

# 一种新的模拟固体火箭 发动机射流铝颗粒燃烧的方法

靳瑞斌, 向红军

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

**摘 要:** 在总结以往火箭射流数值模拟的基础上, 采用多组分有限速率化学反应模型模拟气体在喷管后的复燃, 并引入拉格朗日颗粒轨道模型来模拟由 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成的混合颗粒。通过快速欧拉模型得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  烟尘的速度场, 然后通过质量、动量、能量源项将气体相、颗粒相和烟尘相三者联立耦合计算来模拟铝颗粒的燃烧和燃烧产生的烟尘颗粒对整个射流结构的影响, 为以后更准确地计算射流红外辐射特性提供了理论工具。

**关键词:** 固体火箭发动机; 燃气射流; 铝颗粒; 燃烧

**中图分类号:** V435-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2010) 06-0025-05

## New method of numerical simulation of combustion aluminium droplet in exhaust plume for SRM

JIN Rui-bin, XIANG Hong-jun

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Multi-component chemical reaction models with finite rate are used to simulate the exhaust plume on the basis of summarization for the previous numerical simulation of the rocket jet. Lagrangian discrete phase model is used to simulate the particles composed of Al and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The  $\text{Al}_2\text{O}_3$  smoke velocity field is obtained with the fast Eulerian model. The gas phase, particulate phase, and smoke are coupled with source terms of mass, momentum and energy. The impact of aluminium particle combustion on the entire jet structure also can be simulated in order to accurately calculate the infrared radiation characteristics of the exhaust plume.

**Keywords:** solid rocket motor; exhaust plume; aluminium particle; combustion

## 0 引言

很多固体火箭发动机推进剂中都加入金属颗

粒来提高燃烧效率, 铝颗粒燃烧所产生的热量能占总热量的 30%以上, 对发动机的总比冲有很大贡献, 同时铝的燃烧能抑制燃烧室的不稳定燃烧。但金属颗粒的加入, 使燃烧室、喷管、射流

收稿日期: 2010-10-20; 修回日期: 2010-11-08

基金项目: 国家航天技术支撑项目

作者简介: 靳瑞斌 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究领域为固体火箭发动机工作过程仿真

变成复杂的气固两相流,导致推力损失,加速了燃烧室、喷管壁面的烧蚀和腐蚀,同时也使飞行器射流的红外辐射加剧。

国内外对铝颗粒的燃烧进行了大量研究,洪滔<sup>[1]</sup>研究了铝颗粒的激波点火机制;杨丹<sup>[2]</sup>分别采用拉格朗日模型和双流体模型对喷管内的两相流进行了计算比较。国外 Widener J F 和 Beckstead M W 则通过实验深入研究了铝的燃烧机理,分析了各种外界因素(压力、温度、氧化物浓度、颗粒直径等)对燃烧速率的影响并提出了一套经验公式<sup>[3]</sup>。

本文在多组分有限速率化学反应模型的基础上,通过源项将气体相、颗粒相、烟尘相三者联系起来,综合分析了铝的燃烧、氧化铝的附着、燃烧所产生的烟尘等复杂现象以及对射流结构的影响。

## 1 计算模型

### 1.1 研究对象

铝是一种气相燃烧金属,当铝颗粒点燃后,铝将沸腾并且温度保持在自身沸点附近,一部分燃烧产物形成致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  氧化层包裹在尚未燃烧的液态 Al 表面,阻止其进一步燃烧,这就是很多文献提到的点火延迟的原因;另一部分则形成微小( $\sim 1\ \mu\text{m}$ )的烟尘颗粒。但是,在整个燃烧区域中仍然存在已经气化的铝蒸气,它们形成一个 2~4 倍于颗粒直径的( $\sim 30\ \mu\text{m}$ )火焰区域,我们把这个区域认为是一个较大混合燃烧“颗粒”。在这个火焰区域里,铝和氧化物发生着剧烈反应,还有铝蒸气的蒸发,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等燃烧产物附着、沉积种种复杂的物理化学过程。复合颗粒的燃烧见图 1。

