

热耦萃取精馏分离应用于 甲醇-四氢呋喃体系的优化设计分析

郝增华¹, 张海静^{1*}, 刘旭日¹, 连一苇²

(1. 邯郸职业技术学院, 河北 邯郸 056001; 2. 河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 甲醇-四氢呋喃属于共沸体系, 传统分离工艺采用双塔串联萃取工艺进行分离纯化, 即引入第三种组分, 该工艺能耗、占地面积等相对较高。该研究尝试提出了一种新的工艺方法, 即热耦萃取分离工艺(精馏工艺与萃取工艺相耦合); 对相关工艺参数进行优化设计分析, 得到最佳操作参数; 与传统双塔萃取工艺相比, 热耦萃取工艺可减少能耗约 5%, 同时设备投资及占地面积也相应减少。

关键词: 共沸; 热耦精馏; 优化; 操作参数; 节能

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)09-0194-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.09.040

Optimization design analysis on application of thermal coupled extraction distillation separation in methanol-tetrahydrofuran system

HAO Zeng-hua¹, ZHANG Hai-jing^{1*}, LIU Xu-ri¹, LIAN Yi-wei²

(1. Handan Polytechnic College, Handan 056001, China; 2. School of Materials Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Methanol-tetrahydrofuran azeotropic system is traditionally separated and purified by two-column series extraction process, in which the third component is used. Such a traditional process consumes relatively high energy and occupies large land area. This study proposes a new separation process for separation of methanol-tetrahydrofuran azeotropic system, named thermal-coupled extraction separation process which integrating distillation process and extraction process. The optimum operation parameters are determined through optimization design analysis. Compared with traditional process, this thermal-coupled extraction distillation process can save energy by about 5% and cut down capital investment, and needs smaller land area.

Key words: azeotropic system; thermal-coupled extraction distillation process; optimization; operation parameters; energy-saving

四氢呋喃和甲醇均是重要的化工原料, 前者主要用作高分子聚合物的前体, 二者在常温下存在共沸现象^[1], 且共沸点组成为四氢呋喃 69.8%、甲醇 30.2% (质量分数)。对于共沸体系的分离纯化, 目前主要采用萃取精馏、共沸精馏等工艺技术^[2-9]。

该研究拟采用热耦合精馏技术对甲醇-四氢呋喃进行萃取分离纯化, 通过竖直隔板将塔体分为 3 部分, 塔顶引出 2 股流股分别得到四氢呋喃和甲醇, 塔釜得到二甲基亚砜, 二甲基亚砜可以循环使用。Aspen Plus 流程模拟软件是一款比较成熟的化工流程模拟工具, 广泛应用于化工等领域。该研究借助于 Aspen Plus 对甲醇-四氢呋喃热耦萃取分离工艺

进行建模仿真分析研究, 同时借助相关工具对其工艺参数进行优化设计。

1 建模仿真

模拟条件: 进料质量总流量为 100 kg/h, 组成为甲醇:四氢呋喃=0.5:0.5 (质量比), 温度 30℃, 常压; 选择二甲基亚砜为萃取剂, 温度 30℃, 常压。模拟规定: 常压操作, 分别得到质量分数为 99.5% 和 99.3% 的四氢呋喃和甲醇。

1.1 双塔串联萃取工艺流程

甲醇-四氢呋喃双塔串联萃取工艺如图 1 所示, T1 塔实现四氢呋喃的分离提纯(萃取塔), T2 塔

收稿日期: 2019-11-13; 修回日期: 2020-07-09

基金项目: 河北省社会发展研究课题(201701415); 邯郸市社会科学重点研究课题(201515)

作者简介: 郝增华(1980-), 女, 硕士, 讲师, hgr2018@126.com; 张海静(1983-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为过程工程强化和生物制药, 通讯联系人, hddxzhj@163.com。

