

液体火箭发动机装配密封性试验与质量管控

孙 磊 田跃达 冯海涛 张 勇 李浩天
首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：液体火箭发动机装配密封性直接决定航天发射安全性与可靠性，是发动机研制的核心关键环节。本文阐述装配结构、密封原理及试验核心指标，系统介绍气泡法、氮质谱正压检漏法等试验方法及实施流程，构建涵盖装配、试验、检测全流程的质量管控体系，提出数字化升级、人员能力提升等优化措施，解决密封试验与管控中的薄弱问题，为发动机装配密封性保障提供理论支撑与实践指导，助力提升航天动力产品质量稳定性。

关键词：液体火箭；发动机装配；密封性试验；质量管控

引言：液体火箭发动机作为航天发射的“心脏”，其装配密封性是防范介质泄漏、避免发射故障的关键，国际航天发射故障中近四成与发动机相关，密封失效可能引发灾难性后果。当前航天事业快速发展，对发动机密封性能与质量管控提出更高要求，现有管控模式仍存在流程衔接不紧密、检测精度不足等问题。基于此，本文聚焦装配密封性试验与质量管控，梳理核心技术与管控要点，为发动机可靠运行提供保障。

1 液体火箭发动机装配密封性相关基础理论

1.1 液体火箭发动机装配结构与密封原理

(1) 发动机核心装配结构：液体火箭发动机核心装配结构围绕推进系统展开，推进系统由燃料箱、氧化剂箱、输送管路及增压系统组成，装配时需保证各部件衔接紧密；燃烧室作为核心动力部件，其喷管与燃烧室壳体的衔接处、冷却套接口为关键密封部位；阀门作为介质控制核心，阀座与阀芯、阀体与阀盖的装配处密封要求极高；管路系统纵横交错，接头、弯管及法兰连接处均为密封薄弱点，这些部位需根据工况特点设计适配的密封结构，确保无介质泄漏^[1]。(2) 密封原理与密封类型：静密封核心原理是通过密封件挤压变形，填充密封面间隙，阻断介质渗透，适用于固定衔接部位；动密封则依靠密封件与运动部件的精密配合，在相对运动中维持密封效果。垫片密封多用于法兰、端盖等静密封部位，适配中低压工况；填料密封适用于阀门阀杆、泵轴等动密封场景，可耐受一定转速与压力；机械密封则用于高压、高速的动密封部位，如涡轮泵轴端，密封可靠性更高。

1.2 装配密封性试验核心指标与要求

(1) 核心试验指标：泄漏率是核心判定指标，参考行业标准，按介质类型规定量化值，如推进剂介质泄漏率需控制在规定阈值内；试验压力通常为工作压力的1.2-

1.5倍，确保覆盖实际工况；保压时间不少于30分钟，期间压力降不超过规定值；环境温度控制在15-25℃，避免温度波动影响试验结果，各项指标均需符合航天行业相关标准。(2) 试验基本要求：试验环境需洁净、无粉尘，避免杂质影响密封效果；试验介质选用与实际工作介质兼容的气体或液体，防止腐蚀密封件；试验设备需经校准，精度满足检测要求；操作人员需持证上岗，严格按照试验规程操作，做好每一步记录，确保试验过程规范、结果准确。

1.3 装配密封性质量管控的核心内涵与原则

(1) 核心内涵：液体火箭发动机装配密封性质量管控，是对装配、试验、检测及改进全流程的系统性管控，涵盖零部件进场检验、装配过程把控、密封性试验检测，以及试验后故障分析、工艺优化等环节，核心是确保发动机全生命周期内密封性能稳定可靠。(2) 管控原则：全面性原则要求覆盖所有密封部位及全流程；预防性原则强调提前排查零部件质量、装配工艺隐患；规范性原则要求所有操作符合标准规程；可追溯性原则需确保装配、试验、检测等环节的记录完整可查，便于后续追溯与改进，各原则协同落实，保障密封质量。

2 液体火箭发动机装配密封性试验方法与实施

2.1 密封性试验方法分类与选择

(1) 常用试验方法：气泡法原理是向试验件内通入一定压力的气体，将密封部位浸入皂液，通过观察气泡产生情况判断泄漏，操作流程为装夹试验件、通入气体、涂抹皂液、观察记录，适用于低压密封部位的粗检漏；压降法通过监测试验件内压力随时间的变化判断泄漏，操作时先充压至规定值，保压期间连续记录压力数据，适用于中高压静密封部位的检漏；氮质谱正压检漏法利用氮质谱检漏仪检测试验件内氮气泄漏量，原理是通过质谱分析识别氮气成分，操作流程包括抽真空、充

