

化工工艺设计中风险因素分析及控制对策研究

毛军国 李金娥 练 峰

浙江丽水有邦新材料有限公司 浙江 丽水 323000

摘 要: 化工工艺设计是化工安全生产的源头关键环节,设计隐患具有隐蔽性、传导性与不可逆性,直接影响生产运行安全。本文依托化工设计相关理论,采用HAZOP、风险矩阵等方法,全面识别工艺方案、设备管道、安全辅助系统等阶段的风险因素,剖析人为、制度及技术层面的风险成因。结合行业安全规范,从源头设计、设备优化、应急完善、制度管控维度提出防控对策,为化工工艺安全设计与风险治理提供参考。

关键词: 化工工艺设计; 风险因素; 控制对策

引言: 化工行业具有高危性、工艺复杂、介质危险等特点,安全管控始终是化工项目运营的核心重点。工艺设计作为项目建设的前置环节,设计缺陷会衍生系统性安全风险,极易引发泄漏、爆炸、中毒等安全事故。当前部分项目存在设计不规范、风险论证不足、安全设计缺失等问题。为此,本文系统梳理工艺设计全流程风险,分析风险形成机理,制定科学可控的防控措施,助力提升化工工艺本质安全水平。

1 化工工艺设计及风险相关理论基础

1.1 化工工艺设计核心概述

(1) 化工工艺设计的定义与内涵: 化工工艺设计是化工项目建设的核心环节,贯穿概念设计、基础设计至详细设计全阶段,主要完成生产工艺路线确定、设备选型、工艺参数设定、流程整体布局等核心工作,是衔接项目设计与实际生产的关键纽带,直接决定化工生产过程的安全性、稳定性与高效性,是化工安全生产的前置保障。(2) 化工工艺设计的核心流程: 完整设计体系包含六大核心环节,依次为工艺方案论证、工艺流程图绘制、设备工艺设计、管道布局设计、安全辅助系统设计、设计校核与优化,各环节层层衔接、相互制约,共同构成标准化、系统化的化工工艺设计体系^[1]。(3) 化工工艺设计的基本原则: 设计工作需严格遵循五大核心原则,即本质安全、合规性、经济性、稳定性、可操作性。其中本质安全是风险防控的核心准则,优先从设计源头消除安全隐患,其余原则兼顾项目合规运营、成本控制与长期稳定运行。

1.2 化工工艺设计风险的内涵与特征

(1) 工艺设计风险定义: 指工艺设计各环节中,因方案缺陷、参数设置不合理、设备选型失误、流程布局不规范等设计问题,遗留的潜在安全隐患,极易引发后续生产中的泄漏、中毒、火灾、爆炸等重大安全事故。

(2) 工艺设计风险核心特征: 具备三大典型特征,一是隐蔽性,风险潜藏于设计阶段,难以提前察觉,多在项目投产后才逐步暴露;二是传导性,单一微小设计缺陷可引发连锁隐患,扩大风险影响范围;三是不可逆性,核心设计失误整改难度大、成本极高,难以彻底修复。

(3) 工艺设计风险与生产风险的区别: 设计风险属于源头性、系统性风险,贯穿整个生产周期,影响范围广、危害程度深;生产风险多为操作性、临时性风险,源于现场操作不当、设备临时故障等,可通过现场管控快速调整整改,二者的风险防控重点与治理逻辑存在显著差异。

1.3 常用风险分析与评价方法

(1) 危险与可操作性分析(HAZOP): 作为化工行业核心分析方法,通过精准分析各类工艺参数的运行偏差,系统性识别设计环节的潜在危险与操作隐患,适配化工工艺设计全流程的风险识别工作,适用性极强。

(2) 风险矩阵评价法: 以风险发生概率和事故危害程度为两大核心维度,对工艺设计风险进行等级划分,实现风险分级分类管控,为精准制定防控措施、分配管控资源提供依据。(3) 安全检查表法: 依托国家化工设计规范及行业标准制定专项检查清单,逐项核查工艺设计的合规性,可快速排查基础性、常规性设计风险,是工艺设计初期基础且高效的风险排查手段。

2 化工工艺设计全流程风险因素识别与成因分析

2.1 工艺方案设计阶段风险因素

(1) 工艺路线选择风险: 部分化工项目设计阶段未结合生产工况充分论证工艺路线,盲目沿用老旧落后工艺,或选用尚未成熟的新型工艺,工艺与生产物料、生产规模适配性较差。该问题会直接造成化学反应转化率偏低、副产物生成量超标,引发物料堆积、反应体系失衡等问题,大幅提升反应失控、物料泄漏等安全风险。

