

# 油罐防腐修复工艺的创新与实践案例分析

李 明（中国石化海南炼油化工有限公司，海南 儋州 571738）

**摘要：**油罐作为石油化工行业重要储存设施，其安全运行直接影响生产效率和环境保护。本文以油罐防腐修复工艺为研究对象，深入分析油罐腐蚀损坏的关键因素，包括油品性质、材质选择和使用环境等，在此基础上重点探讨高精度无损检测、新型防腐涂层材料与工艺、高效节能修复等关键技术的创新应用。通过3个不同类型油罐防腐修复工程案例的实践分析，提出从修复策划、施工管理到长效维护的全过程精细化管理与创新方法，为同类工程提供借鉴与参考。

**关键词：**油罐防腐；腐蚀机理；无损检测；防腐涂层；修复工艺

## 0 引言

随着石油化工行业的快速发展，储罐的安全高效运行显得尤为重要。近年来国家相继出台一系列政策法规，对储罐防腐提出更高要求。油罐长期服役过程中不可避免地发生不同程度的腐蚀损坏，如何科学评估其状态，采用先进技术和材料进行修复，进而延长其使用寿命，成为业界普遍关注的课题。本文拟在分析油罐腐蚀损坏机理和影响因素的基础上，总结防腐修复关键技术创新成果，并结合典型工程案例实践，探讨质量控制与管理创新措施，旨在为业界同仁提供一定的理论指导和实践借鉴，推动行业技术进步。

## 1 油罐腐蚀损坏的关键因素分析

### 1.1 油品性质对腐蚀的影响

油品的理化特性是影响油罐腐蚀的内在因素。含硫量、酸值、含水率等指标与腐蚀速率密切相关。研究发现，高含硫油品易产生硫化氢等腐蚀介质，加速罐底泄漏；酸值越高，对罐体材料的腐蚀作用越强；含水率过高，易导致油水界面的局部腐蚀。不同油品的腐蚀机理存在差异，如原油主要引起硫化物应力腐蚀开裂，而成品油则易发生微生物腐蚀。深入探究油品性质与腐蚀的关系，建立完善的油品腐蚀性评价体系，对于优化油品存储条件、合理制定防腐措施具有重要意义。

### 1.2 油罐材质与腐蚀的关系

油罐材质的选择直接决定其抗腐蚀性能。常见的碳钢罐易发生均匀腐蚀、点蚀及应力腐蚀等，而不锈钢罐虽整体性能优异，但缝隙腐蚀和晶间腐蚀仍是主要失效模式。近年来，一些新型耐腐蚀材料如双相不锈钢、纳米复合材料在油罐领域得到应用探索。研究表明，合金元素的种类、含量对材料的耐蚀性有显著影响，而纳米材料的高比表面积和量子效应则赋予其

独特的抗腐蚀特性<sup>[1]</sup>。深入分析不同材质的腐蚀规律，开发高性能防腐材料，对延长油罐使用寿命、保障储存安全至关重要。

### 1.3 油罐使用环境因素

除油品和材质外，油罐所处的使用环境也是影响腐蚀的重要外因。罐内介质的温度、压力动态变化引起的应力状态改变，易诱发疲劳腐蚀和应力腐蚀。研究发现，温度每升高10℃，腐蚀速率可提高1~4倍。此外，罐外大气环境中的氧气、湿度、二氧化硫等，会加速罐顶和罐壁的大气腐蚀。而罐底和基础的腐蚀则受土壤环境中水分、氧气、pH值、电阻率等因素综合作用。因此，研究不同环境条件下油罐腐蚀规律，建立实时监测和预警系统，合理控制温压、湿度等参数，可为精准防腐、科学维护决策提供依据。

## 2 油罐防腐修复关键技术创新

油罐防腐修复的关键在于先进检测评估技术的应用和新型防腐材料、工艺的创新。只有准确诊断罐体的腐蚀状况，才能有的放矢地制定修复方案。同时，防腐涂层材料和施工工艺的选择直接关系到修复效果和使用寿命。本文将重点探讨油罐防腐领域具有代表性的检测、材料和工艺创新成果。

### 2.1 高精度无损检测技术

电磁超声EMAT检测利用电磁效应激发和接收超声波，无需耦合剂，可实现高温和粗糙表面检测。利用电磁超声导波技术进行油罐壁厚快速测量，导波在罐壁中的传播对壁厚变化极为敏感，通过分析导波频散曲线，可精确评估罐壁减薄量。同时，优化线圈设计提高横波换能效率，结合相控阵聚焦技术对罐体焊缝进行扫查成像，实现微小裂纹的高精度定位。磁记忆法基于金属材料在受力后磁化强度分布发生变化的原理，通过测量油罐表面磁场分布，识别应力集中区

和早期裂纹，为罐体完整性评价提供新途径<sup>[2]</sup>。

针对油罐检测环境复杂、缺陷类型多样的特点，采用自适应聚焦算法改进相控阵超声成像分辨率，引入深度学习算法对图像进行智能识别和分类，构建油罐典型缺陷数据库，不断提升检测精度和缺陷定量表征能力。多种高精度无损检测技术的融合创新，形成油罐腐蚀状态快速准确评估的系统解决方案。

