

Kaibel 隔壁塔的温度温差控制

刘蕊, 钱行, 张亮, 陈海胜, 苑杨, 王韶锋, 黄克谨*
(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要:以分离甲醇、乙醇、正丙醇和正丁醇四元混合物的 KDWC 为研究对象,系统地探讨对其实施温度控制的可行性与有效性。基于灵敏度与稳态偏差最小方法给出了一种 5×5 温度控制系统。虽然它能有效克服进料浓度扰动的影响,但对进料流量扰动却存在较大的稳态偏差。鉴于系统内部耦合以及塔内压力变化是导致这一问题的根本原因,基于奇异值分解原理又给出了一种 5×5 温差控制系统。仿真结果显示,它能够有效克服来自进料流量与浓度扰动的影响,保持产品质量的严格控制。结果表明,KDWC 虽具有复杂的动态特性和低可控性,但基于塔板温度的推断控制策略仍是可行与有效的。

关键词:温度控制;温差控制;稳态偏差;流量扰动;组分扰动

中图分类号:TP021.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)02-0219-10

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.02.042

Control on temperature and temperature difference of a Kaibel dividing-wall column

LIU Rui, QIAN Xing, ZHANG Liang, CHEN Hai-sheng, YUAN Yang,
WANG Shao-feng, HUANG Ke-jin*

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

Abstract: Feasibility and effectiveness to execute temperature control on a Kaibel dividing-wall column (KDWC) is systematically addressed with the separation of a quaternary mixture of methanol, ethanol, n-propanol, and n-butanol as an illustrative example. In terms of sensitivity analysis and steady-state deviation minimum deviation method, a 5×5 temperature control system is derived. Although it can effectively deal with feed composition disturbances, it leaves fairly large steady-state deviations in product qualities in face of feed flow rate disturbances. Since system interaction and in-column pressure variations are the primary reasons for the unsatisfactory behavior, another 5×5 temperature difference control system is derived based on the singular value decomposition principle. Closed-loop simulation results show that this system can effectively deal with both feed composition and flow rate disturbances, and achieve tight product quality control. These outcomes demonstrate that the application of temperature inferential control strategy is still feasible and effective in spite of the complicated dynamics and degraded controllability of KDWC.

Key words: temperature control; temperature difference control; steady-state deviation; feed flow disturbance; feed composition disturbance

分壁式精馏塔(dividing-wall column, DWC)可以高纯度地分离三元混合物,相比于常规双塔分离结构可以节省 30% 的设备投资成本与操作能耗^[1-3]。Kaibel 分壁塔(Kaibel dividing-wall column, KDWC)是 DWC 设计理念的进一步扩展,与后者最大的区别在于有 2 股侧线出料,能够高纯度地实现四元混合物的分离^[4-6]。高度的内部物质与能量耦合使得它具有更高的节省设备投资成本与操作能耗的潜力,但也由此导致它具有复杂的动态特性和低可控性,给产品质量的严格控制带来了挑战^[7-9]。Dwivedi 等^[10]通过实体精馏塔的实验探讨了 KDWC 稳态设计和动态控制的可行性。王志锋等^[11]基于

甲醇、乙醇、正丙醇、正丁醇四元混合物的分离对 KDWC 进行了稳态设计和性能分析,显示了 KDWC 大幅度降低冷凝器与再沸器负荷的潜在优势。Qian 等^[12]基于同样的分离物系对 KDWC 的控制问题进行了研究。为了回避 5 个被控产品质量间的相互耦合,他们给出了一个前馈辅助的 4×4 温度控制系统,虽然取得了较好的控制效果,但并没有完全阐明对 KDWC 实施 5×5 温度控制的可行性与有效性。Fan 等^[13]基于正戊烷、正己烷、正庚烷和正辛烷四元混合物的分离问题,通过比较发现在控制结构中增加分液比或分气比的控制回路能够提升系统的性能,但却难以减小下侧线出料的稳态误差。邱洁

收稿日期:2020-03-23;修回日期:2020-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(21676011,21808007)

作者简介:刘蕊(1994-),男,硕士生;黄克谨(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为化工过程系统工程,通讯联系人,huangkj@mail.buct.edu.cn。

等^[14]对一个分离苯、甲苯、二甲苯和三甲苯四元混合物的 KDWC 设计了一种 5×5 温度控制系统。缺点是下侧线产品存在的较大稳态偏差,且不得不依靠一个前馈控制器来校正设定值。该前馈控制器依赖于精准的气液平衡模型,这在实际过程中是难以实现的。虽然目前工业界和学术界对 KDWC 的温度控制已有不少的研究,但至今尚没有完全解明对其实施 5×5 温度控制的可行性与有效性。本文中分离甲醇(methanol, M)、乙醇(ethanol, E)、正丙醇(n-propanol, P)和正丁醇(n-butanol, B)四元混合物(MEPB)的 KDWC (MEPB KDWC)为研究对象,具体研究对其实施温度控制的可行性与有效性。基于灵敏度与稳态偏差最小方法给出了一种 5×5 的温度控制系统。虽然它能有效克服进料浓度的影响,但对进料流量的扰动却产生较大的稳态偏差。鉴于塔内耦合与压力变化是导致这一问题的主要原因,基于奇异值分解原理又给出了一种 5×5 的温差控制系统。仿真结果显示,它能够有效克服来自进料流量与浓度扰动的影响,保持产品质量的严格控制。

1 MEPB KDWC 的稳态设计与分析

图 1 给出了 MEPB KDWC 的稳态设计。预分塔与主塔分别具有 40 和 70 块塔板。进料为等摩尔分数的饱和液体,流量为 1 kmol/h,温度为 298.15 K。甲醇、乙醇、正丙醇、正丁醇的产品摩尔分数均为 99%。稳态仿真是在商用软件 Aspen Plus 环境下进行的,NRTL 模型被用来进行气液平衡的计算。塔顶压力设为 0.1 MPa。图 2 给出了预分塔与主塔的温度分布曲线。不难看出,甲醇和乙醇几乎全部从预分塔的顶部留出,而正丙醇与正丁醇则几乎全部从预分塔的底部抽出。在主塔顶部与底部分别实现甲醇和乙醇以及正丙醇与正丁醇的分离,而在两股侧线之间的分离段则实现乙醇与正丙醇的分离。这有效地遵循了 KDWC 的设计原理。图 3 给出了预分塔与主塔的温度分布曲线。对于预分塔,介于塔板 10 与 25 之间较陡的温度梯度反映着 ME/PB 的分离操作。对于主塔,介于塔板 10 与 18、塔板 40 与 48 以及塔板 60 与 70 之间 3 段较陡的温度梯度反映着甲醇、正丙醇与正丁醇的提纯操作,而对乙醇的提纯操作,显然缺乏一段较陡的温度梯度与之相对应,这是强烈的内部物质与能量耦合所造成的,暗示着对乙醇产品进行温度推断控制的高难度。

