

# 多进料填补隔离壁精馏塔的黑洞问题

李 岫, 黄克谨\*

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

**摘要:** 由于隔离壁精馏塔(DWDC)的预分离塔和主精馏塔之间存在着强烈的物质耦合与能量耦合, 其在四点浓度(3个主要产品的采出浓度和中间产物的杂质浓度比)的控制条件下, 存在设计和操作的黑洞问题。利用多进料策略的综合设计方法有效地对黑洞进行了填补, 通过对实际物系乙醇、丙醇、丁醇分离系统的稳态分析和动态研究, 验证了该方法的可行性及有效性, 并证明了该方法的节能优势。

**关键词:** 隔离壁精馏塔; 四点浓度控制; 黑洞问题; 多进料; 动态操作

中图分类号: TQ021.8; TP29

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)12-0150-04

## Feed splitting strategy for black-hole problem of dividing-wall distillation columns

LI Shen, HUANG Ke-jin\*

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

**Abstract:** A dividing-wall distillation column (DWDC) will suffer the so-called black-hole problem when the four-point composition control strategy (i. e., controlling the main compositions of the three products and the ratio between compositions of the two impurities in the intermediate product) is utilized. This potential drawback stems from the material and thermal coupling between the prefractionator and main distillation column. In this work, feed splitting strategy is applied to avoid the black-hole problem in process design and operation, and an illustrative example is employed to evaluate the proposed philosophy. Both the steady-state analysis and dynamic studies of the ternary mixtures with ethanol, propanol, and butanol show that feed splitting strategy can be an effective means to circumvent the black-hole problem. Moreover, the proposed strategy is also proved to allow more leverage in energy saving with respect to other strategy.

**Key words:** dividing-wall distillation column; four-point composition control; black-hole problem; feed splitting; dynamic operation

隔离壁精馏塔(DWDC)相较常规精馏塔不仅能减少设备投资还能节省操作能耗, 若加以深入研究和推广应用, 必能为化工工业带来良好的经济、环保效益, 前景十分广泛。DWDC将预分离塔和主精馏塔整合于一个塔壳中, 增多了设计和操作的自由变量, 同时, 强化了两塔之间的物质耦合与能量耦合, 但是, 也导致它具有高度的非线性和复杂的动态特性, 让设计和控制环节变得更加棘手。

1995年Wolff等<sup>[1]</sup>对分离系统进行四点浓度控制(即严格控制塔顶、塔底和侧线出料3个主要产品浓度和中间出料产品中最轻与最重组分浓度的比例), 发现在操作区域中存在特殊区间, 在区间内即使给予系统无限大的再沸器热负荷或者回流比也不能满足产品的设计指标要求。这一现象被形象地称为“洞”难题, 严重影响了DWDC的操作弹性和应用范围<sup>[2-5]</sup>。目前, 国内对此类问题的系统研究较少, 大多采取降低中间产品出料浓度或热力学效率为代

价来回避。近期, 本课题组进行了一系列研究, 结果表明, 预分离塔和主精馏塔之间复杂的物质耦合与能量耦合导致了这一独特现象, 并正式命名为DWDC的“黑洞”问题<sup>[6-8]</sup>。

在本文中, 采用多进料策略(feed splitting, FS)对DWDC进行设计, 通过对一组实际三元混合物的分离系统进行稳态分析和研究、动态仿真和对比, 验证了多进料策略填补黑洞的可行性及有效性, 而且表明了多进料策略在节能方面的优势。

## 1 多进料策略填补DWDC的黑洞问题

### 1.1 基本原理

DWDC的预分离塔和主精馏塔之间存在强烈的相互作用, 当以经济指标函数(economic objective function, EOF)为唯一标准进行设计和操作时, 容易引起系统自身的缺陷——黑洞问题。DWDC的两塔由4股气液相流(图1粗箭头所示)相连, 其浓度

收稿日期: 2014-01-02; 修回日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(21076015)

作者简介: 李岫(1989-), 女, 硕士生; 黄克谨(1963-), 男, 教授, 研究方向为化工系统工程, 通讯联系人, 010-64434801, huangkj@mail.buct.edu.cn。

