

精细化工合成中微通道反应器的应用探讨

李庆明

山东鸿运工程设计有限公司安徽分公司 安徽 合肥 230000

【摘要】：精细化工传统合成工艺普遍存在传质效率偏低、温度控制困难、副产物生成量大、安全环保风险突出等问题，制约行业高质量发展。本文围绕微通道反应器在精细化工合成领域的应用展开探讨，以甲苯绝热硝化反应为研究案例，系统分析微通道反应器优化工艺的关键路径与实际成效。研究证实，微通道反应器可有效强化多相传质、精准调控反应温度、缩短反应周期，适配高危强放热合成反应。该技术能显著提升生产安全性与产品纯度，减少三废排放并降低综合生产成本，为精细化工绿色化、安全化工艺升级提供重要参考。

【关键词】：精细化工；微通道反应器；绝热硝化；工艺优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.061

精细化工是现代化工产业的重要组成部分，其合成反应多具有强放热、多相混合、选择性要求高的特点。传统釜式工艺技术成熟，但在安全控制、产品品质与环保性能方面难以契合行业升级需求。微化工技术凭借微型化通道结构与连续流特性，为解决上述痛点提供了新方向。本文以甲苯硝化制备单硝基甲苯为典型案例，探讨微通道反应器在精细化工合成中的应用路径与实践价值，为相关工艺革新提供参考。

1 精细化工传统合成工艺面临的突出问题

1.1 反应传质效率低下

传统釜式反应器内部流场分布不均，流体在反应器内形成明显的死区与涡流区域，导致不同组分间的接触面积受限，液液两相界面更新速率缓慢。甲苯硝化等液液非均相反应依赖两相界面进行物质传递，传统工艺中两相混合仅依靠机械搅拌产生的剪切作用，搅拌桨边缘与中心区域剪切强度差异显著，分散相液滴粒径分布跨度大，部分液滴长时间处于未充分接触状态，反应物分子扩散路径延长，传质阻力持续增大。低传质效率直接造成反应速率受限，整体反应周期被迫延长，同时引发局部区域反应物浓度失衡，为后续副反应发生创造条件，严重制约反应过程的可控性与稳定性。

1.2 温度控制难度较大

强放热硝化反应体系在传统釜式设备中热量传递路径受阻，反应生成的大量热量难以通过釜壁及时导出，热量在反应器内部不断积聚形成局部高温热点。甲苯绝热硝化过程中反应热释放速率快、总量大，釜内温度场呈现中心高、边缘低的梯度分布，热点区域温度可远超工艺设定温度，且温度波动幅度难以精准调控^[1]。高温环境不仅会加速反应物分解，还会改变反应动力学参数，导致反应选择性大幅下降，同时高温条件下设备内壁易发生腐蚀与结垢，进一步削弱传热效率，形成热量积聚的恶性循环，使反应体系始终处于温度失控的潜在风险之中。

1.3 副产物生成率偏高

传统合成工艺缺乏对反应选择性的有效调控手段，反应物在釜内停留时间过长，主反应完成后过量反应物易与产物发生二次反应，生成多种副产物。甲苯硝化制备单硝基甲苯过程中，釜内局部硝酸浓度偏高、温度偏高区域，甲苯易发生深度硝化反应生成二硝基甲苯，同时苯环氧化反应加剧，生成多硝基酚类杂质。副产物生成过程无有效抑制机制，二硝基甲苯与多硝基酚持续累积，不仅降低目标产物单硝基甲苯的收率，还会与主产物形成共沸体系，后续精馏分离难度显著提升，杂质难以彻底去除，直接影响产品纯度与品质稳定性，造成原料利用率下降与资源浪费。现有间歇釜式硝化工艺换热效率有限，放热集中时温控滞后，无法快速移除局部热点，进一步放大副反应概率。富集的酚类杂质化学性质活泼，精馏受热易受热分解产生焦油残渣，残渣黏附设备内壁增大清理成本，废液固废排放量随之增多，额外抬高环保处理成本与生产综合能耗。