## 2.2 新型防腐涂层材料与工艺

功能型有机-无机杂化涂层通过纳米技术将有机聚合物和金属氧化物在分子水平复合，形成纳米级互穿网络结构，既保持有机涂层的柔韧性，又兼具无机材料的高硬度和耐腐蚀性。采用溶胶-凝胶法制备  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  等金属氧化物溶胶，通过化学键合与环氧树脂形成纳米复合涂层，提高涂层抗氧化、抗渗透性能，且附着力高、施工工艺简便。仿生自修复涂层的设计理念源于生物体受损后自发修复的功能，通过在环氧树脂基体中添加装填化学活性物质的微胶囊，当涂层微裂纹扩展至胶囊时，内部化学试剂释放并填充裂纹，实现自我修复。

优化微胶囊壁材料和尺寸，促进胶囊均匀分散，改善涂层力学性能。针对传统低固体分环氧涂层施工效率低、层间附着力差等不足，发展水性高固体分环氧涂料配方，采用增稠剂提高涂料粘度和抗流挂性，引入纳米  $\text{SiO}_2$  提高涂膜硬度，优化施工工艺参数，实现涂层性能与施工效率的平衡，充分满足油罐防腐的高性能和高效率要求。

## 2.3 高效节能修复技术

针对罐底和罐壁局部腐蚀，采用激光熔覆技术快速制备耐蚀合金层，利用激光束在熔覆区形成高温熔池，陶瓷粉末同步送入发生冶金结合，冷却后形成高硬度、高致密的防腐蚀涂层。通过优化激光功率、扫描速度和粉末供给量，控制熔覆层厚度和成分，大幅提高修复效率和使用寿命。热喷涂修复采用超音速火焰或等离子弧将金属粉末加热至熔融，高速喷涂到经过粗化预处理的缺陷区，形成机械咬合力强的金属涂层<sup>[3]</sup>。

采用有限元模拟优化火焰温度和粒子速度，选用纳米结构  $\text{Ti-Al}$  金属间化合物粉末制备梯度涂层，从而克服传统热喷涂涂层易开裂、脱落等问题。金属冷喷涂利用超音速气流加速金属粉末，使其以固态高速撞击罐体基材，通过塑性变形实现涂层沉积。由于喷涂过程无需加热，可最大限度减小基材变形，材料选

用范围广，成本低，已在油罐修复中得到推广应用，但结合强度有待进一步提高。冷喷涂技术与表面激光熔化相结合，有望突破这一瓶颈，实现修复涂层性能的显著提升。

## 3 油罐防腐修复工程实践案例分析

### 3.1 案例一：大型原油储罐防腐修复

某炼化企业一座投运 20 年的 5 万立方米浮顶式原油储罐需进行防腐修复。综合采用磁记忆无损检测、阵列式声发射等技术，评估储罐腐蚀状况，识别关键缺陷部位。基于腐蚀机理分析，结合罐区环境和原油特性，优选“三油两布”内防腐涂层体系：耐硫化氢高固体分环氧富锌底漆、云铁导电型中间漆和玻璃鳞片增强面漆。

针对罐底重点腐蚀区，创新应用热喷涂铝+环氧玻璃鳞片复合修复工艺。全过程引入 FMEA，对施工各环节进行风险评估和预控。修复后，罐体防腐性能和耐久性显著提升，5 年内防腐层完好率超 95%，再次修复周期从 5 年延长至 8 年以上，大幅降低修复频次和成本，提高储罐运行效率。

### 3.2 案例二：成品油罐底板局部修复

某油库一座使用 8 年的 3 万立方米内浮顶式汽油罐频发局部腐蚀渗漏。现场排查发现内部多处点蚀坑，深度超 6mm，底板背面泥土潮湿，判定疲劳腐蚀和微生物腐蚀为主因。为最大限度保留原结构、减少施工影响，采用激光熔覆+高速电弧喷铝组合修复方案。利用多通道阵列渗漏检测，识别腐蚀“热点”；激光熔覆在缺陷处预制耐蚀层，高速电弧喷铝层形成致密防腐涂层。

在铝层与罐底界面取样检测，结果表明界面结合紧密，涂层性能满足设计要求。现场渗漏检测和 2 年监测证实修复区密封完整性良好。该案例为油罐局部腐蚀的快速修复提供了新思路。

### 3.3 案例三：化工球罐防腐失效快速修复

某化工乙二醇装置配套 1000m<sup>3</sup> 球罐内壁环氧酚醛涂层投用 3 年后出现大面积起泡脱落。常规修复需全面除锈和重新涂装，停产时间长，经济损失大。项目组创新采用特种辐射固化涂料快速修复。先对脱落区抛丸粗化，喷涂环氧底漆封闭基体，再辊涂低粘度辐射固化面漆，在紫外光下快速固化，形成致密柔韧的防腐层。相比传统涂料，其固化速度快、耐冲击磨损性能优异。全过程严格控制施工环境，精细化管理各工序，仅用 10 天完成修复，创造可观经济效益。

