

精馏塔回流比优化对产品纯度的影响研究

余 俭 白永波

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

【摘要】：精馏作为化工、石化等行业核心的分离技术，其操作参数的合理性直接决定产品质量与生产经济性，其中回流比是调控精馏分离效率的关键参数。本文以乙醇-水二元精馏体系为研究对象，通过搭建小型连续精馏实验装置，结合 AspenPlus 流程模拟，系统探究回流比在不同区间内对塔顶乙醇纯度、塔底水纯度及单位产品能耗的影响规律。研究表明：回流比低于最小回流比时，塔内气液传质不充分，产品纯度显著不达标；在最小回流比至 1.5 倍最小回流比区间内，塔顶乙醇纯度随回流比增大从 82.3% 快速提升至 99.7%，且能耗增幅控制在 15% 以内；当回流比超过 1.5 倍最小回流比后，产品纯度提升幅度不足 0.3%，但单位产品能耗呈线性增长，每增加 0.1 倍最小回流比，能耗上升 8%~10%。通过多目标协同优化，确定该体系最优回流比为 1.45 倍最小回流比，此时塔顶乙醇纯度达 99.6%，单位产品能耗较工业常用的 2.0 倍最小回流比降低 22.3%，且装置连续运行 8 小时内纯度波动小于 0.2%，稳定性良好。研究成果为精馏塔的节能降耗与稳定生产提供了切实可行的工程参考。

【关键词】：精馏塔；回流比；产品纯度；能耗优化；实验研究；流程模拟

DOI:10.12417/3041-0630.26.05.033

在化工生产中，精馏凭借分离效率高、适应性强的特点，被广泛应用于液体混合物的分离提纯，其能耗占化工行业总能耗的 30%~40%，是节能改造的重点环节。回流比作为精馏塔操作的核心参数，通过调节塔顶回流液与馏出液的比例，直接影响塔内气液两相的接触传质效率、理论板数的实际利用率，进而决定产品纯度、生产能力及能耗水平。本文以典型的乙醇-水二元体系为研究对象（该体系分离特性具有代表性，且实验数据易获取、可重复性强），通过实验与模拟相结合的方法，系统研究回流比对产品纯度的影响规律，构建多目标优化模型，确定最优回流比参数，为中小规模精馏塔的操作优化提供理论依据与工程实践指导。

1 精馏塔回流比理论基础

1.1 回流比的定义与分类

回流比是指精馏塔塔顶回流液流量与馏出液流量的比值，它反映了塔顶冷凝液中用于回流的比例，是调控塔内传质过程的核心抓手。根据精馏操作的实际需求，回流比可分为三类。

一是最小回流比，即实现指定分离要求（如塔顶、塔底产品纯度）所需的最低回流比。此时，塔内气液传质达到临界状态，需要无穷多块理论板才能完成分离，实际操作中无法采用，但它是确定实际回流比的重要依据。若回流比低于此值，无论增加多少理论板，都无法达到预期的分离效果。二是实际回流比，即工业生产中实际采用的回流比。为兼顾分离效率与操作稳定性，实际回流比通常设定为最小回流比的 1.2~2.0 倍。这一区间内，既能保证塔内传质充分，避免产品纯度波动，又能将能耗控制在相对合理的范围。三是最优回流比，即在满足产品纯度要求的前提下，单位产品能耗最低的回流比。它不是一个固定值，而是随进料组成、产品纯度要求、设备结构等因素动态

变化的平衡点，需要通过系统实验与模拟计算确定。

1.2 回流比对精馏过程的影响机理

精馏的本质是利用混合物中各组分相对挥发度的差异，通过塔内气液两相的连续接触、传质、传热，实现轻组分（挥发度高）在塔顶富集、重组分（挥发度低）在塔底富集的过程。回流比通过改变塔内气液两相的流量与分布，直接影响传质效率，具体表现为三个阶段。

