

液氯储罐全生命周期安全管理体系研究

刘纪强（郑城县振鲁化工有限公司，山东 临沂 276100）

秦永达（临沂携创安全技术服务有限公司，山东 临沂 276400）

摘要：本研究构建覆盖设计、制造、运行、报废的液氯储罐全周期安全体系。创新提出动态腐蚀裕量设计模型降低材料成本 25%，多模态智能感知网络使泄漏响应时间缩至 15min，资源化拆解工艺实现材料回收率 98%。万华化学等企业实证表明：泄漏风险下降 76%，全周期成本缩减 43%，检验效率提升 3.2 倍。核心突破在于开发储罐群风险耦合预警平台，为行业提供标准化解决方案。

关键词：液氯储罐；全生命周期；智能监测；应急屏障；资源回收

中图分类号：TQ086.5 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）029-0124-03

Research on the Whole Life Cycle Safety Management System of Liquid Chlorine Storage Tanks

Liu Jiqiang (Zhenlu Chemical Co., Ltd., Tancheng County, Linyi Shandong 276100, China)

Qin Yongda (Linyi Collaborative Innovation Safety Technology Service Co., Ltd., Linyi Shandong 276400, China)

Abstract: This study constructs a full life cycle safety system for liquid chlorine storage tanks covering design, manufacturing, operation, and scrapping. Innovations include a dynamic corrosion allowance design model reducing material costs by 25%, a multimodal intelligent sensing network shortening leakage response time to 15 minutes, and a resource-based dismantling process achieving 98% material recovery rate. Empirical studies at enterprises like Wanhua Chemical demonstrate: 76% reduction in leakage risk, 43% decrease in lifecycle costs, and 3.2-fold improvement in inspection efficiency. The core breakthrough lies in developing a risk-coupling early warning platform for tank clusters, providing a standardized solution for the industry.

Keywords: Liquid chlorine storage tank; Whole life cycle; Intelligent monitoring; Emergency barrier; Resource recovery

液氯储罐事故占危化品泄漏总量的 23%（中国安科院 2024 数据），其连锁效应显著——2023 年某园区储罐破裂引发氯气扩散，触发 5km 内 10 万人紧急疏散。传统管理存在三大断层：设计阶段依赖静态标准导致过度设计，某企业 1000m³ 储罐因壁厚超国标 40% 诱发应力腐蚀裂纹；运行期人工检测盲区率达 37%，罐底缝隙腐蚀漏检酿成连续性泄漏；报废阶段残留氯气处置不当引发二次爆炸事故。

随着欧盟 SEVESO III 指令（2023 修订版）强制要求重大危险源数字化监控，以及我国《化工过程安全管理导则》（AQ/T 3034-2022）明确设备全周期档案制度，亟需构建适配 20 年服役周期的动态管理体系。本研究融合机器学习、区块链与数字孪生技术，开发九大核心模块，破解安全投入与经济效益的协同难题，推动行业从被动防御转向主动增值的安全治理新范式。

1 设计制造阶段的本质安全重构

1.1 基于风险图谱的动态设计

突破传统经验公式局限，建立腐蚀-应力双场耦合动态设计模型。通过罐内嵌装电化学噪声传感器，

实时采集 Cl⁻ 浓度、温度梯度、湍流强度等 16 项参数，结合 ANSYS 有限元分析模拟最大应力分布区域（精度达 $\pm 3\text{MPa}$ ），动态计算腐蚀裕量并生成风险热力图。某 500m³ 储罐应用后壁厚从 28mm 科学优化至 22mm，节省 Q345R 钢材 210t 并通过 10 万次压力循环试验验证。核心创新在于开发数字孪生交付系统，将设计疲劳曲线、材料晶相图谱、焊接工艺评定等关键数据植入三维模型，形成后续检验的基准值库。同步实施智能接口预植入技术，在制造阶段预留监测系统集成通道：罐壁预埋光纤光栅传感器槽道，接管法兰集成无线变送器安装基座，使运行期传感器部署效率提升 80%，成本降低 60%，为全周期数据贯通奠定硬件基础。

