

石脑油分离隔壁塔综合性能模拟研究

陈建娟¹, 丛山^{2,3*}, 杨祖杰³, 张方勤⁴

- (1. 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101;
2. 天津大学化工学院, 精馏技术国家工程研究中心, 天津 300350;
3. 北洋国家精馏技术工程发展有限公司, 天津 300072;
4. 东华工程科技股份有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘要:在流程模拟软件 Aspen Plus 中建立石脑油分离隔壁塔模拟流程, 利用传统石脑油分离两塔流程工艺参数作为初值, 使用单因素变量法对隔壁塔工艺参数进行调整和优化。研究隔壁塔内主要操作和结构参数, 如隔板位置、气液分配比、公共精馏段塔板数和提馏段塔板数对于隔壁塔能耗的影响。同时, 研究了进料组成变化对于隔壁塔性能的影响。

关键词:石脑油; 隔壁塔; 过程模拟; 节能率

中图分类号: TQ028.31

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)12-0213-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.12.049

Simulation study on comprehensive performance of dividing wall column for separating naphtha

CHEN Jian-juan¹, CONG Shan^{2,3*}, YANG Zu-jie³, ZHANG Fang-qin⁴

- (1. Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China; 2. National Engineering Research Center of Distillation Technology, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
3. Pei Yang National Distillation Technology Corporation Limited, Tianjin 300072, China;
4. East China Engineering Science and Technology Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: Aspen Plus software is used to establish a simulation model for the dividing wall column in naphtha separation process. The process parameters of dividing wall column are adjusted and optimized by using single factor variable method, with the process parameters of traditional dual-column naphtha separation process as initial values. It is found that the main operating and structural parameters of dividing wall column, such as position of baffle plate, distribution ratio of gas phase to liquid phase, theoretical tray number in pre-fractional section and theoretical tray number in the public rectifying and stripping section, have great influences on the energy consumption of the dividing wall column. Meanwhile, the influences of feed composition on the performance of dividing wall column are also studied.

Key words: naphtha; dividing wall column; process simulation; energy-saving rate

石脑油(naphtha)是石油产品之一,又叫化工轻油,是以原油或其他原料加工生产的用于化工原料的轻质油,主要用作重整和化工原料。拓宽石脑油下游产品市场及开发新的石脑油深加工方案可有效提高石脑油利用率及附加值^[1]。石脑油主要由正构烷烃、异构烷烃、环烷烃和芳香烃构成,主要有催化重整原料、蒸汽裂解制乙烯原料和汽油调和组分 3 种用途。一般情况下,对蒸汽裂解制乙烯原料,正构烷烃是理想的原料;对重整原料,环烷烃和芳香烃是理想的原料;对汽油调和组分,部分异构烷烃由于其较高抗爆指数和较低的密度,是理想的清洁汽油

调和组分。通过有效的分离过程,可以实现石脑油的优化利用^[2]。

炼厂内通过蒸馏分离方法对石脑油进行轻重组分的切割,进而对分离出的各馏分段进行深加工。目前,石脑油主要切割为 3 段: C₅ 以上作为液化石油气或裂解制乙烯的原料; C₆~C₈ 作为芳烃抽提或重整原料; C₉ 以上则用于汽油调和等用途。其中,在切割过程中提高 C₆~C₈ 馏分段的芳烃含量及产率有助于提高石脑油的经济效益^[3]。

目前,使用蒸馏方法切割石脑油主要为单塔侧采式和两塔序贯式 2 种^[4]。单塔侧采流程塔顶和塔

收稿日期: 2018-05-10; 修回日期: 2018-10-16

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202-013)

作者简介: 陈建娟(1973-),女,高级工程师,研究方向为石油化工设计,chenjianjuan@sei.com.cn; 丛山(1972-),男,副研究员,研究方向为分离过程开发,通讯联系人,congshan@tju.edu.cn。

