

## 化工过程强化技术在精馏分离工艺中的应用与节能本质分析

刘新丛

河北科防治金安全评价有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]过程强化技术是一种通过减少体积、提高效率和降低成本来优化化工过程的方法。精馏是化工核心分离单元，高能耗制约其发展，化工过程强化技术是关键解法。文章基于热力学原理解析精馏过程高能耗的根源，系统探讨超重力、MVR 热泵、隔壁精馏及精馏-膜法耦合四类典型强化技术在精馏中的应用机制，从不可逆损失控制与能量利用效率提升角度剖析其节能本质，并量化分析各类技术的节能效果规律。研究表明强化技术经三大路径可降不可逆损失，提高节能率，MVR 热泵精馏节能效果最优。文章为精馏节能升级提供理论支撑，助力化工低碳发展。

[关键词]化工过程强化技术；精馏分离工艺；节能本质

DOI: 10.33142/sca.v8i11.18689

中图分类号: TQ02

文献标识码: A

## Application and Energy-saving Essence Analysis of Chemical Process Enhancement Technology in Distillation Separation Process

LIU Xincong

Hebei Kefang Metallurgy Safety Evaluation Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Process intensification technology is a method of optimizing chemical processes by reducing volume, improving efficiency, and reducing costs. Distillation is the core separation unit in chemical engineering, and its development is constrained by high energy consumption. Chemical process intensification technology is the key solution. The article analyzes the root cause of high energy consumption in the distillation process based on thermodynamic principles, systematically explores the application mechanisms of four typical strengthening technologies in distillation: supergravity, MVR heat pump, adjacent distillation, and distillation membrane coupling. It analyzes the energy-saving essence from the perspective of irreversible loss control and energy utilization efficiency improvement, and quantitatively analyzes the energy-saving effect laws of various technologies. Research has shown that strengthening technology can reduce irreversible losses and improve energy efficiency through three major paths, with MVR heat pump distillation having the best energy-saving effect. The article provides theoretical support for the energy-saving upgrade of distillation and helps promote the low-carbon development of chemical industry.

**Keywords:** chemical process strengthening technology; distillation separation process; the essence of energy-saving

### 引言

过程强化技术是近年来在化工生产领域引起广泛关注的一项重要技术<sup>[1]</sup>。它的核心目标是通过优化设计方案和工艺流程，显著提高化工过程的效率，减少设备体积和降低投资成本，降低能耗和物耗，同时减少对环境的负面影响<sup>[2]</sup>。化工过程强化技术的诞生，源于对传统化工过程局限性的认识，以及对更加高效、环保和经济可行的生产方式的需求。在化工领域中，精馏分离技术作为一项重要的核心分离单位操作，通过依托混合物中各组分相对挥发度的差异，达成处分的高效分离目标在精细化工、石油冶炼、医药合成等诸多行业中得到了广泛的使用。分离技术在化工过程中的应用至关重要，过程强化技术通过引入膜分离和高效蒸馏等新方法，显著提高了分离效率。膜分离技术利用膜的选择性、渗透性，实现物质的高效分离，具有能耗低、操作简便等优势<sup>[3]</sup>。然而传统的精馏工艺在能量的利用方面存在一些不足之处，在化工行业领域中，因

传热传质过程中存在的不可逆损伤，设备结构、能量利用缺乏合理性等因素的限制，导致过程消耗能量比较高，伴随着低碳发展理念以及全球能源的危机加剧，降低精馏过程中的能耗已经成为当前化工领域中可持续发展的关键诉求。化工过程强化技术凭借对操作方式的优化变革、改良设备结构等一系列措施突破了传统工艺所固有的热力学限制，不仅可以提高传质传热效率，而且可以降低能量消耗，为精馏工艺的节能升级提供了核心解决方案<sup>[4]</sup>。本文研究首先对典型化工过程中强化技术在精馏工艺中的应用机制进行了系统性的阐述，并剖析其节能原理，为精馏工艺的节能优化提供理论支撑。

### 1 精馏过程能耗根源的热力学解析

精馏过程中所呈现的高能耗特性，本质上主要是因其内在不可逆的热力学属性所决定的，从核心能源损失的根源进行剖析，气液两相在流动过程中因存在压力阻力导致压力降损失<sup>[5]</sup>。不同温度的物流之间进行传热操作以及混

