

文章编号:1006-9941(2023)09-0895-08

## 新型 HAN 基液体推进剂 EMP-01 液滴电点火特性

刘冲<sup>1</sup>,姚天亮<sup>2</sup>,薛晓春<sup>1</sup>,余永刚<sup>1</sup>,张欣慰<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘要:** 为探究新型硝酸羟胺(HAN)基液体推进剂 EMP-01 液滴点火特性,搭建了通过将液滴静置在半球形凹槽内并插入电极的液滴电点火实验平台,在液滴直径 6.5 mm、电极间距 0.5 mm、电压加载速率为  $86.31 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  的工况下,研究了 EMP-01 液滴的电点火燃烧特性,确定了着火延迟时间;同时,不改变液滴直径以及电极间距,研究了电压加载速率为  $34.20\sim 246.37 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  时液滴着火延迟时间与燃烧过程的变化规律。结果表明,电点火燃烧中,EMP-01 液滴依次经历为加热、热分解、燃烧 3 个阶段,并且在热分解阶段会产生周期性的膨胀收缩。电压加载速率为  $34.20 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  时,EMP-01 液滴无法成功点火;电压加载速率为  $49.49\sim 246.37 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  时,随着电压加载速率增加,EMP-01 液滴着火延迟时间不断减小,且减小速率逐渐变缓。

**关键词:** HAN 基推进剂;电点火特性;液体推进剂;燃烧

中图分类号: TJ55;V511+.3

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023103

## 0 引言

近年来,随着微小卫星的蓬勃发展,各航天大国在微小推力、小质量、低功耗的微推进技术方面不断深入研究,寻找廉价、低毒性、低污染的高能推进剂已成为各航天大国追求的目标<sup>[1]</sup>。硝酸羟胺(HAN)基液体推进剂是由氧化剂 HAN、燃料、水按一定比例配制的氧燃共存体系,具有密度高、比冲高、安全、毒性小,燃烧产物不会污染环境等优点<sup>[2]</sup>,已成为空间飞行器动力的重点可控来源,可为提高微小卫星的动力可控和快速机动提供技术支撑<sup>[3-4]</sup>。

HAN 基液体推进剂作为新一代绿色推进剂,其点火燃烧特性决定了火箭发动机的推进性能。余永刚等<sup>[5-6]</sup>研究了 HAN 基液体推进剂在高温对流环境以及富含水蒸气环境中的点火燃烧特性。Ferguson 等<sup>[7]</sup>研究了 HAN/甲醇推进剂在高温高压环境下的热分解及

燃烧特性。由于高温环境点燃 HAN 基液体推进剂存在着损耗能量大、装置重复性差等缺点,目前 HAN 基液体推进剂点火主要有激光点火、催化点火和电点火 3 种方式<sup>[8]</sup>。在激光点火方面有学者进行了研究,Alfano 等<sup>[9]</sup>采用激光谐振的方式快速加热推进剂点火,发现激光点火在点火方式上具有一定的优势,但不适用于小型推进器。热催化点火是当前 HAN 基液体推进剂的稳定点火方式之一,该方式通过催化床催化分解 HAN 基液体推进剂,由其产生的氧化组分与燃料组分在热量的作用下点火燃烧。该方式的重点研究集中在催化剂的种类、催化床的结构对 HAN 基液体推进剂点火性能的影响<sup>[10-13]</sup>。由于热催化点火方式下 HAN 基液体推进剂燃烧产生的高温会使催化剂床失活,造成对后续推进剂的重复点火的困难,因此,催化剂床的耐热性和通用性有待进一步研究和改善。电点火主要有电火花点火、电解点火、无弧点火 3 种方式。Despírito<sup>[14]</sup>采用高压脉冲放电方式,研究了微量 HAN 基液体推进剂的电点火特性。余永刚<sup>[15]</sup>设计了一种周期性序列脉冲放电火花的模拟点火装置,研究了 HAN 基液体推进剂 LP1846 液雾在不同条件下电点火特性。由于电火花点火方式同高温环境点火方式一样,存在着能量损耗大、重复性差等缺点。研究人员在 HAN 水溶液电分解的基础上研究

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-06-15

网络出版日期: 2023-09-01

基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人计划资助(22XD1422000)

作者简介: 刘冲(1999-),男,硕士研究生,主要从事含能材料燃烧理论。e-mail: 18331075383@njjust.edu.cn

通信联系人: 薛晓春(1985-),女,副教授,主要从事含能材料燃烧理论。e-mail: xiaochunxue\_njust@163.com

引用本文: 刘冲,姚天亮,薛晓春,等. 新型 HAN 基液体推进剂 EMP-01 液滴电点火特性[J]. 含能材料,2023,31(9):895-902.

LIU Chong, YAO Tian-liang, XUE Xiao-chun, et al. Droplet Electric Ignition Characteristics of New HAN-based Liquid Propellant EMP-01[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(9):895-902.