釜分别采出 C_5 以上轻组分和 C_9 以下重组分,而塔中侧线采出 $C_6 \sim C_8$ 组分。单塔侧采流程虽然设备简单,但 $C_6 \sim C_8$ 中芳烃收率较低,产品附加值较低。两塔序贯流程的切轻塔塔顶主要采出 C_5 以上轻组分;主分离塔的 $C_6 \sim C_8$ 组分从塔顶采出,而 C_9 以下重组分从塔釜采出。两塔序贯式流程可以实现 3 个馏分段的精确分离,是目前主流的芳烃抽提原料石脑油分离的主要形式,但两塔序贯流程较单塔侧采流程相对复杂,能耗也会有所提高。

隔壁塔是在普通精馏塔内设置一个垂直隔壁,将精馏塔分为 4 个部分,分别为隔壁上部的公共精馏段、隔壁下部的公共提馏段、隔壁左侧的预分离段和隔壁右侧的中间采出段。隔壁塔是一种通过流程和设备集成而实现精馏分离集约化的先进精馏技术^[5]。以 3 种物质清晰分割为例,普通分离方法为只能通过两塔序贯分离,而 1 座隔壁塔则可实现上述过程。隔壁塔(DWC)是一种完全经过验证的技术,在节省设备投资和操作能耗方面的优势明显^[6]。

本文中主要研究了隔壁塔用于分离石脑油的可行性及其优化过程。在流程模拟软件 Aspen Plus 中分别建立石脑油分离隔壁塔模拟流程,利用传统石脑油分离两塔流程工艺参数作为初值,使用单因素变量法对隔壁塔工艺参数进行调整和优化。研究隔壁塔内主要操作和结构参数,如隔板位置、气液分配比、预分离段塔板数、公共精馏段塔板数和提馏段塔板数对于隔壁塔能耗的影响。同时,研究了进料组成变化对于隔壁塔性能的影响。

1 原料与分离要求

研究所用原料为作为芳烃抽提原料的某炼厂常压塔塔顶采出石脑油。为了减少芳烃抽提溶剂的消耗以及降低芳烃抽提系统负荷和能耗,通过精馏方式对石脑油进行切割,脱除原料中的 C_5 以上的轻组分和 C_9 以下的重组分,仅将富含芳烃的 $C_6 \sim C_8$ 馏分段进行芳烃抽提使用。对于石脑油的切割要求, C_5 以上的轻组分的苯质量分数要少于 1%, C_9 以下的重组分中 C_8 芳烃质量分数小于 0.5%,同时要求 $C_6 \sim C_8$ 馏分段的收率要低于 75%。

由于石脑油组分繁多,在流程模拟时对其进行全组分分析是不太现实的,而使用剩余曲线进行虚拟组分模拟又不能体现分离要求内对于组分的要求。所以,在本研究中使用物料集总方法对原料进

行组分简化处理。将原料进行色谱分析后,按照碳数将原料组分进行分类集总,同时将同碳数组分为异构烷烃(*iP*)、正构烷烃(*nP*)、环烷烃(*CP*)和芳烃(*A*)。按照生产要求,进料中 C_5 以上的轻组分, $C_6 \sim C_8$ 中间组分和 C_9 以下的重组分经过集总后组分组成如表 1 所示。

表 1 进料的集总组分组成

项目	质量分数/%	组分代表	项目	质量分数/%	组分代表
C_2	0.004	乙烷	nC_8	4.985	正辛烷
C_3	0.054	丙烷	CC_8	4.231	乙基环己烷
iC_4	0.088	异丁烷	AC_8	5.894	间二甲苯
nC_4	0.351	正丁烷	iC_9	4.705	3-甲基辛烷
iC_5	0.878	异戊烷	nC_9	4.674	正壬烷
nC_5	2.104	正戊烷	CC_9	5.793	正丙基环己烷
CC_5	0.701	环戊烷	AC_9	2.889	1,2,4-三甲基苯
iC_6	5.846	2-甲基戊烷	iC_{10}	5.919	2-甲基壬烷
nC_6	5.284	正己烷	nC_{10}	2.805	正癸烷
CC_6	4.658	环己烷	CC_{10}	1.250	正丁基环己烷
AC_6	6.235	苯	AC_{10}	0.690	叔丁基苯
iC_7	5.368	3-甲基己烷	iC_{11}	1.808	2-甲基癸烷
nC_7	5.025	正庚烷	nC_{11}	0.495	正十一烷
CC_7	5.496	甲基环己烷	CC_{11}	0.124	己基环戊烷
AC_7	4.842	甲苯	AC_{11}	0.065	戊基苯
iC_8	6.613	2-甲基庚烷	C_{12+}	0.126	正十二烷