实现甲醇和四氢呋喃分离(再生塔),四氢呋喃再生后返回到萃取塔循环利用。

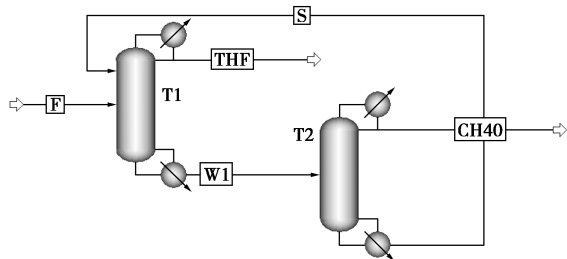


图1 甲醇-四氢呋喃双塔串联萃取工艺流程

萃取分离工艺涉及固定投资和操作费用,此处优化采用年总费用成本(total annual costs, TACs)为目标,即 $TACs = N \times (RR + 1)$ 最小,其中 N 为总塔板数, RR 为回流比。

如图2所示,萃取塔内,随着塔板数增大,年总费用成本先降低后增大,即存在最低点为最佳设计条件,总塔板数为26。

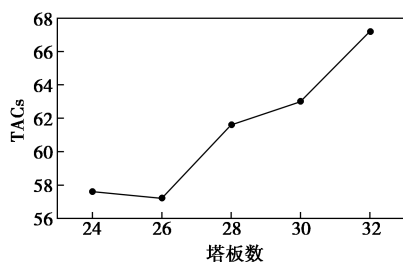


图2 T1塔的TACs随塔板数变化关系

如图3所示,脱洗塔内,随着塔板数增大,年总费用成本先降低后增大,即存在最低点为最佳设计条件,总塔板数为8。

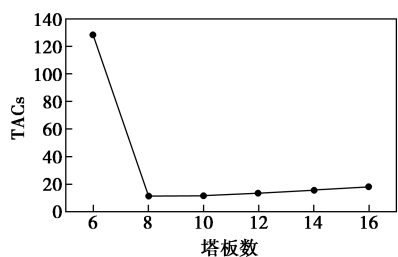


图3 T2塔的TACs随塔板数变化关系

通过仿真模拟,得到双塔串联萃取分离甲醇、四氢呋喃,最佳操作条件为萃取塔26块塔板,再沸器热负荷为23.11 kW,冷凝器热负荷为-12.78 kW;脱洗塔塔板数为8块,再沸器热负荷为32.12 kW,冷凝器热负荷为-22.87 kW。

1.2 热耦萃取精馏分离工艺

甲醇-四氢呋喃热耦萃取精馏分离工艺如图4

所示,在塔体上部插入1块竖直隔板,将塔体主要分为2部分,即隔板左侧预分馏塔,主要实现四氢呋喃的精馏提纯;隔板右侧和隔板下侧构成主塔部分,主要实现甲醇与二甲基亚砆分离提纯,分别得到满足纯度要求的甲醇和二甲基亚砆,且二甲基亚砆作为萃取剂重复利用。

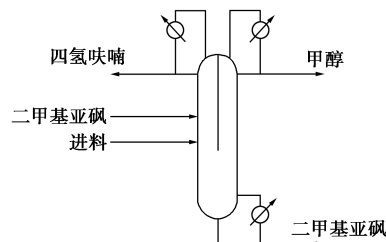


图4 热耦萃取精馏

借助流程模拟软件 Aspen Plus 搭建热耦萃取精馏的双塔等效模型,如图5所示。预分馏塔(或称副塔 PRE)相当于热耦萃取精馏塔的隔板左侧,实现四氢呋喃的分离纯化;主塔(MAIN)相当于热耦萃取精馏塔的主塔部分,实现甲醇和二甲基亚砆的分离纯化。与传统双塔串联萃取工艺相比,热耦萃取精馏分离工艺只有1个再沸器,且耦合在1个塔体内,占地面积及设备投资得到优化。通过简捷设计得到热耦萃取精馏塔的初步结构参数和操作参数,如表1所示。

