

外浮顶罐密封系统失效分析与升级改造实施方案探讨

胡定扬 (中国石化扬子石油化工有限公司, 江苏 南京 211500)

摘要: 本文针对外浮顶罐密封系统失效问题展开分析, 阐述了密封系统失效的常见表现及影响, 从密封材料、结构设计、安装维护等方面剖析失效原因。在此基础上, 探讨了升级改造实施方案, 包括选用新型密封材料、优化密封结构设计、规范安装与维护流程等, 旨在提高外浮顶罐密封系统的可靠性和安全性, 保障储存介质的质量和减少环境污染。

关键词: 外浮顶罐; 密封系统; 失效分析; 升级改造

中图分类号: TE972

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0138-03

Analysis of Failure of Outer Floating Roof Tank Sealing System and Discussion on Upgrade and Renovation Implementation Plan

Hu Dingyang(Sinopec Yangtze Petrochemical Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211500, China)

Abstract: This article analyzes the failure of the sealing system of the external floating roof tank, elaborates on the common manifestations and effects of sealing system failure, and analyzes the causes of failure from the aspects of sealing materials, structural design, installation and maintenance. On this basis, an upgrade and renovation implementation plan was discussed, including the selection of new sealing materials, optimization of sealing structure design, and standardization of installation and maintenance processes, aiming to improve the reliability and safety of the external floating roof tank sealing system, ensure the quality of storage media, and reduce environmental pollution.

Keywords: external floating roof tank; Sealing system; Failure analysis; upgrade and renovation

外浮顶罐主要用于储存容易挥发的介质, 如液化石油气、石脑油、轻烃类等介质。该密封系统可以防止储罐介质从外浮顶处漏出, 安全稳定储存所盛装的介质, 对环境保护、资源节约、保障生产运行及安全存储意义重大。然而在生产和应用中存在大量密封泄漏问题和安全隐患, 即密封失效的现象, 严重影响设备的使用寿命和安全性, 造成重大的环境污染, 而且也带来火灾或爆炸的危险源。针对这些问题, 希望本论文能深入浅出地解读造成密封失效的原因, 并提出一些升级改造以及应对的方案。

1 外浮顶罐密封系统失效的常见表现及影响

1.1 常见表现

外浮顶罐密封系统失效的常见表现是一个由表及里、逐渐发展的过程。最直观地表现是发生溢油泄漏的情况, 罐壁外面或在浮盘周围可以看见有些油迹、油渍等; 可以在静止状态下用相应仪器检测出一、二次密封之间挥发性有机物 (vapor concentration indicator, VOCs) 高于正常情况许多倍, 是最具代表性的密封失效后发生油气泄漏的主要证据; 密封有永久异常状况或有明显的形状扭曲变形痕迹, 如密封条或封环处在密封材料 (通常是橡胶) 的表面上发生硬化的迹象、撕裂、发生扭曲的迹象; 在浮顶开启闭合的过程中, 是否有时感觉有些杂音或者卡死不灵敏时, 说明当时很可能已经是密封已经发生损坏 (出现这样的异响与

阻滞感, 说明可能是外浮顶密封件无法与平移升降的浮顶密合贴牢, 或者是发生了干涉摩擦的故障), 或者是密封材料已变质无法利用了; 或者当遇到恶劣天气条件时, 由于下雨下雪天气之后, 发现存储的介质品质显著变差了, 例如出现水分明显增多, 杂质增加的现象, 这时候则有可能是密封已经无法起保护隔离作用了, 外界的水或灰尘已经可以通过缺陷的地方进入油罐内侧。这些表现最后的指向, 是整体上的失能: 它们代表的是不只是某种局部损伤, 或某个区域的损伤性衰减、削弱乃至功能失去, 而是整个的全面性丧失。到最后, 连最基本的一点把外人挡住的功能也消失了

