

液体火箭发动机管路装配与密封性控制

张 勇 李浩天 孙 磊 田跃达 冯海涛

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要: 液体火箭发动机管路装配中, 零部件清洁、外观检查、工具材料准备为装配基础要求。关键流程涵盖管路定位、连接操作、支撑固定及防护。密封性控制涉及密封结构选型、密封件装配及预防措施。装配后需开展清洁处理、密封部位防护与规范存放。本文详细阐述各环节管控要点, 从装配前准备到装配后处理形成完整体系, 通过严格把控精度、强化密封防护、规范清洁存放等措施, 保障液体火箭发动机管路装配质量与密封性能, 为发动机可靠运行提供坚实支撑。

关键词: 液体火箭发动机; 管路装配; 密封性控制; 装配精度; 防护处理

引言: 液体火箭发动机作为航天运载工具的核心动力装置, 其性能可靠性直接决定任务成败。管路系统作为发动机的关键组成部分, 承担着推进剂、冷却剂等介质的传输任务, 其装配质量与密封性能至关重要。管路装配涉及多环节、多要素, 任何细微偏差都可能引发泄漏、腐蚀等严重问题, 进而影响发动机整体性能。因此, 深入研究液体火箭发动机管路装配与密封性控制技术, 明确各环节技术要求与管控要点, 对于提升发动机制造质量、保障航天任务顺利实施具有不可忽视的重要意义。

1 液体火箭发动机管路装配基础要求

1.1 液体火箭发动机管路装配前准备

液体火箭发动机管路装配前, 零部件清洁工作至关重要。管路系统传输推进剂、冷却剂等关键介质, 若零部件表面残留杂质, 可能引发腐蚀、堵塞或密封失效等问题^[1]。清洁过程需采用专用清洗剂, 通过超声波清洗、高压喷射等手段, 彻底去除油污、金属屑及氧化层。清洗后, 零部件应置于洁净环境中自然干燥或使用惰性气体吹干, 避免二次污染。外观检查是确保管路质量的重要环节。检查人员需对管路零部件进行全面审视, 重点关注表面裂纹、划痕、凹坑等缺陷。对于焊接接头, 需检查焊缝成型是否均匀, 有无气孔、夹渣等焊接缺陷。法兰连接面需确认密封槽深度、宽度是否符合设计要求, 表面粗糙度是否达标。所有检查项目均需形成书面记录, 为后续装配提供依据。装配工具与辅助材料的准备直接影响装配效率与质量。工具方面, 需配备高精度扭矩扳手、激光对中仪、专用卡具等, 确保装配过程可控。辅助材料包括密封垫片、螺纹紧固胶、防锈油等, 需根据管路介质特性、工作温度及压力等级进行选型。所有工具与材料需提前进行状态检查, 确保性能可靠。

1.2 液体火箭发动机管路装配关键流程

管路定位与对准是装配的基础。需依据发动机总体布局, 通过激光跟踪仪或数字孪生技术确定管路空间坐标, 确保各段管路轴线重合度满足设计要求。对准过程中, 需考虑热膨胀、振动等因素对管路位置的影响, 预留适当补偿量。连接方式操作需严格遵循工艺规范。焊接连接时, 需控制焊接电流、电压及速度, 避免产生焊接变形或残余应力。法兰连接时, 需按对角顺序分步拧紧螺栓, 确保密封面均匀压紧。快速接头连接时, 需确认锁紧机构到位, 防止介质泄漏。支撑与固定装配需确保管路稳定性。根据管路走向及受力情况, 合理布置支撑点, 避免管路因自重或振动产生下垂或晃动。固定件需与管路外壁紧密贴合, 防止局部应力集中。对于高温管路, 需考虑热膨胀补偿措施, 避免因热变形导致管路损坏。装配过程中的防护工作不容忽视。操作人员需穿戴防静电服、防护手套等个人防护装备, 避免静电或机械损伤管路表面。装配区域需保持清洁, 防止灰尘、杂物进入管路内部。对于易腐蚀部位, 需及时涂抹防锈油或覆盖防护罩, 延长管路使用寿命。

1.3 液体火箭发动机管路装配过程中的精度控制

尺寸精度控制是管路装配的核心。需通过三坐标测量机或激光扫描仪对管路关键尺寸进行实时监测, 确保长度、直径等参数符合设计要求。对于超差部位, 需分析原因并采取修正措施, 如返工或调整装配顺序。连接间隙控制直接影响密封性能。法兰连接时, 需使用塞尺测量密封面间隙, 确保间隙均匀且符合标准。焊接连接时, 需控制焊缝余高及错边量, 避免因间隙过大导致泄漏。快速接头连接时, 需确认连接间隙在允许范围内, 防止介质外渗。形位公差控制需贯穿装配全过程。通过激光对中仪或数字孪生技术, 实时监测管路同轴度、垂

