

## 工业技术

## 分隔壁塔侧线采出醋酸乙烯的模拟研究

刘佳男,张泽果,方舒婷,沈霞,孙玉强,高雪超\*

(南京工业大学化工学院,江苏南京 211816)

**摘要:**基于乙烯气相法,运用 Aspen 流程模拟软件及分隔壁塔侧线气相采出技术改进了某厂制醋酸乙烯的精制工段。分别考察了分隔壁塔的进料位置、采出位置和流量、液相分配比和回流比等工艺参数对分离效果和能耗的影响,通过优化和灵敏度分析,确定了最佳的工艺操作参数。结果显示,与常规双塔精馏技术相比,分隔壁塔的冷凝负荷节约了 27.69%,再沸器负荷节约了 17.34%。表明分隔壁塔技术在醋酸乙烯工业化生产中有广阔的应用前景。

**关键词:**醋酸乙烯;精馏;分隔壁塔;流程模拟;能耗

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)06-0192-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.06.039

## Process simulation on sideline extraction of vinyl acetate from dividing wall column

LIU Jia-nan, ZHANG Ze-guo, FANG Shu-ting, SHEN Xia, SUN Yu-qiang, GAO Xue-chao\*

(College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:**Based on ethylene-gas phase process for production of vinyl acetate (VAC), Aspen process simulation software and the dividing wall column (DWC) sideline gas phase extraction technology are used to renovate the refining section in a plant. The influences of the feeding position, the extracting position, the extraction flow, the partition ratio of the liquid phases and the reflux ratio of DWC are investigated. Through optimization and sensitivity analysis, the optimal operating parameters are determined. The results indicate that compared with the conventional twin-column distillation technique, the cooling duty and reboiler duty of DWC are saved by 27.69% and 17.34%, respectively, representing that DWC technique is promising in the industrial production of vinyl acetate.

**Key words:** vinyl acetate; distillation; dividing wall column; process simulation; energy consumption

醋酸乙烯(VAC)也称为醋酸乙烯酯,是用醋酸和乙烯或乙炔为原料反应生成的一种重要的有机化工产品,主要用于生成与醋酸乙烯有关的聚合物产品,有聚乙烯醇(PVA)、聚醋酸乙烯(PVAC)和醋酸乙烯-乙炔共聚物(EVA)等,同时也用于生产黏结剂和涂料工业等化学试剂。一般的生产工艺可以采用醋酸、乙烯和氧气为原料,使用以二氧化硅为载体的钯金催化剂<sup>[1]</sup>在 0.9 MPa、160℃的条件下,通过反应工段、气体分离压缩工段、脱碳工段和精制工段制得高纯度的醋酸乙烯。

在 VAC 精制提纯工艺中普遍采用双塔精馏技术。精馏是利用混合物中各组分挥发度不同而将各组分加以分离的一种分离过程,目前世界上所有和化工相关的行业都会涉及精馏,通过精馏,可以从二元物系或者多元物系中获得所需要的高纯度的物质,但是精馏过程能耗巨大,据估计,化工过程中 40%~70%的能耗用于精馏,而精馏能耗占其中的

95%<sup>[2]</sup>。因此,随着世界能源利用不断紧缩的情况,研究和开发新的精馏技术尤为重要。分隔壁塔(dividing wall column, DWC)最早于 1933 年由 Luster<sup>[3]</sup>因裂解气的分离提出。其原理是在普通精馏塔内设置 1 块竖直绝热隔板,将其分为上段(公共精馏段)、下段(公共提馏段)、隔板分开的精馏进料段(预分馏段)和中间采出(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<sup>[4]</sup>,其中副塔为预分馏段<sup>[5]</sup>。Errico 等<sup>[6]</sup>指出,对于某些给定的物料,分隔壁塔和常规精馏塔相比,节能最高可达 60%以上,设备投资节省 30%。例如苯-甲苯-二甲苯的分离中,分隔壁塔在完成相同的分离任务前提下,所需的冷量和热量都大幅度减小,能耗为常规塔的 66.9%<sup>[7]</sup>。由此可见,分隔壁塔能大幅度降低装置能耗,提高热效率,减少设备投资,同时能获得高纯度的产品。近几年来,分隔壁塔还在萃取精馏<sup>[8]</sup>、反应精馏<sup>[9]</sup>、共沸精馏<sup>[10]</sup>得到了应用。

