

基于 MVR 热泵的三元混合烷烃热耦精馏

杨德明,王颖,谭建凯,蒋宇,高晓新*

(常州大学石油化工学院,江苏常州 213164)

摘要:以正己烷、环己烷、异辛烷三元混合烷烃的分离为研究对象,利用 Aspen Plus 软件,选用 RK-SOAVE 方程,以年总费用(TAC)最低为目标函数,考察了中间组分分配比对热耦精馏的能耗及 TAC 等方面的影响,得到最佳分配比为 0.47。在此基础上,把蒸汽再压缩(MVR)热泵技术应用于热耦精馏,提出了 MVR 热耦精馏工艺,研究了压缩比对 MVR 热耦精馏的影响,得到了相关的工艺参数和设备参数。研究表明,MVR 热耦精馏与常规热耦精馏相比,可节能约 38%,节省年总费用约 48%。

关键词:混合烷烃;热耦精馏;MVR 热泵技术;模拟;年总费用

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)03-0156-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.03.040

Thermally coupled distillation for separating ternary mixed alkane based on the MVR heat-pump

YANG De-ming, WANG Ying, TAN Jian-kai, JIANG Yu, GAO Xiao-xin*

(College of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The thermal coupled distillation is applied to separate ternary mixture alkane of *n*-hexane, cyclohexane and isooctane. By using the lowest total annual cost(TAC) as objective function, the influence of the middle component split ratio on energy consumption and TAC is performed by Aspen Plus software with the RK-SOAVE equation. The optimum split ratio is 0.47. Moreover, mechanical vapor recompression(MVR) heat pump technology is also applied into thermally coupled distillation and the MVR thermal coupled distillation is put forward. The influence of compression ratio on the MVR thermal coupled distillation is performed. The process and equipment parameters are determined. The simulation results show that the MVR thermally coupled distillation can save energy by 38% and TAC by 48%, respectively, compared with the conventional thermal coupling distillation.

Key words: mixed alkane; thermally coupled distillation; MVR heat-pump technology; simulation; total annual cost

多元混合烷烃,如正己烷、环己烷、异辛烷的分离纯化在医药、化工、电子等行业普遍存在。传统的分离方法采用连续或间歇精馏,能耗较高。对于三元体系的分离,研究最多的节能分离工艺是热耦精馏^[1-3]。热耦精馏是强化热集成的一条较为有效的途径,不仅可以减少设备投资费用,还可以降低能耗。但在热耦精馏工艺中,塔顶蒸汽潜热通常由冷却介质带走,造成了热量的不可逆损失,未能达到理想的节能效果。而机械蒸汽再压缩(MVR)热泵精馏技术^[4-6]则是把塔顶蒸汽通过压缩机压缩后,提高其蒸汽的品位,用于塔底供热,构成了塔顶塔底的自身热平衡,从而达到最大幅度节能的效果。本文中 MVR 热泵技术应用于热耦精馏中,以正己烷、环己烷、异辛烷三元体系的分离为研究对象,分析考察该工艺的综合经济效益。

1 模拟规定与评价函数

1.1 模拟规定

以正己烷(A)-环己烷(B)-异辛烷(C)三元混合烷烃为研究对象,处理量 5 000 kg/h,饱和液体进料。其中含正己烷 0.2(质量分数,下同)、环己烷 0.6、异辛烷 0.2,要求分离得到的各组分纯度均不小于 0.995。塔顶冷源选用冷却水,进出口温度分别取 33、38℃;塔底热源选用 0.2 MPa 饱和水蒸汽。

热力学状态方程的选用对精馏模拟计算结果的准确性影响很大。烷烃属于非极性分子,故物性方法选用 Aspen Plus 软件中的 RK-SOAVE 方程^[7],二元交互参数计算选用 RKS KBV 方程。压缩机的模拟选用软件中的 Compr. 离心压缩机模型,精馏塔的模拟选用 RadFrac. 严格精馏模型,塔