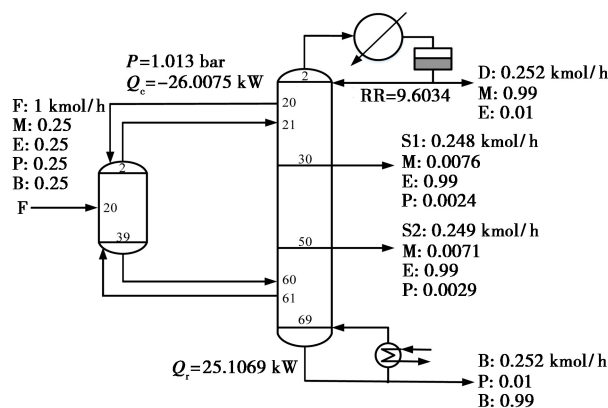
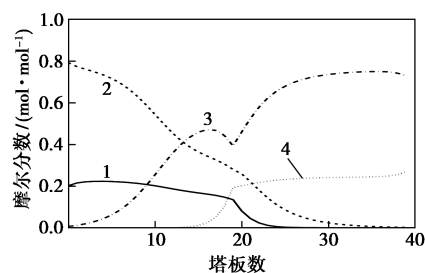
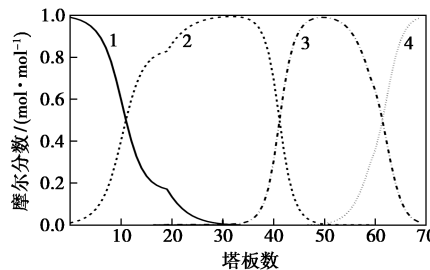


图 1 MEPB KDWC 的稳态设计



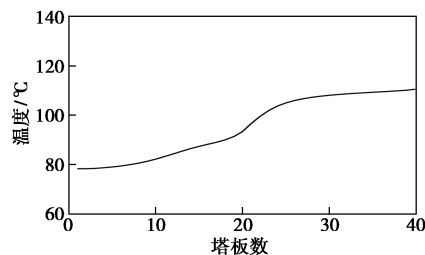
(a) 预分塔



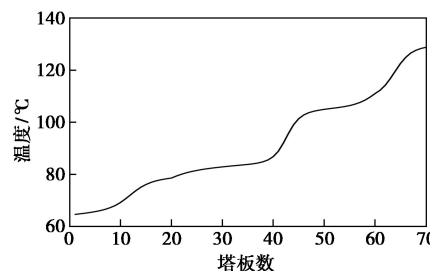
(b) 主塔

1—甲醇(M);2—乙醇(E);3—正丙醇(P);4—正丁醇(B)

图 2 预分塔与主塔的摩尔分数分布图



(a) 预分塔



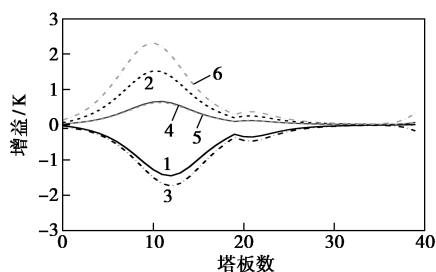
(b) 主塔

图 3 预分塔与主塔的温度分布图

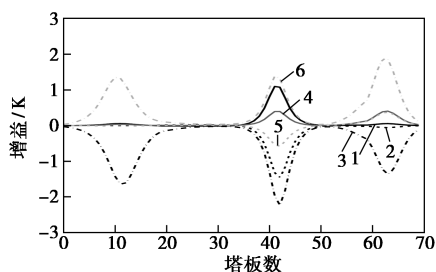
2 MEPB KDWC 的温度控制

2.1 温度控制系统的综合与设计

动态仿真是在商用软件 Aspen Dynamics 环境下进行的。主塔的压力采用冷凝器热负荷进行控制。塔顶与塔底的储罐液位依据相应产品的流量进行控制,均采用比例(P)控制器。压力和液位控制器的参数采用 Luyben 的经验值。MEPB KDWC 具有 5 个被控变量,分别是预分塔塔顶正丙醇的浓度以及主塔甲醇、乙醇、正丙醇和正丁醇 4 个产品的浓度。相应地其温度控制系统需要控制 5 个塔板温度以实现上述 5 个被控变量的推断控制。MEPB KDWC 具有 6 个自由度,分别是回流量(L)、再沸器热负荷(Q_r)、从主塔返回到预分塔的液相流量(L_p)、从主塔返回到预分塔的气相流量(V_p)、第一侧线产品的流量(S_1)以及第二侧线产品的流量(S_2)。基于灵敏度分析原理,分别对这 6 个自由度施加 0.1% 的阶跃扰动,得到了如图 4 所示的预分塔和主塔的稳态增益分布图。从图中可以看出,灵敏度分析仅给出了 4 个灵敏板位置,即预分塔的第 12 块塔板,主塔的第 12 块板、第 43 块板以及第 64 块板。这个计算结果与前述稳态分析结果完全一致。



(a) 预分塔



(b) 主塔

1— $L_p(+0.1\%)$; 2— $L_v(+0.1\%)$; 3— $L(+0.1\%)$;
4— $S_1(+0.1\%)$; 5— $S_2(+0.1\%)$; 6— $Q_r(+0.1\%)$

图 4 预分塔与主塔的灵敏度分析结果

为了搜索第五个塔板位置,在此应用基于稳态偏差最小原理的优化方法。基本原理是在给定扰动组合的情况下搜索最小稳态偏差所对应的被控塔

板^[15]。在本文中采用如下所示的目标函数:

$$J(L1, L2, L3, L4, L5) =$$

$$\sum_i (|\Delta X_M|_i + |\Delta X_E|_i + |\Delta X_P|_i + |\Delta X_B|_i) \quad (1)$$

式中, i 为进料流量变化+10%与-10%以及进料组成变化+10%与-10% 5 种扰动情况;L1、L2、L3、L4、L5 分别为预分塔与主塔被控塔板的位置; $|\Delta X_M|$ 、 $|\Delta X_E|$ 、 $|\Delta X_P|$ 、 $|\Delta X_B|$ 分别为甲醇、乙醇、正丙醇、正丁醇 4 个产品浓度的稳态偏差的绝对值。

在固定 L1、L2、L3、L4 为预分塔的第 12 块塔板、主塔的第 12 块板、第 43 块板、第 64 块板的前提下,求解式(1)的优化问题得到了如图 5 所示的搜索结果。由图中不难看出,第五块被控塔板的位置应在第 51 块塔板。

