

文章编号: 1006-9941(2008)05-0625-04

液体推进剂液滴电点火特性的实验研究

余永刚, 李明, 周彦煌, 陆欣

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为了研究 HAN 基液体推进剂电点火特性, 设计了液体推进剂液滴低压电加热点火模拟试验装置, 利用高速录像系统, 观测了 HAN 基液体推进剂 LP1846 单滴在不同电加热速率下的点火特性, 结果表明, LP1846 液滴在通电时主要经历四个特征过程, 即: 蒸发过程、周期性膨胀收缩过程、热分解过程和着火燃烧过程, 且在膨胀收缩过程中伴有微爆现象发生。电压加载速率从 $80 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $140 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 过程中, 液滴着火延迟期从 0.82 s 变为 0.62 s, 呈线性缩短, 且着火时火焰越明亮。

关键词:燃烧学; 液体推进剂; 电点火; 瞬态测量

中图分类号: TJ55; TK121; V512

文献标识码: A

1 引言

随着新型航天器及新概念火炮的发展, 液体推进剂作为火箭发动机和火炮的能源之一备受关注。考虑到环保、经济性和推进装置的自身要求, 世界工业强国正在寻找廉价、无毒、无污染以及高比冲的液体推进剂, 其中 HAN 基系列液体推进剂是最具潜力的一种。该类推进剂首先用于液体炮和电热化学炮, 围绕 HAN 基液体推进剂 LP1845、LP1846 点火燃烧问题, 国内外学者^[1-4]开展了大量研究工作。近年来, 采用 HAN 基液体推进剂的化学微、小型推进器^[5-6]成为航天领域研究的热点之一。目前许多国家正在竞相开发比冲高、结构紧凑、消耗工质少、成本低廉的微、小推力系统, 以此燃料的发动机正处于预研探索阶段, 它一般采用传统的催化分解点火方式, 由于 HAN 基液体推进剂燃烧温度高, 易于烧坏催化床, 严重缩短了发动机寿命。美国宾夕法尼亚州立大学 Yang V 等学者^[7]提出电点火的工作原理。有关 HAN 基液体推进剂电点火的研究, 首先源于液体炮的两级电点火具, 国内外学者 DeSpirito J^[8]、Klingenberg G^[9-10]、Rockstroh H^[11] 和栗保明等人^[12]分别采用高压(1 kV 以上)脉冲放电方式, 研究了微量(几毫升)整装式 HAN 基液体推进剂的电点火特性。考虑到化学微小型推进器的特点, 针对 HAN 基液体推进剂, 拟采用低压电解点火方式, Yetter R A、Yang V 等学者^[13]提出一种低压(2 ~

30 V)电解点火方式, 并对悬挂的 HAN 基液滴进行了电解点火试验。研究结果表明: 电点火比催化床点火耗电少, 延期时间短, 适合于微小型推进器使用。本工作针对 HAN 基液体推进剂 LP1846, 设计了一种电加热点火试验装置, 研究低压(60 ~ 140 V)不同电加热速率条件下, LP1846 单滴着火燃烧特性, 为 HAN 基液体推进剂发动机电点火系统设计提供参考。

2 实验装置

电加热点火试验装置示意图如图 1 所示, 它主要由交流变压器和电加热点火台组成, 实验中通过调节输出电压控制输出能量。电加热点火台由聚四氟材料制成, 如图 2 所示, 在平台中心钻一个半球形小孔, 直径 3.7 mm, 注入 LP1846, 利用表面张力形成球滴, 然后将两个电极插入液滴中, 电极间隙约 1 mm。

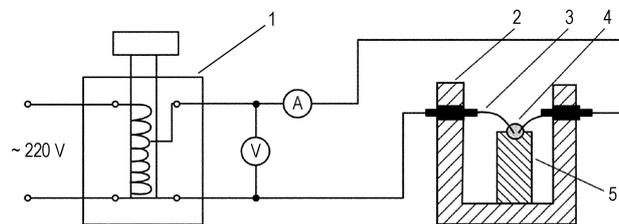


图 1 试验装置示意图

1—交流变压器, 2—电极支架, 3—电极,
4—LP1846 液滴, 5—聚四氟点火台

Fig. 1 Experimental device sketch

1—alternating current transformer, 2—bracket of electrode,
3—electrode, 4—LP1846 droplet, 5—ignition table of Teflon

实验时通过电流表、电压表测定点火过程中的电流与电压, LP1846 液滴从加热到点火燃烧的序列过程

收稿日期: 2008-07-31; 修回日期: 2008-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(50776048)

作者简介: 余永刚(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事含能材料燃烧推进技术研究。e-mail: yonggangy@21cn.com

