

# 化工生产中降低精馏技术能耗的措施

姚国江

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16805

**[摘要]** 精馏技术是化工生产核心分离单元,广泛应用于石油炼制、精细化工等领域,但高能耗问题突出,部分企业精馏能耗占总能耗超50%,且存在工艺设计局限、设备效率低、操作参数优化不足等问题。本文从五维度提出降能耗措施:优化精馏工艺参数(回流比、进料参数等)、采用新型技术(热泵、膜、萃取、反应精馏)、改进设备结构(塔型、填料、附属设备)、强化能源回收(冷凝热、余热利用)、应用智能控制(实时监测、MPC算法、数字孪生)。这些措施可有效减少能耗,为化工企业节能增效、行业绿色可持续发展提供技术支撑。

**[关键词]** 精馏技术; 化工生产; 能耗降低; 措施

**中图分类号:** TQ028 **文献标识码:** A

## Measures for Reducing Energy Consumption of Distillation Technology in Chemical Production

Guojiang Yao

First Olefin Branch, Ningxia Coal Industry Co., Ltd., National Energy Group

**[Abstract]** Distillation technology serves as a core separation unit in chemical production, widely applied in petroleum refining, fine chemicals, and other fields. However, it faces prominent high energy consumption issues: in some enterprises, distillation energy consumption accounts for over 50% of total energy consumption, coupled with limitations in process design, low equipment efficiency, and insufficient optimization of operating parameters. This paper proposes energy-saving measures from five dimensions: optimizing distillation process parameters (reflux ratio, feed parameters, etc.), adopting new technologies (heat pumps, membranes, extraction, reactive distillation), improving equipment structures (column types, packing, auxiliary equipment), enhancing energy recovery (condensation heat and waste heat utilization), and applying intelligent control (real-time monitoring, MPC algorithms, digital twins). These measures can effectively reduce energy consumption, providing technical support for chemical enterprises to save energy, increase efficiency, and promote green and sustainable development in the industry.

**[Key words]** Distillation technology; Chemical production; Energy consumption reduction; Measures

### 引言

在化工生产中,精馏技术凭借高分离精度,成为原料预处理、产品精制、废弃物回收的关键环节——石油炼制借其切割原油得不同馏分,精细化工用其提纯中间体保纯度,医药化工靠其分离药品有效成分控质量。但精馏能耗占企业总能耗30%–50%,部分企业更高。当前全球能源供应趋紧、环保要求提升,高能耗既增加企业成本,又与“碳达峰、碳中和”目标相悖,因此降低精馏技术能耗成为行业节能转型、提升竞争力的迫切需求。

### 1 精馏技术在化工生产中的重要性

精馏技术是基于混合物中各组挥发度差异实现分离的单元操作,在化工生产中具有不可替代的核心地位。从原料预处理

到产品精制,再到废弃物回收,几乎所有涉及混合物分离的环节都依赖精馏技术——例如石油炼制中通过精馏实现原油切割,得到汽油、柴油、煤油等不同馏分产品;精细化工中借助精馏提纯各类中间体,保障最终产品纯度达标;医药化工领域则通过精馏实现药品有效成分的分离与纯化,确保药品质量符合标准。

从能耗与成本角度看,精馏过程的能耗占化工企业总能耗的比例极高,部分以精馏为主要分离工艺的企业,该比例甚至超过50%,直接影响企业生产成本控制与利润空间。随着全球能源供应日趋紧张、环保要求不断提高,化工行业对节能降耗的需求愈发迫切,而降低精馏技术能耗成为企业实现成本优化、践行低碳发展理念的关键突破口。此外,提升精馏技术节能水平,还能

减少能源消耗带来的污染物排放,助力化工行业实现“碳达峰、碳中和”目标,推动产业向绿色可持续发展<sup>[1]</sup>。

## 2 化工生产中精馏技术的能耗现状

### 2.1 传统精馏工艺设计局限

多数化工企业仍采用传统的板式精馏塔或填料精馏塔,且工艺设计多基于“经验值”而非动态优化。传统精馏工艺通常采用单塔精馏或简单双塔精馏流程,未充分考虑混合物组分特性与分离需求的匹配性——例如对多组分混合物分离时,若仍采用单一精馏塔逐段分离,易导致塔内气液传质效率低下,需通过提高回流比或加热负荷保障分离效果,间接增加能耗。此外,传统工艺设计中对进料温度、进料位置的设定较为固定,未根据原料组分波动进行动态调整,导致塔内操作工况偏离最优状态,进一步加剧能耗浪费。

### 2.2 精馏设备运行效率偏低

设备是影响精馏能耗的核心载体,当前部分化工企业的精馏设备存在运行效率偏低的问题。一方面,部分企业仍使用老旧的板式塔,塔板类型多为传统浮阀塔或筛板塔,这类塔板的气液接触面积有限、传质效率较低,为达到预期分离效果,需消耗更多能源维持塔内气液循环;另一方面,填料塔的填料选型与装填质量也存在不足——例如选用比表面积小、空隙率低的填料,或装填过程中出现填料堆积、分布不均等问题,导致气液在塔内分布不均,传质阻力增加,进而增加加热与冷却负荷。此外,精馏塔附属设备如再沸器、冷凝器的换热效率也影响整体能耗,部分设备因结垢、腐蚀等问题,换热系数下降,需消耗更多能源弥补换热损失<sup>[2]</sup>。

