

引用格式:罗逸航,黄克谨. 基于重组分占优的热泵隔壁塔最佳拓扑结构[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(4): 21-30.

LUO YiHang, HUANG KeJin. Optimum topological configuration for a vapor recompressed dividing wall column with a pre-dominance of heavy-components[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(4):21-30.

基于重组分占优的热泵隔壁塔最佳拓扑结构

罗逸航 黄克谨*

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要:在隔壁塔(DWC)分离重组分占优宽沸点三元物系的过程中,重组分的分离产生的大量高温过热蒸汽可以被蒸汽再压缩热泵(VRHP)加以利用,进而形成不同的热泵隔壁塔(VRHP-DWC)拓扑结构。根据 DWC 的稳态运行特征,提出 VRHP-DWC 的最佳拓扑结构,包括两个 VRHP:第一个 VRHP 用来压缩过热蒸汽并将其潜在热量释放至预分离塔的再沸器或公共再沸器;另一个 VRHP 用来压缩由第一个 VRHP 产生的高温冷凝液体和塔底产品流预热后的塔顶蒸汽,并将其潜在热量释放至预分离塔的再沸器或公共再沸器。用苯/甲苯/邻二甲苯和正戊烷/正己烷/正庚烷两组物系验证了所提出结构的经济性能,结果表明,对于隔板在中部的 DWC(DWC with a middle partition, DWCM),两个例子的年度总成本(TAC)分别下降了 17.22% 和 7.11%;而当隔板位于顶部(DWC with a top partition, DWCT)和底部(DWC with a bottom partition, DWCB)时,TAC 也都有不同程度的降低。此外,还讨论了不同隔板位置对 DWC 性能的影响,对于两个例子而言,DWCT 显示出的性能最差,而 DWCM 与 DWCB 在稳态与动态上的性能表现各有优劣。VRHP-DWC 最佳拓扑结构的预先确定可以大大降低化工过程开发阶段的复杂性和乏味性,并对过程中强化技术的应用具有重要意义。

关键词:隔壁塔;重组分占优;宽沸点;蒸汽再压缩热泵;工艺合成;过程设计

中图分类号: TQ202 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.04.003

引 言

隔壁塔(DWC)的性能通常比其传统分离序列(直接和间接分离序列)更加优异,许多理论和实验研究表明,除了节省工厂面积^[1]外,DWC 可以同时使投资和运营成本降低至少 30%^[2]。而蒸汽再压缩热泵(VRHP)强化的 DWC(VRHP-DWC)具有更显著的优势^[3-4]。诸多学者已经对 VRHP 在 DWC 中的应用进行了多方面的研究。Navarro-Amorós 等^[5]提出从塔顶、精馏段和提馏段等部位抽取额外的气相或液相,并对其进行正向或反向蒸汽压缩循环,以利用隔壁塔多余的热量,与传统配置相比,该装置节能约 20%~30%。为了进一步探究热泵在

隔壁塔中的应用限制,Chew 等^[6]使用废热回收(waste heat recovery, WHR)方法(包括热泵,有机朗肯循环和卡琳娜循环)对 DWC 结构进行优化,发现塔顶温度是否过低以及塔顶和塔底温差相对是否过大是影响 WHR 方法是否可行的关键因素。Luo 等^[7]和 Ghalavand 等^[8]分别针对隔板位于顶部和底部的情况,用一个 VRHP 的压缩塔顶蒸汽来加热预分离塔提馏段和公共提馏段,形成一种新型强化分离结构,相应的年度总成本(TAC)分别降低了 24% 和 10.42%,证明了 VRHP 对于隔板位置不同的精馏塔均具有优化效果。为了探索 VRHP 更多的应用方式和潜力,Chen 等^[9]提出一种新型的复杂热集成结构,用两个 VRHP 对隔壁塔的塔顶蒸汽进行多级压缩利用,进一步提高了烃类混合物精馏分离过程的能量效率,并通过比较多种不同的 VRHP-DWC 强化结构,确定了 TAC 最高可节省 25.72%。

由于隔壁塔中具有两塔柱和多热源/热阱的特点,各种 VRHP-DWC 拓扑结构存在很多种可能的

收稿日期:2022-03-06

基金项目:国家自然科学基金(21878011)

第一作者:男,1998 年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: huangkj@mail.buct.edu.cn

联系,如果可以预先确定 VRHP-DWC 处理某一类三元混合物的最佳拓扑结构,则可以在工艺合成和设计过程中解耦拓扑结构的确定与具体的结构和参数搜索,大大减少实际操作中过程建模和搜索计算等复杂而耗时的工作。本文就重组分占优宽沸点三元物系的分离对 VRHP-DWC 的最佳拓扑结构进行了深入探究,首先根据待分离物系的特性对 VRHP-DWC 的最佳拓扑结构进行了理论推导,然后通过两组物系上的模拟验证了所提结构在经济与能耗上的优势,最后给出了一般性的结论。

1 VRHP-DWC 最佳结构推导

在 DWC 实际应用的过程中,待分离物系的性质往往会对其能量消耗、经济性能造成不可忽视的影响。本节以隔板在中部的 DWC(DWCM)为例,针对分离重组分占优宽沸点三元物系的过程,探讨一种合理有效的热泵强化方案。图 1 展示了 DWCM 分离重组分占优宽沸点三元物系的原理。A、B、C 分别表示进料 F 中的轻组分、中间组分与重组分。为了达到分离效果,a、b 两点处都有不同程度 C 的过热产生,由于 C 占优,预分离塔对 A、B 的分离效果有限,大部分 B 从隔板顶端进入主塔,因此 a 点的过热量应该远大于 b 点。C 占优也导致了 a 点与塔釜的低温差,可直接作为有效热源被第一个 VRHP 利用。其次,塔顶蒸汽虽然与塔底温差较大,但是经过塔底产品流与第一个 VRHP 的高温冷凝液体预热后,也可作为一个有效热源。若只利用 a 点过热,则塔顶蒸汽会有剩余热量浪费;若只利用塔顶蒸汽,则塔底产品流的预热效果有限,塔顶蒸汽与塔釜过大的温差将不利于 VRHP 的应用,因此二者的结合无疑是最佳选择。VRHP 热量释放的最佳位置应该在塔釜,这是由重组分占优的进料特性决定的。通过上述分析,推导出 VRHP-DWCM 最佳的拓扑结构如图 2 所示。

