

# 含能液滴在高压下爆裂性燃烧现象的研究

余永刚 金志明

(南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

**摘要** 利用挂滴装置研究了含能液滴 LP1846 在高温 440~620℃、高压 1.52~3.55MPa 环境下爆裂性燃烧的规律。给出液滴从受热到爆裂性燃烧的时间序列照片,并定量测试液滴直径随时间的变化关系以及着火延迟期。初步分析了液滴爆裂性燃烧的机理,即液相化学反应。最后建立了液滴着火延迟期的工程计算模型,其计算值和实验数据吻合。

**关键词** 液体发射药 着火 燃烧 微爆

**中图法分类号** O 389

## 1 引言

目前,国内外军事专家们正致力于研究新概念火炮——液体发射药火炮。它有三种基本设计方式,即整装式、外部动力喷射式和再生喷射式。通过多年选择,目前世界各国的研究重点大都集中于再生式方案。再生式液体发射药火炮的工作原理是通过液体发射药的喷射、燃烧、产生高温高压燃气推动弹丸运动。在火炮内弹道循环中,膛内射流破碎、雾化和燃烧的过程极其复杂,并伴有多层嵌套的激波系,其流谱和状态参量随时空变化异常剧烈。目前我们对此知之甚少。但是,研究射流破碎基元——液滴在高温高压下的燃烧特性是深入了解火炮内弹道过程的重要基础。而现在国内外公认综合性能较好的炮用液体发射药是一种新研制的 HAN 基系列推进剂。它是由硝酸羟胺(简称 HAN)、三乙醇胺硝酸盐(简称 TEAN)和水按一定重量比配成。比例不同,性能不同。常用的两个配方是 LP1845 (63.2% HAN + 20% TEAN + 16.8% H<sub>2</sub>O) 和 LP1846 (60.8% HAN + 19.2% TEAN + 20% H<sub>2</sub>O)。据报道,这两种液滴在高压下的燃烧特点明显不同于其它燃料滴,它不是一种扩散燃烧,而是一种爆裂性燃烧。所以有必要对此燃烧现象进行深入研究。文献<sup>[1-3]</sup>给出 LP1846 液滴在高压下燃烧的部分实验结果。我们以实验和理论两个方面对 LP1846 液滴爆裂性燃烧现象作系统探讨,这对于控制燃烧稳定性和液体发射药火炮内弹道设计均有重要意义。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

高压挂滴装置如图1所示。液滴气、液两相热电偶曲线由一台紫外线光线示波器记录。管形电加热炉由精密温控仪控制,其温度从常温到1000℃可调,精度为±1℃。高压密封筒最大能承受8.11MPa压力,它两端各开一个观察窗,并且在密封筒的背面还开有一观察

