

大型原油储罐主要腐蚀类型及防腐技术进展

柳冰瑞 (中海油惠州石化有限公司, 广东 惠州 516086)

摘要: 本文聚焦于储罐本体的三大腐蚀敏感区 - 罐底、罐壁及气相空间, 从微观电化学角度剖析了硫酸盐还原菌 (SRB) 代谢产物导致的去极化机理, 指出“大阴极 - 小阳极”电偶效应是局部深坑形成的根源。针对工程痛点, 文章论证了符合 GB/T 50393 规范的“网状阳极 CP+ 玻璃鳞片涂层”联合防护体系的必要性, 并结合最新的工程实践, 探讨了粘弹体密封技术在边缘板治理中的应用。同时, 评估了声发射智能监测模型在消除噪声干扰、实现“预知维修”方面的技术潜力。

关键词: 大型原油储罐; 微生物诱导腐蚀; 阴极保护; 边缘板; 完整性管理

中图分类号: TE972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0007-03

Main Corrosion Types of Large Crude Oil Storage Tanks and Progress of Anti-corrosion Technology

Liu Bingrui (CNOOC Huizhou Petrochemical Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516086, China)

Abstract: This study investigates three critical corrosion zones in tank structures—tank bottom, tank walls, and vapor space. Through microscopic electrochemical analysis, it elucidates the depolarization mechanism induced by sulfate-reducing bacteria (SRB) metabolites, identifying the “large cathode-small anode” galvanic effect as the root cause of localized deep pit formation. To address engineering challenges, the paper validates the necessity of a GB/T 50393-compliant hybrid protection system combining “mesh anode CP+ glass flake coating.” Furthermore, it explores the application of viscoelastic sealing technology in edge plate treatment, supported by cutting-edge engineering practices. Additionally, the study evaluates the technical potential of acoustic emission-based intelligent monitoring models for noise interference mitigation and predictive maintenance implementation.

Keywords: large crude oil storage tank; microbial-induced corrosion; cathodic protection; edge plate; integrity management

单罐容量十万立方米级的原油储罐, 是维持炼化企业连续生产的物流枢纽。近年来, 随着主力油田进入注水开发后期, 原油含水率普遍超过 80%, 且伴生气中硫化氢、二氧化碳含量显著攀升。这种介质环境的恶化, 直接导致储罐运行风险上升, 大修周期被迫缩短。工程层面面临的挑战在于, 储罐大型化导致底板受力状态极度复杂。特别是边缘板区域, 承受着液柱静压力与地基差异沉降产生的剪切力, 微裂纹萌生概率极大。一旦腐蚀介质沿裂纹渗入, 极易诱发应力腐蚀开裂 (SCC)。遗憾的是, 既往研究多独立探讨微生物腐蚀或力学损伤, 缺乏对两者耦合机制的工程化阐述。鉴于此, 本文立足于近年的最新现场数据, 重新解构储罐腐蚀图谱, 并对防腐与检测技术的迭代路径进行评述。

1 大型原油储罐主要腐蚀类型及机理

储罐的腐蚀形态具有明显的空间分布特征。根据介质接触状态的不同, 可将腐蚀区域精确划分为三个独立又相互关联的系统: 罐底板系统、罐壁液相与界面系统以及罐顶气相系统。

1.1 罐底板腐蚀: 多场耦合下的失效

罐底板是腐蚀穿孔的高发区, 其失效机理表现为

内、外两侧环境的协同攻击。

1.1.1 沉积水环境下的微生物侵蚀

储罐运行期间, 油水自然分离, 高矿化度水相沉积于罐底。这为厌氧微生物提供了生存温床。实测数据证实, 硫酸盐还原菌 (SRB) 利用有机碳源代谢时, 将 SO_4 还原为硫离子^[1]。反应生成的硫化亚铁 (FeS) 膜虽然覆盖在金属表面, 但它实际上是一种强阴极材料。当涂层破损导致铁基体 (阳极) 裸露时, FeS 膜会加速阳极溶解, 导致点蚀坑深宽比异常高, 形成典型的“溃疡状”腐蚀。

