

单元推进剂液滴组着火过程的实验研究*

余永刚 金志明

(南京理工大学动力工程学院, 南京, 210094)

摘 要: 利用挂滴装置和高速摄影系统研究 HAN 基液体推进剂 LP-1846 液滴组的着火过程, 观察了液滴间相互作用对着火过程的影响, 定量测试液滴组平均着火延迟期、着火温度与环境温度和液滴中心间距的关系, 并对实验现象进行了讨论。研究结果对抑制液体发射药火炮压力振荡和控制燃烧稳定性有一定的指导意义。

主题词: 单元推进剂, 液滴, 推进剂燃烧, 自燃性

分类号: V511.3, TQ562

AN EXPERIMENTAL STUDY ON IGNITION PROCESSES OF LIQUID PROPELLANT DROPLETS GROUP

Yu Yonggang Jin Zhiming

(Coll. of Power Engineering, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: A droplet-suspending apparatus and a high speed camera are employed in investigation of ignition processes of HAN-based liquid propellant LP-1846 drops group. The effects of interactions between the drops on ignition processes are observed. Mean ignition delay time and ignition temperature as a function of ambient temperature and central distance between the drops are also measured. The experimental phenomena are analyzed. The research results are important reference for suppression of pressure oscillation and control of combustion stability in the regenerative liquid propellant gun.

Subject terms: Monopropellant, Drop, Propellant combustion, Autoignition property

1 引言

HAN 基系列发射药是以超高速射弹技术为背景而研制的高能单组元液体推进剂^[1]。它的主要组成是硝酸羟胺(简称 HAN)、三乙醇胺硝酸盐(简称 TEAN)和水,常用的两个配方是 LP-1845 和 LP-1846。而在再生式液体炮射击实验时发现,火炮膛内存在高频压力振荡。研究表明,振荡的主要因素来自液体推进剂射流破碎、雾化和燃烧之间的耦合效应^[2]。因此,为改善液体炮内弹道循环,曾对各个过程进行了深入的研究。如文献[3,4]报道了液体推进剂射流喷射雾化方面的结果,文献[5~7]给出了 LP-1845 和 LP-1846 单滴在几种工况下的着火、燃烧特性。但单元推进剂液滴组着火、燃烧过程的研究则未见报道。本文研究了 LP-1846 液滴组在高温大气环境下的着火特性,拟为液滴群复杂的着火燃烧过程研究奠定基础,并为抑制液体炮压力振荡和控制稳定燃烧准备条件。

* 收稿日期:19960526,修回日期:19961202

2 试验装置

挂滴台结构如图 1 所示。液滴通过针筒直接挂在两根直径为 0.2mm 的镍铬铝热电偶的结点上,再利用测微目镜粗略地估算两个液滴大小,并把它们直径调整到基本相同。液滴组所经历的全过程由高速电影摄影机记录,它的拍频为:35~240 幅/s。

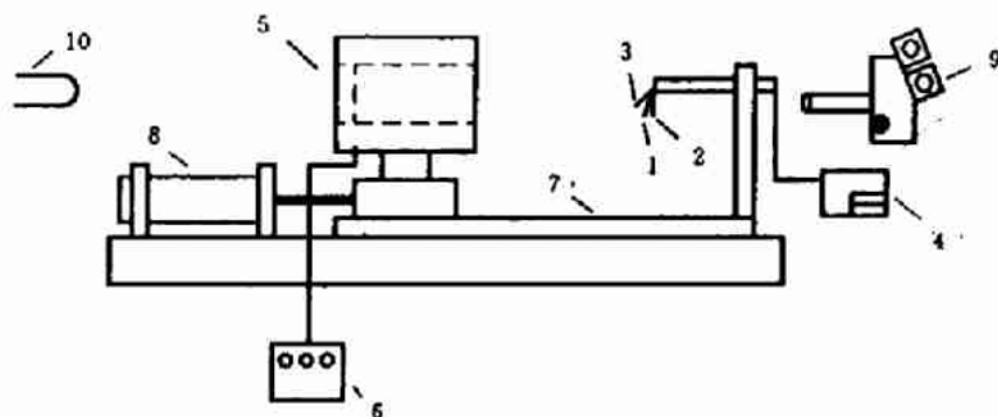


Fig. 1 Scheme of experimental apparatus

- (1)(2). Thermocouple of liquid phase (3). Thermocouple of gas phase
(4). Ultraviolet light oscillograph (5). Electrically heated pipe furnace
(6). Precision control temperature instrument (7). Swallowtail channel
(8). Pneumatic apparatus (9). High speed film camera (10). Parallel light source