板采用浮阀塔盘。

1.2 评价函数

精馏工艺的择优通常是以年总费用 TAC (total annual cost) 最小为依据。TAC 由年操作费用 OC (operating cost) 和年均设备费用 CI (capital investment) 2 部分构成。操作费用包括塔顶冷却水费用、塔底加热蒸汽费用及压缩机电费; 设备费用包括精馏塔塔体、塔盘、压缩机及换热器费用, 计算公式^[8]如下:

$$TAC = OC + CI$$

$$OC = \alpha \cdot [Q_C / (C_p \cdot \Delta t)] +$$

$$\beta \cdot [(Q_B + Q_{FB}) / 1000r] + \gamma \cdot P_w$$

$CI = (\xi \cdot D^2 \cdot 0.5 \cdot N_T + \delta \cdot D^{1.55} \cdot N_T + \sigma \cdot P_w + \Psi \cdot A_T) / \theta$
 式中, θ 为设备折旧年限, 取 10; 0.5 为板间距, m; α 、 β 、 γ 分别为冷却水、蒸汽及电的单价, 分别取 0.35 元/t、200 元/t、0.8 元/kWh; C_p 为水的比热, 4.18 kJ/(kg·°C); Δt 为冷却水的进出口温差, 5°C; r 为水蒸汽的冷凝潜热, 2 177 kJ/kg; Q_C 、 Q_B 、 Q_{FB} 、 P_w 分别为塔顶与塔底的热负荷及压缩机的功耗, 由模拟计算得到; ξ 、 δ 、 σ 、 Ψ 分别为精馏塔塔体、塔盘、压缩机及换热器的换算造价因子, 取 1 250 元/m³、35 元/浮阀、150 元/kW、800 元/m²。 D 、 N_T 、 A_T 分别为塔径、塔板数及总换热面积, 由模拟计算得到。

2 常规热耦精馏

参见图 1, 常规热耦精馏在分离三组分时, 预分塔 (C1) 先将 ABC 粗分为 AB 和 BC 2 组混合物, AB 混合物 (S1) 进入主塔 (C2) 上部, BC 混合物 (S4) 进入主塔下部, 主塔塔顶得到轻组分 A, 塔釜得到重组分 C, 中间组分 B 则在主塔中部侧线采出。在模拟热耦精馏塔系时, 由于两塔的关联变量多、关联程度高, 导致计算难以收敛。为此引入其等价双塔精馏模型 (见图 2), 将等价双塔精馏的优化模拟结果作为模拟热耦精馏塔系的初值, 即把等价双塔精馏模拟得到的塔顶馏出液量和塔底蒸发量分别作为热耦精馏塔系 S2 和 S3 流股的初值。

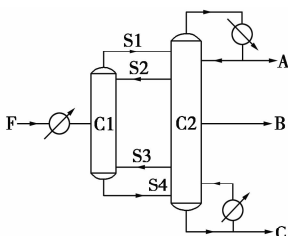


图 1 常规热耦精馏流程

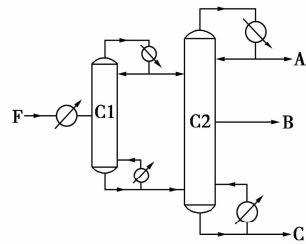
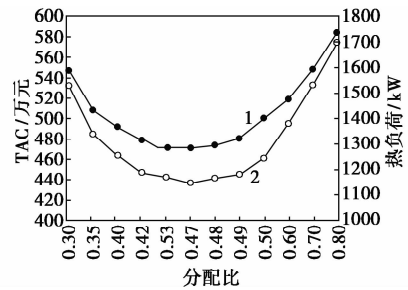


