了一维两相流动模型,并用差分方法求解模型方程,得点火管流量。为了验证计算结果进行了实验。计算和实验结果对比表明趋势一致。本文还给出了药粒粒径和药量对点火管内压力的影响。

一 物理模型

本文研究的对象是某探空火箭上采用的点火管(图1)。当电点火头(1)激发后,首先对周围的复合点火药(3)药粒加热。当药粒表面温度达到着火点时,药粒开始燃烧,产生火

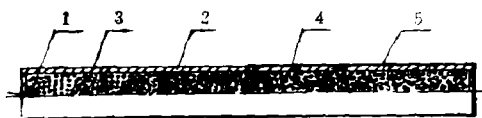


图1 点火管结构示意图

量气体和固体微粒,压力骤增,压力梯度加大,驱赶气体进入药柱未燃区,进而加热未燃的药粒。在压力梯度作用下,药床被压缩,越往下越紧密。随着火焰波阵面的传播,金属点火管(2)内压力增加到一定压力值时,衬纸(4)被冲破,管中气体通过孔(5)外喷。

由于孔径较小,药粒从孔中排出的影响可忽略。当复合点火药产物的生成量小于流出量时,管内压力开始下降。

复合点火药燃烧产生大量的固体微粒,一部分从管中喷出,一部分留在点火管内,实验发现点火管中有相当数量的黑色沉淀物。

二 数学模型

1. 假设条件: a.考虑药粒和燃烧产物的两相流动,流动是一维的; b.除未燃药粒外,复合点火药燃烧产物为气体,凝相的影响通过热力参数考虑; c.复合点火药燃速仅与压力有关; d.燃气服从诺贝尔——阿贝尔状态方程; e.假设药粒是不可压缩的,并忽略药粒大小的实际分布,用药粒当量尺寸表示药粒的尺寸。

2. 基本方程^[1]: 可列出气体和药粒的质量守恒方程(1)、(2),质量守恒方程(3)、(4)和能量守恒方程(5)、(6),其中 ϕ 为空隙率, ρ 为密度, t 为时间, v 为速度, x 为轴向位置, ρ_p 为药粒密度, r 为燃速, M_p 为单个药粒的质量, S_p 为单个药粒的表面积, Q_v 为体积积流量, v_p 为药粒运动速度, p 为压强, f_s 为相间阻力, R_i 为药粗间应力, e 为气体比内能, q 为热流量, e_p 为药粒比内能, f_i 为火药力, k 为比热比。

$$\partial(\Phi\rho)/\partial t + \partial(\Phi\rho v)/\partial x = \rho_p^2 r(1-\Phi)S_p/M_p - Q_v \quad (1)$$

$$\partial\Phi/\partial t + \partial[(\Phi-1)v_p]/\partial x = \rho_p^2 r(1-\Phi)S_p/M_p \quad (2)$$

$$\partial(\Phi\rho v)/\partial t + \partial(\Phi\rho v^2)/\partial x + \Phi\partial P/\partial x = -f_s + \rho_p^2 v_p r(1-\Phi)S_p/M_p - Q_v v \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \partial[(1-\Phi)\rho_p v_p]/\partial t + \partial[(1-\Phi)\rho_p v_p^2]/\partial x + (1-\Phi)\partial p/\partial x + \partial[(1-\Phi)R_1]/\partial x \\ & = f_s - \rho_p^2 v_p r(1-\Phi)S_p/M_p \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \partial[\Phi\rho(e+v^2/2)]/\partial t + \partial[\Phi\rho v(e+p/\rho+v^2/2)]/\partial x + p\partial\Phi/\partial t \\ & = -f_s v_p - q(1-\Phi)S_p/M_p + [\rho_p^2 r(1-\Phi)S_p/M_p](e_p + p/\rho_p + v_p^2/2) - Q_v(e + P/\rho + v^2/2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$e_p = f_1/(k-1) \quad (6)$$

