

Research on the implementation path of chemical safety engineering with chemical essential safety as the core

Haitao Xu¹ Xianlin Zhang²

1. Sichuan Tiancheng Safety Technology Evaluation and Consulting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

2. Shaanxi Liangtai Safety Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

With the rapid development of the global chemical industry, the importance of chemical safety engineering is becoming increasingly prominent. This paper focuses on the core of chemical essential safety, and discusses the implementation path of chemical safety engineering. Starting from the concept of the essential safety of chemical industry, a series of specific implementation paths and methods are put forward in combination with each links of the whole life cycle of chemical production, including research and development, design and operation. Through the introduction of advanced technology and concept, it aims to improve the safety of chemical production, reduce the accident risk, and provide a strong guarantee for the sustainable development of the chemical industry.

Keywords

chemical industry is intrinsically safe; chemical industry safety engineering; full life cycle; technological innovation

以化工本质安全为核心的化工安全工程实施路径研究

徐海涛¹ 张先琳²

1. 四川天成安全科技评估咨询有限公司, 中国·四川·成都 610000

2. 陕西良泰安全技术有限公司, 中国·陕西·西安 710000

摘要

随着全球化工行业的快速发展, 化工安全工程的重要性日益凸显。本文围绕化工本质安全这一核心, 探讨化工安全工程的实施路径。从化工本质安全的概念出发, 结合化工生产全生命周期的各个环节, 包括研发、设计、运行等, 提出了一系列具体的实施路径和方法。通过引入先进技术和理念, 旨在提高化工生产的安全性, 降低事故风险, 为化工行业的可持续发展提供有力保障。

关键词

化工本质安全; 化工安全工程; 全生命周期; 技术创新

1 引言

化工行业作为国民经济的重要支柱, 在推动经济增长的同时, 也面临着严峻的安全挑战。化工生产过程中涉及的原料多属于易燃、易爆、有腐蚀性的物质, 且工艺流程复杂, 操作要求严格, 一旦发生事故, 往往会造成严重的人员伤亡和财产损失。因此, 化工安全工程的重要性不言而喻。化工本质安全作为化工安全工程的核心, 旨在从源头上消除或减少化工生产过程中的安全风险, 实现化工生产的安全、高效、可持续发展^[1]。

2 化工本质安全的概念及原则

2.1 化工本质安全的概念

化工本质安全 (Inherent Safety) 最早由英国的 Trevor Kletz 于 1976 年提出, 强调的是从设计阶段就从根本上消除潜在的风险源, 而非依赖于控制、报警或联锁系统来降低事故发生的可能性及减轻其后果。这种完全无风险的状态是一

种理想化的追求, 在实际操作中难以实现。因此, 在实践中, 通常采取一系列技术手段来提升过程的安全性, 使化工生产活动更接近于本质安全的理想状态, 即通过实施更为安全的设计原则和技术措施来减少工艺流程中的危险因素。

2.2 化工本质安全的原则

在化工领域, 本质安全的核心原则主要包括最小化、替代、缓和与简化。最小化原则旨在减少危险化学品的存储量, 并尽可能地降低对高风险设备 (例如高温或高压装置) 的需求, 通过减小这类设备的规模及数量来实现这一目标。替代原则提倡采用更安全或较低风险的原材料、设施或工艺流程来代替那些潜在危害较高的选项。缓和原则是通过调整生产条件, 例如降低温度、压力或是物料流动速度等方法, 以减轻操作过程中的风险水平。简化原则强调去除不必要的复杂环节, 从而有效降低人为失误和技术故障的可能性; 相较于复杂的系统配置而言, 结构较为简单的单元由于其出错概率相对较小, 因此被认为具有更高的本质安全性。

3 化工安全工程实施路径

3.1 研发阶段的本质安全实施路径

3.1.1 本质安全反应路径的选择和优化

在化工产品开发的研究与设计阶段，选择并优化本质安全的反应路径至关重要，这直接关系到整个化工过程的安全性和环境友好性。

在化学反应的设计与实施过程中，首要任务是对所有相关物质进行详尽而周密的评估。这包括原料、中间产物及溶剂等的物理化学性质及其安全特性，这些因素构成了整个工艺流程的基础。为了确保实验的安全性和效率，研究者必须借助先进的分析技术和广泛的数据支持，来深入考察每种材料的潜在风险，如其易燃性、爆炸倾向、腐蚀作用以及毒性水平；同时也要关注它们在特定条件下的化学活性、热稳定性以及与其他成分之间的相容性。例如，在处理某些有机合成步骤时，如果检测到某组分具有高度挥发性和较低闪点，容易产生危险的蒸汽云，则应考虑采取替换策略以降低风险。寻找更加安全可靠的替代方案对于提高整体安全性至关重要，这意味着需要筛选出那些不仅具备更高安全系数，而且符合当前环保标准、能够在生产过程中保持良好稳定性且易于与其他成分共存的新材料或溶剂。一个典型例子是在油漆制造领域，通过将传统上使用的高挥发性有毒溶剂更换为水基溶液，不仅可以有效减少火灾隐患，同时也大大降低了对环境和工作人员健康的负面影响，从而实现了环境保护与安全生产的双重目标^[2]。

