

文章编号:1006-9941(2023)09-0931-18

电控固体推进剂的点火、燃烧及熄灭特性研究进展

李洋,夏智勋,马立坤,那旭东,冯运超

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 电控固体推进剂(electrically controlled solid propellant, ECSP)具有多次点火和燃速可控的特性,可广泛应用于从微观到宏观的推进系统。本文总结了国内外以硝酸铵、硝酸羟胺和高氯酸盐为氧化剂的ECSP的研究概况,重点综述了硝酸羟胺基ECSP和高氯酸盐基ECSP点火、燃烧及熄灭特性的研究进展,分析了电压、压强以及金属添加剂对ECSP燃速调节的影响规律,并讨论了电能ECSP点火和燃烧过程的作用机制。同时为未来深入研究ECSP点火、燃烧及熄灭机理提出参考建议:开展ECSP固相和气相化学反应机理研究,建立点火、燃烧及熄灭模型和反应机理框架;系统研究电极排布和电极构型对ECSP燃烧效率的影响以及ECSP配方与导电性能之间的关系,寻求改善电极和推进剂界面电阻的方法。优选高性能ECSP配方,完善ECSP燃烧反应机理及燃速调节机制,提高ECSP压强阈值,是电控固体火箭发动机设计、应用和性能调控的关键。

关键词: 电控固体推进剂;点火特性;燃烧性能;硝酸羟胺基;高氯酸盐基;燃速调节

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023018

0 引言

导弹的突防与拦截是近年来研究的热点,随着导弹武器装备向高机动、快速突防方向的发展,要求导弹发动机具备多次启动和推力可调能力^[1-2]。液体火箭发动机虽然可实现多次点火,但结构复杂、推进剂不易储存、难以维护,且安全性差,不满足快速响应作战需求^[3]。高可靠性、结构简单、推进剂可长期储存的固体火箭发动机和火箭冲压发动机更适合用作导弹武器发动机,然而难以实现多次点火,并且推力不可控,严重限制了导弹武器的飞行机动性能^[4-6]。电控固体推进剂(electrically controlled solid propellant, ECSP)具有通电点火、断电熄灭,通过调节电压可实现燃速调控的特点。ECSP的整个工作过程(包括点火、熄灭以及燃速调节等)可以在外部电能的干预下实现主动控制,

其工作原理是:施加适当的点火电压,推进剂起火、持续燃烧直到电源断开,且随着电压的增加,推进剂燃速增加。ECSP特性的实现主要取决于推进剂的配方和电能的输入、撤除以及调节,还与药柱构型、喷管设计、电极设计以及电源控制等相关^[7-10]。将ECSP应用于导弹的姿轨控制动力系统中,可在保留固体火箭发动机优势的基础上,实现多次点、熄火和推力宽域调节,极大地满足了导弹武器系统响应快、智能化的发展需求,大幅提升导弹的快速机动能力和远程精准打击能力,使得ECSP在军事领域具有广泛的应用前景^[11]。

电控固体火箭发动机的重复启动和推力可调要求ECSP必须能在一定压强范围内下实现多次点火、燃速可调和熄灭可控。因此,了解和掌握ECSP的电能工作机制、点火和燃烧机理及熄灭性能对推进剂电控点火燃烧性能的实现具有重要意义。聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)作为ECSP常用的黏合剂,赋予了推进剂良好的粘弹性能和提供了离子迁移的良好通道,其热解产物和热分解机理的研究为建立ECSP的点火燃烧模型提供动力学参数。由于ECSP大部分电能用于克服离子迁移过程的阻力,因此点火燃烧过程中存在高电能消耗,高点火电压等问题。研究影响ECSP的导电性能的因素,掌握电能对推进剂点火过程中的作用

收稿日期:2023-02-10;修回日期:2023-03-31

网络出版日期:2023-09-01

基金项目:装备预研重点实验室基金项目(6142701200102);湖南省自然科学基金(2020JJ4665)

作者简介:李洋(1991-),女,博士研究生,从事电控固体推进剂点火及燃烧机理研究。e-mail:liyong0569@163.com

通信联系人:夏智勋(1961-),教授,主要从事固体火箭冲压发动机和固体超燃冲压发动机研究。e-mail:zxia@nudt.edu.cn

引用本文: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.

机制,是提高 ECSP 的电导率、降低推进剂电能损耗、获得高性能 ECSP 配方的重要途径,也为建立 ECSP 点火模型提供依据。采用仿真建模的手段有助于了解 ECSP 的物理化学演变过程与电能的热效应、电化学反应之间关系,为寻求降低 ECSP 点火延迟时间、提高燃烧速率的方法以及指导配方设计提供思路。国外于 1996 年开始研发 ECSP, Katakian 公司研发了以硝酸铵(ammonium nitrate, AN)为主氧化剂的第一代熄灭可控固体推剂^[13]。其最大比冲为 230 s,大气压下燃速为 1.016~1.27 mm·s⁻¹。然而,其点火延迟时间较长、能损耗率高、安全性能差,限制了该种推进剂的应用和发展。2005 年,由第一代熄灭可控固体推剂进一步发展而来的以硝酸羟胺(hydroxy lammonium nitrate, HAN)为主氧化剂的第二代电控推进剂^[14-15](higher performance electric propellant, HIPEP),其真空比冲高、响应时间短,进一步推动了 ECSP 的发展^[16-17]。目前美国 DSSP 公司已形成了较为完善的 ECSP 配方体系,研制了 3~100 mm,推力为 5 mN~1200 N ECSP 火箭发动机,并进行飞行试验验证。虽然以 HAN 为氧化剂的推进剂是目前国内外 ECSP 研究的主流^[18],并且在姿态控制系统和空间推进剂点火系统均得到了一定应用^[19-20],但是由于 HAN 热稳定性较差(热分解温度为 100 °C 左右),并且长期储存时易分解,使其电控性能适应压强范围较窄^[21]。国内从 2014 年开始开展 HAN 基 ECSP 相关研究,主要涉及 HAN 基 ECSP 理化性能^[22]、点火燃烧现象以及燃速特性研究^[23-25],目前已初步实现 HAN 基 ECSP 的多次点、熄火和燃速调节。

针对 HAN 热分解温度低、高压熄灭性能差等缺点,国内外科研单位研制出了以高氯酸盐为氧化剂的 ECSP。2010 年, Raytheon 公司采用 3D 打印技术制备出了高氯酸盐基 ECSP。该推进剂能够实现在 1.4~14 MPa 的宽压力范围内的电控燃烧^[26]。2015 年以来,国防科技大学^[27-28]以高氯酸锂(lithium perchlorate, LP)为氧化剂, PVA 为黏合剂制备的 ECSP,在 0.1~1.8 MPa 压力条件下实现了推进剂多次重复点火。2018 年,重庆大学^[29-30]通过 ECSP 的热分解和通电/激光点火等试验对推进剂点火燃烧过程进行了初步分析。此外,研究人员基于 LP/PVA 基 ECSP 热分解^[31]的认识,获得了化学动力学参数,进行了 ECSP 端面的电流密度分布仿真计算和发动机原理样机验证试验,提出了提高 ECSP 燃烧喷射效率的方法^[23,32]。然而对于以高氯酸盐为氧化剂的 ECSP 存在的固相残渣容易堵塞喷管、理论比冲低

等问题,还需进一步开展研究。此外,研究人员尝试其他氧化剂作为 ECSP 的主成分,如二硝基酰胺铵(ammonium dinitroamide, ADN)^[33],通过研究该配方体系的点火、燃烧及熄灭特性,为提高 ECSP 的综合性能和扩大其应用范围提供重要的科学指导。由于 ECSP 的物理化学演变过程与外加电能的热效应、电化学反应高度耦合,为实现 ECSP 的可靠点火与可控燃烧,需要明晰 ECSP 的点火和燃烧机理,掌握不同点火燃烧阶段下电能的工作机制,同时对电极材料、电极构型、电极间距等进行甄选和优化。为寻求降低 ECSP 点火延迟时间和提高燃烧速率的方法、改善 ECSP 的燃烧性能以及指导配方设计提供思路。本文综述了 ECSP 国内外研究进展,梳理了典型的 ECSP 配方,重点归纳了 HAN 基和高氯酸盐基配方体系点火、燃烧以及熄灭特性,为 ECSP 及基于 ECSP 的推进系统发展指明了 ECSP 未来需重点攻关的关键技术。

1 HAN 基 ECSP 点火、燃烧及熄灭特性研究

1.1 典型的 HAN 基 ECSP 配方

HAN 本身具有强吸湿性,其晶体在空气中暴露会很快吸水变成液体,以其为氧化剂制备得到的 ECSP 暴露在空气中也易出现吸水变潮现象。HAN 作为第二代 ECSP 的氧化剂主要组分,主要有 3 种配方体系^[34]: 非金属基 ECSP、铝基 ECSP 和硼基 ECSP。研究人员以 HAN 水溶液为主要氧化剂,添加高分子黏合剂(如聚乙烯醇、羧甲基纤维素钠盐等)形成 HAN 基体,引入可相容的燃料(如硼粉、铝粉等),制备 HAN 基 ECSP。典型的 HAN 基电控配方组成列于表 1。

表 1 典型 HAN 基 ECSP 配方^[15]

Table 1 Typical HAN-based ECSP formula composition^[15]

components	mass percent / %
HAN	56.09
paraoxidant	2.88
stabilizer	2.49
ballistic modifier	5.50
aluminium powder	20.00
water	0.94
adhesive	12.10

1.2 HAN 基 ECSP 点火特性

HAN 作为 ECSP 的主氧化剂,其液态形式在电能作用下的点火燃烧性能为 HAN 基 ECSP 点火燃烧机理的研究提供理论依据和数据支撑,因此研究者首先开

展了一系列 HAN 液体推进剂电点火特性研究,主要包括点火装置结构、电极材料、电极极性、电极比表面积等影响因素。同时开展了电流、电压、体积和初始温度对 HAN 液体推进剂点火延迟的影响,获得了电能对 HAN 基液体推进剂中的作用机制。如:Klingenberg 等^[34]开展 HAN 基液体推进剂点火试验,发现纯电加热及电化学转化本身不足以通过初级分解产物实现点火,而是需要反应中间产物的参与。Koh 等^[35]认为,电极材料反应活性是影响 HAN 水溶液电解过程的关键因素,如铜电极和铝电极在分解 HAN 溶液方面均优于惰性电极。Kuo^[36]研究 HAN 基液体推进剂的电解分解特性发现:低温下以电解为主,主要产物为 N_2O 和 CH_3ONO 。Hua 等^[37]对 HAN 基液体推进剂的电解与点火过程的主要影响参数及机理开展了相关研究。结果表明,与热分解过程相比,电流显著增强了 HAN 的分解。他们还发现电解产生的氢气和氧气可能有助于 HAN 基单组元推进剂的后续点火和燃烧过程。Khare 等^[38]对 HAN 液态推进剂的热分解、电解和点火进行

了理论和试验研究,分析结果表明:电流的存在显著降低了点火延迟。上述关于 HAN 液体推进剂电能作用下的试验的研究方法和结果,对于后续开展固体 HAN 基 ECSP 电化学分解机理的研究提供技术支撑和理论指导。

Sawka 等^[39]以 HAN 溶液为氧化剂采用室温法制备 HIPEP 作为推进剂,采用 6.35 mm 和 3.175 mm 直径的圆柱同轴微型推力器(图 1a),酚醛树脂作为电极表面的绝缘层。试验发现:2 种尺寸的推进剂均能实现多次点火,如图 1b 和 1c 所示,且点火发生于中心电极附近。同时发现点火时间过长,容易导致 HAN 基 ECSP 阴燃。同轴装药方式使得 ECSP 的点、熄火依赖电极表面绝缘层来实现,且 ECSP 的燃速受绝缘层的材料、厚度和燃速影响。因此,绝缘层与推进剂的良好匹配性是轴向电极装药方式实现端面纵向燃烧的关键。