（1）在低回流比阶段塔顶回流液流量不足，无法形成稳定的液膜覆盖塔板或填料表面，气液两相接触不充分，甚至出现“干板”现象。此时，轻组分无法有效从塔底向上迁移并富集于塔顶，重组分也难以彻底沉降于塔底，导致塔顶、塔底产品纯度均显著不达标，分离过程基本失效。（2）在适宜回流比阶段随回流比增大，塔顶回流液流量增加，塔内液膜更新速度加快，气液接触面积扩大，传质推动力增强。轻组分在上升气相中不断被回流液冷凝、溶解，再通过蒸发向上迁移，逐步在塔顶富集；重组分则在下降液相中被不断脱除，在塔底纯度持续提升。此阶段，产品纯度随回流比增大快速提高，而能耗因回流比仍接近理论下限，增幅相对平缓。（3）在高回流比阶段，塔内传质已接近极限，理论板数的利用率达到 90% 以上，轻组分在塔顶的富集程度基本达到最大值。继续增大回流比，虽然理论上产品纯度仍有微小提升，但需要显著增加回流液输送功率、塔顶冷凝器冷却负荷及塔底再沸器加热负荷，导致能耗呈线性增长，经济性快速下降。

2 实验与模拟方法

2.1 实验装置与材料

为模拟工业精馏过程，搭建小型连续精馏实验装置，主要

由进料系统、精馏塔、回流系统、检测系统四部分组成。进料系统包括 5L 进料罐和恒流泵，恒流泵流量调节范围为 0~50mL/min，精度±0.1mL/min，可实现稳定进料；精馏塔内径 50mm、总高度 1500mm，内装 3×3mm 不锈钢 θ 环填料，有效填充高度 1200mm，经标定理论板数约 15 块，符合中小规模精馏塔的传质需求；回流系统采用电磁回流阀与回流比控制器组合，回流比调节范围 1~10，精度±0.1，可精准控制回流液与馏出液的比例；检测系统包括阿贝折射仪（用于测定乙醇浓度，测量精度±0.0001）和智能功率计（用于测定再沸器能耗，测量精度±0.5W）。实验材料选用分析纯无水乙醇（纯度≥99.9%）与去离子水，配制进料乙醇浓度为 30wt%，模拟工业发酵液的典型组成，确保实验条件贴近实际生产场景。

2.2 实验方案设计

实验采用单因素变量法，固定进料流量为 20mL/min、进料温度为 25℃，通过调节回流比控制器改变回流比，设定回流比梯度为 0.8 倍最小回流比、1.0 倍最小回流比、1.2 倍最小回流比、1.5 倍最小回流比、1.8 倍最小回流比、2.0 倍最小回流比、2.5 倍最小回流比（其中最小回流比通过前期模拟与实验标定为 1.85）。每个回流比工况下，待装置连续运行 2 小时（确保塔内达到稳定传质状态）后，分别从塔顶馏出液储罐和塔底储罐取样，采用阿贝折射仪测定乙醇纯度；同时通过智能功率计记录再沸器实时功率，结合馏出液产量计算单位产品能耗。为减少实验误差，每个工况重复 3 次，取平均值作为最终实验数据。

2.3 AspenPlus 模拟建模

采用 AspenPlusV11 流程模拟软件建立与实验装置对应的精馏模型，以验证实验数据的可靠性并扩展研究范围。物性方法选择 NRTL 模型，该模型适用于极性混合物（如乙醇-水体系）的气液平衡计算，可准确预测体系的相对挥发度与相平衡数据；采用 RadFrac 模块模拟精馏塔，设定塔板数 15 块、进料位置为第 8 块板（中间进料，符合连续精馏的常规设计），回流比、进料流量等操作参数与实验保持一致；模型验证阶段，将实验测得的塔顶、塔底产品纯度与模拟结果进行对比，通过修正塔板效率（最终设定为 75%，与实验装置实际传质效率匹配），使模拟误差控制在 2% 以内，确保模型可用于后续优化分析。

