

连续化生产工艺在化工行业中的应用

周 静

河北安俱达化工科技有限公司宁夏分公司 宁夏 银川 750000

摘 要：连续化生产工艺是化工行业转型升级的核心技术，相较于传统间歇生产，具备工况稳定、产能高效、绿色低耗、安全性高的显著优势，广泛应用于大宗化工、精细化工、医药农药及新能源化工等领域。本文梳理该工艺的核心理论、设备体系与应用场景，剖析设备适配不足、管控短板、推广成本高等现存问题，针对性提出设备改造、智能调控、体系优化及降本推广的全套优化策略，为化工连续化工艺规模化落地提供参考。

关键词：连续化；生产工艺；化工行业；应用

引言：化工行业传统间歇式生产存在工况波动大、产能低效、能耗偏高、批次质量不均等诸多痛点，难以适配现代化工高质量、绿色化、规模化发展需求。连续化生产工艺凭借不间断稳态生产、自动化管控、闭环循环运行的特性，成为化工产业升级的关键方向。为明晰其应用价值与发展瓶颈，本文系统阐述连续化工艺的技术体系、行业应用现状，深挖实际生产中的核心难题，并制定科学可行的优化改进方案，助力行业提质增效、绿色发展。

1 连续化生产工艺核心理论与技术体系

1.1 连续化生产工艺基本概述

(1) 连续化生产工艺是物料持续输入、过程不间断、产物稳定输出的现代化化工生产模式，核心原理为稳态连续物料传递与反应转化。相较于间歇式生产批次化投料、停工出料、设备间歇运行的模式，其核心特征是生产过程无间断、工况稳态化，规避了批次启停带来的工况波动问题。(2) 该工艺形成“进料-反应-分离-出料”全闭环运行机制，物料按设定流速连续进入系统，在恒定工艺参数下完成反应，随即通过配套设备连续分离产物与副产物，合格产物持续出料，废料、未反应物料可回流复用，全程闭环循环、动态稳定运行。(3) 核心技术优势为工况稳定、生产连续性强、自动化程度高，可有效降低人为误差。适用于规模化、大批量、长周期的化工合成生产，尤其适配精细化工、医药中间体、大宗化学品等对产品稳定性要求较高的生产场景。

1.2 连续化生产核心设备与技术类型

(1) 主流反应设备各有适配特性：管式反应器为管状密闭结构，物料轴向连续流动反应，传热传质效率高；微通道反应器依托微型通道结构，实现物料精准混合与快速反应，安全系数高；连续搅拌反应器通过持续搅拌，维持体系浓度、温度均匀，适配均相反应。

(2) 配套设备保障系统稳定运行：连续进料装置可精准控量、稳定送料；自动分离系统实现产物与杂质实时分离；在线检测设备实时监测温度、浓度、纯度等参数，实现生产过程动态调控。(3) 设备适配性差异化明显，管式、微通道反应器适配快速、强放热、高危反应，适合低粘度物料；连续搅拌反应器适配慢速、多相、高粘度物料反应，覆盖多数常规化工反应场景。

1.3 连续化与传统间歇式生产工艺对比分析

(1) 生产效率：连续化工艺无启停等待时间，产能大幅提升，生产周期大幅缩短，设备全天候运行，利用率接近饱和；间歇式生产批次切换耗时久，设备闲置率高，整体产能受限。(2) 产品质量：连续化工艺工况恒定，产物纯度稳定，无批次差异，杂质可控性强；间歇式生产每批次工况存在波动，易出现纯度参差、杂质含量不稳定的问题。(3) 能耗与环保：连续化工艺物料利用率高，能源损耗低，污染物持续定量处理，排放可控；间歇式生产启停能耗高，物料残留多，批次废液、废料排放分散，环保压力更大。(4) 安全与自动化：连续化工艺人工干预少，智能化适配度高，规避人工操作隐患；间歇式生产依赖人工投料、控温、出料，操作频次高，人为失误与安全风险更高^[1]。

2 连续化生产工艺在化工行业的具体应用

2.1 在大宗基础化工领域的应用

(1) 在石油化工与煤化工领域，连续化生产工艺已全面替代传统间歇工艺，广泛应用于原油裂解、烯烃合成、煤制甲醇、煤制烯烃等核心环节。通过连续化反应与精制系统，实现原料持续性进料、催化反应、精馏提纯一体化运行，有效解决了传统工艺原料转化不充分、精制精度不足的问题，让石化、煤化工基础原料生产全程自动化、稳态化运行。(2) 无机化工大宗产品如酸碱、无机盐、氧化物等，普遍采用规模化连续化生产流

