

化工工程安全风险识别及控制探讨

刘召壹¹ 张松² 陈长营³

1.鱼台县应急管理局 山东 济宁 272300

2.济宁市任城区安居街道办事处 山东 济宁 272300

3.山东辰龙药业有限公司 山东 济宁 272300

【摘要】：化工工程作为国民经济的重要支柱产业，其生产过程涉及大量易燃、易爆、有毒及腐蚀性物料，工艺流程复杂且操作条件严苛，安全风险贯穿全生命周期。一旦发生事故，不仅会造成重大人员伤亡与财产损失，还可能引发严重的环境污染与社会影响。因此，系统识别化工工程安全风险、制定针对性控制策略，是保障安全生产的核心任务。本文从风险分类、识别分析入手，提出涵盖源头控制、过程管理及动态更新的全链条风险管控措施，为化工企业构建科学的安全管理体系提供参考。

【关键词】：化工工程；安全风险；识别；控制

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.048

1 化工工程安全风险的分类

1.1 按全生命周期阶段划分

设计阶段风险集中于工艺路线选择、设备选型及安全设计缺陷。例如，硝化反应若未设计双温度联锁装置，可能因反应失控引发爆炸；储罐区布局未考虑防火间距，易导致连锁火灾。施工阶段风险涉及材料质量、焊接工艺及安装规范。如管道焊接未进行无损检测，可能因焊缝缺陷引发泄漏；压力容器未执行压力试验，存在超压破裂隐患。运行阶段风险涵盖设备老化、操作偏差及维护不足。离心机转子长期未检测，可能因金属疲劳发生飞裂；反应釜未定期清理结垢，导致传热效率下降引发超温。废弃阶段风险聚焦于危废处理及设施拆除。含重金属废液未分类储存，可能污染土壤；反应塔拆除前未置换残留物料，遇明火即发生爆炸。

1.2 按风险成因划分

物料风险源于危险化学品固有特性。如氢气爆炸极限范围宽，遇静电火花即燃；氯气具有强氧化性，泄漏后与有机物反应生成剧毒光气。设备风险涉及机械完整性失效。压缩机润滑系统故障，可能因轴瓦烧毁引发设备损毁；阀门密封面腐蚀，导致易燃介质泄漏。工艺风险关联参数控制偏差。聚合反应温度超标 5℃，可能引发爆聚；蒸馏塔压力波动超过设计值 20%，导致塔盘变形。人为风险包含操作失误与违章行为。DCS 操作员误将进料流量设定值提高 30%，造成反应釜超压；动火作业前未检测可燃气体浓度，引发空间闪爆。环境风险涉及自然灾害与外部干扰。雷击导致储罐避雷装置失效，引发静电积聚；

邻近企业火灾产生的热辐射，使化工装置保温层脱落。管理风险体现为制度缺失与执行不力。

2 化工工程安全风险识别分析

2.1 风险识别的核心目标

风险识别的核心目标在于系统梳理化工工程全生命周期各环节的潜在风险源，明确风险触发条件、传导路径及影响范围，为后续风险评估与控制提供基础数据。例如，在硝化反应装置中，需识别出反应温度超标、进料比例失调等风险源，分析其可能引发爆炸、火灾等事故的触发条件，并评估对周边设备、人员及环境的波及范围。

2.2 化工工程全生命周期风险识别流程

2.2.1 准备阶段

明确识别范围需覆盖设计、施工、运行、废弃全周期。例如，设计阶段重点识别工艺路线合理性，如采用氧化工艺时需评估氧气混合比例控制难度；运行阶段则聚焦设备运行状态，如压缩机润滑油压力波动对轴瓦寿命的影响。

组建跨专业识别团队需包含工艺、设备、安全、仪表等专业技术人员。例如，在识别加氢反应风险时，工艺工程师提供反应热数据，设备工程师评估反应器材质耐压性，安全工程师分析氢气泄漏扩散模型，仪表工程师校验温度联锁系统可靠性。

收集基础资料包括工艺流程图（PFD）、管道仪表图（P&ID）、物料安全技术说明书（MSDS）及设备检测报告。例如，通过 P&ID 图识别出氯气缓冲罐未设置安全阀的缺陷，依据 MSDS 确定环氧乙烷的爆炸极限范围。

2.2.2 排查阶段

采用 HAZOP（危险与可操作性分析）、FMEA（失效模式与影响分析）等方法分阶段排查。设计阶段运用 HAZOP 分析，识别出蒸馏塔进料流量高偏差可能导致塔顶冷凝器超负荷；施工阶段通过 FMEA 发现管道焊接未执行氩弧焊打底工艺，存在焊缝未熔合隐患。

分模块排查需覆盖工艺、设备、公用工程等系统。工艺模块重点识别反应失控、物料分解等风险，如聚合反应温度超标 5℃ 可能引发爆聚；设备模块关注机械完整性失效，如离心泵叶轮腐蚀导致振动值超标；公用工程模块分析供电中断对仪表风系统的影响，如气动阀门失电后无法关闭引发物料泄漏。