其次，深入理解反应系统的复杂性对于确保安全至关重要。在这些系统中，不同物质间可能发生的失控反应、副反应或二次反应构成了潜在的风险源，它们犹如暗藏的“定时炸弹”。开发并应用具有高选择性的催化剂可以有效降低副反应的发生率，成为解决这一问题的有效手段。这种类型的催化剂能够引导化学反应更准确地朝向预期的主要路径发展，显著减少不必要的副产物生成，从而简化了后续处理步骤，并降低了由副产物积累所带来的安全隐患。例如，在某些石油化工过程中的加氢裂化环节，采用新型分子筛催化剂后，目标产物的选择性得到了大幅提升，同时抑制了如焦炭等副产物的形成，保证了工艺流程既高效又安全。此外，探索温和条件下的反应策略同样重要。通过调整反应参数，例如温度、压力或是原料流动状态，可以在不牺牲产品质量的前提下减轻操作风险。一些需要在高温高压条件下进行的聚合反应实验表明，适当优化反应条件，降低温度和压力水平，不仅减少了设备的压力负担与能耗，还有效预防了因过热或过压导致的安全事故，使整个生产过程得以在一个更加稳定且安全的环境中运行^[3]。

3.1.2 依托过程强化技术的安全装备研制

过程强化技术凭借提升生产效能、减小设备体积、降低危险化学品存储量和削减能耗等优势，为增强化工流程安全性带来新契机。近年来，基于微通道、超重力环境、膜分

离技术、反应精馏方法、紧凑与微型换热装置等技术研发的新型设备，以及利用微波、超声波、等离子体等手段的过程强化技术不断涌现，为解决传统化工设施安全隐患提供了有效方案。

以微通道反应器为例，基于微过程强化原理设计的它，液体承载量相较于传统釜式反应器降低幅度超 90%。在处理加氢、氧化、氯化、氟化和硝化这类放热多且涉及强腐蚀性或有毒物质的化学反应时，优势显著。根据应急管理部《化工企业硝化工艺全流程自动化改造工作指南（试行）》，对于安全风险等级达 3 级及以上的硝化工艺，优先推荐采用微通道反应器或者管式反应器等技术。此外，借助微气泡技术实现高效气液混合并推动化学反应的设备，在液相氧化、加氢、卤化和臭氧化等高风险化学过程中广泛应用，极大提升了反应过程的安全性。

3.1.3 工艺操作安全临界条件的界定与管理

明确工艺的安全界限并加以有效管控，是保障工艺安全的关键。在化工工艺开发阶段，当化学反应路径与相关设备确定后，需全面评估温度、压力和浓度等因素对反应失控的影响，进而确定本质安全的操作区间。同时，掌握气体或粉尘爆炸极限、最低氧含量以及爆炸超压等关键数据，严格把控工艺中的浓度条件。在考虑扩大生产规模时，必须考虑物料自加速分解的温度特性，据此合理规划物料的安全储存方案。

例如，在《醋酸乙烯聚合》《环己烷富氧氧化》以及《乙烯氧化制环氧乙烷》等存在较高失控和燃爆风险的工艺研发中，深入研究不同浓度下以及含有不同杂质时物质的行为方式和潜在燃烧爆炸特性，能够精准识别安全操作的临界点。通过严格控制这些参数，确保整个工艺流程安全稳定运行^[4]。

3.2 设计阶段的本质安全实施路径

3.2.1 基于本质安全的设计

在工艺设计、设备选择、安全设施规划以及装置布置等环节，都应充分融入本质安全策略。以 EVOH 生产工艺为例，针对醋酸乙烯—乙烯共聚过程中可能出现的失控风险，通过配置多层次报警系统、紧急冷却机制、应急抑制措施以及主动与被动泄压方案，聚合反应器的安全性能得到显著提升。这些措施从根源上降低了事故发生的可能性，减少潜在风险，保障生产过程安全。

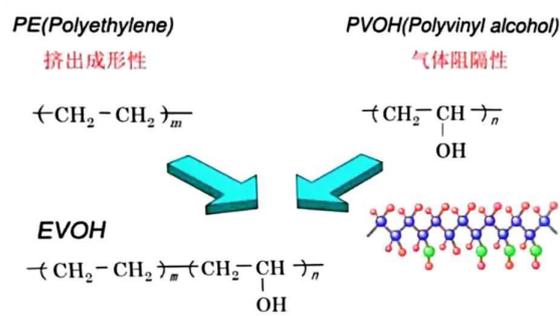


图 1 EVOH 的结构设计

3.2.2 基于风险的设计理念

风险评估在本质安全设计管理体系中占据核心地位,贯穿设计全程。在设计各个阶段,都要将本质安全研究与风险评估作为重点,全方位开展安全设计工作。构建“安全-设计”协同优化机制,以此提升整体的本质安全水平。

