doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.005

乙醇分割式机械蒸汽再压缩热泵精馏系统开发及性能研究

廉文韬[1],吴小华[1],杨鲁伟[2],侯　超[2],宁旭丹[1,3]
(1.北京石油化工学院 机械工程学院,北京 102617;2.中国科学院 理化技术研究所,北京 100190;
3.西安交通大学 能源与动力工程学院,西安 710049)

摘　要:针对乙醇－水采用常规机械蒸汽再压缩(MVR)精馏技术无法达到节能精馏需求,兼顾精馏系统的安全性和经济性,开发了一种外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统;构建了液相采用 NRTL 方程、气相采用 RK 方程的 NRTL-RK 组合模型,用于拟合物系的热力学性质;借助 Aspen Plus 软件,对常规精馏、常规 MVR 热泵精馏、直接压缩式 MVR 热泵精馏和外部工质分割式 MVR 热泵精馏等 4 种系统进行了模拟研究,对比分析了系统热力学性能、安全性等。结果表明,系统引入水作为循环工质,通过压缩水蒸气而非乙醇蒸汽,提高了系统的安全性。采用分割式结构,上精馏塔温差仅为 3.54 ℃,有效减少了压缩机进出口温差;NRTL-RK 组合模型的分析结果与试验数据对比表明,所构建的 NRTL-RK 组合模型可精确拟合乙醇－水物系的热力特性;所设计开发的外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统,较常规乙醇精馏系统,可节约能源 72.15%,可节约运行费用 70.87%。该系统已在实际生产中得到成功应用,节能效果显著。研究结果可为乙醇精馏生产过程中的节能改造提供参考。

关键词:乙醇;精馏系统;热泵;机械蒸汽再压缩(MVR);热力学
中图分类号:TB657.6　　**文献标志码:**A

Development and performance study of ethanol external separate mechanical vapor recompression heat pump distillation system

LIAN Wentao[1], WU Xiaohua[1], YANG Luwei[2], HOU Chao[2], NING Xudan[1,3]
(1.College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;
2.Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3.College of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Conventional mechanical vapor recompression (MVR) distillation technology cannot meet the energy-saving distillation requirements for ethanol-water, while balancing the safety and economy of the distillation system, taking into account the safety and economy of the distillation system, an external working medium splitting MVR heat pump distillation system was developed. A combined NRTL-RK model using NRTL equation in liquid phase and RK equation in gas phase was constructed to fit the thermodynamic properties of the system. With the help of Aspen Plus software, four kinds of systems, namely conventional distillation, conventional MVR heat pump distillation, direct compression MVR heat pump distillation and external working medium separation MVR heat pump distillation, were simulated and analyzed. The results show that the safety of the system is improved by introducing water as circulating working medium and compressing water vapor instead of ethanol vapor. With the split structure, the temperature difference of the upper distillation column is only 3.54 ℃, which effectively reduces the temperature difference of the compressor inlet and outlet. The comparison between the analysis results of the NRTL-RK combination model and experimental data shows that the constructed NRTL-RK combination model can accurately fit the thermodynamic characteristics of the ethanol-water system. Compared with the conventional ethanol distillation system, the designed and developed external working fluid split MVR heat pump distillation system can save 72.15% of energy and 70.87% of operating costs. The system has been successfully

收稿日期: 2024－03－27　**修回日期:** 2024－11－11
基金项目: 中国科学院低温工程学重点实验开放课题(CRYO202112);北京石油化工学院重要科研成果培育项目(BIPTACF-002);重要科研成果培育项目(PCF-002);北京市教委科研计划(KZ202110017026)

applied in actual production, with significant energy-saving effects. The research results can provide reference for energy saving transformation in ethanol distillation process.

Key words: ethanol; distillation system; heat pump; mechanical vapor recompression (MVR); thermodynamics

0 引言

乙醇作为一种重要的清洁能源，可实现无烟燃烧，能显著降低 CO_2 的排放，有效缓解对化石能源的依赖，并提升能源安全性。精馏利用混合物的不同沸点进行物质的纯化，是化学工程中最有效的分离单元操作之一[1]。该过程消耗的能量仅少量用于分离组分，而大部分则用于冷凝和循环使用[2]，因此，精馏操作节能潜力巨大。机械蒸汽再压缩（Mechanical Vapor Recompression，MVR）技术可实现热力过程低品位余热的高效回收利用，积极开发 MVR 热泵精馏系统对解决化工行业高能耗问题具有重要的意义，可为应对气候变化、实现碳中和目标助力[3]。

国内外学者针对 MVR 热泵精馏系统，在结构优化、节能研究以及智能控制等方面开展了大量的理论研究[4-10]，并致力于促进该技术在工业领域的广泛应用。

乙醇和水在标准大气压下的沸点温差达到了 22 ℃，因此常被作为非理想宽沸点共沸混合物体系[11]。如果采用常规 MVR 精馏技术，将无法满足乙醇－水体系的节能精馏需求，为此，许多研究者提出了中间再沸式[12]、分割式[13]、超重力[14]等多种热泵精馏系统，有效扩宽了热泵精馏技术的应用范围。朱平等[15]针对乙醇－水分割式 MVR 热泵精馏系统进行了试验研究和理论分析，证明了这一系统的节能性与经济性。王建国[16]应用 MVR 热泵精馏技术进行节能研究，也取得了较好的经济效益。

