

大型外浮顶储油罐导向柱囊式密封套应用及无组织排放控制研究

刘媛

中石化(天津)石油化工有限公司

摘要: 针对大型外浮顶储油罐导向柱区域无组织排放问题, 文章分析了导向柱泄漏机理及其影响因素, 提出囊式密封套优化方案, 并从结构设计、材料筛选和现场应用效果等方面进行了研究。结果表明, 该装置能够较好适应浮顶升降和结构偏移工况, 改造后导向柱区域 NMHC 浓度明显下降, 减排效果显著, 且具有安装便捷、运行稳定和经济性较好的特点, 可为储油罐附件部位 VOCs 精细化治理提供技术参考。

关键词: 外浮顶储油罐; 导向柱; 囊式密封套; 无组织排放; VOCs 治理

随着石化行业环保管控持续加强, 大型外浮顶储油罐 VOCs 无组织排放治理已成为储运环节的重要课题。现有治理多集中于浮盘边缘密封, 而导向柱区域因存在结构间隙、工艺开口及动态位移, 往往成为油气泄漏的薄弱部位。工程实践表明, 导向柱排放在储罐总无组织排放中占比较高, 直接影响企业边界非甲烷总烃达标水平。基于此, 本文聚焦大型外浮顶储油罐导向柱密封问题, 围绕泄漏机理、囊式密封套结构设计、材料筛选及现场应用效果展开研究, 以期储油罐附件部位 VOCs 精细化治理提供可行的技术参考。

1 导向柱区域无组织排放机理与治理需求

1.1 导向柱区域泄漏形成机制

大型外浮顶储油罐主要由罐体、浮顶、导向柱、量油装置及密封系统构成。浮顶随着液位升降而上下移动, 导向柱则起到限制浮顶横向位移、维持浮顶运行平稳的作用。由于浮顶在运行中必须沿导向柱滑动, 导向柱与浮盘导向孔之间不能完全刚性贴合, 通常需预留 5-10mm 间隙, 而这一结构间隙恰恰构成了油气逸散的重要通道。同时, 为了满足导向柱内外压力平衡和运行需要, 柱体往往还设置通气孔或工艺开口, 这进一步增加了泄漏风险。与边缘密封相比, 导向柱区域泄漏呈现更明显的复合性。一方面, 罐内轻质组分蒸发后形成的油气会沿导向孔间隙向外扩散; 另一方面, 柱体内部与外部环境连通后, 内部残余油气也可能在温差、压差作用下持续释放。此外, 传统附件密封装置多采用较简单的橡胶圈或局部覆盖结构, 对浮顶倾斜、柱体偏移、频繁摩擦等复杂工况适应性不足, 运行一段时间后容易出现磨损、松弛和局部失效, 从而导致导向柱区域成为储罐无组织排放控制中的薄弱环节。

1.2 主要影响因素分析

导向柱区域无组织排放受环境条件、操作工况和

设备状态共同影响。环境因素中, 温度和风速最为关键。环境温度升高时, 油品蒸气压显著增加, 油气逸散驱动力随之增强。研究表明, 当温度由 20℃ 升至 35℃ 时, 汽油蒸气压可由 50kPa 增至 80kPa 以上, 导向柱区域逸散趋势明显加快。风速增大则会改变浮顶上部气流分布, 在局部形成负压效应, 从而促进油气扩散, 特别是在风速超过 3m/s 后, 这种影响更为明显。

操作条件对泄漏也有直接影响。当液位上升较快时, 浮顶上移速度加快, 导向柱附近的气流扰动增强, 油气更易经开口和间隙排出; 当液位下降时, 尽管部分区域可能形成微负压, 但柱体开口及残余空间内仍可能产生持续逸散。储存介质性质也不可忽视, 汽油、石脑油等轻质油品由于蒸气压较高, 其导向柱区域无组织排放通常明显高于原油和重质油品。

设备因素则主要体现在安装精度和长期运行状态上。当导向柱垂直度偏差超过 0.5% 时, 局部间隙可能扩大至 15mm 以上; 若浮顶倾斜度超过 1°, 则密封受力不均问题更加突出。再加上导向柱长期处于室外环境中, 受风吹、日晒、油气腐蚀和反复摩擦影响, 传统材料容易出现老化、变硬、裂纹和疲劳损伤。因此, 导向柱区域密封治理不能仅依赖简单封堵, 而需要兼顾伸缩补偿、耐介质腐蚀、耐候抗老化和运行安全等综合要求。

