

文章编号:1006-9941(2019)09-0743-06

# HAN 基电控固体推进剂的热分解和电导率特性

鲍立荣<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1,2,3</sup>, 陈永义<sup>1,2</sup>, 陈苏杭<sup>1,2</sup>, 沈瑞琪<sup>1,2</sup>, 叶迎华<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学空间推进技术研究所, 江苏 南京 210094; 3. 南京理工大学特种能源材料教育部重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了揭示硝酸羟胺(HAN)基电控固体推进剂(ECSP)可靠点火和燃烧调控机理,采用热重-差示扫描量热-质谱(TG-DSC-MS)联用技术和阻抗-频率扫描方法分别研究了ECSP的热分解行为、热分解产物以及压力与温度对电导率的影响。结果表明:与纯HAN溶液相比,ECSP的热稳定性提高,初始分解温度提高11℃,高温放热峰峰温后移24℃,热分解历程变长。结合ECSP的热分解行为与产物质谱曲线,发现HAN基ECSP的热分解历程主要分为三步:HAN发生热分解反应;HAN的热分解产物和未分解的HAN与聚乙烯醇(PVA)发生相互作用;ECSP中剩余其他组分发生热分解。ECSP的电导率在低频率范围(0~1000 Hz)内急剧增加,但随着频率的增加,在高频率范围(大于1000 Hz)内趋于恒定。随着压强和温度的增加,ECSP的电导率增加。当温度增加到150℃时,ECSP在高频率范围(大于1000 Hz)的电导率与125℃时相比降低2.92%。

**关键词:** 硝酸羟胺(HAN);电控固体推进剂(ECSP);热分解;电导率

中图分类号:TJ55;V512

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019054

## 1 引言

导弹武器及空间飞行器技术的不断发展对为其提供动力的推进剂提出了更高要求。例如,微小卫星之类的小型太空飞行器需经常实施变轨、编队飞行及姿态调整,要求推进系统具备多次点火及推力调节功能,推力的随机控制也是战术导弹固体发动机发展的趋势<sup>[1-2]</sup>。传统的固体推进剂在熄火后,难以再次点火,实现多次启动操作存在困难;另一方面,推进剂的燃烧过程不受控制,难以实现推力调节。

电控固体推进剂(ECSP)的发展突破了传统固体推进剂在可重复点火和推力可调等方面的技术瓶颈,通过电极在ECSP上施加所需电压,推进剂在无需点火

药的情况下被引燃且持续燃烧;当撤去施加在推进剂上的电压时,推进剂熄火,重新施加电压,推进剂可再次燃烧。另外,通过改变所施加电压的大小,进而控制推进剂的燃速,实现推力的调节<sup>[3]</sup>。国外 Andrew 等<sup>[4]</sup>研究了电极极性、电流密度对ECSP点火燃烧顺序的影响,结果发现电流密度相同时,点火燃烧首先发生在正极;当不考虑电极极性时,点火燃烧首先发生在电流密度大的区域。Glascock 等<sup>[5]</sup>利用脉冲电推进器对ECSP与聚四氟乙烯(PTFE)两者的烧蚀特征做了比较,ECSP烧蚀消耗的电弧能量为 $14.82 \mu\text{g}\cdot\text{J}^{-1}$ ,约为PTFE烧蚀消耗能量的2.1倍,发现两种推进剂之间的高温电弧烧蚀过程非常相似,PTFE研究的烧蚀模型可以用于ECSP的烧蚀。王新强<sup>[6]</sup>研究了电极材料、电极极性、电流密度和电压等对ECSP点火和燃烧过程的影响。胡建新等<sup>[7]</sup>开展了基于高氯酸盐的ECSP热分解特性及燃烧波温度分布等相关研究,认为高氯酸盐的ECSP的燃烧火焰呈现预混火焰结构。目前关于ECSP的报导仅限于电热耦合作用下ECSP的响应和能耗等。但是分别从热分解与电导率角度分析热效应和电效应对ECSP性能的报导较少。

ECSP的点火和燃烧过程受热效应和电效应的双

收稿日期:2019-03-14;修回日期:2019-05-15

网络出版日期:2019-07-22

基金项目:中央高校基本科研业务专项(30919012102, 30919011404, 30918011315)和特种能源材料教育部重点实验室开放基金(2019SEM08)

作者简介:鲍立荣(1993-),男,硕士,主要从事电化学推进技术研究。e-mail:blr1216@njust.edu.cn

通信联系人:张伟(1986-),男,讲师,主要从事先进推进技术及先进火工品技术研究。e-mail:wzhang@njust.edu.cn

引用本文:鲍立荣,张伟,陈永义,等. HAN 基电控固体推进剂的热分解和电导率特性[J]. 含能材料,2019,27(9):743-748.

