

化工过程模拟与节能降耗技术

孟海娟

宁夏瑞泰科技股份有限公司 宁夏 中卫 755000

摘要：化工行业高能耗、高损耗问题制约绿色低碳发展，过程模拟是化工节能降耗的核心关键技术。本文阐述化工过程模拟的原理、主流软件及建模流程，从设备、工艺、管控三层面剖析生产能耗损耗核心成因。聚焦参数优化、流程重构、设备改造等核心节能技术，结合实际工程案例验证技术成效，结果表明该系列技术可大幅降低化工装置能耗，兼具经济与环保价值，为化工行业节能降耗提供技术参考。

关键词：化工过程；模拟；节能降耗技术

引言：双碳背景下，化工行业作为高耗能产业，节能降耗、提质降碳成为转型升级核心目标。传统化工生产依赖经验调控，存在能耗损耗大、能效偏低、管控粗放等诸多问题，难以适配精细化绿色生产需求。化工过程模拟可精准复刻生产工况、定位能耗短板，是破解行业节能难题的有效手段。本文基于过程模拟核心理论与技术，分析生产能耗痛点，探究多元化节能降耗技术及应用效果，助力化工产业高效绿色发展。

1 化工过程模拟核心技术与理论基础

1.1 化工过程模拟基本原理

（1）过程模拟的核心定义与仿真逻辑。化工过程模拟是以化工热力学、传递过程原理为核心，依托数学模型量化化工生产单元及全流程运行规律的技术。其仿真逻辑是将实际化工生产的物理、化学变化转化为数学方程，通过数值计算复刻生产工况，实现对工艺运行状态的预测与分析。（2）物料衡算、能量衡算与动量衡算基础理论。三大衡算是模拟的核心支撑。物料衡算遵循质量守恒，核算各单元物料输入、输出与损耗；能量衡算依据能量守恒，追踪反应、传热过程的能量转换与损耗；动量衡算基于动量守恒，适配流体输送、压降变化等工况，保障流体动力学模拟精准度。（3）化工过程热力学模型与物性参数选取原则。热力学模型是模拟计算的核心，适配气液平衡、相态变化等场景。物性参数需结合介质组分、温度、压力工况选取，遵循贴合实际工况、数据精准、模型适配的原则，避免参数偏差导致整体模拟失真。

1.2 主流化工过程模拟软件与技术特点

（1）AspenPlus/HYSYS模拟软件的功能与适用场景。AspenPlus适配精细化工、精馏分离等复杂稳态流程模拟；HYSYS侧重油气、天然气加工领域，兼具稳态与简易动态模拟能力，操作便捷、物性数据库完善。（2）

PRO/II、gPROMS等仿真软件的技术优势对比。PRO/II擅长石油炼制、化工精馏流程模拟，计算稳定性强；gPROMS聚焦动态、非线性复杂过程，适配反应动力学、过程瞬态变化模拟，精准度更高。（3）各类模拟软件在节能优化中的适配性分析。稳态软件适合流程参数静态节能优化，筛选最优操作参数；动态软件可适配变工况、间歇性生产的节能调控，适配精细化、动态化节能优化需求。

1.3 化工过程建模与仿真流程

（1）化工生产流程简化与模型搭建方法。基于生产实际剔除次要设备与干扰因素，保留核心反应、分离、输送单元，依托软件模块搭建对应数学模型，匹配实际工艺拓扑结构。（2）模型参数校准与精度验证手段。通过实测生产数据修正物性参数、反应动力学参数，对比模拟数据与实际工况数据，修正模型偏差，确保模拟结果贴合生产实际。（3）稳态模拟与动态模拟的实施流程与差异。稳态模拟针对恒定工况，流程简单、计算高效，用于常规工艺优化；动态模拟适配工况波动场景，需考虑时间变量，可模拟启停、负荷调整过程，更贴合实际生产动态变化^[1]。

2 化工生产能耗损耗关键因素分析

2.1 工艺设备层面能耗问题

（1）换热设备换热效率低、能量损耗严重问题。换热器是化工能量传递的核心设备，长期运行后易出现管壁结垢、腐蚀、堵塞等问题，大幅降低传热系数，导致冷热介质换热不充分。为满足生产温度要求，系统需持续增加加热或冷却负荷，造成大量热能、冷能浪费。同时，设备密封老化引发的热量外泄、换热温差设置不合理等问题，进一步加剧了换热过程的能量损耗，是设备层面能耗超标的主要原因之一。（2）反应釜、精馏塔等核心设备运行参数不合理损耗。反应釜的温度、压力、

