

化工工艺安全设计中风险因素识别与控制

叶海彬 李 坚 余华胜

浙江丽水有邦新材料有限公司 浙江 丽水 323000

摘 要: 本文围绕化工工艺安全设计展开, 阐述了其遵循的科学合理性、风险控制、系统性、可操作性等原则, 以及涵盖项目立项到投产运行各阶段的设计流程。深入分析了工艺物料、过程、设备设施、人员操作、环境因素等多方面风险因素, 并针对性提出风险因素控制策略, 如物料替代、参数优化、设备选型维护等, 为保障化工工艺安全设计提供参考。

关键词: 化工工艺; 安全设计; 风险因素; 控制策略

引言: 化工产业作为国民经济支柱, 其生产过程涉及高温高压、易燃易爆、有毒有害等复杂工况, 安全风险贯穿工艺设计、设备运行及人员操作全链条。近年来, 化工事故频发, 暴露出物料特性认知不足、工艺参数失控、设备老化失效及应急管理滞后等问题。本文从工艺设计源头出发, 剖析风险因素形成机理, 提出针对性控制措施, 以期推动化工行业安全治理从被动应对向主动防控转型, 为行业高质量发展筑牢安全根基。

1 化工工艺安全设计原则与流程

1.1 化工工艺安全设计原则

化工工艺安全设计需遵循多项核心原则。科学合理原则要求设计严格依据化工生产原理, 确保原料选择、设备选型、产品产出等工艺流程各环节符合客观规律, 契合化学反应特性, 如针对高温高压反应, 需确保设备具备相应的耐压耐热性能, 避免因设计失误引发安全隐患。风险控制原则贯穿设计全程, 通过全面评估工艺过程, 识别易燃易爆物质泄漏等风险点, 采取密封装置防物料泄漏、设置通风系统排有害气体等措施降低风险^[1]。系统性原则从整体出发, 关注设备、单元操作安全性及其关联性, 保障不同工艺流程间物料传输、能量交换的有效衔接, 确保上下游单元参数匹配, 维持系统稳定运行。可操作性原则强调设计方案切实可行, 使工艺流程便于操作人员理解执行, 设备布局利于维护检修, 并通过设置安全警示标识与操作指引, 规范操作行为。

1.2 化工工艺安全设计流程

化工工艺安全设计流程涵盖项目从立项到投产运行的多个关键阶段。项目立项后进入前期规划阶段, 此阶段需对项目开展全面的可行性评估, 明确生产目标与

产品要求。应深入调研项目选址区域的自然环境, 如地质条件、气象状况等, 以及周边设施分布情况, 评估潜在风险, 基于这些调研与评估, 制定初步的安全设计方案, 为后续设计工作指明方向。详细设计阶段依据前期规划方案, 对工艺、设备、管道等进行细致入微的设计。运用专业的设计软件, 对工艺流程进行模拟分析, 通过模拟不同工况下的运行情况, 优化设计方案, 确保工艺的安全性与可行性。在这一阶段, 还需编制详细的施工图纸与技术文件, 为施工建设提供准确、详细的指导。施工建设阶段严格按照详细设计阶段形成的施工图纸与技术文件进行施工操作。施工过程中, 建立严格的质量把控体系, 对设备安装、管道铺设等每一个施工环节进行监督与检验, 确保施工质量符合安全设计标准, 为系统安全运行奠定坚实基础。调试运行阶段对建成的化工系统进行全面测试。在测试过程中, 对设备性能进行检验, 评估设备是否能够满足生产要求; 测试系统的稳定性, 查看系统在不同工况下的运行状况。通过多次试运行, 及时发现潜在问题并加以解决, 应不断完善工艺参数, 使系统达到安全稳定运行的标准, 顺利实现从设计到投产运行的过渡。

2 化工工艺安全设计中的风险因素识别

2.1 工艺物料风险因素

在化工生产过程中, 所使用的各种物料往往具有不同程度的危害性。涉及有毒性的物料可能通过吸入、皮肤接触或误食等途径进入人体, 造成急性或者慢性健康损害。部分物料还可能长期累积于体内, 引发特定职业病。某些有毒气体或蒸气在泄漏后不易察觉, 进一步增加暴露风险。易燃易爆类物料因其物理特性如闪点、燃点及爆炸极限的存在, 在储存、输送与使用过程中若管理不当, 极易导致火灾或爆炸事故。尤其是在通风不良或存在点火源的环境中, 危险性更为突出。腐蚀性物质

通讯作者: 李坚, 1995年10月出生, 2019年毕业于丽水学院, 现就职于浙江丽水有邦新材料有限公司。主要从事化工技术工作

会对设备、管道产生持续侵蚀作用,削弱其结构强度,最终可能导致泄漏甚至系统失效。如果腐蚀过程未被及时发现,后果可能更加严重。某些物料具有较高的化学反应活性,在特定条件下可能发生聚合、分解等剧烈反应,从而引起超压或过热现象,威胁整个系统的稳定运行。这些反应一旦失控,可能引发连锁反应,进一步扩大事故影响范围。