由高速数字录像系统记录。

3 实验结果及讨论

LP1846 在常温下导电性不好,初始液滴(直径 3.7 mm)所测电阻约 10 ~ 11 k Ω ,当液滴两端的电压由零逐渐增大时,它经历的全过程如图 3 所示。由图 3 可见,LP1846 液滴变化的主要特征和其在高温环境中的变化特征相似^[4],主要经历了蒸发期、周期性膨胀收缩期、热分解期和着火燃烧期。特别是周期性膨胀收缩期伴有液滴轻度微爆现象,如图 3 中的第三幅照片所示,其微爆机理^[14]主要是 LP1846 中的水组分

过热造成的,因为 LP1846 中含有 20% 的水组分。

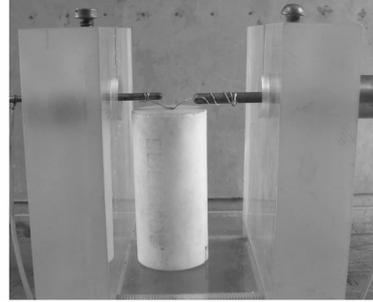


图 2 点火台照片

Fig. 2 Photograph of ignition table

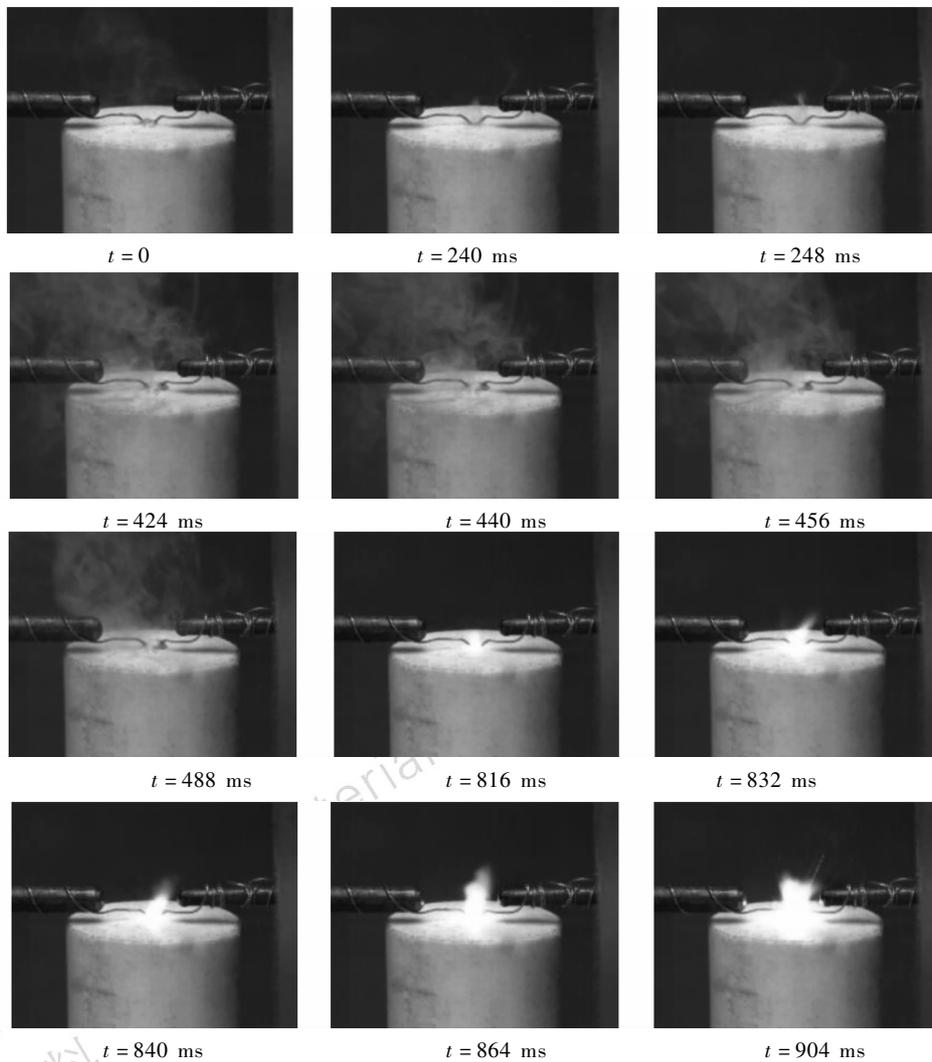


图 3 LP1846 液滴电加热点火的序列过程($U_m = 80$ V)

Fig. 3 Processes of electrical heat and ignition of LP1846 droplet($U_m = 80$ V)

LP1846 液滴在通电过程中电阻值是变化的,所测的加载电压、电流随时间变化曲线如图 4、图 5 所示,电压按线性加载,最大值为 80 V,电流先增大又变小,表

明液滴在通电加热过程中电阻是变化的。对照图 3、图 4 和图 5 可看出,在 0.3 s 以内,液滴电阻变化不大,此时液滴正处于蒸发期和周期性膨胀收缩期;在 0.3 ~