Hiatt 等^[40]采用如图 2a 的试验装置,研究了常压条件下 HAN 基 ECSP 样品的热和电响应。结果表明:面积比相同下,阳极优先发生点火(图 2b 和 2c)。对于不同尺寸的电极对(1:3 和 4:1 的面积比),较小的

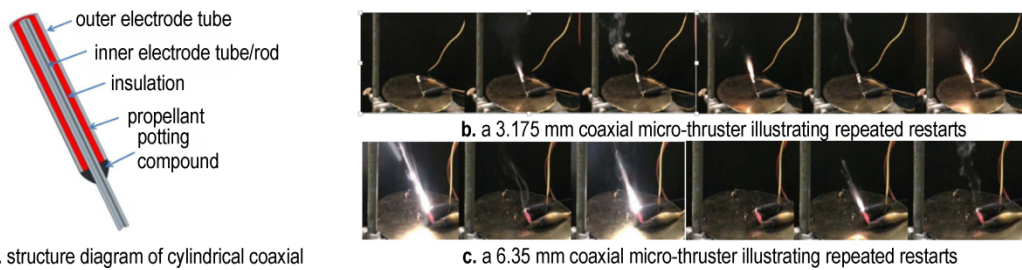


图 1 同轴微型推进器多次启动试验图^[39]

Fig.1 The coaxial micro-thruster illustrating repeated^[39]

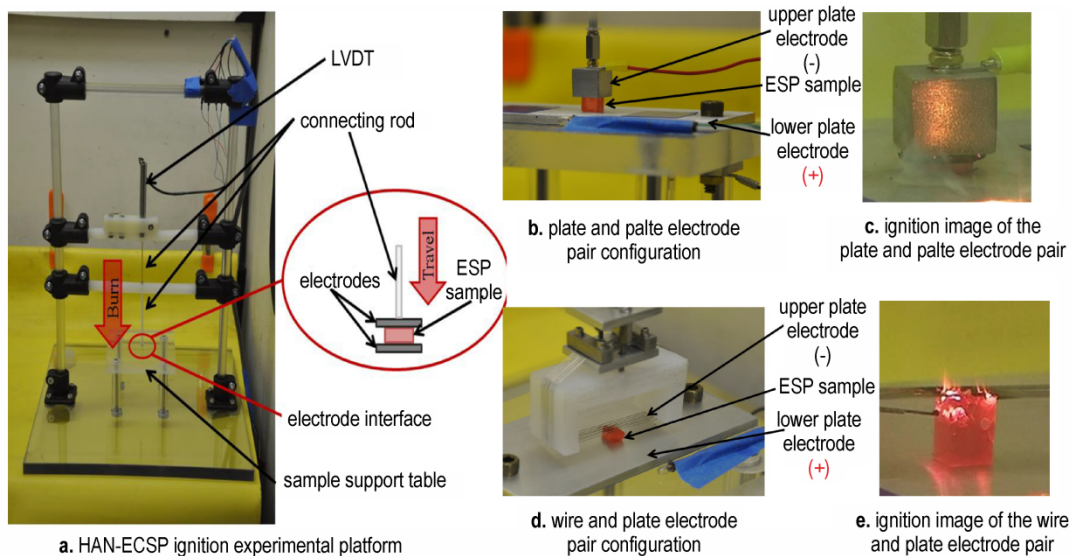
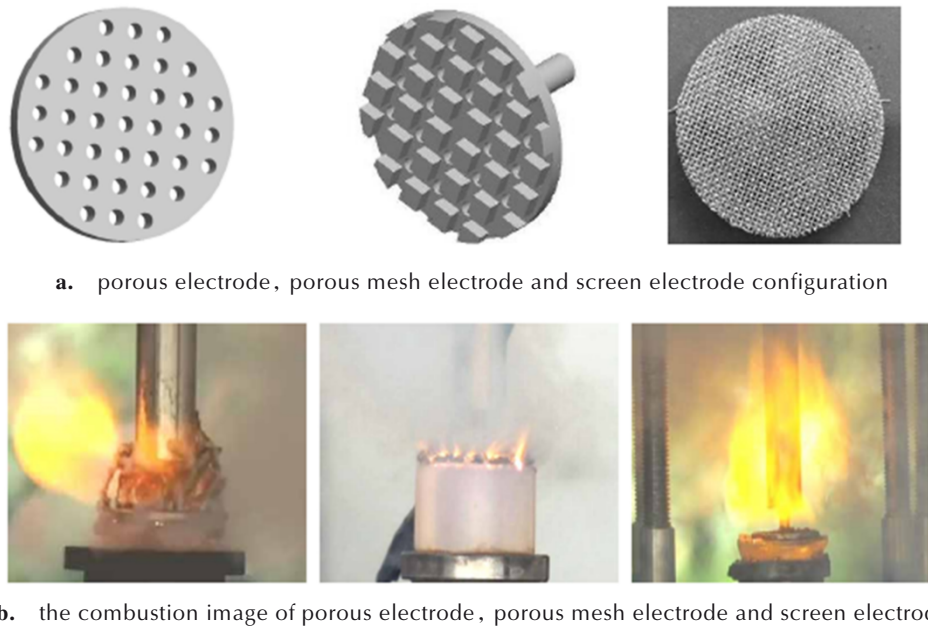


图 2 HAN 基 ESP 试验装置实物图^[40]

Fig.2 Experimental device of HAN based ESP^[40]

电极上优先发生点火(图 2d 和 2e)。与 Hiatt 同组的 Baird^[41]采用图 2b 的板状电极研究 HAN 基 ECSP (HAN/PVA)的电解燃烧过程,也观察到相同的现象。王新强等^[42]设计了 3 种不同形状的燃面端电极(图 3),通过控制电压实现了 HAN 基 ECSP 的多次点/熄火循环。试验结果表明:使用筛网状电极 ECSP 的燃烧效果最佳;采用不同材料的电极优先点火顺序为钛铝、石墨、铜;固定电极材料,电流密度一定时,ECSP 在阳极优先点火;固定电极材料和电极极性时,在电流密度较大电极端的 ECSP 优先点火,且电流密度越大,点火效果越

好。以上结果表明: HAN 基 ECSP 的点火次序与电极材料、电极极性和电流密度(电极面积)有关,且电流密度相同的条件下, HAN 基 ECSP 优先在正极点火。此外,采用板状电极和端面电极结构无需使用绝缘层,但是推进剂的燃速受推进剂接入回路中厚度的限制, ECSP 接入通电回路中的厚度越大,所需点火电压越高,且伴随燃烧推进剂的质量消耗,接入回路中的推进剂厚度发生变化,为适应推进剂的尺寸及性能的动态变化,外接电源及点火装置需要实时做出相应的变化。因此,采用上述的电极结构难以精准控制 HAN 基 ECSP 的燃速。



a. porous electrode, porous mesh electrode and screen electrode configuration



b. the combustion image of porous electrode, porous mesh electrode and screen electrode

图 3 3 种 HAN 基 ECSP 燃面端电极装置及点火燃烧试验图^[42]

Fig.3 The end electrode devices, ignition and combustion test diagrams of three types of HAN based ECSP^[42]

绝缘层和推进剂燃速的匹配困难使得采用同轴电极结构的 ECSP 燃烧可控性降低,而随推进剂燃烧,需要改变电压来调节燃速,使得采用端面电极结构的 ECSP 控制变得更为复杂。鉴于以上不足,全瑞杰等^[43]设计了一种正负交错螺旋型单端面电极结构。该电极构型的 2 个电极均在燃烧侧,保证分解只发生在药柱的一端,启动电压仅与电极之间的距离有关,不受 ECSP 药柱的直径、厚度影响。通过试验发现,设计的电控固体火箭发动机能够在 2 MPa 的压强下实现重复启动,并且随启动次数增加,启动时间逐渐缩短。但是这种正负交错螺旋型单端面电极结构对电极材料的耐烧蚀性能要求很高,长期受高温烧蚀的电极面容易发生形变,导致与推进剂燃面接触不均,使得推进剂燃烧不均匀,进而影响发动机性能。

鲍立荣等^[44-45]研究不同电压、初始温度、压力条件下的 HAN 基 ECSP 的点火特性。试验发现随着电压、初始温度、压力的增加, HAN 基 ECSP 的点火延迟时间、点火能量、电解质量比均减小。同时点火延迟时间、点火能量随点火次数的增加而减小,当点火次数 > 3 次后,点火延迟时间、点火能量基本不再随点火次数的增加而发生变化。采用 Raman 光谱对比有无电压刺激下的光谱图,发现:在电压刺激下 HAN 基 ECSP 发生电化学分解反应,随着电阻热的积累, HAN 中的 N—OH 和 NO₃⁻与 PVA 中的 C—H 反应形成混合物,从而点燃推进剂,即电化学分解产生的可燃物与电阻热的耦合导致了 ECSP 的点火^[44],如图 4 所示。通过上述研究获得 HAN 基 ECSP 潜在的点火机理,但目前尚未明确 HAN 基 ECSP 的电解产物和热解产物对 ECSP

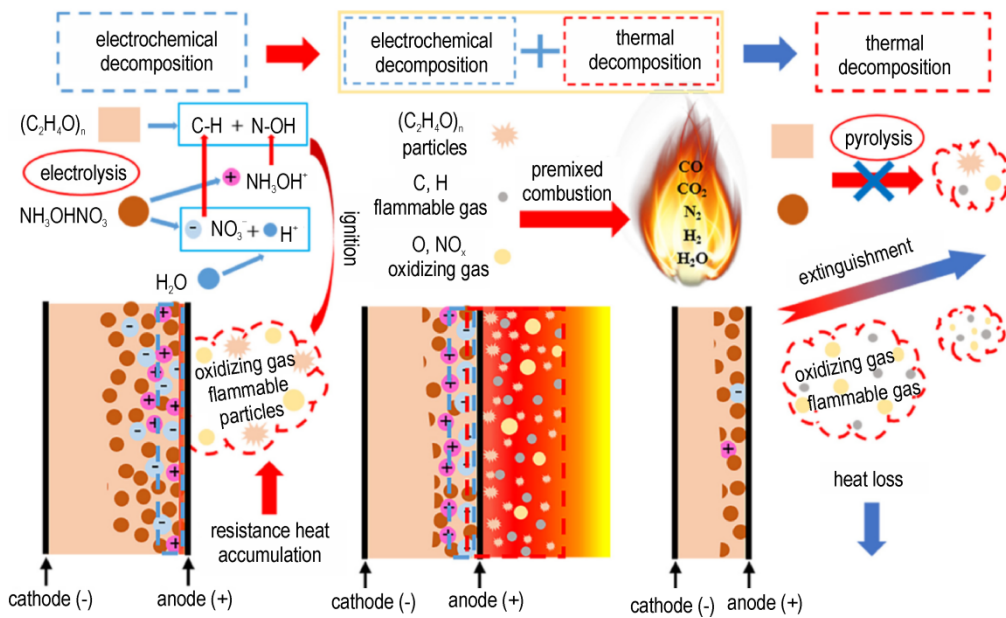


图4 ECSP点火、燃烧和熄灭过程示意图^[44]

Fig.4 Schematic diagram of ECSP ignition, combustion and extinguishment process^[44]