鉴于以上探讨结果，本研究对分割式 MVR 热泵精馏系统在乙醇－水物系中的应用进行开发和设计，使用 Aspen Plus 软件对开发的乙醇分割式 MVR 热泵精馏系统进行节能特性、操作经济性等性能研究，为乙醇精馏生产过程中的节能改造提供参考。

1 系统仿真模型开发及设计

1.1 MVR 热泵精馏系统

乙醇－水 MVR 热泵精馏系统（Heat Pump Distillation Column，HPDC）的原理如图 1 所示[17]。原料液被预热后首先经由加料板进入精馏塔内。在启动阶段，再沸器内需先通入预热蒸汽使再沸器内的液体达到设定温度，精馏塔内的原料液受热部分汽化，气相部分从塔顶进入压缩机，温度和压力均提高后，通入再沸器内，成为精馏塔运行阶段的热源，并在再沸器内被冷凝成为液体，经节流阀降低压力后作为产品采出[18]。

该系统结构简单，以二次蒸汽为热源，充分利用了塔顶二次蒸汽携带的热量，实现节能。

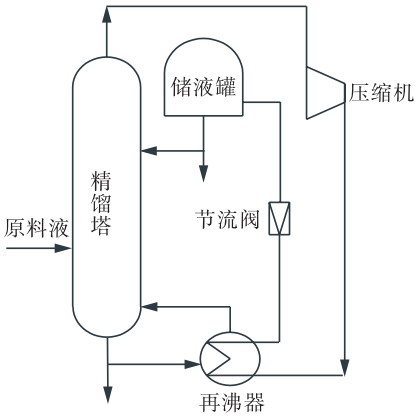


图 1 MVR 热泵精馏系统原理

Fig.1 Principle of traditional MVR heat pump distillation column

1.2 外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统

由于乙醇具有易燃易爆的特性，且乙醇溶液具有弱酸性，对金属有轻微腐蚀性，因此，对于分割式 MVR 热泵精馏系统（Separate Heat Pump Distillation Column，SHPDC），在直接压缩乙醇蒸汽的过程中，需要保证压缩机部件具有一定的耐腐蚀性。

为保证压缩机使用寿命和乙醇精馏过程的安全性，建立了外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统（External Separate Heat Pump Distillation Column，ESHPDC），如图 2 所示。在该系统中，被压缩的工质是化学性质更为稳定的外部工质。为确保系统的正常运行，除需要考虑制冷剂的物理和化学性质外，还需确保所选用的外部工质（制冷剂）在不同压力下的露点温度均低于塔顶温度，且其在

塔底压力下的沸点也需高于精馏塔的塔底温度，方能构建起高效的热泵循环。与其他制冷剂相比，水热稳定性高、使用成本低、传热效率高，在高温系统中非常适合作为制冷剂，因此，选用水作为外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统的外部工质[19]。

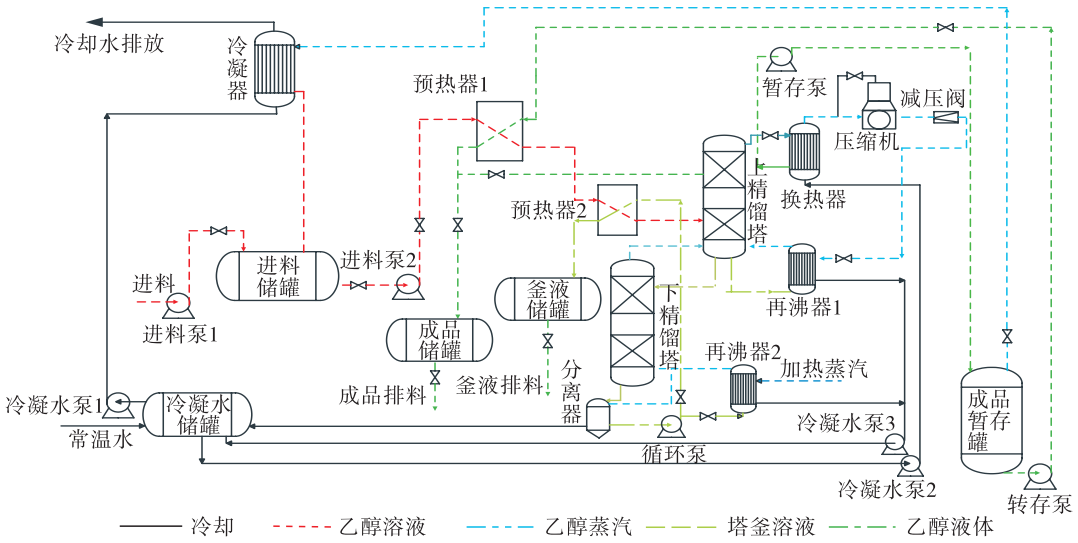


图 2　乙醇 – 水外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统工艺流程

Fig.2　Process principle of ethanol-water external MVR separate heat pump distillation column

如图 2 所示，ESHPDC 系统主要包括预热、上精馏塔、上精馏塔 MVR 蒸汽压缩以及下精馏塔等子系统。

（1）预热系统

预热的主要目的：一是在启动阶段，将进入精馏塔的原料液加热到设定温度，以生成足够 MVR 系统启动的塔顶蒸汽；二是在运行阶段，将原料液加热到一定温度，以降低精馏塔的能耗。

