

# 双隔壁反应精馏塔的动态特性分析及控制研究

王洁鑫<sup>1</sup>, 韩帅帅<sup>1</sup>, 丁晖殿<sup>2</sup>, 师丽<sup>2</sup>, 李强<sup>2</sup>, 苑杨<sup>1\*</sup>

(1. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029;

2. 中石化石油化工科学研究院有限公司炼油工艺与催化剂国家工程研究中心, 北京 102299)

**摘要:**针对具有最不利相对挥发度排序的四元反应物系, 依据共强化原理得到的双隔壁反应精馏塔(R-DDWDC)能够实现比单隔壁反应精馏塔(R-SDWDC)更高的热力学效率, 但共强化策略的应用对R-DDWDC动态特性及可控性的影响尚不明确。以醋酸和甲醇生成醋酸甲酯和水的酯化反应为例, 通过对比R-DDWDC与R-SDWDC在浓度控制方案下的表现, 系统评估了R-DDWDC的动态特性与可控性。仿真结果显示, R-DDWDC在面对进料流量和组分扰动时展示出优于R-SDWDC的闭环响应性能, 且其各控制回路间的耦合也更小。

**关键词:**共强化; 双隔壁反应精馏塔; 单隔壁反应精馏塔; 过程设计; 过程控制

中图分类号: TQ021.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)10-0265-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.10.042

## Dynamic characteristics analysis and control study of double dividing-wall reactive distillation columns

WANG Jie-xin<sup>1</sup>, HAN Shuai-shuai<sup>1</sup>, DING Hui-dian<sup>2</sup>, SHI Li<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, YUAN Yang<sup>1\*</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. National Engineering Research Center for Petroleum Refining Technology and Catalyst, Sinopec Research Institute of Petroleum Processing Co., Ltd., Beijing 102299, China)

**Abstract:** As for separating quaternary reactive mixtures with the most unfavorable relative volatility ranking, the double dividing-wall reactive distillation column (R-DDWDC) designed upon the co-process intensification methodology achieves higher thermodynamic efficiency than the single dividing-wall reactive distillation column (R-SDWDC). However, the impact of applying co-process intensification on the dynamic characteristics and controllability of R-DDWDC remains unclear. In terms of the esterification reaction between acetic acid and methanol to produce methyl acetate and water, the dynamic characteristics and controllability of R-DDWDC are systematically evaluated through comparing its performance under composition control scheme with that of R-SDWDC. Results indicate that compared to R-SDWDC, R-DDWDC exhibits superior closed-loop response performance when suffering disturbances in feed flow rate and composition. Additionally, the coupling among control loops in R-DDWDC is less pronounced.

**Key words:** co-process intensification; double dividing-wall reactive distillation column; single dividing-wall reactive distillation column; process design; process control

针对具有最不利相对挥发度排序的四元反应物系, 即2个反应物分别是最轻和最重组分, 而2个生成物是次轻和次重组分, 单隔壁反应精馏塔(R-SDWDC)通过物质与能量耦合取得了比传统反应精馏序列(RDS)更高的热力学效率<sup>[1-4]</sup>。然而, 由于R-SDWDC拓扑结构的局限性, 其热力学效率仍有明显的提升空间。为解决此问题, 本课题组之前提出了一种能够协调反应-分离强化与分离-分离强化的共强化设计原理, 并依据此原理推导出一种双隔壁反应精馏塔(R-DDWDC)构型<sup>[5-6]</sup>。Fan等<sup>[7]</sup>

针对具有最不利相对挥发度排序的棕榈酸和异丙醇酯化反应物系, 系统比较了RDS、R-SDWDC和R-DDWDC的稳态性能, 证明了R-DDWDC相较前者具有更高的热力学效率。Zang等<sup>[8]</sup>针对具有最不利相对挥发度排序的理想四元反应物系的研究, 也同样证明了R-DDWDC的节能优势。

上述研究充分证明了R-DDWDC在分离具有最不利相对挥发度排序的四元反应物系时具备优异的稳态性能。但是, 共强化原理的应用对R-DDWDC动态特性与可控性造成了何种影响, 目前