和流量都极大地影响着预、主精馏塔之间复杂的耦合关系。因此,任何一个能够决定4股物流浓度和流量的变量都可选为设计变量。

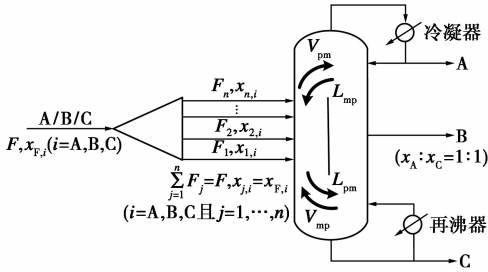


图1 多进料策略的原理图

1.2 多进料策略填补黑洞问题的综合与设计

多进料策略不仅能够强化系统过程中的物质和能量耦合<sup>[9-11]</sup>,还能提升系统的动态特性和可控性<sup>[12-13]</sup>,因此成为常规和非常规精馏塔都常用的综合设计方法。本文中利用多进料策略对DWDC进行设计,即通过改变进料的股数、位置、流量来影响4股气液相流的浓度和流量。采用EOF最小为标

准,循环迭代顺序搜索设计变量,从根本上寻找预分离塔和主精馏塔的稳态和动态的折中与平衡策略,达到填补黑洞与节约资金能耗的双重目的<sup>[7]</sup>,其设计方案原理图如图1所示。

根据之前工作<sup>[6-8]</sup>,规定初始过程设计(initial process design, IPD)为黑洞存在的设计结构,最终过程设计(final process design, FPD)为黑洞填补完毕的设计结构,并选择上升蒸气量V与进料流量F之比(V/F)作为经济能耗指标。

2 实际三元混合物系乙醇、丙醇、丁醇分离系统

2.1 问题描述

采用Wolff等人研究的等摩尔乙醇、丙醇、丁醇三元分离系统来研究DWDC的黑洞问题<sup>[1]</sup>,图2(a)给出了实例的过程设计图,系统的物性参数和设计指标如表1所示。此时,预分离塔和主精馏塔的液相组分浓度如图3(a)和3(b)所示,上升蒸气

