

化工连续化生产工艺稳定性提升技术研究

张伟伟

宁夏紫光天化蛋氨酸有限责任公司 宁夏 中卫 755000

摘要: 化工连续化生产具备高效、量产的行业优势,是现代化工产业主流生产方式,但生产过程易受多方面因素干扰,造成工艺波动、品质偏差与生产中断。本文系统分析工艺参数波动、设备工况异常、环境人为管控疏漏及物料体系失稳等核心影响因素,梳理多参数协同调控、设备稳态保障、物料稳定控制与智能管控等关键技术,可为化工连续生产稳质稳产、降低运行风险提供可行的技术参考与实践支撑。

关键词: 化工连续化; 生产工艺; 稳定性; 提升技术

引言: 在化工产业规模化、集约化发展背景下,连续化生产工艺逐步取代传统间歇生产模式,有效提升了生产效率与产能水平。但实际生产中参数耦合扰动、设备老化故障、原料物性波动及人工操作滞后等问题频发,极易破坏生产工艺稳定性,造成副反应增多、产品质量超标、非计划停机等问题。基于此,本文探究工艺失稳成因,总结配套稳定提升技术,助力化工连续生产安全高效、平稳长效运行。

1 化工连续化生产工艺稳定性影响因素分析

1.1 工艺参数波动影响因素

(1) 温度、压力、流量核心参数波动机制: 温度波动通过改变反应速率常数与平衡转化率直接影响产物分布; 压力波动扰乱气相反应物溶解平衡及体系相态稳定性; 流量波动改变反应停留时间分布, 导致转化率偏移与副反应选择性变化。(2) 物料配比、进料速率不稳定对工艺连续性的干扰: 配比偏差直接改变反应计量关系, 造成未反应物累积或过反应副产物激增; 进料速率周期性脉动引发反应器内浓度波动, 严重时诱发飞温或熄火现象, 中断连续生产进程^[1]。(3) 参数耦合波动引发的工艺失衡问题: 温度升高加剧放热反应强度, 促使压力突升, 压力波动又反向影响进料泵计量精度, 形成正反馈振荡回路, 使多变量控制系统超出调节裕度, 系统失稳。

1.2 设备运行稳定性影响因素

(1) 连续化反应设备、输送设备磨损与故障隐患: 搅拌桨叶侵蚀导致混合传质效率衰减, 反应器内出现死区; 输送泵内件磨损造成扬程下降, 进料流量产生低频周期性波动, 干扰后续工段平稳衔接。(2) 密封、换热、自控设备工况异常对生产的影响: 机械密封泄漏引

起易燃有毒介质外逸, 触发安全联锁停车; 换热器结垢降低总传热系数, 撤热能力不足引发反应温度失控; 自控阀门卡滞造成调节滞后, 使闭环系统振荡发散。(3) 设备老化、维护不及时导致的工艺波动: 加热炉炉管高温蠕变引起管壁温度分布畸变; 未按周期校验的仪表产生测量漂移, 造成控制偏差累积, 致使产品质量逐步劣化直至超标。

1.3 生产环境与人为因素影响

(1) 温湿度、洁净度等生产环境变量的干扰作用: 环境高温降低现场仪表电子元件寿命与测量精度; 高湿空气引发吸湿性原料结块, 堵塞固体加料系统; 洁净度不足致使粉尘积聚, 影响换热器散热效率。(2) 人工操作不规范、参数调控滞后引发的稳定性问题: 操作人员凭经验调整设定值缺乏理论支撑, 超调或误调加剧系统波动; DCS 报警后人工确认耗时过长, 错失最佳干预窗口, 导致扰动扩大。(3) 生产管理制度不完善导致的工艺管控漏洞: 交接班信息传递缺失造成工艺状态盲区; 巡回检查频次不足使设备初期异常未能及时发现; 变更管理流程缺失致使未经评估的工艺调整直接上线^[2]。

1.4 物料体系稳定性影响因素

(1) 原料纯度、物性差异对连续反应的影响: 杂质累积改变溶剂极性环境, 影响反应活化能; 不同批次原料黏度差异改变传质系数, 造成反应速率波动, 需频繁修正进料条件。(2) 物料相变、副反应滋生导致的工艺偏移: 反应体系局部过热诱发气相夹带, 改变气液相传质面积; 副反应产物蓄积改变体系 pH 或离子强度, 加速主反应催化剂中毒, 使转化率持续下降。(3) 催化剂活性衰减对生产连续性的干扰: 均相催化剂配体降解导致活性中心失活, 需在线补加, 补加速率调控不当引