在这个“颗粒”内部,没有气态  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  一旦超过它的沸点就会电离分解。但是由于燃烧所产生的热量不足以把所有氧化产物都保持在气态,故一些  $\text{Al}_2\text{O}_3$  聚集并凝结在 Al 颗粒的表面。这个凝结放热过程保存火焰温度一直在 3800 K 左右。

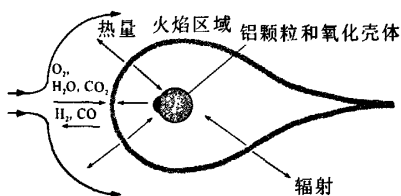


图 1 复合颗粒燃烧示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite particles combustion

为了尽可能准确地描述发动机喷管及其射流的复杂流动、气相多组分反应、铝颗粒的燃烧现象,氧化铝烟尘的附着与聚集,需要分别研究气体、颗粒和烟尘三者和他们之间的相互耦合关系。

### 1.2 计算方法

#### 1.2.1 多组分气体相

针对尾焰流场的特点,采用二维轴对称简化模型和非稳态欧拉方程求解。湍流模型采用两方程的修正的  $k-\varepsilon$  模型 (Realizable  $k-\varepsilon$  turbulent model)。该模型能很好地处理喷管中喷出的气流与周围大气的相互掺混、卷吸的复杂的物理过程。

处理化学反应采用有限速率化学反应模型,其在本问题中的适用性已由 Rodionov 等人进行了验证<sup>[4]</sup>,并采用 C/H/O/CL 系统 11 种组分,17 个方程的反应模型<sup>[5]</sup>进行计算。这不是本文的重点,这里不再冗述。

#### 1.2.2 颗粒相

对于尺寸较大的混合颗粒,采用拉格朗日颗粒轨道模型。对于单一的颗粒,它满足下面的方程:

$$\frac{dx_p}{dt} = v_p, \quad \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (u(x_p) - v_p), \quad \frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{\tau_{p,\theta}} (T(x_p) - T_p) \quad (1)$$

$$\text{上式中: } \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu f(\text{Re}_p)}, \quad \tau_{p,\theta} = \frac{C_{\text{EP}} \rho_p d_p^2}{12kf_\theta(\text{Re}_p)}$$

$$\text{阻力系数 } f(\text{Re}_p) \text{ 采用 } C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2}, \text{ 式}$$

中各系数根据 Ma 进行了压缩性修正<sup>[6]</sup>。

随着颗粒向下游流动, 一部分的 Al 蒸发并燃烧; 相反, 燃烧产物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  通过与周围的烟尘不断碰撞和集聚, 数量逐渐增多。所以说, 复合颗粒刚进入燃烧室以 Al 为主, 而到射流末段则以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主。

我们把复合颗粒 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量的不断变化通过它们各自的质量变化率来表示:

$$\frac{dm_{\text{Al}}}{dt} = -\dot{m}_{\text{bu}}, \quad \frac{dm_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{dt} = -\dot{m}_{\text{dep}} \quad (2)$$

$\dot{m}_{\text{bu}}$  表示 Al 由于燃烧和蒸发的损耗速率;  $\dot{m}_{\text{dep}}$  表示  $\text{Al}_2\text{O}_3$  由于碰撞和集聚的增加速率。 $\dot{m}_{\text{bu}}$  由下式得出<sup>[3]</sup>:

$$\dot{m}_{\text{bu}} = c\rho_{\text{Al}} T^{1.57} (x_p) p^{0.2} (x_p) \chi_{\text{eff}}^{0.39} D_{\text{rel}} d_p^{1.1} \psi_{\text{Al}} \quad (3)$$

式中  $c = 2.885 \times 10^{-13}$ ;  $\psi_{\text{Al}}$  代表 Al 在颗粒中的体积分数。

$$\psi_{\text{Al}} = \frac{\Phi_{\text{Al}} \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\Phi_{\text{Al}} \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} + (1 - \Phi_{\text{Al}}) \rho_{\text{Al}}}$$

