

石油储罐运行过程中泄漏风险识别与防控技术研究

徐磊 (安徽实华工程技术股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 石油储罐在长周期服役过程中易受腐蚀、应力波动与环境扰动的叠加影响, 泄漏隐患常在结构细微变化中逐步显现, 伴随储运规模扩大与工况复杂度上升, 传统经验式管控难以及时识别风险前兆, 安全边界呈现收紧趋势。研究围绕运行阶段的风险生成逻辑、泄漏前兆的识别机制与防控技术的协同应用展开, 利用状态监测、参数分析与工程防护构建前移预警体系, 为储罐运行安全提供更具连续性的技术支撑, 减少环境影响与经济损失的扩散链条。

关键词: 石油储罐; 泄漏风险; 运行监测; 风险识别; 防控技术

中图分类号: TE972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0145-03

Research on Leakage Risk Identification and Prevention-Control Technologies for Oil Storage Tank Operations

Xu Lei (Anhui Shihua Engineering Technology Co., Ltd., Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: During the long-term service of oil storage tanks, they are prone to the combined effects of corrosion, stress fluctuations, and environmental disturbances. Leakage risks often gradually manifest in the subtle changes in the structure. With the expansion of storage and transportation scales and the increasing complexity of working conditions, traditional experience-based management methods struggle to identify early signs of risk in a timely manner, resulting in a tightening of safety boundaries. This research focuses on the risk generation logic during the operational phase, the identification mechanism for leakage precursors, and the synergistic application of prevention and control technologies. By utilizing condition monitoring, parameter analysis, and engineering protection, an early warning system is established to provide more continuous technical support for tank operation safety, reducing the chain of environmental impact and economic loss.

Keywords: oil storage tanks; leakage risk; operational monitoring; risk identification; prevention and control technology

石油储罐在能源供应链中的枢纽作用, 使其运行阶段的安全稳定性常被放大为区域风险治理的关键变量, 运行环境中的温度波动、介质腐蚀性与设备老化, 会同步推动结构性能向隐性衰减方向变化, 泄漏风险因此呈现更强隐蔽性。近年来多起储罐事故暴露出监测维度不足、识别前移能力偏弱等现实约束, 工程领域亟需在风险机理、识别路径与防控技术之间形成结构化链条, 推动运行安全从被动响应转向连续守护。

1 石油储罐运行阶段泄漏风险的形成机理与特征

1.1 结构与材料层面的风险累积机制

石油储罐长期受高湿度、介质腐蚀、温差波动共同影响, 伴随服役年限增加, 结构性能不断下降, 介质沉积、阴极保护覆盖不均等因素影响罐底板与下部罐壁, 局部腐蚀速度往往比理论设计值高, 微裂纹扩展期间金属组织承载能力渐渐失去, 此类腐蚀多呈现为点蚀、缝隙腐蚀以及底板背面腐蚀等隐蔽形式, 检测窗口有轻微滞后, 腐蚀坑将迈向穿孔阶段。材料制造时本身存在的缺陷亦有可能在运行之时被放大, 比如说焊缝金属晶粒粗化与残余应力释放, 会推动裂纹扩展速率进入不稳定阶段, 进而提高泄漏出现的几率。

风险分布受不同结构形式的影响差异明显, 拱顶

罐以及内浮顶罐受顶部结构重量、支撑杆布局、密封构造等差异作用, 应力集中位置常使上部与中部罐壁出现早期疲劳现象, 多曲面组合的储罐结构, 会让一些变形区无法从外部进行观察。底板搭接处、环焊缝附近这些位置更易集聚损害, 因使用年限增长, 结构刚度的衰减与腐蚀减薄叠加以后, 泄漏隐患常聚焦于几何不连续处, 风险的局部性与隐蔽特性同步加剧。