发活性脉冲；多相催化剂积碳覆盖活性位，床层压差升高，周期性再生操作造成产量周期性波动，削弱连续化优势。

2 化工连续化生产工艺稳定性提升关键技术

2.1 工艺参数精准调控优化技术

(1) 多参数协同稳态控制模型构建：基于反应机理与动态特性耦合分析，建立温度-压力-流量-物料浓度多变量状态空间模型，引入前馈-反馈复合控制架构，将单一参数独立调节升级为多参数协同优化，有效克服参数耦合引发的控制振荡，确保系统在扰动工况下快速恢复稳态。(2) 参数实时监测、偏差预警与自动校正技术：部署高精度在线分析仪表与冗余传感器阵列，实现对关键工艺参数的毫秒级数据采集与异常识别；建立统计过程控制阈值体系，对偏差趋势进行分级预警；采用 PID 自整定与模型预测控制相结合的方式，实现参数漂移的自动跟踪校正，减少人工干预频次^[3]。(3) 基于生产工况的参数动态优化策略：针对原料批次差异、环境温度变化、催化剂活性衰减等工况漂移因素，开发基于实时数据驱动的设定值滚动优化算法，根据生产负荷与产品质量反馈动态调整操作参数区间，使控制系统始终运行于当前最优工况附近，兼具适应性与经济性。

2.2 设备稳态运行保障技术

(1) 连续化生产设备常态化运维与故障预判技术：建立设备全生命周期健康档案，制定基于运行时间的差异化点检与保养计划；引入振动频谱分析、润滑油金属磨粒检测等手段，对轴承磨损、叶轮腐蚀等渐进性故障进行早期识别与趋势预判，将被动抢修转化为主动预防，显著降低非计划停机概率。(2) 关键设备密封、换热系统优化改造技术：针对高腐蚀、高泄漏风险工段，推广双重机械密封与干气密封替代方案，辅以密封冲洗与温控系统延长使用寿命；对换热器采取螺旋折流板或高通量管束结构优化，配合在线化学清洗与湍流增效措施，抑制结垢速率，维持传热系数长期稳定。(3) 设备联动运行稳定性匹配优化方案：对多机并联或串联输送系统进行特性曲线匹配分析，通过变频调速与出口阀门协同调节，使各设备运行点始终处于高效区，消除因性能差异造成的系统背压波动与流量脉动，确保上下游设备动态响应协调一致。

2.3 物料体系稳定控制技术

(1) 原料预处理标准化与物性稳定管控技术：建立原料入厂近红外快速筛查机制，对纯度、水分、粒度等关键指标实施批批检验；增设原料均质化调配罐，对黏

度、浓度波动较大的批次进行预混匀处理，降低批次间物性差异对连续反应进料稳定性的冲击。(2) 催化剂活性稳定维持与再生优化技术：对均相催化剂采取在线补加与失活速率实时监测联动策略，根据转化率变化微调补加速率，避免活性脉冲；对多相催化剂制定程序升温再生规程，精确控制烧炭温度与氧气浓度梯度，在保护骨架结构的前提下恢复活性，延长单程使用寿命^[4]。(3) 抑制副反应、稳定反应体系的工艺优化方法：通过调整加料顺序与局部浓度分布，抑制热点生成，降低副反应动力学驱动力；引入阻聚剂或相转移助剂调控反应微环境，阻断副反应链传递，同时优化产品采出位置与速率，减少产物在反应区内过度停留，保持体系组分相对稳定。

2.4 智能化工艺稳定管控技术

(1) 工业大数据实时采集与工艺状态分析技术：构建覆盖全流程的分布式数据采集网络，整合 DCS、分析仪表与设备状态监测数据，建立工艺过程数字镜像；利用主成分分析与聚类算法提取高维数据中的关键特征变量，实现对工艺健康度的实时量化评估，为操作优化提供数据决策支撑。(2) 自动化控制系统在连续生产中的应用优化：将常规 PID 控制升级为模型预测控制与模糊逻辑控制相结合的混合控制策略，针对反应滞后大、非线性强的工段引入史密斯预估器补偿时滞影响，同时部署控制性能监控模块，持续评估控制回路方差与输出偏差，自动识别并推荐控制器参数整定方案。(3) 工艺异常智能诊断与快速处置技术：基于历史故障案例库构建专家规则引擎，结合深度学习分类模型，对温度突升、压力骤降、组分异常等典型故障实现秒级模式匹配与根因定位；同步触发分级联锁保护与应急处置操作推荐，辅助操作人员在最短时间内完成精准处置，最大限度控制异常波及范围，保障连续生产安全性。

3 水利工程质量检测行业高质量发展对策

3.1 规范行业市场竞争秩序

(1) 严格行业准入管理：细化检测机构资质等级认定标准，在人员配置、技术装备、实验室条件、质量管理体系等维度设置明确门槛，建立资质动态核查与退出机制，定期清理不具备基本条件或长期未开展业务的市场主体，从源头把控行业供给质量。(2) 整治低价恶性竞争：由行业协会或主管部门牵头，建立检测项目计价指导体系，综合考量检测参数、工程规模、技术难度等因素发布合理价格区间，在招投标环节引入异常低价评审制度，对明显低于成本价的投标行为予以约束，引导企业回归以质取胜的良性竞争轨道。(3) 构建差异化竞