程。工艺通过优化物料输送、反应温度、压力控制系统,实现物料匀速反应、连续结晶、自动分离提纯。相较于传统间歇生产,有效规避了批次工况波动问题,大幅提升产品结晶度与均匀度,同时简化生产流程,缩短工序周期,实现工艺体系的标准化优化升级^[2]。(3)大宗化工连续化生产的落地,实现了显著的降本增效与产能稳定提升。连续化设备可24小时不间断运行,消除了批次切换、设备启停的空置损耗,设备利用率大幅提升。同时稳定的反应工况降低了原料损耗与次品率,规模化生产摊薄生产成本,有效保障化工企业产能持续输出,满足市场大宗基础原料的稳定供应需求。

2.2 在精细化工领域的应用

(1)连续流反应技术是精细化工合成的核心应用技术,广泛适配催化、偶联、酯化、氧化等各类精细合成反应。依托微通道、管式连续反应器的精准控温、快速传质优势,可实现小分子精细化学品、助剂、涂料原料等产品的连续化合成,适配精细化、高纯度、小批量、多品类的生产特点。(2)传统精细化工间歇生产存在诸多行业痛点,批次间温度、反应时间、投料比例的细微偏差,极易造成产品纯度不均、副产物生成量大、产品合格率偏低等问题。连续化生产通过恒定物料配比、稳态反应环境与实时参数调控,大幅缩小批次差异,抑制副反应发生,从工艺层面解决了精细化工产品稳定性差、杂质偏高的行业难题。(3)在染料、日化助剂、精细催化剂等典型产品生产中,连续化工艺应用成熟。以高端染料中间体合成为例,连续化反应可精准控制反应进程,副产物生成量降低30%以上,产品纯度显著提升,同时生产效率提升一倍,有效减少人工干预,产品批次一致性大幅优化,适配高端精细化工产品的生产标准。

2.3 在医药与农药化工领域的应用

(1)医药原料药及中间体生产中,连续化工艺采用模块化流程设计,搭建起连续进料、精准反应、无菌分离、连续提纯的一体化生产体系。根据不同原料药的反应特性,精准调控反应温度、压力、停留时间,全程密闭化运行,有效适配医药合成复杂、多步骤的反应流程,实现中间体与原料药的稳定合成。(2)医药化工对产品纯度、安全性、合规性要求极高,连续化工艺全程密闭、自动化操作,可有效避免物料污染与杂质引入。同时生产参数可实时追溯、精准可控,完全契合医药生产GMP合规标准。相较于间歇工艺,可大幅降低重金属、有机杂质残留,提升药品纯度与使用安全性,满足医药行业严苛的质量管控要求^[3]。(3)农药合成多涉及固液、液液多相复杂反应,传统间歇工艺反应不充分、

物料混合不均。连续化技术依托高效传质设备,强化多相物料混合反应效果,缩短反应停留时间,提升原料转化率。同时可有效管控农药合成中的高危反应过程,降低反应风险,适配各类除草剂、杀虫剂中间体的规模化、安全化生产。

2.4 在绿色化工与新能源化工领域的应用

(1)连续化处理工艺广泛应用于化工废液、废渣、废气的资源化处置,通过连续萃取、催化降解、分离回收一体化设备,实现废弃物料持续性处理。可高效回收废液中的有效原料、废渣中的有效组分,实现废弃物资源化再利用,减少化工固废、废液的直接排放。(2)在新能源化工领域,锂电池电解液、储能电解质、光伏材料等新能源化学品,均适配连续化生产技术。该工艺可实现新能源材料的精准配比、匀速反应、连续提纯,保障材料性能的稳定性与一致性,解决传统间歇生产中材料性能波动、批次偏差大的问题,适配新能源产业的高质量发展需求。(3)连续化工艺是化工行业绿色低碳发展的核心路径,通过精准控料、稳态反应,大幅提升原料与能源利用率,减少无效能耗损耗与副产物排放。同时废弃物连续化资源化处理,降低末端治理压力,从生产源头实现节能减排,助力化工行业摆脱高能耗、高污染的生产模式,推动绿色低碳生产体系构建^[4]。

3 连续化生产工艺在化工行业应用现存问题与优化策略

3.1 工艺应用现存核心问题

(1)设备适配性存在明显局限,现有标准化连续化设备多适配常规低粘度、稳定均质物料,针对化工生产中高粘度、易结晶、强腐蚀的特殊物料,易出现管路堵塞、设备腐蚀、物料挂壁等问题,大幅降低生产连续性与设备使用寿命。(2)复杂多工况生产场景下,工艺控制短板突出。多反应耦合、多相物料共存的生产过程中,温度、流速、配比等参数调控精度不足,参数滞后、波动问题频发,导致系统运行稳定性下降,影响反应转化率与产品质量一致性。(3)产业化推广存在成本壁垒,连续化生产设备、自动化控制系统初期采购与安装投入远高于传统间歇设备,后期运维、配件更换成本较高,资金实力有限的中小型化工企业改造与推广难度极大。(4)行业配套技术体系不完善,专业的连续化工艺运维人才稀缺,多数企业仍沿用传统间歇生产运维模式。整体智能化运维水平偏低,故障预判、设备养护、参数优化能力不足,制约工艺高效落地应用。