1.2 运行工况与环境因素的叠加影响

石油储罐运行状态按生产节奏不断转变, 液位升降、温度波动与介质属性一起造就多维度应力加载路径: 液位呈周期性变化, 导致罐壁反复弯曲, 因介质密度有别, 疲劳累积速率呈梯度分布; 温度改变驱动罐体胀缩, 局部范围的塑性应变一般难以在短期内恢复如初, 进而减少结构的安全裕度; 若介质里有水、硫化物或酸性成分, 温度提升阶段会放大其腐蚀反应, 腐蚀深度呈现季节性差别。

外部环境作为另一维度, 会促使储罐结构承受更多非设计载荷, 例如寒冷地区的冻融循环会造成钢材微裂纹萌生速率上升, 高湿地区则增加涂层老化与基础沉降的不确定性, 地基在长期沉降过程中会改变罐壁受力分布, 边缘板可能因倾斜产生额外应力集中^[1]。

台风、大风等极端天气亦会形成罐顶负压，浮顶密封带可能因偏移而出现缝隙，为泄漏前兆的出现提供条件。

2 石油储罐泄漏风险的识别方法与技术路径

2.1 基于结构状态的泄漏风险识别方法

结构状态识别侧重围绕腐蚀减薄、裂纹扩展与局部应力偏移等物理量展开，凭借对关键部位开展连续或阶段性检测，为泄漏隐患提供前移判断依据^[2]。壁厚检测是一类典型手段，采用超声测厚、相控阵等技术可在不破坏结构的前提下捕捉金属减薄程度，结合历史测点数据能够判断腐蚀速率与减薄分布，识别潜在穿孔区域。腐蚀监测探针或电化学传感装置通过电阻变化、电流噪声等信号反映腐蚀活跃程度，其趋势往往与泄漏前兆呈同步关系，为底板背面腐蚀等隐蔽区域提供稳定识别路径。

结构损伤识别同样借助裂纹检测技术，磁粉、渗透、超声 TOFD 等方法可发现环焊缝、纵焊缝内部的微裂纹，波形特征放大后可解析裂纹长度与发展速率。部分储罐在服役后期会出现整体变形，罐壁椭圆度、罐底沉陷曲线变化均可借助激光扫描或三维建模完成定量识别，为判断结构受力状态偏移提供依据，这些方法虽各具侧重点，但在结构状态识别体系中具有互补属性，能够让不同部位的隐患各自获得稳定的技术支持。

结构状态识别的另一特征在于趋势判断的可溯性，储罐腐蚀、疲劳的演化周期较长，单次检测难以全面刻画风险分布，多轮检测形成的数据序列更能展示损伤扩展路径，例如某底板测点若在多次检测中呈加速减薄趋势，即便未达到报警值，也常被视为潜在高风险点。这类趋势性信号的价值在于能够及时暴露“隐患萌发期”的迹象，避免风险向不可逆阶段跳跃。

2.2 基于运行数据的异常特征识别

运行参数的动态变化承载着大量潜在泄漏前兆信息，液位、压力、温度与介质性质等指标若出现与常规规律偏离的趋势，通常暗含结构状态变化。液位下降速率是最常用的判断依据之一，若油罐处于静止或恒定蒸发损失阶段，液位波动应保持平稳，一旦下降速率超过经验区间，或在昼夜周期中出现异常波动，便可能反映液位计异常、底板渗漏或浮顶密封偏移等情况，需要结合其他参数进一步研判。

压力与温度作为受工况与介质特性影响最直接的量，也具有突发性异常识别价值，例如夏季高温条件下罐内压力会出现周期性上升，但若升幅超出以往季节规律，则可能代表蒸汽空间密封不良或罐顶排气设施受阻。

温度分布亦可反映介质运动状态，若底部温度异常偏低，可能暗示罐底积水带来的局部腐蚀活跃^[3]。另外，质量流量、油水界面位置等数据也能为泄漏风险提供判断辅助，例如油水界面短时间内出现不合逻辑的跳变，常意味着底部板材附近的腐蚀或穿孔导致介质渗入。