3 结果与分析

3.1 回流比对产品纯度的影响

回流比与塔顶乙醇纯度、塔底水纯度的关系呈现显著的阶段性特征（实验与模拟结果趋势一致，误差≤1.5%）。如下表 1 所示，不同回流比区间内的产品纯度差异明显。

表 1 不同回流比下的产品纯度与能耗数据（实验平均值）

回流比 (R/R _{m in})	实际 回流 比 R	塔顶乙 醇纯度 (wt%)	塔底水 纯度 (wt%)	单位产 品能耗 (kJ/g)	能耗增幅 (相对 1.0R _{m in})
0.8	1.48	82.3	88.5	10.2	-18.4%
1.0	1.85	89.5	92.1	12.5	0%
1.2	2.22	95.8	96.3	13.3	6.4%
1.5	2.78	99.7	99.5	14.4	15.2%
1.8	3.33	99.8	99.6	16.1	28.8%
2.0	3.70	99.8	99.6	17.8	42.4%
2.5	4.63	99.9	99.7	21.3	70.4%

（注：R_{min}=1.85；实验重复 3 次，数据偏差≤0.5%）

由表 1 可知，在回流比为 0.8 倍最小回流比时，塔顶乙醇纯度仅为 82.3%，塔底水纯度 88.5%，均远低于工业要求（乙醇纯度≥99.5%、水纯度≥99%）。这是因为回流液流量不足，填料表面无法形成连续液膜，气液两相接触时间短、传质不充分，轻组分乙醇在上升过程中未被有效富集，重组分水也未能彻底分离至塔底。

当回流比提升至 1.0 倍最小回流比时，塔顶乙醇纯度升至 89.5%，塔底水纯度达 92.1%，分离效果显著改善；随着回流比继续增大至 1.5 倍最小回流比，塔顶乙醇纯度快速提升至 99.7%，塔底水纯度达到 99.5%，均满足工业级产品要求。此阶段，回流液流量的增加促进了填料表面液膜的更新，气液传质推动力增强，轻组分的富集效率与重组分的脱除效率同步提升。

当回流比超过 1.5 倍最小回流比后，产品纯度提升幅度明显趋缓：回流比 2.0 倍最小回流比时，塔顶乙醇纯度为 99.8%，仅比 1.5 倍最小回流比时提升 0.1%；回流比增至 2.5 倍最小回流比时，塔顶乙醇纯度仅为 99.9%，提升幅度不足 0.3%。这表明塔内传质已接近极限，理论板数的利用率已达 95% 以上，继续增大回流比无法有效改善分离效果。

3.2 回流比对能耗的影响

能耗随回流比的增大呈线性增长趋势，且增长速率稳定。回流比为 1.0 倍最小回流比时，单位产品能耗为 12.5kJ/g；增至 1.5 倍最小回流比时，能耗升至 14.4kJ/g，增幅 15.2%；当回流比达到 2.0 倍最小回流比时，能耗达 17.8kJ/g，较 1.5 倍最小回流比增长 23.6%；回流比 2.5 倍最小回流比时，能耗进一步升至 21.3kJ/g，较 1.0 倍最小回流比增幅达 70.4%。

能耗增长的核心原因在于回流比增大直接导致塔顶回流液流量增加，需要消耗更多电力驱动回流泵；同时，回流液冷

凝需要塔顶冷凝器提供更多冷却量，塔底为维持气液平衡，再沸器也需消耗更多热能（如蒸汽），三者均与回流液流量呈正相关，最终表现为能耗随回流比线性增长。

3.3 最优回流比的确定与验证

基于“产品纯度达标、能耗最低”的优化目标，采用响应面法构建多目标优化模型，以回流比为自变量，塔顶乙醇纯度和单位产品能耗为响应值，设定约束条件为“塔顶乙醇纯度 $\geq 99.5\%$ ”。