2 过程模拟模型建立

2.1 两塔序贯式流程

图 1(a)为在 Aspen Plus 中建立的石脑油分离两塔序贯式模拟流程。T1 为切轻塔, C_5 以上轻组分通过塔顶采出,剩余物料则从塔釜采出后输送至 T2 精分塔,其中作为芳烃抽提原料的 $C_6 \sim C_8$ 中间组分从 T2 的塔顶采出,而 C_9 以下重组分则从塔釜采出。模拟过程中,首先使用 DUSTWU 精馏塔简洁计算模型对 T1 和 T2 精馏塔进行初步操作条件确定,规定 T1 轻关键组分正戊烷的塔顶回收率为 99.9%,重关键组分苯的塔顶回收率为 1%;规定 T2 轻关键组分间二甲苯塔顶回收率为 99%,重关键组分正壬烷塔顶回收率为 0.5%,同时设定 T1 和 T2 的回流比为最小回流比的 1.05 倍。进行简洁计算模拟后,将 T1 和 T2 改为 RADFRAC 精馏塔严格计算模型,并使用简洁计算模拟结果作为初值进行运

算,通过在软件内设置设计变量对精馏塔采出量和回流比进行微调以达到预期分离要求。在模拟过程中使用的热力学方法为 PENG-ROB,塔板效率规定为 0.65,单板压降为 500 Pa。

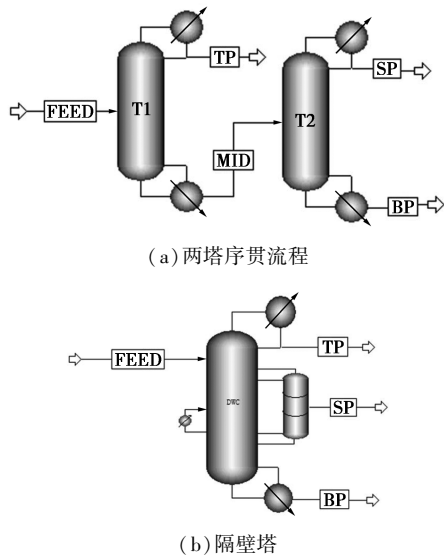


图 1 在 Aspen Plus 中搭建的 2 种石脑油分离流程模拟模型

因为已经将回流比的数值设置得比较接近最小回流比,符合工程设计经验范围,所以对于石脑油分离两塔序贯式流程并没有进行大量的操作参数优化,只是对进料板进行微调以使其处于最优进料位置。最终,两塔序贯式石脑油分离流程的详细操作参数如表 2 所示。

表 2 两塔序贯式石脑油分离流程操作参数

项目	T1	T2	项目	T1	T2
进料量/(kg·h ⁻¹)	14400	13700	操作压力/kPa	310	325
进料温度/℃	105	144	单板压降/Pa	500	500
塔顶采出量/(kg·h ⁻¹)	700	10800	塔顶温度/℃	63.59	136.54
塔釜采出量/(kg·h ⁻¹)	13700	2900	塔釜温度/℃	144.32	219.66
回流比	2.95	0.124	板效率	0.65	0.65
精馏段塔板数	19	4	塔顶冷负荷/kW	259.8	1143.8
提馏段塔板数	9	33	塔釜热负荷/kW	602.4	1248.9
			塔顶总负荷/kW	1403.6	
			塔釜总负荷/kW	1850.9	

2.2 隔壁塔流程

在流程模拟软件 Aspen Plus 中可以通过使用 RADFRAC 模型和物料流股进行组合从而实现隔壁塔模型的搭建,亦可以选择软件中现成的 Petlyuk 塔模块作为隔壁塔模型进行模拟^[7]。如图 1(b)所示,

