

引用格式:武浩,陈海胜,黄克谨. 内部热耦合中间隔壁塔的设计与控制[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(4): 10-20.

WU Hao, CHEN HaiSheng, HUANG KeJin. Design and control of an internally heat integrated middle dividing wall column [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2023,50(4):10-20.

内部热耦合中间隔壁塔的设计与控制

武 浩 陈海胜* 黄克谨

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要:虽然隔离壁精馏塔(DWC)与多个常规精馏塔组成的常规分离序列相比具有明显的节能潜力,但是通过引入内部热耦合技术,仍然具有进一步强化设计的空间。以进料位置为界,可将 DWC 分为上、下两部分,上部包含公共精馏段和进料上端的隔离壁两侧,下部包含进料下端的隔离壁两侧和公共提馏段,在两部分之间设置内部热耦合,得到一种新型内部热耦合中间隔壁塔(IHIMDWC)。在进料上、下两端的隔离壁一侧或两侧设置内部热耦合可以得到 4 种不同的 IHIMDWC 拓扑结构。以甲醇、乙醇与正丙醇三元物系的分离为例,通过启发式搜索法对 4 种 IHIMDWC 拓扑结构进行稳态设计,并提出了一种分散温度控制系统以验证它们的可控性。仿真结果表明,与 DWC 相比,IHIMDWC 不但可以显著降低能量消耗,而且所设计的分散温度控制系统可以有效地抑制干扰。

关键词:隔离壁精馏塔;内部热耦合;稳态设计;分散温度控制;可控性

中图分类号:TQ021.8 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2023.04.002

引 言

传统的三元混合物的分离和提纯通常采用两个或多个精馏塔组成的直接或间接分离序列来实现,然而精馏塔具有较强的不可逆性,且热力学效率极低^[1-3]。为了实现过程的节能降耗,人们提出了多种精馏过程强化设计方法,如物质耦合和/或能量耦合^[4-7]等手段。

隔离壁精馏塔(dividing wall column, DWC)是一种较为有效的过程强化装置^[8-11]。相比于传统的分离序列,DWC 通过预分离塔与主塔之间的物质和能量耦合显著地降低了能耗和投资成本,但其不可逆性较强(塔顶和塔底之间的温差较大),仍有进一步改进的可能性^[12]。现有的改进方式主要分为两种:一种采用热泵(heat pump, HP)技术,将 DWC 中的热源加压升温后为其热阱提供能量^[13-15];另一种是在隔离壁两侧之间设置热耦合^[12,16]。虽然热

泵技术可以在一定程度上提高系统的热力学效率,但是难以充分利用 DWC 中的可用热源。分析隔离壁两侧的热效应类型(热源或热阱)并设置相应的热耦合,可以在不增加额外的设备投资的前提下实现一定程度的节能,然而这种方式不但没有充分利用公共精馏段和公共提馏段的热能,而且隔离壁两侧的热效应类型复杂,难以获得通用的设计结构。

为了充分利用 DWC 塔内各阶段的热能,加深系统内部热耦合程度,从而进一步降低系统的不可逆性,本文以进料位置为界将 DWC 分为上、下两部分,在这两部分之间引入内部热耦合技术^[17],得到一种内部热耦合中间隔壁塔(internally heat integrated middle dividing wall column, IHIMDWC)。以甲醇、乙醇和正丙醇三元混合物的分离为例,给出了 IHIMDWC 的 4 种潜在的拓扑结构,进行了优化设计,并给出了一种分散温度控制方案,分析比较了 4 种拓扑结构的可控性,给出了 IHIMDWC 的可行性与有效性的有关结论。

1 内部热耦合中间隔壁塔及其潜在的拓扑结构

如图 1 所示,DWC 可以分为 I ~ VI 共 6 个区域,其中,区域 I 和 II 为预分离塔,区域 III、IV、V 和

收稿日期:2022-09-20

基金项目:国家自然科学基金(21878011)

第一作者:男,1997 年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: chenhs@mail.buct.edu.cn

VI为主塔。F 表示进料,D、S 和 B 分别表示轻组分、中间组分与重组分出料。通过预分离塔和主塔之间的气液相流股实现 DWC 的内部物质耦合和能量耦合。

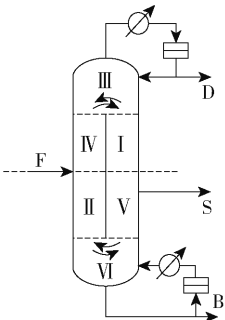
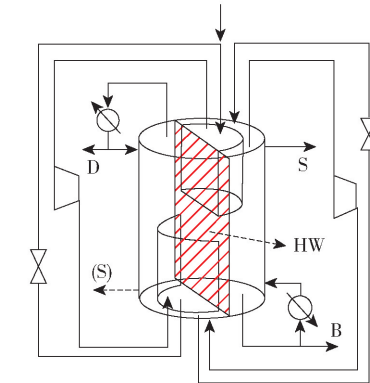


图 1 隔离壁精馏塔结构示意图

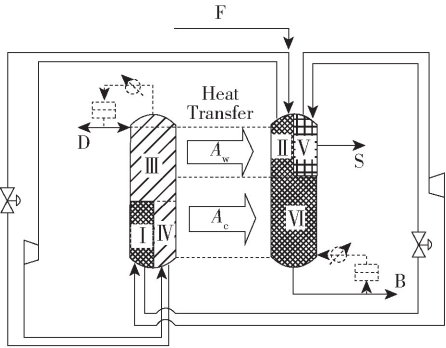
Fig.1 Structural schematic diagram of the DWC

图 2(a) 给出了 IHIMDWC 的拓扑结构。以进料 F 的位置为界,IHIMDWC 被可换热的隔板(HW)分隔开,HW 的左侧为Ⅲ、Ⅳ和Ⅰ,右侧为Ⅱ、Ⅴ和Ⅵ,通过 HW 实现两侧之间的热量交换。根据此拓扑结构,设置了 4 种热耦合方式:①区域Ⅳ和Ⅵ之间以及区域Ⅲ和Ⅱ之间分别设置内部热耦合(IHIMDWC-S);②区域Ⅰ、Ⅳ和Ⅵ之间以及区域Ⅲ和Ⅱ之间分别设置内部热耦合(IHIMDWC-L);③区域Ⅳ和Ⅵ之间以及区域Ⅲ、Ⅱ和Ⅴ之间分别设置内部热耦合(IHIMDWC-U);④区域Ⅰ、Ⅳ和Ⅵ以及区域Ⅲ、Ⅱ和Ⅴ之间分别设置内部热耦合(IHIMDWC-A)。图 2(b) 给出了 IHIMDWC 的热力学等效示意图。以进料位置为界,IHIMDWC 可分为上部分(高压段,包括区域Ⅰ、Ⅲ和Ⅳ)和下部分(低压段,包括区域Ⅱ、Ⅴ和Ⅵ),区域Ⅱ和Ⅴ的上升蒸汽经过两个压缩机加压升温后分别进入区域Ⅳ和Ⅰ,同时,后两个区域的下降液流经过两个节流阀后分别进入前两个区域,两个压缩机与节流阀保证了高压段与低压段间的温度差与压力差,使得热量可通过两个塔段的各个对应塔板从高压段传向低压段。对于理想设计,IHIMDWC 可以节省外部冷凝器或外部再沸器。