合过程时也会产生温度差损失。相浓度处于不平衡状态的物流间进行传质操作或是混合引发的浓度差损失。值得注意的是,塔板上气液两相的温度与组成未能达到平衡状态,是导致内部有效能损失的主因。在传统的精馏塔运行体系过程中,上升气相温度高于下降液相温度,且气相中易挥发组分含量低于与液相平衡的浓度,当这两相在塔内发生接触时,所进行的传热与传质过程均为不可逆过程,从而导致有效能的损耗,对精馏塔的能量利用效率造成严重的影响<sup>[6]</sup>。

除此之外,在传统经典工艺中,为了确保产品的纯度通常采用较大的回流比,这一操作造成塔底再沸器热负荷与塔顶冷凝器冷负荷增加,提高回流比,增加精馏系统的能耗,加剧了能量浪费。图1直观呈现精馏不可逆损失与操作参数关联,操作线与平衡线偏离程度反映损失大小,偏离越大能耗越高。

## 2 化工过程强化技术在精馏中的应用机制

### 2.1 超重力精馏技术: 基于设备结构强化的传质效率提升

超重力精馏技术通过借助高速旋转装置,营造出超重力环境对于传统重力场的局限性有了重大突破,以离心力取代常规重力实现气液两相的高效接触。超重力精馏技术的核心应用机制为:在高速旋转的转子与定子所构成的精密空间内,在强大的机械力作用下,被剪切撕裂成微米至纳米级的液膜、液丝和液滴,这种独特的形态变化使气液

两相速度提升至4~12m/s(远高于传统塔设备的1.5~1.6m/s)<sup>[7]</sup>,使得单位体积内气液接触面积显著增大,这种变化,同时也增强微观混合的强度,传质系数相较于传统精馏工艺,提升幅度超过10倍。从设备的结构层面进行深入的剖析,超重力精馏设备的整体高度被有效控制在1~2m,在空间利用上可以降低设备的占地面积,此外,超重力精馏设备通过减少气液流动路径长度在一定程度上降低压力<sup>[8]</sup>。传质单位高度被优化至仅为1cm左右,使得单位体积内理论塔板数增加,不仅可以有效确保分离效率,而且可以降低对回流比的要求,进而从源头上可以有效控制能源消耗。

### 2.2 MVR 热泵精馏技术: 基于能量梯级利用的潜热回收

机械蒸汽再压缩(MVR)热泵精馏技术的核心应用逻辑主要是通过高效回收,塔顶低温低压蒸汽的潜热,并借助能量阶梯进而实现部分能量的再利用。在传统的精馏中,塔顶蒸汽的潜热主要是通过冷凝器被冷却介质带走,造成大量能源无端损耗与能量浪费;而MVR技术主要是对塔顶蒸汽进行压缩处理,在此过程中,会提高蒸汽的压力和温度,焓值增加,成功转化为高温高压蒸汽。直接引入塔底再沸器,作为塔底再沸器的热源<sup>[9]</sup>。该技术关键在于构建“蒸汽压缩-热量回收-循环利用”能量闭环:压缩机能耗仅提升蒸汽能量品位,回收潜热远超压缩能耗,大幅降低外供热需求。图2为MVR热泵精馏能量流示意图,展现能量梯级利用。