本文中的石脑油分离隔壁塔模型选用 Aspen Plus 中与 Petlyuk 塔等效的 MULTIRAC 模块。模拟过程中,物料从模型中的副塔进料,而主塔的塔顶采出 C₅ 以上轻组分,塔釜采出 C₉ 以下重组分,而 C₆~C₈ 中间组分则从主塔的侧线位置采出。流程模型操作与结构参数初值的设置是石脑油分离隔壁塔设计的基础。如上节中所叙述的,隔壁塔流程模拟模型的初值设定主要是参考了两塔序贯流程中精馏塔参数,具体数值如表 3 所示。

表 3 隔壁塔石脑油分离流程参数初值

项目	数据	项目	数据
预分离段塔板数	9	单板压降/Pa	4
精馏段塔板数	12	分液比(β_L)	0.08
侧线采出段塔板数	9	分气比(β_V)	0.5
提馏段塔板数	29	塔顶采出量/(kg·h ⁻¹)	700
进料位置	21	侧线采出量/(kg·h ⁻¹)	10800
侧线出料位置	23	塔釜采出量/(kg·h ⁻¹)	2900
塔顶压力/kPa	340	回流比	20

3 隔壁塔操作参数优化

在对石脑油分离隔壁塔的操作参数进行优化时,塔顶采出量、塔顶压力和单板压降设置为固定值,而隔板位置、预分离段与侧线采出段塔板数、精馏段塔板数、提馏段塔板数、进料位置和侧线采出位置、分液比与分气比为本文中的重点研究对象。

3.1 隔板位置

隔壁塔的隔板位置很大程度上决定了塔内的返混程度。当隔板位置较为合理时,隔壁塔内返混程度最小,需要的回流比也是最低的,这可以很大程度上降低分离能耗。图 2 中展示了隔板在塔内不同位置时回流比的变化情况(隔板位置为隔板前端所在塔板位置)。可以发现,隔板位置在石脑油分离隔壁塔是有最佳位置的。在精馏段塔板数:隔板区塔板数:提馏段塔板数为 7:5:13 时,隔壁塔的回流比

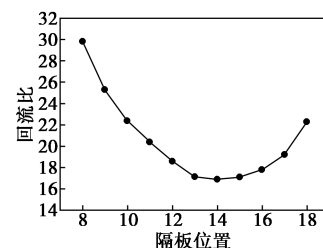


图 2 隔板位置对于隔壁塔回流比的影响

最小为 17.02。当隔壁塔内隔板位置向上或向下移动时,都会使精馏塔的回流比大幅度增加,增加隔壁塔的能耗。

3.2 进料位置和侧线采出位置

精馏塔的进料位置是否合适亦会体现在精馏塔的能耗水平上。当进料位置不在最优位置时,精馏塔物料组分分布会出现不同程度的返混,需要提高精馏塔回流比以满足分离要求。作为精馏塔的一种特殊形式,隔壁塔亦存在相同的问题。一般情况下,隔壁塔的进料位置处于预分离段。从图 3 中可以看出,石脑油分离隔壁塔的进料位置在预分离段的第 3 块板(总第 16 块板)进料时需要的回流比最小为 16.92。同时,相比于隔板位置,石脑油分离隔壁塔的进料所造成的返混几乎可以忽略不计,所造成的回流比变化并不是很大。

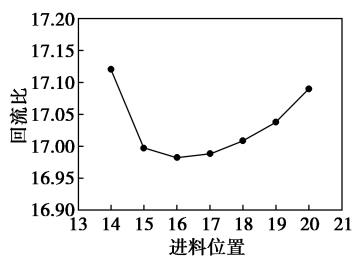


图 3 进料位置对于隔壁塔回流比的影响

图 4 中展示了石脑油分离侧线采出位置对于合格侧线产品采出量的影响。可以看出,当侧线采出位置在侧采段的第 5 块板(总第 18 块板)时,作为石脑油分离隔壁塔主要产品的 $C_6 \sim C_8$ 中间组分的产出率是最高的。在调节侧线采出位置提高 $C_6 \sim C_8$ 中间组分的产出率同时,也会因为中间组分的采出分别使塔顶塔釜产品中 C_6 和 C_8 含量降低,可以进一步降低分离难度,使隔壁塔的分离能耗降低。

