

液体燃料点火温度的分歧研究

方谋鑫 刘峰 余永刚 汪庆永

(南京理工大学应用物理系 南京 210094)

摘要 根据 HAN 基液滴 LP-1846 点火的挂滴实验^[1], 提出了点火模型, 应用分歧理论找出了相应的点火判据。按二维定态投影法给出了分歧分析解。通过对点火判据的分析, 发现理论与实验符合得较好。

关键词 燃烧 点火 分歧

中图法分类号 TQ038.3

1 引言

LP-1846 是 HAN 基液体发射药的一种, 它是由硝酸羟胺(简称 HAN)、三乙醇胺硝酸盐(简称 TEAN)和水按一定比例配制成的。国内于 1992 年刚研制成功。

国外从 80 年代中期开始研究 LP-1846 液滴的燃烧特性。主要是用抛滴装置和挂滴装置研究了高温常压及高温高压下液滴的燃烧规律^[2~4], 其环境温度通常在 750~950℃。对处于 700℃ 以下的环境温度中的液体点火问题未开展研究。而对环境温度低于 700℃ 时液滴点火温度的研究, 对 LP-1846 液体发射药的贮存、运输和喷射过程中的安全性, 无疑有着直接的指导意义。我们所采用的点火准则——分歧分析法有助于进一步认识点火的本质。这不仅将会对燃烧学的整个理论发展作出积极贡献, 而且在工程技术应用上, 尤其是对一般液体燃料的点火温度的确定方法上, 也具有实用价值。

2 LP-1846 液滴点火实验原理

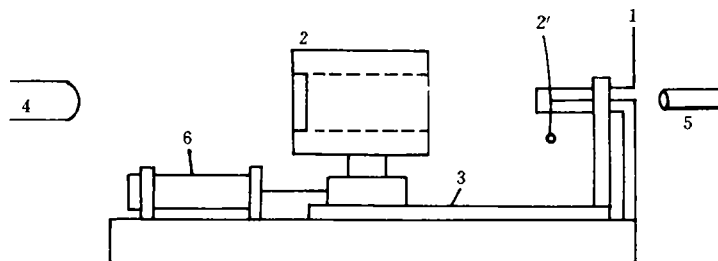


图1 测定 LP-1846 点火温度的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the apparatus used to determine the ignition temperature of the liquid propellant LP-1846

1995年5月18日收到原稿, 8月15日收到修改稿。

我们采用挂滴装置,实验原理如图1所示。液滴通过超微量泵(micropumper)①用注射装置挂在直径0.5 mm(或0.2 mm)的镍铬-镍铝热电偶(thermocouple)②的结点上。②是长160 mm、内径为40 mm的管型加热炉(heat oven),其温度可由常温到1000 C可调。我们用一台精密温度自控仪来控制温度,其精度为1 C。加热炉装在燕尾槽(groove)③上,可被气动筒(pumper)④来回推动。④是光源(light source)。⑤为观测目镜(lens)。

当液滴突然置入高温环境中时,其升温曲线可由光线示波器显示并记录下来,由此可分析液滴的着火点。

3 液滴点火的数学、物理模型

我们认为挂滴实验中液滴燃烧的主要原因是由于它在受热情况下发生化学反应并释放大量的热量,当热量积累到一定程度时就可能使液滴点燃。其中的化学反应项起着重要作用,随时间变化的反应物浓度对反应也有较大影响。据此提出如下假设:

(1)局域平衡(Local Equilibrium)假设成立。

(2)液滴温度和环境温度的空间分布均匀,且由实验可知,液滴汽相作用不大。

(3)液滴与环境间的热交换有热辐射、热传导和扩散等形式,但考虑到管型加热炉的特点,我们认为热辐射起着主要作用。点火过程是在等压场中进行,且压强等于环境压强。

(4)化学反应是个不可逆过程且遵守 Arrhenius 定律。

(5)大活化能近似成立,即化学反应活化能 E 远大于 $RT(E \gg RT)$ 。

根据以上假设,我们列出液滴在均匀温度场中燃烧的能量方程和浓度方程

$$\rho V c_p dT/dt = QVA\alpha(C)\exp(-E/RT) - \eta\sigma_b(T^4 - T_a^4) \quad (1)$$

