

# HAN基电控固体推进剂电热耦合特性 及燃烧特性实验研究<sup>\*</sup>

鲍立荣<sup>1,2</sup>, 汪辉<sup>1,2</sup>, 王志文<sup>1,2</sup>, 谢海明<sup>1,2</sup>, 向书杰<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>,  
张晓军<sup>3</sup>, 黄寅生<sup>2</sup>, 沈瑞琪<sup>1,2</sup>, 叶迎华<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学 空间推进技术研究所, 江苏 南京 210094;  
2. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094;  
3. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了探究HAN基电控固体推进剂(ECSP)的电热耦合特性和燃烧性能, 通过改变施加电压和环境压力对ECSP进行燃烧性能测试。在ECSP燃烧性能测试装置中采用电压、电流探头记录燃烧过程中通过推进剂的电压和电流, 利用高速摄影仪记录推进剂的燃烧过程, 借助法拉第电化学反应定律计算推进剂理论电化学反应质量在总燃烧消耗质量中的占比, 分析电压和压力对推进剂燃速和质量损失的影响, 同时拟合出ECSP燃速( $r$ )与功率( $P$ )和压力( $p$ )的经验公式。结果表明: 随着电压和压力的增加, ECSP理论电化学反应质量和实际燃烧质量增加, 电解质量占比降低, 燃速和质量损失增加。在ECSP的可控燃烧范围内, 其燃速与功率和压力满足 $r = 0.0105P^{0.705}p^{0.251}$ 。本文得到了热分解反应在ECSP的燃烧过程中占主导地位是高压下造成推进剂不可控燃烧的主要原因, 为揭示ECSP的燃烧可控机理提供理论基础。

**关键词:** 电控固体推进剂; 电热耦合特性; 燃烧性能; 电化学反应; 热分解反应

中图分类号: TJ55; V511 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2021)06-1410-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200821

## Experimental Study on Electrothermal Coupling and Combustion Characteristics of HAN-Based Electrically Controlled Solid Propellant

BAO Li-rong<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-wen<sup>1,2</sup>, XIE Hai-ming<sup>1,2</sup>, XIANG Shu-jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Xiao-jun<sup>3</sup>, HUANG Yin-sheng<sup>2</sup>, SHEN Rui-qi<sup>1,2</sup>, YE Ying-hua<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Space Propulsion, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to explore the electrothermal coupling characteristics and combustion performance of HAN-based electrically controlled solid propellant (ECSP), the combustion performance test of ECSP was per-

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-10-17; 修订日期: 2020-12-17。

基金项目: 中央高校基本科研业务专项(30919012102); 西安近代化学研究所开放合作创新基金(SYJJ17; SYJJ200314)。

作者简介: 鲍立荣, 博士生, 研究领域为电化学推进技术。E-mail: blr1216@njjust.edu.cn

通讯作者: 张伟, 博士, 副研究员, 研究领域为先进推进技术及先进火工品技术。E-mail: wzhang@njjust.edu.cn

引用格式: 鲍立荣, 汪辉, 王志文, 等. HAN基电控固体推进剂电热耦合特性及燃烧特性实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1410-1417. (BAO Li-rong, WANG Hui, WANG Zhi-wen, et al. Experimental Study on Electrothermal Coupling and Combustion Characteristics of HAN-Based Electrically Controlled Solid Propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(6): 1410-1417.)

formed by changing the voltage and pressure. In the ECSP combustion performance test device, voltage probe and current probe were used to record the voltage and current passing through the propellant during the combustion process. The combustion process of propellant was recorded by high speed camera. According to Faraday's law of electrochemical decomposition, the proportion of theoretical electrochemical decomposition mass in total combustion consumption mass of propellant was calculated. The effects of voltage and pressure on the burning rate and mass loss of propellant were analyzed, and the empirical formulas of ECSP burning rate ( $r$ ) and power ( $P$ ) and pressure ( $p$ ) were fitted. The results show that with the increase of voltage and pressure, the theoretical electrochemical decomposition mass and actual combustion mass of ECSP increase, the electrolysis mass ratio decreases, and the burning rate and mass loss increase. Within the controllable combustion range of ECSP, the empirical formula of ECSP burning rate can be fitted as  $r = 0.0105P^{0.705}p^{0.251}$ . This article shows that the thermal decomposition reaction is dominant in the combustion process of ECSP and is the main reason for the uncontrollable combustion of the propellant under high pressure. It provides a theoretical basis for revealing the controllable combustion mechanism of ECSP.

