

苯-甲苯-二甲苯物系热偶精馏过程 节能效果的模拟优化

李瑞端¹, 张薇², 戴传波^{1*}, 杨莹¹, 杨家军¹

(1. 吉林化工学院, 吉林 吉林 132022; 2. 吉林石化工程学校, 吉林 吉林 132022)

摘要:以苯-甲苯-二甲苯精馏的 MESH 方程组为基础, 用 pro II 模拟软件模拟, 考察苯-甲苯-二甲苯物系组成对节能率的影响, 并找出产品纯度对连接流股流量变化的灵敏度, 在 L/V' 为 1.5 时, 塔顶、塔中、塔釜产品均达到最佳条件, 在保证 L/V' 最优前提下, 以年费用即操作费用与设备折旧费用之和最小为目标函数, 调节回流比及理论板数, 优化苯-甲苯-二甲苯分离工艺, 得出最优设计方案。结果表明, 经优化设计的苯-甲苯-二甲苯物系的热偶精馏工艺比最好的普通精馏工艺节约能耗近 40%。

关键词: 甲苯; 二甲苯; 热偶精馏; 模拟; 设计

中图分类号: TQ028

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)07-0184-03

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.07.044

Simulation and optimization of energy efficiency for thermally coupled distillation process in benzene-toluene-xylene system

LI Rui-duan¹, ZHANG Wei², DAI Chuan-bo^{1*}, YANG Ying¹, YANG Jia-jun¹

(1. Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China;

2. Jilin Shihua Engineering School, Jilin 132022, China)

Abstract: Based on MESH equation set of benzene-toluene-xylene distillation, stimulation is carried out by pro II software to evaluate the effects of benzene-toluene-xylene composition on the energy efficiency and to find out the sensitivity of product purity to the changes of flow rate of cycle streams. When the value of L/V' is 1.5, purities of products at column top, mid-column and column bottom are all at their best. The optimal design scheme is obtained through adjusting reflux ratio and theoretical plate number, and optimizing the separation process of benzene-toluene-xylene by aiming at minimum of annual operation cost and equipment depreciation in the premise of optimal L/V' . The results show that energy consumption of the optimized thermally coupled distillation process for benzene-toluene-xylene system is nearly 40% of that of common distillation process.

Key words: toluene; xylene; thermally coupled distillation; simulation; design

化学工业中, 精馏过程是能量消耗最大的单元操作之一, 它是利用混合物中各组分的挥发性能的差异来分离均相液体混合物(或液化的气体混合物)的一种基本单元操作过程。据估计, 分离过程的能耗大约占整个化学工业用能的 40%, 而其中 95% 是精馏过程消耗的。美国曾经统计全美国 40 000 多个精馏塔所消耗能量相当于每天 1.9 亿 L (120 万桶) 石油, 几乎占全美国能耗的 3%^[1]。精馏过程耗能如此之大, 因此做好精馏流程的优化节能意义重大。

对于多元混合物的精馏, 流程优化是重要的节能措施, 用复杂塔代替普通塔的热偶精馏流程, 更接近于可逆状态, 在热力学上是最理想的系统结构。

研究表明, 热偶精馏流程节能效果非常显著, 因此从其可操作性及实际应用角度探讨热偶精馏的应用前景^[2]。

1 TCS 热偶精馏

分离 3 组分的双塔普通精馏流程有 2 种: DS 流程是两塔均有冷凝器和再沸器, 且一塔塔底出料作为二塔进料, 如图 1; IS 则是一塔塔顶出料作为二塔进料, 如图 2、图 3 所示, 热偶精馏由 2 个塔构成, 第二塔塔底设再沸器, 塔顶设冷凝器, 第一塔的热源来自第二塔侧线引出进入第一塔的气相; 第一塔的塔顶回流来自第二塔上部引出的液相, 第一塔塔顶蒸气到第二塔上部, 第一塔的液相返回到第二塔底的

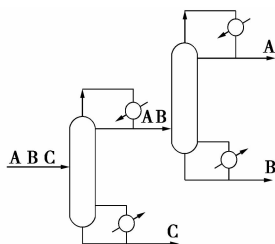


图1 普通精馏序列一流程示意图

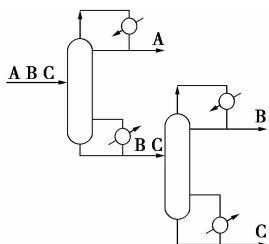


图2 普通精馏序列二流程示意图

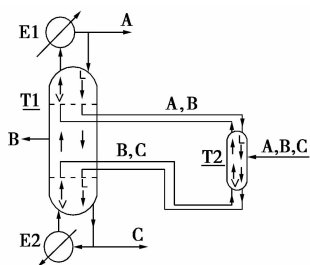


图3 TCS热偶精馏流程图

下部。3组分物系A、B、C由一塔进料,在一塔塔顶含组分A、B的物流与二塔塔顶物流直接换热。一塔塔釜含B、C的物流与二塔塔釜物流进行换热。

(上接第183页)

