

顺序式模拟移动床分离低聚木糖 多目标优化及其变量调控机制

李艳^{1*}, 凌山¹, 刘聚明¹, 徐进²

(1. 内蒙古工业大学化工学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 温州大学化学与材料工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要:在前期分离实验基础上,采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)对顺序式模拟移动床(sequential simulated moving bed reactor, SSMB)分离低聚木糖的过程进行了多目标优化,重点研究了 SSMB 分离过程的最佳操作区间及其变量调控机制,并与传统的模拟移动床进行了对比,在此基础上提出了一种具有普适性的变量控制策略。以低聚木糖产品收率最大化和水耗最小化为目标,详细分析了 SSMB 分离过程的最优操作曲线、变量变化趋势、内部浓度曲线和出口处质量流量,提出了一种适用于 SSMB 的设计优化和变量调控的通用策略,证明了不能用传统的流量比及平衡理论来对 SSMB 过程进行变量控制,为 SSMB 在糖类多组分体系、结构复杂的手性药物及生物质体系的应用提供了新思路和新方法。

关键词:顺序式模拟移动床;低聚木糖;多目标优化;遗传算法;变量调控

中图分类号:TQ021.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)01-0240-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.01.042

Multi-objective optimization of sequentially-simulated moving bed for separation of xylo-oligosaccharides and its variables regulation mechanism

LI Yan^{1*}, LING Shan¹, LIU Ju-ming¹, XU Jin²

(1. College of Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Chemistry and Materials Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract:Based on the previous separation experiments, non-dominated sorting genetic algorithm II is employed to perform multi-objective optimization on xylo-oligosaccharides (XOS) separation process by sequential simulated moving bed (SSMB). The optimum operating conditions and variables regulation mechanism for SSMB separation process are studied, and compared with those for traditional simulated moving bed. Based on the study conclusion, a universal variables control strategy is proposed. Aiming at maximizing the yield of xylo-oligosaccharides and minimizing the water consumption, the optimal operation curve, variation trend of variables, internal concentration curve and mass flow rate at the outlet of SSMB separation process are analyzed in detail. Finally, a universal strategy suitable for design optimization and variables regulation of SSMB is proposed, and it is proved that traditional flow ratio and balance theory cannot be used for variables control of SSMB process. It also provides a new idea and method for the application of SSMB in the carbohydrate multi-component system, complex chiral drugs, and biomass systems.

Key words: sequentially-simulated moving bed; xylo-oligosaccharides; multi-objective optimization; genetic algorithm; variables regulation

模拟移动床(simulated moving bed, SMB)作为一项重要的连续性色谱分离技术,具有分离效果好、产率高、纯度高优点,具有广阔的发展前景。近年来,随着经济的发展和科技的进步,化学工业对于分离过程的能耗、溶剂消耗、分离效率、分离产品的复杂性以及分离过程控制的灵活程度都提出了更高的要求,所以相继提出一些新型的模拟移动床分离技术。比如由 Ludemann-Hombourger 提出的 Varicol 系统^[1-2]、内部流速变化的 SMB 过程^[3]、有梯度的

SMB 过程^[4-5],以及近些年发展起来的顺序式模拟移动床(sequential simulated moving bed, SSMB)。SSMB 在保留 SMB 优点的同时,采用了间歇进料、间歇出料的模式,解决了系统内物料的返混问题。而且 SSMB 将传统 SMB 的一次切换分解成 3 个子步骤,每个子步骤可以实现不同的职能,达到更精确的控制,使各组分都在最佳条件下分离,能耗和溶剂消耗显著降低,非常适用于溶剂比较昂贵的难分离体系和一些复杂物质的大规模工业提纯^[6-7]。

收稿日期:2022-02-27;修回日期:2022-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(21763020, 22268031);内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2021GG0248);内蒙古自然科学基金项目(2021BS02003);内蒙古工业大学科学研究项目(ZZ202001, BS2021028)

