

微孔推进剂稳定燃烧条件的初步计算研究*

刘德辉 彭培根

(国防科技大学材料工程与应用化学系, 长沙, 410073)

摘要: 建立了一个描述微孔推进剂燃烧的模型, 并得到了推进剂稳定燃烧时的控制方程组。计算了燃烧室压力与初始空隙率等对燃烧过程的影响, 分析了稳定燃烧时应满足的一些基本条件, 结果与实验值相一致。

主题词: 高燃速推进剂, 微孔率, 燃烧物理学, 稳定燃烧

分类号: V512.3

A PRELIMINARY INVESTIGATION ON THE STABLE BURNING CONDITIONS FOR MICRO-VOID PROPELLANT

Liu Dehui Peng Peigen

(Dept. of Material Science and Applied Chemistry, National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The combustion model of micro-void propellant is presented in this paper. The control equations for stable burning of propellant are set up. The effects of both chamber pressure and initial porosity on combustion process are calculated, and some basic conditions for stable burning are analysed.

Subject terms: High burning rate propellant, Microporosity, Combustion physics, Stable combustion

1 引言

微孔推进剂乃是实现固体推进剂高燃速的重要途径之一, 但对其稳定燃烧条件的计算研究, 目前未见资料报道。微孔推进剂点燃后, 在压力作用下, 高温燃气渗入微孔推进剂装药内部, 孔隙中由于有不断渗入的高温气流, 从而使孔隙壁的温度升高, 当达到发火点后, 装药立即被点燃, 形成一点火阵面 (即对流火焰阵面, 微孔推进剂实现其高燃速的主要原因就在于对流火焰阵面的传播)。燃烧着的推进剂所产生的高温气体只有一部分渗入未燃装药中, 另一部分从相反的方向排出。对于恒压系统, 对流火焰阵面速度随孔隙尺寸的增大而减小; 对固定尺寸的孔隙, 系统压力增大时, 对流火焰阵面速度显著增加。因此, 对流火焰阵面速度取决于压力、孔隙尺寸、孔隙率、无孔推进剂燃速和产物的排气速度。本文对微孔推进剂端面燃烧发动机的燃烧过程及压力与初始空隙率对燃烧过程的影响, 进行了初步的计算研究。

* 收稿日期: 19961213, 修回日期: 19970225

2 物理与数学模型

微孔推进剂燃烧的物理模型如图 1 所示。整个燃烧室可分为三个部分：在装药区，推进剂被加热，但并不燃烧，在气相区，固相反应已结束，只有气体产物存在，而在反应区中，由于对流燃烧的产生，因而存在着固相反应和气相反应。由于在对模型的数学处理时，反应区中的气、固相反应分别考虑，因而该模型可称为一维分离两相流反应模型。

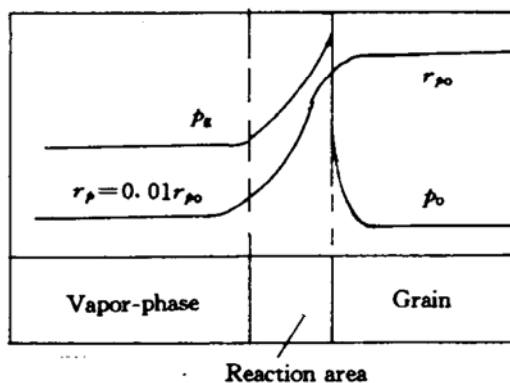


Fig. 1 The sketch of physical model

作者曾研究过封闭的直圆柱形燃烧室内多孔固体

推进剂的燃烧转爆轰 (DDT) 过程^[1]，推进剂 DDT 的物理模型与本文所建立的物理模型主要区别就在于后者中所产生的高温燃气有一部分从发动机内喷出，因此，可采用文献 [1] 中相应的数学处理方法，并考虑到端面燃烧发动机燃烧的实际情况，便可推得微孔推进剂装药燃烧时的控制方程组。这些气相与固相的质量、动量和能量守恒方程，与文献 [1] 所列相同。