梳理风险触发因素需明确直接原因与根本原因。例如，储罐泄漏的直接原因是法兰密封面腐蚀，根本原因是未执行年度防腐检测；反应釜超压的直接原因是进料阀内漏，根本原因是阀门选型不符合介质特性。

2.2.3 分析阶段

风险分类整理需按物料、设备、工艺等维度划分。物料风险包括毒性、易燃性、反应活性，如液氯泄漏后与水反应生成次氯酸和盐酸；设备风险涵盖腐蚀、磨损、疲劳，如换热器管束穿孔导致循环水污染；工艺风险涉及参数控制、反应机理，如加氢反应催化剂失活引发飞温。

评估风险发生可能性需结合历史数据与专家判断。例如，根据过去五年设备故障记录，将压缩机轴瓦温度超标的概率定为“可能”（每年发生 1-2 次）；依据行业事故统计，将环氧乙烷储罐泄漏引发爆炸的概率定为“罕见”（十年发生 1 次以下）。

评估影响程度需考虑人员伤亡、经济损失及环境破坏。例如，反应釜爆炸可能导致 3 人以上死亡、直接经济损失超 500 万元，并引发周边 1 公里范围内大气污染，综合判定为“重大影响”。

初步划分风险等级采用矩阵法，将可能性与影响程度组合。例如，可能性“可能”且影响程度“重大”的风险列为红色级，需立即采取控制措施；可能性“罕见”且影响程度“一般”的风险列为蓝色级，可纳入常规管理。

2.2.4 输出阶段

形成风险识别报告需包含风险清单、分布图及管控建议。风险清单明确高风险点（如加氢反应器超温）、中风险点（如储罐液位计故障）及低风险点（如管道标识缺失）；分布图标注各风险点在装置区的位置；管控建议提出技术措施（如增设温度联锁）与管理措施（如加强巡检频次）。

高、中、低风险点清单需与后续控制策略对应。红色级风险点需制定专项应急预案，如液氨储罐泄漏演练每季度开展一

次；黄色级风险点需纳入日常检查表，如每周检测离心泵振动值；蓝色级风险点可通过培训提升员工意识，如每月组织安全操作规程复习。

3 化工工程安全风险控制策略

3.1 源头风险控制措施

3.1.1 设计阶段管控

设计阶段是风险控制的首道防线，需通过工艺优化、设备选型及安全设施配置规避潜在风险。工艺流程设计应遵循本质安全原则，例如采用连续化工艺替代间歇式操作，减少反应釜开停车次数，降低物料泄漏概率；对硝化反应等高风险工艺，优先选择微通道反应器，通过缩小反应体积控制爆炸能量释放。设备选型需匹配物料特性，如储存液氯的储罐应采用双层钢制结构，内层涂覆环氧树脂防腐层，外层设置真空绝热层防止低温脆裂；输送易燃介质的管道应选用无缝钢管，避免焊缝缺陷引发泄漏。生产区域布局需符合防火间距要求，例如甲类仓库与明火作业区的距离应不小于 30 米，且位于全年最小频率风向的下风侧；控制室应采用抗爆结构设计，门窗玻璃选用防爆型，确保在爆炸冲击波下保持完整性。安全防护设施配置需覆盖防爆、防火、防毒等场景，如加氢反应器顶部设置安全阀与爆破片串联泄放装置，防止超压；储罐区设置泡沫灭火系统与可燃气体检测报警仪，实现火灾早期预警与扑救；涉及剧毒物料的装置应配备正压式空气呼吸器与便携式有毒气体检测仪，保障人员应急防护需求。

3.1.2 物料与设备管控

物料管控需贯穿采购、储存、运输全链条。采购环节应严格审核供应商资质，确保物料质量符合国家标准，例如环氧乙烷的纯度需达到 99.95% 以上，水分含量低于 0.01%，避免杂质引发副反应；储存环节需根据物料危险性分类存放，如氧化剂与还原剂应分开设置独立仓库，酸类与碱类物料储存间距不小于 5 米，防止混合反应；运输环节应选择专用槽车，并配备防静电接地装置与紧急切断阀，例如液氨运输车需安装氨气泄漏检测仪，当浓度超过 20ppm 时自动触发报警并关闭阀门。设备管控需建立全生命周期维护体系，选型阶段应优先选用低故障率设备，如离心泵选用磁力驱动型替代机械密封型，消除密封泄漏风险；安装阶段需执行标准规范，如压力管道焊接应采用氩弧焊打底工艺，确保焊缝无损检测合格率 100%；调试阶段需进行性能测试，如压缩机需连续运行 72 小时，振动值不超过 4.5mm/s，轴承温度不高于 75℃；运行阶段需制定预防性维护计划，如对反应釜每 3 年进行内壁测厚检测，对储罐每 5 年开展全面检验，及时发现并修复腐蚀减薄部位。