1.2 影响

密封系统失效所产生的影响是多层次且严重的, 涵盖经济、环境、安全及产品质量等多个维度。在经济方面, 最直接的影响是导致储存油品损失持续加剧, 正常运行过程中, 油品会因黏附于罐壁产生损耗, 同时可能因密封失效出现渗漏, 二者叠加不仅直接推高运营成本, 更造成不可逆的资源浪费。在环境方面, 逸散的油气是挥发性有机物 (VOCs) 的重要来源, 会对周边大气环境造成污染, 并可能形成光化学烟雾, 破坏生态环境。在安全方面, 由于外浮顶罐一、二次密封间存在较大空间, 泄漏的油气会在此积聚并与空气混合, 极易形成爆炸性混合物。而现场环境中, 静

电火花、明火或高温表面等点火源难以完全杜绝，一旦这些爆炸性混合物接触点火源，就可能瞬间引发灾难性的火灾或爆炸事故，严重威胁现场操作人员的生命安全，同时对罐区设施造成毁灭性破坏。在产品质量方面，失效的密封系统也破坏了储罐的密闭性，使得外部空气中的水分、灰尘、杂质等更易侵入罐内，导致油品含水量上升、品质劣化，甚至影响后续加工工艺和最终产品质量。此外，密封失效还会加速罐体本身的腐蚀。积聚在密封区域的油品和水分会形成腐蚀环境，损害罐壁钢板，缩短储罐的使用寿命。因此，密封系统虽是一个部件，其失效却引发连锁反应，对企业的安全生产、环境保护、经济效益和产品信誉造成全面而深远的负面影响。

2 外浮顶罐密封系统失效原因分析

2.1 密封材料问题

密封材料在油料中的溶胀、变软或者脆化等情况是外浮顶罐密封失效最主要原因之一。材料使用中长时间和油品中的烃类以及其他组成物质接触会导致其出现溶胀、软化、脆化问题；而外部因素如氧气、紫外线都会造成材料加速老化，弹性消退同时表面产生龟裂或是永久的变形情况；如果密封材料不具备耐热性能，则会在夏季的炎热条件下或冬季的低温条件下面临硬化或是收缩的现象，从而减弱了材料与罐壁的紧密性。当储油罐内油料的密封材料缺乏抗压缩永久变形的能力时，在材料经受重压的情况下便很难恢复原本的形状，从而产生了泄漏途径；比如一次密封上的软泡沫填料，在储罐运行一段时间后便会失去弹性的特性，导致该部分材料难以贴合于内衬上，也不能充分地发挥出密封作用。所以在进行密封材料的选择时需要具备较好的初始使用性能与优良的使用持久性，避免因为密封自身性能问题而在较短的时间内出现密封失效。

2.2 密封结构设计不合理

密封结构若未能科学匹配浮顶罐的实际工况，极易成为系统失效的诱因。浮顶在运行中会随液面升降并可能发生水平偏移，如果密封追随不良、无法补偿罐体变化和没有及时调整适应由于椭圆度、凹陷和焊接不平而导致出现间隙便会引发泄漏与磨擦，有的不合理的密封形制太过硬，刚安装时不错，后来温度上升或罐子变形失去追随而密封在某些位置又不再具有它的原来密封压等现象。还有些由于密封接触面的设计形状不合理，则在使用的应力（压强）上分布是不均匀的和出现边缘应力集中的磨损疲劳现象。所以，良好的设计结构应当能确保其有弹性并能保证其有足够的追随行程和正确的受力设计，因而可以适合于不同的动态工作状态；这样才

避免引起使用性退化的影响。

2.3 安装与维护不当

安装的准确性和维修的有效性关系到密封的效果和生命期限。安装时，如果对密封圈与容器之间的空间大小不能均匀控制，在使用中容易出现不平均过紧过松的情况，会使密封力不均，造成过早磨损甚至泄漏。人员如果不明白密封设计人员的目的在进行安装作业时误把密封构件扭伤或扭死，将会毁掉组件的全部密封效果。缺乏专业性的定期密封检查，由于不及时更换老化的或已磨损、破裂的元件，在某些微不足道的地方出了故障却损坏整个组件。在进行定期密封维修的时候清洗密封面不彻底，污物如油污脏物积聚在密封件之间会造成贴合困难，加剧磨损。

