

化工过程强化的关键技术路径与未来发展趋势

卢惠燕 (浙江国正安全技术有限公司, 浙江 绍兴 312030)

徐 剑 (杭州德邦检测技术有限公司, 浙江 杭州 311600)

摘要: 化工过程强化技术是推动行业能效升级与绿色转型的核心支撑, 以大型氨合成装置为实践载体, 通过合成回路压降精细拆解、换热网络集成优化、多变量先进控制等技术手段, 可有效削减系统能耗, 显著增强装置运行稳定性。本文立足该工艺, 系统剖析过程强化的技术内核与工业应用成效, 结合智能融合、新材料赋能等未来发展趋势, 梳理关键技术路径, 为其在流程工业的推广应用提供理论与实践参考, 助力行业通过过程强化实现绿色转型与高质量发展。

关键词: 化工过程; 强化; 关键技术; 发展趋势

中图分类号: TQ021.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 011-0019-04

Key Technological Pathways and Future Development Trends of Chemical Process Intensification

LU Huiyan (Zhejiang Guozheng Safety Technology Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang 312030, China)

XU Jian (Hangzhou Debon Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311600, China)

Abstract: Chemical process intensification technology serves as a core pillar in driving the industry's energy efficiency enhancement and green transformation. Taking large-scale ammonia synthesis plants as practical examples, this technology effectively reduces system energy consumption and significantly improves operational stability through methods such as detailed breakdown of synthesis loop pressure drops, integrated optimization of heat exchanger networks, and multivariable advanced control. Based on this specific process, this paper systematically analyzes the technical essence and industrial application outcomes of process intensification. By integrating future development trends such as intelligent convergence and new materials empowerment, it outlines key technological pathways to provide theoretical and practical references for the broader application of this technology in the process industry, thereby supporting the industry's green transformation and high-quality development through process intensification.

Keywords: Chemical Process; Intensification; Key Technology; Development Trend

氨合成作为化工产业链的关键核心环节, 其装置规模化升级与能效水平提升, 直接关乎产业链高质量发展大局。在双碳目标引领的绿色低碳发展浪潮下, 构建高效低耗、稳定可靠的氨合成系统已成为行业核心诉求。卡萨利氨合成工艺凭借低压降、高循环比的突出特性, 为能效突破提供了优质技术范式。结合智能控制、新材料应用等方向, 其未来将向智能化、模块化、低碳化深度迈进, 助力行业实现更高质量的绿色可持续发展, 彰显过程强化技术的长远应用价值与发展潜力。

1 过程强化对能效提升与绿色转型的意义

1.1 系统集成与能耗最小化直接降低碳排放

过程强化技术以系统集成设计为核心, 从源头优化能量传递路径, 对化工行业绿色转型的推动作用至关重要。卡萨利氨合成工艺便是典型例证, 其核心优势在于打造了高度集成的合成回路, 将反应、冷凝、分离及热量回收等单元深度耦合。通过精细化的“压降分解”管控, 回路总压降被控制在较低水平, 大幅

削减了循环压缩机的动力消耗, 实现了能耗的直接节约。这种系统性的能耗优化, 减少了单位产品生产所需的化石燃料消耗量, 进而直接降低生产过程中的二氧化碳排放, 为化工装置迈向低碳乃至近零碳排放运行提供了切实可行的技术方案。

1.2 借助设备创新与过程协同提升资源利用效率

设备结构创新与工艺过程的深度协同, 是过程强化技术提升物料、能量综合利用效率的关键路径, 集中彰显了绿色转型中的资源节约理念。文档重点分析的氨合成反应器, 采用轴径向流多床层结构设计, 内置气体再分布器, 可精准均化床层温度场, 有效抑制热点形成。这不仅延长了催化剂使用寿命, 更使反应始终贴近最优温度区间进行, 显著提升氨合成转化率, 减少原料气循环量。换热系统采用多段逆流并联设计, 将最小换热温差压缩至较低范围, 最大化回收反应余热。设备与工艺的这种深度融合, 让同等原料与能量输入能够产出更多合格产品, 减少资源浪费, 成为推动化工生产从粗放模式向精细化、集约化转型的核心