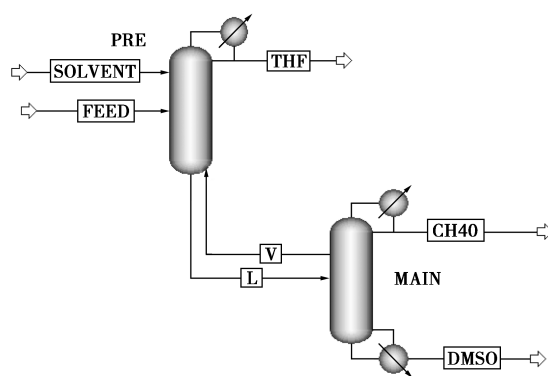


图5 热耦萃取精馏的双塔等效模型

表1 热耦萃取精馏工艺初始参数

设计参数	数值	设计参数	数值
PRE(副塔)		MAIN(主塔)	
塔板数	26	塔板数	8
原料进料板位置	14	出料板位置 V	6
萃取剂进料板位置	3	进料板位置 L	5
萃取剂用量/(kg·h ⁻¹)	214.195	回流比	2
回流比	1.44		

基于年总费用成本最低为目标,分别对设备参数(如塔板数、进料板位置等)和操作参数(如回流比等)进行优化分析。在满足分离要求的前提下,得到热耦合萃取精馏塔的最佳模型参数。

1.2.1 进料位置优化分析

在其他参数不变的情况下,分别以萃取剂(二甲基亚砜)和原料进料位置为自变量,塔顶出料四氢呋喃纯度为因变量,通过改变进料位置,分析其对四氢呋喃纯度的影响,得到结果如图 6 所示。由图 6 知,副塔出料流股中四氢呋喃浓度随萃取剂和原料进料板位置变化趋势呈马鞍形,即萃取剂和原料进料板位置分别为第 3 和第 15 块塔板时,四氢呋喃纯度达到最优。

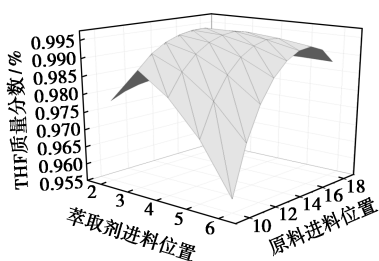
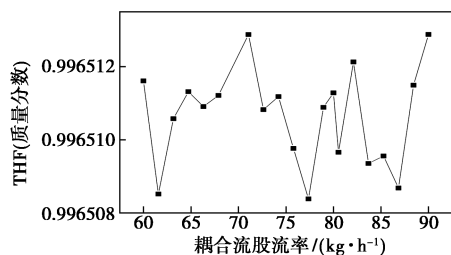


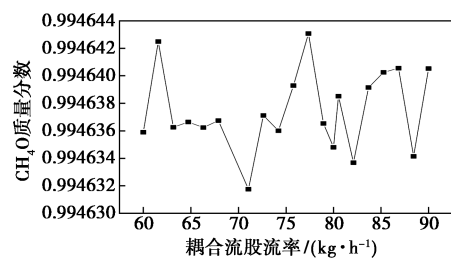
图 6 萃取剂和原料进料板位置对四氢呋喃(THF)质量分数的影响

1.2.2 内部耦合流股优化分析

固定其他操作条件,基于产品流股中四氢呋喃、甲醇纯度最高为目标,通过改变内部耦合流股流量进行优化分析。得到四氢呋喃和甲醇产品流股纯度随热耦合萃取精馏塔内部耦合流股变化趋势如图 7