图 2 等价双塔精馏流程

对于热耦精馏, 在给定进料组成、规定产品纯度的条件下, 中间组分 B 在 AB 和 BC 2 组混合物中的占比是影响热耦精馏的关键参数。定义中间组分 B 的分配比为组分 B 在预分塔塔顶的采出量与在进料中的含量之比, 即 $\beta = S1 \cdot y_{S1B} / F \cdot x_{FB}$ 。以 TAC 为目标函数, 对于不同的分配比 β , 通过分离塔板数以及进料位置等参数的优化, 模拟得到了热耦精馏塔系的能耗和 TAC, 结果见图 3。



1—TAC; 2—热负荷

图 3 分配比 β 对热负荷、TAC 的影响

从图 3 可以看出, 中间组分分配比对分离塔的热负荷及 TAC 均有较大的影响。随着中间组分分配比的加大, 热负荷及 TAC 均呈现由大变小, 再由小变大的趋势, 当 $\beta = 0.47$ 时, 热负荷及 TAC 均达到最小值, 即组分 B 在预分塔塔顶进入主塔的量略小于在预分塔塔底进入主塔的量。这是因为 AB 组分的平均相对挥发度为 1.46, 而 BC 组分的平均相对挥发度为 1.64, 这意味 BC 体系比 AB 体系更容易分离些, 因而中间组分 B 在 BC 体系中的含量高, 则主塔的分离能耗就低, 模拟结果与理论分析结果是一致的。

在最佳分配比条件下, 模拟得到了预分塔和主塔中各组分的液相浓度分布, 见图 4 和图 5。从图 4 中可以看出, 预分塔塔顶物料中组分 C 含量接近 0, 而塔釜物料中组分 A 含量也接近 0, 表明在预分塔中, 组分 A 和 C 基本实现了完全分离。对于中间组分 B 而言, 从进料板开始, 往塔顶塔釜均呈现单一的上升趋势, 这样可以有效避免返混现象, 降低能

耗。从图 5 中可以看出,主塔的塔顶、侧线以及塔釜分别分离得到纯度较高的组分 A、B、C,组分 B 的浓度在侧线(第 48 块)最高。

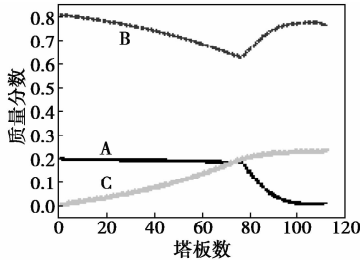


图 4 预分塔内组分的液相浓度分布

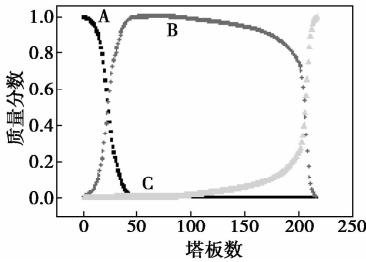


图 5 主塔内组分的液相浓度分布

3 MVR 热偶精馏

热耦精馏的预分塔不设冷凝器和再沸器,其塔底气相由主塔下部引入,而塔顶回流则由主塔的上部引入,因此预分塔无需加热介质和冷却介质。热耦精馏系统的能耗主要消耗在主塔的塔底,塔底供热转化为塔顶蒸汽潜热,再由冷却介质带走,造成了热量的不可逆损耗。基于 MVR 热泵的节能原理,将 MVR 热泵技术应用于热耦精馏系统^[9-11],即主塔塔顶蒸汽经蒸汽压缩机压缩后,提高其温位,用于主塔塔底的供热,形成主塔的自热循环,以达到最大幅度的节能效果,MVR 热耦精馏流程见图 6,图中虚线表示辅助再沸器。

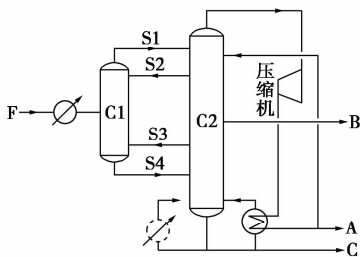
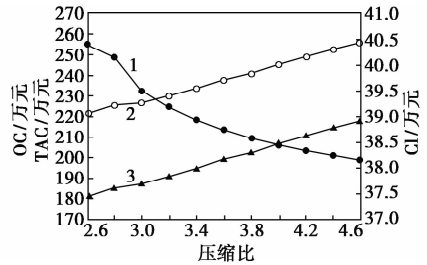