2 VRHP-DWC 模拟实例

为了获得经济效益最好的 VRHP-DWC 拓扑结构,将包含操作成本(OC)和资本投资(CI)的年度总成本作为过程设计和优化的目标函数。目标函数 TAC 的优化通过单变量搜索方法完成^[10],操作成本、资本投资和年度总成本及其所包含具体参数的计算公式详见文献[11]。TAC 的计算如方程(1)所示,其中 β_{pbt} 为投资回收期,本文设定为 3 年。预热

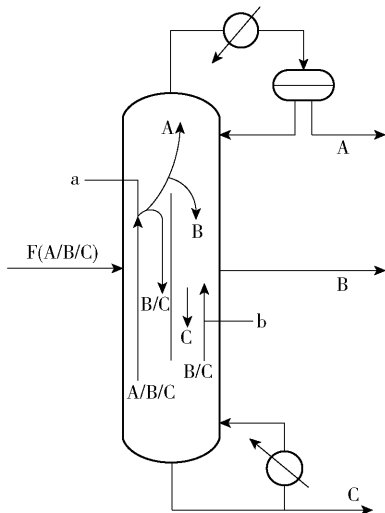


图 1 DWCM 分离重组分占优宽沸点三元物系

Fig. 1 View of the DWCM used for separating heavy-component dominated and wide-boiling point ternary mixtures

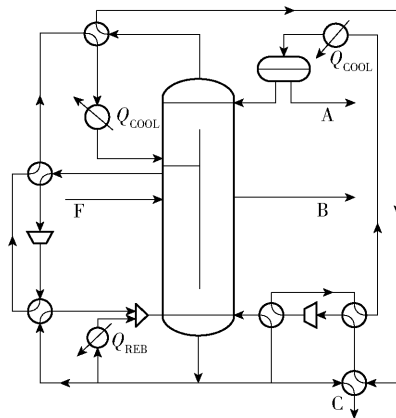


图 2 VRHP-DWCM 最佳拓扑结构

Fig. 2 Optimum topological configuration of VRHP-DWCM 器的冷出口温差设定为 5 K,换热器的温差驱动力设定为 10 K,由热泵轴功率保证。本节将主要以 DWCM 为例进行模拟,详细介绍其热泵强化结构的设计过程,并与隔板位于顶部的 DWC(DWCT)与隔板位于底部的 DWC(DWCB)进行比较,讨论隔板位置对所提热泵强化结构性能的影响。模拟所用两组物系分别为苯/甲苯/邻二甲苯(例一)与正戊烷/正己烷/正庚烷(例二),均符合宽沸点的进料特征。

$$C_{\text{TAC}} = C_{\text{OC}} + \frac{C_{\text{CI}}}{\beta_{\text{pbt}}} \quad (1)$$

2.1 VRHP-DWCM 分离苯/甲苯/邻二甲苯

2.1.1 操作条件

表 1 列出了工艺操作和产品规格的主要条件。进料流量为 1 000 kmol/h,其中苯、甲苯和邻二

甲苯摩尔分数分别设为 5%、5% 和 90%。苯、甲苯和邻二甲苯在标准大气压下的沸点分别为 353.30 K、385.30 K 和 417.55 K,相邻组分之间的沸点差超过 30 K,满足宽沸点要求。产品规格统一设定为 99.5% (摩尔分数)的纯度,在实际操作中可由不同的自由度控制。在塔结构的设计上,规定隔板两侧的塔板数量相同。电力、高压蒸汽(3 102.64 kPa, 510.15 K)和冷却水(303.15 K)的单位成本分别为 0.04 美元/(kW·h)、14.55 美元/t、0.066 美元/t。此外,设备运营时间为 8 150 h/a。汽-液平衡关系由 Peng-Robinson 热力学模型描述,整个过程模拟通过商业软件 Aspen Plus 进行。

表 1 操作条件和产品规格(例一)

Table 1 Operating conditions and product specifications (example I)		
参数	数值	
塔顶压力/kPa	101.325	
塔压降/kPa	0.689 01	
进料流量/(kmol·h ⁻¹)	1 000	
进料温度/K	408.733	
进料组分(摩尔分数)	苯	0.05
	甲苯	0.05
	邻二甲苯	0.9
产品规格(摩尔分数)	苯	0.995
	甲苯	0.995
	邻二甲苯	0.995

2.1.2 单热泵隔壁塔的设计

经目标函数优化后,DWCM 的结构如图 3 所示,其中 F 表示进料流股,D 表示轻组分产品流股,G 表示中间组分产品流股,B 表示重组分产品流股, Q_{CON} 与 Q_{REB} 分别表示冷凝器与再沸器的热负荷, β_L 与 β_V 分别表示隔壁塔的液相分离比与气相分离比。待分离混合物从预分离塔第 26 块板进料,中间产品从主塔第 23 块板采出。图 4(a)为 DWCM 的温度-塔板分布,其中 PRE 与 MDC 分别表示预分离塔与主塔。可以看出,DWCM 的公共提馏段以及 PRE 提馏段都具有较小的温度跨度,这是由重组分占优的进料特性导致的,而该特性也会导致产生大量的邻二甲苯过热蒸汽。图 4(b)为 DWCM 的塔板-焓值分布,可以看出 PRE 的第 16 块板到第 25 块板释放了相当的热量,这无疑是由大量邻二甲苯过热蒸汽放热引起的。从该塔段抽出过热蒸汽作为过程强化