收稿日期:2019-08-31;修回日期:2020-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(21878147);江苏省品牌专业建设工程项目(PPZY2015A044)

作者简介:刘佳男(1996-),男,本科生;高雪超(1984-),男,博士,副教授,研究方向为传质过程计算,通讯联系人,xuechao.gao@njtech.edu.cn。

考虑到分隔壁塔技术比双塔精馏更加经济,本文中运用 Aspen Plus 流程模拟采用分隔壁塔侧线气相采出 VAC 技术,研究了分隔壁塔的进料位置、侧线采出位置、侧线采出流量、液相分配比和回流比工艺参数对分离效果和能耗的影响,为解决 VAC 精制工段使用常规精馏技术导致的能耗高、设备投资大的问题提供一定的解决方案。

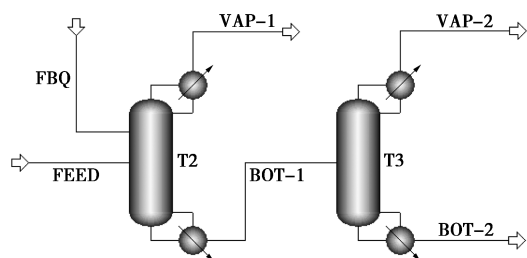
## 1 流程模拟

### 1.1 热力学模型的选择

由于本工段的进料组成主要由醋酸甲酯、丙烯醛、乙醛、醋酸乙烯和醋酸乙酯组成,该混合物系表现为极性非理想系,使用 NRTL 方程模型可以很好地描述强非理想溶液的气液平衡<sup>[11-12]</sup>。所以流程模拟采用 NRTL 热力学模型。

### 1.2 模拟的建立

VAC 精制工段常规精馏技术如图 1 所示,而采用分隔壁塔可在 1 个塔内完成,如图 2 所示。



T2—低沸物分离塔;T3—高沸物分离塔;  
PBQ—阻聚剂对苯醌(同下);VAP-1—低沸物;  
VAP-2—高纯度的 VAC;BOT-2—高沸物

图 1 醋酸乙烯精制工段常规精馏流程

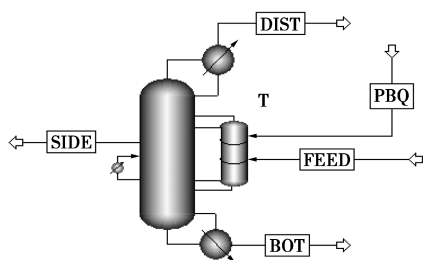


图 2 醋酸乙烯精制工段分隔壁塔流程

## 2 分隔壁塔的模拟研究

分隔壁塔的精馏模拟如图 2 所示,某厂的精馏塔进料组成如表 1。

塔的操作压力为 0.1 MPa,其中主塔的理论板数为 65 块,副塔的理论板数为 15 块,进料位置为副塔的第 4 块理论板,阻聚剂 PBQ 从副塔的塔顶进

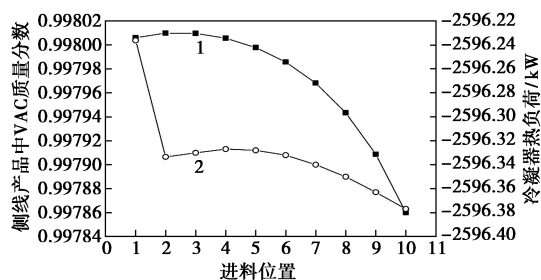
表 1 醋酸乙烯精制工段进料组成

	FEED	PBQ	FEED	PBQ
质量流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	16240.01	223.48		
质量分数				
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.005			
VAC	0.976	0.995		
H <sub>2</sub> O	0.012			
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	8.96×10 <sup>-4</sup>			
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>			0.001	
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>			0.002	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O			0.003	
PBQ				0.005