在所开发的系统中，板式换热器 1 和 2 作为预热器，溶液经由进料泵被依次被送入 2 个预热器中，分别与上精馏塔塔顶的产品冷凝液和下精馏塔的塔釜液换热。

（2）上精馏塔系统

主要是对乙醇 – 水溶液进行精馏分离，原料液在上精馏塔内被加热后，部分汽化，气相进入塔顶换热器，与外部工质换热后被冷凝，冷凝液除回流部分外，其余部分作为产品被采出；部分汽化后的剩余溶液进入塔釜，除再沸部分外，成为下精馏塔的原料液。

（3）上精馏塔 MVR 蒸汽压缩系统

上精馏塔精馏过程中，外部工质在塔顶换热器与塔顶蒸汽换热，塔顶蒸汽被冷凝；外部工质水汽化后进入蒸汽压缩机，被压缩后温度和压力升高，进入上精馏塔的再沸器为上精馏塔提供热源。

（4）下精馏塔系统

上精馏塔的塔釜液为下精馏塔的原料液，而下精馏塔产生的塔顶蒸汽则进入上精馏塔内。

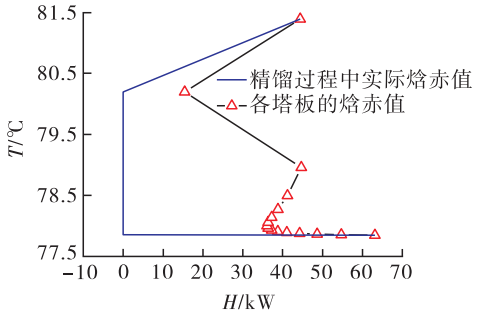
1.3　外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统可行性分析

精馏塔总组合曲线（Column Grand Composite Curve，CGCC）是精馏塔在实际接近最小热力学状态（Practical Near-Minimum Thermodynamic Condition，PNMTC）下的温焓图。最小热力学状态（Minimum Thermodynamic Condition，MTC）是在工艺可逆假定下提出的，而 PNMTC 则是以 MTC 为基础，综合考虑原料与塔内的不可逆损耗，构建一个完整的精馏塔热集成分析模型。从热力学的观点来看，CGCC 曲线代表满足精馏塔的分离需求时，每一层塔板所需输入和排出的热量的极限值。

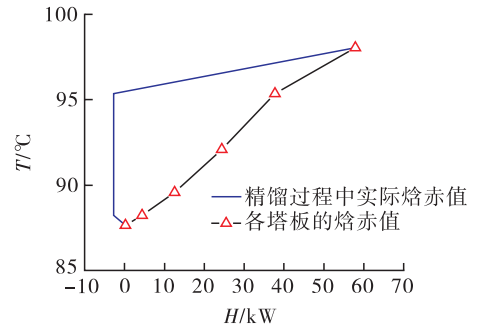
根据 Aspen Plus 仿真得到的乙醇精馏塔每块塔板上的气液平衡组成、塔板温度、焓值等结果，建立乙醇精馏系统塔总组合曲线。ESHPDC 系统的 CGCC 曲线如图 3 所示，从图中可以看出，上精馏塔（C1）塔顶和塔釜的温差仅为 3.54 ℃，而下精馏塔（C2）塔顶和塔釜的温差达到了 10.38 ℃。因此，C1 塔可以采用 MVR 热泵精馏技术。

从再沸器的负荷来看，C1 塔的再沸器负荷为 44.38 kW，C2 塔的再沸器热负荷仅为 8.33 kW，不

到 C1 塔的五分之一，因此，C2 塔可单靠外部蒸汽供热，而不会对系统节能效果产生较大影响。



（a）C1 塔



（b）C2 塔

图 3 ESHPDC 系统 CGCC 曲线

Fig.3 CGCC curves of ESHPDC systems

图 4 所示为 SHPDC 和 ESHPDC 系统内 C1 塔塔板能量损失对比。可以看出，2 种系统中，C1 塔内的前 15 块塔板的能量损失量相同，即 C1 塔内的前 15 块塔板完成了相同的能量传递过程。而对于图中的第 16 块塔板，ESHPDC 系统的能量损失显著升高。主要原因在于，ESHPDC 系统引入了外部工质，塔顶增加了间壁式换热器，使得 ESHPDC 系统再沸器所需的能量增加。

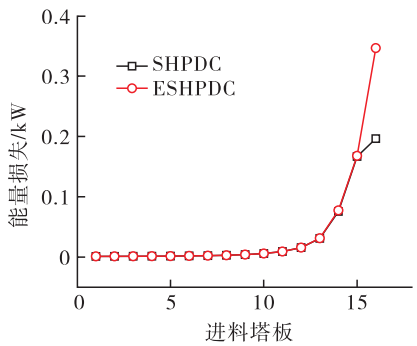


图 4 C1 塔塔板能量损失对比

Fig.4 Comparison of plate energy loss of C1 column

2 精馏系统仿真优化

2.1 乙醇 – 水物系热力学模型

乙醇 – 水物系的液相热力学模型选择 NRTL 方程，乙醇 – 水物系的活度系数计算如下：

$$\frac{G^{ex}}{RT}=x_1x_2\left(\frac{\tau_{21}G_{21}}{x_1+x_2G_{21}}+\frac{\tau_{12}G_{12}}{x_2+x_1G_{12}}\right) \tag{1}$$

