

# 连续流反应器在硝基胍生产中的应用

马志超

宁夏贝利特生物科技有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17486

**[摘要]** 工程化设计是连续流反应器实现硝基胍工业化生产落地、突破传统工艺瓶颈的核心支撑。本研究立足硝基胍生产工艺升级需求,系统梳理连续流反应器在该领域的实施现状,剖析工程化设计、过程控制、评价体系及保障条件存在的问题,提出针对性优化策略。研究聚焦工程化设计与生产实践的深度适配,为连续流反应器在硝基胍生产中安全、高效应用提供理论指导与实践范式。

**[关键词]** 连续流反应器; 硝基胍; 工程化设计; 生产工艺; 过程优化

**中图分类号:** TQ226.61 **文献标识码:** A

## Application of Continuous Flow Reactors in Nitroguanidine Production

Zhichao Ma

Ningxia Belite Biotechnology Co., Ltd.

**[Abstract]** Engineering design serves as the core support for implementing continuous flow reactors in the industrial-scale production of nitroguanidine, overcoming the bottlenecks of traditional processes. Based on the needs for upgrading nitroguanidine production technology, this study systematically reviews the current implementation status of continuous flow reactors in this field, analyzes existing issues in engineering design, process control, evaluation systems, and supporting conditions, and proposes targeted optimization strategies. The research focuses on the deep integration of engineering design with production practices, providing theoretical guidance and practical paradigms for the safe and efficient application of continuous flow reactors in nitroguanidine production.

**[Key words]** Continuous Flow Reactor; Nitroguanidine; Engineering Design; Production Process; Process Optimization

硝基胍作为重要的含能材料与化工中间体,其生产工艺的安全性、稳定性与高效性直接影响下游产业发展质量。传统硝基胍生产长期依赖间歇式釜式反应,在强放热控制、产物均一性等方面存在难以解决的问题。连续流反应器凭借精准控温、高效传质的技术优势,成为工艺升级的重要方向。工程化设计作为连续流技术从实验室走向工业生产的桥梁,其科学性直接决定技术应用效果。本研究围绕连续流反应器在硝基胍生产中的工程化设计应用展开,旨在破解技术转化难题,推动生产工艺向现代化转型。

### 1 连续流反应技术在硝基胍生产的应用现状

连续流反应技术在硝基胍生产中的应用已从实验室小试逐步向中试及小规模工业化示范推进。目前行业内主要探索微通道反应器、管式反应器及静态混合反应器三类设备的应用。实验室层面,连续流技术已实现反应过程精准控温与稳定运行,在产物选择性控制上展现优势。中试阶段,部分企业搭建小规模连续流装置,完成原料预处理、反应参数匹配、产物分离等关键单

元验证。小规模工业化应用中,连续流反应器已初步实现生产连续化,在降低安全风险、提升效率上取得一定成效,但尚未形成成熟的大规模工业化应用案例。

### 2 连续流反应器在硝基胍生产中存在的问题

#### 2.1 工程化设计针对性不足

现有工程化设计未充分结合硝基胍反应特性,针对性不强。反应器结构设计未考量强放热与物料黏度变化的耦合效应,换热结构与放热速率不匹配,易出现局部温度超标;内构件未优化混合需求,难以实现高效传质。放大设计缺乏科学方法,多采用几何相似放大,未考虑传热传质效率变化,导致放大后性能与小试结果偏差较大。材质选型虽关注耐腐蚀性,但未与温度、压力等工况精准匹配,存在腐蚀速率过快、使用寿命缩短等问题。

#### 2.2 反应过程控制与转化效率衔接不畅

过程控制与转化效率未建立高效衔接机制。控制参数设定基于经验,缺乏操作参数与转化效率、选择性的定量关联模型,难以通过参数优化实现效率最大化。转化效率检测依赖离线取

样,结果滞后无法及时反映反应变化,导致控制调整滞后于实际状态<sup>[1]</sup>。多参数耦合时缺乏有效解耦策略,温度、流量、配比等相互影响难以协同优化,制约转化效率提升。

### 2.3 连续化生产的评价体系不完善

评价体系未形成科学框架,难以全面反映工程化效果。评价指标单一,多聚焦产物收率与纯度,对安全、能耗、环保等工程化关键指标关注不足,无法衡量综合价值。评价方法缺乏动态性与实时性,多采用生产周期结束后的静态总结,难以捕捉参数变化影响,无法及时发现潜在问题。评价标准无行业统一性,企业基于自身条件制定,结果缺乏可比性,不利于技术交流与水平提升。

### 2.4 工程实施保障条件存在短板

保障条件在材质适配、密封防护、应急处置等方面存在短板。耐蚀材质综合性能与需求存在差距,部分耐蚀材质力学性能不足,难以适应温压变化;部分力学性能优良材质耐蚀性无法匹配强酸性环境。密封技术与工况适配性差,强腐蚀、温压条件导致密封件易老化失效,存在泄漏风险。应急处置系统不完善,针对硝基胍分解引发的爆炸、有毒气体泄漏等突发事件,缺乏快速响应与高效处置方案。