直度等形位参数。对于复杂管路系统,需建立形位公差链,逐级传递并控制误差,确保最终装配精度满足设计要求。装配完成后,需进行全面检测并形成质量报告,为后续试验与发射提供数据支持。

2 液体火箭发动机管路密封性控制核心要点

2.1 液体火箭发动机管路密封结构选型依据

液体火箭发动机管路密封结构选型需紧密结合实际工况。在高压工况下,金属密封结构凭借高强度与耐压性能成为首选,通过金属变形实现可靠密封,可承受数百兆帕压力^[2]。低温工况则对密封材料弹性提出严苛要求,氟橡胶或硅橡胶密封件因低温下仍能保持良好弹性,被广泛应用于液氧、液氢管路。高温工况下,陶瓷或镍基合金密封结构凭借优异耐热性,有效防止密封失效。对于振动频繁的管路系统,需选用具有自润滑特性的聚四氟乙烯密封件,降低磨损并延长使用寿命。密封件与管路材质的匹配是确保密封性能的关键。不锈钢管路宜选用不锈钢或氟橡胶密封件,避免电化学腐蚀。钛合金管路则需匹配钛合金或聚四氟乙烯密封件,防止因材质差异导致密封面损伤。对于复合材料管路,需综合考虑管路基体与增强层的热膨胀系数,选择弹性模量匹配的密封结构,防止因热应力导致泄漏。密封件硬度需与管路表面硬度形成合理梯度,既保证密封性又避免管路表面划伤。

2.2 液体火箭发动机管路密封件装配控制

密封件安装前处理直接影响密封效果。需使用专用清洗剂去除密封件表面油污与杂质,通过超声波清洗确保微观表面清洁度。对于金属密封件,需进行表面钝化处理,形成致密氧化膜提升耐腐蚀性。橡胶密封件则需进行预压缩处理,消除内部应力并提升初始密封性能。处理后的密封件应置于洁净环境中保存,避免二次污染。装配操作规范是确保密封可靠性的核心。金属密封件装配时,需控制预紧力大小,避免因过度压缩导致密封面塑性变形。橡胶密封件装配则需采用专用工具,防止划伤或扭曲。对于O型圈密封,需确保压缩率在合理范围内,既保证密封性又避免过度挤压导致失效。装配过程中需严格遵循对角拧紧原则,确保密封面均匀受力。装配过程中对密封件的保护至关重要。操作人员需佩戴洁净手套,避免手部油脂污染密封件表面。装配区域需保持正压洁净环境,防止灰尘进入密封间隙。对于精密密封结构,需在装配前进行局部遮蔽,防止工具划伤密封面。装配完成后需立即进行密封性检查,及时发现并处理潜在问题。

2.3 液体火箭发动机管路装配过程中的密封性预防措施

管路连接部位的密封防护需形成多道屏障。在法兰连接处,除选用合适密封垫片外,还需在密封面涂抹专用密封胶,填补微观间隙。焊接连接部位则需进行焊缝渗透检测,确保无裂纹等缺陷。对于快速接头连接,需设计双重密封结构,主密封失效时备用密封仍能维持系统密封性。杂质防控是防止密封失效的重要环节。装配前需对管路内部进行彻底吹扫,去除焊渣、金属屑等杂质。装配过程中需使用洁净布擦拭管路内壁,防止纤维类杂质残留。对于关键管路系统,需在装配完成后进行高压气体冲洗,确保内部清洁度达到设计要求。装配应力对密封性的影响需通过工艺优化控制。需合理设计管路支撑结构,避免因重力或振动导致管路变形。装配顺序需遵循从中间向两端的原则,逐步释放装配应力。对于高温管路,需预留热膨胀补偿量,防止因热应力导致密封失效^[3]。装配完成后需进行应力释放处理,通过振动时效或热处理消除残余应力,提升密封可靠性。

3 液体火箭发动机管路装配与密封性控制的关键环节管控

3.1 液体火箭发动机管路装配过程中的环节管控

液体火箭发动机管路关键装配工序的操作管控需贯穿装配全流程。管路定位环节需借助激光跟踪仪或数字孪生技术,实时监测管路空间坐标,确保各段管路轴线偏差控制在设计允许范围内。连接工序中,焊接操作需严格控制电流、电压及焊接速度,避免产生未熔合或裂纹等缺陷;法兰连接则需按对角顺序分步拧紧螺栓,防止密封面偏斜导致泄漏。支撑件安装时,需通过力矩扳手控制固定螺栓预紧力,确保管路受力均匀且无局部应力集中。装配过程中的状态管控需建立多维度监测体系。操作人员需使用专用量具定期检测管路直线度、圆度等几何参数,及时发现并修正装配偏差。环境控制方面,装配区域需维持恒温恒湿条件,防止温度波动导致管路热胀冷缩影响装配精度。洁净度管控需通过风淋室、洁净工作台等设备,确保装配环境达到百级洁净标准,避免灰尘进入管路内部。所有检测数据需实时记录并上传至质量管理体系,为后续追溯提供依据。

