



130吨级液氧煤油发动机 重复使用技术研究进展

吕发正¹ 张森¹ 杨永强¹ 李程¹ 李斌²

(1. 西安航天动力研究所; 2. 航天推进技术研究院)

摘要:130吨级重复使用液氧煤油发动机是某新型重复使用运载火箭的一子级主动力装置,满足火箭一子级垂直起降重复使用需求,具备两次点火启动、低入口压力二次启动、快速推力调节和健康监测等功能,并已完成多次重复使用试车考核,通过热试车初步验证了重复使用火箭发射和回收等飞行任务剖面。研制团队继承了120吨级高压补燃循环液氧煤油发动机的成熟技术和可靠性成果,提出发动机健康管理、寿命评估和维护维修等重复使用技术需求和发展方向,130吨级重复使用液氧煤油发动机能够快速满足我国垂直起降重复使用运输系统需求。

关键词:运载火箭;重复使用;液氧煤油发动机;关键技术

近年来,国内外可重复使用天地往返运输系统发展迅速,各类型飞行器概念、动力方案层出不穷。航天运载器正朝着高性能、无污染、低成本、重复使用的方向迈进。为满足未来载人登月和空间站运营需求,我国提出了登月载人运载火箭研制方案。在该火箭构型下衍生出的无助推构型某新型重复使用运载火箭用于执行空间站航天员及货物运输任务。火箭一子级具备垂直起降重复使用能力,采用先进的技术和创新设计打造我国重复使用天地往返运输系统。可重复使用运载火箭的核心是先进的可重复使用动力装置,基于垂直起降技术的重复使用火箭技术特点,要求发动机具备多次点火起动技术、低入口压力起动技术、大范围变推力技术、高可靠长寿命组件技术、维修维护与状态评估检测技术及健康管理技术等。

液氧煤油发动机在国外重复使用运载动力方案中的应用比较广泛,以“猎鹰”9火箭为代表的两级入轨垂直起降运输系统已发展成熟,并实现了16次重复使用飞行和回收。120吨级液氧煤油补燃循环发动机作为我国新一代运载火箭的主动力装置,具有高性能、大推力、无毒无污染等优点,已具备不下试车台重复试车能力,单台发动机地面累计工作时间达到飞行任务时间的10倍以上,是重复使用运输系统主动力装置的重要发展方向。与美国等航天强国相比,我国液体动力重复使用技术仍在起步阶段,尚未形成高效、规模化的技术发展规划与发展态势。

一、130吨级重复使用发动机研制概况

(一)研制历程

降低关键技术风险是目前重复使用运载器动力装置优选技术方案之一。130吨级重复使用发动机基于120吨级补燃循环液氧煤油发动机成熟技术研发而成,以130吨级泵后摆发动机为基础平台,可以满足新一代载人运载火箭的动力需求,具备两次起动、高空低入口压力自身起动、自主状态维持等功能。2022年11月,130吨级重复使用发动机完成首台整机原理演示验证热试车,并已开展了多次重复使用试车考核。

(二)技术方案及指标

130吨级重复使用发动机具备泵后摆功能,在燃

气主路设置燃气摇摆装置,并设置其他气液路摇摆补偿装置,仅通过推力室摇摆实现了推力矢量控制;增加了两次点火装置、控制与吹除气源装置等,满足火箭垂直回收需求。130吨级重复使用发动机的主要技术指标见表1。

表1 130吨级重复使用发动机的主要技术指标

参数	指标
海平面推力/kN	1250
海平面比冲/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2958
混合比	2.6
推力调节	65%~105%快速调节
摇摆	双向摇摆 $\pm 8^\circ$
起动次数/次	2

(三)发动机技术特点

发动机主要设计特点为:(1)控制阀门选用适用于重复使用的电动气阀、电液阀;(2)易于更换的三乙基硼-三乙基铝(TEA-TEB)点火剂导管方案;(3)继承基于火箭箱压的自身起动方案,不需要外置能源起动;(4)燃料隔离阀采用气动阀门,通过气体控制,可重复控制开启和关闭。