作者简介:李艳(1990-),女,博士,讲师,研究方向为化工分离过程,通讯联系人,yanLi@imut.edu.cn。

本文中将在实验验证模拟程序准确性的基础上^[8],采用多目标优化的方法探索 SSMB 分离过程的最佳操作区间和变量调控机制。在本课题组的前期研究中,选择了低聚木糖体系为研究对象,体系中的杂质主要是在上游水解反应中未反应的木糖和副产物阿拉伯糖,目标是分离得到聚合度为 1~7 的低聚木糖 (xylooligosaccharide, XOS)。利用 DOWEX MONOSPHERETM 99/310 K⁺ 离子交换树脂作为固定相,测定了此体系吸附等温线和动力学参数^[8]。本文中重点分析 SSMB 分离过程机理和变量变化趋势,比较其与传统 SMB 分离过程的异同,利用基因算法进行多目标优化,总结出适用于 SSMB 的变量调控机制,并深入探索随着优化目标的变化,操作条件产生改变的内在科学依据。

1 SSMB 理论基础及优化策略

SSMB 分为进料、循环、洗脱 3 步,如图 1(b)、(c)、(d) 所示。常见的 SMB 分离过程的控制和优化策略包括:一是由 M. Morbidelli 提出的“平衡理论”,也称为“三角形理论”^[9],是基于局部瞬时平衡和忽略扩散影响的假设,利用一阶偏微分方程来计算物料平衡。具体通过 SMB 系统各个区域的无量纲流量(m 值)和目标分离体系的吸附参数来确定完全分离区域(三角形区域),在此区域内对应的变量即为最佳操作条件。另外,standing wave design (SWD) 理论的应用也较为广泛^[10-11],这种策略是基于真实移动床系统的稳态解,考虑传质的影响,通过一系列的代数方程来解决 SMB 过程的优化问题^[12]。除此之外,还有一种选择是对 SMB 分离过

程进行数值模拟和多目标优化,通过试验和对模型的调整来保证优化结果的准确性,此种方法难度较高,但是结果最为准确,可以针对不同的优化目标(可以将溶剂消耗等因素考虑其中)高效地提供一组最优解(pareto set)^[13-16]。而且,多目标优化考虑了传质和扩散的影响,对整个分离过程完整的数学描述可以解释一些在 SMB 改型模式中无法用传统平衡理论中的平均 m 值解释的瞬时行为和变化趋势^[17]。

2 SSMB 建模及模型描述

2.1 SSMB 分离过程模型选用

针对色谱分离过程的描述,根据分离体系、分离介质和内部传递现象的不同,有很多种数学模型^[18]。在本文中,基于前期大量的实验研究基础^[8],选择了 transport dispersive (TD) 模型^[19-20] 来描述整个 SSMB 过程的物料平衡;线性吸附模型来描述低聚木糖在色谱柱上的吸附情况。具体表达式如下:

$$(\partial c_{i,j})/(\partial t) + \varphi[(\partial q_{i,j})/(\partial t)] + u_j[(\partial c_{i,j})/(\partial z)] - D_{L,j}[(\partial^2 c_{i,j})/(\partial z^2)] = 0 \quad (1)$$

$$(\partial q_{i,j})/(\partial t) = k_{m,i}(H_i c_i - q_i) \quad (2)$$

其中, c (g/L)和 q (mL/min)分别代表流动相和固定相中的浓度, i 代表体系中的各个组分, j 代表色谱柱, t 代表时间, φ 代表相率 $[\varphi = (1 - \varepsilon)/\varepsilon]$,是空隙率, u (m/s)是间隙流动速度, z (m)表示轴向坐标, D_L 是轴向扩散系数, k_m (s⁻¹)是传质系数, H 是线性吸附中的亨利常数。

