

基于风险管控的精细化工工艺安全措施优化研究

惠巧云

内蒙古冠仕达化学有限公司 内蒙古 阿拉善盟 750312

摘要:精细化工生产具备反应复杂、高危物料使用量大、生产批次切换频繁、工艺参数敏感度高的特点,工艺失控、物料泄漏、燃爆中毒类安全隐患较为突出。为提升精细化工行业本质安全生产能力,本文以风险分级管控理论为基础,梳理精细化工全生产流程共性安全风险,归纳工艺风险辨识、量化评估的通用技术手段,从本质安全工艺改良、工程防护升级、自动化智能管控、制度应急体系搭建四个层面,建立系统化工艺安全优化方案。该研究可为精细化工行业安全技改、双重预防机制落地提供通用理论参考。

关键词:精细化工;风险管控;工艺优化

引言:精细化工多涉及强放热反应与危险化工工艺,工况多变、危险物料集中,是化工行业安全监管的重点领域。传统事后隐患整改模式无法适配现代安全生产要求^[1]。本文依托全过程风险管控思路,结合国家现行行业规范分析精细化工固有工艺风险,探究普适性安全优化路径,助力行业建立事前预防、动态监管的安全生产运行模式。

1 精细化工工艺特点与通用安全风险

1.1 精细化工行业生产工艺特征

精细化工区别于大宗化工连续化规模化生产模式,主要采用间歇釜式反应、小批量多批次、多产品柔性化生产模式,产品覆盖化工助剂、医药中间体、染料、功能性化学品等品类。完整生产工序包含原料预处理、合成反应、中和水洗、减压精馏、过滤脱色、成品调配、灌装储运,配套循环水、蒸汽供热、低温制冷、氮气保护、尾气处理公用工程系统^[2]。

从安全层面来看,该行业存在三项固有属性。其一,反应危险性偏高,生产常用缩合、加成、磺化等重点监管危险工艺,多数主反应为强放热反应,热量累积速度快,工艺可调节范围窄,微小参数偏差就可能引发反应失控。其二,生产操作波动大,频繁更换生产品种会反复调整物料配比、反应温度、反应时长,极易造成工艺条件偏离设计标准。其三,物料安全风险集中,生产大量使用低闪点有机溶剂、腐蚀性原料、受热易分解的中间产物,物料挥发、自聚、不相容接触均会诱发安全事故。

1.2 全流程工艺安全风险分类

按照风险产生根源,可将精细化工生产风险划分为工艺固有风险、设备运行风险、人为操作风险、环境影响风险四大类,各类风险相互叠加,构成生产系统主要

隐患来源。

工艺固有风险属于源头类风险,主要包含反应热失控、化学品不相容反应、副反应连锁失控。强放热反应中冷却能力不足、投料速度过快,会快速造成体系超温超压,引发冲料、火灾爆炸;生产线更换产品时设备残留物料未彻底清理,不同化学物质接触易触发不可控副反应。

设备运行风险为长期运行产生的系统隐患,反应釜换热部件结垢老化、输送管线腐蚀渗漏、安全阀与爆破片等泄压附件失效、温度压力流量仪表校准失准,都会导致生产工况失去监控,是工艺事故的重要诱因。

人为操作风险是中小型精细化工企业事故高发主因,间歇生产人工介入环节较多,操作人员违规调整工艺参数、简化作业流程、特殊作业监护缺失,极易发生误操作^[3]。

环境影响风险受厂区所处地域气候制约,低温严寒易造成物料管线冻堵破裂,高温环境会加快有机溶剂挥发,大风天气提升可燃气体扩散范围,间接放大工艺运行的安全隐患。

2 精细化工工艺风险辨识与量化评估通用体系

2.1 多维度标准化风险辨识方法

风险全面辨识是工艺优化的前置基础,依照《精细化工反应安全风险评估规范》GB/T 42300-2022要求,风险排查需要覆盖物料、工艺、设备、作业、外部环境五个维度,实现全工序无遗漏排查。