0.5 s内,液滴电阻变小,此时液滴正处于热分解初期,产生了部分离子;在 0.5 ~ 0.9 s 内,液滴电阻急剧变小,此时液滴正好处于强烈热分解期,直至着火燃烧。

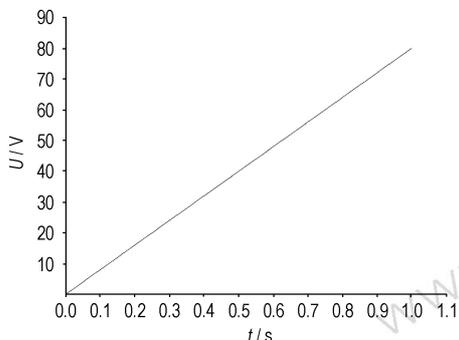


图 4 U-t 关系

Fig. 4 U-t curve

当电压加载速率增大时,液滴的微爆现象更加明显,图 6 给出了 1 s 内电压由零加载到 100 V 时某一微

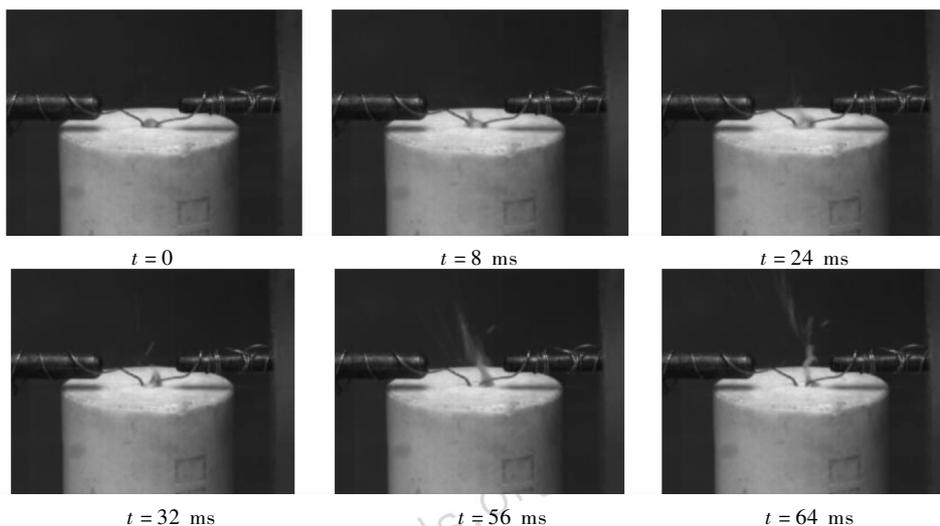


图 6 LP1846 液滴微爆序列过程 ($U_m = 100 \text{ V}$)

Fig. 6 Processes of LP1846 droplet micro-explosion ($U_m = 100 \text{ V}$)

4 结 论

(1) LP1846 单滴在通电时主要经历四个特征过程,即:蒸发过程、周期性膨胀收缩过程、热分解过程和着火燃烧过程,且在周期性膨胀收缩过程中伴有微爆现象发生,其微爆机理主要是 LP1846 中的水组分过热造成的。

(2) 电压加载速率从 $80 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $140 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 过程中,LP1846 液滴着火延迟期呈线性缩短,且着火时火焰越明亮。LP1846 液滴在通电加热过程中电阻是逐渐减小的。