运行数据识别的关键在于多参数的协同解释，一项参数偏离并不必然对应泄漏，但多项指标同步出现异常，则相关性会显著增强，例如液位下降与介质补充量不匹配、压力下降与温度上升具有同步性等情形，均可被视为潜在泄漏信号。

2.3 综合判别与风险分级识别机制

结构检测与运行参数的单维识别虽然能够捕捉风险线索，但泄漏隐患通常具有多源、多维、多阶段的特征，需要依托综合判别机制完成风险等级的稳定划分，综合判别的核心是信息融合，凭借将壁厚减薄、腐蚀电流变化、液位异常、压力波动等多项指标纳入统一框架，并运用逻辑判断或模型推断完成权重分配，让不同来源的信息形成互证关系。罐底穿孔风险一般表现为减薄趋势与液位下降的联动，罐顶密封偏移一般伴随压力波动与油气回收参数异常，这种耦合特征正是综合判别的关键依据。

明确分界标准是构建风险分级的关键，通常的做法是依据减薄率、裂纹扩展速率、液位变化速率等设定多个级别，让风险状态呈现出梯度分布态势，等级之间不是简单区隔开来，而是展现罐体结构状态从“轻度异常-明显偏离-接近临界”三个阶段的变化进程，这类分级体系可使运行人员迅速知晓风险的演化阶段，进而有针对性实施运行调整、检测加密或维护筹备。

3 石油储罐泄漏风险防控技术及运行保障措施

3.1 工程技术层面的泄漏防控措施

工程技术防控主要针对罐体结构、防渗构造及关键节点可靠性建设去开展，在材料、结构还有工艺层面打造多重屏障，减少泄漏隐患的暴露空间，罐底防渗是防控体系关键构成。工程实践一般采用双层底结构、底板局部加厚、涂层体系强化等方式，让底板在长久服役期间保有稳定抗蚀能力，双层底结构凭借夹层检漏作用构建早期渗漏识别路径，即便底层板有局部穿孔现象，检漏管道能引导渗液，避免介质溢出到土体之外^[4]。

罐壁及焊缝区域防护更倚重材料工艺优化，环焊缝、纵焊缝可采用先进焊接技术和在线检测体系，加大焊缝的紧密性，减少微裂纹产生几率，罐壁外表面宜选用高耐候性涂层，于罐底外缘设置阴极保护，让

腐蚀区域维持可控范围^[5]。顶盖与密封机构设计同样影响整体泄漏风险，运行周期内，内浮顶密封件的材质、弹性响应能力、磨损速率等均要维持稳定性能，阻止蒸汽空间逸散或油气泄露。

3.2 运行监控与预警体系的构建

泄漏防控效果好坏，全看监控体系的实时性、敏感性以及可解释性，监测系统往往根据液位、压力、温度、腐蚀、电化学信号等多类型参数构建，让储罐状态在时间序列内实现完整刻画。

液位监测装置选用高精度雷达液位计，能在毫米精度范围内捕捉波动走向，为泄漏前兆给予敏感窗口；压力及温度监测凭借数字输出传感器，可在工况频繁变动时维持稳定响应，协助分析蒸汽空间状况及介质热力特性；腐蚀监测系统含有腐蚀探针、电阻式传感器等，可以体现金属损伤速率，趋势改变一般比实测减薄更早发出危险信号^[6]。

预警阈值的设定需要结合储罐结构、介质性质与历史数据，例如液位下降速率的正常范围可依据季节性蒸发损失模型建立，当下降速率连续超出模型预测区间，系统应立即触发预警。压力波动的上限与下限可根据罐顶结构形式、防火气封系统参数等综合设定，偏离幅度若在短时间内持续扩大，则需要进入重点监测状态。预警体系的价值不仅体现在报警功能，更体现在能够引导运行人员开展针对性核查，如自动调取历史数据、生成异常趋势图、提示相关部位检测等，让预警信息具备操作指向。