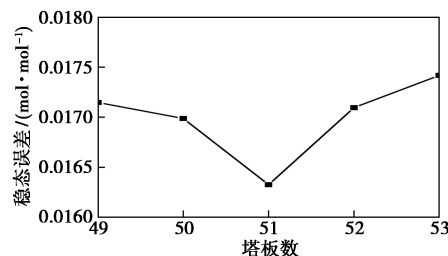


图 5 第五个被控塔板位置的搜索结果

鉴于隔壁的低端位置一般在操作中保持固定,故从主塔返回到预分塔的气相流量(V_p)亦为常量。因此本文中选择回流量、再沸器热负荷、从主塔返回到预分塔的液相流量、第一侧线产品的流量以及第二侧线产品的流量作为操作变量。基于被控变量与操作变量的就近原则,决定以从主塔返回到预分塔的液相流量控制预分塔第 12 块塔板的温度,以塔顶回流量、塔釜再沸器热负荷、第一侧线产品以及第二侧线产品的流量分别控制主塔的第 12 块塔板、第 43 块塔板、第 51 块塔板以及第 64 块塔板的温度,由此得到了如图 6 所示的 5×5 温度控制结构

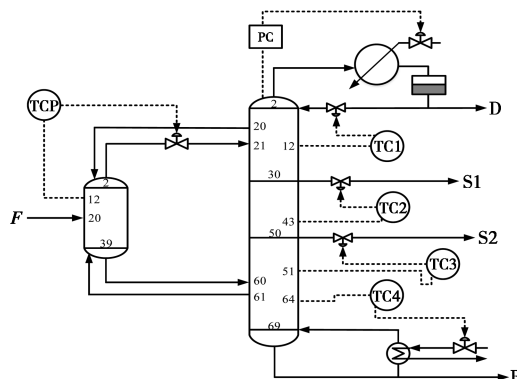


图 6 MEPB KDWC 的温度控制结构图(CS1)

(CS1)。在这里,所有的温度控制器均采用比例积分(PI)控制器,并采用 Tyreus-Luyben 方法进行迭代整定。迭代整定的顺序依次为主塔的塔釜、塔顶、第一侧线、第二侧线以及预分塔。在假定 5 个温度控制回路均存在 1 min 的测量时滞的情况下,得到了如表 1 所示的 5 个温度控制器的参数。

表 1 温度控制器的参数

控制回路	被控变量	操作变量	比例增益	积分时间/min
TCP	TP12	L_p	4.77	17.16
TC1	TM12	L	2.39	10.56
TC2	TM43	S_1	5.95	15.84
TC3	TM51	S_2	42.69	13.20
TC4	TM64	Q_r	0.75	129.36

2.2 温度控制结果与分析

在进料流量阶跃变化 $\pm 10\%$ 的情况下,图 9 描绘了受控于 5×5 温度控制系统的 MEPB KDWC 的闭环响应。阶跃变化是在 0.5 h 这一时刻被引入的。可以看到,该 5×5 温度控制器系统能够较快地使 MEPB KDWC 达到稳定状态。对于塔顶甲醇产品、第二侧线正丙醇产品以及塔底正丁醇产品,稳态偏差均保持在 5‰ 以内,显示了较好的温度推断控制效果。对于第一侧线乙醇产品,稳态偏差却超过了 5‰,显示了较不理想的温度推断控制效果。MEPB KDWC 内部强烈的物质与能量耦合以及内部压力分布较大的变化是导致这一问题的根本原因。

在进料中的甲醇、乙醇、正丙醇以及正丁醇的浓度分别阶跃变化 $\pm 10\%$ 的情况下,图 10~图 13 描绘了受控于 5×5 温度控制系统的 MEPB KDWC 的闭环响应。阶跃变化也是在 0.5 h 这一时刻被引入的。可以看到,该 5×5 温度控制系统仍能够较快地使 MEPB KDWC 达到稳定状态。与进料流量扰动的情形相比,塔顶甲醇产品、第一侧线乙醇产品、第二侧线正丙醇产品以及塔底正丁醇产品的稳态偏差相对较小,均保持在 5‰ 以内,显示了较好的温度推断控制效果。横向比较塔顶甲醇产品、第一侧线乙醇产品、第二侧线正丙醇产品以及塔底正丁醇产品的稳态偏差可以发现,第一侧线乙醇产品的误差绝对值最大,显示了该 5×5 温度控制器的不足。这一结果仍与 MEPB KDWC 内部强烈的物质与能量耦合以及内部压力分布较大的变化密切相关。

3 MEPB KDWC 的温差控制

3.1 温差控制系统的综合与设计

为了解决上述 5×5 温度控制器稳态偏差较大

的缺陷,本文中认为可以对 MEPB KDWC 引入温差控制器的设计理念。相比于 1 个塔板温度,2 个塔板之间的温差不但能够有效地回避塔内压力分布变化的影响,更准确地反映所对应产品浓度的变化,而且在一定程度上能够减弱与其他被控变量之间的相互作用,提高温度推断控制的效果。利用预分塔与主塔的塔板温度稳态增益矩阵,分别求取上述被控塔板与其他塔板的增益差值矩阵,并对其进行奇异值分解($\Delta K = U \Sigma V$)得到了如图 7 所示的分解结果。不难看出,所得到的参考塔板分别为预分塔第 3 块塔板,主塔第 3 块塔板、第 31 块塔板、第 53 块塔板以及第 61 块塔板。图 8 描绘了 MEPB KDWC 的 5×5 温差控制结构(CS2)。其中,温差控制器仍采用 Tyreus-Luyben 方法进行整定,所得到的控制器参数已示于表 2。

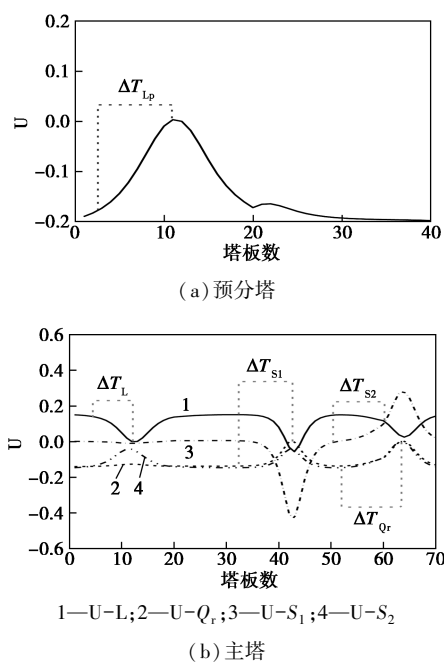


图 7 MEPB KDWC 的奇异值分解

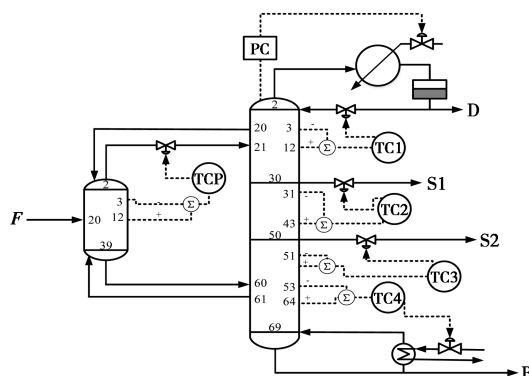


图 8 KDWC 的温差控制结构图(CS2)