**Key words:** Electrically controlled solid propellant; Electrothermal coupling characteristics; Combustion performance; Electrochemical decomposition; Thermal decomposition reaction

## 1 引言

传统固体推进剂在熄灭后难以重新点燃且燃烧过程不可控,无法满足微小卫星和武器装置实现连续启动和推力调节等要求<sup>[1]</sup>,研究人员曾尝试通过改变推进剂药柱形状或优化设计固体推进剂发动机的结构来实现上述操作<sup>[2]</sup>,但效果甚微。为了解决上述问题,国外研究人员研发出一种智能电控固体推进剂(ECSP)<sup>[3]</sup>。此类推进剂在无需点火药的情况下可以通过施加电压被引燃并且持续燃烧,改变施加电压的大小可以对推进剂燃烧过程进行主动控制,实现燃熄可控、燃速可调以及推力可变等操作<sup>[4]</sup>。ECSP的应用将是固体推进领域的技术革新,由于推进剂具备燃烧状态可主动控制的特性,有望为微小卫星的姿态调整和武器装备的快速机动提供技术支撑<sup>[5-6]</sup>。

目前,根据ECSP所使用的氧化剂种类可将其分为硝酸铵(AN)基ECSP<sup>[7]</sup>、硝酸羟胺(HAN)基ECSP<sup>[3]</sup>和高氯酸盐基ECSP<sup>[8-10]</sup>。其中,HAN基ECSP因具有能量高、安全钝感和燃烧产物绿色无毒等优点成为国内外的研究热点。鲍立荣等<sup>[11]</sup>研究了ECSP热分解过程和导电特性,发现推进剂的热分解历程为三步反应并且热稳定性较纯HAN溶液提高,推进剂所处压力和温度的增加有利于提高其电导率。此外,鲍立荣等<sup>[12-13]</sup>还研究了导电石墨以及多壁碳纳米管/铝粉复合体系对ECSP燃烧性能及可控性的影响,结果表明:提高ECSP的导电性和添加高能组分可以显著提高ECSP的燃烧性能,但是高能组分容易使ECSP从非自持燃烧转变为自持燃烧。He等<sup>[14-15]</sup>利用

Ma'lek 和 Coats-Redfern 法确定了ECSP的热分解机理转化模型,发现推进剂的热分解动力学遵循随机成核生长模型。Hiatt等<sup>[16]</sup>和王新强等<sup>[17]</sup>对ECSP的点火特性进行研究,发现电极极性和电流密度是影响推进剂点火次序的主要因素,推进剂的点火燃烧优先发生在正极和电流密度较大的区域。Glascok等<sup>[18-20]</sup>在脉冲等离子体推力器中以电推进测试手段为参考,对比了ECSP和聚四氟乙烯(PTFE)的烧蚀过程,认为ECSP的烧蚀过程与PTFE相似,烧蚀过程中产生离子流密度较低,烧蚀质量约为PTFE的2倍。Baird等<sup>[21-22]</sup>提出了ECSP的电解反应历程,进一步解释了因电极面积不等从而推进剂在正、负电极上燃烧情况不同的原因,即正极上 $\text{NO}_3^-$ 氧化产生的氧浓度较高,燃烧优先发生在等电极面积时的正极上;当小面积电极上的较大电场超过了推进剂的介电击穿强度,燃烧优先发生在小面积的电极上。

ECSP的燃烧过程受电效应和热效应耦合作用,而当前与推进剂相关的报道主要为热分解和点火燃烧特性研究,尚不能准确反映推进剂燃烧过程中的电化学反应和热反应对燃烧性能的影响,无法进一步揭示ECSP的燃烧可控机理。因此本文对改进制备工艺后的ECSP药柱形貌进行了表征,在确保药柱内部无断层和气泡的情况下对其进行燃烧性能测试。利用法拉第电化学分解理论计算推进剂电化学分解质量在总燃烧消耗质量中的占比,分析了电压和压力对推进剂燃速和质量损失的影响,同时拟合出ECSP燃速与功率和压力的经验公式。

## 2 实验方法

### 2.1 试剂组分与样品制备

试剂:本实验中测试的推进剂样品配方(质量百分数)为: HAN 溶液, 洛阳黎明化工研究院, 65%~75%; AN, 上海百灵威化学技术有限公司, 2%~4%; 5-氨基四唑(5-ATZ), 洛阳黎明化工研究院, 2%~4%; 聚乙烯醇(PVA), 上海迈瑞尔化学技术有限公司, 12%~15%; 硼酸(HB), 南京荣华科学器材有限公司, 1%~2%; 其它 1%~2%。

在制备 ECSP 样品前, 所有固体原材料在 35℃ 的真空烘箱中放置 24h 以去除水分。室温条件下, 将 AN, 5-ATZ, HB 加到含有缓冲剂、金属螯合剂等 HAN 浓缩液中, 超声 10min 至溶解; 将 PVA 加入到上述固体组分溶解后的混合液中, 真空搅拌 12min 得到均匀的药浆; 将药浆在常压下灌注至 10mm×10mm×20mm 的 PTFE 模具中, 超声震动模具除去气泡, 在 35℃ 的烘箱中放置 7 天固化成型。ECSP 制备过程如图 1 所示。

