

含能液滴间相互作用对着火、 燃烧过程的影响^{*}

余永刚 金志明

(南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

摘要 在控制再生式液体发射药火炮燃烧稳定性的背景下,采用挂滴装置和高速摄影系统开展了HAN基液体发射药LP1846液滴组内部相互作用对着火、燃烧过程影响的研究。观测了液滴间相互作用对它们所经历的四个特征过程的影响。定量测试液滴组平均着火延迟期、着火温度等特性参数与环境温度和液滴中心间距的关系。实验发现:在一定条件下,液滴组将出现聚并现象。最后,建立了一个工程简化模型,理论计算与实验数据吻合较好。这个工作对控制燃烧稳定性和抑制压力振荡有一定的指导意义。

关键词 液体发射药 着火 推进剂燃烧

中图分类号 V511.3

1 引言

自二次世界大战以来,人们对采用单元发射药和双元发射药的各种整装式和再生式液体发射药火炮系统进行了种种探索性研究。然而,目前世界各国的研究重点集中在用HAN基液体单元发射药的再生式火炮概念的试验。其工作过程是利用再生原理把液体药由贮液室喷射到火炮的燃烧室,然后点燃、燃烧,产生高温高压燃气推动弹丸运动。所用的HAN基液体发射药主要是由硝酸羟胺(简称HAN)、三乙醇胺硝酸盐(简称TEAN)和水按一定重量比配成,常用的两个配方是LP1845(63.2% HAN + 20% TEAN + 16.8% H₂O)和LP1846(60.8% HAN + 19.2% TEAN + 20% H₂O)。

在再生式液体炮内弹道循环中,液体发射药射流破碎成液滴,稠密的液滴间必然存在较强的相互作用。研究表明:液滴群燃烧和射流破碎、雾化之间的耦合效应是导致液体炮燃烧不稳定即膛内出现高频压力振荡的重要因素。因此,要改善液体炮内弹道循环,必须对各个过程进行深入研究。文献[1~4]报道了液体药射流喷射雾化方面的结果。文献[5~8]给出了LP1845和LP1846单滴在几种工况下的着火、燃烧特性。HAN基液滴间的相互作用研究未见报道,在此背景下,我们从实验和理论两个角度探讨LP1846双滴在高温环境下其间距大小对着火、燃烧过程的影响。这个工作可以为进一步了解液滴群复杂的燃烧过程奠定基础,同时对控制燃烧稳定性和抑制压力振荡有一定的指导意义。

* 国家自然科学基金资助。

1996-02-05收到原稿,1996-08-17收到修改稿。

2 实验研究

2.1 实验装置

挂滴装置结构如图 1 所示,液滴通过针筒直接挂在两根 $\phi 0.2\text{mm}$ 的镍铬镍铝热电偶的结点上,再利用测微目镜粗略地估算两个液滴大小,并把它的直径调整到基本相同。另外,高温环境由管形电炉提供,它的温度由精密温控仪控制,温控范围从常温到 $1000\text{ }^\circ\text{C}$,精度为 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,液滴组所经历的全过程由高速电影摄影机拍摄,其拍频为 $35\sim 240$ 幅/秒。