$$\ln\gamma_1=x_2^2\left[\frac{\tau_{21}G_{21}^2}{\left(x_1+x_2G_{21}\right)^2}+\frac{\tau_{12}G_{12}^2}{\left(x_2+x_1G_{12}\right)^2}\right] \tag{2}$$

$$\ln\gamma_2=x_1^2\left[\frac{\tau_{12}G_{12}^2}{\left(x_2+x_1G_{12}\right)^2}+\frac{\tau_{21}G_{21}^2}{\left(x_1+x_2G_{21}\right)^2}\right] \tag{3}$$

式中，G 为超额吉布斯自由能，$G_{ij}=\exp(-\alpha\tau_{ij})$；$\alpha$ 为乙醇 – 水物系参数，$\alpha=0.3$；x_1 为乙醇摩尔分数；x_2 为水摩尔分数；γ_1 为乙醇的活度系数；γ_2 为水的活度系数；τ_{ij} 为交互作用能量之间的差异，$\tau_{ij}=(g_{ij}-g_{ii})/(RT)$，$R$ 为理想气体常数，$R=8.314$ J/(mol·K)。

通过状态方程可以表达压力 P、体积 V 和温度 T 之间的关系。在计算气体阶段，RK 方程拥有非常高的准确性，具体表达形式如下：

$$P=\frac{RT}{V_m-b}-\frac{a}{\sqrt{T}V_m\left(V_m+b\right)} \tag{4}$$

$$a=\left(0.427\ 48R^2T_c^{2.5}\right)/P \tag{5}$$

$$b=0.086\ 64RT_c/P_c \tag{6}$$

式中，V_m 为摩尔体积。

对强非理想物系，状态方程和活度系数公式的结合可提高液相和气相的热力学性质的准确性[20]。在乙醇 – 水物系中，液相和气相分别选择 NRTL 方程和 RK 方程进行计算，计算得出的结果与试验得到的物系气液平衡结果，对比关系如图 5 所示。

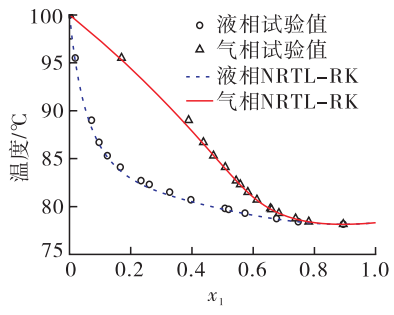


图 5 组合模型数据与试验数据对比

Fig.5 Comparison of the data obtained from the combined model with the experimental data

从图 5 中可以看出，对比组合模型计算所得的乙醇 – 水数据和试验数据，仅在液相中的乙醇摩尔分数为 0.166 1，0.233 7，0.260 8 和 0.327 3，以及在气相中的乙醇摩尔分数为 0.389 1 时略有偏

差，误差仅为 1.35%，表明采用 NRTL–RK 组合模型可准确计算出乙醇 – 水物系的热力特性。

2.2 外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统模拟流程建立

在 ESHPDC 系统中，通过换热量的衡算得到外部工质的流量。

$$Q_h = Q_c + Q_l \tag{7}$$

式中，Q_h 为热流体负荷，W；Q_c 为冷流体负荷，W；Q_l 为热损失，W。

其中，负荷通过焓差法计算。

$$Q_h = W_h\left(H_{hi} - H_{ho}\right) \tag{8}$$

$$Q_c = W_c\left(H_{ci} - H_{co}\right) \tag{9}$$

式中，W 为质量流量，kg/s；H 为比焓，J/kg；下标 i 为入口，下标 o 为出口。

根据式（7）~（9），对外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统进行模拟。模拟流程如图 6 所示。

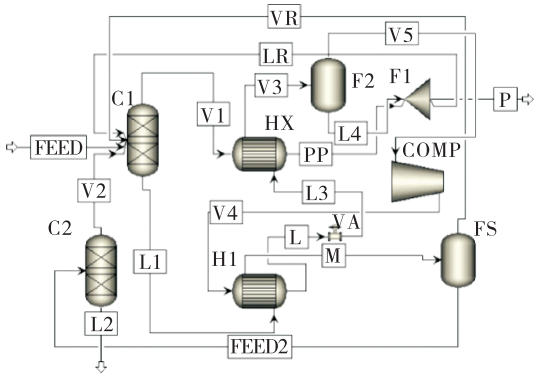


图 6 外部工质分割式 MVR 热泵精馏模拟流程

Fig.6 Simulation flow diagram of external separate MVR heat pump distillation column system

2.3 仿真参数设置

外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统设置参数见表 1。

表 1 设置参数

Tab.1 Design parameters

条件	参数
进料流量 /（kg·h^{-1}）	100
物料	乙醇 – 水
进料乙醇浓度	50 wt%
物性方法	NRTL–RK
进料热状态	q=1
操作压力 /kPa	101.325
产品要求	塔顶乙醇浓度≥ 95 wt%
收敛方法	BROYDEN（拟牛顿）