### 2.2 实验过程

推进剂形貌表征: 使用场发射扫描电子显微镜(FESEM, Quanta 400FEG, America)表征推进剂内部截面形貌。借助 X 射线三维显微镜( $\mu$ -CT, nanoVoxel-2700, China)表征推进剂内部的三维显微结构。

燃烧性能测试: ECSP 燃烧性能测试系统示意图如图 2 所示, 主要包括示波器、直流电压源、燃烧室、压力控制系统和图像采集系统等。其中, 推进剂置于正、负电极之间, 正极形状为筛板结构, 以确保火焰从正极喷射出来从而充分燃烧。直流电压源提供

维持推进剂持续燃烧所需电压(如 150~250V)。开关主动控制电压施加在推进剂上的时间。在压力控制系统中, 使用氮气调节推进剂的环境压力(如 0.1~1.0 MPa)。使用示波器记录电压、电流探头采集到的燃烧过程中通过推进剂的电压和电流值。图像采集系统记录推进剂的燃烧过程。此外, 借助高精度天平测得推进剂燃烧前后的质量。

因为 ECSP 在施加电压后才发生燃烧, 推进剂的燃烧过程受电和热耦合作用影响, 因此其总燃烧质量为发生电化学分解质量和实际燃烧质量之和。以理论电化学分解质量对总燃烧消耗质量的占比(电解质量占比)作为 ECSP 的电热耦合特性的评价参数。因为 ECSP 中的主要组分为 HAN 和 PVA, 同时为了简化 ECSP 中的电解反应, 以 HAN/PVA 二元体系为 ECSP 电热耦合特性研究对象, 借助法拉第电解公式计算理论电化学分解的质量, 电解质量占比( $m_{\text{ele}}/m_{\text{tot}}$ )由式(1)定义。 $m_0$ 和 $m_1$ 分别是推进剂燃烧前后质量; $t$ 为推进剂的燃烧时间; $I$ 为经过推进剂的电流; $K$ 为 ECSP 的电化学当量, 数值为 1.82mg/C<sup>[21]</sup>。

$$\frac{m_{\text{ele}}}{m_{\text{tot}}} = \frac{K \int_0^t I dt}{m_0 - m_1} \quad (1)$$

推进剂的燃烧性能主要包括燃速( $r$ )和质量损失( $m/Q$ ), 分别由式(2)和(3)定义。 $V$ 为推进剂的体积; $S$ 为推进剂与电极的接触面积; $U$ 为施加到推进剂上的电压。

$$r = \frac{\nabla H}{t} = \frac{\nabla m}{\rho \cdot S \cdot t} = \frac{(m_0 - m_1) \cdot V}{m_0 \cdot S \cdot t} \quad (2)$$