3 试验结果与讨论

当 LP-1846 双滴置入高温环境中,它们经历的过程和同条件下的单滴行为相似,也有 4 个特征过程,即垂发期(t_1)、周期性膨胀收缩期(t_2)、较强热分解期(t_3)和燃烧期(t_4)。从高速摄影胶片上看去,若液滴中心间距小于 3 倍初始直径时,则双滴间有明显的相互作用。结果如图 2 所示。

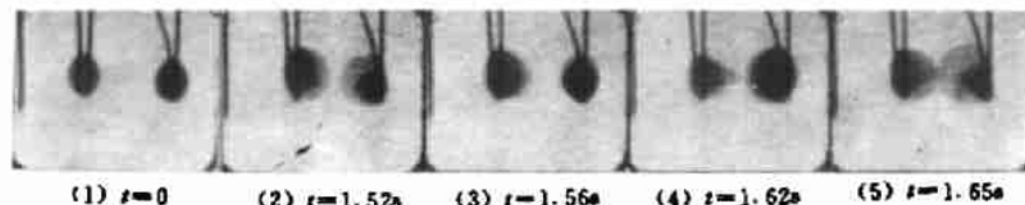


Fig. 2 Series processes of interactions between LP-1846 droplets($T_{\infty}=800^{\circ}\text{C}$)

在图 2 中,两个液滴初径分别为 1.639mm 和 1.595mm,中心间距为 3.196mm。从第(5)幅照片可看出,双滴间由于相互作用,使得各自的形状变成锥形,周围有球形气相产物笼罩。经分析,产物以水蒸气为主。

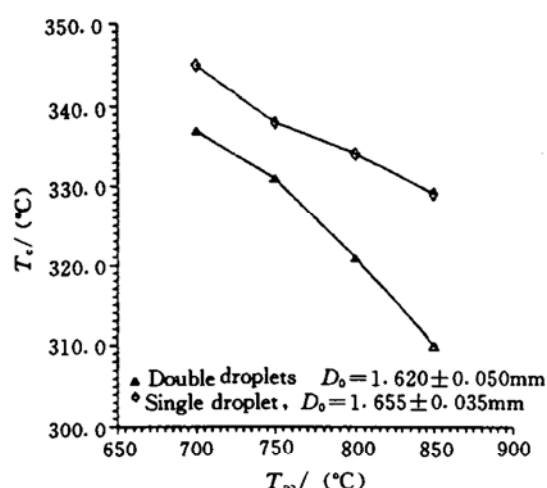
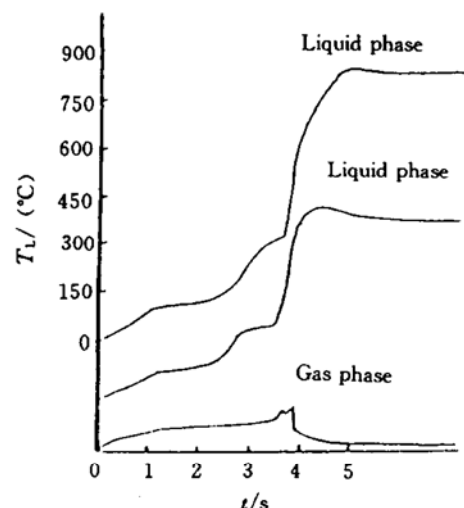
液滴间相互作用的结果导致液滴组经历特征过程的时间与单滴不同。LP-1846 液滴经历 4 个特征过程的时间测量结果见表 1。

Table. 1 Time of four characteristic processes what LP-1846 drops undergo ($T_{\infty}=850^{\circ}\text{C}$, $L=4.071\text{mm}$)

Codition	D_0/mm	t_1/s	t_2/s	t_3/s	t_4/s
Single drop	1.629	1.08	0.95	1.15	0.10
	1.665	1.01	1.53	1.00	0.10
Dorble drop	1.670	1.09	1.56	1.08	0.07

可见在条件基本相同时,影响最大的是膨胀收缩期,大约比单滴结果延长 50%。其次是较强热分解期,大约比单滴值降低 10%。而全过程时间大约比单滴生存期增加 12%。

