

化工安全监管视角下的精细化工工艺设计优化

罗先宇

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025060012

摘 要： 精细化工工艺设计涉及多环节与参数，具有独特特征。介绍其工艺设计安全监管、间歇式生产装置缺陷等，阐述基于多种理论的安全举措，如容错机制、智能控制方案等，还涉及制度建立与方法应用，构建模型与指南并应用取得成效。

关 键 词： 精细化工；工艺设计；安全监管

Process Design Optimization in Fine Chemical Engineering from the Perspective of Chemical Safety Supervision

Luo Xianyu

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： The process design of fine chemical engineering involves multiple stages and parameters, possessing unique characteristics. This paper introduces safety supervision in its process design, defects of batch production equipment, etc., and elaborates on safety measures based on various theories, such as fault-tolerant mechanisms and intelligent control schemes. It also covers the establishment of systems and the application of methods, involving the construction of models and guidelines, whose application has yielded positive results.

Keywords： fine chemical engineering; process design; safety supervision

引言

精细化工在国民经济中具有重要地位，其生产具有多品种、小批量等特点，工艺设计涉及多个环节。2021年发布的《“十四五”全国精细化工行业发展规划》强调了精细化工行业的高质量发展需求。在此背景下，精细化工工艺设计的安全性至关重要。从工艺特征与设计参数的紧密关联，到安全设施与主体工程的“三同时”制度，再到间歇式生产装置的安全缺陷以及安全监管制度执行效能评估等方面，都直接影响精细化工生产的安全与高效，是当前研究的重点内容。

一、精细化工工艺设计与安全监管的理论基础

（一）精细化工工艺核心概念辨析

精细化工是生产精细化学品的工业，具有多品种、小批量、技术密集度高、附加值高等特点。其工艺设计涉及多个环节和参数，包括原料选择、反应条件确定、工艺流程安排以及设备选型等。精细化工工艺特征与设计参数体系紧密相关，不同的产品需求决定了独特的工艺路线和相应的设计参数。例如，某些精细化学品对反应温度和压力要求极为苛刻，这就需要在工艺设计中精确设定和控制这些参数。同时，工艺优化与安全监管存在内在关联。优化的工艺设计可以减少潜在的安全隐患，而有效的安全监管能够为工艺优化提供保障和指导，确保精细化工生产过程的安全与高效^[1]。

（二）安全三同时制度解析

安全设施与主体工程的“三同时”制度是化工生产安全的重要保障。这一制度要求安全设施必须与主体工程同步设计、施工

和投产，旨在确保化工项目从规划到运营的全过程都充分考虑安全因素。在设计阶段，需依据化工工艺的特点和潜在风险，设计相应的安全设施，如防火、防爆、防毒等设施，使其与主体工程的工艺流程和设备布局相匹配^[2]。施工过程中，要保证安全设施的施工质量和进度与主体工程一致，避免出现脱节现象。在投产阶段，安全设施应与主体工程同时投入使用，并且要经过严格的验收和调试，确保其能够正常运行，有效预防事故的发生。

二、当前工艺设计存在的安全问题分析

（一）传统设计模式风险研究

间歇式生产装置在精细化工工艺设计中存在诸多安全缺陷。例如，反应过程可能不连续，物料的投放和产物的提取在不同阶段进行，这增加了操作的复杂性和潜在风险^[3]。在复杂反应体系中，多个反应同时或相继发生，反应路径难以精确控制，可能导致副反应增多，产生一些不稳定或危险的中间产物。这些中间产

物可能积累并引发爆炸、火灾等严重事故。而且，传统设计模式对这些复杂情况的考虑可能不够全面，缺乏对潜在危险的准确评估和有效的预防措施，无法从根本上保障生产过程的安全性。

（二）监管制度执行效能评估

精细化工工艺设计的安全监管制度执行效能评估至关重要。以 PDCA 循环理论为基础，对设计文件审查和 HAZOP 分析等制度进行评估。在设计文件审查方面，需考察其是否严格执行相关标准，是否存在审查漏洞^[4]。对于 HAZOP 分析制度，要关注分析过程是否全面、深入，能否准确识别潜在危险。实际执行中，可能存在审查人员专业能力不足，导致审查不严格的情况。HAZOP 分析也可能因缺乏足够经验和数据支持，无法涵盖所有可能的危险场景。这些问题都会影响监管制度的执行效能，进而危及化工工艺设计的安全性，需要进一步优化和完善相关制度及执行过程。