2.2 工艺过程风险因素

温度、压力、流量和浓度等工艺操作条件直接影响生产安全。温度过高会使反应失控,大量热量和气体释放可能引发设备爆炸;压力过大导致设备破裂、物料泄漏;流量不稳定破坏物料配比,浓度异常引发副反应。在间歇反应中,若投料速度过快,瞬间产生的热量无法及时散发,会使反应体系温度急剧上升。复杂工艺流程因涉及多步反应、介质交替,易出现混合不均或反应不完全问题,导致局部热量积聚或有害副产物增多^[2]。缺乏有效监测反馈机制,故障难以及时处理。一些串联工艺中,前序反应未彻底完成就进入下一环节,会使后续反应过程充满不确定性。工艺操作弹性不足时,难以适应原料品质变化或设备故障。操作范围狭窄,在连续化生产中,微小偏差可能迅速放大为系统性问题。当原料纯度降低,杂质参与反应,不仅影响产品质量,还可能改变反应路径,产生未知的危险副产物。

2.3 设备设施风险因素

设备选型不当直接影响系统运行。材料不耐腐蚀、容量不满足需求,都会埋下隐患。在处理强氧化性物料时,若选用普通碳钢材质设备,短时间内就会被腐蚀穿孔。设备制造阶段焊接不良、密封性差,易导致后期渗漏或故障。焊接缺陷处应力集中,在压力波动下可能引发裂纹扩展。设备老化磨损不可避免,若未及时监测维护,将增加泄漏乃至事故风险。设备表面的涂层在长期使用后剥落,金属直接暴露在腐蚀性环境中,加速老化进程。设备现场布置同样关键,间距不足影响检修与救援,危险源靠近人员密集区会放大潜在危害。大型储罐区若未设置足够宽的消防通道,一旦发生火灾,消防车难以靠近施救。设备维护记录缺失或不规范,导致难以追溯设备历史状态,增加故障预判难度。

2.4 人员操作风险因素

操作人员专业知识缺乏,易出现错误开关阀门、设置参数偏差等失误。在紧急停车操作中,若未按正确顺序关闭设备,可能导致物料倒灌。安全意识薄弱者常违反规范,如不按要求穿戴防护装备、擅自更改作业程序。在未进行气体检测的情况下进入受限空间作业,极

易发生中毒窒息事故。长时间连续工作易导致疲劳,降低判断力和反应速度,使人注意力分散。夜班作业时,操作人员因生物钟紊乱,对异常数据的敏感度下降。团队协作不畅、沟通不到位,也会加剧事故风险。交接班时信息传递不完整,后续操作人员可能因不了解设备运行状态而误操作。新老员工技术传承不足,导致操作经验无法有效延续,增加人为失误概率。

2.5 环境因素风险

地震、洪水、雷击等极端天气虽发生频率低,但破坏力大,可能引发厂房受损、电力中断等次生灾害。雷击可能直接击中储罐,破坏防雷装置,引发火灾爆炸。周边工厂排放的废气废水可能干扰生产,厂区事故时有毒气体也易扩散影响周边。当主导风向改变,化工企业排放的有害气体可能飘向居民区。地质条件如地基沉降、土壤腐蚀性等,会影响设备基础稳定性,威胁工艺安全。土壤盐碱度过高,会加速地下管道的腐蚀。气候变化带来的不确定性,如异常降雨或高温天气,也可能影响物料储存和设备运行状态,增加管理难度。环境监测系统的缺失将导致异常情况难以及时发现,延误应对时机,进一步加剧风险程度。

3 化工工艺安全设计中风险因素控制策略

3.1 工艺物料风险控制

在化工生产过程中,物料本身的毒性、易燃易爆性、腐蚀性和反应活性是造成安全事故的主要来源之一。在设计阶段优先选择低毒、低易燃易爆性以及低腐蚀性的物料作为替代品,是降低工艺系统固有风险的关键措施。替代物料的选择必须满足工艺过程的技术要求,确保不会影响产品的质量或生产效率。在实际应用中,还需关注新旧物料之间的兼容性问题,防止因化学性质差异导致新的安全隐患。储存和输送环节的安全控制同样至关重要。应根据物料特性选用相应的防火、防爆储罐,并优化管道布置路径,避免潜在泄漏点的形成^[3]。在关键部位安装安全阀、紧急切断阀等装置,能够在异常情况下迅速隔离危险源,防止事态扩大。同时制定详尽的操作规程,明确物料添加顺序、投料量控制及反应监控方式,通过标准化操作来减少人为失误带来的风险。

