

DOI: 10.11943/CJEM2025179

文章编号: 1006-9941(2025)08-0817-03



高性能复合固体推进剂的发展思考

导弹是实现精确打击、快速响应和战略威慑的核心装备,其性能提升依赖于动力系统。复合固体推进剂凭借能量密度高、贮存安全性好、适应性强等优势,已成为导弹动力系统的主流。随着新材料设计、制备工艺、仿真模型、人工智能等技术的快速发展,复合固体推进剂正从传统功能向高性能、多功能、智能化方向发展,对加速装备升级换代、增强国防力量具有重要意义。

一. 发展现状

复合固体推进剂跨越式发展的关键阶段是在近七、八十年间。这一时期,新型固体推进剂不断涌现,最为典型有聚硫推进剂、丁羧推进剂、丁羟推进剂,以及以硝酸酯增塑的聚醚推进剂(NEPE)。目前,推进剂的研究以现有材料的极致应用为主,以高能量、高燃速、高安全、强环境适应等为重点方向。

高能量: 高能量固体推进剂能够增加导弹的射程,实现导弹的轻质化和小型化,是未来相当一段时间内的发展主线,而新型高能或超高能材料则有望使高能量固体推进剂的标准理论比冲超过 300 s。目前,我国已形成了多代高能固体推进剂体系,技术路线包括以聚叠氮缩水甘油醚(GAP)为黏合剂、硝酸酯为增塑剂、在含能添加剂中引入六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)、环四亚甲基四硝胺(HMX)、在金属燃料中引入储氢材料三氢化铝(AlH_3)等(表 1)。这些技术路线使推进剂实测标准比冲从 255 s 提高至 265 s,进一步引入二硝酰胺铵(ADN)、铝锂合金等材料,则比冲可超过 270 s。

表 1 高能固体推进剂技术路线

	国内第一代	国内第二代	国内第三代	国内第四代	国外高能推进剂
黏合剂	PET/PEG	GAP	GAP	GAP	GAP 等
含能添加剂	HMX	CL-20	CL-20	ADN、CL-20	ADN、CL-20 等
金属燃料	Al	Al	Al、 AlH_3	Al、 AlH_3 、铝锂合金	Al、 AlH_3 、铝锂合金、其它高能量密度材料
实测比冲	~255 s	~260 s	~265 s	~270 s	~275 s

高燃速: 高燃速固体推进剂无需复杂的药柱燃面结构设计,即可在瞬间产生较大的推力,满足导弹高机动性、高精度、高反应速度的要求,因此高燃速固体推进剂的研制和应用一直是推进剂发展的重点。通过复合催化体系、二茂铁衍生物、碳硼烷衍生物、超细粒子、快燃物、纳米金属粉等多条技术途径(表 2),推进剂燃速可以达到几十、几百,甚至上千。但随着燃速的提高,推进剂的安全性能急剧下降,使工程应用的高燃速推进剂燃速上限约 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与国际高燃速固体推进剂相比,我国研制的固体推进剂燃速水平与之相当,但国内对燃烧调控与机理研究却较为薄弱。

高安全: 能量与安全是制约推进剂技术发展的“双刃剑”。在追求高能量、高燃速时,首先要保障安全。因此,北约国家研制了多种低易损性/钝感推进剂并应用于战术导弹。法国 SNPE 公司以 TMETN 取代 NG 制备了钝感双基推进剂,其撞击感度试验结果为无反应,爆轰试验为不爆轰,隔板试验为 50 片小于 70 片的要求,达到了美国

表2 高燃速固体推进剂技术路线

主要技术途径	燃速/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
采用铅-铜-碳黑三元复合催化剂	~ 42
4,4-二(二茂铁基)-1-戊醇和3,3-二(二茂铁基)异氰酸酯	~ 80
二茂铁的聚丁二烯树脂预聚物	~ 70
正己基碳硼烷	~ 145
石墨纤维	由 $76\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (14MPa) 提升至 $150\sim 230\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (14MPa)
超细氧化剂	~81 (14MPa)
高氯酸铵/极细金属粉	500 ~ 760 (14MPa)
快燃物	160 ~ 220
铜或铅的有机金属化合物、微孔氧化剂	1000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上

国防部的 1.3 级标准。美国加州 NAWC 武器分部和聚硫公司合作,采用硝酸酯/聚醚粘合剂体系,降低硝胺含量,增加 AP 含量,研制出改性 NEPE 推进剂配方,该推进剂不仅保持了 NEPE 推进剂优异的力学性能、粘结性能,而且感度低、价格低,在慢烤燃反应方面性能较好,且具有较低撞击和冲击波感度。此外,日本通过多种方法研究了 GAP 复合推进剂的感度性能,分析了 HMX、AN、AP、硝酸酯等组分对感度特性的影响,发现当 HMX 含量低于 15% 时,该推进剂危险等级属 1.3 级,且理论比冲达到 $2512.2\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。英国以含能聚合物 ORP-2(端羟基硝胺聚酯)为黏合剂, TMETN、BTTN 和 TEGDN 为增塑剂(增塑比 3.6), AN 作氧化剂,研制了 1.3 级微烟推进剂。

强环境适应:为了适应航天的发展需求,在宽温度范围($-80\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)、宽压强范围($1\sim 50\text{ MPa}$)下,推进剂应具有稳定的力学、燃烧、老化等性能。目前,高能推进剂的使用温度范围为 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,压强指数在 0.5 以上,较高,限制了其多场景的使用。丁羟推进剂的使用温度范围为 $-60\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用低玻璃化温度黏合剂或增塑剂,如高顺式丁羟胶,可拓宽使用温度下限,但是丁羟推进剂在高压段下压强指数易激增,影响了它的强环境适应性。

