

石油化工储罐区火灾爆炸风险评估与防控体系优化研究

孙小永（齐成（山东）石化集团有限公司，山东 东营 257300）

摘要：石油化工行业的储罐区存放大量易燃、易爆及有毒有害物质，像英国邦斯菲尔德油库、江苏响水天嘉宜化工事故，危害极大。为降低风险展开研究，借助贝叶斯网络、模糊集理论等方法，构建静态、动态风险评估模型，分析现有防控体系并优化。研究确定关键危险因素与危险类型，给出安全投资优化方案，提升防控体系可靠性与协同性。成果为石油化工储罐区安全管理提供科学依据，推动行业安全生产。

关键词：石油化工储罐区；火灾爆炸风险评估；防控体系优化；数据不确定性；安全投资分配

中图分类号：TE88 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）018-0148-03

Study on fire and explosion risk assessment and prevention and control system optimization in petrochemical tank farm

Sun Xiaoyong (Qicheng (Shandong) Petrochemical Group Co., Ltd., Dongying Shandong 257300, China)

Abstract: a large number of flammable, explosive, toxic and harmful substances are stored in the tank farm of the petrochemical industry, such as the British bunsfield oil depot and the Jiangsu Xiangshui tianjiayi chemical accident, which are extremely harmful. In order to reduce the risk, a static and dynamic risk assessment model was built by using Bayesian network, fuzzy set theory and other methods, and the existing prevention and control system was analyzed and optimized. Study and determine the key risk factors and risk types, and give the optimization scheme of safety investment to improve the reliability and coordination of the prevention and control system. The results provide a scientific basis for the safety management of petrochemical tank farm and promote the safe production of the industry.

Keywords: petrochemical tank farm; Fire and explosion risk assessment; Optimization of prevention and control system; Data uncertainty; Allocation of safety investment

石油化工储罐区，能源供应关键所在，偏偏也是火灾爆炸风险的高发之处。英国邦斯菲尔德油库、江苏响水天嘉宜化工那些事故，损失巨大，令人揪心。秉持绿色安全发展理念，传统风险评估与防控手段，已难以应付当前局面。把控风险、优化防控体系，是当下急需解决的难题。本文就针对此展开研究，综合运用多种技术，构建评估模型、优化防控策略，期望为石油化工储罐区安全发展，提供新的思路与有效的方案。

1 火灾爆炸风险概述

1.1 石油化工储罐区特点

在我国能源储备体系里，石油化工储罐区的重要性不言而喻。舟山、镇海、大连等大型石油储备基地，作为能源稳定供应的关键节点，储存着海量原油和各类化工产品。就拿舟山国家石油储备基地来说，规模十分庞大，单个储罐容积可达数十万立方米，能装下巨量能源物资。这里储存的物质复杂多样，有原油、成品油、液化石油气等，全是易燃易爆或有毒有害的东西。原油里富含烃类化合物，化学性质活泼，碰上明火、高温，马上就可能燃烧爆炸。那威力足以把周边建筑、设施夷为平地，严重威胁人员生命安全，给社会经济、环境带来难以估量的损失。

1.2 火灾爆炸风险现状

近些年来，石油化工储罐区火灾爆炸事故频繁上演，给社会带来极大冲击。2005年12月11日，英国邦斯菲尔德油库突发火灾爆炸，熊熊大火燃烧60多小时，20余座大型油罐被烧毁，43人受伤，直接经济损失高达2.5亿英镑^[1]。转眼到2019年3月21日，江苏盐城响水县天嘉宜化工有限公司储罐起火爆炸，事故影响周边16家企业，致使78人失去生命、76人重伤，640人住院治疗，直接经济损失19.86亿元。还有2021年5月31日，河北沧州市鼎睿石化有限公司也发生火灾，火情持续84小时，6个储罐被大火吞噬，直接经济损失达38721万元。

1.3 研究意义与目的

保障人民生命财产安全，风险评估作用重大，能提前察觉潜在危险，助力制定预防措施，减少事故伤亡与财产损失。秉持可持续发展理念，环境保护不容小觑，优化防控体系可降低事故对环境的污染风险，守护周边生态环境安全。研究运用贝叶斯网络、模糊集理论等先进技术方法，构建风险评估模型。通过分析火灾爆炸风险因素，找出关键风险点，依据成本效益原则与不确定型决策准则，优化安全投资分配方案，提升防控措施有效性与经济性，为石油化工行业安全

生产提供有力技术支撑。

2 风险评估方法与模型构建

2.1 常用评估方法介绍

石油化工储罐区火灾爆炸风险评估有多种方法。故障树分析法，把复杂事故拆解成基本事件，展现事故发生逻辑。以某化工企业储罐区为例，分析储罐泄漏引发火灾爆炸时，可将储罐破裂、阀门故障当作基本事件，构建故障树模型来算事故发生概率。蒙特卡罗模拟法借助计算机模拟大量随机事件，考虑像储罐内物质挥发速率、泄漏量等不确定因素，能多次模拟不同场景下的事故过程，给出更全面风险评估结果。贝叶斯网络也不错，能处理不确定性和因果关系，依据新证据更新事件概率，为石油化工储罐区火灾爆炸风险评估提供有效手段。