虽然内部热耦合技术可以降低精馏过程的能量消耗,但需要使用压缩机对蒸汽进行增压。若压缩机的压缩比过大,其固定投资和操作费用将非常巨大,因此采用 IHIMDWC 分离的体系中各组分的沸点差不宜过大^[18]。下文将以甲醇/乙醇/正丙醇三元物系的分离为例验证 IHIMDWC 的有效性和可控性。该物系的物性数据与产品指标如表 1 所示。



(a) 拓扑结构



(b) 热力学等效示意图

图 2 IHIMDWC 的拓扑结构和热力学等效示意图

Fig.2 Topological structure and thermodynamic equivalent scheme of the IHIMDWC

表 1 分离过程的物性数据与产品指标
Table 1 Physical properties and product indicators of the separation process

参数		数值
常压沸点/℃	甲醇	64.7
	乙醇	78.25
	正丙醇	97.2
进料流量/(kmol·h ⁻¹)		100
进料温度/℃		77.03
进料组成(摩尔分数)	甲醇	0.3
	乙醇	0.4
	正丙醇	0.3
产品纯度规定(摩尔分数)	甲醇 D	0.99
	乙醇 S	0.99
	正丙醇 B	0.99

2 IHIMDWC 的稳态设计

借助化工流程模拟软件 Aspen Plus 搭建 IHIMDWC 的稳态模型,甲醇/乙醇/正丙醇三元物系的汽

液平衡关系采用非随机两流体(non-random two liquids, NRTL)物性方法描述。IHIMDWC 对应塔板之间的传热量为

$$Q_n = UA(T_H - T_L) \quad (1)$$

式中, U 为传热系数, A 为换热面积, T_H 为上部分第 n 块塔板温度, T_L 为下部分对应塔板的温度。在 Aspen Plus 中采用 FORTRAN 语句描述该表达式, 并通过多次迭代计算获得传热量 Q_n , 最后将该结果赋值于 Heaters and Coolers 模块中。

为验证 IHIMDWC 的节能潜力, 本文首先对 DWC 进行优化, 并在此基础上采用统一热传递面积的方式设计 IHIMDWC^[19]。如图 2(b) 所示, 换热区域 III- II/V 的塔板间热传递面积均为 A_w , 换热区域 I/IV-VI 的塔板间热传递面积均为 A_c 。给定 IHIMDWC 高压段一个较大的初始压力, 以全年总费用(TAC)为目标函数, 通过启发式搜索法, 不断调整优化塔板数、侧线出料位置、塔板间热传递面积及汽、液相分离比等变量, 多次迭代搜索得出 IHIMDWC 的最优设计。IHIMDWC 优化的具体流程如下^[20]:

- (1) 给定一个高压段塔顶压力值, 多次迭代步骤(2)~(8), 迭代搜索到该给定压力下的 TAC 最小值;
- (2) 调整 III、VI 区域塔板数, 保证左右两塔之间的塔板数一致;
- (3) 调整 I、IV 区域塔板数, VI 区域塔板数随之变动, 保证左右两塔之间的塔板数一致;
- (4) 保持总塔板数不变, 调整 III、I(IV) 区域塔板数的相对数量;
- (5) 保持总塔板数不变, 调整 II(V) 和 VI 区域的相对塔板数, 即调整 VI(III) 区域塔板数;
- (6) 调整侧线出料位置, 侧线出料位置可能会在高压段与低压段之间浮动;
- (7) 调整汽相或液相分离比;
- (8) 调整换热面积 A_w 和 A_c ;
- (9) 多次调整高压段压力, 探索 TAC 的最小值。

图 3 分别给出了分离甲醇/乙醇/正丙醇三元物系的直接分离序列、间接分离序列、DWC、IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 以及 IHIMDWC-A 的最优设计结构。可以看到, IHIMDWC 的上、下两部分的塔板数均为 45 块, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的中间出料位置分别为区域 V 的第 11、12、5、11 块塔板。从图中可以看

到, IHIMDWC 的 4 种拓扑结构均可节省外部再沸器, 有明显的节能效果。IHIMDWC-S 的内部热耦合换热面积为 $A_w = A_c = 9.1 \text{ m}^2$, IHIMDWC-L 的内部热耦合换热面积为 $A_w = 8.88 \text{ m}^2$ 和 $A_c = 8.32 \text{ m}^2$, IHIMDWC-U 的内部热耦合换热面积为 $A_w = 2.98 \text{ m}^2$ 和 $A_c = 11.23 \text{ m}^2$, IHIMDWC-A 的内部热耦合换热面积为 $A_w = 3.07 \text{ m}^2$ 和 $A_c = 5.93 \text{ m}^2$ 。

图 4 分别给出了 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的温差分布图。黑色曲线表示该区域设置内部热耦合, 灰色曲线表示该区域未设置内部热耦合。可以看到, 虽然有少量塔板间的温差小于 $3 \text{ }^\circ\text{C}$, 但是大部分塔板间的温差均大于 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 2 是传统双塔分离序列、DWC 和 IHIMDWC 的能量消耗、操作费用和设备投资等计算结果。可以看到, 在相同的 TAC 下, 虽然 IHIMDWC 的设备投资和投资回收期有所增加, 但是系统的能量消耗得到大幅降低。直接分离序列、间接分离序列、DWC、IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的总能量消耗分别为 5 693.80、6 063.21、3 439.95、1 563.42、1 522.47、1 504.63 kW 和 1 708.14 kW。相比 DWC, IHIMDWC 的总能量消耗节省了 50.34%~56.26%, 相比传统的双塔分离序列, IHIMDWC 的总能量消耗节省了 70%~75%。

