

化工工艺安全设计中的危险因素以及应对策略

陈少霞

湖北兴发化工集团股份有限公司 湖北 宜昌 443700

摘要：化工工艺安全设计是保障生产安全、降低事故风险的关键。本文剖析了化工工艺中物理危险（如高温高压、易燃易爆物）、化学危险（如毒性泄漏、反应失控）、人为操作风险（如误操作、培训不足）及环境因素（如自然灾害）等主要危险源。通过HAZOP、QRA等方法识别风险，并提出本质安全设计、过程控制、设备优化及应急管理策略。研究强调，需从源头降低风险，结合智能化监控与法规合规，推动化工工艺向绿色、安全方向转型。

关键词：化工工艺；安全设计；危险因素；评估方法；应对策略

引言：化工行业因涉及高温高压、易燃易爆及有毒物质，其工艺安全设计直接关系到人员生命、环境保护与经济稳定。近年来，国内外化工事故频发（如天津港爆炸、美国得克萨斯州化工厂泄漏），暴露出工艺设计缺陷、风险评估不足及应急响应滞后等问题。本文旨在系统分析化工工艺中的危险因素，提出科学有效的应对策略，为化工企业安全管理提供参考。

1 化工工艺安全设计的重要性

1.1 从源头降低事故风险

化工工艺的本质安全设计需从工艺路线选择入手。例如，传统的高温高压反应虽能提高反应效率，但伴随超压、超温等风险，一旦失控可能导致爆炸或泄漏事故。通过采用低温低压反应替代高温高压工艺，可显著降低设备压力等级与材料耐受要求，减少因设备失效引发的风险。此外，溶剂的选择同样关键。有机溶剂（如苯、甲苯）易燃易爆且毒性较大，而水基溶剂（如水性涂料、水性胶黏剂）则具有低挥发性、低毒性的优势。例如，某涂料企业通过技术改造，将溶剂型涂料生产线升级为水性涂料生产线，不仅降低了火灾爆炸风险，还减少了挥发性有机物（VOCs）排放，符合环保要求。

1.2 设备与过程控制的安全保障

安全设备与过程控制是化工工艺安全设计的另一大支柱。在设备层面，需选用耐腐蚀、耐高温、抗冲击的材料，如不锈钢、合金钢等，以延长设备寿命并减少泄漏风险。例如，氯碱工业中，氯气管道需采用钛合金材质以抵御强腐蚀性，避免因管道腐蚀导致的氯气泄漏。在过程控制层面，需建立自动化监控系统，实时监测关键参数（如温度、压力、流量），并通过安全仪表系统（SIS）实现超限联锁停车^[1]。例如，某炼油厂通过安装SIS系统，在反应釜温度超限时自动切断原料供应，成功避免了一起潜在爆炸事故。

1.3 标准合规与持续改进

化工工艺安全设计需严格遵循国际标准与国内法规。国际上，API（美国石油学会）标准、IEC（国际电工委员会）标准等为化工设备与工艺安全提供了技术规范；国内方面，《化工过程安全管理导则》等法规明确了工艺设计、设备选型、操作规程等方面的要求。合规性不仅是法律义务，更是企业社会责任的体现。例如，某化工企业因未按照《导则》要求开展HAZOP（危险与可操作性分析），导致一起泄漏事故被监管部门处罚。另外安全设计需持续改进，通过定期评估、事故复盘、技术升级等手段，不断提升工艺安全性。例如，某企业引入AI预测技术，通过大数据分析提前预警设备故障，将事故发生率降低了30%。

2 化工工艺中的主要危险因素

化工工艺涉及高温高压、易燃易爆、有毒有害物质，其生产过程复杂且风险高，一旦发生事故，可能造成人员伤亡、环境污染及经济损失。

2.1 物理危险因素

（1）高温高压操作：化工生产中，反应釜、蒸馏塔等设备常需在高温高压条件下运行，以促进化学反应或分离提纯。然而，长期处于极限工况可能导致设备材料疲劳、密封失效，进而引发超压、超温事故。例如，某石化企业因反应釜压力调节阀故障，导致内部压力超过设计值，最终发生爆炸，造成多人伤亡。（2）易燃易爆物质：氢气、甲烷、有机溶剂等易燃易爆物质在化工工艺中广泛应用，但其泄漏后遇明火、静电或高温可能引发火灾爆炸。例如，某化工厂在储罐区进行动火作业时，因未彻底清理残留溶剂，导致火星引燃泄漏的有机溶剂，引发大火并波及周边储罐，造成重大财产损失。（3）设备老化：管道腐蚀、阀门失效、设备磨损等老化问题可能导致泄漏事故。例如，某氯碱厂因长期未对氯