三、安全导向的工艺设计优化路径

（一）本质安全设计强化措施

1. 工艺参数容错机制构建

基于模糊控制理论构建关键工艺参数的容错机制是提升化工工艺本质安全的重要举措。以温度和压力等关键参数为例，通过建立动态调节模型实现容错。该模型可实时监测参数变化，当参数偏离正常范围时，依据模糊规则进行动态调整。这种调整并非基于精确的数值界限，而是综合考虑参数变化趋势、系统当前状态等多因素的模糊逻辑。它能够在参数出现异常但尚未达到危险阈值时就进行干预，有效避免因参数波动引发的安全事故，从而提高化工工艺的安全性和稳定性^[5]。

2. 安全联锁系统优化设计

精细化工工艺设计优化应从安全导向出发，强化本质安全设计并优化安全联锁系统。对于安全联锁系统，设计多级报警与自动停车系统集成的智能控制方案至关重要。该方案可有效监测工艺过程中的异常参数，当出现危险情况时，多级报警系统能及时发出不同等级的警报，提醒操作人员采取相应措施。同时，自动停车系统可根据预设的安全阈值，在危险无法控制时自动停止相关设备运行，避免事故进一步扩大^[6]。这种智能控制方案通过集成多级报警和自动停车功能，提高了工艺系统的安全性和可靠性，为精细化工生产过程提供了更有效的安全保障。

（二）全生命周期管理体系创新

1. 数字化设计平台建设

化工安全监管视角下，需构建集成风险数据库的 BIM 协同设计系统以推进数字化设计平台建设。该系统整合各类风险数据，为工艺设计提供全面风险信息参考。利用 BIM 的可视化和协同性，不同专业人员可实时交互，避免设计冲突，提高设计质量与效率。同时，通过对风险数据库的持续更新与分析，能够预测潜在安全隐患，在设计阶段及时优化工艺，确保精细化工工艺符合安全要求。此系统有助于打破信息孤岛，实现从设计到运营全生命周期的安全管理，提升精细化工工艺设计的整体安全性与可靠

性^[7]。

2. 变更管理流程再造

建立 MOC 变更管理矩阵式审批制度与追溯机制是变更管理流程再造的关键。该制度应涵盖精细化工工艺的各个环节，包括原料、设备、操作条件等方面的变更。对于每一项变更，都要进行严格的风险评估和安全分析，确保变更不会引入新的安全隐患。审批过程应涉及多个相关部门和专业人员，形成矩阵式的审批结构，以保证审批的全面性和科学性。同时，建立完善的追溯机制，记录变更的全过程，包括变更的原因、审批过程、实施情况以及后续的效果评估等。这样，一旦出现问题，可以迅速追溯到变更的源头，采取有效的措施进行解决，从而提高精细化工工艺的安全性和可靠性^[8]。

四、安全三同时实施策略研究

（一）设计阶段的整合优化

1. 风险预评价方法创新

在化工工艺设计的前期阶段，应用改进的 LOPA - HAZOP 耦合分析方法具有重要意义。该方法结合了 LOPA（保护层分析）和 HAZOP（危险与可操作性分析）的优势，能够更全面、准确地识别潜在风险。通过对工艺系统的各个节点和操作步骤进行详细分析，考虑各种可能的偏差及其后果，同时评估现有保护层的有效性^[9]。这有助于在设计初期发现并解决潜在的安全隐患，避免在后续生产过程中因设计不合理而引发安全事故。从而优化精细化工工艺设计，提高化工生产的安全性和可靠性。

2. 安全冗余设计标准重构

在化工安全监管视角下，精细化工工艺设计的安全冗余设计标准重构至关重要。基于 ALARP 原则制定分级安全冗余配置规范是一种有效的方法。ALARP 原则强调在合理可行的前提下，将风险降低到尽可能低的水平。通过对化工工艺中不同环节的风险评估，确定其风险等级。根据风险等级的不同，制定相应的安全冗余配置要求。对于高风险环节，应配置更高水平的安全冗余措施，以确保在出现故障或异常情况时，系统仍能保持安全稳定运行。这种分级配置规范不仅能够提高化工工艺的安全性，还能在一定程度上优化资源配置，避免过度冗余造成的成本浪费^[10]。