孔。高速电影摄影机的拍频 35~240 幅/秒。

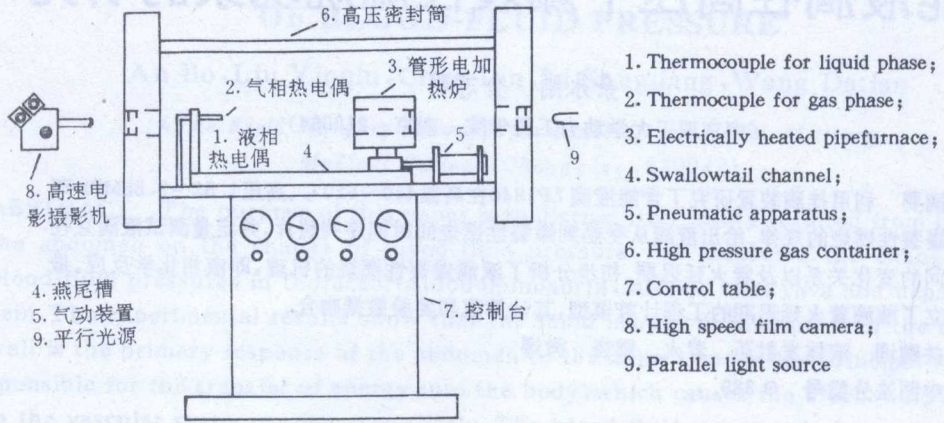


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

## 2.2 实验结果与讨论

当 LP1846 液滴置入高温高压环境后,液滴首先急剧膨胀,这不是一般的受热带膨胀,而是含有微弱液相反应的因素。随后液滴开始经历几次较大的膨胀收缩过程,接着进

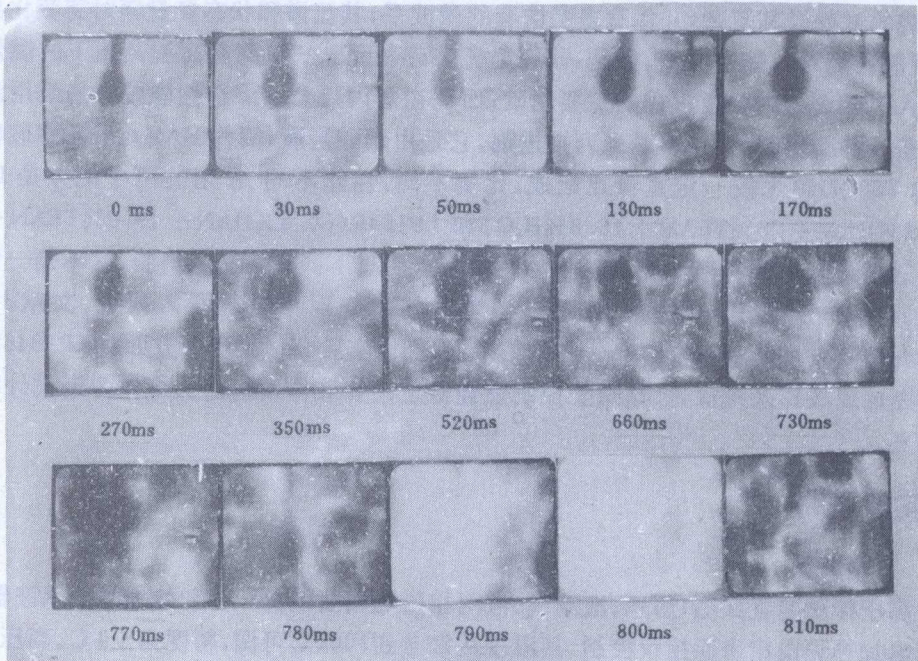


图2 液滴从受热到爆裂性燃烧的时间序列照片

Fig. 2 Time series photographs of droplet from heating to explosion combustion

$$(D_0 = 1.959 \text{ mm}, P_{\infty} = 2.03 \text{ MPa}, T_{\infty} = 510 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

入相对稳定期,液滴体积变化不大,略有波浪式涨落,但此阶段热分解较剧烈。当液相热电偶温度升高到 40~80 C 范围内,液滴又一次开始急剧膨胀,直至出现爆裂性燃烧。其典型过程如图 2 所示。液滴周围的阴影区是由于光通过气流密度不均匀区造成的。在图 2 中,第 12 幅照片( $t=780\text{ms}$ )指爆裂瞬间,第 13、14( $t=790\text{ms}$ 、 $t=800\text{ms}$ )两幅是爆裂性燃烧照片,由于火焰充满整个现场,所以不存在阴影区。

环境压力和环境温度高低对液滴特征过程影响较大,环境温度在 440~620 C 范围内,压力越高,液滴在前期膨胀收缩次数越少,其直径随时间的变化关系如图 3 所示。另外,随着压力的增加,液滴爆裂性特征也由部分破碎变为瞬间全部破碎、气化燃烧。当环境压力为 1.52~2.53 MPa,环境温度高于 500 C 时,发现液滴爆裂略提前于着火。当环境压力为 3.04~3.55 MPa,环境温度低于 500 C 时,发现液滴爆裂和着火几乎同时发生。图 4

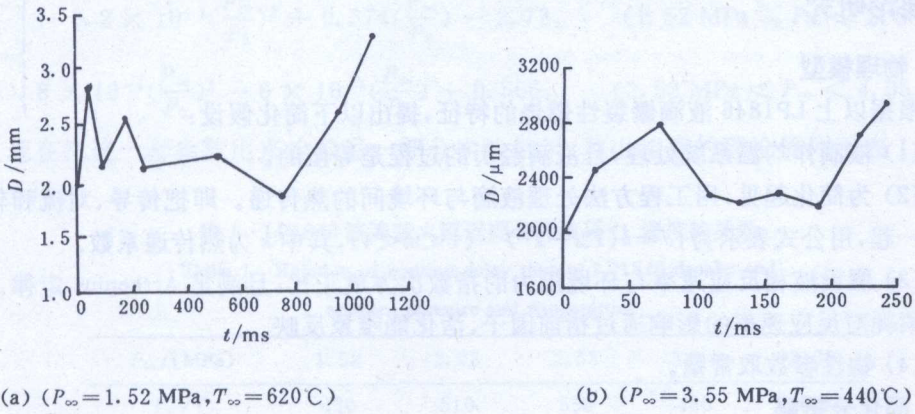
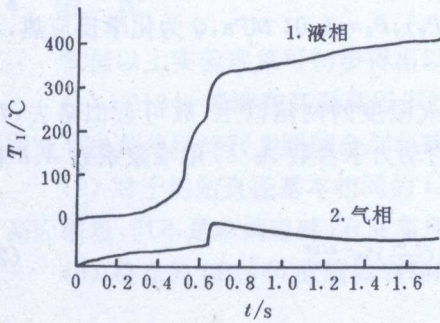


