

不锈钢双盘内浮盘安装施工工法在石化储罐 VOCs 治理中的应用研究

陈玮成 何云罗

中建三局第三建设工程有限责任公司, 湖北武汉, 430074;

摘要: 在石油储运过程中, 原油及轻质油品的蒸发散逸是造成挥发性有机物 (VOCs) 污染和油品损耗的主要原因。传统浮顶罐因存在油气空间, 导致盘缝损耗占总蒸发损耗的 75% 以上, 严重威胁环境安全并造成经济损失。本文提出一种基于不锈钢双盘内浮盘的安装施工工法, 通过全接液设计消除油气空间, 结合模块化结构和无梁式连接技术, 显著提升浮盘强度与密封性。该工法采用 304 不锈钢材质, 模块间通过品字形组装与螺栓连接, 实现浮盘整体浮重比达 2.5 倍以上, 接液面积率超过 99.5%, VOCs 减排量较传统浮筒式浮盘减少 85%。实际工程应用表明, 该工法施工便捷、安全性高, 使用寿命超过 20 年, 为石化行业 VOCs 源头治理提供了技术支撑。

关键词: 内浮盘; VOCs 治理; 不锈钢双盘浮盘; 全接液设计; 模块化施工

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 031

引言

石油作为现代工业的重要基础能源, 在其储运过程中, 轻质油品 (如汽油、航煤等) 的蒸发散逸问题一直是石化行业面临的严峻挑战。国际石油工业环境保护协会 (IPIECA) 的统计数据显示, 全球每年因油品蒸发造成的经济损失高达数十亿美元。这不仅意味着大量的能源浪费, 更对环境产生了深远的负面影响。

挥发性有机物 (VOCs) 作为油品蒸发的主要产物之一, 与雾霾的形成密切相关。在我国, 随着环保意识的不断增强和环保标准的日益严格, 对石化行业 VOCs 排放的管控愈发重视。根据我国《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》的明确指出, 常压储罐的蒸发损耗在储运总损耗中占比超过 60%, 而其中盘缝损耗更是占据了总蒸发损耗的 75% 以上。

传统浮顶罐由于自身结构存在一定的缺陷, 在运行过程中极易形成油气空间。在这一空间内, 气液传质现象频繁发生, 使得油品中的挥发性成分不断逸出, 导致大量的 VOCs 排放。这种情况不仅难以满足当前日益严格的环保要求, 还对周边的生态环境和居民健康构成了严重威胁。

为有效解决这一问题, 不锈钢双盘内浮盘技术应运而生。该技术通过全接液设计, 从源头上彻底消除了油气空间, 从而阻断了 VOCs 的挥发路径。其采用的模块化结构, 并结合高强度蜂巢芯填充技术, 使得浮盘的抗变形能力达到 API650 标准的 5 倍以上。此外, 该技术还支持无火作业安装, 大大降低了施工过程中的风险。

本文将结合某石化基地航煤储罐的实际工程案例, 系统且深入地阐述该工法的技术原理、详细的施工流程

以及关键的质量控制要点, 旨在为同类项目的开展提供全面且具有价值的参考。

1 工法特点与创新性

1.1 工法特点

1) 源头减排: 不锈钢双盘内浮盘的设计理念核心在于消除油气空间, 其浮盘整体采用无油气空间设计, 通过全接液的形式, 在油品与空气之间构建起一道有效的屏障, 极大地阻隔了气液传质过程。经实际检测, 其 VOCs 减排效率能够达到 85% 以上, 从源头上有效控制了挥发性有机物的排放, 显著降低了对大气环境的污染程度。

2) 结构强化: 在浮盘内部, 均匀分布着数量众多的蜂巢芯, 每平方米的蜂巢芯数量不少于 2500 个。这些蜂巢芯如同坚固的支撑骨架, 为浮盘提供了强大的抗压能力。经过测试, 模块抗压强度达到 API650 标准的 5 倍, 浮重比也不低于 2.5。这一优异的结构特性使得浮盘在承受油品压力、外界环境因素影响时, 能够保持稳定的形态, 有效避免变形、损坏等问题, 确保了储罐的安全运行。