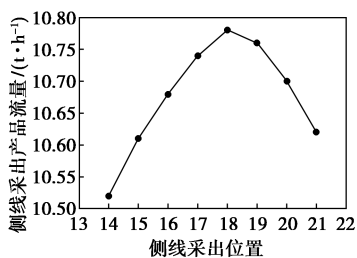
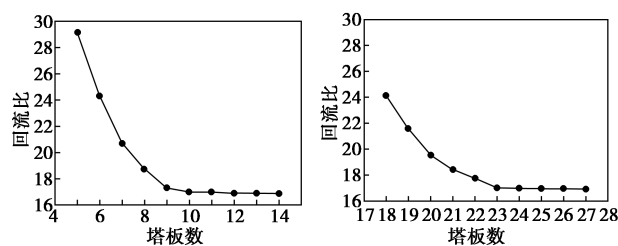


图 4 侧线采出位置对于侧线采出产品量的影响

3.3 公共精馏段和提馏段塔板数

图 5 展示了石脑油分离隔壁塔公共精馏段和提馏段塔板数对于回流比的影响。从图 5 中可以发

现,不管是公共精馏段还是提馏段在增加都会使隔壁塔回流比减小,但这种减小不是无限制的,待公共精馏段和提馏段塔板数增加到一定数目时,隔壁塔的回流比减小的速率明显降低,最后趋向于稳定值。隔壁塔内精馏段和提馏段塔板数变化对于回流比影响规律基本上是与传统精馏塔一致的。当回流比下降速率变得极其缓慢时,精馏段和提馏段塔板数基本可确定最优值。所以,石脑油分离隔壁塔的最优公共精馏段和提馏段塔板数分别为 10、23 块。



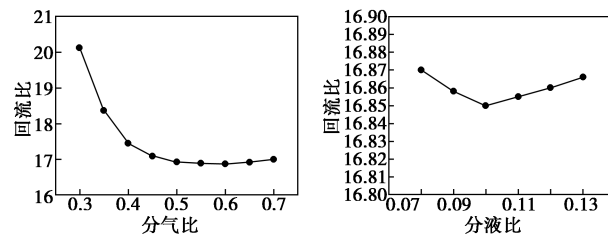
(a) 公共精馏段 (b) 公共提馏段

图 5 公共精馏段和提馏段塔板数

对于回流比的影响

3.4 分气比和分液比

分气比(β_v)指的是进入预分离段底部的上升蒸气量与总蒸气量的比值,而分液比(β_L)则指的是进入预分离段顶端的回流液与总回流液量的比值。合理分配预分离段和侧线采出段的气液流量有助于降低塔内组分返混,从而降低隔壁塔分离能耗。图 6(a)为不同分气比下石脑油分离隔壁塔回流比变化。从图中可以看出,分气比对于隔壁塔回流比影响很大,当分气比为 0.6 时,隔壁塔回流比具有最小值,为 16.87。图 6(b)为不同分液比下隔壁塔回流比变化。受侧线采出段采出量的限制,分液比并不能像分气比进行大范围的调整。从图中可以发现,相比于分气比,隔壁塔回流比并不会因为分液比的变化而变化太多。在分液比为 0.1 时,隔壁塔的回流比具有最小值为 16.85。



(a) 分气比 (b) 分液比

图 6 分气比与分液比对于回流比的影响

通过以上对石脑油分离隔壁塔流程参数进行研究与优化,最终确定的隔壁塔操作参数如表 4 所示。

石脑油分离隔壁塔各个出口产品组成如表5所示,完全符合分离要求。比较隔壁塔和传统两塔精馏过程的能耗,发现隔壁塔需要的冷凝水减少了9.8%,塔底蒸汽的需求也减少7.7%。所以从能耗上讲,石脑油分离隔壁塔较两塔序贯式分离流程具有一定优势。

