

我国液氧煤油发动机试车



“星舰”第一级并联33台猛禽发动机



# 液体火箭动力系统复用 下一步瞄准哪儿?

近日,由航天科技集团六院西安航天动力研究所自主研制的某型液氧煤油发动机实现重复飞行试验验证。由此,国内首次实现了液体火箭动力系统重复使用,标志着我国液体火箭发动机重复使用技术进入工程应用阶段。

放眼全球,随着可重复使用火箭技术日益成熟,技术难点被逐步攻克,各国已掀起新一轮发展热潮。那么可重复使用的液体火箭目前有哪些型号?未来发展趋势又会怎样呢?

## 回收复用难关多

液体火箭发动机作为航天运载器的主要动力装置,具有性能高、任务适应强、技术难度大、研制周期长等特点,堪称航天运载器上最复杂的产品之一。因此,液体火箭动力系统重复使用是实现航天运载器重复使用所必须突破的关键技术之一。

在世界主要航天强国中,美国在可重复使用火箭动力领域的科研实力最雄厚,应用经验也最丰富。早在20世纪80年代,美国就已经成功研制了能够重复使用的大推力液体火箭发动机,并作为航天飞机的主发动机。

航天飞机的主发动机使用液氢液氧推进剂,3台总共提供600多吨的推力,而且推力可在65%~109%范围内调节。这样设计是为了让航天飞机在点火和初始的上升阶段获得更大的推力,更容易飞起来并加速,而在最后的上升阶段,主发动机会减少推力,便于实现对入轨速度的精确控制。

2011年航天飞机退役之后,美国商业航天新势力承担起“重复使用,天地往返”的重任。其中,SpaceX公司的猎鹰9火箭革命性地实现了入轨级运载火箭第一级回收与重复使用。

2015年12月,猎鹰9火箭首次陆地成功回收一子级。2017年3月,猎鹰9火箭一子级首次重复使用发射。截至2022年9月,该火箭成功回收一子级130多次,单枚火箭一子级复用次数最多达14次,发射强度之高、可靠性和经济性之显著都令人惊叹。

成就猎鹰9火箭的技术基础是9台并联的梅林1D发动机。这款发动机是专门为可重复使用火箭设计的,采用了液氧煤油推进剂,单台海平面推力87吨,比冲275秒,具备多次点火能力。

与传统液体火箭发动机相比,梅林1D发动机最特殊的一点是实现了在39%~100%范围内推力调节,9台并

联则能实现总推力在4.3%~100%范围内调节,为火箭回收和重复使用奠定了坚实的基础。

此外,梅林1D发动机还被应用于猎鹰重型火箭,由27台并联构成了第一级,成就了这款现役运载能力最强的火箭,近地轨道运载能力达63吨。自2018年以来,猎鹰重型火箭已成功发射3次,但回收工作不是很顺利,可见液体火箭动力回收和重复使用的复杂性。

## 群雄争锋迎挑战

纵览各国,液体火箭动力系统重复使用技术吸引着众多航天业者投身其中,不惜挑战更大的难关,追求更高的指标。

据公开资料显示,我国某型液氧煤油发动机于2021年作为某飞行器主动力装置参加了首飞试验,经检测维护后,近日成功参加了重复飞行试验任务。

此外,我国已曝光了多款液体火箭动力系统回收方案和重复使用航天器计划,使用不同的推进剂和构型。一些发动机测试取得进展的新闻报道也证实,我国液体火箭发动机重复使用技术正在稳步推进。

美国SpaceX公司正在全力研发“星舰”,其近地轨道运力达到160吨级。同步推进的项目则是代号“猛禽”的液氧甲烷发动机,其最新型号的海平面推力达300吨,比冲334秒,能够在20%~100%范围内推力调节。

“猛禽”难度最大、潜力最优的指标是燃烧室的超高压,已超过了之前在这方面最出色的液体火箭发动机——俄罗斯RD-180。而超高的燃烧室压可以让“猛禽”有更高的推重比,目前的版本达到了107:1,后续提升空间仍然很大。

目前,“星舰”第二级已多次完成有限高度试飞,并联33台“猛禽”的第一级很快将进行全面点火测试,推动“星舰”