入氮气、质谱检测、数据读取,适用于泄漏等级要求高的关键部位;浸水法与气泡法类似,将试验件整体浸入水中,通入气体后观察气泡,适用于小型管路、阀门等部件的整体检漏^[2]。(2)试验方法选择依据:结合密封部位结构,法兰、端盖等静密封部位可选用气泡法、压降法,阀杆、泵轴等动密封部位优先选用氮质谱正压检漏法;根据泄漏等级要求,普通部位选用气泡法、浸水法,核心关键部位选用氮质谱正压检漏法;结合试验环境,干燥环境可采用气泡法,潮湿环境需做好防护后选用压降法,实验室高精度检测优先选用氮质谱正压检漏法。同时优化试验方案,对复杂密封部位采用多种方法联合检漏,提升检测准确性。

2.2 密封性试验设备与准备工作

(1)核心试验设备:检漏仪核心参数包括检漏灵敏度、测量范围,需定期校准,确保灵敏度符合检测要求;压力传感器精度不低于0.5级,校准周期不超过6个月,操作时需正确安装在压力监测点;保压装置需具备压力稳定功能,压力波动不超过规定值;介质供给装置需能稳定提供试验介质,控制流量与压力。氮质谱检漏仪使用时需提前抽真空至规定真空度,严格控制氮气纯度不低于99.99%,避免杂质影响检测结果,操作后及时清理仪器管路^[3]。(2)试验准备工作:试验介质选用与发动机实际工作介质兼容的气体或液体,气体需经干燥、过滤处理,去除水分、油污及杂质,液体需静置沉淀后过滤;试验件预处理包括清洁密封面、检查密封件完好性,去除表面杂物与锈蚀;设备调试需检查各部件连接密封性,校准仪器参数,确保设备正常运行;安全防护措施包括设置防护栏、配备应急器材,操作人员穿戴防护装备,避免介质泄漏引发安全事故。

2.3 密封性试验实施流程与关键步骤

(1)试验实施流程:试验前准备完成试验件装夹、设备调试及安全检查;试验介质注入按照规定速率缓慢注入,避免冲击密封件;压力施加逐步提升至试验压力,避免压力骤升损坏试验件;保压监测期间持续记录压力、温度及泄漏数据;泄漏检测采用对应试验方法排查泄漏点;试验结束后缓慢卸压,排出试验介质,清洁试验件与设备,整理试验场地。(2)关键操作步骤:压力施加速率控制在0.1-0.2MPa/min,确保密封件平稳受力;保压过程中每5分钟记录一次压力、温度数据,密切监测压力降;泄漏点定位采用分段排查法,对可疑部位重点检测,结合皂液涂抹、质谱分析等方式精准定位;试验数据需实时、准确记录,包括试验时间、压力、泄漏率等参数,不得涂改,确保数据可追溯^[4]。

2.4 试验数据处理与结果判定

(1)试验数据处理:整理试验过程中记录的压力、温度、泄漏量等数据,剔除异常值;泄漏率计算根据试验介质类型、试验件容积及压力变化,采用对应公式计算,确保计算精度;数据误差分析包括仪器误差、环境误差及操作误差,通过多次重复试验减小误差,确保数据准确可靠,形成完整的数据报告。(2)试验结果判定:合格结果需满足泄漏率、压力降等指标符合行业标准及设计要求,保压期间无明显泄漏;不合格结果为泄漏率超标、压力降超出规定值或存在明显泄漏点,需排查泄漏原因,整改后重新试验;可疑结果为数据异常或泄漏情况不确定,需重复试验,结合多种检测方法复核。不合格情况处理流程包括停机卸压、排查泄漏原因、更换密封件或调整装配工艺,复检需采用相同试验条件,确保结果准确。

3 液体火箭发动机装配密封性质量管控体系构建与优化

3.1 装配过程质量管控

(1)零部件质量管控:建立全流程零部件质量管控机制,零部件入库前需进行严格检验,重点核查密封件的尺寸精度、材质性能及密封性能,出具检验合格报告后方可入库;存储环节需划分专属区域,控制存储环境的温湿度,避免密封件受潮、老化或损坏;搬运过程中采用专用工装,轻拿轻放,防止零部件碰撞、划伤,杜绝不合格零部件进入装配环节,从源头保障装配密封性。(2)装配工艺管控:严格规范装配操作流程,针对不同密封部位明确具体装配工艺参数,如法兰连接的拧紧力矩、密封件装配间隙等,确保装配操作标准化;加强装配过程中的工序检验,每完成一道密封装配工序,需经检验人员确认合格后,方可进入下一道工序,同时落实操作、检验、监理三方确认制度,确保装配质量可追溯。(3)多余物控制:建立完善的装配过程多余物预防与控制体系,梳理零部件清洁、装配操作、工装使用等多余物产生的关键环节,明确各环节责任人;制定针对性控制措施,如装配前清洁工装与试验件、装配过程中规范工具使用、装配后进行多余物排查,避免多余物残留密封部位,防止其磨损密封件、堵塞管路,导致密封失效。