表 2 温差控制器的参数

控制回路	被控变量	操作变量	比例增益	积分时间/min
TDCP	TP12-TP3	L_p	7.70	11.88
TDC1	TM12-TM3	L	0.88	11.88
TDC2	TM43-TM31	S_1	2.35	11.88
TDC3	TM61-TM51	S_2	4.10	10.56
TDC4	TM64-TM53	Q_r	3.98	7.92

3.2 温差控制结果与分析

在进料流量阶跃变化±10%的情况下,图 9 同样给出了受控于 5×5 温差控制系统的 MEPB KDWC 的闭环响应。可以看到,该 5×5 温差控制系统也能较快地使 MEPB KDWC 达到稳定状态。对于塔顶甲醇产品、第二侧线正丙醇产品以及塔底正丁醇产品,稳态偏差均保持在 2‰ 以内,显示了较好的温差

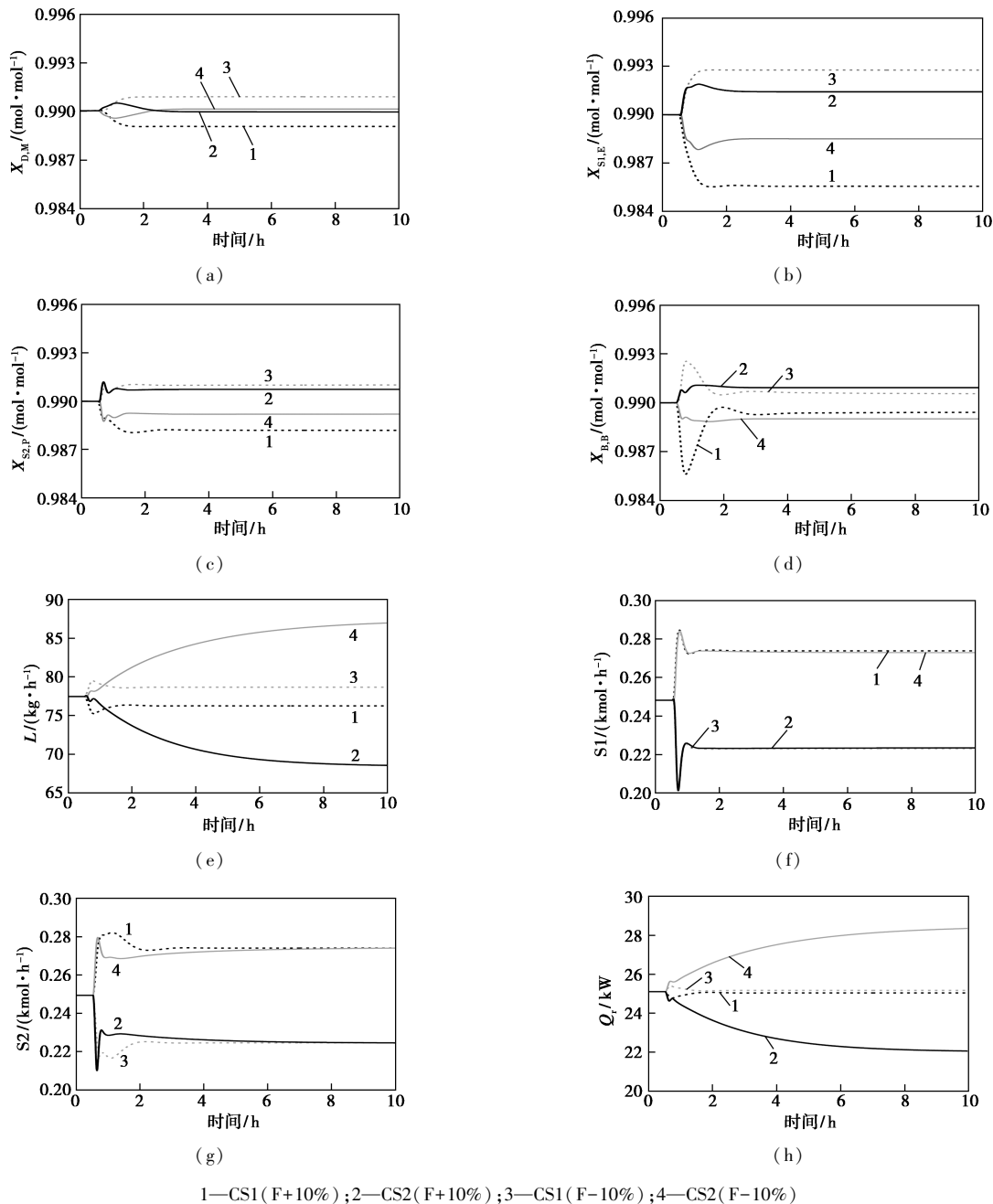


图 9 当进料流量阶跃变化±10%后各产品纯度以及控制器输出的变化

推断控制效果。对于第一侧线乙醇产品,稳态偏差也已经小于 2‰,(与上述 5×5 温度控制器相比)显示了较满意的温差推断控制效果。

在进料中的甲醇、乙醇、正丙醇以及正丁醇的浓

度分别阶跃变化±10%的情况下,图 10~图 13 同样给出了受控于 5×5 温差控制系统的 MEPB KDWC 的闭环动态响应。可以看到,该 5×5 温差控制系统也能较快地使 MEPB KDWC 达到稳定状态。与进