3 分割式 MVR 热泵精馏系统性能分析

采用 Aspen Plus 软件，建立常规乙醇精馏系统（Conventional Distillation Column，CDiC）、HPDC 系统、SHPDC 系统和 ESHPDC 系统的稳态流程，对 4 种乙醇 – 水精馏系统的性能进行对比研究。

3.1 模拟方法与热力分析

以能耗为基准评估化学反应效果的方法称为热力学效率。该方法能展现各部分有效功的损失对系统的影响。对于乙醇 – 水精馏系统，整体热力学效率的提高意味着更高的能源转化效率和更低的运行费用。热力学效率计算公式如下：

$$\eta = \frac{\Delta H_{\text{有效能增量}}}{\Delta H_{\text{有效能消耗}}} \tag{10}$$

$$\Delta H_{\text{有效能增量}} = \sum_{\text{出}} m\left(h - T_0 S\right) - \sum_{\text{入}} m\left(h - T_0 S\right) \tag{11}$$

$$\Delta H_{\text{有效能消耗}} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i + P \tag{12}$$

能效比（Coefficient of Performance，COP）是评价热泵系统性能的重要指标[21]。

$$COP = Q_2 / P \tag{13}$$

式中，Q_2 为再沸器负荷，W；P 为压缩机功率，W。

3.2 不同形式乙醇精馏系统性能对比

4 种系统的热力学效率及 *COP* 值见图 7。CDiC 系统热效率仅为 5.14%，ESHPDC 系统热效率为 8.27%，较常规乙醇精馏系统高 3.13%。其中，ESHPDC 系统的 *COP* 值达到了 11.75，表明 ESHPDC 系统具有良好的节能特性。

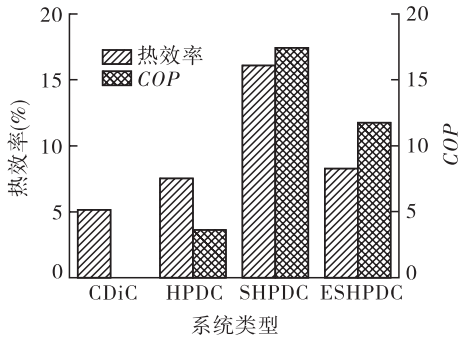


图 7 精馏系统效率及 *COP* 对比

Fig.7 Comparison of distillation system efficiency and *COP*

从图 7 中可以得出，热泵的引入提高了精馏系统的热效率，但是对于 HPDC 系统，由于压比过大，热泵的 *COP* 较低，热泵的性能不高。热效率用来评价整个精馏系统的可逆程度，*COP* 用于评价热泵性能，两者数值的大小并没有直接关系。因此，在评价系统时，应选取热效率和 *COP* 均较高的系统。

以系统的经济效益最大或总费用最小为设计目标，按照实际生产需要，计算了 4 种系统 1 小时的公用工程消耗，并按标准煤折算所消耗的蒸汽和电力。4 种系统的对比结果见表 2[22]。

表 2 精馏系统能耗及运行费用对比

Tab.2 Comparison of energy consumption and operating costs of distillation systems

系统类别		CDiC	HPDC	SHPDC	ESHPDC
蒸汽能耗	再沸器负荷 /kW	70.18	—	10.17	10.19
	消耗 /(kg·h^{-1})	118.23	—	16.72	16.75
	标准煤 /(kg·h^{-1})	12.82	—	1.81	1.82
	费用 /(元·h^{-1})	29.56	—	4.18	4.19
电力能耗	压缩机功率 /kW	—	20.05	3.72	5.52
	标准煤 /(kg·h^{-1})	—	6.38	1.18	1.75
	费用 /(元·h^{-1})	—	16.04	2.98	4.42
总标准煤 /(kg·h^{-1})		12.82	6.38	2.99	3.57
节约能源(%)		—	50.23	76.68	72.15
运行费用 /(元·h^{-1})		29.56	16.04	7.16	8.61
节约运行费用(%)		—	45.74	75.78	70.87

注：蒸汽价格为 0.25 元 /kg；电力价格为 0.8 元 /(kW·h)。

可以看出，相较于 CDiC，3 种热泵技术，均可大幅降低精馏过程能耗，能源节约率在 50% 以上。此外，SHPDC 和 ESHPDC 的能源节约率高于 HPDC，分别为 76.68% 和 72.15%。

生产企业因受限于电力、场地等客观条件，常依靠外部购买蒸汽用于维持运行，按照蒸汽价格为 0.25 元 /kg，电力价格为 0.8 元 /(kW·h) 计算，相较于 CDiC，SHPDC 系统的经济性最佳，可节约 75.78% 的运行费用，ESHPDC 系统次之，可节约 70.87% 的运行费用，二者均具有良好的经济性。

ESHPDC 流程隔离了乙醇，增加了系统的复杂性和成本，但可以看出 SHPDC 和 ESHPDC 系统的性能和运行成本相差较小，且 ESHPDC 系统将水作为循环工质，通过压缩水蒸气而非乙醇蒸汽，提高了系统的安全性。