入,主塔的摩尔回流比为 6.0,液相由主塔的第 14 块板抽出到副塔的第 1 块板,流量为 245 kmol/h;气相由主塔的第 36 块抽出到副塔的第 20 块板,流量为 360 kmol/h;隔板位置为第 27 块理论板,气相采出流量为 155 kmol/h。通过 Aspen Plus 模拟,研究分隔壁塔的进料位置、侧线采出位置、侧线采出流量、液相分配比和回流比工艺参数对分离效果和能耗的影响。

### 2.1 进料位置的分析

在其他条件不变的情况下,改变进料位置,考察不同的进料位置对分隔壁塔的分离效果和能耗的影响。分析结果如图 3 所示。



1—侧线产品中的 VAC 质量分数;2—冷凝器热负荷

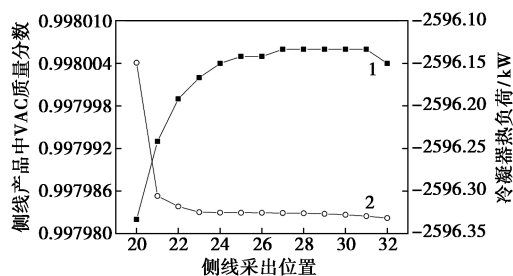
图 3 进料位置对分离效果和热负荷的影响

从图 3 可以看出,随着进料位置的增加,醋酸乙烯的质量分数在不断下降,在第 1~4 块板时,醋酸乙烯分离效果最好,但是随进料位置的增加,冷凝器的热负荷也在增大。综合考虑,选择最佳的进料位置为副塔的第 1 块板。

### 2.2 侧线采出位置的分析

在分隔壁塔中,侧线采出位置的不同会直接影响产品的分离纯度,在其他条件不变的情况下,考察不同的侧线采出位置对分隔壁塔分离效果的影响。

分析结果如图 4 所示。



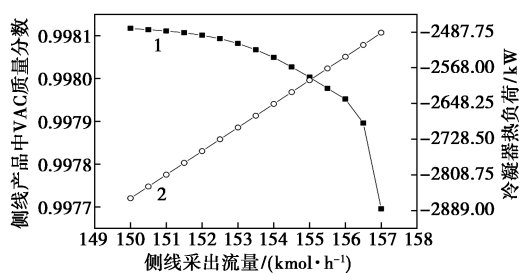
1—侧线产品中的 VAC 质量分数;2—冷凝器热负荷

图 4 侧线采出位置对分离效果和热负荷的影响

醋酸乙烯作为中间组分需要从主塔的其中 1 块塔板侧线采出,从图 4 可以发现,当侧线采出位置为第 27~30 块板时,醋酸乙烯的分离效果最好,但是随着侧线采出位置的增大,所需要的冷凝器热负荷也逐渐增大,同时重组分醋酸乙酯的采出也会增加。综合考虑,选择最佳的侧线采出位置为第 27 块板。

### 2.3 侧线采出流量的分析

醋酸乙烯作为最终的产品,所以醋酸乙烯的产量高低直接决定收益的高低,但是侧线采出的流量增大或减小对产品的纯度和塔的热负荷有着密切的影响,因此在保持其他条件不变的情况下,考察了侧线采出流量对分隔壁塔的分离效果和热负荷的影响。分析结果如图 5 所示。



1—侧线产品中的 VAC 质量分数;2—冷凝器热负荷

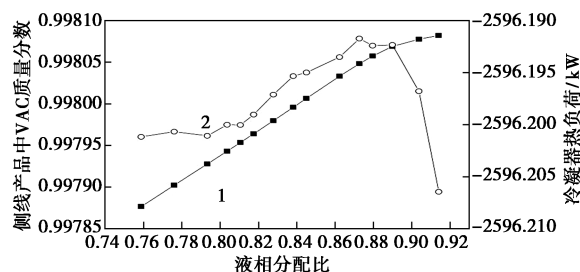
图 5 侧线采出流量对分离效果和热负荷的影响

从图 5 可以发现,随着侧线采出流量的增加,醋酸乙烯的质量分数变化显著,冷凝器的热负荷也随之变化较大,这是因为侧线采出流量的增大,侧线产品中重组分含量变大,导致纯度下降,同时塔顶的重组分采出量减少,降低了冷凝器所需热负荷。当侧线采出流量大于 155 kmol/h 时,醋酸乙烯的质量分数已不符合要求。综合考虑,选择侧线采出流量为 155 kmol/h。