2 囊式密封套设计与材料优化

2.1 设计思路与结构组成

针对大型外浮顶储油罐导向柱区域间隙泄漏、动态位移明显和运行环境复杂等问题, 囊式密封套的设计应兼顾密封性、伸缩性、安全性与安装便利性。导向柱与浮盘导向孔之间必须保留活动空间, 浮顶在液位变化过程中又会持续升降, 并可能出现轻微倾斜和偏移, 因此传统刚性封堵或简单橡胶圈结构难以长期

保持稳定密封。基于此,本文采用柔性包覆思路,在导向柱外侧设置囊式密封套,通过对导向孔周边形成相对封闭空间,减少油气经间隙和开口向外扩散。

该装置主要由伸缩囊套、顶部固定组件、底部底座组件和等电位连接装置构成。伸缩囊套负责随浮顶运动同步变形,是实现动态密封的核心;顶部固定组件用于将囊套上端可靠固定于导向柱外壁;底部底座组件与浮盘导向孔周边连接,为囊套提供支撑和密封基面;等电位连接装置则用于防止静电积聚。与传统局部密封相比,囊式密封套将导向柱区域视为整体控制对象,有利于同时削弱间隙泄漏、连接缝隙泄漏及局部开口逸散的影响,从而提高附件部位无组织排放控制效果。

2.2 关键结构优化

在结构设计上,伸缩囊套采用多层褶皱形式,以增强装置对浮顶升降和径向偏移的适应能力。囊套内侧设置12~16道褶皱槽,并配置304不锈钢加强条,以避免反复伸缩过程中出现粘连、塌陷或撕裂。褶皱角度控制在 45° 左右,使其既具备较好的轴向伸缩能力,又能吸收一定横向位移,可适应 $\pm 100\text{mm}$ 范围内的径向偏移。

底部底座采用对合式结构,安装时可直接拼装于导向柱外侧,适用于 $\phi 200\text{--}\phi 300\text{mm}$ 导向柱。底座顶部设计为弧形过渡面,可增强囊套下端压紧效果,提高底部密封稳定性。顶部固定组件采用双箍式不锈钢卡箍,并辅以橡胶衬垫,以兼顾固定强度和防磨保护。整体来看,该结构通过“柔性伸缩+刚性支撑+静电防护”的组合方式,提高了装置在复杂工况下的稳定性与安全性。

2.3 材料筛选与性能比较

材料性能直接关系到囊式密封套的使用寿命和密封效果。本文对丁腈橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶和热塑性聚氨酯弹性体进行了比较。结果显示,丁腈橡胶耐油性能较好,但耐候性相对一般;热塑性聚氨酯弹性体力学性能较强,但长期户外适应性和阻燃性能不够突出;氯磺化聚乙烯橡胶在耐油气、耐老化和阻燃方面表现更均衡,其24h耐油气溶胀率不高于3%,拉伸强度不低于18MPa,断裂伸长率不低于400%,适用温度范围为 $-30\text{--}100^\circ\text{C}$ 。

进一步试验表明,氯磺化聚乙烯橡胶在 70°C 原油中浸泡24h后溶胀率仅为2.8%,拉伸强度保留率为92%;经1000h紫外老化后,表面未出现明显龟裂,性能下降较小;在 $-30\text{--}100^\circ\text{C}$ 循环50次后,仍能保持较稳定的密封性能。综合比较后,本文最终选用氯磺

化聚乙烯橡胶作为囊套主体材料,并配合304不锈钢加强带和热镀锌Q235B底座,以保证装置具有较好的耐介质腐蚀能力、力学强度和长期运行可靠性。

3 现场应用效果与综合效益分析

3.1 工业应用情况

为验证囊式密封套的实际应用效果,本文在某石化企业1台 10万 m^3 外浮顶储油罐上开展现场试验。该储罐罐径80m,罐壁高度22m,设计液位18m,储存介质为92#汽油,其 25°C 真实蒸气压为45~60kPa。储罐原有密封形式为泡沫式一次密封与舌型二次密封组合,导向柱共4根,直径均为 $\phi 250\text{mm}$,原附件密封仅采用简单橡胶圈结构。检测依据HJ 38-2017执行,采用GC-9860型气相色谱仪测定NMHC浓度,检出限为 0.05mg/m^3 ,并在导向柱附近设置4个监测点,同步记录温度、风速等环境参数。

现场试验分为三个阶段:一是改造前15天基线监测,获取原始排放水平;二是进行3天安装调试;三是改造后30天连续效果监测。安装过程中采用螺栓连接,无需动火作业,单根导向柱囊式密封套安装时间约8h,4根导向柱总安装时长约32h,未对储罐正常运行造成明显影响,这表明该装置具备较好的现场可实施性。