发动机主要功能特点为:(1)具备10次以上重复飞行能力;(2)通过增加两次起动点火装置和换向阀门实现发动机两次起动功能;(3)研制了起动加速阀和起动加速系统,实现发动机高空低入口压力两次起动功能;(4)提升伺服机电控制技术能力,实现了大范围、高精度、快速、连续工况调节能力,满足火箭着陆快速调节需求;(5)结构包络及摇摆包络小,在5m箭径内可布7台,显著提高箭体单位面积内可产生的推力;(6)采用健康诊断系统,监控发动机状态,识别出发动机故障则紧急关机。

二、高压补燃液氧煤油发动机重复使用技术优势

(一)液氧煤油推进剂组合综合性能优异

推进剂是液体动力发展的基础,对液体动力技术

发展具有革命性推动作用。推进剂选择是比较各种推进剂的优点（高性能、高密度、容易起动、低费用、稳定、长时间贮存）和缺点（腐蚀性、易燃、有毒、易于贮存变质、高蒸汽压力或燃烧不稳定性）之后确定的折中结果。常用推进剂特性如表2所示。

液氧煤油推进剂具有较高的综合性能，煤油优异性主要体现在以下几个方面。

（1）煤油综合性能高。与低温燃料相比，煤油属于常温推进剂，易于贮存，价格相对便宜，密度高，比冲较甲烷略低，但密度比冲高于甲烷，是一种综合性能很高的推进剂。煤油作为常温推进剂可以继承目前常规推进剂贮箱技术，降低了燃料贮箱质量；综合考虑比冲和密度比冲效益及火箭性能和结构质量，液氧甲烷和液氧煤油性能相当。液氧煤油补燃循环发动机能够充分发挥室压优势，使得液氧煤油的性能进一步提高。

（2）煤油保障条件基础深厚、应用广泛。作为常温推进剂，煤油的保障条件简单，不像低温推进剂作燃料时需要建设价格昂贵的工业技术设施和航天发射场基础设施。煤油作为燃料在各个领域都广泛使用，形成了系统的产业链，并成功研发了煤基航天煤油和石油基航天煤油，保障煤油供应和使用。

（3）液氧煤油具有较高的固有安全性和可靠性。液氧煤油推进剂应用于火箭发动机已经过了大半世纪的考验，无论是俄罗斯运载火箭体系，还是美国的F-1、Merlin系列发动机都验证了液氧煤油具有较高固有安全性和可靠性。液氧煤油动力系统的结构组成和使用性能相对并不是特别复杂，且具有丰富的试验研制基础。在某些航天系统如海射系统和空射系统中，低温推进剂的使用安全性是其最大的使用难题。在氢氧发动机或液氧甲烷发动机研制过程中，必须要严格

管理甲烷或液氢这两种低温推进剂，为它们设置专门的排放通道，防止其因泄漏而与空气混合发生自燃自爆。重复使用运输系统对固有安全性和可靠性有非常严格的要求，采用液氧煤油发动机技术可以降低动力系统故障导致的安全性风险。

（二）液氧煤油发动机全寿命周期综合成本低

发动机采用成熟的液氧煤油发动机技术可以降低研制成本。液氧煤油推进剂价格相对便宜，在研制试验阶段可以进行大量的地面试验，充分考核可靠性，降低试验成本，同时地面试验、发射场建立煤油配套系统较为简便，安全要求较低，风险小。

对已研制完成的液氧煤油补燃循环发动机进行重复使用技术改进，则可以较低的研制经费完成重复使用运输系统动力系统研制。基于120吨级液氧煤油发动机积累的技术经验和研制体系，以及新一代运载火箭“长征”五号、六号、七号、八号系列火箭飞行经验，随着重复使用次数增多，130吨级液氧煤油发动机的全寿命周期综合成本将有效降低。