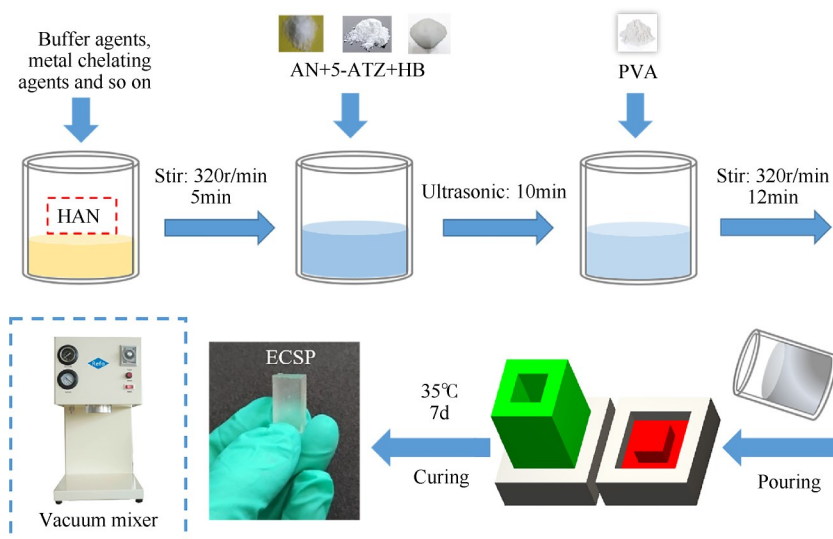


Fig. 1 Schematic diagram of ECSP preparation process

$$\frac{m}{Q} = \frac{m_0 - m_1}{\int_0^t U I dt} \quad (3)$$

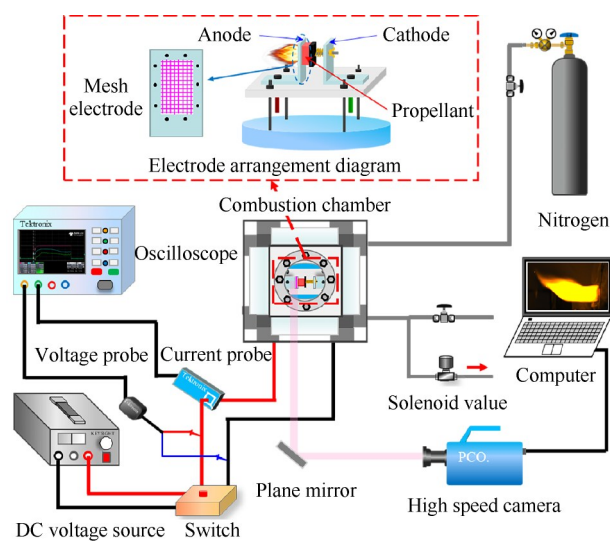


Fig. 2 Schematic of the ECSP combustion performance test system

### 3 结果与讨论

#### 3.1 ECSP 药柱形貌

固化后的 ECSP 内部截面 SEM 形貌图如图 3 所示。溶解有 AN, 5-ATZ 等固体组分的 HAN 混合液溶胀在粘结剂 PVA 中, 固化后 ECSP 为均相, 推进剂内部截面上无明显大颗粒团聚, HAN, AN 及 5-ATZ 等分布均匀且被包围在 PVA 与 HB 交联形成的三维网络状体系中。

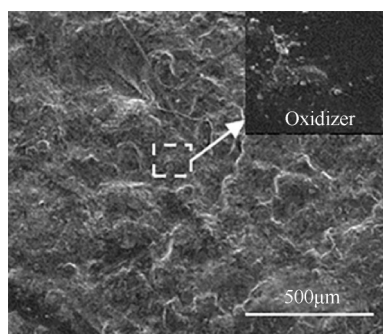


Fig. 3 SEM topography of the internal cross-section of ECSP

在制备 ECSP 过程中, 固体组分溶解和药浆浇注会引入气泡, 对推进剂燃烧性能产生影响, 因此利用真空搅拌和超声震动可以有效消除气泡, 制备得到均一的 ECSP 药柱。图 4 为 ECSP 内部的三维显微结构  $\mu$ -CT 图。从图 4 可以看出, 推进剂药柱内部几乎

不存在微米级的气泡, 且无断层。结合 ECSP 内部截面 SEM 图, 认为真空搅拌和超声震动后制备的推进剂药柱具有各组分分布均匀, 内部相均一, 无气泡和断层, 可以确保 ECSP 电热耦合特性和燃烧性能测试的准确性和一致性。

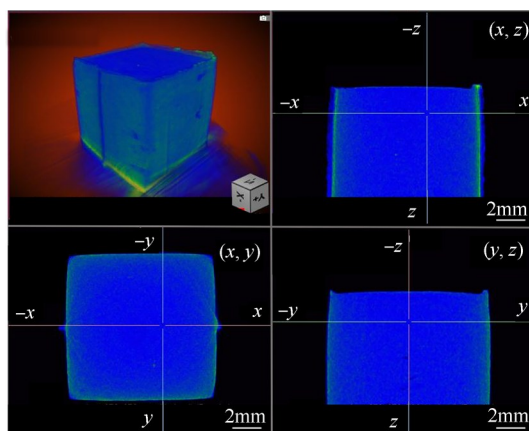


Fig. 4  $\mu$ -CT image of three-dimensional microstructure of ECSP

#### 3.2 ECSP 电热耦合特性

图 5 为不同电压下 ECSP 的质量损失速率和电解质量占比变化图。从图 5(a) 可知, 随着电压 (0.1MPa 下) 的增加, ECSP 的理论电化学分解质量有所增加, 而实际燃烧质量增加显著。当电压从 150V 增加到 250V 时, 理论电化学分解质量速率从 4.293mg/s 增加到 6.045mg/s, 实际燃烧质量速率从 0.0681g/s 增加到 0.1840g/s。原因为上述制备工艺获得的同批次 ECSP 药柱的导电性能接近, 提高施加在推进剂上的电压会增加通过推进剂的电流值, 从而提高推进剂的理论电化学分解质量。电压的提高会增强推进剂的燃烧, 进而增加推进剂的实际燃烧质量。图 5(b) 表明电压的升高会造成 ECSP 的电解质量占比的降低, 并且随着电压的进一步增加, 比值开始出现趋于定值的趋势。当电压从 150V 增加到 250V 时, ECSP 的电解质量占比从 6.43% 降低到 2.26%。结合图 5(a) 可知, 因为随着电压的增加, 实际燃烧质量较理论电化学分解质量增加显著, 则电解质量占比不断降低。在 0.1MPa 下, 因为施加不同电压值不会对 ECSP 的燃熄可控性造成影响, 则 ECSP 的电解质量占比尚未低于其发生燃熄可控的电解质量占比阈值, 这说明了此时电效应仍然是 ECSP 燃熄可控的控制因素。