气输送管道进行检测,管道内壁腐蚀穿孔,氯气泄漏后迅速扩散,造成周边居民紧急疏散。

2.2 化学危险因素

(1) 危险化学反应:聚合、分解、氧化等化学反应若失控,可能释放大量能量,导致爆炸或火灾。例如,某化工厂在生产聚丙烯时,因催化剂过量引发聚合反应失控,反应釜内压力急剧升高,最终爆炸。(2) 毒性与腐蚀性物质:氯气、硫酸、氰化物等有毒有害物质泄漏后,可能对人员健康和环境造成严重危害^[2]。例如,某农药厂因储罐泄漏,大量氰化物流入河流,导致下游水体污染,周边居民饮用水安全受到威胁。

2.3 人为与操作危险因素

(1) 操作失误:误操作阀门、违反操作规程等人为失误是化工事故的重要诱因。例如,某化工厂在切换原料罐时,操作员误将两种不相容的物料混合,引发剧烈反应并爆炸。(2) 培训不足:员工对化学品性质、应急处置流程不熟悉,可能导致事故扩大。例如,某化工厂发生泄漏事故后,现场人员因未佩戴防护装备直接进入泄漏区域,导致多人中毒。

2.4 环境与外部因素

(1) 自然灾害:地震、洪水、台风等自然灾害可能破坏化工设施,引发次生灾害。例如,日本福岛核事故中,海啸导致核电站冷却系统瘫痪,核燃料熔毁并泄漏,造成全球性影响。(2) 周边环境风险:化工厂与居民区、水源地距离过近,可能增加事故后果严重性。例如,某化工厂因选址不当,距离居民区仅数百米,一次小型泄漏事故导致周边居民紧急疏散,社会影响恶劣。

2.5 危险因素的综合作用

化工工艺中的危险因素并非孤立存在,而是相互关联、相互影响。例如,高温高压操作可能加速设备老化,设备老化又可能引发泄漏,泄漏的易燃易爆物质若遇明火则可能引发火灾爆炸;同时自然灾害可能破坏老化设备,导致危险化学品泄漏。因此,化工企业需从系统角度识别和管理风险,避免单一因素引发连锁反应。

3 危险因素评估方法

3.1 危险与可操作性分析(HAZOP)

(1) HAZOP方法概述:HAZOP是一种系统化的风险识别工具,通过引导词(如“无”“过量”“反向”等)与工艺参数(如流量、温度、压力)结合,识别工艺偏差及其可能后果,并提出改进建议。(2) HAZOP应用场景:某化工厂新建丙烯酸生产线时,采用HAZOP分析发现:若反应釜温度过高(偏差为“+10%”),可能导致聚合反应失控,引发爆炸。基于这一结论,团队建

议增加温度联锁控制,当温度超过设定值时自动切断原料供应。(3) HAZOP优势与局限:HAZOP的优势在于全面覆盖工艺流程,能识别潜在的人为失误、设备故障及外部因素。但其局限性在于依赖专家经验,分析结果可能存在主观性,且对复杂系统的分析效率较低。

3.2 定量风险评估(QRA)

(1) QRA方法概述:QRA通过数学模型计算事故发生的概率与后果严重性,量化风险水平。(2) QRA应用场景:某化工厂储罐区储存大量易燃液体,通过QRA分析发现:若储罐发生泄漏,泄漏量与风速、温度相关,爆炸半径可能波及周边1公里范围。基于这一结果,企业将储罐区风险等级定为“高风险”,并增设防火堤与泄漏检测系统。(3) QRA优势与局限:QRA的优势在于提供量化风险数据,支持决策优化(如是否增加安全投入)。但局限性在于需依赖大量历史数据与假设条件,结果可能存在不确定性。

3.3 故障树分析(FTA)

(1) FTA方法概述:FTA是一种自上而下的逻辑分析方法,通过构建故障树追溯事故根本原因,识别关键风险点。(2) FTA应用场景:某化工厂发生氯气泄漏事故后,通过FTA分析发现:阀门失效(占根因的60%)是主因,其中40%源于密封材料老化,20%源于维护不足。基于这一结论,企业改进了阀门选型与维护流程。(3) 逻辑与价值:FTA通过“与门”“或门”等逻辑符号,将事故原因分解为设备故障、人为失误、环境因素等,帮助企业聚焦关键风险点。例如,某化工厂通过FTA发现,阀门失效(占根因的70%)是泄漏事故的主因,进一步分析显示,密封材料老化(占阀门失效的50%)是核心问题^[3]。(4) FTA适用范围:FTA适用于复杂系统的事故根源分析,但需专业人员操作,且对数据完整性要求较高。

3.4 安全检查表(SCL)