料流量扰动的情形相比,塔顶甲醇产品、第一侧线乙醇产品、第二侧线正丙醇产品以及塔底正丁醇产品的稳态偏差相对较小,均保持在 2‰以内,显示了较

好的温差推断控制效果。对于第一侧线乙醇产品,稳态偏差也已经小于 2‰,(与上述 5×5 温度控制器相比)显示了令人满意的温差推断控制效果。

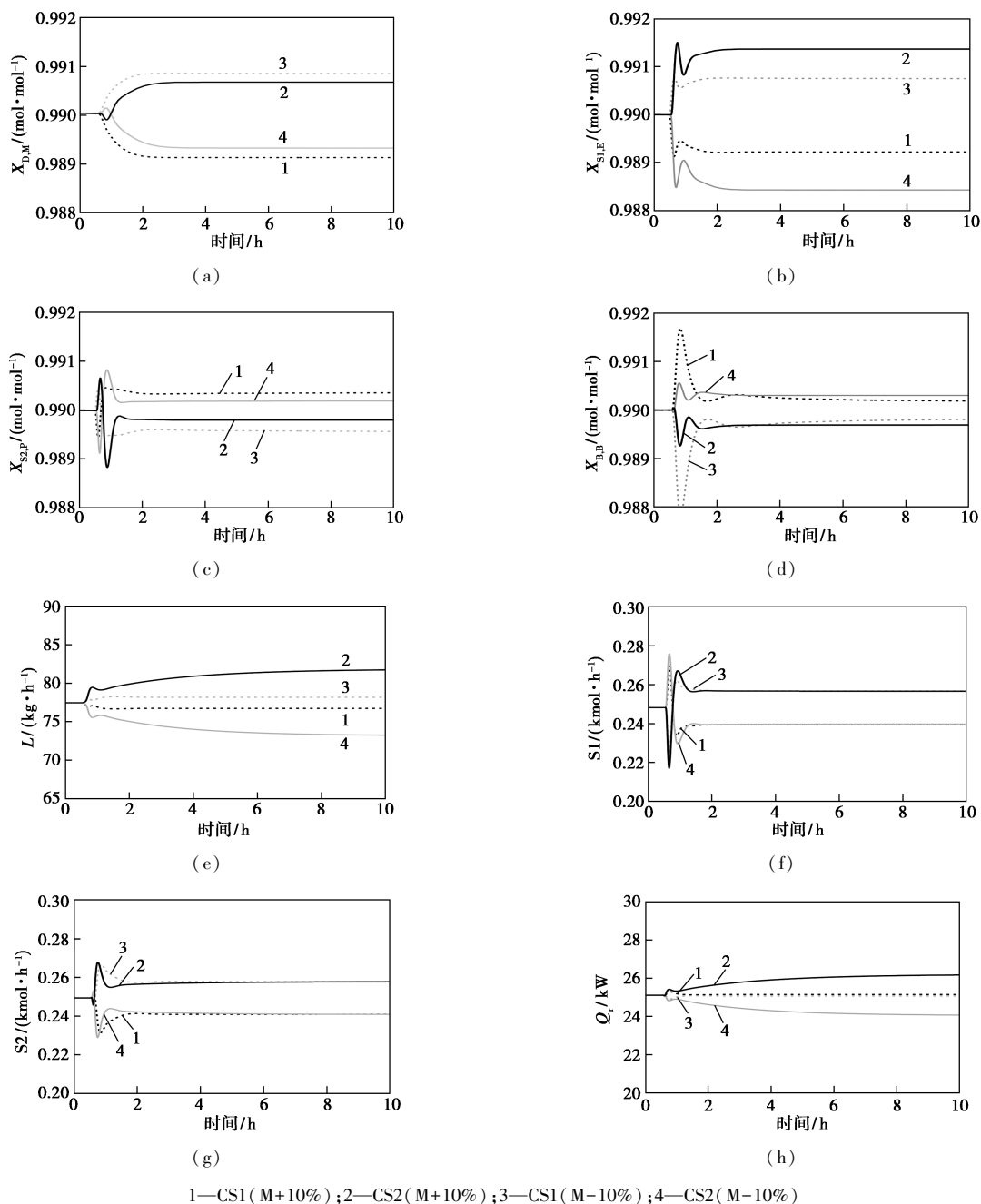
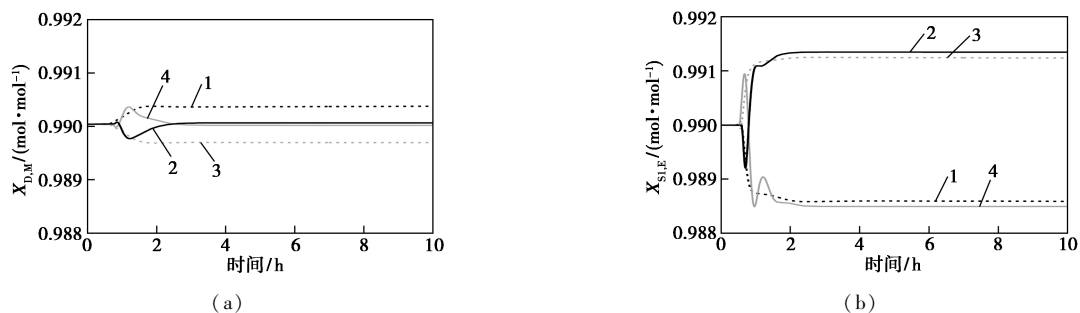
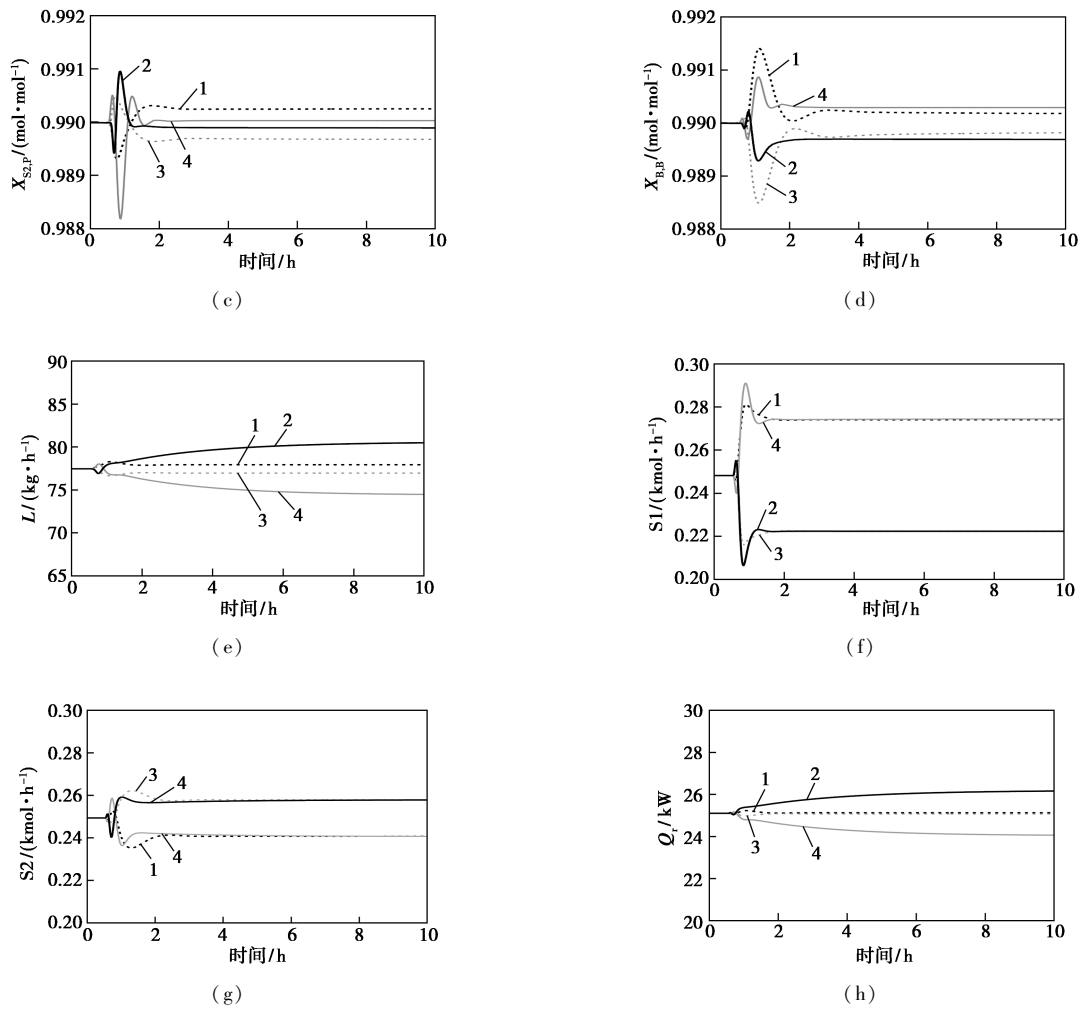