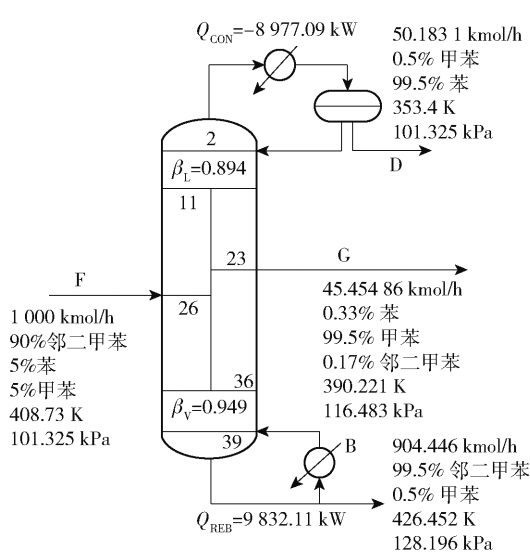


图 3 DWCM 结构(例一)

Fig. 3 Configuration of DWCM (example I)

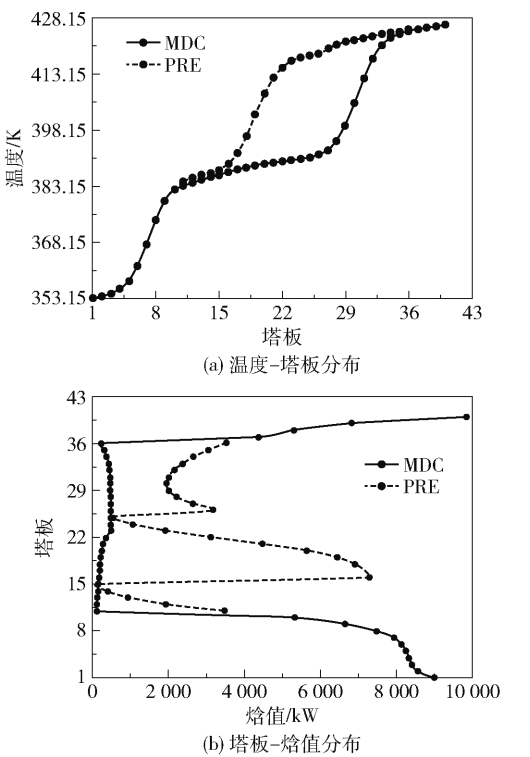


图 4 DWCM 温度-塔板分布与塔板-焓值分布(例一)

Fig. 4 Temperature-stage and stage-enthalpy distribution of DWCM (example I)

的第一启动热源,由此得到的单热泵隔壁塔(VRHP-DWCM-I)结构如图 5 所示,其中 $Q_{HE,PH}$ 表示预热器热负荷, $Q_{HE,IR}$ 表示换热器热负荷, Q_{COOL} 表示冷却器热负荷,CR 表示热泵压缩比。可以看出,与 DWCM 相比,虽然总塔板数增加了两块,但 VRHP-DWCM-I 的冷凝器和再沸器的热负荷分别

减少了4 291.65 kW和4 090.76 kW,系统能耗大幅降低。值得注意的是,过热蒸汽的抽出位置也可以用夹点理论来解释。从图 4(b)可以看出,PRE 第 25 块板对应了系统的夹点,而夹点的位置在很大程

度上决定了系统的性能。因此,从夹点下方且靠近夹点的位置抽出过热蒸汽,可以使得夹点在塔板-焓值图中的位置进一步左移,有助于 DWC 性能的提升。

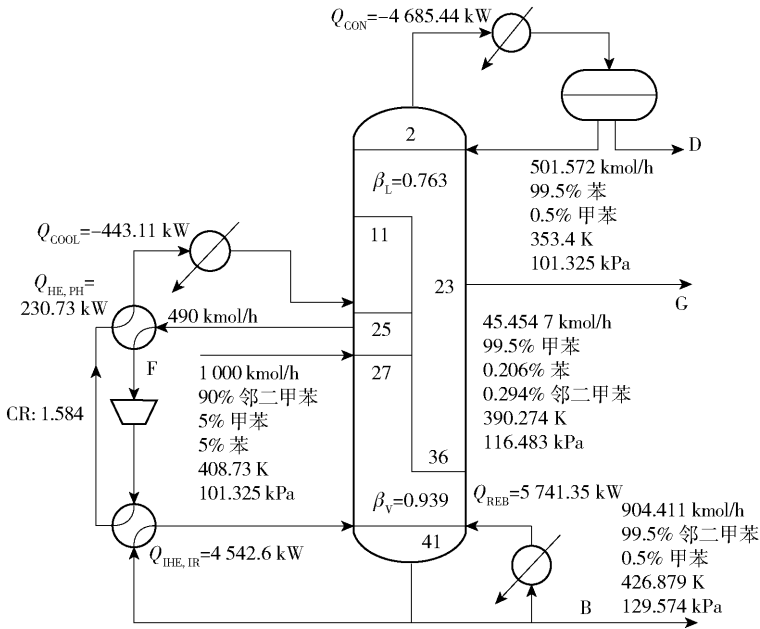


图 5 VRHP-DWCM-I 结构(例一)

Fig. 5 Configuration of VRHP-DWCM-I (example I)