因为 LP-1846 中水份占 20%,液滴在周期性膨胀收缩期的温度约为 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。尽管此时存在 HAN 的微弱热分解,但仍以水的汽化为主。双滴每个液滴周围的水蒸气含量都比单滴周围大,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质微爆,即有小液滴飞溅出来。由于双滴距离较近,则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。而双滴在较强热分解期间,由于气相流场间存在耦合作用,可加快热分解的过程,其宏观表现为双滴比单滴更易于着火。图 3 的试验结果证明了这一点,双滴平均着火温度 T_i 比同条件下单滴值低 $2\%\sim 5\%$ 。

**Fig. 3** Ignition temperature vs ambient temperature curves ($L=4.071\text{mm}$)**Fig. 4** Temperature rise curves of gas and liquid phases ($T_{\infty}=850^{\circ}\text{C}$)

记录的双滴气液两相温升曲线如图 4 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 $\bar{t}_i$ 与环境温度的关系,并与同条件下单滴的值进行了对比。(见图 5)。由图 5 可见,双滴的 $\bar{t}_i$ 大约比单滴的 t_i 延长 $3\%\sim 15\%$,这个定量结果和以上的定性解释相符。

试验中观察到,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 800°C 下, $\bar{t}_i$ 与双滴中心间距 L 的关系。从图中看出,当 L 大约在 2 倍和 3 倍初始直径之间时,液滴间相互作用较强。间距越小,平均着火延迟期越长,基本上呈线性增长。但是,当 L 大于 3 倍初始直径时,液滴间相互作用较弱, $\bar{t}_i$ 与 t_i 很接近。若液滴间距过小,可能出现聚并现象。因为从前面的实验现象可知,液滴在高温环境中会出现周期性的膨胀收缩现象。一般来说,单滴膨胀的最大直径可达初径的 2 倍左右^[8]。因此,在 L 小于 2 倍

初始直径时,两个液滴可能因强烈相互作用而聚并。在实验中已观察到这个现象,如图 7 所示。两个液滴初径约 1.652mm 和 1.766mm,中心间距 3.6257mm。从第(4)幅照片(放大 2.44 倍)看出,两滴已聚成一滴。尽管此例中液滴中心间距略大于 2 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。

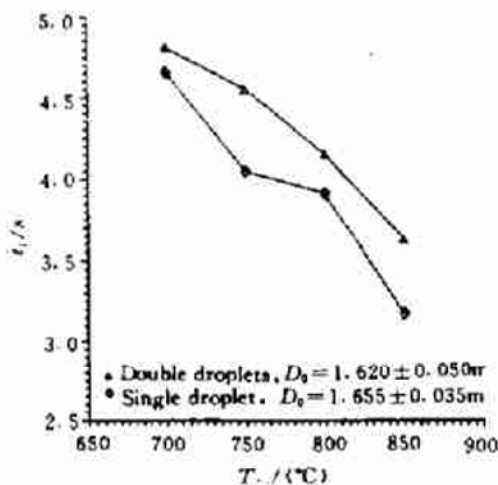


Fig. 5 Ignition delay time vs ambient temperature curves ($L = 4.071\text{mm}$)

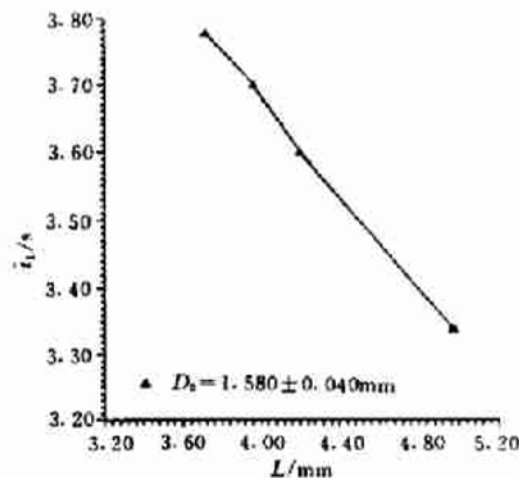


Fig. 6 Ignition delay time vs central distance between the droplets curves ($T_a = 850^\circ\text{C}$)

在再生式液体炮中,由于燃烧室初始容积很小,射流破碎雾化后形成的液滴群十分稠密,在高温下势必出现聚合效应。使刚刚分离出的液滴又聚成一片。在 RLPG 射击循环初期,由于膛内的压力不太高,液体推进剂点火、燃烧的时间相对较长,聚合效应将使液体推进剂在

