

一甲基肼的高压蒸发研究*

聂万胜 庄逢辰

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 对一甲基肼的高压蒸发进行了研究, 计算了一甲基肼液滴温度和半径的变化历程, 并对各种不同环境压力下的结果进行了比较。计算了蒸发常数、传热数和传质数, 所得结果同已有的实验数据相比较是吻合的, 且考虑了不同的 Le 数对蒸发界限压力的影响, 说明了此蒸发模型和计算方法的合理性。所得结论对于分析液体火箭发动机的燃烧过程是重要的。这一方法还可以用来计算其他燃料的蒸发。

关键词 一甲基肼, 高压, 蒸发

分类号 V434.1

The Study of Evaporation of Monomethyl Hydrazine(MMH) at High Pressure

Nie Wansheng Zhuang Fengchen

(Department of Astronautics Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Evaporation of monomethyl hydrazine(MMH) at high pressure is studied. The MMH droplet radius and temperature at different environmental pressure is computed and compared. The evaporation constant, the number of heat transfer and the number of mass transfer are considered and computed. The results are identical to the test data. The effect of Lewis number to the limit pressure of evaporation is evaluated. It shows that the evaporation model and compute method are reasonable. The results are important for the analysis of the combustion process in liquid rocket engine. This method may be used to evaluate other fuels.

Key words monomethyl hydrazine(MMH), high pressure, evaporation

* 1997年5月20日收稿

一甲基肼是一种在航天领域应用极为广泛的推进剂燃料,对其蒸发燃烧特性的研究也由来已久,但目前为止,尚没有看到公开发表的理论性文章。本文在文献[1~3]的基础上,针对一甲基肼的蒸发特性进行了较为深入的分析计算。蒸发特性将直接影响燃烧的稳定性,这也是燃烧不稳定性研究的基础。一甲基肼的分解反应是放热反应,故在惰性介质中可形成一个分解反应火焰峰,为此分析如下:

1 基本假设

(1)过程是球对称并在等压场中进行;

(2)考虑高压下液相表面的内移速度,忽略气相中的非定常性;

(3)分解燃烧火焰峰为一几何表面,其位置由组元蒸气混合物的层流火焰质量传播速度与蒸汽来流速度相等的条件决定;

(4)对流的影响可用折算薄膜理论考虑;

(5)不考虑传热传质的交叉效应和辐射传热,只考虑分子热传导和分子扩散。

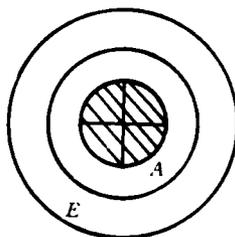


图1 一甲基肼液滴蒸发示意图

2 基本计算方程

2.1 蒸发速度计算公式

根据图1可知,在A区无分解反应,蒸发速度完全由传热传质决定。考虑液滴界面内移时,应用文献[3]中的方法,可以求得离开液滴表面的蒸发速度公式为

$$\dot{m}_{v,s} = \frac{4\pi\rho D}{AB} \frac{1}{1/r_s - 1/r_f} \ln \left[\frac{1}{1 - BY_{v,s}} \right] \quad (1)$$

式(1)中

$$A = 1 + \frac{4\pi r_s^2 \rho_{v,s}}{m_{v,s}} \frac{dr_s}{dt} \quad (2)$$

$$B = 1 + \frac{\rho_{e,s}}{\rho_{v,s}} \left(1 - \frac{1}{A} \right) \quad (3)$$

$Y_{v,s}$ 表示液滴表面处蒸汽浓度,物理量的下标V指蒸汽,S指液滴表面,E代表环境介质。由于液滴表面有内移速度,所以在同一时刻流向分解反应火焰峰的液滴蒸汽流量应为

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{v,s} + 4\pi r_s^2 \rho_{v,s} \frac{dr_s}{dt} = A \dot{m}_{v,s} \quad (4)$$