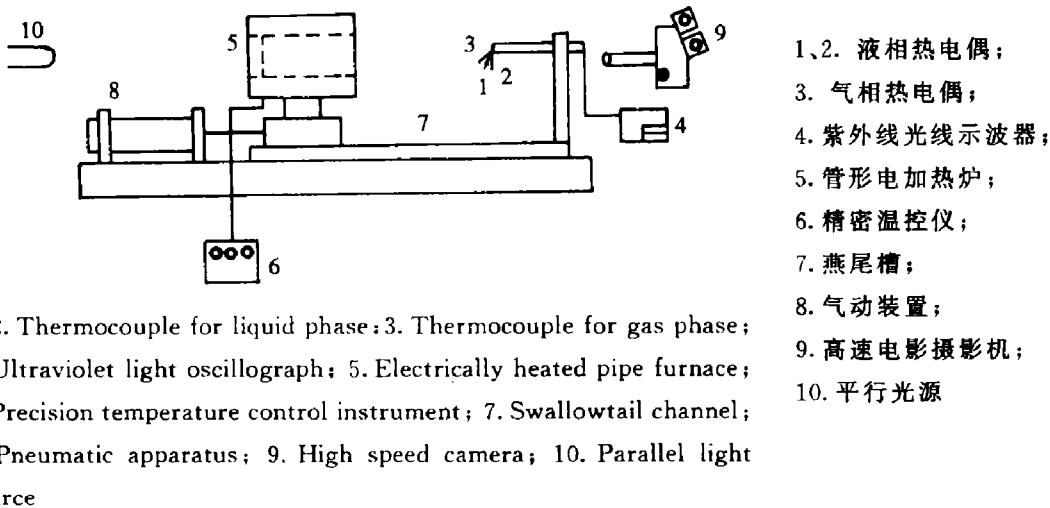


图 1 挂滴装置示意图

Fig. 1 Scheme of suspended droplet apparatus

2.2 实验结果与讨论

当 LP1846 双滴置入高温环境中,它们经历的过程和同样条件下的单滴行为相似^[9],即经历蒸发期(t_1)、周期性膨胀收缩期(t_2)、强烈热分解期(t_3)和燃烧期(t_4),但是两者经历同一过程的时间不等。实验中观察到,当液滴中心间距小于三倍初始直径(D_0)时,由于液滴间相互作用而造成的这种时间差异较明显,详见表 1 所示。

表 1 LP 1846 液滴经历四个特征过程的时间($T_\infty=850\text{ }^\circ\text{C}$, $L=4.071\text{mm}$)

Tabel 1 Four characteristic processes times LP1846 drops undergoing

滴型	D_0/mm	t_1/s	t_2/s	t_3/s	t_4/s
单滴	1.629	1.08	0.95	1.15	0.10
双滴	1.665	1.01	1.53	1.00	0.10
	1.670	1.09	1.56	1.08	0.07

从表 1 看出,在条件基本相同情况下,双滴经历膨胀收缩期的时间大约是单滴周期时间的 1.5 倍。因为 LP1864 液体发射药中水份占 20%,当液相温度到达 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时,即接近 LP1846 的沸点,它开始出现明显的周期性膨胀收缩现象。根据 LP1846 热分解试验结果可知:尽管此时存在硝酸羟胺(HAN)的微弱热分解,但仍以水的汽化为主,即气相产

物中以水蒸气为主。因此对双滴而言,每个液滴周围的水蒸气含量都比单滴周围的大,这样从分子运动论的观点来看,水分子的回归率必然增加,势必延长膨胀收缩过程。另外,液滴在膨胀收缩过程中会出现轻度微爆,即大液滴破裂,有小液滴飞溅出来。由于双滴距离较近,那么两个液滴都可能彼此接受部分飞溅过来的小液滴,从而减缓了液滴质量减小速率,导致膨胀收缩期延长。

此外,从表 1 还可以看出,双滴经历较强热分解期的时间大约比单滴经历同过程的时间缩短 10%,这是由于双滴在热分解时气相流场间存在耦合作用。具体来说,两个液滴分解出的中间产物分子由于距离很近,彼此间将存在质量和能量的输运现象,从而刺激中间反应过程的进行。其宏观表现为,双滴在高温环境下比单滴更易于着火。试验结果如图 2 所示。可以看出,双滴平均着火温度 T_c 比同条件下单滴的 T_c 值低 2%~5%。

从紫外线光线示波器上,很容易得到 LP1846 双滴气液两相热电偶曲线,其典型结果如图 3 所示。由图可见,气相热电偶曲线有两次突跃,分别表示两个液滴着火。在实验中,我们测量了液滴中心间距 $L=4.071\text{mm}$ 情况下,双滴平均着火延迟期 t_i 与环境温度 T_∞ 的关系,如图 4 所示。并在图上标出同条件下单滴的对比值。可以看出,双滴的 t_i 大约比单滴的 t_i 延长 3%~15%,这个定量结果和以上的定性解释相符。