支撑。

1.3 柔性控制与动态优化增强运行稳定性

过程强化技术强调系统动态响应与柔性控制能力的提升，通过增强装置在复杂工况下的运行稳定性保障长期能效，为绿色转型筑牢可靠根基。该合成系统以温度压力控制、氢氮比调节为核心构建控制体系，并引入模型预测等先进控制策略，使系统在面临负荷波动、进料组成变化时，能够快速平滑过渡至新稳态，避免因操作剧烈波动导致的能效下降及安全风险。依托压缩机非线性控制函数与旁路调节机制，系统可将压降严格控制在安全余量内，维持反应器操作压力稳定。这种内在的稳定性与适应性，确保装置长期在高效区间运行，减少非计划停车及低效运行时长，从全生命周期视角规避了运行不稳定引发的额外能耗与排放，为可持续绿色生产提供了重要保障。

2 传统化工生产面临的问题

2.1 系统能效瓶颈与能源利用粗放

传统化工生产长期受困于系统能效瓶颈，根源在于各工艺环节的能量集成程度偏低，大量高品位热能难以实现有效回收，能源利用模式整体较为粗放。以氨合成装置为例，合成回路中反应热的移除与物料预热多依赖独立换热单元，缺乏整体化热集成考量，导致冷热物流匹配失衡，换热网络温差偏大，造成显著的可用能损失。文档提及，传统设计对回路压降的管控较为粗放，压缩机为克服系统阻力需消耗额外动力，直接推高了运行能耗。这种偏低的能源利用效率，不仅导致生产成本居高不下，更与当下绿色低碳的发展导向相悖，已然成为制约产业可持续发展的核心桎梏。

2.2 运行稳定性与负荷适应性不足

传统化工生产装置在应对复杂工况波动时，普遍存在运行稳定性欠佳、负荷适应性薄弱的问题，这与控制策略单一、难以实现多变量动态协同优化密切相关。文档指出，氢氮比、床层温度、系统压力等关键参数若采用独立单回路控制，在进料组成变化或生产负荷调整时，易引发参数耦合干扰，致使系统出现振荡，甚至偏离最优操作区间。合成回路压降缺乏弹性设计余量，装置启停或负荷波动时，压缩机易面临喘振风险，威胁连续稳定运行。这种薄弱的动态运行性能，既限制了装置的生产弹性，难以适配市场需求变化，也变相提升了非计划停车的发生概率。

3 化工过程强化的关键技术路径

3.1 基于压降分解与精细化管理的设备集成设计

设备层面的化工过程强化，核心路径之一在于对系统压降实施精细化分解与管控，通过优化设备内部结构及设备间集成方式，在保障传质传热效率的前提

下，最大限度降低能量损耗。卡萨利氨合成工艺为此提供了极具参考价值的实践范例，其核心思路是将合成回路总压降视为一项整体预算，科学拆分管线阀门压降与设备本体压降两部分。具体而言，回路总计算压降控制在 0.85MPa，其中设备压降占 0.7MPa，管线阀门压降仅 0.15MPa。这种精细化拆分，让设计者可对各环节阻力进行精准调控与优化。反应器内部采用轴向流多床层结构，搭配内置气体再分布器，有效均化床层气流分布，将单级床层压降控制在较低水平，最终使反应器整体压降满足 0.3MPa 的保证值要求。系统集成层面，通过将合成塔出口高温工艺气与蒸汽过热器直接对接，省去中间管道及换热设备，大幅缩短工艺流程，降低布置复杂度与压降损失。这种基于压降预算的设备集成设计，为系统低能耗稳定运行筑牢了物理基础，是过程强化的核心支撑（见图 1）。

