

液体推进剂液滴高压蒸发研究

周进 吴道洪 庄逢辰

(航天技术系)

摘要 本文改进了现有的液体推进剂液滴高压蒸发模型,提出了一个计算高压下液滴蒸发时环境介质气体在液滴中溶解的子模型,该模型中采用了改进的R-K气体状态方程。利用本模型对丙烷在氮气中的高压蒸发进行了计算。结果表明在高压下液滴蒸发时间随压力和环境温度的增加而减小,当压力超过某临界值时,液滴将达到超临界状态。高压下环境介质气体在液滴中的溶解是非常明显的,并且压力愈高溶解性愈大,因此在推进剂高压燃烧中必须考虑溶解性对于液滴蒸发的影响。

关键词 推进剂, 溶解性, 高压蒸发

分类号 V434.13

在航天技术高速发展的今天,各类大型液体火箭发动机燃烧室的设计压力变得愈来愈高,因此对于液体推进剂液滴高压蒸发和燃烧的研究已经成为目前燃烧科学研究的一个重要领域,并已提出了一些液滴高压蒸发和燃烧的基本模型^{[1]~[3]}。但在这些模型中都没有考虑环境介质气体在液滴中溶解对于蒸发和燃烧的影响。然而,实验表明在高压下这种溶解往往是非常明显的,并对液滴的蒸发和燃烧有显著的影响。另外,在这些模型中对于气体热力学状态的描述也是比较粗糙的,通常都采用理想气体方程或普通的R-K方程。而理论与实验的比较表明,在高压下尤其是在临界点附近,理想气体方程和普通R-K方程具有较大的误差,甚至给出错误的结果。

1 理论模型

对于高压下液滴的亚临界蒸发,由于气液相密度相差较大,气相输运特征时间远大于液相输运特征时间,因此可假定液滴周围的气相过程是准定常的。此外模型还假定液滴的蒸发是球对称的,液滴内部温度均匀,汽液两相达到热力学平衡状态。根据上述假定可建立以下液滴高压蒸发模型。

1.1 液滴蒸发速率

在准定常假定下,考虑蒸发所引起的液滴表面移动,液滴的蒸发速率可表示为:

$$m_v = \frac{2\pi\rho D N u}{AB} \ln \left[\frac{1 - BY_\infty}{1 - BY_s} \right] \quad (1)$$

式中,
$$A = 1 + \frac{4\pi r_s^2 \rho_{vs}}{\dot{m}_v} \frac{dr_s}{dt}; \quad B = 1 + \frac{\rho_{es}}{\rho_{vs}} \left(1 - \frac{1}{A}\right)$$

r_s 为液滴半径, ρ 为气体密度, D 为扩散系数, Y_∞ 、 Y_s 分别为环境介质和液滴表面处燃料蒸汽浓度, ρ_{vs} 、 ρ_{es} 分别为液滴表面处燃料蒸汽和介质气体的密度, Nu 为 Nusselt 数。

1.2 液滴温度的变化

对于内部温度均匀的液滴, 其温度的变化可由以下方程描述

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{3\lambda Nu \bar{Z}}{2C_{pl} r_s^2 \rho_l} \left[\frac{T_\infty - T_s}{e^z - 1} - \frac{\Delta H}{AC_{pv} + (A-1)C_{pe}\rho_{es}/\rho_{vs}} \right] \quad (2)$$

式中,
$$\bar{Z} = \frac{\dot{m}_v [AC_{pv} + (A-1)C_{pe}\rho_{es}/\rho_{vs}]}{2\pi\lambda r_s Nu}$$

C_{pl} 为液滴比热, ρ_l 为液滴密度, λ 为气相导热系数, C_{pv} 、 C_{pe} 分别为燃料蒸汽比热和介质气体比热, ΔH 蒸发潜热。

1.3 液滴半径的变化

根据质量守恒, 液滴蒸发时半径的变化可表示为

$$\frac{dr_s}{dt} = \frac{\dot{m}_v - \frac{4}{3}\pi r_s^3 \frac{d\rho_l}{dt}}{4\pi r_s^2 \rho_l} \quad (3)$$

1.4 改进的 R-K 状态方程

普通 R-K 方程用于高压计算之所以误差较大, 其原因主要是采用了恒定不变的 Ω_a 、 Ω_b 和过于简单的混合规则, 为此根据文献[4]可对其做如下改进:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)} \quad (4)$$

当用于混合物时, 混合规则为

$$b = \sum_1^n Y_i b_i; \quad b_i = \frac{\Omega_{bi} RT_{ci}}{P_{ci}}; \quad a = \sum_1^n \sum_1^n Y_i Y_j a_{ij}$$

$$a_{ij} = \frac{(\Omega_{ai} + \Omega_{aj}) R^2 T_{cij}^{2.5}}{2P_{cij}}; \quad P_{cij} = \frac{Z_{cij} RT_{cij}}{V_{cij}}$$

$$V_{cij}^{1/3} = \frac{1}{2} (V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3})$$

$$Z_{cij} = 0.291 - 0.08 \left(\frac{\omega_i + \omega_j}{2} \right); \quad T_{cij} = \sqrt{T_{ci} T_{cj}} (1 - K_{ij})$$