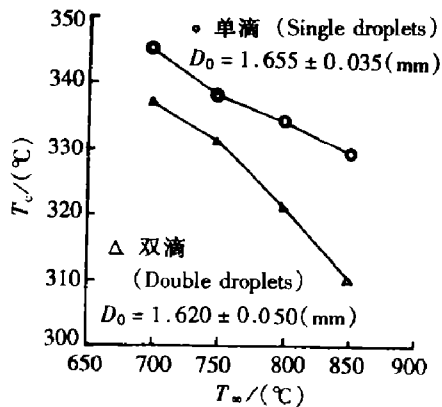
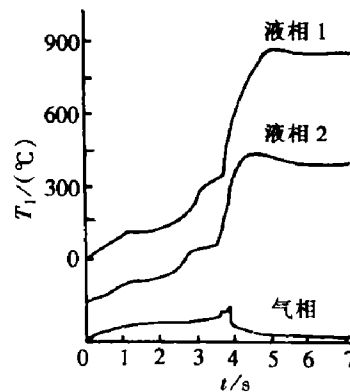


图 2 液滴着火温度与环境温度的关系
($L=4.071\text{mm}$)

Fig. 2 Ignition temperature of the droplets
vs ambient temperature



1. Liquid phase 1; 2. Liquid phase 2; 3. Gas phase
图 3 双滴气液两相温度与时间的关系

($T_\infty=850\text{C}$)
Fig. 3 Gas-phase and liquid-phase temperature
of the double droplets vs time

另外,在我们所用的实验设备中,难以做到让两个液滴同时着火,同时燃尽,从而求出燃烧速率。但是,我们可仿照单滴的方法,利用高速摄影胶片求出双滴从受热到燃尽全过程中液滴表面积平均减少速率 \bar{k} ,即

$$\bar{k} = (D_0^2 - D_1^2)/t_i$$

其中: D_0 为液滴初径, D_1 为热电偶结点直径。图 5 给出双滴和单滴的 \bar{k} 值随环境温度 T_∞ 变化的对比关系。

在实验中观察到,液滴间距不同,相互作用也不等,其宏观效应表现为双滴平均着火延迟期受液滴间距大小的影响。图 6 显示 800C 下, t_i 与双滴中心间距的关系,从图 6 看出,当 L 大约在两倍和三倍初始直径之间时,液滴间相互作用较强, L 越大, t_i 越小,两者

基本上呈线性递减关系。但是,当 L 大于三倍初始直径时,液滴间相互作用较弱,双滴值和单滴值很接近。概括起来说,双滴从受热到燃尽全过程中,其表面积平均减小速率 \bar{k} 与 L 的关系可粗略反映作用力大小的影响,其结果如图 7 所示。可以看出,这些定量结果和以上的定性解释是一致的,且 L 越大, \bar{k} 越接近单滴的 $k^{[9]}$ 。

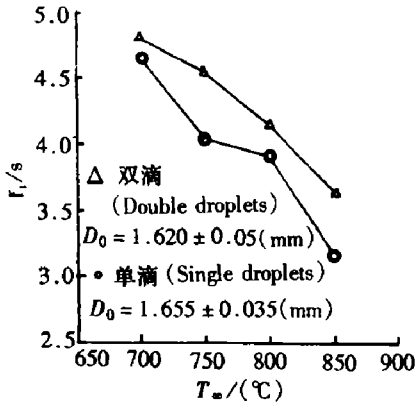


图 4 液滴的着火延迟期与环境温度的关系 ($L=4.071\text{mm}$)

Fig. 4 Ignition delay time of the drops vs ambient temperature

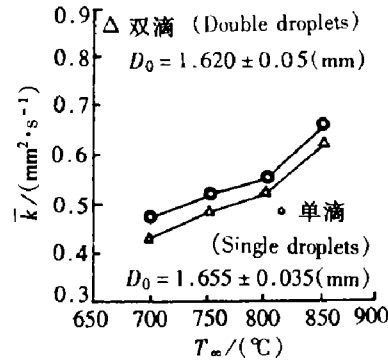


图 5 \bar{k} 与 T_∞ 的关系 ($L=4.071\text{mm}$)

