

热集成变压精馏分离异丙醇-异丙醚混合物的动态控制

叶青,熊晓娟,秦继伟

(常州大学石油化工学院,江苏常州 213164)

摘要:在稳态模拟的基础上,对热集成变压精馏流程的动态控制性能进行了研究与分析。根据流程特点建立了合理的控制方案,用 Aspen Dynamics 软件对控制方案行了模拟。模拟结果表明,通过3个温度控制回路(用高压塔回流股物料中换热器的热负荷控制回流股的温度;用高压塔再沸器热负荷控制低压塔第16块板的温度;采用压力补偿温度控制结构,用高压塔塔顶回流比控制高压塔第24块板温度)可较好地控制热集成变压精馏流程,该控制结构动态可控性强,各指标均能在干扰施加后较短时间内达到稳定,对各项干扰的稳定性能良好。

关键词:异丙醇;异丙醚;变压精馏;动态控制;热集成

中图分类号:TQ028.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)02-0156-04

Dynamic control of isopropanol-diisopropyl ether separation by heat integration pressure swing distillation

YE Qing, XIONG Xiao-juan, QIN Ji-wei

(Institute of Petrochemical Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Control strategy of heat integration pressure swing distillation process for separation of isopropanol and diisopropyl is studied on basis of steady-state simulation. A reasonable control system is built based on the process features and Aspen Plus Dynamics is used to simulation the process. The simulation results show that the PI control scheme with three temperature loops can achieve reasonable control performance, which include the recycle temperature control for high pressure column by manipulating the heat duty of the heater for the recycle of high pressure, the temperature control for stage 16 in the low pressure column by manipulating the reboiler duty of the high pressure column and the temperature control for stage 24 in the high pressure column by manipulating the reflux ratio in the high pressure column in combination with the pressure-compensated-temperature system. Heat integration pressure swing distillation process has good dynamic controllability and resistance to interference. It indicates that this control system has good performance in dynamic characteristics.

Key words: isopropanol; isopropyl ether; pressure distillation; dynamic control; heat-integration

在化工过程中,精馏是最普遍使用的分离方法,是根据液体混合物中各组分间的相对挥发度不同的原理来分离混合物^[1]。很多共沸物的共沸组成会随压强改变,所以在理论上可以通过改变压强的方法来分离共沸物。变压精馏就是利用这一特性,利用两塔的压力差来改变共沸物的组成,因而可以有效分离共沸体系^[2]。赵俊彤等^[3]提出了采用变压精馏精制甲缩醛和甲醇的新工艺方法,李春山等^[4]研究的碳酸二甲酯和甲醇的加压-常压分离工艺得到高纯度的碳酸二甲酯。近年来,出现了大量关于热集成变压精馏的文章^[5-7],在变压精馏中将高压塔的冷凝器和低压塔再沸器之间热交换,能达到很好的节能效果。但由于采用了两塔的热集成,使得精馏过程的非线性和操纵变量的耦合关系变得更为

复杂,两塔的控制变量与控制回路的选择更加困难^[8-9],所以热集成变压精馏的控制技术一直是限制其进一步发展的瓶颈。

异丙醇(IPA)是世界上最早生产的石油化工产品之一,主要用于生产丙酮和用作溶剂,在异丙醇生产过程中存在副反应产生异丙醚^[10]。由于异丙醇-异丙醚形成二元共沸物,应用常规的精馏方法难以对其进行有效的分离,可采用热集成变压精馏进行分离。

本文中采用热集成变压精馏分离异丙醇-异丙醚共沸物,通过对流程操作性能的分析,确立了热集成变压精馏的控制方案,利用 Aspen Dynamics 软件考察了该控制方案的可行性,并对完全热集成变压精馏过程的动态可控性能进行了分析,为热集成变

压精馏流程在工业上的应用提供了理论依据。

1 热集成变压精馏的稳态模拟

异丙醇、异丙醚混合物以 100 kmol/h 进料,进料组成为异丙醇摩尔分数 75%。采用常压-高压两塔精馏流程来分离该混合物,高压塔操作压力在 0.4 MPa。常压塔(LPC)塔底出料为异丙醇,高压塔(HPC)塔底出料为异丙醚,高压塔塔顶物料返回常压塔继续精馏。

