

精细化工工艺技术提升及安全管理对策

何腾蛟 李 松 何洪波

浙江三方检测科技有限公司 浙江 杭州 311200

摘要：精细化工行业作为化工产业的核心分支，其产品具有附加值高、技术密集、应用领域广等特点，在医药、农药、新材料、电子化学品等领域发挥着不可替代的作用。当前，我国精细化工行业正处于从规模扩张向质量提升转型的关键阶段，工艺技术水平与国际先进水平仍存在差距，且生产过程中物料危险性高、工艺条件苛刻、反应流程复杂等特性，导致安全事故时有发生。本文围绕精细化工工艺技术提升路径与安全管理优化对策展开研究，分析了精细化工工艺的特点与技术痛点，从催化剂创新、反应工艺优化、分离提纯技术升级等方面提出工艺技术提升措施，同时结合风险分级管控、本质安全化改造最新要求，构建全流程安全管理体系。研究成果可为精细化工企业实现高效、安全、绿色发展提供理论参考与实践指导。

关键词：精细化工；工艺技术提升；安全管理；本质安全；风险管控

引言

精细化工是化学工业中技术密集、附加值高、创新性强的核心领域，广泛服务于医药、农药、新材料、电子化学品等关键行业，是衡量国家化工发展水平的重要标志。随着我国化工行业向高端化、绿色化、安全化转型，传统生产模式在工艺水平、生产效率、本质安全等方面的短板日益凸显。本文针对精细化工工艺技术瓶颈与安全管理薄弱环节，系统开展提升路径与管控对策研究，为企业实现高效、稳定、安全、绿色生产提供理论支撑与实践指导。

1 研究背景

精细化工是化学工业的重要组成部分，其产品涵盖农药、医药中间体、染料、香料、表面活性剂等诸多门类，广泛应用于国民经济的各个领域。近年来，随着下游新能源、半导体、生物医药等新兴产业的快速发展，市场对精细化工产品的需求持续增长，对产品纯度、性能及生产过程的绿色化、安全性提出了更高要求。

然而，我国精细化工行业长期存在“小、散、乱”的发展格局，多数企业工艺技术较为落后，仍采用传统的间歇式生产模式，生产效率低、产品收率不高、“三废”排放量较大。同时，精细化工生产涉及的原料和产品多为易燃、易爆、有毒、腐蚀性物质，反应过程常伴随高温、高压、深冷等苛刻条件，且反应体系复杂，副反应多，潜在的安全风险点遍布生产全流程。据应急管理部门统计，近五年我国精细化工行业发生的生产安全事故中，因工艺失控、设备故障、管理疏漏导致的事故占比超过70%，严重制约了行业的高质量发展。因此，加强精细化工工艺技术提升与安全管理体系建设，已成为行业

转型升级的迫切需求。

2 研究意义

从技术层面来看，提升精细化工工艺技术水平，能够显著提高产品收率与纯度，降低原材料消耗和“三废”排放，提升企业的核心竞争力，推动我国精细化工行业向高端化、精细化方向迈进。从安全层面分析，完善安全管理对策，构建科学的风险防控体系，可有效降低生产安全事故发生率，保障从业人员的生命财产安全，维护社会稳定。从产业发展角度而言，工艺技术提升与安全管理优化相辅相成，二者协同推进，能够促进精细化工行业实现绿色、安全、可持续发展，助力我国从化工大国向化工强国转变。

1.3 研究现状

国内外学者针对精细化工工艺技术与安全管理开展了大量研究。在工艺技术领域，国外企业凭借先进的催化剂技术和连续化生产工艺，占据了高端精细化工产品的主要市场份额；国内研究则集中在新型催化剂研发、反应工艺优化、分离技术创新等方面，部分成果已实现产业化应用。在安全管理领域，国际上普遍采用风险评估、本质安全设计、过程安全管理（PSM）等先进理念和方法；国内则逐步建立了“风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制”，但在实际执行过程中，部分企业存在制度落实不到位、风险辨识不全面等问题。本文结合当前行业发展趋势，针对工艺技术与安全管理的协同发展开展深入研究，为行业发展提供更具针对性的解决方案。

2 精细化工工艺的特点与技术痛点

2.1 精细化工工艺的核心特点

2.1.1 技术密集度高：精细化工产品的生产通常涉及

多步化学反应，每一步反应都需要精准控制反应温度、压力、物料配比、反应时间等参数，对工艺技术的要求极高。同时，产品的性能往往取决于分子结构的细微差异，需要通过精细化的工艺设计和严格的过程控制来实现。

2.1.2 物料危险性强：生产原料和中间体多为危险化学品，具有易燃、易爆、有毒、腐蚀性等特性。例如，医药中间体生产中常用的硝化试剂、酰化试剂，农药生产中使用的磷化物、氰化物等，一旦泄漏或操作不当，极易引发火灾、爆炸、中毒等安全事故。

