

DOI: 10.11943/CJEM2023188

文章编号: 1006-9941(2023)09-0859-03



## 新型推进剂的制备与能量调控

推进剂作为火箭发动机的能量来源,一定程度上决定了火箭发动机的能量水平与工作方式,对导弹武器远程投送、机动突防能力至关重要,更是推动火箭动力装备升级换代的核心技术之一。现有固体火箭发动机在推力按需输出方面存在瓶颈,无法满足导弹武器装备智能化、高机动、快速突防的发展需求。基于固体燃料可控能量释放的推进剂能量调控方法是提高推进剂能量输出可调可控性,优化发动机推力分配,实现导弹射程和机动性提升的有效尝试。

### 1. 固体燃料可控能量释放的基本内涵

固体燃料可控能量释放是指通过外界条件作用和改变燃料组成等措施来控制固体燃料能量释放过程,可控对象主要包括能量释放强度、燃烧速度和产物特性(温度、颗粒物、气体分子量等)等。传统固体火箭发动机一旦点火,发动机就一直工作直到推进剂完全消耗,推力按需输出一直是先进装备的重大需求和严峻技术挑战。尽管多脉冲发动机、喉栓与涡流阀等变推力发动机可以在一定程度上实现推力调控,但是还不能满足智能弹道对推力随控的要求。因此,从发动机性能输出层面上讲,固体燃料可控能量释放是指借助特定固体燃料燃/熄可控与燃速可调的特性达到发动机推力随控的目的,即实现发动机多次启停与推力实时调节。另一方面,通过改变燃料组元的微观结构,例如在铝粉等燃料颗粒表面构筑界面反应层,实现微观燃烧过程和凝相燃烧产物粒度的调控,也是固体燃料可控能量释放的研究范畴。

固体燃料可控能量释放技术不仅可以用于导弹主动力、姿轨控制力和空间动力,在液体火箭发动机燃料贮箱增压系统、甚至是汽车安全气囊上都有广阔的应用前景。因此,固体燃料可控能量释放技术是军民两用的基础性、前沿性技术。

### 2. 有关固体燃料可控能量释放研究的几点思考

#### 2.1 推进剂组元的能量可控释放

以固体推进剂中铝粉的燃烧为例,铝粉是目前固体推进剂中普遍使用的金属添加剂,铝的加入可提高推进剂密度、提高发动机比冲和抑制高频不稳定燃烧,在现代固体火箭发动机中被广泛采用。一般在固体推进剂中铝的质量含量在17%左右,其燃烧过程和燃烧产物特性对固体发动机的工作特性具有重要的影响。铝凝相产物的粒度分布对推进剂的能量发挥程度、绝热结构工作安全性和发动机燃烧稳定性都有重要的影响。通过创新手段改善铝的表面团聚、降低凝相产物粒度、提升铝的燃烧效率对发动机性能意义重大。

近年来,采用具有良好粘接能力的界面材料(如聚多巴胺),在铝表面形成界面材料包覆层,进而实现金属燃料的表面功能化方面的研究取得了很好的进展。在界面材料的基础上,通过溶剂热等方法在铝粉表面可生长多

种氧化剂与催化剂,构建界面化学反应层,实现对铝粉点火温度、燃烧速率、反应产物的调控,从而克服铝粉在推进剂中(尤其是低燃速推进剂)燃烧效率低、燃烧产物烧结的问题。研究发现,该方法不仅能够调控铝的凝相燃烧产物分布,一些表面生长氧化剂后的金属燃料还能起到降低高压下压强指数的效果,为高压下推进剂的安全燃烧提供了新的调控方向。含能燃烧催化剂掺杂核壳型铝基复合燃料,在含能燃烧催化剂有效提高铝基燃料的燃烧效率和能量密度的基础上,直接将催化剂掺杂在复合燃料壳层中,有效提高了催化剂与氧化剂作用面积,进而提高其催化效率。

以上研究成果在实验室制备的推进剂试件中展示了良好的调控性能,但在真实固体推进剂或其他含能材料上实现应用,还需要验证核壳型铝基复合结构的在剪切力作用下的结构完整性、以及与其他组分的相容性问题。

