

130吨级重复使用液氧煤油发动机维护维修技术分析

杨永强¹, 何江^{1*}, 吕发正¹, 张闯¹, 曹文²

(1. 西安航天动力研究所, 西安 710100; 2. 西安航天发动机有限公司, 西安 710100)

摘要:针对液体火箭发动机重复使用需求,对130吨级液氧煤油发动机进行了技术提升,使其初步具备重复使用能力,并通过了多次地面重复试车考核。通过分析重复使用液氧煤油发动机的技术特点和使用要求,建立了重复使用液氧煤油发动机维护维修技术流程,制定了重复使用发动机维护维修方案。通过对比发动机装箭状态和地面单机状态差异性,分析了重复使用液氧煤油发动机返回后处理与检查、维修可达性与经济性、状态检测与评估、寿命评估与延寿、维修技术研究和维护维修体系建设等关键技术研制现状,提出了进一步研究方向,可为重复使用液氧煤油发动机研制和维护维修技术验证提供技术支撑。

关键词:液氧煤油发动机; 重复使用; 维护维修; 技术分析

中图分类号:V434. +3 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-5825(2025)01-0104-07

Analysis on Maintenance Technology of 130-ton Reusable LOX/Kerosene Rocket Engine

YANG Yongqiang¹, HE Jiang^{1*}, LYU Fazheng¹, ZHANG Chuang¹, CAO Wen²

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract: In response to the demand for repeated use of liquid rocket engines, a 130-ton LOX/Kerosene engine was upgraded to have the initial repeated use capability, and it has passed the reusability test on the ground many times. By analyzing the technical characteristics and application requirements of the reusable LOX/Kerosene engine, the technical flow of maintenance of the reusable LOX/Kerosene engine was established, and the maintenance scheme of the reusable engine was proposed. Based on the comparison between the engine mounted in rocket status and the ground single engine status, the development status of the key technologies, such as the post-processing and inspection, maintenance accessibility and economy, condition detection and evaluation, life evaluation and life extension, maintenance technology research and maintenance system construction was analyzed. Further research directions were proposed which could serve as a technical support for the development and maintenance technology verification of reusable LOX/Kerosene engine.

Key words: LOX/Kerosene engine; reusable; maintenance; technical analysis

1 引言

随着 SpaceX 公司猎鹰 9 号重复使用火箭的多次成功发射和回收,国内外再次掀起重复使用运载火箭的研制热潮^[1]。其中,发动机重复使用是研制重复使用火箭的前提条件,需要发动机具有多次点火、高空低入口压力启动、大范围变推力和长时间工作能力^[2]。

中国从 2000 年初开始,通过 120 吨级补燃循环液氧煤油发动机的研制突破了液氧煤油发动机重复使用的多项关键技术^[3],使 120 吨级液氧煤油发动机具备了不下台、重复试车能力。130 吨级重复使用发动机基于 120 吨级液氧煤油发动机重复试车的成熟技术,进行技术提升,拓展了低入口压力启动、二次启动和重复使用功能,为可重复使用火箭研制奠定了重要基础。

重复使用火箭回收后发动机维护和维修是重复使用的一项重要研究内容,需结合发动机重复使用特点开展。李斌等^[4-5]对重复使用发动机技术特点进行了分析;崔朋等^[6]对重复使用液体火箭发动机典型特征进行了研究,得到组件/元件可重复、便于维护等 10 个典型特征,并提出了建立可重复使用火箭发动机标准体系的建议;张楠等^[7]按照寿命、功能、性能、维修、检测诊断等分类提出了重复使用液体火箭发动机的 15 个技术指标体系,为重复使用发动机维护维修策略的制定提供了思路。

本文基于 130 吨级重复使用液氧煤油发动机特点,建立发动机重复使用维护维修技术流程,并对重复使用火箭回收后液氧煤油发动机不离箭维护维修技术进行了探讨。

2 发动机概况

130 吨级液氧煤油发动机在 120 吨级液氧煤油发动机基础上进行性能提升,降低整机结构重量的同时实现推力提高,并提升了发动机深度变推能力和维修性^[2]。130 吨级重复使用液氧煤油发动机在此基础上增加了低入口压力启动、二次启动和重复使用等功能,主要结构和功能特点如下:

1)在涡轮泵后燃气主路设置摇摆环节,通过仅摇摆推力室实现发动机推力矢量控制;

2)通过可拆卸密封实现主涡轮泵、燃气摇摆装置与推力室的连接,提升了维修性;

3)具备高空低入口压力的二次启动能力;

4)单机与箭体对接,可实现多台发动机自由组合;

5)采用健康诊断系统,监控发动机状态,对于识别出的发动机故障可紧急关机。

3 发动机维护维修方案

重复使用发动机再次使用前,需要对发动机进行初步检查、内腔处理、状态检查、状态恢复和状态评估等工作,多次重复使用后到寿件也需要维修或更换。此外,重复使用火箭在飞行、分离和返回过程中,发动机经历关机、再次启动、深度变工况等复杂的工作过程,可能会影响发动机产品状态,导致部分组件故障或不满足再次飞行要求,也需要维修或更换组件。寿命期内重复使用发动机返回后维护维修流程如图 1 所示。

1)初步外观检查。初步外观检查包括 2 个层次:①火箭返回后,检查发动机外露部分,特别是热力组件—推力室喷管是否有漏液、外壁变形或烧蚀等损伤;②具备安全条件后,通过箭体维修舱口对发动机可视部位进行排查,检查是否有泄

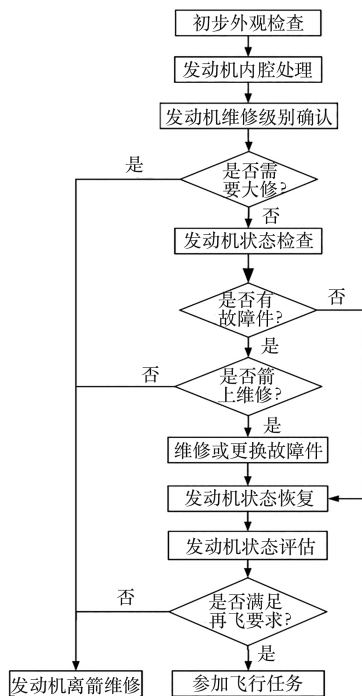


图 1 维护维修流程

Fig. 1 Preventive maintenance and repair process

漏、结构破坏或损伤,对发动机结构完整性进行初步判断。

2) 发动机内腔处理。发动机内腔处理包括发动机氧系统液氧泄出和回温、点火剂泄出、燃料腔煤油泄出、燃气腔处理、燃气腔取样化验等,处理流程如图 2 所示,具体如下:①发动机氧系统液氧泄出和回温,一方面是避免后续操作中人员低温冻伤,也防止氧系统极低温度下,由于冷抽吸现象造成发动机氧腔进水、生锈等状态异常;②130 吨级重复使用液氧煤油发动机点火剂主要存在于发动机燃料系统点火路中。为避免造成起火,发动机煤油泄出前,必须先泄出点火剂;③发动机燃料腔残存的煤油在后续检查等操作中可能会造成局部封存气体,影响发动机煤油系统充填,应尽可能泄出;④发动机燃气腔处理是重复使用前的一个关键处理过程,发动机在重复点火前,必须将燃气腔碳氢化合物含量降低至较低水平;⑤燃气腔取样化验是通过从发动机燃气系统中典型部位进行碳氢化合物取样,评估发动机燃气腔碳氢化合物含量。

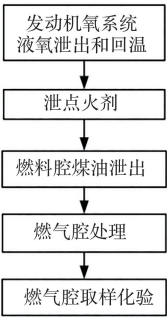


图 2 发动机返回后内腔处理流程
Fig. 2 Internal cavity processing flow after engine return

3) 发动机维修级别确认。根据发动机维修准则和寿命要求,判断发动机维修级别,确定下一步处理工作。

4) 状态检查。火箭尾舱具备操作条件后,开展发动机状态检查。包括外观和内部结构检查、气密检查、电性能检查等,具体如下:①液氧煤油补燃循环发动机大部分组件内部状态无法直接观察,除发动机起动工作数据判读外,通过内泄漏和外泄漏检查获得其健康特性;②涡轮泵为高速旋转部件,涡轮叶片受离心力和高温高压燃气的冲刷,返回后应使用内窥镜对涡轮叶片状态进行检查确认。推力室、发生器为高温高压工作部件,返