各种工程上常用物质的 Ω_{ai} 、 Ω_{bi} , 以及二元相互作用常数 K_{ij} 都可在文献[5]中查到。

1.5 环境介质气体在液滴中溶解的计算

根据热力学相平衡原理, 对于某一组分 i 当达到热力学平衡时, 汽液两相化学势相等。即

$$f_i^v = f_i^l$$

汽相逸度 f_i^v 可表示为压力和蒸汽浓度的函数

$$f_i^v = \phi_i P Y_i \quad (5)$$

式中 ϕ_i 为逸度系数, 由热力学关系可将其与状态方程中各参数联系起来,

$$\ln(\phi_i) = \ln\left(\frac{V}{V-b}\right) + \frac{b_i}{V-b} - \frac{2\sum_i Y_i a_{ki}}{RT^{3/2}b} \ln\left(\frac{V+b}{V}\right) + \frac{ab_i}{RT^{3/2}b} \left[\ln\left(\frac{V+b}{V}\right) - \frac{b}{V+b} \right] - \ln(Z) \quad (6)$$

液相逸度 f_i^l 对于亚临界可凝性组分和超临界非凝性组分其定义不同, 它与标准态和归一化条件的选择有关。

对于亚临界可凝性组分

$$f_i = r_1^{(p_r)} \hat{f}_1^{(p_r)} \exp\left(\int_{p_r}^p \frac{\bar{V}_1^l}{RT} dp\right) X_1 \quad (7)$$

对于超临界非凝性组分

$$f_2 = r_2^{*(p_r)} H_{2(l)} \exp\left(\int_{p_r}^p \frac{\bar{V}_2^l}{RT} dp\right) X_2 \quad (8)$$

式中 $r_1^{(p_r)} r_2^{*(p_r)}$ 为活度系数, 可通过剩余吉布斯能计算

$$\begin{cases} \ln(r_1^{(p_r)}) = \left[\frac{\partial (ng^{E*}/RT)}{\partial n_1} \right]_{T, P, n_2} \\ \ln(r_2^{*(p_r)}) = \left[\frac{\partial (ng^{E*}/RT)}{\partial n_2} \right]_{T, P, n_1} \\ g^{E*}/RT = (x_1 q_1 + x_2 q_2) a_{22(1)} \Phi_2^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 q_1 、 q_2 、 Φ_2 、 $a_{22(1)}$ 都可由经验公式计算^[4]。

标准态逸度 $\hat{f}_1^{(p_r)}$ 和亨利常数 $H_{2(l)}$ 则可由下式计算

$$\begin{cases} \hat{f}_1^{(p_r)} = \Phi_1 P_1 \exp\left(\int_{p_1^*}^{p_r} \frac{V_1^l}{RT} dp\right) \\ H_{2(l)} = \hat{f}_2^{(p_r)} r_{2,1}^\infty \\ \hat{f}_2^{(p_r)} = \Phi_2 P_2 \exp\left(\int_{p_2^*}^{p_r} \frac{V_2^l}{RT} dp\right) \\ r_{2,1}^\infty = \exp\left(-\lim_{x_2 \rightarrow 1} \ln(r_2^*)\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中 Φ_1 、 Φ_2 、 P_1 、 P_2 可由物性手册查到, V_1^l 、 V_2^l 则由液相状态方程给出。 x_1 、 x_2 分别是液相组分 1、2 的摩尔百分数。

这样对于由液滴和介质气体组成的二元系统, 在给定的压力和温度下就可由以上方程求出汽液两相中各组分的浓度, 确定出介质气体在液滴中的溶解度, 代入高压蒸发模型方程(1)~(4)计算液滴的蒸发过程。

2 计算结果及分析

利用以上模型本文对丙烷液滴在氮气中的蒸发进行了计算。

图 1 所示为液滴温度随时间的变化。当压力较低时, 液滴在整个蒸发过程中都处于亚临界状态, 液滴温度初始上升很快, 然后逐渐趋于一平衡温度, 并且平衡温度随压力的增加而增加。但当压力较高时, 液滴温度不断上升, 并超过其热力学临界温度, 这时,

液滴达到超临界状态。使得液滴达到超临界状态所需的环境压力，通常都明显高于液滴的热力学临界压力，并随燃料种类和环境温度而变化，对于丙烷超临界压力比其热力学临界压力高1~2倍。