当单位时间单位体积的气相质量生成率 Γ 和排出质量 Q_v 相等时发动机燃烧是稳定的。因此，作为对微孔推进剂稳定燃烧的初步研究。我们取 Γ 等于 Q_v ，此时控制方程组应该有解，且求出的解是合理的。如果守恒方程组从某个临界条件开始无解或求出的解无物理意义，此时稳态守恒方程组在物理上不成立，则此条件即可认为是稳定燃烧的边界条件。现在主要考虑气相守恒条件，并已知定压下推进剂稳定燃烧的燃面温度 T_p 为恒定值 (900K~1000K)，和稳态下对流火焰阵面速度即固相移动速度 u_p 为常数，则文献 [1] 所列出的 6 个守恒方程可简化为 4 个常微分方程，即：

气相质量守恒：

$$\frac{d(\rho_1 u_g)}{dx} = 0 \quad (1)$$

固相质量守恒：

$$\frac{d(\rho_2 u_p)}{dx} = -\Gamma \quad (2)$$

气相动量守恒：

$$\frac{d(\rho_1 u_g^2)}{dx} + \Phi \frac{dp_g}{dx} = \Gamma u_p - D - Q_v V \quad (3)$$

气相能量守恒：

$$\frac{d(\rho_1 u_g E_{gT} + \Phi u_g p_g)}{dx} = \Gamma (u_p^2/2 + u_p V) - D u_p - Q \quad (4)$$

在反应区内，可采用龙格-库塔法求解。为解方程 (1) ~ (4)，需要补充一些方程，除方程 (5) ~ (9) 外，其它所需方程详见文献 [1]。

Γ 按如下公式计算：

$$\Gamma = \frac{3\Phi^{\frac{1}{3}}}{r_{p0}\Phi_0} [(1 - \Phi)r_{p0}] \quad (5)$$

D , Q 分别为：

$$D = 0.83/10^6 p_g \Phi \quad (6) \quad Q = \frac{\Gamma}{r \rho_p} [(T_g - T_p) h_{pg}] \quad (7)$$

气体状态方程为:

$$p/\rho = RT \quad (8)$$

由 $Q_v = \Gamma$, 求得排气速度 V 为:

$$V = A_g \Gamma / [\rho_g \Phi_g (1 + \Phi_0)] - u_g \Phi_0 / (1 + \Phi_0) \quad (9)$$

在上述式子中 A_g 为系数, 指数 $\delta = 0.7 \sim 1.0$ 。

3 计算结果与讨论

对某微孔推进剂计算时的输入参量值为: 无孔药密度 $\rho_p = 1720 \text{ kg/m}^3$, 无孔药燃速 $r = 0.022 \text{ m/s}$ (6.86 MPa), $n = 0.4$, 维也里方程频率因子 $b = 4.055 \times 10^{-5} \text{ m/(s} \cdot \text{Pa)}$, 燃气平均分子量 $M = 27.96$, 燃烧室温度 $T_g = 3296 \text{ K}$, 微孔推进剂稳态燃速 $u_p = 2.0 \text{ m/s}$, 气相热容 $C_{vg} = 1733.1 \text{ J/kg}$, 固相热容 $C_{vp} = 1266.5 \text{ J/kg}$, 推进剂初温 $T_0 = 300 \text{ K}$, 固相燃烧温度 $T_p = 900 \text{ K}$, 孔隙距 $r_p = 0.66 \times 10^{-4} \text{ m}$, 初始孔隙含量 $\phi_0 = 0.05 \sim 0.20$ 。