3) 密封可靠: 在模块单元的制造过程中, 采用了先进的激光焊接工艺。这种高精度的焊接技术能够实现三维方向上无泄漏点的密封效果, 使得浮盘的接液面积率达到 99.5% 以上。此外, 在密封设计上, 还配备了边缘补偿密封系统, 进一步增强了浮盘的密封性能, 即使在储罐因温度变化、液位波动等因素产生微小变形时, 也能保证良好的密封性, 防止油品泄漏和 VOCs 挥发。

4) 施工高效: 该工法采用的模块化组装方式具有

显著的优势。模块尺寸设计合理,能够通过人孔进行运输,大大简化了运输流程。同时,在整个施工过程中,全程无需动火作业,避免了因动火带来的火灾、爆炸等安全隐患,提高了施工安全性。与传统施工工艺相比,采用该工法可使工期缩短 30%,有效提高了施工效率,降低了施工成本。

5) 耐久环保: 不锈钢双盘内浮盘选用 304 不锈钢材质, 这种材质具有出色的耐腐蚀性能和抗高温性能。在长期接触油品和恶劣的储罐环境下, 能够保持稳定的化学性质, 不易被腐蚀损坏。其使用寿命超过 20 年, 大大减少了频繁更换浮盘带来的资源浪费和经济成本。此外, 304 不锈钢材料可循环利用, 符合当前绿色环保的发展理念, 在使用寿命结束后, 可进行回收再加工, 降低了对环境的影响。

1.2 技术创新性

1) 无梁式模块设计: 摒弃了传统浮盘的主梁结构, 采用独特的品字形螺栓连接方式。这种创新设计打破了传统结构的局限性, 使得浮盘在周向方向上的刚度得到显著提升, 同时具备更好的柔性适配性。在储罐受到热胀冷缩、地基沉降等因素影响时, 浮盘能够通过自身的柔性变形来适应这些变化, 有效减少应力集中现象, 提高了浮盘的整体稳定性和可靠性。

2) 双面甲板连续工艺: 上下盖板通过先进的自动激光焊技术实现全密闭连接。这种连续焊接工艺不仅保证了盖板之间的连接强度, 还进一步增强了浮盘的抗变形能力。与传统的焊接方式相比, 自动激光焊能够实现更高精度的焊接, 焊缝质量更可靠, 减少了因焊接缺陷导致的泄漏风险, 为浮盘的长期稳定运行提供了有力保障。

3) 智能泄压系统: 集成了弹性密封与泄压阀门的智能泄压系统是该技术的又一创新亮点。在储罐运行过程中, 由于温度变化、油品进出等因素, 罐内压力会不断波动。智能泄压系统能够实时监测罐内压力变化, 当压力超过设定阈值时, 泄压阀门自动开启, 释放多余压力, 避免超压风险; 当压力恢复正常后, 阀门自动关闭, 确保罐内压力始终处于安全范围内。同时, 弹性密封设计保证了泄压过程中的密封性, 防止油品泄漏和 VOCs 挥发。

2 工艺原理与适用范围

2.1 工艺原理

1) 全接液设计: 不锈钢双盘内浮盘的双面甲板直接与油品完全接触, 这种设计从根本上消除了气相空间的存在。在传统浮顶罐中, 油气空间为气液传质提供了场所, 导致油品中的挥发性成分不断挥发到空气中。而

全接液设计使得油品与空气完全隔离, 切断了 VOCs 挥发的途径, 从而实现了从源头控制 VOCs 排放的目的。

2) 模块化密封: 在模块单元之间, 采用了 XPE 胶带与螺栓的双重密封方式。XPE 胶带具有良好的柔韧性和密封性, 能够在模块之间形成一道紧密的密封屏障, 有效防止油品泄漏。螺栓连接则进一步增强了模块之间的连接强度, 确保密封的可靠性。此外, 边缘补偿密封系统的设置, 能够根据储罐的变形情况自动调整密封状态, 使漏点率趋近于零, 进一步提高了浮盘的密封性能。

