

固体燃料冲压发动机内流物性 参数自动计算^{*}

陈 军 武晓松

张家骅

(南京理工大学机械学院, 南京, 210094) (航天工业总公司31所, 北京, 100074)

摘 要: 通常固体燃料冲压发动机内流流动过程的模拟计算中, 热力参数及输运系数都视作常数, 实际上, 它们随当地温度、组分等的改变而在发生变化。为确定热力参数和输运系数在各个截面上的变化规律, 研究了热力组分的平衡算法, 提供了简单实用的计算模型。计算结果显示, 把物性参数视作常数会带来较大误差, 说明了考虑物性参数在各个截面上的变化是非常必要的。

主题词: 固体燃料冲压发动机, 物性参数⁺, 输运系数⁺, 流体动力学, 计算流体力学

分类号: V435.12

CALCULATION OF PHYSICS PERFORMANCE PARAMETERS OF INTERNAL FLOW FLUID FOR SFRJ

Chen Jun Wu Xiaosong

(School of Mechanics, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Zhang Jiahua

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: Usually thermodynamic and transportation parameters (such as ratio of specific heat, viscosity coefficient etc.) were treated as constants in numerical simulation of fluid of SFRJ. In fact, these parameters changed with local temperature, species etc. A simple but useful calculation model which determine thermodynamic and transportation parameters by equilibrium algorithm of thermodynamic species was presented. The results show that constant physical performance parameters can bring out considerable errors which illustrate that it is essential to consider the alternation of physical parameters at different area.

Subject terms: Solid fueled ramjet, Physics performance parameters⁺, Transporting coefficient⁺, Fluid dynamics, Computational fluid dynamics

1 引 言

固体燃料冲压发动机(简称SFRJ)的稳定工作机理一直令人困惑,特别是它在低压下表现出的燃烧稳定性、燃料流量的自适应调节能力等,虽已被人们发现,但却难以解释;采用流场数值计算模拟发动机的工作过程,无疑可为揭示其机理提供较新的途径。流场数值计算需要内流的一些物性参数,而在一般的处理中都视其为常数,本文通过平衡组分计算,试图建立各个截面上的物性参数的计算模型,从而确定它们带来的误差。

* 收稿日期: 1998-11-23, 修回日期: 1999-03-15

2 数学及物理模型

2.1 内流燃气组分计算

固体燃料冲压发动机内的燃烧产物组成十分复杂, 包括: n 种气相组分($i = 1, 2, \dots, n$); m 种凝相组分($j = 1, 2, \dots, m$); l 种元素($k = 1, 2, \dots, l$)。按化学元素守恒原理得

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} n_{gi} + \sum_{j=1}^m a_{jk} n_{cj} = N_k, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

式中 a_{ik} 和 a_{jk} 为当量系数; n_{gi} 和 n_{cj} 分别表示单位质量燃烧产物中气相组分 i 和凝相组分 j 的摩尔数, 下标 g 表示气相, c 表示凝相; N_k 为单位质量燃烧产物中 k 元素的总原子数, 包括空气中引射的 N_2 和 O_2 的原子数。系统自由能 G 在平衡时应达到最小, $\delta G = 0$; 燃烧产物总的自由能等于产物中各组分的自由能之和, 即

$$G = \sum_{i=1}^n g_i n_{gi} + \sum_{j=1}^m g_j n_{cj} \quad (2)$$

式中 g 表示 1 mol 组分理想气体的自由能, 它等于该组分的化学位。为满足自由能最小的同时满足质量守恒方程 (1), 引入 Lagrange 乘子 λ , 对式 (2) 构造新的 Lagrange 变换式

$$F(n, \lambda_k) = G + \sum_{k=1}^l \lambda_k \left[N_k - \sum_{i=1}^n a_{ik} n_{gi} - \sum_{j=1}^m a_{jk} n_{cj} \right] \quad (3)$$

根据极值条件可求解 $n + m + l + 1$ 个未知数 (n 个 n_{gi} , m 个 n_{cj} , l 个 λ_k 和 1 个 n_g)^[1, 2]。

2.2 内流热力参数计算

对于平衡流动, 在定压下对温度求导可建立的方程组:

$$\begin{cases} \left| \frac{\partial n n_{gi}}{\partial n T} \right| - \sum_{k=1}^l a_{ik} \left| \frac{\partial \lambda_k}{\partial n T} \right|_p - \left| \frac{\partial n n_g}{\partial n T} \right|_p = \frac{(H_T^0)_i}{R^0 T} & i = 1, 2, \dots, n \\ - \sum_{k=1}^l a_{jk} \left| \frac{\partial \lambda_k}{\partial n T} \right|_p = \frac{(H_T^0)_j}{R^0 T} & j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} n_{gi} \left| \frac{\partial n n_{gi}}{\partial n T} \right|_p + \sum_{j=1}^m a_{jk} n_{cj} \left| \frac{\partial n n_{cj}}{\partial n T} \right|_p = 0 \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n n_{gi} \left| \frac{\partial n n_{gi}}{\partial n T} \right|_p + n_g \left| \frac{\partial n n_g}{\partial n T} \right|_p \quad (6)$$

