

化工工艺安全设计与风险控制措施研究

郭 军

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041600

摘要：化工工艺安全设计与风险控制对保障生产稳定运行意义重大。本文先阐述化工工艺安全设计基础，涵盖工艺流程、设备选型布局及物料特性安全要求。接着探讨安全设计要点，包括防火防爆、防毒防害等方面。随后进行风险识别，运用多种方法分析工艺操作、设备设施及人员行为风险。最后提出风险控制措施，从工程技术、管理、应急三方面着手。通过全面研究，为化工工艺安全设计与风险控制提供理论依据与实践指导。

关键词：化工工艺；安全设计；风险识别；风险控制措施

引言：化工行业作为国民经济重要支柱产业，在推动经济发展同时，因工艺复杂、物料危险性高，安全风险突出。化工工艺安全设计是预防事故发生的关键环节，合理设计能降低事故发生可能性。风险控制措施则是在事故发生时，最大限度减少损失、保障人员安全与环境稳定的重要手段。深入研究化工工艺安全设计与风险控制措施，有助于提升化工企业安全管理水平，促进化工行业健康可持续发展，对保障社会公共安全也具有深远意义。

1 化工工艺安全设计基础

1.1 化工工艺流程分析

化工工艺流程的构建需以反应机理与物质转化规律为核心，通过多阶段操作实现目标产物合成。流程阶段划分通常依据反应类型、相态变化及分离需求展开，例如连续化生产中原料预处理、化学反应、产物分离及精制等环节构成完整链条^[1]。各阶段物料性质随温度、压力及反应进度呈现动态变化，如氧化反应中氧气浓度梯度分布直接影响反应速率，而吸热或放热过程导致体系能量波动，需通过换热网络调控以维持热平衡。关键操作单元的确定需综合考量工艺复杂性、操作弹性及安全冗余，例如精馏塔的塔板数设计需平衡分离效率与操作稳定性，反应釜的搅拌速率选择需兼顾传质效果与能耗控制。

1.2 化工设备选型与布局

设备选型需以工艺条件为基准，结合介质特性、操作压力及温度范围确定结构形式。例如高压反应场景需选用厚壁容器或管式反应器，而腐蚀性介质处理则需采用钛合金或内衬聚四氟乙烯设备。工艺条件对设备的要求体现在材料耐温性、密封可靠性及结构强度等方面，如高温裂解炉需采用耐热合金以抵抗热应力，真空蒸馏设备需强化密封设计以防止空气渗入。材质选择需通过相容性实验验证，确保设备长期运行不发生催化降解或

应力腐蚀。设备布局需兼顾安全间距与操作效率，爆炸危险区域设备间距应满足防火规范要求，通过模块化设计缩短物料输送路径。操作面宽度需满足人员巡检需求，检修空间预留需考虑大型设备吊装可行性，防火隔离带设置需结合物料爆炸极限参数确定。

1.3 化工物料特性与安全要求

化工物料按危险特性可分为易燃易爆、有毒有害及腐蚀性三大类。易燃物料闪点与自燃点数据是火灾风险评估的关键参数，其蒸气压与扩散系数决定泄漏后的扩散范围。有毒物料需关注半数致死量及暴露限值，例如氰化物通过皮肤吸收的毒性远高于挥发吸入途径。腐蚀性物料对金属的侵蚀速率与介质浓度、流速呈正相关，需通过电化学腐蚀实验确定防护方案。物料储存需严格控制环境参数，易燃液体储罐应设置氮封系统以隔绝氧气，有毒物料需采用双层罐体防止泄漏污染土壤。运输方式选择需匹配物料状态，液态物料优先采用槽罐车运输，固态物料可采用专用包装袋，运输途中需配备实时监测装置追踪温度、压力及泄漏指标，防护措施包括防静电接地、防晒遮盖及应急堵漏工具配备。

2 化工工艺安全设计要点

2.1 防火防爆设计

爆炸极限参数是评估可燃物料火灾风险的核心指标，通过测定下限与上限浓度范围可确定安全操作边界。火灾危险性分析需综合物料闪点、自燃温度及最小点火能等数据，结合工艺条件判断潜在爆炸场景^[2]。防火防爆措施实施需从源头消除风险因素，针对电气火花、机械摩擦及静电积聚等常见点火源，应采用防爆型设备并强化静电接地设计。可燃物浓度控制可通过惰性气体稀释或工艺参数优化实现，例如在储罐顶部设置氮封系统以维持氧含量低于爆炸下限。泄压设计需根据设备容积与操作压力确定泄爆面积，防爆结构选用应匹配物料