回后应进行外观检查。③发动机电性能检查可与箭体电气系统检查一并进行,以确定发动机电气系统状态。

飞行数据判读也是状态检查的重要部分,数据判读的结果也可能会影响发动机的维修方案。

通过状态检查,查找发动机故障件,同时为发动机结构完整性和剩余寿命评估提供基本依据。

5) 维修或更换组件。重复使用发动机维修包括预防性维修和修复性维修。根据飞行状态监控、状态检查结果和数据分析,同时结合发动机组件寿命和大修要求,对发动机故障件和到寿件进行更换,降低组件失效的可能,提高发动机工作可靠性。

6) 发动机状态恢复。发动机状态恢复包括以下内容:①一次性使用件,包括点火导管、外露隔热罩、排放组件、后处理和气密检查时拆开的密封接头等,每次飞行后都需要更换;②对推力室、发生器进行维护,包括清除推力室内壁积碳、推力室内壁防锈处理等;③外观维护。

7) 发动机状态评估。通过返回后维护维修过程评估和状态检查结果分析,以及发动机起动过程数据和飞行过程数据、故障监控数据分析,并结合发动机寿命预估对发动机是否具备再次飞行的能力进行评估。

4 发动机维护维修技术分析

目前,130 吨级液氧煤油发动机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 10 倍以上,验证了发动机的重复使用能力。但是由于发动机试车状态和飞行状态保障条件存在差异,而且发动机单机状态无法验证到多机并联装箭状态的维护维修能力,维修经济性和维修方案等均未深入考虑,发动机状态检测和评估方法也尚不完备,重复使用发动机寿命评估和到期后延寿问题也亟待研究。此外,国内目前尚未建立重复使用发动机工作体系,缺乏维护维修指导性文件。

4.1 发动机返回后处理与检查

杜天恩等^[8]对低成本重复使用氢氧发动机 RD-0120 可重复使用能力进行了分析,不考虑随箭综合测试时间,该型发动机 2 次重复点火间检查和处理仅需要少量的工具、设备和人数,合计

99人·小时,约2人·2天,较目前130吨级重复使用液氧煤油发动机处理间隔少很多。此外,发动机不离箭状态,操作可达性相比地面单机状态要差很多,会进一步增加处理时间。因此,需要对发动机不离箭状态煤油泄出方案优化开展研究。宋亚轻等^[9]对120吨液氧煤油发动机湿态停放和快速处理技术进行研究,对仅从外露舱外的发动机抽真空口和推力室泄液口泄出煤油的方案进行分析,并完成了试车验证。该方案对重复使用液氧煤油发动机不离箭状态内腔处理优化具有重要借鉴作用。

点火后燃气腔碳氢化合物含量是评估发动机是否具备再次点火能力的重要指标。为满足指标要求,目前130吨级重复使用液氧煤油发动机试车后燃气腔处理采用抽真空—热吹除循环处理和氮气强吹循环处理方案,若多次循环处理后指标不满足要求,则增加循环处理次数。2种方案都要在发动机燃气系统结构上对接多处后处理管路,需要多种地面设备支持。因此,有必要以降低地面设备要求、缩短处理时间为目标,开展发动机燃气腔碳氢化合物处理方案优化和合格指标扩展研究。

4.2 发动机状态检测与评估

目前,130吨级重复使用液氧煤油发动机状态检测措施主要包括:再次点火前的外观检查、气密检查和电气检查,以及飞行过程中重要性能参数和故障诊断参数的实时监测等。

130吨级重复使用液氧煤油发动机状态评估采用工程化方法,通过分析再次点火前发动机检查结果,结合工作过程参数和故障诊断参数,通过与寿命评估试验积累子样比对,对发动机健康状态和剩余寿命进行评估,进而判断发动机是否具备再次点火能力。