3.2 工艺过程风险控制

化工反应通常依赖于特定条件下的热力学和动力学平衡,一旦操作参数偏离正常范围,极易引发失控反应。必须通过实验研究和数值模拟相结合的方式,对反应温度、压力、流量和浓度等关键参数进行优化,确定其安全运行区间,并在控制系统中设置超温、超压、超

流量等报警和联锁保护功能,当检测到异常信号时能自动采取减缓或终止反应的措施。另一方面,简化工艺流程结构有助于提高系统的本质安全性。去除冗余设备和不必要操作步骤,不仅能够减少故障发生节点,还能提高反应的转化率和产物选择性,从而降低副产物生成的可能性。在工艺设计中还应充分考虑操作弹性,使系统具备一定的适应能力,以应对原料波动、负荷变化等外部扰动。例如通过设置备用设备、采用可调节参数的控制逻辑等方式,增强系统运行的稳定性和容错能力。

3.3 设备设施风险控制

设备作为化工工艺实施的基础载体,其选型是否恰当、制造质量如何、布局是否合理都直接影响整个系统的安全性能。在设备选型阶段,需结合具体工艺要求和所处理物料的理化特性,选择具有足够耐腐蚀、耐高温、耐高压能力的材质和规格,保证其长期使用的可靠性。制造过程中应严格执行质量标准,强化全过程监督,确保焊接接头、密封结构等关键部位符合技术规范。设备投入使用前,必须进行水压试验、气密性测试等全面检验,及时发现并修复存在缺陷的部分。为延长设备使用寿命,必须建立完善的维护保养机制,定期开展状态评估、部件更换和性能调整等工作,防止因老化、磨损等问题而导致突发性失效。合理的设备布局也是保障安全的重要方面。应按照功能分区、安全距离的要求进行规划,确保设备之间留有足够的操作空间和应急通道,避免因布局拥挤而影响日常检修或事故发生时的快速处置。对于高危区域内的设备,应尽可能远离人员密集场所,降低事故对操作人员的直接威胁。

3.4 人员操作风险控制

尽管现代化化工装置自动化程度不断提高,但操作人员仍然是保障系统安全运行不可或缺的一环。他们的专业能力和安全意识水平直接影响着日常操作的规范性和应急响应的准确性。企业应加强对员工的专业知识培训和技能提升,使其深入掌握工艺流程、设备结构和控制逻辑,熟悉各项操作规程及应急处置方法。应持续开展安全教育,强化员工对风险的认知,引导他们养成良好的作业习惯,杜绝违规操作行为的发生^[4]。针对不同岗位制定详细的操作手册,明确每个操作步骤的具体要求和注意事项,并建立严格的执行监督机制,对违反规定的

行为及时纠正并进行追责。在排班管理方面,应科学安排工作时间和轮班制度,避免因长时间连续作业造成的注意力下降和判断失误,保障操作过程的稳定性。

3.5 环境因素风险控制

化工企业的运行环境复杂多变,自然条件和周边社会环境都会对其安全构成一定影响。为应对地震、雷电、洪水、台风等自然灾害可能造成的破坏,工程设计中应纳入抗震加固、防洪排水、避雷接地、抗风结构等防护措施,提高设施的整体抗灾能力。同时建立预警响应机制,接入气象、地质等相关部门的信息平台,一旦接收到灾害预警信号,立即启动应急预案,组织人员撤离、设备停运和现场隔离,最大限度地减少损失。化工企业与周边工厂、居民区之间的互动关系也需引起重视。一方面要防范外界污染物、粉尘、噪声等因素对本厂工艺运行的影响;另一方面也要严格管控自身排放,防止在事故状态下有毒有害物质扩散至周边区域,危害公共安全。应加强企业与地方政府、社区之间的沟通联系,共同制定联防联控方案,开展联合应急演练,提升协同处置突发事件的能力。

结束语

化工工艺安全设计中的风险因素识别与控制是一项系统性工程,涉及工艺物料、过程、设备设施、人员操作及环境等多方面。通过对这些风险因素的深入剖析,并采取针对性的控制策略,如科学选型物料、优化工艺参数、强化设备维护、提升人员素质、完善环境应对措施等,可有效降低化工生产过程中的安全风险。未来,随着化工技术的不断发展,需持续完善安全设计体系,为化工行业的安全稳定发展保驾护航。

参考文献

- [1]朱亮.化工工艺设计中安全危险的识别及控制探究[J].辽宁化工,2023,52(08):1208-1210+1236.
- [2]沙亚峰.化工工艺设计中危险因素识别及防控策略[J].云南化工,2023,50(03):138-140.
- [3]张路向.化工工艺设计中的安全管理与危险识别[J].化工管理,2022(08):140-142.
- [4]杨伟佳.化工工艺设计中安全危险的识别及控制探究[J].中小企业管理与科技,2022(05):142-144.