$$dC/dt = \alpha(C)A\exp(-E/RT) + \psi(C)A\exp(-E/RT_a) \quad (2)$$

各符号具体意义如下: A 为化学反应频率因子; C 为反应物浓度; C_0 为反应物初始浓度; c_p 为等压摩尔热容量; E 为反应物的活化能; Q 为反应热; R 为气体普适常数; σ_b 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_a 为环境温度(K); T 为系统在某时刻 t 的温度(K); T_{room} 为系统初始温度(K); V 为反应物体积; ρ 为密度; η 为调整常数; $\alpha(C)$ 、 $\psi(C)$ 为反应物浓度的函数。

4 燃烧方程的无量纲化

对 e 指数项有

$$\begin{aligned} -E/RT &= -E/RT_a + (E/RT_a)(1 - T_a/T) \\ &= \left(\frac{RT_a}{E} \cdot \frac{T_a}{T - T_a} + \frac{RT_a}{E}\right)^{-1} - \frac{E}{RT_a} = \frac{\theta}{1 + \varepsilon\theta} - \frac{E}{RT_a} \end{aligned}$$

其中: $\theta = \frac{E}{RT_a} \cdot \frac{T - T_a}{T_a}$, $\varepsilon = \frac{RT_a}{E}$ 。

令 $\tau = A\exp(-E/RT_a)t$, 则经过运算对(1)式有

$$d\theta/d\tau = \alpha\alpha(C)\exp[\theta/(1 + \varepsilon\theta)] - \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1] \quad (3)$$

其中: $\alpha = EQ/\rho c_p RT_a^2$, $\beta = E\eta\sigma_b T_a^2/\rho V c_p R A \exp(-E/RT_a)$

对于(2)式令 $\lambda = 1 - C/C_0$, 则有

$$d\lambda/d\tau = \alpha(\lambda)\exp[\theta/(1 + \varepsilon\theta)] + \psi(\lambda) \quad (4)$$

(3)、(4)为无量纲化方程。

5 分歧解的存在性——点火条件的定量研究

定态分析:求出定态及在定态偏移下方程的形式。取 $\varphi(\lambda) = K\lambda$, $\psi(\lambda) = 1 - \lambda$, 考虑到
大活化能近似成立后知: $\varepsilon = RT_s/E$ 很小, 可近似认为 $\varepsilon \rightarrow 0$, 故无量纲化方程(3)、(4)变为

$$d\theta/d\tau = \alpha K \lambda \exp(\theta) - \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]$$

$$d\lambda/d\tau = K \lambda \exp(\theta) + 1 - \lambda$$

由定态条件有

$$K = \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}{\alpha \exp(\theta) + \exp(\theta) \cdot \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}$$

$$\lambda = 1 + \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}{\alpha}$$

假定上述方程组的定态解为 θ_i , 令变量 θ, λ 有一微扰 (v, u) , 即

$$\theta = \theta_i + v$$

$$\lambda = 1 + \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}{\alpha} + u$$

$$K = \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}{\alpha \exp(\theta_i) + \exp(\theta_i) \cdot \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}$$

因而可得定态偏移下方程的形式为

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1] \{ \alpha + \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1] + \alpha u \}}{\alpha \{ \alpha + \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1] \}} \exp(v) - \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}{\alpha} - u$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{\beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]}{\alpha + \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1]} \{ \alpha + \beta[(1 + \varepsilon\theta)^4 - 1] + \alpha u \} \exp(v) - \beta[(1 + \varepsilon\theta_i + \varepsilon v)^4 - 1]$$