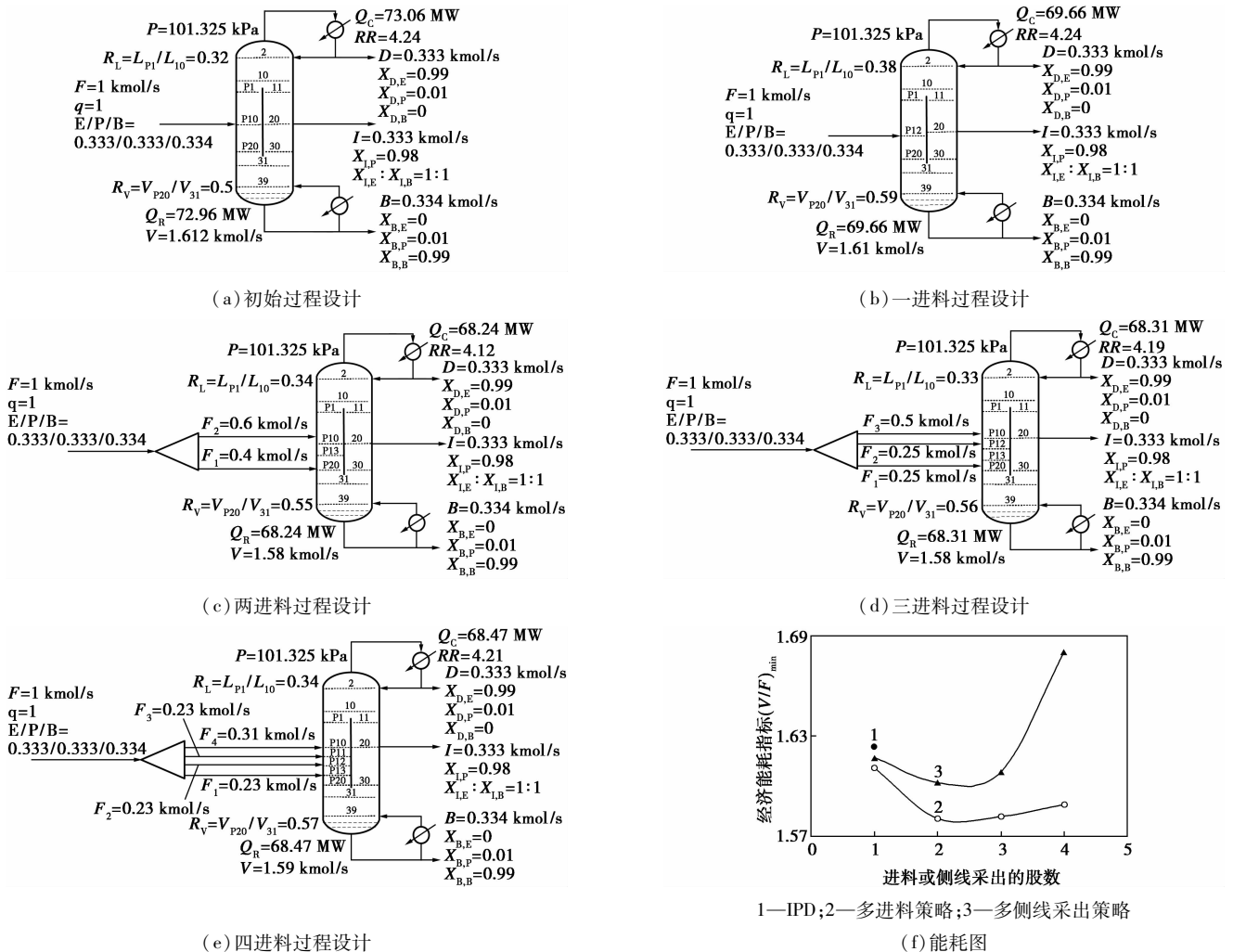


图2 实际三元混合物系的过程设计图

表 1 实际物系分离系统的物性参数和设计指标

参数	数值
冷凝器压力/kPa	101.325
塔板压降/kPa	0
进料组分(摩尔分数)/%	
乙醇(E)	33.3
丙醇(P)	33.3
丁醇(B)	33.4
进料流量/(kmol·s <sup>-1</sup> )	1
进料热状况	1.0
相对挥发度 E:P:B	4:2:1
标准沸点/K	
乙醇(E)	352
丙醇(P)	370
丁醇(B)	392
产品规格(摩尔分数)/%	
乙醇(E)	99
丙醇(P)	98
丁醇(B)	99
中间产品中组分 E 与 B 的比值	1:1