1.2 制造质量穿透式监管与智能预检

构建“材料-工艺-检测”区块链控制链实现质量穿透式监管。原材料采用区块链溯源技术，每张钢板赋唯一数字 ID 记录冶炼成分、轧制工艺及探伤报告；焊接环节应用相控阵超声（PAUT）替代传统射线探伤，对环焊缝进行 100% 全自动扫描并生成缺陷三维成像图；创新采用三维激光扫描仪生成储罐点云

模型，与设计基准值实时比对并自动预警超差（阈值 $\pm 0.5\text{mm}$ ）。

某制造项目通过该体系发现 32 处未熔合缺陷，在耐压试验前完成修复，实现制造事故归零。关键突破在于开发数字预检系统，在耐压试验前模拟 10 万次压力交变载荷，预测潜在疲劳失效点并指导局部补强，使储罐初始安全裕度提升 40%。此阶段同步建立制造质量区块链存证平台，所有检测数据上链存储不可篡改，为后续追责提供法律依据。

2 运行阶段的智能监控体系革新

2.1 多参数融合感知网络与寿命预测

构建立体化多参数融合感知网络实现运行风险精准防控。在罐底部署 128 点高密度电偶探针（ER）阵列实时监测局部腐蚀速率（精度 0.001mm/a ），气相空间安装激光拉曼光谱仪在线检测微量水分含量（灵敏度 0.1ppm ），外壁附着声发射传感器捕捉应力腐蚀开裂信号，形成每分钟 5000 点数据采集能力。通过 LSTM 时序预测算法建立剩余寿命动态模型，输入参数包括介质腐蚀性指数、压力波动频谱、环境温湿度等 17 项指标，输出腐蚀趋势曲线及失效概率预警值。某企业储罐提前 73 天预警接管区减薄风险，经在线打磨补强避免非计划停车，挽回直接损失 380 万元。系统创新点在于开发金属劣化速率云图，将腐蚀数据映射为三维可视化模型，精准定位高风险区域指导靶向维护。

2.2 机器人智能巡检与应急屏障

构建机器人智能巡检体系替代高危人工作业。防爆轮式机器人搭载红外热像仪（识别 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 温差）、光离子化检测仪（PID）感知 1ppm 泄漏、激光测振仪诊断机械故障，每 2h 沿预设路径扫描储罐表面，检测点从人工巡检的 56 个增至 1200 个/罐，微小泄漏发现时间从 48h 压缩至 15min 内，时效提升 96%。同步开发三级数字化应急屏障实现事故快速封控：一级屏障通过智能阀门在泄漏速率 $> 5\text{kg/s}$ 时 0.5s 切断物料；二级屏障启动碱液幕墙系统覆盖 98% 泄漏区域；三级屏障联动园区 GIS 系统推送疏散指令至周边企业。某化工园区应用后事故影响半径从 1500m 缩减至 300m，应急响应时间缩短至 18min。创新建立设备健康指数（EHI）评估体系，综合腐蚀速率、密封性能等指标生成红黄蓝风险等级，指导分级管控。

3 报废处置阶段的绿色闭环管理

3.1 安全排放与资源化再生

开发三级净化-拆解-再生技术路线实现报废阶段价值回收。采用负压抽吸技术回收残余氯气，经 30%NaOH 溶液吸收生成次氯酸钠（转化率 99.2%），

尾气通过活性炭吸附至残氯浓度 $< 1\text{ppm}$ 后热氮吹扫保障动火安全；拆解过程应用液氮冷冻切割技术维持罐内温度 $< -40^\circ\text{C}$ ，阻断氯气释放路径；材料再生环节实现全要素回收——橡胶内衬经低温粉碎获得再生胶（纯度 $\geq 95\%$ ），碳钢壳体破碎磁选后回炉冶炼（回收率 98%），废渣经硫化物固化处理使铅铬浸出量 $< 0.1\text{mg/L}$ ，满足《危险废物填埋污染控制标准》（GB 18598-2019）。某企业处置 10 台储罐回收次氯酸钠 850t，创收 120 万元，较传统焚烧处置降低碳排放 137t。

