

基于 UD-Aspen 的间歇精馏过程 优化设计研究

王传昌,许保云,艾波,翟金国*,吴高胜,李良君
(上海化工研究院 精细化工研究所,上海 200062)

摘要:提出了基于均匀设计(UD)-Aspen 耦合优化间歇精馏过程的方法,并以天然香料 β -苯乙醇粗产品高真空间歇精馏提纯过程优化技术研究为例,探索该方法对间歇精馏过程优化的可行性。通过均匀设计方法确定间歇精馏模拟的试验方案,利用 Aspen Plus 软件建立 β -苯乙醇间歇精馏过程的模型,计算各试验方案的工艺参数。经过优化可得 β -苯乙醇产品单程收率为 75.49%,操作时间为 6.22 h,能耗为 3.614×10^4 kJ。

关键词:均匀设计; Aspen 模拟; 间歇精馏; 优化

中图分类号: TQ028

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)09-0175-03

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.09.043

Optimization of operation conditions of batch distillation based on UD-Aspen

WANG Chuan-chang, XU Bao-yun, AI Bo, ZHAI Jin-guo*, WU Gao-sheng, LI Liang-jun
(Fine Chemical Institute, Shanghai Research Institute of Chemical Industry, Shanghai 200062, China)

Abstract: A method based on uniform design and Aspen model is developed for the optimization of batch distillation. Taking the high vacuum distillation of the crude product of the natural flavor (β -benzene ethanol) as an example, the feasibility of the optimization of batch distillation is explored. The experimental scheme of batch distillation simulation is determined by uniform design method. The model of the batch distillation process of the β -benzene ethanol is established by using Aspen Plus software. The technological parameters of each test plan are calculated. The yield, the operation time and the energy consumption are 75.49%, 6.22 h and 3.614×10^4 kJ, respectively, after optimization.

Key words: uniform design; Aspen model; batch distillation; optimization

随着精细化工和医药化工等行业的发展,间歇精馏^[1]被广泛应用于小批量、多组分、多产品和高附加值产品的生产过程中,对间歇精馏过程的研究也获得了国内外学者的重视。间歇精馏过程是一种非稳态操作过程,其塔内浓度分布和温度分布均随时间和空间的变化而改变,给操作和控制带来很大的困难,因此对于间歇精馏塔的动态特性及操作条件进行研究,探索间歇精馏过程的优化技术,对于提高工业间歇精馏装置的效益具有理论和现实意义^[2-4]。

均匀设计是一种只考虑试验点在试验范围内均匀散布的试验设计方法,相对于正交设计方法,均匀设计只考虑“均匀分布”,从而使实验次数大大减

少,为实验过程节约大量时间^[5]。

本文中提出了基于 UD-Aspen 的间歇精馏过程耦合优化新方法,以天然香料 β -苯乙醇粗产品高真空间歇精馏提纯的优化技术研究为例,介绍该方法在间歇精馏过程优化设计中的应用。

1 Aspen 模型的建立与验证

对 β -苯乙醇粗产品间歇精馏过程进行模拟计算,使用商业流程模拟软件 Aspen plus 中的 BatchFrac 模型模块进行建模,模型验证采用实验室小试装置。模型相应地简化^[6]:①相比于液体持液量而言,蒸汽持汽量忽略;②塔板为理论塔板;③恒定的相对挥发度;④每块塔板的持液量恒定;⑤等摩尔流量

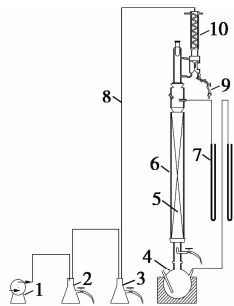
收稿日期:2016-01-26

基金项目:上海市自然科学基金项目(14ZR1420800);上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目(201411-PT-C104-028)

作者简介:王传昌(1991-),男,硕士生;翟金国(1975-),男,高级工程师,主要从事化工装备开发、香料香精技术的中试及产业化等方面的工作,通讯联系人,021-52801132-3101,oldzhai@163.com。

假设。

模型验证实验在减压精馏塔内进行,实验装置如图 1 所示,该装置主要包括精馏塔塔体、蒸馏釜、冷凝器。塔体采用内径为 23 mm 的玻璃柱,塔高 1 m,内装金属矩形螺旋圈不锈钢散堆填料;塔釜为 1 L 的三颈圆底烧瓶,分别连接温度计、U 型压差计、塔体和釜液采出管线。塔釜采用导热油加热,塔身用保温带保温,塔顶装有冷凝器,用低温水冷凝塔顶蒸气;原料一次性加入塔釜内,回流比用继电器和电磁铁控制,塔顶、塔釜采出样品用气相色谱仪分析其组成。



