

文章编号:1006-9941(2025)08-0892-06

## 端面电流密度对硝酸羟胺基电控固体推进剂燃烧性能的影响

刘富涵,鲁浩洋,夏德斌,张健,林凯峰,杨玉林

(哈尔滨工业大学化工与化学学院空间电源国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为了探究端面电流密度对硝酸羟胺基电控固体推进剂(HAN-ECSP)燃烧性能的影响,通过改变 HAN-ECSP 与 Cu 电极的接触面积比调节推进剂一端的端面电流密度,对其分解产气性能、燃烧性能及燃烧启停性能进行研究。结果表明,当推进剂与电极阴极接触的端面电流密度较大时,推进剂的燃烧性能改善显著。然而,过小的有效接触面积会导致局部电流密度过高,可能引发电极损坏。因此,电极阳极和阴极与推进剂的最佳接触面积比为 1:0.4。相较于未更改电极与推进剂的接触面积时,推进剂与电极阴极接触的端面电流密度从  $301 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  增至  $2466 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。通过产气和燃烧性能测试,端面电流密度增大了  $2165 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  后,推进剂的产气总压强提高了 4.8 倍,产气速率提高了 12 倍,点火延迟时间从 3.13 s 降至 0.76 s,质量燃烧速率从  $0.07 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  增至  $0.22 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。并且在此端面电流密度下,推进剂依旧保持了出色的电控启停性能。

**关键词:** 硝酸羟胺基电控固体推进剂(HAN-ECSP);燃烧性能;端面电流密度;燃烧启停性能

中图分类号: Tj55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025057

### 0 引言

随着智能弹药等新型武器对机动性和灵活性的要求提高,传统固体推进剂在重复点火、熄火以及燃烧速率的实时调节方面存在局限<sup>[1]</sup>。2005年,由第一代电控固体推进剂发展而来的以硝酸羟胺(HAN)为主氧化剂的电控固体推进剂(HAN-ECSP)可以通过施加或移除电源来点燃和熄灭推进剂<sup>[2-4]</sup>,这个过程可以重复进行,直到固体推进剂被完全消耗,解决了传统固体推进剂的点火熄火和燃速不可控问题<sup>[5-8]</sup>。此外, HAN-ECSP 对火焰和静电刺激不敏感,具有较高的安全性,适用于制备、运输、使用和储存<sup>[9-12]</sup>。在 HAN-ECSP 的工作体系中,电极用来连通推进剂构成导电回路,并且作为推进剂电分解反应界面以及燃烧端面<sup>[13]</sup>。Wang 等<sup>[14]</sup>研究发现当推进剂一端与电极的

接触面积由  $200 \text{ mm}^2$  降到  $88 \text{ mm}^2$  时,推进剂的临界点火电压从 75 V 降至 55 V。Li<sup>[15]</sup>等发现电压为 200 V 时,粗糙表面的钼电极的点火能量为 16.7 J,比细腻表面的钼电极的点火能量低了 0.9 J。因此,电极和推进剂的接触面积和端面电流密度对推进剂的燃烧性能起着关键作用。

然而对于端面电流密度对推进剂燃烧性能的提升和影响机制仍未得到探讨,同时也没有明确的电极与推进剂的最佳接触面积比。确定适宜的电极和推进剂的接触面积比对于设计适应不同形状推进剂的电极系统具有重要意义,尤其是在未来发动机设计中尤为关键。因此,为了验证端面电流密度对推进剂燃烧性能的影响,明确最佳的电极与推进剂的接触面积比,本研究选用金属铜(Cu)作为电极材料,通过调整推进剂与电极的接触面积比,从而调控推进剂和电极接触的端面电流密度。验证接触面积比和端面电流密度对推进剂燃烧时的分解产气总压强以及产气速率的影响,确定推进剂与电极的最佳接触面积比和端面电流密度,并对其燃烧性能进行测试。此外,为进一步测试高电流密度下推进剂燃烧的可控性,通过电压施加与移除的循环实验验证推进剂在高端面电流密度下的电控启停性能。

收稿日期:2025-04-02;修回日期:2025-05-20

网络出版日期:2025-08-19

基金项目:黑龙江省自然科学基金(YQ2024B004)

作者简介:刘富涵(1994-),女,博士,主要从事含能材料研究。

e-mail:578333958@qq.com

通信联系人:林凯峰(1979-),男,教授,主要从事含能材料研究。

e-mail:linkaifeng@hit.edu.cn

引用本文:刘富涵,鲁浩洋,夏德斌,等.端面电流密度对硝酸羟胺基电控固体推进剂燃烧性能的影响[J].含能材料,2025,33(8):892-897.