监控体系的稳定运行需要依托数据平台支撑，数据平台可借助数据采集单元、通信模块与逻辑分析模型，使监测信息能够在后台形成连续序列，多项参数的变化联系可利用数据融合算法完成解析。例如液位异常可与腐蚀监测数据同时调用，判断是否存在底板损伤；压力异常可与密封磨损记录关联，分析浮顶密封是否存在偏移。监控体系因此能够形成“测量—分析—提示”的闭环路径，使运行人员在早期即介入隐患处置。

3.3 管理机制与应急处置能力的协同提升

工程技术与监控体系虽能形成外显的安全屏障，但管理体系作为运行链条的底层逻辑，其稳定性直接影响防控体系的整体效能，管理机制的构建需围绕制度执行、巡检质量、维护节奏与信息链路等方面进行重塑，使运行过程具备持续可控性。巡检制度应具备明确的路线表、检查点与记录要求，让易损位置、历史隐患点、底板边缘区等重点区域得到精准关注；巡检结果需形成数字记录，避免纸质记录在交接阶段出现遗漏。

维护节奏需与结构状态挂钩，不宜仅沿用固定周期，应依托检测数据动态调整，例如当腐蚀速率进入异常区间，应提前布局底板补强或密封更换计划，让维护行为能够顺应结构变化趋势。

信息流转机制是管理体系的另一关键环节，监测数据、巡检记录与运行调整需要构建连贯的传递链条，让任何异常信息能够被快速反馈至决策单元，例如某项关键参数进入偏离区间，系统可向巡检与维护岗位同步推送核查任务，避免因沟通延时造成隐患扩散。管理机制中若配套绩效考核、岗位责任制等制度约束，可以让执行质量保持在稳定水平，从而让技术措施具有落地基础。

应急处置能力的建设则面向泄漏事故的后果控制，在运行管理体系中，应急预案需要具备动态性，根据介质类别、储罐容量与罐区布局不断优化。应急物资应按泄漏类型分类配置，如吸油毡、拦油带、应急堵漏工具等，各自承担不同类型泄漏的处置任务。处置流程需明确人员响应顺序、现场隔离措施、油品回收与污染控制路径，使人员在突发状态下能够快速进入操作状态。应急演练亦需保持常态化，凭借模拟不同场景逐步熟悉处置流程，让日常管理与突发处置之间形成良性衔接。

4 结语

石油储罐在连续运行中呈现腐蚀活跃、工况扰动频繁与结构老化并存的状态，泄漏风险由此带有更强的隐蔽性与累积性，研究围绕风险生成机制、识别路径与防控体系展开论述，以结构状态、运行数据与综合判别构建识别链条，并借助工程防护、监测预警与管理协同形成稳定防控框架。伴随数字化技术与材料技术不断演进，储罐运行安全有望由传统依赖经验判断转向基于数据逻辑的前移治理格局，为能源储运体系的环境安全与经济稳定提供更坚实的技术基础。

参考文献：

- [1] 曾维丁. 石油化工项目储罐基础防渗要求与环境监管重点[J]. 环境保护与循环经济, 2025, 45(09): 107-110.
- [2] 修士鑫, 陈敬军. 石油储罐腐蚀原因及监测技术方案研究[J]. 山西化工, 2025, 45(03): 158-160.
- [3] 许强. 针对石油储罐涂层防腐性能的优化设计[J]. 金属功能材料, 2024, 31(05): 110-116.
- [4] 陈增良. 石油库储罐内部底板防渗改造施工工艺探讨[J]. 石油库与加油站, 2025, 34(02): 1-3+53.
- [5] 周晓溢. 石油储罐罐底焊接工艺常见问题及解决措施分析[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 235-238.
- [6] 赵志广. 石油储罐防腐措施的创新探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(17): 28-30.