点火的影响,这是由于电解反应和热解反应耦合,难以在点火过程区分两者产物。后续研究可以采用数值仿真计算手段,获得HAN基ECSP点火机理。

1.3 HAN基ECSP燃烧特性研究

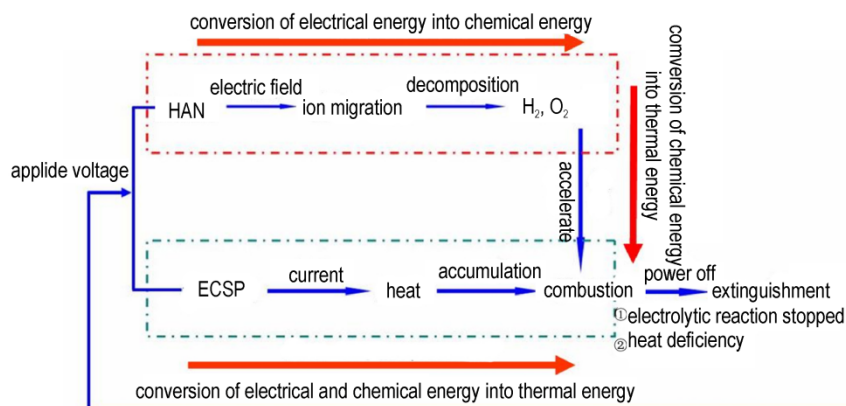
1.3.1 HAN基ECSP燃烧机理研究

王新强等^[46]针对HAN基ECSP开展了燃烧控制技术研究,分析了ECSP的燃烧可控机理,认为ECSP发生燃烧是电解效应和电热效应耦合的结果,通过电压能够控制ECSP的一次电解反应,是实现燃烧可控的关键。Glascock等^[47-49]分析了HIPEP的烧蚀过程,发现燃烧过程中的离子电流密度低,电阻热很可能决定其工作机制。Hiatt^[39]认为HAN基ECSP点火主要是由电化学反应决定的,并且点火发生在较小的线电极上,这可能是由电流密度或电场效应造成的。在大气压和常温下,关闭电源后仅由热化学反应提供的能量不足以维持ECSP燃烧。研究人员提出的HAN基ECSP可能的燃烧工作机制,可以扩展对电解反应和热分解效应影响ECSP燃烧过程的理解,为后续揭示ECSP的燃烧可控机理提供指导方向。

程红波等^[50]认为ECSP的工作机理如图5所示,可简化为以下4个机理:ECSP导电机理、HAN电解机理、HAN热解机理、ECSP电控点火熄灭机理。ECSP的工作机理是:ECSP导通后,HAN电离的一部分离子相互接触形成导电通道;另一部分离子分散在PVA黏合剂中不参与导电。在外加电场作用下,导电离子发生电迁移,与相邻的导电离子相互接触而形成迁移电

流。在电场作用下HAN发生电解反应和热分解。黄印等^[51]开展了ECSP药浆电解试验,并分析阴阳两极的气体产物。结果表明:阴极电解水产生氢气和氨气;阳极则产生氧气。在以上HAN基ECSP的工作机理中,对HAN基ECSP导电机理的报道尚不深入,离子迁移机理尚不明确,而高电导率的ECSP能降低点火电压和点火能量^[72],因此后续可开展HAN基ECSP的导电机理研究,通过深入分析推进剂的导电性能与推进剂点火燃烧之间的关系,为优化推进剂配方提供指导。

推进剂的燃烧是沿表面发生热分解的一个能量释放、质量传递及产物相互作用的复杂过程^[52],ECSP燃烧机理对推进剂的燃烧性能的调节极为重要。要掌握ECSP的燃烧机理需要对凝相热分解性能特性和热解产物及燃烧火焰中发生物理、化学过程有深入的理解,热分解释放的能量是燃烧波传播的动力,故推进剂配方中组分的热分解特性会影响推进剂的燃烧过程^[53]。研究人员从HAN基ECSP的热分解、电解反应及燃烧过程解释ECSP的燃烧机理。具体为:HAN基ECSP的热分解先是部分HAN热分解反应,产生H₂O、NO和N₂O等产物;其次,HAN的热分解产物同未分解的HAN与PVA相互作用;最后ECSP中剩余其他组分热分解^[54]。HAN基ECSP的电解过程是:当施加电压,HAN基ECSP中水先被电解产生氢气和氧气,电热使得HAN基ECSP黏合剂分解产生热量和气体产物,最终气体产物在电极两侧混合点燃^[55],HAN电化学反应方程式具体如表2所示。HAN基ECSP在电化学、热

图5 HAN基ECSP工作机理^[50]Fig.5 Schematic diagram of HAN-based ECSP working mechanism^[50]表2 HAN电化学反应方程^[55]Table 2 HAN electrochemical reaction equation^[55]

name	electrochemical reaction
anodic reaction	$\text{H}_2\text{O}(l) \rightarrow 0.5\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$
	$(\text{NH}_3\text{OH})^+ \text{NO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_3\text{OH}^+ + \text{HNO}_3$
cathodic reaction	$2(\text{NH}_3\text{OH})^+ + 2\text{e}^-_{\text{water}} + 3\text{e}^-_{\text{Al}} \rightarrow 2\text{NH}_2\text{OH} + \text{H}_2$
total reaction	$\text{H}_2\text{O} + 2(\text{NH}_3\text{OH})^+ \text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{HNO}_3 + 2\text{NH}_2\text{OH} + \text{H}_2 + 0.5\text{O}_2$

化学反应的共同影响下,推进剂开始逐渐稳定燃烧^[44]。在燃烧过程中,ECSP的燃烧反应区可分为电解区和热解区。在电解区,除了与点火过程相同的电解反应外,燃烧面内部还存在着热解反应。将电解和热解产生的混合物与PVA在热解区预混合,进一步燃烧生成分子量更小的物质(CO、CO₂、N₂、H₂、H₂O等)。燃烧过程同时受到电化学和热化学反应的影响,且电解比热解对ECSP实现可控燃烧有更重要的作用^[47]。断电后,推进剂停止电解,同时,气相的热反馈的能量要小于推进剂本身被点燃的能量,推进剂无法维持正常稳定燃烧,ECSP随即熄灭^[49]。

1.3.2 HAN基ECSP的燃速特性研究

发动机的工作时间和推力大小与固体推进剂的燃速大小有关^[56-57];推进剂的燃速压强指数的大小也会对发动机的工作稳定性产生影响^[58-59]。此外,还需要改变推进剂的化学组成、物理结构以调节推进剂的燃烧性能,才能适应不同发动机的需求。因此研究ECSP的燃速性能,不仅有利于揭示固体推进剂的燃烧机理,而且对满足各种导弹武器的需求十分重要^[60]。黄印^[51]研究了HAN基ECSP配方的关键组分和电压、燃速的关系。研究发现当金属燃料的含量低于5%时,

含金属燃料配方的ECSP燃速是非金属配方的2~4倍,且燃速随点火电压的增加而增加;而当金属含量高于10%后,HAN基ECSP断电自维持燃烧,改变外加电压无法调控ECSP的燃速。一般的燃速测量方法(靶线法和超声波动态测量法)由于电场干扰均不适合用于测量ECSP的线性燃速,王新强^[42]在常压条件下设计了一种基于位移传感器燃速测量原理的测试装置,获得不同电压下HAN基ECSP的平均燃速。试验结果表明电压为200V下的燃速(0.552 mm·s⁻¹)是100V下燃速(0.156 mm·s⁻¹)的3倍;对不同电压和燃速进行线性拟合发现:常压下HAN基ECSP的燃速与电压呈线性关系。鲍立荣等^[44]研究了在不同电压、初始温度、压力条件下的HAN基ECSP的燃烧特性。试验结果表明:推进剂燃烧速率及热失重随着电压、初始温度、压力的增加而增加,如图6a~6f所示。研究发现提高推进剂的初始温度能增加推进剂点火表面热量,可以缩短与点火温度的温差,从而降低推进剂点火延迟;增加压强一方面能增加气体和颗粒混合物的浓度,另一方面高压下燃面热反馈作用更强。以上研究结果表明,影响HAN基ECSP燃速的主要因素是初始温度、电压和压强。但是由于HAN的低分解温度,作者只分析了1.5 MPa以下的HAN基ECSP燃速与压强、电压关系。后续可通过调整配方设计提高ECSP的熄灭压强阈值,进一步探究ECSP的燃速与压强、电压关系。

1.4 HAN基ECSP熄灭性能研究

针对固体火箭发动机难以熄灭、推力难以控制问题,国内外学者提出一些推力控制方案,如:调节喷管喉面、采用分段装药等。然而采用喷管喉面调节,其结构复杂且无法实现发动机多次启动^[61];而分段装药方

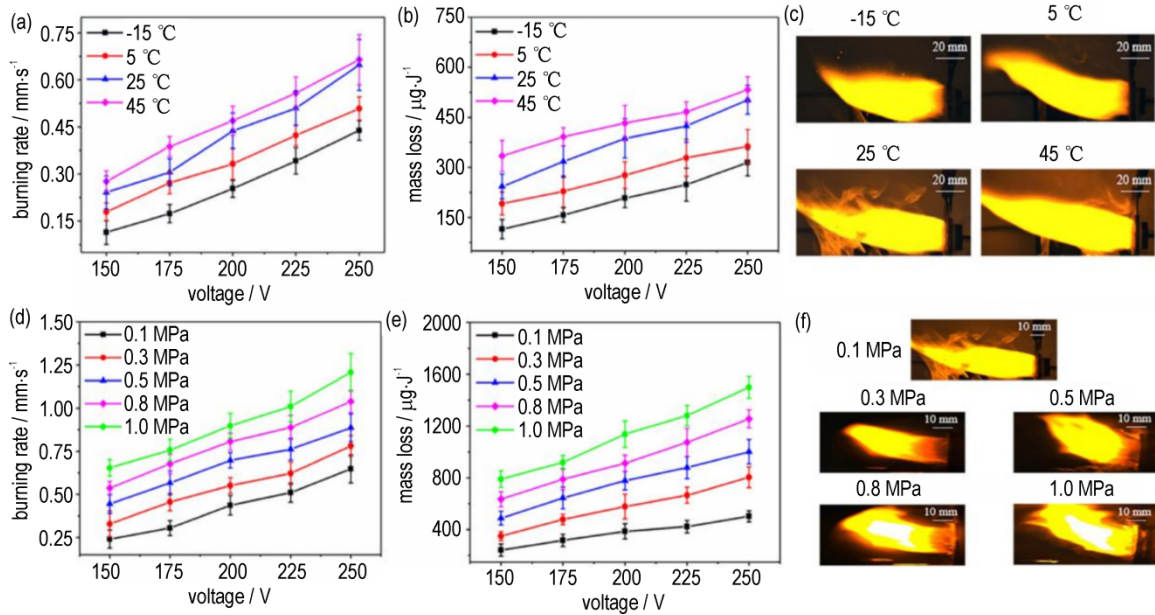


图6 HAN基ECSP的燃速关系图^[44]

Fig.6 Burn rate relation diagram of HAN-based ECSP^[44]

式使得发动机不具备连续多次启动和随机控制能力^[62]。ECSP的出现能从根本上颠覆传统固体推进剂难以实现多次点火特性,通过认识ECSP的熄灭性能,掌握不同配方体系ECSP的压强阈值,有利于揭示ECSP的熄灭机理。非金属化HIPEP配方自持燃烧所需的压力阈值^[63]如图7所示。标记为“可熄灭”的区域表示低于阈值的工作压力,其中压力效应和燃烧能量反馈不足以维持燃烧的推进剂表面。HIPEP可以通过电能输入来维持或停止低于此压力阈值的燃烧。金属燃料的作用是降低或消除压力阈值,以使燃烧焓足以在较低压力下实现自持燃烧或将燃烧行为降低至阴燃状态。从图8可知,随着电压、压强的增加,断电后HAN基ECSP的熄灭延迟时间增加;同时熄灭延迟时间先随重复点火次数的增加而增加,当点火次数超过3次后,由于推进剂内的电流趋势及累计硝酸残余量趋于一致,熄灭延迟时间基本不变^[44]。与传统的固体推进剂不同的是,HAN基ECSP在撤去电压后,剩余的热量不能维持推进剂的热解以支持燃烧。随着热损失和残留火焰远离燃烧表面,推进剂逐渐熄灭。目前仅采用试验手段测量影响ECSP熄灭的因素,还未见关于ECSP熄灭的机理报道。究其原因缺少ECSP的化学反应参数,无法采用数值仿真开展研究。因此,未来工作可开展ECSP的固相热解和气相燃烧详细反应,明确基元反应来分析和解释熄灭过程中详细化学本质,建立熄灭仿真模型,揭示HAN基ECSP的熄灭机制。

