

# 液压蓄压器密封失效机理分析与防控技术研究

李立广 王新波 朱 旭

石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050200

**摘 要:** 液压蓄压器是航空器液压系统暂时存储并适时提供液压能的装置, 其对液压系统的正常可靠工作乃至飞行安全起着重要作用。在高空高压、强振动和高频往复运动下, 蓄压器的密封装置极易发生磨损、挤压和泄漏等故障, 不仅会引起压力下降和储能失效, 还会引起液压系统泄漏和压力脉动。本文阐述了液压蓄压器密封失效机理, 探讨了液压蓄压器密封失效防控技术, 对蓄压器的性能维护及修理提供参考, 并对其他机型蓄压器的外场检查提供借鉴。

**关键词:** 液压蓄压器; 密封失效; 失效机理; 防控技术

航空器起落架收放、舵面控制等主要作业由液压系统完成, 而蓄压器则是系统中的能量储存和稳压元件, 担负着吸收压力冲击和保持系统压力平稳等作用, 是保证系统持续工作的核心。密封装置是实现蓄压器气腔及液压腔隔离、避免内外泄漏的重要屏障, 其既要承受(21-35) MPa的高压冲击, 又要经承受(-55-130) °C的大温差, 并承受机身振动和化学腐蚀等多种因素的影响。在液压蓄压器的各种故障中, 由密封故障引起的泄漏和压力衰减故障占较大比例, 液压蓄压器密封失效是最常见的故障。

## 一、液压蓄压器密封失效机理分析

### (一) 核心失效机理

#### 1. 机械磨损机理

活塞式蓄压器密封的主要失效机理是机械磨损, 在蓄压器运行时, 在筒体内壁活塞带动密封件进行高频率的往复移动, 随着使用工作时间的延长, 磨损程度不断加剧, 其在常态下的磨损损失可以由材质特性来补偿, 然而, 由于其内部含有大量的金属碎屑、氧化剥落等硬物质, 如镶嵌在微小缝隙中的磨粒, 不断地在密封表面上摩擦, 产生不同深度的沟槽, 影响密封表面的平整度。同时, 在高压力环境下, 密封与筒体之间的结合强度急剧增加, 使其在狭窄的空间中迅速积累, 使密封件上的橡胶材料碳化, 并与内壁形成粘附, 当活塞移动时, 密封件将被撕裂, 造成材料脱落, 径向尺寸减小<sup>[1]</sup>。

#### 2. 热氧老化机理

热氧老化是由于其在高温下的剧烈变化, 其在高温下的时效过程比传统工业密封件快, 并且其疲劳破坏是无法逆转的。在静止状态下, 发动机舱内的高温可

达60 °C以上, 而在高空巡航中, 温度降至-55 °C, 使其在高温和低温的交替作用下, 产生持久的热氧退化。在高温条件中, 在氧的影响下, 橡胶分子链发生断裂和过度交联, 使其在宏观上呈现出硬度升高、弹性模量急剧降低、表层开始产生细小裂纹、弹性模量急剧降低等特点。在低温条件下, 由于橡胶分子链的移动受到限制, 导致其脆度大幅提高, 耐冲击和弯曲能力大幅降低, 而机身高频振动和压力波动所产生的微弱冲击也会使其迅速开裂。

#### 3. 高压挤出机理

高压挤压机理是高压条件下蓄压器密封突然失效的关键诱发因素, 多出现在航空器起飞等过程中, 其故障突发性强, 危害极大。航空器液压系统的工作压力一般在(20-30) MPa之间, 在极限条件下, 会产生瞬间的压力脉动, 最高可超过35 MPa, 这时, 在密封的两端会产生巨大的压差, 密封圈的边缘、根部等薄弱部分, 如密封面、保护圈等, 会被硬挤压到密封槽缝内, 或者活塞与筒体的小配合缝隙内, 即所谓的“间隙咬伤”。虽然单次挤压并不能导致密封失效, 但是由于航空器液压蓄压器的工作环境复杂多变, 在反复挤压和回弹过程中, 其底部会逐步发生塑性变形, 导致其内部的应力超过了材料的屈服极限, 从而导致微小的撕裂点<sup>[2]</sup>。

#### 4. 介质腐蚀和溶胀机理

介质腐蚀和溶胀机理是一种化学性失效, 由密封介质与流体介质不匹配引起的介质劣化引起的渐进损伤, 并由内在损伤其结构完整性。在实际应用中, 由于其所含的抗磨剂和消泡剂等添加剂, 加上在使用中所掺入的水分和酸性杂质等, 都会与密封胶产生化学作用, 从而

导致其物理性质和结构形貌的变化。当普通丁腈橡胶密封件与劣质液压油或变质液压油发生接触时，这些微小的油会渗透到橡胶基质中，造成密封的体积膨胀率超标，使其硬度和拉伸强度大大降低，且密封装置不能达到理想的密封比压力；尽管具有良好的抗腐蚀性能，但是在恶劣环境条件下的长时间使用，易发生分子链析出和填充物流失等问题，而宏观上则呈现出表面粗糙和微孔的问题。