3.2 排放控制效果分析

监测结果表明,改造前导向柱区域4个点位NMHC浓度分别为 14.2mg/m^3 、 16.5mg/m^3 、 18.3mg/m^3 和 14.2mg/m^3 ,平均值为 15.8mg/m^3 ,最大值达到 23.6mg/m^3 ,明显高于 4.0mg/m^3 的控制要求。改造后,4个点位浓度分别降至 1.1mg/m^3 、 1.3mg/m^3 、 1.0mg/m^3 和 1.4mg/m^3 ,平均值为 1.2mg/m^3 ,最大值仅为 1.8mg/m^3 ,整体削减率达到92.4%。从达标情况看,囊式密封套使导向柱区域排放水平由明显超标转变为稳定达标,说明其对导向柱附件无组织排放具有显著抑制作用。

在不同工况条件下,装置也表现出较好的适应性。监测显示,在 $-10\text{--}40^\circ\text{C}$ 环境温度范围内,改造后NMHC浓度基本维持在 $1.0\text{--}2.0\text{mg/m}^3$ 之间,说明密封材料对温度变化具有较强适应性;当液位上升速度由 0.5m/h 提高至 2.0m/h 时,NMHC浓度仅由 1.0mg/m^3 升至 1.5mg/m^3 ,变化幅度较小,表明装置在动态运行过程中仍能保持较好密封效果。运行300天后,密封套未出现明显老化、破损和伸缩失效,NMHC平均浓度始终维持在 $1.1\text{--}1.3\text{mg/m}^3$ 之间,未出现明显反弹,进一步说明其长期运行稳定性较好。

3.3 环境与经济效益

从环境效益看,囊式密封套的应用显著降低了导

向柱区域 VOCs 无组织排放。按现场试验结果测算,单台 10 万 m³ 外浮顶储油罐年 VOCs 减排量约 4.2 吨。若在同类大型储罐中推广,将对石化企业边界 NMHC 控制和区域臭氧前体物减排产生积极作用。除直接减排外,该装置还可减少雨水、灰尘等杂质进入相关空间,对维持储罐运行环境和油品质量也具有一定辅助意义。

从经济效益看,减排同时意味着物料损耗降低。按 4.2 吨 VOCs 减排量折合约 4.5 吨汽油资源计算,若以 8000 元/吨计,则单台储罐年资源节约效益约为 3.6 万元。该装置初始投资约 2.8 万元/台,按 5 年寿命折算,年均折旧成本约 0.56 万元,年维护费用约 0.2 万元,年均总成本约 0.76 万元,因此单台储罐年均净经济效益约为 2.84 万元,投资回收期约 1 年。与此同时,装置的安装无需动火、维护要求较低,也有助于降低企业环保整改和停工风险。综合来看,囊式密封套不仅具有较好的减排效能,也具备较高的经济可行性和推广价值。

4 结论

本文围绕大型外浮顶储油罐导向柱区域无组织排放问题,提出并验证了囊式密封套控制方案。研究表明,导向柱区域是储罐 VOCs 泄漏的重要薄弱环节,而囊式密封套能够较好适应浮顶升降、温度变化及一定范围内的结构偏移。现场应用结果显示,改造后导向柱区域

NMHC 平均浓度由 15.8mg/m³ 降至 1.2mg/m³,减排效率达 92.4%,且运行稳定、安装便捷、维护成本较低。该技术在提升储罐附件密封性能、降低无组织排放和增强企业环保达标能力方面具有较强的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 中国石油化工集团公司. 外浮顶储罐密封技术提升改造探讨 [R]. 北京: 中国石化出版社, 2024.
- [2] 湖南海滨环保科技有限公司. HB-III 型储罐导波管伸缩囊套密封系统 [EB/OL]. <http://m.hnhbep.com/col.jsp?id=110>, 2025-07-12.
- [3] 李明, 王强, 张伟. 油罐导向柱用伸缩密封装置的制作方法 [P]. 中国专利: 201721411972.5, 2024-10-17.
- [4] 生态环境部. GB 20950-2020 储油库大气污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [5] 王小红, 刘建国, 陈丽. 油气田储罐 VOCs 排放规律与减排措施研究 [J]. 环境工程学报, 2025, 19(10): 3120-3128.
- [6] 张光明, 赵磊. 外浮顶储罐密封技术优化与应用 [J]. 石油化工设备, 2024, 53(6): 45-50.
- [7] 环境保护部. HJ 38-2017 固定污染源废气总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定气相色谱法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.