

# 化工装置火灾爆炸危险性评价及安全决策的经济效益分析

岳公之<sup>1</sup> 李成光<sup>2</sup> 庄新刚<sup>1</sup>

(1. 新泰正大焦化有限公司, 山东 泰安 271200; 2. 新泰兰和化工有限公司, 山东 泰安 271222)

**摘要:** 化工装置具有物料危险性高、工艺条件苛刻、设备密集度高、能量集中等特点, 火灾爆炸事故是化工行业最主要、危害最大的事故类型。本文系统分析了化工装置火灾爆炸事故的致因机理与典型模式, 将危险源划分为物质危险性、工艺设备危险性与人为管理危险性三大类。本文旨在为化工装置的工程设计与风险管控提供系统化的理论支撑与方法指导, 为企业安全投资决策提供经济性依据。

**关键词:** 化工装置; 火灾爆炸; 危险性评价; 经济效益; 成本效益分析; HAZOP; 道化学指数法; 防控措施

中图分类号: TQ086.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 011-0065-03

## Cost-Benefit Analysis of Fire and Explosion Risk Assessment in Chemical Plants

Yue Gongzhi<sup>1</sup>, Li Chengguang<sup>2</sup>, Zhuang Xingang<sup>1</sup>

(1. Xintai Zhengda Coking Co., Ltd. Tai'an Shandong 271200, China;

2. Xintai Lanhe Chemical Co., Ltd. Tai'an Shandong 271222, China)

**Abstract:** Chemical plants have the characteristics of high material hazard, strict process conditions, high equipment density, and energy concentration. Fire and explosion accidents are the most important and harmful types of accidents in the chemical industry. This article systematically analyzes the causal mechanism and typical modes of fire and explosion accidents in chemical plants, and divides the hazards into three categories: material hazards, process equipment hazards, and human management hazards. This article aims to provide systematic theoretical support and methodological guidance for the engineering design and risk management of chemical plants, and to provide economic basis for enterprise safety investment decisions.

**Keywords:** chemical equipment; Fire and explosion; Hazard assessment; economic performance; Cost benefit analysis; HAZOP; Dow Chemical Index Method; prevention and control measures

化工行业作为国民经济的基础与支柱产业, 生产装置日益大型化、集约化与复杂化, 且装置内常存大量易燃易爆物质, 生产过程多处于高温高压或低温负压等极端工艺条件, 火灾爆炸事故风险突出, 国内外统计显示其约占化工行业重特重大事故总量的60%以上, 具有突发性强、破坏范围广、连锁效应显著等特点, 会造成巨大人员伤亡、财产损失, 还可能引发环境灾难与社会恐慌<sup>[1]</sup>。本文将从化工装置火灾爆炸事故致因机理出发, 梳理主要危险性评价方法与适用范围, 引入经济性评价指标, 建立风险等级与防控成本的量化关联模型, 从工程技术与安全管理双维度构建综合防控体系, 并重点分析各防控措施的成本效益特征, 为企业安全投资决策提供方法论支撑, 为化工装置全生命周期风险管控提供参考。

### 1 化工装置火灾爆炸危险源辨识

火灾爆炸事故的发生需同时具备可燃物、助燃物和点火源三个基本要素。化工装置的特殊性在于, 这三要素往往在生产系统中高度共存且相互接近。从风险管理的角度, 可将化工装置火灾爆炸危险源系统归纳为以下

三类。危险源辨识是经济性评价的基础, 只有准确识别风险点, 才能避免安全投入的盲目性和资源浪费。

#### 1.1 物质危险性

物质本身的燃烧爆炸特性是化工装置火灾爆炸风险的物质基础。物质危险性等级直接决定了防控投入的基础成本: 低危险性物料(闪点 $>60^{\circ}\text{C}$ )的基础防控投入约为装置总投资的3%-5%; 中等危险性物料(闪点 $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $60^{\circ}\text{C}$ )需投入5%-8%; 高危险性物料(闪点 $<-20^{\circ}\text{C}$ 或爆炸极限范围 $>50\%$ )则需投入8%-15%, 且需额外配置DCS/SIS系统、气体检测报警系统等高成本设施。易燃与可燃液体是化工装置中最常见的危险物料, 其火灾危险性主要体现在闪点、燃点、爆炸极限及自燃温度等参数上。

