

化工储罐风险防控与应急处置的安全环保协同

霍伟光（吉林省松原石油化工股份有限公司，吉林 松原 138000）

摘要：化工储罐是当前存贮危险化学品的重要设施，为了确保安全，必须做好其风险防控与应急处置。本文在介绍化工储罐风险识别与安全环保耦合机制，基于 Bow-tie 模型识别风险耦合路径，构建了涵盖设计、运行、应急全流程的化工储罐风险协同防控技术体系并提出了优化应急处置的策略。最后一以某化工园区的化工储罐改造为例，验证了安全环保协同指数（SECI）模型的有效性，为化工储罐的风险防控与应急处置的安全环保协同提供了全新思路。

关键词：化工储罐；安全环保协同；风险防控；应急处置

中图分类号：X937 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)031-0165-04

Risk Prevention and Control and Emergency Response for Chemical Storage Tanks with Safety-Environmental Synergy

HUO Weiguang (Jilin Songyuan Petrochemical Co., Ltd., Songyuan Jilin 138000, China)

Abstract: Chemical storage tanks are important facilities for storing hazardous chemicals, and in order to ensure safety, it is necessary to do a good job in risk prevention and emergency response. This article introduces the coupling mechanism between chemical tank risk identification and safety and environmental protection. Based on the Bow tie model, the risk coupling path is identified, and a chemical tank risk collaborative prevention and control technology system covering the entire process of design, operation, and emergency response is constructed. Strategies for optimizing emergency response are also proposed. Finally, taking the renovation of a chemical storage tank in a certain chemical park as an example, the effectiveness of the Safety and Environmental Protection Synergy Index (SECI) model was verified, providing a new idea for the safety and environmental protection coordination of risk prevention and emergency response of chemical storage tanks.

Keywords: chemical storage tanks; safety-environmental synergy; risk prevention and control; emergency response

化工储罐作为危化品储存的核心设施，其安全运行与环境保护密切相关。近年来，随着化工产业规模扩大，储罐泄漏、火灾爆炸等事故频发，不仅造成人员伤亡和财产损失，还导致有毒有害物质扩散，引发严重的环境污染事件。例如，2015年天津港爆炸事故和2019年江苏响水“3·21”事故，均暴露出传统风险防控模式在安全与环保协同管理上的不足。当前，我国化工行业正处于绿色转型与安全生产标准化建设

的关键阶段，如何实现安全风险防控与环境污染预防的协同优化，成为亟待解决的问题。

1 化工储罐风险识别与安全环保耦合机制

1.1 主要风险类型及环境影响

化工储罐由于存贮着不同的化学制品，因此其容易遭受的风险也相对较多，不仅有物理、化学风险，还存在操作管理方面的风险。

如表1所示，可以将化工储罐的风险类型划分为

表1 化工储罐主要风险类型及环境影响分析表

风险类别	典型风险因素	可能事故形态	主要环境影响	典型污染物
物理性风险	罐体腐蚀 / 机械损伤 / 密封失效	物料泄漏 / 蒸汽逸散	土壤污染 / 地下水污染	石油类 / 重金属
	超压 / 真空失效	罐体变形 / 破裂	大气污染 (VOCs 扩散)	苯系物 / 硫化物
化学性风险	化学品分解反应	发生爆炸 / 引发火灾 / 释放毒气	污染大气或引发酸雨	NOx/SOx/ 二噁英
	危险化学品混合存放	化学品发生反应压力失衡	破坏周边的水环境	氰化物 / 重金属化合物
操作管理风险	工人操作不当	阀门开关错误 / 出现溢出储罐	破坏周边生态环境	有机溶剂 / 酸碱物质
	监测系统失灵或延迟	报警失灵或者系统失效	系统遭到破坏 / 污染物溢出	多种污染物复合影响

物理性风险、化学性风险和操作管理风险三大类。物理性风险主要是指化工储罐发生罐体物理性损坏，导致罐体密封性不够或出现破损，可能会导致化工储罐中的化学品泄漏、蒸汽逸散等，进而影响周边土壤环境、水环境甚至污染大气。化学性风险则主要是因为化学品的反应或分解，进而发生爆炸、引发火灾等，不仅会污染大气环境，还可能造成周边生态破坏。操作管理风险主要来自于人为操作失误或者罐体监测系统失效，其会导致储罐功能缺失，引发污染物溢出影响到周边环境。