## 2.2 基于电控的固体推进剂能量可控释放

采用电、磁和等离子体等物理场对推进剂的能量释放进行调控目前引起了研究者的广泛关注,这里重点讨论可燃可熄、燃速可调节的电场控制分解固体推进剂(简称电控固体推进剂)。目前,关于电控固体推进剂的研究已经证实该类型推进剂在多次脉冲及推力实时调控上的可行性,但是仍存在以下问题:1)国内外电控固体推进剂普遍采用硝酸羟胺、高氯酸羟胺等作为电控固体推进剂关键组分,主要存在推进剂比冲相对较低、高压下燃烧可控难度大和推进剂密度偏低等问题,其根本原因在于硝酸羟胺、高氯酸羟胺等电控组分难以进行分子改性、含水并且难以通过强化学作用将其接入推进剂固化网络;2)由于电控固体推进剂燃烧时需要电极持续与燃面接触以提供维持其燃烧所需的电能,因此需要设计可移动电极或者依靠推进剂移动来实现持续接触,这给高温电极材料的研发以及发动机机构匹配设计带来挑战;3)关于电控固体推进剂的点火、燃烧理论研究相对较少,目前尚无关于该类型推进剂的体系化理论模型,点火与燃烧过程电能与化学反应之间的耦合作用机制尚不清楚。

开发新型电控组分替代传统硝酸羟胺等材料是进一步推进固体推进剂能量可控释放研究的关键。基于柔性支链的碳氢燃料具有相对较高的热值与热沉,通过适当改性赋予其电控性能后可获得具有电控点火、自熄火和高热值特性的电控燃料。与传统电控固体推进剂相比,上述电控型燃料加高氯酸盐体系在能量密度、可调可控性及推进剂密度上具有一定的优势。此外,上述燃料分子具有可设计性,因此可在其分子中引入反应基团,成链后形成完整的导电网络,避免非高能的导电物质加入。同时,含有长碳链的燃料分子可通过反应官能团形成固化网络实现推进剂药浆从液态向固态的转化,最终得到完整的固体推进剂。因而与传统电控固体推进剂固化工艺相比,避免了聚乙烯醇引入导致的推进剂能量性能下降,以及液态氧化剂未与固化网络形成强化学键导致的密度低、力学性能差的问题。

从能量可控释放机制上讲,要解决电控固体推进剂的点火延迟和燃烧效率问题,需要降低点火过程中热作用所占比重,提升电化学作用所占比重。通过电化学作用首先将燃料电解生成小分子量的还原性气体,将氧化剂电解生成氧化性气体,再通过两者的混合实现燃烧,点火过程才能更加迅速、反应更加彻底。

电控固体推进剂技术的突破对各种类型的固体火箭发动机性能的跃升都会起到极大的推动作用,希望加强人、财、物等方面的投入,促进其技术快速发展。

## 2.3 能量可控释放与非稳态燃烧

固体推进剂的能量可控释放是典型的非稳态燃烧过程,深刻认识非稳态机理有助于更好地开发该项技术。目前,固体燃料可控能量释放方面的研究方法 with 常规推进剂的配方研究比较接近,主要依赖经验和灵感,还没有

形成理论支撑技术发展的局面。精细化燃烧研究需要先进的燃烧诊断方法,固体推进剂的燃烧具有高温、高压、烟雾环境的特点,一般的商用燃烧诊断设备很难直接应用于推进剂燃烧的研究。并且,固体推进剂的能量可控释放过程涉及电、磁等外界条件作用,传统燃烧诊断设备已不能满足该类型推进剂的测试要求。因此,需要开发针对固体推进剂可控能量释放的先进燃烧诊断方法。

此外,固体推进剂的能量可控释放过程涉及多次点火、熄火以及燃速调节,多次转换的燃烧模式使固体推进剂处于非稳态燃烧过程,对发动机推力的精准调节与稳定输出带来挑战。设计具有快速响应并稳定燃烧的燃料、优化固体推进剂配方是实现能量可控释放型固体推进剂应用的关键。但是,目前关于固体推进剂可控能量释放的基础研究相对薄弱,尚未形成体系的理论基础,难以支撑电控型燃料、功能材料等的研发工作。

因此,进行学科交叉融合,发展先进的高动态、细观燃烧诊断技术,夯实基础理论研究,在精细试验数据的基础上掌握非稳态燃烧机理,建立燃烧模型,进而支撑能量可控释放技术的研究,需要多学科、多单位协同发力。

### 3. 结语

固体燃料可控能量释放技术是高性能武器装备的迫切需求,实现这一领域的突破,需要从几个维度开展工作:首先,固体燃料可控能量释放组分或推进剂的研究需要与发动机的需求相结合,不一定所有性能尽善尽美才能走向应用,不同的可控能量释放特征可能有不同的应用场景;其次基础研究与应用研究相结合,在理清能量可控释放机理的基础上开展技术研究工作,提升行业的整体研究水平;最后,开展化学、物理学、仪器科学与技术、工程热物理和航空宇航科学与技术等多学科交叉融合,协同发力,共同进步。

刘佩进<sup>1</sup>, 何伟<sup>2</sup>

1. 西北工业大学固体推进全国重点实验室

2. 四川大学空天科学与工程学院