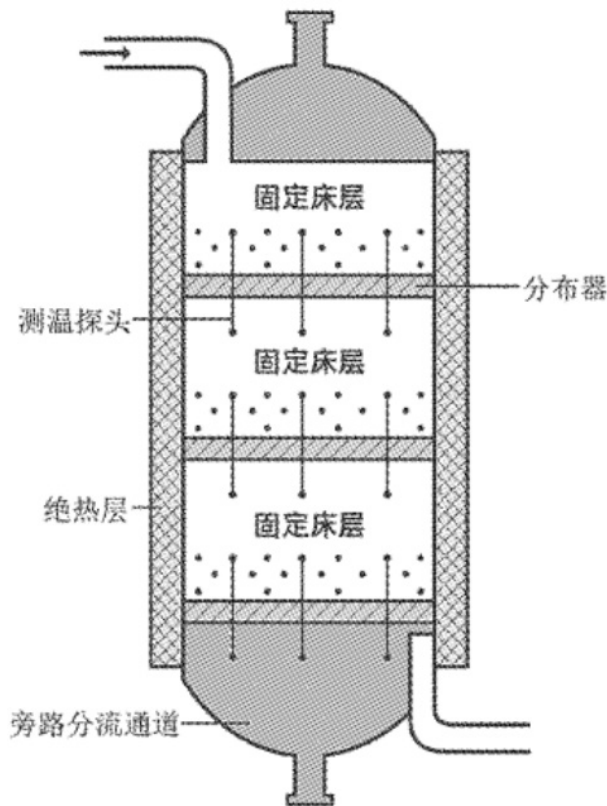


图 1 氨合成反应器结构布置示意图

3.2 构建以最小温差为目标的换热网络集成优化

能量回收环节的过程强化，核心在于搭建高效集成的换热网络，以最大限度减小换热过程中的有效能损失，实现能量梯级高效利用。这就要求对系统内所有冷热物流开展全局性匹配优化，缩小换热器最小传热温差。卡萨利工艺在换热网络集成中，采取了多维度强化手段。一方面，针对 E1802、E1803 等关键换热器，采用多段逆流并联与壳程旁通双通道设计，既

增强传热湍流效果，又优化冷热流体温度匹配度，成功将冷端最小温差控制在 8°C 以下，显著提升热回收效率。另一方面，融入热能梯级利用理念，不仅借助反应热预热进料，还尝试将部分高品位反应热直接供给中压蒸汽过热工序，实现反应热与动力需求的高效协同。为量化优化成效，文档引入换热效能指标——即系统回收热量与反应器热释放总量的比值，作为评估换热网络性能的核心参数。这种系统性的换热网络集成优化，充分挖掘了过程系统内部的热量回收潜力，是降低外部能源消耗的关键技术路径。

3.3 实施多变量协同的先进过程控制策略

过程系统动态行为具有强耦合、多扰动的特点，要提升系统操作稳定性与负荷适应性，需突破传统单回路控制局限，依托先进控制策略实现关键工艺参数的多变量协同优化。卡萨利合成系统构建了以温度压力控制、氢氮比调节为核心的控制体系，为过程强化提供了核心调控支撑。温度控制方面，针对反应器床层这一关键环节，通过分层布点监测床层温度，联动床层间气体再分布器协同调节，将床层出口温度波动严格控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内，同时限定最高温度阈值以保障催化剂使用寿命。压力控制则以压缩机出口压力为主设定值，建立其与循环气流量、转速等变量的非线性函数关系，形成压比与流量的联动协同调节机制。更为关键的是，系统引入模型预测控制等先进算法，可前瞻性预判负荷阶跃、进料波动下的系统动态响应，主动调整操作变量，实现温度偏差快速回稳与压力波动最小化。这种智能化控制策略，确保装置在各类工况下均能维持最优操作区间，堪称过程强化的“神经中枢”。

3.4 通过循环气组成精准调控强化反应与分离效率

工艺流体组成的精准调控，是过程强化在分子尺度的核心落地手段，直接影响反应速率、产品收率及后续分离工序能耗。在氨合成系统中，循环气氢氮比与惰性气体含量是决定反应效能的两大关键参数。文档显示，该系统将氢氮摩尔比控制区间设定为2.95~3.05，采用比值控制与床层温升约束相耦合的调控方案，结合在线成分分析仪实时监测与反馈校正，确保反应始终贴近最优化学计量比，最大化氨生成推动力。针对氩气、甲烷等惰性气体，系统设计了精细化排放策略，在低压分离器等关键节点设置惰性气体释放口，实施受控间歇放空操作，有效避免惰性组分在回路中累积导致的反应平衡后移、有效分压下降问题。这种对循环气组成的动态优化管控，既提升了反应器时空产率，又减轻了下游冷冻、吸收单元的净化负荷，从反应源头实现了过程强化。