2.4 外界环境因素

外部条件不断变化，随时考验着密封系统。白天夜晚和不同季节温差使得罐体与密封材料膨胀量的不同程度改变着两者的间隙，反复变形可致使材料疲劳伤。大风荷载不仅导致浮顶晃动加剧密封件与壁板摩擦、碰撞，也足以让油气从狭窄的间隙中溢散。雨雪冰雹及其他可能发生的降水有可能渗透密封面，一旦低温环境使之结冰膨胀，无疑会进一步挤出更小的密封区间而伤及原本有效的密封条的形状和弹性。

3 外浮顶罐密封系统升级改造实施方案探讨

3.1 选用新型密封材料

对外浮顶罐的密封升级改造首先要考虑选用一种耐久耐用、性能稳定的新材料，因为以往用于密闭浮盘的各类塑料衬垫，在正常使用条件下，由于浸渍在液体介质中会受到磨损腐蚀，在老化过程中会随着时间增长而发生老化失效，并且受到外界温度变化的影响等等，所以新型密封材料需要具备抗油性、耐久性好，以及耐老化性能。PTFE 就是上述一种很良好的选材理由，因为它不仅摩擦系数很小且可以保持长久化学稳定性，并可以在非常宽的温度范围内表现良好，适用于多用途储存条件。还有如金属与橡胶材料复合，柔性石墨与橡胶 / 氟塑料 / 玻璃纤维（增强或混入石墨片或箔片）混合聚合物制成的层压密封材料等也都是非常好的新型密封新材料的选择，可以最大程度地利用以上每种不同新型密封材质材料各自的有利特点提高密封效果，从而有效提高密封材料和密封结构的耐久性与适用性。

3.2 优化密封结构设计

合理的密封结构对于保障外浮顶罐的密封装置安全、高效运转是至关重要的。改造设计中应当重点关注提升密封件的追随性及自适应程度，使其能够自动适应由浮顶升降、温度波动以及罐体变形所引致的间

隙变化。有效途径之一则是通过高弹性密封件结合带杠杆或弹簧助力的结构设计使密封压力随间隙变动而自动改变，并始终处于贴合状态。如可以采用具有翼型或囊式结构的密封件利用介质压力或结构自重加大贴壁力的方式降低泄漏；同时，注重通过结构手段减少密封与罐壁间存在的摩擦阻力。过大的摩擦力不仅加速了密封件的磨损还妨碍浮顶正常浮沉，甚至可引发卡盘或密封失效等问题。改善密封条的横截面形状、表面润滑涂镀等，以及设置低摩擦辅助导位机构来降低密封件的运行摩阻力，延长使用寿命也是必要的。此外，整体便于安装、调试和检修，整体结构采用模块化设计，在整体各关键位置的磨损零件处设置可更换单元：对于一次密封，把固定长度的橡胶带和聚氨酯泡沫制成可以单独更换的弹性密封元件模块；针对二次密封，将两个橡皮滑片设计为独立的更换单元，当其中一个弹性件磨损时，可以只对更换部分进行整体拆装而不需将整个装置取出。

3.3 规范安装与维护流程

为保证外浮顶罐密封装置改造之后可以正常发挥密封的效果，应该制定科学严格的安装及日常维护办法。安装的时候要有详细的作业指导书，要确定好密封装置的各部件应该如何组装，装配误差应该在什么范围内，需要特别注意的地方有哪些等。安装时要使用专用工具，并进行精细校准，尤其是对间隙均匀性的要求十分严格，不能存在一部分过紧、或者有一部分留有缝隙的情况。在运行过程中要加强日常管理维护，要按照时间计划定期对密封装置的磨损、变型和老化程度进行检查评估，在维修中重点关注密封材料的弹性是否已经失效、连接部是否牢靠以及是否存在溢油泄露等痕迹，使其一直处于有效、稳定的密封状态。