3 IHIMDWC 的动态控制

3.1 分散温度控制方案

实现 IHIMDWC 平稳操作的前提条件是保证其上、下两部分的隔离壁两侧的操作压力相等, 并确保已施加基于系统稳定操作的储量控制(inventory control)。IHIMDWC 的操纵变量共有 10 个: 冷凝器热负荷 Q_{con} 、第一个压缩机的制动功率 BP_1 、第二个压缩机的制动功率 BP_2 、塔底出料流量 F_1 、中间出料流量 F_{sd} 、塔顶出料流量 F_2 、区域 IV 的下降液量 FV_1 、区域 I 的下降液量 FV_2 、回流量 R 、液相分离比 R_L 。在进行操作变量与被控变量匹配时需要在尽量缩小控制器时间常数的基础上使操作变量与被控变量间的相互作用足够大, 因此本文根据就近原则设计了压力比值控制回路和液位控制回路^[21-22]:

- 1) 区域 III 的操作压力通过 Q_{con} 调节;
- 2) 区域 I 和 IV 的操作压力组成比值控制(比值为 1, 即两个变量稳定时应相等), 通过 BP_1 调节;
- 3) 区域 II 和 V 的操作压力组成比值控制(比值为 1, 即两个变量稳定时

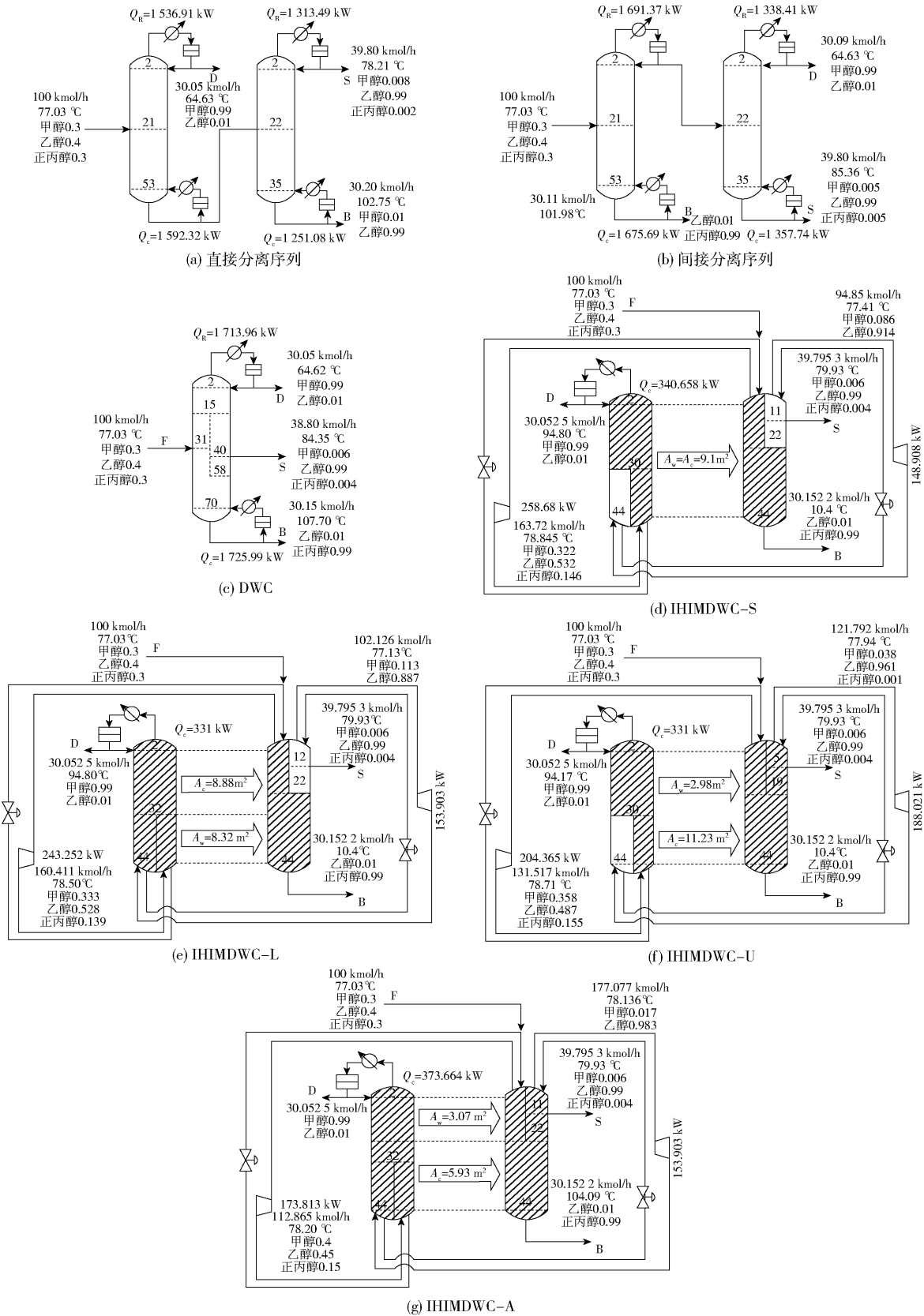


图 3 最优设计结构

Fig. 3 Optimal design structures

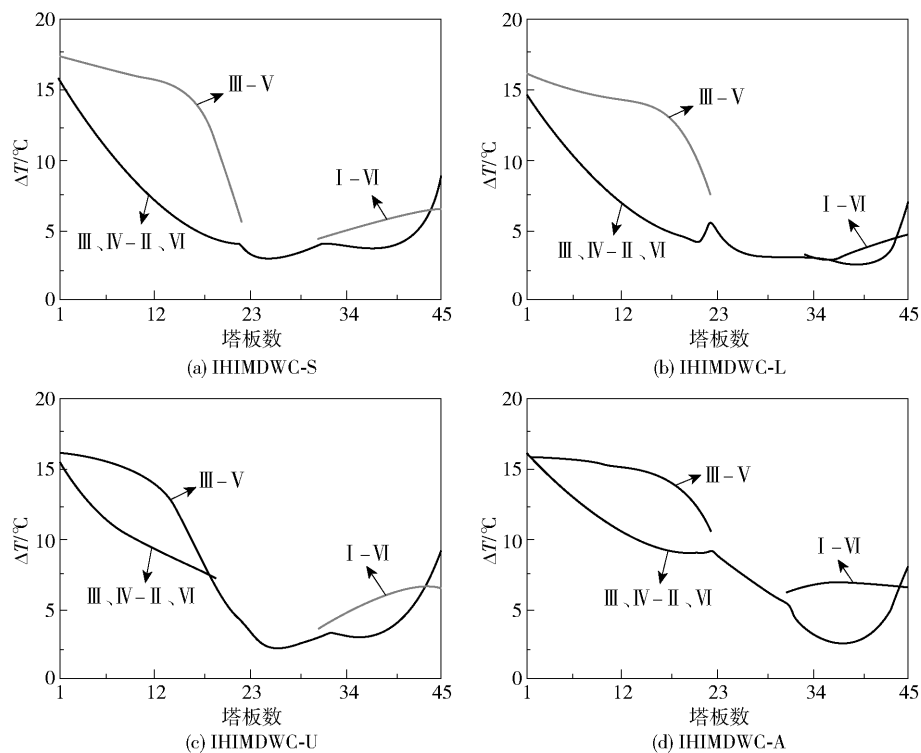


图 4 IHIMDWC 的温差分布图

Fig. 4 Temperature difference distribution diagrams for the IHIMDWC

表 2 过程设计结果

Table 2 Results of process design

过程设计结果	数值						
	直接序列	间接序列	DWC	IHIMDWC-S	IHIMDWC-L	IHIMDWC-U	IHIMDWC-A
操作压力/atm	1	1	1	2.94/1	2.8/1	2.88/1	2.86/1
冷凝器热负荷/kW	-2 850.40	-3 029.78	-1 713.96	-340.65	-331.67	-327.47	-373.66
再沸器热负荷/kW	2 843.40	3 033.43	1 725.99	<1	<1	<1	<1
塔板数	54	47	71	90	90	90	90
压缩机功率/kW	-	-	-	407.59	397.16	392.386	444.824
能量消耗/kW	5 693.80	6 063.21	3 439.95	1 563.42	1 522.47	1 504.63	1 708.14
压缩比	-	-	-	2.94	2.80	2.88	2.86
塔的成本/10 ³ 美元	1 603.62	1 336	1 960.17	2 144.74	2 177.13	2 125.45	2 298.82
总换热面积/m ²	-	-	-	391.3	474.96	388.25	342.42