尽早尝试首次入轨发射。

美国可重复使用火箭严重挤压了俄罗斯和欧空局传统火箭的市场份额,迫使俄、欧也重视研发可重复使用火箭及其液体发动机。

阿穆尔火箭是俄罗斯开发的,可重复使用两级中型火箭,预计将于2026年从东方航天发射场首飞。按设计,该火箭第一级可重复使用10次,并联合5台RD-0169液氧甲烷发动机。在重复使用第一级时,阿穆尔火箭预计能将9.5吨载荷送入近地轨道,在一次性使用时,近地轨道运载能力约12吨。

欧空局在阿里安6火箭的基础上规划了可重复使用火箭,第一级将采用7台或9台普罗米修斯液氧甲烷发动机。论证中的火箭构型直径分别为5.4米和4.6米,可捆绑液体助推器,进一步增大运载能力。

## 三足鼎立新趋势

可重复使用运载火箭的出现,深远地改变了世界航天运输领域的格局和发展方向。液体火箭动力系统追求可重复使用,兼顾低成本和高可靠性,已经成为各国研发新一代液体火箭发动机的共识。

那么未来的液体火箭动力系统会选择什么推进剂呢?从发展趋势来看,液氧甲烷似乎成为新一代可重复使用火箭动力系统的主流选择。因为液氧甲烷推进剂具备比冲高、成本较低、清洁环保、维护使用方便等优点,适合发动机大规模生产和重复发射,本身也便于在太空中长期贮存,能有效减小发动机尺寸和质量。尤其是近年来越来越热门的地球与火星往返任务,液氧甲烷发动机有可能从火星原位资源利用试验

中受益,潜力巨大。

不过,液氢液氧发动机的高比冲、液氧煤油发动机的高可靠性等优势仍不容忽视,在某些任务中是不可或缺的,所以可重复使用液体火箭的技术路线有可能呈现三足鼎立的格局。

随着可重复使用火箭在未来逐渐成为主流,现有液体火箭动力系统的研发、制造、维护保障也面临变革。从效益出发,发动机有可能采用更多高强度、低重量的新型材料,创新低成本快速制造工艺,而快速多次启动性能也成为发动机的新需求。

总之,液体火箭动力系统重复使用优势明显,前途光明,不仅能降低航天发射成本,更好地服务于生产生活,更有望开拓航天探索的新领域。



猎鹰9火箭第一级与第二级分离示意图

欧空局正在测试普罗米修斯发动机。

## 相关链接

### 我国液氧煤油发动机攻克多项关键技术难题

液氧煤油发动机是我国新一代运载火箭的主要动力装置,具有高性能、大推力、无毒无污染等优点。该发动机从设计之初,部组件方案及总体布局按多次工作的要求开展论证,地面研制试验实现了单台发动机不下台重复试车8次。然而,可重复地面试车并不代表着发动机可以适应可重复使用,由于天地工作环境的差异性及各种保障条件的限制,液氧煤油发动机重复使用需要攻克的关键技术难题更多,主要有以下几个方面:

#### 多次点火技术

采用垂直起降的航天运载器都需要发动机具备多次点火能力。液氧煤油发动机采用了绿色、环保的推进剂组合,可在一次点火工作后进行吹除处理后,实现发动机重复点火工作,技术上具有重复使用能力。但航天运载器飞行时,无法实现和地面试验相同的吹除等保障条件,同时由于低温发动机点火准备阶段需对低温系统进行预先预冷,所以点火准备期的流程和地面也有较大差异。对于补燃循环液氧煤油发动机,这些制约条件将更加凸显,需要对发动机进行技术研究,优化发动机点火准备阶段的预冷流程,简化发动机关机后至点火前的吹除处理方案。

目前,我国补燃循环液氧煤油发动机已在地面试验实现了不间断三次点火启动,摸索出了重复点火工作间的吹除处理和预冷方法。

#### 重复使用检测维护技术

为了实现低成本,体现出发动机重复使用的价值,要求对返回后的发动机进行的检测项目越少越好,维护越简单越好,在健康状态评估的基础上尽量简化检测维护方案,最终实现发动机的低成本、短周期快速检测维护。

液氧煤油发动机通过发射场使用维护简化研究及重复使用相关维护处理技术研究,实现操作维护项目大幅度精简,首次实现低温火箭液氧加注后无人值守功能验证。

据《中国航天报》、央视新闻客户端、《武汉科技报》