1.4 安全环保风险突出

传统釜式工艺中反应体系持液量大，危险化学品在设备内存量高，强放热反应热失控风险难以规避，局部高温易引发物料分解甚至爆炸事故，安全管控难度极大。工艺运行过程中副产物生成量大，多硝基酚需通过大量碱液洗涤去除，产生高浓度碱性废水，废酸中溶解大量有机杂质，废水、废酸处理流程复杂，处理成本高昂，且易造成生态环境污染。同时，传统工艺多为间歇式操作，批次间反应条件难以保持一致，产品质量稳定性差，生产过程自动化程度低，人工干预环节多，进一步放大安全与环保风险，难以满足现代精细化工绿色化、安全化的生产要求。此外，间歇生产频繁启停设备，每次投料、卸料阶段易出现物料滴漏、挥发损耗，既损耗原料又造成车间废气无组织排放。各类废液废渣无法连续资源化回收，大量废酸只能中和处置，有价值组分难以回收利用，进一步压缩企业经济效益，制约工艺规模化提质增效。

2 微通道反应器优化精细化工合成的关键路径

2.1 强化多相反应混合传质

微通道反应器采用 0.5mm 特征尺寸通道结构, 形成高比表面积反应空间, 从结构层面提高液液两相混合与传质效率。设备内部设置专用微混合单元, 搭配 316L 不锈钢预热盘管与分散相通道, 使流体在进入反应区前完成均匀分配与快速分散, 有效消除传统釜式反应器内普遍存在的涡流、死区及剪切强度不均等问题。甲苯硝化属于典型液液非均相反应, 传质效率直接决定反应进程与选择性, 微通道通过快速更新两相界面, 显著降低传质阻力, 使反应物接触更加充分。在硝酸甲苯摩尔比为 0.6、硫酸硝酸质量比为 10 的工艺条件下, 高效传质环境使硝酸利用率稳定大于 97%, 避免局部浓度失衡引发副反应, 为甲苯过量条件下单硝基甲苯高选择性合成提供可靠传质基础, 推动硝化反应过程向可控化与高效化方向发展^[2]。

2.2 实现反应过程精准控温

微通道反应器依托高导热壁面与多区段温度调控结构, 构建高效传热体系, 可快速导出甲苯硝化等强放热反应释放的大量热量, 从根本上杜绝釜式工艺中局部热点频发的现象。工艺采用 35℃ 反应初温的绝热硝化模式, 通过高精度温度监测与动态热交换调控机制, 持续维持体系温度稳定, 避免热量在局部区域积聚, 实现全过程温度可控。即使在高放热速率条件下, 体系绝热最高温度仍可稳定控制在安全阈值范围内, 有效规避热失控风险。精准控温可显著抑制深度硝化与氧化等副反应, 使二硝基甲苯质量分数稳定在 0.84%, 多硝基酚质量分数降至 0.12%, 大幅提升反应选择性与目标产品纯度, 为精细化工强放热工艺提供可靠的温度控制技术路径。

2.3 缩短反应停留时间

微通道反应器采用连续流运行模式, 通过 0.5mm 微通道结构与合理管路配置, 显著压缩反应停留时间, 将传统釜式工艺数小时的反应周期缩短至 240s, 实现生产效率的大幅提升。设备采用 T 形单通道结构, 搭配 4m 长预热盘管与填充氧化铝微球的延时盘管, 精准调控流体停留时间分布, 避免物料返混造成的过度反应或反应不完全现象。甲苯绝热硝化体系中, 240s 的停留时间可保证主反应充分进行, 硝酸利用率稳定大于 97%, 同时有效避免停留时间过长引发的多硝化副反应, 减少杂质生成。停留时间的精准可控, 结合微通道高效传质传热特性, 使反应体系始终处于最优反应状态, 为精细化工合成过程高效化、连续化提供关键技术支撑, 契合现代精细化工对高效生产、绿色降耗的实际需求^[3]。

