

# 液体火箭发动机装配过程失效模式及预防措施

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

**摘 要:** 液体火箭发动机装配过程复杂, 易出现多种失效模式。本文详细阐述了零件装配偏差类失效, 包括零件定位偏差、配合间隙异常等; 连接部位失效, 如螺纹、焊接、铆接与粘接、密封连接失效; 装配操作及辅助环节失效, 涵盖装配力控制不当等; 清洁度相关失效。针对各类失效模式, 从规范操作流程、选用适配工具、控制装配环境等多方面提出预防措施, 以保障液体火箭发动机装配质量, 提升其可靠性与稳定性。

**关键词:** 液体火箭发动机; 装配过程; 失效模式; 预防措施

引言: 液体火箭发动机作为航天器的关键动力装置, 其性能直接决定航天任务的成败。而装配过程是确保发动机性能的重要环节, 由于发动机结构复杂、零件众多, 装配过程中极易出现各类失效模式。这些失效模式不仅会影响发动机的装配精度与结构强度, 还可能导致发动机在服役过程中出现故障, 甚至引发严重的安全事故。因此, 深入分析液体火箭发动机装配过程的失效模式, 并制定有效的预防措施, 具有重要的现实意义。

## 1 零件装配偏差类失效及预防措施

### 1.1 主要失效模式

零件定位偏差是装配过程中常见的失效表现, 源于装配定位基准选取不合理、定位工装精度不足或定位操作流程不规范, 导致零件在装配过程中无法处于设计预设的空间位置, 进而影响后续装配工序的顺利推进, 破坏整机装配精度<sup>[1]</sup>。零件配合间隙异常体现在间隙过大与间隙过小两种情况, 间隙过大易造成零件装配后出现松动、晃动现象, 降低装配结构的稳定性与连接强度; 间隙过小则会导致零件装配时出现卡滞, 强行装配可能引发零件表面损伤, 甚至破坏零件原有结构精度, 二者均不符合装配设计标准。零件装配方向错误是装配操作中的基础性失误, 多因装配人员对零件结构认知不充分、装配标识不清晰, 导致零件安装方向与设计要求相悖, 直接影响零件功能发挥, 严重时会导致整个装配组件无法正常工作, 造成装配工序返工。

### 1.2 预防措施

规范零件定位流程是预防定位偏差的核心手段。在操作过程中, 需紧密结合零件装配设计要求, 科学且精准地选取定位基准。应优先选择零件上具有高精度、高稳定性的特征部位, 例如设计基准孔、基准面等, 以此保证定位基准具备足够的稳定性与精度。与此同时, 还需建立标准化的定位操作流程, 清晰且明确地规定各环

节操作要求, 杜绝定位过程中的随意性操作。严格控制零件配合尺寸是解决配合间隙异常的关键。装配前需对零件关键配合尺寸进行全面复核, 采用专业测量工具完成尺寸检测, 筛选出符合设计要求的合格零件, 杜绝尺寸超差零件进入装配环节, 从源头规避配合间隙异常问题。明确零件装配方向标识能够有效避免装配方向错误。在零件生产过程中设置清晰、规范的装配方向标识, 装配前由操作人员对标识进行仔细核对, 确认标识与装配要求一致后再开展装配操作, 通过双重把控确保装配方向的准确性, 保障装配工序有序推进。

## 2 连接部位失效及预防措施

### 2.1 主要失效模式

#### 2.1.1 螺纹连接失效

螺纹连接失效是机械装配中发生率较高的连接类失效形式, 多由螺纹加工精度不足、螺纹表面损伤、拧紧操作不规范等因素引发, 具体表现为螺纹滑丝、连接松动或未达到设计拧紧要求, 进而导致连接结构承载能力下降, 无法传递设计预设的载荷, 严重时会引起连接部件分离, 影响装配体整体稳定性。

#### 2.1.2 焊接连接失效

焊接连接失效源于焊接工艺参数不合理、焊接操作不规范或焊接材料与基体材料适配性不足, 常见表现为未焊透、焊接裂纹、虚焊等形式, 此类失效会破坏焊接接头的完整性与强度, 导致焊接部位无法承受工作载荷, 易在装配后或服役过程中出现断裂现象<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.3 铆接与粘接连接失效

铆接与粘接连接失效均会导致连接结构强度不足, 铆接失效主要表现为铆钉脱落、铆接处变形或铆钉与铆接孔配合不良, 粘接失效则多因粘接剂选型不当、粘接面清洁不彻底或粘接工艺参数控制不佳, 导致粘接面分离, 二者均会影响连接部位的结构完整性。

### 2.1.4 密封连接失效

密封连接失效直接影响装配体的密封性能, 多由密封件选型不合理、密封面损伤、密封件装配操作不当等因素导致, 表现为密封面贴合不紧密、密封件老化或损坏, 进而引发介质泄漏, 破坏装配体正常工作环境, 甚至影响整机功能。