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-08-23

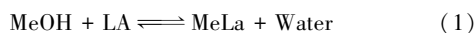
基金项目: 炼油工艺与催化剂国家工程研究中心(中石化石油化工科学研究院有限公司)开放基金项目; 新疆生产建设兵团科技计划重点领域科技攻关项目(2024AB059)

作者简介: 王洁鑫(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为化工过程系统工程, 2022200785@mail.buct.edu.cn; 苑杨(1992-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为化工过程系统工程, 通讯联系人, yuanyang@mail.buct.edu.cn。

尚不明确。一些研究人员针对 R-DDWDC 的操作与控制进行了研究,提出了一些温度或浓度控制方案<sup>[9-12]</sup>,基本验证了 R-DDWDC 的可控性。遗憾的是,这些研究未系统地分析和比较过 R-DDWDC 与其他构型(尤其是 R-SDWDC)的动态特性,因而未能阐明共强化原理的应用对系统动态特性与可控性的影响。本文中将以甲醇(methanol, MeOH)和乳酸(lactic Acid, LA)生成乳酸甲酯(methyl Lactate, MeLa)和水(Water)的酯化反应系统为例,系统地比较 R-DDWDC 和 R-SDWDC 的动态特性与可控性,深度揭示共强化原理的应用对系统动态特性的影响。

### 1 甲醇与乳酸酯化反应仿真实例

MeOH 与 LA 生成 MeLa 和 Water 的酯化反应可用如下反应方程式表示:



LA、MeOH、MeLa 和 Water 在标准大气压下的沸点分别为 490.00、337.85、417.95、373.15 K,符合具有最不利相对挥发度排序的反应物系特征。该反应采用酸性例子交换树脂 Amberlyst15 作为催化剂。本文中在 Aspen Plus V12 中进行稳态仿真,使用 UNIQUAC 模型描述该反应物系的热力学性质,使用基于活度的伪均相动力学模型计算反应速率,反应动力学方程如式(2)所示,相关反应动力学与热力学参数均取自 Sanz 的文章<sup>[13-14]</sup>。具体动力学参数、反应操作条件和产品规格在表 1 中列出。

$$\text{rate}_{i,j} = k_F \exp(-E_F/RT) (\alpha_{LA,i} \alpha_{MeOH,j}) - k_B \exp(-E_B/RT) (\alpha_{MeLa,i} \alpha_{Water,j}) \quad (2)$$

式中,  $k_F$  和  $k_B$  为正向和逆向反应的反应速率,  $\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ;  $E_F$  和  $E_B$  为正向和逆向反应的反应活化能,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;  $T$  为反应温度,  $\text{K}$ ;  $\alpha_i$  与  $\alpha_j$  为组分  $i$  与  $j$  的活度;  $R$  为通用气体常数,一般为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

