

# 化学工程工艺对化学工程节能的作用

苏道顺

连云港石化有限公司 江苏 连云港 222000

**摘要:** 本文旨在系统性地探讨化学工程工艺在推动化学工程节能中的核心作用。文章首先阐述了化学工程节能的必要性与紧迫性,分析了当前化工行业面临的能耗现状与挑战;其次,从热集成与能量回收、反应过程强化、分离过程优化、先进控制与智能化、以及绿色工艺路线开发等五个维度,深入剖析了现代化学工程工艺如何通过技术创新实现节能降耗;最后,文章展望了未来化学工程工艺在节能领域的前沿发展方向,并提出了相应的策略建议。研究表明,通过持续的工艺创新与系统集成,化学工程工艺不仅是实现节能目标的技术手段,更是构建绿色、低碳、高效现代化工体系的战略引擎。

**关键词:** 化学工程; 节能; 工艺优化; 过程强化; 热集成; 绿色化工

## 引言

21世纪,人类社会的发展遭遇资源与环境的双重约束,化石能源过度消耗致储量减少、气候恶化,节能减排成为全球共识。中国作为化工生产消费大国,化学工业能耗占全国工业总能耗超20%,传统高能耗、高排放模式难以为继,推动其绿色转型迫在眉睫。化学工程是实验室成果向工业生产转化的关键学科,核心是优化物质与能量转化过程,即化学工程工艺。过去工艺重产品收率、纯度和成本,对能量流管理不足。如今能源成本上升、环保法规趋严,工艺设计内涵深刻变革,优秀工艺需物质流与能量流协同优化,内嵌节能理念。深入研究化学工程工艺对节能的作用,理论、现实意义重大,关乎企业竞争力、国家能源安全及全球生态。本文将从多层面论述其如何成为撬动化学工程节能的关键支点。

## 1 化学工程节能的必要性与挑战

### 1.1 能源消耗现状与环境压力

化学工业是典型的流程工业,其生产过程通常涉及高温、高压、多相、复杂的物理化学变化,这些特点决定了其固有的高能耗属性。以我国为例,合成氨、乙烯、烧碱、纯碱、电石等基础化工产品的单位产品能耗虽经多年努力有所下降,但与国际先进水平相比,仍存在5%-15%的差距。这意味着,通过工艺优化和技术升级,我国化工行业仍有巨大的节能潜力可挖。与此同时,化工生产过程中的能源消耗直接关联着温室气体排放。据统计,化工行业的二氧化碳排放量占全球工业部门总排放量的相当大比例。在《巴黎协定》及我国“30·60”双碳目标的指引下,化工行业面临着前所未有的减排压力。节能,作为最直接、最经济的减排手段,其重要性不言而喻。降低单位产品的能耗,就是减

少单位产品的碳足迹,这是化工企业履行社会责任、实现绿色发展的必由之路。

### 1.2 经济驱动与市场竞争

从微观经济角度看,能源成本是化工企业运营成本的重要组成部分。对于一些能源密集型产品(如合成氨、甲醇),能源成本可占到总生产成本的60%以上。在全球化竞争日益激烈的市场环境中,任何能够有效降低能耗的工艺改进,都将直接转化为企业的成本优势和利润空间。尤其是在能源价格波动剧烈的时期,拥有先进节能工艺的企业无疑更具抗风险能力和市场竞争力<sup>[1]</sup>。此外,随着绿色金融、ESG(环境、社会、治理)投资理念的普及,企业的能效表现已成为投资者评估其长期价值的重要指标。高能耗、高排放的企业将面临融资困难、市场准入受限等风险。反之,积极采用节能工艺、践行绿色制造的企业,则更容易获得政策支持、资本青睐和消费者认可。

### 1.3 面临的主要挑战

尽管节能的重要性已被广泛认知,但在实践中仍面临诸多挑战。首先,许多现有化工装置是在过去能源价格低廉、环保要求宽松的背景下设计和建设的,其工艺路线和设备选型并未充分考虑能效最大化,对其进行大规模改造往往需要巨额投资。其次,化工过程的复杂性和耦合性使得节能优化并非简单的线性叠加,局部优化可能带来全局次优甚至负面效应,这要求工程师具备系统工程的思维。再者,一些前沿的节能工艺技术(如新型催化剂、膜分离、微反应器等)尚处于研发或示范阶段,其工业化放大、长周期运行的可靠性及经济性仍需验证。最后,企业内部缺乏专业的能效管理人才和系统化的能效评估体系,也制约了节能工作的深入开展。