BAO Li-rong, ZHANG Wei, CHEN Yong-yi, et al. Thermal Decomposition and Conductivity Characteristics of HAN-Based Electrically Controlled Solid Propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(9):743-748.

重作用。本研究借助 TG-DSC-MS 联用技术对硝酸羟胺(HAN)基 ECSP 的热解行为和热解产物进行分析, 揭示其热解反应过程; 使用 CS350 电化学工作站研究不同压强和温度下的电导率特性, 探究影响 ECSP 电导率的因素, 以期成为 ECSP 的可靠点火及燃烧调控提供重要的参考依据。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

试剂: HAN 溶液, 实验室复分解法<sup>[8]</sup>制得, 经减压旋蒸浓缩后的质量分数为 92.6%; 硝酸铵(AN), 研磨后 100 目, 含量 >99%, 上海百灵威化学技术有限公司; 5-氨基四唑(5-ATZ), 研磨后 100 目, 含量 >99%, 洛阳黎明化工研究院; 聚乙烯醇(PVA), 2699 型, 分子量为 114400~123200, 上海臣启化工有限公司; 硼砂(NB), 研磨后 100 目, 含量 >99.5%, 南京荣华科学器材有限公司。

仪器: Quanta 250 FEG 场发射扫描电子显微镜(SEM): 美国 FEI 公司; 热重-差示扫描量热-质谱(TG-DSC-MS)联用分析系统: 梅特勒-托利多 TGA/DSC 1/1600 高温同步热分析仪和珀金埃尔默(PE)公司 SQ8 T 质谱分析仪; 电导率测试系统为实验室自行搭建, 如图 1 所示。其中电化学工作站为 CS350 型, 武汉科思特仪器有限公司。

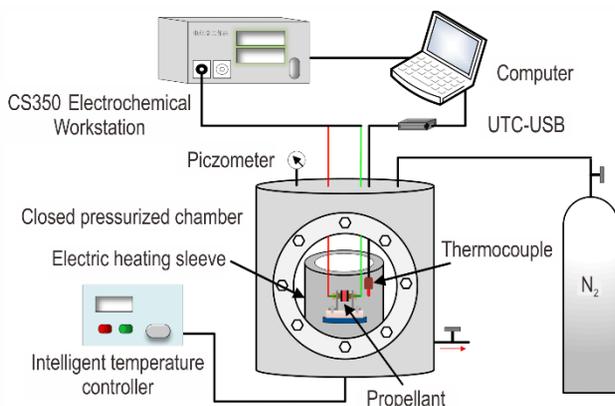


图1 电导率测试系统示意图

Fig.1 Schematic of the conductivity test system

### 2.2 样品的制备

推进剂样品配方(质量百分数)为: HAN 65%~75%, AN 2%~4%, 5-ATZ 2%~4%, PVA 12%~15%, NB 1%~2%, 其他 1%~2%。

推进剂样品的制备: 在室温条件下, 将 AN、

5-ATZ、NB 加到 HAN 的浓缩液中, 超声至溶解; 将 PVA 加入到上述溶解后的液体中, 真空搅拌得到均匀的药浆; 将药浆在常压下灌注至模具中, 消除气泡, 放置在 35 °C 的真空烘箱中, 固化成型, 图 2 为其截面形貌图, 液体氧化剂 HAN 先溶胀在粘结剂 PVA 中, 固化后 HAN、AN 及 5-ATZ 等均匀分散在 PVA 与 NB 交联形成的三维网络状体系中。