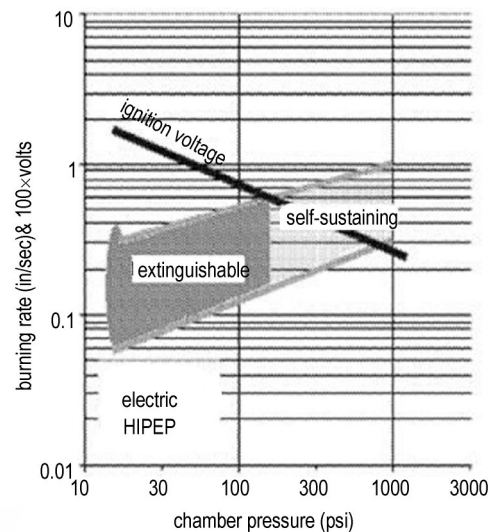


图7 HIPEP电压-压力与燃速的关系^[63]

Fig.7 Burning rate vs voltage/pressure for HIPEP^[63]

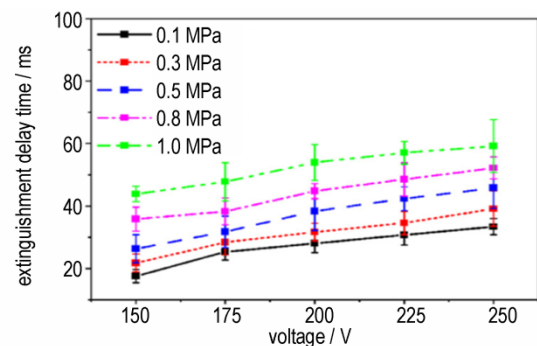


图8 不同压强下HAN基-ECSP电压与熄灭延迟时间的关系^[44]

Fig.8 The variation of extinguishment delay time with voltage for HAN-based ECSP at different pressure^[44]

2 高氯酸盐基 ECSP 点火、燃烧及熄灭特性研究

2.1 典型的高氯酸盐基 ECSP 配方

ECSP在电能作用下要想实现快速响应,同时保持其对高温和高压的耐受性,需要采用具有高离子电导率和高分解温度的氧化剂以减少电能损失并且避免阴燃。在众多可用的氧化剂中,高氯酸盐具有良好的燃烧特性、高分解温度,其中LP还具有高氧平衡。此外,LP用于传统固体电解质^[63-65]中能增强聚合物基质的无定形相。采用高氯酸盐代替AN或HAN作为氧化剂,以长链高分子聚合物PVA为黏合剂^[66],制备得到了高氯酸盐基ECSP,其典型配方组成列于表3。

2.2 高氯酸盐基 ECSP 的点火特性研究

电极参数(材料、极性、面积比等)会影响高氯酸盐基ECSP的点火特性^[40-42],Li等^[67]在常压下开展板状ECSP构型(带绝缘层)的电点火试验,研究电极极性、电极材料、电极表面粗糙度和电极面积比等参数对ECSP点火的影响,如表4所示。电极极性响应试验结果表明:施加直流电时(P1测试条件),ECSP点火发生

在负极附近;向ECSP施加的交流电(测试P2条件),在两电极均能点火。对比P1和P2试验结果可知:在考虑电极极性的情况下,ECSP在负极发生点火。在不考虑电极极性的情况下,两电极板均能点火,且按交流电频率交替在电极板上点燃。此外,电极排布、电极构型等对ECSP的点火特性和燃烧效率也有重要影响^[30]。后续可通过设计多种电极构型和不同的电极分布形式,结合理论和试验研究其对ECSP点火燃烧特性影响,为发动机燃烧室电极构型设计提供理论依据。

ECSP电点火具体过程^[67](图9)如下:通电后两侧电极接触的推进剂开始分解并且出现液体;点火发生在靠近绝缘层附近的推进剂上。Gobin等^[68]研究以聚环氧乙烷(polyethylene oxide,PEO)为黏合剂,LP为氧化剂制备ECSP的点火特性时也发现类似的现象。他们发现电点火过程中ECSP在阴极处出现液体,如图10所示。这些液体是由于高电压作用下PEO主链经历快速氧化热解产生的。随着ECSP分解和电流流动,分解层从阴极生长到阳极。研究认为ECSP样品的完全点燃要求液体分解层到达阳极,同时2个电极之间的液体分解层生长可能是点火的关键因素。这可能是由于离子比固体更容易通过液体层,较高的离子穿

表3 高氯酸盐基 ECSP 的典型配方^[15]

Table 3 Typical perchlorate salt-based ECSP formula composition^[15]

name	components	mass percent /%
perchlorate oxidizer	aluminum perchlorate	50-90
	barium perchlorate lithium perchlorate	
perchlorate-based ECSP	fuel	5-30
	magnesium tungsten	
	aluminium copper copper oxide	
	adhesive	
casein methyl cellulose methyl cellulose polyvinyl alcohol		

表4 不同电极极性下高氯酸盐基 ECSP 电响应试验参数及结果^[67]

Table 4 LP based ECSP polarity response overall experimental test^[67]

test	electrode polarity	electrode material	electrode surface roughness	electrode area ratio	ignition position
P1	direct current	Al(+)-Al(-)	mirror polished finishing	1:1	Al(-)
		SS(+)-SS(-)			SS(-)
		Cu(+)-Cu(-)			Cu(-)
P2	alternating current(50 Hz)	Al-Al	mirror polished finishing	1:1	both
		SS-SS			both
		Cu-Cu			both

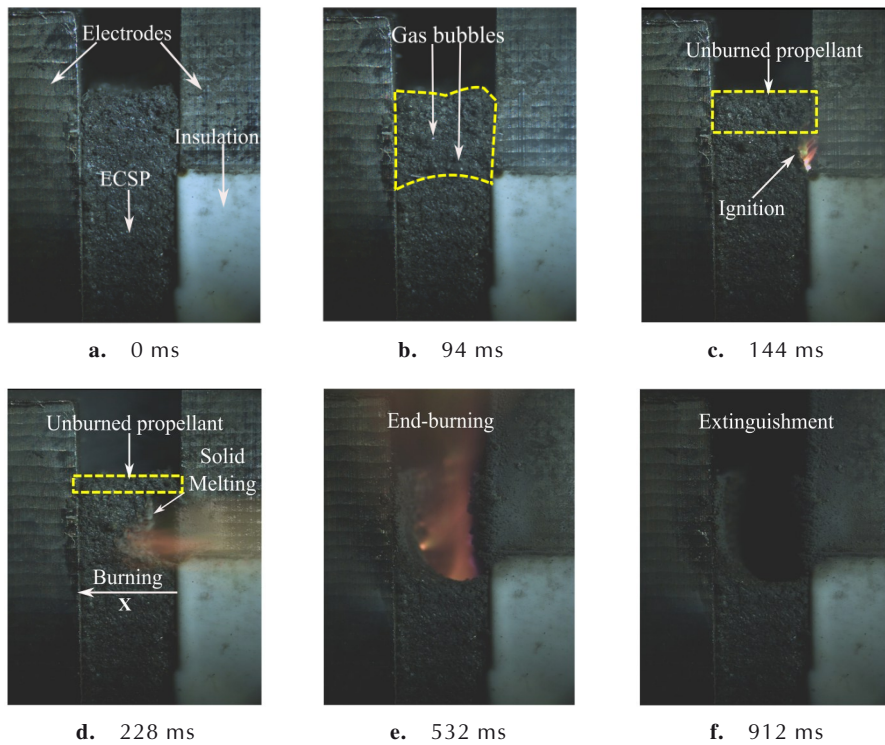


图9 LP基ECSP从点火到熄灭的序列图像^[67]

Fig.9 Sequence images of the LP-ECSP from ignition to extinguishment^[67]

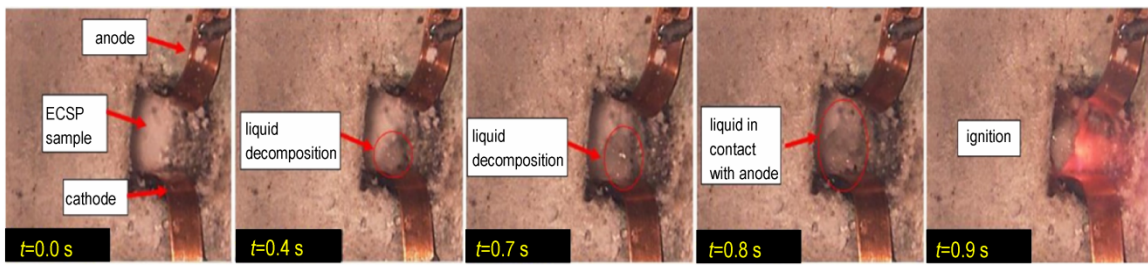


图10 LP/PEO基ECSP电化学分解演变过程^[68]

Fig.10 Electrochemical decomposition evolution of LP/PEO-based ECSP^[68]

过溶液的速率可能会加速PEO聚合物骨架的分解。而一旦分解层连接电极,阳极处高氯酸盐离子分解速率即会增加。此外,在分解层连接阳极和阴极之前,在阳极处没有观察到大量气态产物。一旦连接,阳极周围开始形成气泡,表明高氯酸盐离子开始分解成气态氧和氯,这有助于聚合物的点燃。通过以上研究发现:高氯酸盐基ECSP热分解和熔化的原因可能是聚合物在电能作用下发生离子迁移运动引起的整个推进剂的欧姆加热和电极处发生的电化学反应的共同作用,其点火则与电化学反应相关。

Li等^[69]研究了电压、压强以及初温对LP基ECSP点火延迟时间的影响。通过试验发现:相比增加初温和压力,增加点火电压能有效地减少ECSP的点火延迟时间。此外,添加金属粉末后,ECSP点火延迟时间也

会明显减少。LP基ECSP随点火次数和压强的增加,点火延迟时间和点火能量明显减少。Gnanaprakash等^[70]开展添加金属钨的高氯酸盐基ECSP在0.1~2.0 MPa下点火特性试验研究,也得到类似的结论。此外,他们还发现添加金属钨能显著降低ECSP的点火延迟时间和点火能量,且显著提高了2.0 MPa以下的ECSP燃烧速率。以上研究发现:电压、初温、压强以及金属添加剂均能影响高氯酸盐基ECSP的点火延迟时间和点火能量,此外研究还发现ECSP与电极材料之间的界面电阻是增大推进剂点火延迟时间和点火能量的主要原因。未来可以在该体系的基础上,尝试其他黏合剂或对现有的黏合剂进行改性处理,改善材料的柔韧性,降低界面接触电阻,提高ECSP的电导率。

2.3 高氯酸盐基 ECSP 燃烧特性研究

2.3.1 高氯酸盐基 ECSP 燃烧性能研究

为了深入理解 ECSP 的燃烧反应机理,研究人员采用高速摄像动态捕捉 ECSP 燃烧火焰和燃面的细节,通过分析推进剂燃烧火焰微观变化解析燃烧过程中相关物理和化学行为。Wang 等^[71]在 1 MPa 压力下采用定容燃烧试验系统研究以 LP 和高氯酸铵(ammonium perchlorate, AP)为氧化剂,PEO 或聚丙烯腈(polyacrylonitrile, PAN)为黏合剂的 ECSP 燃烧特性。试验研究表明:PEO 基 ECSP 的燃面平行向下退移,且火焰呈亮黄色,而 PEO/PAN 基 ECSP 的燃烧火焰则呈现橙黄色,如图 11 所示。段炼^[30]观察到非金属高氯酸盐 ECSP 的燃烧火焰形成的初期,推进剂表面存在明显暗区,在持续的电流作用下,推进剂的火焰亮度提高,暗区逐渐减小直至消失,如图 12 所示。Li 等^[67]观察到含金属高氯酸盐基 ECSP 燃烧表面的火焰上方区域观察到燃烧表面与火焰完全分离,也出现明显的暗区,如图 13 所示。根据 ECSP 火焰形貌,火焰形态可分为:附着在燃烧表面的多束发光火焰和离燃面一定距离的扩散火焰。目前针对 ECSP 的研究都是宏观上对燃烧特