2.1.3 双热泵隔壁塔的设计

第二个可用热源为塔顶蒸汽。为了克服由重组分绝对占优导致的塔顶与塔底之间的巨大温差,利用来自第一个 VRHP 的高温冷凝液体与塔底重组分产品流股对塔顶蒸汽进行预热,之后再用第二个 VRHP 进行压缩升温,不仅可使得第一个 VRHP 产生的热量得到更充分的利用,降低了第一个 VRHP 后的冷却器的能耗,而且使第二个 VRHP 的能耗也得到了有效降低。设计的双热泵隔壁塔(VRHP-DWCM-II)结构如图 6 所示,再沸器的热负荷减少了 8 201.23 kW,而冷凝器(气相到液相)被冷却器(液相到液相)取代,塔顶蒸汽所含潜热被完全利用,能耗进一步降低。

2.1.4 经济性评估

表 2 比较了 DWCM、VRHP-DWCM-I、VRHP-DWCM-II 的经济效益。可以发现,VRHP、预热器、换热器、冷却器等设备的添加虽然一定程度上增加了投资费用,但是热量的回收利用可以大大减少公用工程带来的操作成本。与 DWCM 相比,当 VRHP-DWCM-I 与 VRHP-DWCM-II 的 CI 分别增加了 38.56% 和 70.24% 时,相应的 OC 分别减少了

37.12% 和 74.91%,而这使得 VRHP-DWCM-I 与 VRHP-DWCM-II 的 TAC 分别降低了 7.04% 和 17.22%。这证明通过 VRHP 对塔内热量进行压缩再利用的过程强化方案是合理有效的,而 VRHP-DWCM-II 无论在节能性还是经济性上都具有最佳表现。

表 2 VRHP-DWCM 的经济评估(例一)

Table 2 Economic assessment of VRHP-DWCM (example I)

项目	数值		
	DWCM	VRHP-DWCM-I	VRHP-DWCM-II
资本投资/ (10 ³ 美元)	1 575.07 (100%)	2 182.53 (138.56%)	2 681.47 (170.24%)
操作成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	2 388.25 (100%)	1 501.75 (62.88%)	599.26 (25.09%)
年度总成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	3 963.3 (100%)	3 684.28 (92.96%)	3 280.73 (82.78%)

括号内数字为以 DWCM 为基准,3 种结构相应费用的百分比比较。

2.2 VRHP-DWCM 分离正戊烷/正己烷/正庚烷

2.2.1 操作条件

表 3 列出了例二的工艺操作设计和产品规格的主要条件。进料流量为 1 000 kmol/h,其中正戊烷、

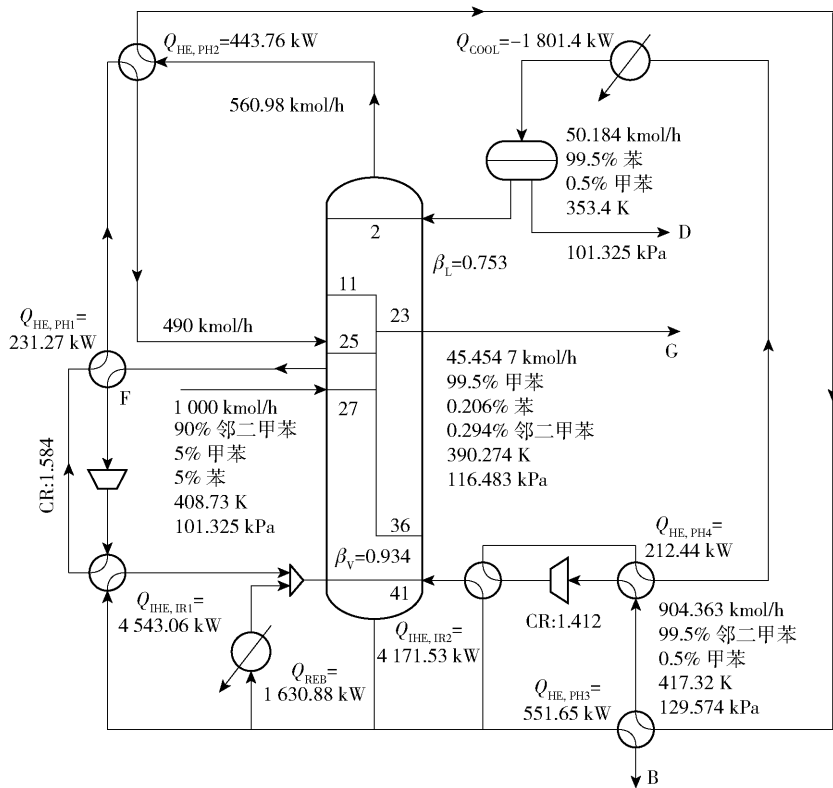


图 6 VRHP-DWCM-II 结构(例一)

Fig. 6 Configuration of VRHP-DWCM-II(example I)

表 3 操作条件和产品规格(例二)

Table 3 Operating conditions and product specifications (example II)

参数	数值
塔顶压力/kPa	101.325
塔压降/kPa	0.689 01
进料流量/(kmol·h ⁻¹)	1 000
进料温度/K	366.401
进料组分(摩尔分数)	正戊烷 0.05 正己烷 0.05 正庚烷 0.9
产品规格(摩尔分数)	正戊烷 0.995 正己烷 0.995 正庚烷 0.995

正己烷和正庚烷的摩尔分数同样分别设为 5%、5% 和 90%。在一个标准大气压下 3 种物质的沸点分别为 309.7、342.16、371.60 K,基本满足宽沸点物系的条件。在整个设计过程中,产品规格保持为 99.5% (摩尔分数),并使隔板两侧的塔板数量相同。电力、低压蒸汽(344.74 kPa,420.15 K)和冷却水(278.15 K)的单位成本分别为 0.04 美元/(kW·h)、6.61 美元/t 和 4.43 美元/GJ,运营时间同样为 8 150 h/a。用 Soave-Redlich-Kwong 热力学模型描