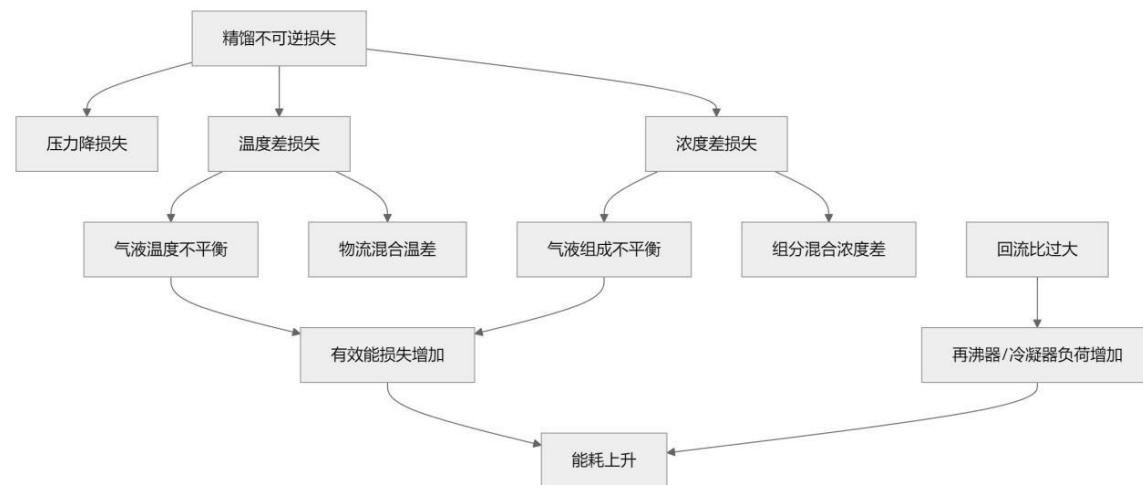


图1 精馏过程不可逆损失的形成路径与能耗关联

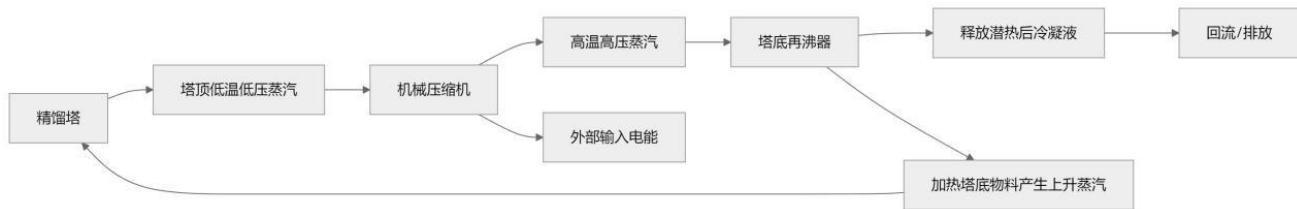


图2 MVR热泵精馏系统能量流示意图

### 2.3 隔壁精馏技术：基于过程集成的内部热耦合强化

隔壁精馏技术于塔内设垂直隔板，将双塔流程集成于单塔，实现物流高效耦合。其核心机制是将塔内分四区：预分离区初分原料，公共段集中传质传热，主分离区侧线采目标产物<sup>[10]</sup>。该结构优势在于避免物料反复加热冷却，实现能量直接耦合利用，气、液相回流共享减少温差损失；且隔板抑制返混，精准控组分路径，降低浓度差损失。

### 2.4 精馏-膜法耦合技术：基于多过程协同的分离边界拓展

精馏-膜法耦合技术有机协同渗透汽化膜分离与精馏过程，突破共沸体系分离瓶颈并降能耗。其核心机制分两模式：低沸点组分浓度低于共沸浓度时，先精馏初分，塔顶气入膜组件，截留相回流、渗透相收集产物；高于共沸浓度时，先膜组件预处理，截留相精馏深分，塔顶物料再回膜组件提纯<sup>[11]</sup>。关键创新在“热协同”，膜渗透汽化吸热与精馏塔顶蒸汽冷凝放热互补，无需额外加热膜分离；且塔顶无冷凝器，避免冷凝-再汽化能量损失，降操作热负荷。

## 3 强化技术的节能机理与效果量化分析

### 3.1 节能机理的共性与差异

共性机理：各类强化技术均聚焦于对气液接触状态进行深度优化处理，着力缩小传热与传质过程中的温差及浓度差，亦或达成能量的高效回收与循环再利用。通过这些举措，有效降低精馏过程中因不可逆因素所导致的能量损失，进而显著提升整个精馏体系的能量利用效率。

差异机理：超重力技术可以有效降低系统压力，最小化传质过程中的不可逆能量损失；MVR 技术主要是对潜热进行高效的回收，从而大幅度减少外部能量输入；隔壁塔技术凭借其独特的内部热耦合机制，减少反复加热冷却的能量无谓损耗；精馏-膜法耦合技术借助过程协同效应，避免传统分离过程中相变环节所带来的能量损失问题。