上式中  $\Phi_{\text{Al}} = \frac{m_{\text{Al}}}{m_{\text{Al}} + m_{\text{Al}_2\text{O}_3}}$  为 Al 的质量分数。

$\chi_{\text{eff}}$  为有效氧化物浓度, 它综合考虑了  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  等对 Al 燃烧有影响的氧化物的作用, 将它们的影响加权相加即得

$$\chi_{\text{eff}} = \chi_{\text{O}_2} + 0.58\chi_{\text{H}_2\text{O}} + 0.22\chi_{\text{CO}_2}$$

式(3)中  $D_{\text{rel}}$  表示  $\text{H}_2$  相对于其它氧化物扩散率对 Al 燃烧的影响,  $D_{\text{rel}} = 1.0 + 2.7\chi_{\text{H}_2}$ 。

混合颗粒的氧化壳层随着与烟尘的碰撞和集聚不断增加, 这种碰撞是由于颗粒与周围烟尘的速度差所造成的, 这里我们忽略了烟尘颗粒的直径而采用了它的浓度  $C_s$  来代替, 如下式:

$$\dot{m}_{\text{dep}} = \frac{\pi}{4} d_p^2 \left| |V_p - u(x_p)| \right| C_s \eta_c \quad (4)$$

上述分析没有考虑 Al 的蒸发和每个颗粒燃烧的复杂性, 因此在上式中引入一个效率因子  $\eta_c$ , 根据与实验结果对比修正, 此处取 0.25。

### 1.2.3 烟尘相

对于颗粒直径很小的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  烟尘相, 必须将它视为连续相。如果烟尘完全随气体而流动, 那么只需要再求解一个颗粒浓度的标量场即可, 这

样避免了再为颗粒而求解复杂的 NS 方程组。但是, 实际上颗粒速度并不完全与气体速度相同, 尤其是在喷管收敛和扩张段, 而且这种简化无法考虑烟尘的堆积和对壁面的冲击效果。

为此, Ferry 和 Balachandrar<sup>[7]</sup>提出了一种平衡欧拉方法来解决上述矛盾, 他假定烟尘速度由下式显式得到:

$$w_s = u - \tau_s \frac{Du}{Dt} \quad (5)$$

式中  $\tau_s$  为迟豫时间, 定义为  $\tau_s = \rho_s d_s^2 / 18\mu$ , 其中  $d_s$  为烟尘的平均直径,  $D/Dt$  为全导数。这样当气体加速或减速时, 全导数不为 0, 颗粒速度  $w$  和气体速度  $u$  就不再相等。速度差  $w_s - u$  将正比于  $\tau_s$ 。

平衡欧拉方法同样可以应用于温度场:

$$T_s = T - \tau_{s,\theta} (DT/Dt) \quad (6)$$

此时温度迟豫时间  $\tau_{s,\theta} = C_{p,s} (\rho_s d_s^2 / 12k)$ 。

当速度场, 温度场都求出以后, 需要求解的微分方程只剩下烟尘浓度的对流扩散方程。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \nabla \cdot (w_s C_s) = \nabla \cdot (D_s \nabla C_s) + S_s^p \quad (7)$$

扩散系数  $D_s$  需要考虑烟尘的碰撞, 剪切扩散等, 与  $C_s$  有很大关系, 在本文中它只取常数。而源项  $S_s^p$  代表了复合颗粒燃烧对烟尘的贡献作用, 它将在式(10)中给出。

### 1.2.4 源项

由于混合颗粒的燃烧, 碰撞和集聚, 它影响着气体相, 烟尘相的质量、动量、能量。在欧拉方程的求解中, 将通过源项将气体相、烟尘相、混合颗粒紧紧地耦合起来。

对气体相的源项:

$$\left. \begin{aligned} \text{质量源项: } S_{p,i}^p &= L\dot{m}_{\text{bu},i} (1 - M_R) \\ \text{动量源项: } S_{p,u,i}^p &= LF_{p,i} + L\dot{m}_{\text{bu},i} v_{p,i} + S_{p,i}^p u(x_{p,i}) \\ \text{能量源项: } S_{p,e,i}^p &= S_{p,u,i}^p u(x_{p,i}) + L\dot{m}_{\text{bu},i} h_b \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