(a) THF



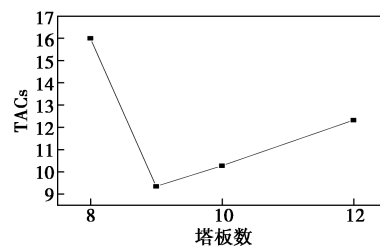
(b) CH₄O

图 7 内部耦合流股对四氢呋喃及甲醇流股质量分数的影响

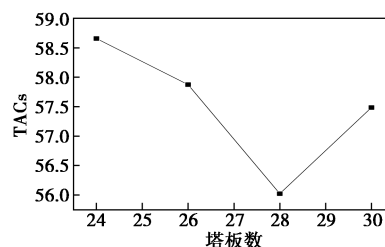
所示。由图 7 可知,内部耦合流股对 2 股产品纯度的影响趋势不一致,综合考虑最佳条件为 $V = 58.26 \text{ kg/h}$ 。

1.2.3 副塔塔板数与回流比的优化

以年总费用成本(TACs)最低,即 $N \times (RR+1)$ 最小为优化目标,对副塔(PRE)塔板数进行优化设计分析,得到结果如图 8 所示。



(a) 主塔



(b) 副塔

图 8 热耦合萃取精馏塔 TACs 随塔板数变化趋势

由图 8 知,当塔板数较少时,随着塔板数增加,年总费用成本先降低,此时操作费用占主导(塔板数代表固定投资,回流比代表操作费用),即随着塔板数增加,年总费用降低。但当塔板数增加到一定程度后,随着塔板数增加固定投资增加,但回流比(操作费用)减少幅度缓慢,此时固定投资占主导,即年总费用增加。

2 结果与讨论

通过优化设计分析,分别得到双塔串联萃取分离甲醇-四氢呋喃和热耦合萃取精馏分离甲醇四氢呋喃的优化设计参数,如表 2 所示。

表 2 优化设计参数

设计参数	热耦合萃取精馏分离	双塔串联萃取分离
PRE/T1		
塔板数	28	26
回流比	1.87	1.2
冷凝器负荷/kW	-16.76	-12.78
再沸器负荷/kW	0	23.11

续表

设计参数	热耦合萃取精馏分离	双塔串联萃取分离
MAIN/T2		
塔板数	9	8
回流比	0.037	0.5
冷凝器负荷/kW	-16.02	-22.87
再沸器负荷/kW	53.74	32.12

由表2知,双塔串联萃取分离工艺分离提纯甲醇和四氢呋喃,总塔板数为34,冷凝器总负荷为 $(-12.78)+(-22.87)=-35.65$ kW;再沸器总负荷为 $23.11+32.12=55.22$ kW。热耦合萃取精馏分离工艺分离提纯甲醇和四氢呋喃,总塔板数为37,冷凝器热负荷为 $(-16.76)+(-16.02)=-32.78$ kW,再沸器负荷为53.74 kW。

与双塔串联萃取分离工艺相比,热耦合萃取精馏分离工艺节省1个再沸器,设备投资减少;将2个塔耦合在一个塔体内,节省占地面积;冷凝器负荷节能2.87 kW,约8.05%;再沸器热负荷节能1.48 kW,约2.68%。

3 结论

热耦合萃取精馏工艺可以用于甲醇-四氢呋喃共沸体系分离提纯,且与传统双塔串联工艺相比,不仅节省设备投资(减少1个再沸器及其他相关管线)和减少占地面积(将2个塔耦合在1个塔体内),而且冷凝器负荷节能2.87 kW,约8.05%;再沸