（三）补燃循环液氧煤油发动机技术成熟

苏联从研制补燃循环液氧煤油发动机开始，已成功研制了几代发动机，并经过了大量的型号验证，也研制了多台可重复使用液氧煤油发动机，包括RD-180，RD-191，NK-33等，虽然到目前为止还没有成功进行重复飞行，但各项适应性试验已验证了可重复使用能力。我国已研制多型号补燃循环液氧煤油发动机，推力覆盖2~500吨级，在重复使用技术方面已开展了大量地面试验。

补燃循环液氧煤油发动机采用富氧燃气发生器，煤油推进剂在发生器中不存在积炭问题，推力室喷管

表2 常用推进剂特性比较

推进剂	四氧化二氮/偏二甲肼	液氧煤油	液氧甲烷	液氧液氢
真空比冲 ^① /s	353	381	397	491
燃料贮存特性	耐贮存	易贮存	不易贮存	难贮存
燃料价格/(万元·t ⁻¹)	约16	约1.0	约0.5	约35
密度/(kg·m ⁻³)	1312/791	1140/830	1140/426	1140/71

① 在室压为20MPa、面积比为200条件下。

存在部分积炭,通过后处理可以解决积炭问题。煤油在冷却通道中易于结焦,结焦问题对发动机重复使用影响最大,是液氧煤油发动机亟待解决的问题。煤油的极限结焦温度约为550K,主要原因是煤油中的硫化物对推力室冷却通道腐蚀严重,随着煤油脱硫技术的进步,将有效减弱结焦效应。另外,补燃循环发动机增压能力强,煤油冷却路有足够的压降用于强化换热,采用强化冷却和环带液膜冷却可以有效降低煤油温度,防止煤油结焦。

三、发动机重复使用关键技术

(一)重复使用健康管理技术

健康管理系统在未来重复使用发动机使用过程中的作用将越来越大,可在对发动机测试阶段、运行工作状态及维护阶段提供支撑。因此,有必要在重复使用发动机研制初期就引入健康管理系统,探讨其在全任务剖面中如何发挥作用。

随着重复使用火箭发展需求日益迫切,发动机和火箭技术突飞猛进。火箭推质比的提升带来了早期火箭无法实现的动力系统冗余。健康管理系统能够精准定位故障位置,判断故障程度,实现发动机故障状态下减损工作,为火箭提供下一步任务策略等。因此,健康管理系统要求故障诊断具备实时性和智能化,能根

据发动机状态实施减损状态运行。

将健康管理系统与飞行数据分析结合,可实现发动机全自动状态管理。飞行数据管理与健康管理系统之间需要形成一个联系。重复使用发动机多次工作,产品数据的积累可以完善故障诊断系统,健康管理系统需具有自学习数据库能力,这对后续发动机故障诊断能力的提升、新算法研究及传感器与测点的优选具有重要意义。同时,健康管理系统也可对产品状态评估和使用维护维修提供指导建议。

传统的故障诊断系统已广泛用于地面试车,新一代某运载火箭改进型号芯一级发动机上设置了点火段故障诊断系统,通过工艺试车预估值预设上下限实现“红线关机”,确保发动机点火正常后再实施起飞。针对重复使用发动机应用需求,研制团队在传统故障诊断系统上发展了多元健康管理系统,新引入了涡轮泵位移缓速变采集和诊断系统,以及振动、脉动、应变等速变采集系统,搭配自适应阈值诊断和位移特性诊断方案,实现多元健康管理。发动机多元健康管理系统逻辑图如图1所示。