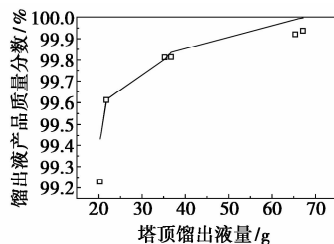
1—真空泵;2—缓冲罐 1;3—缓冲罐 2;4—塔釜;
5—填料;6—塔体;7—U 型测压管;8—真空系统管路;
9—取样系统;10—冷凝器

图 1 减压精馏实验装置

验证实验中塔釜加入原料 300.2 g,原料中 β -苯乙醇质量分数为 99%,在 0~2.33 h 是产生回流及全回流阶段,2.33~7 h 回流比是 40:4,7~8.33 h 回流比是 20:5。模型的初始条件与验证实验相同,选用的热力学模型是 UNIFAC,由于原料组成复杂,其中能经过气相色谱仪检测出来的物质就达 75 种,而模型中仅选用含量相对较高的部分组分输入,仅持液量和理论塔板数属于可调整参数。

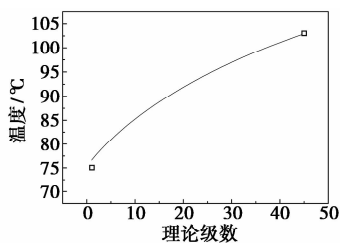
Aspen Plus 模拟结果与实验室小试研究结果如图 2 和图 3 所示。图 2 为塔顶 β -苯乙醇产品馏出液浓度 Aspen 模拟值与实验值比较,图 3 为全回流稳定后各级理论板温度的模拟值与实验值对比。在本验证实验中由于实验条件的限制,仅测量了塔顶和塔釜的温度,所以图 3 所示温度实验值只有 2 个。从图 3 上可以看出,实验测量的 2 个温度值与模型模拟中第一块和最后一块理论板温度平均相对误差为 2.0%,在工程允许的误差范围内,从而可以判断实验过程中随塔高的温度分布与模型模拟的温度分布相符。同时从图 2、图 3 中可以看出,不同时间塔顶 β -苯乙醇产品馏出液浓度和温度的实验值均与

模拟值吻合良好,选择 UNIFAC 热力学模型以及组分简化对本工艺流程模拟是可行的,从而验证了所建立的 Aspen 模型的可靠性,可以在此基础上进行模拟。



□—实验值;—模拟值

图 2 塔顶 β -苯乙醇产品馏出液的模拟值与实验值对比



□—实验值;—模拟值

图 3 各级理论板温度模拟值与实验值对比

2 均匀试验设计及模型模拟

2.1 优化参数的确定

在间歇精馏过程中,影响产品单程收率、操作时间和能耗的因素有很多,为了降低精馏过程控制的难度,减少精馏过程的波动性,选择几个对单程收率、操作时间和能耗影响比较大的因素作为优化参数,其中回流比的影响最大^[7],压力和塔釜加热功率对过程的影响也比较大。为了使产品经济效益最大化,需要优化主要操作参数。

间歇精馏模拟所用原料是生物发酵法制备的天然香料 β -苯乙醇粗产品,原料进料量 6 kg,其中原料组成中 3-甲基丁酸等轻组分含量为 0.23% (质量分数,下同), β -苯乙醇含量为 99%,苯甲酸苯乙酯等重组分含量为 0.77%。在优化过程中固定部分设计参数和操作参数,如理论塔板数是 65 块,全塔压降是 1.2 kPa,冷凝器持液量是 0.001 kg,每块塔板持液量是 0.001 kg。整个分离过程分为 4 个阶段,依次是全回流阶段、轻馏分阶段、过渡馏分阶段和产品阶段,其中每个阶段的停止条件依次是全回流 2 h, β -苯乙醇瞬时含量达 99.9%、 β -苯乙醇累

积含量达 77% 和全部采出量为 5.935 kg。研究冷凝器压力、轻馏分阶段回流比、过渡馏分阶段回流比、轻馏分阶段加热功率和过渡馏分阶段加热功率对产品单程收率、操作时间和能耗的影响。

2.2 均匀试验设计及 Aspen 模拟结果

均匀试验设计是一种实验安排方法^[8],由于考虑到因素间的交互作用,对于间歇精馏过程优化有很好的适用性。

根据经验和单因素优化各操作参数较优值,同时为了保证塔系统安全有效地运转,将操作变量的实验范围设为不低于单因素较优值上下的 20% 浮动空间,确定各待优化参数的取值范围,如表 1 所示。