爆炸压力上升速率,压力容器可配备爆破片或安全阀实现双重保护。

2.2 防毒防害设计

有毒有害物质泄漏途径主要包括设备密封失效、管道腐蚀穿孔及操作失误引发的意外排放。泄漏扩散模型分析需考虑物料密度、风速及地形因素,为防护措施制定提供依据。通风系统设计应基于毒物散发速率确定换气次数,局部排风装置需靠近泄漏源布置以提升捕获效率。个人防护装备选型需匹配毒物侵入途径,针对挥发性毒物应配备全面罩呼吸器,皮肤接触风险高的场景需穿戴防化手套与防护服。泄漏检测装置需覆盖关键工艺节点,电化学传感器适用于氯气等特定毒物监测,红外光谱技术可实现挥发性有机物全谱扫描,报警阈值设定应低于职业接触限值。

2.3 防腐蚀设计

化工工艺中腐蚀类型涵盖均匀腐蚀、点蚀及应力腐蚀开裂,其作用机理涉及电化学氧化、氢脆及微生物侵蚀等复杂过程。材质选择需通过腐蚀试验验证,不锈钢在含氯环境易发生点蚀,钛合金对稀硫酸具有优异耐腐蚀性。表面处理技术可提升基材抗蚀能力,喷砂处理能去除氧化皮并增强涂层附着力,渗氮工艺可在金属表面形成致密硬化层。防腐涂料应用需考虑施工环境与介质特性,环氧树脂涂料适用于淡水环境,聚氨酯涂层对有机溶剂具有良好阻隔性。衬里技术通过物理隔离实现防护,玻璃钢衬里适用于强酸储罐,橡胶衬里可吸收物料冲击力并防止缝隙腐蚀。电化学保护通过外加电流或牺牲阳极改变金属电位,阴极保护设计需计算保护电流密度并优化阳极分布。

2.4 电气安全设计

化工场所的电气危险因素分析需全面识别电气设备运行、线路敷设过程中可能存在的漏电、短路、过载等风险,结合化工场所易燃易爆、腐蚀性强的环境特点,研判电气风险引发安全事故的可能性。电气安全措施需贴合化工场所特殊要求,强化电气系统的安全可靠性。防爆电气设备的选用需严格遵循防爆标准,根据场所爆炸危险等级选用适配的防爆类型,杜绝电气火花引发安全事故。接地与防雷设计需完善接地系统,规范防雷装置布置,防止静电积累与雷电冲击对电气系统及设备造成损坏。电气线路敷设与保护需结合工艺设备布局,规范线路走向,采取防腐蚀、防机械损伤等保护措施,确保电气线路安全稳定运行,契合化工电气安全设计相关规范。

3 化工工艺风险识别

3.1 风险识别方法

3.1.1 危险与可操作性分析

危险与可操作性分析以系统化偏差推导为核心,通过预设引导词挖掘工艺参数潜在偏离。分析过程需将工艺流程划分为若干节点,每个节点聚焦特定参数范围,如温度、压力或流量边界。引导词选择需覆盖常见偏差类型,"过高""过低"用于定量参数,"逆向""遗漏"针对流程顺序或操作步骤^[3]。节点划分依据设备功能或物料状态变化,反应器进出口、换热器热端等关键位置均需独立分析。分析团队需由工艺、设备及安全专业人员组成,通过多维度讨论确保偏差识别全面性,最终形成包含原因、后果及建议措施的风险清单。

3.1.2 故障模式与影响分析

故障模式与影响分析通过解构设备功能链确定薄弱环节。故障模式确定需结合设备结构特性与运行数据,密封失效、电机烧毁等典型故障需纳入分析范畴。影响程度评估需量化故障对工艺连续性、产品质量及人员安全的作用,设备停机导致的生产中断时长、物料泄漏引发的环境危害范围均属评估要素。分析结果需按风险优先级排序,高风险故障模式应制定专项监控方案,中低风险模式纳入常规维护计划。故障数据库的持续更新可提升分析准确性,历史故障记录与行业经验数据是重要参考依据。

3.2 风险识别内容

3.2.1 工艺操作风险

正常操作风险源于参数波动超出控制范围,温度骤升可能引发副反应,压力波动导致设备应力集中。异常操作风险涉及非计划工况,如进料流量突增造成反应器超压,冷却水中断引发温度失控。开停车阶段风险具有动态特征,升温速率过快导致设备热应力损伤,降压速度超标引发密封失效。切换操作风险与物料性质变化相关,不同牌号原料混合可能改变反应动力学特性,催化剂更换周期偏差影响产物选择性。

3.2.2 设备设施风险

设备故障风险与材质劣化机制相关,高温环境导致金属蠕变,腐蚀性介质侵蚀引发壁厚减薄。管道泄漏风险受应力状态影响,焊接缺陷在交变载荷作用下扩展,法兰密封面损伤导致介质渗漏。辅助设施风险具有隐蔽性,仪表阀门卡滞造成参数失真,安全阀起跳压力偏差削弱超压保护能力。设备寿命周期管理是风险防控关键,剩余寿命评估需结合无损检测数据与运行工况参数。