搅拌速率等参数偏离最优工况时,会导致反应转化率下降、副反应增多,需通过延长反应时间、增加原料投入弥补产能,间接提升能耗。精馏塔存在回流比过大、塔压失衡、进料参数不稳定等问题,会造成塔内气液传质效率降低,分离过程消耗大量蒸汽与电力,产生不必要的能量损耗。(3)泵、风机等辅助设备能耗冗余问题分析。化工生产中泵、风机多为长期连续运行设备,多数设备按照最大生产负荷选型,实际生产常处于低负荷、变负荷运行状态。设备长期偏离高效工作区间,运行效率大幅降低,出现“大马拉小车”的能耗冗余现象。此外,设备叶轮磨损、管路阻力过大、变频调控缺失等问题,进一步增加了无效能耗消耗。

2.2 工艺流程层面能耗缺陷

(1)生产流程冗余、工序衔接不合理造成的能量浪费。部分化工生产线工艺设计老旧,存在多余的输送、过滤、缓冲工序,物料多次周转、升降温,产生额外能量消耗。各生产工序衔接缺乏统筹规划,上下游工况匹配度低,易出现设备空载、待机运行等情况,持续造成能源浪费,降低整体生产能效。(2)冷热物流匹配失衡、余热回收利用率低的问题。生产过程中存在大量高温出料、低温进料等冷热物流资源,但现有流程普遍存在冷热物流交叉匹配不足的问题。高温余热废气、废水未得到充分回收利用,直接排放造成热能流失,同时生产所需热能需依靠外部热源补充,形成双重能耗损耗,余热回收系统的低效运行加剧了能源浪费^[2]。(3)间歇生产过程能耗波动与能量损耗特征。间歇化工生产具有启停频繁、工况不稳定的特点,设备每次启停需反复升温、升压、降温泄压,产生大量启停能耗。生产批次切换过程中,物料残留、工况调整滞后、设备空载等待等问题突出,能耗波动幅度大,相较于连续生产模式,无效能量损耗更为显著。

2.3 运行管控层面能耗隐患

(1)人工操作参数偏差导致的能耗升高。化工生产部分工序依赖人工操作,操作人员技术水平、操作习惯存在差异,易出现温度、压力、流量等参数调节偏差。长期偏离最优工艺参数运行,会导致设备运行效率下降、单位产品能耗上升,且人为操作的随机性难以实现精准控能,持续增加生产能耗。(2)设备老化、运维不及时引发的能耗损耗。设备长期服役会出现零部件老化、性能衰减等问题,若日常巡检、维护保养不到位,易引发设备泄漏、运行卡顿、效率下降等故障。故障设备无法维持高效运行状态,能耗持续攀升,同时易引发工况波动,间接增加整体生产线的能源消耗。(3)传统

管控模式缺乏精准节能调控机制。传统化工能耗管控多采用粗放式管理,仅依靠人工定期记录能耗数据,无法实时监测各设备、工序的能耗状态。缺乏智能化数据分析与动态调控手段,难以精准定位能耗异常点位,无法及时优化工况参数,导致各类能耗损耗问题长期存在,节能管控效果极差。

3 基于过程模拟的化工节能降耗关键技术与应用

3.1 基于模拟的工艺参数优化节能技术

(1)反应温度、压力、进料配比参数仿真优化方法。依托AspenPlus、HYSYS等模拟软件,可对化工反应体系进行单变量与多变量仿真迭代计算,规避传统经验调试的盲目性。通过固定其余变量、梯度微调核心工艺参数,精准定位反应体系最优运行区间。在精细化工合成、酯化反应等工艺中,经仿真优化进料配比后,原料利用率可提升3%~5%,在保障产品纯度 $\geq 99.2\%$ 的前提下,有效降低无效反应带来的能源消耗^[3]。(2)精馏回流比、换热温差等核心参数节能调控策略。精馏与换热系统是化工能耗主力单元,其中回流比每超额10%,蒸汽能耗将增加8%左右。借助过程模拟软件可构建参数能耗关联模型,在满足分离精度标准下,将传统固定回流比优化为动态可调回流比。同时精准校准换热温差,避免温差过大造成的热能损耗,实测数据显示,该调控策略可使精馏单元综合能耗降低6%~10%。(3)多参数耦合下的最优节能运行方案筛选。化工生产中温度、压力、流量、回流比等参数存在强耦合关系,单参数优化节能效果有限。通过模拟软件开展正交试验与响应面分析,构建多参数耦合能耗模型,排除参数相互干扰的负面影响,筛选出全局最优运行方案。工业应用表明,多参数协同优化可让装置整体能耗较原始工况下降12%左右,节能效果远优于单一参数调整。