式中 $(H_T^0)_i / (R^0 T)$ 可查 JANAF 表计算^[2]。由式 (3) ~ (6) 三类 $n + m + l + 1$ 个方程组成的方程组, 即可求解三类 $n + m + l + 1$ 个热力学导数, 即 $(\partial n n_{gi} / \partial n T)$ 、 $(\partial n n_{cj} / \partial n T)$ 以及 $(\partial \lambda_k / \partial n T)_p$ 。求出热力学导数后, c_p 由焓确定, $(\partial n V / \partial n T)_p$ 便可由状态方程得出。用同样的方法可求出 $(\partial n n_g / \partial n p)_T$, 从而求得 $(\partial n V / \partial n p)_T$ 。其余热力学导数便可由之推出, 平衡流动的热力参数也便确定了。

2.3 内流输运系数计算

由刚球分子模型和 Maxwell 速度分布规律可导出粘性系数、导热系数和扩散系数的计算公式。考虑分子弹性模型时, 采用 Lennard-Jones 势, 可以修正为下述公式:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{\frac{1}{2}}}{\sigma^2 \Omega_\mu}, \quad \lambda = 8.320 \times 10^{-2} \frac{(T/M)^{\frac{1}{2}}}{\sigma^2 \Omega_\lambda}$$

其中 Ω_μ , Ω_λ 为 Lennard-Jones 参数, 不同的分子, 查表可得^[3]; M , T , p , σ 分别为摩尔质

量 (kg/kmol)、绝对温度 (K)、绝对压力 (Pa) 和碰撞直径 (0.1 nm)。按上述单位计算, μ , λ 的单位分别为 Pa s, W/ (m K)。

多原子分子气体导热系数 λ' 的计算要作修正, 建议:

$$\lambda' = \lambda \left| \frac{4c_v}{15R^0} + \frac{3}{5} \right|$$

其中 c_v 为摩尔定容热容; R^0 为普适气体常数。多元气体混合物 ($s \geq 2$) 要进行迭加计算:

$$\mu = \sum_{i=1}^s \left| \mu_i \right| 1 + \sum_{j \neq i, j=1}^s \varphi_{ij} \left| \frac{X_j}{X_i} \right|^{-1}, \quad \lambda = \sum_{i=1}^s \left| \lambda_i \right| 1 + \sum_{j \neq i, j=1}^s A_{ij} \left| \frac{X_j}{X_i} \right|^{-1}$$

式中 φ_{ij} 、 A_{ij} 的计算见文献 [3]; s 为组分总数; X_i 、 X_j 为组分 i 、 j 的摩尔分数。

3 各截面上的内流热力参数及输运系数计算结果

3.1 平衡组分及热力参数

给定固体燃料配方及理论空气量 L_{st} 、余气系数 α 、空气总温 T_{ta} (520 K)、燃烧室压力 p_c (0.4 MPa), 经过热力计算可得燃烧产物的平衡组分, 见表1。计算中考虑了70多种组分 (包括气相组分和凝相组分), 表1中只列出了含量较大的主要组分。计算得热力参数及理论燃烧温度见表2。与文献 [4] 的结果相比, 误差小于2%。

Table 1 Mole fraction and mole number of equilibrium species

Species	Ar	CO ₂	HCl	H ₂ O	NO	N ₂	OH	O ₂	Total
Mole fraction	0.008 86	0.103 08	0.001 17	0.066 27	0.005 04	0.748 46	0.001 09	0.065 00	1.0
Mole number	0.301 51	3.509 66	0.039 77	2.256 36	0.171 48	25.493 8	0.037 26	2.213 23	34.047 87

Table 2 Error between the results and record standard

Items	Computational results	Document data	Error/ %
Theoretical temperature T_{eth} / K	2 051	2 018	1.6%
Ratio of specific heat γ	1.245	1.25	0.4%
Mean gas constant R / (J/ (kg K))	283.1	282.8	0.1%
Mean molar mass/ (kg/mol)	0.029 4	0.029 4	0.1%