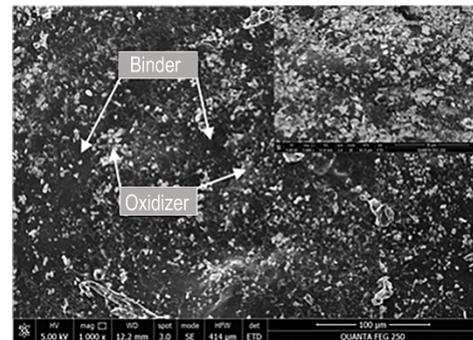


图2 ECSP 截面 SEM 形貌图

Fig.2 Sectional morphology of ECSP analyzed by SEM

### 2.3 实验过程

#### (1) TG-DSC-MS 联用分析

TG-DSC: 氧化铝坩埚; 载气为高纯氦气(纯度 99.999%), 吹扫气流量 40 mL·min<sup>-1</sup>, 保护气流量 20 mL·min<sup>-1</sup>; 样品质量约 10 mg, 升温速率为 10 °C·min<sup>-1</sup>, 测试温度为 25~450 °C。TG-MS: 传输线温度 280 °C, 以超纯氦气(纯度 99.9999%)为载气, 流量 1 mL·min<sup>-1</sup>, 进样口温度 200 °C, 离子源为 EI 源, 70 eV, 离子源温度 280 °C, 质荷比扫描范围 14~200 amu。除了获得 TG 和 DSC 数据外, 还从该联用分析获得主要气体产物的质荷比和温度的关系曲线。

#### (2) 电导率测试

基于阻抗-频率扫描法<sup>[9]</sup>, 利用不锈钢做电极测试 ECSP 在不同压强和温度下的电导率。推进剂样品尺寸为 10 mm×10 mm×20 mm。样品电导率测试在密闭加压室内进行, 试验过程中将药柱夹持在电导率夹具中, 置于电加热套内, 分别测试 0.1, 1, 2 MPa 和 3 MPa 下的电导率, 然后调节燃烧室压力至 0.1 MPa, 利用热电偶监测加热温度, 测试药柱在 25~150 °C 的电导率。

## 3 结果与讨论

### 3.1 热分解性能分析

图 3 为纯 HAN 溶液和 ECSP 样品的 TG-DSC 曲

线。以纯 HAN 溶液为参考,探究热效应对 ECSP 性能的影响。

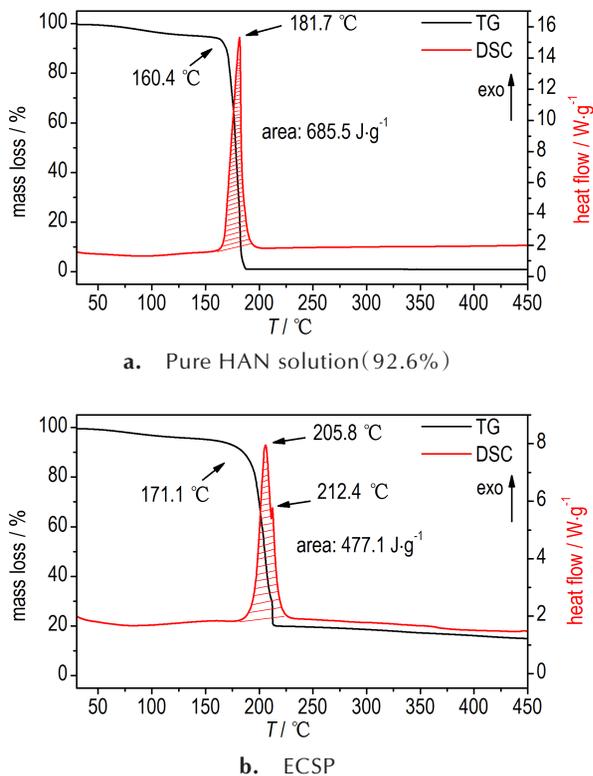


图3 纯 HAN 溶液和 ECSP 的 TG-DSC 曲线  
Fig.3 TG-DSC curves of pure HAN solution and ECSP

从图 3a 可以看出,在升温后 TG 曲线出现缓慢的下降趋势,DSC 曲线对应微弱的吸热,因为 HAN 溶液约 7.4% 的水吸热蒸发。随后在 160.4 °C 开始出现急剧的失重,且质量损失 100%,与此相对应为窄且强的放热峰,峰温为 181.7 °C,放热温度为 160~196 °C,放热量为 685.5 J·g<sup>-1</sup>,对应于 HAN 的剧烈放热反应,说明 HAN 在 160~196 °C 内完全分解为气相物质,这与文献[11]的结果一致。