(1) SCL方法概述:SCL是一种基于标准与规范的检查工具,通过对照清单逐项检查设备、操作与管理的合规性。(2) SCL应用案例:某化工厂定期使用SCL检查压力容器安全阀,发现某批次安全阀因长期未检测导致启闭压力超标,及时更换后避免了一起潜在事故。(3) SCL实施要点:SCL需基于法规标准(如《压力容器安全技术监察规程》)与行业最佳实践,确保检查内容全面且可操作。例如,定期检查安全阀的启闭压力、密封性,或检测管道腐蚀情况。(4) SCL优势与挑战:SCL的优势在于操作简单、结果直观,可快速发现合规性问题。但挑战在于需持续更新检查标准,且难以覆盖动态风险(如临时操作变更)。

3.5 方法综合应用

在实际应用中,四种方法常结合使用:(1)HAZOP+FTA:通过HAZOP识别工艺偏差,再用FTA追溯偏差的根本原因。例如,某化工厂发现反应釜超温偏差后,用FTA分析发现传感器故障与操作员误判是主因。

(2)QRA+SCL:用QRA量化储罐区风险,再用SCL检查储罐安全设施(如喷淋系统、泄漏检测装置)的合规性。(3)动态调整:根据HAZOP、QRA等分析结果,定期更新SCL内容,确保检查标准与最新风险匹配。

4 危险因素应对策略

4.1 本质安全设计

(1)核心原则:通过工艺与设备优化,降低事故发生的可能性与后果严重性。(2)选用低风险工艺:以催化裂化替代热裂化为例,前者在催化剂作用下进行反应,温度与压力要求更低,能耗减少30%,且避免高温高压引发的爆炸风险。某炼油厂改造后,事故率下降40%。

(3)设计冗余系统:设置备用泵、双阀门控制等冗余配置,防止单点故障引发连锁反应。例如,某化工厂在关键输送管道上安装双阀门,当主阀门失效时,备用阀门可自动切换,避免物料泄漏。(4)实施要点:本质安全设计需贯穿工艺规划、设备选型与布局优化全流程,从源头消除或降低风险。

4.2 过程控制与自动化

(1)技术支撑:通过自动化系统与智能监控,实现工艺参数的实时监测与异常预警。(2)安装安全仪表系统(SIS):SIS可实时监测温度、压力、液位等关键参数,当参数超限时自动触发联锁停车。例如,某化工厂在反应釜上安装SIS,当温度超过设定值时,系统自动切断原料供应并启动冷却系统,避免反应失控。(3)智能化监控:利用物联网传感器、AI预测模型,提前识别设备故障风险。例如,某企业通过振动传感器监测泵体运行状态,AI算法分析数据后提前7天预警轴承磨损,避免泄漏事故。(4)优势:自动化系统可24小时不间断运行,显著提升风险响应速度与准确性。

4.3 设备与材料选择

(1)材料优化:选用耐腐蚀、耐高温材料,延长设

备寿命并降低泄漏风险。(2)耐腐蚀材料:使用不锈钢、合金钢替代碳钢,减少腐蚀导致的泄漏。例如,某氯碱厂将氯气管道材质升级为316L不锈钢,腐蚀速率降低80%,设备寿命延长5倍。(3)定期检测:通过无损检测(NDT)、压力测试等手段,确保设备完整性。例如,某化工厂每季度对压力容器进行超声波检测,及时发现并修复微裂纹,避免重大事故。(4)关键点:材料选择需结合工艺介质特性,定期检测需覆盖所有承压设备与关键部件。

4.4 应急管理预案

(1)预案制定:明确泄漏处置、火灾扑救、人员疏散等流程,定期演练以验证有效性。(2)应急预案:某化工厂针对氯气泄漏事故,制定“三级响应”预案,包括泄漏源控制、区域封锁、人员疏散等步骤,并通过桌面推演与实战演练不断优化。(3)人员培训:开展急救、消防、化学品泄漏处置等专项培训,提升员工应急能力。例如,某企业每年组织全员参加应急技能考核,考核不合格者需重新培训。(4)协同机制:应急管理需与政府、消防、医疗等外部机构联动,确保事故发生时资源快速调配。

结语

化工工艺安全设计需从风险识别、评估到控制形成闭环管理。未来,随着绿色化工技术(如生物催化、低碳工艺)的发展,化工行业将逐步减少对高危险化学品的依赖。同时,智能化监控与法规合规性将成为安全设计的重要方向。企业需建立长效安全机制,推动化工生产向“本质安全”转型,实现经济效益与环境保护的协调发展。

参考文献

- [1]赵隆颖.化工工艺安全设计中的危险因素及消除途径[J].化工管理,2021(15):147-148.
- [2]卜亚东.化工工艺安全设计中的危险因素及消除途径[J].化工管理,2020(35):62-63.
- [3]管华博.化工工艺安全设计中危险识别和控制策略研究[J].中国化工贸易,2020,12(29):28-30.