## 3 连续流反应器在硝基胍生产中的优化策略

### 3.1 优化工程化设计

结合反应强放热、黏度变化特性,采用“前段微通道+后段静态混合”复合结构。目前行业内已有企业尝试单一管式反应器用于硝基胍环化反应,但因换热面积不足,反应温度波动超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,产物纯度仅达92%;而部分小规模生产选用单一微通道反应器时,又因物料停留时间不足导致环化不完全。优化后,前段微通道单元利用高效传热特性,快速移除硝化反应热量,避免局部升温;后段静态混合单元优化内构件叶片角度与排布,强化环化反应混合效果,提升传质效率。分段优化反应器内径、长度等参数,使结构与反应进程精准匹配,保障反应平稳。

建立基于反应动力学与数值模拟的放大方法。某企业曾采用几何相似放大将实验室微通道反应器放大10倍用于中试,因未考虑传热效率下降,导致反应热点温度超过安全阈值,被迫停车整改。本研究通过小试获取反应速率、活化能等动力学参数,为放大提供理论依据。利用计算流体力学(CFD)模拟流场、温度场、浓度场,预测放大后传热传质变化。采用“分步放大+逐级验证”策略,从实验室到中试再到工业化,每步试验验证并优化参数,确保放大后性能稳定。

采用“基材+复合衬里”方案,平衡耐蚀性与力学性能。现有部分企业选用纯哈氏合金材质反应器,虽耐蚀性达标,但成本较高且低温下脆性增加;另有企业采用普通聚四氟乙烯衬里,在反应压力超过0.3MPa时出现衬里脱落。优化后选用力学性能优良的碳钢作为基材,保障结构强度;内壁复合耐强酸的聚四氟乙烯-全氟丙基乙烯基醚共聚物(PFA)衬里,抵御反应体系腐蚀。优化衬里成型工艺,确保与基材紧密贴合,避免脱落,实现两种性能协同优化。

### 3.2 建立反应控制与产物转化的有效路径

基于试验数据构建操作参数与转化效率的定量关联模型,实现精准对接。以反应温度(T)、物料配比(R)、停留时间( $\tau$ )为输入,转化效率(X)为输出,建立模型:

$$X = k_0 e^{-E_a/(RT)} R^m \tau^n$$

其中 $k_0$ 为指前因子, $E_a$ 为活化能,R为气体常数,m、n为反应级数,通过试验拟合确定参数。利用模型可根据目标效率计算设定操作参数。

集成在线检测与自动控制技术,搭建实时闭环系统。目前行业内普遍采用离线取样检测产物纯度,检测周期长达30分钟,导致反应异常时无法及时调整,某企业曾因此造成连续3小时产物纯度不达标。优化后在反应器出口设置在线近红外光谱检测仪,实时采集产物信息并解析转化效率,检测滞后控制在秒级。将数据传输至DCS系统,与目标效率对比,通过算法自动调整温度、流量等参数,形成“检测-对比-调整”闭环,保障效率稳定<sup>[2]</sup>。

采用多变量解耦控制技术,解决参数耦合干扰。某中试装置曾因温度升高导致物料黏度变化,进而影响流量稳定性,最终使转化效率下降12%。本研究建立耦合关系模型,通过解耦算法将系统分解为独立控制通道,实现参数独立调节。基于模型预测控制算法,提前预测参数变化趋势,制定协同策略,实现温度、配比、停留时间等参数协同优化,保障效率持续稳定。

### 3.3 完善多元化评价体系

表1 硝基胍连续流生产综合评价指标体系

评价维度	评价指标	指标内涵
技术性能	产物收率	反映原料向硝基胍转化的充分程度,体现反应有效性
技术性能	产物纯度	体现产品中目标成分占比,反映产品质量控制水平
技术性能	转化效率	衡量单位时间原料转化效率,反映生产能力与效率
经济成本	设备投资成本	反应器及配套系统建设购置总费用,反映初期投入水平
经济成本	运行能耗	生产耗电、蒸汽等能源总量,反映运行经济性
经济成本	维护成本	设备维护、检修及易损件更换费用,反映长期运营成本
安全环保	安全风险等级	基于反应特性与设备状态评估的生产安全风险程度
安全环保	废液排放量	生产产生并需处理的废液体积,反映环保治理压力
安全环保	废气处理效果	废气经处理后污染物达标排放情况,反映环保治理质量

建立涵盖技术、经济、安全环保三大维度的评价体系(见表1),全面衡量工程化效果。现有部分企业仅以产物收率作为核心评价指标,某企业连续流装置收率达95%,但因未考量能耗指标,