3.2 工艺与设备优化策略

(1)推行物料特性定制化设备选型与改造策略,针

对高粘度物料,选用大通道、强推送式反应器与输送设备,搭配防挂壁结构设计;针对易结晶物料,改造管路伴热、恒温保温模块,杜绝管路结晶堵塞;针对强腐蚀物料,采用防腐合金、衬氟等耐磨防腐材质,根据生产场景个性化改造设备结构,全面提升设备适配性。(2)持续优化整体反应工艺流程,精简冗余生产工序,整合预处理、反应、提纯等衔接环节,缩短物料传输路径与停留时间。通过优化工序衔接逻辑,减少物料转运、设备启停产生的能量损耗与物料浪费,简化生产操作流程,提升连续化生产整体运行效率,降低常态化运行成本^[5]。(3)针对性升级核心功能模块,重点改进设备密封、换热与分离系统。采用高性能机械密封结构,杜绝复杂工况下物料泄漏;升级高效板式、管式换热模块,强化温控调节能力,适配强放热、吸热反应;优化连续分离、过滤模块,提升多相物料分离精度,有效解决复杂工况下生产不稳定、损耗偏高的问题。

3.3 智能控制与生产体系优化

(1)深度融合工业自动化控制系统,搭建全流程闭环调控体系,对生产全过程的温度、压力、物料流速、配比比例等核心参数进行精细化、实时化调控。依托自动调节模块替代人工干预,消除参数调控滞后问题,保障反应工况长期稳定,提升生产精准度与可控性。(2)搭建全时段在线实时检测系统,在进料、反应、出料关键节点布设检测设备,实时监测产物纯度、杂质含量、物料浓度等核心指标。系统可自动捕捉生产异常数据,实现故障与质量问题提前预警,快速联动调控生产参数,形成动态监测、及时纠偏的质量管控模式。(3)构建标准化、规范化的连续化生产运维体系,结合不同工艺、设备的运行要求,制定专属操作规范、设备养护流程与故障处理预案。同时开展常态化员工专项培训,摒弃传统间歇生产操作思维,规范日常运维、参数调节、设备检修流程,夯实连续化生产稳定运行基础。

3.4 行业推广与成本优化策略

(1)推行模块化连续化工艺设计,将反应、分离、

换热、检测等设备设计为独立标准化模块,企业可根据自身生产规模与产品类型按需组合、分期改造,无需一次性全套投入。大幅降低中小企业设备升级、工艺改造的资金门槛,适配中小化工企业的轻量化改造需求。

(2)完善行业统一技术标准与规范体系,针对不同化工品类的连续化生产工艺、设备参数、质量标准进行统一界定,解决行业工艺混乱、适配性差的问题。依托标准化体系推动连续化工艺规范化、规模化落地,降低试错成本,助力行业整体迭代升级。(3)深化产学研协同合作,联动高校、科研院所与化工企业搭建技术研发平台,聚焦低成本、高适配的连续化新技术、新设备开展攻关。重点研发小型化、低成本、易运维的连续化设备,优化简化连续生产工艺,加速新技术成果落地转化,从源头破解成本高、推广难的行业痛点。

结束语

综上所述,连续化生产工艺有效弥补了传统化工生产的诸多短板,在提升产品质量、提高生产效率、降低能耗与安全风险等方面优势突出,覆盖多类化工生产场景,是化工行业绿色低碳、智能升级的重要路径。当前工艺仍存在设备适配弱、管控精度不足、推广成本高、配套体系不完善等问题。未来需通过设备定制优化、智能体系升级、模块化改造与产学研协同攻关,持续破解行业痛点,推动连续化工艺全面普及应用。

参考文献

- [1]刘年.连续流技术在精细化工中的应用研究[J].化工进展,2023,42(3):56-62.
- [2]冯康博,陈炯.全连续流反应技术在化工合成中的研究进展[J].现代化工,2024,44(5):38-42.
- [3]皮教文.微通道连续化工艺在精细化工合成反应中的应用[J].石化技术,2025,32(6):49-51.
- [4]孙武.化工连续流合成技术的产业化应用与发展趋势[J].化工设计通讯,2023,38(6):78-85.
- [5]周依,叶晓生.自动化赋能化工连续合成生产工艺优化研究[J].化工自动化及仪表,2025,44(6):319-323.