(二)重复使用发动机寿命评估技术

1.发动机寿命评估技术突破

在大推力液氧煤油发动机研制过程中,研制团队同步开展了重复使用技术研究,掌握了重复试车技术,

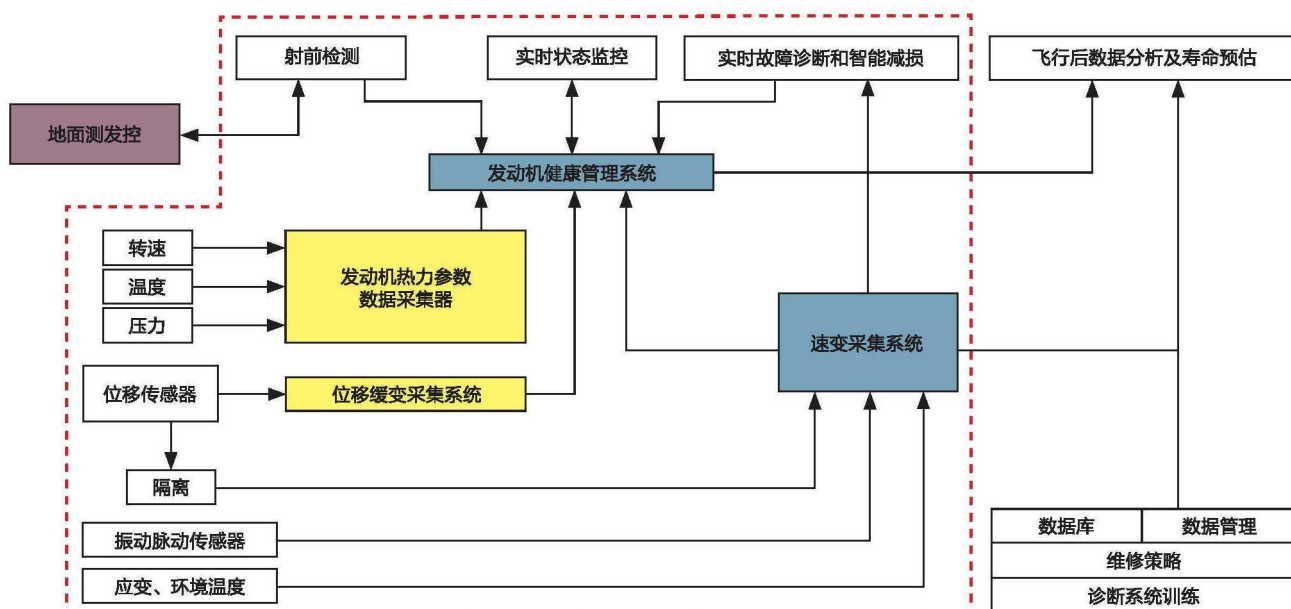


图1 发动机多元健康管理系统逻辑图

不断完善使用维护技术和长寿命关键组件技术,不断提高发动机重复使用能力;并梳理出影响发动机重复使用寿命的关键组件寿命特性,开展了发动机组件寿命评估和试验验证。

(1) 长寿命、重复使用易损件寿命评估技术

轴承和密封作为发动机易受损关键组件,直接关系到发动机的重复使用性能。针对这两个方面,技术人员开展了轴承镀膜研究、长寿命轴承试验,以及接触式密封石墨材料研究、长寿命密封转动试验与非接触式密封运转试验等。

(2) 推力室、发生器热应力控制及冷却技术

再生冷却和环带冷却组合是推力室冷却的主要措施,针对推力室长时间工作可能出现烧蚀问题,研制团队采取了环带冷却流量优化、改进推力室内壁镀层、主动控制边区温度等措施。再生冷却技术同时也导致推力室及发生器内壁存在大温度梯度并承受极端压差,发动机重复使用时内壁在低周疲劳、热疲劳与蠕变损伤的耦合作用下发生热-机械疲劳失效,通过热应力及冷却控制,可有效延长结构寿命。此外,推力室镀层试片循环热震试验表明,热疲劳载荷下镀层状态良好。发生器在高富氧环境下工作,燃烧振荡产生的交替热载荷容易引起喷嘴烧蚀,通过调整喷注器混合比,确保喷嘴充分冷却,保护喷嘴不烧蚀。