1.2 安全与环保的耦合关系分析

只有确保化工储罐的安全，才能确保环境不遭受污染，因此对于化工储罐来说，安全与环保是高度耦合的。过去，对于化工储罐的安全防护，主要是从避免人员伤亡和财产损失的角度来进行，而如今随着环保理念逐渐深入人心，化工储罐的安全管理必须从环保角度出发。因此，在进行化工储罐风险排查与安全防控的过程中，必须采取更多的环保措施。例如，为了防止储罐泄漏污染环境，就必须在化工储罐加装废气回收系统或放泄漏装置，要避免因泄漏引发的环境污染或因爆炸引发的二次破坏。因此，在进行化工储罐风险防控与应急处置时，必须兼顾环保效益。

1.3 基于 Bow-Tie 模型的风险耦合路径分析

Bow-Tie 模型也被通俗成为蝴蝶结模型，因其模型像蝴蝶形状而得名。它是一种将事故树和事件树进行同时分析的风险管理工具。首先找出项目的核心风险，将其作为顶级事件，再从顶级事件的前因后果进行分析，分析事故原因和事故后果，进而设置预防性措施和控制性措施。Bow-Tie 模型原理如图 1 所示。

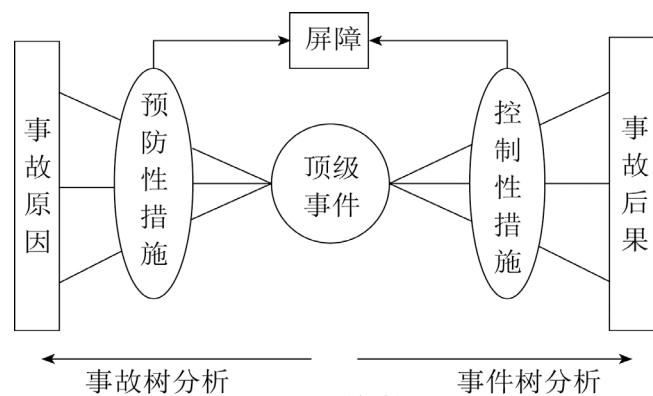


图 1 Bow-Tie 模型原理图

根据 Bow-Tie 模型构建出化工储罐的风险管理模型，如图 2 所示。在该模型中，核心风险事件为化工储罐的泄漏，为了防止化工储罐泄漏，结合项目实际寻找到事故原因和事故后果，针对可能的事故原因，从预防层制定了预防性措施；针对事故后果，在缓解层明确了控制性措施。

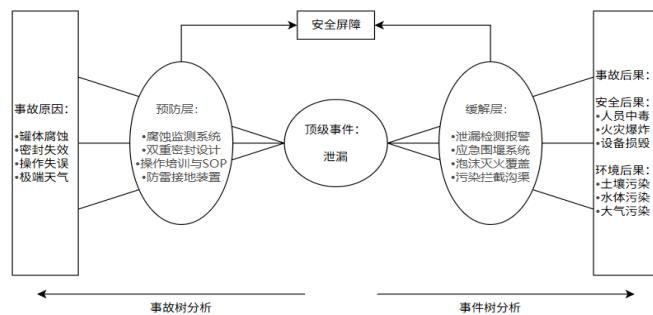


图 2 化工储罐 Bow-Tie 模型图

2 安全环保协同防控技术体系

2.1 设计阶段协同防控

化工储罐的安全环保协同防控要从设计阶段开始，应采用全生命周期的设计理念，在设计过程中体现出环保理念，将环保要求融入到化工储罐的风险防控和应急处置过程中。例如，在选择化工储罐的架设地址时，除了考虑成本和安全外，还要对周边的地形地貌、水文地质条件等进行调查，确保化工储罐不会受到周边环境影响，当发生事故时，也不会污染周边环境。在对化工储罐的本体进行设计时，不仅要使用双重壁的结构，还需要采用更加先进的防泄漏技术，需要设置二层密封系统确保化工储罐的密封性。同时，还应该根据化工储罐的容量，同步设计一些如围堰等环保设施，确保发生应急情况时，能够尽可能防止污染外溢。对于化工储罐的管道设计，还应该尽可能减少连接点，降低泄漏的风险。

