

隔壁精馏塔分离乙二醇丁醚混合物的模拟与节能分析

侯 瞬¹, 林子昕¹, 安维中^{1*}, 黄连喜¹, 别海燕¹, 朱建民²

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 辽宁奥克化学集团, 辽宁 辽阳 111003)

摘要:针对乙二醇丁醚混合物的特征和分离要求, 提出用隔壁精馏塔(DWC)分离混合物的工艺, 并利用 Aspen Plus 模拟技术开展塔的优化设计与节能分析。首先设计出分离混合物的传统双塔工艺, 在此基础上对 DWC 进行设计与优化。为了考察 DWC 工艺的可行性和节能效果, 研究采用能量衡算和烟损失分析 2 种方法对系统的用能特性进行分析。结果表明, 相比于传统双塔工艺, DWC 的再沸器负荷、冷凝器负荷分别减少了 27.4%、32.4%, 总烟损失减少了 33.7%, 体现了 DWC 工艺的节能优势。

关键词:隔壁塔; 乙二醇丁醚; 烟损失; 节能

中图分类号:TQ028.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)08-0231-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.08.049

Simulation and energy saving analysis on separation of ethylene glycol monobutyl ether mixture via dividing wall distillation

HOU Shun¹, LIN Zi-xin¹, AN Wei-zhong^{1*}, HUANG Lian-xi¹, BIE Hai-yan¹, ZHU Jian-min²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Liaoning Oxiranchem Group, Liaoyang 111003, China)

Abstract: A new technology using a dividing wall column (DWC) to separate ethylene glycol monobutyl ether mixture is proposed by taking into account the characteristics of the separation system under study. The design of DWC and the analysis of energy saving superiority is performed by means of computer simulations on Aspen Plus software platform. Firstly, a conventional two-column distillation flowsheet is proposed and designed to provide a basis for the design of DWC. The simulation, design and optimization of DWC is then carried out. In order to investigate the feasibility and energy saving superiority of the suggested DWC process, two approaches based on energy balance analysis and exergy loss analysis are employed to analyze the energy consumption characteristics of the system. The obtained results demonstrate that compared with the conventional two-column distillation process, total reboiler duty, total condenser duty and total exergy loss of DWC process reduce by 27.4%, 32.4% and 33.7%, respectively, indicating an obvious energy saving advantage.

Key words: dividing wall column; ethylene glycol monobutyl ether; exergy loss; energy saving

精馏是工业领域应用最广泛的分离技术, 具有易于大规模生产、技术成熟可靠等优点, 但也存在设备投资大、分离能耗高的问题。所以精馏节能技术一直是研究的热点问题之一^[1-3]。在众多的精馏节能技术中, 基于热耦合概念和原理的隔壁精馏塔(DWC)成为近年来研究和开发的重点^[4]。

DWC 是一种与完全热耦合精馏塔拥有等效热力学意义但设备费用更低的塔设备^[5]。原理是在普通精馏塔内设置一块竖直绝热隔板, 将其分为公共精馏段、公共提馏段、预分馏段和侧线精馏段 4 个部分, 从而在单个塔体内实现 3 种组分的分离^[6]。研究表明, DWC 具有节约能源和节省投资的双重优势, 与传统双塔流程相比, 隔壁精馏塔可节省约 30% 的能耗和设备投资, 同时还可节约安装空间^[7-9]。需要说明, 隔壁塔虽然在节能降耗和提高

热力学效率上表现出巨大的潜力, 但并不是所有分离体系都适合采用该技术。研究和工业应用表明^[10-11], 适宜采用 DWC 技术的要求是: ①待分离混合物中轻重组分含量相当, 中间组分的质量分数需超过 20%, 且在 66% 左右最佳; ②轻组分对中间组分的相对挥发度和中间组分对重组分的相对挥发度相差不大; ③对中间组分的分离纯度要求较高; ④整个分离过程的操作压力需要保持恒定。目前, 国内外关于隔壁塔的研究和应用主要集中在烃类、醇类、醛类、酮类、酯类混合物的分离中, 并且已经成功实现工业化^[12-15]。

本研究将 DWC 技术应用于一种新的分离体系——辽宁奥克化学集团乙氧基化工厂乙二醇丁醚混合物的分离。本文中研究的目的是建立 DWC 的优化设计方法并考察节能效果, 为该技术的工业化应