LIU Fu-han, LU Hao-yang, XIA De-bin, et al. Effect of Surface Current Density on the Combustion Performance of HAN-ECSP[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(8):892-897.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

铜片(99.5%, 0.2 mm)和铂片(99.9%, 0.2 mm)购自中诺新材料(北京)科技有限公司。 $C_2H_5OH$ (分析纯)、聚乙烯醇(PVA, 优质纯)和硼酸购自西陇科学公司。硝酸铵(AN)、5-氨基四唑(5-AT)、硼酸( $H_2BO_3$ )和盐酸购自伊诺凯。HAN根据文献<sup>[16]</sup>中的溶胀法制备。

仪器:高速摄影仪;电化学工作站(CHI 660D);压力传感器(Omega);稳压稳流电源。

### 1.2 样品和电极制备

HAN-ECSP的制备:将HAN溶液、AN、 $H_2BO_3$ 和5-AT(重量比为20:2:1:5)加入到烧杯中搅拌至充分溶解。然后,在搅拌的状态下将PVA缓慢加入到烧杯中,混合均匀后,将其装入3个10 mL的离心管中,对样品进行振荡以去除气泡,最后在35 °C的烘箱中固化7 d后取出。将推进剂切成长度为8 mm,直径为12.86 mm的圆柱体。

电极的制备:电极材料选用Cu电极,将电极裁成长宽分别为5, 7, 9, 10 mm和20 mm的正方形,依次在乙醇、去离子水和2 mol·L<sup>-1</sup>盐酸溶液中分别超声处理15 min,用无水乙醇洗干净后吹干备用。

### 1.3 测试方法

推进剂端面电流密度的计算:推进剂的端面电流密度是指单位面积上通过的电流。通过稳压稳流电源读取推进剂的端面电流,根据公式(1)计算得到推进剂的端面电流密度。当电极面积大于推进剂的面积时,接触面积为推进剂的横截面积,而当电极面积小于推进剂的面积时,接触面积则为电极的面积。为了便于比较,仅计算推进剂与电极接触面积较小一端的电流密度。

$$J = \frac{I}{S} \quad (1)$$

式中, $J$ 为电流密度, $A \cdot m^{-2}$ ;  $I$ 为通电电流,A;  $S$ 为阳极或者阴极电极与推进剂接触面积, $m^2$ 。

分解产气测试:该系统主要由燃烧室、直流电压源、计算机和压力传感器组成。在测试过程中,推进剂被切成长度为8 mm的固体样品,将电极与推进剂固定在充满Ar的密封容器中,推进剂分解产生的气体压力数据由压力传感器获得,测试电压为210 V。

燃烧测试:燃烧测试在空气环境中进行,通过夹具

保证电极和推进剂之间的紧密接触,有效地固定推进剂。在夹具和电极之间贴上绝缘的云母片,以防止电极或推进剂与金属夹具接触,造成实验误差或短路现象。燃烧测试示意图如图1所示。燃烧前每个推进剂药柱的厚度为8 mm,推进剂的左侧与电极的阴极连接,右侧与电极的阳极连接。首先改变阳极面积,阴极面积不变(与推进剂的接触面积为1.30 cm<sup>2</sup>),使电极阳极端和阴极端的面面积比为0.2:1、0.4:1、0.6:1、0.8:1、1:1,然后再改变阴极面积,阳极面积不动(与推进剂的接触面积为1.30 cm<sup>2</sup>),使电极阳极端和阴极端的面面积比为1:0.2、1:0.4、1:0.6、1:0.8、1:1,点火电压均为210 V。