换热面板成本/10 ³ 美元	-	-	-	389.81	442.12	387.83	357.43
压缩机费用/10 ³ 美元	-	-	-	1 857.23	1 817.46	1 799.23	1 997.74
设备投资/10 ³ 美元	2 368.36	2 123.81	2 396.45	4 304.07	4 347.58	4 231.42	4 551.91
设备投资占比/%	98.83	88.62	100	179.6	181.41	176.57	189.94
操作费用/(10 ³ 美元·a ⁻¹)	630.39	671.08	419.71	149.33	145.29	143.33	162.58
操作费用占比/%	150.20	159.89	100	35.57	34.61	34.14	38.73
回收时间β/a	4.027	3.98	3	4.025	4.05	3.936	4.31
TAC/(10 ³ 美元·a ⁻¹)	1 218.52	1 218.52	1 218.52	1 218.52	1 218.52	1 218.52	1 218.52

1 atm = 101 325 Pa。

应相等),通过 BP_2 调节;4) IHIMDWC 的上部分塔顶液位通过 F_2 调节;5) 区域 I 的底部液位通过 FV_1 调节;6) 区域 IV 的底部液位通过 FV_2 调节;7) 区域 VI 的底部液位由 F_1 调节。

IHIMDWC 的 3 个产品质量通过 3 个温度控制回路实现:1) 通过 R 控制 IHIMDWC 的上部分灵敏板的温度;2) 通过 F_{sd} 控制区域 V 的灵敏板的温度;3) 通过 R_L 控制 IHIMDWC 的下部分灵敏板的温度。所得到的 IHIMDWC 的分散温度控制方案如图 5 所示。

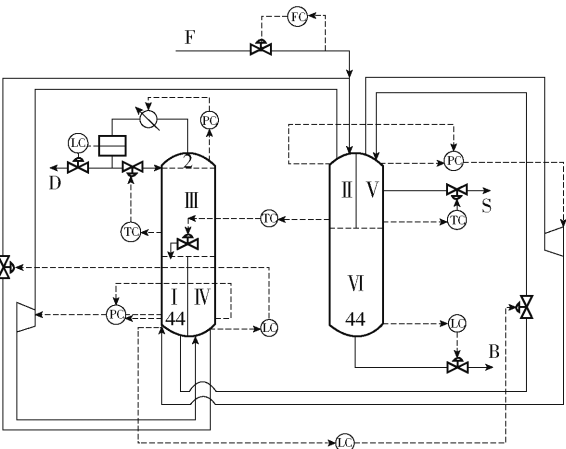


图 5 IHIMDWC 的分散温度控制方案

Fig.5 Decentralized temperature control system of IHIMDWC

3.2 温度灵敏板的选择

IHIMDWC 分散温度控制方案的 3 个灵敏板可采用常规灵敏度分析进行选取^[23-24]。图 6 给出了 3 个操纵变量 R_L 、 F_{sd} 和 R 出现阶跃干扰时 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的灵敏度分析结果,不同拓扑结构的曲线峰值所对应塔板为温度灵敏板。可以看出, IHIMDWC-S

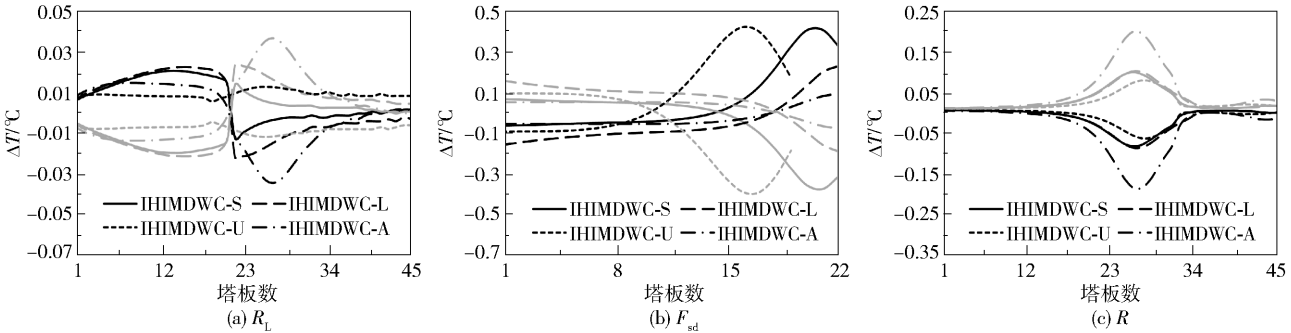


图 6 R_L 、 F_{sd} 和 R 出现阶跃干扰时 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的灵敏度分析 (黑色线为正扰动曲线,灰色线为负扰动曲线)