2.2 SSMB 过程变量以及优化目标

如图 1 所示,与传统的 SMB 过程不同,一个完整的 SSMB 过程包含 7 个独立变量,即 3 个时间变量(t_1 、 t_2 、 t_3)和 4 个流量变量(Q_{loop} 、 $Q_{eluent, phase1}$ 、 $Q_{eluent, phase3}$ 和 Q_{feed}),这就为过程控制和模拟优化带来了极大的复杂性和挑战性。因此在本研究中,假定 I 区的流量恒定不变且为 I~IV 区 4 个区域中的最大流量,即 $Q_{loop} = Q_{eluent, phase1} = Q_{eluent, phase3} = Q_I = Q_{max}$ 。依据前期的柱参数测定和实验结果,设定 Q_{max} 为 20 mL/min,这样,就把 SSMB 过程中的独立变量简化为了 4 个,如表 1 所示。

表 1 SSMB 分离过程独立变量

子步骤	持续时间	Q_I	Q_{II}	Q_{III}	Q_{IV}
1	t_1	Q_{max}	0	Q_{feed}	0
2	t_2	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}
3	t_3	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}	0

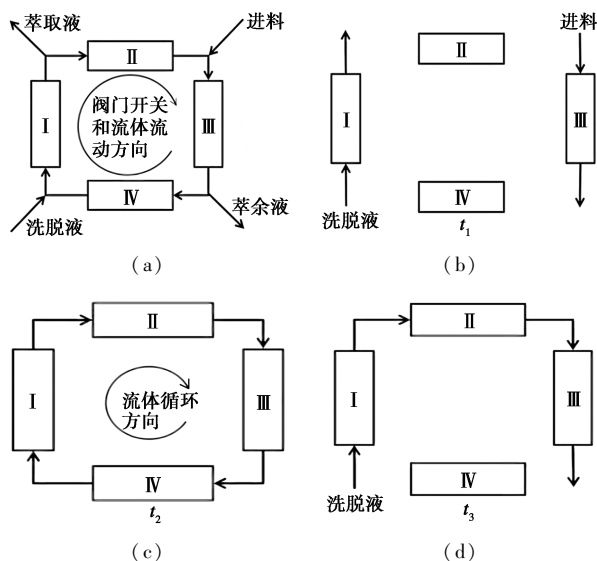


图 1 SMB 和 SSMB 分离过程示意图

在进行多目标优化和结果讨论的过程中,参照 SMB 过程以及平衡理论的设定,需要用各区的流量比,即 m 值来进行描述和比较。

$$m_j = \left(\int_0^{t_s} Q_j dt - V\varepsilon \right) / [V(1 - \varepsilon)] \quad (3)$$

相应地,4 个变量可以用 m 值表示为:

$$t_2 = [m_{IV} V(1 - \varepsilon) + V\varepsilon] / Q_{\max} \quad (4)$$

$$t_3 = [m_{II} V(1 - \varepsilon) + V\varepsilon] / Q_{\max} - t_2 \quad (5)$$

$$t_1 = [m_I V(1 - \varepsilon) + V\varepsilon] / Q_{\max} - t_2 - t_3 \quad (6)$$

$$Q_{\text{feed}} = [m_{III} V(1 - \varepsilon) + V\varepsilon - (t_2 + t_3) Q_{\max}] / t_1 \quad (7)$$

在构建每组多目标优化时,本文中同时优化 2 个目标函数,比如,增大处理量的同时减小分离过程水耗。利用遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 在一定区间内高效筛选最佳操作条件 (pareto solutions)^[21-24]。

3 SSMB 分离低聚木糖实验

为了保证 SSMB 模型建立的准确性以及后续多目标优化结果对实际操作的指导性,在本课题组的前期工作中,设计并进行了在不同操作条件下的 SSMB 分离低聚木糖的实验 ($T=60^\circ\text{C}$, SSMB 完成 10 个循环),检测了最终产品的纯度;同时,完成了在同样操作条件下对应的 SSMB 过程模拟并得到了模拟结果。通过对照,实验和模拟结果误差在 1% 左右,证明此模型可以为实际的操作提供准确的指导和预测,为后续的多目标优化以及变量调控机制的探索奠定了基础^[8]。