### 2.4 液相分配比的分析

液相分配比是指从主塔某块塔板流向副塔的液

相流量与该板总液相流量的比值。在进料状态,采出位置、采出流量和回流比等其他条件不变的情况下,考察不同的液相分配比对分隔壁塔分离效果和热负荷的影响。分析结果如图 6 所示。



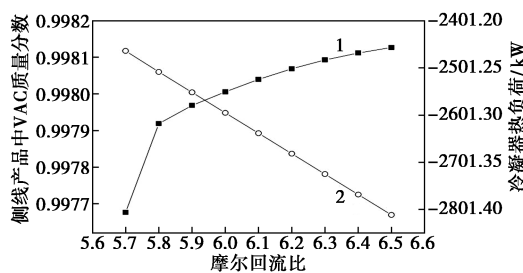
1—侧线产品中的 VAC 质量分数;2—冷凝器热负荷

图 6 液相分配比对分离效果和热负荷的影响

从图 6 可以发现,当液相分配比增加时,醋酸乙烯质量分数增加,冷凝器热负荷先减小后增大,当液相分配比为 0.87 时,冷凝器所需热负荷最小,醋酸乙烯质量分数也符合要求。综合考虑,当液相分配比为 0.87 时,分隔壁塔的分离效果最佳。

### 2.5 回流比的分析

在精馏操作中,回流比是一个重要的参数,回流比的大小对塔的分离程度、操作负荷和操作费用起着重要的作用。在保持塔的各项操作条件不变的情况下,考察回流比的变化对分隔壁塔的分离效果和热负荷的影响。分析结果如图 7 所示。



1—侧线产品中的 VAC 质量分数;2—冷凝器热负荷

图 7 回流比对分离效果和热负荷的影响

从图 7 的分析结果可以发现,和传统的精馏方法类似,回流比增大,醋酸乙烯质量分数越大,相应的冷凝器的热负荷也越高,当回流比为 6.0 时,醋酸乙烯质量分数已满足要求,若继续增大回流比,所需要的热负荷也随之增加。综合考虑,在满足分离要求的同时保证能耗最低,所以选取较为合适的回流比为 6.0。

## 3 常规精馏与分隔壁塔的能耗分析

在进料条件相同的情况下,2 种流程完成相同

的分离任务,比较两者各自所需消耗的冷凝器热负荷和再沸器热负荷大小。分析结果如表2所示。

表2 常规精馏与分隔壁塔能耗比较 kW

	冷凝器热负荷	再沸器热负荷
常规精馏 T2	-2210.48	3008.21
常规精馏 T3	-1379.99	2713.67
常规精馏总计	-3590.47	5721.88
分隔壁塔	-2596.24	4729.52

由表2可知,在相同的进料组成和分离任务情况下,通过 Aspen Plus 模拟结果表明,分隔壁塔比常规精馏的分离能耗要节约 27.69% 的冷凝器热负荷,节约 17.34% 的再沸器热负荷。

#### 4 不同的醋酸乙烯进料组成对产品单位能耗的影响

在保持分隔壁塔的主塔和副塔理论塔板数不变,且分离任务也不变的情况下,改变进料中醋酸乙烯的质量分数来考察产品单位能耗的变化情况。其中单位能耗的计算参照《石油化工设计能耗计算标准》(GB/T 50441—2016)。分析结果如表3所示。