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-04-25

作者简介: 侯瞬(1995-), 女, 硕士生; 安维中(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为过程系统工程, 通讯联系人, awzhong@ouc.edu.cn。

用奠定理论基础并提供模型支持。

1 待分离混合物特征与传统分离流程

1.1 待分离混合物条件与分离要求

本文中待分离混合物是正丁醇(N-butanol)和环氧乙烷反应的混合物,包括未转化的正丁醇和反应生成的乙二醇单丁醚(EGMBE)、乙二醇单丁醚(DEGMBE)和三乙二醇单丁醚(TEGMBE)。表 1 为待分离乙二醇醚混合物的原料条件和分离要求,其中 N、E、D、T 分别代表正丁醇、乙二醇单丁醚、二乙二醇单丁醚、三乙二醇单丁醚。

表 1 待分离混合物条件及分离要求

进料条件及分离要求	数值
进料流量/(kg·h ⁻¹)	3230.0
进料温度/℃	150.0
进料压力/MPa	0.12
进料组成(N/E/D/T)	[0.174, 0.696, 0.119, 0.011]
沸点/℃(N/E/D/T)	[117.6, 171.0, 231.0, 272.0]
相对挥发度(N/E/D/T)	[6.05, 1.00, 0.17, 0.03]
分离要求	
产品纯度(N/E)/%	[100.0, 99.8]
回收率(N/E)/%	[100.0, 99.7]

从表 1 可以看出,待分离混合物具有的主要特征是:①中间组分 EGMBE 的含量多,接近 70%,且轻重组分含量相当;②4 种组分之间沸点差较大,N-butanol 和 EGMBE 的相对挥发度为 6.1,EGMBE 和 DEGMBE 的相对挥发度为 5.9,两者相差不大;③体系内无共沸物形成。从 DWC 的适宜性分析,本文中待分离混合物适宜用 DWC 工艺进行分离。

1.2 传统双塔分离流程模拟设计

依据乙二醇丁醚混合物的条件,可采用传统的直接顺序精馏来实现混合物的分离要求。具体方法是:①首先利用 Aspen Plus 软件中 DSTWU 模块建立分离流程,进行简捷设计;②物性模型选择 UNIFAC,精馏塔常压操作,计算模型采用平衡级模型;③把简捷设计的模拟结果作为以 RadFrac 模块进行严格模拟的初值,流程模拟如图 1 所示;④对该流程的优化,采用灵敏度分析,以回流比为目标优化操作条件,以产品质量为约束条件进行。图 1 给出了优化的操作参数和模拟结果。需要说明,该工艺的冷却介质和加热介质分别采用 30℃ 的循环水和 250℃ 的水蒸汽。基于此公用工程条件,分离乙二醇丁醚混合物的传统双塔流程很难进行塔间热集成,故采用隔壁塔工艺进行节能分析。

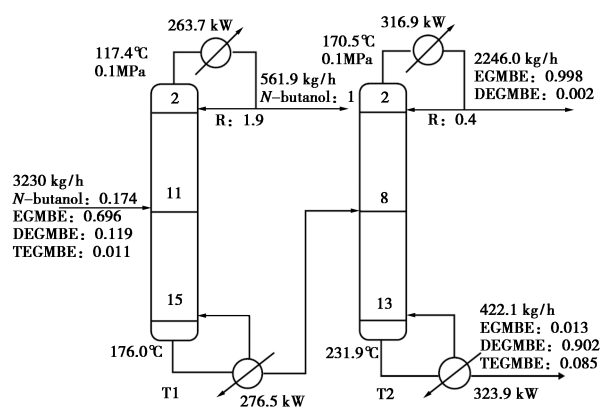


图 1 传统分离流程及设计参数

2 隔壁塔分离混合物的工艺及模拟设计

2.1 隔壁塔分离混合物的流程

从 DWC 的适用性分析,本文中待分离混合物适宜用 DWC 技术进行分离。图 2 为分离乙二醇丁醚混合物的 DWC 构型,其中轻组分 N-butanol 从塔的顶部采出,中间组分 EGMBE 为含量最多的组分,从 DWC 的侧线精馏段采出,DWC 塔釜产品包括少量 EGMBE 和全部 DEGMBE、TEGMBE(塔釜采出少量 EGMBE 的原因是降低塔釜温度,使其满足加热介质的温度条件)。