争格局：引导国有检测机构聚焦国家重大水利工程及关键领域，民营机构深耕中小型工程与区域市场，第三方机构发挥灵活优势拓展专项检测与技术服务细分赛道，通过细化市场功能定位实现错位发展，促进检测资源的优化配置与高效利用。

3.2 推动行业技术创新与数字化转型

(1) 加大技术研发投入：鼓励检测机构设立年度科研专项资金，联合高校与科研院所开展智能化、绿色化检测技术攻关，重点突破自动化采样、AI 辅助识别、远程监控等关键核心技术，积极引进国内外先进检测设备与技术成果，缩短从研发到应用落地周期。(2) 推进数字化体系建设：统一搭建行业级检测数据管理平台，制定数据接口与交换标准，实现检测委托登记、现场数据采集、实验室分析、报告编制审核等全流程线上闭环管理，建立从样品接收到报告出具的全链条溯源机制，提升检测活动的可追溯性和透明度^[5]。(3) 完善新型技术标准：加快物联网监测、数字孪生、智能识别等新兴检测技术配套标准与评定规范的研究制定，修订与新技术不相适应的现行标准条款，统一智能化检测设备校准方法、数据精度要求与结果判定准则，为技术规模化推广提供明确制度遵循。

3.3 完善行业人才培养与管理体系

(1) 健全人才引进机制：制定行业紧缺人才目录，将高端复合型技术人才、数字化系统运维人才、现代管理型人才纳入重点引进范围，完善薪酬激励与职业发展保障制度，面向重点院校及科研机构精准引进高层次人才，优化行业人才梯队结构。(2) 搭建常态化培养体系：建立覆盖入职基础培训、岗位技能提升、新技术专题研修的分层分类培训体系，深化校企合作共建实习实训基地，联合开发贴合行业实际的课程资源与教学案例，实施定向培养与订单式育人计划，畅通青年骨干职业成长通道。(3) 强化机构内部管控：督促检测机构完善内部质量管理文件体系，细化岗位说明书与权责清单，建立从样品接收、试验操作、数据记录到报告出具的全流程标准化作业规范，推行常态化质量自查与内部审核制度，对关键环节实施重点管控与责任追溯，全面提升机构运营规范性与服务品质。

3.4 健全行业监管与长效保障机制

(1) 强化全流程监管：构建覆盖事前资质审查与能力核验、事中检测行为随机抽查与过程监督、事后问题整改追踪与责任追究的全链条监管体系，明确各级监管部门职责分工与联动协作机制，对数据造假、违规承揽等违法行为加大查处力度，提高行业违规成本。(2) 完善行业信用体系：建立全国统一的检测机构信用信息归集与评价平台，制定科学合理的信用评级指标与评分规则，将资质条件、检测质量、市场行为、投诉记录等纳入评价范畴，落实信用分级分类监管，完善守信激励与失信惩戒机制，推行红黑名单制度并与招投标、资质延续等挂钩，增强信用约束实效。(3) 统筹区域均衡发展：加大对基层与欠发达地区检测基础设施投入力度，通过财政专项资金、对口技术帮扶、设备共享调剂等方式补齐资源短板，鼓励优质检测机构在薄弱地区设立分支或开展协作共建，推动区域间技术交流与人才双向流动，逐步缩小城乡及东西部行业发展差距，实现行业整体协调发展。

结束语

本文全方位剖析化工连续化生产工艺的各类失稳诱因，构建涵盖工艺调控、设备运维、物料管控、智能赋能的稳定性提升技术体系，有效解决连续生产中的动态波动难题。化工工艺稳定优化是长期迭代的系统工程，后续可依托大数据与智能控制技术持续优化管控策略，进一步削弱生产扰动影响，全面提升连续生产的安全性、稳定性与生产效益，推动化工生产工艺智能化升级与行业提质发展。

参考文献

- [1] 王帅, 李超, 张鑫. 精细化工连续化生产工艺稳定性影响因素及优化控制 [J]. 现代化工, 2023, 43(08): 189-193.
- [2] 赵阳, 孙浩. 化工连续生产过程扰动抑制与工艺稳定性提升策略 [J]. 化工自动化及仪表, 2022, 49(11): 1421-1426.
- [3] 陈明, 吴迪. 连续化化工生产长周期稳定运行工艺优化研究 [J]. 化学工业与工程, 2023, 40(03): 76-82.
- [4] 谭成侠, 柯森林. 基于微通道连续流技术的化工合成工艺稳定性优化实践 [J]. 精细与专用化学品, 2025, 33(04): 45-50.
- [5] 黄俊, 陆文杰. 化工连续生产参数漂移治理与稳态工艺构建 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(09): 112-114.