(3) 柔和的启动和关机优化技术

发动机在启动和关机时极易发生故障,启动发生器的温度峰、转速峰和关机水击都会对重复使用造成交变载荷影响。启动条件包括液氧路预冷温度、燃料路推进剂充填状态、阀门控制时序等方面,因此研制团队开展了适应性研究,确定了启动环境要求。基于高精度启动关机动力学仿真研究及热试车验证,发动机的启动温度峰降低80K,发生器启动、关机振动和脉动压力大幅降低。

(4) 裕度试车

研制团队通过积极极限拉偏试车数据,拓展发动机重复使用能力,包括极限高、低入口压力,高、低推进剂入口温度,以及组合边界条件适应性,并通过调节器、节流阀工作裕度试验,发动机过载适应性等多项边界试验考核,尽可能对内部组件偏差、外部输入工况偏差的所有组合进行考核,拓宽发动机特性包络限,在大量最坏情况组合下考验发动机适应能力,以

满足不同工作条件、环境的发射要求。

2. 组件寿命评估方法

我国液体火箭发动机结构设计仍以材料静强度性能、稳态载荷数据为输入进行静强度设计为主,辅以部组件试验和整机试车考核验证,针对部分型号的部分寿命关键件进行了材料疲劳性能试验、疲劳寿命评估。围绕重复使用发动机寿命评估需求,研制团队已开展疲劳寿命分析与评估方法研究,采用故障模式、影响和危害度分析方法,结合各类型发动机故障模式(见图2),对发动机零部件进行分类,确定寿命关键件、寿命重要件和寿命一般件。其中,寿命关键件是指直接影响发动机安全和结构完整性,会导致试车失败的组件。这类组件及故障模式包括小直径管路的泄漏和堵塞、涡轮烧蚀破坏、涡轮泵类等。

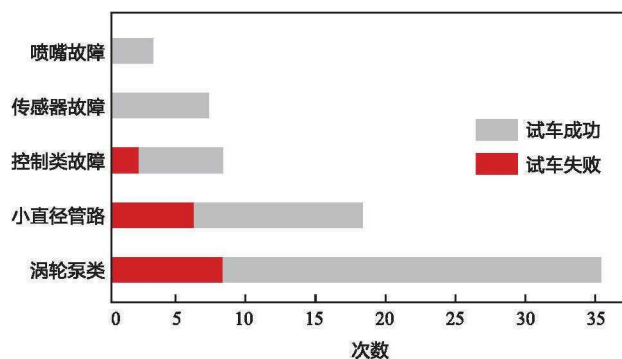
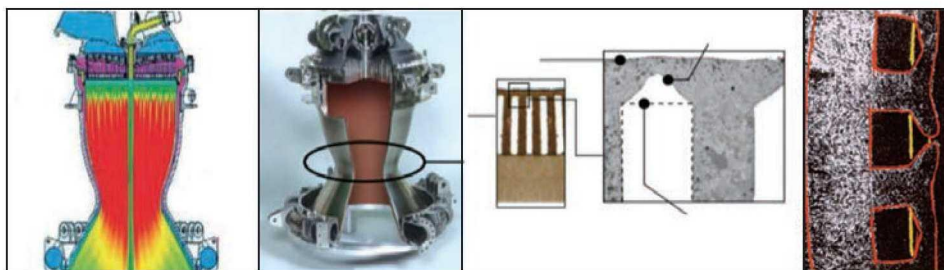