图 1 是热集成变压精馏工艺流程图,由常压塔和高压塔组成。常压塔的塔板数为 20,高压塔的塔板数为 28。异丙醇和异丙醚组成的混合物 F 从常压塔的第 13 块板进料,在 LPC 塔底得到高纯度的异丙醇。常压塔塔顶的异丙醇和异丙醚共沸物作为原料从第 20 块板进入高压塔,在高压塔塔底得到高纯度的异丙醚。高压塔塔顶的异丙醇和异丙醚共沸物循环至常压塔从第 11 块板进入常压塔。调节高压塔的回流比使高压塔塔顶气体作为常压塔塔釜再沸器的热源。产品要求异丙醇和异丙醚产物的摩尔

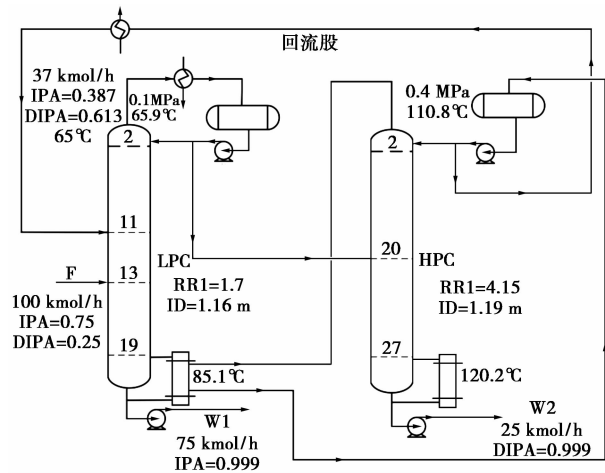


图 1 热集成变压精馏工艺流程图

表 1 热集成变压精馏分离异丙醇-异丙醚混合物的稳态模拟结果

塔	常压塔(LPC)	高压塔(HPC)
塔径/m	1.16	1.01
进料板位置	13	20
回流比	1.70	4.15
回流量/(kmol·h ⁻¹)	62	37
冷凝器能耗/(GJ·h ⁻¹)	5.32	5.61
塔顶温度/°C	66.17	110.84
再沸器能耗/(GJ·h ⁻¹)	5.61	6.35
塔釜温度/°C	85.10	120.22

分数达到 0.999。热集成变压精馏分离异丙醇-异丙醚混合物的稳态模拟结果如表 1 所示。

由表 1 可知,常压塔塔釜再沸器所需热量为 5.61 GJ/h,而高压塔塔顶冷凝器可放出热量 5.61 GJ/h,且高压塔由于在 0.4 MPa 下操作,塔顶蒸汽温度可达到 110.84°C,比常压塔塔釜温度高 25°C 以上,故高压塔塔顶冷凝器放出的热量可提供给常压塔塔釜再沸器,可将这 2 部分的热量进行热集成。

2 热集成变压精馏的控制设计

精馏塔是一个多输入多输出的多变量过程,其内在机理复杂,变量之间相互关联,在有干扰的情况下,变量变化复杂,严重时系统可能无法收敛,从而加深了精馏过程控制的难度。在精馏塔操作中一般是选择某块塔板的温度作为间接质量控制指标,因为温度控制反映快,所需投资小。本文中以灵敏板温度来间接控制产品质量,而对于温度控制点的选择,根据 Luyben^[11]归纳的方法可知,常压塔的灵敏板为第 16 块板,高压塔的灵敏板为第 24 块板,故温度控制点分别是常压塔的第 16 块和高压塔的第 24 块板。

在精馏塔中,每一块塔板的温度都是组分和压力的函数,影响温度变化的因素可以是组分,也可以是压力。当 2 个组分的相对挥发度相差很小,由于组分变化所引起的温度变化比起压力变化引起的温度变化要小得多,微小的压力波动也会造成明显的温度变化。对于热集成变压精馏流程,由于高压塔塔顶冷凝器的热量需与常压塔塔釜再沸器的热量相等,此时高压塔的压力是不能被控制的,当进料流量或进料组成发生扰动时,必然导致高压塔压力发生变化,而压力改变也将使高压塔灵敏板温度发生变化,将会影响到温度控制效果。此时为了实现两塔的热集成,可采用压力补偿温度控制方法来补偿由于压力的改变引起的温度变化,从而得到更好的控制效果。