#### 1.2 工艺与设备危险性

工艺条件的苛刻程度直接决定了物料危险性的释放概率与后果严重度, 同时也显著影响防控成本。高压( $>10\text{MPa}$ )装置的安全阀、爆破片等泄压设施成本是常压装置的3-5倍; 高温( $>300^{\circ}\text{C}$ )装置需采用特殊材质(如不锈钢、哈氏合金), 设备成本增加

30%–50%；涉及硝化、氯化等危险工艺的装置，自动化控制系统的投入占总投资的15%–20%，远高于普通装置的5%–8%。高压操作会增大气体或蒸气的泄漏驱动力，高温操作则使物料更接近其自燃点或分解温度，并增加设备发生蠕变、疲劳失效的风险。负压操作虽看似温和，但一旦设备密闭性被破坏，空气被吸入系统内部即可能形成爆炸性混合物<sup>[3]</sup>。

## 2 化工装置火灾爆炸危险性评价方法

危险性评价是在危险源辨识的基础上，对事故发生的可能性及后果严重程度进行定性或定量的分析与评判，为防控措施的决策提供依据。经济性评价则是对评价方法本身成本与收益的分析，确保评价工作的投入产出合理。根据评价结果的量化程度，可将主流评价方法划分为定性、半定量与定量三大类别。

### 2.1 定性评价方法

安全检查表法是最基础、应用最广泛的定性评价手段。该方法经济性最优：编制成本约1–3万元，耗时1–2周，适用于中小型装置的日常管理，但深度不足可能导致重大隐患遗漏，潜在经济损失巨大。评价人员依据相关法规、标准及工程经验，编制涵盖工艺、设备、仪表、电气、消防等各专业的检查条目，逐项对照核查装置存在的隐患与偏差。其优点是操作简单、覆盖全面，适用于设计审查、投用前安全检查及日常隐患排查。故障模式与影响分析则从系统组成单元出发，逐一分析各部件可能的故障模式及其对子系统乃至整个装置的影响，适用于关键设备如反应釜、大型压缩机、关键调节阀的可靠性分析<sup>[4]</sup>。

### 2.2 定量评价方法

定量评价方法致力于计算事故发生的概率与后果的数值量级，是风险评价的高级阶段，也是经济性投入最高的阶段，适用于重大危险源和高压高危装置。概率风险评价通过故障树分析或事件树分析，对系统的失效概率进行量化。故障树/事件树分析成本约30–80万元，需3–6个月，可精确计算顶上事件概率（如 $10^{-4}$ – $10^{-6}$ /年），为安全仪表系统（SIS）的安全完整性等级（SIL）定级提供依据，避免因过度设计造成的投资浪费（SIL3级系统成本是SIL1级的5–8倍）。后果模拟依托计算流体动力学模型，对池火灾、喷射火、蒸气云爆炸（UVCE）、沸腾液体扩展蒸气爆炸（BLEVE）等典型事故场景进行数值模拟，得到热辐射通量、冲击波超压、有毒气体浓度等在空间和时间上的分布，从而划定伤亡区域与破坏范围。CFD模拟成本约20–50万元，可优化消防冷却水系统和应急疏散方案，避免过度设计（如冷却水用量可减少20%–30%），节约建设投资100–500万元。定量评价结果