2.2 构建评估模型思路

全面识别石油化工储罐区风险因素，涵盖储罐材质、储存物质特性以及环境因素。以储存苯的储罐来说，苯易燃易爆且易挥发，其挥发后蒸汽云浓度与扩散范围需重点留意。运用模糊集理论这一数学工具，量化专家经验和不确定性数据，针对难以精准确定的因素，用模糊数表示可能性。利用贝叶斯网络结构，搭建各风险因素与火灾爆炸事故间因果关系，通过节点和有向弧描绘，让风险传播路径清晰呈现，从而实现风险定量评估，为后续制定防控措施提供有力依据，助力保障石油化工储罐区安全。

2.3 关键参数选择设定

石油化工储罐区风险评估里，物质泄漏率是个重要参数。拿储存液化石油气的储罐来讲，它的泄漏率和储罐压力、温度，还有阀门、管道密封性紧密相关。依据相关研究以及实际监测数据，不同工况下，液化石油气储罐泄漏率有差异。正常压力波动范围内，泄漏率大概每小时数千克到数十千克。点火源概率同样关键，化工生产环境里，静电、明火、电气故障等都可能充当点火源。统计显示，某化工园区内，静电引发火灾爆炸概率相对偏高，大概每年每百次操作会发生1-2次。安全屏障有效性参数也不容忽视，像防火堤防火性能、消防设施响应时间等，这些参数按照设备技术规格以及实际运行数据来确定，以此保证评估模型能够如实反映风险状况，为石油化工储罐区风险评估提供可靠支撑。

3 火灾爆炸风险动态评估分析

3.1 风险因素动态变化模拟

在某沿海地区的石油化工储罐区，储罐腐蚀问题突出。因长期遭受海水侵蚀与潮湿空气影响，储罐底部腐蚀速率加快。借助安装在储罐底部的腐蚀监测设

备，能实时获取腐蚀数据。比如某储罐，运行前5年，每年腐蚀速率约0.1mm；到第6-10年，速率增至每年0.15mm。运用这些实际监测数据，再结合数值模拟软件，可对不同时间段的腐蚀情况开展动态模拟，预测储罐底板未来不同时间点的厚度变化。考虑储存物质特性，轻质油易挥发，蒸汽浓度会随温度、压力改变。模拟不同季节、生产工况下的蒸汽浓度变化，能更确切掌握风险因素的动态演变，为风险评估提供实时、可靠的数据支撑，助力把控石油化工储罐区风险。

3.2 事故场景仿真分析

以苯储罐为实例，某储罐区设有5个容积各为5000m³的苯储罐。一旦其中一个储罐发生泄漏，借助专业仿真软件ALOHA（Areal Location of Hazardous Atmospheres），能模拟苯泄漏后蒸汽云的扩散情形。当地气象条件为风速3m/s、大气稳定度C级，模拟结果表明，泄漏10分钟内，蒸汽云会迅速向四周蔓延，影响半径可达100m^[2]。要是遇到点火源引发火灾爆炸，软件还能进一步模拟火灾热辐射与爆炸冲击波的传播。距离火源50m处，热辐射强度可达20kW/m²，足以损坏周边储罐和设备；30m处，爆炸冲击波超压为5kPa，对建筑物和人员安全构成严重威胁。

3.3 风险评估结果量化分析

在某石油化工企业风险评估里，运用构建好的评估模型，结合实际数据量化不同事故场景风险。就储罐泄漏引发火灾场景而言，考虑物质泄漏量、点火源概率以及周边设备脆弱程度等因素，计算风险值。拿一次特定模拟来说，假定某储罐泄漏500kg，点火源存在概率是0.1，周边有3个储罐可能受波及，经模型算出该事故场景风险值为0.05（风险值是无量纲数值，由特定计算方法得到），它体现此场景下发生火灾可能性与潜在危害程度。爆炸场景也一样，综合多种因素计算。比如某储罐爆炸，TNT当量达100kg，依据爆炸超压计算公式，再结合周边人员、设备承受能力，量化出爆炸致使人员伤亡和财产损失的风险值，为企业合理分配安全资源、制定风险防控策略提供量化依据，助力企业有效把控风险。

4 防控体系优化策略研究

4.1 现有防控体系问题剖析

某大型石油化工企业储罐区，部分火灾监测设备老化严重。2010年装的某型号火焰探测器，探测精度大幅下滑，误报、漏报频频发生。部分储罐的安全阀这类安全泄压装置，因长期没维护校验，压力异常时没法及时准确开启。据统计，过去5年该企业因设备故障引发15起安全隐患事件。防控体系里应急响应流程也有毛病，从事故被发现到应急预案启动，平均