并列出状态方程(7)和内能公式(8),其中 α 为余容, T 为温度, R 为气体常数。

$$p[(1/\rho) - \alpha] = RT \quad (7)$$

$$e = RT/(k-1) \quad (8)$$

方程(1)~(8)中包含十五个未知量即 Φ , p , ρ , T , v , v_p , e , e_p , r , S_p , M_p , f_s , Q_v , R_1 , q 。要求解这些未知量, 还须补充七个方程。

相间阻力 f_s : 用 α 表示药粒当量直径, Φ_0 表示初始空隙率, 则

$$\frac{f_{s1}}{[(1-\Phi)/d]|v-v_p|(v-v_p)\rho} = \begin{cases} 1.75 & \Phi \leq \Phi_0 \\ 1.75[(1-\Phi)\Phi_0/(1-\Phi_0)\Phi]^{0.45} & \Phi_0 \leq \Phi \leq \Phi_1 \\ 0.3 & \Phi_1 \leq \Phi \leq 1 \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \{1 + 0.02[(1-\Phi_0)/\Phi_0]\}^{-1}$$

$$f_s = f_{s1} + \rho M_p (dv/dt - dv_p/dt) 2\rho_p S_p \quad (9)$$

药粒间应力 R_1 : 用 α_1 表示应力系数, k_1 为经验常数则

$$A \quad \Phi \leq \Phi_0, R_1 = -\rho_p \alpha_1^2 \Phi(\Phi - \Phi_0)/(1-\Phi)\Phi_0 + (1-\Phi_0)p/(1-\Phi)$$

$$B \quad \Phi_0 \leq \Phi \leq \Phi_*, R_1 = \rho_p \alpha_1^2 [1 - e^{-2k_1(1-\Phi)}] 2/k_1(1-\Phi)$$

$$C \quad \Phi_* < \Phi < 1, R_1 = 0, \Phi_* = \Phi_0 + 0.1513 \quad (10)$$

$$\text{相间传热量 } q: q = h_c(T - T_{ps}) \quad (11)$$

其中 T_{ps} 为药粒表面温度, h_c 为传热系数,

$$h_c = Nu \cdot k_f/d, \quad Nu = 0.4Re^{2/3}Pr^{1/3},$$

$$Pr = 4k/(9k-5), \quad Re = \rho|v-v_p|d/\mu_f,$$

$$k_f = C_2 T^{1.5}/(T+C_T), \quad \mu_f = \mu_{f\infty}(T/T_{\infty})^{0.5}(1+C_3/T_{\infty})/(1+C_3/T)$$

其中 C_2 、 C_T 、 C_3 均为经验常数^[1]。 Re 为雷诺数, Pr 为普朗特数, k_f 为产物的导热系数, Nu 为拉萨尔特数, μ_f 为粘性系数。

用 k_p 表示复合点火药的导热系数, λ_1 表示导温系数, 考虑颗粒运动, 故表面温度为

$$\begin{aligned} T_{ps}(t+\Delta t) &= T_{ps}(t) + 2\lambda_1^{0.5} h_c [T(t) - T_{ps}(t)] [(t+\Delta t)^{0.5} - t^{0.5}] / k_p \sqrt{\pi} \\ &\quad - \Delta t [T_{ps}(t+\Delta t) - T_{ps}(t)] v_p / \Delta x \end{aligned}$$

单位时间单位体积小孔排出的质量:

$$Q_v = (\Phi_2 r \Phi / A \Delta x) (p / \sqrt{RT}) \quad (12)$$

其中 Φ_2 表示流量系数, A 表示点火管横截面积, $\Gamma = [2/(k+1)]^{(k+1)/2(k+1)} \sqrt{k}$ 。

$$\text{燃速 } r^{(2)}: r = bp^n \quad (13)$$

$$\text{药粒表面积和质量: } S_p = \pi d^2 \quad (14)$$

$$M_p = \pi d^3 \rho_p / 6 \quad (15)$$

为计算方便, 可将上面十五个方程化简。推导过程从略, 只写出简化的计算方程。

$$\partial U / \partial t - A(U) \partial U / \partial x = H \quad (16)$$

其中: $U = [\Phi, \rho, v, v_p, p]^T$

$$H = [g_1, g_2, g_3, g_4, g_5]^T$$

$$A(U) = \begin{pmatrix} -v_p & 0 & 0 & 1-\Phi & 0 \\ \rho(v_p - v)/\Phi & -v & -\rho & \rho(\Phi - 1)/\Phi & 0 \\ 0 & 0 & -v & 0 & -1/\rho \\ [R_1/(1-\Phi) - f_\phi]/\rho_p & 0 & 0 & -v_p & -(1+f_e)/\rho_p \\ kp(v_p - v)/\Phi(1-\rho\alpha) & 0 & -kp/(1-\rho\alpha) & -(1-\Phi)kp/\Phi(1-\rho\alpha) & -v \end{pmatrix}$$

f_ϕ 和 f_p 通过 R_1 对 x 求导得到, 即

$$\partial R_1 / \partial x = f_\phi \partial \Phi / \partial x + f_p \partial p / \partial x$$

$$g_1 = \rho_p r (1 - \Phi) S_p / M_p$$

$$g_2 = [\rho_p^2 r (1 - \Phi) S_p / M_p Q_v - g_1 \rho] / \Phi$$

$$g_3 = [-f_s + \rho_p^2 v_p r (1 - \Phi) S_p / M_p - Q_v v - \Phi v g_2 - \rho v g_1] / (\rho \Phi),$$

$$g_4 = [f_s - \rho_p^2 v_p r (1 - \Phi) S_p / M_p - g_1 \rho_p v_p] / (1 - \Phi) / \rho_p$$

$$g_5 = \{-q(1 - \Phi) S_p \rho_p / M_p - f_s v_p - Q_v (e + p / \rho + v^2 / 2) + [\rho_p^2 (1 - \Phi) S_p r / M_p] (e + P / \rho + v^2 / 2) - g_1 [p / (k - 1) - \rho \alpha p / (k - 1) + \rho v^2 / 2] - g_3 \Phi \rho v - g_2 [\Phi v^2 / 2 - \alpha \Phi p / (k - 1)] - g_1\} / (1 - \rho \alpha) (k - 1) / \Phi$$

三 计算方法及结果分析

1. 差分格式、初始条件及边界条件 求解方程 (16) 采用解析方法是行不通的, 只能用数值方法。本文采用差分法求解所用差分格式为Ritchmyer预校二步格式:

$$\begin{aligned} U_j^{n+1} &= (U_{j+1}^n + U_{j-1}^n) / 2 + \Delta t A_j^n (U_{j+1}^n - U_{j-1}^n) / 2 \Delta x + \Delta t H_j^n \\ U_j^{n+1} &= U_j^n + \Delta t A_j^{n+1} (U_{j+1}^{n+1} - U_{j-1}^{n+1}) / 2 \Delta x + \Delta t H_j^{n+1} \end{aligned} \quad (17)$$

初始条件的确定: 假设电点火头引燃复合点火药初期燃气均布于点火管中, 燃气温度沿管的轴向呈指数衰减函数分布, 按状态方程得到的压力沿轴向分布亦与此相同。最左端的药粒在 $t = 0$ 时刻已经达到着火点, 其余药粒的表面温度分布沿轴向呈指数衰减规律, 最右端的药粒表面温度为常温。初始条件可简单地用下式表示:

$$E_i = E_0 + E_c e^{-c_i x} \quad (18)$$

E 分别代表压强、温度、密度、和药粒表面温度。 E_0 、 E_c 、 c_i 均为常数。

Φ 沿轴向为常数, 依实验条件而定。

$$v = 0, v_p = 0 \quad (19)$$

考虑点火管为固定边界, 采用镜面反射法给定边界条件:

