

HAN 基绿色推进剂点火技术研究进展

王新强, 邓康清, 李洪旭, 余小波
(湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳, 441003)

摘 要: 针对 HAN 基绿色推进剂普遍存在点火困难的问题, 总结了国内外 HAN 基绿色推进剂点火技术的研究和应用情况。HAN 基液体推进剂的点火方式主要包括催化分解点火、电火花点火、无弧点火、电解点火和激光点火。HAN 基凝胶推进剂仍采用传统烟火药方式, 难以实现点火。HAN 基固体推进剂采用电极电解点火方式, 在电压的控制下实现了点火、燃烧和熄火可控。分析认为, 采用电解方式能够显著提高 HAN 推进剂的点火效率, 是 HAN 基推进剂点火技术的发展方向。

关键词: 硝酸羟胺; 催化点火; 电点火; 电解点火

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 02-0072-05

Research progress on ignition of HAN-based green propellant

WANG Xinqiang, DENG Kangqing, LI Hongxu, YU Xiaobo
(Hubei Institute of Aerospace Chemo-technology, Xiangyang 441003, China)

Abstract: The recent research and application of the ignition technology of HAN-based green propellants at home and abroad is reviewed to solve the difficulty commonly existing in ignition of HAN-based green propellants. Several ignition methods of the HAN-based liquid propellants includes catalytic decomposition ignition method, electric spark ignition method, electrolytic ignition method and laser ignition method. The HAN-based gel propellant still uses conventional ignition methods, which is difficult to achieve ignition. The electrolytic ignition method can achieve ignition, combustion and flameout control of a novel HAN-based solid propellant under the condition of voltage control. The analysis results indicate that the electrolytic ignition method can improve the ignition effectiveness of HAN-based propellant obviously, and is the development direction of HAN-based propellants.

Keywords: HAN; catalytic ignition ; electrical ignition; electrolytic ignition

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2016-10-31

作者简介: 王新强 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究领域为特种推进剂火箭发动机技术

0 引言

硝酸羟胺(hydroxy lammonium nitrate, HAN)一般以水溶液形式存在。HAN基推进剂由于其具有绿色无毒,能量水平高等特征,目前被作为绿色推进剂的首要选择。传统的HAN基推进剂主要是HAN基液体推进剂^[1-2]。但近年来,国内外学者陆续探索研制了HAN基凝胶推进剂和HAN基固体推进剂,扩展了HAN基推进剂的应用范围。但HAN基推进剂仍然存在点火和燃烧困难的技术问题,限制了HAN基发动机的广泛应用^[3]。本文具体介绍了HAN基液体推进剂、HAN基凝胶推进剂和HAN基固体推进剂的点火技术,指出了电解点火是HAN基推进剂点火方式的发展方向。

1 HAN基液体推进剂点火技术

HAN基液体推进剂主要由氧化剂HAN、其他燃料和水复配形成的氧燃共存体系,是一种新型离子液体推进剂,具有蒸汽无毒、冰点低、密度高、比冲高等特点。典型的HAN基液体推进剂主要有:以TEAN为燃料的LP1845和LP1846,以HEHN为燃料的AF-315系列单元推进剂。

采用传统的烟火药点火方式无法实现HAN基液体单元推进剂的可靠点火。Comer采用密闭爆发器研究了HAN基液体推进剂在0.1~100 MPa压力下的点火以及燃烧特性^[4]。研究发现:在低压下,HAN基液体推进剂只能进行分解燃烧,不能形成可见的火焰;当环境压力超过26 MPa之后,液体推进剂燃烧时会发出明亮的火焰。

目前,关于HAN基液体推进剂点火方式的研究主要集中于催化分解点火、电点火和激光点火,而电点火主要包括电火花点火、无弧点火和直流电解点火。

1.1 催化分解点火

HAN基液体推进剂最初主要采用催化分解点火方式,HAN基液体推进剂的催化分解与胂类单元推进剂有本质的区别。胂类推进剂的催化分解是胂在催化剂的作用下发生化学键的断裂,分

解成小分子的 N_2 , H_2 和 NH_3 的过程,催化剂床温度较低。而HAN基液体推进剂首先是HAN在催化剂的作用下催化分解成氧化性组分放出热量,同时,氧化性组分又与燃料进一步发生二次分解燃烧,提高了推进剂的能量,催化床温度高达1 200℃以上。