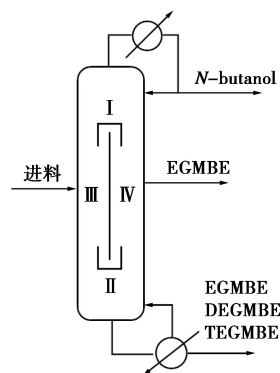


图 2 分离乙二醇丁醚混合物的隔壁塔示意图

2.2 隔壁塔模拟设计方法和结果

目前有大量关于 DWC 模拟设计的文献报道^[16-18],本研究主要采用文献[16]提出的方法。具体是:①采用与 DWC 具有等效热力学意义的 Petlyuk 塔进行模拟设计,如图 3 所示。②以图 1 的双塔精馏流程为基础设计 Petlyuk 塔,即后者的关键设计参数和分离要求和前者相同,并按文献[16]的方法进行模拟设计。③以回流比最小为目标,以表 1 中的分离要求为限定条件,通过灵敏度分析方法得到塔优化的设计参数。由以上方法设计得到的

DWC 模拟结果见图 4, 其中 R 代表回流比, R_L 代表液相分配比, R_V 代表气相分配比。

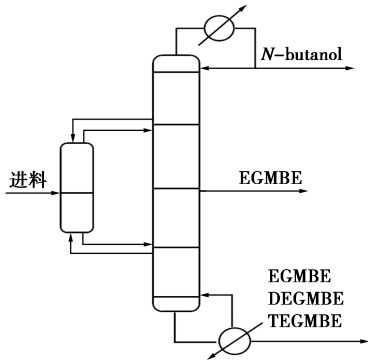


图 3 分离乙二醇丁醚混合物的 Petlyuk 塔示意图

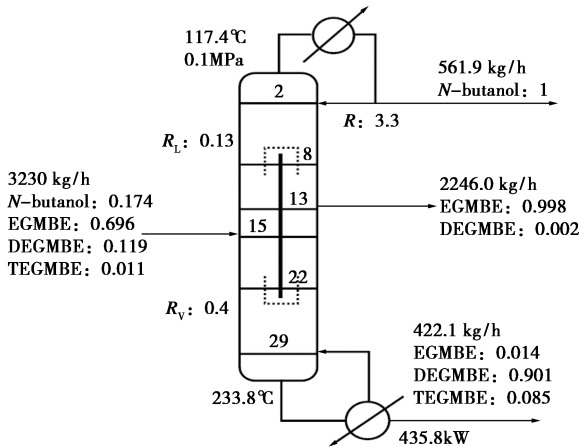


图 4 隔壁塔分离流程及设计参数

3 隔壁塔分离混合物的节能效果分析

3.1 分析方法

DWC 应用于一个新的分离体系是否可行还需考察其经济性。前期的研究表明, 相对于传统的双塔精馏流程, DWC 在设备投资费用方面具有明显优势, 所以本文中仅从能量方面进行比较分析。为了全面比较和深层次分析 DWC 的节能效果, 本研究采用热力学第一定律和第二定律相结合的分析方法, 其中前者用于分析比较 DWC 和传统双塔的总用能数量(冷凝器负荷和再沸器负荷), 后者用于比较 2 种工艺的焓损失大小。方法实施时, 将焓损失分为塔板(分离)焓损失和换热器焓损失 2 部分考虑, 其中塔板上的焓损失通过 Aspen 模拟软件计算, 冷凝器和再沸器的焓损失计算方法如式(1)和式(2)^[19]。其中冷却介质选择循环水, 进口温度取 30℃, 出口温度取 40℃。

冷凝器的焓损失计算:

$$Ex_{\text{loss,cond}} = m_{\text{cool}}(Ex_{\text{cool,in}} - Ex_{\text{cool,out}}) + L_2(Ex_1^V - Ex_2^L) \quad (1)$$

再沸器的焓损失计算:

$$Ex_{\text{loss,reb}} = V_n(Ex_{n-1}^L - Ex_n^V) + Q_{\text{reb}}(1 - T_0/T_{\text{reb}}) \quad (2)$$