Fig.6 Sensitivity analyses of IHIMDWC-S, IHIMDWC-L, IHIMDWC-U and IHIMDWC-A when there is a step change in R_L , F_{sd} and R (the black lines represent positive disturbance curves, while the grey lines represent negative disturbance curves)

的 3 个灵敏板可选取为区域 II 的第 19 块塔板 (其温度记为 T_{s-1})、区域 V 的第 20 块塔板 (其温度记为 T_{s-2}) 和区域 III 的第 26 块塔板 (其温度记为 T_{s-3});IHIMDWC-L 的 3 个灵敏板可选取为区域 II 的第 21 块塔板 (其温度记为 T_{L-1})、区域 V 的第 21 块塔板 (其温度记为 T_{L-2}) 和区域 III 的第 25 块塔板 (其温度记为 T_{L-3});IHIMDWC-U 的 3 个灵敏板可选取为区域 VI 的第 3 块塔板 (其温度记为 T_{U-1})、区域 V 的第 17 块塔板 (其温度记为 T_{U-2}) 和区域 III 的第 28 块塔板 (其温度记为 T_{U-3});IHIMDWC-A 的 3 个灵敏板可选取为区域 VI 的第 6 块塔板 (其温度记为 T_{A-1})、区域 V 的第 20 块塔板 (其温度记为 T_{A-2}) 和区域 III 的第 27 块塔板 (其温度记为 T_{A-3})。

3.3 动态仿真结果及分析

3.3.1 相对增益矩阵结果分析与动态模型的搭建

表 3 给出了 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的相对增益矩阵 (relative gain array, RGA)。可以看出,4 种拓扑结构的被控变量和操纵变量的相对增益接近于 1,初步表明本文所给控制回路的合理性。其中, IHIMDWC-U 的相对增益较接近于 1,即各个控制回路之间的耦合较弱。

借助于化工流程模拟软件 Aspen Plus Dynamics 搭建 IHIMDWC 的动态模型, IHIMDWC 的内部热耦合通过软件内置的 Flowsheet 编程语言的形式进行模拟。假定温度变送器有 1 min 的纯滞后,在初始状态时所有控制阀处于半开状态。各个温度控制回路和压力比值控制回路均采用 PI 控制器,各个液位控制回路均采用 P 控制器。所有温度控制器的参数采用 Tyreus-Luyben 方法进行整定^[25-26]。表 4

给出了所有温度控制器的整定结果。

表 3 IHIMDWC 的 RGA
Table 3 RGA of the IHIMDWC

拓扑结构	被控变量	R_L	F_{sd}	R
IHIMDWC-S	T_{S-1}	1.12	-0.116	-0.004
	T_{S-2}	-0.125	1.173	-0.048
	T_{S-3}	0.006	-0.058	1.052
IHIMDWC-L	T_{L-1}	0.728	0.299	-0.027
	T_{L-2}	0.248	0.886	-0.134
	T_{L-3}	0.024	-0.185	1.161
IHIMDWC-U	T_{U-1}	1.017	0	-0.017
	T_{U-2}	-0.002	1.026	-0.024
	T_{U-3}	-0.015	-0.026	1.041
IHIMDWC-A	T_{A-1}	0.89	-0.125	0.234
	T_{A-2}	0.099	0.644	0.257
	T_{A-3}	0.011	0.48	0.509

加粗表示已完成配对的被控变量与操纵变量所对应的 RGA 值。

3.3.2 开环仿真结果

图 7 给出了进料流量出现 $\pm 3\%$ 的扰动时, IHIMDWC 的开环响应曲线。可以看出,当进料流量出现正、负扰动时, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的开环响应曲线具有不对称性。对于中间出料乙醇浓度, IHIMDWC 存在非最小相位特性。以上现象表明 IHIMDWC 具有较强的非线性特性,其中, IHIMDWC-U 的非线性特性最弱。图 8 分别给出了进料的甲醇组分、乙醇组分和正丙醇组分出现 $\pm 1\%$ 的扰动时, IHIMDWC 的开环响应曲线。可以再次看出, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 具有较强的非线性特性,其中, IHIMDWC-S 和 IHIMDWC-U 的非线性特性较弱。

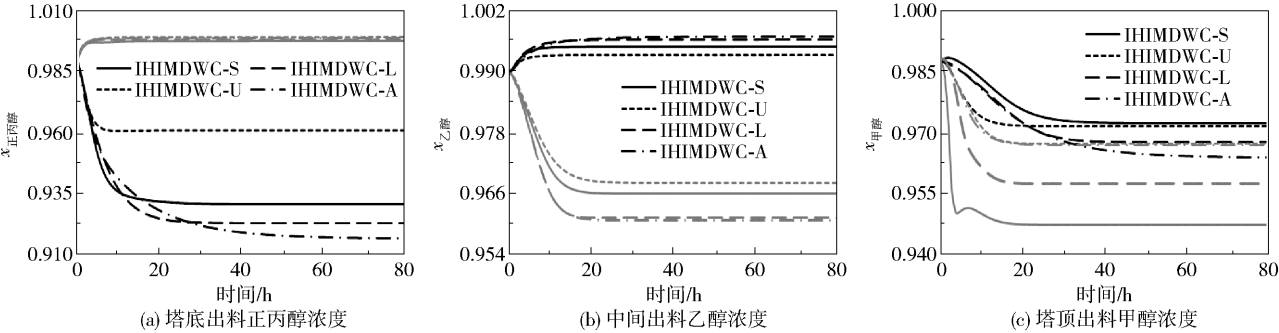


图 7 进料流量出现 $\pm 3\%$ 扰动时, IHIMDWC 的开环响应曲线(黑色线表示输入为正扰动,灰色线表示输入为负扰动)

Fig. 7 Open loop responses of the IHIMDWC subjected to $\pm 3\%$ step changes in feed flow (the black lines represent positive disturbance curves, while the grey lines represent negative disturbance curves)

表 4 IHIMDWC 的分散温度控制方案的温度控制器参数
Table 4 Temperature controller parameters of decentralized temperature control system of the IHIMDWC