爆序列过程,LP1846 液滴周期性膨胀收缩的频率有一定的随机性,微爆时有气体析出和小液滴飞溅。

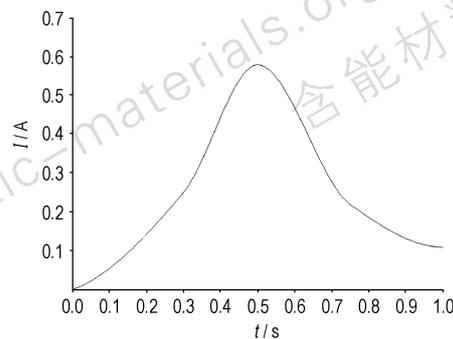


图 5 I-t 关系

Fig. 5 I-t curve

另外,在相同时间内,加载的电压越大,液滴着火延迟期越短,着火时火焰越明亮,结果如图 7、图 8 所示。由图 7 可见,液滴着火延迟期基本呈线性变化。

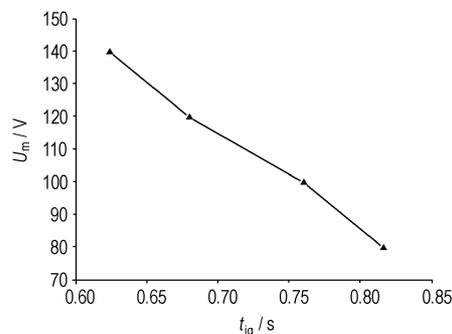


图 7 液滴着火延迟期与加载电压的关系

Fig. 7 The relationship between droplet ignition delay time and loaded voltage

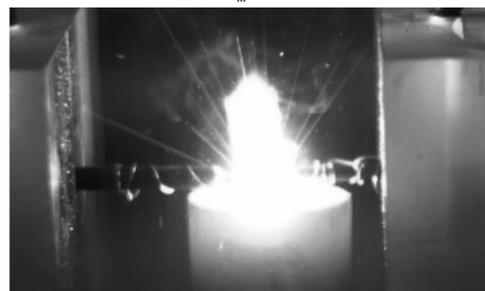
(1) $U_m = 100$ V(2) $U_m = 120$ V(3) $U_m = 140$ V

图8 LP1846液滴电点火特性与最大加载电压的比较

Fig. 8 Comparison between LP1846 droplet electrical ignition and peak load voltage

参考文献:

- [1] Law C K. Ignition and combustion of liquid propellants [R]. ADA224150, 1990.
 [2] Lee H S, Litzinger T C. Thermal decomposition of HAN-based liquid propellants[J]. *Combustion and Flame*, 2001, 123: 2205-2222.

- [3] Chang Y P, Boyer E, Kuo K K. Combustion behavior and flame structure of XM46 liquid propellant[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(4): 800-808.
 [4] 余永刚, 金志明. HAN基液滴在富含水蒸气环境中着火、燃烧特性研究[J]. *兵工学报*, 2001, 22(3): 289-292.
 YU Yong-gang, JIN Zhi-ming. A study on the ignition and combustion characteristics of HAN-based liquid droplet under a rich-in-water-vapor ambience[J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(3): 289-292.
 [5] Meinhardt D S. Development and testing of new, HAN-based monopropellants in small rocket thrusters[R]. AIAA-1998-4006, 1998.
 [6] Bombelli V, Simon D. Economic benefits of the use of non-toxic monopropellants for spacecraft applications[R]. AIAA-2003-4783, 2003.
 [7] Yetter R A, Yang V, Wang Z, et al. Development of meso and micro scale liquid propellant thrusters[R]. AIAA-2003-0676, 2003.
 [8] DeSpirito J, Knapton J D. Electrical ignition of HAN-based liquid propellants[R]. ADA195094, 1988.
 [9] Klingenberg G, Frieske H J. Electrical Ignition of HAN-based liquid propellants[R]. ADA223272, 1990.
 [10] Klingenberg G, Rockstroh H, Knapton J D, et al. Investigation of liquid gun propellants: Electrical ignition of LGP1846 [J]. *Journal of Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1990, 15(3): 103-114.
 [11] Rockstroh H, Frieske H J, Klingenberg G. Electrical Ignition of HAN-based liquid propellants[R]. ADA226314, 1990.
 [12] 栗保明, 官汉章. HAN基液体发射药电点火参数的实验研究[J]. *弹道学报*, 1995, 7(4): 36-41.
 LI Bao-ming, GUAN Han-zhang. Experimental study on electrical ignition parameters of HAN-based liquid propellant[J]. *Journal of Ballistics*, 1995, 7(4): 36-41.
 [13] Yetter R A, Yang V. Chemical micro thrusters: Combustion issues and approaches [C] // International Symposium on Space Propulsion. Shanghai, China. 2004: 165-174.
 [14] 余永刚, 金志明. 单元推进剂液滴在高温高压下的微爆现象观测[J]. *高压物理学报*, 2000, 14(4): 302-308.
 YU Yong-gang, JIN Zhi-ming. Monopropellant droplet microexplosions under high pressure and temperature[J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(4): 302-308.

Experimental Study on Electrical Ignition Properties of Liquid Propellant Droplet

YU Yong-gang, LI Ming, ZHOU Yan-huang, LU Xin

(Power Engineering College, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the electrical ignition properties of HAN-based liquid propellant, an experimental device of electrical heating ignition of liquid propellant droplet was designed. By using high speed camera system, the ignition properties of LP1846 single droplet was observed at different electrical heating rates. The results show that when the LP1846 droplet is electrified, it goes mainly through four characteristic processes, i. e. evaporation process, periodic expansion and contraction process, stronger thermal decomposition process, and ignition and combustion process. When peak load voltage is from $80 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ to $140 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$, the ignition delay time of LP1846 droplet is linearly shorten from 0.82 s to 0.62 s, but the flame is lighter.

Key words: combustion; liquid propellant; electrical ignition; transient measurement