侧线采出量为主要调节方式,来避免汽油回流量增大引起的急冷油塔釜温度的降低,从而保证稀释蒸汽的发生量。

(2) 盘油循环量对急冷油塔整体的取热量影响较少,主要影响盘油与急冷油的取热比,应在满足急冷油塔顶温度的情况下尽量减小盘油循环量以提升取热的品位。

(3) 在不改变急冷油换热器换热面积的情况下,通过适度降低急冷油循环量提高急冷油温度的方法,来提高平均传热温差,更有利于高品位的急冷油的热量回收。

参考文献

[1] 赵浩辰. 乙烯装置急冷油系统汽油分馏塔节能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.

接近纯组分的A、B、C分别从二塔塔顶、塔中、塔底采出。与普通精馏塔序列相比节省了冷凝器、再沸器各1个,不仅节省投资,而且减少有效能损失,提高了热力学效率。

2 数学模型

2.1 建立优化塔釜上升蒸气量数学模型

塔器的平衡级模型,即由物料平衡(M方程)、相平衡(E方程)、摩尔分数加和(S方程)和热平衡(H方程)组成的方程组,简称MESH方程组。

以MESH方程组为基础,以塔釜最小上升蒸气量为目标函数,结合Underwood方程建立数学模型,优化塔釜上升蒸气量,得出塔釜最小上升蒸气量,上升蒸气量最小是节能的实质所在,上升蒸气量小所需加热蒸气量就小。

2.2 最优目标函数的建立

为了达到优化设计的目的,以年费用即操作费用与设备折旧费用最小为目标函数,将两塔的操作回流比为优化参数来求得此工艺的最优设计。

3 模拟与优化

用pro II模拟软件对苯-甲苯-二甲苯物系进行模拟,以进料100 kmol/h为例,选定流体包里的NRTL方程,泡点(109℃)进料,产品苯从主塔顶部采出,甲苯从塔中部采出,二甲苯从塔底采出,要求各产品回收率均达96%以上,考察不同的进料组成对节能率的影响,模拟结果如表1所示。

- [2] 罗淑娟,李东风. 乙烯装置汽油分馏塔模拟与探讨[J]. 化工进展, 2009, 28(S1): 489-492.
- [3] 侯经纬,白跃华,高飞,等. 乙烯分离流程模拟技术[J]. 化工进展, 2011, 30(S2): 70-79.
- [4] 林晓华,苏成利,李平,等. 乙烯装置急冷系统的流程模拟与热量回收优化分析[J]. 当代化工, 2015, 44(10): 2328-2331, 2334.
- [5] 刘翀,窦珍. 24万t/a乙烯装置急冷系统改造[J]. 石化技术与应用, 2012, 30(6): 518-522.
- [6] 于婷婷. 乙烯装置急冷系统工艺模拟及改进研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [7] 高光英,全先亮,姜斌,等. 真组分法模拟乙烯装置急冷系统[J]. 化学工程, 2008, 8(8): 66-69.
- [8] 全先亮. 基于二次油的乙烯装置急冷系统工艺模拟与研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [9] 许斌. 乙烯装置急冷系统工艺模拟与研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [10] 堵祖荫. 汽油分馏塔系统的优化[J]. 乙烯工业, 2003, 15(2): 16-21. ■

表 1 TCS 热偶精馏节能率

| 流程 | 进料组成 苯-甲苯- 对二甲苯 | $Q_C/$ ($GJ \cdot h^{-1}$) | $Q_R/$ ($GJ \cdot h^{-1}$) | $Q_T/$ ($GJ \cdot h^{-1}$) | $E_{sav}/$ % |
|----------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 普通精馏序列I | 0.4-0.3-0.3 | 7.8083 | 6.5924 | 14.4007 | — |
| 普通精馏序列II | 0.4-0.3-0.3 | 9.6336 | 6.5960 | 16.2296 | — |
| TCS 热偶精馏 | 0.4-0.3-0.3 | 5.1668 | 4.3664 | 9.5332 | 33.80 |
| 普通精馏序列I | 0.3-0.4-0.3 | 7.9546 | 6.6205 | 14.5751 | — |
| 普通精馏序列II | 0.3-0.4-0.3 | 9.8547 | 7.8510 | 17.7057 | — |
| TCS 热偶精馏 | 0.3-0.4-0.3 | 5.4471 | 4.4946 | 9.9417 | 31.79 |
| 普通精馏序列I | 0.3-0.3-0.4 | 3.3000 | 3.0727 | 6.3727 | — |
| 普通精馏序列II | 0.3-0.3-0.4 | 3.8574 | 3.2117 | 7.0691 | — |
| TCS 热偶精馏 | 0.3-0.3-0.4 | 2.5423 | 2.2973 | 4.8396 | 24.10 |