令 $b = \beta[(1 + \varepsilon\theta_i)^4 - 1]$, 将 e 按指数展开, 在考虑到四次项近似后有

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{-\alpha u}{\alpha + b} + \frac{bv}{\alpha} + \frac{b}{\alpha} \frac{v^2}{2} + \frac{buv}{\alpha + b} + \frac{b}{\alpha} \frac{v^3}{6} + \frac{buv^2}{2(\alpha + b)} + \frac{bv^4}{24\alpha} + \frac{buv^3}{6(\alpha + b)} \quad (5)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{ab}{\alpha + b} u + \{ b - \beta[4\varepsilon(1 + \varepsilon\theta_i)^3] \} v + \left[\frac{b}{2} - 6\beta\varepsilon^2(1 + \varepsilon\theta)^2 \right] v^2 + \frac{ab}{\alpha + b} uv + \left[\frac{b}{6} - 4\beta\varepsilon^3(1 + \varepsilon\theta_i) \right] v^3 + \frac{ab}{2(\alpha + b)} uv^2 + \left(\frac{b}{24} - \beta\varepsilon^4 \right) v^4 + \frac{ab}{6(\alpha + b)} uv^3 \quad (6)$$

令 $\beta[4\varepsilon(1 + \varepsilon\theta_i)^3] = c$, 取 $du/d\tau, dv/d\tau$ 的线性项则有

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{-\alpha}{\alpha + b} u + \frac{b}{\alpha} v, \quad \frac{dv}{d\tau} = \frac{ab}{\alpha + b} u + (b - c)v$$

令以上二式的系数矩阵本征值为 σ , 则有

$$\begin{vmatrix} \frac{-\alpha}{\alpha + b} - \sigma & \frac{b}{\alpha} \\ \frac{ab}{\alpha + b} & b - c - \sigma \end{vmatrix} = 0$$

则由分枝条件有

$$\alpha(c - b) = b^2 \quad c - b = -\alpha / (\alpha + b)$$

综合上述二式可得 $ab^2 + b^3 + a^2 = 0$ 。再把 $\alpha = (EQ / \rho c_p RT_a^2)$, $b = \beta[(1 + \varepsilon\theta_i)^4 - 1]$ 代回上式即得

$$\tilde{C}_1 T_a^2 d^3 e^{-\tilde{C}_3 / T_a} + \tilde{C}_2 (T_c^4 - T_a^4)^3 + \tilde{C}_4 (T_c^4 - T_a^4)^2 T_a^2 d^3 e^{-\tilde{C}' / T_a} = 0 \quad (7)$$

式中: T_a 为环境温度; T_c 为液滴点火温度; d 为液滴直径; $\tilde{C}_1 = \rho c_p R A^3 \pi^3 E^2 Q^2 / 216$; $\tilde{C}_2 = E^3 \eta^3 \sigma_0^3$; $\tilde{C}_3 = E / R$; $\tilde{C}_4 = (1/6)(E^3 \eta^2 \sigma_0^2 Q \pi)$ 。

(7)式即点火判据。下面在数据拟合中再作进一步地整理分析。

6 分枝分析解

用二维定态投影法求发自 $(\delta, 0, 0)$ 的定态分枝解为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \xi_1 \varepsilon + \frac{1}{2} \xi_2 \varepsilon^2 + O(\varepsilon^3) = \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon \\ \delta(1 + \delta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{K_{11}}{2} \varepsilon^2 \\ 0 \end{pmatrix} + O(\varepsilon^3)$$

7 数据拟合

对(7)式进行量级分析后有

$$(1) T_c < T_a \text{ 时, } T_c^4 = T_a^4 - \tilde{C} T_a^2 d^3 e^{-\tilde{C}' / T_a}, \quad (2) T_c > T_a \text{ 时, } T_c^4 = T_a^4 + \tilde{C} T_a^2 d^3 e^{-\tilde{C}' / T_a}$$

对于第一组实验,当 $T_c < T_a$ 时可得

$$\tilde{C} = 7.179 \times 10^{15} (\text{K}^2/\text{m}^3) \quad \tilde{C}' = 3195 \text{ K}$$

理论计算值与实验值见表 1。

表 1 第一组实验在不同的环境温度及液滴直径时点火温度的理论计算值与实验值 ($T_c < T_a$)