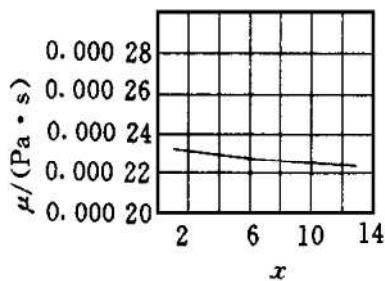
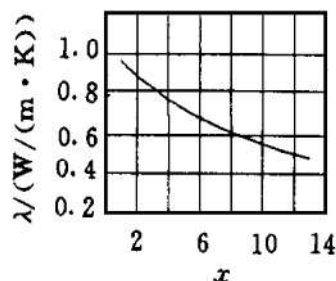
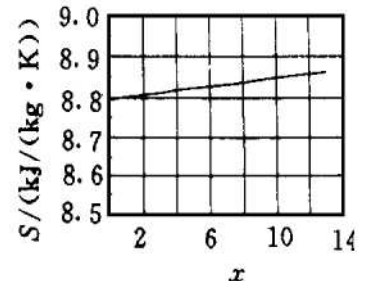
3.2 各截面上的热力参数和输运系数

在进一步的多维流动计算中, 需考虑压力、温度与组分摩尔数的耦合。惰性气体如 N_2 、Ar 等, 在各个截面上的组分摩尔数保持不变; 来流中的 O_2 , 逐渐消耗而减少; 其余组分, 因不断生成而逐渐递增。主要产物的摩尔分数在 x 方向上的分布结果见表3 (装药的无量纲长度为 13)。

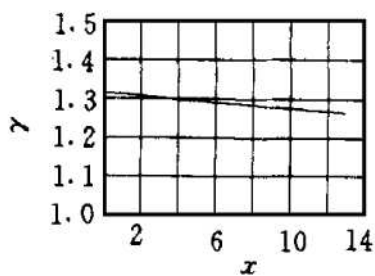
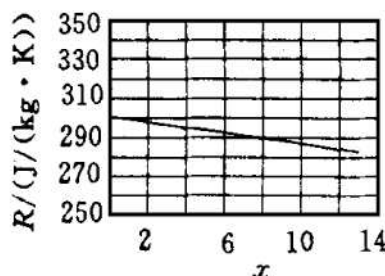
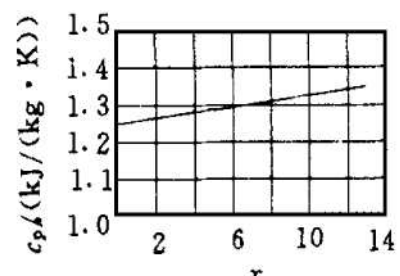
Table 3 Mole fraction distributing of main species in x -direction

Species	0	2	4	6	8	10	13
Ar	0.008 8	0.008 8	0.008 8	0.008 8	0.008 8	0.008 8	0.008 9
CO ₂	0	0.015 8	0.031 6	0.047 4	0.063 3	0.079 2	0.103 1
HCl	0	0.000 2	0.000 4	0.000 5	0.000 7	0.000 9	0.001 2
H ₂ O	0	0.010 1	0.020 3	0.030 5	0.040 7	0.050 9	0.066 3
NO	0	0.000 8	0.001 5	0.002 3	0.003 1	0.003 9	0.005 0
N ₂	0.743 4	0.744 2	0.745 0	0.745 9	0.746 7	0.747 5	0.748 5
O ₂	0.247 8	0.219 8	0.191 8	0.163 8	0.135 6	0.107 4	0.065 0

图1为粘性系数在 x 方向上的变化规律, 可见把粘性系数视作常数会带来约4%的误差; 图2为导热系数在 x 方向上的变化规律, 从图中可以看出前后截面的变化约有60%; 图3是在 x 方向上熵的变化规律, 由于质量加入以及组分的变化, 熵增现象是合乎道理的。

**Fig. 1 Viscosity coefficient****Fig. 2 Conductivity coefficient****Fig. 3 Entropy coefficient**

在流场计算中, 用到较多的是比热比 γ , 图4为比热比在各个截面上的变化, 可见前后误差达4%。图5为气体常数的分布, 图6为定压比热容的分布, 从中可见差别的大小。

**Fig. 4 Ratio of specific heat****Fig. 5 Gas constant****Fig. 6 Constant pressure specific heat**

参 考 文 献

- 1 李宜敏. 固体火箭发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- 2 Sanford Gordon. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks, and chapman-jouguet detonations. NASA SP-273, 1974.
- 3 万俊华. 燃烧理论基础. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1992.
- 4 刘兴洲. 飞航导弹动力装置. 北京: 宇航出版社, 1992.