## 2.2 预防措施

### 2.2.1 预防螺纹连接失效的措施

规范螺纹连接操作是预防螺纹连接失效的关键, 需结合螺纹连接的设计要求, 选用适配的螺纹连接工具, 精准控制拧紧力矩, 确保拧紧力矩符合设计标准, 同时在装配过程中对螺纹表面进行清洁, 避免杂质残留影响连接精度, 减少螺纹滑丝与松动风险。此外, 需对螺纹加工质量进行提前检验, 剔除螺纹表面有损伤、加工精度不达标的零件, 装配后对螺纹连接部位进行复查, 确认连接牢固, 进一步保障螺纹连接的可靠性。

### 2.2.2 预防焊接连接失效的措施

优化焊接工艺是规避焊接连接失效的核心手段, 需结合焊接材料与基体材料特性, 合理调整焊接电流、焊接速度、焊接温度等工艺参数, 建立标准化焊接操作流程, 明确焊接前准备、焊接过程控制及焊接后处理的操作要求, 提升焊接接头质量。焊接前需清洁焊接面, 去除表面油污、氧化皮等杂质, 选用与基体材料适配的焊接材料, 焊接过程中严格控制工艺参数, 焊接后及时进行保温、探伤等处理, 排查焊接缺陷并及时整改, 杜绝焊接失效隐患。

### 2.2.3 预防铆接与粘接连接失效的措施

严格把控铆接与粘接工艺参数能够有效保障连接强度, 铆接过程中需精准控制铆钉规格与铆接力, 确保铆钉与铆接孔适配, 避免铆接力过大导致铆接处变形、过小导致连接松动, 同时检查铆钉质量, 剔除损坏、变形的铆钉。粘接过程中需选用与基体材料适配的粘接剂, 彻底清洁粘接面, 去除表面杂质与油污, 严格控制粘接温度与固化时间, 确保粘接强度达到设计要求, 粘接后进行固化养护, 避免过早受力导致粘接面分离。

### 2.2.4 预防密封连接失效的措施

规范密封件装配操作可有效提升密封面贴合度, 装配前需检查密封件状态, 确保密封件无损伤、无老化, 同时清洁密封面, 去除表面杂质与油污, 避免杂质影响密封效果。装配过程中控制装配力度, 确保密封件与密封面紧密贴合, 避免过力导致密封件损坏、欠力导致密封不严密, 同时根据装配环境与工作需求, 选用适配规格与材质的密封件, 定期检查密封部位状态, 及时更换

老化、损坏的密封件, 从源头规避密封连接失效问题。

## 3 装配操作及辅助环节失效及预防措施

### 3.1 主要失效模式

#### 3.1.1 装配力控制不当

装配力控制不当分为过力与欠力两种情况, 过力装配会导致零件产生塑性变形, 破坏零件原有结构精度, 甚至引发零件表面划伤、裂纹等损伤; 欠力装配则无法保证零件连接强度与装配精度, 易导致零件装配后出现松动, 影响装配体整体稳定性<sup>[3]</sup>。

#### 3.1.2 装配顺序错误

装配顺序错误违背装配工艺设计原则, 会导致后续零件无法顺利安装, 或已装配零件与待装配零件发生干涉, 破坏零件结构完整性, 同时增加装配返工概率, 降低装配效率。

#### 3.1.3 装配过程中零件损伤

装配过程中零件损伤多源于操作不规范, 拿取、放置时力度控制不合理, 或装配过程中缺乏必要防护, 导致零件表面出现磕碰、划伤, 或精密零件出现磨损, 影响零件使用性能与装配精度。

#### 3.1.4 装配工具选用不当或状态异常

装配工具选用不当或状态异常会直接引发装配失效, 选用工具与装配需求不匹配会导致装配操作无法精准完成, 工具磨损、精度下降等状态异常则会影响装配精度, 甚至造成零件损伤。

#### 3.1.5 装配工装夹具定位或固定异常

装配工装夹具定位或固定异常会破坏装配基准, 导致零件定位偏差, 无法达到设计装配精度, 同时可能在装配过程中出现零件松动、偏移, 引发装配失误与零件损伤。

### 3.2 预防措施

#### 3.2.1 预防装配力控制不当的措施

明确装配力控制标准是规避装配力不当失效的关键, 结合零件装配设计要求与材料特性, 制定合理的装配力控制范围, 选用精准控力工具开展装配操作, 实时监测装配力大小, 确保装配力符合设计标准。同时, 加强操作人员的操作培训, 提升其对装配力的把控能力, 装配过程中若出现异常受力情况及时停止操作, 排查问题后再继续, 避免因装配力不当造成零件损伤与装配失效。

#### 3.2.2 预防装配顺序错误的措施

制定标准化装配顺序需结合零件结构与装配工艺要求, 明确各装配步骤的先后逻辑, 细化各环节操作规范, 编制详细的装配流程手册, 方便操作人员查阅与执行。装配过程中严格按既定顺序执行, 避免随意调整装配流