Table 1 The ignition temperature of LP-1846 under different diameters and ambient temperature for the 1st group experiment while $T_c < T_a$

d/mm	1.450	1.475	1.500	1.525	Error
$T_a/^\circ\text{C}$	700.0	600.0	500.0	400.0	
$T_{c \text{ theo}}/^\circ\text{C}$	314.6	326.1	321.4	296.3	1.75%
$T_{c \text{ exp}}/^\circ\text{C}$	340.6	326.5	321.5	315.8	

对于第一组实验,在 $T_c > T_a$ 时,经拟合有

$$\tilde{C} = 5.83 \times 10^{15} (\text{K}^2/\text{m}^3) \quad \tilde{C}' = 1095 \text{ K}$$

理论计算值与实验值列于表 2。

表 2 第一组实验在不同的环境温度及液滴直径时点火温度的理论计算值与实验值($T_c > T_a$)Table 2 The ignition temperature of LP-1846 under different diameters and ambient temperature for the 1st group experiment while $T_c > T_a$

d/mm	1.550	1.575	1.600	1.625	1.650	Error
$T_a/^\circ\text{C}$	300.0	250.0	200.0	160.0	140.0	
$T_{c\text{theo}}/^\circ\text{C}$	350.6	351.1	293.3	246.1	223.3	5.50%
$T_{c\text{exp}}/^\circ\text{C}$	332.3	303.7	281.3	286.2	270.4	

对于第二组实验在 $T_c < T_a$ 时,经拟合后有

$$\tilde{C} = 5.51 \times 10^{15} (\text{K}^2/\text{m}^3) \quad \tilde{C}' = 3495 \text{ K}$$

理论计算值与实验值列于表 3。

表 3 第二组实验在不同的环境温度及液滴直径时点火温度的理论计算值与实验值($T_c < T_a$)Table 3 The ignition temperature of LP-1846 under different diameters and ambient temperature for the 2nd group experiment while $T_c < T_a$

d/mm	1.750	1.788	1.825	1.863	Error
$T_a/^\circ\text{C}$	700.0	600.0	500.0	400.0	
$T_{c\text{theo}}/^\circ\text{C}$	322.2	341.4	337.7	329.8	3.20%
$T_{c\text{exp}}/^\circ\text{C}$	341.8	328.0	333.9	366.9	

对于第二组实验在 $T_c > T_a$ 时,经拟合后有

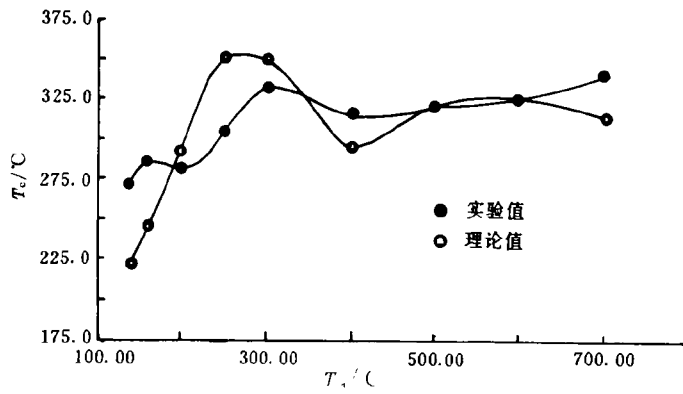
$$\tilde{C} = 6.32 \times 10^{15} (\text{K}^2/\text{m}^3) \quad \tilde{C}' = 1001 \text{ K}$$

理论计算值与实验值列于表 4。

表 4 第二组实验在不同的环境温度及液滴直径时点火温度的理论计算值与实验值($T_c > T_a$)Table 4 The ignition temperature of LP-1846 under different diameters and ambient temperature for the 2nd group experiment while $T_c > T_a$

d/mm	1.900	1.937	1.970	2.010	2.050	Error
$T_a/^\circ\text{C}$	300.0	250.0	200.0	160.0	140	
$T_{c\text{theo}}/^\circ\text{C}$	397.3	376.9	335.8	305.8	291.9	5.00%
$T_{c\text{exp}}/^\circ\text{C}$	357.6	346.2	342.3	326.6	315.6	