了HAN基液体推进剂的电解点火。Koh等<sup>[16]</sup>分别以铜、铝和石墨作为电极研究了HAN基溶液的电解点火特性,发现采用牺牲电极如铜、铝等比传统碳电极要更利于HAN基溶液的点火。Chai等<sup>[17]</sup>探究了电极对数量、液体流量、电压对HAN基液体反应速率的影响,发现增加电极对数量和电压都可以增加液体反应速率,但因为HAN基液体反应需要与电极接触足够的时间,液体流速需要保持在一定范围内。电解点火虽然比热催化点火耗电少,延迟时间短,但会使HAN基液体推进剂点火过程变得更为复杂,为此,Despirito等<sup>[18]</sup>利用HAN基液体推进剂导电率较高的特点,通过施加电压、利用电流的热效应点燃推进剂,给出了电点火装置的优化方案,这种无弧点火方式在减小点火能量的同时能增加点火装置的利用率。余永刚等<sup>[19]</sup>针对HAN基液体推进剂LP1846设计了一种低压无弧点火实验装置,探究了电压加载速率在80~140 V·s<sup>-1</sup>范围内LP1846无弧点火特性,发现LP1846液滴着火延迟期随加载电压的增加呈现缩短的趋势。可以看到,电点火方式具有装置利用率高,以及电压低、耗能少的优点,将成为HAN基液体推进剂可靠点火的发展方向<sup>[20]</sup>。目前,研究人员针对HAN基液体推进剂中水的含量越多会导致比冲越低的特点<sup>[21]</sup>,降低HAN基液体推进剂中水的含量,研制了一种新型推进剂EMP-01,其质量配比为:5.0% H<sub>2</sub>O+11.0% HBF<sub>4</sub>+25.8% TEAN(三乙醇胺硝酸盐)+58.2% HAN。针对EMP-01液体推进剂还未开展过电点火特性的研究。

为了将EMP-01安全应用于实际工程中,实现EMP-01的稳定电点火,研究搭建了EMP-01单液滴电点火实验平台,通过置滴法将液滴静置在半球形凹槽内并插入电极的方法,研究了EMP-01单滴无弧电点火的燃烧特性,并探究了在较大的电压加载速率范围内对其燃烧特性尤其是着火延迟期的影响,获得了EMP-01着火延迟期与电压加载速率的关系。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

原料:EMP-01,上海空间推进研究所。

仪器:自耦变压器,浙江徽正电气有限公司;FASTCAM Mini高速摄像机,成都光纳科技有限公司,高速摄像机拍摄速率为500帧/秒,每帧对应时间

2 ms,成像像素为1024×1024;电流表与电压表,上海苏超电子科技有限公司。

### 1.2 实验装置

采用置滴法研究新型HAN基液体推进剂EMP-01单滴电点火特性,以及电压加载速率对其电点火特性的影响,课题组优化了电极部分以便于装配和移动电极,设计了如图1所示实验装置。装置主要由供电部分、点火系统以及图像采集三部分组成。供电部分由自耦变压器和电流表、电压表组成。其中,自耦变压器外接220 V交流电,通过转动上方旋钮调整变压比,将合适的电压加载到放电电极两侧,电极选用钨电极;电流表和电压表用来测量回路中的电流和电压。点火系统部分包括点火平台、放电电极以及置滴平台;其中点火平台为绝缘的有机塑料,两侧的孔洞用来固定放电电极;2根电极分别固定在2根绝缘的橡胶棒内,将橡胶棒固定在点火平台两侧,通过移动橡胶棒可控制电极间距;置滴平台为绝缘的聚四氟乙烯,其中心开有半球形凹槽,用来放置液滴,凹槽尺寸决定液滴直径。电极间距 $d$ 为2根电极尖端的距离,实验时保证电极尖端处于液滴中央。图像采集部分主要由高速摄像机以及连接的计算机组成。

### 1.3 实验过程

实验时,使用移液器将EMP-01单滴滴入置滴平台上的半球形凹槽,使其完全填满,受到表面张力的作用,液滴会保持与凹槽尺寸相近的球形。为了进一

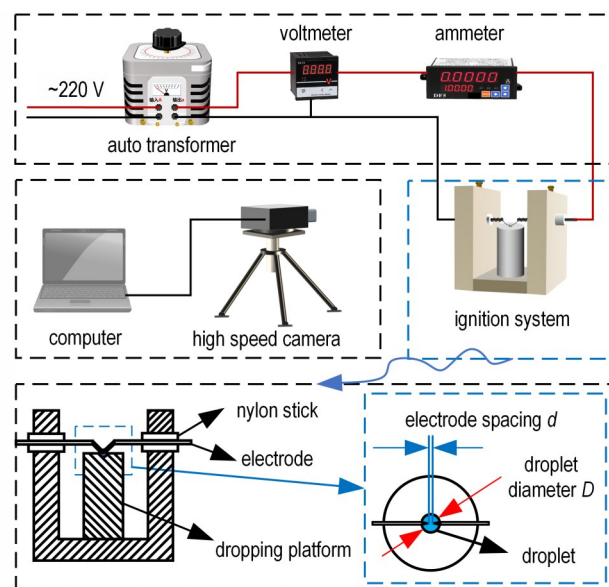


图1 电点火实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the electric ignition experimental system

步确定液滴的直径,待液滴稳定后,拍摄其正视图与俯视图,使用 ImageJ 软件测量其大小。具体操作为,在图片中创建与电极直径相当的直线,设定其长度为 2 mm,随后分别对液滴正视图与俯视图中的半径与直径进行画线测量,测量精度为 0.001 mm。液滴直径测量结果在凹槽直径±0.2 mm 范围内即认为液滴直径与凹槽直径一致。放电电极分别从两侧插入液滴,移动电极,确保电极空隙处于液滴中央位置,待电极固定后记录电极间距。将自耦变压器接入 220 V 交流电,同时连接电极,转动自耦变压器上的旋钮使加载到电极上的电压线性增大,最终达到的电压为最大加载电压  $U$ ,转动时间记为加载时间  $t$ ,期间记录回路中的电流、电压。当电压达到液滴着火临界点后,液滴即可被点燃。实验通过分析高速摄像机拍摄图片来确定液滴着火延迟期。