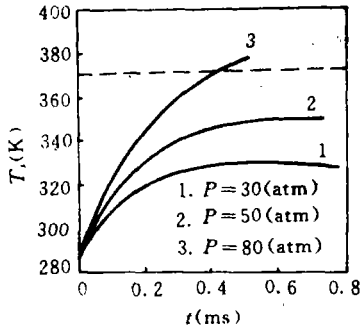


图1 液滴温度随时间的变化

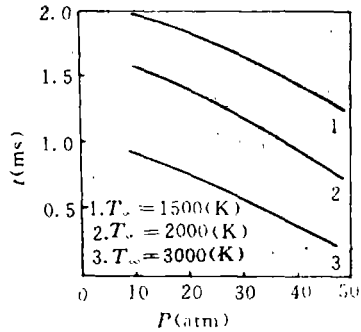


图2 蒸发时间随压力和温度的变化

图2给出了液滴蒸发时间随压力和温度的变化。由图可见蒸发时间随压力和环境温度的升高而缩短。这是因为压力愈高，液滴所达到的平衡温度也愈高，而环境温度愈高，环境向液滴传热就愈快，二者都将导致较高的液滴蒸发速率，所以蒸发时间就短。

图3所示为在不同温度和压力下，氮气在丙烷液滴中的溶解度。介质气体在液滴中的溶解度随压力的增加而增大，随液滴温度的升高开始增大，然后又减小。这一结果与现有的实验^[6]是一致的。在高压下气体的溶解是十分明显的，例如在60大气压，液滴温度为230 K时，液滴中氮的含量高达10%。

图4给出了由于气体在液滴中的溶解，液滴热力学临界参数的变化。由图可见，由于介质气体在液滴中的溶解明显改变了液滴的热力学临界参数。例如当氮气在丙烷中的溶解度达到10%左右时，临界压力提高了近20%，而临界温度降低了大约5%。此外，介质气体的溶解还将明显影响液滴的其它物性，如蒸汽压，比热等，从而影响液滴的蒸发。

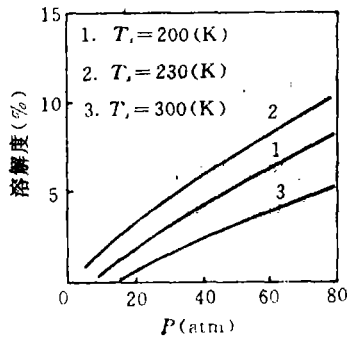


图3 氮气在丙烷液滴中的溶解度

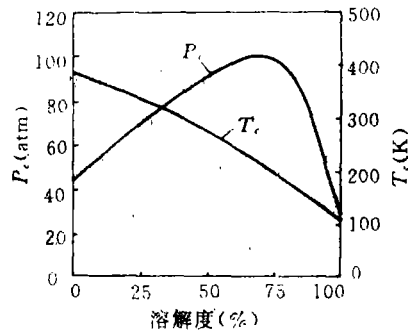


图4 临界压力和温度随溶解度的变化

3 结 论

由以上计算和分析可以得到以下结论。

(1) 高压下推进剂液滴的蒸发时间随压力和环境温度的增加而缩短。当压力超过某一临界值时,液滴将达到超临界状态,而超临界压力通常不等于燃料的热力学临界压力;

(2) 高压下环境介质气体将明显地溶解于液滴中,从而影响液滴的物性和蒸发,并且压力愈高溶解性愈大,因此在高压下必须考虑气体溶解对推进剂液滴蒸发和燃烧的影响。

参 考 文 献

- 1 Kadota T and Hiroyasu H. Evaporation of A Single Droplet at Elevated Pressures and Temperature. Bull. JSME, 1976, 19: 1515
- 2 庄逢辰, 陈新华. 燃料液滴高压蒸发理论. 工程热物理学报. 1982, (3): 277
- 3 Frage E et al. A Theoretical Model for the Combustion of Droplet in Super-critical Condition and Gas Pockets. Astronautica Acta, 1972, 17: 685
- 4 Prausnitz J M and Chuech P L. Calculation of High-Pressure Vapor-Liquid Equilibria. Ind. Eng. Chem., 1968, 60: 34
- 5 Prausnitz J M and Chuech P L. Vapor-Liquid Equilibria at High Pressure. Ind. Eng. Chem. Fundamentals 1967, 6: 492
- 6 Prausnitz J M. 用计算机计算多元汽-液和液-液平衡. 北京: 化学工业出版社, 1983

A Study of Evaporation of Liquid Propellant Droplet under High Pressure

Zhou Jin Wu Daohong Zhuang Fengchen
(Department of Aerospace Technology)

Abstract

The existing models of evaporation of liquid propellant droplet under high pressure have been modified by the authors. A submodel of solution of surrounding dielectric gas in droplet was developed to investigate the effect of solubility on evaporation under high pressure. A modified R-K equation of gas state was used in the model. Using the model, the evaporation of propane droplet in a nitrogen environment was simulated. It was found that the evaporation time of droplet decreases with the increasing of pressure and environment temperature and that the droplet will reach a supercritical state when the pressure is greater than a critical value. The solution of surrounding gas in droplet is very obvious under high pressure, and the higher the pressure, the greater the solubility. So it is important to take the effect of the solution into account in high pressure combustion of propellant.

Key words propellant, solubility, evaporation under high pressure