表3 VAC 进料质量分数对单位能耗的影响

进料中 VAC 质量分数	0.976	0.950	0.930
VAC 产量/(t·h <sup>-1</sup> )	13.34	8.61	6.72
消耗 0.3 MPa 蒸汽/(t·h <sup>-1</sup> )	7.77	12.99	30.88
蒸汽折算成标准油/(kg·h <sup>-1</sup> )	512.68	857.54	2037.36
单位能耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	38.42	99.60	303.44

从表3可以发现,当进料中醋酸乙烯质量分数从 97.6% 变为 95% 时,单位能耗(折标准油)增加了 61.18 kg/t,当变为 93% 时单位能耗增加了 265.02 kg/t,醋酸乙烯质量分数的降低是因为进料中低沸物和高沸物杂质的增加,其中低沸物较为容易分离,但高沸物醋酸乙酯与产品醋酸乙烯同属于有机溶剂,相互溶解,因此较难分离,所以要得到高纯度的醋酸乙烯必然要增加更多的蒸汽。

#### 5 结论

(1) 运用 Aspen Plus 软件对某厂醋酸乙烯精制工段进行了分隔壁塔模拟,在与常规精馏相同的进料条件和分离任务情况下,得到了最佳的工艺参数:分隔壁塔的主塔理论板数为 65 块板;副塔的理论板数为 15 块板;进料位置为副塔的第 1 块板,其中阻

聚剂 PBQ 进料位置也为副塔的第 1 块板;副塔的气相回流采出位置为主塔的第 14 块板,副塔的气相回流采出位置为主塔的第 36 块板;侧线采出的位置为主塔的第 27 块板;侧线采出流量为 155 kmol/h;液相分配比为 0.87;摩尔回流比为 6.0。

(2) 通过能耗分析,与常规双塔精馏相比,分隔壁塔精馏的冷凝器热负荷降低了 27.69%,再沸器热负荷降低了 17.34%。

(3) 通过改变进料中醋酸乙烯质量分数来分析单位能耗的变化,得出了随着进料中醋酸乙烯质量分数的降低,单位能耗会大幅度增加,这也间接说明了在实际生产中若分隔壁塔的塔釜加热蒸汽量突然增大,则很可能是某个工段出了问题。

#### 参考文献

- [1] Han Y, Kumar D, Sivadinarayana C, *et al.* Kinetics of ethylene combustion in the synthesis of vinyl acetate over a Pd/SiO<sub>2</sub> catalyst [J]. *Journal of Catalysis*, 2004, 224(1): 60-68.
- [2] 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.
- [3] Luster E. Apparatus for fractionating cracked products: US, 1915681A[P]. 1933-06-27.
- [4] Dejanovic I, Matijasevic L. Dividing wall column: A breakthrough towards sustainable distilling [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2010, 49(6): 550-580.
- [5] 马晨皓, 曾爱武. 隔壁塔流程模拟及节能效益的研究[J]. *化学工程*, 2013, 41(3): 1-5.
- [6] Errico M, Tola G, Rong B, *et al.* Energy saving and capital cost evaluation in distillation column sequences with a divided wall column [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87(12): 1649-1657.
- [7] 何振斌, 方利国, 杜嘉伟, 等. 隔板塔特性模拟研究[J]. *广东化工*, 2013, 40(12): 1-2.
- [8] 刘诗尧, 李凭力, 赵雅静, 等. 隔壁塔应用于萃取精馏技术的研究进展[J]. *现代化工*, 2019, 39(6): 65-69, 71.
- [9] 杨杰, 祁江羽, 沙勇. 反应精馏隔壁塔制甲缩醛过程模拟与分析[J]. *化工学报*, 2019, 70(3): 960-968.
- [10] 李春利, 董立会, 马帅明, 等. 共沸-反应精馏隔壁塔制备乙酸乙酯的实验与模拟研究[J]. *现代化工*, 2017, 37(10): 197-200.
- [11] Neau E, Escandell J, Nicolas C. Modeling of highly nonideal systems: I. A generalized version of the NRTL equation for the description of low-pressure equilibria [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(16): 7580-7588.
- [12] Gebreyohannes S, Neely B, Gasem K. Generalized interaction parameter for the modified nonrandom two-liquid (NRTL) activity coefficient model [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(52): 20247-20257. ■