液氧煤油发动机涡轮泵中高速旋转部件以及推力室、发生器等热力组件工作条件恶劣,目前采用的方法仅通过外观检查,并不能完全检测组件内部状态,可能存在问题漏报,特别是重复使用带来的疲劳问题、应力松弛和性能退化问题,往往不易察觉,需要进一步开展发动机无损检测技术和智能化检测方法研究^[10]。同时,需要开展基于检测数据的发动机状态评估研究,包括:推力室和发生器等高

温组件剩余寿命评估、高速运动组件损伤评估、应力松弛检测、密封性能退化等,形成发动机状态和剩余寿命评估标准。

4.3 发动机寿命评估与延寿

4.3.1 发动机寿命评估

130吨级重复使用液氧煤油发动机通过地面重复试车考核验证了发动机的可靠性和重复使用能力,但寿命关键件未得到寿命摸底试验验证。因此,应梳理出影响发动机重复使用寿命的关键组件,开展发动机组件寿命评估和试验验证,在此基础上完成发动机整机级寿命评估和试验验证,为合理制定发动机预防性维修间隔提供技术支撑。

目前,对重复使用发动机的寿命评估已有相关研究。李斌潮等^[11]对发动机结构疲劳、损伤、蠕变等力学问题进行了分析;金平等^[12]对发动机典型结构的失效机理与寿命评估方法进行总结,提出了研究热点;刘士杰等^[13]、杜大华等^[14]、杨进慧等^[15]、孙冰等^[16]对发动机涡轮泵、推力室等典型组件的寿命预估方法进行了研究。但是对液体火箭发动机寿命评估工程应用和验证方面的研究较少,需要针对发动机特点开展寿命评估方法研究和验证工作。

4.3.2 发动机延寿

从经济性角度考虑,发动机使用寿命应尽可能准确,而不是过于保守,在满足飞行可靠性指标要求的前提下也应尽可能延长。重复使用发动机延寿的目的在于使发动机具有尽可能长的使用寿命,提高发动机全寿命周期的经济性。发动机延寿问题在航空领域早已开展研究和实践,具备了一定的经验和方法^[17-20]。固体火箭发动机主要用于武器装备,存在贮存期到寿问题,发动机使用寿命预估和延寿问题也有相关研究^[21-22]。而液体火箭发动机前期主要为一次性使用,国内相关研究很少,国外也未见公开资料,然而对于重复使用液体火箭发动机,却尤为重要。为增加重复使用发动机寿命,应开展以下方面研究:

- 1)开展环境谱和载荷谱长期适应性研究;
- 2)开展发动机寿命薄弱环节组件识别和可靠性提升;
- 3)加强发动机检测和状态监控技术应用;
- 4)建立健康监测数据管理系统,积累试验和

寿命数据,为状态评估提供技术支撑。

4.4 发动机维修可达性与经济性

发动机装箭状态下,发动机与箭体结构间隙、发动机与发动机间隙很小,操作可达性较发动机单机地面试车状态差很多。为提前识别维修约束条件,同时为发动机布局设计和保障性、测试性设计等提供依据,需要开展箭体状态下发动机维修性分析。

4.4.1 发动机维修可达性

在火箭工程样机具备模拟维护维修操作条件前,箭体内发动机操作可达性通过人机工程仿真软件模拟。常用的装配和人机工程仿真软件通过建立虚拟人和动作库以及操作评估方法,具备人员动作的仿真能力和评估能力。目前,基于人机工程仿真软件开展了多机并联状态发动机维护维修可达性分析,也暴露出一些操作性差的部位,如图 3 所示。但是由于该类软件对真人操作的灵活性难以充分模拟,更精确的分析尚不能进行。

