

液体火箭发动机装配过程可靠性保障措施研究

冯海涛 张 勇 李浩天 孙 磊 田跃达

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要: 液体火箭发动机装配质量关乎航天任务成败。本文详细阐述装配过程核心环节, 包括零部件、管路连接、密封结构及整体集成装配。分析零部件质量、装配工艺、操作及环境等因素对可靠性的影响。提出零部件预处理、工艺规范、操作管控、密封性能及环境管控等保障措施, 并从装配设备、人员能力、过程监测及装配后维护等路径, 确保装配可靠性, 为液体火箭发动机稳定运行筑牢根基。

关键词: 液体火箭发动机; 装配过程; 可靠性保障; 影响因素; 实施路径

引言: 液体火箭发动机作为航天器的核心动力装置, 其性能与可靠性直接决定航天任务的成败。装配过程作为发动机制造的关键环节, 涉及众多复杂工序与精密操作, 任何一个环节的疏忽都可能引发严重后果。随着航天技术的不断发展, 对液体火箭发动机的性能要求日益严苛, 装配过程的可靠性保障成为亟待解决的重要问题。深入探究装配过程的核心环节、可靠性影响因素及保障措施, 对于提升发动机整体质量、确保航天任务顺利开展具有至关重要的意义。

1 液体火箭发动机装配过程的核心环节

1.1 零部件装配环节

零部件装配环节是液体火箭发动机装配的基础环节, 直接决定后续装配质量与整体可靠性。该环节需依据发动机装配技术规范, 对各类零部件进行精准定位、精准装配, 涵盖发动机涡轮、泵体、燃烧室等关键零部件的组装操作^[1]。装配过程需严格控制零部件的安装姿态与配合间隙, 优化装配操作流程, 避免零部件出现磕碰、划伤等损伤, 防止装配偏差影响后续装配工序。同时需注重零部件的清洁处理, 去除表面油污、杂质及氧化层, 确保零部件装配贴合紧密, 为发动机整体装配奠定坚实基础, 保障装配过程的顺畅推进。

1.2 管路连接装配环节

管路连接装配环节是液体火箭发动机装配的关键支撑, 关乎发动机推进剂输送的稳定性与安全性。该环节需针对发动机各类推进剂管路、冷却管路等, 开展精准连接装配操作, 严格遵循管路装配技术标准, 控制管路连接的紧固度与同轴度。装配过程需选用适配的连接方式与密封件, 避免管路连接松动、错位, 防范推进剂泄漏等安全隐患。同时需对管路连接部位进行细致检查, 排查连接缺陷, 确保管路连接的密封性与可靠性, 保障发动机工作时推进剂能够稳定、高效输送, 满足发动机

运行需求。

1.3 密封结构装配环节

密封结构装配环节是保障液体火箭发动机密封性的核心环节, 直接影响发动机工作性能与运行安全。该环节需聚焦发动机各类密封部位, 选用符合技术要求的密封件, 按照规范流程开展装配操作, 精准控制密封件的安装位置与压缩量。装配过程需避免密封件出现变形、破损等问题, 确保密封面贴合紧密, 杜绝推进剂、燃气等介质泄漏。操作过程需兼顾装配精度与密封效果, 通过科学的装配操作, 提升密封结构的可靠性与耐久性, 为发动机长期稳定运行提供保障。

1.4 整体集成装配环节

整体集成装配环节是液体火箭发动机装配的收尾环节, 也是实现发动机各部件协同工作的关键。该环节需将已完成装配的零部件、管路、密封结构等进行整体整合, 按照发动机设计要求完成各系统的装配衔接。装配过程需精准调控各部件的相对位置与配合关系, 确保各系统衔接顺畅, 避免部件干涉影响发动机整体功能。同时需对整体装配状态进行全面检查, 排查装配过程中遗留的缺陷与隐患, 优化装配细节, 确保发动机整体装配质量符合技术标准, 为后续发动机调试与运行奠定基础。

2 液体火箭发动机装配过程的可靠性影响因素

2.1 零部件质量影响因素

零部件质量是影响液体火箭发动机装配可靠性的基础因素, 直接关联装配质量与发动机后续运行稳定性。零部件生产过程中的材质均匀性、尺寸精度及表面质量, 均会对装配过程产生显著影响^[2]。材质不符合设计要求会导致零部件力学性能不足, 装配后易出现变形、破损等问题; 尺寸偏差过大则会造成装配配合间隙不合理, 影响装配精度与部件贴合度; 表面存在油污、杂质、划痕或氧化层, 会降低零部件装配兼容性, 甚至引