3) 力学优化: 蜂巢芯结构作为浮盘的重要组成部分, 在提升抗压强度方面发挥了关键作用。蜂巢芯的独特结构使其能够均匀分散压力, 有效提高了浮盘的承载能力。同时, 无梁式连接方式通过合理分布应力, 降低了应力集中现象的发生。这种优化设计使得浮盘能够更好地适应储罐在热胀冷缩过程中产生的变形, 保证了浮盘的结构稳定性和长期使用寿命。其中, σ 为抗压强度, F 为载荷, A 为接触面积, t 为壁厚, d 为蜂巢芯边长,

η 为材料修正系数。实验表明, 当蜂巢芯密度 ≥ 2500 个/ m^2 时, σ 值可达传统结构的 5 倍以上。

2.2 适用范围

本工法适用于容积大于等于 5000m^3 的常压储罐。这是因为在较大容积的储罐中, 油品的储存量较大, 蒸发损耗和 VOCs 排放问题更为突出, 采用不锈钢双盘内浮盘技术能够取得更为显著的治理效果。尤其对于轻质油品 (蒸汽压大于等于 10Pa) 的长期储存, 该工法具有独特的优势。轻质油品由于其挥发性较强, 在储存过程中更容易产生 VOCs 排放问题, 而不锈钢双盘内浮盘的全接液设计和高效密封性能, 能够有效减少轻质油品的挥发损耗, 满足长期储存的环保和安全要求。

3 施工工艺流程与关键技术

3.1 施工总流程

施工平台搭设→浮动出油装置安装→伸缩囊套安装→胎具架体搭设→浮盘模块组装→支腿与压条安装→密封系统调试→架体拆除与验收。

3.2 关键技术要点

1) 施工平台优化: 在施工平台搭建过程中, 选用 $\phi 48 \times 3.5$ 钢管搭设 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 卸料平台, 立杆间距严格控制在 1m 。这样的设计能够确保平台具有足够的承载能力, 同时保证施工人员和材料在平台上的操作安全。为了防止在模块运输过程中造成损伤, 在人孔处增设聚四氟乙烯垫。聚四氟乙烯具有良好的耐磨性和低摩擦系数, 能够有效保护模块表面, 避免刮擦和碰撞。在平台搭建完成后, 需要进行严格的验收, 检查平台的稳定性、承载能力以及各连接部位的牢固性, 确保符合施工要求。

2) 模块化组装: 以导波管中心线为基准进行模块排列, 按照“品字形”方式进行组装。这种排列方式能够充分发挥模块的结构优势, 提高浮盘的整体稳定性和承载能力。在箱体间预留 3mm 胶条缓冲层, 胶条缓冲层能够有效吸收在使用过程中因振动、变形等产生的应力, 保护模块连接部位不受损坏。采用扭矩控制法紧固螺栓, 标准值设定为 $45\text{N}\cdot\text{m}$ 。通过严格控制螺栓扭矩, 确保连接面均匀受力, 避免因螺栓松动或过紧导致的连接不牢固或结构损坏问题。在组装过程中, 需要对每个模块的位置、连接情况进行仔细检查, 确保组装质量符合标准。

3) 密封系统安装: 一次密封采用“聚四氟乙烯膜+XPE 胶带+弹簧板”复合结构。聚四氟乙烯膜具有良好的耐腐蚀性和低摩擦系数, 能够有效防止油品腐蚀密封材料; XPE 胶带提供了主要的密封屏障, 确保油品不会泄漏; 弹簧板则能够根据浮盘的运动情况自动调整密封压力, 保证密封效果。滑履板折弯角度控制在 $\leq 15^\circ$, 这样的角度设计能够保证滑履板与罐壁之间的良好接触, 同时避免因角度过大导致的密封失效和磨损加剧问题。防旋转装置通过三点一线定位法安装, 确保安装位置准确无误。钢丝绳张紧力需 $\geq 200\text{N}$, 合适的张紧力能够保证防旋转装置有效工作, 防止浮盘在运行过程中发生旋转, 影响密封性能和使用安全。在密封系统安装完成后, 需要进行密封性能测试, 确保无泄漏现象。