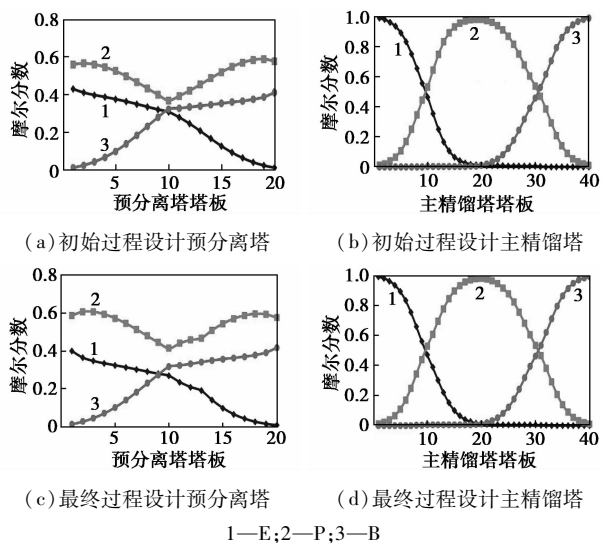


图 3 初始过程结构和最终过程结构的组分曲线图

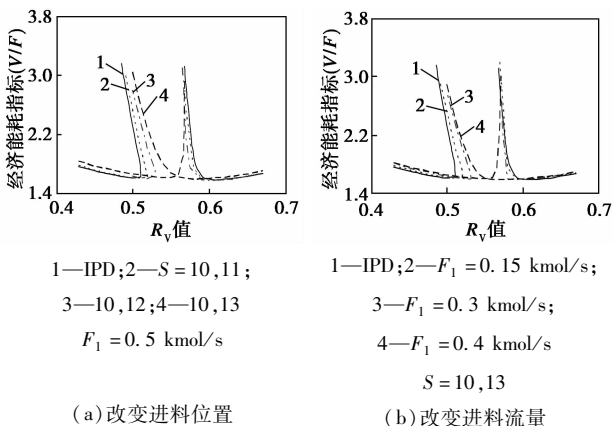


图 4 实际三元混合物系的黑洞填补过程

量与进料流量的比值  $V/F$  和气相分离比  $R_V$  关系如图 4(a) 实线所示,此时黑洞明显可见。

### 2.2 填补过程

图 2(b) ~ (e) 描述了进料股数从 1 ~ 4 填补黑洞的设计结构图,图 2(f) 显示了进料股数与  $V/F$  之间的关系,根据经济能耗指标,2 个进料的最终过程设计选作该物系下的最终结构。图 4(a) 和 4(b) 描述了两进料填补黑洞的过程,当进料塔板为 10 和 13,流量均为 0.5 kmol/s 时,黑洞完全消失。进一步调整进料流量为 0.4 kmol/s 和 0.6 kmol/s 时,不仅黑洞被填补,同时能量消耗相对较低。其预分离塔、主精馏塔的液相组成如图 3(c) 和 3(d) 所示。从图 3(d) 中可见,中间采出丙醇组分的对称性得以加强,也就是据 Wolff 所言中间产物的“钟形”程度更高<sup>[1]</sup>。

### 2.3 动态验证

利用 Aspen Dynamic 建立 DWDC 的等效动态模型,对比初始和最终过程设计的闭环动态响应来验证多进料策略填补黑洞的有效性。本文中继续沿用之前工作中的分散控制结构<sup>[6-7]</sup>,采用 Tyreus-Luyben 顺序整定控制器参数<sup>[14]</sup>,整定结果如表 2 所示。在 2.5 h 时对进料组分乙醇添加  $\pm 10\%$  扰动,同时保证进料组成中杂质丙醇、丁醇组分比值不变。从动态响应曲线(图 5)中可以看到,最终过程设计较初始过程设计的稳定时间更短、偏差更小、抗干扰性能更好。面对干扰,初始过程设计不能维持中间采出产品中杂质比为 1:1,即出现了黑洞,对应稳态操作中的无解区域,而最终过程设计能够有效避免黑洞。同理,依次验证丙醇、丁醇  $\pm 10\%$  干扰下的动态响应,结果与乙醇发生扰动时的结论一致,此处图省略。

表 2 实际三元混合物系的初始、最终过程设计的控制器参数整定

控制器	控制变量	被控变量	$K_C$		$T_I/\text{min}$	
			IPD	FPD	IPD	FPD
$CC_{\text{top}}$	$D$	$X_{D,E}$	95.57	107.29	112.20	104.28
$CC_{\text{intermediate}}$	$I$	$X_{I,P}$	23.37	26.56	48.84	52.80
$CC_{\text{bottom}}$	$Q_R$	$X_{B,B}$	4.52	4.78	44.88	64.68
$CC_{\text{ratio}}$	$R_L$	$R_{E/B}$	0.05	0.139	228.36	104.28