3.3 外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统运行性能分析

Aspen Plus 软件内部置有多种优化算法，采用序列二次规划算法，以乙醇产品浓度作为边界条件，分析回流比、进料位置等重要参数对系统节能特性的影响。

上精馏塔回流比对系统性能的影响如图 8 所示。随着回流比的增加，上精馏塔 *COP* 随之增大。这主要是因为回流比决定了上精馏塔内液相流量的大小，随着回流比的不断增加，上精馏塔内液相流量也不断增大，从而导致上精馏塔需要更多的热量来汽化增多的液相，再沸器负荷也相应增大，相同的压缩机功率会提供更多的热量给上精馏塔，因而，上精馏塔的 *COP* 增大。

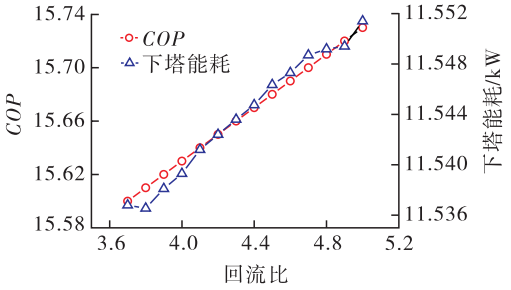


图 8 上精馏塔回流比对系统性能的影响

Fig.8 Effect of reflux ratio of upper distillation column on system performance

由于下精馏塔采用蒸汽进行加热，如果将上精馏塔和下精馏塔分开来看，可以认为下精馏塔是一个没有进行节能改造的精馏塔，因而下精馏塔的能耗会对系统的总能耗产生影响，下精馏塔的能耗升高，会导致系统总能耗的升高。同时，由图 8 可知，由于上、下精馏塔采取串联形式，下精馏塔的能耗也会随着上精馏塔回流比的增加而增大。因此，上精馏塔的回流比不宜过大，以免增加下精馏塔的能耗，导致系统总能耗和运行费用上升。

上塔进料位置对乙醇浓度和系统能耗的影响如图 9 所示。从图中可以看出，进料板位置会影响乙醇浓度和系统能耗，随着进料板位置的下移，塔釜液中乙醇浓度逐渐降低、下精馏塔能耗

增加、系统总能耗和运行费用升高。在实际操作中，为避免发生物料返混，进料的浓度与精馏塔内的物料浓度不宜相差过大，因此，在选择进料板位置时，一般根据精馏塔内物料的浓度来确定进料板的位置，使进料浓度接近精馏塔内的物料浓度，在保证精馏塔分离效果的前提下，使系统能耗最小。

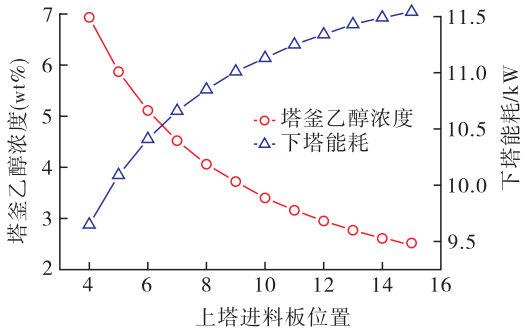


图 9　上塔进料板位置对乙醇浓度和系统能耗的影响

Fig.9　Influence of feed plate position on distillation column on ethanol concentration and system energy consumption

4　工程实际应用

对烟台某食品公司原有精馏系统进行了升级改造，诞生了我国首套大型 MVR 余热精馏系统。该系统以水为循环工质，实现了对有机气体的精馏。如表 3 所示，与原有系统相比，改造后的系统处理每吨物料节约运行费用超过 50%，标煤节约率可达 60% 以上。

表 3　食品公司改造前后精馏系统经济性对比

Tab.3　Comparison of the economics of distillation systems before and after the transformation of food companies

项目	原有精馏系统	余热改造后
电力能耗 /（kW·h）	—	32.78
蒸汽能耗 /kg	360	54.45
运行费用 / 元	74.40	36.02
节约运行费用（%）	—	50.39
总标准煤 /kg	53.92	21.52
节约能源（%）	—	60.79

对内蒙古某制药企业原有单塔精馏系统进行了技术改造，由原有单塔精馏改造为多塔精馏，实现了有机溶媒的高效循环利用，改造后的热泵精馏系统每小时可节约蒸汽约 12 t，每年可大幅节约运行费用及降低二氧化碳的排放量。

表 4　制药企业改造后精馏系统效果

Tab.4　The effect of the distillation systems after the transformation of pharmaceutical enterprises

改造后效果	数值
节约蒸汽 /（$t\cdot h^{-1}$）	12
节约运行费用 /（万元·a^{-1}）	1 400
二氧化碳减排量 /（$t\cdot a^{-1}$）	1 100
单塔处理能力增量 /（$m^3\cdot h^{-1}$）	15~20

5　结论

（1）开发了一种外部工质分割式 MVR 热泵精馏系统（ESHPDC），可提高系统安全性并大幅度降低乙醇精馏过程能耗。系统将水作为循环工质，通过压缩水蒸气而非乙醇蒸汽，提高了系统的安全性；采用分割式结构，上精馏塔温差仅为 3.54 ℃，可有效减少压缩机进出口温差。

（2）所构建的 ESHPDC 系统相比于常规乙醇精馏系统，可节约能源 72.15%，可节约运行费用可 70.87%。

（3）在保证塔釜乙醇浓度的条件下，需结合生产实际，确定回流比、进料位置等关键性参数，以达到最佳节能效果。

参考文献：

[1] HERNANDEZ S，SEGOVIA-HERNANDEZ J G，RICO-RAMIREZ V.Thermodynamically equivalent distillation shemes to the Petlyuk column for ternary mixtures[J].Energy，2006，31（12）：2176 – 2183.