物料辨识需检测原辅材料、中间品、成品、精馏残渣的闪点、热分解温度、爆炸极限、毒性、化学禁禁性,明确各类物料储存、输送、使用的安全限制条件;工艺辨识聚焦核心合成工序,围绕投料量、反应温度、釜内压力、搅拌速率、冷却介质流量等关键参数,预判

参数偏离正常范围的危害后果；设备与作业辨识针对特种设备、安全仪表、动火受限空间等特殊作业，梳理设备缺陷、仪表失灵、作业审批不合规等隐患，形成完整风险清单。

2.2 行业通用风险量化评估技术

当前精细化工行业主流评估手段包含反应量热测试、Stoessel风险分级、HAZOP危险与可操作性分析三类，组合使用可完成从定性识别到定量定级的全流程风险研判。

反应量热借助绝热加速量热仪、差示扫描量热仪，测定反应体系绝热温升、最大放热速率、起始分解温度等动力学数据，判定反应失控临界条件，是评估本质安全性能的核心检测方式。

Stoessel分级法结合反应热风险、物料危险特性、操作窗口宽度，将化学反应划分为0至4级，3级及以上高危反应，必须配套紧急联锁保护或开展工艺本质安全改造，是行业通用分级管控准则。

HAZOP分析以工艺参数偏差为核心，分析温度异常、压力超标、投料不足、搅拌停运等偏差的诱因、后果与现有防护短板，精准定位系统内重大风险，为工艺整改指明方向。

2.3 四级风险分级管控准则

结合风险发生概率与事故严重程度，将精细化工风险划分为四级管控标准。重大风险可引发爆炸、大面积中毒窒息事故，多集中在放热合成工段；较大风险易造成设备损坏、局部泄漏，具备升级扩大的可能性；一般风险危害范围小、易于现场处置；低风险基本不会造成人身伤害与财产损失。针对不同等级风险实施差异化管理，高风险点位重点监护、定期复测，低风险点位纳入常规巡检，实现风险精细化管控。

3 基于风险管控的工艺安全优化体系构建

精细化工安全优化严格遵循本质安全为首要选择、工程防护作为补充、自动化降低人为失误、管理应急兜底保障的设计顺序，从四个维度搭建通用优化框架。

3.1 工艺本质安全源头优化

本质安全改造从反应路线、物料体系、操作模式上消除固有风险，不依赖外部防护设施提升安全水平。

第一，高危物料替换优化。在不影响产品质量的前提下，以低挥发性、高闪点、低毒型助剂替换易燃易爆有机溶剂，减少高危物料现场存储量与在线使用量，降低可燃蒸汽积聚、中毒风险。

第二，反应操作工艺改良。摒弃一次性全投料的间歇反应模式，改为匀速滴加的半间歇工艺，控制反应釜

内瞬时反应物浓度，减缓放热聚集速度，拉长反应失控预警时间。选用低温高活性催化剂，降低反应启动温度，收窄危险操作区间，提升反应体系稳定性。

第三，多品种生产标准化管控。建立物料相容性核查制度，产品切换生产时制定固定的设备清洗、氮气置换、工艺调试标准，杜绝釜内残留物料引发未知副反应^[4]。

3.2 设备工程防护系统升级改造

工程防护提升装置容错能力，在工艺出现小幅偏差时阻隔事故扩散。

升级换热温控系统，增大放热反应釜换热面积，配置一用一备双路冷却供水系统，冷却水进出口加装流量、温度联锁变送器，介质供给异常自动报警并切断进料，定期对换热设备除垢维护，保障换热效率稳定。

完善泄压与惰性保护，高危反应设备配备安全阀+爆破片双重泄压装置，泄放介质接入密闭收集系统，禁止可燃有毒气体直排大气；配套在线氧含量监测的氮气保护系统，氧含量超标自动补氮，隔绝空气与反应体系接触。