拓扑结构	操纵变量	被控变量	控制器	比例增益 K_C	时间/min
IHIMDWC-S	R_L	T_{S-1}	TC _{S-1}	6.19	20
	F_{sd}	T_{S-2}	TC _{S-2}	16.33	11.88
	R	T_{S-3}	TC _{S-3}	251.94	22.44
IHIMDWC-L	R_L	T_{L-1}	TC _{L-1}	2.11	15.52
	F_{sd}	T_{L-2}	TC _{L-2}	35.13	9.24
	R	T_{L-3}	TC _{L-3}	148.85	27.72
IHIMDWC-U	R_L	T_{U-1}	TC _{U-1}	43.77	29.04
	F_{sd}	T_{U-2}	TC _{U-2}	24.01	14.52
	R	T_{U-3}	TC _{U-3}	209.05	22.44
IHIMDWC-A	R_L	T_{A-1}	TC _{A-1}	6.23	62.04
	F_{sd}	T_{A-2}	TC _{A-2}	15.37	11.88
	R	T_{A-3}	TC _{A-3}	197.2	22.44

3.3.3 闭环仿真结果

图 9 给出了进料流量出现 $\pm 10\%$ 的扰动时, IHIMDWC 的闭环响应曲线。可以看出, IHIMDWC 的塔底、中间和塔顶产品的纯度均可以在 10 h 左右达到稳定。具体而言,对于塔底产品的正丙醇浓度控制, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的调节时间和稳态余差相近,但是超调量 σ 差别较大 ($\sigma_{IHIMDWC-A} > \sigma_{IHIMDWC-L} > \sigma_{IHIMDWC-U} > \sigma_{IHIMDWC-S}$);对于中间产品的乙醇浓度控制, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L 和 IHIMDWC-A 的调节时间和稳态余差相近, IHIMDWC-U 的稳态余差较大;对于塔顶产品的甲醇浓度控制, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的调节时间相近, IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A

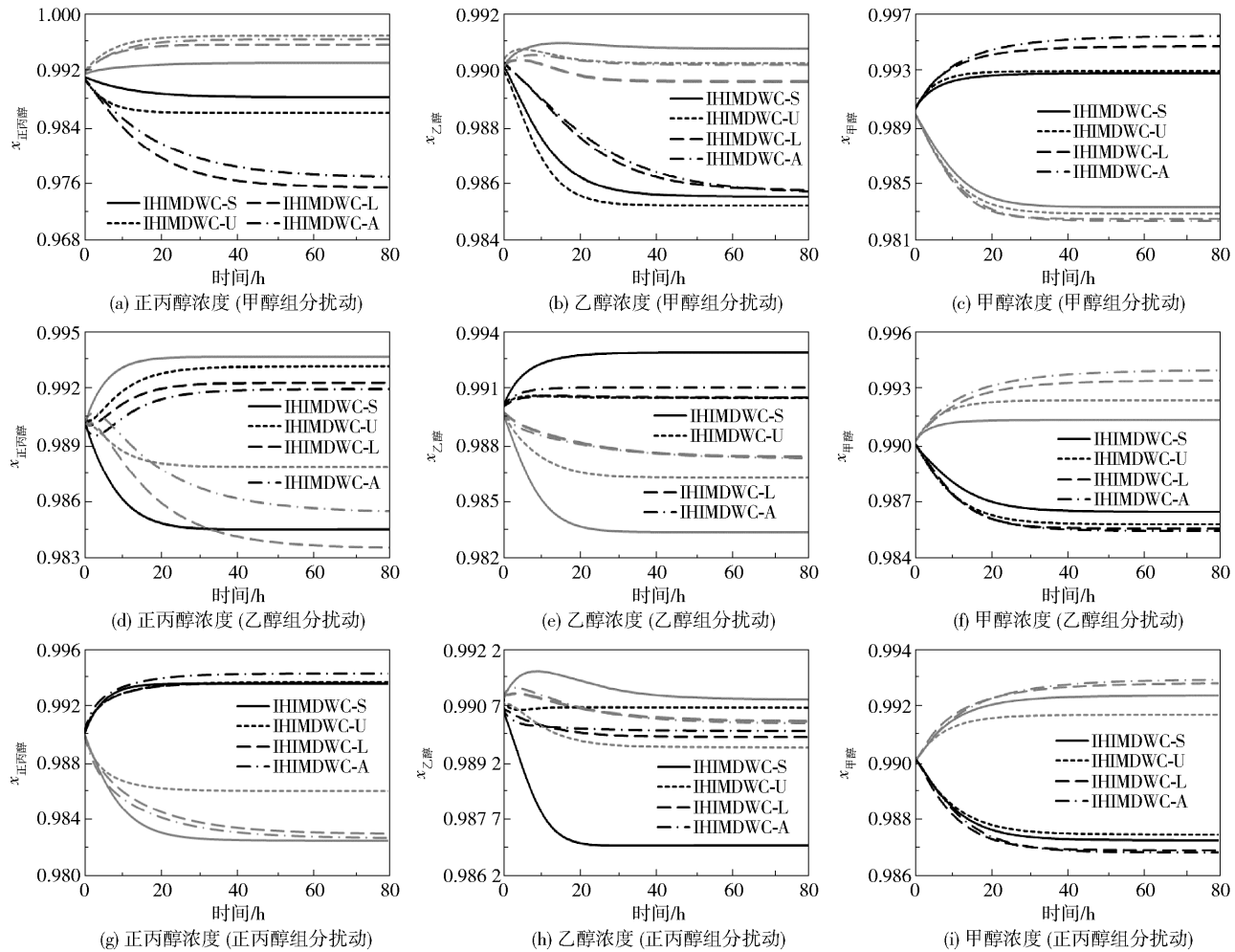


图 8 进料组分出现 $\pm 1\%$ 扰动时, IHIMDWC 的开环响应曲线 (黑色线表示输入为正扰动, 灰色线表示输入为负扰动)
Fig. 8 Open loop responses of the IHIMDWC subjected to $\pm 1\%$ step changes in the composition of the feed flow (the black lines represent positive disturbance curves, while the grey lines represent negative disturbance curves)