耗时超 30 分钟，在分秒必争的事故处理中极为不利，亟待解决这些安全问题，保障储罐区平稳运行^[3]。

4.2 优化防控体系的原则

在可靠性原则下，防控设备必须有高可靠性。选那些经严格测试、验证的先进监测设备，能检测多种易燃易爆气体，误报率特别低。协同性原则强调，各类防控设备要无缝对接、高效协同。把火灾报警系统和自动灭火系统智能化联动，火灾报警系统一检测到信号，自动灭火系统 5s 内就能启动灭火程序，大大提升应急响应速度。至于前瞻性原则，得结合行业走向与新技术应用，提前规划防控体系升级。引入大数据分析技术，实时分析储罐区运行数据，提前预判潜在风险，从以往被动防控转为主动预防，契合石油化工行业持续发展的安全要求，全方位保障储罐区安全运行。

4.3 具体优化策略探讨

在设备升级环节，为储罐装上新型智能监测装置，像基于物联网技术的液位、压力以及温度实时监测系统，能把数据及时传送到控制中心。一旦参数出现异常，系统会马上发出警报。有企业采用了这套系统，成功在事故隐患还处于萌芽状态时就发出预警，进而妥善处理了多起潜在危险。

应急响应优化同样关键，得制定科学的应急预案，还得定期演练。组织火灾、泄漏等不同事故场景的实战演练，让相关人员熟悉应急流程，提高应急处理能力。还可以借助虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术，模拟各类事故场景，开展沉浸式培训，加深人员对事故的认知与应对能力。在防控体系布局方面，依据储罐区实际布局和风险分布状况，合理增设安全屏障。在相邻储罐间设置高强度防火防爆墙，这能增强对事故的阻隔能力，有效降低多米诺效应发生的概率，实实在在提升防控体系的整体性能，全方位保障储罐区的安全运行^[4]。

5 优化防控体系效果验证

5.1 模拟实验设计

以储存乙醇的 5m³ 小型不锈钢储罐为研究对象，该储罐符合相关标准，还配有温度、压力和液位监测设备。模拟环境参考某化工园区夏季气象条件，将温度设为 30℃，相对湿度控制在 50%，风速定为 2m/s。实验通过设置不同泄漏场景，在储罐底部开直径 5mm 小孔模拟缓慢泄漏，开直径 20mm 大孔模拟快速泄漏。同时，引入不同点火源，用电火花发生器模拟静电点火，用加热丝模拟明火点火，全面模拟各类可能发生的事故场景，从而为后续分析提供丰富的数据样本，助力深入研究乙醇储罐在不同情况下的风险状况。

5.2 实际应用案例验证

5.2.1 案例选取介绍

选取某大型石油化工企业储罐区作为实际应用案例来验证。该储罐区储存苯、甲苯、液化石油气等多种易燃易爆物质，有 10 座单罐容积 8000m³ 的苯储罐，8 座单罐容积 6000m³ 的甲苯储罐，5 座单罐容积 4000m³ 的液化石油气储罐^[5]。储罐区周边有配套生产设施与办公区域，人员密集。其原有的防控体系涵盖传统火灾报警系统、固定灭火设施，还有安全巡检制度。

5.2.2 防控效果评估

安装新型气体监测设备，成效显著，多次成功检测出微小苯泄漏。有一回，泄漏刚发生 10s 就发出警报，相较之前，平均报警时间缩短约 20s。在模拟甲苯泄漏引发火灾的演练中，新自动灭火系统收到报警信号，5s 内迅速启动喷水和泡沫灭火程序，仅 5min 就控制住火势，周边储罐和设施完好无损。实际运行一年里，安全巡检借助智能化数据分析，提前发现并处理 3 起潜在设备故障隐患，成功避免严重事故发生，切实提升了储罐区的安全性。

6 结语

石油化工储罐区火灾爆炸风险评估与防控体系优化研究极为关键。研究时，分析常用评估方法、构建评估模型，模拟风险因素动态变化，剖析现有防控体系并优化，收获了不少成果。经实验室模拟和实际案例检验，相关模型以及防控体系优化策略行之有效。这些成果可有效评估风险，显著提升防控能力，给石油化工储罐区安全生产提供坚实支撑，助力减少事故，降低人员伤亡和财产损失，推动石油化工行业朝着安全、可持续方向稳步前行。

参考文献：

- [1] 郭晓雪. 数据不确定性下化工储罐区火灾爆炸风险评估与安全投资优化分配方法研究 [D]. 中国科学技术大学, 2023.
- [2] 杨德泽, 任佳亮, 王栋, 等. 石油化工企业危险源火灾爆炸事故智能消防设计研究 [J]. 科学技术创新, 2021,(20):15-16.
- [3] 曾昭雄, 张志坚, 梁俊, 等. 油品罐区多维防控体系的评估 [J]. 现代化工, 2020(S01):16-19.
- [4] 陈广芳. 三甲胺罐区存储操作安全性与效率优化研究 [J]. 流程工业, 2024(9):30-33.
- [5] 刘馨泽, 毛文锋, 于广宇. 石油化工储罐火灾事故消防车安全部署优化技术研究 [J]. 工业安全与环保, 2019,45(04):20-22.