2.4 适配高危险强放热反应

微通道反应器具备微尺度持液特性, 危险物料在线存量极低, 从本质上降低强放热反应的安全风险, 能够有效适配甲苯硝化等高危险工艺场景。工艺采用 73% 硫酸作为反应介质, 结

合绝热硝化设计理念, 充分利用反应自身释放的热量维持体系温度, 无需额外加热, 同时依靠高效传热能力避免热量积聚, 从源头杜绝热失控隐患。在甲苯过量条件下, 微通道同时发挥萃取功能, 将酸相中有机物质量分数降至 0.18%, 有效降低后续废酸处理压力与环保风险。结合硝酸甲苯摩尔比 0.6、硫酸硝酸质量比 10 的工艺参数优化, 可实现高危险强放热反应的稳定、安全运行, 为精细化工高危工艺绿色化、本质安全化转型提供切实可行的技术路径, 具有重要工程应用价值。整套装置连续化闭环运行, 便于自动化联锁管控, 可实时在线调节进料配比与流速, 产品批次稳定性远优于传统釜式生产, 助力硝化类化工工艺完成智能化升级改造。

3 微通道反应器赋能精细化工合成的实际成效

3.1 显著提升生产安全水平

微通道反应器以微尺度反应空间构建本质安全体系, 单通道内物料持液量远低于传统釜式, 甲苯硝化体系中危险物料在线存量实现大幅缩减, 从源头规避大规模物料泄漏与热失控风险^[4]。采用 73% 硫酸介质配合绝热硝化工艺, 反应热可被体系高效导出, 全程避免局部高温热点形成, 将绝热最高温度稳定控制在安全阈值内。相较于传统釜式工艺, 反应时间由数小时压缩至 240s, 高温反应时长显著缩短, 进一步降低副反应引发的安全隐患。工艺参数控制在硝酸甲苯摩尔比 0.6、硫酸硝酸质量比 10 的最优范围, 可稳定抑制危险副产物生成, 实现强放热硝化反应的全程可控, 为精细化工高危工艺安全化生产提供可靠技术支撑, 具备重要的工程安全参考价值。

3.2 有效提高产品纯度质量

微通道反应器通过精准调控反应进程, 抑制杂质生成路径, 实现单硝基甲苯产品纯度的显著提升。在甲苯过量的连续绝热硝化体系中, 硝酸利用率稳定超过 97%, 原料转化效率大幅提高, 减少未反应物料残留对产品纯度的影响。反应选择性得到精准调控, 深度硝化副反应被有效抑制, 二硝基甲苯质量分数控制在 0.84%, 避免多硝基杂质混入目标产物。氧化类副反应同步受限, 多硝基酚质量分数降至 0.12%, 该类杂质易与主产物形成共沸物、增加分离难度, 其含量降低可减少后续精馏工序的提纯负担, 提升产品品质稳定性。相较于传统釜式工艺, 杂质含量降低幅度超过 50%, 产品质量批次一致性显著增强, 为医药、农药、染料等下游应用提供高纯度中间体保障, 具备重要的产品质量优化参考价值。

3.3 大幅降低三废排放总量

微通道反应器依托甲苯过量的萃取机制与高效转化特性, 从工艺源头削减三废生成量, 契合精细化工绿色生产要求。甲苯过量条件下可发挥萃取作用, 将酸相中有机物质量分数降至 0.18%, 显著减少废酸中有机杂质含量, 降低废酸处理过程中的污染物排放。副产物生成量大幅缩减, 多硝基酚质量分数降

至 0.12%，传统工艺中需大量碱液洗涤去除该类杂质，碱洗废水排放量随之降低，减少高浓度碱性废水对环境的污染。二硝基甲苯质量分数控制在 0.84%，副产物总量减少可降低固废处置压力，避免副产物堆积带来的环保隐患。相较于传统釜式工艺，多硝基酚生成量降低 50%以上，废酸有机杂质去除效率提升，三废处理流程简化，污染物排放总量实现显著下降，为精细化工绿色低碳转型提供可借鉴的减排路径，具备重要的环保应用价值。见图 1。