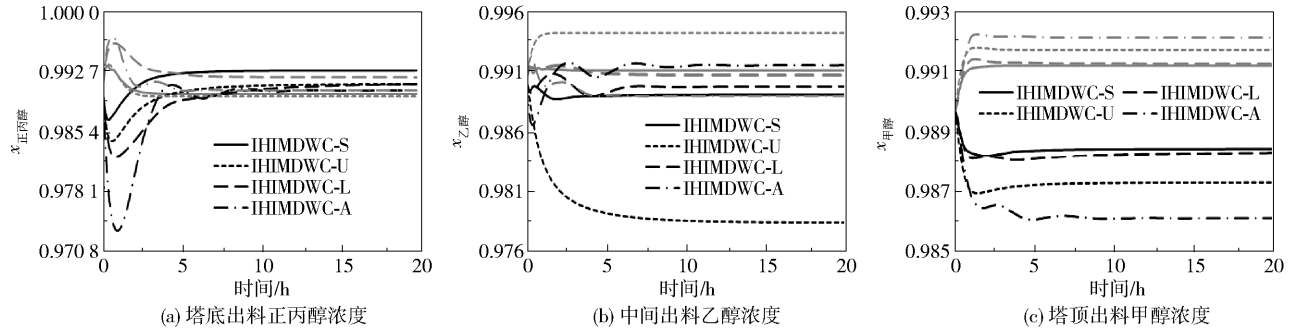


图 9 进料流量出现 $\pm 10\%$ 扰动时, IHIMDWC 的闭环响应曲线 (黑色线表示输入为正扰动, 灰色线表示输入为负扰动)
Fig. 9 Closed loop responses of the IHIMDWC subjected to $\pm 10\%$ step changes in feed flow (the black lines represent positive disturbance curves, while the grey lines represent negative disturbance curves)

的稳态余差较大。

图 10 分别给出了进料的甲醇组分、乙醇组分和正丙醇组分出现 $\pm 5\%$ 的扰动时, IHIMDWC 的闭环响应曲线。当进料的甲醇组分出现扰动时, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A

的调节时间相近, IHIMDWC-S 和 IHIMDWC-L 的塔底产品正丙醇浓度和中间产品乙醇浓度稳态余差较大。当进料的乙醇组分出现扰动时, IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的调节时间相近, IHIMDWC-S 和 IHIMDWC-L 的塔底

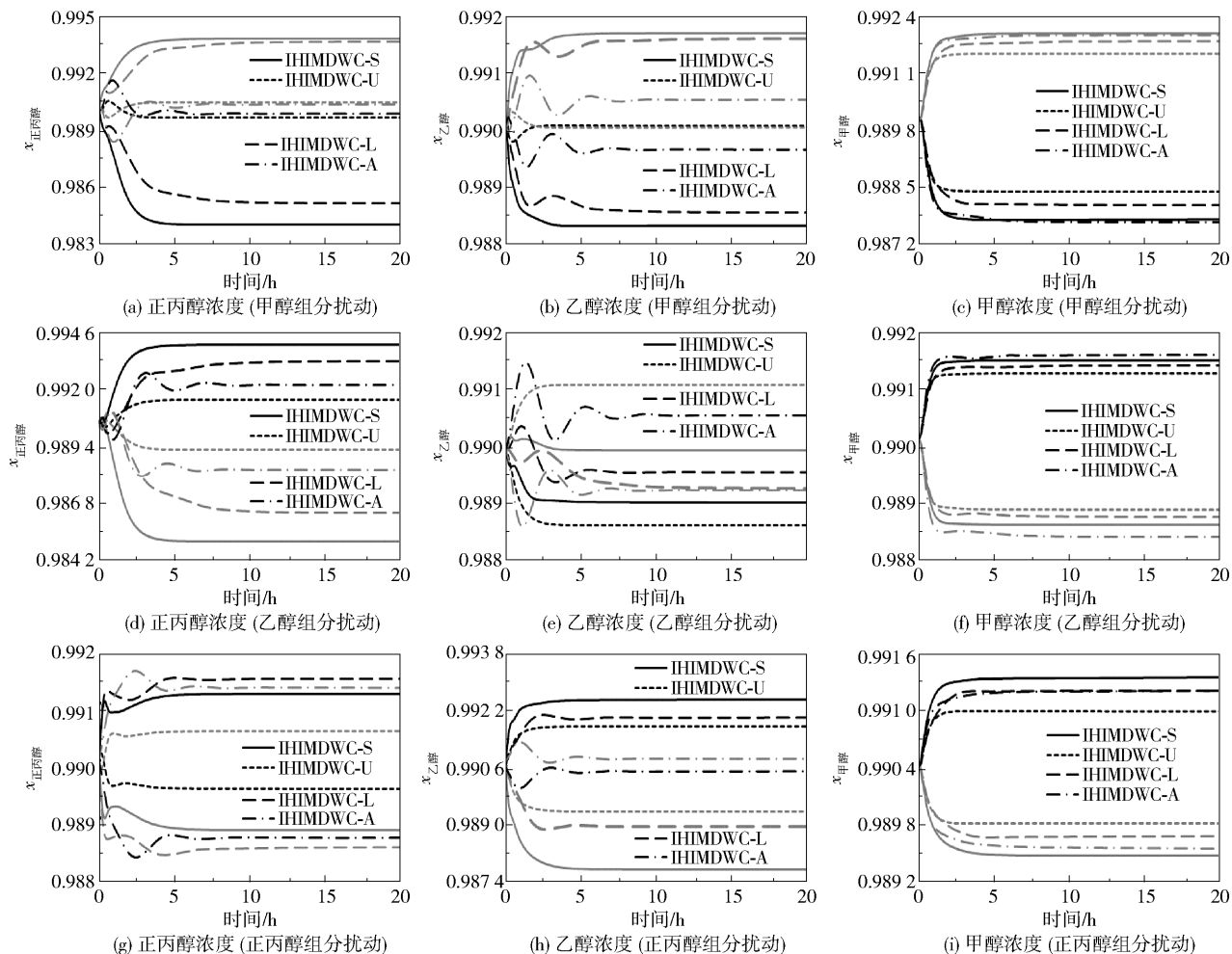


图 10 进料组分出现 $\pm 5\%$ 扰动时, IHIMDWC 的闭环响应曲线 (黑色线表示输入为正扰动, 灰色线表示输入为负扰动)

Fig. 10 Closed loop responses of IHIMDWC subjected to $\pm 5\%$ step changes in composition of the feed flow (the black lines represent positive disturbance curves, while the grey lines represent negative disturbance curves)

产品正丙醇浓度稳态余差较大, IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A 的中间产品乙醇浓度稳态余差较大。当进料的正丙醇组分出现扰动时, IHIMDWC-U 的塔底产品正丙醇浓度稳态余差小于 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L 和 IHIMDWC-A, IHIMDWC-A 的中间产品乙醇浓度稳态余差小于 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L 和 IHIMDWC-U。

4 结论

为了降低中间隔离壁精馏塔的能量消耗, 本文针对甲醇/乙醇/正丙醇三元物系的分离提出一种内部热耦合中间隔壁塔, 并给出了 4 种潜在的拓扑结构 IHIMDWC-S、IHIMDWC-L、IHIMDWC-U 和 IHIMDWC-A。稳态设计的仿真结果表明 4 种拓扑结构相比于中间隔离壁精馏塔节省了外部再沸器, 系统能耗下降了 50.34% ~ 56.26%。针对 IHIMD-

WC 给出了一种分散温度控制方案。基于 Aspen Plus Dynamics 的动态仿真结果表明这种分散温度控制方案可在扰动发生 10 h 之内使系统达到新的稳定状态, 且稳态余差较小, 适用于所给的 4 种拓扑结构。

IHIMDWC 的最优拓扑结构应根据具体的分离物系的热力学特征和主要的扰动来源进行选择。对于甲醇/乙醇/正丙醇三元物系的分离, 若主要扰动来源于进料流量, 则最优拓扑结构为 IHIMDWC-S, 若主要扰动来源于进料组分, 则最优拓扑结构为 IHIMDWC-A。

参考文献:

- [1] KISS A A, SMITH R. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry [J]. Energy, 2020, 203: 117788.

