

化学工程工艺安全优化策略及其对成本控制的影响研究

闫玉军 (浙江方华化学有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 随着化工行业绿色智能化发展, 工艺安全改进已成为提升企业核心竞争力的有效手段之一。本文通过对化学工程中工艺安全内涵及意义进行探讨, 对现有工艺安全管理存在的技术和管理层面的问题进行了系统梳理, 并提出相应对策建议包括: 工艺变更、工艺参数调整、设备改造、自动化监控等工艺安全改进方式。具体分析上述措施对建设期及运行期节省费用的影响, 再用实际案例说明其可行性与有效性, 从而为其他化工企业实现工艺安全与节省费用齐头并进提供一定的理论依据和借鉴意义。

关键词: 化学工程工艺; 安全优化; 策略; 成本控制; 影响

中图分类号: TQ086 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 004-0055-03

Research on Safety Optimization Strategies of Chemical Engineering Processes and Their Impact on Cost Control

Yan Yujun (Zhejiang Fanghua Chemical Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang 312000, China)

Abstract: With the green and intelligent development of the chemical industry, process safety improvement has become one of the effective means to enhance a company's core competitiveness. This paper explores the connotation and significance of process safety in chemical engineering, systematically reviews the technical and managerial issues in existing process safety management, and proposes corresponding countermeasures, including process modifications, parameter adjustments, equipment upgrades, and automated monitoring as methods for process safety improvement. It specifically analyzes the impact of these measures on cost savings during both the construction and operational phases, and demonstrates their feasibility and effectiveness through practical case studies. This provides a theoretical basis and reference for other chemical enterprises to achieve simultaneous progress in process safety and cost savings.

Key words: Chemical Engineering Technology; Safety optimization; Strategy; Cost control; Influence

化工厂在双重理念约束下面临着严峻的安全监管以及高昂的成本压力。传统化学工程存在物耗低、能耗大、防护设施不健全等问题, 极易造成事故的发生, 并导致资源浪费与成本升高。因此, 运用科学方法改善工艺安全管理模式从而提升其安全性及有效实现降本增效已经成为化工厂升级转型的必然需求以及全行业关注的核心议题。

针对化工厂改善工艺安全管理模式的实际需求提出可落地的优化策略, 具体分析了各方案对节支的具体途径, 便于企业准确把握在保障工艺安全的同时节约经营费用的方法手段, 提高企业的竞争力, 推动行业朝更安全、更清洁、更高的效率发展。

1 化学工程工艺安全优化的核心内涵与理论基础

1.1 化学工程工艺安全的核心内涵

化工安全主要是指在化工生产的全过程 (包括设计、建造及使用改进), 应用科学技术手段和管理措施防止或减少危害物 (如泄漏、失控反应以及爆炸燃烧等) 对人、机器和自然的伤害的过程。其中我们要做的工作就是将基础安全提升到一个程度, 在对工艺进行设计的过程中, 将危险源缩小甚至是消除; 其次我们想要的是可以控制操作过程中的安全性, 让所有的工艺参数都处于一个相对安全的状态中; 最后则是

针对突发性的安全问题能够及时做出处理, 尽量减少由灾害造成的损失。

CEPS 主要考虑的风险概率、后果严重程度、操作稳定性、物质危险性和应急响应时间等因素作为评估指标, 各因素间相互影响并构成整体性的 CEPS 指标体系来定量指导工艺安全性改进。

1.2 工艺安全优化与成本控制的理论关联

风险成本理论认为, 企业为预防可能发生的风险而产生的全部耗费, 包括事前预防支出、可能遭受的损失以及对上述情况进行处置所发生的相关费用等。提升化工过程安全性能能够降低危险事故的发生概率, 从而减少事故发生后经济损失 (如人员伤亡赔偿金、装置修复费用、停产损失等)。

其次, 适当的投资用于预防性的保护措施 (如工艺变更及装置更换), 可代替高额的事后处置费, 使得风险成本实现最优配置; 同时, 全生命周期成本概念将化工过程中的所有开支纳入设计、运行直至报废全过程之中, 而工艺安全的提升并非单纯增加前期投入, 但其可以综合考量产品全流程以达到各环节成本之间的平衡。例如: 在前期设计过程中对过程路线的优化可在后续使用中节约能耗及维护费用, 进而增加项目总体经济效益。总之, 我们应明白工艺的安全性

与成本控制并非对立关系，他们之间有共同成长发展的规律。

在生产过程中提高物化率和能耗水平以及减少重复劳动和维修成本，就能有效节约经营成本；良好的安全绩效还能树立企业形象，降低融资利息和监管处罚风险，在间接上也达到了增效的目的。反之，若忽视了生产工艺环节的安全管控，安全事件频发，带来更大损失。