[2] YANG M B，FENG X，LIU G L.Heat integration of heat pump assisted distillation into the overall process[J].Applied Energy，2016，162：1 – 10.

[3] 张化福，童莉葛，张振涛，等 . 机械蒸汽压缩蒸发技术研究现状与发展趋势[J]. 化工学报，2023，74（增刊 1）：8–24.
ZHANG H F，TONG L G，ZHANG Z T，et al.Recent progress and development trend of mechanical vapor compression evaporation technology[J].CIESC Journal，2023，74（Sup.1）：8 – 24.

[4] OLIVEIRA S B M，PARISE J A R，MARQUES R P.Modelling of an ethanol–water distillation column assisted by an external heat pump[J].International Journal of Energy Research，2002，26（12）：1055 – 1072.

[5] RANADE S M，CHAO Y T.Industrial heat pumps：where and when[J].Hydrocarbon Process，1990，94（10）：71 – 73.

[6] 赵远扬,刘广彬,李连生,等.机械蒸汽再压缩系统的性能分析[J].流体机械,2017,45(6):16-20.
ZHAO Y Y,LIU G B,LI L S,et al.Performance analysis on mechanical vapor recompression system [J].Fluid Machinery,2017,45(6):16-20.

[7] CUI C T,SUN J S,LI X G.A hybrid design combining double-effect thermal integration and heat pump to the methanol distillation process for improving energy efficiency[J].Chemical Engineering and Processing,2017,119:81-92.

[8] 蔡玉强,孟欣.蒸汽压缩蒸馏装置罗茨压缩机内部流场的数值分析[J].流体机械,2015,43(4):17-20.
CAI Y Q,MENG X.Numeric analysis on inside flow field of lobed rotor compressor in the vapor compression distillation device[J].Fluid Machinery,2015,43(4):17-20.

[9] KAZEMI A,MEHRABANI-ZEINABAD A,BEHESHTI M.Recently developed heat pump assisted distillation configurations:A comparative study[J].Applied Energy,2018,211:1261-1281.

[10] PATRASCU I,BILDEA C S,KISS A A.Dynamics and control of a heat pump assisted extractive dividing-wall column for bioethanol dehydration[J].Chemical Engineering Research&Design,2017,119:66-74.

[11] 武庭宇,王超,秦余涛,等.乙酸乙酯/乙醇/水体系预分离萃取精馏工艺研究[J].化工学报,2023,74(11):4578-4586.
WU T Y,WANG C,QIN Y T,et al.Study of extractive distillation processes with preconcentration for separating ethyl acetate/ethanol/water azeotropic mixture[J].CIESC Journal,2023,74(11):4578-4586.

[12] 张钰,刘军,张振涛,等.中间再沸式热泵甲醇精馏节能及经济分析[J].节能技术,2017,35(204):367-370.
ZHANG Y,LIU J,ZHANG Z T,et al.Energy saving and economic analysis of methanol distillation with inter-reboiler mechanical vapor recompression heat pump[J].Energy Conservation Technology,2017,35(204):367-370.

[13] 肖逸文,李明鸿,张力丹,等.1,4-丁炔二醇的分割式热泵精馏工艺模拟[J].广东化工,2023,50(13):107-110.
XIAO Y W,LI M H,ZHANG L D,et al.Process simulation of separated heat pump distillation technique to extract 1,4-butynediol[J].Guangdong Chemical Industry,2023,50(13):107-110.

[14] 刘军,张钰,毛祥,等.基于乙醇压缩的超重力热泵精馏热集成系统性能分析[J].化工学报,2018,69(10):4342-4352.
LIU J,ZHANG Y,MAO X,et al.Performance analysis of high-gravity heat pump distillation heat integrated system based on ethanol compression[J].CIESC Jourual,2018,69(10):4342-4352.

[15] 朱平,冯霄.分割式热泵精馏流程的优化设计及运行调优[J].化学工程,2004,32(6):10-14.
ZHU P,FENG X.Optimal design and operation of separate heat pump distillation[J].Chemical Engineering,2004,32(6):10-14.

[16] 王建国.应用MVR热泵技术改造醋酸-水精馏系统节能研究[J].甘肃科技纵横,2022,51(11):28-30.
WANG J G.Application of MVR heat pump technology for energy saving in acetic acid-water distillation system[J].Scientific & Technical Information of Gansu,2022,51(11):28-30.

[17] 陆恩锡,吴震.蒸馏过程热泵节能—热泵基本原理[J].化学工程,2008,36(8):75-78.
LU E X,WU Z.Energy conservation with heat pump in distillation—basic principles[J].Chemical Engineering,2008,36(8):75-78.

[18] 赵林,吴小华,孙东亮,等.乙醇超重力MVR热泵精馏系统仿真及优化研究[J].工程热物理学报,2022,43(3):679-684.
ZHAO L,WU X H,SUN D L,et al.Simulation and optimization study of ethanol-water high gravity MVR heat pump distillation system[J].Journal of Engineering Thermophysics,2022,43(3):679-684.