### 2.3 操作参数优化不足

精馏过程的操作参数(如回流比、塔釜温度、塔顶压力、进料量)直接影响能耗水平,但当前多数企业对操作参数的优化仍停留在“粗放式”层面。一方面,操作人员多依赖经验设定操作参数,未建立参数与能耗、分离效率的关联模型,例如为确保产品纯度,常过度提高回流比——而回流比每增加10%,精馏塔的能耗可能增加15%~20%,导致能耗与分离效果的失衡;另一方面,部分企业缺乏实时监测与调控系统,无法及时感知原料组分波动、外界环境变化对塔内工况的影响,当进料组分变轻或变重时,若未及时调整回流比或塔釜温度,易导致塔内“过分离”或“分离不足”,既浪费能源,又可能影响产品质量。

## 3 化工生产中降低精馏技术能耗的主要措施

### 3.1 优化精馏工艺参数

精馏工艺参数的优化是降低能耗的基础,需围绕“提高传质效率、减少能源浪费”目标,对关键参数动态调整。回流比作为核心参数,过高会增加塔内液体循环量,推高再沸器与冷凝器负荷,过低则影响分离纯度,实际需结合混合物组分特性与产品纯度要求,按“最小回流比+安全系数”确定最优值,并随原料组分波动调整,如进料中易挥发组分含量升高时适当降回流比,避免“过分离”耗能。进料参数优化需兼顾温度与位置:进料温度应贴近进料板泡点,可利用塔顶冷凝器或塔釜再沸器余热预热,

减少额外加热或冷却能耗,若温度偏离泡点易打乱塔内气液平衡;进料位置需匹配塔内浓度分布,多组分分离时,易挥发组分含量高选上部进料,难挥发组分含量高选下部进料,确保与气液浓度梯度契合以提升传质效率。塔顶压力与塔釜温度的协同优化同样关键,保障纯度前提下,适当降低塔顶压力可降低混合物泡点温度,如常压精馏塔降压5%~10%,塔釜温度可降3~5℃,再沸器能耗减少8%~12%,同时需依塔顶压力调整塔釜温度,避免重组分过度加热造成能源浪费<sup>[3]</sup>。

### 3.2 采用新型精馏技术

突破传统精馏技术局限,采用新型精馏技术是降低能耗的关键方向,当前已应用或试点的主要有热泵精馏、膜精馏、萃取精馏及反应精馏,各类技术依不同原理实现节能。热泵精馏通过回收塔顶气相冷凝热循环利用,借助压缩机将塔顶低温气相压缩至高温高压状态,通入塔釜再沸器作为热源加热塔釜液相,自身冷凝后回流,仅耗压缩机电能即可替代传统蒸汽加热,能耗降低30%~50%,还可按工况选闭式或开式耦合,闭式适配塔顶腐蚀性气相,开式直接压缩气相通入再沸器,换热效率更高。膜精馏结合膜分离与精馏优势,利用疏水膜的选择性透过性,在膜两侧蒸汽压差作用下实现易挥发组分分离,无需将混合物完全沸腾,仅需维持一定温度差,加热负荷大幅降低,能耗减少40%~60%,且能在低温低压下操作,适配热敏性混合物分离,设备体积小、占地少,更适合中小型化工企业。萃取精馏通过加入萃取剂改变混合物组分相对挥发度,打破共沸或近沸分离难题,降低回流比与加热负荷,如乙醇-水分离加乙二醇可减少能耗;反应精馏则将化学反应与精馏分离结合,让反应产物及时脱离反应区推动反应正向进行,如酯化反应中分离生成的水,既提升转化率,又减少单独反应与精馏环节能耗,实现分离与反应的协同节能。

### 3.3 改进精馏设备结构

精馏设备是传质传热的核心载体,改进其结构以提升效率可从源头降低能耗,主要包括塔型优化、填料升级与附属设备改进三方面。塔型优化需依分离需求选高效节能塔型,如波纹填料塔采用比表面积250~750m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>、空隙率超90%的填料,气液接触充分、传质效率高,较传统板式塔能耗降20%~30%;立体传质塔结合板式与填料塔优势,通过立体传质元件提升传质效率40%以上且压降小,减少风机与泵能耗,老旧塔可改塔内件,如将传统浮阀塔板换为高效导向浮阀塔板,优化气液分布、减少返混,传质效率升15%~20%以降能耗。填料升级需优先选高效类型,金属波纹填料比表面积大、耐高压,适配石油化工高压场景;陶瓷波纹填料耐腐,适合酸碱分离;塑料花环填料质轻、空隙率高,用于低压场景,较传统拉西环填料,其传质单元高度(HTU)降30%~50%,相同分离要求下可缩塔高或降回流比,同时需分层装填并设分布器,避免填料堆积不均以保障气液接触效果。附属设备改进聚焦再沸器与冷凝器换热效率,再沸器可用波纹管(换热系数比光管高20%~30%)或翅片管(增换热面积)替代光管,且需定期除垢(结垢1mm致换热效率降10%~15%);冷凝器可换为板式,同体