对比图 3a 和图 3b,ECSP 在 25~171 °C 内,表现出和纯 HAN 溶液相似的水吸热蒸发过程。但 ECSP 的热稳定性与纯 HAN 溶液相比较好,明显的失重开始于 171.1 °C,相比纯 HAN 溶液滞后近 11 °C,放热温度范围(183~228 °C)增加,对应的 DSC 曲线上出现两个放热峰,峰温分别为 205.8 °C 和 212.4 °C。ECSP 主要是由氧化剂 HAN 和粘结剂 PVA 组成,而单独的 PVA 在加热到 160~170 °C 后开始脱水醚化,200 °C 左右开始分解<sup>[11]</sup>。结合纯 HAN 溶液的热分解特性,说明放热温度范围(183~228 °C)内,存在 HAN 的分解放热和

HAN 的分解产物与 PVA 相互作用放热,峰温 205.8 °C 较纯 HAN 溶液提高了约 24 °C,在 ECSP 放热过程中第二个微弱的放热峰可能是由于 ECSP 中极少量的 AN 或 5-ATZ 与 PVA 相互作用放热。此外,由于 PVA 的分解过程为吸热反应,ECSP 在放热温度范围的放热量为 477.1 J·g<sup>-1</sup>,较纯 HAN 溶液的放热量降低 208.4 J·g<sup>-1</sup>。

### 3.2 热分解主要气体分析

利用 TG-DSC-MS 联用技术获得纯 HAN 溶液和 ECSP 在热分解过程中产生的气体产物质谱图见图 4。

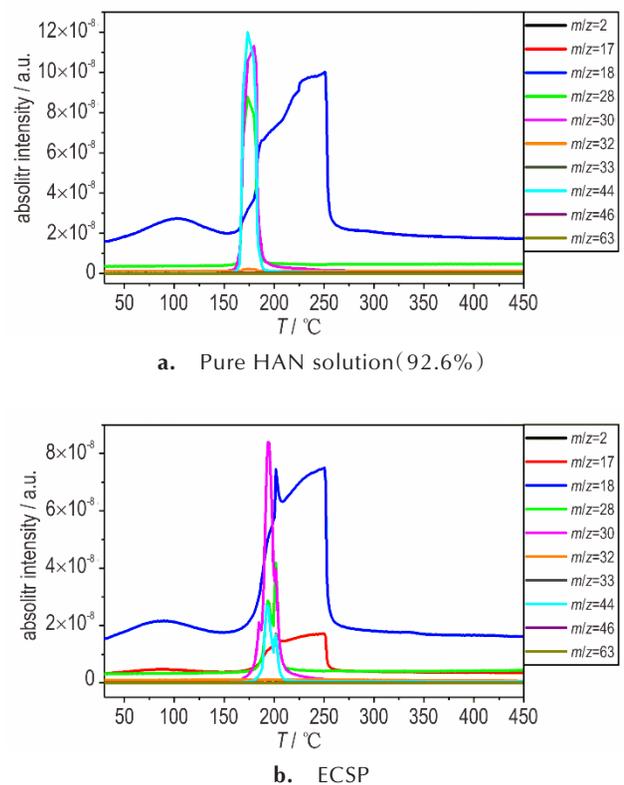


图4 纯 HAN 溶液和 ECSP 产物的质谱曲线  
Fig.4 Mass spectrometry curves of pure HAN solution and ECSP products

由图 4a 可知,纯 HAN 溶液的质谱中检测到其热分解产物可能为 H<sub>2</sub>O ( $m/z=18$ ), N<sub>2</sub> ( $m/z=28$ ), NO ( $m/z=30$ ), O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>NO ( $m/z=32$ ), N<sub>2</sub>O ( $m/z=44$ ), NO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>N<sub>2</sub>O ( $m/z=46$ ), 如表 1 所示,这在 Klein N<sup>[12]</sup> 和 Atamanov M K<sup>[13]</sup> 的研究中可以得到验证。

对比图 4a 和图 4b 可以看出,相对于纯 HAN 溶液,ECSP 的热分解过程新产生了 NH<sub>3</sub> ( $m/z=17$ ), O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>NO ( $m/z=32$ ) 和 NO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>N<sub>2</sub>O ( $m/z=46$ ) 消失,如表 2 所示。结合图 3b 和图 4b,可认为 ECSP 的热分