Fig. 5 \bar{k} vs T_∞

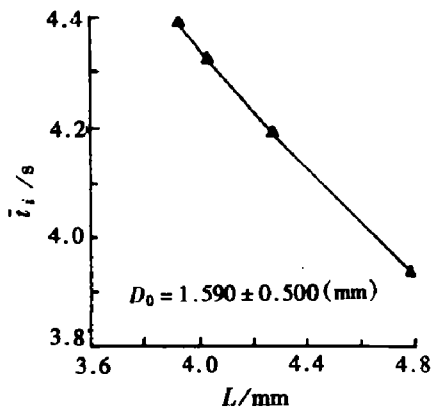


图 6 $\bar{\tau}_i$ 与 L 的关系 ($T_\infty=800\text{C}$)

Fig. 6 $\bar{\tau}_i$ vs L

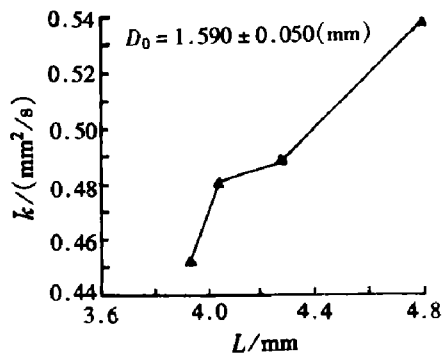


图 7 \bar{k} 与 L 的关系 ($T_\infty=800\text{C}$)

Fig. 7 \bar{k} vs L

若液滴间距过小,可能出现聚并现象。因为从单滴行为来看,液滴膨胀的最大直径可达初径的两倍左右,因此,在 L 小于两倍初始直径时,两个液滴可能因强烈相互作用而聚并。我们在实验中已观察到这个现象,详细过程如图 8 所示,其中三个液滴初径分别为 1.549, 1.614, 1.684mm, 中心间距依次为 3.269, 3.303mm, 从第(4)幅照片看出,左边两个液滴已聚合成一滴。从第(10)幅照片看出,三个滴已聚成一滴。尽管此例中液滴中心间距略大于两倍初始直径,但由于热电偶丝导致液滴膨胀不对称,所以仍会聚合。

在再生式液体发射药火炮中,由于液滴群十分稠密,在高温下势必出现聚合效应,从而使液体药堆积下来,这是导致液体炮后期压力振荡剧烈的一个重要因素。因此液体炮所选用的推进剂从弹道要求来说,其液滴着火延迟期不应太长,但燃烧时间要很短,液滴间

应避免因膨胀而出现的二次聚合现象,这对控制弹道稳定性是有利的。

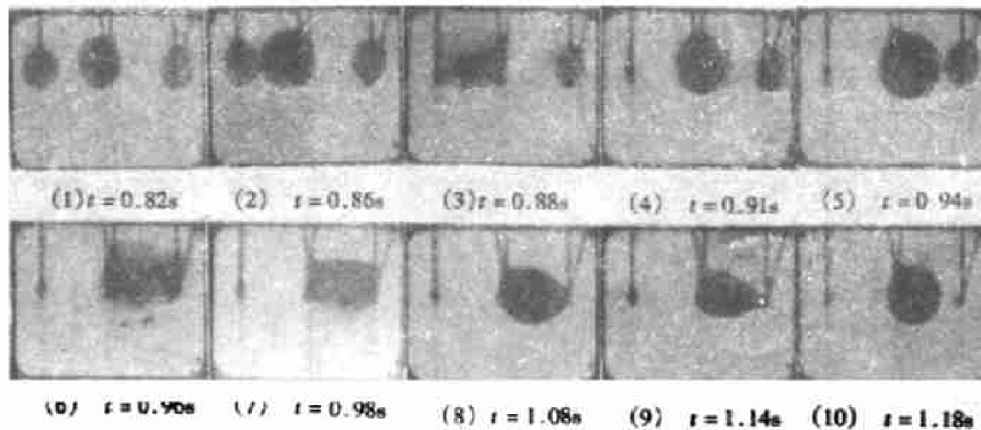


图8 LP1846液滴组膨胀聚合的序列过程($T_{\infty}=800\text{C}$)