(1)为探究 EMP-01 液滴电点火燃烧具体过程,实验首先研究当最大加载电压  $U=145.0$  V,加载时间  $t=1.68$  s,即电压加载速率  $k_U=86.31$  V·s<sup>-1</sup>,液滴直径  $D=6.5$  mm,电极间距  $d=0.5$  mm 时,EMP-01 电点火燃烧情况,通过高速摄像机观察其着火延迟时间。

(2)为探究电压加载速率对 EMP-01 液滴电点火特性的影响,在液滴直径  $D=6.5$  mm,电极间距  $d=0.5$  mm 条件下,研究开展 2 组实验。第一组实验固定加载电压  $U$  为 145.0 V,通过改变电压加载时间  $t$  改变电压加载速率,实验进行 5 次,参数如表 1(1#~5#)所示,其电压加载速率曲线如图 2a 所示。第二组实验固定电压加载时间  $t$  为 0.70 s,通过改变最大加载电压来改变电压加载速率,实验进行 4 次,参数如表 1(6#~9#)所示,其电压加载速率曲线如图 2b 所示。

表 1 实验主要参数

Table 1 Experimental parameters

group	No.	$U$ / V	$t$ / s	$k_U$ / V·s <sup>-1</sup>
I	1#	145.0	4.24	34.20
	2#		2.93	49.49
	3#		1.77	81.92
	4#		1.68	86.31
	5#		0.70	207.14
II	6#	132.0	0.70	188.57
	7#	145.0		207.14
	8#	162.0		231.43
	9#	172.5		246.37

Note:  $U$  is the maximum load voltage.  $t$  is the voltage loading time.  $k_U$  is the voltage loading rate.

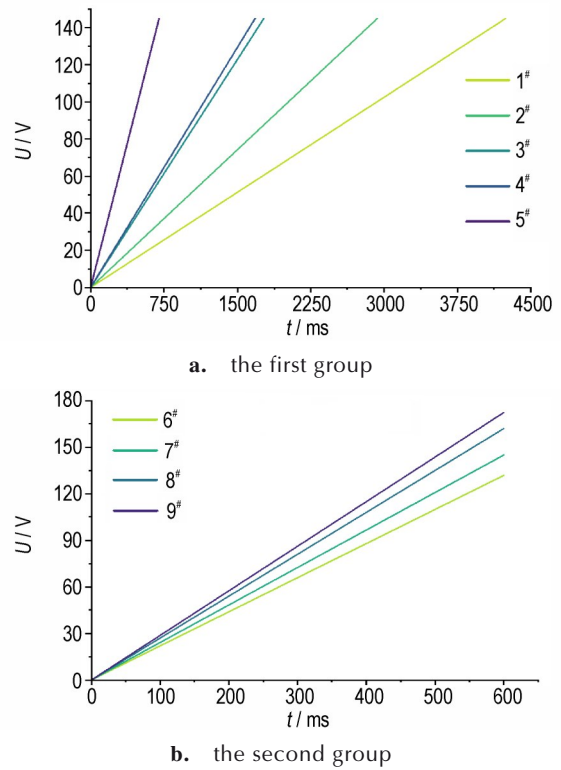


图 2 电压加载速率曲线

Fig.2 Curves of voltage loading rate

## 2 结果与讨论

### 2.1 EMP-01 液滴电点火燃烧具体过程

为探究 HAN 基液体推进剂 EMP-01 液滴电点火燃烧具体过程,对电压加载速率为 86.31 V·s<sup>-1</sup> 条件下,EMP-01 液滴电点火过程的高速摄像图片进行整理挑选,结果如图 3 所示。由图 3 可见,当回路开关闭合后,液滴在起初的小段时间里无明显变化,表明此时电压较低,液滴内部的能量不足以使液滴发生反应。在  $t=582$  ms 时,液滴开始出现微小的起伏,但不明显,这表明液滴内部积聚的能量已经达到了使液滴开始发生热分解反应的条件,液滴开始进行热分解反应并伴随微弱的蒸发反应,但此时液滴内部温度还比较低,反应还处于初始阶段,反应比较缓慢。随着时间的推移,液滴逐渐膨胀,在  $t=706$  ms 时,液滴有了明显的增大。一方面,随着电压增加,电极加载到液滴内部的能量逐渐增强;另一方面,液滴内部的热量随时间不断累积,两者都促进了液滴内部的热分解反应不断加快,但还达不到液滴燃烧的条件。

在  $t=854$  ms 时,可以看到液滴的体积几乎是初始状态的两倍,并且周围伴随黄色的烟雾,带有强烈的刺

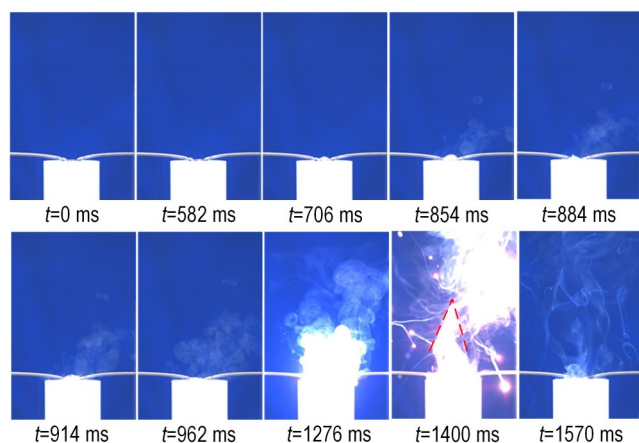


图3 EMP-01液滴电点火燃烧时间序列图

Fig.3 Time sequence diagram of EMP-01 droplet electric ignition combustion

激性气味。表明液滴内部蒸发和热分解产生的气体聚集到一定极限后冲破了液滴的束缚,最终排到外部环境中。增大的液滴表明液滴内部的气体排出后,液滴的热分解反应并没有停止,液滴回到初始状态后,又开始在其内部重新积聚气体,并且随着电压的不断增大,液滴内部的能量不断增大,使得其内部的热分解反应不断加快。在 $t=884$  ms时,可以看到破碎后的液滴。在 $t=914$  ms时,液滴相较于 $t=884$  ms时刻,体积又在重新增长,表明液滴的膨胀收缩具有周期性。