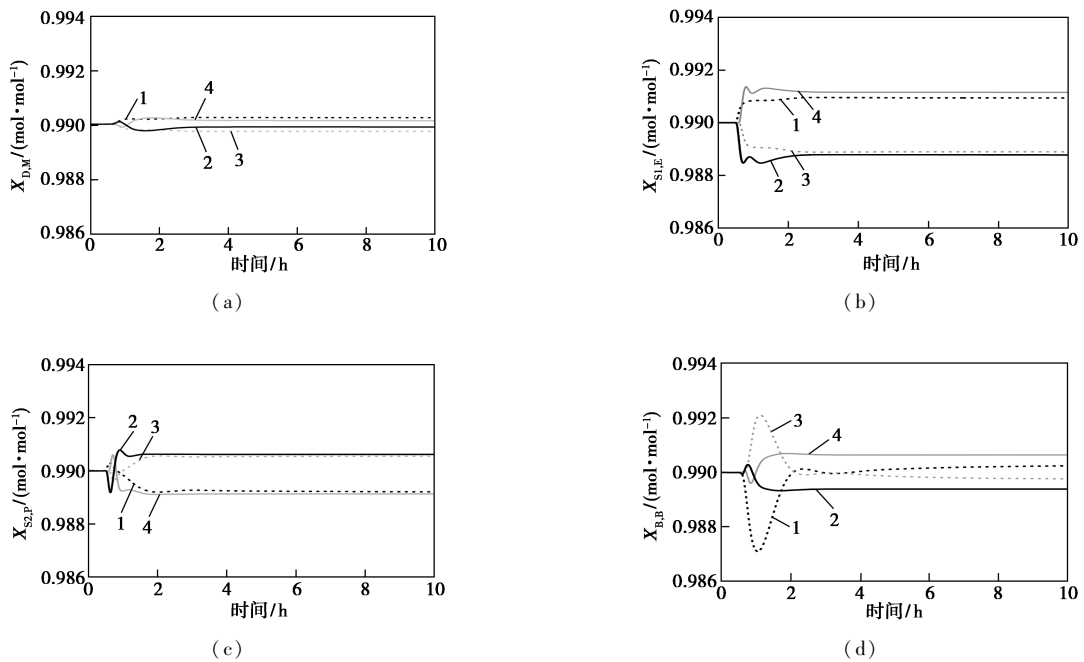
图 10 当进料中甲醇的浓度阶跃变化±10%后各产品纯度以及控制器输出的变化





1—CS1 (E+10%) ; 2—CS2 (E+10%) ; 3—CS1 (E-10%) ; 4—CS2 (E-10%)