最为精确，但对基础数据、建模能力与计算资源的要求较高<sup>[5]</sup>，企业应根据装置规模和风险等级合理选择，避免“过度评价”造成的经济负担。

## 3 化工装置火灾爆炸综合防控与经济性分析

化工装置火灾爆炸的防控遵循“预防为主、防治结合、应急兜底”的基本原则。同时应遵循“经济性优化”原则：在满足法规标准底线要求的基础上，通过成本效益分析（CBA）确定最优投入水平，实现安全风险最小化与全生命周期成本（LCC）最小化的平衡。一个完备的防控体系应从本质安全设计源头抓起，贯穿工艺运行、设备维护、监测预警及应急响应各环节。

### 3.1 本质安全设计与经济性

本质安全是风险防控的最高境界，旨在从根本上消除或减弱危险，而非依赖附加的安全设施。本质安全措施是经济性最优的投入：在设计阶段消除1元风险，相当于生产阶段投入10元管控成本，或事故后支出100元损失赔偿。通过最小化原则，可减少装置内危险物料的一次性存量，例如采用微通道反应器替代传统釜式反应器，初期投资增加20%–30%，但可取消或减小中间储罐（节约占地和配套成本15%–20%），且本质安全水平提升，保险费率可降低10%–15%，3–5年可收回增量投资；或通过管道化输送替代中间储罐。替代原则指用安全的或危险性较低的物料或工艺替代高风险物料与工艺，例如以水基涂料替代溶剂型涂料、以加氢还原替代铁粉还原等，虽然可能增加原料成本5%–10%，但可大幅降低防爆电气、通风设施等投入（节约20%–30%），并减少职业健康赔偿风险，综合效益显著。缓和原则是在不改变物料的前提下通过稀释、低温、低压等方式降低操作条件的苛刻程度，如将反应温度从150℃降至80℃，可采用碳钢替代不锈钢（材料成本降低40%–50%），且设备壁厚减薄，制造费用降低<sup>[6]</sup>。

### 3.2 工艺参数控制与仪表安全系统的经济性

运行阶段的防控核心在于将工艺参数严格约束在设计允许的安全操作区间内。过程控制系统（BPCS）和安全仪表系统（SIS）的投入占装置总投资的5%–15%，但可将人为误操作导致的事故概率降低90%以上，避免因反应失控造成的设备报废损失（通常数百万元至数千万元）和停产损失（每日数十万元至数百万元）。过程控制系统（BPCS）负责常规工况下的温度、压力、流量、液位调节。当参数偏离报警限时，由操作人员介入干预；当参数持续恶化并触及安全联锁设定值时，安全仪表系统（SIS）应自动执行预定义的减灾动作，如紧急切断进料、开启泄压阀、启动紧急停车。SIS系统的安全完整性等级（SIL）选择

表1 化工装置火灾爆炸典型防控措施分类与经济性分析

防控层级	技术措施	功能定位	投入成本(占装置投资%)	风险降低效果	成本效益比	优先级建议
本质安全设计	最小化、替代、缓和、简化	根源消除/降低危险	+10%~+30%(增量)	显著(基础风险降低50%-80%)	最优(1:10以上)	第一优先
工艺控制	BPCS、SIS、泄压装置、抑爆系统	维持正常工况、防止超限	5%-15%	显著(误操作风险降低90%)	良好(1:5-1:10)	第二优先
设备完整性	检验检测、状态监测、LDAR、防腐蚀	物理屏障有效、预防泄漏	年均1%-3%	中等(失效概率降低70%)	良好(1:3-1:5)	常规投入

应基于经济性：SIL1级系统成本约50-100万元，适用于风险降低因子(RRF)10-100的场景；SIL2级成本150-300万元，适用于RRF100-1000；SIL3级成本400-800万元，仅适用于RRF>1000的高危场景。