在 $t=962$  ms之后,液滴已经没有明显的膨胀,转而表现为剧烈的沸腾并伴有轻度的微爆,产生的烟雾急剧增加。这可能是由于电压的持续增长使得液滴的热分解反应愈加剧烈,液滴内部在短时间内可以产生大量的气体,并且随着输入液滴的能量不断增加,液滴的高温区域不再局限于液滴中心的小部分区域,尤其是在电极之间的区域内,液滴内部的温度不断向外传递,液滴整体的温度不断增加,这使得液滴的热分解反应不再仅存在于液滴内部,液滴表面也开始发生热分解反应并伴随着蒸发反应,但主要进行热分解反应。

从图3可知,在 $t=1276$  ms时,液滴成功点火,液滴燃烧产生耀眼的白光,并伴随大量的烟雾,表明此时液滴内部能量达到着火临界点,液滴燃烧产生大量的烟雾是因为液滴不会直接燃烧,其本身首先发生热分解反应,随后热解产物燃烧,而液滴剧烈的燃烧反应使得液滴本身及周围的温度迅速升高,致使液滴的热分解反应速率迅速增加,同时周围温度场的升高也会使液滴在点火之前热分解产生的气体被点燃。液滴成功点火后,其燃烧反应愈加剧烈,表现为燃烧产生的火光逐渐增强,直至照亮整个点火区域。

液滴燃烧产生的强烈白光一直持续到 $t=1400$  ms后开始减弱,表明液滴经过剧烈的燃烧反应已经所剩不多,剩余的热解产物以及EMP-01液体燃烧产生的热量在不断减少。随着液滴燃烧反应逐渐微弱,燃烧火焰逐渐减小,这时可以观察到火焰形状呈大致的锥形。在 $t=1570$  ms时,可以观察到已经没有明显的火焰,凹槽内的液滴消耗完毕,即1.57 s,液滴已经燃烧完毕。

为了对液滴的膨胀收缩过程进行进一步研究,针对液滴成功点火前的高速摄像图片,选取了一个特征较为明显的膨胀收缩过程,其膨胀收缩过程如图4所示。由图4可以看出,随着电压增加,在电流的热效应下,液滴内部开始发生蒸发和热分解反应,其产生的气体产物汇集在液滴内部。在通电初期,由于电压比较低,液滴内部温度较低,其热分解反应进行得比较缓慢,产生的气体产物量比较少,此时,液滴内部压强还比较小,气体产物无法突破液滴束缚,只能在液滴内部不断积累。随着电压增加以及通电时间逐渐加长,液滴内部温度逐渐上升,使得其热分解反应速率逐渐加快,热解产生的气体逐渐增多,并在液滴内部不断聚集。在 $t=876$  ms时,液滴膨胀到极限,在 $t=878$  ms时,可以看到液滴破碎,液滴内部的气体冲出液滴,排到外部环境的过程。在 $t=876$  ms到 $t=880$  ms的4 ms内可以看到完整的液滴破碎、气体排出过程。随后,液滴内部重新积聚气体,液滴又开始新一周期的膨胀收缩,并且随着电压增加,液滴膨胀收缩周期逐渐变短,液滴内的能量不断积累,直至液滴成功点火。

为了分析液滴在点火前膨胀收缩的特性,选取 $t=718$  ms到 $t=1028$  ms时间段内液滴膨胀高度 $h$ 进行分析,结果如图5所示。液滴膨胀高度 $h$ 定义为液滴最顶端到置滴平台平面的距离,其示意图如图4所示,