二. 发展瓶颈

固体推进剂的发展也面临多方面的瓶颈,主要表现在以下 4 个方面:

1、能量和安全的矛盾,制约了能量性能的进一步提升。高能量追求的是能量释放的极限效率,而高安全追求的是能量释放的可控边界。两者在化学物质的活性、反应速率、环境适应性等维度上存在根本性冲突,提升一方必然以牺牲另一方为代价。

2、高性能和低成本之间的矛盾,制约了高性能推进剂的大规模制造。现有高性能推进剂的生产成本高,一方面,昂贵的原材料价格使得高性能推进剂的成本居高不下,如某高能推进剂原材料成本约 6000 RMB/kg;另一方面,制造工艺繁琐也增加了推进剂的制造成本。

3、新配方研发周期长与应用需求急之间的矛盾,制约了导弹的更新换代。固体推进剂的设计需要考虑能量、力学、燃烧等综合性能,成型过程反应复杂,反应过程易受到人为和环境因素干扰,严重制约了其自动化、数字化发展,导致推进剂制备及试验过程参数感知困难,黑箱特征明显,难以建立准确的制造过程反应状态与调控的映射模型。依靠传统经验主导的“循环试错”推进剂研发模式,存在研发周期长、成本高、安全风险大的问题。当前研发模式已难以满足我国新一代导弹的发展需求,以更科学的方法设计、制备高性能推进剂势在必行。

4、现有推进剂性能不满足未来智能动力系统的需求。随着固体动力技术发展模式的变化,对固体动力提出了“三自、三变、三高”的要求,即自主感知、自主决策、自主调控;变工况、变构型、变燃烧模式;高适变、高效能、高矢量调控。这需要能量按需管控、状态实时反馈、功用实时调节的智能固体动力,对此,现有推进剂还有较大差距。

三. 发展建议

针对固体推进剂所面临的瓶颈,后续发展过程中有以下建议:

1、针对高能量和高安全的矛盾,后续能量性能提升研究中,一是构建能更好适应固体推进剂的高能氧化剂和燃料的原材料体系。充分考虑焓值、密度、有效氧含量和燃烧产物分子量对推进剂密度、比冲、燃烧效率的影响,开展高能量密度氧化剂、亚微米级金属基燃料及新型复合微单元的合成研究,在材料设计、制备及表征技术等方面有所突破,从原材料设计层面提高推进剂燃烧效率,减少含能材料的使用,提高安全性能。二是使用高品质球形固体颗粒,如高品质超细氧化剂替代普通超细氧化剂,以提高颗粒表面的规整性,减少颗粒之间碰撞摩擦产生的热点,降低机械感度。三是突破推进剂传统的设计和制造理念,由提升比冲为主的发展模式变革为提升密度比冲的发展模式。以现有固体推进剂材料体系为基础,优先选用低感度的原材料,减少低密度的组分,通过固体含量的提升,植入新型高能量密度、高燃烧效率燃料,结合模压技术,形成“宏观均匀、微观有序”的高能量密度固体推进剂。在推进剂能量性能(密度比冲)不降低,甚至升高的前提下,提升安全性能。

2、针对高性能和低成本之间的矛盾,一是通过高能量密度固体推进剂的研制,优先选择常规低成本原材料,结合配方优化技术,实现高密度比冲的同时,维持较低的原材料成本。二是改革推进剂制造模式,由一次性大当量的(混合+浇注)模式转变为多次小当量(压制+组装)模式。一方面,减少生产环节,采取并行制造模式,有效缩短固体推进剂的制造时间;另一方面,采取模块化药柱提升了柔性制造能力,提高发动机装药的通用性。多措并举,不仅提高了推进剂的制造效率,而且降低了制造成本。

3、针对新配方研发周期长与应用需求急之间的矛盾,开展“推进剂设计大模型+高通量自动化制备+智能表征测试”高效研发系统研究,突破固体推进剂领域数据稀缺、多源异质且高度专业化条件下的大模型训练微调,物质-材料-配方全过程关键数据靶向收集,高通量自动化制备与状态评估,基于高通量自动化实验和人类专家反馈的强化学习等关键技术,构建推进剂设计智能体,实现固体推进剂性能显著提升、研发成本和周期大幅降低、本质安全度明显跃升,革新传统推进剂行业研发范式,为新一代导弹提供技术支撑。

4、针对现有推进剂性能不满足未来智能动力系统的矛盾,探索形成燃烧性能实时按需调控和装药结构可按需重构的技术路径。如通过在推进剂中添加少量调控材料,使推进剂具有全温度范围燃速恒定或燃速按需实时主动调控,装药结构变化的自主感知、修复和主动调控,实现燃速温度敏感系数接近于零、燃速场控调节比大于10、装药结构自感知、自修复、自评估等目标,推动固体动力系统智能化发展。

四. 总结

导弹的智能化是国防科技博弈的主战场。因此,推进剂性能的跨代提升对国防力量提升有着重要的作用。后续,为了能够形成新域新质战斗力,一方面需要在现有材料的基础上,深化高能量、高燃速、高安全、强环境适应的研究;另一方面需要突破推进剂材料及配方的设计和制造理念,发展高能量密度、低成本、智能化的推进剂。

毛成立¹, 郑 剑²

1. 上海航天动力技术研究所

2. 中国航天科技集团有限公司