

化工精馏分离工艺能耗瓶颈分析与工艺结构优化策略

王广辉, 于尚燕, 崔磊, 王广明, 张彦娟
中化鲁西催化剂有限公司, 山东 聊城 252000
DOI:10.61369/ERA.2026090010

摘 要 : 精馏能耗瓶颈为热力学效率不足、塔板压降与传质惩罚、分离序列拓扑失当, 及非设计工况操作裕度纯度过剩引发的能耗翘尾。优化路径主要通过完全热耦合隔壁塔、多效精馏和蒸汽再压缩热泵实现能级匹配与流动重构, 借助共沸、萃取及反应精馏完成路径替代与过程耦合, 并与公用工程同步综合。评估层面, 耦合夹点分析与数学规划优化分离网络, 全生命周期权衡投资、操作费用与碳排放, 并配置面向原料波动及负荷变化的柔性控制, 以保障方案的经济性与稳健性。

关 键 词 : 能耗瓶颈; 结构优化; 全生命周期; 柔性控制

Analysis of Energy Consumption Bottlenecks in Chemical Distillation Separation Processes and Optimization Strategies for Process Structures

Wang Guanghui, Yu Shangyan, Cui Lei, Wang Guangming, Zhang Yanjuan
Sinochem Luxi Catalyst Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252000

Abstract : The energy consumption bottlenecks of distillation are insufficient thermodynamic efficiency, plate pressure drop and mass transfer penalty, improper separation sequence topology, and energy consumption carpage caused by excessive purity of operating margin under non-design conditions. The optimized path mainly achieves energy level matching and flow reconstruction through fully thermally coupled adjacent towers, multi-effect distillation and steam recompression heat pumps, and completes path substitution and process coupling with azeotropic, extractive and reactive distillation, and is integrated in synchronization with public utilities. At the evaluation level, the coupling point analysis and mathematical programming optimization separate the network, balance the investment, operating costs and carbon emissions throughout the entire life cycle, and configure flexible control for raw material fluctuations and load changes to ensure the economy and robustness of the scheme.

Keywords : energy consumption bottleneck; structural optimization; full life cycle; flexible control

引言

精馏是化工行业能耗最高的分离过程, 其能耗瓶颈主要源于热力学效率低下、塔板压降与传质损失、多组分分离序列不合理, 以及非设计工况操作裕度与纯度过剩引发的额外能耗。识别此类壁垒后, 结构调优成为关键: 引入完全热耦合隔壁塔、多效精馏和蒸汽再压缩热泵, 进行能级匹配与流动重构; 通过共沸、萃取和反应精馏实现过程耦合; 并协同公用工程参数综合优化。方案评估则需通过夹点分析与数学规划的耦合, 全生命周期权衡经济与碳排放, 并设计柔性控制方案以应对不确定性, 从而保证工艺优化的稳健性与可持续性。

一、精馏分离工艺能耗壁垒的形成机制与识别方法

(一) 理想功、损失功与热力学效率的定量标度

精馏过程的能耗壁垒源于其热力学本质。衡量一个分离任务所需的最小理论功耗, 即理想功, 仅由原料、产品组成及环境温度决定, 它代表了分离过程能量消耗的下限。在实际的精馏塔当中, 为了维持传质的推动力, 从上面到下面存在着浓度以及温度的梯度, 这种不可逆的性质使得实际的功耗远远超过理想功, 这

二者之间的差值就是损失功。在塔板上, 气液两相进行传质、传热以及流体阻力产生的压降是损失功的主要的来源。所以, 把理想功和实际功的比值定义为热力学效率, 将其作为定量标度精馏系统能量利用水平的核心的指标, 这个效率普遍是不足百分之二十的, 能够直观地反映出巨大的节能的空间^[1]。进一步来说, 通过计算各个塔段的损失功的分布情况, 可以定量地区分不同的不可逆因素的贡献程度, 从而精准地辨识出能耗瓶颈的具体的环节。

作者简介: 王广辉 (1971.10.23-), 男, 汉族, 山东省阳谷县人, 学历: 高中, 研究方向或工作领域: 钛硅、沸石分子筛催化剂生产及研发, 铜锌铝系共沉淀法催化剂生产及研发, 钨钼催化剂生产及研发。

（二）平衡级传质假设下塔板效率与压降引发的能耗惩罚

常规精馏的设计以及分析普遍依赖平衡级的假设，也就是认为离开每一块塔板的气液两相处于热力学平衡的状态。然而，实际的塔板上，气液接触的时间是有限的，传质的速率很难让两相达到理想的平衡组成，这种偏离的程度通过板效率来进行表征。板效率不足就意味着完成既定的分离任务需要设置更多的实际的塔板数量，由此直接增加了塔釜再沸器的热负荷。更加隐蔽的能耗惩罚来自塔板的压降。流体逐块板穿越塔板的时候产生的压力损失，迫使塔釜的压力明显高于塔顶，相应地，釜温也跟着攀升^[2]。这不但要求加热介质提供更高品位的能量，而且让塔内的温度梯度被人为地加大，进一步使分离过程的不可逆性恶化。所以，把板效率和压降的叠加效应纳入分析的框架，对于准确地诊断实际分离过程中的能耗瓶颈有着不可忽视的意义。