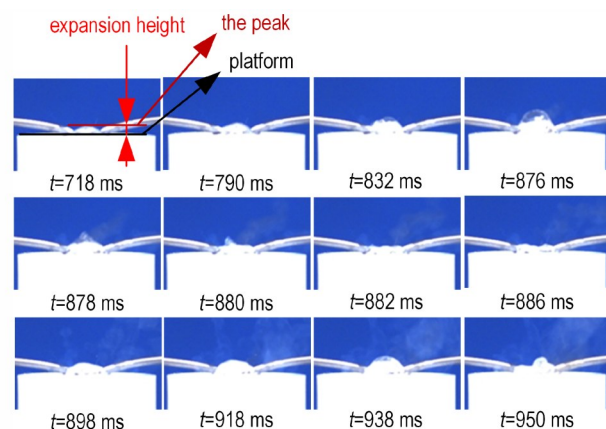


图4 EMP-01液滴膨胀收缩过程

Fig.4 Process of EMP-01 droplet expansion and contraction

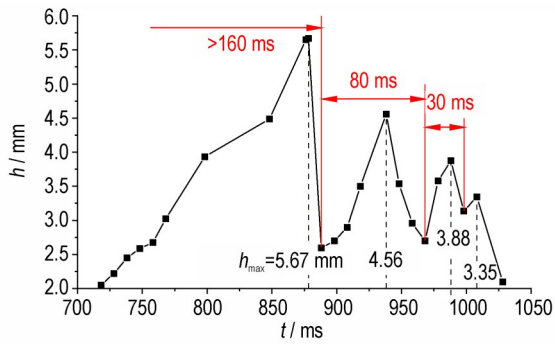


图5 液滴膨胀高度变化曲线

Fig.5 Variation curve of droplet expansion height

测量方法同液滴直径测量方法相同。选取上述时间段是考虑到在  $t=718\text{ ms}$  之前,液滴内部的热分解反应比较微弱,其膨胀收缩特征不明显;在  $t=1028\text{ ms}$  之后,液滴的热分解反应逐渐剧烈以及液滴内部热量向外传递加热整个液滴,使液滴的热分解反应不再局限于液滴内部,液滴的膨胀不再明显,转而变为剧烈的沸腾状态,其表面高度变化较剧烈。由图5可以看出,在  $t=718\text{ ms}$  之后,液滴的膨胀高度逐渐增大,在  $t=878\text{ ms}$  时,液滴的膨胀高度达到最大,最大膨胀高度  $h_{\text{max}}$  为  $5.67\text{ mm}$ 。随后,液滴破碎,液滴膨胀高度急剧降低。在  $t=888\text{ ms}$  时,液滴膨胀高度降到了最低点,即  $2.60\text{ mm}$ 。随后,液滴继续膨胀。在  $t=938\text{ ms}$  时,液滴膨胀高度又一次达到最大值,为  $4.56\text{ mm}$ ,随后液滴破碎,液滴膨胀高度急剧下降。从图5中可以看到,液滴的最大膨胀高度  $h_{\text{max}}$  是随着膨胀周期逐渐递减的,液滴的  $h_{\text{max}}$  由最初的  $5.67\text{ mm}$  下降到了  $3.88\text{ mm}$ ;液滴的膨胀周期也在逐渐缩短,第一个膨胀周期要长于  $160\text{ ms}$ ,而下一个膨胀周期缩短到了  $80\text{ ms}$ ,随后又缩短到了  $30\text{ ms}$ 。造成上述现象的原因是,液滴在加热初期反应比较缓慢,气体产物的产生速率比较缓慢,需要在液滴内积聚较长的时间才能使液滴内的压强达到冲破液滴的极限。随着液滴热分解反应加快,气体产生速率加快,并且经过之前的膨胀收缩,一部分液体产生的气体排到外部环境,液滴质量也因此减小,需要冲破液滴的压强也逐渐减小,故液滴内的气体不需要积聚到与上一周期相同的体积,即表现为液体的最大膨胀高度逐渐降低。

2.2 电压加载速率对 EMP-01 液滴电点火特性影响

为探究不同电压加载速率下 EMP-01 液滴电点火燃烧特性,选取不同电压加载速率下 EMP-01 液滴在初始时刻、开始燃烧时刻、燃烧后期以及火焰完全熄灭时刻的高速摄像图片进行对比,结果如图6所示。由图6可以看到,在最大加载电压为  $145.0\text{ V}$  的情况下,

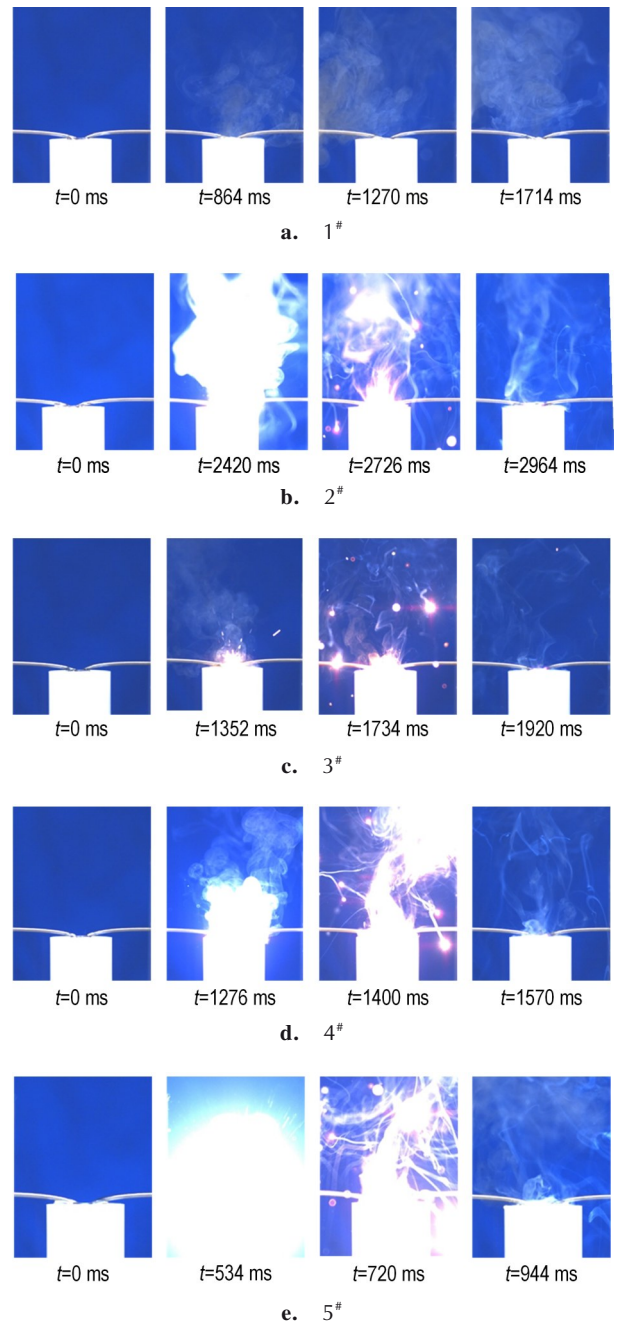


图6 加载电压为  $145.0\text{ V}$  时液滴电点火燃烧情况

Fig.6 Comparison of droplet electric ignition combustion when the load voltage is  $145.0\text{ V}$