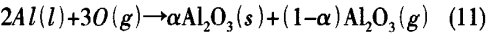
其中  $M_R = M_{\text{Al}_2\text{O}_3} / (2M_{\text{Al}})$  代表 Al 燃烧的摩尔质量比率;  $F_{p,i}$  表示作用在颗粒上的阻尼力, 表达式如下:

$$F_{p,l} = -\frac{\pi}{6} d_{p,l}^3 \frac{\rho_{p,l}}{\tau_{p,l}} (v_{p,l} - u(x_{p,l})) \tag{9}$$

同时，每个颗粒由于碰撞和堆积，对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 烟尘来说相当于一个个小的“汇”，烟尘浓度在这些点上都会有所下降。因此，颗粒对烟尘的作用体现在烟尘方程的附加源项上，如下：

$$S_{s,l}^p = L \left[ \dot{m}_{bu,l} M_R - \dot{m}_{dep,l} \right] \tag{10}$$

对于各相之间的热量传递，主要考虑如下基本反应方程式：



式中 α 表示凝结成固态烟尘颗粒的比例，当局部温度 T 高于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的沸点 T<sub>b,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> 时，α=0；

当 T<<T<sub>b,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>，此时 α=1，并且如果还有气相的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，会继续凝结成烟尘颗粒并继续释放热量。

$$h_p = \alpha h + (1-\alpha)(-h_{ev} + h_{reac}) \tag{12}$$

上式中各反应热取值见表 1。

表 1 典型反应放热量 J/kg·k  
Tab. 1 Typical reaction heat

热 量	数 值
气化热 $h_{ev}$	8240.0
反应热 $h_{reac}$	7157.0
冷凝热 $h_{cond}$	29326.0
凝固热 $h_{solid}$	0.0

最后，最为连续相的烟尘并不能完全与气体相速度相同，它的速度相对气体有一个滞后效应，这个可以通过下面的动量源项来表示：

$$S_{p,\mu}^s = -L \dot{m}_{bu,l} M_R w(x_{p,l}) \tag{13}$$

2 算例及结果分析

为了简化计算模型，计算区域采用二维轴对称网格，在壁面处和喷管出口后缘速度剪切层进行了加密，取燃烧室出口（及喷管入口）为燃气进口边界条件，给定总压 9.5 MPa、总温 3100 K 和混合颗粒的初始质量流量 0.6 kg/s，复合颗粒初始直径 10 μm 和 Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 各占 80%和 20%。

外流则采用静止大气条件。烟尘相在喷管入口处给定的第一类边界条件，值为 0.01，在其他处给定第二类边界条件(dC/dn=0)。出口处温度分布见图 2。

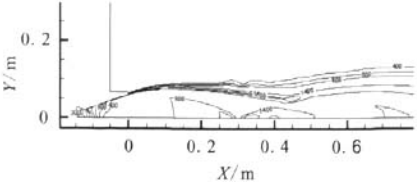


图 2 出口处温度分布

Fig. 2 Temperature distribution near nozzle exit

从图 2 可以看出在同一轴向截面处，在内流与外界混合层，由于复燃的大量放热，温度要比靠近轴线处高很多。

从图 3 可以看出，颗粒轨迹在喷管扩张段靠近壁面存在一个盲区，也叫“无颗粒区”<sup>[2]</sup>。这是与实验现象不符的。以往数值计算上的解释是由于颗粒惯性比气体大很多，在通过喉部后很难迅速改变流动方向。而通过本文的多相耦合计算，虽然在这个盲区没有燃烧的复合颗粒，但是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 烟尘还是有的，这可以从图 4 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 浓度得到证实。这与实验观察是吻合的，也解决了以往单一颗粒模型计算无法解释这种现象的难题。