解过程可分为三个阶段:(1)ECSP中的部分HAN首先发生热分解,表现为生成 $H_2O$ , $N_2$ , $NO$ 和 $N_2O$ 等产物;(2)HAN除继续热分解外,HAN的部分热分解产物以及未分解的HAN与PVA发生相互作用,表现为 $H_2O$ 的减少,生成 $CO$ 和 $CO_2$ ;(3)在 $203\text{ }^\circ\text{C}$ 后,ECSP中剩余的其他组分发生热分解,表现为出现的 $NH_3$ 和 $H_2O$ 的增加,其中 $NH_3$ 可能为AN的热分解产物<sup>[14]</sup>。

表1 纯HAN溶液分解产物碎片离子峰及可能的归属

Table 1 Fragment peaks and their assignments of pure HAN solution

$m/z$	$T_0 / ^\circ\text{C}$	$T_1 / ^\circ\text{C}$	possible assignment
18	158	251	$H_2O^+$
28	161	173	$N_2^+$
30	161	181	$NO^+$
32	168	175	$O_2^+/H_2NO^+$
44	161	173	$N_2O^+$
46	168	175	$NO_2^+/H_2N_2O^+$

Note:  $T_0$  is the temperature of the evolved gas detected by the mass spectrometer.  $T_1$  is the temperature (peak temperature) of the evolved gas at the maximum concentration by the mass spectrometer.

表2 ECSP分解产物碎片离子峰及可能的归属

Table 2 Fragment peaks and their assignments for ECSP

$m/z$	$T_0 / ^\circ\text{C}$	$T_1 / ^\circ\text{C}$	$T_2 / ^\circ\text{C}$	$T_3 / ^\circ\text{C}$	possible assignment
17	179	203	251	-	$NH_3^+$
18	158	201	251	-	$H_2O^+$
28	175	193	203	-	$N_2^+/CO^+$
30	175	185	193	203	$NO^+$
44	175	193	203	-	$N_2O^+/CO_2^+$

Note:  $T_2$  is the second temperature (peak temperature) of the evolved gas at the maximum concentration by the mass spectrometer.  $T_3$  is the third temperature (peak temperature) of the evolved gas at the maximum concentration by the mass spectrometer.

### 3.3 电导率特性

#### (1) 压力对电控固体推进剂电导率的影响

图5是ECSP的电导率随着频率在不同压强下的变化图。从图5可以看出,ECSP的电导率在低频率范围( $0\sim 1000\text{ Hz}$ )内急剧增加,但是随着频率的增加,在高频率范围(大于 $1000\text{ Hz}$ )内趋于恒定值。原因为在低频率范围( $0\sim 1000\text{ Hz}$ )内由于电极的极化效应,ECSP的电导率表现出对频率强烈的依赖性。而高频率范围(大于 $1000\text{ Hz}$ )内,在PVA和NB交联后形成的三维网络状体系中,ECSP中氧化剂HAN的 $NH_3OH^+$ 和 $NO_3^-$ 在频率增加的情况下对电场的再定

向受到物理限制。另外,ECSP电导率在较高频率下开始趋于平稳,体现了推进剂对带电离子物质流动的电导能力。

此外,压强的增加也会导致ECSP电导率的增加,压强越高,电导率在低频率范围( $0\sim 1000\text{ Hz}$ )内增加越快。这是因为压强的增加使得电极与样品接触更加紧密,ECSP中的网络间隙变小,离子与离子之间、离子与网络之间被压缩紧密接触而相互作用增强,形成了更多的导电通道。

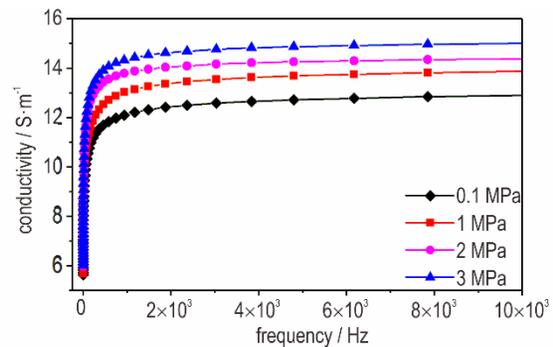


图5 ECSP电导率随着频率在不同压强下变化

Fig. 5 The dependence of conductivity of ECSP on the frequency under various pressures