3.2 试验过程质量管控

(1)试验人员管控:严格执行试验人员持证上岗制度,所有试验人员需经专业培训,熟练掌握试验流程、设备操作及安全规范后,方可开展试验工作;明确各岗位人员职责,规范操作行为,杜绝违规操作;定期开展

技能考核与专项培训,及时更新专业知识与操作技能,提升试验人员的专业素养与责任意识。(2)试验设备管控:建立试验设备全生命周期管理体系,制定定期校准、维护、检修制度,压力传感器、检漏仪等核心设备需按规定周期校准,确保测量精度;日常做好设备清洁、维护工作,及时排查设备故障,做好设备运行记录与故障处理记录,留存完整档案;设备出现故障时,立即停机检修,严禁设备带故障运行,保障试验过程顺利开展^[5]。(3)试验环境管控:严格控制试验场地的环境参数,将温度控制在15-25℃、湿度控制在40%-60%,保持场地清洁无粉尘;采取有效措施避免气流、电磁波及振动等外界干扰,防止影响试验数据准确性;建立环境参数实时监测与记录机制,每30分钟记录一次环境数据,确保试验环境符合标准要求。

3.3 质量检测与缺陷处理

(1)质量检测体系:构建装配与试验全流程检测机制,装配过程中开展工序检测,重点检查密封件装配质量、密封面清洁度及装配间隙;试验后进行成品检测,全面核查泄漏率、压力降等核心指标;明确各检测项目的检测方法、检测频率及合格标准,配备专业检测人员与设备,确保检测工作全面、精准。(2)缺陷识别与分类:总结液体火箭发动机装配密封性常见缺陷,主要包括密封面损伤、装配偏差、密封件老化、介质污染等类型;建立统一的缺陷识别标准与分类方法,明确各类缺陷的外观特征、判定依据,便于检测人员快速识别、精准分类,为缺陷处理提供依据。(3)缺陷处理与改进:制定规范的缺陷整改流程,针对不合格缺陷,明确返工要求、整改时限及责任人,返工后需重新检测,直至合格;建立缺陷原因分析机制,通过现场排查、数据复盘等方式,找出缺陷产生的根本原因,制定针对性预防措施,更新工艺规范与管控要求,实现缺陷闭环管理,持续降低缺陷发生率。

3.4 质量管控体系优化措施

(1)数字化管控升级:引入数字化管控技术,搭

建装配与试验数据管理平台,实现装配过程参数、试验数据的实时监测、自动记录与全程追溯;利用大数据分析技术,排查管控薄弱环节,预测潜在质量风险,提升管控效率与精准度,减少人为操作误差。(2)人员能力提升:建立常态化培训与考核机制,结合岗位需求开展专项培训,覆盖装配工艺、试验操作、缺陷识别等内容;优化人员配置,明确岗位职责,完善激励与考核机制,提升装配、试验及管控人员的专业技能与责任意识,打造高素质管控团队。(3)标准体系完善:结合航天行业发展趋势与工程实际经验,修订完善液体火箭发动机装配密封性试验与质量管控的标准规范,细化检测指标、工艺参数及管控要求;加强与行业标准对接,确保管控工作的规范性、统一性,为质量管控提供坚实的标准支撑。

结束语

综上,液体火箭发动机装配密封性试验与质量管控是一项系统性、精细化工程,需贯穿零部件进场、装配、试验、缺陷处理全生命周期。本文明确的试验方法、实施流程及管控体系,可有效规避密封失效风险,提升发动机密封可靠性。未来需结合航天技术发展,持续完善标准体系、推进数字化管控升级,强化人员专业能力,持续优化管控模式,为我国航天事业高质量发展筑牢动力保障防线。

参考文献

- [1]刘超,赵洪丰,胡一廷,等.数字化装配在航空发动机装配中的应用研究[J].航空制造技术,2025,58(21):46-50.
- [2]赵明,涂冰怡.航空发动机关键部件结构及制造工艺的发展[J].航空制造技术,2023,48(12):42-46.
- [3]张波,王园园,宋迎军,等.航空发动机脉动装配生产线排产算法研究[J].机电工程技术,2022,23(08):151-154.
- [4]罗龙锦,李鸿,马利.突出重点强化管理做好航空发动机装配质量监督工作[J].质量与可靠性,2022,17(3):91-94.
- [5]李慧,宋迎军,王园园,等.航空发动机脉动总装生产线建模仿真系统[J].机电工程技术,2022,6(8):77-82.