图 3 颗粒轨迹

Fig. 3 Trajectories of particles

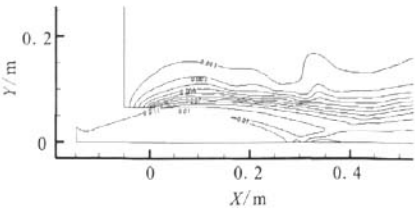


图 4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 烟尘质量浓度分布

Fig. 4 Distribution of alumina dust concentration

从图 6 中混合颗粒的各组分质量变化率可以看出，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 附着速率在横坐标 0.3~0.5m 处(及喷

管扩张段)急剧增加,这是由于公式(4)中气体速度  $u(x_p)$  在扩张段迅速增长而导致  $||V_p - u(x_p)||$  迅速增大的缘故,观察图 5 也可以得出相同结论。

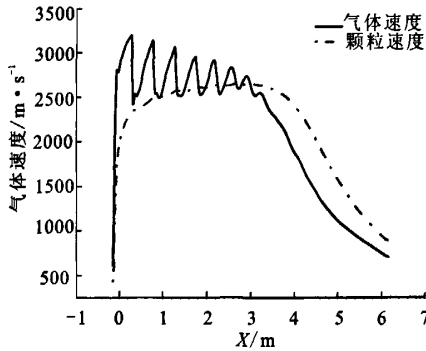


图 5 气体、颗粒速度沿轴向变化

Fig. 5 Change of gas and particle velocity along axis

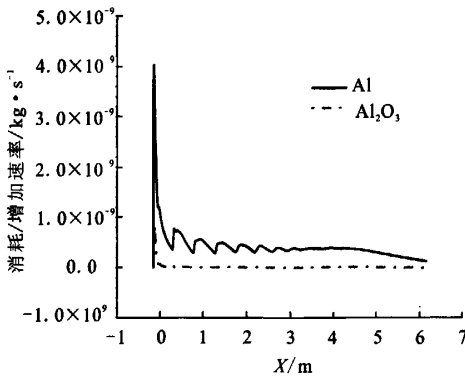


图 6 颗粒消耗/堆积速率沿轴向变化

Fig. 6 Particle consumption/accumulation rate changes along axis

### 3 结论

本研究获得以下结论:

1) 通过引入  $Al_2O_3$  烟尘相,可以解释以往单一的拉格朗日模型计算得到的喷管扩张段无颗粒的现象,与实验结果相吻合。

2) 结合拉格朗日颗粒轨道模型和快速欧拉法,并通过源项将它们与气体相很好地耦合计算,可以较准确地模拟发动机射流颗粒的复杂燃烧,证明了这种新方法的可行性,为以后进一步地研究射流的红外辐射提供了理论基础。

### 参考文献:

- [1] 洪滔,秦承森. 铝颗粒激波点火机制初探[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23 (4): 295-299.
- [2] 杨丹. 固体火箭发动机气-固两相流的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [3] WIDENER J F, BECKSTEAD M W. Aluminium combustion modeling in solid propellant combustion products, A-IAA, 1998-3824 [R]. USA: AIAA, 1998.
- [4] RODIONOV A V, PLASTININ Y A, DRAKES J A, et al. Modeling of multiphase alumina-loaded jet flow fields, A-IAA1998-3462 [R]. USA: AIAA, 1998.
- [5] TROYES J, DUBOIS I, BORIE V, et al. Multi-phase reactive numerical simulations of a model solid rocket motor exhaust jet, AIAA 2006-4414 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [6] LIFT R C, GRACE J R, WEBER M E. Bubbles, drops, and particles [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [7] FERY J, BALACHANDAR S. A fast Eulerian method for disperse two-phase flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27: 1199-1226.
- [8] 徐学文,王连生,牟俊林. 某固体火箭发动机点火启动过程三维流场一体化仿真[J]. 固体火箭技术, 2008, 31 (1): 8-14.

(编辑: 王建喜)