3.1 压力的影响

在 10 MPa ~ 30 MPa 范围内, $\Phi_0 = 0.1$, 计算结果见表 1。由表 1 看出, 随燃烧室压力增大, 燃烧反应愈激烈 (因反应区变窄), 但燃气温度变化不大, 说明在 10 MPa ~ 30 MPa 内, 该推进剂可稳定燃烧。由表 2 还看出, 燃烧室压力不同, 其产物的排气速度不同, 因此, 若要维持在 20 MPa 下的稳态燃烧, 则发动机设计应满足:

$$A_t/A_0 = V_{av}/(k\sqrt{RT})$$

Table 1 The effects of pressure on steady combustion

Chamber pressure (MPa)	Length of convection combustion area (m)	Calculated combustion temperature T_g/K	Maximum exhaust velocity $V_{\max}/(\text{m/s})$	Average exhaust velocity $V_{av}/(\text{m/s})$
9.50	0.080	3266	509.5	390.1
14.36	0.065	3268	405.7	306.5
19.33	0.055	3272	341.0	272.6
24.15	0.050	3274	294.1	225.1
29.07	0.045	3276	257.7	190.9

式中 A_t , A_0 分别为喷管喉部和燃烧室横截面积, R 为比热比, 将 $V_{av} = 273 \text{ m/s}$, $T_g = 3272 \text{ K}$, $k = 1.2$, 代入上式则得到 $A_t/A_0 = 0.231$ 。

3.2 初始孔隙率的影响

在燃烧室压力为 24 MPa 下, 初始孔隙率对燃烧的影响结果见表 2。由表看出, 当 Φ_0 从 0.05 变到 0.20 时, 燃烧室压力和反应区长度基本不变, 说明此时推进剂仍能稳定燃烧。

3.3 无孔药燃速的影响

在 $\Phi_0 = 0.1$ 下, 无孔药燃速对燃烧的影响见表 3。由表 3 可知, 无孔药燃速在 11 mm/s ~

33mm/s (6.86MPa) 范围内, 推进剂仍能稳定燃烧。无孔药燃速太低, 虽然不能导致爆燃或 DDT, 但却使对流燃烧区变长, 燃烧稳定性欠佳; 燃速超过 45mm/s 也能获得稳定燃烧。

Table 2 The effects of primary void content on combustion

Φ_0	Chamber pressure (MPa)	Length of convection combustion area (m)	Calculated combustion temperature T_g/K	Maximum exhaust velocity $V_{\max}/(m/s)$	Average exhaust velocity $V_{av}/(m/s)$
0.05	24.02	0.055	3175	289.7	232.2
0.10	24.15	0.050	3474	294.1	225.1
0.15	24.13	0.050	3290	289.2	249.0
0.20	24.23	0.045	3297	297.1	234.0

Table 3 The effects of burning rate of void-free grain on combustion

Burning rate of void-free grain (mm/s)	Chamber pressure (MPa)	Length of convection combustion area (m)	Calculated combustion temperature T_g/K	Maximum exhaust velocity $V_{\max}/(m/s)$	Average exhaust velocity $V_{av}/(m/s)$
11	23.11	0.100	3203	146.2	127.7
22	24.15	0.050	3274	294.1	225.1
33	23.56	0.030	3307	448.0	292.2

综上所述, 由 6.86MPa 燃速为 11mm/s~33mm/s 无孔药所制得的微孔推进剂在 $\Phi_0 = 0.05 \sim 0.20$ 时可在低于 30.0MPa 的条件下稳定燃烧。实验表明, 当 $\Phi_0 = 0.08 \sim 0.13$ 时, 无孔药燃速为 22mm/s (6.86MPa 下) 的微孔推进剂可在 20MPa~25MPa 内稳定燃烧。这说明二者是相互一致的。

4 结 论

- (1) 本文所建立的一维分离两相流反应模型适合于研究微孔推进剂稳定燃烧的条件。
- (2) 计算所得稳定燃烧的条件与实验结果相符合。

参 考 文 献

- 1 刘德辉等. 固体推进剂燃烧转爆轰模拟计算研究. 推进技术, 1993(1)