式中, Ex 代表焓, kW; cond 代表冷凝器; reb 代表再沸器; cool 代表冷却剂; L 代表液相流量, kg/h; V 代表气相流量, kg/h; m 代表质量流量, kg/h; Q 代表热负荷, kW; T 为温度, K; n 代表塔板数, 0 指环境状态。

3.2 传统双塔流程与隔壁塔的能耗比较

3.2.1 总用能比较

表 2 给出了 DWC 和传统双塔精馏流程冷凝器和再沸器的计算结果。从结果看出, DWC 的再沸器、冷凝器负荷比传统双塔流程分别降低了 177.2、187.4 kW, 降低比例分别为 27.4%、29.2%, 此表明 DWC 在热力学第一定律方面具有明显的节能优越性。

表 2 隔壁塔与传统双塔流程换热器负荷比较

热负荷/ kW	DWC	传统双塔流程		节能效果/ %
		T1	T2	
再沸器	435.8	276.5	323.9	27.4
冷凝器	-392.7	-263.7	-316.9	32.4

3.2.2 焓损失比较

运用建立的焓损失计算方法, 首先对 DWC 和传统双塔精馏流程的总塔板焓损失(分离焓损失)、冷凝器总焓损失和再沸器总焓损失进行比较, 结果见表 3。

表 3 2 种不同工艺的焓损失比较

焓损失	隔壁塔	传统双塔
冷凝器焓损失	80.3	148.0
再沸器焓损失	9.3	34.7
塔板焓损失	54.0	34.0
总焓损失	143.6	216.7

由表 3 可知: ①DWC 冷凝器焓损失小于传统双塔冷凝器的总焓损失(减小 45.7%), 其原因可归结为双塔流程中 T2 塔的冷凝器存在更大的传热温差。在双塔精馏流中, T2 塔顶气相物料的温度为 170.5℃, 与冷却介质传热温差过大是导致焓损失的主要原因, 而 DWC 塔顶气相物料的温度为 117.0℃, 传热温差相对小, 传热焓损失相应更小。②DWC 再沸器焓损失小于传统双塔再沸器的总焓损失(减小 73.2%), 与冷凝器情况相同, 其原因也归结为双塔流程中 T1 再沸器传热温差更大。③DWC 塔板总的焓损失比双塔流程更大(增加 37.0%), 其原因在于 DWC 两端的传热温差更大, 组分浓度变化更大, 即传热和传质引起的不可逆性更大。④在系统总焓损失中, 换热器的焓损失占据

了很大比例,其中 DWC 换热器的总焓损失占系统总焓损失的 62.4%,双塔精馏流程总换热器的总焓损失占系统总焓损失的 84.3%。⑤从系统总的焓损失看(塔板总焓损失+换热器总的焓损失),DWC 总的焓损失更小,比传统双塔流程减小了 33.7%,这是因为 DWC 减少了一个再沸器和冷凝器。综上可认为,由于换热器总的焓损失占了系统总焓损失的一半以上,所以因减少冷凝器和再沸器数量,进而减少过程不可逆性是 DWC 节能的核心所在。

4 结论

提出应用隔壁精馏塔分离乙二醇单丁醚混合物的新工艺,建立了传统双塔工艺和 DWC 工艺的模拟设计方法,并进行了节能分析,结果如下。

(1)与传统直接分离流程相比,DWC 的再沸器负荷减少 27.4%,冷凝器负荷减少 32.4%,再沸器焓损失降低 73.2%,冷凝器焓损失降低 45.7%,塔板焓损失增加 37.0%,但总焓损失降低 33.7%,表明 DWC 在热力学第一定律和第二定律方面均具有节能优势。

(2)系统中换热器总的焓损失占了总焓损失的一半以上,DWC 节能的核心原因在于减少了冷凝器和再沸器数量。

(3)采用 DWC 分离乙二醇丁醚混合物是可行的,具有技术经济优越性,研究建立的方法和取得的结果将为 DWC 技术产业化奠定重要理论和模型基础。

参考文献

- [1] Engelen H K, Larsson T, Skogestad S. Implementation of optimal operation for heat integrated distillation columns [J]. Trans IChemE, 2003, 81(A): 277-281.
- [2] Kim Y H. Rigorous design of fully thermally coupled distillation column [J]. Chemical Engineering of Japan, 2001, 34(2): 236-243.