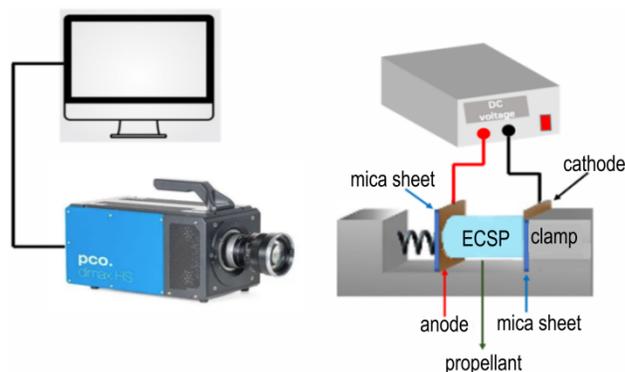


图1 电控固体推进剂燃烧测试示意图

Fig.1 Combustion testing system of ECSP

通过高速摄像机以每秒100张获得推进剂的燃烧图像和点火延迟时间的变化。推进剂的点火延迟时间是初始通电(灯泡亮起时)和推进剂燃烧开始之间的时间差。燃烧的持续时间为推进剂的初始燃烧时间和燃烧停止时间之间的差值。通过称量燃烧前后推进剂的质量,使用公式(2)计算推进剂的质量燃烧速率。

$$v_m = \frac{m_s - m_0}{t_s - t_0} \quad (2)$$

式中, $v_m$ 是推进剂的质量燃烧速率, $g \cdot s^{-1}$ ;  $m_0$ 是推进剂燃烧前的质量,g;  $m_s$ 是推进剂燃烧后的质量,g;  $t_0$ 是推进剂刚开始燃烧的时间,s;  $t_s$ 是推进剂燃烧结束后时间,s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 端面电流密度对推进剂燃烧性能的影响

#### 2.1.1 接触面积比对推进剂电化学和端面电流密度的影响

通过稳压稳流电源测得推进剂初始燃烧时的端面电流,根据公式(1)计算的不同接触面积比下的端面

电流密度结果如图2所示。当阳极与阴极接触面积比从1:1降至0.2:1时,端面电流从0.039 A降至0.026 A(图2a),而端面电流密度则从 $301 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 显著增至 $1052 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ (图2b)。电极阳极和阴极与推进剂的接触面积比为1:0.2时,推进剂的端面电流显著增大到0.098 A,端面电流密度提升了13倍(图2c~d)。结果

表明,阴极接触面积的调整对电流密度的影响显著大于阳极。这归因于阴极作为电子受体,其接触面积减小会大幅提升反应电流,从而促进点火。然而,阴极有效接触面积过小会导致局部电流密度过高,可能引发电极损坏和断路<sup>[17]</sup>。因此,适当的接触面积比可保证推进剂具有足够电分解界面和端面电流密度。