### 3.3 设备完整性管理的经济性

设备是包容危险介质的物理屏障，其机械完整性一旦丧失，将直接导致泄漏。设备完整性管理投入约占年销售收入的1%-3%，但可将设备失效导致的事故概率降低70%-80%，避免因泄漏火灾造成的数千万元损失和长期停产。设备完整性管理覆盖设备从选材、制造、安装、投用到报废的全生命周期。针对压力容器与压力管道，应建立定期检验台账，综合运用超声波测厚、射线检测、磁粉检测等手段监测腐蚀与裂纹，年度检验成本约5-20万元，可提前发现缺陷，避免突发失效造成的数百万元维修费和停产损失。针对动设备，应开展状态监测与故障诊断，通过振动、温度、油液分析预判轴承磨损、叶轮不平衡等早期故障，状态监测系统投入10-30万元，可延长设备寿命20%-30%，减少非计划停机50%以上，节约维修成本30%-50%。防腐蚀管理包括合理选材、添加缓蚀剂、阴极保护、涂覆防腐层等措施，防腐蚀投入占设备投资的3%-8%，但可延长设备寿命1-3倍，避免因腐蚀减薄导致的泄漏事故。

## 4 化工装置火灾爆炸风险管控与经济效益协同发展趋势

### 4.1 智能监测预警技术的经济性

工业物联网与5G技术的应用，使得大量低成本、低功耗的无线传感器得以部署于传统有线仪表难以覆盖的区域，无线传感器网络建设成本较有线系统降低30%-50%，部署周期缩短50%以上，且可灵活扩展。如腐蚀监测探头、法兰泄漏监测模块、微小火焰探测器等。数字孪生技术通过构建与物理装置实时同步的虚拟模型，融合实时数据与机理模型，可对装置运行状态进行动态风险评估，预测未来一段时间内的高风险时段与高风险部位，数字孪生系统投入200-500万元，可优化操作参数降低能耗5%-10%，延长设备寿命10%-20%，2-3年可收回投资。

### 4.2 基于风险的动态决策与经济性优化

传统的风险评价多基于固定时间节点的静态评

价，而风险本身随装置老化、工况变化、季节更替等因素动态演变。动态风险评价通过实时接入在线监测数据，对评价模型参数进行实时更新，从而输出动态更新的风险等级，实现“精准投入、避免浪费”。例如，腐蚀速率可根据在线测厚数据实时修正，预测的剩余寿命及泄漏概率随之调整，据此优化检验周期：对低风险部位延长检验周期（节约检验费用30%-50%），对高风险部位缩短周期（提前发现缺陷避免突发失效），总体检验成本不变但有效性提升。

## 5 结论

化工装置火灾爆炸事故是工艺危险性与管理缺陷共同作用的结果，其防控是一个贯穿装置全生命周期的系统工程。本文的主要贡献在于将经济性评价系统性引入火灾爆炸风险管控领域，构建了“风险辨识-等级评价-成本分析-效益优化”的完整技术经济分析框架。研究表明，化工装置火灾爆炸防控应遵循“设计阶段优先本质安全、运行阶段优化动态投入、全生命周期追求成本效益最优”的经济性原则。建议企业建立基于风险等级的分级投入机制，将安全投入从“成本中心”转变为“价值投资”，实现安全生产与经济效益的协同提升。

### 参考文献：

- [1] 孙志浩. 化工装置多安全风险演化机制研究[D]. 北京化工大学, 2025.
- [2] 阳晓剑. 大型石油化工装置灭火救援策略研究[J]. 石化技术, 2025, 32(10): 408-410.
- [3] 杨文东, 马飞. 炼油化工装置中存在的风险及规避策略[J]. 石化技术, 2025, 32(05): 42-43+23.
- [4] 席玉蕾, 李媛, 刘鹏. 石油化工装置中静电积聚问题及安全防护措施研究[J]. 石化技术, 2025, 32(04): 373-375.
- [5] 张广羽. 石油化工装置火灾爆炸事故原因探讨[J]. 消防界(电子版), 2025, 11(03): 98-100.
- [6] 付金楼, 焦广永, 王建胜, 等. 化工装置蒸馏操作单元风险分析及管控措施研究[J]. 山东化工, 2023, 52(24): 202-204.

### 作者简介：

岳公之(1986-)男，汉族，山东新泰人，本科，中级注册安全工程师，研究方向：化工安全。