电压加载时间越短,液滴着火越快,即着火延迟期  $t_c$  越短,相反,电压加载时间越长,着火延迟期  $t_c$  越长,但加载速率过慢则会导致液滴无法成功点火。当加载时间  $t$  为  $4.24\text{ s}$  时,液滴只进行热分解和蒸发反应,但是没有进行燃烧反应,表明当电压加载速率过低时,电极无法为液滴提供足够的能量使其点火,液滴只能进行持续的热分解和蒸发反应直至液滴消耗完。当加载时间

$t=2.93$  s时,液滴在 $t=2420$  ms时成功点火,燃烧产生的火焰范围较大,这是由于液滴的着火延迟期太长,长时间的热分解反应使得大量的分解产物聚集在液滴上方,液滴着火瞬间会点燃其上方的热分解产物。当加载时间 $t=1.77$  s时,液滴的着火延迟期 $t_c$ 提前到了1352 ms,但液滴着火时的火焰要明显小于加载时间 $t=2.93$  s时液滴着火火焰。产生上述变化的主要原因是液滴着火延迟期的提前导致其上方热分解产物的减少。对比图6c、图6d和图6e可以发现,随着加载时间的继续缩短,即电压加载速率的继续增大,液滴成功点火时的火焰开始呈现增大的趋势。上述现象表明当电压加载速率 $k_U > 81.92 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,尽管着火延迟期的提前导致液滴热分解反应时间缩短,但是电压加载速率的增加会使得液滴热分解反应速率急剧增加,故而液滴上方在短时间内仍能聚集大量热分解产物。

为探究EMP-01液滴着火延迟期与电压加载时间的关系,对第一组实验中不同电压加载时间下的着火延迟期进行了数据拟合,结果如图7所示,其中,拟合曲线 $R^2$ 为0.99584,拟合度较好。由图7可以看出,在最大加载电压固定的情况下,液滴着火延迟期随电压加载时间的缩短呈现线性减小的趋势,即着火延迟期随电压加载速率增大而减小。当电压加载速率过小,即在第一组实验中,当最大加载电压为145.0 V,加载时间为4.24 s时,液滴无法成功点火。因为电压加载速率过小会导致液滴只能进行持续的热分解反应,而液滴内部的能量无法达到着火临界点。

对第二组实验结果进行处理,同样选取不同电压加载速率下EMP-01液滴在初始时刻、开始燃烧时刻、燃烧后期以及火焰完全熄灭时刻的高速摄像图片进行对比,结果如图8所示。由图8可以看到,在加载时间为0.70 s的情况下,当最大加载电压为132.0 V时,液

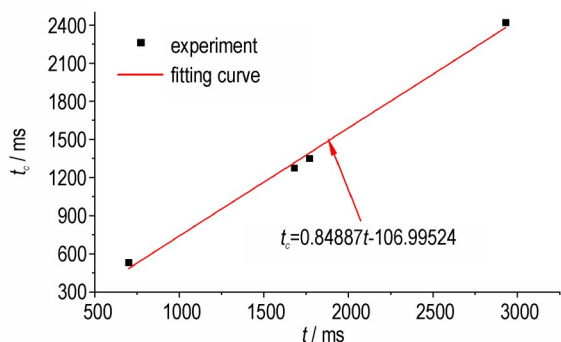


图7 液滴着火延迟期与加载时间的关系

Fig. 7 Relationship between droplet ignition delay period and voltage loading time

滴的着火延迟期为584 ms。随着最大加载电压的增加,液滴的着火延迟期逐渐缩短,当最大加载电压为172.5 V时,液滴的着火延迟期提前到442 ms。在本组实验中,液滴成功着火时的火焰随着电压加载速率的增加逐渐减小,表明当电压加载速率过高时,尽管电压加载速率增加会使液滴的热分解速率加快,但是不断提前的着火延迟期使得液滴热分解反应时间不断缩短,进而导致液滴燃烧前热分解反应的产物较少。

为探究EMP-01液滴着火延迟期与最大加载电压的关系,对第二组实验中不同加载电压下液滴着火延迟期进行了数据拟合,结果如图9所示,其中,拟合曲线 $R^2$ 为0.998,拟合度较好。由图9可以看出,在加载时间 $t$ 一定时,液滴的着火延迟期 $t_c$ 随最大加载电压 $U$