(4)式可改写成

$$\dot{m}_v = \frac{C r_s}{1 - \frac{r_s}{r_f}} \quad (5)$$

这里

$$C = \frac{4\pi\rho D}{B} \ln \left[\frac{1}{1 - BY_{v,s}} \right] \quad (6)$$

由于忽略了气相中的非正常性,所以由液滴表面流向分解反应火焰峰的液滴蒸汽量应等于由于层流火焰传播而在火焰峰上燃烧掉的液滴蒸汽量。层流火焰质量传播速度可取文献[7]所推导的值,即

$$\dot{m}''_f = \sqrt{\frac{2K_0 K_A v! C_{p,A} \left(\frac{PM}{RT_f}\right)^v \left(\frac{RT_f}{E}\right)^{v+1} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right)}{\Delta H_v^{v-1}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{[C_{p,A}(T_f - T_s) + \Delta H_v]^2 - [C_{p,A}(T_f - T_{f,a})]^2}} \quad (7)$$

在非绝热,例如在正常的火箭发动机燃烧室工况时,层流火焰峰的温度不等于 $T_{f,a}$,而是与环境温度有关,其计算公式如下:

$$T_f = T_{f,a} + (T_\infty - T_{f,a}) \exp\left[-\frac{\dot{m}_v C_{p,B}}{4\pi K_B} \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_\infty}\right)\right] \quad (8)$$

若令 $A_n = 4\pi \dot{m}''_f$, 则

$$\dot{m}_v = A_n r_f^2 \quad (9)$$

由(5)、(9)两式消去 r_f , 可得

$$m_{v,s} = \frac{\dot{m}_v}{A} = \frac{C r_s}{A} \left[\left(1 + \frac{A_n r_s}{2C}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{A_n r_s}{2C}\right)^2 - 1} \right] \quad (10)$$

由(5)、(9)两式消去 \dot{m}_v , 可得

$$r_f = \frac{r_s}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4C}{A_n r_s}} \right] \quad (11)$$

2.2 液滴温度和液滴半径变化的计算公式

根据能量守恒,可在 A 区列出以下方程

$$q = 4\pi r_s^2 K \frac{dT}{dr} \Big|_s = 4\pi r^2 K_A \frac{dT}{dr} - \dot{m}_{v,s} (T - T_s) [AC_{p,v} + (A-1) \frac{\rho_{e,s} C_{p,e}}{\rho_{v,s}}]$$

边界条件为

$$r = r_s, T = T_s; r = r_f, T = T_f \quad (13)$$

从而可解得

$$q = 4\pi K_A z \frac{T_f - T_s}{(e^z - 1) \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_f}\right)} \quad (14)$$

式(14)中

$$z = \dot{m}_{v,s} \left[AC_{p,v} + (A-1) \frac{\rho_{e,s} C_{p,e}}{\rho_{v,s}} \right] \frac{\left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_f}\right)}{4\pi K_A} \quad (15)$$

假定液滴内部温度均匀,由热平衡方程可以求得

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q - \dot{m}_{v,s} \Delta H_v}{\frac{4}{3} \pi r_s^3 \rho_l C_{p,l}} \quad (16)$$

同样可求得

$$\frac{dr_s}{dt} = \frac{(A-1) \dot{m}_{v,s}}{4\pi r_s^2 \rho_{v,s}} \quad (17)$$

根据(16)、(17)两式即可求得液滴温度和滴径的变化历程。

2.3 液滴平衡温度计算

当液滴达到平衡温度时

$$q = \dot{m}_{v,s} \Delta H_v \quad (18)$$

$$\dot{m}_{v,s} = 4\pi \frac{K_A}{AC_{p,v} + (A-1)C_{p,e}\rho_{e,s}/\rho_{v,s}} \ln \left\{ 1 + \frac{(T_f - T_s)[AC_{p,v} + (A-1)C_{p,e}\rho_{e,s}/\rho_{v,s}]}{\Delta H_v} \right\} \quad (19)$$

令

$$L_e = \frac{K_A}{\rho D [AC_{p,v} + (A-1)C_{p,e}\rho_{e,s}/\rho_{v,s}]} \quad (20)$$

$$B_m = \left[\frac{1}{1 - BY_{v,s}} \right]^{1/ABLe} \quad (21)$$

$$B_T = \left\{ 1 + \frac{(T_f - T_s)[AC_{p,v} + (A-1)C_{p,e}\rho_{e,s}/\rho_{v,s}]}{\Delta H_v} \right\} \quad (22)$$