#### (2) 温度对电控固体推进剂电导率的影响

图6是ECSP的电导率随着频率在不同温度下的变化图。根据ECSP的TG-DSC曲线,实验测试施加的最高温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,确保ECSP的组分不发生热分解。从图6可以看出,在某一温度下,ECSP的电导率随频率变化也是先迅速增大,然后趋于恒定。随着温度的增加,ECSP的电导率在低频率范围( $0\sim 1000\text{ Hz}$ )内增加,呈现负温度系数电阻效应。原因为温度的升高使得ECSP中组分的电离度增加,存在的离子迁移变得活跃,布朗运动变得剧烈,使得导电通道中导电成分的比例增加,增加了离子与离子之间的接触,有利于ECSP中离子导电网络的致密化。当温度增加到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时,ECSP的电导率在低频率范围( $0\sim 1000\text{ Hz}$ )内较 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 不再增加,在高频率范围(大于 $1000\text{ Hz}$ )内 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 对应电导率趋于的稳定值与 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 时相比降低 $2.92\%$ 。这是因为温度增加到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时,接近HAN的热分解温度,ECSP中导电成分已不再增加。而在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时ECSP软化发生微弱变形,整体开始呈现高弹态,在频率增加的情况下对电场的再定向受到的物理限制加强。

综上所述,根据ECSP电导率随频率的变化规律,

当对 ECSP 施加交流电时,可通过选择交流电场频率,将电导率调节到最优值,用于控制推进剂的电响应;结合 ECSP 电导率随所处压强和温度的变化规律,适当提高 ECSP 所处环境压强和温度将有利于提高其电导率,对于存在电效应刺激下的 ECSP 的点火和燃烧起到促进作用。

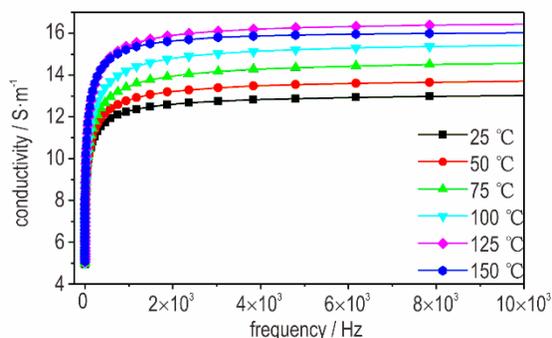


图6 ECSP 电导率随着频率在不同温度下变化

Fig.6 The dependence of conductivity of ECSP on the frequency under various temperatures

## 4 结论

(1)与纯 HAN 溶液相比,ECSP 的稳定性提高,初始分解温度提高 11 °C,高温放热峰峰温后移 24 °C,热分解历程变长,放热量降低。

(2)ECSP 的热分解历程主要分为三步: HAN 发生热分解反应; HAN 的热分解产物以及未分解的 HAN 与 PVA 发生相互作用; ECSP 中剩余的其他组分发生热分解。

(3)ECSP 的电导率在低频率范围(0~1000 Hz)内急剧增加,表现出对频率强烈的依赖性,但是随着频率的增加,在高频率范围(大于 1000 Hz)内趋于恒定。随着 ECSP 所处压强和温度的增加,其电导率增加,因此适当提高 ECSP 所处环境压强和温度将有利于 ECSP 在电效应刺激下的可靠点火和燃烧调控。