在风险识别阶段,可运用安全检查表、故障假设分析法、危险及可操作性研究以及安全审查等工具,全面查找潜在风险;进入风险分析阶段,对泄漏、火灾、爆炸等潜在事故的后果进行量化分析;在风险评价环节,借助故障树分析、保护层分析等手段,判断风险是否处于可接受范围。对于不可接受的风险点,依照保护层原则制定详细防护策略,切实降低安全隐患。比如,在精细化工领域,针对配备硝化、氯化、氟化、重氮化、过氧工艺的生产设备,开展全面反应风险评估并实施风险管理措施,增强工艺流程的本质安全性。

3.2.3 基于性能的设计要点

传统按标准规范设计的方法,在精确风险控制方面存在一定局限。为更好满足实际需求,在遵循现有规范的基础上,还需依据具体性能要求,对本质安全防护层进行精确的定量设计。

例如,运用激光、红外等先进技术探测火焰和气体,通过模拟剖析气体扩散以及火焰传播规律,优化探测器布局,缩小盲区范围;运用数值仿真技术,综合考虑事故影响、防护措施有效性以及设备独特风险特性,科学确定安全间距;研发高效灭火材料和技术,改进灭火设施配置,提升应对火灾等紧急情况的能力;引入微纳级气敏传感器和高灵敏度气体检测装置,强化对微量泄漏的快速识别能力,进而提升企业整体风险管理能力。

3.3 运行阶段的本质安全实施路径

3.3.1 数智化赋能专业安全

随着安全生产和数智化技术的日益融合,石化行业的转型正经历着深刻的革新。借助物联网装置及大数据分析手段,企业能够实现生产流程的即时监控,从而快速识别设备故障或工艺异常情况,有效防止事故的发生。此外,人工智能技术的应用为提升本质安全开辟了新路径,通过利用AI进行预测性分析,企业能够提前发现生产过程中的潜在隐患,并采取预防性维护措施,以避免因设备故障而导致的安全事件。

3.3.2 构建企业安全文化

尽管技术手段对于提升安全水平至关重要,但要达到

根本性的安全保障,构建企业内部的安全文化同样必不可少。每位员工都应当深刻理解安全生产的价值,并在日常工作中严格遵循相关的安全规定。因此,定期向员工提供安全教育成为了企业的必要举措之一;同时,通过建立一套系统化的安全管理机制来确保所有操作环节均符合既定标准也显得尤为重要。在此过程中,管理层的角色尤为关键——他们不仅需要从战略高度给予安全问题足够的重视,还要为实施具体的预防措施提供必要的资源与支持。

3.3.3 设备的全生命周期管理

在设备管理领域,除了确保生产过程中设备的安全性外,企业还应加强对设备从采购到报废整个生命周期的管理。设备老化及维护不当往往是导致多种安全问题的关键因素之一。因此,定期评估设备状态并依据其使用情况实施预见性的保养措施显得尤为重要。此外,随着监控技术的发展,采用基于风险的维护(RBM)策略可以帮助企业更早地识别出潜在的故障点,从而有效预防意外事件的发生。

4 结语

总而言之,化工安全工程的实施路径需要从研发、设计到运行的全生命周期进行综合考虑,以化工本质安全为核心,通过技术创新和管理优化,实现化工生产的本质安全化。这不仅需要在技术层面进行深入研究和应用,还需要在企业文化和管理层面进行相应的变革和提升。通过数智化技术赋能专业安全,构建企业安全文化,以及实施设备全生命周期管理,可以有效降低化工生产过程中的安全风险,保障员工的生命安全和企业的可持续发展。

参考文献

- [1] 许健.化工环保事件看危机公关中新闻信息的有效传播——评《化工安全工程实验教程》[J].化学工程,2024,52(08):108.
- [2] 谈朋,刘畅,吴宏描,朱育丹,朱家华,孙林兵.以化工本质安全为核心的化工安全工程专业建设[J].化工高等教育,2024,41(03):14-18.
- [3] 王桂香,吉明波,巫瑞智,薛云,冯静,马福秋.案例教学法在材料与化工安全工程教学中的应用探索[J].高教学刊,2024,10(13):122-125.
- [4] 张军亮,金侃.面向行业职业需求的双环增长式应用型课程教学改革——安全工程专业化工安全学课程[J].化学教育(中英文),2024,45(06):76-82.
- [5] 张光.化工安全工程存在的问题与采取措施[J].化学工程与装备,2023,(08):238-239+31.