

塔板分布对热耦合隔板精馏塔操作性能的影响

宋二伟¹, 王明媚², 王二强^{2*}

(1. 中铝郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450041;

2. 中国科学院大学化学工程学院, 北京 100049)

摘要:热耦合精馏塔通过在塔体内安装垂直隔板将多个塔耦合在一个塔体内, 单塔可实现传统多塔分离效果。塔体内各部分塔板数分布不仅影响组分分离效果, 还会影响设备投资(或能耗)。基于理论模拟仿真, 对热耦合精馏塔内部各区域塔板分布进行研究, 重点考察其对能耗及流场分布的影响。模拟结果表明, 热耦合精馏塔内部塔板分布影响其能耗及内部流场分布, 且公共精馏段与公共提馏段塔板分布存在唯一最佳匹配, 而隔板左右两侧塔板分布存在多个最佳组合。

关键词:热耦合隔板精馏塔; 塔板分布; 优化; 流场分布; 最佳匹配

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0294-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.S.060

Influences of trays distribution on operation performance of thermally coupled dividing wall distillation column

SONG Er-wei¹, WANG Ming-mei², WANG Er-qiang^{2*}

(1. Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450041, China;

2. School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Compared with conventional distillation separation column, thermally coupled dividing wall distillation column (TCDWDC) has more merits, such as needing less land, lower capital investment, less energy and so on, hence attracting plenty of attentions from researchers and engineers. TCDWDC, integrating two or more towers into one tower by using vertical walls, can realize separation effects as conventional multi-tower cascade. However, trays distribution of each section inside TCDWDC will affect separation efficiency and capital investment or energy consumption. Based on theoretical simulation and calculation, trays distribution of each section inside TCDWDC is explored, with emphasis on its influences on energy consumption and stream field distribution. Simulation results demonstrate that trays distribution indeed affects energy consumption and internal stream field distribution of TCDWDC. Besides, there is a unique optimum matching between tray distributions of the public distillation section and the public distillation section, while there exist several couples of matchings on both sides of the vertical wall.

Key words: thermally coupled dividing wall distillation column; trays distribution; optimization; stream field distribution; optimum match

热耦合精馏塔(TCWD)又称分隔壁精馏塔, 通过在塔体内安置垂直隔板将多塔耦合在一个塔体内, 单塔可实现传统多塔分离效果, 即单个热耦合精馏塔可以实现三组分或更多组分的分离。与传统精馏工艺相比, 热耦合精馏塔具有占地面积小、设备投资少、能量利用率高、可有效避免中间组分的再混合等优势^[1-3]。

以三组分热耦合隔板精馏塔为例(图1), 与传统精馏塔相比, 热耦合精馏塔具有更多自由变量(自由度), 如分液比(RL, 公共精馏段下降液相分配到隔板左侧的比例)、分气比(RV, 公共提馏段上升

气相分配到隔板左侧的比例)等, 所以在热耦合精馏塔内部存在多解现象, 即进料条件及设备参数固定, 满足分离要求时存在多种分液比和分气比的组合解^[4-7]。热耦合精馏塔的设计、优化涉及到非线性混合整数型问题, 是其主要的研究方向之一^[8-11]。此外部分研究人员在研究过程中直接默认隔板两侧塔板数目相同, 一方面为了计算或优化方便, 另一方面易于控制隔板两侧压降^[12]。然而, 在设计或应用方面隔板两侧塔板数未必相同, 且文献[13]指出, 可以借助不同填料, 抑或填料与塔板混合使用来调整隔板两侧压力, 以满足最优分气比。此外, 公开文

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-04-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(E0E48918X2)

作者简介: 宋二伟(1989-), 男, 硕士, 主要从事过程工艺技术开发, sew0208@126.com; 王二强(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为化工过程强化, 通讯联系人, wangerqiang@ucas.ac.cn。

献资料中关于热耦合精馏塔内部塔板分布的研究较少。常见三组分分离隔板精馏塔可分为 4 个功能区:隔板左侧的进料区域、隔板右侧的侧线采出区域、隔板上方的公共精馏区和隔板下方的公共提馏区。每一个区域所起的分离作用不同,对塔板数目和气液负荷要求也不同,重要性也有区别。隔板左侧区域的分离更加重要,会严重影响其他区域的分离性能,因此研究热耦合精馏塔内部塔板分布对整塔性能的影响具有重要价值。