最早用于HAN基液体推进剂催化点火的催化剂主要是铈、铂贵金属催化剂,但是,点火前需要将催化床预热至200℃,较低温度下的点火延迟期长,甚至无法实现点火。推进剂在催化床上积存较多,限制了发动机的启动性能。Schmidt以氧化铝为载体的铂族贵金属催化剂,通过改变不同催化剂配比,催化剂点火温度最低为113℃;Pt/Ta合金片催化剂点火预热温度为250℃^[5]。催化剂点火启动温度过高,无法实现室温或低温条件下的催化点火。实现HAN基液体推进剂催化分解点火的关键是必须找到一种能在室温条件下催化HAN分解的高活性催化剂。

任晓光制备了以 SiO_2 为载体的负载型贵金属催化剂^[6]。用热重法考察了催化剂对80% HAN液体推进剂的分解活性。结果表明, Ir/SiO_2 催化剂能够在20.7℃实现催化分解,验证了HAN基液体推进剂实现室温条件下催化点火的可能性。

近年来,在美国空军的主导下,Fokema等研制了一系列高性能的热稳定催化剂和非贵金属催化剂^[7],与传统铈、铂贵金属催化剂相比具有更低的点火温度。

预热温度过高是限制HAN基推进剂催化点火的主要瓶颈之一,因此,降低反应温度,提高催化剂活性,是HAN基推进剂催化点火的研究方向。2007年,Aerojet公司和雷声公司在两级空射武器系统NCADE上采用AF-315E推进剂,通过催化点火方式进行了飞行验证试验,可提供680 N的推力。

1.2 电点火点火方式

由于HAN基液体推进剂燃烧温度高,采用传统的催化分解点火方式,易于破坏催化床,会严重缩短发动机的寿命。Yetter等提出了HAN基液体推进剂电点火方式^[8]。关于HAN基液体推进剂电点火技术的研究主要有电火花点火、无弧点

火和低压电解点火。电点火比催化分解点火耗能少,延迟时间短,适合于微小型推进器使用。

1) 电火花点火方式

Despirito 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^[9]。余永刚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^[10]。结果表明,电火花在圆周放电空间的分布越密集,电能时空分布越均匀,LP1846 液雾点火效果越好。喷雾场流速、液雾细度与周向放电火花能量分布存在一个最佳匹配关系。

2) 无弧点火方式

针对 HAN 基液体推进剂具有较高电导率的特性,Despirito 提出了利用加载电压下电流的热效应点燃推进剂,并给出了点火装置的优化方案,指出无弧点火方式可以减小点火能量,提高点火装置的重复利用率^[11]。

余永刚等针对 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(6~140 V)不同电加热速率条件下,LP1846 单滴无弧点火燃烧特性,分析了点火延迟时间和点火能量的定性关系,证明了无弧点火的可能性^[12]。研究发现,单脉冲点火时放电能量很大,在液体推进剂雾化效果较好的情况下,容易出现爆燃现象。如果点火能量不足,同样会使点火状况受到影响。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,液滴点火延迟时间从 0.82 s 变为 0.62 s,呈线性减小关系,且燃烧时火焰越明亮。

刘焜等研究了 HAN 基单元液体推进剂 LP1846 单滴无弧电点火的机理,基于两步不可逆化学反应机理,同时考虑物性参数随温度的变化关系,结合相关实验,对 HAN 基液体推进剂 LP1846 液滴在大气环境下的无弧电点火过程进行了数值模拟^[13]。结果表明:根据化学反应速率和温度分布变化,将最大加载电压 80 V 的无弧电点火过程分为预热、热分解及燃烧三个特征阶段。预热阶段,液滴保持球形,中心温度缓慢上升;热分解阶段,反应在液滴中心产生向外发展,液滴膨胀变大,内部出现伞形温度梯度分布;燃烧

阶段,火焰在液滴内部生成,LP1846 剧烈燃烧生成大量产物,流场温度先升后降。液滴着火延迟期随着最大加载电压的增大而减小,模拟结果与实验数据变化趋势一致,最大误差为 2.9%。

3) 电解点火方式

采用电火花点火方式,存在能量损耗大、重复性差等缺点。考虑到化学微小型推进器的特点,G.A. Risha 等提出了一种直流低压(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^[14]。电解点火比催化床点火耗电少,延迟时间短,适合于微小型推进器使用。

Hua Meng 等研究了 HAN 基推进剂电解点火性能,研究了电流、电压及初温与 HAN 基推进剂点火延迟时间之间的关系^[15],研究发现,随着电流、电压和初温的增加,点火延迟时间减小。

Kai SengKoh 等运用直流电压分别以铜丝、铝和石墨作为电极研究了 HAN 溶液的电解点火特性^[16],研究发现,这种牺牲电极的电解点火方式非常有效,在 300 W 能量条件下,以铜丝为电极有效缩短了 HAN 水溶液的分解过程,在 10 s 内溶液达到 100°C ;以铝片为电极 HAN 水溶液组分达到了 320°C ;但是以石墨为电极其分解缓慢,效率低。电解能量在 100~300 W 之间,其电分解效率最高。