3.5 采用模块化与紧凑化设计提升系统操作弹性

过程强化既聚焦稳态运行性能，亦注重系统在启停、变负荷等非稳态工况下的操作弹性与运行安全，这一目标需通过模块化、紧凑化设计理念落地实现。卡萨利工艺在系统可操作性设计上颇具代表性，通过硬件结构与控制逻辑的协同优化，强化了非稳态工况适应能力。例如，循环压缩机系统配置高位吸入鼓，可确保进入压缩机的气体为干气，规避液击事故风险，同时为反喘振回路预留最短流体路径与充足阀位余量。换热网络中增设旁通支路，在启停、低负荷工况下可灵活调整热流分配，避免设备处于不利工况运行。控制系统亦兼顾动态需求，为温度、压力、流量等关键测点预设适配启停、降负荷工况的特殊控制逻辑，涵盖热氨与冷氨旁路切换、惰性气体置换顺序等关键操作。这种将操作弹性融入硬件设计与控制逻辑的模块化紧凑化方案，大幅缩短非正常工况持续时间，提升装置年运行时率，为全生命周期过程强化提供了坚实保障。

4 未来发展趋势

4.1 智能控制与数字孪生深度融合提升系统自主决策能力

化工过程强化的未来发展，将深度依托智能控制与数字孪生技术的融合创新，打造兼具精准预测、动态优化与自主决策能力的智能化运行体系。结合卡萨利工艺对多变量协同控制、动态响应性能的重视，未来核心趋势是将现有模型预测控制框架，升级为嵌入人工智能算法的自适应智能控制平台。数字孪生凭借对物理系统的精准虚拟映射，整合高保真工艺模型、实时传感数据与历史运行台账，可实现合成回路内反应、传热、流体动力学等复杂过程的精准模拟与前瞻预判。这种技术深度融合，将显著增强大型合成装置在复杂工况下的运行稳定性、能效水平与负荷适应性，为无人化操作落地及全生命周期性能优化筑牢根基。

4.2 新材料与模块化设计驱动能效瓶颈突破与建设模式革新

新材料应用与模块化、紧凑化设计理念的深化，是未来过程强化突破性能瓶颈、革新工程建设模式的核心方向。文档已明确设备压降控制、材料选型对系统能效的关键影响，未来将逐步推广高性能合金、特种复合材料及抗氢脆、耐高温的新型催化剂载体，这类材料可耐受更高温、高压及强腐蚀工况，为设计更紧凑、传质传热效率更优的反应器与换热设备提供可能。模块化设计则将进一步深化，把文档所述合成回路等工艺系统，拆解为若干功能完备的标准化预制模块，在工厂内完成集成制造与全性能测试后，运输至

现场快速对接组装。该模式不仅能大幅缩短项目建设周期、降低前期投资成本，更可保障各模块达至最优运行性能，为后续系统升级改造提供便利。

5 结束语

过程强化技术依托多目标耦合设计思路，在提升化工装置综合效能、助力节能降碳方面彰显出独特优势。面向未来工业化推广需求，仍需聚焦极端工况下的系统动态响应机制，攻克长期运行中的性能退化难题。持续深化智能控制与全生命周期优化技术研究，将成为推动该技术规模化应用、充分释放其节能降碳潜力的核心发力点，为流程工业绿色高质量发展注入持久动力。

参考文献：

[1] 耿霞. 基于化工过程强化技术的反应器设计与优化研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(07): 111-113.
 [2] 崔玉红. 过程强化技术在化工生产中的应用 [J]. 现代盐化工, 2025, 52(01): 88-90.

[3] 徐国亮. 化工过程强化技术在丁腈胶乳生产过程中的应用 [J]. 化学工程与装备, 2023, (12): 29-33.
 [4] 高峰, 负莹, 杨秀娜, 等. 超声波强化技术在化工过程中的应用进展 [J]. 当代石油石化, 2022, 30(08): 22-27.
 [5] 孙宏伟, 陈建峰. 我国化工过程强化技术理论与应用研究进展 [J]. 化工进展, 2011, 30(01): 1-15.
 [6] 佚名. 多项化工过程强化技术获应用 [J]. 河南化工, 2008, (04): 35.
 [7] 方向晨, 黎元生, 刘全杰. 化工过程强化技术是节能降耗的有效手段 [J]. 当代化工, 2008, (01): 1-4+34.
 [8] 巩金龙, 陈光文, 张香平. 化工过程强化：从理念到实践 [J]. 化工学报, 2020, 71(1): 1-20.
 [9] 王健, 刘昌俊, 谢在库. 面向碳中和的化工过程强化技术路径分析 [J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1097-1110.
 [10] 江志农, 张来斌, 段礼祥, 等. 面向智能工厂的数字孪生车间构建及关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-15.