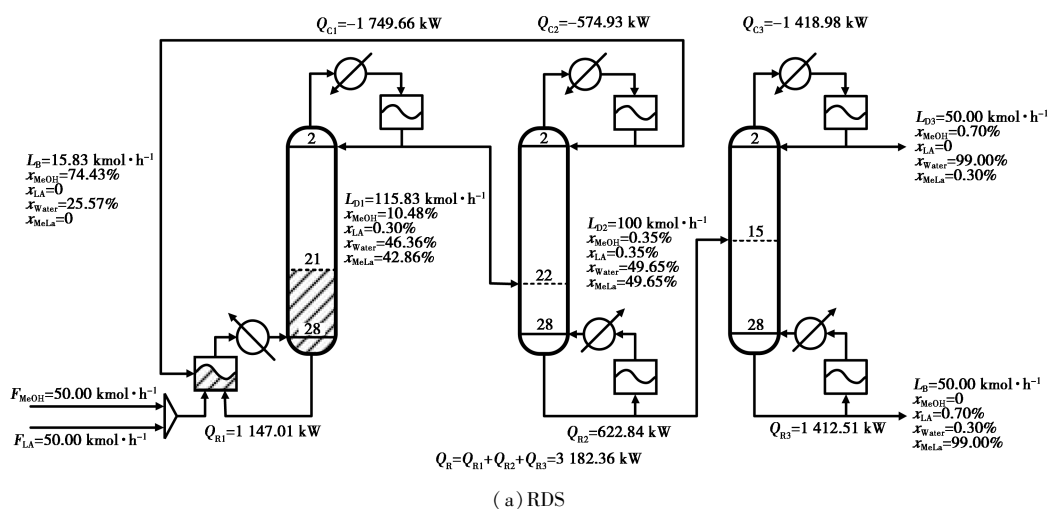
表 1 甲醇与乳酸酯化反应体系的反应动力学参数、操作条件和产品规格

参数名称	数值	
$E_F/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	48.52	
$E_B/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	50.91	
$k_F/(\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$6.96 \times 10^7$	
$k_B/(\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$9.90 \times 10^6$	
塔顶压力/MPa	0.1	
塔压降/atm	0.0068	
反应物进料流量/ $(\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1})$	MeOH	50
	LA	50
产品规格(摩尔分数)/%	MeLa	99
	Water	99

### 2 分离甲醇与乳酸酯化反应物系的 R-DDWDC 与 R-SDWDC 设计

为了客观地评价共强化原理对系统动态特性的影响,在比较 R-DDWDC 与 R-SDWDC 的动态特性之前,有必要将两者的稳态设计在相同设计规格下优化至最优状态。本文中规定 R-DDWDC 与 R-SDWDC 的总塔板数和总催化剂量与用于分离甲醇与乳酸酯化反应的最优 RDS 设计[图 1(a)]相同,该设计通过序贯优化法搜索得到<sup>[15-16]</sup>。在优化过程中,以系统总再沸器热负荷( $Q_R$ )作为目标函数;以产品设计规格作为约束条件;以序贯搜索法作为优化方法。R-SDWDC 的优化决策变量包括内部各塔段塔板数、液相分离比、外部循环物流流量;R-DDWDC 的优化决策变量包括左右内部各塔段塔板数、气液相分离比、外部循环物流流量。