落实分区物理隔离，按照防爆设计规范分隔高危反应区、成品仓储区、中控操作区，以防爆墙体实现人机分离、高低风险区域分离，限制事故波及范围。

3.3 自动化数字化动态风险管控

自动化改造是削减人工误操作风险的核心手段，行业通用方案为DCS集散控制系统搭配独立SIS安全仪表系统。

DCS系统实现投料、温控、压控、液位调节全流程自动化，替换人工现场手动阀门操作，所有工艺参数实时上传中控平台，运行曲线存储不少于一年，便于异常工况回溯分析。

SIS系统与常规控制系统物理隔离，设定超温、超压、冷却中断、搅拌停机联锁触发逻辑，出现紧急工况自动停止进料、开启紧急冷却、切断加热热源，实现无人干预紧急停车。

在车间、储罐区布设可燃及有毒气体探测器，报警信号联动防爆通风设备，重大危险源储罐运行数据远程监控，实现24小时不间断风险预警。

3.4 管理制度与应急闭环管理

硬件优化需配套标准化管理体系落地，形成风险辨识-措施执行-隐患整改-培训复盘的闭环管理。

依据风险评估结果编制分产品、分工况的标准化操作规程，明确工艺参数上下限值与异常处置方案，建立工艺变更审批制度，任何工艺调整均需先开展风险评估方可实施。

从严管控动火、受限空间、盲板抽堵等特殊作业，

规范作业审批、气体检测、现场监护、完工验收全流程要求,严控检修作业安全风险。

针对溶剂泄漏、反应冲料、火灾爆炸等高频事故编制现场处置预案,配齐适配危化品的应急器材,定期开展不同环境下的应急演练;常态化开展安全培训与风险复评工作,持续更新风险清单与管控措施。

4 优化体系应用成效与行业推广价值

4.1 风险管控优化效果

这套四维优化体系可系统性解决精细化工固有风险高、人为隐患多、管控滞后的普遍问题。本质工艺改造从源头降低反应热失控、物料燃爆的根本性风险,有效下调反应危险等级;工程防护与自动化系统提升装置抗故障能力,实现参数自动调节、风险提前报警、险情自动处置,规避设备失效与人工误操作带来的事故;标准化管理体系将安全管理由被动整改转为主动预防,建立长期稳定的风险管控机制^[5]。

4.2 行业通用推广价值

国内大量中小型精细化工企业仍沿用老旧间歇工艺、人工为主的管控模式,安全升级需求迫切。本文构建的优化体系依据国家现行规范制定,不局限于某一类产品或单套生产装置,适配助剂、染料、医药中间体等各类精细化工生产场景,兼顾改造成本与安全收益,可广泛应用于企业双重预防机制建设、安全生产标准化升级,具备极强的通用性与落地性。

结束语

本文分析了精细化工行业生产特征与四类共性安全

风险,介绍了量热测试、HAZOP分析、Stoessel分级等风险评估通用方法,搭建了以风险管控为核心,包含本质工艺优化、工程防护升级、智能自动化管控、管理应急完善的完整安全优化体系。

研究表明,精细化工工艺安全事故的主要诱因是前置风险评估缺失、工艺固有隐患未消除、人工操作不可控、安全防护与管理制度不健全。通过多维度同步优化,能够全方位降低生产全流程安全风险,遏制工艺失控、泄漏燃爆等高发事故,为精细化工行业安全升级提供通用理论支撑。精细化工安全管控正朝着数字化、智能化、预判式预警方向发展,未来可结合在线红外反应监测、大数据风险预判技术,建立实时动态风险评估模型。行业需持续更新风险管控方案,结合新型连续化反应工艺不断提升本质安全水平,推动精细化工产业安全高质量发展。

参考文献

- [1]GB/T 42300-2022,精细化工反应安全风险评估规范[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [2]GB 51283-2018,精细化工企业工程设计防火标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [3]张磊.间歇式精细化工反应工艺风险评估与安全优化[J].化工安全与环境,2023,36(11):15-17.
- [4]王浩.SIS系统与HAZOP分析在精细化工安全生产中的应用[J].当代化工研究,2024(05):132-134.
- [5]刘凯.精细化工工艺安全风险分级管控体系构建研究[J].化工设计通讯,2023,49(06):201-203.