2.1.3 生产流程复杂：多数精细化工产品采用间歇式生产模式，生产流程包括原料预处理、反应、分离提纯、产品精制等多个环节，各环节之间关联性强，某一环节的参数波动可能会影响整个生产流程的稳定性，甚至导致产品不合格或引发安全风险。

2.1.4 绿色化要求高：随着环保政策的日益严格，精细化工生产过程中的“三废”处理和资源循环利用成为行业发展的重要方向。传统工艺往往存在资源利用率低、污染物排放量大等问题，难以满足绿色发展的要求。

2.2 当前精细化工工艺技术的主要痛点

2.2.1 催化剂性能不足：催化剂是精细化工反应的核心，直接影响反应的收率、选择性和反应条件。目前，我国精细化工行业使用的催化剂多为传统的均相催化剂，存在催化效率低、选择性差、难以回收利用等问题，不仅增加了生产成本，还导致后续分离提纯难度加大，产生大量污染物。

2.2.2 反应工艺落后：多数企业仍采用间歇式反应工艺，生产效率低、劳动强度大，且反应过程中物料的加入、产物的取出等操作均为人工或半自动化，容易导致物料配比不准确、反应参数波动大，进而引发工艺失控。相比之下，国际先进企业已广泛采用连续化、自动化生产工艺，生产效率和产品质量稳定性显著提升。

2.2.3 分离提纯技术短板：精细化工产品对纯度要求极高，分离提纯是保证产品质量的关键环节。传统的分离提纯方法如蒸馏、萃取、结晶等，存在能耗高、分离效率低、产品纯度难以达标等问题。对于一些热敏性、高沸点的产品，传统分离方法还可能导致产品分解或变质。

3 精细化工工艺技术提升的核心路径

3.1 新型催化剂研发与应用

3.1.1 非均相催化剂的开发：非均相催化剂具有易于回收利用、可重复使用、对环境友好等优点，是精细化工催化剂的发展方向。研发高效、高选择性的非均相催化剂，如分子筛催化剂、金属有机框架（MOFs）催化剂、负载型金属催化剂等，可显著提升反应效率，降低副产物

生成量。例如，在苯硝化反应中，采用分子筛催化剂替代传统的浓硫酸催化剂，不仅能提高硝基苯的收率和选择性，还能减少废酸的排放，降低环境污染。

3.1.2 生物催化剂的推广：生物催化剂如酶制剂具有高效、专一、反应条件温和等特点，在医药、食品添加剂等精细化工领域具有广阔的应用前景。利用基因工程技术改造酶的结构，提升酶的稳定性和催化活性，可实现传统化学工艺难以完成的反应。例如，在手性药物中间体的合成中，采用脂肪酶作为催化剂，可实现高选择性的不对称合成，产品纯度可达99%以上，且反应条件温和，无需高温高压。

3.1.3 催化剂的回收与再生技术：建立催化剂的回收与再生体系，可降低生产成本，减少资源浪费。对于负载型金属催化剂，可通过过滤、离心、焙烧等方法实现回收；对于生物催化剂，可采用固定化技术将酶固定在载体上，提高其重复使用次数。

3.2 反应工艺的优化与升级

3.2.1 间歇式工艺的精细化改造：对于暂不具备连续化生产条件的企业，可对间歇式工艺进行精细化改造。通过引入自动化控制系统，实现物料配比、反应温度、压力等参数的精准控制；优化反应加料方式和反应时间，减少副反应的发生；采用分段控温、梯度升压等工艺手段，提升反应的稳定性和可控性。例如，在精细化工的缩合反应中，采用滴加式加料替代一次性加料，可有效控制反应速率，防止反应过于剧烈引发冲料或爆炸。

3.2.2 连续化生产工艺的推广：连续化生产工艺具有生产效率高、产品质量稳定、安全风险低等优点，是精细化工工艺升级的重要方向。开发适合精细化工产品的连续化反应装置，如微反应器、管式反应器、固定床反应器等，实现反应的连续化、自动化运行。微反应器作为一种新型的连续化反应设备，具有传质传热效率高、反应体积小、安全可控等特点，特别适合于高危精细化工反应。例如，在硝化、重氮化等强放热反应中，采用微反应器可有效控制反应温度，防止局部过热，显著降低安全风险。

3.2.3 工艺条件的优化：通过正交试验、响应面法等方法，对反应温度、压力、物料配比、催化剂用量等工艺参数进行优化，确定最优的反应条件，提高产品收率和选择性。同时，结合模拟仿真技术，利用Aspen Plus、ChemCAD等化工模拟软件，对反应过程进行模拟和优化，减少实验次数，降低研发成本。