图 11 当进料中乙醇的浓度阶跃变化±10%后各产品纯度以及控制器输出的变化



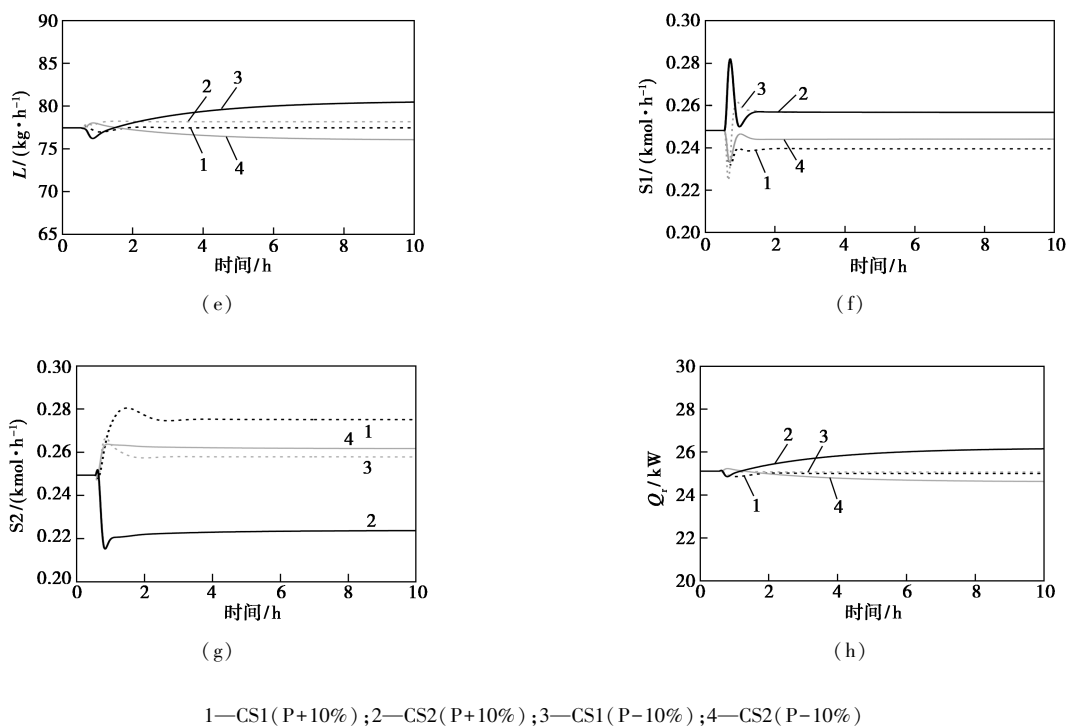
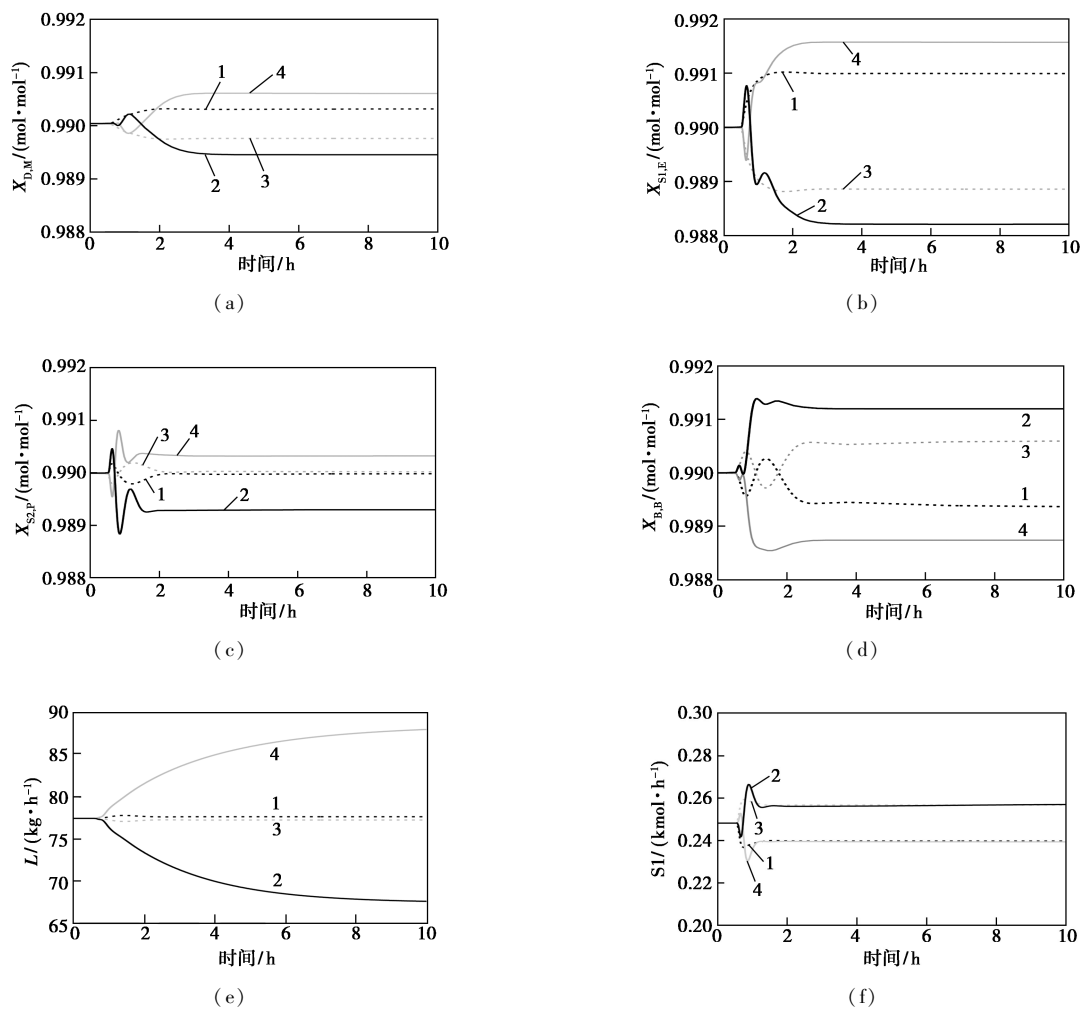


图 12 当进料中正丙醇的浓度阶跃变化±10%后各产品纯度以及控制器输出的变化



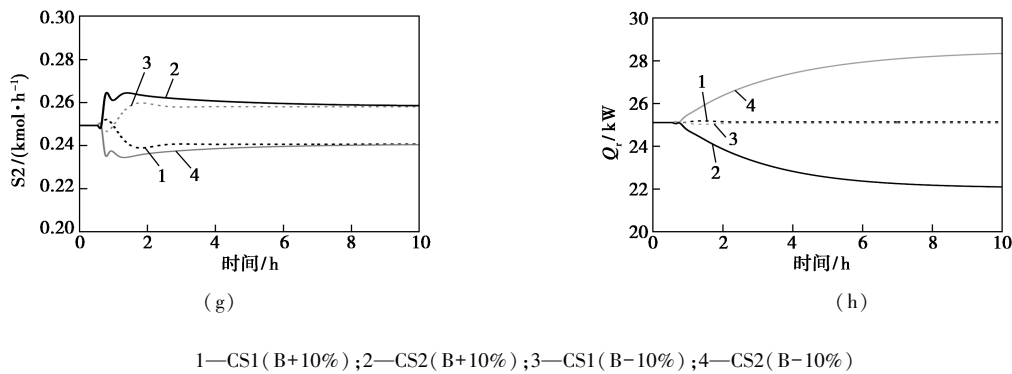


图 13 当进料中正丁醇的浓度阶跃变化±10%后各产品纯度以及控制器输出的变化

4 讨论

上述仿真结果表明,采用 5×5 温度控制系统难以实现对 MEPB KDWC 的严格质量控制。在进料流量存在扰动的前提下,MEPB KDWC 内部强烈的物质与能量耦合以及内部压力分布的较大变化弱化了被控塔板温度与相应产品质量之间的对应关系,从而使得第一侧线乙醇产品具有较大的稳态误差。图 14 描绘了由+10%进料流量阶跃变化所导致的受控于 5×5 温度控制器的 MEPB KDWC 的新稳态压力分布与原稳态压力分布的差值曲线。不难看出,无论是预分塔还是主塔,内部压力的变化均没有呈现一定的规律性,必然使得该 5×5 温度控制系统难以实现全部产品质量的严格控制。图 15 描绘了由+10%进料流量阶跃变化所导致的受控于 5×5 温差

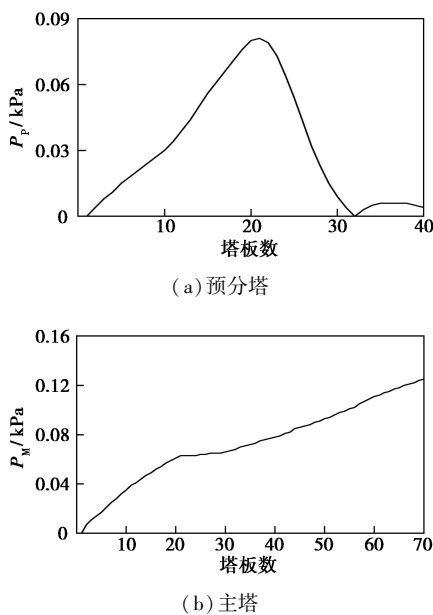


图 14 在温度控制系统的作用下,由+10%进料流量变化所引起的内部压力的变化

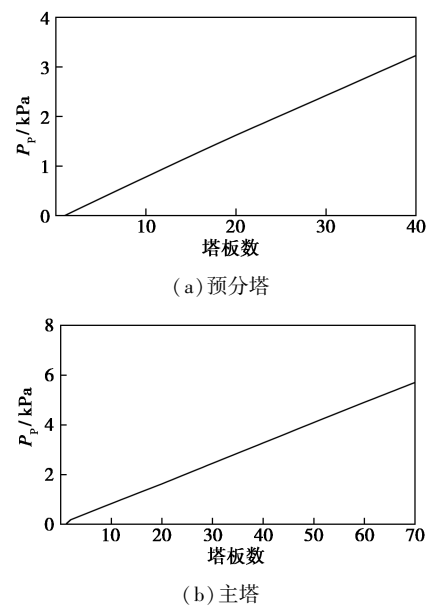


图 15 在温差控制系统的作用下,由+10%进料流量变化所引起的内部压力的变化

控制系统的 MEPB KDWC 的新稳态压力分布与原稳态压力分布的差值曲线。可以看到,预分塔与主塔的内部压力变化呈现相当的规律性,显示了温度与温差控制策略的差异,也给出了后者为什么能够实现 MEPB KDWC 全部产品质量更严格控制的原因。