器热负荷节能1.48 kW,约2.68%,总能耗可节约5%左右。

参考文献

- [1] 王俊,王克良.萃取精馏分离甲醇-四氢呋喃共沸体系的流程模拟[J].山东化工,2017,46(19):153-154.
- [2] 李静,王克良,连明磊,等.[Emim]AC萃取精馏分离乙酸甲酯和甲醇工艺模拟[J].化学工程,2018,46(5):69-72.
- [3] 王伊楠,杨景轩,李春成,等.PVFC与萃取精馏工艺回收高纯度糠醛的流程模拟及能量对比分析[J].太原理工大学学报,2018,49(2):184-189.
- [4] 张波,许松林.萃取精馏分离丙酮-环己烷共沸体系的模拟与实验[J].现代化工,2018,38(3):218-222.
- [5] Iqbal A, Ahmad S A. Separating iso-propanol-toluene mixture by azeotropic distillation[J/OL]. American Institute of Physics Conference Series, 2018, DOI: 10.1063/1.5032351.
- [6] Khaledi R, Motahhari H R, Boone T J, et al. Azeotropic heated vapour extraction-A new thermal-solvent assisted gravity drainage recovery process [J/OL]. SPE Canada Heavy Oil Technical Conference, 2018, DOI: 10.2118/189755-MS.
- [7] Lee E J, Kim Y H. Energy saving in acetic acid process using an azeotropic distillation column with a side stripper [J]. Chemical Engineering Communications, 2018: 1-12.
- [8] Liping L, Hang L I, Bing L I, et al. Dynamic control of pressure-swing distillation for separating azeotropic system of methanol/benzene [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(5): 1003-1012.
- [9] Zhao T, Geng X, Qi P, et al. Optimization of liquid-liquid extraction combined with either heterogeneous azeotropic distillation or extractive distillation processes to reduce energy consumption and carbon dioxide emissions [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2018, 132: 399-408. ■
- [10] Wang Xiaohong, Hu Yangdong, Li Yugang. Intergration of nonsharp distillation sequences via genetic programming [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2008, 25(3): 402-408.
- [11] Wang Xiaohong, Li Yugang, Hu Yangdong, et al. Intergration of heat-integrated complex distillation systems via genetic programming [J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32: 1908-1917.
- [12] Wang Xiaohong, Li Yugang. Stochastic GP intergration of heat integrated nonsharp distillation sequences [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2010, 88: 45-54.
- [13] 张远鹏.基于遗传规划的醇-水共沸物系精馏-膜分离集成工艺优化研究[D].青岛:青岛科技大学化工学院,2019.
- [14] Wang Xiaohong, Li Minggao, Zhang Yuanpeng, et al. Research on the integration process of energy saving distillation-membrane separation based on genetic programming to achieve clean production [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020, 151: 107885.
- [15] Moulik, Siddhartha, Vani, et al. Chitosan-polytetrafluoroethylene composite membranes for separation of methanol and toluene by pervaporation [J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2018, 69(193): 28-38.
- [16] Van Hoof V, Van den Abeele L, Buekenhoudt A, et al. Economic comparison between azeotropic distillation and different hybrid systems combining distillation with pervaporation for the dehydration of isopropanol [J]. Separation and Purification Technology, 2004, 37(1): 33-49.
- [17] 姚路路,叶辉,宋影,等.水性聚氨酯膜渗透蒸发分离苯/环己烷的条件及过程[J].化工学报,2016,67(S1): 289-295.
- [18] 张穹,张锦威,朱宏吉,等.萃取精馏分离甲醇-甲苯共沸物的研究[J].化学工业与工程,2013,30(5): 71-75. ■

(上接第193页)

- [11] Wang Xiaohong, Hu Yangdong, Li Yugang. Intergration of nonsharp distillation sequences via genetic programming [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2008, 25(3): 402-408.
- [12] Wang Xiaohong, Li Yugang, Hu Yangdong, et al. Intergration of heat-integrated complex distillation systems via genetic programming [J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32: 1908-1917.
- [13] Wang Xiaohong, Li Yugang. Stochastic GP intergration of heat integrated nonsharp distillation sequences [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2010, 88: 45-54.
- [14] 张远鹏.基于遗传规划的醇-水共沸物系精馏-膜分离集成工艺优化研究[D].青岛:青岛科技大学化工学院,2019.
- [15] Wang Xiaohong, Li Minggao, Zhang Yuanpeng, et al. Research on the integration process of energy saving distillation-membrane separation based on genetic programming to achieve clean production