图 1(b)、(c) 分别给出了 R-SDWDC 和 R-DDWDC 的最优稳态设计。可以看到, R-SDWDC 的



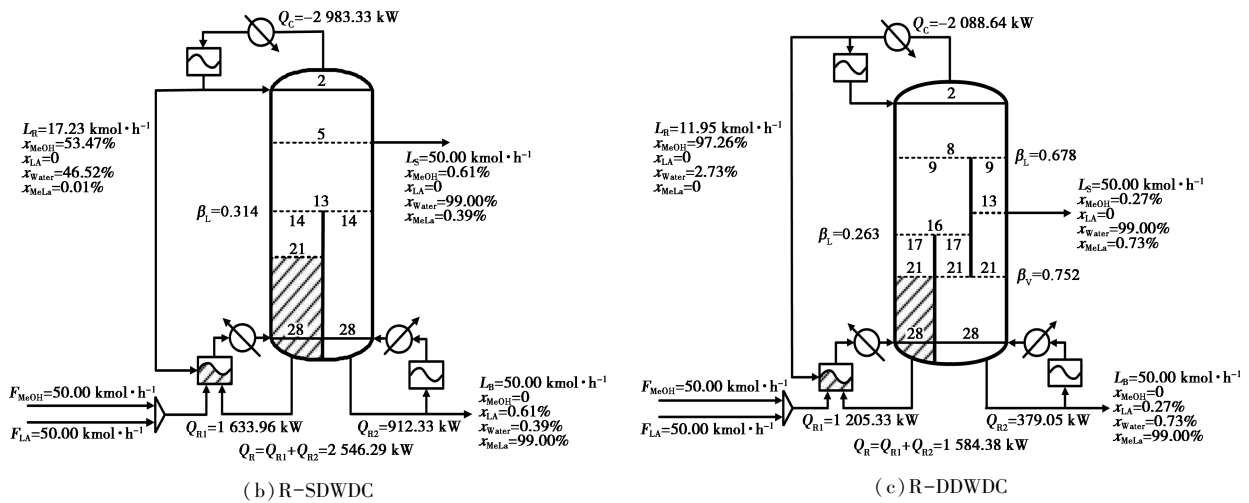


图 1 RDS、R-SDWDC 和 R-DDWDC 的最优设计

总再沸器热负荷为 2 546.29 kW ( $Q_{R1} = 1 633.96$  kW;  $Q_{R2} = 912.33$  kW), 而 R-DDWDC 的总再沸器热负荷为 1 584.38 kW ( $Q_{R1} = 1 205.33$  kW;  $Q_{R2} = 379.05$  kW)。相较于最优 CDS 设计的总再沸器热负荷 3 182.36 kW ( $Q_{R1} = 1 147.01$  kW;  $Q_{R2} = 622.84$  kW;  $Q_{R3} = 1 412.51$  kW), R-SDWDC 实现了 19.99% 的节能, 而 R-DDWDC 则实现了 50.21% 的节能。这一结果再次证明了基于共强化原理设计的 R-DDWDC 相较于 CDS 和 R-SDWDC 具有显著的节能优势。

### 3 R-DDWDC 与 R-SDWDC 的动态性能比较

针对上面获得的最优 R-DDWDC 与 R-SDWDC 设计, 本文中将通过在 Aspen Dynamics V12 中进行动态仿真, 详细比较两者的开环与闭环控制性能, 从而深入探究共强化原理对系统动态特性的影响。

#### 3.1 R-DDWDC 与 R-SDWDC 的浓度控制系统

对于 R-DDWDC 与 R-SDWDC 的控制, 关键在于 2 点: 一是保持 2 种反应物之间的化学计量比平衡, 二是维持被控产品的纯度。基于此, 分别为 R-DDWDC 和 R-SDWDC 设计了浓度控制系统。选择浓度控制而非温度控制的原因在于, 浓度控制系统的性能不会像温度控制系统一样受到温度控制塔板选择的影响, 因此更能准确反映系统的动态特性和可控性。图 2(a) 展示了 R-SDWDC 的浓度控制方案, 主要由 3 个浓度控制回路以及必要的压力、液位控制回路组成。CC1 控制回路通过调节反应物 LA 的进料流量 ( $F_{LA}$ ) 控制反应段第 1 块塔板上 LA 的浓度 ( $x_{LA}$ ), 作用是保持 2 种反应物之间的化学计量

比平衡<sup>[17]</sup>。CC2 控制回路通过调节侧线产品的流量 ( $L_S$ ) 控制侧线产品中 Water 的浓度 ( $x_{Water}$ ), 而 CC3 控制回路通过调节右侧再沸器的热负荷 ( $Q_{R2}$ ) 控制底部产品中 MeLa 的浓度 ( $x_{MeLa}$ )。PC 控制回路用来维持塔顶压力。LC1、LC2 和 LC3 控制回路分别被用来维持 1 个顶部回流罐和 2 个塔釜的液位。图 2(b) 展示了 R-DDWDC 的浓度控制方案。