3.2 液体火箭发动机管路密封性相关环节管控

密封面加工质量是密封可靠性的基础。机械加工环节需采用高精度数控机床,确保密封面粗糙度达到Ra0.4以下,平面度误差不超过0.02mm。对于焊接接头密封面,需通过磨削或抛光处理消除焊缝余高,防止因表面凸起导致密封失效。表面处理环节需根据管路介质特性选择合适工艺,液氧管路需进行电解抛光降低表面活性,液氢管路则需进行镀层处理防止氢脆。加工完成后

需使用三坐标测量机或激光扫描仪进行全尺寸检测,确保密封面几何参数符合设计要求。连接紧固力度管控需结合材料特性与工况条件。金属密封结构需通过液压拉伸器或扭矩倍增器控制螺栓预紧力,确保密封面产生足够塑性变形形成可靠密封^[4]。橡胶密封件连接则需控制压缩率在15%-30%范围内,避免过度压缩导致永久变形或压缩不足引发泄漏。对于高温管路,需考虑热膨胀对预紧力的影响,采用弹性垫片或弹簧垫圈补偿热应力。紧固完成后需使用超声波螺栓测力仪检测实际预紧力,确保与理论值偏差 $\leq 5\%$,并定期复检预紧力衰减情况。

4 液体火箭发动机管路装配后密封性相关处理

4.1 液体火箭发动机管路装配后清洁处理

管路装配完成后的清洁处理是保障密封性能的重要前置条件。需采用分级清洗工艺,首先使用高压氮气对管路内部进行吹扫,去除装配过程中残留的金属屑、纤维等大颗粒杂质。随后注入专用清洗剂,通过循环泵驱动清洗液在管路内流动,溶解油污与有机污染物。对于精密管路系统,需采用超声波清洗技术,利用高频振动剥离附着在管壁上的微观颗粒。清洗完成后,需用高纯度酒精或去离子水进行漂洗,并通过洁净压缩空气吹干管路内部。清洁度检测需借助粒子计数器或显微镜观察法,确保管路内残留颗粒尺寸与数量满足设计要求,避免杂质嵌入密封面导致泄漏。

4.2 液体火箭发动机管路密封部位的防护处理

密封部位防护处理需针对不同密封结构采取差异化措施。金属密封面需涂抹专用防锈油,形成致密油膜隔绝空气与水分,防止氧化腐蚀。橡胶密封件则需喷涂硅基润滑剂,既保持密封面湿润又避免润滑剂迁移影响介质纯度。对于焊接接头密封部位,需用可剥离保护膜覆盖,防止后续操作划伤密封面。法兰连接部位需安装专用防护盖,避免灰尘进入螺栓孔或密封槽。防护处理完成后需进行外观检查,确保防护层均匀无缺陷,并记录防护材料批次与施工时间,为后续维护提供依据。

4.3 液体火箭发动机管路装配后的存放要求

装配完成后的管路系统存放环境需严格控制。存放区域应保持恒温恒湿,温度波动范围 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度控制在40%-60%,防止管路因温湿度变化产生应力或腐蚀。管路需水平放置在专用支架上,避免局部受力导致变形,支架接触面需包裹软质材料防止划伤管路表面。对于长期存放的管路,需定期启动洁净压缩空气循环系统,防止管路内部潮湿环境滋生微生物^[5]。存放期间需每周检查管路外观与防护层状态,发现破损及时修复。若存放周期超过设计规定时限,需重新进行密封性检测与清洁处理,确保管路性能满足使用要求。

结束语

液体火箭发动机管路装配与密封性控制是一项系统且复杂的工作,涵盖装配前准备、关键流程实施、密封性核心要点把控以及装配后处理等多个方面。通过严格遵循基础要求、精准执行关键流程、科学选型密封结构、规范装配密封件以及采取有效预防措施,可切实提升管路装配质量与密封性能。同时,强化各环节管控与装配后规范处理,能进一步保障管路系统稳定可靠。重视并落实这些工作,有助于提高液体火箭发动机整体性能,为航天事业发展筑牢坚实基础,推动航天技术不断迈向新高度。

参考文献

- [1]宋虎,杨富宁,吴英彪.液体火箭发动机翻转对接工装的设计[J].机械制造,2024,62(8):1-7,24.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]王珏,窦唯,杜家磊,等.液体火箭发动机涡轮泵振动问题研究现状及展望[J].推进技术,2025,46(4):14-29.
- [5]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.