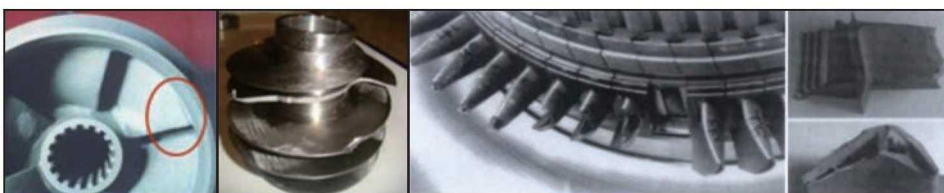
图2 某发动机研制过程中的故障模式

推力室失效时会集中体现热-机械疲劳过程,如图3(a)所示。推力室内壁的燃气侧和冷却侧存在极大的温度梯度与压差,发动机工作时产生显著塑性变形;重复使用的启动、关机、变推力、高空二次启动和反推回收等工况下,推力室内壁将反复承受热流和压力冲击,结构内低周疲劳、蠕变、热棘轮和化学等耦合损伤不断累积,最终发生热-机械疲劳失效,严重影响组件安全及性能。通过常温液压试验和热载荷循环试验,可以研究循环力热载荷下复合镀层内壁裂纹萌生及扩展行为。

涡轮泵是发动机故障率最高的部件(见图3(b)),且一旦发生故障可能会产生灾难性后果,直接制约发动机重复使用能力,是维修和检测的重点关注部位,且存在测不到的盲区。涡轮转子、叶片等存在高低周疲劳复合和疲劳蠕变耦合效应,壳体部组件通常承受



(a) 推力室故障模式



(b) 涡轮泵故障模式

图3 发动机故障模式

高压、非定常流动、高低温载荷作用。研制团队采用超转循环试验、运转疲劳试验研究涡轮泵关键组件蠕变损伤和线性损伤累积特性。

研制团队在静强度设计规范的基础上,结合热机械疲劳、损伤容限等研究工作,建立材料、载荷、模型、分析方法、寿命评估、寿命验证技术相关的重复使用发动机结构设计评估规范体系。此外,通过研究发动机重复使用力热载荷环境测试与预示技术,典型结构高精度、高效率疲劳寿命评估技术,形成重复使用液体火箭发动机疲劳寿命评估体系。

(三) 重复使用维护维修与状态评估检测技术

发动机使用维护技术简易可靠,可以有效提高发动机的重复使用可靠性。通过贮存运输管理、试后处理方法、电气检查方法等使用维护技术,确保发动机性能可靠、状态稳定。研制团队已通过优化使用维护技术,考核了发动机不下台处理维护7天完成重复试车的能力,验证了发动机重复使用的快速响应能力和可靠性。

1. 发动机快速处理技术

快速处理技术关系到运载器的使用率,通过简化使用维护技术达到快速处理目的,可以缩短再次发射间隔,提高运载器的使用率。围绕优化电气检测、气密检查和箭上维修等关键技术,结合火箭结构功能开展不离箭使用维护技术研究。运载器回收后,需要对

液氧煤油发动机煤油积存和碳氢化合物进入燃气腔问题进行处理,确保发动机再次使用性能稳定;发射前,通过简化预冷和抽真空流程,开展自动化检测,可达到快速发射的要求。发动机快速处理流程见图4。