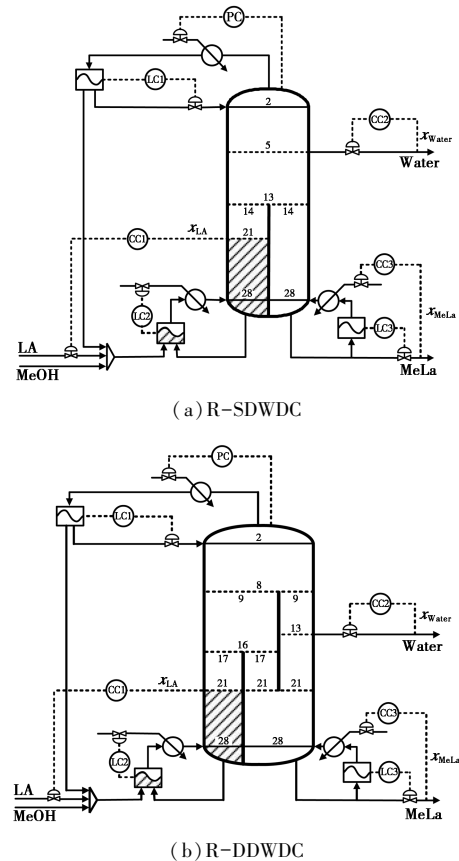


图 2 R-SDWDC 和 R-DDWDC 的 3 点浓度控制方案

各控制回路的功能与 R-SDWDC 中控制回路的功能基本相同,在此不再重复解释。

在 R-SDWDC 与 R-DDWDC 的浓度控制系统中,压力控制回路采用 PI 控制器 ( $K_C = 20, T_i = 12 \text{ min}$ ),液位控制回路均采用纯比例控制器 ( $K_C = 2, T_i = 9\ 999 \text{ min}$ )。浓度控制回路采用 PI 控制器,假定所有浓度传感器都有 3 min 的死区时间,在初始状态时所有控制阀处于半开状态,控制器参数由 Tyreus-Luyben 法进行整定<sup>[18]</sup>。在整定过程中,3 个浓度控制回路循环整定,直至各控制器的参数整定结果不再有明显变化时停止,尽可能避免控制器参数对动态仿真结果的影响<sup>[19]</sup>。控制器的详细参数在表 2 中列出。

表 2 R-SDWDC 与 R-DDWDC 浓度控制方案的控制器参数

控制方案	控制器	$K_C$	$T_i/\text{min}$
R-SDWDC	CC1	0.71	43.24
	CC2	234.25	69.48
	CC3	48.32	39.60
R-DDWDC	CC1	0.88	53.74
	CC2	168.85	160.27
	CC3	37.28	25.89

### 3.2 开环评估

为了能够全面评估 R-SDWDC 和 R-DDWDC 的动态响应特性,本文中首先通过计算它们浓度控制系统中 3 个浓度控制回路的相对增益矩阵 (relative gain array, RGA) 来进行开环评估<sup>[20]</sup>。具体做法是:①将 R-SDWDC 和 R-DDWDC 的 3 个浓度控制回路切换至手动操作模式,并对这 3 个浓度控制回路的操作变量分别施加  $\pm 1\%$  的阶跃扰动;②等待系统稳定后,计算被控变量与操作变量的变化量之间的增益,得到增益矩阵;③根据所得增益矩阵,计算系统的 RGA。

表 3 列出了 R-DDWDC 与 R-SDWDC 浓度控制回路的 RGA 计算结果。在 R-SDWDC 的 RGA 中, $\lambda_{11}$  和  $\lambda_{22}$  的值远大于 1。这意味着 CC1 和 CC2 控制回路的操作变量发生变化时,不仅会对相应的被控变量产生显著影响,还会对其他回路的被控变量产生较大的交叉影响。这种强耦合会在控制时引起控制回路间较大的相互干扰,从而影响系统动态控制质量。 $\lambda_{33}$  的值接近于 0.5。这表明 CC3 控制回路的自耦合较弱,该回路被控变量对操作变量的响应不强烈,可能影响整体控制效果。在 R-

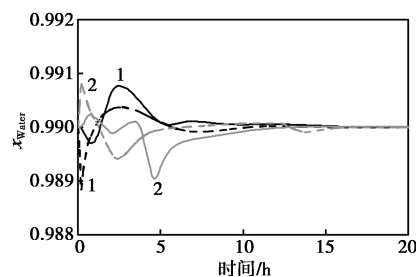
DDWDC 的 RGA 中,各对角元素的值都比较接近 1。这意味着 R-DDWDC 浓度控制系统中的各浓度控制回路都比较独立,各回路之间的相互影响较小。