引入虚网格 $(i, -1)$, $(i, N+1)$

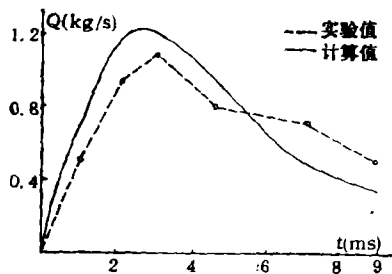


图2 实验和计算得到的点火管流量

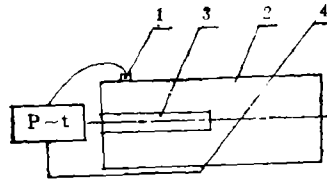


图3 点火管流量实验原理图

对于向量有: $f_{(i, -1)} = -f_{(i, 1)}$, $f_{(i, N+1)} = -f_{(i, N-1)}$

对于标量有: $f_{(i, -1)} = f_{(i, 1)}$, $f_{(i, N+1)} = f_{(i, N-1)}$

2. 算例和结果 本文图1的点火管计算模型。点火管长126mm, 内径12.5mm, 开孔直径2mm, 开孔数28个。计算输入的其它参数如下:

$$b^{(2)} = 1.69 \times 10^{-2}, \quad n^{(2)} = 0.22, \quad \alpha = 10^{-3},$$

$$R = 126, \quad C_T = 648, \quad \rho_p = 1240.$$

图2给出了复合点火药药量为6g, 粒径为0.86mm情况下的点火管流量值。为了验证点火管流量计算值, 设计了一套实验装置(图3), 用以确定实验点火管流量值的大小。实验装置由四个部分组成, 即传感器(1)、密闭容器(2)、点火管(3)和微机系统(4)。

由文献[3]可知, 在上面的实验装置中有:

$$Q = (v/kRT_c)(dp/dt) + \dot{H}_L \quad (20)$$

其中Q为秒流量, T_c 为燃气温度, V为密闭容器的体积, C_p 为定压比热, $\dot{H}_L$ 为热损失的导数, 根据实验确定。

求Q并不困难, 只须将微机采集的数据处理为 dp/dt 与 t 的关系, 由(20)式即可求得点火管流量。图2中给出了实验得到的点火管流量值, 从图2可见, 实验值和计算值趋势一致。

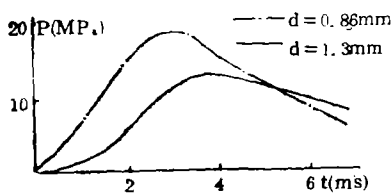
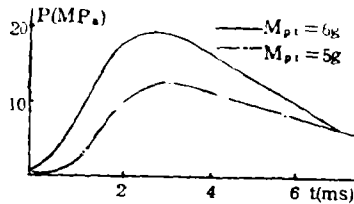
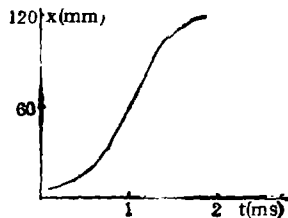
图4 不同粒径的压力时间曲线 ($M_{pt} = 6g$)图5 不同药量的压力时间曲线 ($d = 0.86mm$)