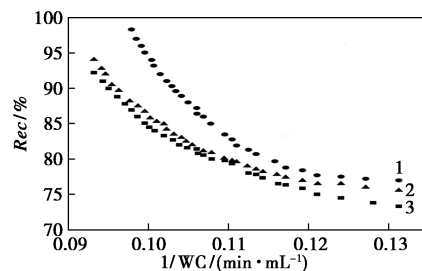
4 结果和讨论

4.1 多目标优化:增大 XOS 收率的同时减小水耗

在糖类分离领域,因为原料成本普遍较低,生产规模较大,溶剂消耗就成为制约生产经济性的一个重要因素。因此在多目标优化中,将水耗作为一个重要的优化参数来进行考量,第一组优化问题设定为增大 XOS 收率的同时减小水耗,同时设置了质量分数大于 90% 的限制以保证产品纯度,将处理量设为固定值 (3 组不同处理量)。

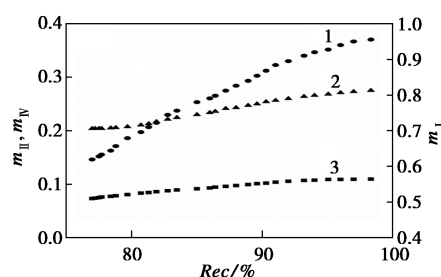
SSMB 分离过程中有 4 个独立变量,此问题中固定了处理量,所以在模拟优化时选择流量比 m_I 、 m_{II} 和 m_{IV} 作为变量,并依据各组分的吸附参数和三角形理论对变量的范围进行了初步设定。这样,对应的操作条件 t_1 、 t_2 、 t_3 和 Q_{feed} 可以根据公式 (4) ~ (7) 计算得出。与 SMB 过程比较时变量变化趋势和各区间功能的异同也将更为直观。在 Fortran 程序中经过 100 次的迭代和筛选,优化结果和对应的变量

及操作条件如图 2、图 3 所示。



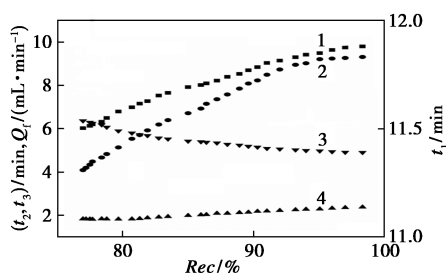
1— $UT=2$; 2— $UT=3$; 3— $UT=4$

图 2 多目标优化问题 1 优化结果:不同处理量下的最佳操作曲线



1— m_I ; 2— m_{II} ; 3— m_{IV}

(a) $UT=2$ 时的 m 值变化趋势



1— t_2 ; 2— t_3 ; 3— Q_I ; 4— t_1

(b) $UT=2$ 时的操作条件变化趋势

图 3 多目标优化问题 1 优化变量和操作条件

图 2 表明,优化结果中 XOS 收率随着水耗的减少而降低,即 $Rec - (1/WC)$ 之间形成了一组 pareto 解,曲线上的每一个点都是最佳操作点,所有的解都是均衡解,当需要降低水耗的时候必须以牺牲收率为条件,当需要增加收率的时候必须增加溶剂的投入。3 组不同处理量的结果说明,当收率一定时,处理量增大,水耗增加。

图 3(a) 显示了变量 m 值随收率 Rec 的变化趋势,所有最优解的筛选都在设定范围内完成。把 m_I 、 m_{II} 、 m_{IV} 的变化趋势分为 2 部分来理解:①在低聚木糖收率大于 80% 时,随着收率的增加, m_I 、 m_{II} 、 m_{IV} 增大;②在 $Rec < 80\%$ 时,随着收率的增加, m_I 、 m_{IV} 增大, m_{II} 保持不变。