表 1 待优化参数取值范围

待优化参数	范围
冷凝器压力(绝压)/Pa	200 ~ 750
轻馏分回流比	10 ~ 32
过渡馏分回流比	10 ~ 32
轻馏分加热功率/kW	0.7 ~ 3.2
过渡馏分加热功率/kW	0.7 ~ 3.2

在实验方案安排过程中,选用 $U_{12}^*(12^{10})$ 的均匀设计表进行本次模拟的均匀试验设计,设计方案列于表 2。

表 2 $U_{12}^*(12^{10})$ 实验方案安排表及模拟结果

序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	$y_3 \times 10^{-3}$
1	200	14	16	3.1	4	68.61	6.69	57.49
2	250	20	24	1.9	3.7	71.52	5.26	33.23
3	300	26	32	0.7	3.4	75.49	6.22	36.14
4	350	32	14	3.4	3.1	61.03	4.99	30.28
5	400	12	22	2.2	2.8	68.24	5.58	32.94
6	450	18	30	1.0	2.5	73.38	6.42	35.89
7	500	24	12	3.7	2.2	56.27	5.34	28.84
8	550	30	20	2.5	1.9	65.29	6.55	34.02
9	600	10	28	1.3	1.6	71.07	7.57	35.60
10	650	16	10	4.0	1.3	50.29	6.37	27.22
11	700	22	18	2.8	1.0	63.14	8.74	32.51
12	750	28	26	1.6	0.7	69.96	12.3	36.04

注: x_1 为冷凝器压力,Pa; x_2 为前馏分阶段回流比; x_3 为过渡馏分阶段回流比; x_4 为前馏分阶段加热功率,kW; x_5 为过渡馏分加热功率,kW; y_1 为单程收率,%; y_2 为操作时间,h; y_3 为能耗,kJ。

2.3 优化结果

对于间歇精馏过程,通常希望产品的单程收率

最高、操作时间最短、能量消耗最低。但在实际生产过程中,由于目的不同,优化的重点也不一样。本研究优化的目的是产品的单程收率最高,操作时间和能量消耗在可接受的范围内即可。本研究采用直观分析法寻优,从表 2 中可以看出,序号 3 的操作参数组合单程收率最高,操作时间和能量消耗也比较低,在可接受的范围内,即冷凝器压力为 300 Pa,前馏分阶段回流比为 26,过渡馏分阶段回流比为 32,前馏分阶段加热功率为 0.7 kW,过渡馏分阶段加热功率为 3.4 kW。所得到单程效率为 75.49%,操作时间为 6.22 h,能耗为 3.614×10^4 kJ。

3 总结

提出了基于 UD-Aspen 耦合优化间歇精馏过程优化设计的方法,并以天然香料 β -苯乙醇粗产品高真空间歇精馏提纯过程优化技术研究为例,探索该方法对间歇精馏过程优化的可行性。研究结果表明,经过优化设计可得 β -苯乙醇产品的单程收率为 75.49%,操作时间为 6.22 h,能耗为 3.614×10^4 kJ,该结果对实际生产过程具有指导意义。研究的优化方法也为今后的间歇精馏过程优化提供了一种新的思路。

致谢:感谢上海化工研究院徐静安教授对本文的指导和帮助!

参考文献

- [1] 王浩平,项曙光. 间歇精馏过程模拟优化研究进展[J]. 计算机仿真,2004,21(2):4-6.
- [2] 李飘英,邹德正. 新型网波填料塔的间歇精馏优化操作的研究[J]. 精细化工,1993,(2):40-43.
- [3] Kim K J, Diwekar U M. Comparing batch column configurations; Parametric study involving multiple objectives[J]. Aiche Journal,2000,46(12):2475-2488.
- [4] Young S. Distillation principles and processes[J]. Nature,1922,109(2736):434-435.
- [5] 董敬莎,孙晓燕,牛博英. 正交和均匀实验设计方法的比较[J]. 科技视界,2013,(22):78-78.
- [6] Kim Y H. Optimal design and operation of a multi-product batch distillation column using dynamic model[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification,1999.38(1):61-72.
- [7] Coelho T C,Souza O,Sellin N, et al. Analysis of the reflux ratio on the batch distillation of bioethanol obtained from lignocellulosic residue[J]. Procedia Engineering,2012,42:131-139.
- [8] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001. ■