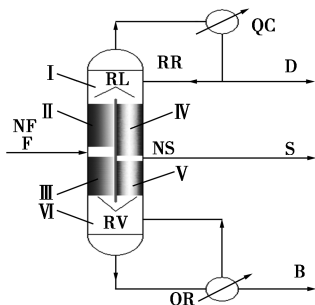


图 1 三组分热耦合隔板精馏塔示意图

鉴于热耦合隔板精馏塔内部塔板分布研究存在的问题,本文基于三组分热耦合隔板精馏塔进行一系列模拟研究分析,探讨塔内塔板分布对热耦合精馏塔操作性能的影响,重点考察隔板两侧塔板数分布对操作能耗及年总投资费用的影响。同时,在操作能耗固定的情况下,探讨隔板两侧塔板数分布对塔体内部流股分布的影响。

1 研究方法与思路

首先,利用流程模拟软件搭建热耦合隔板精馏塔三塔等效简捷设计模型(图 2),基于 Winn-Underwood-Gilliland 方程计算得到热耦合精馏塔初始设计参数^[14]。方程如下:

$$N_{\min} = \ln[(x_{1,D}/x_{1,B})(x_{h,B}/x_{h,D})^{\theta_1}]/\ln\alpha_{1/h} \quad (1)$$

$$\sum_i^n (\alpha_{ij}x_{Fi})/(\alpha_{ij} - \theta) = 1 - q \quad (2)$$

$$R_{\min} = \sum_i^n (\alpha_{ij}x_{Di})/(\alpha_{ij} - \theta) - 1 \quad (3)$$

$$X = (R - R_{\min})/(R + 1) \quad (4)$$

$$Y = (N - N_{\min})/(N + 2) \quad (5)$$

式中:B 为塔釜产品流股;D 为塔顶产品流股;X 为液相摩尔分数;l 为轻关键组分;h 为重关键组分; α_{ij} 为组分 i 对组分 j 的相对挥发度; x_{Fi} 为进料中组分 i 的含量; θ 为 q 方程的根,其值介于轻重关键组分的相对挥发度之间;q 为进料热力学状况; R_{\min} 为最小回流比; N_{\min} 为最小理论塔板数;R 为回流比;N 为塔

板数; α 为相对挥发度;Y 为纵坐标; θ 为方程的根。

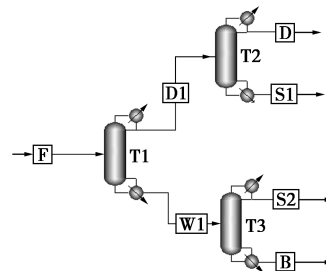


图 2 热耦合精馏塔三塔简捷设计模型

简捷设计得到的参数作为严格模拟设计的初始参数,利用热耦合精馏塔四塔等效模型进行严格模拟设计和优化分析,四塔模型如图 3 所示。其中,T1 为公共精馏段;T2 和 T3 分别为预分馏段(副塔)和侧线采出段;T4 为公共提馏段。预分馏段为实现轻、重关键组分的清晰分割,在整个隔板精馏塔内处于核心地位,会严重影响侧线纯度;公共精馏段、公共提馏段和侧线采出段分别为实现中间组分与轻、重关键组分的分离,即在塔顶、侧线采出位置及塔釜分别得到满足分离要求的轻、重关键组分及中间组分流通股。利用灵敏度分析手段,在满足产品分离要求的前提下,分析塔板分布对操作能耗、内部流股分布的影响。

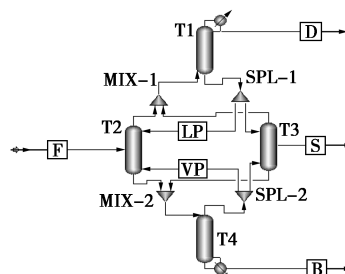


图 3 热耦合精馏塔四塔等效严格模型

2 模拟与讨论

2.1 进料条件及分离要求

研究对象选择正己烷($n-C_6$)-正庚烷($n-C_7$)-正辛烷($n-C_8$)三组分体系,由于该三组分为理想体系,所以模拟物性方法选择 IDEAL。进料参数为:总流量 $F = 100 \text{ kmol/h}$, $n-C_6/n-C_7/n-C_8 = 0.25/0.5/0.25$ (摩尔比),常压,饱和液相进料($q = 1$)。分离要求为:正己烷 99%,正庚烷 99%,正辛烷 99%(均为摩尔分数)。

2.2 模拟过程

2.2.1 简捷设计结果

利用上一部分提到的三塔等效简捷设计模型,

计算热耦合隔板精馏塔初始设计参数,同时基于化工分离专业知识对简捷设计结果进行整理,结果见表 1。

表 1 热耦合精馏塔初始参数

| 变量 | 数值 | 变量 | 数值 |
|--------|-------|--------|------|
| 主塔塔板数 | 38 | 侧线采出位置 | 6 |
| 副塔塔板数目 | 24 | 回流比 | 6.07 |
| 耦合位置 | 10,27 | 分液比 | 0.29 |
| 进料板位置 | 10 | 分气比 | 0.52 |