述汽-液平衡关系,采用商业软件 Aspen Plus 进行过程模拟。

2.2.2 单热泵隔壁塔与双热泵隔壁塔的设计

同样采用例一的思路:首先,将重组分正庚烷的过热蒸汽作为过程强化的第一启动热源,用一个 VRHP 将其压缩升温后释放至塔底再沸器;然后用来自第一个 VRHP 的高温冷凝液体与塔底重组分产品流股对塔顶蒸汽进行预热,再用第二个 VRHP 将其潜在热量释放至塔底再沸器。与例一不同的是,例二中烷烃物系更低的沸点导致其需要更低温度、更高价格的冷却水,进而使得塔顶冷却器带来的操作成本超出预期。因此,引入两个额外的中间换热器作为塔顶蒸汽的第一步预热,来自第一个 VRHP 的高温冷凝液体和塔底重组分产品流股则分别用于预热的第二步和第三步。这样不仅可以减小经第二个 VRHP 后的高温冷凝液体与塔顶蒸汽之间的温差,进而大大降低冷却器的操作成本,还能使第二个 VRHP 产生的热量得到多级利用,可观地提高热效益。根据以上分析,例二的 DWCM、VRHP-DWCM-I、VRHP-DWCM-II 最佳结构分别如图 7~9 所示。

可以看出,与 DWCM 相比,VRHP-DWCM-I 冷

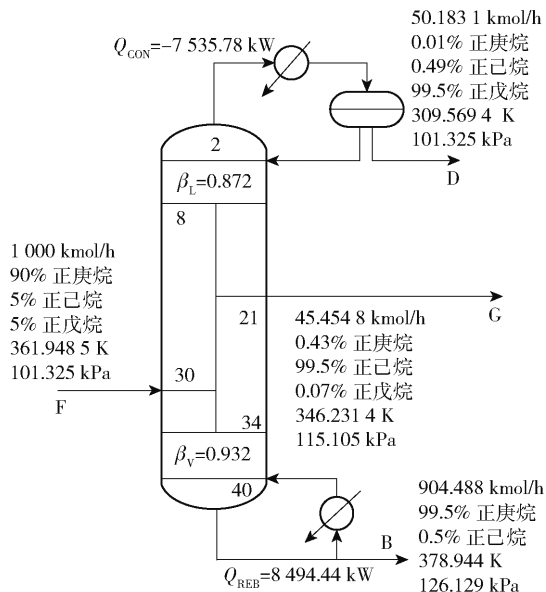


图7 DWCM 结构(例二)

Fig. 7 Configuration of DWCM (example II)

凝器与再沸器的热负荷分别降低了 2 441.99 kW 和 2 326.6 kW,而 VRHP-DWCM-II 的总塔板数虽然比初始结构增加了 1 块,但再沸器的热负荷降低了 6 545.44 kW,冷凝器同样被一个冷却器取代,能耗得到大幅降低。

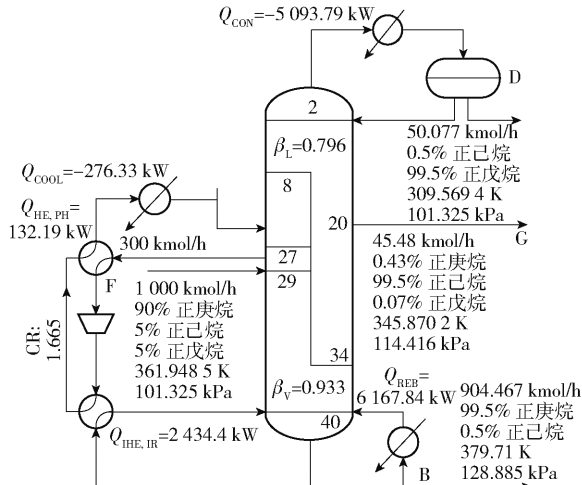


图8 VRHP-DWCM-I 结构(例二)

Fig. 8 Configuration of VRHP-DWCM-I (example II)

2.2.3 经济性评估

表 4 比较了例二中 DWCM、VRHP-DWCM-I、VRHP-DWCM-II 的经济效益。与例一相同,虽然随着过程强化的逐步进行,投资费用会有一定程度的增加,但是操作成本的降低显然带来了更大的收益。相较于 DWCM,VRHP-DWCM-I 与 VRHP-DWCM-II 的 TAC 分别降低了 2.16% 和 7.11%,再次证明 VRHP-DWCM-II 无论是在节能性还是经济