4) 安全控制: 架体拆除遵循“先支后拆”原则, 这是确保拆除过程安全的关键。在拆除过程中, 同步监测浮盘水平度, 偏差控制在 $\leq 3\text{mm}/\text{m}$ 。浮盘水平度对于其正常运行至关重要, 水平度偏差过大可能导致密封失效、油品泄漏等问题。静电消除装置接地电阻 $\leq 4\Omega$, 并通过第三方检测认证。静电消除装置能够及时导除在油品储存和运输过程中产生的静电, 防止因静电积聚引发火灾、爆炸等安全事故。在整个施工过程中, 还需要加强对施工人员的安全教育和培训, 提高安全意识, 严格遵守安全操作规程。

4 工程应用与效果分析

4.1 工程概况

成都天府石化基地 $2\times 10^4\text{ m}^3$ 航煤储罐项目是不锈钢双盘内浮盘安装施工工法的典型应用案例。该项目的罐体直径达到 48m, 高度为 18m, 规模较大。在施工过程中, 采用了本工法进行不锈钢双盘内浮盘的安装。与传统工艺相比, 施工周期仅为 45 天, 缩短了 20%。这不仅提高了工程建设效率, 还降低了施工成本, 为项目的顺利投入使用提供了有力保障。在施工过程中, 严格按照施工工艺流程和关键技术要点进行操作, 确保了浮盘的安装质量。

4.2 性能测试数据

指标	实测值	标准要求
浮盘水平度	$\leq 2\text{mm}/\text{m}$	$\leq 5\text{mm}/\text{m}$
接液面积率	99.7%	$\geq 99.5\%$
VOCs 减排率	87.3%	$\geq 85\%$
支腿承载力	15kN/点	$\geq 12\text{kN}/\text{点}$

4.3 经济效益

该项目采用不锈钢双盘内浮盘安装施工工法后, 取得了显著的经济效益。经统计, 每年可减少油品损耗约 120 吨。按照当时的市场价格计算, 折合经济效益达到 80 万元。这意味着在长期的使用过程中, 能够为企业节省大量的成本。此外, 维修频次由每年 2 次降至 0.5 次, 运维成本降低了 60%。这不仅减少了维修所需的人力、物力和财力投入, 还提高了储罐的运行效率, 减少了因维修导致的停产时间, 进一步提升了企业的经济效益。从长期来看, 不锈钢双盘内浮盘的应用能够为企业带来可观的经济回报。

5 结论与展望

不锈钢双盘内浮盘安装工法通过全接液设计与模块化施工, 成功攻克了石化储罐 VOCs 挥发的难题。从工程实践结果来看, 该工法在减排效率、结构安全性以及经济性等方面均展现出明显的优势, 大幅超越了传统技术。其高达 85% 以上的 VOCs 减排率, 有效降低了对大气环境的污染; 强大的结构性能确保了浮盘在复杂工况下的稳定运行; 显著的经济效益则为企业的可持续发展提供了有力支持。

展望未来, 随着科技的不断进步和行业需求的持续升级, 在浮盘技术领域仍有广阔的发展空间。可进一步深入研究浮盘智能监测系统, 集成高精度的压力、温度传感器等设备。通过这些传感器, 能够实时采集浮盘运行过程中的各项数据, 如罐内压力、温度变化、浮盘位置等, 并借助无线传输技术实现数据的远程传输。这将使储罐运维人员能够及时掌握浮盘的运行状态, 提前发现潜在问题并采取相应措施, 推动储罐运维向数字化、智能化方向迈进。同时, 还可探索新型材料和结构设计, 进一步优化浮盘性能, 降低成本, 提高其在不同工况下的适用性, 为石化行业的绿色、可持续发展注入新的活力。

参考文献

- [1] IPIECA. Guidelines for VOC Emissions Management in the Oil and Gas Industry[R]. London, 2018.
- [2] 生态环境部. 石化行业 VOCs 污染源排查工作指南[S]. 北京: 中国环境出版社, 2015.