（三）多组分分离序列拓扑结构对总能耗的主导作用

当待分离的混合物包含三个或者更多的组分的时候，精馏塔的排列顺序并不是唯一的，不同的分离序列所对应的总能耗的差异可以达到数十个百分点。这一能耗瓶颈的形成是源于拓扑结构本身对组分间汽化潜热以及显热的分配方式产生了根本性的影响。在某一个序列当中，如果中间组分被过早地脱除，有可能导致后续分离中该组分被反复地蒸发以及冷凝，形成不必要的能量内循环。相反，如果把最难分离的组分对放在塔系的末端，就可以避免大量的非关键组分在塔内反复地升温以及相变。分离序列的确定本质上是在构建整个流程的能流骨架，它直接决定了各个塔的进料热状态、回流比以及操作压力，进而锁定了公用工程的总需求^[3]。

（四）非设计工况下操作裕度与产品纯度过剩产生的能耗翘尾

为了应对进料状态以及负荷扰动，在设计阶段通常会预留操作裕度，通过提高回流比或者加大再沸器热负荷的方式来确保产品在波动条件之下始终能够合格。这种“过度保证”的策略让分离操作长时间偏离最优经济点，产品纯度明显高于规格要求。超标部分所消耗的额外蒸汽以及循环水并没有创造出附加价值，反而形成了能量投入的无效增量^[4]。在非设计工况之下，这种由纯度过剩所引发的能耗翘尾效应会急剧放大，暴露出刚性操作边界和动态优化缺失之间的深层矛盾。

二、基于结构调优的节能工艺路径与集成策略

（一）完全热耦合精馏及隔壁塔技术的流动拓扑重构

传统的多组分分离通常是由多个常规精馏塔进行串联然后完成的，塔间的物料通过冷凝器与再沸器反复地进行相变，这种由独立塔器构成的流动拓扑存在重复潜热传递以及能量品位多次衰减的结构性缺陷。完全热耦合精馏通过取消单塔间的冷凝器和再沸器，用一种气液两相的直接交换来替代，实现了能量的逐塔传递以及梯级利用。在这个理念的基础之上发展起来的隔壁塔技术，就把这一思想从多塔间的热耦合浓缩到单一塔壳的内部，利用垂直隔板把塔内的空间划分成为预分馏段和主塔段，让多组分

混合物在同一设备的内部完成三个以上产品的分离。该重构方式从源头上避免了传统流程中中间组分的二次冷凝以及再蒸发，同时消除了因为进出料位置不当而导致的返混效应^[5]。流动拓扑的重构并不是简单的设备替换，而是通过解除对分离序列的刚性约束，从根本上降低了分离过程对高温热源的依赖，让再沸器总负荷和系统不可逆损失得到显著的削减。

（二）多效精馏与蒸汽再压缩热泵的能级匹配利用

针对传统单塔精馏当中塔顶冷凝热品位低从而直接排弃、塔釜加热又需要高位热源的能级错配这种情况，多效精馏与蒸汽再压缩热泵构成了两条核心的能级匹配利用路径。多效精馏把分离任务分配到不同操作压力的多塔之间，以前一效塔顶蒸汽当作后一效塔釜热源，实现潜热的梯次传递，其能耗随着效数的增加近似等比例下降。蒸汽再压缩热泵则通过压缩机提升塔顶低压蒸汽的压力以及饱和温度，让其自身用作本塔再沸热源，把开路排热转化成为闭路循环。多效精馏侧重于潜热的多次利用，热泵则着眼于潜热的品位升级，其选择需要依据物料热敏性、压缩温升以及公用工程条件进行综合确定^[6]。

（三）共沸、萃取与反应精馏的分离路径替代与过程耦合

对于那种存在共沸或者近沸点等情况、常规精馏难以进行经济处理的体系而言，直接分离这种路径往往会因为回流比变得过大或者纯度没办法达到标准，从而导致能耗急剧增加。共沸和萃取精馏这种方式是通过向塔的内部引入第三类组分，让原本组分之间的相对挥发度发生改变，突破了气液平衡关系所形成的约束。这种替代分离路径的做法，以适度增加溶剂回收成本为代价，换取主分离任务所需回流比的大幅削减，在总体能量核算上具有显著优势。更为深层次的结构优化体现在反应精馏的过程耦合当中，也就是把化学反应和产物分离整合到同一塔器里面去完成，让生成物一旦形成就被连续地移出，推动反应平衡朝着产物的方向移动，从而同时绕开化学平衡和气液平衡这双重限制。这种耦合方式不但省去了独立的反应和分离工序，还把反应热直接用于精馏汽化，让能量利用路径变得更加紧凑。路径替代和过程耦合的核心都在于通过对分离的物理或者化学条件进行重构，从根源上消除传统流程当中本来就存在的高能耗环节^[7]。