(上接第 230 页)

双效和三效精馏分别比普通精馏减少 47.2% 和 50.9% 的投资费用。

(3)综合考虑,质量分数为 15% DAMC 废水不能采用四效精馏;质量分数为 5% 的 DMAC 废水的回收,三效和四效差别很小,相差仅有 2.5% 左右,所以质量分数为 5%~15% 的 DMAC 膜工业废水的回收工艺,采用减压逆流三效精馏为最优方案。

参考文献

- [1] 高维平,杨莹,张吉波,等.化工精馏高效节能技术开发及应用[J].吉林化工学院学报,2008,25(3):1-5.

- [3] 李虎,张于峰,李鑫钢,等.低温发电系统在精馏工艺中的节能技术[J].化工进展,2013,32(5):1187-1193.
- [4] 任海伦,安登超,朱桃月,等.精馏技术研究进展与工业应用[J].化工进展,2016,35(6):1606-1626.
- [5] Suphanita B, Bischerth A, Narataruksa P. Exergy loss analysis of heat transfer across the wall of the dividing-wall distillation column [J]. Energy, 2007, 32(4): 2121-2134.
- [6] Dejanovic I, Matijasevic L. Dividing wall column: A breakthrough towards sustainable distilling [J]. Chemical Engineering and Processing, 2010, 49(6): 550-580.
- [7] Halvorsen I J, Dejanovic I, Skogestad S, et al. Internal configurations for a multiproduct dividing wall column [J]. Chem Eng Res Des, 2013, 91(10): 1954-1965.
- [8] Triantafyllou C, Smith R. The design and optimisation of fully thermally-coupled distillation columns [J]. Trans IChemE, 1992, 70(A): 118-132.
- [9] Lestak F, Collins C. Advanced distillation saves energy and capital [J]. Chem Eng, 1997, 104(7): 72-76.
- [10] 孙兰义,李军,李青松.隔壁塔技术进展[J].现代化工,2008,28(9):38-41,43.
- [11] Michael A, Schultz M, Stewart D. Reduce costs with dividing wall columns [J]. Chemical Engineering Progress, 2002, 98(5): 64-71.
- [12] Fang Jing, Zhao Hanmei, Qi Jianchao, et al. Energy conserving effects of dividing wall column [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(6): 934-940.
- [13] 杨兵兵,李扬,范赢,等.隔壁塔分离乙醇-正丙醇-正丁醇体系[J].现代化工,2018,38(8):217-220,222.
- [14] 吴卫忠,杜雷,薛青青.节能型隔壁精馏塔分离烷烃混合物[J].化工进展,2014,33(S1):94-97.
- [15] Le M, Nguyen L, Moonyong L. Energy efficiency improvement of dimethyl ether purification process by utilizing dividing wall columns [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(11): 1500-1507.
- [16] 龚超,余爱平,罗祎青,等.完全能量耦合精馏塔的设计、模拟与优化[J].化工学报,2012,63(1):177-184.
- [17] 黄国强,靳权.隔壁精馏塔的设计、模拟与优化[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2014,47(12):1057-1064.
- [18] Nguyen L, Yongsoo K, Moonyong L. Design and optimization of thermally coupled distillation schemes for the trichlorosilane purification process [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 59(1/2): 200-210.
- [19] Rizk J, Nemer M, Clodic D. A real column design exergy optimization of a cryogenic air separation unit [J]. Energy, 2012, 37(11): 417-429. ■

- [2] Sun J, Wang P, Gao H, et al. Paralleled double-effect distillation: Simulative case studies [C] // Aiche Spring National Meeting, 2013.
- [3] 杨德明,郭新连.多效精馏回收 DMF 工艺的研究[J].计算机与应用化学,2008,25(10):1202-1206.
- [4] 赵舜华,宋锡瑾,张景铸,等.合成革生产废水中 DMF 的节能回收新工艺[J].化工进展,2007,26(9):1347-1350.
- [5] 王春丽.液液萃取回收含盐医药废水中的 N,N-二甲基乙酰胺[D].长春:长春工业大学,2016.
- [6] Douglas J. Conceptual design of chemical processes [M]. McGraw-Hill, 1988.
- [7] Xingxing Z, Kejin H, Haisheng C, et al. Comparing three configurations of the externally heat-integrated double distillation columns [M]. Computers & Chemical Engineering, 2011, 35: 2017-2033. ■