2.2.2 严格模拟与分析

基于上节简捷设计得到的初始参数,进行严格模拟仿真分析,考察内部塔板分布对再沸器能耗、内部流场分布的影响,同时借助年总投资进行简单经济技术评价。简捷设计过程设定为恒压操作。

2.3 塔板分布对能耗的影响

2.3.1 T1 及 T4 塔板分布的影响

为了研究 T1 及 T4 塔板分布对能耗(以再沸器热负荷计)的影响,固定塔板总数目及其他操作参数,调节 T1 和 T4 的塔板数(分别以 N_1 和 N_4 表示)分布,观察其对满足产品分离要求条件下再沸器能耗的影响,结果见图 4。其中,QR 代表再沸器热负荷。

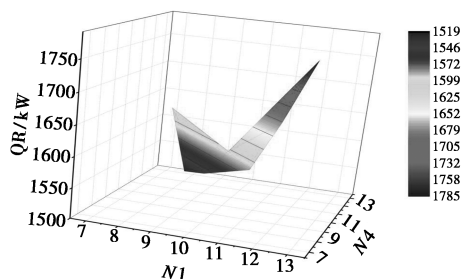


图 4 T1 和 T4 塔板分布对能耗的影响

由图 4 可知,隔板左右两侧塔板数固定,T1 和 T4 塔板数总和固定的前提下,调整 T1 和 T4 内塔板数目,满足分离纯度要求的情况下,再沸器能耗随着 N_1 和 N_4 的变化而变化,且存在最小值,即当 $N_1=8$ 、 $N_4=12$ 时,再沸器能耗最小,为 1 519.2 kW。

出现上述现象的原因是,T1 和 T4 分别为实现轻关键组分($n-C_6$)、重关键组分($n-C_8$)与中间组分($n-C_7$)的分离,并且 T1 和 T4 对应于整塔的气液相负荷和能耗。随着 N_1 和 N_4 的分配变化,两个部分的分离效果随之变化,为满足塔顶、侧线及塔釜产品分离要求,塔内气、液相负荷发生变化,即再沸器热负荷随之变化。当 N_1 和 N_4 达到最佳匹配时,T1

和 T4 完成各自分离任务所需要的气液相负荷相等,此时再沸器能耗最低。

2.3.2 隔板两侧塔板分布的影响

为了研究隔板两侧塔板分布对能耗(以再沸器热负荷计)的影响,固定塔板总数目及其他操作参数,调节 T2 和 T3 的塔板数(分别以 N_2 和 N_3 表示)分布,观察其对满足产品分离要求条件下再沸器能耗的影响,结果见图 5。

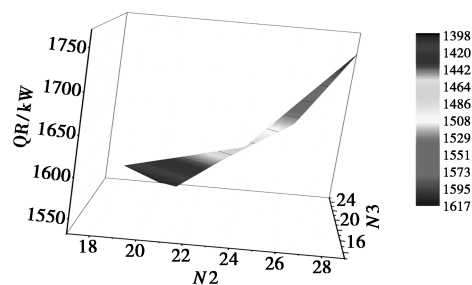


图 5 T2 和 T3 塔板分布对能耗的影响

由图 5 可知,T1 和 T4 塔板数固定,隔板左侧部分(T2)和隔板右侧部分(T3)塔板总数固定的前提下,调整 T2 和 T3 内塔板数目分布,满足分离纯度要求的情况下,再沸器能耗随着 N_2 和 N_3 的变化而变化,再沸器能耗存在多个最小极值点,即存在多个 N_2 和 N_3 最佳组合。

出现上述现象的原因是,T2 和 T3 分别为实现轻关键组分($n-C_6$)与重关键组分($n-C_8$)分离以及中间组分($n-C_7$)提纯的作用。随着 N_2 和 N_3 的分配变化,两个部分的分离效果随之变化,为满足塔顶、侧线及塔釜产品分离要求,塔内气、液相发生变化,即再沸器热负荷随之变化。隔板两侧部分都涉及到中间组分的分离,两侧塔板分布存在多个最佳组合,这一点与隔板塔存在分气比、分液比的多组定态解有关。

2.4 塔板分布对流场分布的影响

固定热耦合精馏塔总塔板数,在满足分离要求的前提下,分别研究四塔塔板分布对隔板两侧流场分布的影响。由于塔内气液相要达到平衡,此处用 LP(隔板上侧下降液相分配到隔板左侧部分液相)数值表示隔板两侧气、液流场分布。