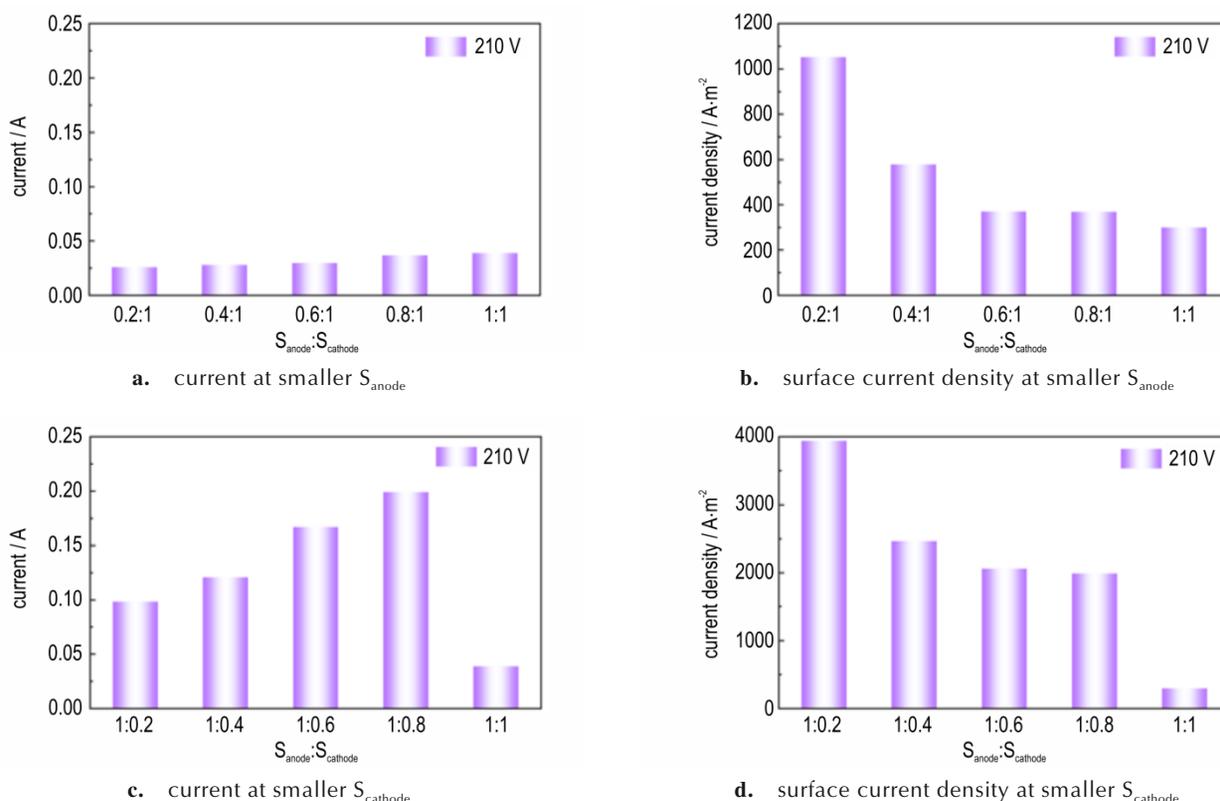


图2 接触面积比不同时推进剂端面电流和电流密度

Fig.2 Current and surface current density of propellant at different contact area ratio

### 2.1.2 端面电流密度对推进剂分解产气的影响

为了探究端面电流密度对推进剂分解产气的影响并确定最佳接触面积比,在密闭容器中对推进剂进行集气测试,分析推进剂端面电流密度不同时分解产气总压强和分解产气的速率,结果如图3所示。在210 V,推进剂的电分解反应和热分解反应都伴随着大量气体的生成和腔体内气体总压强的强烈变化。当阳极的端面电流密度从 $301 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 增大到 $370 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,推进剂分解所产生气体的最大压强从18564 Pa增加至29923 Pa(图3a)。相比之下,阴极端的端面电流密度的变化对推进剂分解产生的气体压强影响更显著。当阴极端面电流增大到 $2466 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ ,气体总压强达到了89105 Pa(图3b),推进剂的产气速率同样达到最大值,为 $22276 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3c)。高的气体压强意味着气体分子在有限空间内的碰撞频率显著增加,这不

仅加速了推进剂分解反应的速率,还促使更多的燃烧产物产生,从而提高了推进剂的燃烧效率和稳定性。然而,当阴极端面电流密度进一步增大到 $3939 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ ,推进剂分解产气的总压强却出现下降趋势,气体生成的速率也受到了抑制。这是由于过小的有效面积导致局部过热,进而影响推进剂的分解均匀性,并可能导致不完全反应的发生。因此,当电极阳极端与阴极端的面积比为1:0.4,阴极端面电流达到 $2466 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,推进剂分解产气的气体总压强达到了最大值,并且产气速率也最快。

综上所述,端面电流密度对推进剂分解反应的速率和稳定性具有关键性的影响。合理的端面电流密度设计不仅能够有效提高推进剂的气体生成速率,还能确保电极的长期稳定性,从而优化推进剂系统的整体运行性能。