热集成变压精馏流程的控制目标是在进料流量或组分扰动后,能保证异丙醇和异丙醚的产品摩尔分数达到 0.999 以上。为了保证两塔塔底产品的纯度达到规定的指标,同时更好地控制热集成变压精馏流程,采用压力补偿温度控制方法,控制结构如图 2。

由图 2 可知,控制方案中主要有 1 个压力控制回路,即常压塔塔顶冷凝器热负荷控制常压塔的压力;4 个液位控制回路,分别是两塔的塔顶出料流量

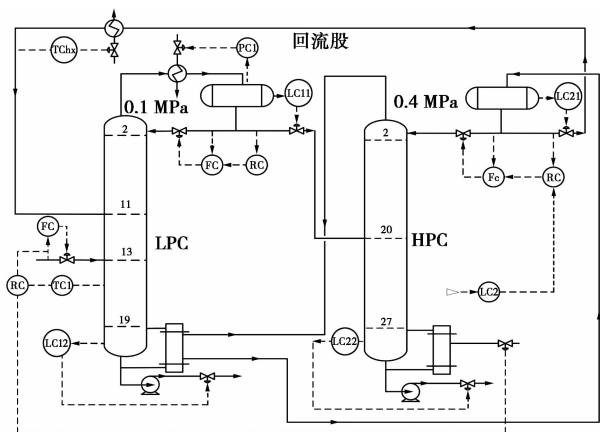


图 2 热集成变压精馏塔的控制结构图

控制塔顶回流罐液位和两塔的塔釜出料流量控制塔釜液位;3 个温度控制回路,分别是高压塔回流股物料中换热器的热负荷控制回流股的温度,高压塔的再沸器热负荷控制常压塔第 16 块板的温度,该控制采用前馈控制结构,高压塔塔顶回流比控制高压塔第 24 块板温度,该控制采用压力补偿温度控制结构,消除高压塔塔压变化引起的控制的不稳定。

对于温度控制回路,使用中继-反馈测试计算每个温度控制回路 PID 控制器的积分时间(τ_i)和积分增益(K_c)。该控制方法的 PID 控制器的参数及结果如表 2 所示。

表 2 压力补偿温度控制法的 PID 的参数及结果

	控制器		
	TC1	TC2	TC _{hx}
被控变量	$T_{1,16}$	$T_{2,24}$	$T_{recycle}$
操纵变量	Q_{r2}	R_{r2}	Q_{hx}
积分增益 K_c	1.94	19.74	1.58
积分时间 τ_i/min	22.44	14.52	1.32

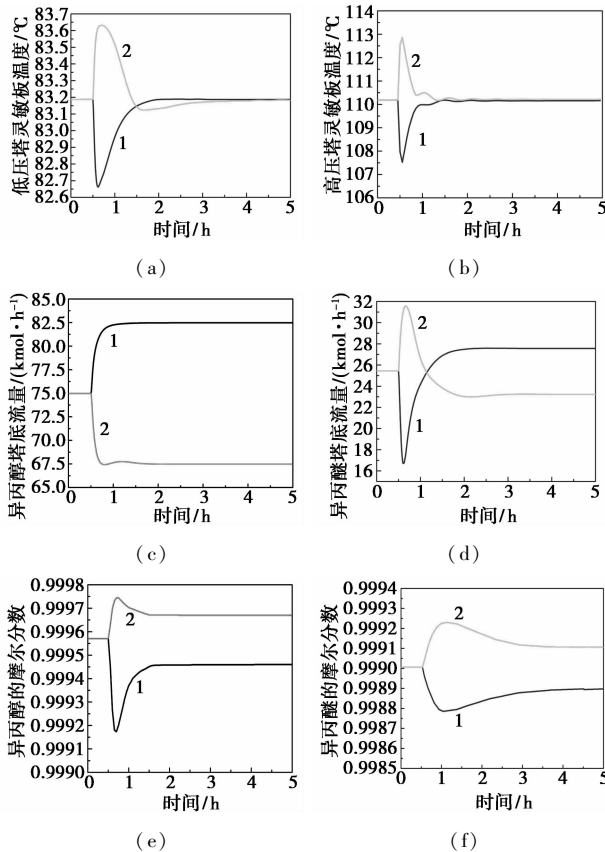
注: $T_{1,16}$ 为 LPC 的第 16 块塔板的温度; $T_{2,24}$ 为 HPC 的第 24 块塔板的温度; $T_{recycle}$ 为 HPC 塔顶回流股的温度; Q_{r2} 为 HPC 的再沸器热量; R_{r2} 为 HPC 的塔顶回流比; Q_{hx} 为 HPC 塔顶回流股的冷凝器的热量。