(2) 工艺参数设计风险: 反应温度、系统压力、物料

流速、原料配比等核心工艺参数是生产稳定的关键。若参数设计阈值不合理,未根据生产波动预留充足安全余量,会导致工况波动时参数快速超标,超出设备耐受极限,极易引发设备超压、介质超温等危险工况,进而诱发燃烧、爆炸等安全事故^[2]。(3)物料选型设计风险:设计过程中若对原料、辅料及中间产物的易燃易爆、有毒、腐蚀等理化性质调研评估不充分,会出现物料选型与工艺体系匹配度不足的问题。高危物料使用方案不合理,会从源头埋下物料泄漏、人员中毒、设备腐蚀损坏等安全隐患。

2.2 设备与管道设计阶段风险因素

(1)化工设备选型风险:反应釜、储罐、换热器等核心生产设备,若材质、容积、耐压及耐温等级选型不符合工艺生产要求,设备耐腐蚀、耐高温、抗压力波动性能无法适配生产工况。设备长期在超负荷、腐蚀环境下运行,易出现壳体破损、密封失效等问题,引发物料泄漏事故。(2)设备布局设计风险:厂区及车间设备布局规划不合理,高危易燃易爆设备密集布置,设备间安全间距不足、高低布局混乱,未预留规范的安全疏散与检修空间。一旦发生泄漏、起火事故,易导致火势快速蔓延,引发连锁爆炸、燃烧灾害,扩大事故影响范围。

(3)管道系统设计风险:管道管径规格、敷设走向、阀门点位布局设计不科学,系统内存在死角、积液盲区,易造成物料沉积堵塞。同时管道防腐、防静电、防震设计缺失或不达标,生产过程中易出现静电积聚、管道破损,诱发爆炸、物料泄漏等安全风险。

2.3 安全辅助系统设计阶段风险因素

(1)防爆泄压系统设计缺陷:安全阀、泄压阀、防爆膜等核心安全附件选型参数不匹配、安装位置不合理,整体泄压泄爆能力无法覆盖极端工况。当系统出现超压问题时,无法快速释放内部压力,压力持续堆积会引发设备爆裂、爆炸事故。(2)报警与联锁系统设计缺失:温度、压力、液位等关键工况监测报警装置布设数量不足、覆盖范围有限,监测存在盲区。同时紧急停车联锁逻辑设计不完善、响应滞后,无法对异常工况实现实时预警和自动紧急处置,错失事故防控最佳时机。

(3)消防与应急系统设计不足:车间消防喷淋、灭火器材、通风排毒等应急设施布设不符合行业规范,设施配置数量、覆盖范围及运行性能不达标。面对初期火灾、有毒气体泄漏等事故,应急处置能力不足,无法快速控制事故态势^[3]。

2.4 风险因素核心成因综合分析

(1)人为因素:部分设计人员专业储备不足、安

全设计意识薄弱,对新工艺、新物料的风险特性认知匮乏,设计工作依赖过往经验,缺乏精细化、标准化设计思维。同时设计校核、审核工作流于形式,未能及时排查修正设计缺陷。(2)制度因素:企业工艺设计管理制度不完善,未建立多级、全方位的风险校核与审查机制,设计方案的合规性、安全性审核流程不规范,存在设计漏洞未被及时发现、整改的问题。(3)技术与管理因素:部分企业片面追求生产效率与经济效益,忽视安全设计的重要性,刻意简化安全设计环节、压缩安全投入。同时新工艺、新技术投产前风险论证不充分,未全面识别潜在隐患,导致设计阶段风险遗留至生产环节。

3 化工工艺设计风险控制对策与优化方案

3.1 强化工艺方案源头本质安全设计

(1)优化工艺路线筛选机制:工艺方案是化工生产安全的源头,需建立标准化、规范化的工艺路线筛选与论证机制。项目设计阶段应优先选用技术成熟、运行稳定、风险等级低的清洁生产工艺,坚决淘汰高污染、高风险、老旧落后的生产工艺。针对拟选用的工艺技术,开展全方位前期风险论证,结合生产规模、物料条件、厂区环境等实际场景,验证工艺适配性,从源头规避工艺体系不匹配带来的安全隐患。(2)科学设定工艺安全参数:工艺参数波动是引发生产异常的主要诱因,需结合生产物料理化特性、核心设备耐受性能,科学界定温度、压力、流速、物料配比等关键参数的运行区间。摒弃极限化参数设计理念,合理预留充足的安全冗余量,同时借助工艺流程模拟仿真技术,对参数运行稳定性进行验证,排查参数设计漏洞,保障各类工况下工艺系统平稳运行^[4]。(3)规范危险物料管控设计:针对生产过程中易燃易爆、有毒有害、强腐蚀性等高危物料,优化全流程物料管控设计。合理规划物料储存、输送、反应、回收全流程路径,配套设置物料缓冲装置、安全隔离设施与密闭回收系统,减少高危物料直接暴露的工况场景,有效降低物料泄漏、人员中毒、燃烧爆炸等安全风险。