表4 石脑油分离隔壁塔工艺操作条件

项目	数据	项目	数据
预分离段塔板数	9	侧线采出温度/℃	136.13
精馏段塔板数	10	塔釜温度/℃	218.75
侧线采出段塔板数	9	分液比(β_L)	0.10
提馏段塔板数	23	分气比(β_V)	0.60
进料位置	14	塔顶采出量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	700
侧线出料位置	18	侧线采出量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	10780
塔顶压力/MPa	0.310	回流比	16.85
塔釜压力/MPa	0.343	塔顶负荷/MW	1.264
塔顶温度/℃	62.22	塔釜负荷/MW	1.706

表5 石脑油隔壁塔产品信息 %

项目	塔顶产品	侧线产品	塔釜产品
质量分数			
苯	0.90	—	—
C ₈ 芳烃			0.481
轻组分	68.68	1.12	微量
中间组分	31.32	83.74	0.75
重组分	微量	15.14	99.25
收率			
<C ₆	79.87		
C ₆ ~C ₈		97.41	
>C ₈			63.77
采出率	4.86	74.85	20.29

4 隔壁塔操作弹性分析

结构已经确定的隔壁塔对于石脑油原料组成的变化应具有一定适应性,当物料组成变化时需要比普通两塔序贯式精馏方式节能才能体现其优越性,通过调节石脑油中的进料组成,在不改变原有精馏塔主体结构的基础上,对其进行了隔壁塔分离和两塔序贯分离的模拟和优化,2种精馏模式下的塔顶塔底负荷结果如表6所示。

表6 2种分离模式下塔顶塔底负荷比较

组成	项目	隔壁塔模型	两塔模型	节约度/%
原组成	塔顶负荷/MW	1.264	1.399	9.70
	塔釜负荷/MW	1.706	1.848	7.70
组成1	塔顶负荷/MW	1.288	1.510	14.70
	塔釜负荷/MW	1.562	1.786	12.54
组成2	塔顶负荷/MW	1.564	1.727	9.44
	塔釜负荷/MW	2.021	2.196	7.97

从以上结果可以看出,隔壁塔具有与普通精馏塔一样的适应性,能够只是调节采出量和回流比的情况下得到目标要求的产品,并且在相同的工艺要求条件下,相比较两塔序贯式分离模式,石脑油分离隔壁塔均具有一定节能优势。

5 总结

通过在流程模拟软件 Aspen Plus 中分别建立石脑油分离隔壁塔模拟流程,利用传统石脑油分离两塔流程工艺参数作为初值,使用单因素变量法对隔壁塔工艺参数,如隔板位置、气液分配比、公共精馏段塔板数和提馏段塔板数,进行调整和优化,最终得到了石脑油分离隔壁塔最优工艺流程参数。研究表明,隔壁塔用于石脑油分离具有可行性,且可分别节省冷凝水和蒸汽量为9.8%和7.7%。此外,通过调整进料组成,发现石脑油分离隔壁塔具有很好的适应性和操作弹性。

参考文献

- [1] 朱厚兴,宋爱萍,王新平.石脑油分离技术进展与应用前景探讨[J].石油规划设计,2014,25(6):9-12.
- [2] 秦广华.深度催化裂解石脑油加氢工艺技术的工业应用[J].炼油技术与工程,2017,47(6):23-26.
- [3] 刘秀清,刘振杰.石脑油的综合利用方案的探讨[J].石油知识,2005,(5):20-21.
- [4] Eagle S, Rudy C E. Separation and desulfurization of cracked naphtha [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 2002, 42(7): 1294-1299.
- [5] Gómez-Castro F I, Segovia-Hernández J G, Hernández S, et al. Dividing wall distillation columns: Optimization and control properties [J]. Chemical Engineering & Technology, 2008, 31(9): 1246-1260.
- [6] Aspiron N, Kaibel G. Dividing wall columns: Fundamentals and recent advances [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2010, 49(2): 139-146.
- [7] 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. ■