5 结论

虽然强烈的内部物质与能量耦合使得 KDWC 拥有非常复杂的动态特性与低可控性,但基于温差的推断控制系统仍有可能对其全部产品质量实施严格的控制,这主要归功于它应对被控变量之间的强烈耦合以及系统内部压力较大变化的能力。虽然多变量温差控制要比多变量温度控制更为复杂,但 KDWC 降低设备投资成本与操作能耗的巨大潜力显然能够回馈系统操作的额外付出。

参考文献

- [1] Dejanovi I, Matija L, Evi L O. Dividing wall column—A breakthrough towards sustainable distilling [J]. Chemical Engineering and Processing, 2010, 49(6): 559–580.
- [2] Kiss A A. Distillation technology—still young and full of breakthrough opportunities [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2014, 89(4): 479–498.
- [3] Stankiewicz A, Moulijn J A. Process intensification [J]. Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017, 41(8): 509–518.
- [4] Kaibel D I G. Distillation columns with vertical partitions [J]. Chemical Engineering & Technology, 1987, 10(1): 92–98.
- [5] Dwivedi D, Halvorsen I J, Skogestad S. Control structure selection for four-product Petlyuk column [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 67: 49–59.
- [6] Kiss A A, Ignat R M, Landaeta S J, et al. Intensified process for aromatics separation powered by Kaibel and dividing-wall columns [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 67: 39–48.
- [7] Niggemann G, Hiller C, Fieg G. Experimental and theoretical studies of a dividing-wall column used for the recovery of high-purity products [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(23): 12331–12331.
- [8] Ghadrani M, Halvorsen I J, Skogestad S. Optimal operation of Kaibel distillation columns [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(8): 1382–1391.
- [9] Mutalib M I A, Zeglam A O, Smith R. Operation and control of dividing wall distillation columns; Part 2: Simulation and pilot plant studies using temperature control [J]. Chemical Engineering Research & Design, 1998, 76(3): 319–334.
- [10] Dwivedi D, Strandberg J P, Halvorsen I J, et al. Steady-state and dynamic operation of four-product dividing-wall (Kaibel) columns: Experimental verification [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(48): 15696–15709.
- [11] 王志锋, 沈海涛, 潘蓉, 等. 分壁精馏塔分离四元醇体系的稳态研究 [J]. 石油学报: 石油加工, 2017, 33(1): 129–137.
- [12] Qian X, Jia S K, Skogestad S, et al. Control structure selection for four-product Kaibel column [J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 93: 372–381.
- [13] Fan G L, Jiang W D, Qian X. Comparison of stabilizing control structures for four-product Kaibel column [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 109: 675–685.
- [14] 邱洁, 华涛, 何桂春, 等. Kaibel 分壁精馏塔的压力补偿-温度控制 [J]. 化工学报, 2018, 69(11): 310–325.
- [15] Zang L J, Huang K J, Guo T, et al. Temperature inferential control of a reactive distillation column with double reactive sections [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, (4): 896–904. ■

(上接第 218 页)

(2) 通过 4 种 PAM 的抗盐性能对比测试发现, 对于五元 PAM (AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA) 而言, 0.35% PAM 在 80 000 $\mu\text{g/g}$ 矿化水中的黏度可达 78 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 在 10% 氯化钙水溶液中黏度可达 60 $\text{mPa}\cdot\text{s}$; 说明该 PAM 具有良好的抗盐性能; 并且证明疏水缔合 PAM 中起抗盐作用的单体为长链阳离子单体 ODAAC, SMA 与 ODAAC 在抗盐性能上具有协同增效的作用。

(3) 通过热重和流变性能测试表明, 同时加入 ODAAC 和 SMA 的 PAM 的热稳定性最高, 0.35% 的基液在 170 s^{-1} 、90 $^{\circ}\text{C}$ 条件下剪切 1 800 s 后, 黏度仍然大于 50 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 说明该五元共聚物具有良好的耐温耐剪切能力。

参考文献

- [1] 赵禧阳, 李小瑞, 马国艳. 疏水缔合两性 PAM 的制备及性能评价 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 18–22.
- [2] Sakar, Sarvenhan, Morris, et al. Polymer flooding and its combinations with other chemical injection methods in enhanced oil recovery [J]. Polymer Bulletin, 2018, 75(4): 1753–1774.
- [3] 封明明, 李世伟, 苟绍华, 等. 四种丙烯酰胺疏水缔合共聚物合成及性能研究 [J]. 精细石油化工, 2016, 33(5): 9–15.
- [4] Li Fan, Luo Yue, Hu Pan, et al. Study on the self-assembly properties of surface active hydrophobically associating polyacrylamide with nonionic surfmer units [J]. Polymer Bulletin, 2017, 74(7): 2873–2886.
- [5] Liu Rui, Pu Wanfen, Sheng J J, et al. Star-like hydrophobically associative polyacrylamide for enhanced oil recovery: Comprehensive properties in harsh reservoir conditions [J]. Taiwan Institute Chem Eng, 2017, 80: 639–649.
- [6] 田宜灵, 邱丽娟, 曹利千, 等. 疏水缔合 PAM 临界胶束浓度的测定及微观结构的研究 [J]. 天津大学学报, 2016, 49(1): 9–14.
- [7] 王桂芹, 陈涛, 张蕊, 等. 新型耐温抗盐疏水缔合 PAM 的制备及性能 [J]. 石油化工, 2020, 49(7): 657–663.
- [8] 曹绪龙, 胡岳, 宋新旺, 等. PAM 类疏水缔合物的增黏因素研究 [J]. 高等学校化学学报, 2014, (9): 2037–2042.
- [9] 陈磊, 鲍文辉, 郭布民, 等. 耐高温海水基压裂液稠化剂性能评价 [J]. 油田化学, 2020, 37(1): 17–21, 28.
- [10] 钟传蓉, 黄荣华, 代华. 疏水改性丙烯酰胺共聚物在水溶液中的缔合 [J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(5): 88–91. ■