图 6 为不同压力下 ECSP 的质量损失速率和电解质量占比变化图。图 6(a) 表明随着压力 (200V 下) 的增加, ECSP 的理论电化学分解质量增加, 实际燃烧质

量也增加。当压力从 0.1MPa 增加到 1.0MPa 时,理论电化学分解质量速率从 4.993mg/s 增加到 6.402mg/s,实际燃烧质量速率从 0.1243g/s 增加到 0.2947g/s。作者之前的相关研究<sup>[10]</sup>表明,压力的增加会提高 ECSP 的电导率,因此尽管施加在 ECSP 上的电压相同,但通过推进剂的电流会随着压力的增加有所提高,理论电化学分解质量相应增加。和传统的固体推进剂一样,压力的增加会促进 ECSP 的燃烧,则实际燃烧质量增加。从图 6(b)可以看出,ECSP 的电解质量占比会因压力的升高不断降低。当压力从 0.1MPa 增加到 1.0MPa 时,电解质量占比从 3.77% 降低到 1.92%。结合图 6(a)可以发现,因为实际燃烧质量随压力增加的趋势较理论电化学分解质量更显著,则 ECSP 的

电解质量占比不断减小。在本实验中,当压力大于 1.0MPa 时,ECSP 的燃烧不再受电压控制,其燃烧状态由非自持燃烧转变为自持燃烧。这表明当压力大于推进剂燃烧可控压力值(1.0MPa)时,推进剂的燃熄可控性受到影响,此时 ECSP 的电解质量占比已低于其发生燃熄可控的电解质量占比阈值,热效应将取代电效应成为 ECSP 燃熄可控的控制因素。

### 3.3 ECSP 燃烧性能

不同电压和压力下 ECSP 的燃烧图如图 7 所示。从图 7 可以看出,ECSP 的燃烧火焰从电极面喷出,并且推进剂的燃烧随着电压和压力的增加而变得剧烈。0.1MPa 下,随着电压的增加,推进剂的燃烧增强,燃烧火焰长度增加且拉直。200V 下,受压力影