3 热集成变压精馏流程的动态性能

精馏塔的主要干扰因素为进料流量、进料组分。本文中对建立的上述热集成变压精馏流程的控制系统采用 Aspen Dynamics 软件进行动态模拟,对进料流量和进料组成 2 个干扰因素进行测试,分析两塔塔底产品组成、流量和灵敏板温度对于干扰因素的响应变化。

为测试该动态控制方法的性能。在 Aspen

Dynamics 软件上模拟平稳运行 0.5 h 后,分别加入进料流量扰动和进料组分扰动,灵敏板温度、塔釜出料量和塔底产品组成的响应如图 3 和图 4。



1—摩尔分数 +10% 进料流量;2—摩尔分数 -10% 进料流量

图 3 进料流量加入 ±10% 扰动的动态响应曲线

图 3 为各控制指标对进料流量加入 ±10% 扰动的动态响应曲线,其中 IPA 为异丙醇,DIPE 为异丙醚。从图 3 可知,该控制方案对流量扰动具有良好的抗干扰性能。当在 0.5 h,施加进料量 ±10% 扰动,两塔的灵敏板温度、塔底流量以及塔底产品的组成开始出现波动。图 3 的(a)和(b)分别表示低压塔和高压塔的灵敏板温度对扰动的响应,在 0.5 h 加入扰动后,低压塔灵敏板的温度由 83.2℃ 上升到峰值 83.6℃ 或下降到谷值 82.7℃;高压塔灵敏板的温度由 110℃ 上升到峰值 113℃ 或下降到谷值 107.5℃,然后变化趋于平缓,且在 3 h 可恢复到 83.2℃。图 3 的(c)和(d)分别表示两塔的塔底产品流量对扰动的响应,在 0.5 h 分别加入进料量 ±10% 扰动,两塔塔底产品流量出现了相应的增减,分别在 1 h 和 2 h 后达到了稳定状态。图 3 的(e)和(f)分别表示两塔的塔底产品的组成对扰动的响应,在 0.5 h 分别施加进料流量 ±10% 扰动,两塔塔釜产品的摩尔分数出现波动,但在 3 h 后可恢复稳定,