性(如燃速、燃烧火焰结构及燃烧波)进行试验研究,然而 ECSP 在微观上具有复杂的三维异质结构,其微观燃烧包括气固耦合、化学反应机理以及复杂火焰结构等。现阶段文献报道的 ECSP 的微观燃烧较少,表征手段较为单一。后续工作可采用多种手段(如平面激光诱导荧光等)表征 ECSP 的火焰形貌,建立 ECSP 燃烧模型,获得 ECSP 的微观燃烧特性。

Wang 等^[71]认为高氯酸盐基 ECSP 的燃烧主要是由凝胶的离子转移、电子交换、欧姆加热和阻燃性 4 个因素控制。他们认为低点火温度下的氧化电解产物和热解产物预混到一定浓度时,电加热能加速其发生点火。电能则通过调节离子转移和电子交换的速率来改变电解产物的生成速率,宏观上表现为 ECSP 点火延迟时间和燃烧速率随施加的电压而变化。而 Li 等^[67]认为热化学反应在 LP 基 ECSP 的点火起主导作用,而电化学过程在维持其稳态燃烧中发挥了重要作用。基于以上研究结果,高氯酸盐基 ECSP 的点火和燃烧过程机制主要分为 3 个:电作用过程、固相热分解过程及气相化学反应。电作用过程分为电加热和电解,具体表现为:ECSP 吸收电能使其自身温度逐渐升高,达到水的

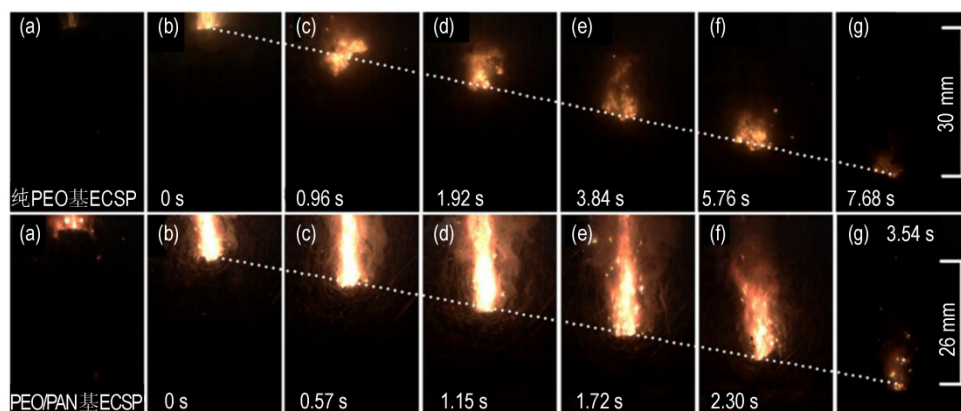


图 11 1.0 MPa 下 PEO 基 ECSP 和 PEO/PAN 基 ECSP 的燃烧图^[71]

Fig.11 Combustion image sequences for PEO-based ECSP and PEO/PAN-based ECSP under 1.0 MPa^[71]

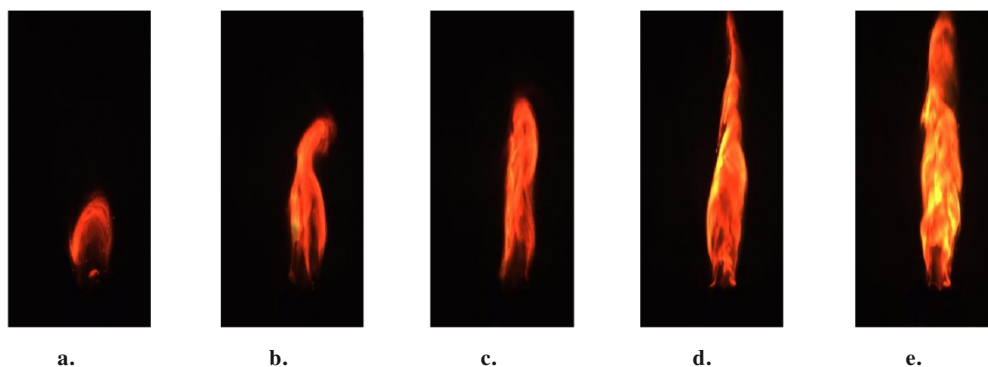


图 12 非金属基-ECSP 的火焰形态演变图^[30]

Fig.12 Sequence images of combustion flame of Non-metal ECSP^[30]

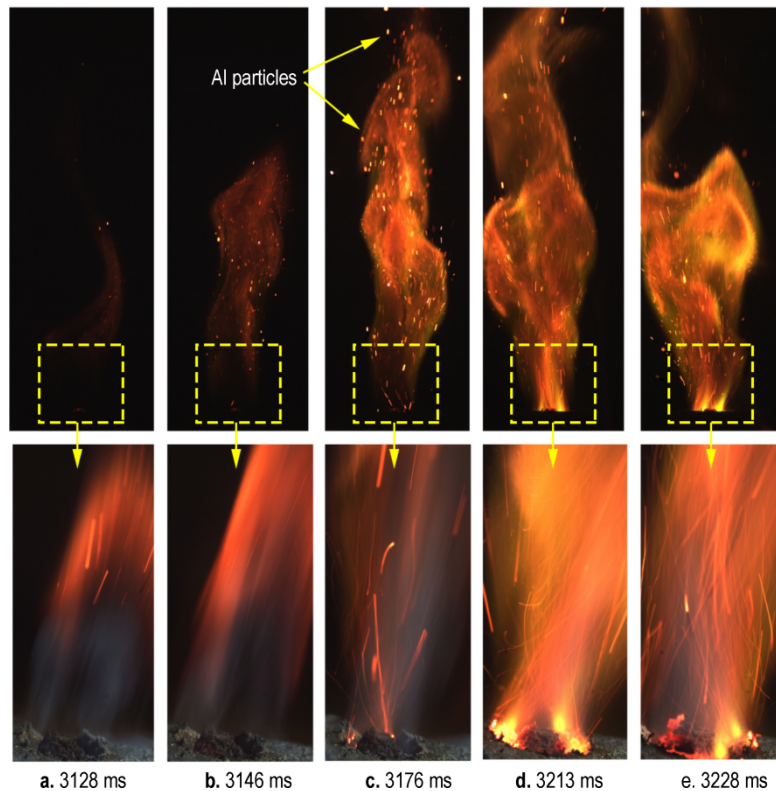


图 13 5% Al-ECSP 的火焰形态演变图^[67]

Fig.13 Sequence images of combustion flame of 5% Al-ECSP^[67]

沸点继续吸收能量,水发生相变,且由于温度的升高,黏合剂由玻璃态转变为高弹态,此时推进剂固相整体变软且有水蒸气产生。电解过程则是电压作用下离子发生迁移,氧化剂的阳离子迁移到阴极,高氯酸根和水则在阳极电解产生气态产物和燃料。固相热分解过程主要是:氧化剂和黏合剂通过热传导和电加热使得氧化剂和黏合剂吸热分解。该固相区域可以分为固相预热区和固相反应区。固相预热区与电极构型以及绝缘层位置有关。固相反应区内不仅存在氧化剂和黏合剂单元各自的吸热分解过程,还存在他们之间的化学反应。气相化学反应为:固相区的分解产物和蒸发产物逐渐进入气相,随着反应物的积累和温度的不断升高,热分解和电解产生的气态氧化产物和还原性产物预混到一定浓度,气相发生化学反应,最终点火燃烧。

2.3.2 高氯酸盐基 ECSP 的燃速特性研究

固体推进剂的燃速主要取决于燃面处反应释放的热量及气相区燃烧火焰对燃面的热反馈。高氯酸盐基 ECSP 在常压下存在暗区,增加燃烧室压强可以减少暗区的高度,从而增加气相热反馈,ECSP 的燃速增加。如:He 等^[28]在 0.5~5 MPa 范围内开展高氯酸锂基 ECSP 燃速特性研究,随压力的升高,推进剂燃速增幅变大。增加电压可以增加燃面处的电流,从而提高燃

面处的热反应速率和热解产物生成速率,使得 ECSP 的燃速增加。高氯酸锂基 ECSP 具有较宽的燃速调节范围,随着输入电压的改变燃速可变化 2~10 倍^[27]。受限于电极的间距,ECSP 存在上限电压阈值,因为高电压极易引起 ECSP 短路,从而使得电源无法正常工作^[69]。因此,后续的研究工作应该考虑设计电极分布,确保推进剂燃烧喷射效率的同时避免推进剂在燃烧过程中发生短路。此外,ECSP 的燃速还受配方中氧化剂和黏合剂的种类和配比影响。如 Gobin 等^[68-70]仅采用 LP 作为氧化剂的 ECSP 样品在燃烧速率与电压线性相关,如图 15a 所示。而使用 AP 和 LP 作为氧化剂的 ECSP 样品,其燃烧速率与电压呈非线性关系,如图 15b 所示。综上可知,引入 AP 颗粒可有效提高 ECSP 的燃速。Wang 等^[71]以 LP 和 AP 为氧化剂,PEO-PAN 为黏合剂制备 ECSP,研究其不同推进剂配比下的燃速特性,其火焰图像如图 15 所示。试验结果表明:针对不同比例的 PEO 和 PAN,当 PEO 和 PAN 的质量比为 2:1 (C31)时,燃烧速率最大为 $7.34 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;而当 PEO 和 PAN 的质量比为 5:1 (B31)时,燃烧速率为 $6.52 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这意味着,PAN 的加入会改变聚合物结构,使得燃烧速率增加,如图 15a 所示。对于仅使用 PEO 的配方,当 LP 和 AP 的质量比为 2:1 (A21)时,燃烧速率最高为

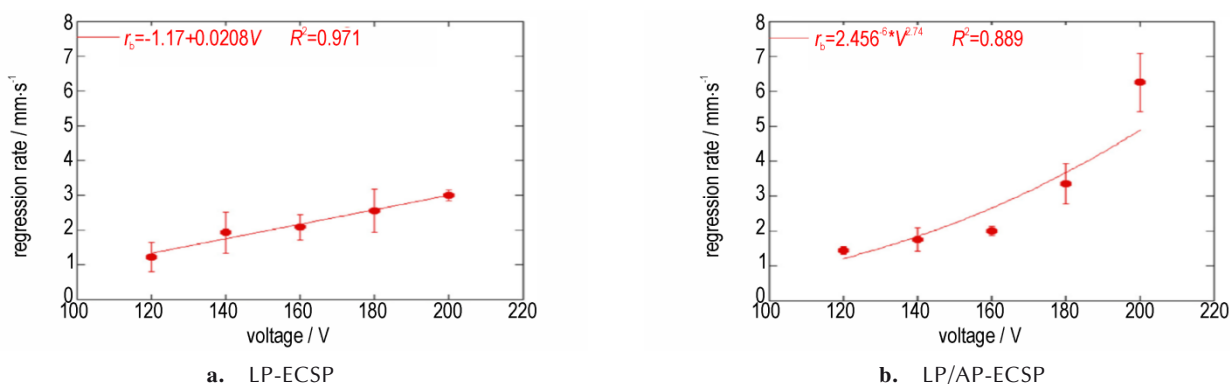
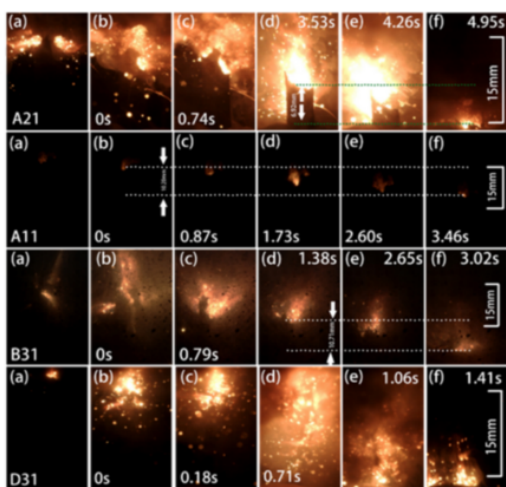
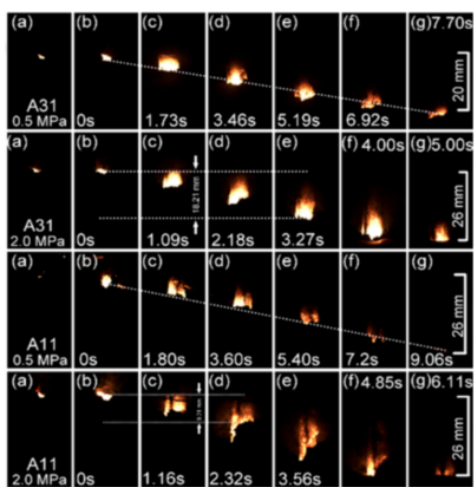


图 14 LP 基 ECSP 和 LP/AP 基 ECSP 的电压-燃速图^[68]

Fig.14 Regression rate vs. voltage for LP-based ECSP (left) and LP/AP-based ECSP (right)^[68]



a.



b.