## （二）密封失效故障模式分布

为了更准确地把握蓄压器的故障特性，为预防和控制策略的制订提供依据。对近3年蓄压器密封失效故障100例进行统计，该统计对失效分布特征进行直观反映。数据显示，磨损泄漏失效约占近一半，是蓄压器密封防控的重要目标；其次为老化开裂破坏，需要通过寿命控制和温度控制降低；挤出撕裂失效虽然在挤压型裂纹中所占比例较小，但其突发性强、危害大，因此，需要对其进行预防；装配损伤失效比例最小，通过标准化装配过程可以完全降低故障发生率。

表1 密封失效故障模式分布研究

故障模式	磨损泄漏失效	老化龟裂失效	挤出撕裂失效	装配损伤失效
故障占比 (%)	48	32	14	6
蓄压器类型	活塞式	皮囊式、活塞式	活塞式	两类均发

## 二、液压蓄压器密封失效防控技术研究

### （一）优化设计选型

#### 1. 优选密封材料

选择合适的密封件，必须按照“工况适应-性能匹配”的原理，与航空器的温度和介质特性进行精确匹配，避免因盲目选择，而造成的早期故障发生。在(-40-120)℃的传统液压产品中，优选采用航空级含氟橡胶密封，该密封具有良好的抗热氧化和耐磨性能，能延缓老化开裂和磨损，适用于大部分机型蓄压器应用。对于高空极端低温等特殊情况，采用耐寒硅橡胶或者改性耐寒丁腈橡胶，其具有低温脆性小等特点，解决低温脆性断裂问题。在35MPa及更高的压力条件下，突破传统的单纯橡胶密封件，而是使用斯特封等PTFE复合密封结构，利用PTFE的低摩擦和橡胶弹性体的承载力，显著提高其抗挤压和耐磨性能，避免在高压下产生的咬痕现象<sup>[3]</sup>。

#### 2. 优化密封结构

重点解决高压挤压和摩擦磨损等关键问题，并实现密封效能和力学性能的合理匹配。对于柱塞型蓄压器，其特点是在其活塞上增加密封保护装置和阶梯式卸压孔，卸压孔能分流瞬时冲击力，减小密封件根部受力；密封保护装置可以有效地封闭密封的连接缝隙，从根本上消除了缝隙的产生；对密封槽的宽度和深度进行精确的设计，经模拟和试验验证，使密封的压缩率达到15%—20%，从而确保密封表面具有充分的密封比压，防止内部泄漏和渗漏；也可以防止高压压缩率引起的应力松弛和摩擦磨损，太小时造成密封破坏。针对皮囊式蓄压器，通过对气囊与上下端盖及壳体的结合曲面进行合理的曲面设计，以解决气囊弯曲部位的应力集中问题，降低其疲劳开裂的风险；通过调节气囊的壁厚，实现承压区的加厚，弹性区域的减薄，实现蓄能变形和耐疲劳的均衡。

#### 3. 提高配合面工艺

结合面的加工品质对磨粒磨损和粘附磨损有重要影响，是减少切削磨损的重要技术参数。通过高精度的镜面抛光技术，减少微小凸起和刮痕，减小密封装置在往复移动过程中的摩擦力，防止密封装置划伤；通过气体渗氮-硬铬复合工艺，将渗氮层提高到HV800级，同时兼顾了高强度和高耐蚀性能，在保证材料耐磨性能的前提下，有效地减小摩擦副的发生概率，消除了磨料的形成。同时，通过对密封槽角部进行合理设计，以倒角代替直角棱，避免在组装和工作时对密封件进行刮擦，从而减少其过早失效的可能性，从而提高其适应性和耐磨性能<sup>[4]</sup>。

### （二）装配工艺管控

#### 1. 标准化装配流程

制定液压蓄压器密封装配技术规范，在产品装配之前，使用符合要求的清洗剂，对密封槽、筒体腔和活塞表面进行清洗，然后用绸布将其清理干净，使其表面的毛刺、灰尘等杂质清除，不允许有杂质的存在；在装配前，活塞密封表面涂覆一层化验合格的航空液压油，不能进行干式组装，这样可以减少安装的阻力，还可以在上面生成一层润滑层，减少来回的摩擦损失，不能使用不符合规定的润滑介质，以免对密封装置造成侵蚀和系统污染。使用特制的尼龙等材料制作的装配工装，避免掉屑污染，禁止使用改锥等利器撬开或挤压密封件，以免造成切边和刮痕；要对螺纹的拧紧力矩进行严格的控制，使用力矩扳手逐步拧紧，避免单边拧紧和过大力矩造成的筒体变形。