优化结果显示，当回流比为 1.45 倍最小回流比 (2.68) 时，塔顶乙醇纯度达 99.6% (满足工业要求)，单位产品能耗为 14.1kJ/g，较工业常用的 2.0 倍最小回流比降低 22.3%，实现了“纯度与能耗”的最优平衡。为验证最优回流比的操作稳定性，在该参数下进行 8 小时连续运行实验：塔顶乙醇纯度波动范围为 99.5%~99.7%，塔底水纯度稳定在 99.4%~99.6%，能耗波动 $\leq 3\%$ ，无“干板”“液泛”等异常现象。这表明最优回流比不仅能降低能耗，还能保证装置长期稳定运行，具有良好的工业应用可行性。

4 工业应用案例

某生物乙醇厂现有 30m³/h 连续精馏装置，用于将发酵液（乙醇浓度 30wt%）提纯至工业级乙醇（纯度 $\geq 99.5\%$ ）。原操作采用回流比 2.0 倍最小回流比（最小回流比经标定为 2.1），虽能保证产品纯度达 99.8%，但能耗偏高，单位产品能耗 20.5kJ/g，年蒸汽消耗约 5000t。应用本文研究成果进行优化将回流比降至 1.5 倍最小回流比 (3.15)，同时根据模拟结果调整进料位置（从第 15 块板调整至第 12 块板，增强塔中部传质效率），其余操作参数保持不变。

表 2 工业精馏装置回流比优化前后指标对比

指标类别	具体指标	优化前 (2.0R _{min})	优化后 (1.5R _{min})	变化量	变化率
操作参数	回流比 R	4.2	3.15	-1.05	-25.0%
	进料位置 (塔板数)	15	12	-3	-20.0%

参考文献:

- [1] 李宁.基于工艺及设备优化精馏塔分离效率的试验研究[J].化工装备技术,2025,46(04):44-49.
- [2] 刘侃,申伟,王建华.丙烯精馏塔参数优化与爆炸极限动态监测系统开发[J].石化技术,2025,32(08):10-12.
- [3] 杨九如,郭芳,寇学申.基于热耦合技术的甲醇精馏塔节能优化设计研究[J].化学工程与装备,2025,(07):48-50.
- [4] 戴遥龙.精馏塔回流比优化与能源消耗关系分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(23):117-118+121.
- [5] 杨帆.基于微分几何的内部热耦合精馏塔建模与控制策略研究[D].长春工业大学,2025.

产品指标	塔顶乙醇纯度 (wt%)	99.8	99.6	-0.2	-0.2%
	塔底水纯度 (wt%)	99.7	99.6	-0.1	-0.1%
能耗指标	单位产品能耗(kJ/g)	20.5	16.2	-4.3	-21.0%
	年蒸汽消耗 (t)	5000	4200	-800	-16.0%
经济效益	年节能效益 (万元)	-	48	+48	+48万元
	设备维护周期 (月)	3	6	+3	+100.0%

(注：蒸汽单价按 600 元/t 计算；数据为装置连续运行 1 个月的平均值)

优化后运行数据显示，塔顶乙醇纯度稳定在 99.6%，满足下游化工原料使用要求；单位产品能耗降至 16.2kJ/g，年蒸汽消耗减少 800t，折合经济效益 48 万元（蒸汽单价 600 元/t）；此外，回流比降低后，塔顶冷凝器循环水用量减少 15%，设备运行负荷降低，塔板与阀门的维护周期从 3 个月延长至 6 个月，进一步降低了运维成本。该案例证实，本文提出的回流比优化方法可直接应用于工业装置，在保证产品纯度的前提下实现显著节能，具有较强的工程实用价值。

5 结论

综上所述，回流比对精馏塔产品纯度的影响具有阶段性，低于最小回流比时分离失效；最小回流比至 1.5 倍最小回流比区间内纯度快速提升；超过 1.5 倍最小回流比后纯度提升趋缓。能耗随回流比线性增长，高回流比操作存在显著能耗冗余，降低回流比是精馏过程节能的有效途径。乙醇-水体系的最优回流比为 1.45 倍最小回流比，此时产品纯度达标，单位产品能耗较工业常用值降低 22.3%，且装置运行稳定。将回流比优化与模型预测控制等智能算法结合，实现基于实时进料组成、产品需求的回流比自动优化，进一步提升操作灵活性。