

# 储罐密封系统改造与运行优化及其经济效益研究

高世国 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257200)

**摘要:** 储罐密封系统是保障储运安全、减少油品蒸发损耗的核心部件。它在长期运行中, 容易出现诸如结构失效、密封性能下降等问题。因此, 研究深入探讨了各种典型失效模式。在此基础上, 从结构补偿、材料升级、精度控制、附件强化等角度, 提出了系统性改造技术方案。同时, 针对改造后系统, 构建了一套运行优化机制。经评估, 这些措施能显著降低油品挥发损耗, 延长设备的检修周期, 节约维修成本, 从而, 产生可观的经济效益。

**关键词:** 储罐密封; 失效分析; 结构改造; 运行优化; 经济效益

**中图分类号:** TE972      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0082-03

## Research on the Renovation and Operation Optimization of Storage Tank Sealing System and Its Economic Benefits

Gao Shiguo (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257200, China)

**Abstract:** The sealing system of storage tanks is a core component that ensures storage and transportation safety and reduces oil evaporation loss. During long-term operation, it is prone to problems such as structural failure and decreased sealing performance. Therefore, this study deeply explored various typical failure modes. Based on this, systematic renovation technical solutions were proposed from perspectives such as structural compensation, material upgrading, precision control, and accessory reinforcement. At the same time, a set of operation optimization mechanisms was constructed for the renovated system. After evaluation, these measures can significantly reduce oil evaporation loss, extend the maintenance cycle of equipment, save maintenance costs, and thus generate considerable economic benefits.

**Keywords:** Storage Tank Sealing; Failure Analysis; Structural Renovation; Operation Optimization; Economic Benefits

大型储罐作为石油化工行业的重要储存设备, 其密封性能, 会直接关系到介质的储存质量、环境安全和经济效益<sup>[1]</sup>。储罐的密封系统一般安装在浮顶与罐壁之间的环形间隙处, 其主要作用, 是阻止罐内油蒸气逸散至大气中。随着储罐服役年限的增长, 其密封系统有可能会出现罐壁变形、材料老化等多种不良问题, 密封效果会逐渐下降。密封失效的情况下, 不仅会有大量油品挥发损耗, 造成巨大经济损失, 还会带来严重的安全隐患, 对环境产生严重的污染<sup>[2]</sup>。因此, 对现有储罐密封系统, 进行适当的技术改造, 并通过科学的运行管理手段, 维持其长期高效运行, 已成为储运技术管理工作中重要的一环, 对于提升储罐的本质安全水平, 具有重要的现实意义。

### 1 储罐密封系统结构特征与运行机理分析

#### 1.1 储罐密封系统的结构组成

储罐密封系统的结构设计需要满足密封性、耐磨性, 以及可以随浮顶升降的跟随性等严格要求。一套完整的密封系统, 通常由一次密封、二次密封以及各种连接紧固件构成<sup>[3]</sup>。一次密封一般安装在紧贴浮盘边缘的位置。其是阻止油气挥发的第一道屏障。常见的结构形式包括机械式金属密封、充液式弹性密封, 以及囊式软密封等。二次密封, 则需要安装在一次密

封的上方, 作为一个辅助密封层。其作用, 是在一次密封失效时, 提供补充保护, 同时, 防止雨水、灰尘等杂质落入密封间隙。

#### 1.2 储罐密封系统的密封运行机理

储罐密封系统的密封效果, 主要取决于密封构件与罐壁之间, 形成的一股动态接触压力。在理想状态下, 密封材料可以依靠自身的弹性变形或外加机械力, 始终贴合在罐壁上, 阻断油气泄漏通道。而当浮盘随液面升降时, 密封系统必须要能够适应罐壁几何形状的变化。其中包括局部凸起、凹陷以及圆度偏差等。这种适应能力, 需要靠密封材料的弹性补偿特性, 以及机械结构的位置调整功能, 来实现。

在运行过程中, 密封系统会处于一个动态平衡状态。一方面是要阻止油气分子的进行扩散和宏观泄漏, 另一方面, 系统也要承受浮盘运行产生的摩擦和冲击。而维持这一平衡的关键, 就是要保证密封件要有足够的弹性储备, 而且, 还要确保接触压力有均匀分布的效果<sup>[4-5]</sup>。

### 2 储罐密封系统典型失效问题

#### 2.1 罐壁局部变形导致的密封间隙异常

储罐在长期使用过程中, 罐壁会因地基沉降、罐内压力波动或外界撞击等原因, 产生一定的局部变形。

密封件与罐壁之间,容易出现异常间隙。密封系统的整体密封效果会大幅下降。在浮盘运行经过变形区域时,密封件的跟随性就会变差,可能会导致瞬间出现大流量泄漏等问题。但罐壁变形问题本身有一定的累积性和隐蔽性,初期的话不易察觉,但随着运行时间不断推移,其对密封性能的影响,就会越来越明显。