### 3.2 节能效果的量化规律

基于理论计算与通用数据，各类技术节能效果有明确量化范围（表 1），此结果为通用规律，体现技术自身节能潜力，不受具体案例影响。

表 1 典型强化技术的节能效果量化规律

强化技术类型	节能率范围 (%)	核心节能贡献因素	有效能效率提升幅度 (%)
超重力精馏	20~40	回流比降低、压力降损失减少	15~25
MVR 热泵精馏	30~60	塔顶蒸汽潜热回收利用率 > 80%	25~40
隔壁精馏	20~35	内部热耦合、返混损失减少	18~30
精馏-膜法耦合	25~35	避免冷凝-再汽化能量损失	20~32

从能量平衡的深度视角上展开进一步的分析可知，MVR 热泵精馏在众多蒸馏技术中的节能成效极为突出，其压缩机输入电能与回收潜热的比值为 1:3~1:5，由此彰显出了其卓越的节能特性，即输入 1 单位的电能时，可回收 3~5 单位的潜热；隔壁精馏通过创新性的设计分别减少了 1 台冷凝器和再沸器配置，这种创新性的设计不仅可以降低设备的投资成本，而且可以减少这两类设备的能量消耗，热负荷可降低 45% 以上；精馏-膜法耦合技术通过引入一种突破传统的设计理念，实现了塔顶无冷凝器的创新设计，可减少 20%~30% 的冷却能耗，与传统的分离方法不同，在膜分离过程不需要进行额外的加热处理，降低操作能耗。

### 3.3 强化技术节能效果的影响因素分析

#### 3.3.1 操作参数的影响

操作参数直接影响强化技术节能效果，核心参数有回流比、操作压力、气液比及 MVR 技术的压缩机转速等。以超重力精馏为例，回流比要平衡“节能”与“分离效率”，最优为最小回流比的 1.1~1.3 倍，此区间节能率稳定在 30%~35%，过高则节能率下降。MVR 热泵精馏中，压缩机转速影响蒸汽温压，转速在额定转速 80%~110% 时，节能率达 40%~55%。操作压力通过影响组分相对挥发度，低压可提升强化技术节能潜力。

#### 3.3.2 物系特性的影响

物系特性（组分相对挥发度、黏度、表面张力、是否含共沸物等）制约强化技术适配性与节能效果。难分离物系（相对挥发度小）用超重力技术节能优势突出，节能率比易分离物系高 5~10 个百分点；高黏度物系用该技术，传质阻力增大，节能率降 8~12 个百分点。共沸物系决定强化技术选择，传统精馏难突破共沸，用精馏-膜法耦合或萃取精馏，膜对易挥发组分选择性系数大于 5，耦合技术节能率超 30%；低于 3，能耗上升，节能率降至 20% 以下。

#### 3.3.3 设备结构参数的影响

设备结构参数是强化技术实现传质传热强化的基础，关乎能量利用效率。超重力设备中，丝网填充转子使气液接触面积增 30%~50%，传质系数升 20%~25%，节能率提高 8~10 个百分点，但填充密度要控制在 200~300kg/m<sup>3</sup>。隔壁精馏塔隔板高度不足，节能率降 10~15 个百分点；位置偏离最优值，节能效果受损。MVR 设备中，螺杆式压缩机等温压缩效率比活塞式高 15%~20%，节能率再提升 5~8 个百分点。总之，强化技术节能效果是操作、物系、设备结构参数耦合的结果，需优化参数与适配设备以释放节能潜力，为后续优化提供依据。

## 4 强化技术应用的挑战与应对策略

### 4.1 核心应用挑战

部分强化技术运行稳定性受操作条件波动影响大，如超重力精馏技术原料波动致气液分布不均、传质效率下降<sup>[12]</sup>；MVR 热泵精馏对蒸汽品质要求高，杂质或湿度超标会缩