- [2] CHEN H, CONG H F, HE L, et al. A novel two-parts heat integrated dividing wall column with middle vapor recompression[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 262: 118302.
- [3] PINTO F S, ZEMP R, JOBSON M, et al. Thermodynamic optimisation of distillation columns [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(13): 2920–2934.
- [4] FANG J, LI Z Y, HUANG G M, et al. Externally heat-integrated multiple diabatic distillation columns (EHImxDC): basic concept and general characteristics [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2020, 59(4): 1668–1681.
- [5] FANG J, CHENG X M, LI Z Y, et al. A review of internally heat integrated distillation column [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(6): 1272–1281.
- [6] GADALLA M A. Internal heat integrated distillation columns (iHIDiCs)—new systematic design methodology [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(12): 1658–1666.
- [7] VOINOV N A, ZEMTSOV D A, DERYAGINA N V, et al. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 185: 1–13.
- [8] DEJANOVIĆ I, MATIJAŠEVIĆ L, OLUJIĆ Ž. Dividing wall column—a breakthrough towards sustainable distilling[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(6): 559–580.
- [9] WALTERMANN T, SIBBING S, SKIBOROWSKI M. Optimization-based design of dividing wall columns with extended and multiple dividing walls for three- and four-product separations [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2019, 146: 107688.
- [10] LI C L, ZHANG Q L, XIE J W, et al. Design, optimization, and industrial-scale experimental study of a high-efficiency dividing wall column[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 247: 116891.
- [11] YILDIRIM Ö, KISS A A, KENIG E Y. Dividing wall columns in chemical process industry: a review on current activities [J]. Separation and Purification Technology, 2011, 80: 403–417.
- [12] FANG J, HU Y Q, LI C L. Energy-saving mechanism in heat transfer optimization of dividing wall column[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52(51): 18345–18355.
- [13] ZANG L J, HUANG K J, YUAN Y, et al. Vapor recompressed dividing-wall distillation columns: structure and performance[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(7): 1891–1897.
- [14] 孙诗瑞, 杨傲, 石涛, 等. 特殊精馏热耦合强化技术研究进展[J]. 化工学报, 2020, 71(10): 4575–4589.
- SUN S R, YANG A, SHI T, et al. Research advances in thermally coupled intensification technology for special distillation[J]. CIESC Journal, 2020, 71(10): 4575–4589. (in Chinese)
- [15] GAO L R, XU L H, YIN X H, et al. Effective control of vapor recompression-assisted dividing wall column with a middle partition[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2020, 59(13): 6112–6122.
- [16] SUPHANIT B, BISCHERT A, NARATARUKSA P. Exergy loss analysis of heat transfer across the wall of the dividing-wall distillation column [J]. Energy, 2007, 32(11): 2121–2134.
- [17] NAKAIWA M, HUANG K J, ENDO A, et al. Internally heat-integrated distillation columns: a review [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81(1): 162–177.
- [18] GANDU R, BUROLIA A K, AMBATI S R, et al. Reducing total annual cost and CO₂ emissions in batch distillation for separating ternary wide boiling mixtures using vapor recompression heat pump [J]. Chemical Product and Process Modeling, 2023, 18(1): 177–194.
- [19] SUPHANIT B. Design of internally heat-integrated distillation column (HIDiC): uniform heat transfer area versus uniform heat distribution [J]. Energy, 2010, 35(3): 1505–1514.
- [20] ALY S. Heuristic approach for the synthesis of heat-integrated distillation sequences [J]. International Journal of Energy Research, 1997, 21: 1297–1304.
- [21] LIANG S S, CAO Y J, LIU X Z, et al. Insight into pressure-swing distillation from azeotropic phenomenon to dynamic control [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 117: 318–335.
- [22] MA Y X, CUI P Z, WANG Y K, et al. A review of extractive distillation from an azeotropic phenomenon for dynamic control[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(7): 1510–1522.
- [23] LUYBEN W L. Evaluation of criteria for selecting temperature control trays in distillation columns[J]. Journal of Process Control, 2006, 16(2): 115–134.
- [24] JIA S K, QIAN X, YUAN X G, et al. Control structure

- comparison for three-product Petlyuk column [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26 (8): 1621 – 1630.
- [25] KISS A A, BILDEA C S. A control perspective on process intensification in dividing-wall columns [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2011, 50: 281 – 292.
- [26] ZHU Y, LIU X G. Investigating control schemes for an ideal thermally coupled distillation column (ITCDIC) [J]. Chemical Engineering Technology, 2005, 28 (9): 1048 – 1055.

Design and control of an internally heat integrated middle dividing wall column

WU Hao CHEN HaiSheng* HUANG KeJin

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Although a dividing wall column (DWC) is more energy-efficient than the conventional distillation sequence composed of multiple conventional distillation columns, it can still be further intensified. The DWC can be divided into upper and lower parts in terms of the feed location (the upper part includes the common rectifying section and the two sections adjacent to the partition above the feed location, whilst the lower part contains the two sections adjacent to the partition under the feed location and the common stripping section). A novel internally heat integrated middle dividing wall column (IHIMDWC) has been developed by introducing internal heat integration between the two parts. Depending on the arrangement of the internal heat integration at one side or both sides of the partition above or under the feed location, four topological configurations can be derived. Taking the separation of a ternary mixture of methanol, ethanol and 1-propanol as an illustrative example, these four topological configurations were optimized by a heuristic search method and their controllability was examined using a decentralized temperature control system. The simulation results show that the IHIMDWC can not only reduce energy consumption when compared with the DWC, but the proposed decentralized temperature control system can also effectively suppress disturbances.

Key words: dividing wall column; internally heat integration; steady-state design; decentralized temperature control; controllability

(责任编辑:吴万玲)