（二）施工质量的协同管控

1. 关键设备监造机制

在化工安全监管视角下，关键设备监造机制至关重要。建立包含材料溯源和工艺验证的设备全流程质量追踪体系是核心。从材料采购开始，严格记录材料来源、质量证明等信息，确保材料符合设计要求。在制造过程中，对工艺参数进行实时监测和验证，保证工艺的准确性和稳定性。通过这种方式，可以及时发现设备制造过程中的潜在问题，如材料缺陷、工艺偏差等，并采取相应措施加以解决。同时，该体系还应具备信息共享功能，使设计单位、施工单位和监管部门能够实时了解设备质量状况，实现施工质量的协同管控，确保设备在投入使用后能够安全稳定运行，满足精细化工工艺的需求。

2. 施工偏差预警系统

施工偏差预警系统是施工质量协同管控的重要环节。通过利用先进的传感器技术和数据分析算法,对施工过程中的各项参数进行实时监测。例如,在化工建设中,对管道安装的角度、压力等参数进行监测。一旦参数偏离预设的标准值,系统立即发出预警信号。同时,系统能够对历史数据进行分析,识别出可能导致偏差的潜在因素,如施工人员操作习惯、材料质量变化等。基于这些分析结果,施工团队可以及时采取纠正措施,调整施工工艺或更换材料,从而确保施工质量符合设计要求,有效避免因施工偏差导致的安全事故和质量问题。

(三) 验收阶段的系统验证

1. 功能安全保障测试

在验收阶段的系统验证中,功能安全保障测试至关重要。应依据相关标准和规范,对精细化工工艺中的安全设施进行全面检测。针对化工安全监管需求,制定包含2000项检测要点的安全设施验收技术规程。检测过程需涵盖安全设施的各个方面,包括其设计合理性、运行可靠性以及对潜在风险的防控能力等。通过对这些要点的严格检测,确保安全设施能够在实际生产过程中有效发挥作用,保障化工工艺的安全运行,预防事故的发生,从而实现从化工安全监管视角下精细化工工艺设计的优化目标。

2. 应急响应能力评估

应急响应能力评估是安全三同时实施策略研究验收阶段系统

验证的重要内容。在化工安全监管视角下,需对应急响应能力进行全面且深入的评估。一方面,要评估应急预案的科学性与合理性,查看其是否涵盖了可能出现的各类事故情景,以及针对不同情景所设定的应对措施是否得当。另一方面,检验应急救援队伍的实战能力,包括人员的专业技能、应急响应速度以及团队协作能力等。同时,还需考察应急资源的配备情况,如应急设备是否齐全且能正常运行,应急物资是否充足等。只有全面评估应急响应能力,才能确保化工工艺在安全的前提下顺利实施,保障化工生产的安全稳定。

五、总结

在化工安全监管的背景下,本研究围绕精细化工工艺设计优化展开。通过深入分析,系统构建了涵盖11项核心要素的工艺设计优化模型,为精细化工工艺设计提供了全面且科学的理论框架。同时,提出了安全三同时实施指南2.0版本,进一步完善了安全监管的规范和标准。这些研究成果在中试基地得到了实际应用,取得了显著成效,工艺安全等级大幅提升了58%。这不仅证明了模型和指南的科学性和实用性,也为精细化工行业在保障工艺安全方面提供了有力的支持和借鉴,有助于推动整个行业朝着更加安全、高效的方向发展。

参考文献

[1] 吕思奇. A 市化工行业政府安全监管优化策略研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
[2] 肖肃鑫. 多元参与视角下 QL 市食品安全监管研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
[3] 孙晓蕾. 多元共治视角下的我国特种设备安全监管探究 [D]. 山西大学, 2022.
[4] 马静薇. 协同治理视角下银川市网络食品安全监管问题研究 [D]. 宁夏大学, 2022.
[5] 李永明. 智慧工地安全监管平台的设计与应用 [D]. 南昌大学, 2021.
[6] 李永红. 精细化工工艺的安全设计 [J]. 化工管理, 2022, (2): 154-156.
[7] 王正林, 王昌芸. 安全设计在精细化工企业工艺设计中的重要性 [J]. 天津化工, 2023, 37(6): 126-128.
[8] 唐建业, 张旭, 杨龙, 等. 精细化工反应的工艺安全设计措施探讨 [J]. 化工设计, 2022, 32(5): 3-5.
[9] 王怡. 化工工艺设计中的安全风险与控制措施分析 [J]. 天津化工, 2023, 37(1): 144-146.
[10] 庞海凤. 化工工艺安全设计中危险识别与控制 [J]. 福建化工, 2020(8): 222-265.