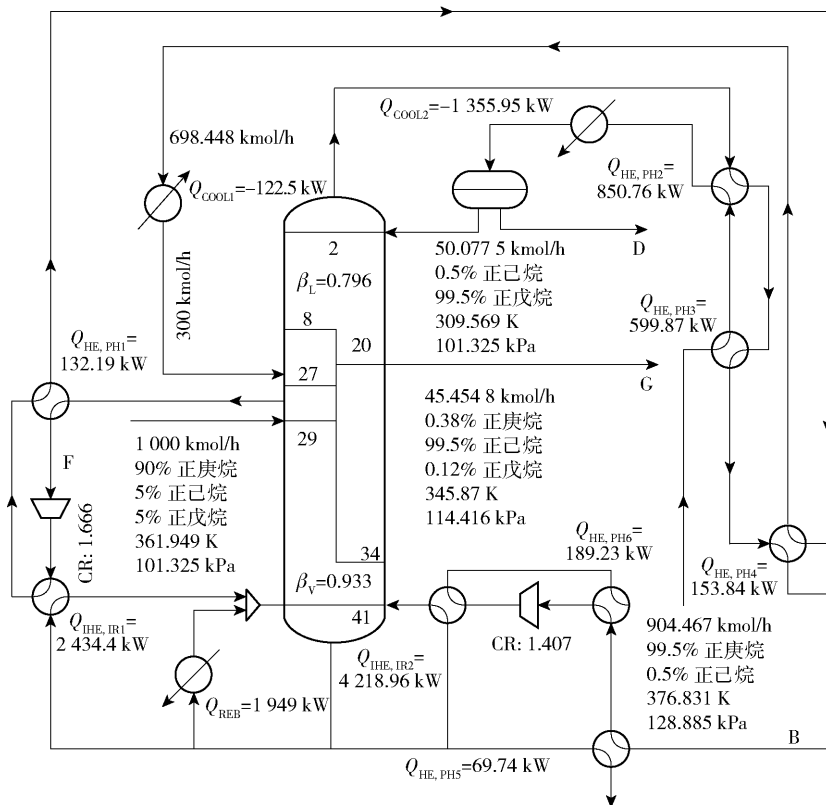


图9 VRHP-DWCM-II 结构(例二)

Fig. 9 Configuration of VRHP-DWCM-II (example II)

Table 4 Economic assessment of VRHP–DWCM (example II)

项目	数值		
	DWCM	VRHP-DWCM-I	VRHP-DWCM-II
资本投资/ (10 ³ 美元)	1 776.42 (100%)	2 129.64 (119.88%)	2 742.27 (154.37%)
操作成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	1 755.92 (100%)	1 326.34 (75.53%)	538.91 (30.69%)
年度总成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	3 532.34 (100%)	3 456 (97.84%)	3 281.18 (92.89%)

性上都具有最佳表现。值得注意的是,例二中VRHP-DWCM的经济效益远不如例一明显,这无疑与被分离物系的具体性质密切相关。

2.3.1 VRHP-DWCM 与 VRHP-DWCT

以苯/甲苯/邻二甲苯的分离为例,按照 VRHP-DWCM 的设计过程,可以依次得到 VRHP-DWCT-I 和 VRHP-DWCT-II 的最佳结构,如图 10、11 所示。提取过热蒸汽的位置变为隔板右侧而不是进料上方塔段,这显然与不同隔板位置的特性有关。塔顶蒸

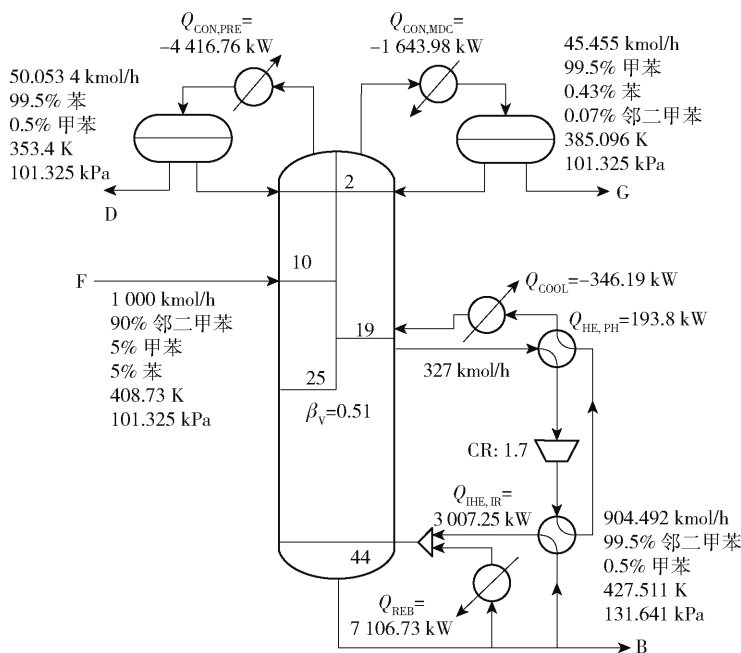


Fig. 10 Configuration of VRHP-DWCT-I

VRHP-DWCT 的经济评估见表 5。与例一中 IP-DWCM 的表现相比可以看出,虽然 VRHP-DWCT 仍然是以一定程度的投资增加来减少操作成本,使 TAC 呈下降趋势,但是下降幅度却远不如 IP-DWCM。尽管如此,VRHP-DWCT-II 仍然是 VRHP-DWCT 的最佳拓扑结构,具有最优的能耗与经济效益。

Table 5 Economic assessment of VRHP–DWCT

项目	数值		
	DWCT	VRHP-DWCT-I	VRHP-DWCT-II
资本投资/ (10 ³ 美元)	1 714.07 (100%)	2 211.55 (129.02%)	2 707.48 (157.96%)
操作成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	2 441.26 (100%)	1 808.65 (74.08%)	961.5 (39.39%)
年度总成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	4 155.3 (100%)	4 020.2 (96.75%)	3 668.97 (88.3%)