2. 发动机状态评估检测技术

状态评估和寿命检测技术是可重复使用运载器关键的技术难点。不建立完善的状态评估体系不但影响发动机可靠性,更有可能将细小的故障放大造成灾难

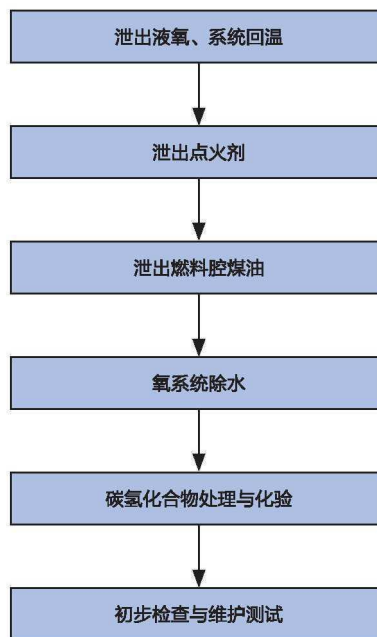


图4 发动机快速处理流程

性故障。因此,任何重复使用发动机都着重对状态评估和寿命检测技术进行专项研究。

发动机返回后需要进行轴承与端面密封磨损检查、涡轮泵叶片裂纹检测、结构件焊缝检测、阀门动作检测、气密性能检测及电气系统性能检测等,形成发动机状态数据,并与寿命评估试验积累子样进行比对,对数据包络内组件进行可靠性指标评定,确定组件再次使用剩余寿命,对包络外组件进行状态评估,进入维护维修环节。基于发动机寿命评估技术,重点对寿命关键件和寿命重要件的寿命数据进行分析 and 评估,例如,推力室内壁不能烧蚀、泄漏、鼓包、变形等,涡轮泵内腔进行内窥镜检查无可视裂纹等。先进的无损检测技术和光纤测振技术等能够满足发动机在火箭状态下进行检测的需求,对结构裂纹及微变形等进行预示。

3. 发动机维护维修技术

根据状态评估结果对发动机状态异常的组件进行更换和维修,可以有效提高发动机再次工作的可靠性,降低关键组件失效的可能。发动机作为重复使用火箭

重要的分系统,建立完善的维护维修流程极为必要,特别是多机并联发动机受火箭布局影响,需要开展箭体状态下维修产品的人机工程研究。通过建立发动机维修流程,对箭上更换、离箭更换及整机维修进行分类管理,评估维修时间,并在分类维修中引入维修成本管理。

四、结束语

130吨级重复使用发动机已初步完成模拟飞行任务剖面试车考核,具备两次点火启动、低入口压力两次启动、快速推力调节和健康监测等功能,研制团队正在开展发动机重复使用关键技术研究。发展液氧煤油发动机重复使用技术,结合地面试验和飞行试验,逐步突破发动机健康管理技术、寿命评估技术和使用维护维修技术等,可以加快推动我国重复使用天地往返运输系统快速应用,实现我国液体火箭发动机更新换代。

参考文献

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [2] 张蒙正, 张玫. 航天运载器重复使用液体动力若干问题探讨[J]. 火箭推进, 2019, 45(4): 9-15.
- [3] 张晓军, 高玉闪, 杨永强, 等. 我国液氧煤油发动机技术发展概述[J]. 中国航天, 2023(5): 9-15.
- [4] 沈谦. 我国首台130吨级重复使用液氧煤油补燃循环发动机在陕试车成功[N]. 陕西日报, 2022-11-27.
- [5] 李斌, 刘站国, 吕发正, 等. 130吨级泵后摆高压补燃液氧煤油发动机关键技术研究[J]. 载人航天, 2022, 28(4): 433-438.
- [6] 包为民, 汪小卫, 董晓琳. 航班化航天运输系统对动力的发展需求与技术挑战[J]. 火箭推进, 2021, 47(4): 1-5.
- [7] TAN Y H, ZHAO J, CHEN J H, et al. Progress in Technology of Main Liquid Rocket Engines of Launch Vehicles in China[J]. Aerospace China, 2020, 21(2): 23-30.
- [8] 李斌, 张小平, 高玉闪. 我国可重复使用液体火箭发动机发展的思考[J]. 火箭推进, 2017, 43(1): 1-7.
- [9] 李斌, 闫松, 杨宝锋. 大推力液体火箭发动机结构中的力学问题[J]. 力学进展, 2021, 51(4): 831-864.
- [10] 康玉东, 孙冰. 液体火箭发动机推力室可重复使用技术[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1659-1664.
- [11] 陈守芳, 李健, 熊莉芳. 可重复使用发动机管路连接与密封可靠性工作思考[J]. 空天防御, 2023, 6(1): 6-10.
- [12] LI B. Research on Key Technologies for Reusable Liquid Rocket Engines[J]. Aerospace China, 2022, 23(4): 24-34.
- [13] 谭永华, 李平, 杜飞平. 重复使用天地往返运输系统动力技术发展研究[J]. 载人航天, 2019, 25(1): 1-11, 41.
- [14] 张楠, 孙慧娟. 低温液体火箭发动机重复使用技术分析[J]. 火箭推进, 2020, 46(6): 1-12.

(责任编辑 徐菁) 中国航天