Fig. 8 Series processes of coalescence due to expansion for LP1846 drop group

3 理论模型

3.1 基本假设

LP1846双滴在高温环境下蒸发、分解、燃烧时,由于气相流场间的耦合作用,使得双滴现象更趋复杂。为了从理论上定量计算双滴表面积平均减小速率,我们提出以下简化假设:(1)假设LP1846双滴所经历的过程为准定常的;(2)假设气相反应仅发生在燃烧区,且火焰区很薄,可作几何面处理;(3)不考虑对流和Stefan流;(4)物性参数取常量,且 $L_c=1$ 。

3.2 简化分析解

根据以上假设,在气相燃烧区外,燃料质量分数满足下列方程

$$\nabla^2 Y_F = 0 \quad (1)$$

为了求解双滴拉普拉斯方程,我们采用双球坐标系^[10],即 $(x, y, z) \rightarrow (\eta, \theta, \varphi)$

$$\begin{cases} x = \frac{a \sin \theta \cos \varphi}{\cosh \eta \cos \theta} & (-\infty < \eta < +\infty) \\ y = \frac{a \sin \theta \sin \varphi}{\cosh \eta - \cos \theta} & (0 < \theta < \pi) \\ z = \frac{a \sinh \eta}{\cosh \eta - \cos \theta} & (0 \leq \varphi \leq 2\pi) \end{cases} \quad (2)$$

球面方程为

$$x^2 + y^2 + (z - a \coth \eta)^2 = \frac{a^2}{\sinh^2 \eta} \quad (3)$$

其中: $a = R \sinh \eta_1$,双球间距 $L = 2R \cosh \eta_1$, R 为液滴半径。利用(2)、(3)式可把方程(1)变成

$$\begin{aligned} & \frac{(\cosh \eta - \cos \theta)^2}{a^2 \sin^2 \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{\cosh \eta - \cos \theta} \cdot \frac{\partial Y_F}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{\cosh \eta - \cos \theta} \cdot \frac{\partial Y_F}{\partial \theta} \right) \right] \\ & + \frac{(\cosh \eta - \cos \theta)^2}{a^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 Y_F}{\partial \varphi^2} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

方程(4)的边界条件为

$$\begin{cases} \eta = \pm \eta_1, & Y_F = Y_{F,\infty} \text{ (对两个液滴)} \\ \theta = 0, & \pi, \quad \partial Y_F / \partial \theta = 0 \\ \eta = \theta = 0, & Y_F = 0 \end{cases} \quad (5)$$

考虑到对称性,方程(4)的解可写成如下分离变量的形式

$$Y_F(\eta, \theta) = (\cosh \eta - \cos \theta)^{1/2} [A_m e^{(m+1/2)\eta} + B_m e^{-(m+1/2)\eta}] P_m(\cos \theta) \quad (6)$$

把方程(5)代入方程(4),整理得

$$Y_F = 2^{1/2} Y_{F,\infty} (\cosh \eta - \cos \theta)^{1/2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\exp[-(m + \frac{1}{2})\eta_1]}{\cosh[(m + \frac{1}{2})\eta_1]} \cosh[(m + \frac{1}{2})\eta] P_m(\cos \theta) \quad (7)$$

因此,质量扩散速率为

$$\dot{m}' = \iint_{A_1} \rho D (\nabla_{\eta} Y_F) dA_{\eta} \quad (8)$$

其中

$$\nabla_{\eta} Y_F = \frac{1}{g_1^{1/2}} \cdot \frac{\partial Y_F}{\partial \eta}, \quad dA_{\eta} = (g_2 g_3)^{1/2} d\theta d\varphi \quad (9)$$

上两式中 g_1, g_2, g_3 均为矩阵系数,即

$$\begin{cases} g_1 = g_2 = \frac{a^2}{(\cosh \eta - \cos \theta)^2} \\ g_3 = \frac{a^2 \sin^2 \theta}{(\cosh \eta - \cos \theta)^2} \end{cases} \quad (10)$$