运行成本较传统工艺仅降低3%,且废液排放量未达标被责令整改。技术维度聚焦收率、纯度、转化效率;经济维度包含设备投资、运行能耗、维护成本;安全环保维度涵盖风险等级、废液排放量、废气处理效果,形成全方位评价视角。

构建基于实时生产数据的动态评价方法,实现评价与生产过程的同步推进。某企业此前采用批次结束后静态评价,曾因未及时发现反应温度缓慢升高的隐患,导致产物分解风险增加。本研究依托DCS控制系统实时采集各评价指标数据,建立动态评价数据库,采用加权评分法对各指标进行实时评分与综合计算。设定评价结果预警阈值,当综合评价得分低于预警值时,自动触发预警机制,提示管理人员排查生产过程中存在的问题并及时调整。定期对评价结果进行趋势分析,总结生产规律,为工艺优化与工程化设计改进提供数据支撑<sup>[3]</sup>。

联合科研机构、生产企业与行业协会,开展行业统一评价标准制定工作。目前行业内无统一标准,A企业以纯度 $\geq 98\%$ 为合格标准,B企业则设定为 $\geq 97\%$ ,导致两家技术方案难以横向对比。本研究基于不同生产规模、工艺路线的共性与特性,明确各评价指标的定义、检测方法与分级标准。规范评价流程与评价结果表述方式,确保评价过程的科学性与评价结果的客观性、可比性。通过统一评价标准的实施,引导行业内连续流反应器工程化设计与应用水平的整体提升,促进技术交流与创新。

### 3.4 强化生产实施的保障支撑

开展耐蚀材质与密封技术的协同优化,提升设备运行可靠性。某企业曾选用316L不锈钢作为反应器材质,在强酸性反应体系中运行3个月后出现明显腐蚀,壁厚减薄0.8mm;另有企业采用普通橡胶密封件,因温压波动导致密封失效,发生少量物料泄漏。针对反应工况特性,筛选并研发兼具优良耐蚀性与力学性能的新型复合材质,通过试验验证材质在不同温度、压力条件下的腐蚀速率与力学稳定性,确保材质性能与工况需求精准匹配。优化密封结构设计,采用“金属骨架+全氟弹性体”的复合密封结构,利用金属骨架保障密封强度,全氟弹性体材质提升耐蚀密封性能,通过密封面加工精度优化与安装工艺改进,降低物料泄漏风险。

构建“监测-预警-处置-恢复”全流程应急处置系统,提升突发事件应对能力。在反应器及关键设备区域布置温度、压力、

气体浓度等多维度监测传感器,实现风险隐患实时监测。建立分级预警机制,根据监测数据异常程度设置不同预警等级,配套相应的预警响应措施。配置应急冷却、紧急切断、气体吸收等成套处置设备,制定详细的应急处置预案并定期开展演练,提升操作人员应急处置技能,确保突发事件发生时能够快速响应、有效处置,最大限度降低事故损失<sup>[4]</sup>。

建立系统化的工程技术人员培训体系,提升人员专业素养与操作能力。某企业因操作人员不熟悉连续流反应器启停流程,导致开机时物料配比失衡,反应效率下降20%。培训内容涵盖连续流反应器原理、工程化设计要点、操作规范、故障排查、应急处置等核心知识与技能。采用“理论授课+实操训练+案例分析”的培训模式,理论授课夯实专业基础,实操训练提升动手能力,案例分析增强问题解决能力。建立培训考核机制,考核合格后方可上岗操作,定期开展后续培训与技能提升训练,确保工程技术人员能够熟练掌握连续流反应器工程化应用相关技术,为生产稳定运行提供人才保障。

## 4 结语

工程化设计是连续流反应器在硝基胍生产中落地应用的核心关键。本研究通过梳理实施现状、剖析核心问题,从工程化设计优化、控制与转化路径构建、评价体系完善及保障支撑强化四个方面提出策略,形成聚焦落地的完整方案。优化后的工程化设计可提升反应器运行稳定性、效率与安全性,推动硝基胍生产向高效、安全、绿色转型。未来需加强设计与实践深度融合,持续技术创新,促进连续流技术大规模工业化应用,为含能材料行业升级提供支撑。

### [参考文献]

- [1]张立鑫,朱盈喜,袁知梁,等.氟化挥发流化床反应器设计及试验研究[J].原子能科学技术,2025,59(6):1245-1253.
- [2]郭鹏飞,汪兵,宗源,等.硝化反应在填充床环流反应器中的实现路径探究[J].山西化工,2025,45(7):126-128.
- [3]潘涛,卢哲,宋文杰,等.布置级间导流板的二级气升式环流反应器的流动与传质规律研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2025,58(10):1057-1068.
- [4]段振亚,范成镨,蒋文才,等.动态液膜式连续流反应器的研发与应用[J].化学工程,2025,53(9):73-76,87.