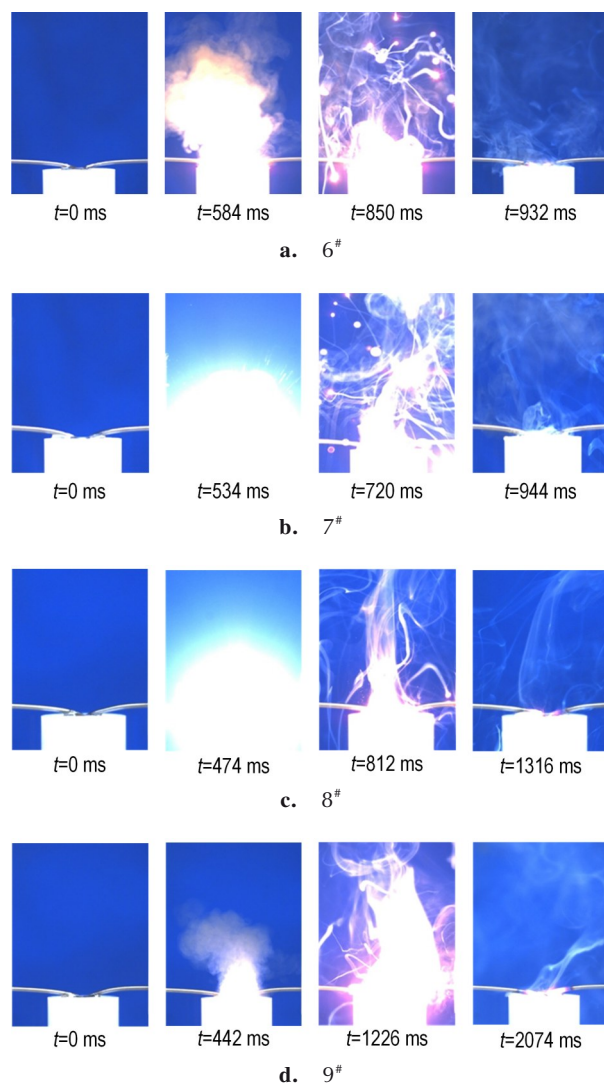


图8 加载时间为0.70 s时液滴电点火燃烧情况

Fig. 8 Comparison of droplet electric ignition combustion when the loading time is 0.70 s

的增加呈现线性减小的趋势,即着火延迟期  $t_c$  随电压加载速率增加而减小。

为探究电压加载速率对 EMP-01 液滴着火延迟期的影响,对第一、二组实验结果进行整理拟合,结果如图 10 所示,其中拟合曲线采用指数关系式拟合,拟合曲线  $R^2$  为 0.999,拟合度较好。从图 10 中可以看出,液滴着火延迟期随电压加载速率的增加而缩短,但是,随着电压加载速率不断增高,着火延迟期曲线下落幅度逐渐变缓,说明当电压加载速率过高时,电压加载速率的增加对着火延迟期的影响逐渐减弱。

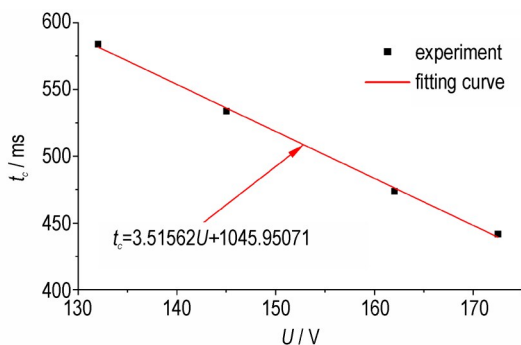


图 9 液滴着火延迟期与最大加载电压的关系

Fig. 9 Relationship between droplet ignition delay period and maximum loading voltage

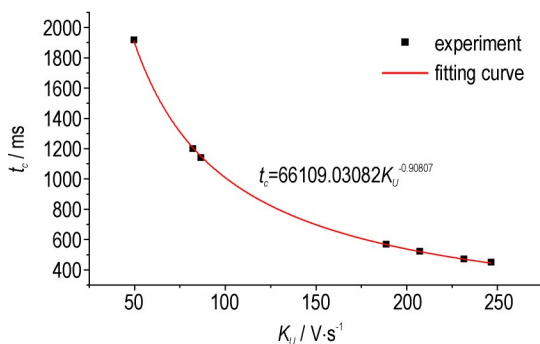


图 10 液滴着火延迟期与电压加载速率的关系

Fig. 10 Relationship between droplet ignition delay period and voltage loading rate

### 3 结论

采用置滴法搭建了液滴电点火实验装置平台,研究了新型 HAN 基液体推进剂 EMP-01 电点火特性,同时探究了电压加载速率对 EMP-01 液滴电点火特性的影响,可以得到以下结论。

(1) EMP-01 液滴电点火过程大致可分为三段:加热阶段、热分解阶段、燃烧阶段。EMP-01 液滴在加热阶段由于其内部热量较低,无明显变化;在热分解阶段

开始有明显的起伏,随着电压的增大,液滴膨胀收缩更加剧烈,周期变短,并伴随有大量的烟雾排出;在燃烧阶段剧烈燃烧,并发出耀眼白光,随后火焰逐渐微弱并消失。

(2) 液滴在  $k_U \leq 34.20 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$  时无法成功点火;在  $k_U = 49.49 \sim 246.37 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内,液滴点火火焰呈现随电压加载速率增加先减小后增大后又减小的趋势。

(3) EMP-01 液滴着火延迟时间随着电压加载速率的增加而减小,且减小速率逐渐减小。当  $k_U$  由  $49.49 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $86.31 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$  时,  $k_U$  增加了  $36.82 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ , 着火延迟期减小了 1144 ms,降幅为 47.27%;当  $k_U$  由  $188.57 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $246.43 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$  时,  $k_U$  增加了  $57.8 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ , 着火延迟期减小了 142 ms,降幅仅为 24.32%。

### 参考文献:

- [1] 李钊, 李二鹏, 李书明, 等. 卫星推进系统推进剂技术发展研究 [C]//第五届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第 41 届技术交流会论文集(第三册), 2020, 3: 199-205.  
LI Zhao, LI Er-peng, LI Shu-ming, et al. Research on propellant technology development of satellite propulsion system [C]//Proceedings of the Fifth Joint Conference on Aerospace Power and the 41st Technical Exchange Conference of China Aerospace Third Professional Information Network, 2020, 3: 199-205.
- [2] 陈兴强, 张志勇, 滕奕刚, 等. 可用于替代肼的 2 种绿色单组元液体推进剂 HAN, ADN[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(4): 63-66.  
CHEN Xing-qiang, ZHANG Zhi-yong, TENG Yi-gang, et al. Two kinds of green liquid monopropellants HAN, AND for replacing hydrazine[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2011, 9(4): 63-66.
- [3] LEMMER K. Propulsion for cubesats [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 134: 231-243.
- [4] TUMMALA A R, DUTTA A. An overview of cube-satellite propulsion technologies and trends [J]. *Aerospace*, 2017, 4(4): 58.
- [5] 余永刚, 金志明. 含能液滴在对流环境中着火燃烧特性研究[J]. 推进技术, 1996, 17(2): 53-58.  
YU Yong-gang, JIN Zhi-ming. A study on ignition and combustion characteristics of energetic liquid droplet under convection environment[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 17(2): 53-58.
- [6] 余永刚, 金志明, 曾毓敏. 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, ZENG Yu-min. 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.
- [7] FERGUSON R E, ESPARZA A A, et al. Combustion of aqueous HAN/Methanol propellants at high pressures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(2): 3295-3302.
- [8] 王新强, 邓康清, 李洪旭, 等. HAN 基绿色推进剂点火技术研究进展[J]. 火箭推进, 2017, 43(2): 72-76.