## 2 化学工程工艺在节能中的核心作用机制

### 2.1 热集成与能量回收：构建高效的能量网络

热力学第二定律指出，能量不仅有“量”的概念，更有“质”（即品位）的概念。化工过程中大量的能量损失并非因为能量消失，而是因为高品位能量（如高温蒸汽、电能）被不可逆地降级为低品位能量（如低温废热），从而无法被有效利用。热集成技术正是解决这一问题的关键。夹点分析是热集成领域的经典方法。它通过对全厂或装置内所有热物流和冷物流的热特性进行系统分析，确定能量回收的理论极限（即夹点），并据此设计最优的换热网络（HEN）。一个设计精良的换热网络，能够最大限度地利用工艺物流之间的热量匹配，用高温物流预热低温物流，从而大幅减少外部公用工程（如蒸汽、冷却水）的消耗。除了过程间的热集成，余热回收也是节能的重要途径。化工生产中产生大量不同温度等级的废热，如反应器出口的高温气体、精馏塔顶的蒸汽、高温烟气等<sup>[2]</sup>。通过采用余热锅炉、有机朗肯循环（ORC）、热泵等技术，可以将这些废热转化为有价值的蒸汽、电力或用于其他低温需求的工艺加热，实现能量的梯级利用。例如，在硫酸生产中，转化炉产生的高温炉气可通过废热锅炉回收产生中压蒸汽，供全厂使用，使整个装置的能量自给率大大提高。

### 2.2 反应过程强化：从源头提升能效

反应过程强化（PI）旨在通过创新的反应器设计和操作方式，从根本上提升反应效率，从而实现节能。新型高效反应器是PI的重要体现。例如，微通道反应器凭借其极小的特征尺寸（微米级），提供了极大的比表面积，使得传热传质速率比传统反应器高出几个数量级。这不仅能精确控制反应温度，抑制副反应，提高选择性，还能处理强放热或强吸热反应，避免因温度失控造成的能量浪费和安全风险。在硝化、氯化等精细化工反应中，微反应器的应用已展现出显著的节能和安全优势。催化技术的进步同样是反应强化的核心。开发高活性、高选择性、长寿命的催化剂，可以在更低的温度和压力下实现目标反应，直接降低反应过程的能耗。例如，新型分子筛催化剂在石油裂解中的应用，显著降低了裂解温度，减少了焦炭生成，从而节省了再生所需的能量。此外，多功能催化剂的设计，可以将原本需要多步完成的反应（如反应-分离耦合）集成在一个反应器内完成，省去了中间产物的分离和再加热/冷却步骤，极大地简化了流程并节约了能量。

### 2.3 分离过程优化：攻克能耗“高地”

高效分离技术的研发与应用是关键。催化精馏是一

个革命性的概念，它将化学反应与精馏分离巧妙地结合在同一塔内。反应生成的产物一旦形成，便立即被分离移出反应区，根据勒夏特列原理，这能极大地推动反应向正方向进行，提高转化率和选择性。同时，反应热可以直接用于精馏所需的汽化潜热，实现了能量的内部耦合利用。在乙酸乙酯、MTBE（甲基叔丁基醚）等产品的生产中，催化精馏技术已成功替代了传统的反应+精馏两步法，能耗可降低30%以上。膜分离技术作为一种新兴的分离方法，因其能耗低、无相变、操作简单等优点，在气体分离（如氢气回收、CO<sub>2</sub>捕集）、液体脱水（如渗透汽化膜脱除有机溶剂中的微量水）等领域展现出巨大潜力。与传统的吸收、吸附或精馏相比，膜分离过程通常只需要提供推动力（如压力差），而不涉及大量的相变潜热，因此能效更高<sup>[3]</sup>。此外，对传统精馏塔本身进行优化也不容忽视。通过采用高效塔内件（如规整填料、新型塔盘）、优化操作参数（回流比、进料位置）、实施热泵精馏（将塔顶低温蒸汽压缩升温后用于塔釜再沸）等措施，也能在现有装置上实现可观的节能效果。

### 2.4 先进过程控制与智能化：实现动态最优运行

模型预测控制（MPC）能够基于过程的动态数学模型，预测未来一段时间内的系统行为，并提前计算出最优的控制动作序列，以确保关键工艺变量（如温度、压力、流量）始终稳定在设定值附近，避免因波动造成的能量浪费。例如，在乙烯裂解炉中，MPC可以根据原料组成的变化，实时调整炉膛温度分布和停留时间，确保在最大化乙烯收率的同时，最小化燃料消耗。全流程模拟与实时优化（RTO）技术则站在更高的层面。它利用高保真的机理模型或数据驱动模型，对整个生产装置进行在线模拟，并结合市场价格、能耗成本等经济参数，求解出全局最优的操作条件。RTO系统可以定期（如每小时）向DCS（分布式控制系统）下发新的设定点，引导装置始终运行在经济效益和能效的最优曲线上。这种从“经验操作”到“模型驱动”的转变，是实现精细化能效管理的关键。