1.1.2 土壤侧的氧浓差效应

罐底外侧坐落在沥青砂垫层上。由于储罐直径巨大, 中心区域长期缺氧, 而边缘区域透气性好、氧含量高。这种气体分布差异构建了宏观的充气不均电池: 边缘板因富氧被保护, 中心板则因缺氧成为牺牲阳极。

1.2 罐壁与气相空间腐蚀

罐壁腐蚀主要集中在油水界面波动区, 干湿交替导致氯离子浓缩, 极易破坏钝化膜。而罐顶气相空间则受制于“硫循环”: 挥发出来的硫化氢在冷凝水中被氧化成元素硫, 进而歧化生成硫酸。由于气相空间缺乏连续电解质, 常规阴极保护在此处完全失效。

1.3 罐顶及气相空间腐蚀：硫循环的恶性循环

对于浮顶罐而言，浮盘上部与罐壁之间的气相空间，以及固定顶罐的顶部空间，是气相腐蚀的重灾区。

原油中挥发出来的硫化氢、二氧化碳与水蒸气在昼夜温差作用下，于罐顶内壁凝结成露。这些冷凝液吸收酸性气体后，酸碱度显著下降。在这个过程中，存在一个恶性的“硫循环机制”：硫化氢被氧化生成元素硫，元素硫在湿润环境中发生歧化反应生成硫酸，进一步酸化冷凝液。这种腐蚀产物主要为氧化铁与硫化铁的混合物。值得注意的是，由于气相空间缺乏连续的液相电解质，传统的牺牲阳极或外加电流阴极保护技术在此处完全失效，这使得罐顶腐蚀成为防护技术的难点。

2 大型原油储罐防腐技术进展

原油储罐内部腐蚀环境越来越差，而防护基本是按《钢质石油储罐防腐工程技术标准》(GB/T 50393-2017)来，是要弄成一个由“物理阻隔(涂层)+电化学极化(阴极保护)+柔性密封”组成的立体防护网^[1]。长时间下来，材料性能下降和施工本身的缺陷等问题搅在一起，相关技术必须得做深度调整改进。

2.1 内壁涂层技术的改性与结构优化

内壁涂层是挡住腐蚀介质往里渗透的第一层物理挡墙，它的致密程度是影响储罐多久修一次的关键，罐底和罐壁下面有水积着的地方，以前常用的纯环氧树脂涂层，在对付高浓度硫化氢时用起来有明显问题：小分子的硫化氢和水能钻进树脂分子链之间的小缝隙，在压力推着下直接到金属表面，让涂层因为界面上腐蚀生成的东西体积变大而起泡脱落。现在玻璃鳞片增强的重防腐涂层已经全面代替纯树脂涂层成了行业里都用的，技术关键是“迷宫效应”的形成——在乙烯基酯或环氧树脂底子中，密密麻麻填着微米级、耐酸的薄玻璃鳞片，这些鳞片在涂层里一层一层平行叠着，让腐蚀东西的扩散路变弯变绕，实验显示，这种物理挡住的办法能让腐蚀东西的渗透路变长几十到上百倍，大大拖慢了导电液体碰到金属底子的时间。存原油时静电堆起来有危险，所以涂层必须能导静电是底线，传统做法是加炭黑或石墨颗粒来建导电的路，但这常会造成“导电性和致密性”的矛盾：加太多填料会破坏树脂底子的连续结构，让涂层的小孔变多，防腐能力突然变差。最近，用碳纳米管(CNTs)或石墨烯的纳米改性技术有了解决办法，纳米材料长和直径比例很高，只要加很少量就能搭起高效的电子传输网，在保持涂层防腐致密的同时，正好解决了静电导出去的问题。