短设备寿命、增加成本。多数强化技术初始投资高于传统工艺，如大型 MVR 热泵精馏装置核心设备投资约为传统精馏塔的 1.5~2 倍；隔壁精馏塔投资成本较传统双塔流程增加，精馏-膜法耦合技术膜组件寿命短、更换成本高，膜污染控制不当会增加成本。

#### 4.2 针对性应对策略

针对运行稳定性问题，优化设备结构与升级辅助系统，如超重力转子增设气液分布器和导流板，开发自适应调控系统；MVR 热泵精馏系统增设蒸汽预处理单元。针对适配性局限，加强高效材料研发与定制化设计，如开发新型膜材料，设计可调节式隔壁精馏塔。建立“工艺设计-设备选型-智能调控”一体化方案，改造前用流程模拟软件优化参数与集成路径；开发智能调控系统，实时采集参数，动态调整操作参数，实现多技术协同最优匹配。

### 5 结论与展望

#### 5.1 结论

随着化工行业的迅速发展，化工分离技术在现代化化学工业领域中的应用越来越重要。研究首先对超重力精馏技术、隔壁精馏技术、精馏-膜法耦合技术的作用机制进行了分析探讨，研究结果表明，不同的技术均有不同的优缺点与作用机制，在具体的使用过程中需要根据现场的工况合理进行选择，以实现节能降耗的效果。化工过程强化技术经设备结构优化、能量梯级利用、过程耦合集成，从源头降精馏不可逆损失，显著节能。超重力、MVR、隔壁塔、精馏-膜法耦合四类技术各有节能方式，提高节能率，其中 MVR 技术的节能效果最佳。

#### 5.2 展望

尽管各类化工过程强化技术在蒸馏中起到了降能耗、节能的效果，但在实际应用场景中，仍需要围绕“效率-能耗-成本”的平衡为中心，实施系统化的优化工作。应该强化多技术协同集成的创新，例如通过将 MVR 热泵技术与超重力技术的深度融合，既可提高传质的效率，又可以实现能量回收利用率提升的目的。此外，还应该注重高

效材料的研发与应用，研发具备高选择性、高通量特征的膜材料，提高实际应用效果。通过智能调控策略的适配，精准控制回流比、旋转速度、膜面流速等关键参数，实现技术运行状态的最优匹配。

#### [参考文献]

- [1] 贾晓敏,陈东,谢继红,等.典型膜蒸馏技术的性能及发展分析[J].化工装备技术,2016,37(2):19-23.
- [2] 李维斌,沈鑫,胡瑞,等.膜蒸馏在废水处理中的应用及膜污染控制进展[J].现代化工,2021,41(1):19-23.
- [3] 宋剑.膜蒸馏与膜蒸馏工艺过程 [J].盐科学与化工,2017,46(4):3-5.
- [4] 申龙,高瑞昶.膜蒸馏技术最新研究应用进展[J].化工进展,2014,33(2):289-297.
- [5] 刘兆峰,何瑞敏,郭强,等.渗透膜蒸馏研究进展与展望[J].广州化工,2022,50(14):11-16.
- [6] 刘羊九,王云山,韩吉田,等.膜蒸馏技术研究及应用进展[J].化工进展,2018,37(10):3726-3736.
- [7] 唐勇.丙烯酸装置提纯系统的模拟与优化[J].精细化工,2002,19(5):307-309.
- [8] 方晓明.丙烯酸精制单元轻组份分馏塔的流程模拟[J].石油化工应用,2008,27(5):58-61.
- [9] 沈蔡龙,贾炎,陈彦臻,等.化工技术在生物冶金过程强化中的研究进展[J].过程工程学报,2022,22(10):1349-1359.
- [10] 杨哲.化工过程本质安全技术研究进展[J].石油炼制与化工,2021,52(10):31-37.
- [11] 吴叶超,王博,张青程,等.化工过程强化技术在制备铜基合成甲醇催化剂中的应用 [J].化工技术与开发,2018,47(4):43-49.
- [12] 王玉琪.绿色化工过程强化与分离技术的研究与应用[D].西安:西北大学,2017.

作者简介：刘新丛（1980.10—），毕业院校：沈阳理工大学，所学专业：安全工程，当前就职单位：河北科防治冶金安全评价有限公司，职务：安全评价师，职称级别：中级。