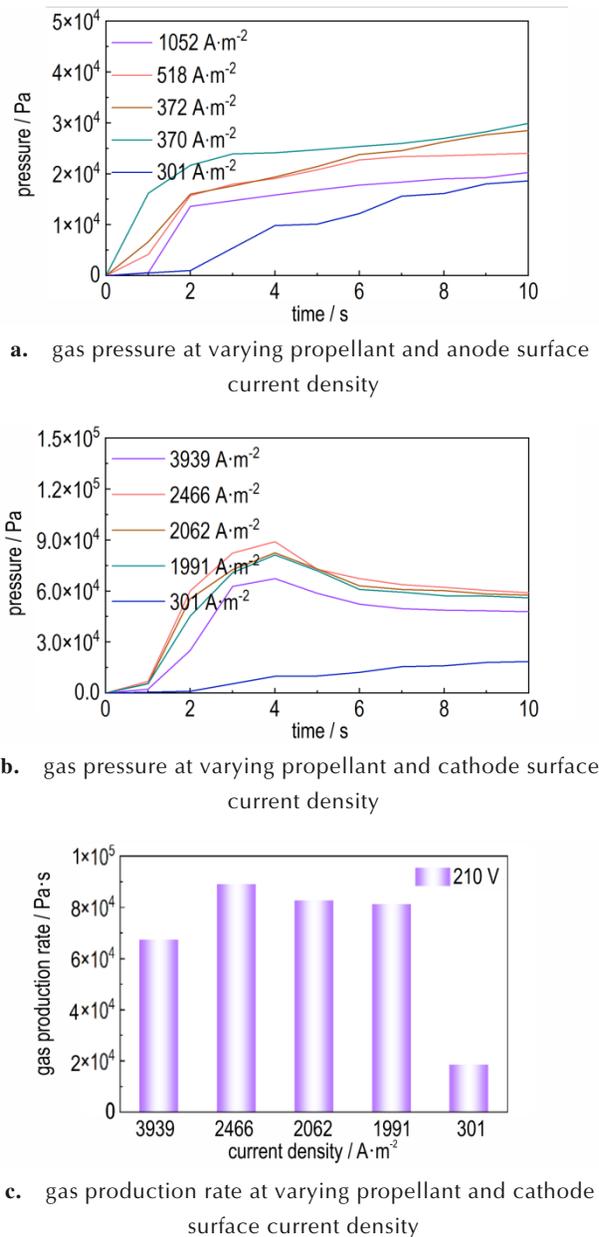


图3 端面电流密度不同时推进剂的产气总压强和气体生成速率

Fig.3 Total gas pressure and gas production rate of propellant at different surface current densities

### 2.1.3 端面电流密度对推进剂燃烧性能的影响

基于 210 V 电压下推进剂分解产生的气体总压强与产气速率的研究,确定了当电极阳极与阴极的面积比为 1:0.4,阴极接触面电流密度达到 2466 A·m<sup>-2</sup>时,推进剂的分解性能最优。为验证此优化条件下推进剂的燃烧性能是否相应提升,对其进行了燃烧性能测试,结果如图 4 所示。与阴极接触面电流密度为 301 A·m<sup>-2</sup>相比(图 4b),在 2466 A·m<sup>-2</sup>条件下,推进剂的点火延迟时间缩短至 0.76 s,质量燃烧速率提升至 0.22 g·s<sup>-1</sup>。

此外,使用面积比为 1:1 的 Cu 电极时,点火通常优先发生在与电极阳极接触的推进剂端。这是由于燃烧过程中,阳极接触区域的推进剂分子发生氧化反应,阳极处快速的氧化反应不仅加剧了局部的热量释放,也促进了更多热能向推进剂的传递,从而更易引发推进剂的分解或燃烧<sup>[15]</sup>。然而,当增大阴极接触面的电流密度至 2466 A·m<sup>-2</sup>后,点火优先位置转移至阴极接触端。这一现象表明,推进剂倾向于在电流密度更高的电极接触端起始燃烧。因此,通过调控电极两端的面积比,可以有效地控制推进剂燃烧的起始端面,以适应不同的点火环境需求。结合推进剂分解产气性能测试结果可知,提升阴极接触面的电流密度可以大幅提升了推进剂的产气总压强和产气速率,从而显著改善推进剂的燃烧状态和质量燃烧速率,降低了点火延迟时间。因此,将 Cu 电极阳极与阴极与推进剂的接触面积比调整为 1:0.4,使阴极接触面电流密度达到 2466 A·m<sup>-2</sup>,是优化推进剂燃烧性能的有效策略。