图 3  $D-t$  关系  
Fig. 3  $D-t$  relation



1. Liquid phase; 2. Gas phase  
图 4 着火延迟期与环境压力、环境温度的关系  
Fig. 4 Relation of ignition delay time and ambient pressure and temperature

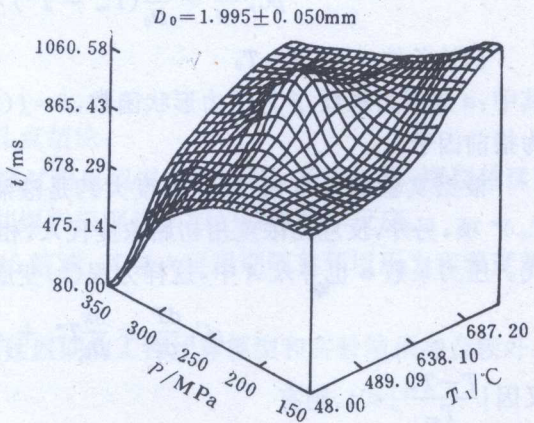


图 5 液滴气、液两相升温曲线  
( $P_{\infty}=3.04\text{ MPa}, T_{\infty}=480\text{ C}$ )  
Fig. 5 Temperature rise curves of gas and liquid phases of droplet

显示了液滴着火延迟期与环境压力、环境温度的关系。由图4可见,在2.53 MPa、530℃工况下,出现一个小峰值,这说明LP1846液体发射药热分解的机理很复杂,外界压力和温度对LP1846化学反应速率大小的影响是一种非单调约束,这种反应机理有待进一步研究。

根据以上的实验现象可推测,液滴爆裂性燃烧的机理是剧烈的液相化学反应。这个观点可从液滴气液两相热电偶曲线找到佐证。图5是3.04 MPa下液滴气液两相温升曲线。从图看出:大约在50℃时,液相曲线开始突跃,表明液滴升温较快,而此时液滴周围的气相温度变化不大,这就排除了气相反应释放出大量热量使液滴突然升温的可能。所以只可能是液滴内部的液相反应使液滴自身温度突升,且这个过程是发生在液滴爆裂性燃烧之前的。

### 3 理论研究

#### 3.1 物理模型

根据以上LP1846液滴爆裂性燃烧的特征,提出以下简化假设:

(1) 液滴作均温系统处理,且液滴经历的过程是等压的。

(2) 为简化起见,用工程方法处理液滴与环境间的热传递。即把传导、对流和辐射综合到一起,用公式表示为: $J=k(T_{\infty}^m-T^m)$  ( $1<m<4$ ),其中 $k$ 为热传递系数。

(3) 假设液相反应速率与环境压力的指数次方成正比,且满足Arrhenius定律。反应物的消耗对反应速率的影响通过指前因子、活化能唯象反映。

(4) 物性参数取常量。

#### 3.2 简化分析解

由能量守恒方程可得

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{6k}{D_0}(T_{\infty}^m - T^m) + \alpha Q Y_0^{\beta} \left(\frac{P_{\infty}}{P_0}\right)^{\beta} A_0 e^{-E_0/RT} \quad (1)$$

初始条件: $t=0, T=T_0$

其中: $\alpha$ 为压力系数, $\beta$ 为压力形状函数, $\beta=f(P_{\infty}/P_0)$ , $P_0=1.01$  MPa, $Q$ 为化学反应热, $A_0$ 为指前因子。

根据实验结果可知:环境温度大约是液滴着火温度的两倍以上,故可近似略去 $(T/T_{\infty})^m$ 项,另外,反应物浓度用初始浓度代入,相应的动力学参数 $A_0$ 、 $E_0$ 用唯象系数 $A$ 、 $E$ 替代。压力系数 $\alpha$ 也并入 $A$ 中,这样方程(1)变成:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{6k}{D_0} T_{\infty}^m + A Q Y_0^{\beta} \left(\frac{P_{\infty}}{P_0}\right)^{\beta} e^{-E/RT} \quad (2)$$

又因 $|\frac{T-T_{\infty}}{T_{\infty}}| < 1$ ,则有

$$\frac{E}{RT} \approx \frac{E}{RT_{\infty}} - \frac{E}{RT_{\infty}^2} (T - T_{\infty}) \quad (3)$$

把(3)式代入(2)式可得:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{6k}{D_0} T_{\infty}^m + A Q Y_0^{\beta} \left(\frac{P_{\infty}}{P_0}\right)^{\beta} \cdot e^{-E/RT_{\infty}} \cdot e^{E(T-T_{\infty})/RT_{\infty}^2} \quad (4)$$