并且可使产品的摩尔分数达到 99.8% 以上。该控制方法对于进料量扰动有较好的抗干扰能力。

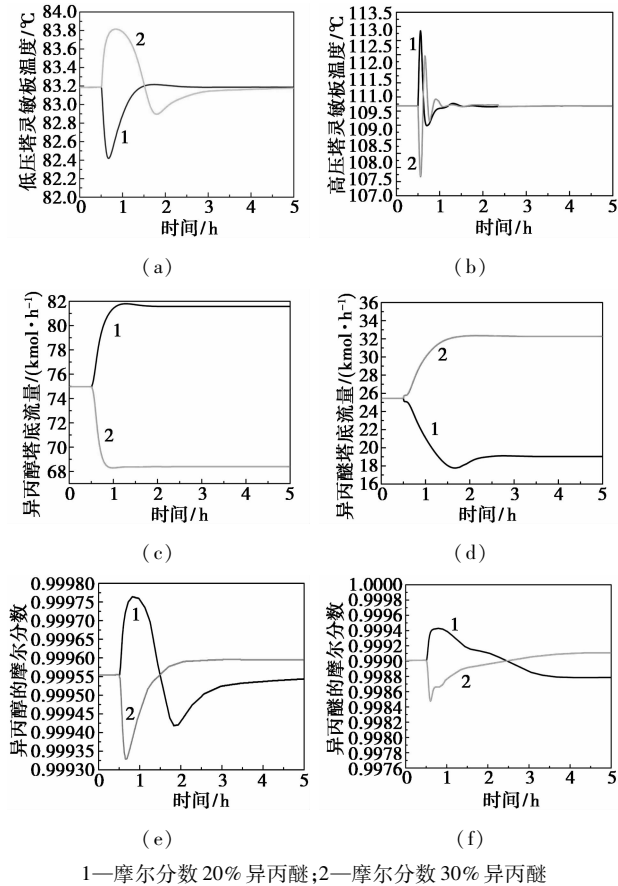


图 4 异丙醚摩尔浓度加入 $\pm 5\%$ 扰动的动态响应曲线

图 4 为热集成变压精馏流程各控制指标对异丙醚摩尔浓度加入 $\pm 5\%$ 扰动的动态响应曲线,其中 IPA 为异丙醇,DIPE 为异丙醚。从图 4 可知,该控制方案对组成扰动具有良好的抗干扰性能。图 4 的 (a) 和 (b) 分别表示低压塔和高压塔的灵敏板温度对组分扰动的响应,当在 0.5 h,对异丙醚摩尔浓度加入 $\pm 5\%$ 扰动,两塔灵敏板温度出现波动,但在 3 h 后即可达到稳定。图 4 的 (c) 和 (d) 分别表示两塔的塔底产品流量对组分扰动的响应,当异丙醚摩尔浓度加入 $\pm 5\%$ 扰动后,两塔塔底产品流量出现了相应的增减,且分别经过 1 h 和 2 h,塔釜出料量达到稳定。图 4 的 (e) 和 (f) 分别表示两塔的塔底产品的组成对扰动的响应,当对异丙醚摩尔浓度加入 $\pm 5\%$ 扰动后,两塔塔釜产品的摩尔分数出现相应的峰(谷)值后在 3 h 即可稳定,并使产品的摩尔分数达到 99.8% 以上。该控制方法对于进料组分扰动同样有较好的抗干扰能力。

4 结论

采用热集成变压精馏分离异丙醇-异丙醚混合物,可得到高摩尔分数的异丙醇和异丙醚。

对热集成精馏流程分离异丙醇-异丙醚混合物的动态控制方案进行了研究,得到了动态可控性良好的控制方案。采用高压塔回流股物料中换热器的热负荷控制回流股的温度;采用前馈控制结构,用高压塔再沸器热负荷控制低压塔第 16 块板的温度;采用压力补偿温度控制结构,用高压塔塔顶回流比控制高压塔第 24 块板温度。模拟结果显示,该方案动态响应较快,稳定性强,对进料流量和进料组成干扰均有较好的抗干扰性能。动态模拟结果表明了所提出的热集成变压精馏控制方案的动态性能切实可行,为其工业化应用提供了设计依据。

参考文献

- [1] Perry R H, Green D W. Perry's chemical engineers' hand-book [M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [2] Gmehling J, Menke J, Krafczyk J, et al. Azeotropic data [M]. New York: Wiley, 2004.
- [3] 赵俊彤,熊伟庭,许春建. 变压精馏分离甲缩醛与甲醇混合物过程[J]. 化工进展, 2011, 30(17): 62-64.
- [4] 李春山,张香平,张锁江,等. 加压-常压精馏分离甲醇碳酸二甲酯的相平衡和流程模拟[J]. 过程工程学报, 2003, 3(5): 453-458.
- [5] Luyben W L. Design and control of a fully heat-integrated pressure-swing azeotropic distillation system [J]. Ind Eng Chem Res, 2008, 47(8): 2681-2695.
- [6] Jihwan Lee, Jungho Cho, Dong Min Kim, et al. Separation of tetrahydrofuran and water using pressure swing distillation: Modeling and optimization [J]. Korean J Chem Eng, 2011, 28(2): 591-596.
- [7] Luyben W L. Pressure-swing distillation for minimum- and maximum-boiling homogeneous azeotropes [J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(33): 10881-10886.
- [8] Yu Baoru, Wang Qiaoyi, Xu Chunjian. Design and control of distillation system for methylal/methanol separation. part 2: Pressure swing distillation with full heat integration [J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(3): 1293-1310.
- [9] 张吕鸿,刘建宾,高鑫. 差压热耦合精馏分离甲基环戊烷/苯过程的动态性能研究 [J]. 现代化工, 2012, 32(11): 97-100.
- [10] 刘杰,刘岗,王洪志. 从异丙醇装置副产中分离精制异丙醚的工艺研究 [J]. 化学工业与工程技术, 2004, 25(5): 8-10.
- [11] Luyben W L. Evaluation of criteria for selecting temperature control trays in distillation columns [J]. J Process Contr, 2006, 16(2): 115-134. ■