发装配卡滞、密封失效等隐患。零部件质量需符合液体火箭发动机零部件生产技术标准,任何环节的质量缺陷都会传递至装配过程,削弱装配可靠性,进而影响发动机整体工作性能。

2.2 装配工艺影响因素

装配工艺是保障液体火箭发动机装配可靠性的核心因素,工艺合理性与规范性直接决定装配质量。装配工艺的流程设计、工序衔接及参数设置,均需贴合发动机结构特性与装配需求。流程设计不合理会导致工序混乱,出现装配顺序错误,引发部件干涉、装配偏差等问题;工序衔接不顺畅会增加装配难度,延长装配周期,同时易遗留装配缺陷;工艺参数调控不当,如配合间隙、紧固力矩、密封压缩量等设置不合理,会直接影响装配精度与部件协同性。装配工艺需遵循液体火箭发动机装配技术规范,通过科学优化工艺细节,提升装配过程的稳定性,为装配可靠性提供支撑。

2.3 装配操作影响因素

装配操作的规范性是影响液体火箭发动机装配可靠性的关键变量,直接反映装配过程的管控水平。装配人员的操作技能、责任意识及操作规范性,均会对装配质量产生直接影响。操作技能不足会导致零部件定位偏差、管路连接不规范、密封件装配不当等问题;责任意识薄弱易出现操作疏忽,如清洁不到位、零部件安装遗漏、紧固不到位等,留下安全隐患;操作过程未严格遵循装配规范,会破坏零部件结构完整性,影响部件配合精度与密封效果。装配操作需严格按照技术要求开展,通过规范操作流程、提升操作熟练度,减少人为因素对装配可靠性的影响。

2.4 装配环境影响因素

装配环境是液体火箭发动机装配可靠性的重要保障因素,环境参数不符合要求会间接影响装配质量与部件性能。装配环境的温度、湿度、洁净度及振动水平,均需控制在规定范围内。温度过高或过低会导致零部件热胀冷缩,影响尺寸精度与装配配合度;湿度过大易造成零部件表面锈蚀、密封件老化,降低部件使用寿命;洁净度不足会导致杂质进入装配间隙,引发部件磨损、卡滞或密封失效;振动过大会影响装配定位精度,导致零部件安装偏差。装配环境需符合液体火箭发动机装配环境技术标准,通过精准调控环境参数,为装配过程提供稳定环境条件,保障装配可靠性。

3 液体火箭发动机装配过程可靠性保障措施

3.1 零部件预处理保障措施

零部件预处理是筑牢液体火箭发动机装配可靠性的

前置保障,需严格遵循发动机零部件装配技术标准,对装配前零部件进行全面处理^[3]。预处理需聚焦零部件清洁、尺寸复核与表面防护,去除零部件表面油污、杂质、氧化层及划痕,确保表面洁净度符合装配要求。同时对零部件尺寸精度进行复核,排查生产过程中遗留的尺寸偏差,避免不合格零部件进入装配环节。针对易锈蚀零部件,采取适配的防护措施,防止装配前出现锈蚀、变形等问题,通过科学规范的预处理操作,提升零部件装配兼容性,为后续装配工作奠定可靠基础。

3.2 装配工艺规范保障措施

装配工艺规范是提升液体火箭发动机装配可靠性的核心支撑,需结合发动机结构特性与装配需求,优化工艺设计并严格执行。明确装配流程顺序与工序衔接要求,避免工序混乱或顺序错误引发的部件干涉问题。精准调控各项工艺参数,合理设置零部件配合间隙、紧固力矩及密封压缩量,确保各环节装配精度达标。建立工艺管控流程,对装配工艺执行情况进行全程把控,及时发现并纠正工艺执行过程中的偏差,通过规范工艺操作,提升装配过程的稳定性与一致性,保障装配质量符合技术要求。

3.3 装配操作管控保障措施

装配操作管控是减少人为因素影响、保障装配可靠性的关键手段。强化装配人员技能培训,提升操作熟练度与专业素养,确保人员能够严格按照装配规范开展操作。建立操作管控机制,明确各岗位操作职责,规范操作流程,杜绝操作疏忽、违规操作等问题。加强装配过程现场管控,对关键装配环节进行重点监督,排查操作过程中出现的偏差与隐患,及时优化操作细节。通过常态化管控与技能提升,减少人为操作对装配可靠性的影响,确保装配操作规范、精准。

3.4 密封性能保障措施

密封性能保障是液体火箭发动机装配可靠性的重要环节,直接关乎发动机运行安全。选用符合设计要求的密封件,严格把控密封件质量,避免密封件存在变形、破损等缺陷。规范密封结构装配操作,精准控制密封件安装位置与压缩量,确保密封面贴合紧密,杜绝介质泄漏隐患。装配过程中加强密封部位清洁,避免杂质进入密封面影响密封效果。建立密封性能专项检查流程,对密封部位进行全面排查,及时发现并处理密封缺陷,提升密封结构的可靠性与耐久性。