DWCB-I和VRHP-DWCB-II的最佳结构,如图12、13所示。可以看出,VRHP-DWCB两个VRHP的

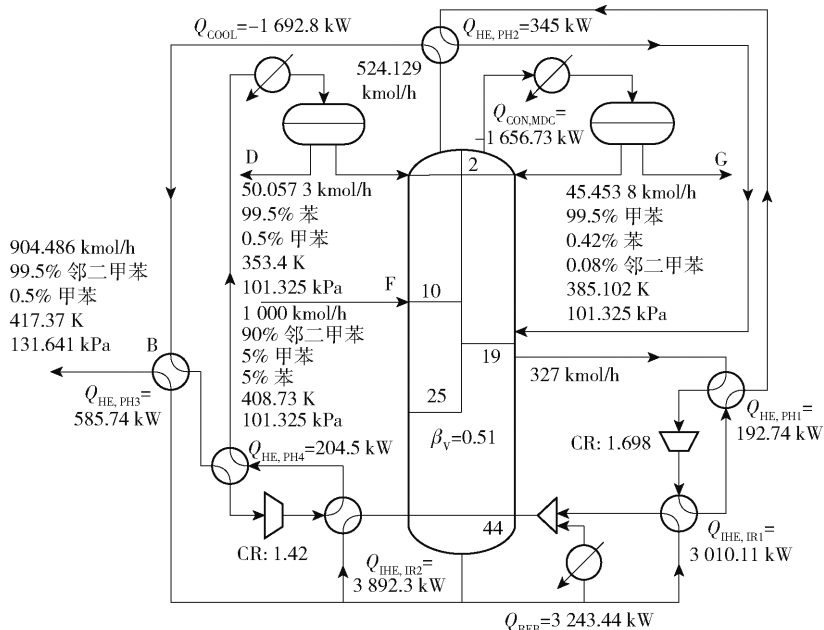


图 11 VRHP-DWCT-II 结构

Fig. 11 Configuration of VRHP-DWCT-II

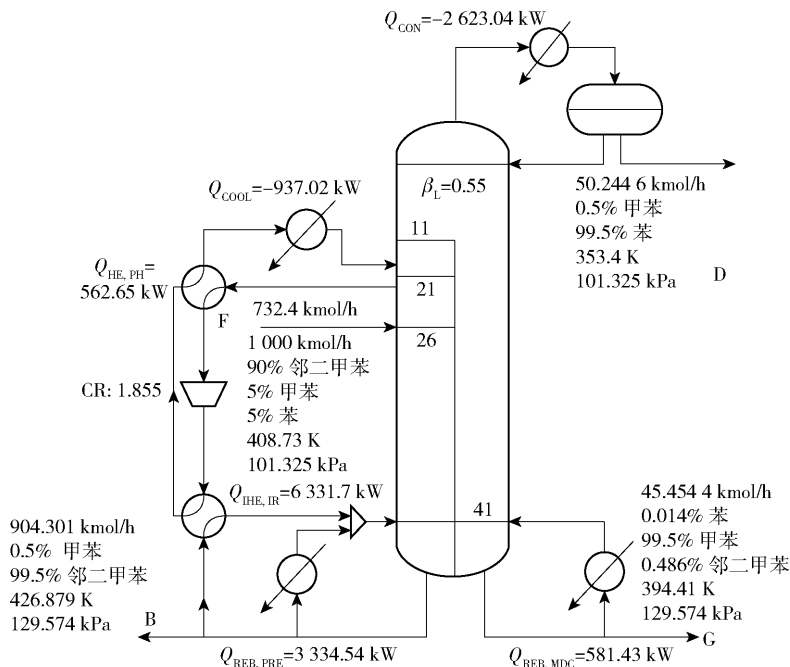


图 12 VRHP-DWCB-I 结构

Fig. 12 Configuration of VRHP-DWCB-I

热量都释放至预分离塔提馏段,这也是由隔板位置特性决定的。

表 6 为 VRHP-DWCB 的经济评估结果。可以看出,VRHP-DWCB-II 仍然显示出最佳的经济效益。与例一中 VRHP-DWCM 的表现相比表明,VRHP-DWCB-II 的 TAC 降幅略低于 VRHP-