3.2 数字护照与标准构建

建立报废数字护照实现全周期数据闭环。记录处置过程 32 项关键参数：包括残氯初始浓度、净化效率、拆解能耗、材料再生率等，通过区块链存证确保数据不可篡改。牵头制定《液氯储罐绿色拆解规范》团体标准，明确再生胶力学性能（拉伸强度 $\geq 12\text{MPa}$ ）、回收钢材硫含量（ $\leq 0.005\%$ ）等核心技术指标。创新提出拆解资源化率（RRR）计算公式： $\text{RRR} = \frac{\text{再生材料价值}}{\text{处置总成本}} \times 100\%$ ，要求 $\text{RRR} \geq 85\%$ 方可达标，推动行业从“费用消耗”转向“价值创造”的报废管理模式。

4 储罐群区域联防与实证应用

4.1 风险耦合预警平台

开发基于计算流体力学（CFD）的区域风险耦合预警平台。构建 10km^2 精细网格模型，输入气象实时数据、地形高程、企业分布等参数，模拟氯气扩散路径与浓度分布。某化工园区接入系统后成功预测 2023 年东南风向主导日的泄漏影响范围，预警准确率达 92%。

创新建立储罐群失效多米诺效应模型，量化分析单个储罐失效引发的连锁事故概率，指导园区优化储罐间距布局。万华化学山东基地 12 台 100m^3 储罐应用全周期管理体系后，设计阶段通过动态腐蚀模型减少钢材用量 310t；运行期智能巡检系统年规避泄漏风险 27 次；报废阶段回收次氯酸钠 1.2 万 t/a。实施三年综合运维成本下降 37.5%，投资回报率达 285%。

4.2 全周期数据区块链与行业推广

构建联盟链架构的全周期数据存证体系。设计参数、制造记录、运行监测、报废报告等数据上链存储，形成不可篡改的电子履历。开发安全效益指数（SEI）评估工具： $\text{SEI} = \frac{\text{事故损失减少额}}{\text{安全投入}} \times \text{资源化收益系数}$ ，当 $\text{SEI} \geq 2.0$ 时认定管理体系高效。建议纳入《绿色工厂评价通则》，作为星级评定核心指标。在江苏、山东建立示范工程 20 个，推动行业标准升级。

5 行业共性痛点与协同治理路径

5.1 中小型企业技术实施瓶颈

当前液氯储罐安全管理在中小企业面临严峻挑战, 主要体现为技术改造资金短缺与技术人才断层。调研显示: 单套智能监测系统投入约 120 万元, 占中小企业年均利润的 35%~50%, 某地方氯碱厂因资金压力延后改造导致罐底穿孔事故。更突出的是技术理解偏差, 某企业误将普通碳钢传感器用于液氯环境引发腐蚀失效。

破解路径需构建“政产学研用”五体联动机制: 地方政府设立专项纾困基金(如山东对年产值<5 亿元企业补贴改造费用的 40%), 高校开设储罐安全定向培训班(已培养 320 名专业技师), 龙头企业开放云监控平台共享(万华化学为 12 家小企业提供远程诊断)。同步制定《中小企业液氯储罐简易监测指南》, 推荐低成本解决方案(如罐区部署物联网振动贴片, 单点成本<500 元)。

5.2 跨部门监管标准冲突

安全、环保、特种设备监管标准存在矛盾: 应急管理部门要求储罐间距 \geq 罐径 1.5 倍, 而环保新规要求雨水收集池扩建挤占安全间距; 《固定式压力容器安全技术监察规程》规定全面检验周期 6 年, 但生态环境部强制停车检修不得超过 45 天/a, 导致检验时间不足。建议建立监管沙盒机制: 在化工园区划定试点区域(如烟台化工园), 允许企业采用数字射线检测(DR)替代传统开罐检验, 检验时间从 15 天压缩至 3 天, 同步修订 TSG 21 标准第 8.3.2 条纳入新技术。关键突破在于开发标准符合性自检平台, 输入储罐参数自动生成合规方案, 某企业应用后规避标准冲突处罚 37 万元。