4.2 SSMB 与 SMB 优化结果比较(优化目标:增大 XOS 收率的同时减小水耗)

以上结果与传统 SMB 中的 m 值变化趋势有很大不同,为了解释 SSMB 中产生此种变化的原因以及提出适合 SSMB 的变量调控机制,理解 SSMB 中各个子步骤独特的职能作用,深入分析了 SSMB 分离过程的浓度、质量流量变化对分离变量的影响,并设计了同等条件下 SMB 多目标优化以进行对比,结果如表 2。

表 2 SSMB 和 SMB 优化中 m 值变化趋势对比

收率标准	分离模式	收率	水耗	m_I	m_{II}	m_{IV}
低收率	SMB	↑	↓	~	↑	~
	SSMB	↑	↓	↑	~	↑
高收率	SMB	↑	↓	↑	↑	↑
	SSMB	↑	↓	↑	↑	↑

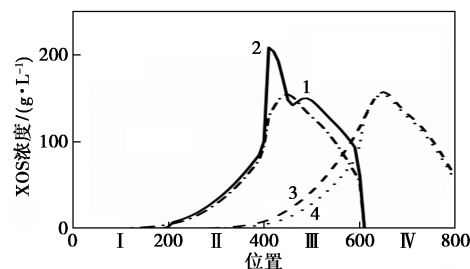
注:↑, ↓, ~ 分别代表增大、减小和不变。

在 SSMB 中, m 值的定义和代表的职能与 SMB 中的有所不同,所以 m 值的变化趋势也会不同,无法再用三角形理论来简单地解释。如式(3)所示, m 值应该是一个切换内 3 个子步骤各区流量的平均值,应该考虑到 SSMB 各个子步骤不同柱模式下的分离职能。通过对式(4)~(7)的分析可知,在 Q_{\max} 确定的前提下, m_{IV} 取决于 t_2 , 即第二个子步骤的持续时间; m_{II} 的大小由 t_2 和 t_3 决定; m_I 取决于整个切换时间,即 t_s 的大小。由表 2 可知, SMB 与 SSMB 分离过程中, m_I 、 m_{II} 、 m_{IV} 的变化趋势明显不同,这些差异由 2~3 个子步骤共同决定,为了进一步解释这些差异,本文中深入研究了 SSMB 分离过程的内部浓度曲线和不同操作条件下萃取口各组分质量流量的情况。

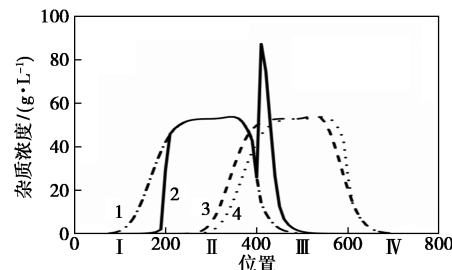
4.3 SSMB 分离过程内部浓度曲线与出口处质量流量分析(优化目标:增大 XOS 收率的同时减小水耗)

由图 4 可知,在 SSMB 一个切换开始时($t = t_s+$), XOS 主要集中于 II 区和 III 区, I 区和 IV 区几乎没有;杂质主要存在于 II 区, I 区和 III 区有少量杂质, IV 区没有杂质。在第一个子步骤内($t = t_1$),如图 1 所示,进料液由 III 区进入系统,之前在 III 区所积累的部分轻组分 XOS 移动到 III 区出口(萃取口), XOS 的浓度曲线整体向前移动。同样,杂质峰也因为进料的影响向前移动,但因为在色谱柱上吸附能力较强而移动较慢,始终停留在 III 区,未能抵达萃余

口。同时,洗脱液(水)由 I 区进入系统,之前保留在 I 区中的少量 XOS 和大量杂质被冲出系统,在 I 区出口收集(萃取口),因为在 3 个子步骤中只有这一步开放萃取口,所以这一步要完成尽可能多的杂质的收集和 I 区色谱柱的再生,这些决定了操作参数 t_1 的大小。在这一步中,因为关闭了 II 区和 IV 区,所以 II 区和 IV 区的物质浓度曲线没有变化。