3.4 增加辅助密封措施

为实现罐体的安全和绿色的密封功能，可以在已经普遍使用的“一、二次密封”措施上，重点做好辅助密封的功能，针对减小一、二次密封之间的油气空间重点优化提升；管理好“一、二次密封”之间的油气空间至关重要，处理不好会增大罐体燃爆概率和环境污染；现有条件可以通过增设抑爆膜的方式有效减少油气空间，在不削弱已有密封效果的情况下减小油气空间；可以加装导流或收集装置于罐壁密封区域周边，例如增加集液槽等装置，减少了物料和腐蚀风险，避免污染，特别是对一些高挥发性的或比较贵重的产品储油罐适用；在经常出现多雨或多风沙地区外浮顶罐，可加设防雨防尘设施，确保应对恶化的气候条件进行安全密封。如此优化的“辅助密封措施”与主密封相结合能够实现提高外浮顶罐密封系统安全性和环

保性的应用目标。

3.5 加强人员培训

密封系统改造的有效性和长期的运行效能有赖于操作维护人员的能力水平和责任心，因此有必要加强操作人员和技术人员的专业技能培训，使其了解密封结构特点、工作原理、操作规程及维护知识。培训的内容应包括新密封材料或结构的特点、安装及调试方法、日常检查重点、密封异常现象与判断、密封泄漏原因等，并进行理论结合实操相结合方式学习。同时要有简明清晰的操作维护保养手册，制定具体的操作规范标准，让密封操作人员能在短期内掌握基本的操作能力，如密封装置调整、密封件更换、密封泄漏初步诊断等，并强调在生产操作过程中安全意识和环保要求，使每一位维护操作人员能深刻认识到密封失效对生产和社会的影响，提高事前预防和处理密封隐患的思想意识，培养职工应急能力和能力，也可不定期进行训练或举行相关比赛，检验并提升学习效果。

4 结束语

外浮顶罐密封系统失效是一个过程。通过对导致了外浮顶罐密封系统失效原因进行分析，在实践中采用新型密封材料和密封结构以及合理的密封施工设计方案和合理恰当的安装拆除、定期对密封系统进行检查维护的工作、合理加装辅助密封装置的工作方法以及对外浮顶罐操作维护人员进行相关的教育培训等多种关于外浮顶罐密封系统的升级改造方法等，实践减少当今所具有的严重危害较大的密封老化现象的增多，减小其危险性加大和维修费用高昂，改造工作措施难以有效施行的局面，在逐步地提高着其安全储存中所装载物质的质量程度，减少污染周边环境的危害程度，确保企业的效益，并能结合科技发展现状把握各密封新技术进展，合理改良改善现有的外浮顶罐密封系统，持续增加其密封系统的可靠性及安全性要求与环保程度。

参考文献：

- [1] 王超. 关于外浮顶罐新型无油气密封的探讨 [J]. 中国储运, 2024, (04): 97-98.
- [2] 孙成德, 王晶, 郭晓坤, 等. 软体密封在外浮顶罐上的应用研究 [J]. 石化技术, 2021, 28(02): 10-11.
- [3] 樊锦春. 大型汽油外浮顶罐主动防护系统故障分析及防护 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(11): 36-37.
- [4] 蒋慧灵, 蒋云涛, 吴剑付, 等. 大型外浮顶罐充氮保护联动控制系统设计 [J]. 武警学院学报, 2018, 34(04): 53-57.
- [5] 李军, 柳少磊. 大型外浮顶罐防雷击保护及快速灭火措施 [J]. 水上消防, 2017, (03): 23-25.