3.2 流程重构与能量系统优化技术

(1)基于模拟仿真的冗余工序精简与流程优化。针对传统化工流程工序繁琐、物料周转频繁等问题,利用过程模拟复刻全流程能耗分布,精准识别空载缓冲、重复换热、多余输送等冗余工序。通过仿真验证工序合并、删减与重组方案的可行性,在不影响生产稳定性的前提下精简流程。某石化装置改造后,删减3处冗余输送工序,物料周转能耗降低4.5%,流程运行效率显著提升。(2)冷热物流集成匹配与余热余压回收优化设计。依托模拟软件统计全厂冷热物流负荷、温度区间与流量参数,重构冷热物流匹配体系,替代传统单一、无序的换热模式。将高温工艺出料与低温进料精准耦合换热,同时回收装置余热、余压用于预热物料、驱动辅助设

备。优化后企业余热回收利用率可由原来的55%提升至82%，大幅减少外置热源与冷源的能源投入^[4]。（3）夹点技术结合模拟软件的能量系统节能改造。将夹点技术与Aspen模拟结合，精准测算系统夹点温度、最小公用工程消耗，定位能量瓶颈与热量误用区域。通过模拟仿真验证换热网络改造、公用工程系统调配方案，规避夹点违背问题，最大化回收系统废热。该复合改造技术可使化工系统公用工程能耗整体降低15%–18%，是大型化工装置节能改造的核心技术。

3.3 设备运行节能优化与改造技术

（1）模拟仿真辅助换热设备、精馏设备节能改造。通过模拟软件还原换热器结垢、传热低效及精馏塔传质不均的运行状态，精准计算设备换热系数、塔板效率衰减数值，针对性制定改造方案。通过优化换热器流道结构、更换高效换热板片、规整精馏塔内件，可将换热器传热效率提升20%以上，精馏塔分离效率提升12%，有效解决核心设备能耗偏高问题。（2）动设备变频调控与运行工况优化方案。针对泵、风机等动设备“大马拉小车”的能耗冗余问题，依托动态模拟仿真设备全负荷运行特性，确定高效运行区间。为设备加装变频调控系统，根据生产负荷实时调节转速与流量，替代传统节流调控模式。实测数据显示，动设备变频优化后，单台设备节电率可达18%–25%，长期连续运行节能效益显著。

（3）新型节能设备与传统工艺的适配仿真验证。新型高效节能设备直接替换存在工况不匹配、运行不稳定风险，利用过程模拟可提前复刻替换后的全流程运行状态，验证设备适配性。通过仿真调试设备运行参数、匹配上下游工况，规避负荷波动、工艺失衡等问题，为设备改造提供数据支撑，大幅降低改造试错成本，保障节能改造平稳落地^[5]。

3.4 工程应用效果与节能效益分析

（1）典型化工工艺节能改造模拟应用案例。某精细化工乙酸乙酯生产装置依托过程模拟开展全方位节能优化，整合参数调控、换热网络重构、设备改造等多项技

术，对反应、精馏、换热全流程进行仿真优化与落地改造，实现生产工况精准管控，解决了装置能耗高、余热浪费严重的行业共性问题。（2）改造前后能耗数据对比与节能效果验证。该装置改造前单位产品综合能耗为0.82t标准煤/t产品，改造后降至0.65t标准煤/t产品，综合能耗降幅达20.7%。其中精馏单元蒸汽消耗减少22%，动设备电力消耗减少23.5%，余热回收利用率提升27%，各项能耗指标均达到行业先进标准，节能效果十分显著。

（3）经济、环保双重效益综合分析。经济效益方面，改造后装置年节约标准煤约860t，减少能源采购成本超60万元，设备运维成本同步降低，投资回收期仅1.8年。环保效益方面，年减少二氧化碳排放约2150t、二氧化硫排放6.8t，有效降低生产过程碳排放与污染物排放，实现化工生产节能、降碳、增效的双重发展目标。

结束语

综上，化工过程模拟技术可精准定位化工生产全流程能耗损耗点位，通过工艺参数优化、能量系统重构、设备节能改造等手段，有效解决设备低效、流程冗余、管控滞后等能耗问题。工程实践证实，该技术体系节能降碳成效显著，可大幅提升生产能效与经济效益。未来可结合智能化技术优化模拟精度，推动化工节能管控向动态化、精准化、智能化升级，助力行业可持续发展。

参考文献

- [1]马岩山,王敏,程奇.气体膜分离技术在精细化工节能降耗中的应用[J].化学工程与装备,2025,13(4):65-67.
- [2]张维强.化工工艺中常见节能降耗技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(5):190-192.
- [3]闫明,申庆飞,司华彬.化工工艺节能降耗常见技术措施[J].化工管理,2022,8(17):35-37.
- [4]乜春晖.对化工过程中节能降耗工艺设计探讨[J].化工管理,2024,21(30):146-149.
- [5]田秀.化工分析与生产过程中的节能降耗[J].山西化工,2023,39(1):130-132.