### 参考文献:

- [1] 张淑慧, 胡波, 孟雅桃. 推力可控固体火箭发动机应用及发展[J]. 固体火箭技术, 2002, 25(4): 12-15.  
ZHANG Shu-hui, HU Bo, MENG Ya-tao. Application and development of thrust controllable solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2002, 25(4): 12-15.
- [2] 程红波, 陶博文, 黄印, 等. 国外电控可熄火固体推进剂技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(6): 1-6.  
CHENG Hong-bo, TAO Bo-wen, HUANG Yin, et al. Research progress of electrically controlled extinguishable solid propellant abroad[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2016, 14(6): 1-6.
- [3] Sawka W N. Pulse performance and power requirements for electrically controlled solid propellant[C]//54th JANNAF Propulsion Meeting, Las Vegas, NV, 2007.
- [4] Hiatt A, Frederick R A. Laboratory experimentation and basic research investigating electric solid propellant electrolytic characteristics[C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, 2016: 4935.
- [5] Glascock M S, Rovey J. Electric solid propellant ablation in a pulsed electric thruster[C]//2018 Joint Propulsion Conference, Cincinnati, Ohio, 2018: 4818.
- [6] 王新强. 电控固体推进剂动力装置技术研究[D]. 湖北: 航天动力技术研究所, 2017.  
WANG Xin-qiang. Research on power device technology of electronically controlled solid propellant[D]. Hubei: Institute of Aerospace Dynamics Technology, 2017.
- [7] 胡建新, 李洋, 何志成, 等. 电控固体推进剂热分解和燃烧性能研究[J]. 推进技术, 2018, 39(11): 2588-2594.  
HU Jian-xin, LI Yang, HE Zhi-cheng, et al. Study on thermal decomposition and combustion properties of electrical controlled solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2588-2594.
- [8] 彭清涛, 黄小光, 胡文祥, 等. 硝酸羟胺水溶液的制备及其含量分析[J]. 上海航天, 2003, 20(2): 52-55.  
PENG Qing-tao, HUANG Xiao-guang, HU Wen-xiang, et al. Preparation and content analysis of hydroxylamine nitrate aqueous solution[J]. *Aerospace Shanghai*, 2003, 20(2): 5-55.
- [9] Zawodzinski T A, Derouin C, Radzinski S, et al. Water uptake by and transport through nafion 117 membranes[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 140(4): 1041-1047.
- [10] Amrousse R, Katsumi T, Itouyama N, et al. New HAN-based mixtures for reaction control system and low toxic spacecraft propulsion subsystem: Thermal decomposition and possible thruster applications[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(6): 2686-2692.
- [11] 张留成, 瞿雄伟, 丁会利. 高分子材料基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 150-151.  
ZHANG Liu-cheng, QU Xiong-wei, DING Hui-li. Foundation of polymer materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 150-151.
- [12] Klein N. Ignition and combustion of the HAN-based liquid propellants[C]//Proceedings of the 27th JANNAF Combustion Subcommittee Meeting, Cheyenne, WY, 1990, 1: 443-450.
- [13] Atamanov M K, Amrousse R, Jandosov 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.
- [14] Oxley J C, Brower K R. Thermal decomposition of hydroxylamine nitrate[C]//International Society for Optics and Photonics, Los Angeles, CA, 1988, 872: 63-71.

## Thermal Decomposition and Conductivity Characteristics of HAN-Based Electrically Controlled Solid Propellants

BAO Li-rong<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yong-yi<sup>1,2</sup>, Chen Su-hang<sup>1,2</sup>, SHEN Rui-qi<sup>1,2</sup>, YE Ying-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Space Propulsion, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Key Laboratory of Special Energy Materials, Ministry of Education, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to realize the reliable ignition and clarify combustion control mechanism of hydroxylamine nitrate (HAN)-based electrically controlled solid propellant (ECSP), thermogravimetric-differential scanning calorimetry-mass spectrometry (TG-DSC-MS) and impedance-frequency scanning techniques have been used. The effects of thermal decomposition behavior, decomposition products, pressure and temperature on conductivity of ECSP were studied independently. The results showed that compared with the pure HAN solution, the thermal stability of ECSP was improved. The initial decomposition temperature was raised by 11 °C, whereas the peak temperature of exothermic peak was decreased by 24 °C with a broader exothermic temperature range. Combining the thermal decomposition behavior of ECSP with the mass spectrometry curves of the gaseous products, it could be concluded that the thermal decomposition process of HAN-based ECSP might be divided into three steps: the thermal decomposition reaction of HAN, the interaction of the thermal decomposition products of HAN and the undecomposed HAN with polyvinyl alcohol (PVA), and the thermal decomposition of the residue components in ECSP. The electron conductivity of the ECSP was increased largely in the low frequency range (0–1000 Hz), but tended to be constant in the high frequency range (greater than 1000 Hz) as the frequency increased. With the increase of the pressure and temperature, the electron conductivity of the ECSP was increased. By raising the temperature to 150 °C, the electron conductivity in the high frequency range was reduced by 2.92% compared with that obtained at 125 °C.

**Key words:** hydroxylamine nitrate (HAN); electrically controlled solid propellant (ECSP); thermal decomposition; electron conductivity

**CLC number:** TJ55; V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019054

(责编:张琪)