图 15 A21、A11、B31 和 D31 在 1.0 MPa 下燃烧过程的连续火焰图像(a)和 A31 和 A11 在 0.5 和 2.0 MPa 压力下的连续火焰图像(b)^[71]

Fig.15 Sequence images of combustion flame of A21, A11, B31 and D31 at 1.0 MPa (a), of A31 and A11 at 0.5 and 2.0 MPa (b)^[71]

4.9 mm·s⁻¹;当 LP 和 AP 的质量比为 1:1(A11)时,其燃烧速率最低为 3.0 mm·s⁻¹。当 LP 和 AP 的质量比分别为 3:1(A31)和 1:1(A11)时,在 0.5~2 MPa 压力范围内的燃烧过程如图 15b 所示。根据维耶定律拟合的压力指数(n)结果,对于 A31,其 n 值为 0.55,而 A11 的 n 为 0.23。综上可知,电控固体推进剂的燃速不仅与压强和电压有关,还受成分和配比的限制。因此提高 ECSP 燃速的有效途径需要在甄选和优化推进剂的主要成分和成分配比的基础上,掌握不同电压和压强下燃速的影响规律。

2.4 高氯酸盐基 ECSP 熄灭性能研究

Li 等^[69]研究 Non-metal-ECSP 和 5% Al-ECSP 熄火特性。图 16 为 0.1~3.5 MPa 下的 Non-metal-ECSP 和 5% Al-ECSP 的熄灭延迟时间。由图 16 可知随着压强的升高,ECSP 熄灭延迟时间变长,熄灭变得困难。对于含铝推进剂当压强高于 3 MPa 后,即使断电推进剂也不能熄灭,而非金属推进剂自维持燃烧的压强阈值是 3.5 MPa。Wang^[72]认为高氯酸盐基 ECSP 的熄灭是由于断电后,推进剂中的离子转移和电子交换瞬间中止,电解产物停止生成使燃烧不稳定,而剩余的电解产物在燃烧反应中被快速消耗。此外,电加热也停止,使得电极温度逐渐降低,热分解最终停止。而火焰和热电极不足以支持黏合剂的燃烧,导致推进剂熄灭。研究认为高氯酸盐基 ECSP 的熄灭特性主要受聚乙烯醇凝胶基质的阻燃性和热分解温度的影响。虽然选用高分解温度的高氯酸盐作为 ECSP 的主氧化剂能显著提高 ECSP 的熄灭压强阈值,但是目前研究得到的最高熄灭压强阈值为 3.5 MPa,这远远不能满足目前弹道武器的工程化使用需求,后续应当开展其熄灭机理研究,获取提高 ECSP 压强阈值的方法。

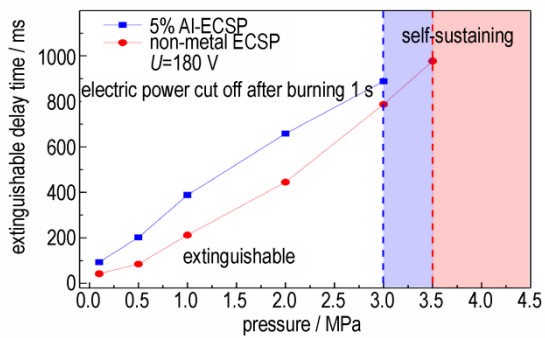


图 16 不同压强下 Non-metal-ECSP 和 5% Al-ECSP 的熄灭延迟时间^[69]

Fig. 16 Extinguishment delay times of non-metal ECSP and 5% Al-ECSP obtained at different pressures^[69]

3 其他氧化剂 ECSP 点火燃烧特性研究

3.1 典型配方

Sawka 等^[14]对基于 AN 的熄灭可控固体推进剂进行研究。在 AN 中加入其他成分,以降低制备过程中推进剂的熔点,并在燃烧过程中形成导电相。由于大多数 ECSP 配方获得比冲比较低, Ma 等^[33]采用高能氧化剂 ADN 作为 ECSP 的主氧化剂, ADN 的添加能大幅度提高推进剂的能量,降低特征信号,其典型配方组成列于表 5。

表 5 其他氧化剂 ECSP 的典型配方

Table 5 Typical other oxidizer-based ECSP formula composition

names	components	mass percent / %	reference
AN base-ECSP	AN	75	[73]
	epoxy resin	25	
AN/AND base-ECSP	ADN	5~60	[33]
	AN	5~60	
	unsaturated polyester resin	40	
	dioctyl sebacate	-	

3.2 其他氧化剂 ECSP 点火燃烧特性研究

Sawka 等^[14]研发以 AN 作为氧化剂的第一代熄灭可控固体推进剂,其燃烧过程如图 17 所示。该推进剂熄灭可控是由于燃烧产生大量液化层。常压下燃速为 $1.01\sim 1.27\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 3.45 MPa 时燃速可达到 $5.08\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当压强大于 1.4 MPa 时推进剂燃烧不能熄灭。Khoruzhii 等^[74-75]开展硝酸铵-环氧树脂基 ECSP 点火燃烧特性研究。结果表明: AN 和环氧树脂的固相混合物不导电,需要通过加热使样品熔化才能实现电点火燃



图 17 硝酸铵基 ECSP 电点火燃烧过程图^[14]

Fig. 17 Ignition and combustion process of AN-ECSP^[14]

烧。此外,样品燃烧率随电压增加而线性增加。Zamir 等^[73]在 Khoruzhii 等^[74-75]的基础上开展高压条件下电压对 AN 和环氧树脂混合物样品燃烧速率的影响。与 Khoruzhii 的试验现象类似,该样品也需要热点火来创建初始熔融层,然后再施加电压实现点、熄火。此外,当电压从 70 V 增加到 200 V 时,燃烧速率增加了约 4 倍,如图 18 所示。电压的变化导致推进剂燃烧表面形成的导电层中电流产生变化,进而影响燃烧速率。在低压范围内,电压变化对燃烧速率的影响相对更大。基于压强和比功率(单位表面积功率)之间的耦合效应,提出了一个燃速经验模型,该模型可以很好地预测推进剂在较宽压力和电功率范围内的燃速变化。以上研究发现,采用硝酸铵作为 ECSP 的主氧化剂需要先创建导电层,这就增加 ECSP 点火的复杂程度,而且硝酸铵基 ECSP 的燃速要明显低于以 HAN 和高氯酸盐为氧化剂的 ECSP 的燃速。这说明相比于 HAN 和高氯酸盐,硝酸铵不适合单独作为 ECSP 的主氧化剂。

Ma 等^[33]以 ADN 为主氧化剂制备了一种新型绿色 ECSP。从图 19 中可知电压为 60 V 时,观察到明显的液相分离;当电压增加到 90 V 时燃烧产生高温气体,但是该电压下断电已无法熄灭。以 AND 为氧化剂的 ECSP 显示出较高的能量,但是稳定性较差。而当氧化剂中加入硝酸铵后,发现其点火阈值略有增加,并且产生明显的火焰,说明其具有良好的电响应和高能量性能。以 AND 为氧化剂的 ECSP 点火发生在样品与电极板接触的部分。推进剂在初始点火阶段(0~60 V) ECSP 处于固态,当施加 30~150 V 电压,推进剂和电极之间的界面被加热,且推进剂熔化,离子开始在熔化的推进剂中迁移。随着能量的累积 ECSP 达到点火的阈值,推进剂被点燃。虽然含能材料 AND 的加入能有效地提高 ECSP 的能量,但是低分解温度限制了其应用范围。AN 的加入能一定程度提高 ECSP 的整体分解温度,但效果不甚理想。以 AND 作为 ECSP 的主氧化剂是一个新的尝试,也为增加 ECSP 的理论比冲提供新的思路。后续可采用含能且导电性高材料作为 ECSP 氧化剂或添加剂,解决目前 ECSP 低比冲和高点火电压的问题。

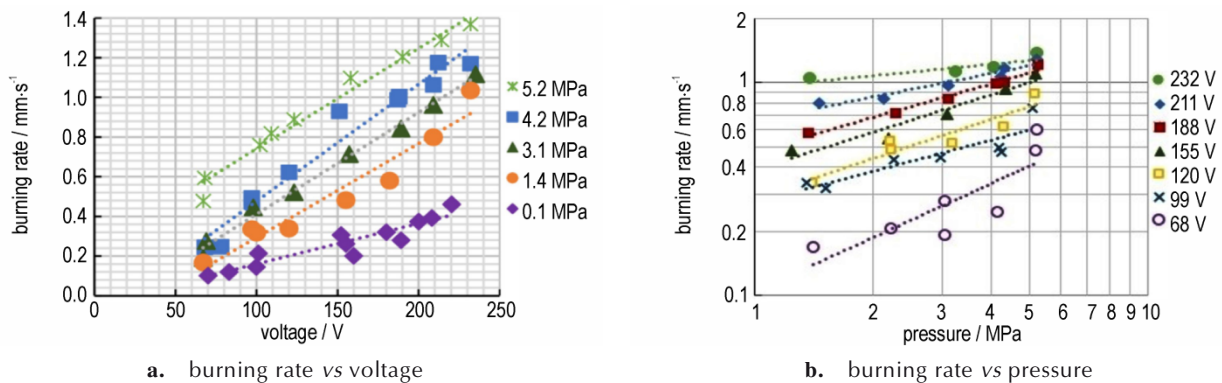


图 18 75% AN 和 25% 环氧树脂组成的推进剂燃速与电压/压力的关系^[73]

Fig.18 Burning rate vs voltage/pressure for propellant consisting of 75% AN and 25% epoxy^[73]

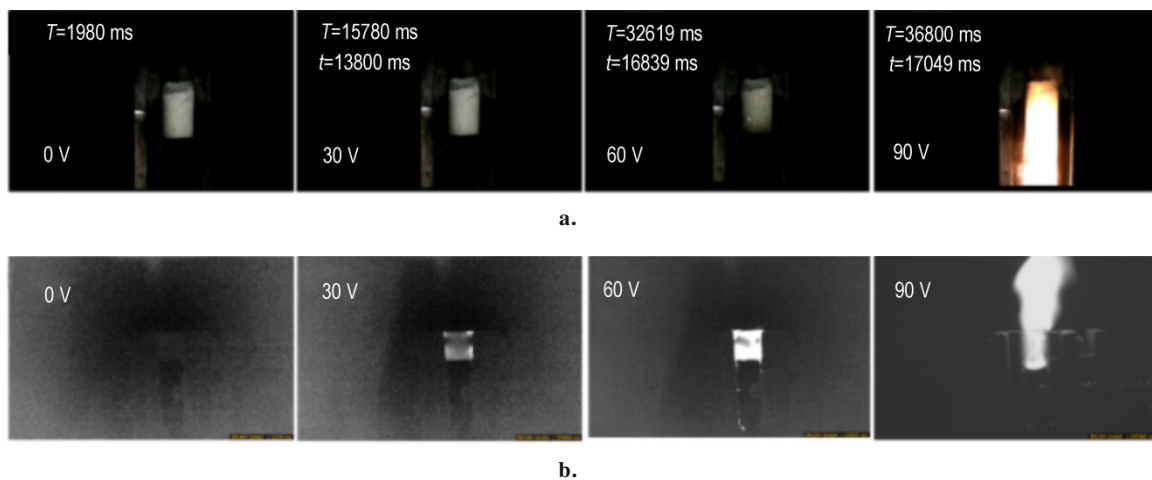


图 19 ADN 基 ECSP 的高速相机(a)和红外成像仪(b)燃烧试验图^[33]