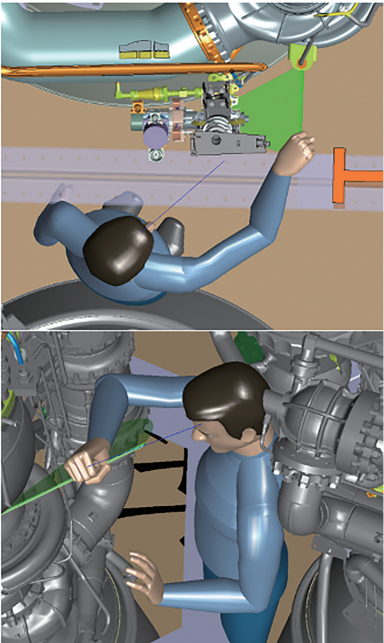


图 3 基于人机工程的仿真模拟
Fig. 3 Simulation based on human factors engineering

虚拟维修技术^[23]是虚拟现实技术在发动机装配和维修领域的工程应用,采用交互式仿真环境,可以利用运动捕获设备实时获取操作人员的运动信息,更能真实地模拟操作,同时具备记录装配顺序和路径的功能。该技术目前已具备了较为完备的操作平台、操作设备和评估方法,国内研究

较多^[24],在航空维修中应用较为广泛^[25],也将为重复使用火箭维修仿真提供重要支撑。

4.4.2 发动机维修经济性

重复使用不一定是经济,航天飞机退役就是很好的案例^[26]。发动机维护维修费用在重复使用火箭全寿命周期费用中占有较大比重,是影响重复使用火箭全周期费用的重要因素^[27]。发动机维修项目、维修方式和维修间隔等是影响重复使用发动机维修经济性的重要因素。为提高 130 吨级重复使用液氧煤油发动机维修经济性,采用分级维修策略,根据维护维修操作难度、工装设备和工作场地要求等进行维修级别划分,按照箭上维修、箭体厂房维修、返回生产厂维修的级别优先顺序执行。

在多台发动机并联装箭状态下,应考虑综合成本最优。受箭体操作空间影响,发动机上维修件往往不是直接可达,需要拆除有影响的组件之后再行维修。该组件可能是箭上的,也可能是发动机自身或相邻发动机的,由此导致发动机维修工作更加复杂。制定发动机维修方案时,应综合权衡可靠性和经济性,缩小维修规模,减少对其他产品带来影响。具体实施时,需要结合维修周期、维修费用、维修时效以及对其他系统的影响开展综合评估。

4.5 开展维修技术和维修体系建设研究

航空军用装备领域经过多年的发展,形成了以可靠性为中心的维修思想,作为确定军用飞机及发动机预防性维修大纲、优化维修项目的一种系统工程方法,已形成了军用标准 GJB1378A-2007《装备以可靠性为中心的维修分析》作为指导文件。

民用航空领域更加关注航空器运营的安全性、可靠性和经济性,从 1960 年美国运输协会(Airlines for America)研究航空设备故障机理开始,经过六十余年发展,形成了应用逻辑判断表制订计划维修大纲的分析方法,又称预定维修大纲制定文件,至今已发展至第三版,并且在不断修订中。其目的是用最少的维修、费用、资源保持满足安全运行的可靠性水平。

液体火箭发动机领域,目前仅有美国 SpaceX 公司实现了重复使用液体火箭发动机的工程应用,但是也未见发动机返回后维修维护相关公开

信息。目前,国内这方面的研究尚属空白。因此,有必要借鉴航空领域研究成果,对研制经验的适应性进行评估,开展液体火箭发动机维修体系建设、指导思想、维修技术等方向研究和攻关。

5 结论

1) 针对130吨级重复使用液氧煤油发动机特点,建立了发动机维护维修技术流程,制定了发动机维护维修技术方案。

2) 基于130吨级重复使用发动机,分析了液体火箭发动机维护维修技术研究和应用现状,提出了进一步的研究和发展需求。

130吨级重复使用液氧煤油发动机维护维修技术已通过地面试车验证,发动机回收后不离箭条件下的维护维修工作也得到初步仿真验证。为提高重复使用发动机可靠性和经济性,应继续开展发动机维护维修优化研究和技术攻关,加快推动中国低成本重复使用天地往返运输系统发展。

参考文献 (References)