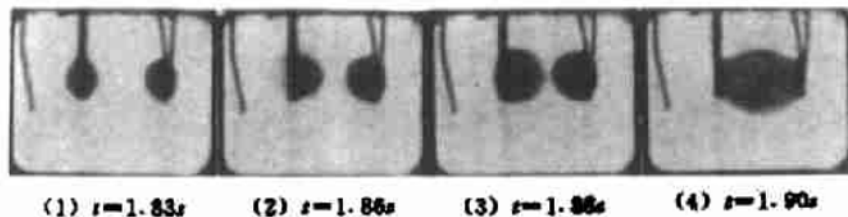


Fig. 7 Series processes of coalescence for the droplets ($T_a = 800^\circ\text{C}$)

膛内堆积,尤其在点火初期最为严重。一旦积累的液体推进剂着火、燃烧,必然导致膛压猛增,从而加大喷射。这种正反馈式的耦合效应是导致 RLPG 后期压力振荡剧烈的一个重要因素。

4 结 论

(1) LP-1846 液滴间的相互作用对着火过程有显著影响。与单滴相比,它使着火延迟期延长,但使着火温度降低。在液滴中心间距小于 3 倍初始直径时表现得较为明显。

(2) LP 1846 液滴中心间距小于 2 倍初始直径时,液滴组将出现聚合效应,这是诱发 RLPG 后期压力振荡的一个重要因素。

参 考 文 献

- 1 Klein N. Liquid propellants for use in guns—a review. ADA 153051, 1985
- 2 Klein N, Coffee T P, Leveritt C S. Pressure oscillations in a liquid propellant gun—possible dependence of propellant burning rate. ADA252758, 1992
- 3 Warken D, Krehl P. Application of flash radiography to the analysis of simulated liquid gun propellant jets.

Proceedings of the 11th International Symposium on Ballistics, Brussels, 1989: 138~146

- 4 Lee T W, Faeth G M. Structure and mixing properties of combustng monopropellant sprays. J of Propulsion and Power, 1992, 8: 271~279
- 5 Zhu D L, Law C K. Aerothermochemical studies of energetic liquid materials: 1. combustion of HAN-bases liquid gun propellants under atmospheric pressure. Combustion and Flame, 1987, 70: 333~342
- 6 Beyer R A. Studies of single liquid propellant drop in hot, high pressure environments. 23rd TANNAP Combustion Meeting, Monterey, 1986: 429~438
- 7 Yonggang Y. The study of ignition, combustion and microexplosion properties for HAN-based monopropellant LP-1846 droplets. Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics. Israel, 1995: 205~214

(上接第 72 页)

4 结 论

本课题研究的这种类型的超声波喷嘴,主要有如下规律:

(1)激励电压 A 越高,射流越容易断裂。可以借提高激励电压来改善喷嘴的工作状况。

(2)应选取压电应变常数 d_{33} 大的压电陶瓷作为换能器材料,喷射压力越大, d_{33} 的影响越显著。

(3)喷嘴腔纵向间隙 δ 存在最佳值,处于最佳间隙值时,射流最容易断裂。离开这个最佳值,断裂效果逐渐变坏。

(4)喷射压力 p 高射流不容易断裂,在较低的压力下, d_{33} , δ , d_0 等因素对液滴形成的影响减弱。因此,选用较低的喷射压力对提高喷嘴的工作稳定性也是有利的。

(5)喷口直径 d_0 小,容易形成液滴,且其它参数的影响减弱。但小喷孔容易堵塞,必须提高墨水的过滤精度。

(6)在选取工作频率 f 时,要考虑与具体喷嘴结构相匹配。

参 考 文 献

- 1 西北工业大学,南京航空学院,北京航空学院合编. 航空燃气涡轮发动机原理. 北京:国防工业出版社, 1990
- 2 赵其寿. 液体燃料的雾化. 北京航空航天大学, 1979
- 3 金如山. 航空燃气轮机燃烧室. 北京:宇航出版社, 1988
- 4 应崇福主编. 超声学. 北京:科学出版社, 1993
- 5 杜功焕等编. 声学基础. 上海:上海科学技术出版社, 1981
- 6 白瑞纳克 L L 著. 声学. 北京:高等教育出版社, 1959
- 7 苏尔皇. 管道动态分析及液流数值计算方法. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1985
- 8 马大猷,沈喆编著. 声学手册. 北京:科学出版社, 1983
- 9 王矜奉,姜祖桐,石瑞大编著. 压电振动. 北京:科学出版社, 1989
- 10 王 平译. 流体力学大学. 北京:北京航空航天大学出版社, 1991
- 11 Schneider. John M. The versatility of ink jet. Hard Copy and Printing Technologies, 1990, 1252: 183