



## 固体推进剂技术的创新与发展规律

固体推进剂技术从无到有,从低级到高级,遵循着自身发展的特殊规律。研究、分析和总结固体推进剂技术发展的规律及创新机制,有利于国内固体推进剂技术的进步,实现跨越式发展。

### 1. 固体推进剂技术创新规律

从发明黑火药到现在的高能固体推进剂,固体推进剂技术已经经历了数百年的发展,但真正使得固体推进剂技术产生翻天覆地变化的仅仅是二战后的数十年的时间,在这期间,新品种固体推进剂不断涌现。其中,聚硫推进剂、端羧基聚丁二烯推进剂(CTPB)、端羟基聚丁二烯推进剂(HTPB)和硝酸酯增塑的聚醚推进剂(NEPE)的开发成功,更是具有划时代的里程碑。图1显示了固体推进剂技术的发展历程。

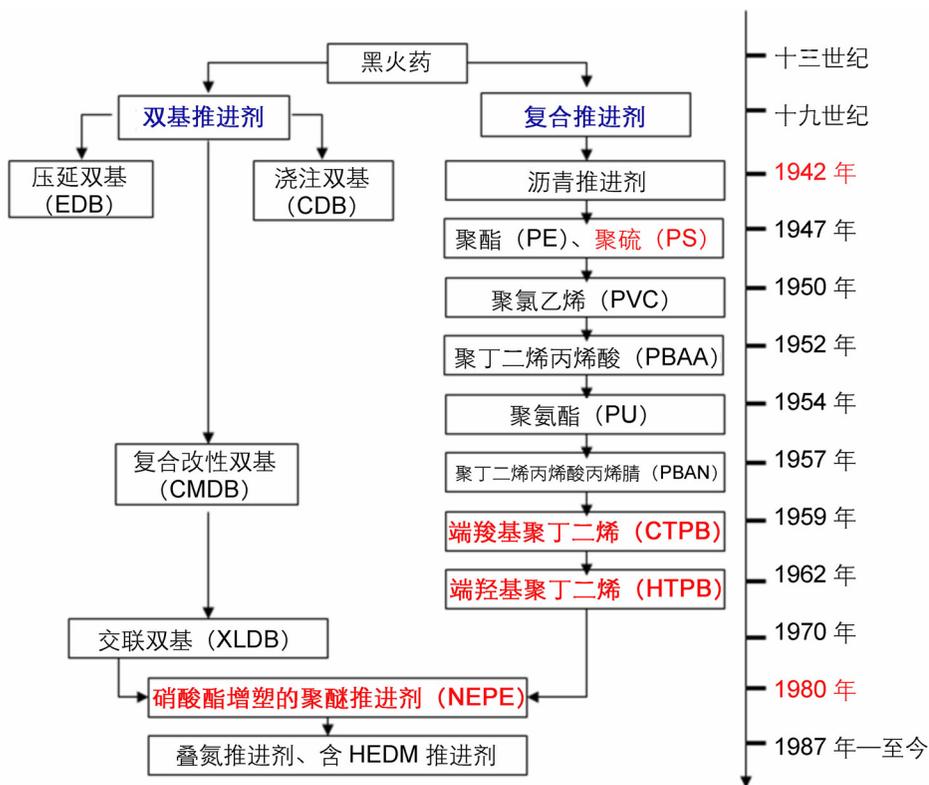


图1 固体推进剂发展历程

#### (1) 固体推进剂的技术发展规律

分析固体推进剂的更新换代历程和技术发展,有以下规律:

- ① 能量始终是推进剂追求的目标;

- ② 粘合剂一直是推进剂发展的主线;
- ③ 推进剂配方设计思路不断更新;
- ④ 交叉、互补促进推进剂新品种产生;
- ⑤ 宇航、战略、战术型号的新需求推动了推进剂技术的发展。

随着高性能武器系统和航天发射的"需求牵引",高能量、低特征信号、低易损、低成本、低污染、灵活的能量管理和高可靠性成为当前及未来一段时间固体推进剂新的发展方向。

## (2) 固体推进剂的技术创新规律

### ① 能量主线论

固体推进剂技术的重大创新发展大都有利于提高推进剂能量。归结起来,即有利于提高推进剂燃烧温度( $T_c$ ),降低燃气平均分子量( $\overline{M_g}$ )。如:

第一次创新 硝化棉吸收大量硝酸酯,提高 $T_c$ ,使双基推进剂能量显著高于黑火药。

第二次创新 加入含能物质,如高氯酸铵(AP)、奥克托今(HMX)等,提高 $T_c$ 、降低 $\overline{M_g}$ ,提高推进剂能量。

第三次创新 加入大量金属铝粉等,提高 $T_c$ ,又一次显著提高了推进剂的能量。

第四次创新 引入新型高能或高能量密度物质,如叠氮粘合剂、六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)、二硝酰胺铵(ADN)、 $AlH_3$ 等,提高 $T_c$ 、降低 $\overline{M_g}$ ,使推进剂的能量又一次显著提高。

### ② 粘合剂牵引论

固体推进的发展总是以新粘合剂的成功应用为前提的,具体表现在:

第一次创新 高分子硝化纤维的出现,产生双基推进剂,使推进剂能量显著高于黑火药。

第二次创新 合成高分子的技术进步,聚硫橡胶、聚氯乙烯聚物的出现,导致了复合固体推进剂的产生。

第三次创新 合成高聚物技术的进一步发展,特别是聚氨酯化学工业的进步,产生了聚氨酯、聚丁二烯丙烯酸推进剂、聚丁二烯丙烯酸丙烯腈推进剂、端羧基聚丁二烯推进剂和端羟基聚丁二烯推进剂、NEPE推进剂等。

第四次创新 在固体推进剂的粘合剂中引入含能基团,产生含能粘合剂推进剂,如叠氮推进剂等。

### ③ 交叉融合论

跨学科、跨专业的交叉融合,使固体推进剂技术发生了一次又一次的飞跃,详见图2。

### ④ 能量输入论(或能量组合论)

火箭发动机的工作原理是具有动能的工质由喷管膨胀排出,利用作用力与反作用力定律推动火箭向预定方向运动。其关键是工质蕴涵能量的多少,如果其能量越高,推力就越大,火箭射程也越远。

工质一般是气体分子或离子,也可以是更小的微粒。输入工质的能量一般有化学能(如液体推进剂、固体推进剂等)、电能(如电推进)、磁能、光能、核能(核推进)等。因此,根据输入的不同能量形式,将产生不同类型的推进方式,如激光化学推进技术。

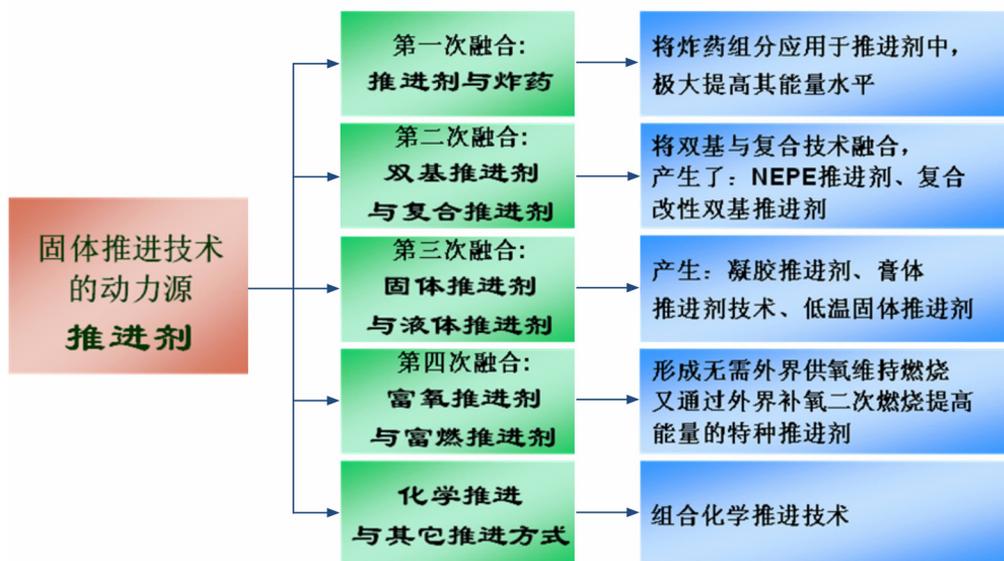


图2 学科融合对推进剂技术发展的促进作用

## 2. 国外固体推进剂技术现状及发展趋势

### (1) 国外战略导弹

世界上最先进的战略导弹是美国的三叉戟 II-D5 导弹和俄罗斯的布拉瓦导弹,分析其代表的固体推进剂技术发展的方向为:

- ① 高性能(高比冲、高力学性能,适应高压强工作);
- ② 强突防(速燃、能量管理);
- ③ 更高使用性能需求(高精度、环境适应性);
- ④ 长寿命需求。

### (2) 国外防空反导导弹

国外先进防空反导导弹正朝着"高压强、双脉冲、低易损"的方向发展,具有代表性的导弹型号有美国的 PAC-3、THAAD、SM-3 导弹和俄罗斯的 C-400、C-500 导弹,分析动力系统用固体推进剂呈现出的典型技术特点有:

- ① 采用超高压强技术实现能量提升;
- ② 用于双脉冲发动机技术实现能量管理;
- ③ 采用低易损、低残渣、低燃速推进剂提升安全性;
- ④ 高压强不稳定燃烧抑制技术。

### (3) 国外固体冲压导弹

美、欧、俄、日等国在固体冲压导弹技术方面开展了多年的研究、制订了详细的发展计划,一些型号即将装备部队,分析其固体推进剂技术发展方向主要有:

① 推进剂由早期的中能铝镁贫氧推进剂向高能量的含硼贫氧推进剂、碳氢无烟贫氧推进剂和 GAP 贫氧推进剂等方向发展。

② 由亚燃向超燃领域拓展成为了固体冲压发动机的重要发展方向。

#### (4) 国外运载火箭固体火箭或助推器

美、欧、俄、日等航天大国已成功应用了多种型号的全固体运载火箭和固体助推器,并不断升级,分析该领域应用的固体推进剂技术有以下特征:

① 国外固体运载用固体推进剂最大限度地采用战略导弹的成熟产品和成熟技术,快速形成具备一定运载能力的全固体运载火箭,并不断提高其可靠性。

② 固体推进剂普遍采用低燃速、低残渣、高比冲 HTPB 推进剂。

③ 低成本设计理念贯穿整个研发过程,低熔温热塑性固体推进剂技术有望得到应用。

### 3. 固体推进剂技术未来发展展望

目前,乃至未来相当一段时间内,固体推进剂技术将处于一个发展的平台区,这也很有可能是一个快速发展的孕育期。未来可能在以下三个方面将取得突破。

#### (1) 新型含能物质将取得突破

新型高能物质具有代表性的有:笼形富氮张力环化合物,激发态、亚稳态和原子簇、分子簇化合物,富氢化合物,氟氮类化合物等。高氮、全氮化合物以及氢原子工质的高效利用,将给固体推进剂技术的发展带来变革,推动比冲 300s 以上新型高能推进剂的研发步伐。

#### (2) 先进的高能固体推进剂配方将分阶段进步

随着高密度材料的成功应用,高能固体推进剂配方的进步将按照近期理论比冲达到 280 s、中期能量比 NEPE 高 10% 左右,理论比冲达到 290 s、远期能量较 NEPE 显著提高,理论比冲达到 300 s 以上的目标分阶段发展。

#### (3) 交叉融合技术不断推进新发展

跨专业、跨学科的深度交叉融合,将推动固体推进剂技术不断创新。

① 高能富燃料推进剂技术,引入新型高密度烃或显著改善硼粉的燃烧效率,而使固体冲压或超燃冲压发动机能量充分发挥。

② 高能膏体/凝胶推进剂技术,满足高能和灵活的能量管理双重作用。

③ 低温、热塑性弹性体固体推进剂技术(随温度发生可逆相态变化)。

④ 跨学科、跨专业的组合推进技术。

庞爱民,黎小平

中国航天科技集团公司四院 42 所

e-mail: ppam@tom.com