### 2.2 HAN-ECSP 的电控启停性能

本研究确认了当电极阳极端与阴极端的面积比为 1:0.4 时,推进剂与电极阴极端接触的端面电流密度为 2466 A·m<sup>-2</sup>,分解产气和燃烧性能最优异。为了验证推进剂在此电极配置和高电流密度下是否能够保持对电压的响应性和可控的燃烧行为,在室温与大气压条件下开展了电控启停实验。多次启停特性是 HAN-ECSP 的核心性能之一,使其能够在多次点火和熄灭循环中维持稳定、可控的燃烧行为,该特性由电压的施加和去除来调节推进剂的燃烧和熄灭。在推进剂开始稳定燃烧后断电,采用断电 0.2 s,通电 0.2 s 的程序进行电控启停测试,共重复 3 次。由于手动操作直流电源,所以时间控制存在一定偏差。测试结果如图 5 所示。研究表明,在 210 V 的电压下,使用该电极配置时推进剂均表现出对电压的快速且可调的响应。首次通电后,推进剂于 0.74 s 内从与电极阴极端面的一侧开始燃烧,在 0.94 s 进入稳定燃烧状态。断电后,推进剂火焰在 0.01 s 内完全熄灭,显示出极强的快速熄火能力。随后在 1.28 s 进行第二次通电,推进剂在 0.01 s 内再次恢复燃烧。推进剂在优化电极配置和端面电流密度下三次启停操作均表现出优异的点火重复性与燃烧可靠性,这样的电极配置能够在缩短推进剂点火延迟的同时,保证了推进剂出色的电控性能,保证了推进剂在未来高精度姿轨控制和小型航天器自主推进系统等应用中的高效率 and 灵活性。

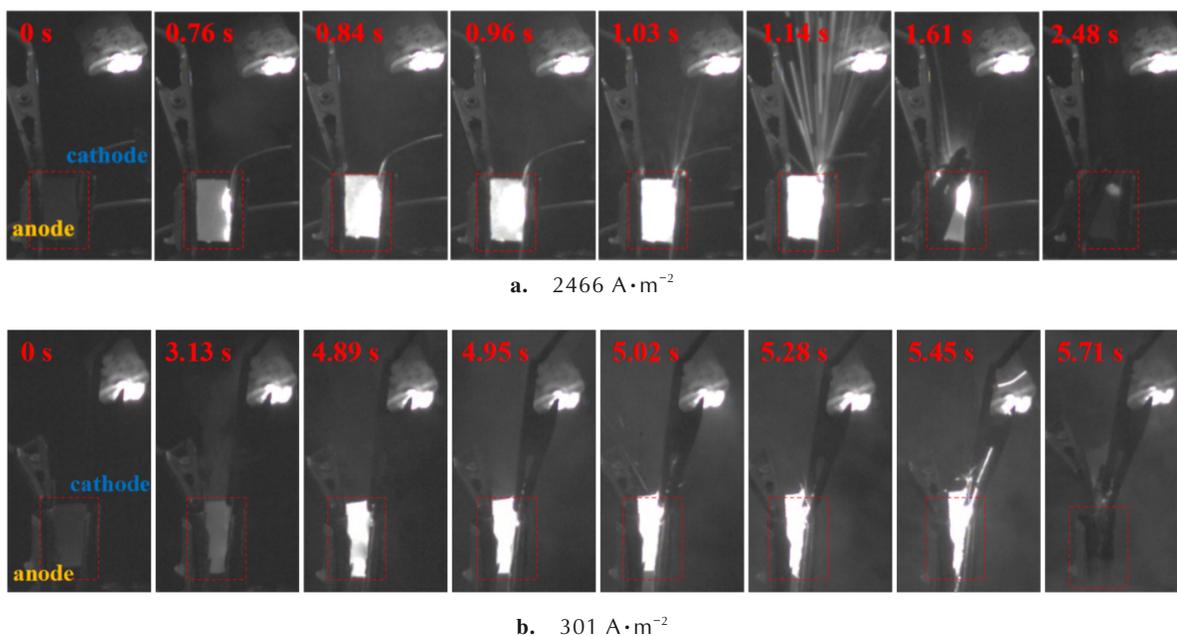


图4 推进剂与电极阴极接触端的端面电流密度不同时推进剂的燃烧过程图像

Fig.4 Combustion process images of different propellants and cathode surface current densities