- WANG Xin-qiang, DENG Kang-qing, LI Hong-xu, et al. Research progress on ignition of HAN-based green propellant[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(2): 72-76.
- [9] ALFANO J A, MILLS D J, VAGHJIANI L G. Resonant laser ignition study of HAN-HEHN propellant mixture [J]. *Combustion Science and Technology*, 2009, 181(6): 902-913.
- [10] GUAN J W, LI G X, LI H M, et al. Effect of catalytic bed porosity and mass flow rate on decomposition and combustion processes of a HAN-based monopropellant thruster[J]. *Vacuum*, 2021, 194: 10566.
- [11] GUO T S, LI G X, LI H M, et al. Simulation study on optimization design of structural parameters of 150N-class hydroxylammonium nitrate (HAN)-based thruster[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 191: 346-358.
- [12] MEIRAM A, RACHID A, JAKPAR J, et al. Combustion characteristics of HAN-based green propellant assisted with nanoporous active carbons[J]. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2017, 19(3): 215-222.
- [13] SUN D C, LIU J, XIANG W B. Numerical simulation of the transient process of monopropellant rocket engines[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 103: 105921.
- [14] DESPIRITO J, KNAPTON J D. Electrical ignition of HAN-based liquid propellants: ADA1950 94[R]. US: ADA, 1988.
- [15] 余永刚, 王玉强, 周彦煌, 等. 周期性序列脉冲放电火花点火特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 10(31): 1793-1796.
- YU Yong-gang, WANG Yu-qiang, ZHOU Yan-huang, et al. Study on ignition characteristics of periodic sequence pulse discharge spark [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 10(31): 1793-1796.
- [16] KOH K S, CHIN J, CHIK T F W K. Role of electrodes in ambient electrolytic decomposition of hydroxylammonium nitrate (HAN) solutions[J]. *Propulsion and Power Research*, 2013, 2(3): 194-200.
- [17] CHAI W S, CHEAH K H, KOH K S, et al. Parametric studies of electrolytic decomposition of hydroxylammonium nitrate (HAN) energetic ionic liquid in microreactor using image processing technique [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 296: 19-27.
- [18] DESPIRITO J, REEVES G P, KNAPTON J D. Two-stage igniter test results: electrical ignition of LGP 1846 [R]. Maryland: BRL, 1991.
- [19] 余永刚, 李明, 周彦煌, 等. 液体推进剂液滴点火特性的实验研究[J]. *含能材料*, 2008, 16(5): 625-628.
- YU Yong-gang, LI Ming, ZHOU Yan-huang, et al. Experimental study on electrical ignition properties of liquid propellant droplet [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 625-628.
- [20] 鲍立荣, 汪辉, 陈永义, 等. 硝酸羟胺基绿色推进剂研究进展[J]. *含能材料*, 2020, 28(12): 1200-1210.
- BAO Li-rong, WANG Hui, CHEN Yong-yi, et al. Review on hydroxylammonium nitrate based green propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(12): 1200-1210.
- [21] 周劲松, 桂林, 孙莲萍, 等. 用于航天推进的 HAN 基液体单元推进剂[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2002, (1): 12-13.
- ZHOU Jin-song, GUI Lin, SUN Lian-ping, et al. HAN-based liquid unit propellant for aerospace propulsion [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2002, (1): 12-13.

## Droplet Electric Ignition Characteristics of New HAN-based Liquid Propellant EMP-01

LIU Chong<sup>1</sup>, YAO Tian-liang<sup>2</sup>, XUE Xiao-chun<sup>1</sup>, YU Yong-gang<sup>1</sup>, ZHANG Xin-wei<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** In order to explore the droplet ignition characteristics of a new type of hydroxylamine nitrate (HAN)-based liquid propellant EMP-01, a droplet electric ignition experimental platform was built by placing the droplet in a hemispherical groove and inserting the electrode. The electrical ignition characteristics of EMP-01 droplets under the conditions of droplet diameter of 6.5 mm, electrode spacing of 0.5 mm and voltage loading rate of  $86.31 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  were studied, and the ignition delay time under this condition was determined. At the same time, the variation law of droplet ignition delay time and combustion process was also studied within  $34.20\text{--}246.37 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  under the condition of constant droplet diameter and electrode spacing. The results show that the droplet separation of EMP-01 undergoes three stages: heating, thermal decomposition and combustion, and there is a periodic expansion and contraction process in the thermal decomposition stage. When the voltage loading rate is  $34.20 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$ , the EMP-01 droplet cannot be successfully ignited; When the voltage loading rate is  $49.49\text{--}246.37 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$ , the ignition delay time decreases gradually with the increase of voltage loading rate, but with the increase of voltage loading rate, the decrease rate of ignition delay time gradually slows down.

**Key words:** HAN-based propellant; electrical ignition characteristics; liquid propellant; combustion

**CLC number:** TJ55; V511+.3

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023103

**Grant support:** Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (No. 22XD1422000)

(责编: 王馨逸)