DWCM-II。但值得注意的是,由于 VRHP-DWCB 少一个自由变量(气相分离比),因此在模拟过程中具有更好的稳态收敛特性。

3 结论

(1)对于重组分占优的宽沸点三元混合物在隔

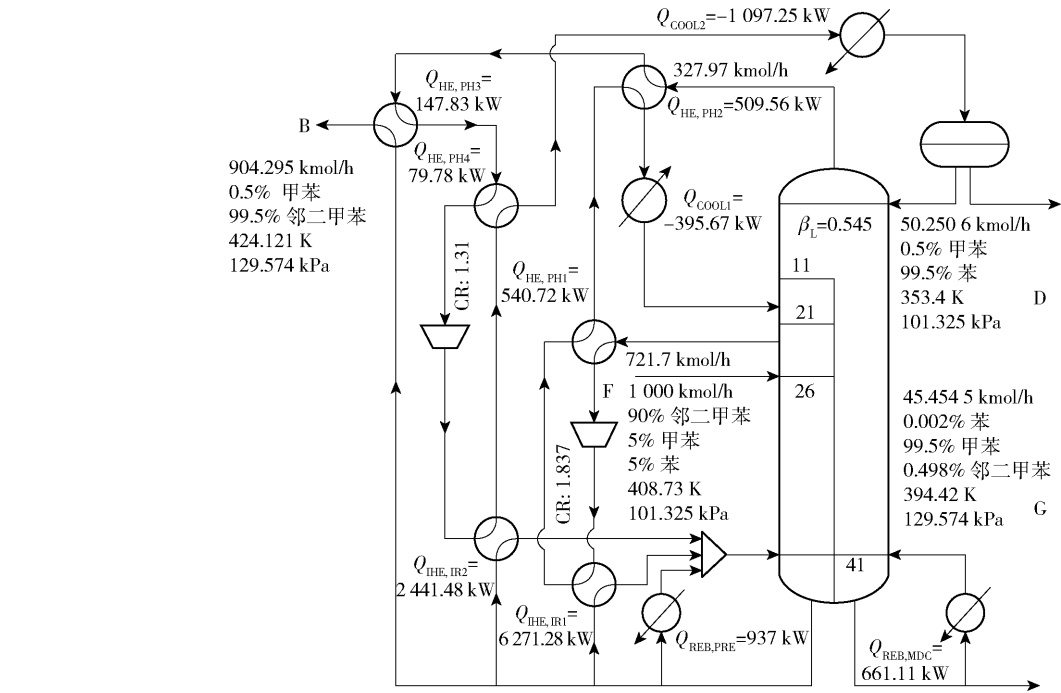


图 13 VRHP-DWCB-II 结构

Fig. 13 Configuration of VRHP-DWCB-II

表 6 VRHP-DWCB 经济评估

Table 6 Economic assessment of VRHP-DWCB

项目	数值		
	DWCB	VRHP-DWCB-I	VRHP-DWCB-II
资本投资/ (10 ³ 美元)	1 570. 89 (100%)	2 413. 58 (153. 64%)	2 686. 8 (171. 03%)
操作成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	2 309. 5 (100%)	1 165. 77 (50. 48%)	639. 9 (27. 7%)
年度总成本/ (10 ³ 美元·a ⁻¹)	3 880. 4 (100%)	3 579. 35 (92. 24%)	3 326. 7 (85. 73%)

括号内数字为以 DWCB 为基准,3 种结构相应费用的百分比比较。

壁塔中的分离,其进料特性导致产生了公共提馏段/预分离塔提馏段的低温度跨度和含有大量重组分的过热蒸汽,并因此决定了 VRHP-DWC 的最佳拓扑结构设计。无论隔板位于何处,第一个 VRHP 都用于压缩该过热蒸汽,第二个 VRHP 则用于充分利用塔顶蒸汽的剩余热量。

(2) 苯/甲苯/邻二甲苯以及正戊烷/正己烷/正庚烷的分离模拟结果表明,待分离混合物的具体物性(沸点、相对挥发度)和隔板的位置都对 VRHP-DWC 的经济性能有一定的影响。随着热泵的逐个添加,经济效益逐渐提升的总体趋势没有改变,这表明重组分占优的进料特性对 VRHP-DWC 最佳拓扑结构的确立起着决定性的作用。

(3) VRHP-DWCM 与 VRHP-DWCB 在经济效益与稳态特性上各有优劣,在实际生产过程中应该根据待处理混合物的具体性质以及主要的生产目标进行合理选择。

参考文献:

[1] TARJANI A J, TOTTH A J, NAGY T, et al. Thermodynamic and exergy analysis of energy-integrated distillation technologies focusing on dividing-wall columns with upper and lower partitions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(10): 3678–3684.

[2] ASPRION N, KAIBEL G. Dividing wall columns: fundamentals and recent advances[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(2): 139–146.

[3] JANA A K. Vertical partition in fractionating tower to configure a novel heat integrated distillation hybridized with vapor recompression[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 235: 116153.

[4] PATRAȘCU I, BILDEA C S, KISS A A. Eco-efficient downstream processing of biobutanol by enhanced process intensification and integration [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(4): 5452–5461.

[5] NAVARRO-AMORÓS M A, RUIZ-FEMENIA R, CABALLERO J A. A new technique for recovering energy in thermally coupled distillation using vapor recompression

- cycles[J]. *AIChE Journal*, 2013, 59(10): 3767 – 3781.
- [6] 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.
- [7] LUO H, BILDEA C S, KISS A A. Novel heat pump-assisted extractive distillation for bioethanol purification[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(7): 2208 – 2213.
- [8] GHALAVAND Y, NIKKHAH H, NIKKHAH A. Heat pump assisted divided wall column for ethanol azeotropic purification[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 123: 206 – 218.
- [9] CHEN H, CONG H F, HE L, et al. A novel two-parts heat integrated dividing wall column with middle vapor recompression[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 262: 118302.
- [10] SHI L, HUANG K J, WANG S J, et al. Application of vapor recompression to heterogeneous azeotropic dividing-wall distillation columns[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(46): 11592 – 11609.
- [11] YU J P, WANG S J, HUANG K J, et al. Improving the performance of extractive dividing-wall columns with intermediate heating[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(10): 2709 – 2723.

Optimum topological configuration for a vapor recompressed dividing wall column with a predominance of heavy-components

LUO YiHang HUANG KeJin *

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In the separation of ternary mixtures with a predominance of heavy-components and a wide-boiling point range using a dividing-wall distillation column (DWC), a certain amount of excess heat always exists during the stripping of the heavy-component from the intermediate- and light-components. This can be employed to develop a vapor recompression heat pump (VRHP)-assisted DWC (VRHP-DWC). In the light of the steady-state operating characteristics of the DWC, the optimum topological configuration of the VRHP-DWC is found to involve two VRHPs. One compresses the excess heat and releases its latent heat to the reboiler or the reboiler of the pre-fractionator. The other compresses the overhead vapor stream pre-heated with the condensed liquid from the first VRHP and the bottom product stream and releases its latent heat to the reboiler or the reboiler of the pre-fractionator. The separations of ternary mixtures of benzene, toluene, and o-xylene and of n-pentane, n-hexane, and n-heptane are examined to determine the optimum economic performance. The results showed that for a DWC with a middle partition (DWCM), the total annual cost for the two ternary mixtures decreased by 17.2% and 7.1%, respectively. The TAC also decreased to varying degrees when the partition was at the top (DWCT) or bottom (DWCB). The origins of the differences between VRHP-DWCs with a dividing-wall in different positions are discussed. Predetermination of the optimum topological configuration of the VRHP-DWC can considerably lower the complications and tediousness involved in process development, which is of great significance in terms of application of this process intensification technology.

Key words: dividing-wall distillation column; heavy-component dominance; wide-boiling point; vapor recompression heat pump; process synthesis; process design

(责任编辑:吴万玲)