3.2 过程风险控制措施

3.2.1 工艺操作管控

标准化操作规程（SOP）是规范作业行为的核心工具，需

明确各工艺单元的操作步骤、参数控制范围及异常处置方法。例如，聚合反应 SOP 应规定催化剂加入量误差不超过 $\pm 1\%$ ，反应温度波动范围控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内，当温度超限 5°C 时需立即启动紧急冷却系统；蒸馏塔操作 SOP 应明确进料流量、回流比等关键参数，当塔顶压力超过设计值 10% 时需自动联锁切断进料。操作人员岗前培训需涵盖理论考核与实操演练，理论考核包括物料危险性、设备原理及应急预案等内容，实操演练需在模拟装置上完成开停车、参数调整等操作，考核合格后方可独立上岗；在岗考核应定期开展，例如每季度进行一次操作技能复审，对连续两次不合格者暂停作业资格。工艺参数监控需采用自动化仪表与 DCS 系统，实时采集温度、压力、液位等数据，并设置三级预警阈值：当参数接近控制上限时（如反应温度达到 90°C ）触发黄色预警，提示操作人员加强巡检；当参数超过控制上限但未达联锁值时（如 95°C ）触发橙色预警，自动启动声光报警并推送至管理人员手机；当参数达到联锁值时（如 100°C ）触发红色预警，系统自动切断进料并启动紧急泄放装置。

3.2.2 人员管理管控

安全培训体系需分层级实施，管理层培训侧重法规标准与风险管理，例如组织学习《危险化学品安全管理条例》及 HAZOP 分析方法；技术人员培训侧重工艺安全与设备维护，例如开展反应热效应计算与设备腐蚀防护培训；操作人员培训侧重岗位技能与应急处置，例如进行防护服穿戴与消防器材使用实操训练。安全生产责任制需明确各岗位风险管控职责，例如工艺工程师负责编制 SOP 并定期修订，设备工程师负责制定维护计划并监督执行，操作人员负责按规程操作并记录参数，安全员负责现场巡查与隐患排查；职责落实情况需纳入绩效考核，对未履行职责导致事故者追究责任。现场作业监督需采用“人防+技防”模式，人防方面安排专职安全员每 2 小时巡查一次重点区域，检查设备运行状态与人员操作行为；技防方面安装视频监控系统与智能巡检终端，实时传输作业画面至控制室，对违规行为（如未佩戴安全帽、擅自离岗）自动抓拍并报警。

3.2.3 环境与应急管理

生产环境布局需防范外部风险，例如将控制室、变配电室

等重要设施布置在爆炸危险区外，且与装置间距不小于 15 米；在台风多发地区，储罐区应设置防风拉索，建筑物屋顶采用轻质材料防止掀翻；在地质灾害易发区，装置基础需进行加固处理，并设置排水沟防止雨水积聚。应急预案需覆盖火灾、爆炸、泄漏等场景，明确应急组织架构、处置流程及资源调配方案，例如泄漏事故预案应规定关闭泄漏源、围堵扩散、中和处理等步骤，并标注消防栓、吸附材料等应急物资位置；应急演练需每半年开展一次，模拟不同事故场景检验预案可行性，例如开展液氨泄漏演练时，需测试应急队伍响应时间（不超过 5 分钟）、防护装备穿戴正确率（ 100% ）及泄漏控制效果（30 分钟内完成堵漏）。

3.3 风险分级管控与动态更新

风险分级管控需基于识别结果划分等级，红色级风险（如加氢反应器超温、储罐泄漏）需制定专项管控方案，明确管控措施、责任人及完成时限，例如对红色级风险点每 2 小时巡检一次，每月开展一次专项检查；黄色级风险（如管道振动超标、仪表校准偏差）采取常规管控措施，如每周巡检一次，每季度进行一次全面检测；蓝色级风险（如标识缺失、防护栏损坏）纳入日常管理，由岗位人员每日检查并记录。风险动态更新需结合工程进展、工艺调整及外部环境变化，例如当装置进行技改增加新设备时，需重新识别该设备相关风险并更新清单；当季节变化导致极端天气频发时，需评估其对储罐区的影响并补充防汛措施；当法规标准修订时，需对照新要求完善管控策略，例如《化工企业安全风险分级管控实施指南》更新后，需在 3 个月内完成风险等级重新评定。

4 结语

化工工程安全风险管控是一项系统性、动态性工程，需以全生命周期视角统筹设计、施工、运行及废弃各阶段的风险防控。通过精准识别风险成因与传导路径，结合分级管控与动态更新机制，可实现风险超前预控与资源高效配置。随着数字化技术与本质安全理念的深化应用，化工企业应持续优化风险管控模式，强化人员安全素养与应急能力建设，推动安全生产向主动预防型转变，为行业高质量发展筑牢安全根基。

参考文献：

- [1] 昂洋.化工工程安全风险识别及控制探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(03):9-11.
- [2] 冯宇.化工工程安全风险识别与控制措施[J].化纤与纺织技术,2024,53(08):115-117.
- [3] 董迎春.化工工程工艺管道安装安全风险控制措施分析[J].化纤与纺织技术,2024,53(06):98-100.
- [4] 雷廷,李世星,刘准凯.化工工程安全风险识别及其控制策略[J].山东化工,2023,52(09):219-220+224.
- [5] 王强.化工工程工艺管道安装安全风险控制措施分析[J].化工管理,2019,(30):71-72.