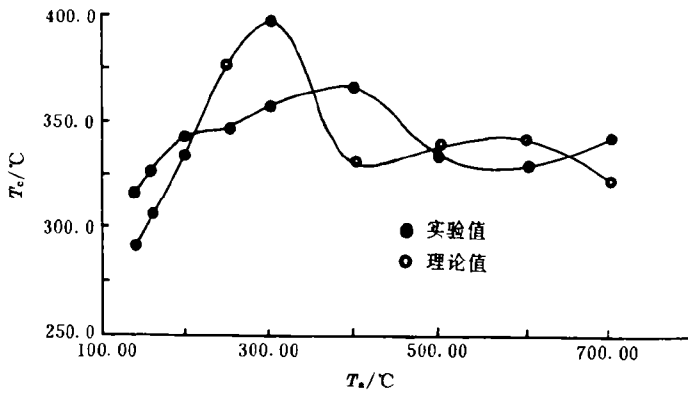
理论计算值与实验值比较后发现两者符合得较好(见图 2 和图 3)。



• Experimental value ◦ Theoretical value

图 2 第一组实验的理论计算值与实验值

Fig. 2 The theoretical and experimental data of first group



• Experimental value ◦ Theoretical value

图 3 第二组实验的理论计算值与实验值

Fig. 3 The theoretical and experimental data of the second group

8 小 结

我们的主要工作是建立模型,将模型方程进行改造使之有利于非线性分析;运用分歧解的线性稳定性理论对模型进行线性稳定性分析,确定方程出现分歧的条件;运用二维定态投影法求出了相应的分歧分析解;最后通过对液滴 LP-1846 点火的挂滴实验数据进行分析与拟合,将理论计算值与实验值加以比较,发现理论计算与实验结果符合得较好。

由点火判据得出的 $T_c^* = T_a^* \pm \tilde{C} T_a^{*2} d^3 e^{-\tilde{C}^* / T_a^*}$ 可知, T_a 与 T_c 具有相同的量级,即环境温度 T_a 对液滴 LP-1846 的燃烧起着主要作用,而 $\tilde{C} T_a^{*2} d^3 e^{-\tilde{C}^* / T_a^*}$ 项则可看作修正量。液滴的大小、浓度等因素对点火的影响可通过修正量来体现。由点火判据可见,当序参量达到临

界值时,即发生分歧时,点火现象才能发生。

用分歧分析法计算点火判据尚属初次探索,模型较为简化(如平均温度分布、热传导和扩散、液滴直径对点火温度的影响等均被忽略),尚待进一步完善。今后还有大量工作可做,如运用计算机数值分析还可得出点火时的一系列特性:热分解的特性、燃烧速率、燃烧寿命以及其它各种参数对点火温度的影响等。

参 考 文 献

- 1 余永刚,金志明.HAN 基液体发射药滴 LP-1846 着火的实验研究.南京理工大学学报,1993,(6):
- 2 Zhu D L, Law C K. Aero-thermochemical Studies of Energetic Liquid Materials; 1, Combustion of HAN-Based Liquid Gun Propellants Under Atmospheric Pressure. *Combustion and Flame*, 1987, 70 (3): 333~342
- 3 Beyer R A. Single Droplet Studies in an Hot, High-Pressure Environment. AD-A, 194472, 1988
- 4 Beyer R A. Continuing Studies of Liquid Gun Propellant Drops in Hot High-Pressure Environments. AD-A212265, 1989

BIFURCATION STUDY ON THE IGNITION TEMPERATURE OF LIQUID POWER

Fang Mouxin, Liu Feng, Yu Yonggang, Wang QingYong

(*Applied Physics Department of Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing, 210094*)

ABSTRACT Based on the ignition experiment of HAN-based liquid propellant — LP-1846, an ignition model is set up. Based upon the bifurcation theory, the criterion of ignition as well as the bifurcation solution are given by using the method of 2-D stationary projection

KEY WORDS combustion, ignition, bifurcation