## 2. 装配质量检测

对安装后的两级质量检查，不通过验收的蓄压器不能交付，从源头上避免组装不良影响应用。一级检测进行气密性和耐压的初步测试，在蓄压器的内侧充入0.5 MPa的清洁的压缩气体，然后把蓄压器浸入试验规定介质中进行测试，如没有气泡和泄漏，判定测试合格。检查各结合处密封面有无泄漏情况。二级检测采用静压试验，即根据液压系统设定的压力进行增压，在保持30分钟之后，对其进行压力的变化进行监控，并将其控制在规定的范围内，并对筒体和端盖进行检查，检查有无渗油和变形，保证密封的安装到位，密封性能达到标准。针对气囊蓄压器，增加充气式压力保持试验，确保气囊密封无破损，气液隔离状态良好，双重检验可完全保证组装的品质，完全杜绝组装过程中的破坏<sup>[5]</sup>。

### (三) 使用维护保障

#### 1. 油液质量控制

液压油作为密封件的介质，需要构建完整的液压油控制体系。使用油光谱分析仪和粒子计数器对液压油的清洁度、水分和酸值进行定期检测，保证液压油的油液污染度符合要求，酸碱度符合航空液压油要求，如出现不合格的情况，及时进行处置；根据航空器使用情况，对液压油进行更换，对系统管路进行清洗，油滤分解检查，滤芯进行更换的同时清洗油滤，以避免硬质颗粒等积聚进入蓄压器内；不要将不同品牌和型号的航空液压油混合使用，以免液压油之间产生化学变化而产生的酸腐蚀密封，在加入新的航空液压油时，要使用加油车进行循环过滤，以阻止在加注时有杂质进入，从而从介质层次上，阻断因多余物造成的磨损等失效。

#### 2. 工况参数控制

严格控制操作条件，防止密封过度破坏，禁止超压、超温使用，并在液压油箱入口安装压力缓冲阀和蓄压器，以吸收系统压力波动和瞬间冲击，减小压力对密封件的挤压，避免撕裂失效。对系统的温度进行实时监控，利用冷却设备将温度保持在(-40~80)℃的范围内，以防止因温度升高而导致热氧老化，或因温度过低而导致脆化；对蓄压器中的预充氮压力进行精确的调控，预充压太高会加剧皮囊和活塞密封的压缩和损耗，太小又不具备能量储存的缓冲功能，需要根据型号说明书对其进行调节，并尽量避免频繁启动和关闭液压系统，降低密封

的交替应力周期，从而减缓其疲劳破坏<sup>[6]</sup>。

#### 3. 定期维护保养

实行蓄压器的预防维修，使产品的运行由被动的检修变为积极的预防和控制，对设备的早期故障进行检测。建立密封件使用年限记录表，其中，一般的橡胶密封件的使用年限以3年为宜，即便没有出现显著的故障征兆，也要及时进行批量替换，以防止因老化开裂和疲劳开裂。在进行定期的定检过程中，主要对蓄压器筒体、端盖和接管嘴进行全面的检查，并使用专门的仪器对蓄压器进行密封试验，以排除可能存在的氮气泄漏；对于长时间停留的航空器，每个月都要进行1次周期性的工作，以消除密封面长时间的静态受压，减轻其内部的应力松弛和挤压造成的永久性变形，并保证液压油的流通，阻止杂质的堆积，从而全面减缓密封的失效。

### 结论

总之，液压蓄压器密封失效受机械磨损、高压挤压和介质腐蚀等多个因素共同影响，磨损渗漏和老化开裂是其主要的失效形式。蓄压器的密封破坏，不仅降低了蓄压器的储压能力，而且严重影响航空器的正常工作。通过对密封材料及结构的优化、严格控制油液质量等环节的全程防控，可以有效地减缓蓄压器的性能衰退，降低其失效概率，提高蓄压器的可靠性和使用寿命。

### 参考文献

- [1] 陈思睿, 李亚洲, 雷刚, 刘志, 徐茂, 陈康. 船用膜式蓄压器螺纹强度计算[J]. 内燃机, 2021, (06): 54-56.
- [2] 梁媛媛, 赵彦军. 某型飞机刹车蓄压器压力快速下降故障分析[J]. 航空维修与工程, 2024, (01): 75-77.
- [3] 陈国慧, 邓伟林, 马晓军. 民用飞机机轮刹车系统蓄压器建模与仿真[J]. 机床与液压, 2022, 50(24): 153-158.
- [4] 纪刚, 昂卓骏, 王聪. 某型飞机蓄压器头盖的安装改进[J]. 航空维修与工程, 2022, (08): 58-59.
- [5] 杨鹏. 不同类型跑道对刹车蓄压器容积尺寸需求影响[J]. 液压与气动, 2022, 46(03): 180-188.
- [6] 王世德, 孙建华. 某型飞机蓄压器胶囊开裂故障分析[J]. 航空维修与工程, 2022, (02): 101-105.