B_m 和 B_T 为考虑液滴表面内移时的传质数和传热数。比较(1)式和(19)式,并令传质数等于传热数即可求得平衡温度 $T_s = T_{s,e}$ 。

2.4 液滴表面蒸汽浓度与表面温度的关系

液滴表面蒸汽浓度与表面温度的关系,可根据高压下的液滴表面热力学平衡条件求得。这里液滴由一种组元组成(不考虑气体的溶解),并且不考虑由纯组元形成混合气体时的非理想性,便可写出

$$Y_{v,s} = \frac{M_v}{M} \frac{P_{v,s} \exp[v'(P - P_{v,s})/(R_u T_s)]}{P} \quad (23)$$

3 计算结果分析

本文对不同压力下的各种直径的一甲基胍液滴在氮气中的蒸发速度进行了计算,找出了液滴平衡蒸发温度和蒸发常数与环境压力的关系。对液滴的生存发展进行了模拟,给出了液滴温度及半径等参数随时间和环境压力的变化曲线。计算中的物性数据主要取自文献[4~6]。

计算得出,对于一甲基胍液滴,当环境压力为1大气压,温度为2470K, $Nu=2$,液滴直径为0.63cm,在氮气中的蒸发速度 5.1×10^{-3} g/s,而在同样条件下得出的实验值为 5.35×10^{-3} g/s,可见是相当接近的。此外,我们还对液滴直径为0.95cm的一甲基胍液滴在氮气中的情况进行了计算,计算所得的蒸发速度为 8.7×10^{-3} g/s,而实验值为 8.92×10^{-3} g/s。

图2表示了一甲基胍液滴温度 T_s 在不同环境压力下随时间变化的关系。可以看出,随着压力增加,液滴升温速率增加,最后达到的平衡温度亦增加。

图3表示了一甲基胍滴半径随时间的变化,由此图可知,开始时液滴半径反而增加,这是由于温度增加使得液滴膨胀导致半径增大的速度大于由于液滴蒸发而使液滴半径减小的速度,而且环境压力越大,这种效应越明显,液滴膨胀越大。同时也可以得知,环境压

力越大,液滴蒸发完毕的时间越短。也就是说,增加环境压力更有利于蒸发的进行。

图 4 所示为一甲基胍液滴在绝热分解燃烧时的平衡温度随环境压力变化的关系曲线。从图可知,随着环境压力升高,液滴平衡温度亦升高,当液滴温度超过临界温度后,就不存在平衡温度,这时就出现超临界蒸发/燃烧。找出达到超临界蒸发/燃烧时的介质压力值和相应的温度对正确建立发动机燃烧效率的分析模型是很重要的。计算求得,对于一甲基胍,在绝热条件下蒸发,当 $Le=0.6, 1.0, 1.4$ 时,界限压力分别为 61, 58, 54 大气压,而介质温度为 2000K 和 3000K 时,相应的界限压力基本没有变化。这是由于外界介质温度对一甲基胍平衡蒸发温度的影响必须通过分解反应火焰峰的温度来起作用,当环境温度变化时,由于 Stefan 流的影响,分解反应火焰峰温度的改变相对讲要小得多。