由上式易得液滴着火延迟期  $t_i$  与着火温度  $T_c$  的关系如下:

$$t_i = \frac{\rho C_p R D_0}{6kET_\infty^{m-2}} \left\{ \ln \left[ G \exp \left( \frac{2E}{RT_\infty^2} - \frac{ET_0}{RT_\infty^2} \right) + 1 \right] - \ln \left[ G \exp \left( \frac{2E}{RT_\infty^2} - \frac{ET_c}{RT_\infty^2} \right) + 1 \right] \right\} \quad (5)$$

其中 
$$G = \frac{6kT_\infty^m}{AQD_0Y_0^2} \left( \frac{P_0}{P_\infty} \right)^n \quad (6)$$

### 3.3 计算值与实验值的比较

公式(5)中的  $A, E, k, m, \beta$  均为拟合参数,它们可根据部分实验数据来拟合。其它物性参数<sup>[4]</sup>取平均值,一起列出如下:

$$\begin{aligned} A &= 1.54 \times 10^{-2} \text{1/s} & \rho &= 1.365 \times 10^3 \text{kg/m}^3 & m &= 3 \\ E &= 3.26 \times 10^4 \text{J/mol} & C_p &= 4.19 \times 10^3 \text{J/(kg} \cdot \text{K)} & n &= 1 \\ k &= 2.51 \times 10^{-5} \text{W/(m}^2 \cdot \text{K}^3) & Q &= 8.8 \times 10^8 \text{J/m}^2 & Y_0 &= 1 \end{aligned}$$

$$\beta = \begin{cases} -9.2 \times 10^{-3} \left( \frac{P_\infty}{P_0} \right)^2 + 0.374 \left( \frac{P_\infty}{P_0} \right) - 2.73, & (1.52 \text{ MPa} \leq P_\infty \leq 2.53 \text{ MPa}) \\ 8 \times 10^{-4} \left( \frac{P_\infty}{P_0} \right)^2 - 6 \times 10^{-3} \left( \frac{P_\infty}{P_0} \right) + 0.506, & (2.53 \text{ MPa} < P_\infty < 4.05 \text{ MPa}) \end{cases}$$

现在把这一套参数用来检验另一部分实验结果,算出相应的理论值列于表 1,其误差小于 5%。

表 1 LP1846 液滴着火延迟期与环境压力、温度的关系  
Table 1 Relation of ignition delay time of LP1846 droplet and ambient pressure and temperature

$P_\infty$ /(MPa)	1.52	2.03	2.53	3.04	3.55
$T_\infty$ /°C	620	510	530	480	440
$t_i$ /s(实)	1.125	0.785	1.013	0.660	0.265
$t_i$ /s(计)	1.114	0.790	1.017	0.637	0.278

## 4 结 论

根据以上实验现象可初步得出以下几点结论:

(1) LP1846 液滴在高温高压下的燃烧过程呈现爆裂性特征。压力越高,爆裂越猛烈,即液滴由部分破碎转为瞬间全部粉碎。其爆裂机理是剧烈的液相化学反应。

(2) 对于初始直径基本相同的 LP1846 液滴,其着火延迟期随着环境压力和温度的升高而缩短,但不是单调递减,有涨落现象。

(3) 建立的 LP1846 液滴爆裂性燃烧延迟期的工程计算模型和实验结果吻合较好。

### 参 考 文 献

- 1 Beyer R A. Single Droplet Studies in a Hot, High pressure Environment, ADA 194472, 1988.
- 2 Beyer. R A. Continuing Studies of Liquid Propellant Drops in Hot, High-Pressure Environment, ADA212265, 1989.
- 3 Beyer R A. The Response of an LP to Heating at High Pressure, The Fourth Annual conferene of HAN-Based

Liquid propellants, 1988.

4 张续柱,肖忠良著.液体发射药.北京:中国科学技术出版社,1993.

## A STUDY ON EXPLOSION COMBUSTION PHENOMENON OF ENERGETIC DROPLET IN HIGH PRESSURE ENVIRONMENTS

Yu Yonggang, Jin Zhiming

(*College of Power Eng. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094*)

**ABSTRACT** The properties of explosion combustion of energetic droplet LP1846 in hot (440~620 °C) and high pressure (1.52~3.55 MPa) ambient have been investigated by use of suspended droplet apparatus. Time series photographs of the droplet from heating to explosion combustion are given. Ignition delay time and relation of the droplet diameter as a function of time are also measured quantitatively. The mechanism of explosion combustion of the droplet is discussed tentatively. An engineering calculation model on ignition delay time of the droplet is proposed. The calculated values agree with the experimental data.

**KEY WORDS** liquid propellant, ignition, combustion, microexplosion