（四）工艺过程与公用工程系统的同步综合与参数调优

精馏塔操作参数与公用工程系统单独优化、分立边界处理，常丧失系统级节能空间。同步综合需将塔压、回流比、进料热状态等工艺变量，与蒸汽等级匹配、冷却介质选择及换热网络设计纳入统一优化框架。塔压调整可通过改变塔顶蒸汽品位实现能级匹配一升压可产低压蒸汽，降压则适配余热^[8]。协同效应要求构建包含全部变量及成本函数的数学模型，进行多变量同步寻优，所得参数组合为全系统燃料能耗与总成本最低的全局最优，效果显著优于分步优化的局部最优叠加。

三、工艺结构优化方案的多维评估与稳健实施

（一）夹点分析与数学规划耦合的分离网络综合优化

把夹点分析和数学规划进行深度耦合，能够为分离网络综合

优化提供热力学洞察和系统寻优两者并重的路径。夹点技术首先确定多组分分离序列和换热网络之间的最小公用工程目标,标定能耗的理论下限;以这个为基础,把备选精馏序列、塔压等级以及热集成路径表达成超结构,构造混合整数非线性规划模型。求解这个模型能够同步优化塔的数量、进料位置、级间热量匹配和公用工程负荷分配,在设备投资和操作费用之间取得全局折衷。这种耦合策略有效地避免了序贯设计容易引发的夹点退化和局部最优,所得到的拓扑既满足极限能量目标,又为后续柔性分析以及碳排放核算提供一致、可以调节的工艺框架,显著增强优化方案的稳健性和可实施性。

（二）投资成本、操作费用与碳排放的全生命周期权衡

方案优化不能仅以能耗最低为判断依据,而需要从全生命周期视角统筹权衡投资成本、操作费用和碳排放。引入隔壁塔或热泵等节能结构,虽能大幅削减蒸汽用量,但可能导致塔器投资增加及电力消耗结构变化,若忽略碳税和能源价格波动,局部热力学最优往往偏离总成本最小。所以,必须要建立一个覆盖设备折旧、公用工程消耗以及碳排放成本的综合指标,在初期投入和长期运行收益之间去求取折衷,从而确保所选择的工艺在经济性和碳足迹这两个维度方面都具备可持续的竞争力^[9]。

（三）针对原料波动与负荷变化的柔性控制保障方案

高度耦合在一起的节能工艺结构让系统的自衡能力被削弱

了,原料组成出现波动或者负荷发生变化很容易引发扰动沿着循环回路进行传播。为了这个,需要建立一个多变量协调控制的架构,把产品纯度、塔压以及级间热负荷分配纳入到统一调节当中,通过合理地设定中间组分控制区间以及再沸器热负荷的前馈补偿,避免为了应对扰动而进行过度提纯所造成的能量冗余情况。同时应该保留适度的操作弹性,在约束边界范围之内动态地对操作点进行优化,让分离效率、能耗指标以及产品质量在全工况之下协同保持稳定,赋予优化方案适应实际生产扰动所必要的鲁棒性^[10]。

四、结论

综上所述,精馏分离能耗居高不下,根源在于理想功偏离、塔板传质压降损失、分离序列拓扑不合理,以及操作裕度与纯度过剩引起的能耗翘尾。据此,提出以结构调优为核心的节能路径:采用完全热耦合隔壁塔重构流动拓扑,借助多效精馏与蒸汽再压缩热泵实现能级匹配,通过共沸、萃取与反应精馏进行路径替代,并同步优化工艺与公用工程。方案评估则耦合夹点分析与数学规划,综合权衡全生命周期投资、操作费用与碳排放,并配备柔性控制以应对原料波动和负荷变化。

参考文献

- [1] 刘家祺.传质分离过程[M].北京:化学工业出版社,2005:42-78.
- [2] 陈敏恒,从德滋,方图南,等.化工原理:下册[M].4版.北京:化学工业出版社,2015:136-159.
- [3] 李群生,黄小侨,吴海龙.精馏过程的节能技术研究进展[J].化工进展,2016,35(6):174-182.
- [4] 王晓红,田文德,王英龙.非设计工况下精馏塔操作弹性与能耗灵敏度分析[J].化学工程,2017,45(9):67-72.
- [5] 孙兰义,李军,李青松.隔壁塔技术及其在完全热耦合精馏中的应用进展[J].化工进展,2014,33(8):171-177.
- [6] 冯霄,王斌斐.化工节能原理与技术[M].4版.北京:化学工业出版社,2015:214-248.
- [7] 项曙光,王英龙.考虑公用工程集成的精馏过程同步综合优化策略[J].高校化学工程学报,2016,30(4):82-89.
- [8] 罗雄麟,孙琳,张昊.基于夹点技术与混合整数非线性规划的分离网络综合[J].化工学报,2012,63(9):289-296.
- [9] 钱宇,杨思宇,贾小平,等.考虑碳排放约束的化工过程全生命周期多目标优化[J].化工学报,2015,66(1):8-18.
- [10] 刘兴高.精馏过程的建模、优化与控制[M].北京:科学出版社,2004:167-203.