### 3 讨论

实际三元物系乙醇、丙醇和丁醇混合物分离系统的稳态分析和动态研究充分证实了多进料策略能很好解决设计和操作中 DWDC 的黑洞问题,这一结

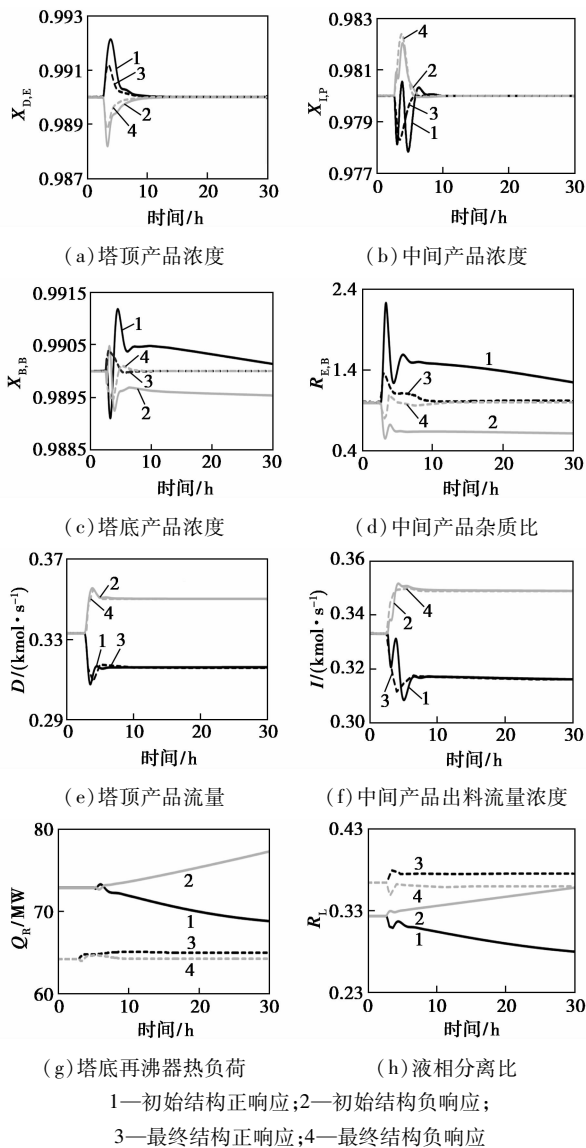


图5 实际三元混合物系的进料组分乙醇改变 $\pm 10\%$ 的动态响应曲线

论将极大地拓展 DWDC 在四点浓度控制的应用范围。与多侧线采出策略(arrangement of multiple intermediate products, AMIP)的对比<sup>[7]</sup>如图 2(f)所示,可知多进料策略能耗更低,在节能方面拥有更多优势。不仅如此,通过对 2 种策略相结合的应用效果的进一步研究,结果显示较单独运用并无明显优势,故实际应用中二者择一即可。

由于多进料策略较好地协调了预、主两塔之间的耦合关系,提升了过程设计的综合性能,寻优之后所得设计结构的常规三点浓度(3 个主要产品采出浓度)控制也同样得到了改进。而且,根据提升程度的不同,推测系统的动态特性和可控性与稳态能量消耗差异有关,能耗差异越大,性能提升程度越高。

## 4 结论

多进料策略能够有效填补 DWDC 四点浓度控制的设计与操作黑洞,通过选取合适的进料股数、位置、流量,协调了两塔的复杂耦合关系。实际物系乙醇、丙醇、丁醇的三元分离系统的综合设计与动态控制的实验,不仅验证了该方法的可行性和高效性,还显示了其在节能方面具有的较大优势。

## 参考文献

- [1] Wolff E A, Skogestad S. Operation of integrated three-product (Petlyuk) distillation columns[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1995, 34(6): 2094–2103.
- [2] Halvorsen I J, Skogestad S. Optimal operation of Petlyuk distillation: Steady-state behavior[J]. *J Process Contr*, 1999, 9(5): 407–424.
- [3] Serra M, Espuña A, Puigjaner L. Control and optimization of the divided wall column[J]. *Chem Eng Process*, 1999, 38(4/5/6): 549–562.
- [4] Niggemann G, Hiller C, Fieg G. Experimental and theoretical studies of a dividing-wall column used for the recovery of high-purity products[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2010, 49(14): 6566–6577.
- [5] Yildirim O, Kiss A A, Kenig E Y. Dividing wall columns in chemical process industry: A review on current activities[J]. *Sep Purif Technol*, 2011, 80(3): 403–417.
- [6] Wang Y, Huang K, Luan S, *et al.* Circumventing the black-hole problem in design and control of dividing-wall distillation columns[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2012, 51(45): 14771–14792.
- [7] Gao J, Huang K, Luan S, *et al.* Avoiding the black-hole problem by the arrangements of multiple intermediate products to dividing-wall distillation columns[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2013, 52(11): 4178–4210.
- [8] Chen W, Huang K, Chen H, *et al.* Design and operation of dividing-wall distillation columns. 1. Diminishing the black-hole problem through over-design[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 75: 90–109.
- [9] Wankat P C, Kessler D P. Two-feed distillation: Same-composition feeds with different enthalpies[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1993, 32(12): 3061–3067.
- [10] Soave G S, Gamba S, Pellegrini L A, *et al.* Feed-splitting technique in cryogenic distillation[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45(16): 5761–5765.
- [11] Li P, Huang K, Lin Q. A generalized method for the synthesis and design of reactive distillation columns[J]. *Chem Eng Res Des*, 2012, 90(2): 173–184.
- [12] Vora N, Daoutidis P. Dynamics and control of an Ethyl Acetate reactive distillation column[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2001, 40(3): 833–849.
- [13] Cheng J K, Lee H Y, Huang H P, *et al.* Optimal steady-state design of reactive distillation processes using simulated annealing[J]. *J Tw Inst Chem Eng*, 2009, 40(2): 188–196.
- [14] Luyben W L. *Distillation design and control using Aspen simulation* [M]. New York: Wiley, 2006. ■