2.4.1 T1 和 T4 塔板分布的影响

固定隔板两侧塔板数目分布,调节 N_1 和 N_4 分布(总塔板数固定),研究其对流场分布的影响,结果见图 6。

如图 6 所示,T1 和 T4 内塔板数目分布直接影响塔体内部流场分布。出现上述现象的原因是,

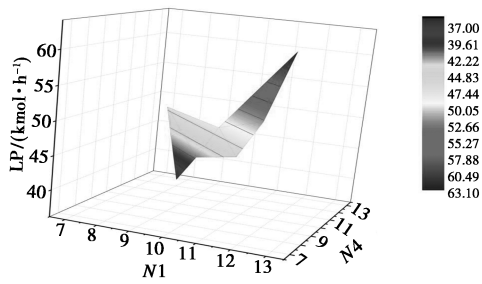


图6 T1和T4塔板分布对流场分布的影响

T1和T4分别为实现轻关键组分($n-C_6$)、重关键组分($n-C_8$)与中间组分($n-C_7$)的分离纯化。随着 $N1$ 和 $N4$ 的分配变化,两个部分的分离效果随之变化,为满足塔顶、侧线及塔釜产品分离要求,T1和T4的气液负荷会发生变化,意味着整塔的负荷变化,从而隔板两侧的气液相分配量会发生变化,尽管此时可能分配比例保持不变。

2.4.2 隔板两侧塔板分布的影响

固定T1和T4塔板数目分布,调节 $N2$ 和 $N3$ 分布(总塔板数固定),研究其对流场分布的影响,结果见图7。

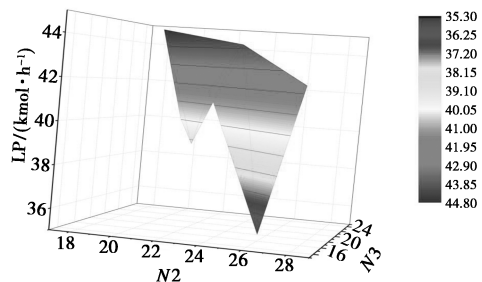


图7 T2和T3塔板分布对流场分布的影响

T2和T3分别为实现轻关键组分($n-C_6$)与重关键组分($n-C_8$)分离和中间组分($n-C_7$)提纯的作用。随着 $N2$ 和 $N3$ 的分配变化,隔板两侧所需要的液相回流和上升蒸汽量会有变化,因此影响隔板两侧的液相分配和气体分配量。

3 结论

借助于流程模拟软件,对热耦合隔板塔内部塔板分布进行模拟分析研究。结果表明,内部塔板分布对精馏能耗及内部流场分布都有影响,且公共精馏段和公共提馏段的塔板分布存在最佳匹配,隔板两侧塔板分布存在多种最佳匹配。为达到精馏操作最佳生产条件,在隔板塔的模拟、设计、建造实施过程中,需要根据实际情况对塔体内部塔板分布进行合理配置和优化。

参考文献

- [1] Aspiron N, Kaibel G. Dividing wall columns: Fundamentals and recent advances [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2010, 49(2): 139-146.
- [2] Dejanović I, Matijašević L, Olujić Ž. Dividing wall column—A breakthrough towards sustainable distilling [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2010, 49(6): 559-580.
- [3] Jansen, Dejanović H, Rietfort I, et al. Dividing wall column as energy saving retrofit technology [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2016, 88(1): 200-207.
- [4] Vázquez-Castillo J A, Segovia-Hernández J G, Ponce-Ortega J M A. Multi-objective optimization approach for integrating design and control in multicomponent distillation sequences [J]. Ind Eng Chem Res, 2015, 54: 12320-12330.
- [5] Lin W J, Seader J D, Wayburn T L. Computing multiple solutions to systems of interlinked separation columns [J]. AIChE Journal, 1987, 33(6): 886-897.
- [6] Rafael C C, Seader J D, Wayburn T L. Multiple steady-state solutions for interlinked separation systems [J]. Ind Eng Chem Fundamen, 1986, 25(4): 566-576.
- [7] Song E, Wang E. Design of dividing wall column considering its multiple steady state characteristic [J]. Chem Eng Technol, 2018, 41(3): 517-523.
- [8] Meyer X. Design and simulation of divided wall column: Experimental validation and sensitivity analysis [J]. Chemical Engineering & Processing Process, Intensification, 2016, 104: 94-111.
- [9] Wu S, Kai G, Liu C, et al. Design and control for a dividing-wall column with a partial condenser for pretreating an industrial multi-component reformed gasoline mixture [J]. Can J Chem Eng, 2018, 96: 2431-2442.
- [10] 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.
- [11] 方静, 祁建超, 李春利, 等. 隔壁塔四塔模型的设计计算 [J]. 石油化工, 2014, 43(5): 530-535.
- [12] 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.
- [13] Dejanović I, Matijašević L, Jansen H, et al. Designing a packed dividing wall column for an aromatics processing plant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(9): 5680-5692.
- [14] Winn F W. New relative volatility method for distillation calculations [J]. The Petroleum Refiner, 1958, 37(5): 216-218. ■