从模拟结果来看,无论进料组成如何,一序列的耗能量都少于二序列,因此根据普通精馏一序列计算下面热偶精馏的节能率。

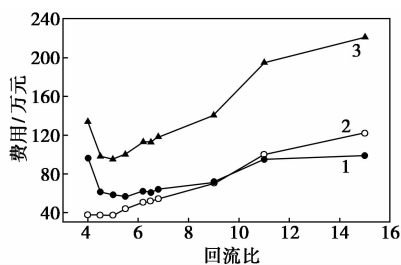
与普通精馏流程相比,获得相同的产品质量,对于理想物系苯-甲苯-对二甲苯系,进料中主要组分从轻组分变化到中间组分、重组分时,TCS 热偶精馏的节能率不断下降,即进料主要组分为轻组分时,节能效果最好,主要组分为中间组分时次之,主要组分为重组分时节能效果最差,后续以苯-甲苯-对二甲苯组成 0.4-0.3-0.3 为研究对象,进行经济核算。

在热偶精馏中,产品的纯度及回收率对连接流量变化十分敏感^[3],而且塔顶、塔底产品分离的最佳条件不同,因此,根据塔顶、塔中、塔釜 3 个产品的产量及价格进行优化计算,确定最佳条件为 $L/V' = 1.5$ 。

在确定连接流股后,改变回流比及塔板数对系统进行优化,在达到分离要求时,达到塔总费用最少。

通过改变回流比和塔板数对系统进行调试,观察回流比及塔板数的变化与热负荷变化的关系,回流比与冷凝器的热负荷呈正比,回流比越大冷凝器的热负荷越大,即操作费用越高;塔板数越多则设备费用越高。模拟出各个回流比下的系统流程,比较其变量、操作费和设备费,可以得出最优回流比为 5,副塔塔板数为 20,主塔塔板数为 40,副塔 13 块板进料,主塔第 3 和 37 块板与副塔塔顶、塔底耦合回流,此时达到了分离要求,塔的总费用最少。

回流比与设备费、操作费、总费用的关系如图 4。



1—设备费;2—操作费;3—总费用

图 4 设备费、操作费与回流比的分布曲线图

4 费用核算

普通精馏与热偶精馏的比较见表 2。

从费用核算的结果可以明显看出,热偶精馏更节省经济费用,与普通精馏序列一相比较,TCS 热偶精馏操作费用的节能率为 37.7%,年消耗费用节约 36.3%,有效地节省了年消耗费用。

表 2 普通精馏与热偶精馏的比较

| 项目 | 普通精馏塔 | 普通精馏塔 | 热偶精馏塔 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| | 序列 1 | 序列 2 | TCS |
| 冷凝水用量/($kg \cdot h^{-1}$) | 186900 | 230500 | 133700 |
| 水蒸气用量/($kg \cdot h^{-1}$) | 3115.90 | 2903.00 | 2066.50 |
| 操作费/万元 | 324.67 | 375.01 | 202.27 |
| 设备费用/万元 | 88.19 | 97.92 | 101.57 |
| 总费用/万元 | 333.49 | 384.80 | 212.43 |

5 结论

以 MESH 方程为基础,用 pro II 模拟软件对苯-甲苯-二甲苯物系的热偶精馏和普通精馏进行模拟与优化,结果表明,本项研究在理论上具有重要价值,可以节约能源、降低成本,并能够提供依据对中试装置进行指导,目前国内的研究应用还不够成熟,如果此项研究应用成功,将是一个重大的进展,可以更加有效地节能,提高企业的经济效益。

参考文献

- [1] 杨友麒.精馏过程节能[J].现代化工,1994,14(5):9-15.
- [2] 尹航,曹玉波.TCS-R 热偶精馏过程的模拟优化计算[J].吉林化工学院学报,2001,18(4):8-10.
- [3] 杨德明.烷烃分离热偶精馏的模拟研究[J].石油化工高等学校学报,2002,15(3):25-27. ■