2.2 区域性阴极保护技术的工程适应性分析

涂层不可避免地存在微观针孔或施工缺陷，因此，

施加阴极保护(CP)是抑制罐底外侧(土壤侧)腐蚀的唯一补救措施。但是，大型储罐巨大的底板面积以及沥青砂垫层的高电阻率特性，给保护电流的均匀分布带来了巨大的物理屏蔽障碍。早期采用的深井阳极地床方案，受限于电流的几何发散特性，极易在罐底中心区域形成“保护死角”，而在边缘区域造成“过保护”(引发析氢剥离)。针对这一工程痛点，将阳极系统从“远场”移至“近场”是必然趋势^[2]。网状阳极系统(MMO)应运而生，该系统将贵金属氧化物阳极带如地毯般预埋在罐底基础砂层中，将阳极与阴极(底板)的间距缩短至厘米级。这种分布式的几何结构，从根本上消除了土壤电阻导致的电压降，确保了保护电流在底板每一寸表面的全覆盖。对于无法进行动火大修的在役旧罐，如何在不破坏原有基础的前提下更新失效的阳极系统，是一项极具挑战的工程考题。利用定向钻技术水平植入柔性阳极，成为目前最具可行性的折中方案。尽管该工艺对钻进精度要求极高，但它成功规避了清罐作业的高昂时间成本，为老旧储罐的延寿治理提供了一条切实可行的技术路径。

2.3 边缘板与补板维修的精细化治理

底板边缘板外伸部分，处于大气、混凝土基础与金属罐体的交汇处，是腐蚀控制的绝对“死角”。雨水和夜间露水利用毛细现象，极易沿罐壁与基础的缝隙渗入罐底，形成难以挥发的潮湿环境。传统的沥青砂浆封堵，因材料老化变硬，无法跟随罐体热胀冷缩发生形变，往往在经历数个温差循环后开裂失效。目前的最佳工程实践是引入粘弹体密封系统。这种高分子材料具有独特的“冷流”特性，能够保持永久的非固化状态。无论储罐发生何种程度的沉降或热变形，粘弹体始终能像液体一样流动并填充缝隙，从而彻底切断水汽入侵通道。此外，针对底板腐蚀穿孔后的补板维修，有限元模拟研究证实，圆形补板相比方形补板，能更有效地分散焊缝周边的热应力集中，显著降低了补板边缘发生二次应力腐蚀开裂(SCC)的概率^[4]。这一结论有力纠正了施工现场为节省材料而随意下料的粗放习惯。

3 罐腐蚀监测与检测技术

在“双碳”背景下，储罐维护策略正经历着从“基于时间的被动维修”向“基于风险的预知维修”的范式转型。检测技术作为感知道具，其灵敏度与可靠性直接决定了决策的科学性。

3.1 离线停机检测

储罐停运清罐后，漏磁检测(MFL)依然是评估底板腐蚀状况的行业金标准。其物理原理利用强磁场将磁性底板磁化至饱和，在腐蚀减薄处磁导率突变，

导致磁力线溢出表面被传感器捕获。现代 MFL-3D 设备已能通过多维探头数据融合, 精确区分上表面(介质侧)与下表面(土壤侧)腐蚀^[1]。但 MFL 技术并非万能, 在焊缝凸起区及边缘板死角, 由于磁桥无法贴合, 存在明显的检测盲区。此时, 必须引入相控阵超声(PAUT)作为补充, 利用其声束角度可控的特性, 对盲区进行定点切片扫描, 最大限度消除检测死角。

3.2 在线智能化监测

罐底发生腐蚀裂纹扩展或氧化皮剥落时, 释放瞬态弹性波, 罐壁布置传感器阵列捕捉这些信号, TDOA 算法定位声源, 现场环境雨水撞击、泵机振动等背景噪声, 极易淹没微弱腐蚀信号, 误报率一直很高, 这是声发射(AE)在线检测技术推广的瓶颈。李伟等人引入人工智能算法, 构建基于 SMOTE-GWO-SVM 的储罐底板腐蚀智能评价模型^[3], 模型机器学习海量信号特征, 自动剥离环境噪声, 精准提取代表腐蚀活性的特征参数, 从“定性监听”到“智能诊断”的跨越, 极大提升在线监测可信度, 电阻探针(ER)内腐蚀监测逐步推广, 只能反映安装点局部腐蚀速率, 和全场覆盖的声发射技术数据融合, 构建多维度健康感知网络。