- [1] 刘哲,张柏楠,张宁,等. 运载火箭可重复使用总体技术研究[J]. 中国航天,2022(10):36-41.
Liu Z, Zhang B N, Zhang N, et al. Research on overall design technology of the reusable launch vehicles[J]. Aerospace China,2022(10):36-41. (in Chinese)
- [2] 吕发正,张森,杨永强,等. 130吨级液氧煤油发动机重复使用技术研究进展[J]. 中国航天,2023(9):18-24.
Lyu F Z, Zhang M, Yang Y Q, et al. Research progress on reuse technology of 130-ton liquid oxygen kerosene engine[J]. Aerospace China,2023(9):18-24. (in Chinese)
- [3] 李斌,张小平,马冬英. 我国新一代载人火箭液氧煤油发动机[J]. 载人航天,2014(5):427-431.
Li B, Zhang X P, Ma D Y. The LOX/Kerosene rocket engine for Chinese new-generation manned launch vehicle[J]. Manned Spaceflight,2014(5):427-431. (in Chinese)
- [4] Li B. Research on key technologies for reusable liquid rocket engines[J]. Aerospace China,2022,23(4):24-34.
- [5] 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.
Li B, Zhang X P, Gao Y S. Consideration on development of reusable liquid rocket engine in China[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017,43(1):1-7. (in Chinese)
- [6] 崔朋,刘阳,朱雄峰,等. 重复使用液体火箭发动机典型特征分析[J]. 载人航天,2023,29(3):345-353.
Cui P, Liu Y, Zhu X F, et al. Typical characteristic analysis of reusable liquid rocket engines[J]. Manned Spaceflight,2023,29(3):345-353. (in Chinese)
- [7] 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.
Zhang N, Sun H J. Analysis on the reusable cryogenic liquid rocket engine technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020,46(6):1-12. (in Chinese)
- [8] 杜天恩,杨瑞亭. 以RD-0120发动机为基础的可重复使用火箭动力装置[J]. 火箭推进,1996(3):6-16.
Du T E, Yang R T. Reusable rocket power unit based on RD-0120 engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 1996(3):6-16. (in Chinese)
- [9] 宋亚轻,白旭东,成洁,等. 1200 kN 液氧煤油发动机湿态停放和快速处理技术研究[J]. 导弹与航天运载技术,2019(5):70-73.
Song Y Q, Bai X D, Cheng J, et al. Research on 1200 kN LOX/Kerosene standby state in propellant loading and fast processing technology[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(5):70-73. (in Chinese)
- [10] 王珺,吕海鑫,陈景龙,等. 液体火箭发动机健康状态智能检测方法[J]. 火箭推进,2021,47(4):52-58.
Wang J, Lyu H X, Chen J L, et al. Intelligent detection method of liquid rocket engine health state[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021,47(4):52-58. (in Chinese)
- [11] 李斌潮,黄道琼,王振,等. 液体火箭发动机重复使用中的力学问题[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议,2019:2337-2339.
Li B C, Huang D Q, Wang Z, et al. Mechanical problems in the reuse of liquid rocket engines [C]//The 40th Technical Exchange Conference of China Aerospace Third Professional Information Network and the 4th Joint Conference on Aerospace Dynamics, 2019:2337-2339. (in Chinese)
- [12] 金平,吕俊杰,戚亚群,等. 可重复使用液体火箭发动机寿命问题探讨[J]. 宇航总体技术,2023,7(4):51-59.
Jin P, Lyu J J, Qi Y Q, et al. Probe into the life of reusable liquid rocket engines[J]. Aerospace General Technology, 2023,7(4):51-59. (in Chinese)
- [13] 刘士杰,刘登丰,马晓秋,等. 重复使用液体火箭发动机涡轮泵安全寿命预估方法[J]. 航空动力学报,2022,37(5):1079-1088.
Liu S J, Liu D F, Ma X Q, et al. Predicting method of safety life of reusable liquid rocket engine turbopump [J]. Journal of Aerospace Power,2022,37(5):1079-1088. (in Chinese)
- [14] 杜大华,王珺,王红建,等. 液体火箭发动机涡轮盘低周疲劳寿命预测[J]. 火箭推进,2020,46(6):52-58.
Du D H, Wang J, Wang H J, et al. Low cycle fatigue life prediction of a liquid rocket engine turbine disk[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020,46(6):52-58. (in Chinese)
- [15] 杨进慧,陈涛,金平,等. 液体火箭发动机再生冷却槽寿命预估[J]. 航空动力学报,2012,27(4):907-912.
Yang J H, Chen T, Jin P, et al. Life prediction of cooling passage for reusable liquid rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012,27(4):907-912. (in Chinese)
- [16] 孙冰,丁兆波,康玉东. 液体火箭发动机推力室内壁寿命预估[J]. 航空动力学报,2014,29(12):2980-2986.
Sun B, Ding Z B, Kang Y D. Life prediction of liquid rocket engine thrust chamber liner wall[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014,29(12):2980-2986. (in Chinese)
- [17] 黄季墀. 论××系列飞机结构定寿、延寿工作[J]. 飞机设计,1996(1):5-9.
Huang J X. On the life determination and extension of xx series aircraft structure[J]. Aircraft Design, 1996(1):5-9. (in Chinese)
- [18] 沈小明,戴顺安,王烨. 飞机部件延寿的风险评估方法研究[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(11):35-38.
Shen X M, Dai S A, Wang Y. Research on a risk assessment method for aircraft component prolonging life [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017,38(11):35-38. (in Chinese)
- [19] 何宇廷,高潮,张腾,等. 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命