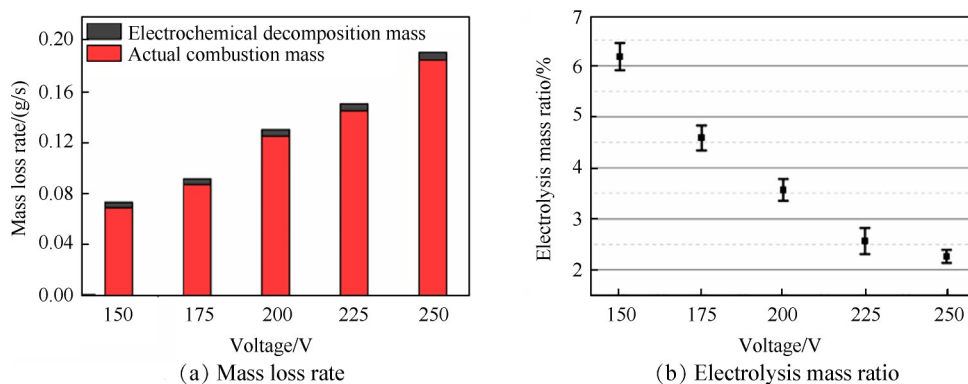


Fig. 5 Mass loss rate and electrolysis mass ratio vs voltage for ECSP

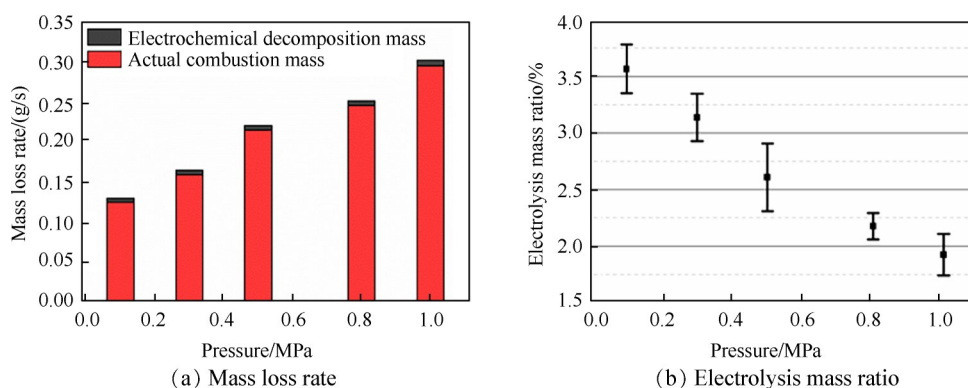


Fig. 6 Mass loss rate and electrolysis mass ratio vs pressure for ECSP

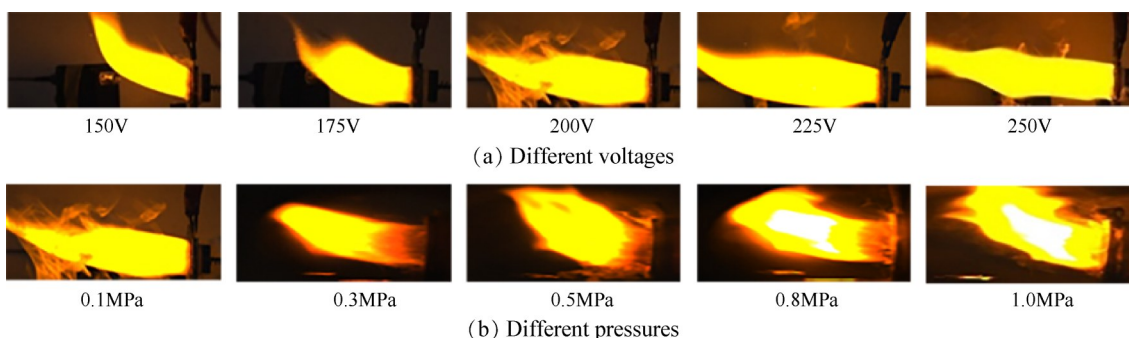
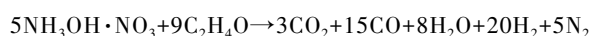


Fig. 7 Combustion state of ECSP under different voltages and pressures

响,推进剂的燃烧火焰长度变短,火焰宽度增加,热量在靠近推进剂燃面处积累,火焰变得更加明亮。

图8中的燃速和质量损失是在电压值为150~250V和压力为0.1~1.0MPa的条件下所测得。从图8可以看出,ECSP的燃速和质量损失随着电压和压力的增加而增加。在0.1MPa下,当电压从150V增加到250V时,燃速从0.241mm/s增加到0.648mm/s,分别增加26.6%,81.3%,111.6%和168.5%;质量损失从242.8 $\mu$ g/J增加到502.5 $\mu$ g/J,分别增加30.8%,59.3%,74.6%和106.9%。在200V下,当压力从0.1MPa增加到1.0MPa时,燃速从0.438mm/s增加到0.899mm/s,分别增加26.1%,54.8%,84.1%和105.3%;质量损失从386.7 $\mu$ g/J增加到1137.2 $\mu$ g/J,分别增加49.5%,101.1%,135.9%和194.1%。这是因为在0.1MPa下,ECSP的燃烧过程受电压控制,其组分氧化剂HAN和黏合剂PVA会发生如下的电解反应<sup>[22]</sup>



增加电压可促进上述电解反应速率的提高,从而推进剂燃速增加。同时该推进剂自身具有电阻,通电后会产生电阻热,提高电压会使得推进剂自身产生的电阻热增加,热量的增加也会增强其燃烧。此外,当施加在ECSP上的电压不变时,压力的增加

可以使得电阻热和推进剂燃烧产生的热量不易向外扩散,促进了推进剂燃烧面上反应物和热量的积累,积累的热量透过推进剂燃面传递到未燃烧区内,未反应区内的推进剂部分发生热分解,则ECSP燃烧变得更剧烈。

除与传统固体推进剂的燃烧过程受热效应影响相同外,ECSP的燃烧过程还受到电效应的作用,其燃烧行为是电、热耦合作用的结果。因为在施加不同电压时,通过推进剂内部的电流也存在变化,则在研究电效应对ECSP燃烧性能影响时也应考虑电流,因此分别对不同功率( $P$ )和压力( $p$ )下的燃速进行拟合,如图10所示。0.1MPa下,ECSP的燃速与功率满足指数关系,为 $r=0.0011P^{0.979}$ 。200V下,ECSP的燃速与压力满足指数关系,为 $r=0.8688p^{0.356}$ 。由图9的结果发现,传统固体推进剂的燃速-压力公式已不再满足ECSP。因此,在ECSP燃烧可控的前提下,在燃速-压力公式的基础上引入功率参数,将ECSP的燃速公式修改为燃速与功率和压力的关系式。通过对大量实验数据进行拟合发现,ECSP的燃速与功率和压力之间满足 $r=m\cdot P^a\cdot p^b$ 关系(如图10),具体为 $r=0.0105P^{0.705}p^{0.251}$ 。其中燃速系数 $m$ 为0.0105,功率指数为0.705,压力指数为0.251,拟合系数 $R^2$ 为0.9845。