Fig.19 High-speed (a) and infrared photos (b) taken during the combustion processes of AND-based ECSP^[33]

综合上述研究可知:ECSP 的电点火过程集合了电能作用、凝聚相热解、气相反应,并且与电极结构、电极特性以及电能大小相关。对比同轴电极、端面电极以及正负交错螺旋型单端面电极结构对 ECSP 点火特性的试验结果发现:不同电极结构会影响 ECSP 的点火现象;同一电极结构下,电极极性和电流密度是影响 ECSP 的点火次序的主要因素,且在电流密度较大的电极端 ECSP 优先点火。此外,不同 ECSP 配方体系的点火试验表明其点火机制不同。HAN 基 ECSP 点火优先发生在正极,而高氯酸盐基的 ECSP 点火则优先发生在负极。这是由于 HAN 基 ECSP 在正极分解生成 NO_3^- , 产生的氧浓度较高,使得正极升温速率高于负极;而高氯酸盐基 ECSP 可能是由负极电解水产生的氢气加快了 ECSP 的气相反应^[71]。综合不同 ECSP 配方体系的燃烧试验可知:ECSP 燃烧是由于当能量高于氧化剂点火能量阈值的外部电场被施加到推进剂上,氧化剂/水

电解,释放的可燃物质混合,在持续的电热作用下发生化学反应释放大量的热,从而促使推进剂燃烧,其燃烧过程主要受电效应和热效应耦合作用。综合以上几种不同配方体系的燃速特性可知:改变燃烧室压强和电压均能有效提高 ECSP 的燃速。升高燃烧室压强能有效加快 ECSP 的气相反应,而增加电压则能提高 ECSP 中的离子转移、电子交换以及电加热的速率。此外氧化剂和金属添加剂也能明显改变 ECSP 的燃速。综合不同配方的 ECSP 的熄灭特性可知:高氯酸盐基 ECSP 的熄灭压强阈值明显高于 HAN 基 ECSP,这与 HAN 氧化剂较低的分解温度有关。相比之下,采用高分解温度的高氯酸盐作为氧化剂可以提高 ECSP 的熄灭压强阈值。然而,即使该类氧化剂能够提高 ECSP 的熄灭压强阈值,目前研究也只限于 3.5 MPa。这大大限制了 ECSP 的应用。此外,研究人员发现 ECSP 的熄灭与黏合剂阻燃以及氧化剂的分解温度有关,后续可以通过

筛选/合成高阻燃、高导电性的黏合剂来提高 ECSP 的压强阈值。

4 总结与展望

ECSP 具有多次点火、安全钝感和推力可调等优点,在航天和国防领域展现出广阔的应用前景,为解决固体动力系统重复启动和推力宽域调节提供新的技术路线。随着 ECSP 配方的拓展,目前已具备较为丰富的研究积累。本文综述不同配方体系 ECSP 的点火和燃烧性能,重点讨论了 HAN 基 ECSP 和高氯酸盐基 ECSP 的点火特性和燃速特性,包括电极材料、电极极性、电极比表面积等对 ECSP 点火性能的影响,总结了电压、初始温度和环境压强对 HAN 基 ECSP 和高氯酸盐基 ECSP 点火延迟时间的影响规律,讨论了电能对 ECSP 燃速的影响,发现 ECSP 的燃烧过程是电解效应和电热效应耦合的结果,电化学反应是实现燃烧可控的关键,改变电压能有效地调节 ECSP 的燃速。此外,提高压强和添加金属粉末均能有效提高 ECSP 的燃烧速率。本文所述的 ECSP 配方体系的可熄压强均较低,其熄灭可能是由于黏合剂阻燃性决定的。

针对当前 ECSP 研究和应用中的不足,对其未来的研究重点提出以下几点建议:

(1) 当前约束 HAN 基 ECSP 研究进展的主要问题是点火困难和高压熄灭性差,应着重开展该类推进剂点火性能的改善研究,解决该类推进剂的工程化应用问题。

(2) 高氯酸盐基 ECSP 的研究还处于初步阶段,推进剂的性能上还存在诸多不足,如燃烧固相残渣多易堵塞喷管,比冲相对较低,可熄灭压强阈值偏低,目前还难以满足固体火箭发动机的性能要求。因此针对此类问题应着重开展该类推进剂配方的优化,改善该类推进剂的燃烧性能问题,加快其实际应用脚步。

(3) 以 AN 和 ADN 等为氧化剂的 ECSP 研究较少,其中 AN 有效氧含量低,以其为氧化剂的 ECSP 重复点火差、点火延迟时间长,不适合单独作为 ECSP 的氧化剂使用。后续工作可重点筛选推进剂的氧化剂开展试验研究;此外黏合剂对 ECSP 的导电性能和燃烧性能也有较大影响。因此 ECSP 的氧化剂和黏合剂的筛选将是未来实现工程化应用的突破点。

(4) ECSP 目前已在微推进领域,固体姿轨控发动机等领域应用。然而 ECSP 应用在大型尺寸系统仍面临多次点火重复性差,燃烧室压强偏低,且长时间工作

后熄火时间长甚至难以熄灭等挑战。明晰 ECSP 的燃烧可控机理可以从根源提出行之有效的方法解决以上技术难题。ECSP 的燃烧可控机理涉及到复杂的物理化学过程、电化学反应与热化学反应耦合、多相传热和传质等,需要结合实验研究和数值仿真获得 ECSP 电能作用机制、点火燃烧机理、燃速调节及熄灭性能,为优化 ECSP 配方、提供电控固体火箭发动机设计思路、实现工程化应用奠定基础,因此 ECSP 的燃烧可控机理将是未来研究的重点。

参考文献:

- [1] 齐艳丽, 伍赣湘, 韩洪涛, 等. 美国新型陆基导弹武器发展及其作战使用研究[J]. 飞航导弹, 2021, 4: 43-47.
QING Yan-li, WU Han-xiang, HAN Hong-tao, et al. Research on the development and operational use of new land-based missile weapons in the united states[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021, 4: 43-47.
- [2] 吕琳琳, 王瑾. 2021 年国外弹道与巡航导弹武器发展综述[J]. 中国航天, 2022, 6: 9-13.
LV Lin-lin, Wang Jin. Comprehensive analysis on the 2021 world-wide development tendency of ballistic and cruise missiles[J]. *Aerospace China*, 2022, 6: 9-13.
- [3] 董立宝, 何博, 聂万胜, 等. 液体火箭发动机动态特性研究进展[J]. 空天技术, 2022, 4: 19-27.
DONG Bao-li, HE Bo, NIE Wan-sheng, et al. Research progress in characteristics of liquid rocket engine[J]. *Aerospace Technology*, 2022, 4: 19-27.
- [4] 刘佩进, 魏少娟, 王琢璞, 等. 固体火箭发动机燃烧不稳定研究进展与展望[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 1921-1935.
LIU Pei-jin, WEI Shao-juan, WANG Zhuo-pu, et al. Advances and prospects of combustion instability in solid rocket motors[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9): 1921-1935.
- [5] HAO X, ZHANG H, HOU X, et al. Radiative properties of alumina/aluminum particles and influence on radiative heat transfer in solid rocket motor[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(2):19.
- [6] THOMAS R C J, SOMASUNDARAM P, SHANMUGAM Y. Certain analysis of a solid rocket motor (SRM) with modified pentagonal grain configuration[J]. *Materialstudy: Proceedings*, 2022, 51(3): 1585-1592.
- [7] AO W, WEN Z, LIU L, et al. Controlling the combustion and agglomeration characteristics of a solid composite propellant via a DC electric field[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 128: 107766.
- [8] 张伟, 鲍立荣, 沈瑞琪, 等. 一种高能高力学性能电控固体推进剂: 110759800A[P], 2020.
ZHANG Wei, BO Li-rong, SHEN Rui-qi, et al. An electrically controlled solid propellant with high energy and high mechanical properties: 110759800A[P], 2020.
- [9] 任士栋. 可控推力固体推进剂研究现状及三维聚乙烯醇凝胶合成[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
REN Shi-dong. Research status of controllable thrust solid propellant and synthesis of three-dimensional polyvinyl alcohol Gel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

- [10] 何志成, 夏智勋, 胡建新, 等. 电控固体推进剂制备方法及性能研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(12): 1190-1199.
HE Zhi-cheng, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, et al. Review on preparation methods and properties of electrically controlled solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(12): 1190-1199.
- [11] SAWKA W N. Solid-State, On-demand gas generators as pneumatic batteries for micro-electronic actuators and fluid delivery [C]//NSTI Nanotechnology Conference and Trade, 2006.
- [12] SAWKA W N. Family of modifiable high performance electrically controlled propellant and explosives: US0067789 [P], 2009.
- [13] MCCAULEY R J, FLETCHER W G, CRANE D J. Throttle control of an extinguishable solid propellant thruster system-mars lander [J]. *Concepts and Approaches for Mars Exploration*, 2012, 1679: 4264.
- [14] SAWKA W N, MCPHERSON M. Electrical solid propellants: a safe, micro to macro propulsion technology [C]// 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013.
- [15] GRIX C E, SAWKA W N. Family of modifiable high performance electrically controlled propellants and explosives: US 2011/0067789 [P], 2011.
- [16] SAWKA W N, GRIX C. Electrode ignition and control of electrically ignitable materials: US20150047526 [P], 2015.
- [17] SAWKA W N. Controllable digital solid state cluster thruster rocker propulsion and gas generation: US0134924 [P], 2008.
- [18] CHAI W S, CHEAH K H, WU M H, et al. A review on hydroxylammonium nitrate (HAN) decomposition techniques for propulsion application [J]. *Acta Astronautica*, 2022, 196: 194-214.
- [19] CHAI W S, KOH K S, CHEAH K H. Chapter 11-Hydroxylammonium nitrate—the next generation green propellant [J]. *Space Micropropulsion for Nanosatellites*, 2022: 285-305.
- [20] KATSUMI T, HORI K. Successful development of HAN based green propellant [J]. *Energetic Materials Frontiers*, 2021, 2(3): 228-237.
- [21] NICHOLAS A, FINNE T, SAWKA W, et al. SpinSat mission overview [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technical Conference, 2013.
- [22] 黄印, 张小平, 庞爱民, 等. 一种含金属燃料的电控固体推进剂及其制备方法: CN109851457A [P], 2019.
HUANG Yin, ZHANG Xiao-pin, PANG Ai-ming, et al. An electrically controlled solid propellant containing metal fuel and its preparation method: CN109851457A [P], 2019.
- [23] HE Z, XIA Z, HU J, 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.
- [24] 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.
- [25] BAO L, WANG H, ZHENG T, et al. Exploring the influence of conductive graphite on hydroxyl ammonium nitrate (HAN)-based electrically controlled solid propellant [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2020, 45(11): 1-10.
- [26] KOEHLER B, LANGHENRY M T, SUMMERS M H, et al. Electric propellant solid rocket motor thruster results enabling small satellites [C]//30th Annual AIAA/USU Conference on small satellites, 2016.
- [27] 何志成. 改性PVA基改性固体推进剂及性能研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
HE Zhi-cheng. Research on composition/performance of modified PVA-based electrically controlled solid propellant [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [28] 何志成, 夏智勋, 胡建新, 李洋. 铝粉对高氯酸盐基电控固体推进剂感度的影响 [J]. 含能材料, 2020, 28(1): 52-55.
HE Zhi-cheng, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, et al. Effect of aluminum powder on sensitivity of perchlorate-based electrical controlling solid propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(1): 52-55.
- [29] 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. C Study on thermal decomposition and combustion performance of electrically controlled solid propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2588-2594.
- [30] 段炼. 电控固体推进技术探索研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
DUAN Lian. Exploration and research on electrically controlled solid propulsion technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [31] HE Z C, XIA Z X, HU J X, et al. Thermodynamic properties of polyvinyl alcohol binder of electrically controlled solid propellant [J]. *Journal of Polymer Research*, 2019, 26(9): 219.
- [32] GNANAPRAKASH K, YANG M, YOH J J. Thermal decomposition behaviour and chemical kinetics of tungsten based electrically controlled solid propellants [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 139(3): 2187-2195.
- [33] MA X Y, JIN S H, XIE W X, et al. A novel green electrically controlled solid propellant with good electrical response and high energy performance [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 641: 128550.
- [34] KLINGENBERG G, FRIESKE H J, ROCKSTROH H. Electrical ignition of HAN-based liquid propellants [R]. ADA226314, 1990.
- [35] KOH K S, CHIN J, WAHIDA K. Role of electrodes in ambient electrolytic decomposition of hydroxylammonium nitrate (HAN) solutions [J]. *Propulsion and Power Research*, 2013, 2(3): 194-200.
- [36] KUO B. A study on the electrolytic decomposition of HAN-based propellants for microthruster applications [D]. The Pennsylvania State University: Mechanical Engineering, 2010: 18-32.
- [37] HUA M, KHARE P, RISHA G, et al. Decomposition and ignition of HAN-based monopropellants by electrolysis [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA, 2013.
- [38] KHARE P, YANG V, MENG H, et al. Thermal and electrolytic decomposition and ignition of HAN-water solutions [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 187(7): 1065-1078.
- [39] SAWKA W N. Solid state digital propulsion cluster thrusters for small satellites, using high performance electrically controlled extinguishable solid propellant [C]//The 19th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2005.
- [40] HIATT A, FREDTICK R A. Laboratory experimentation and basic research investigating electric solid propellant electrolytic characteristics [C]//AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Confer-