表 3 R-SDWDC 和 R-DDWDC 浓度控制回路的 RGA

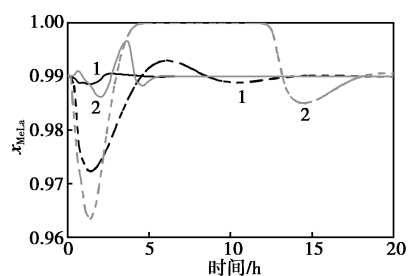
控制方案	$x_{LA}$	$x_{Water}$	$x_{MeLa}$
R-SDWDC			
$F_{LA}$	1.84	0.16	-1.00
$L_S$	-2.95	2.49	1.46
$Q_{R2}$	2.11	-1.65	0.54
R-DDWDC			
$F_{LA}$	1.39	0.31	-0.70
$L_S$	-0.58	0.84	0.74
$Q_{R2}$	0.19	-0.15	0.95

### 3.3 闭环评估

图 3 展示了 MeOH 进料流量面对  $\pm 10\%$  阶跃扰动时, R-SDWDC 与 R-DDWDC 的闭环动态响应曲线。对于本文中展示的闭环响应曲线,黑色线条表示正向扰动,灰色线条表示负向扰动。对于侧线产品纯度  $x_{Water}$  的控制, R-SDWDC 和 R-DDWDC 的浓度控制系统均能在 20 h 内将  $x_{Water}$  调整回设定值,且动态响应曲线的超调量和调节时间基本相等。但是,对于底部产品纯度  $x_{MeLa}$  的控制, R-DDWDC 的浓度控制系统明显能够实现相较 R-SDWDC 更小的超调量和更短的调节时间。



(a)



(b)

1—R-DDWDC; 2—R-SDWDC

图 3 MeOH 进料流量面对  $\pm 10\%$  扰动时的闭环响应曲线

图 4 展示了 MeOH 进料浓度发生 -5% 阶跃扰动时, R-SDWDC 与 R-DDWDC 的闭环动态响应曲线。对于侧线产品纯度  $x_{\text{Water}}$  的控制, R-SDWDC 和 R-DDWDC 的浓度控制系统均能在 20 h 内将  $x_{\text{Water}}$  调整回设定值。对于底部产品纯度  $x_{\text{MeLa}}$  的控制, R-SDWDC 和 R-DDWDC 的浓度控制系统均能在 20 h 内将  $x_{\text{MeLa}}$  调整回设定值, 但 R-DDWDC 浓度控制系统的超调量和调节时间相较于 R-SDWDC 明显更小。

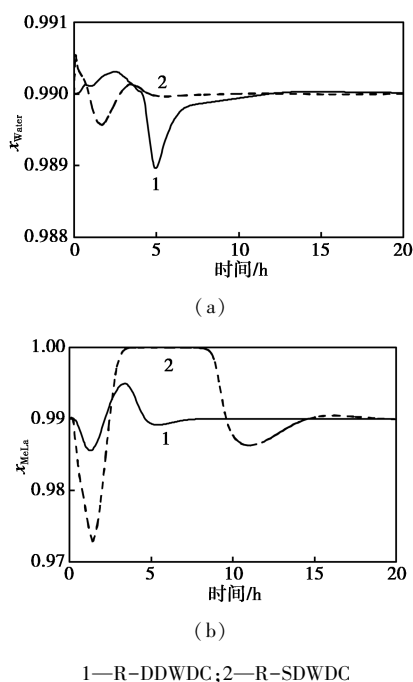


图 4 MeOH 进料浓度面对 -5% 扰动时的闭环响应曲线

### 3.4 动态仿真结果分析

从开环评估结果可以看出, R-DDWDC 的浓度控制系统中各控制回路之间的相互影响显著小于 R-SDWDC。这一特点表明, R-DDWDC 在动态响应和控制性能方面表现出更好的特性, 具有更高的可控性。此外, 闭环评估结果进一步显示, R-DDWDC 的产品纯度控制质量(尤其是对底部产品纯度的控制质量)显著高于 R-SDWDC。其动态响应曲线表现出更小的超调量和更短的调节时间。这种动态控制质量的提升显然归功于 R-DDWDC 特有的双隔壁拓扑结构, 而该结构的得出正是得益于共强化原理的应用。具体而言, 右侧隔离壁的介绍有效消除了侧线产品纯度控制与底部产品纯度控制之间的相互耦合, 显著提升了系统的可控性。通过减少控制回路间的干扰, R-DDWDC 不仅改善了各控制回路的独立性, 还增强了整体系统的稳定性和响应速度。