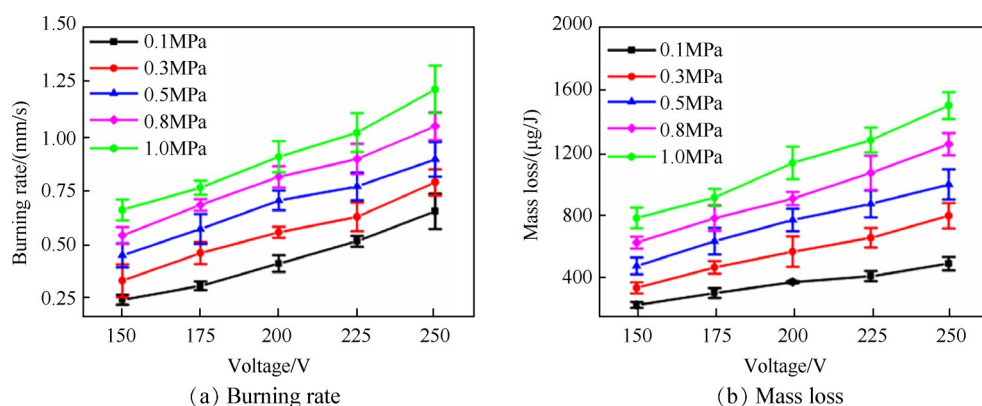


Fig. 8 Burning rate and mass loss vs. voltage for ECSP under different pressures

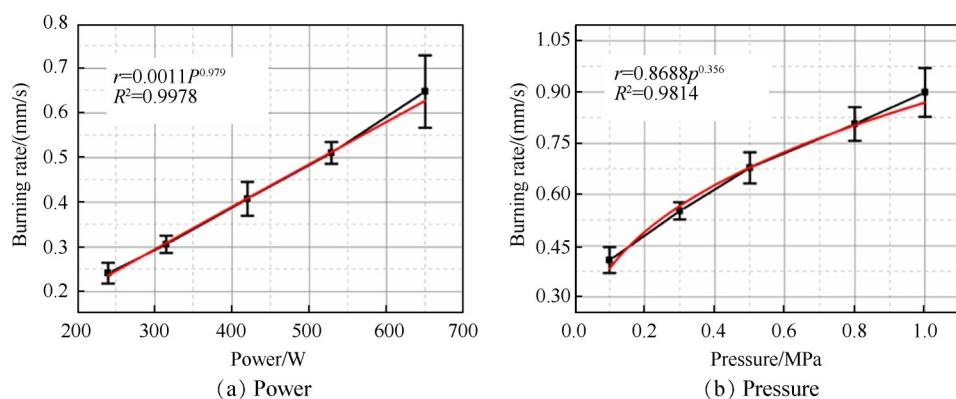


Fig. 9 Fitting curve of burning rate of ECSP under different power and pressures

在电效应对 ECSP 的影响中,同时存在电解和电阻热,通过对比功率指数和压力指数值,可知在 ECSP 可控燃烧范围内,燃速对功率的响应较压力更为敏感。

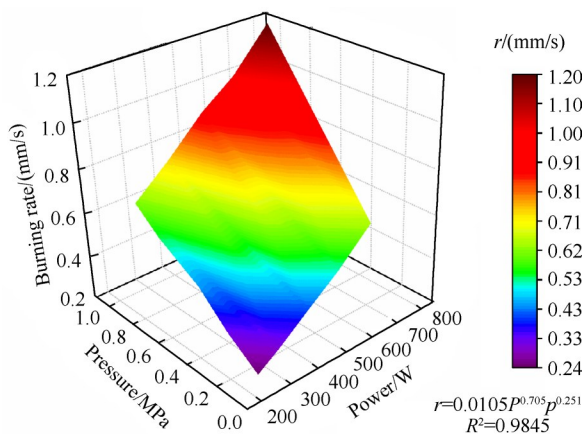


Fig. 10 Burning rate fitting graph of ECSP

## 4 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)在制备 ECSP 过程中,利用真空搅拌和超声震动能有效去除 ECSP 药柱中的气泡,可以确保 ECSP 相关性能测试的准确性和一致性。

(2)随着电压和压力的增加,ECSP 理论电化学分解质量和实际燃烧质量增加,但电解质量占比降低。ECSP 存在燃熄可控的电解质量占比阈值,提高电压不会使推进剂的燃熄可控的电解质量占比低于其阈值;而提高压力会使推进剂的燃熄可控的电解质量占比低于其阈值,造成推进剂的燃烧不可控。说明热分解反应在 ECSP 的燃烧过程中占主导地位。