4 当前面临的主要挑战与技术瓶颈

尽管相关防腐与检测技术迭代迅速, 但在真实的工程实践层面, 大型原油储罐的完整性管理依然被几个深层次的结构性矛盾所困扰, 这些问题远比单纯的技术参数更棘手:

4.1 微观机理与宏观监测数据的“严重脱节”

目前的学术研究多集中于实验室环境下的“温室”实验, 往往针对单一菌种进行理想化培养。然而, 现场储罐底部是一个黑暗、缺氧且动态变化的复杂生态系统, 存在着多菌种的协同或拮抗作用。现场工程师面对的是一个巨大的“黑箱”, 仅凭简单的介质采样数据, 根本无法还原沉积层下复杂的微生物群落演替过程。这就导致我们至今难以建立细菌浓度与腐蚀速率之间精确的定量映射模型, 现场的加药杀菌策略往往缺乏科学指导, 不得不陷入“出了问题再加药”的被动循环, 甚至沦为“盲人摸象”般的经验主义操作。

4.2 老旧储罐技术改造中出现的“排异反应”

国内目前大量服役超过 15 年甚至 20 年的储罐, 其基础沥青砂层经过长期的重压与浸泡, 往往已经发生了不可逆的老化——有的板结如石, 透气性丧失殆尽; 有的则因含油严重而变成了绝缘体。在不破坏原有地基这一严苛前提下, 要想强行实施现代化的网状阳极改造, 极易面临电流被屏蔽的窘境。这不仅是工艺上的难办, 更是一道在“安全投入”与“施工风险”

之间艰难平衡的算术题, 许多改造项目最终因无法解决这一地基匹配性问题而不得不降级处理。

4.3 海量检测数据形成的“孤岛效应”

在数字化转型的浪潮下, 我们虽然拥有了声发射、漏磁扫描、电阻探针等先进手段, 但这些宝贵的数据往往被锁死在各自独立的软件系统或部门硬盘里。防腐工程师难以将阴极保护的电位波动、介质的化验分析数据以及历年的壁厚减薄趋势放在同一个坐标系下进行多维度的关联分析。缺乏这种跨学科的数据融合, 所谓的“基于风险的检验(RBI)”往往流于纸面形式, 变成了一堆无法指导现场维修决策的僵尸数据, 难以真正发挥预防性维护的核心价值。

5 结论

通过梳理大型原油储罐的腐蚀机理与防护发展过程。全篇内容分析, 得出了以下结论: 罐底板失效不是单个因素造成的, 是微生物代谢产物、沉积水电解质环境、地基应力这些多场耦合的必然结果, 传统设计容易低估这种局部点蚀的爆发速度。而 GB/T 50393 标准推荐采用的“玻璃鳞片涂层+网状阳极 CP”组合, 配合边缘板粘弹体密封, 工程实践证明是当前可靠的优选防护体系。维护策略主动化转型已经是定局, 声发射这类在线监测技术还受噪信比影响, 结合李伟等人研究出的智能去噪算法, 已经有了识别活性腐蚀源的工程能力^[3]。未来, 打破设计、施工与运维的数据壁垒, 建立用数字孪生的全生命周期管理平台, 是解决储罐安全隐患的终极路径。

参考文献:

- [1] 王恒, 赵世佳, 郭洪, 等. 初采原油储罐腐蚀调查与无损检测技术应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2024, 41(4): 36-40.
- [2] 刘伟明. 大型原油储罐用钢腐蚀性能的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(6): 6.
- [3] 李伟, 张伟, 戴光. 基于 SMOTE-GWO-SVM 模型的储罐底板腐蚀声发射检测智能评价[J]. 无损检测, 2023, 45(1): 74-78.
- [4] 张贵霖, 李卓原, 吴玉国. 原油储罐罐底腐蚀缺陷最佳补板形状研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(5): 52-58.
- [5] GB/T 50393-2017. 钢质石油储罐防腐工程技术标准[S]. 北京: 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局, 2017.

作者简介:

柳冰瑞(1975-), 男, 湖北黄梅人, 毕业于江苏石油化工学院, 工程师职称, 工艺副经理, 从事油品储运工作。