图 6 MVR 热耦精馏流程

由图 6 可知,MVR 热耦精馏系统的能耗主要取决于蒸汽压缩机的电耗。压缩相同的塔顶蒸汽量工况条件下,压缩比大,操作费用高;压缩蒸汽与塔底

物料的换热温差变大,塔底换热器的面积减小,设备投资费用就低。因此压缩比是 MVR 热耦精馏系统的关键参数,同时影响操作费用和设备投资费用。规定中间组分 B 的分配比 $\beta = 0.47$,改变压缩比,模拟得到 MVR 热耦精馏系统的各工艺参数及设备参数,代入评价函数计算年操作费用(OC)、年均设备费用(CI)及年总费用(TAC),压缩比与以上三者的关系见图 7。可见,随着压缩比的增大,年均设备费用下降,而操作费用则上升,由于操作费用在年总费用中的占比较大,导致年总费用随压缩比的增大而增加。综合考虑塔底换热温差及 TAC 的变化趋势,选择压缩比为 3.0,此时塔底换热温差为 10℃,TAC 为 226.3 万元。



1—TAC;2—OC;3—CI

图 7 压缩比对操作费用、设备费用及年总费用的影响

4 2 种热耦精馏模拟结果比较

对于常规热耦精馏,优化结果是分配比 $\beta = 0.47$;而对于 MVR 热耦精馏,优化结果是压缩比为 3.0(在 $\beta = 0.47$ 条件下)。2 种热耦精馏的部分优化模拟结果见表 1,对于 MVR 热耦精馏,由于主塔塔顶的压缩蒸汽冷凝潜热为 1 082 kW,略小于主塔塔底需求的热负荷,因此需补充 193 kW 热量。可以看出,压缩机消耗 187 kW 的电功率,可回收利用塔顶 1 082 kW 的热量,即工况性能系数 $COP = 1082/187 = 5.79$ 。MVR 热耦精馏与常规热耦精馏比较,其能耗减少约 38%,年总费用(TAC)节省约 48%。

表 1 2 种热耦精馏模拟结果比较

项目	常规热耦精馏		MVR 热耦精馏	
	预分塔 (C1)	主塔 (C2)	预分塔 (C1)	主塔 (C2)
理论塔板/块	112	217	110	215
流股 S1 离开与进入的位置/块	1	30	1	51
流股 S2 离开与进入的位置/块	1	31	1	51

续表

项目	常规热耦精馏		MVR热耦精馏	
	预分塔 (C1)	主塔 (C2)	预分塔 (C1)	主塔 (C2)
流股 S3 离开与进入的位置/块	112	200	110	200
流股 S4 离开与进入的位置/块	112	201	110	202
冷凝器热负荷/kW	—	1264	—	—
再沸器热负荷/kW	—	1275	—	1082
辅助再沸器热负荷/kW	—	—	—	193
压缩机进汽量/(kg·h ⁻¹)	—	—	13492	—
压缩比	—	—	3.0	—
压缩机功耗/kW	—	—	187	—
总换热面积/m ²	226.8	—	203.5	—
总能耗/(t·a ⁻¹)	1315	—	870	—
OC/万元	403.8	—	187.2	—
CI/万元	31.5	—	39.6	—
TAC/万元	435.3	—	226.8	—