1.3 激光点火

近年来,在 HAN 基液体推进剂的激光点火方面也有学者进行了研究。Alfano 等使用激光谐振的方式快速加热推进剂来点火,其在点火方式上具有一定的优势,但并不适用与小型推进器,目前仍处于试验研究阶段^[17]。

Carleton 等研究了 HAN 基推进剂的激光点火^[18]。在铂网上加入一滴液体推进剂,通过激光在液滴的不同位置聚焦点火,试验前采用诸如电解、电热等方式对液滴进行不同程度的预处理,对生成的气体进行在线分析以便监测分解程度。结果表明硝酸再分解在反应过程中的作用非常重要,这与目前公认的机理一致。

2 HAN 基凝胶推进剂点火技术

HAN 水溶液具有良好的物理化学特性,且分

解产生的气体洁净,为安全气囊高效率气体发生剂的研制提供了崭新的思路。HAN须以水溶液形态才能稳定存在,这给气体发生器的装药带来了困难。Michael把HAN水溶液凝胶化制得一种HAN基水凝胶气体发生剂应用于安全气囊中^[19]。HAN基凝胶推进剂的点火方式主要还是传统的烟火药点火方式。

马忠亮等以HAN为主氧化剂,AN为辅助氧化剂,PVA为凝胶剂,在水介质中通过“冷冻-解冻-冷冻”工艺制备HAN基凝胶发射药^[20]。在密闭燃烧器通过烟火药点火方式对该推进剂进行了点火试验,试验结果表明: HAN凝胶发射药点火延迟时间长,点火困难。采用单基发射药薄片包裹凝胶有利于点火。

曲艳斌制备了HAN/PVA凝胶推进剂,研究了不同含水量HAN凝胶体的燃烧性能^[21],此HAN凝胶体仍具有较高的能量及较少的燃烧时间,并且产气量较大,但此种凝胶体点火较难。此种凝胶体随着含水量的增加,能量及燃烧速度有所降低,因此可以通过调节含水量来调节其能量水平。

3 HAN基固体推进剂点火技术

Katzakian等研制了一种燃烧可控的HAN基固体推进剂^[22],这种推进剂与传统固体推进剂不同,它具有较好的导电性能,能够通过电压控制推进剂的燃烧状态。在电极两端加载一定电压,推进剂能够实现点火,燃烧过程中通过改变电压大小能够调节推进剂的燃速,断电推进剂能够自动熄火。对直径6.350 mm的HAN基固体推进剂微型推进器进行了直流电解点火测试,点火电压为直流300 V,电极为金属惰性电极。结果表明这种HAN基固体推进剂可以通过直流电压引燃,燃速可以通过电压调控,当切断电压时,推进剂立即熄火。

4 结束语

HAN基绿色推进剂普遍存在难以点火的问题,由于HAN基液体推进剂燃烧温度高,采用催化分解点火方式,易于破坏催化床,严重缩短

了发动机寿命,同时,催化分解的预热温度过高也限制了其在发动机中的应用。采用电火花点火方式,存在着能量损耗大、重复性差的缺点。分析认为,直流电解点火方式能在较低电压条件下实现点火,耗能少,在HAN基液体推进剂和HAN基固体推进剂中的点火试验中都验证了其点火的可靠性,是HAN基推进剂点火技术的发展方向。

参考文献:

- [1] 禹天福. 空间化学推进技术的发展[J]. 火箭推进, 2005, 12(3): 23-29.
YU Tianfu. Development of space chemical propulsion technology[J]. Journal of rocket propulsion, 2005, 12(3): 23-29.
- [2] 张蒙正. 凝胶燃料单滴燃烧的建模、实验及应用[J]. 火箭推进, 2010, 36(3): 1-9.
ZHANG Mengzheng. Modeling, experimental and application of single droplet combustion for gel fuel[J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(3): 1-9.
- [3] KATSUMI T, INOUE T, NAKATSUKA J, et al. HAN-based green propellant, application, and its combustion mechanism [J]. Combustion, explosion, and shock waves, 2012, 48(5): 536-543.
- [4] COMER H. Ignition and combustion of liquid mono-propellants at high pressures[J]. Symposium on combustion, 1977, 16(1): 1211-1219.
- [5] SCHMIDT E W, GAVIN D F. Catalytic decomposition of hydroxylammonium nitrate-based monopropellants: US-5485722[P]. 1996-11-12.
- [6] 任晓光, 李明慧, 王爱琴, 等. 室温条件下硝酸羟胺的催化分解[J]. 催化学报, 2007, 28(1): 1-2.
- [7] FOKEMA M D, TORKELOSON J E. Thermally stable catalysts and process for the decomposition liquid propellant: US20080064914[P]. 2008-06-05.
- [8] YETTER R A, YANG V. Development of meso and micro scale liquid propellant thruster: AIAA 2003-0676[R]. US-A: AIAA, 2003.
- [9] DESPIRTO J, KNAPTON J D. Electrical ignition of HAN-based liquid propellants: ADA1950 94[R]. US: ADA, 1988.
- [10] 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]. 工程热物理论, 2010, 10(31): 1793-1796.
- [11] DESPIRTO J, REEVES G P, KNAPTON J D. Two-stage igniter test results: electrical ignition of LGP 1846 [R]. Maryland: BRL, 1991.
- [12] 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.
- [13] 刘焜, 余永刚, 倪彬. HAN 基液体推进剂单滴无弧点火过程的数值模拟[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 155-160.
- [14] RISHA G A, YETTER R A, YANG V. Electrolytic-induced decomposition and ignition of HAN-based liquid monopropellants [J]. Proceedings of 6th International Symposium in Chemical Propulsion. Santiago, USA: [s. n.], 2005: 8-11.
- [15] HUA M, PRASHANT K, GRANT A. Decomposition and ignition of HAN-Based monopropellants by electrolysis: AIAA 2009-451[R]. USA: AIAA, 2009.
- [16] KAI S, JITKAI C, TENGKU F. Role of electrodes in ambient electrolytic decomposition of hydroxylammonium nitrate (HAN) solutions[J]. Propulsion and power research, 2013, 2(3): 194-200.
- [17] ALFANO A J, MILLS J D, VAGHJIANI G L. Resonant laser ignition study of HAN-Hehn propellant mixture: AFRL-RZ-ED-JA-2008-333[R]. [S.l.: s.n.], 2008.
- [18] CARLETON F B, KLEIN N, KRALLIS K, et al. Initiation reaction in liquid propellants by focused laser beams [J]. Combustion science and technology, 1992, 88: 33-41.
- [19] MICHAEL W B, BRADLEY D H, JOHNSON L. Hydroxyl ammonium nitrate/water/self-deflagrating fuels as gas generating pyrotechnics for use in automotive passive restraint system: US5684269[P]. 1997-07-11.
- [20] 马忠亮, 吴昊, 何利明, 等. HAN 基凝胶发射药的性能 [J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3): 3-5.
- [21] 曲艳斌, 肖忠良. 硝酸羟胺(HAN)水凝胶性能研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 168-170.
- [22] KATZAKIAN, A, GRIX C, SAWKA W N. Electrically controlled extinguishable solid propellants a safe, broadly scalable propulsion technology [C]//53rd JANNAF Propulsion Mtg. Monterey, CA, USA: 2005: 11-19.

(编辑: 王建喜)

(上接第 65 页)

4 结束语

本文提出的液氧/煤油发动机用步进电机力矩加载系统通过回转平板和转动基座配合实现了加载前磁粉制动器的磁粉的均匀化, 并结合模糊 PI 控制算法对输出制动力矩值实时的修正, 使输出力矩值精度大大提高。经实验验证, 步进电机力矩加载系统具有操作自动化、系统可靠性高等优点, 输出制动力矩满足液氧/煤油发动机步进电机测试需求, 只需增加电机接口匹配工装, 力矩加载系统便可推广至其他步进电机、直流电机加载、控制器性能验证等场合, 具有较高的经济效益。

参考文献:

- [1] 刘军. 液氧煤油发动机用电机测量控制系统研究设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] 白连平, 杨婷, 孙佃升. 电机实验中稳恒负载的实现[J]. 实验技术与管理, 2016, (8): 23-25.
- [3] 张洪帅, 王平, 韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1879-1894.
- [4] 章为国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
- [5] 陈作杰, 吴培德, 张义红. 模糊 PI 控制器在薄膜张力控制系统的应用研究[J]. 智能计算机与应用, 2014, (6): 42-44.
- [6] 周晖. 基于模糊 PI 控制的永磁同步电机矢量控制系统实现及性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] 邹乾. 两相混合式步进电机的模糊 PI 控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [8] 李刚, 韩海兰, 赵德阳. 四轮轮毂电机电动汽车横摆力矩模糊 PI 控制研究[J]. 机械设计与制造, 2015, (7): 103-107.
- [9] 鲁文其, 周延锁, 刘虎. 动态载荷模拟可控加载与测试装置设计[J]. 机电工程, 2015(2): 185-189.

(编辑: 陈红霞)