图6 火焰波阵面位置的传播

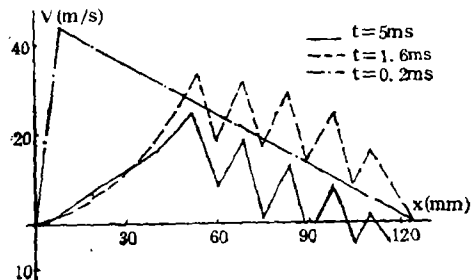


图7 气体速度分布

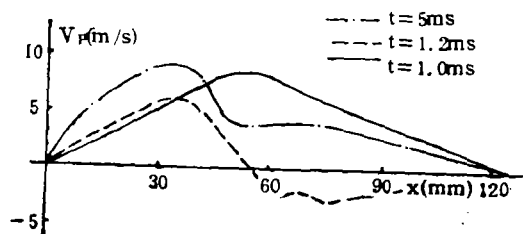


图 8 药粒速度分布

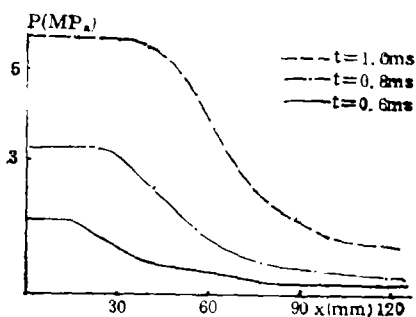


图 9 压力分布

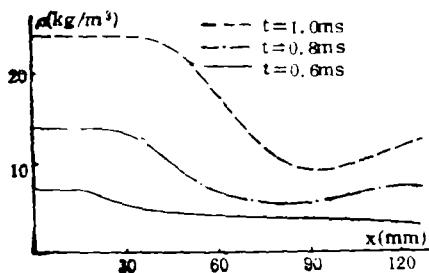


图10 密度分布

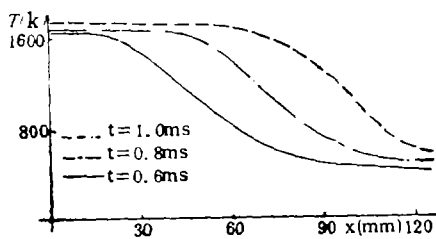


图11 温度分布

图 4 和图 5 分别给出不同药量及不同粒径情况下点火管内的压力时间曲线。相同药量,下粒径越小,压力上升越快,下降亦快;相同粒径下,药量越大,压力上升越快,下降亦快。实验中的趋势与此相一致。

图 6 给出了火焰波阵面的传播规律,图 7 ~图11给出了点火管内参数的变化规律。从这些结果的分析可得到一些有用的结论。

3. 结论

- (1) 实验和计算点火管流量趋势一致;
- (2) 火焰波阵面传播呈现加速传播规律,这与实验观察到的现象一致^[1];
- (3) 压力、密度、温度在药粒已燃区域趋向于一致,速度分布随时间变化较大;
- (4) 药粒粒径和药量大小对点火管内压力时间曲线有显著影响。相同药量下,粒径越小,压力上升和下降越快;相同粒径下,药量越大,压力上升和下降越快。

参 考 文 献

- (1) 金志明,袁亚雄,“内弹道气动力原理”,国防工业出版社,1983年。
- (2) Pertz, A., “Investigation of Pyrotechnic MTV Composition for Rocket Motor Igniters”, AIAA82-1189。
- (3) 张为华,“固体火箭发动机压力建立过程的预示研究”,硕士论文,国防科技大学。

(责任编辑 王慧玉)

EXPERIMENTAL RESEARCH ON A BIROPELLANT THROTTLING LIQUID ROCKET ENGINE WITH CONTROLLABLE INJECTOR AND THROTTLING CAVITATING VENTURI

Gao Hanru, chen Qizhi, Yang Loping

(National University of Defence Technology)

A bipropellant throttling liquid rocket engine with controllable injector and throttling cavitating venturi has been designed, tested and analyzed. In result the relationships of pressure, pressure recovery coefficient of venturi, stroke of injector pintle, propellant flow rate and mixture ratio, combustion efficiency, specific impulse, thrust, stability and response time to control voltage signal are obtained and the corresponding plots and data are also presented.

DETERMINATION OF MASS FLUX FOR IGNITRON

Zhang weihua and Dai Xuheng

(National University of Defence Technology)

An one-dimensional two-phase flow model is put forward for ignitron in solid propellant rocket, and its governing equations are derived. The gas pressure, temperature, density and particle velocity in the ignitron are obtained from solution of the equations by finite difference method. A experimental apparatus has been set up to testify the calculations. From analyzing the results of the calculations and experiments the following conclusions are drawn. First, consistency of the flux calculated with the flux measured proves feasibility of the present calculation method; Second, the particle size and charge of igniter have significant effects on pressure in the ignitron; Third, the gas pressure, temperature and density in the burned area change very little, but the gas and particle velocities vary a lot; Last, the acceleration of flame spreading which comes from the calculations is testified in the experiments.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON PLANAR CASCADE ENTIRE CHARACTERISTIC

Fun Qi and Zhang Huimin *(Nanjing Aeronautical Institute)*

The concept of planar cascade entire characteristics is first introduced, which comprises forward and reversed flow characteristics. A single-row and a tandem planar cascades with equivalent geometrical parameters are investigated experimentally. Their forward and reversed flow characteristics are obtained separately from