该案例为化工装置防腐失效应急处理开辟新途径。

#### 4 油罐长效防腐修复的质量控制与管理创新

优秀的防腐修复设计和施工固然重要，但如果沒有科学的质量控制体系和先进的管理理念作保障，最终的修复效果也难以令人满意。因此，全过程、精细化的质量控制和管理创新，是实现油罐长效防腐的关键环节。本文将从修复工程的策划、施工、评价三个阶段入手，系统探讨质量管控的关键点和创新举措。

##### 4.1 修复工程策划阶段的关键控制

油罐防腐修复工程策划阶段，需开展全面的风险评估，识别各环节的质量隐患和风险因素，制定“风险-控制措施”矩阵，并据此策划针对性的检验测试项目。材料选型是确保修复质量的基石，应建立完善的材料评价体系和供应商管理制度，从源头把控材料品质。针对工程特点，优化施工工艺流程和操作规程，编制作业指导书和技术交底资料，对各工序的人员、设备、环境条件提出明确要求，为修复作业提供可操作的技术指引<sup>[4]</sup>。

同时，要加强施工方案论证和优化，开展工艺试验和技术测试，对关键工序开展预研和放大验证，不断优化施工参数，为工程实施奠定坚实基础。修复工程往往涉及多专业协同，需统筹兼顾各方需求，合理安排工期，并预留应对突发事件的时间冗余，以“计划-执行-检查-改进”的闭环动态管理模式，确保工程有序实施。

##### 4.2 修复施工过程的精细化管理

表面处理是涂装施工的首要环节，需采用规范的除锈、除油和粗化工艺，并实施过程检查和质量验收，以测量放行的模式严格把关。针对环氧涂层对施工环境湿度、温度等要求高的特点，宜采用自动化监测和控制系统实现环境条件实时调控，为涂装作业创造良好条件。加强施工设备的定期检查、维护和校准，确保设备性能稳定。

要建立涂层施工过程参数的自动记录和质量追溯机制，对关键工序开展工艺确认和产品抽检。完善涂层质量检验标准，开展涂层厚度、附着力等关键指标检测，确保涂层质量满足设计要求。在质量管理中，要坚持“三不放过”原则，即不清楚不开工、不达标不施工、不合格不交工。创新培训模式，开展技能竞赛和经验交流，提升作业人员技能水平。建立科学的绩效考核和奖惩机制，将质量指标量化到人，调动全员参与的积极性。

#### 4.3 修复后评价与长效管理

采用涂层针孔检测仪，结合目视检查，对修复后涂层的针孔、划伤等缺陷进行全面排查，并及时修补。开展涂层附着力拉伸试验，定量评估涂层与基底的结合强度。针对罐底等重点部位，宜采用阴极保护与内防腐涂层联合防护，定期测量阴极保护电位和内壁防腐层的对地电位，评估防腐体系运行状态，优化阴极保护电流密度。建立油罐防腐设施档案，开展定期检查维护，及时发现问题，制定整改措施<sup>[5]</sup>。对防腐层劣化区域实施局部修补，对破损严重区域及时组织再次修复，最大限度延长修复周期。基于大数据分析和风险评估，合理制定修复后再评价检查周期和项目，动态优化检维修策略。完善管理制度和操作规程，明确日常巡检、定期评价和应急处置流程，并开展应急演练，从管理和技术两个维度，全面提升油罐长效防腐修复水平。

#### 5 结束语

油罐防腐修复是一项复杂的系统工程，涉及腐蚀机理、检测评估、材料工艺、质量管理等多个专业领域。只有综合运用先进科学技术成果，不断优化创新，才能最终实现油罐的长效防护和安全运行。同时，还需加强全过程精细化管理，完善相关标准规范，注重人才培养和技术传承。展望未来，随着新一代信息技术与石油化工行业的深度融合，大数据和人工智能等在油罐完整性管理中的应用将成为必然趋势，其必将推动行业实现更加智能化、精细化的管理，不断提升本质安全水平。本文的研究成果可为相关从业者提供一定的参考，但仍需在实践中不断优化完善。

#### 参考文献：

- [1] 刘得欢. 储油罐底板腐蚀问题及处理方法 [J]. 全面腐蚀控制 ,2024,38(12):179-181+185.
- [2] 王飞. 储油罐防腐涂料选用及施工措施 [J]. 全面腐蚀控制 ,2022,36(11):129-130.
- [3] 魏丽春. 储油罐防腐施工方法及施工质量控制的策略 [J]. 全面腐蚀控制 ,2022,36(08):111-112.
- [4] 王波. 储油罐防腐层施工质量问题与控制 [J]. 全面腐蚀控制 ,2022,36(05):81-83.
- [5] 刘永昕. 石油储罐防腐涂料施工策略 [J]. 全面腐蚀控制 ,2022,36(01):141-142.

#### 作者简介：

李明（1997-），男，满族，吉林白城人，本科，助理工程师，研究方向：油罐防腐。