[19] 吴迪,胡斌,王如竹,等.水制冷剂及水蒸气压缩机研究现状和展望[J].化工学报,2017,68(8):2959-2968.
WU D,HU B,WANG R Z,et al.A review on development and prospect of water refrigerant and water vapor compressor[J].CIESC Jourual,2017,68(8):2959-2968.

[20] 汪尔奇,彭书舟,杨震,等.含HFO混合体系气液相平衡的理论模型评价[J].化工学报,2023,74(8):3216-3225.
WANG E Q,PENG S Z,YANG Z,et al.Evaluation of vapor-liquid equilibrium models for mixtures containing HFOs[J].CIESC Jourual,2023,74(8):3216-3225.

(下转第 101 页)

WANG Y, YOU S J, SUN Y K, et al. Experimental investigations on air source heat pump and solar composite water heating system in hot summer and warm winter area [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(12): 58 – 62.

[10] 胡文举，张帅，李德英，等 . 北京地区空气源热泵供暖系统的应用研究 [J]. 流体机械，2017，45(7)：58 – 61.
HU W J, ZHANG S, LI D Y, et al. Study on the application of air source heat pump heating system in beijing area [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(7): 58 – 61.

[11] 乔桂楠，王宇，李艳菊，等 . 基于空气源热泵与新型通水地板的辐射供暖系统应用分析 [J]. 流体机械，2022，50(3)：88 – 95.
QIAO G N, WANG Y, LI Y J, et al. Application analysis of radiant heating system based on air source heat pump and the new type of water-passing floor [J]. Fluid Machinery, 2022, 50(3): 88 – 95.

[12] 黄凯良，侯旭，冯国会 . 基于 TRNSYS 的严寒地区地热辅助的空气源热泵系统研究 [J]. 流体机械，2023，51(7)：83 – 90.
HUANG K L, HOU X, FENG G H. Study on geothermal-assisted air source heat pump system in cold region based on TRNSYS [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(7): 83 – 90.

[13] 中国产品全生命周期碳排放系数库 [EB/OL]. 中国城市温室气体工作组，2024–04–26. https://lca.cityghg.com.
China Products Carbon Footprint Factors Database [EB/OL]. China Ciy Greenhouse Gas Working Croup, 2024–04–26. https://lca.cityghg.com.

[14] BENJAMIN G, ADISA A. Domestic heat pumps: Lifecycle environmental impacts and potential implications for the UK [J]. Energy, 2012, 39(1): 205 – 217.

[15] 魏夕凯，谭效时，林明，等 .2005—2035 年全国电网碳排放因子的计算与预测 [J]. 综合智慧能源，2024，46(3)：72 – 78.
WEI X K, TAN X S, LIN M, et al. Calculation and prediction of carbon emission factors for the national power grid from 2005 to 2035 [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(3): 72 – 78.

[16] 李萍，杨红义，刘琳，等 . “碳中和” 目标下中国核电发展 [J]. 节能技术，2023，41(1)：10 – 15.
LI P, YANG H Y, LIU L, et al. Development of nuclear power in China under carbon neutrality target [J]. Energy Conservation Technology, 2023, 41(1): 10 – 15.

作者简介：屈博艺（1993），女，工程师，硕士，主要从事绿色高效制冷空调技术研究工作，通信地址：230031 安徽省合肥市长江西路 888 号合肥通用机械研究院有限公司，E – mail：56798970@qq.com。

本文引用格式：
屈博艺，吴俊峰，孙云，等 . 工商业用低环境温度空气源热泵（冷水）机组碳足迹分析 [J]. 流体机械，2025，53(2)：94 – 101.
QU B Y, WU J F, SUN Y, et al. Carbon footprint analysis on low ambient temperature air source heat pump (chiller) units for industrial and commercial use [J]. Fluid Machinery, 2025, 53(2): 94 – 101.

（上接第 40 页）

[21] 于晓慧，王甜，高志 . 真空管直膨式太阳能热泵系统性能分析 [J]. 太阳能学报，2023，44(11)：166 – 173.
YU X H, WANG T, GAO Z. Performance analysis of evacuated tube direct-expansion solar-assisted heat pump systems [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 166 – 173.

[22] 宁旭丹 . 乙醇分割式 MVR 热泵精馏系统设计及其优化研究 [D]. 北京：北京石油化工学院，2020.
NING X D. Design and optimization of etnanol separate heat pump distillation system [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2020.

作者简介：廉文韬（1999），男，硕士研究生，主要从事机械蒸汽再压缩（MVR）技术及其应用研究，E – mail：13485491386@163.com。

通信作者：宁旭丹（1994），女，博士研究生，主要从事热力系统节能优化研究，通信地址：710049 陕西省西安市中国西部科技创新港西安交通大学能源与动力工程学院，E – mail：xdning@stu.xjtu.edu.cn。

本文引用格式：
廉文韬，吴小华，杨鲁伟，等 . 乙醇分割式机械蒸汽再压缩热泵精馏系统开发及性能研究 [J]. 流体机械，2025，53(2)：33 – 40.
LIAN W T, WU X H, YANG L W, et al. Development and performance study of ethanol external separate mechanical vapor recompression heat pump distillation system [J]. Fluid Machinery, 2024, 53(2): 33 – 40.