将(7),(9),(10)式代入(8)式,计算可得

$$\begin{aligned} \dot{m}' &= 4\pi R \rho D Y_{F,\infty} \sinh \eta_1 \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{1}{\sinh(2m+1)\eta_1} - \frac{1}{\sinh(2m+2)\eta_1} \right] \\ &= 4\pi R \rho D Y_{F,\infty} \left[1 - \sum_{m=2}^{\infty} (-1)^m \frac{\sinh \eta_1}{\sinh m \eta_1} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

在液滴高温蒸发的实际过程中,Stefan 流是很强烈的。液滴蒸发是由扩散和 Stefan 流共同作用的结果,文献[11]报道在纯扩散过程中,通过引入传递数 B 可把 Stefan 流的贡献考虑进去,于是,双滴质量蒸发速率为

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{m}' \ln(1+B) \\ &= 4\pi R \rho D Y_{F,\infty} \ln(1+B) \left[1 - \sum_{m=2}^{\infty} (-1)^m \frac{\sinh \eta_1}{\sinh m \eta_1} \right] \\ &= 4\pi R \frac{\lambda}{c_p} \ln(1+B) \left[1 - \sum_{m=2}^{\infty} (-1)^m \frac{\sinh \eta_1}{\sinh m \eta_1} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

从双滴蒸发的实验结果可知,其直径随时间的变化基本满足 D^2 定律,则易于算出双滴与单滴蒸发常数之比为^[12]

$$\frac{\bar{k}_z(L)}{\bar{k}_z(\infty)} = 1 - \sum_{m=2}^{\infty} (-1)^m \frac{\sinh \eta_1}{\sinh m \eta_1} \quad (13)$$

把(13)式右边的级数展开,得

$$\text{当 } m = 2 \text{ 时} \quad \frac{\sinh \eta_1}{\sinh 2\eta_1} = \frac{1}{2\cosh \eta_1} = \frac{R}{L}$$

$$\text{当 } m = 3 \text{ 时} \quad -\frac{\sinh \eta_1}{\sinh 3\eta_1} = \frac{1}{1 - 4\cosh^2 \eta_1} = \frac{1}{1 - (L/R)^2} \approx -\left(\frac{R}{L}\right)^2$$

依次类推,(13)式可近似写成

$$\frac{\bar{k}_i(L)}{\bar{k}_i(\infty)} \approx 1 - \frac{R}{L} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 - \left(\frac{R}{L}\right)^3 + \dots = \left(1 + \frac{R}{L}\right)^{-1} \quad (14)$$

LP1846 液滴从受热到燃尽全过程中,都可近似当作一准蒸发过程处理,因为在液滴燃烧时,可简单地把火焰理解为液滴周围的高温环境,这样把燃烧问题转化为蒸发问题处理。所以,双滴表面积平均减小速度 $\bar{k}(L)$ 和单滴 $\bar{k}(\infty)$ 之比可近似认为与(14)式相同,即

$$\frac{\bar{k}(L)}{\bar{k}(\infty)} \approx \left(1 + \frac{R}{L}\right)^{-1} \quad (15)$$

3.3 与实验结果的比较

利用(15)式针对图 5 和图 7 的试验结果,算出相应的理论值,其结果分别如图 9 和图 10 所示。从图上看,理论计算和实验数据基本吻合,两者最大误差小于 10%。

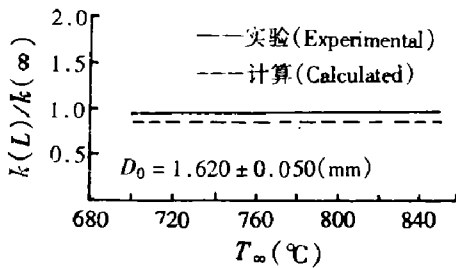


图 9 $\bar{k}(L)/\bar{k}(\infty)-T_{\infty}$ 曲线计算值与实验值的比较

Fig. 9 Comparison between calculated values and experimental data for $\bar{k}(L)/\bar{k}(\infty)$ vs T_{∞}