积下换热面积是壳管式的3-5倍且易清洗,还可与进料预热器结合,用冷凝余热预热进料实现能源回收,进一步降低能耗<sup>[4]</sup>。

### 3.4 强化能源回收利用

精馏过程中存在塔顶气相冷凝热、塔釜液相余热、蒸汽冷凝水余热等大量可回收能源,通过强化回收可将“废弃能源”转化为可用能量,减少外部能源输入,具体可从三方面实施。一是塔顶冷凝热回收,传统流程中该热量随冷却水排放,可通过两种方式回收:将冷凝器与进料预热器耦合,利用冷凝热加热进料至接近泡点,如某乙醇精馏装置借此将进料温度从25℃提至75℃,再沸器蒸汽消耗减少25%;或如3.2节所述采用热泵技术,将塔顶气相压缩后通入再沸器加热塔釜液相,实现冷凝热循环利用。二是塔釜余热与蒸汽冷凝水余热回收,塔釜高温液相可通过余热换热器加热低温需求环节,如预热锅炉给水或厂区生活用水,减少锅炉燃料消耗;再沸器蒸汽冷凝后形成的100℃以上高温冷凝水,可回收至锅炉重新产汽或用于预热进料、清洗设备,避免热量损失,合理回收可使企业蒸汽消耗减少15%-20%。三是多塔串联系统能源梯级利用,多台精馏塔企业可依各塔操作温度差异,构建“高温塔→中温塔→低温塔”的能源传递链条,如用高温原油精馏塔的塔顶冷凝热加热中温柴油精制塔进料,用中温塔塔釜余热加热低温溶剂回收塔再沸器,还可将精馏余热与反应釜加热、物料干燥等其他工艺环节结合,构建全厂级余热回收网络,进一步挖掘节能潜力。

### 3.5 应用智能控制技术

随着工业自动化与数字化技术的发展,应用智能控制技术实现精馏过程的精准调控,成为降低能耗的重要手段,其通过实时监测塔内工况、动态调整操作参数,确保精馏过程始终处于最优运行状态,减少人工操作偏差或参数滞后调整导致的能耗浪费。需先建立实时监测系统,在精馏塔不同位置安装适配传感器,如用红外温度传感器监测塔内温度分布以避免接触式传感器因腐蚀、结垢产生的测量偏差,用在线气相色谱仪实时分析产品纯度,同步采集塔顶塔釜温度、塔内压力、回流流量及进料流量等关键参数并传输至中央控制系统,及时发现温度骤升、压力波动

等异常工况,为后续调控提供数据支撑。其次采用先进控制算法优化参数,传统PID控制仅能实现单一参数闭环控制,无法兼顾多参数耦合关系,而模型预测控制(MPC)、自适应控制等可基于精馏过程数学模型,综合回流比、进料量、塔釜温度等参数相互影响实现协同优化,例如MPC能依据实时数据预测工况变化趋势,提前调整回流比(进料中易挥发组分含量升高时降低回流比,预测产品纯度将低于标准时适当提高回流比),实践中采用MPC的精馏塔能耗可降低8%-15%,产品纯度稳定性提升20%以上。还需构建精馏过程数字孪生模型,建立与实际精馏塔物理一致的虚拟模型,结合实时监测数据模拟不同操作参数下的能耗与分离效果,如优化回流比时无需实际设备试错即可快速确定最优值以减少能耗,还能模拟原料组分波动、设备故障等场景提前制定应对策略避免能耗骤增,既提升控制精度,又为后续工艺升级与设备改造提供科学依据,助力精馏技术持续节能优化。

## 4 结语

本文系统分析化工精馏能耗现状,明确工艺、设备、操作参数层面的核心问题,并针对性提出五大降耗措施。这些措施协同作用,既能从基础优化(参数、设备)、技术突破(新型技术、智能控制)、能源循环(回收利用)多维度降低能耗,又能提升分离效率,帮助企业控制成本、减少污染物排放。未来,随着新型材料、低碳能源与智能算法发展,精馏技术将进一步向高效低碳升级,为化工行业实现“双碳”目标、推动绿色可持续发展提供更强支撑。

## [参考文献]

- [1]王焱.化工生产中降低精馏技术能耗的措施[J].化工设计通讯,2020,46(2):98-99.
- [2]周柳,唐桀.化工生产中降低精馏技术能耗的措施[J].中国科技期刊数据库工业 A,2020(9):237+239.
- [3]宋天磊.化工生产中降低精馏技术能耗措施[J].中国科技期刊数据库工业 A,2020(12):00227-00228.
- [4]刘奇波,耿伟.化工生产中降低能耗精馏技术的思路[J].化工管理,2022(21):44-46.