2 当前化学工程工艺安全管理的现状与问题

2.1 工艺设计阶段安全冗余不足

部分化工企业在工艺设计阶段过度追求投资成本降低，忽视工艺安全的本质要求，导致工艺路线存在先天性缺陷。一是反应条件设计不合理，未充分考虑物料的反应活性与热力学特性，如部分放热反应的冷却系统设计能力不足，易引发反应失控；二是工艺参数安全阈值设定过窄，缺乏足够的缓冲空间，当外界条件（如原料纯度、环境温度）发生微小波动时，易突破安全界限；三是物料输送与储存环节设计不完善，如管道材质选择不当、阀门密封性能不足，增加了易燃易爆、有毒有害物料泄漏的风险。据行业调研数据显示，约45%的化工安全事故与工艺设计缺陷直接相关。

2.2 工艺操作与管控水平落后

部分企业的一线操作人员缺乏系统的专业培训与安全意识教育，对工艺参数的控制标准与安全风险认知不足，存在违规操作（如擅自调整反应温度、压力）、操作失误（如阀门开关错误）等问题，成为引发安全事故的重要诱因。

某化工企业的统计数据显示，60%以上的小型安全事件与人为操作不当有关。多数中小型化工企业仍采用传统的人工监控模式，对工艺参数的监测存在滞后性，无法实时捕捉参数波动并及时预警；部分企业虽配备了自动化监控设备，但设备老化、数据传输不及时、系统集成度低等问题突出，难以实现对工艺全过程的精准管控。

2.3 设备老化与升级滞后

化工设备是工艺安全的重要载体，部分企业为控制短期成本，长期不进行设备升级改造，导致设备老化、性能下降。一是反应设备（如反应釜、精馏塔）的腐蚀、磨损问题严重，降低了设备的耐压、耐高温能力，易引发设备破裂、物料泄漏；二是安全附件（如安全阀、压力表、爆破片）校验不及时，存在失效风险，无法在工艺参数异常时发挥保护作用；三是环保与安全处理设备（如废气处理装置、应急喷淋系统）能力不足，难以应对突发安全事件，扩大了事故影响范围。

2.4 安全管理体系不健全

部分企业未建立健全工艺安全管理责任制度，未将安全责任明确落实到具体岗位与个人，出现问题时推诿扯皮，影响安全隐患的及时处置。风险辨识与评估方法单一，多依赖经验判断，未采用科学的风险评估工具（如HAZOP、LOPA）对工艺全过程进行系统风险辨识；风险防控措施缺乏针对性，未结合工艺特点与风险等级制定专项防控方案。应急救援预案缺乏可操作性，未针对不同类型的工艺安全事故制定详细的处置流程；应急救援物资储备不足、更新不及时，救援人员专业能力有限，导致事故发生后无法快速有效响应，扩大了事故损失。

2.5 工艺安全优化与成本控制协同不足

部分企业存在“重安全轻成本”、“重成本轻安全”的片面思想，一方面有的企业为提升安全水平盲目增加安全投入，如滥用安全设施设备，导致资源浪费；另一方面，还有的企业为降低生产成本会牺牲一些必要的安全工艺改善费用投入如不再对陈旧设备进行更新改造、减少安全培训投入等等，造成企业工艺安全性水平持续下降，最终又导致了安全事件带来的巨大经济损失。这种协作的非均衡对企业的发展造成了严重后果。

3 化学工程工艺安全优化的关键策略

3.1 工艺路线重构与本质安全提升

首先应该采用对人及环境均无污染或者低风险等级的材料替代高风险等级的传统有害材料，从而从源头上减少工艺过程中的危险性。例如在精密生产中，选用生物基原料而不是有毒化学药品的主要成分，不仅可以大大地减少物料外泄造成的危险性，还可以节约环境治理成本。另外，简化工艺流程可以缩减反应环节以及中间产品的数量，进而缩小货物运输的距离，减少了混合或者泄漏的概率。某农药企业曾经对生产工艺进行改进后，将原来的七步操作缩减成四步，从而降低了六成的物料泄漏概率，而且还节省了近1/3的机械设备及运转费用。

采用技术模拟软件（如AspenPlus和ChemCAD）进行动力学及热工模拟优化反应条件（包括温度、压力以及配料比），保证了工艺效果的前提下拓宽安全操作区间，提高抗扰动能力。例如：对于一个放热反应，在模拟的基础上对降温装置进行优化设计，将该反应的温度安全范围从 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 提升至 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，降低由于温度波动导致的反应失控的概率。

优化精馏、萃取、过滤等分离过程，提高物耗转化率，强化回收集成，降低未参加化学反应的原料以及次级产品积存量是关键因素之一。大量的高活化度

未反应原料以及易变化的次级产物的囤积是造成工业过程安全风险的重要原因。所以,可以通过优化分离方法来降低此类物质的数量从而提高工艺安全性,并因为增加了材料回收率而减少浪费以降低成本。