3.2 优化设备与管道系统安全设计

(1)严格设备选型与校核:设备是工艺运行的核心载体,需依据实际工艺工况、物料腐蚀特性、运行负荷要求,精准匹配设备材质、规格型号与结构参数。严格开展设备耐压、耐温、防腐、抗疲劳性能校核工作,全面验证设备适配性,杜绝设备选型偏小、材质不达标、性能不匹配等设计问题,避免设备长期运行出现破损、失效、泄漏等故障。(2)标准化设备布局设计:严格遵循化工安全设计规范,科学规划车间设备布局,明确划

分生产作业区、物料储存区、应急疏散区等功能区域。对高危生产设备进行分散化、合理化布置,控制高危设备布置密度,严格落实设备安全间距标准,预留充足的设备检修空间与人员疏散通道,规避事故连锁扩散风险。(3)完善管道系统安全设计:优化管道管径规格与敷设走向设计,规整管路布局,彻底消除管路积液、死角、盲管等隐患区域。同步完善管道防静电、防腐蚀、防振动与防泄漏设计,针对高危介质管道选用专用管件与密封配件,统一阀门、管件选型安装标准,保障管道系统输送稳定,杜绝物料堵塞、静电积聚、管道破损等风险。

3.3 完善安全辅助与应急保障系统设计

(1)优化安全泄压防护系统:结合工艺系统压力等级、设备容积、介质特性,精准匹配安全阀、泄压阀、防爆膜等安全附件的规格型号,科学规划安全附件的安装位置与数量,保障泄压、泄爆无盲区。确保系统出现超压、超温等极端工况时,防护装置可快速启动、及时释放内部压力,快速消解设备爆裂、燃烧爆炸风险,筑牢工艺系统安全防线。(2)搭建智能监测联锁系统:构建全域化智能安全监测体系,在关键工艺点位全面布置温度、压力、液位、可燃及有毒气体浓度监测装置,实现生产工况全覆盖监测。完善自动报警、紧急停车、物料联锁切断控制系统,优化联锁响应逻辑,缩短应急响应时间,实现异常工况实时预警、风险自动阻断,有效防控工况失控引发的安全事故^[5]。(3)升级消防应急配套设计:严格按照国家化工安全设计规范,优化车间消防喷淋、灭火设施、通风排毒、废气处理等应急配套系统。针对性完善密闭空间、高危作业区域的通风与应急防护设施,规范设置应急物资存放区域,配齐应急救援器材,全面提升初期火灾、有毒气体泄漏等事故的应急处置能力,降低事故危害程度。

3.4 健全设计管控体系与人员管理机制

(1)建立多级设计审核制度:构建设计、校核、审核、审批四级闭环管控体系,明确各岗位审核职责,细

化审核标准与流程。将HAZOP风险分析、专项安全评审纳入设计审核核心环节,对工艺方案、设备管道设计、安全系统设计进行全方位风险核查,及时排查并整改设计缺陷,杜绝不合格设计方案落地应用。(2)强化设计人员专业培训:定期组织设计人员开展化工设计规范、安全标准、风险识别技术、新型工艺设备等专项培训,夯实专业基础,提升设计人员的本质安全设计意识与风险预判能力。通过案例分析、实操演练等方式,纠正经验化设计陋习,全面提升团队整体设计水平。(3)推行设计全生命周期管控:将风险管控理念贯穿工艺方案设计、详细设计、施工交底、设备安装、投产试运行全流程。建立设计动态跟踪与隐患整改机制,及时核查设计落地偏差,针对施工、试运行阶段暴露的设计缺陷快速优化整改,实现设计风险全周期闭环管控,从根本上降低工艺设计安全风险。

结束语

本文梳理了化工工艺设计各阶段的主要风险,归纳风险产生的核心原因,针对性提出源头优化、设备管道整改、安全系统升级及全周期管控等控制策略。工艺设计风险防控是化工安全生产的核心抓手,只有严格落实本质安全设计要求,完善审核管理制度,强化人员专业能力,才能从源头消除设计隐患。后续可结合新型工艺技术持续优化防控体系,切实降低化工生产安全风险。

参考文献

- [1]李玉鑫.化工工艺设计中安全危险的识别及控制研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(24):64-67.
- [2]樊龙龙,刘艳,董养林.化工工艺中节能降耗技术应用与优化研究[J].产业创新研究,2024,9(24):78-80.
- [3]谢彩明,徐江洲,刘玉德,等.化工工艺安全设计中的危险因素识别与控制[J].石化技术,2024,31(12):159-161.
- [4]胥学松.化工工艺设计中安全危险的识别与控制措施[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(22):142-146.
- [5]江南.化工工艺安全设计中危险识别和控制策略研究[J].现代盐化工,2023,47(1):54-55.