2.2 运行阶段动态管控

化工储罐的运行阶段是时间最长的阶段，也是风险最大的阶段，因此对于这个阶段的可能出现的风险，必须要实行基于安全环保理念的动态管控。可以利用物联网技术，建立实时监控系统，对化工储罐的温度、压力等参数进行监测，并且在化工储罐周边设置 VOCs、地下水等监测点位以监测周边环境变化。还可以利用 AI 技术构建风险预警模型，基于化工储罐的运行数据以及周边环境监测数据，设置风险预警识别阈值，重点监测化工储罐易腐蚀部位和密封系统，确保出现风险时能够第一时间发现。在操作管理方面，要将环保操作纳入日常巡检，可以定期开展 HAZOP 分析与环境风险评价，针对化工储罐的运行状态及时更新防控措施。只有结合环保理念，实现对化工储罐运行状态的动态监控，才能够确保风险止于未发。

2.3 应急缓冲设施优化

除了设计阶段和运行阶段需要做好风险防控，还需要对化工储罐的应急缓冲设施进行优化设计，以阻断事故的后果链，防止发生二次污染，对环境造成影响。结合化工储罐的实际，可以设置三级应急缓冲设

施。第一级是靠近化工储罐的核心区，主要设置围堰和排水切换系统等设施，当遇有泄漏事故时，能够起到缓冲拦截的作用。第二级可以设置应急池和缓冲罐，主要是扩充容量，预想事故最坏场景，确保泄漏发生后应急缓冲空间容量充足。第三级主要是在化工储罐所在场区的外围设置生态拦截带或环境净化湿地，对第一级和第二级拦截后逃逸的化工污染物进行拦截和处理。每一层级的应急缓冲设施还需要考虑环保要求，要确保材料的耐腐蚀性和防渗透性。还可以基于智能技术设置控制应急缓冲设施自启动和联动响应的系统，确保应急缓冲设施的自动化和灵敏性。

3 安全环保协同应急处置策略

3.1 应急响应流程优化

化工储罐的安全环保协同，需要划分化工储罐泄漏的事故等级，对应应急响应流程进行优化。可以基于化工储罐的泄漏量、污染物毒性等关键参数构建一个三色预警体系模型，加入智能决策系统，确保一旦化工储罐发生泄漏，能够自动生成响应方案。一级响应方案主要针对化工储罐的小规模泄漏，响应流程主要是启动现场应急处置程序，重点控制泄漏点，防止泄漏扩大化。二级响应针对一些中等规模的化工储罐泄漏，应急响应流程需要启动场区的应急资源，并组织人员疏散并对化工污染物进行拦截。三级响应针对化工储罐的重大事故，这时需要及时对接政府应急部门，触动专业应急力量进行抢险防控。为了确保应急响应的时效和位置精确度，需要利用各种 GIS 地理信息系统，应急资源数据库等开发应急指挥平台，实现化工储罐的应急处置。

3.2 次生环境污染防控技术

化工储罐一旦泄漏，很容易对周边的水体、大气、土壤的环境造成污染，因此，基于安全环保协同，必须采取次生环境污染防控技术。针对不同的污染类型，采用针对性的防控技术。对于化工储罐泄漏造成的大气污染，该厂区及其附近应部署移动式蒸汽幕墙和高压雾炮系统，并结合无人机技术，实现对 VOCs 扩散轨迹的追踪和控制。对于化工储罐泄漏可能造成的水体污染，则需要采用智能拦油栅与吸附材料组合技术，

还可以根据污染物特性选择活性炭、改性硅藻土或纳米纤维材料，确保水体中的污染物得到有效过滤清除。对于土壤污染，则应该采用电动修复和化学氧化技术，实现土壤中污染物的快速降解。

3.3 废弃物无害化处理

事故废弃物的无害化处理需要构建分类处置的技术路线。液态废物优先采用高级氧化工艺，通过臭氧-紫外光催化组合技术降解有机污染物，COD 去除率超过 95%。固态污染物实施热脱附处理，针对不同沸点污染物采用梯度升温控制，尾气经二次燃烧后达标排放。重金属污染土壤应用稳定化技术，添加磷酸盐或硫化物改性剂，使重金属浸出浓度低于管制标准。开发移动式处理装备，集成微波热解和等离子体技术，实现危险废物的现场减量化。建立废物特性快速检测体系，采用便携式 XRF 和 GC-MS 设备，30min 内完成废物分类鉴定。处理过程实施全过程监管，通过电子联单系统追踪废物转运和处理轨迹，确保不发生二次污染。