## 2.2 密封材料老化与弹性衰减问题

目前广泛使用的橡胶类和聚氨酯类密封材料,在长期接触油品介质和受大气环境作用的过程中,会发生物理和化学性质的变化。其中,材料老化会出现硬度增加、弹性模量变化、表面龟裂、永久压缩变形量增大等问题,弹性衰减的话,密封材料就无法提供足够的回弹力,来补偿罐壁的微小位移,所以接触压力也会随之降低,密封效果自然变差。

## 2.3 密封结构装配偏差与运行偏磨现象

密封系统的安装质量对其运行效果,有着至关重要的影响。在安装过程中,如密封件的定位尺寸控制不当,或连接件的紧固力不均匀的话,就会导致密封件与罐壁的接触状态,会偏离设计要求,即出现装配偏差问题。这些偏差在浮盘运行时,会引发偏磨现象,密封件的局部区域会摩擦过度,偏磨会导致密封材料磨损速度加快,磨损产生的粉尘可能会污染罐内介质,磨损严重的部位会形成潜在的泄漏通道。

## 2.4 附件穿透部位密封薄弱与挥发损耗增加

浮盘上通常都会安装有量油孔、扶梯、导向柱等多种附件。这些附件需要穿透密封系统才能实现其功能。在附件穿透部位,密封结构会有天然间断。处理不当的话,就会成为油气挥发的薄弱环节。传统做法是在附件周围加装局部密封件。但附件的形状有的不太规则,且附件随浮盘运行时,可能会产生相对位移,局部密封的话,事实上很难做到长期有效严密性。这些薄弱点的存在,会使得即使主体的密封保持良好,整体挥发损耗仍会居高不下,亟需重视和解决。

## 3 面向失效问题的储罐密封系统结构改造技术

### 3.1 罐壁适应性结构优化与密封间隙补偿技术

针对罐壁局部变形导致的密封间隙异常问题,单纯依靠更换同规格的密封件难以从根本上解决问题。改造的重点,在于增强密封系统对罐壁几何偏差的适应性。比如,可以采用大补偿量弹性密封结构,增加密封材料的弹性体截面积,或采用多腔室结构设计,使密封件在径向方向,具备更大的压缩回弹范围,这样,即使罐壁出现一定程度的凹陷或凸起,密封材料仍能保持良好的接触。

还可以在二次密封的背面,增设弹性支撑元件,从而推动密封件始终贴合罐壁。对于罐壁变形严重的

区段,还可以结合罐壁修复技术,对局部凹凸进行平整处理,消除极值点。

### 3.2 高性能密封材料替代与复合密封结构升级

针对材料老化问题,改造中必须提升密封材料的品质等级和耐老化性能。目前,可以使用新型高性能密封材料,逐步替代传统橡胶材料。例如,可以采用特种氟橡胶或氢化丁腈橡胶等材料。其具有更优异的耐油性、耐高温性和抗臭氧老化能力。在恶劣工况下,依旧能保持长期弹性。为了兼顾耐磨性和柔韧性,可以采用复合密封结构的改造方案。可以采用内外两层设计,外层采用低摩擦系数、高耐磨材料;内层则采用高弹性材料,提供充足的补偿回弹力。

### 3.3 密封结构精度控制与抗偏磨改造技术

针对装配偏差和偏磨问题,在结构改造中,可以引入预制化模块和定位工装,提高安装精度。密封件的连接件,可采用可调节结构。允许在安装过程中进行微调。这样密封件就能在整个圆周上,保持均匀一致的压缩量。改造方案还可加入磨损自动补偿机构。如,在机械密封中采用恒力弹簧。当密封板因磨损变薄时,弹簧能够自动推进,维持接触压力不变。

### 3.4 附件密封强化与整体结构优化设计

附件穿透部位的密封薄弱环节,需要通过专项强化技术加以解决。针对导向柱和量油孔等规则形状附件,可以开发专用的穿套式密封组件。这些组件能够紧密贴合附件外壁。并随浮盘上下移动。对于扶梯等不规则附件,则可采用组合式密封结构。柔性密封条与刚性护板相结合,可以形成连续封闭的密封带。在附件根部,可以增设动态密封腔室,利用介质压力,实现自紧式密封。在整体结构优化层面,改造工程可不再局限于局部修补,而从系统角度,对密封布局进行重新设计。减小二次密封与一次密封之间的空腔容积,降低油气积聚量。优化密封件的断面形状,使其受力更合理。

## 4 改造后密封系统的运行优化机制

### 4.1 构建密封系统运行状态感知与监测体系

改造后的密封系统具备了更好的硬件基础。但要维持长期高效运行,还离不开完善的状态感知与监测体系,首先,要在关键部位部署传感器。可以在浮顶边缘的密封腔室内,安装一些油气浓度传感器。实时监测油气泄漏情况。一旦浓度超标即可发出报警。在罐壁外侧对应密封区域,可以设置声发射传感器。捕捉密封件摩擦或刮擦产生的特征声波。判断运行是否平稳。而对于大型储罐,还可以在浮顶上,安装倾角传感器和位移传感器。