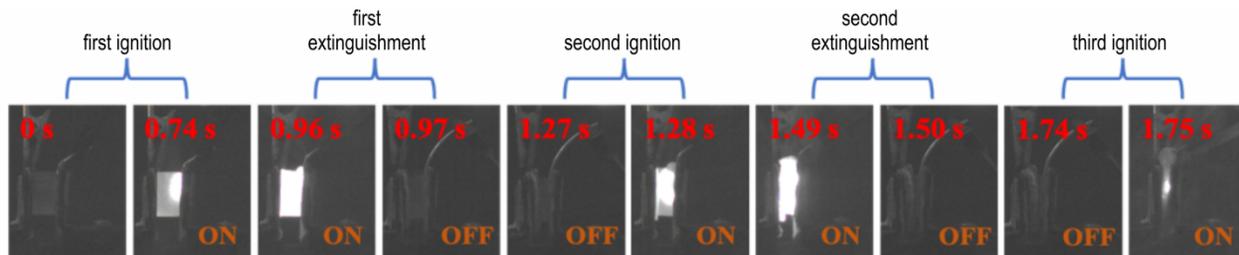


图5 HAN-ECSP的电控启停性能

Fig.5 Repeated on-off combustion performance of HAN-ECSP

### 3 结论

本研究通过改变Cu电极与推进剂的接触面积比调节推进剂的端面电流密度,研究了HAN-ECSP推进剂的燃烧性能与端面电流密度的关系,得到如下结论:

(1)电极与推进剂的接触面积显著影响推进剂的端面电流密度。当电极阳极和阴极与推进剂的接触面积比为1:0.4时,推进剂与电极阴极端接触的端面电流达到了 $2466 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(2)当推进剂与电极阴极端接触的端面电流密度较大时推进剂的分解产气速率显著加快,气体总压强也明显高于改变电极阳极面积时的分解产气总压强。当阴极端面电流密度为 $2466 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,推进剂分解产气的总压强和速率最大,达到 $89105 \text{ Pa}$ ,产气速率为 $22276 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3)相较于端面电流密度为 $301 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ ,当推进剂与电极阴极接触的端面电流密度为 $2466 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,推

进剂的点火延迟时间缩短了 $2.37 \text{ s}$ ,质量燃烧速率提高了 $0.15 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外,推进剂优先在电极接触面积较小的一端,即端面电流密度更大的一端开始燃烧。由此可见,通过调节推进剂两端的端面电流密度,可以有效控制点火端,以适应不同的点火需求和工作环境。

(4)推进剂在优化电极配置和端面电流密度下保留了出色的电控启停性能,可以实现三次启停操作,每次启停均保证了优异的点火重复性与燃烧可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 刘鹤欣,赵凤起,秦钊,等. 固体含能材料点火引燃技术研究进展[J]. 火炸药学报,2023, 46(8): 669-687.  
LIU He-xin, ZHAO Feng-qi, QI Zhao, et al. Research progress on ignition technologies of solid energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2023, 46(8): 669-687.
- [2] WANG B, LIU F, NAI H, et al. Electrocatalytic oxidation for hydroxyl radicals generation: Exploring the role of an electrode-induced interphase on electronically controlled solid