## 4 结论

基于 MeOH 和 LA 酯化反应物系, 本文中系统地比较了 R-DDWDC 与 R-SDWDC 的动态特性与可控性。动态仿真结果表明, R-DDWDC 具有相较于 R-SDWDC 更好的动态特性与更高的可控性。在相同的浓度控制系统下, R-DDWDC 能够实现更高质量的产品纯度控制。具体而言, R-DDWDC 能够更有效地维持侧线和塔底产品的纯度, 在面对进料流量和组分变化时, 其超调量更小且调节时间更短。这些结果充分证明了, 共强化原理不仅有助于推导出热力学效率更高的反应精馏系统, 而且能够改善系统的动态特性与可控性, 是一种非常有效的反应精馏系统设计方法。

## 参考文献

- [1] Pazmino-Mayorga I, Jobson M, Kiss A. Conceptual design of a dual reactive dividing wall column for downstream processing of lactic acid[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2021, 164(3): 45-56.
- [2] Kong J, Liu W, Fu Y, et al. Optimization of the process for separating ethylene glycol and 1,2-butanediol using reactive distillation-assisted separation based on a parallel stochastic algorithm framework[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354(2): 128732.
- [3] Gore J, Mahajani S, Mali N. Reactive distillation configuration for the production of ethyl acrylate[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2024, 203: 109864.
- [4] Bose D, Bangal A, Hens A, et al. Design and optimization of reactive distillation for enhancing supercritical transesterification process to produce biodiesel [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2024, 203: 109877.
- [5] Huang K, Hong Y, Han S, et al. Co-process intensification in the synthesis and design of reactive double dividing-wall distillation column[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2023, 189: 109405.
- [6] 李浩, 韩帅帅, 范晨阳, 等. HeOH 与 BuAc 酯交换反应共强化系统的评价[J]. *北京化工大学学报: 自然科学版*, 2024, 51(3): 40-48.
- [7] Fan C, Han S, Liang P, et al. Reactive double dividing-wall distillation columns via co-process intensification for the esterification of palmitic acid and isopropanol[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 360(3): 131248.
- [8] Zang L, Zhang L, Huang K, et al. Reactive double dividing-wall distillation columns: Structure and performance[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(46): 20410-20427.
- [9] 张铁权, 臧立静, 黄克谨, 等. 双隔壁反应精馏塔的设计与控制[J]. *现代化工*, 2022, 42(3): 221-226.

(下转第 275 页)