3.2.3 人员行为风险

操作失误风险与认知负荷相关,复杂流程界面增加

误操作概率,紧急工况下决策时间压缩导致应对措施失当。维护不当风险源于技能缺失,润滑周期延长引发设备磨损加剧,检修顺序错误造成系统污染。培训效果评估可降低行为风险,实操考核与理论测试结合验证人员能力,高风险岗位需通过仿真系统进行应急演练^[4]。行为观察记录分析能识别习惯性违章,近三年事故统计显示,未佩戴防护用具导致的伤害占比超四成。

4 化工工艺风险控制措施

4.1 工程技术控制措施

工艺优化与改进是从源头降低风险的核心工程技术手段,遵循GB50160化工企业设计防火规范相关要求,通过精简冗余工序、整合工艺单元实现工艺流程简化,减少风险点数量与物料接触环节。采用低危险性工艺可替代高风险反应工艺,降低反应失控、物料泄漏等风险发生概率,提升工艺系统本质安全水平。设备可靠性提升需贯穿设备全生命周期,定期维护与保养需按照设备运行规程开展,及时排查设备磨损、老化、腐蚀等隐患,确保设备运行参数稳定在设计范围内。冗余设计应用针对关键工艺设备与系统,通过增设备用设备、备用线路等方式,避免单一设备故障导致工艺系统停运或引发安全事故。安全设施配备需兼顾防控与应急需求,消防设施选用需适配化工场所火灾类型,应急救援设备需覆盖泄漏处置、人员防护、应急冷却等场景,保障风险突发时能快速响应。

4.2 管理控制措施

操作规程制定与执行是规范作业行为、控制操作风险的关键,详细操作步骤需贴合工艺实际,明确各环节操作标准与安全注意事项,确保作业人员操作有章可循。操作人员的培训与考核需落实化工从业人员安全培训规范,结合工艺特点与风险要点开展针对性培训,考核合格后方可上岗作业。人员资质管理需明确岗位资格要求,筛选符合岗位能力的从业人员,定期复审从业人员岗位资质,开展继续教育提升从业人员专业技能与安全意识,避免因人员能力不足引发风险。安全检查与监督需常态化开展,日常检查聚焦工艺运行、设备状态、作业行为等常规环节,专项检查针对高风险工序、特殊工况开展重点排查,隐患排查后需建立整改台账,跟踪整改进度与整改效果,确保隐患闭环管理。

4.3 应急控制措施

应急控制措施是化工工艺风险控制的最后一道防线。应急预案制定需全面考虑各种可能发生的事事故情景,明确应急组织与职责,确定应急指挥机构、各应急小组的组成和职责分工,确保在事故发生时能够迅速、有序地开展应急救援工作。制定科学合理的应急响应程序,规定事故报告、应急启动、救援行动、后期处置等各个环节的具体流程和要求。应急演练与培训是提高应急能力的有效途径。制定详细的演练计划,定期组织开展演练,通过模拟事故场景,检验应急预案的可行性和有效性,锻炼应急队伍的实战能力^[5]。培训内容与方法注重实用性和针对性,根据不同岗位需求,开展应急知识、技能培训,提高全体人员的应急意识和自救互救能力。应急资源保障充足,做好物资储备与管理,确保应急物资的种类、数量和质量满足应急需求,同时加强与外部救援力量的协调沟通,建立联动机制,在事故发生时能够及时获得外部支援。

结束语

化工工艺安全设计与风险控制是一个复杂且系统的工程,涉及多个环节与方面。通过全面深入的安全设计,从工艺流程、设备选型、物料特性等多维度保障工艺本质安全;运用科学有效的风险识别方法,精准找出潜在风险点;采取针对性工程技术、管理及应急控制措施,降低风险发生概率与影响程度。只有将安全设计、风险识别与控制措施有机结合,形成完整的安全管理体系,才能切实保障化工工艺的安全稳定运行,实现化工行业安全生产目标。

参考文献

- [1]王怡.化工工艺设计中的安全风险与控制措施分析[J].天津化工,2023,37(1):144-146.
- [2]黄辉.化工工艺设计中的安全风险与控制探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(8):1-3.
- [3]王绪梅,刘秀敏,吴桂芬,等.化工工程工艺管道安装安全风险控制措施分析[J].山西化工,2025,45(8):192-194,233.
- [4]马鹏,刘振贵,王志勇,等.关于化工工艺设计中的安全问题及控制措施研究[J].山西化工,2024,44(2):208-209.
- [5]王猛,沙帅,刘秀敏,等.化工工艺安全设计中危险因素识别与控制[J].生物化工,2025,11(2):191-193.