(3)在 ECSP 可控燃烧范围内,推进剂的燃速和质量损失随着电压和压力的增加而增加。考虑电、热效应对 ECSP 耦合作用影响,其燃速与功率( $P$ )和压力( $p$ )之间关系可拟合为  $r=0.0105P^{0.705}p^{0.251}$ ,拟合系数  $R^2$  可达 0.9845,则燃速对功率的响应较压力更为敏感。

致 谢:感谢中央高校基本科研业务专项和西安近代化学研究所开放合作创新基金的资助。

## 参考文献

[1] 鲍立荣,陈永义,陈苏杭,等. 可控固体推进技术研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(5): 961-973. (BAO Li-rong, CHEN Yong-yi, CHEN Su-hang, et al. Research Progress on Controllable Solid Propulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(5):

961-973.)

- [2] Tahsini A, Farshchi M. Thrust Termination Dynamics of Solid Propellant Rocket Motors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(5): 1141-1143.
- [3] Grix C E, Sawka W N. Family of Modifiable High Performance Electrically Controlled Propellants and Explosives [P]. US: 993084, 2014-11-18.
- [4] Sawka W N, Mcpherson M. Electrical Solid Propellants: A Safe, Micro to Macro Propulsion Technology[C]. San Jose: 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013.
- [5] Nicholas A, Finn E T, Sawka W N, et al. Spinsat Mission Overview[C]. Logan: 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2013.
- [6] Chung K, Rozumov E, Kaminsky D, et al. Development of Electrically Controlled Energetic Materials (ECEM) [J]. *ECS Transactions*, 2013, 50(40): 59-66.
- [7] Zamir I, Grinstein D, Gany A. Testing Electric Effects on the Burning Rate of Ammonium Nitrate-Based Solid Propellants[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2017, 16(1): 39-47.
- [8] Koehler F, Langhenry M, Summers M, et al. Electric Propellant Solid Rocket Motor Thruster Results Enabling Small Satellites[C]. Logan: 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2017.
- [9] 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 Performance of Electrically Controlled Solid Propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2588-2594.)
- [10] He Z C, Xia Z X, Hu J X, et al. Lithium-Perchlorate/Polyvinyl-Alcohol-Based Aluminized Solid Propellants with Adjustable Burning Rate[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, 35(3): 512-519.
- [11] 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.
- [12] Bao L R, Wang H, Zheng T T, et al. Exploring the Influences of Conductive Graphite on Hydroxylammonium Nitrate (HAN)-Based Electrically Controlled Solid Propellant[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(11): 1790-1798.
- [13] Bao L R, Zhang W, Zhang X J, et al. Impact of MW-CNT/Al on the Combustion Behavior of Hydroxyl Ammonium Nitrate (HAN)-Based Electrically Controlled Solid Propellant [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 218: 218-228.
- [14] He Z C, Xia Z X, Hu J X, et al. Thermodynamic Proper-

- ties of Polyvinyl Alcohol Binder of Electrically Controlled Solid Propellant [J]. *Journal of Polymer Research*, 2019, 26(9).
- [15] He Z C, Xia Z X, Hu J X, et al. Thermal Decomposition and Kinetics of Electrically Controlled Solid Propellant Through Thermogravimetric Analysis [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 139 (3) : 2187–2195.
- [16] Hiatt A T, Frederick R A. Laboratory Experimentation and Basic Research Investigating Electric Solid Propellant Electrolytic Characteristics [C]. *Salt Lake City: 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.
- [17] 王新强, 邓康清, 李洪旭, 等. 电控固体推进剂点火技术研究[J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(3): 313–318.
- [18] Glascock M S, Rovey J L, Williams S, et al. Observation of Late-Time Ablation in Electric Solid Propellant Pulsed Microthrusters [C]. *Salt Lake City: 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.
- [19] Glascock M S, Rovey J L, Williams S, et al. Plume Characterization of Electric Solid Propellant Pulsed Microthrusters [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(4): 870–880.
- [20] Glascock M S, Drew P D, Rovey J L, et al. Thermodynamic Properties of Hydroxylammonium Nitrate-Based Electric Solid Propellant Plasma [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2020, 34(3): 522–529.
- [21] Baird J K, Huang S, Frederick R A. Space Charge Limited Conduction and Internal Electric Field in the Polyvinyl Alcohol + Hydroxyl Ammonium Nitrate Solid Propellant [C]. *Cincinnati: 2018 Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [22] Baird J K, Huang S, Frederick R A. Space Charge Limited Conduction in Polyvinyl+Hydroxyl Ammonium Nitrate Solid Propellant [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2020, 36(3): 479–484.

(编辑:梅 瑛)