3.3 分离提纯技术的创新与升级

3.3.1 新型分离技术的应用：推广膜分离、超临界流

体萃取、分子蒸馏等新型分离技术，替代传统的蒸馏、萃取方法。膜分离技术具有能耗低、分离效率高、操作简单等优点，可用于精细化工产品的浓缩、提纯和分级；超临界流体萃取技术利用超临界二氧化碳作为萃取剂，具有无毒、无污染、萃取效率高特点，适用于热敏性、高附加值产品的分离提纯；分子蒸馏技术则适用于高沸点、热敏性物料分离，可有效避免产品分解，提高产品纯度。

3.3.2 分离工艺的集成化设计：将多种分离技术集成应用，构建高效的分离提纯工艺。例如，将膜分离与结晶技术相结合，先通过膜分离对反应液进行浓缩，再通过结晶技术得到高纯度产品，可显著提高分离效率，降低能耗。同时，优化分离流程，减少分离步骤，缩短生产周期，降低生产成本。

4 精细化工行业安全管理的优化对策

4.1 强化工艺风险的分级管控

4.1.1 全面开展工艺风险辨识：企业应组织专业技术人员，结合《精细化工反应安全风险评估规范》，对生产工艺进行全面的风险辨识。采用危险与可操作性分析（HAZOP）、故障类型和影响分析（FMEA）等方法，识别工艺过程中的潜在风险点，分析风险发生的可能性和后果严重程度。重点关注硝化、重氮化、磺化、氯化等高危险反应，对反应的热风险、物料相容性风险、设备故障风险等进行详细评估。

4.1.2 实施风险分级管控：根据风险辨识结果，将工艺风险划分为不同的等级，针对不同等级的风险采取相应的管控措施。对于重大风险，应制定专项管控方案，设置安全联锁装置，加强监控和巡检；对于较大风险，应优化工艺参数，完善操作规程；对于一般风险，应加强日常管理和员工培训。同时，建立风险管控台账，实时更新风险状态，确保风险可控在控。

4.2 推进生产装置的本质安全化改造

4.2.1 设备的本质安全化设计：选用本质安全型设备，减少设备故障引发的安全风险。例如，采用防爆电机、耐腐蚀管道、耐高温高压的反应釜等；在设备设计中设置安全防护装置，如安全阀、爆破片、紧急切断阀等，确保在异常情况下能够及时泄压或切断物料。对于高危反应装置，应设置紧急停车系统（ESD），当工艺参数超过安全限值时，系统能够自动停车，防止事故扩大。

4.2.2 工艺的本质安全化优化：通过工艺优化减少危险因素，降低安全风险。例如，采用温和的反应条件替代高温高压条件；采用低毒、低危险性的原料替代高毒、高危险性的原料；采用连续化工艺替代间歇式工艺，减少

人工操作环节。本质安全化改造是从源头上降低安全风险的根本措施，能够显著提升生产过程的安全性。

4.3 完善安全管理制度与操作规程

4.3.1 建立健全安全管理制度：企业应建立完善的安全生产责任制，明确各级管理人员、技术人员和操作人员的职责；制定工艺管理、设备管理、人员管理、应急管理等方面的规章制度，确保安全生产有章可循。同时，加强制度的执行力度，定期对制度的落实情况进行检查和考核，对违反制度的行为进行严肃处理。

4.3.2 制定精细化的操作规程：根据工艺特点和设备特性，制定详细、准确的操作规程。操作规程应明确各操作步骤的参数要求、操作方法、注意事项等，确保操作人员能够严格按照规程进行操作。对于高危反应，应制定专项操作规程，设置操作权限，禁止无关人员操作。同时，定期对操作规程进行评审和修订，确保其适用性和有效性。

5 结论

研究结论

本文通过对精细化工工艺技术提升路径与安全管理对策的研究，得出以下结论：精细化工工艺具有技术密集度高、物料危险性强、生产流程复杂等特点，当前存在催化剂性能不足、反应工艺落后、分离提纯技术短板等技术痛点；通过新型催化剂研发、连续化工艺推广、新型分离技术应用等措施，能够有效提升精细化工工艺技术水平；强化工艺风险分级管控、推进本质安全化改造、完善安全管理制度等对策，可显著降低生产安全风险；工艺技术提升与安全管理优化协同发展，是实现精细化工行业高质量发展的根本途径。

参考文献

- [1]张启明,李红梅.精细化工工艺优化与绿色化生产技术研究[J].化工进展,2024,43(5):2105-2112.
- [2]王志强,刘芳.精细化工反应安全风险评估方法与应用[J].安全与环境学报,2024,24(3):1245-1251.
- [3]陈建国,赵文静.微反应器在高危精细化工反应中的应用进展[J].现代化工,2025,45(2):67-72.
- [4]李向阳,孙健.精细化工行业本质安全化改造路径探讨[J].化工安全与环境,2024,37(18):10-13.
- [5]中华人民共和国应急管理部.精细化工反应安全风险评估规范（AQ/T3046最新版）[S].北京:应急管理出版社,2024.
- [6]刘军,王丽娜.新型非均相催化剂在精细化工中的研发与应用[J].催化通报,2025,36(1):45-53.