- ence, AIAA, 2016.
- [41] BAIRD J K, LANG J R, HIATT A T. Electrolytic combustion in the polyvinyl alcohol + hydroxylammonium nitrate solid propellant [C]//52nd AIAA/SAE/ASEE joint propulsion conference, 2016.
- [42] 王新强. 电控固体推进剂动力装置技术研究[D]. 西安: 动力技术研究院, 2017.
WANG Xin-qiang. Research on technology of electrically controlled solid propellant device [D]. Xi'an: Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, 2017
- [43] 全瑞杰, 王志强, 邹涛, 等. 基于正负交错螺旋型单端面电极的电控固体发动机试验验证[C]//第六届空天动力联合会电推进技术, 2021: 3317-3324.
GONG Run-jie, WANG Zhi-qiang, ZHOU Tao, et al. Experimental verification of electrically controlled solid rocket motor based on positive-negative staggered helical single-end electrode [C]//6th China Joint Conference on Aerospace Propulsion, 2021: 3317-3324.
- [44] BAO L, WANG H, WANG Z, et al. Controllable ignition, combustion and extinguishment characteristics of HAN-based solid propellant stimulated by electric energy [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 236:111804.
- [45] 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.
- [46] 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 smulation ignition characteristics of electric solid propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(3):313-318.
- [47] GLASCOCK M S, JOSHUA L R. Plasma plume characterization of electric solid propellant pulsed microthrusters [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(4): 1-11.
- [48] GLASCOCK M S, ROVEY J, POLZIN K A. Impulse measurements of electric solid propellant in an electrothermal ablation-fed pulsed plasma thruster [C]//AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, AIAA, 2019.
- [49] GLASCOCK M S, ROVEY J L, POLZIN K A. Impulse and performance measurements of electric solid propellant in a laboratory electrothermal ablation-fed pulsed plasma thruster [J]. *Aerospace*, 2020, 7(6): 1-19.
- [50] 程红波, 陶博文, 庞爱民. 电控固体推进剂(ESP)燃烧机理的探索研究[C]//中国宇航学会固体火箭推进专业委员会第三十二届年会, 2015.
CHEN Hong-bo, TAO Bo-wen, PANG Ai-ming. Research on combustion mechanism of electrically controlled solid propellant (ESP) [C]//The 32nd Annual Meeting of the Solid Rocket Propulsion Professional Committee of the Chinese Aerospace Society, 2015.
- [51] 黄印, 张小平, 庞爱民, 等. 新型智能化电控固体推进剂技术研究进展[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会, 2019.
HUANG Yin, ZHANG Xiao-pin, PANG Ai-ming, et al. Research of new intelligent electrically controlled solid propellant technology [C]//The 40th Technical Seminar of the four Professional Information Network of China Aerospace and the Three conference of Aerospace Propulsion, 2019.
- [52] BECKSTEAD M W, PUDUPPAKKAM K, THAKRE P, et al. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(6): 497-551.
- [53] DUAN B R, ZHANG H N, HUA Z H, et al. Burning characteristics and combustion wave model of AP/AN-based laser-controlled solid propellant [J]. *Energy*, 2022, 253: 124007.
- [54] 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.
- [55] KOH K S, CHIN J, WAHIDA K. Role of electrodes in ambient electrolytic decomposition of hydroxylammonium nitrate (HAN) solutions [J]. *Propulsion and Power Research*, 2013, 2(3): 194-200.
- [56] 田维平, 雷晓龙, 唐敏, 等. 固体动力智能化发展技术展望 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44(2): 146-150.
TIAN Wei-ping, LEI Xiao-long, TANG Min. Prospect of the intelligentized solid propulsion technology [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2021, 44(2): 146-150.
- [57] 马宝印, 李军伟, 王兴起, 等. 针栓变推力固体火箭发动机动态响应特性研究 [J]. 推进技术, 2020, 41(10): 2161-2172.
MA Bao-yin, LI Jun-wei, WANG Xin-qi, et al. Simulation on dynamic response characteristics of pintle variable thrust solid rocket motor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10): 2161-2172.
- [58] RAJAK R, CHAKRAVARTHY S R, GANESAN S. Measurement of admittance and acoustic augmentation of burning rate of composite solid propellants using laser doppler velocimetry [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4391-4399.
- [59] GUPTA G, JAWALE L, BHATTACHARYA B, et al. Various methods for the determination of the burning rates of solid propellants an overview [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(3): 593-620.
- [60] KUMAR P, VARSHNEY M, MANASH A. Combustion performance studies of aluminum and boron based composite solid propellants in sub-atmospheric pressure regimes [J]. *Propulsion and Power Research*, 2019, 8(4): 329-338.
- [61] 赵泽敏, 固体火箭冲压发动机燃气流量调节控制系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZHAO Zhe-min. Research on gas flow control system of solid rocket ramjet [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [62] 何娜, 张维海, 乔小平, 等. 某单室双推力发动机串联装药固体推进剂界面力学性能分析 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44(4): 473-478.
HE Na, ZHANG Wei-hai, QIAO Xiao-ping, et al. Interfacial mechanical properties of the tandem solid propellant of single-chamber dual thrust motor [J]. *Journal of Solid Rocket*

- Technology*, 2021, 44(4): 473–478.
- [63] GNANAPRAKASH K, YOH J J. Understanding the pyroelectric combustion behaviour of metallized electrically controlled solid propellants [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(4): 5677–5686.
- [64] JINISHA B, FEMY A F, ASHIMA M S. Polyethylene oxide (PEO) / polyvinyl alcohol (PVA) complexed with lithium perchlorate (LiClO_4) as a prospective material for making solid polymer electrolyte films [J]. *Materials Today Proceedings*, 2018, 5(10): 21189–21194.
- [65] YASSIN A Y. Impedance, structural and thermal analyses of polyvinyl alcohol/polyvinyl pyrrolidone blend incorporated with Li^+ ions for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 754–767.
- [66] PUTRI R M, FLOERI O, MAYANGSARI T R, et al. Preliminary study of electrochemical properties of polyethylene oxide (PEO) and polyvinyl alcohol (PVA) composites as material for solid polymer electrolyte [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44(3): 3375–3377.
- [67] 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.
- [68] GOBIN B, HARVEY N, YOUNG G. Combustion characteristics of electrically controlled solid propellants using polymer electrolytes [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 244: 112291.
- [69] LI Y, XIA Z X, MA L K. Ignition and extinction characteristics of electrically controlled solid propellants [J]. *Journal of propulsion and Power*, 2022, 39(3): 340–350.
- [70] GNANAPRAKASH K, Daehong L, YOH J J, et al. Combustion characteristics of lithium perchlorate-based electrically controlled solid propellants at elevated pressures [J]. *Thermochimica Acta*, 2023, 720: 179421.
- [71] WANG S Z, LYU J Y, HE W, et al. Thermal decomposition and combustion behavior of ion conductive PEO-PAN based energetic composites [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 230: 111421.
- [72] WANG Z W, XIE H M, XIANG S J, et al. Multi-stage combustion characteristics of sodium perchlorate/lithium perchlorate-based electrically controlled solid propellant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 456: 140958.
- [73] ZAMIR I, BEN R M, GANY A, et al. Investigation of electrically controlled ammonium nitrate-epoxy solid propellant at high pressures [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, 46: 477–483.
- [74] KHORUZHII I V, KLYAKIN G F, TARANUSHICH V A, et al. A study of the electrothermal method for control over combustion velocity under atmospheric pressure of energetic condensed systems based on ammonium nitrate [J]. *Russian Journal of Application Chemistry*, 2007, 80: 1295–1299.
- [75] KHORUZHII I V, KLYAKIN G F, TARANUSHICH V A, et al. Electrothermal method for controlling the ballistic characteristics of energetic condensed systems based on ammonium nitrate [J]. *Russian Journal of Application Chemistry*, 2008, 81, 61–66.

Research Progress on Ignition, Combustion and Extinction Characteristics of Electrically Controlled Solid Propellant

LI Yang, XIA Zhi-xun, MA Li-kun, NA Xu-dong, FENG Yun-chao

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Electrically controlled solid propellant (ECSP) has the characteristics of multiple ignitions and controllable burning rate, and can be widely used in propulsion systems from micro to macro. The research on ECSP with ammonium nitrate, hydroxylamine nitrate and perchlorate as oxidants was summarized at home and abroad, especially the characteristics of ignition, combustion and extinction for ECSP based on hydroxylamine nitrate and perchlorate were emphatically reviewed. Meanwhile, the effects of voltage, pressure and metal additives on the burning rate adjustment of ECSP were analyzed, and the mechanism of electric energy in the ignition and combustion process of ECSP was discussed. Furthermore, some suggestions were put forward for further in-depth study on the ignition, combustion and extinction mechanism of ECSP: study the chemical reaction mechanism on the solid and gas phases of ECSP, establish the model and framework of the reaction mechanism for ignition, combustion and extinction; explore the effect of electrode arrangement and electrode configuration on the combustion efficiency of ECSP and the relationship between ECSP formula and electrical conductivity systematically, and seek the method to decrease the interface resistance between electrode and propellant. Finally, optimizing the formulation of high-performance ECSP, perfecting the combustion reaction mechanism and burning rate adjustment mechanism of ECSP, and raising the pressure threshold of ECSP are the keys to the design, application and performance regulation of electronically controlled solid rocket motor.

Key words: electrically controlled solid propellant; ignition characteristics; combustion performance; hydroxylamine nitrate; perchlorate group; burning rate regulation

CLC number: TJ55;O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023018

Grant support: Key Laboratory of Equipment Pre-research Foundation Project of China (No.6142701200102) and Natural Science Foundation of Hunan Province, China (No.2020JJ4665)

(责编:王馨逸)