实时监控浮盘的运行姿态。防止因浮盘倾斜,导

致密封系统受力不均。所有监测数据,可设计成通过无线传输方式,汇集至中央控制系统,形成密封系统运行的数字化档案,为后续的评价和调控,提供数据基础。

#### 4.2 优化基于监测数据的密封性能评价与劣化判据

而有了实时监测数据,下一步便可建立科学的密封性能评价方法和劣化判据。在对油气浓度数据进行长期跟踪后,可以计算出泄漏速率的变化趋势。当泄漏速率出现持续上升拐点时,表明密封性能开始劣化。而对声发射信号进行频谱分析,可以识别出当前是正常滑动,还是异常摩擦状态。如异常摩擦信号频繁出现,则说明偏磨问题正在发展。评价体系还可设定对应的分级预警阈值。如,将泄漏浓度划分为正常、关注、预警和报警四个等级,每个等级对应不同的处置措施,从而,把维修决策从故障后处理模式,转向故障前预防模式。

#### 4.3 执行运行参数协同调控与工况优化策略

密封系统的运行效果,不仅取决于自身状态,还与储罐的运行工况密切相关,因此,需要执行一些协同优化策略。如,采用机械密封的储罐,浮盘的运行速度是需要重点控制的关键参数。因为过快的升降速度会加剧密封件的摩擦和冲击,导致密封件损坏。同时,罐内压力的稳定性也需要有所保障,因为压力剧烈波动的话,会迫使密封系统承受交变载荷,加速疲劳失效等问题。因此,在收发油作业时,需要尽量保持平稳操作,避免压力突变。温度方面对密封材料的弹性,亦有显著影响。因此,在季节交替或极端天气条件下,可适当调整密封件的预紧力,或补充一些润滑介质,减缓性能变化。

#### 4.4 落实预防性维护与全生命周期管理机制

在日常的管理维护中,需要按照既定周期和标准对密封系统进行预防性检查和维护,要定期清理密封腔内的沉积物,检查密封件的磨损情况,测试弹性件的回弹性能,以及对运动部件进行润滑等操作。还可以结合全生命周期管理机制,从更宏观的角度,对密封系统的规划、设计、采购、安装、运行、维护直至报废的整个过程,进行统筹优化。

### 5 经济效益评估

#### 5.1 直接经济效益

密封系统改造与运行优化,会带来巨大的直接经济效益。首先,在减少损耗方面,经过结构改造和优化运行后,罐顶油气浓度可以平均降低百分之六十以上。年直接挽回经济损失甚至可超过十万元。对于大型原油储罐而言,由于储存介质中轻组分含量较高,蒸发损耗会更为严重,因此改造后的经济效益也会更

加显著。其次,在节约维修费用方面,改造后的密封系统,其使用寿命会大幅延长。更换周期也会从原来的三年,延长至八年,从而可以减少密封材料的采购费用,以及相关的更换施工成本。同时,因为用了智能监测体系,维修工作也可从定期全面拆检,转变为针对性维护,从而,可以降低大量相关的人工成本和停产损失。

#### 5.2 间接经济效益

除了直接的经济收益,密封系统的改造和运行优化策略,还可创造显著的间接经济效益。其一,密封性能的提升,可大幅降低油气向大气的排放量。这可以降低企业可能面临的环保罚款风险,也可以减少相应的治理投入费用。其二,可以一定程度上减缓罐壁的腐蚀速度。因为油品的挥发物中,会含有腐蚀性组分,随着挥发量的减少,罐壁和浮顶构件所能接触到的腐蚀介质浓度就会有所下降,腐蚀速率自然也会随之减缓。储罐的整体使用寿命,就能得以延长。其三,运行优化机制的实施,还可提高储罐运行的可靠性。如果发生密封故障,会有大量的非计划停产损失,而可靠性提升后,生产的连续性也能得到更好保障,从而,就能避免停产造成的产能损失。

### 6 结论

储罐密封系统的改造与运行优化是一项系统工程。密封系统会存在罐壁变形、材料老化、装配偏差及附件穿透等典型失效问题。针对这些问题,需要优化罐壁的适应性、改用高性能材料、优化精度控制与抗偏磨设计、并强化附件密封设计等。改造后的系统,可将状态感知、数据评价、参数协同与预防维护等,进行有机结合,确保密封系统在长期服役过程中,始终保持良好的密封性能。从而,为企业带来大量的直接与间接经济效益,进而,提升企业的运营效率和可持续发展能力。

#### 参考文献:

- [1] 郝爽. 储罐全接液内浮盘密封失效的预防[J]. 山西化工,2024,44(11):178-182.
- [2] 罗丽华,尤泽广,吴龙平,高枫. 浮顶油罐密封安全性与补偿范围分析与计算[J]. 石油化工设备,2021,50(01):29-34.
- [3] 肖睿. 外浮顶储罐应用全补偿密封的效果[J]. 化学工程与装备,2020,(11):94-95.
- [4] 张继荣. LNG 储罐气顶升施工原理及其应用分析[J]. 建材与装饰,2020,(08):142-143.
- [5] 丁少军. 全接液内浮盘与弹力片补偿密封在成品油储罐上的应用[J]. 石油化工设备技术,2023,44(5):7-12,17.