注:表中总能耗的数据为折合成标煤的数据。

5 结论

(1)对于三组分的常规热耦精馏分离工艺,中间组分在预分塔塔顶和塔底的分配对整个分离塔系的能耗及年总费用均有较大的影响。对于本研究体系,最佳分配比为0.47。

(2)引入等价双塔精馏模型,以其计算结果赋以热耦精馏模拟的初值,可加快热耦精馏模拟的速度,提高其计算精度。

(3)MVR热耦精馏比常规热耦精馏无论在能耗还是综合经济效益方面,均凸显显著的优势。两者相比,前者较后者节能约38%,节省年总费用约

48%。

(4)MVR热泵技术的应用已工业化,因此如果能解决热耦精馏塔系中两塔间的流股控制,可以预期MVR热耦精馏工艺将会有很大的工业应用前景。

参考文献

- [1] 孙兰义,昌兴武,谭雅文,等.热耦合技术应用于共沸精馏系统的研究[J].化工进展,2010,29(12):2228-2233.
- [2] 杨霞,李玉刚,郑世清.一种新型的热耦精馏过程的节能分析与工业应用[J].现代化工,2007,27(1):318-321.
- [3] Van Duc Long N, Lee M. Improved energy efficiency in debottlenecking using a fully thermally coupled distillation column[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2011, 6(3): 338-348.
- [4] 邓仁杰,陈清林,高学农.醋酸丁酯热泵精馏新工艺[J].化学工程,2006,34(6):64-67.
- [5] Long N V D, Lee M. A hybrid technology combining heat pump and thermally coupled distillation sequence for retrofit and debottlenecking[J]. Energy, 2015, 26(4): 125-134.
- [6] 高丽丽,张琳,杜明照. MVR蒸发与多效蒸发技术的能效对比分析研究[J].现代化工,2012,32(10):84-86.
- [7] 杨德明,王杨,廖巧.基于分割式热泵的2-甲氧基乙醇-水精馏工艺模拟[J].化学工程,2012,40(5):1-5.
- [8] 杨德明,叶梦飞,杜鹏,等.基于MVR热泵精馏的乙醇-异丙醇分离工艺[J].化工进展,2014,33(5):1344-1347.
- [9] Errico M, Tola G, Rong B G, et al. Energy saving and capital cost evaluation in distillation column sequences with a divided wall column[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(12):1649-1657.
- [10] 王岗,全贞花,赵耀华,等.太阳能-空气复合热源热泵热水系统[J].化工学报,2014,65(3):1033-1039.
- [11] Chew J M, Reddy C C S, Rangaiah G P. Improving energy efficiency of dividing-wall columns using heat pumps, organic rankine cycle and kalina cycle[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014, 76: 45-59. ■

赢创在上海开设新 ROHACELL® 工厂

2016年初,赢创工业集团宣布,其位于上海化学工业园区中国多用户基地的ROHACELL®工厂正式投产。1200m²的ROHACELL®工厂于2015年4月破土动工,经过9个月的建设,现已全部竣工。该工厂是赢创ROHACELL®在全球第3个也是最新的工厂。另外2个生产基地分别位于德国的达姆施塔特和美国阿拉巴马州莫比尔,目前均已投产。

新工厂的投产印证了赢创在亚洲地区让产品更贴近客户的战略决策。这也是ROHACELL®泡沫业务增长过程中里程碑式的一步。ROHACELL®是赢创快速增长的创新业务,其结构性泡沫产品被广泛应用于全球的航空、汽车、电子、医疗和运动器械等行业中。ROHACELL®泡沫以其轻

质特性而闻名,在亚洲航空工业中备受青睐。现有客户包括支线客机ARJ21和中国首架大型商用客机C919(计划于2018年投入商业运营)。

近期,赢创又推出了全新TEGO® Dispers 747 W产品,这是专门为应用于建筑涂料的水性氧化铁浓缩浆而开发的。新产品结合了静电稳定和空间位阻稳定的双重优势,可提供持久的颜料稳定性,确保高颜色强度的一致。此外,该助剂还能降低颜料浓缩浆的黏度,从而能在浓缩浆中加入更多的颜料,以减少覆盖既定表面积所需浓缩浆的用量。TEGO® Dispers 747 W适用于所有水性的无机颜料浓缩浆,并且在调色阶段具有优异的工艺性能。(方圆)