业生产过程中产生废乙腈溶剂的再生和工艺优化提供了参考。

### 参考文献

- [1] 叶启亮,赵成辉,孙浩,等.乙腈法抽提丁二烯流程模拟与优化[J].现代化工,2023,43(12):204-208.
- [2] 张丽,朱一华,刘芝燕,等.丁二烯抽提装置中粗乙腈制备高纯乙腈的研究[J].现代化工,2022,42(4):245-249.
- [3] 李贵林.丁二烯抽提装置乙腈精制再生技术开发[J].乙烯工业,2019,31(2):15-19.
- [4] 郭昊乾,李雪飞,李小亮.用于甲醇与乙腈体系分离的变压间歇精馏模拟优化[J].煤质技术,2020,35(2):21-26.
- [5] 何桃吉.乙腈—水共沸物分离的模拟与实验研究[D].天津:天津大学,2008.
- [6] 杨阳阳,徐东芳.乙腈—水二元共沸体系的变压精馏动态研究[J].化工设计,2024,34(1):22-26.
- [7] 赵俊彤.乙醇—乙腈混合物分离工艺研究及过程模拟[D].天津:天津大学,2013.
- [8] 杨建发,曾小琴,王泳芳,等.乙醇—乙腈共沸物系分离方法的研究[J].山东化工,2018,47(15):180-181.
- [9] 李肖华.艾双与计建炳,双效变压精馏分离甲醇—乙腈的工艺模拟与优化[J].现代化工,2013,33(12):111-113.
- [10] 施兰,杨太飞,左启军,等.甲醇—乙腈共沸体系变压精馏工艺的模拟与优化[J].山东化工,2022,51(18):150-151,154.
- [11] 沈冬平.萃取精馏分离水—乙腈二元共沸物[D].杭州:浙江工业大学,2017.
- [12] 高晓新,王天宇,陈梦圆,等.常规变压精馏和变压热集成精馏分离乙腈和水的模拟[J].现代化工,2020,40(5):219-222.
- [13] 杨金杯,李冰,余美琼,等.变压精馏和萃取精馏分离乙腈—正丙醇工艺优化[J].精细石油化工,2021,38(3):40-46.
- [14] 仲超,李春梅,朱雅楠.变压精馏分离乙腈—乙醇共沸物的模拟与优化[J].山东化工,2024,53(11):202-206.
- [15] 郑建东,杨靖,陈纲领,等.Aspen Plus 在模拟分离乙腈—水过程中的应用[J].山东化工,2018,47(17):115-117.
- [16] 李文魁,王晓红,陈敬轩,等.分离乙腈—乙醇—水三元物系的变压/萃取耦合精馏工艺及系统优化设计[J].青岛科技大学学报:自然科学版,2021,42(4):39-46.
- [17] 王敏.有机废液的分选—含甲醇、乙醇和水的乙腈废液的分选[D].上海:上海应用技术大学,2022.
- [18] 王晓红,于新帅,李明高,等.变压精馏分离三元共沸物系[J].青岛科技大学学报:自然科学版,2018,39(5):64-69.
- [19] 王乃根.变压精馏分离三组分共沸物的节能研究[D].常州:常州大学,2021.
- [20] 李渝东.高效节能精馏过程分离乙腈—异丙醇—水三元混合物的研究[D].常州:常州大学,2022.
- [21] 陈敬轩,王晓红,田增虎,等.基于离子液体的乙腈—乙醇—水共沸体系节能分离[J].石油学报:石油加工,2023,39(2):310-320. ■
- .....
- (上接第 269 页)
- [10] Qin W,Zang L,Huang K, *et al.* Reinforced temperature control of a reactive double dividing-wall distillation column[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2023, 54: 288-295.
- [11] 李杰.乳酸甲酯双隔板反应隔壁塔的设计与控制[J].化学工程,2020,48(1):18-23.
- [12] Wang S,Huang H,Yu C.Design and control of an ideal reactive divided-wall distillation process[J]. Asia-pacific Journal of Chemical Engineering, 2011, 6(3): 357-368.
- [13] Sanz M,María M,Beltrán S, *et al.* Kinetic study for esterification of lactic acid with ethanol and hydrolysis of ethyl lactate using an ion-exchange resin catalyst[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 43(9): 2049-2053.
- [14] Sanz M,Beltrán S,Calvo B, *et al.* Vapor liquid equilibria of the mixtures involved in the esterification of lactic acid with methanol[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2003, 48(6): 1446-1452.
- [15] Huang K,Han S,Zang L, *et al.* Configuring topologically optimum vapor recompressed dividing-wall distillation columns to maximize operating efficiency[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2023, 57(25): 247-264.
- [16] Zhao W,Zang L,Huang K, *et al.* Optimum topological configuration for the vapor-recompressed dividing-wall distillation columns processing an intermediate-component-dominated and wide-boiling-point ternary mixture[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(14): 4860-4878.
- [17] Al-Arfaj M,Luyben W.Comparison of alternative control structures for an ideal two-product reactive distillation column[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, 39(9): 3298-3307.
- [18] Luyben W,William L.Distillation design and control using Aspen™ simulation[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013: 124-131.
- [19] Huang K,Yuan Y,Zang X, *et al.* Controllability evaluation for reactive distillation columns with multiple reactive sections disproportionating trichlorosilane to silane [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(3): 1102-1108.
- [20] Skogestad S,Havre K.The use of RGA and condition number as robustness measures.Computers & Chemical Engineering, 1996, 20: 1005-1010. ■