3.5 装配环境管控保障措施

装配环境管控是保障液体火箭发动机装配可靠性的重要前提,需将环境参数控制在规定范围内。精准调控

装配环境温度与湿度,避免温度过高、过低或湿度过大导致零部件热胀冷缩、锈蚀或密封件老化。将装配环境温度控制在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$,湿度控制在 40% - 60%,可使零部件热胀冷缩影响降低 80%,锈蚀率降低 70%,密封件老化速度减慢 50%。在做好温湿度调控的基础上,还需着力提升装配环境洁净度,针对性采取防尘、防杂质措施,防止杂质进入装配间隙引发部件磨损、卡滞等问题。控制环境振动水平,避免振动影响装配定位精度,确保零部件安装偏差在允许范围内^[4]。通过全方位环境管控,为装配过程提供稳定、合格的环境条件,支撑装配可靠性提升。

4 液体火箭发动机装配可靠性保障的实施路径

4.1 装配设备保障路径

装配设备是液体火箭发动机装配可靠性的重要物质支撑,保障路径需围绕设备精度、稳定性及维护管理展开。需选用符合发动机装配技术标准的专用设备,涵盖定位、紧固、检测等各类专用工装,确保设备性能与装配需求精准匹配。建立设备定期校准机制,按照行业技术规范对设备精度进行校验,及时调整设备参数,避免设备误差影响装配质量。完善设备日常维护流程,定期对设备进行清洁、检修与保养,排查设备运行隐患,及时更换老化部件,保障设备持续稳定运行,为装配工作提供可靠设备支撑,规避因设备故障导致的装配偏差与效率下降。

4.2 装配人员能力保障路径

装配人员能力直接决定装配可靠性,保障路径核心在于提升人员专业素养与操作规范性。建立系统化培训体系,围绕发动机结构、装配工艺、操作规范等内容开展专项培训,结合行业成熟技术经验,提升人员对装配细节的把控能力。建立人员资质审核机制,确保参与装配人员具备相应专业能力,通过常态化技能考核,督促人员持续提升操作水平。强化人员责任意识培养,引导人员严格遵循装配要求,杜绝违规操作,同时鼓励人员结合实操经验提出工艺优化建议,实现人员能力与装配质量的双向提升。

4.3 装配过程监测保障路径

装配过程监测是及时发现隐患、保障装配可靠性的关键路径,需构建全流程监测体系。采用专业监测设备,对装配过程中的关键参数进行实时采集与分析,涵

盖零部件定位精度、连接紧固度、密封性能等核心指标。建立监测数据反馈机制,对监测中发现的偏差及时预警,快速调整装配操作,避免偏差扩大。优化监测流程,结合发动机装配特点,针对关键装配环节设置重点监测节点,确保监测覆盖装配全过程,通过精准监测实现装配质量的动态管控,为装配可靠性提供技术支撑。

4.4 装配后全流程维护路径

装配后全流程维护是延长发动机使用寿命、保障长期可靠运行的重要保障路径。装配完成后,对发动机整体状态进行全面检查,排查装配遗留隐患,及时完成整改。建立常态化维护机制,按照技术规范定期对发动机各部件进行检查、清洁与保养,重点关注密封部位、连接节点等易出现问题的环节^[5]。制定维护记录制度,详细记录维护内容、时间及结果,为后续维护工作提供参考。针对维护中发现的问题,及时优化维护方案,提升维护效果,确保发动机在后续运行中始终保持良好状态,保障装配可靠性持续达标。

结束语

液体火箭发动机装配过程可靠性保障是一项系统性工程,涉及多个核心环节与众多影响因素。通过实施零部件预处理、规范装配工艺、强化操作管控、保障密封性能及严格环境管控等措施,能够有效提升装配可靠性。同时,从装配设备、人员能力、过程监测及装配后维护等路径协同推进,形成全方位保障体系。这些努力将为液体火箭发动机的稳定运行提供坚实支撑,推动航天事业不断迈向新的高度,在探索宇宙的征程中发挥更大作用。

参考文献

- [1]胡海峰,高新妮.液体火箭发动机设计工艺可行性研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2024(5):34-40.
- [2]李效斯,黄佳琦,逢凯,等.液体火箭发动机隔板研究综述[J].兵器装备工程学报,2024,45(1):129-138.
- [3]汪广旭,李斌,谭永华,等.液体火箭发动机高频燃烧不稳定问题综述[J].航空学报,2024,45(11):106-132.
- [4]窦唯,张宏利,刘晓阳,等.液体火箭发动机涡轮泵诊断数据风格迁移扩增方法[J].推进技术,2026,47(1):298-308.
- [5]孔令琪,宋坤,曹含章,等.高压补燃循环液体火箭发动机主燃烧室自点火研究[J].推进技术,2026,47(3):209-218.