### 2.5 绿色工艺路线开发：重构节能的底层逻辑

最高层次的节能，是在工艺路线选择的源头就规避高能耗环节。这需要化学工程师跳出单一装置的局限，从分子层面和全生命周期的角度，重新审视和设计化学转化路径。原子经济性原则强调，在化学反应中应尽可能多地将原料分子中的原子转化为目标产物，减少废物的生成。高原子经济性的反应本身就意味着更少的分离负担和更低的能耗。例如，环氧丙烷的传统氯醇法会产生大量含氯废水，而采用HPPO（过氧化氢直接氧化丙烯）法则只生成

水作为副产物,工艺流程大大简化,能耗和环保压力显著降低。生物催化与电化学合成等新兴技术也为绿色工艺开发开辟了新路径<sup>[4]</sup>。生物催化通常在温和的条件下(常温常压、水相)进行,能耗远低于传统的高温高压化学催化。电化学合成则可以直接利用可再生电力驱动化学反应,有望在未来绿电成本持续下降的背景下,成为一种极具前景的低碳甚至零碳生产方式。

### 3 未来展望与策略建议

#### 3.1 前沿方向展望

(1) 数字化与人工智能深度融合:数字孪生技术将构建物理工厂的虚拟镜像,实现对能效的全生命周期监控、预测性维护和“假设分析”。AI算法将能从海量运行数据中挖掘出人眼难以发现的节能模式,自主提出优化策略。(2) 可再生能源与化工过程耦合:随着风电、光伏等间歇性可再生能源成本的下降,如何将其稳定、高效地融入连续化生产的化工装置将成为新课题。电加热裂解炉、绿氢耦合合成氨/甲醇等“Power-to-X”技术将重塑传统化工的能源结构。(3) 循环经济导向的工艺设计:未来的工艺设计将更加注重物料的闭环循环。例如,开发能高效解聚废旧塑料并将其单体高值化利用的化学工艺,不仅能解决环境污染问题,更能节约生产原生塑料的巨大能耗。

#### 3.2 策略建议

政府应完善能效标准和碳交易市场,加大对先进节能工艺技术研发和首台套应用的财政补贴与税收优惠,营造有利于绿色工艺创新的市场环境。建立以企业为主体、市场为导向、高校和科研院所为支撑的创新联合体,加速实验室成果向工业化应用的转化,共同攻克节能工艺中的“卡脖子”技术。在高等教育和职业培训中,强化系统工程、过程集成、数据分析等交叉学科知识,培养既懂化工

又懂数字化的复合型人才,为企业节能工作提供智力支持。在工艺方案比选时,不仅要考虑装置内部的能耗,更要评估从原料开采、产品使用到废弃处置全过程的能源与环境影响,做出真正可持续的选择。

### 4 结语

化学工程工艺绝非仅仅是物质转化的“管道”,它更是能量流动的“指挥家”和节能降耗的“主战场”。从热集成的能量网络构建,到反应与分离过程的源头强化,再到智能化的动态优化,以及绿色工艺路线的根本性变革,化学工程工艺以其系统性、创新性和前瞻性,在推动化学工程节能的道路上发挥着无可替代的核心作用。面对能源与环境的双重挑战,化工行业必须将节能理念深植于工艺研发、设计、建设和运行的每一个环节。唯有通过持续不断的工艺创新,才能突破能效瓶颈,实现经济效益、社会效益与生态效益的和谐统一。未来的化学工程师,不仅要成为化学反应的专家,更要成为能量流的艺术师,用智慧和创新描绘出一幅绿色、低碳、高效的现代化工新图景。化学工程工艺,作为连接科学与产业的桥梁,必将在构建可持续未来的历史进程中,书写下浓墨重彩的一笔。

### 参考文献

- [1]谭开军,申卫星.化学工程与工艺对化学工业节能的促进作用[J].科技视界,2025,15(21):71-73.
- [2]吕烁,刘允鹏.绿色化学工程与工艺对化学工业的促进作用[J].清洗世界,2024,40(03):74-76.
- [3]卢奕先.绿色化学工程与工艺对化学工业的促进作用[J].当代化工研究,2024,(06):132-134.
- [4]孙美芹,赵淑琴.化学工程与工艺对化学工业节能的促进作用[J].化工管理,2023,(20):43-45.