(a) 低聚木糖



(b) 杂质

1— $t = t_s+$; 2— $t = t_1$; 3— $t = t_1+t_2$; 4— $t = t_s-$
相应的 m 值: $m_I = 0.88$, $m_{II} = 0.26$, $m_{IV} = 0.10$;
 t_s+ : 一个切换开始; t_s- : 一个切换结束

图 4 $UT = 2 \text{ mL/min}$ 时的 SSMB 内部浓度曲线

在第二个子步骤内,所有的进出口全部关闭,各区色谱柱连接成一个闭合的回路,随着流动相在其中的循环流动,各个组分向前移动并在各区内重新分配,逐渐分离。在 t_2 结束时, XOS 富集于 III、IV 区,由于萃取口的关闭,少量 XOS 进入了 I 区, IV 区完成了流动相的再生。杂质主要在 II、III 区,通过循环与吸附,与 XOS 慢慢分开。 t_2 越大,分离度越高,产品纯度越高,但是如果 t_2 过高,大量 XOS 将被带到 I 区,影响产品收率。

在第三个子步骤内, I ~ III 区工作, IV 区关闭,洗脱液自 I 区进入系统,自 III 区流出,萃取口关闭,萃余口打开。III 区中在上一步中富集的 XOS 和部分杂质被冲出,在萃余口收集,这一步的时间 t_3 越大, XOS 收率越高,当然如果 t_3 过大,会影响 XOS 产品的纯度。

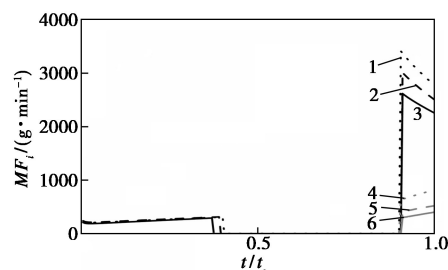
根据内部浓度曲线阐述了 SSMB 各步骤职能后,分析了萃余口的各组分质量流量 (mass flow,

MF) 情况, 以进一步说明 m 值产生变化的原因。物料积累 MF 值的定义如下式所示:

$$MF_i = c_{i,Raf} Q_{Raf} \quad (8)$$

在图 5 中, 曲线与横纵坐标包围的部分代表萃余口的各组分质量流量。当 XOS 收率为 91% 时, 在萃余口每分钟可以收集到 356.7 g XOS 和 45.1 g 杂质(表 3)。其中在子步骤 3 中收集到的 XOS 超过总量的 70%, 说明 t_3 对收率的影响大于 t_1 ; 而杂质则全部在子步骤 3 内得到, 因为在子步骤 1 中, 大量的杂质会由萃取口流出。当收率的要求减小到 85% 时, m_I 、 m_{II} 、 m_{IV} 减小, 对应的水耗减少, 在萃余口流出的 XOS 和杂质的量减少。说明在这一收率要求下, t_1 、 t_2 和 t_3 均减小, 与图 3 相符, 部分 XOS 停留、吸附在色谱柱内, 没有在萃余口冲出, 影响最终收率。当最终产品收率减小到 80% 以下, 设置足够

长的 t_3 即可达到收率要求, t_1 、 t_2 不必减小以保证处理量 and 产品纯度, 所以当 $Rec < 80\%$ 时, m_{II} 的变化不大。因此, SSMB 中 3 个子步骤的变化模式和各自职能的不同, 导致了变量调控机制与传统 SMB 过程的差异。