3.2 设备升级改造与安全性能强化

用高性能耐腐蚀性材料(如钛材或者哈氏合金)代替原有装置材料来提升装置安全性能;对老化的反应罐、蒸馏塔等重要装置进行改造升级,安装新型的搅拌装置及加热装置,确保化学反应更加稳定可靠。例如某石化企业将原本使用的碳钢结构反应罐改为使用钛钢反应罐,从而大大提高了设备抗腐蚀性能,将使用寿命从五年的寿命延长至十五年,并降低了物质泄漏的可能性。

对于老化破损的安全设备应该进行更换,选用精确度高及可靠性高的安全阀、压力表、爆破片等装置确保在工艺工况发生变化时能及时做出响应;同时可以采用一些智能检测设备如在线气体流量传感器、温度压力一体化监测仪、振动检测器等。便于进行工艺状态跟踪监测以及机械设备运转过程中的监测分析工作,在获得相关数据分析的基础上可以对可能发生的设备故障和工艺异常情况进行预判,并采取相应的预防性措施以规避风险。

3.3 智能管控系统构建与过程可控性提升

采用 BIM+ 数字孪生构建工艺数字模型,实现可视化工艺流程仿真和虚拟试验,在设计阶段利用数字模型进行不同工况下工艺过程仿真,发现设计缺陷和安全隐患;在运行阶段利用该数字孪生模型将真实工艺装备和虚拟工艺装备并联。实时跟踪工艺参数变化情况,仿真不同事故工况下的处理效果,提高应急处置能力。

采用 DCS+SIS 的联合控制系统实现了生产过程中工艺指标的数据采集、运算、控制和报警一体化管理。其中 DCS 主要实现生产过程的常规控制,确保工艺指标始终处于正常状态;SIS 是一个相对独立于其他系统的安全保护系统。一旦超出正常值,就会触发连锁保护动作(如停机、断料、启动应急喷淋等),从而避免事故扩大。上述化工厂采用 DCS 和 SIS 的联合使用后,工艺参数控制准确度提升了 80%;处理突发事件时间从几分钟缩短至 1s。

利用大数据分析技术对生产工艺数据、设备状态数据及安全监测数据进行分析,挖掘出其中潜在的风险规律并实现风险趋势预测,如基于历史反应温度数据对未来温度波动的趋势进行预判,并及时调整冷媒系统运行参数;利用智能化 AI 算法对工作人员进行工作行为监控,在实时识别出违章动作后发出警报,

实现工作程序规范化的管控。

3.4 安全管理体系完善与人员能力提升

建立“全员有责、层层负责”的生产安全责任制,明确从公司领导到一线员工的责任,并将产品质量的安全绩效与其考核挂钩,对积极完成安全目标的部门及个人给予奖励,对违反制度规范、管理失职的进行问责追责。二是强化全员安全生产责任。

采用 HAZOP (Risk Identification and Competency Analysis - 风险辨识和能力评估), LOPA (Layer of Protection Analysis - 层级保护分析), JSA (Job Safety Analysis - 工作场所安全检查) 等一系列科学合理的危险性评估技术手段系统地针对整个生产工艺中每个步骤开展危险性评估和确认工作,并形成完整的风险清单库。针对每一个不同类别的风险制定相应的处理方案明确具体落实这些措施的主体、方式方法以及应急处置流程,最终达到“识别风险 - 判断危险程度 - 采取对策 - 验证反馈”的安全闭环控制。

4 结论

化学工程工艺安全优化是提升化工企业安全水平、实现成本控制的核心路径。当前,我国化工企业在工艺安全管理中存在工艺设计安全冗余不足、操作管控水平落后、设备升级滞后、管理体系不健全、安全与成本协同不足等问题。通过工艺路线重构、设备升级改造、智能管控系统构建、安全管理体系完善等优化策略,可有效提升工艺本质安全水平。

这些优化策略不仅能够通过提升原料转化率、降低能耗、减少维修成本等途径实现直接成本节约,还能够通过降低安全事故风险、规避监管处罚等途径实现间接成本规避。案例分析表明,工艺安全优化策略具有显著的经济效益与安全效益,能够实现安全与成本的协同发展。

参考文献:

- [1] 彭雯洁. 绿色化学理念下苯甲酸连续溴化工艺安全实训设计 [J]. 化学工程与装备, 2025, (11): 164-166.
- [2] 褚斌. 化学工程与工艺过程安全评估与风险控制 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(09): 109-111.
- [3] 胡浩, 孟玉, 刘松, 等. 化学除磷前置工艺在酿酒污水处理中的应用研究 [J]. 酿酒, 2025, 52(05): 103-106.
- [4] 韦倩. 绿色化学工程与工艺在化学工业节能减排中的应用研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(16): 109-112.
- [5] 谭开军, 申卫星. 化学工程与工艺对化学工业节能的促进作用 [J]. 科技视界, 2025, 15(21): 71-73.

作者简介:

闫玉军(1978-), 男, 汉族, 辽宁建昌人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 安全工程。