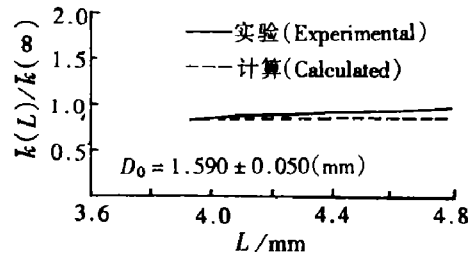


图 10 $\bar{k}(L)/\bar{k}(\infty)-L$ 曲线计算值与实验值的比较

Fig. 10 Comparison between calculated values and experimental data for $\bar{k}(L)/\bar{k}(\infty)$ vs L

4 结 论

(1) LP1846 液滴组在高温常压环境下经历的过程和同条件下的单滴行为相似,即经历蒸发期、周期性膨胀收缩期、较强热分解期和燃烧期,只是它们经历同一过程的时间不等。

(2) 当 $2D_0 < L < 3D_0$ 时, LP1846 液滴间有较强的相互作用,双滴平均着火延迟期比单滴结果大,但平均着火温度比单滴值低,并且液滴间距越小,两者的差异越大。

(3) 当 $L > 3D_0$ 时, LP1846 液滴组内部相互作用较弱,液滴组着火,燃烧的各种特征参数接近同条件下的单滴结果。

- (4) 当 $L \leq 2D_0$ 时, LP1846 液滴组将出现聚并现象。
 (5) 本文所建立的简化工程模型, 其计算值与实验结果吻合较好。

参 考 文 献

- 1 Steffens U, Rittel R. Studies on Liquid Injection and Jet Formation—A Comparison of Experimental and Theoretical Studies on Liquid Propellants Injection. Proceedings of the 10th Int Symp on Ballistics, San Diego, 1987
- 2 Warken D. Investigation of Injection Processes of Liquid Propellants—First Results. The 4th Anglo-German Meeting on Internal Ballistics, United Kingdom, 1987
- 3 Char J M, Kuo K K, Hsieh K C. Observations of Breakup Processes of Liquid Jets Using Real Time X-Ray Radiography. AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propulsion Conference, San Diego, CA, 1987
- 4 Coffee T P. One-Dimensional Modeling of Liquid Injection in a Regenerative Liquid Propellant Gun. BRL-TR-2897, 1988
- 5 Beyer R A. Atmospheric Pressure Studies of Liquid Propellant Drops in Hot Flows. ADA174639, 1986
- 6 Beyer R A. Single Droplet Studies in a Hot, High Pressure Environments. ADA194472, 1988
- 7 Law C K. Ignition and Combustion of Liquid Propellants. ADA224150, 1990
- 8 余永刚, 金志明. 含能液滴在高压下爆裂性燃烧现象的研究. 爆炸与冲击, 1996, 16(1): 47~52
- 9 Yu Yonggang, Jin Zhiming. The Study of Ignition, Combustion and Microexplosion Properties For HAN-Based Monopropellant LP1846 Drops. 15th Int Symp on Ballistics, Israel, 1995. 205~214
- 10 Moon P, Spencer D E. Field Theory Handbook. Berlin; Springer-Verlog, 1971. 110~120
- 11 Labowsky M. A Formalism for Calculating the Evaporation Rates of Rapidly Evaporating Interacting Particles. Combustion Science and Technology, 1987, (18): 145~151
- 12 傅维标, 张永廉, 王清安. 燃烧学. 北京: 高等教育出版社, 1989. 165

EFFECTS OF INTERACTIONS BETWEEN ENERGETIC DROPLETS ON IGNITION AND COMBUSTION PROCESSES

Yu Yonggang, Jin Zhiming

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

ABSTRACT A study of the effects of interactions between HAN-based liquid propellant LP1846 drops on ignition, combustion processes has been developed with the goal of control combustion stability for regenerative liquid propellant gun. By use of a suspended drops apparatus and a high speed film camera, the effects of interactions between the drops on four characteristic processes where they undergo are observed. Mean ignition delay time, ignition temperature and other parameters for LP1846 drops group are measured. It is seen in experiments that coalescent phenomenon occurs for the drops group under some conditions, and the experimental phenomenon is discussed. Besides, a simplified engineering model is set up, the calculating results are in good agreement with the experimental data. The research results are important for control of combustion stability and suppression pressure oscillation in regenerative liquid propellant gun.

KEY WORDS liquid propellant, ignition, propellant combustion