4 某大型化工园区储罐区改造项目案例分析

4.1 案例背景

该化工园区位于长江沿岸敏感区域，占地面积 12.8km²，拥有各类化工储罐 386 座，主要储存苯类、酸类及有机溶剂等危险化学品。改造前评估显示，罐区存在严重安全隐患和环保缺陷：45% 的储罐使用超过 15 年，罐体腐蚀速率高达 0.3mm/a；环保设施仅能满足日常排放要求，事故状态下防泄漏系统失效概率高达 32%。2022 年园区启动系统性改造工程，总投资 3.2 亿元，重点对储罐本体、安全防护系统和环境应急设施进行协同升级。项目涉及 78 座重点储罐的更换或修复，配套建设智能监控平台和多级拦截系统，改造周期 18 个月。

4.2 安全环保协同指数（SECI）评价模型构建

SECI 评价模型基于层次分析法构建，包含 3 个一级指标、8 个二级指标和 22 个三级指标。一级指标权重分配为：本质安全水平（0.45）、环境风险防控（0.35）、协同管理效能（0.20）。本质安全水平下设储罐完整性、工艺安全度和应急能力 3 个二级指标，通过超声波测

表 2 SECI 评价指标体系及改造前后对比

指标层级	具体参数	改造前数值	改造后数值	提升幅度
储罐完整性	腐蚀速率 (mm/年)	0.32	0.12	62.5%
	泄漏检测响应时间 (min)	45	8	82.2%
污染物拦截	初级防控系统有效性	68%	95%	39.7%
	应急池启动延迟 (min)	22	3	86.4%
协同管理	跨部门指令执行率	71%	98%	38.0%
	数据共享时效性 (min)	30	2	93.3%

厚、HAZOP 分析和应急演练达标率等具体参数量化。环境风险防控包括污染物拦截率、生态敏感区保护度和修复效率 3 个维度，采用围堰防渗检测、下游水质监测等数据进行评估。SECI 评价指标体系及改造前后对比如表 2 所示。

模型采用模糊综合评价法处理定性指标，通过专家打分确定隶属度函数。计算显示改造后 SECI 综合得分从 56.2 提升至 89.7，风险等级由较高风险降至可接受风险。特别在环境敏感期（汛期、极端天气），协同防控效果提升更为显著，事故预防率提高 76%。模型验证采用蒙特卡洛模拟，置信度达到 95% 时，结果误差范围控制在 $\pm 2.3\%$ 。

4.3 成本效益分析

项目总投资 3.2 亿元中，设备更新占比 58%，智能系统建设占 25%，人员培训占 12%。效益评估采用全生命周期法，考虑直接经济效益和隐性社会效益。直接效益包括事故损失减少（年均避免损失 1.8 亿元）、保险费用降低（费率下调 40%）及环保罚款减少（预计年节省 3200 万元）。隐性效益主要体现在生态价值保全方面，经环境会计测算，每年可避免的生态损失价值约 2.3 亿元。

5 结语

本文通过风险识别与耦合分析，揭示了化工储罐风险防控与应急处置的安全环保耦合关系，构建了基于 Bow-tie 模型的风险管控路径，提出的协同防控技术体系从设计、运行到应急全流程覆盖，实现了安全防护与环保控制的有机融合。案例分析表明，SECI 评价模型可有效量化协同管理效能，改造项目在经济性和环境效益方面均表现显著。

参考文献：

- [1] 王敏阳, 刘红宇, 杨静. 基于 PCA 的化工储罐异常监测方法研究 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(04):21-22+25.
- [2] 米海霞, 刘世峰, 宋长飞. 化工储罐结构强度计算与耐久性分析 [J]. 中国机械, 2024(03):101-104.
- [3] 马燕, 王飞. 安全视角下天然气长输管道穿越化工储罐施工参数的优化 [J]. 化工管理, 2023(35):157-160.
- [4] 李强. 石油化工储罐的安全运行模式分析 [J]. 中国设备工程, 2023(17):67-69.
- [5] 赵景斌, 王彦富, 王涛, 等. 基于蒙特卡洛模拟和动态事件树的储罐脆弱性评估 [J]. 化工进展, 2023, 42(05):2751-2759.