程,同时建立装配过程检查机制,每完成一个装配步骤进行专项检查,确认无误后再进入下一道工序,杜绝因装配顺序错误引发的装配失效与返工问题。

### 3.2.3 预防装配过程中零件损伤的措施

规范零件拿取、放置、装配操作,建立标准化操作流程,拿取放置时轻拿轻放,避免用力过猛造成零件磕碰、划伤,对精密零件采用专用防护工具进行保护,减少与其他部件的接触损伤。装配过程中合理规划装配空间,避免零件之间发生碰撞,同时定期检查装配环境,清除环境中的尖锐杂物,为零件装配提供安全的操作环境,保护零件表面精度与结构完整性。

### 3.2.4 预防装配工具选用不当或状态异常的措施

根据装配需求精准选用适配工具,结合零件规格与装配工艺要求筛选工具,避免选用规格不符、精度不足的工具,同时建立工具管理台账,对工具进行分类存放、统一管理<sup>[4]</sup>。定期对工具进行全面检查,及时维护损坏、磨损工具,对精度下降的工具进行校准或更换,确保工具处于良好工作状态,为精准装配提供可靠保障,避免因工具问题引发装配失效。

### 3.2.5 预防装配工装夹具定位或固定异常的措施

定期校准工装夹具,按照校准标准开展周期性精度检测与校准工作,及时调整夹具定位、固定参数,消除定位偏差,确保工装夹具定位与固定精度符合装配设计要求。装配前检查工装夹具的状态,确认夹具无松动、无损坏,定位基准与装配要求一致,装配过程中实时观察夹具的固定情况,若出现松动、偏移及时进行调整,为精准装配提供稳定的基准支撑,规避因工装夹具异常引发的装配失效。

## 4 清洁度相关失效及预防措施

### 4.1 主要失效模式

装配环境清洁度不达标是引发清洁度相关失效的重要因素,环境中存在的粉尘、油污、金属碎屑等杂质,会在装配过程中附着于零件表面或装配间隙,破坏零件装配精度,同时可能加剧零件表面磨损,影响零件配合性能。杂质进入装配间隙还会导致零件卡滞,无法实现顺畅运行,严重时破坏零件结构完整性,降低装配体整体可靠性。零件表面清洁度不足同样会引发装配失效,零件生产、存储或转运过程中,表面易附着油污、氧化皮、灰尘等污染物,这些污染物会影响零件连接强度与密封性能,导致连接部位松动、密封面贴合不紧密,进

而引发介质泄漏。污染物还会破坏零件表面精度,影响装配基准准确性,导致后续装配工序出现偏差,同时可能加速零件腐蚀,缩短零件使用寿命,影响装配服役性能。

### 4.2 预防措施

控制装配环境清洁等级是预防环境清洁度不达标失效的核心,结合装配工艺设计要求与零件精度需求,确定合理的环境清洁等级标准,搭建符合标准的洁净装配环境。定期开展环境清洁度检测工作,采用专业检测设备对环境中的杂质含量、粒径分布等指标进行检测,及时清理环境中的污染物,调整环境净化系统运行参数,确保装配环境始终符合清洁等级要求。装配前对零件进行全面清洁是保障零件表面清洁度的关键,根据零件材质与表面污染物类型,选用适配的清洁介质与清洁方法,彻底去除零件表面的油污、灰尘、氧化皮等污染物<sup>[5]</sup>。清洁完成后需开展严格检验工作,采用目视检测、精密仪器检测等方式,确认零件表面清洁度符合装配要求,合格后方可进入装配环节,从源头规避清洁度不足引发的各类装配失效。

### 结束语

液体火箭发动机装配过程失效模式多样,涵盖零件装配、连接部位、操作环节及清洁度等多个方面。这些失效模式对发动机的装配质量与性能有着严重影响。通过详细分析各类失效模式,并针对性地提出预防措施,能够有效降低装配过程中的失效风险,提高装配质量与效率。在实际装配工作中,需严格遵循预防措施,加强过程管控,确保液体火箭发动机装配工作顺利开展,为航天事业的发展提供坚实保障。

### 参考文献

- [1]张振臻,李艺烜,陈晖.基于故障融合降维的液体火箭发动机诊断方法[J].火箭推进,2025,51(6):1-14.
- [2]杜大华,李斌.液体火箭发动机结构动力学设计关键技术综述[J].航空学报,2023,44(10):32-48.
- [3]朱兆基,樊勋,董龙雷,等.液体火箭发动机典型承力结构动态拓扑优化设计[J].航天器环境工程,2025,42(2):152-158.
- [4]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.
- [5]汪广旭,杨宝娥,谭永华,等.液体火箭发动机高频纵向燃烧不稳定现象的随机性[J].航空学报,2024,45(14):189-199.