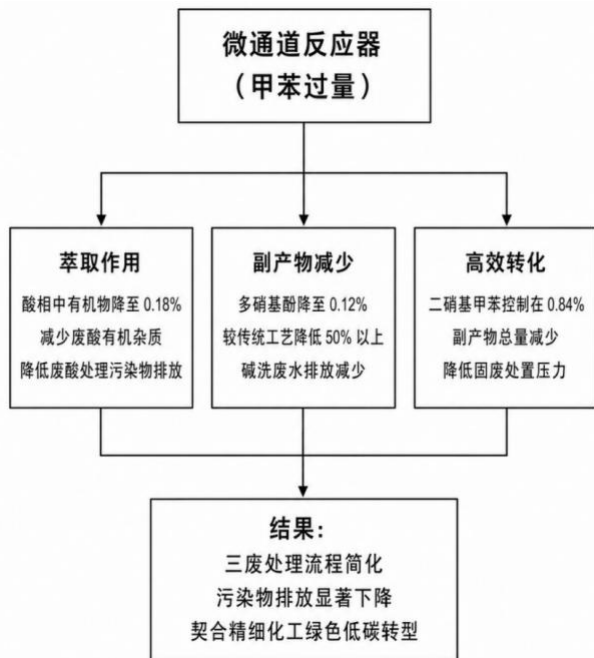


图 1 微通道反应器绿色减排示意图

参考文献:

- [1] 薛潇,商敏静,苏远海.微反应器内药物连续流合成的研究进展[J].化工学报,2024,75(4):1439-1454.
- [2] 姜圣坤,韩博,赵鑫,等.微通道反应器中甲苯过量连续绝热硝化制备单硝基甲苯[J].化工进展,2022,41(6):2910-2914.
- [3] 王佳,秦修培,郭妮京,等.基于传热模拟的微通道工艺安全优化研究[J].固体火箭技术,2025,48(4):579-586.
- [4] 陈饶,赵鑫,陈戴欣,等.微反应器内甲苯连续二硝化制备二硝基甲苯[J].化工学报,2024,75(3):867-876.
- [5] 范雨,周维友,何明阳,等.微通道反应器内间二甲苯连续氧化合成间苯二甲酸工艺研究[J].现代化工,2025,45(2):146-150.

3.4 全面降低生产综合成本

微通道反应器通过优化原料利用、简化后处理流程、缩短生产周期，实现精细化工合成全流程成本的系统性降低^[5]。硝酸利用率稳定超过 97%，原料转化效率提升减少物料浪费，降低甲苯、硝酸、硫酸等核心原料消耗成本。副产物含量大幅降低，二硝基甲苯质量分数为 0.84%、多硝基酚质量分数为 0.12%，杂质减少可降低精馏、洗涤等后处理工序的能耗与试剂消耗，减少碱液、水等辅料投入。反应停留时间缩短至 240s，替代传统釜式数小时的反应周期，设备单位时间产能提升，减少设备折旧与人工运维成本。废酸中有机物质量分数降至 0.18%，废酸处理难度降低，简化处理工艺、减少处理设备投入，降低环保处理成本。多硝基酚生成量降低 50%以上，废水处理负荷减轻，进一步削减环保运行支出，整体实现原料、能耗、环保、运维等多维度成本下降，为精细化工工艺节能降耗提供可参考的成本优化方案，具备重要的工业应用经济价值。

4 结语

精细化工合成工艺升级需兼顾安全、环保与高效多重目标，微通道反应器凭借独特的微尺度结构与连续流特性，成为破解传统工艺瓶颈的有效技术手段。其在强放热、高危硝化反应中的应用，展现出强化传质、精准控温、缩短周期的显著优势，有效平衡生产安全、产品质量与环保排放的核心需求。该技术为精细化工高危工艺的绿色化、本质安全化转型提供可行路径，相关工艺优化思路与实践经验，对同类精细合成反应的技术革新具有重要借鉴意义。