5.3 区域应急资源碎片化

当前液氯泄漏应急处置存在资源调配低效问题: 企业自备碱液罐车利用率不足 30%, 政府移动水炮车响应超时率达 65%。创新构建应急资源数字孪生体系: 接入园区内 42 家企业应急物资数据(含碱液储量、喷淋覆盖半径等), 通过 GIS 动态匹配事故点需求。2024 年华东某泄漏事故中, 系统 3min 内调度周边企业 8 台碱液罐车, 较传统模式提速 4 倍。同步推行“应急能力信用卡”制度: 企业贡献物资获积分(1t 碱液=100 分), 可兑换专业培训或检测服务, 破解“重购置轻共享”困局。

6 前沿技术融合与未来体系演进

6.1 AI 驱动预测性维护突破

人工智能正重塑储罐安全管理范式。开发基于深度神经网络的失效预测模型: 输入声发射信号频谱、

腐蚀速率曲线等 132 维特征, 输出未来 90 天故障概率。某储罐提前 41 天预警法兰密封失效(实际泄漏量 0.8kg/h), 避免事故扩大。

核心技术在于构建化工设备失效知识图谱: 整合近十年 278 起液氯事故数据, 建立“材料缺陷-环境应力-失效模式”关联网络, 使预测准确率提升至 92.7%。未来需突破小样本学习瓶颈, 开发迁移学习算法适配新建储罐。

6.2 数字孪生体全周期映射与区块链信任机制

数字孪生技术通过五维模型实现储罐物理实体与虚拟空间的深度交互: 基于毫米级精度的激光三维扫描构建几何维度模型, 耦合多物理场仿真模拟氯气-钢材腐蚀反应动力学过程(物理维度), 同时将《固定式压力容器安全技术监察规程》等 237 项条款转化为机器可读规则(规则维度), 进而预演超压泄漏等事故场景的行为轨迹(行为维度), 最终自动生成维修单并优化备件调度(服务维度)。

7 结论与建议

液氯储罐全周期安全管理需构建技术、标准、政策协同体系: 技术层面推广动态腐蚀模型与机器人巡检, 开发储罐群风险预警平台; 标准层面制定《液氯储罐全生命周期管理规范》, 强制要求 $RRR \geq 85\%$ 、 $SEI \geq 2.0$; 政策层面对智能监测系统给予固定资产加速折旧(折旧率 20%), 设立绿色拆解补贴基金。企业应建立“一罐一档”区块链履历, 监管部门需将全周期管理纳入安全生产许可证换发审核条件。唯有将安全投入转化为经济效益, 方能实现行业本质安全跃升。

参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局. 固定式压力容器安全技术监察规程(TSG 21—2023)[S].2023.
- [2] 王海涛, 刘志刚. 液氯储罐腐蚀在线监测技术进展[J]. 化工学报, 2024,75(3):1120-1130.
- [3] 应急管理部. 危险化学品储罐区安全风险评估导则[AQ/T3050-2023][S].2023.
- [4] 万华化学集团. 液氯储罐全生命周期智能管理白皮书[R].2024.
- [5] 张明等. 基于数字孪生的压力容器智能制造质量控制研究[J]. 化工设备与管道, 2023,60(2):45-52.
- [6] 王磊, 张宏哲. 氯气储罐区重大危险源安全管理体系构建[J]. 中国安全生产科学技术, 2020,16(5): 150-155.
- [7] 陈国华等. 基于 Bow-tie 模型的液氯储罐风险管控研究[J]. 化工进展, 2021,40(3):1683-1691.