- propellants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 504: 158977.
- [3] GONG L, ZHOU X, GUO Y, et al. Combustion of composite propargyl-terminated copolyether propellant containing ammonium dinitramide [J]. *Combustion Science and Technology*, 2020, 192(9): 1707–1718.
- [4] 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.
- [5] MA X, JIN S, XIE W, et al. A novel green electrically controlled solid propellant with good electrical response and high energy performance [J]. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 2022, 641: 128550.
- [6] LI Y, XIA Z, HU J, et al. Experimental investigation of the ignition and combustion characteristics of electrically controlled solid propellant [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 184: 167–179.
- [7] LI F, WANG Z, ZHANG Q, et al. Tuning combustion and energy in hydroxylammonium nitrate (HAN)-based electrically controlled solid propellant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 487: 150562.
- [8] 李洋, 夏智勋, 马立坤, 等. 电控固体推进剂的点火、燃烧及熄灭特性研究进展[J]. *含能材料*, 2023, 31(9): 931–948.  
LI Yang, XIA Zhi-xun, MA Li-kun, et al. Research progress on ignition, combustion and extinction characteristics of electrically controlled solid propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(9): 931–948.
- [9] LIU F, GUO H, ZHANG J, et al. The electrochemical and combustion properties of HAN-ECSP using  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$  electrode [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2024, e202400164.
- [10] 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.
- [11] AMROUSSE R, KATSUMI T, AZUMA N, et al. Hydroxylammonium nitrate (HAN)-based green propellant as alternative energy resource for potential hydrazine substitution: From lab scale to pilot plant scale-up [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 334–348.
- [12] BAO L, ZHANG W, ZHANG X, et al. Impact of MWCNT/Al on the combustion behavior of hydroxyl ammonium nitrate (HAN)-based electrically controlled solid propellant [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 218: 218–228.
- [13] PARK K, KIM T. Experimental studies on effects of electrode material and voltage on electrolytic decomposition of Hydroxylammonium nitrate solution [J]. *Acta Astronautica*, 2024, 216: 8.
- [14] 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.  
WANG Xin-qiang, DENG Kang-qing, LI Hong-xu, et al. Experimental investigation of electrically stimulated ignition characteristics of electric solid propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(3): 313–318.
- [15] LI C, WANG Z, LI L, et al. Enhancement effect of Mo electrodes on the ignition characteristics of HAN-based gel propellant fuel and its combustion mechanisms [J]. *Fuel*, 2025: 374, 132421–132431.
- [16] THOMAS L. Hydroxylammonium nitrate process [P], US: 5182092, 1993.
- [17] SAMAT A A, JAIS A A, SOMALU M R, et al. Electrical and electrochemical characteristics of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3.8}$  cathode materials synthesized by a modified citrate-EDTA sol-gel method assisted with activated carbon for proton-conducting solid oxide fuel cell application [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2018, 86: 617–630.

## Effect of Surface Current Density on the Combustion Performance of HAN-ECSP

LIU Fu-han, LU Hao-yang, XIA De-bin, ZHANG Jian, LIN Kai-feng, YANG Yu-lin

(State Key Laboratory of Space Power-Sources, School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** To investigate the effect of surface current density on the combustion performance of hydrazine nitrate-based electrically controlled solid propellant (HAN-ECSP), the contact area ratio between HAN-ECSP and Cu electrode was adjusted to regulate the surface current density of propellant. Decomposition, combustion and repeated on-off combustion performances were studied using gas collection and combustion test. The results indicate that the combustion performance of propellant is improved significantly as the increase of surface current density between the cathode and propellant. However, too small effective contact area could lead to excessive local current density, potentially causing the damage of electrode. Hence, the optimal contact area ratio between anode and cathode is 1:0.4. Compared to unchanging the contact area between electrode and propellant, the surface current density rises from 301 to 2466  $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ . The results of gas decomposition pressure test and combustion indicate that the total gas pressure increases by 4.8 times, gas generation rate increases by 12 times, ignition delay time of propellant decreases from 3.13 to 0.76 s and mass combustion rate increases from 0.07 to 0.22  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ , when the surface current density rises 2165  $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ . Moreover, the propellant still maintains excellent repeated on-off combustion performance at this surface current density.

**Key words:** HAN-ECSP; combustion performance; surface current density; repeated on-off combustion performance

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025057

**Grant support:** Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (No. YQ2024B004)

(责编:姜梅)