- 延寿方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(6): 1-6.
- He Y T, Gao C, Zhang T, et al. On method of fatigue/durability safe life extension of aircraft structure [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 1-6. (in Chinese)
- [20] 陈国栋, 邢雷, 赵明. 国外航空发动机关键件定寿和延寿方法分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 61-65.
- Chen G D, Xing L, Zhao M. Analysis of life deciding and life extending for aeroengine critical parts [J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 61-65. (in Chinese)
- [21] 王铮. 固体火箭发动机使用寿命的预估和延寿[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(1): 23-28.
- Wang Z. Prediction and prolongation of solid rocket motor service life[J]. Journal of Solid Rocket Technolog, 1999, 22(1): 23-28. (in Chinese)
- [22] 徐颖军, 严聪, 高峰. 固体火箭发动机长寿命及可靠性技术进展[J]. 飞航导弹, 2007(5): 56-58.
- Xu Y J, Yan C, Gao F. Progress in long life and reliability technology of solid rocket engines[J]. Winged Missiles Journal, 2007(5): 56-58. (in Chinese)
- [23] 刘佳, 刘毅. 虚拟维修技术发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(11): 1519-1534.
- Liu J, Liu Y. A survey of virtual maintenance technology [J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2009, 21(11): 1519-1534. (in Chinese)
- [24] 周栋, 霍琳, 王美慧, 等. 虚拟维修技术研究与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 231-236.
- Zhou D, Huo L, Wang M H, et al. Research and application of virtual maintenance technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 231-236. (in Chinese)
- [25] 徐斌龙, 海雯炯. 航空发动机虚拟维修培训系统设计[J]. 航空维修与工程, 2003(2): 29-30.
- Xu B L, Hai W J. The design of virtual maintenance training system about aviation engine[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2003(2): 29-30. (in Chinese)
- [26] 智浩. 雄鹰亦有折翼时: 航天飞机退役原因简析[J]. 太空探索, 2011(4): 48-51.
- Zhi H. The eagle also has a folding wing: A brief analysis of the reasons for space shuttle retirement[J]. Space Exploration, 2011(4): 48-51. (in Chinese)
- [27] 庄方方, 汪小卫, 吴胜宝. 可重复使用运载火箭全寿命周期费用分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(6): 82-85.
- Zhuang F F, Wang X W, Wu S B. Life cycle cost analysis on reusable launch vehicle [J]. Missiles and Space Vehicles, 2016(6): 82-85. (in Chinese)

(责任编辑: 冯雪梅)