图 5 表示了蒸发常数 $K(= -8r_s \frac{dr_s}{dt})$ 随时间的变化历程。很明显地说明了环境压力越高,蒸发常数越大的事实。

图 6 表示出各种不同环境压力下液滴传质数与传热数随液滴温度的变化。总的来说,

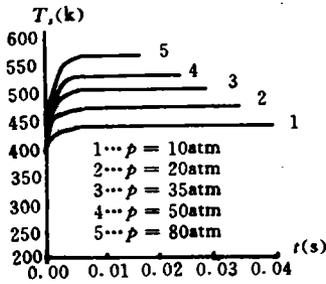


图 2 不同压力下一甲基胍液滴温度随时间的变化

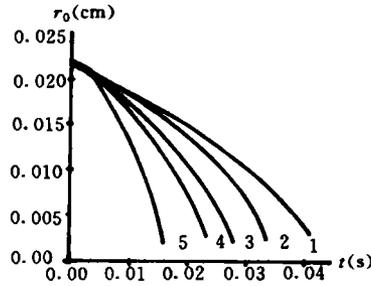


图 3 不同压力下一甲基胍液滴半径随时间的变化

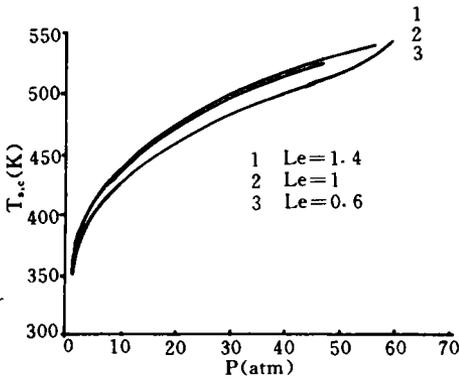


图 4 一甲基胍液滴在绝热分解燃烧时的液滴

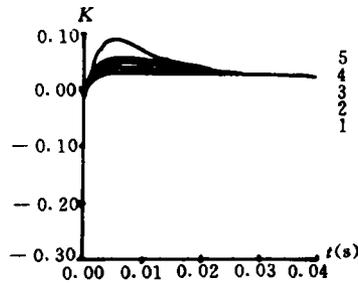


图 5 不同压力下蒸发常数随时间的变化

传热数随温度的升高而减小,而传质数随温度的升高而渐增。但在压力较低时,传热数随温度变化比较平缓,而压力较高时,传热数的变化渐趋剧烈。当 $B_T > B_m$ 时,液滴为蒸发状态,并且液滴温度将不断增加,直至达到平衡温度。而 B_m 与 B_T 的交点所对应的温度即为

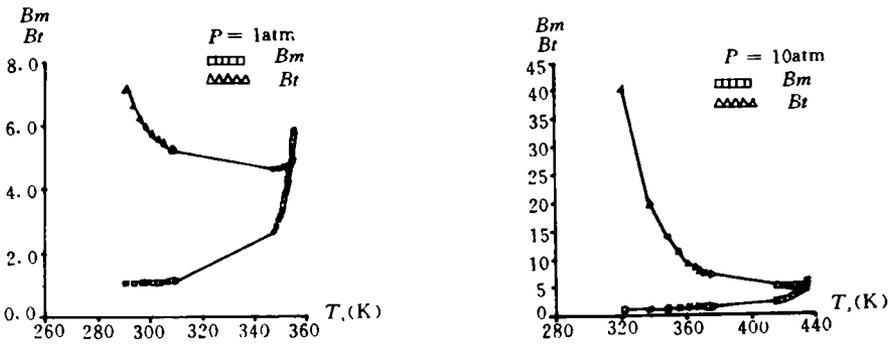


图6 不同环境压力下—甲基胍液滴传质数与传热数随液滴温度的变化

液滴平衡温度,可以形象地发现,随着环境压力的增加,平衡温度随之增大。

4 结论

本文提出了一甲基胍的高压平衡蒸发计算模型,应用本模型计算了不同介质压力下的液滴平衡蒸发常数,并确定了达到超临界蒸发所必需的外压值和介质温度值。计算结果与部分实验情况是吻合的。计算可靠方便,通用性强,方法可以大力推广。—甲基胍是一种应用非常广泛的推进剂燃料,计算结果可以用来分析液体火箭发动机中燃烧速率的控制过程,并为提高其燃烧效率和改善燃烧稳定性指明方向。

参 考 文 献

- 1 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用. 长沙:国防科技大学出版社,1995
- 2 庄逢辰,陈新华. 液滴高压蒸发理论. 工程热物理学报,1982,3(3)
- 3 庄逢辰,刘孝弟. 自然推进剂组元液滴的高压平衡蒸发计算模型. 航空动力学报,1988(4)
- 4 苏志林,张起源. 液体推进剂. 国防科委后勤部,1979
- 5 童敬山,李敬. 流体热物理性质的计算. 北京:清华大学出版社,1982
- 6 Mitchell R C et al. Engineering Properties of Rocket Propellants. AD-771580
- 7 庄逢辰,钟良生. 液体单元推进剂燃烧效率理论计算. 国防科技大学学报,1978(2)

(责任编辑 石少平)