1—XOS 收率 95%; 2—XOS 收率 91%; 3—XOS 收率 85%;
4—杂质收率 95%; 5—杂质收率 91%; 6—杂质收率 85%

图 5 SSMB 分离过程萃余口各组分质量流量情况

表 3 3 组不同优化结果中萃余口的平均质量流量

收率/%	变量			AMF/(g·min ⁻¹)					
	m_I	m_{II}	m_{IV}	XOS 1 ^①	XOS 3	XOS T	IMP ^② 1	IMP 3	IMP T
95	0.93	0.28	0.110	94.1	302.1	396.2	0	68.8	68.8
91	0.88	0.25	0.100	90.0	266.7	356.7	0	45.1	45.1
85	0.78	0.23	0.091	54.3	137.6	191.9	0	33.8	33.8
80	0.61	0.21	0.083	42.3	90.1	132.4	0	31.5	31.5
77	0.54	0.21	0.070	33.7	51.8	85.5	0	25.2	25.2

注:①1,3,T 代表子步骤 1、子步骤 3 和总量;②IMP 代表杂质。

5 结论

本研究结合前期 SSMB 分离实验的结果, 完成了顺序式模拟移动床分离低聚木糖体系的多目标优化, 以增大 XOS 收率的同时减小水耗为案例, 探究了 SSMB 分离过程机理和变量变化趋势, 比较了其与传统 SMB 分离过程的异同, 总结了适用于 SSMB 的变量调控方法。结果证明, 传统的平衡理论已经不适用于 SSMB 过程分析和预测, 因为 SSMB 包含有 3 个子步骤, 且各步承担的职能不同, m 值通常由 2~3 个操作变量共同决定, 所以 m 值的调控方式与 SMB 也大不相同。因此, 本文中提出了一种新的针对 SSMB 的变量调控机制, 当优化目标是 Rec 和 $(1/WC)$ 时, 在固定处理量的前提下, 收率要求较高时, m_I 、 m_{II} 、 m_{IV} 增大, 收率增加, 处理量增大; 当收率要求较低时, m_I 、 m_{IV} 增大即可增加收率, 同时处理量也会增大。在实际应用中, 可根据生产要求的不同在范围内自行调控。此项研究将为 SSMB 分离

过程提供有效的指导和预测, 阐明 SSMB 分离机理和变量调控机制, 为其他新型模拟移动床过程的优化研究提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] Toumi A, Engell S, Ludemann-Hombourger O, et al. Optimization of simulated moving bed and Varicol processes[J]. Journal of Chromatography A, 2003, (1006): 15-31.
- [2] Supelano R C, Barreto Jr A G, Andrade Neto A S, et al. One-step optimization strategy in the simulated moving bed process with asynchronous movement of ports: A varicol case study[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1634: 461672.
- [3] Zang Y F, Wankat P C. Variable flow rate operation for simulated moving bed separation systems: Simulation and optimization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, (42): 4840-4848.
- [4] Wei F, Shi L C, Wang Q, et al. Fast and accurate separation of the paclitaxel from yew extractum by a pseudo simulated moving bed with solvent gradient[J]. Journal of Chromatography A, 2018, (1564): 120-127.
- [5] Cristancho C A M, Seidel-Morgenstern A. Purification of single-

- chain antibody fragments exploiting pH-gradients in simulated moving bed chromatography [J]. *Journal of Chromatography A*, 2016, (1434): 29–38.
- [6] 李洪飞,孙大庆,李良玉,等.基于顺序式模拟移动床色谱法的两种木糖母液分离工艺比较[J]. *食品与机械*, 2019, 35(10): 210–213.
- [7] Li Y, Xu J, Yu W F, *et al.* Multi-objective optimization of sequential simulated moving bed for the purification of xylo-oligosaccharides [J]. *Chemical Engineering Science*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ces>.
- [8] Li Y, Yu W F, Ding Z Y, *et al.* Equilibrium and kinetic differences of XOS2-XOS7 in xylo-oligosaccharides and their effects on the design of simulated moving bed purification process [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, (215): 360–367.
- [9] Nicoud R M. *Chromatographic processes: Modeling, simulation and design* [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2015.
- [10] Ma Z, Wang N H L. Standing wave analysis of SMB chromatography: Linear systems [J]. *AIChE Journal*, 1997, (10): 2488–2508.
- [11] Weeden G S, Wang N H L. Speedy standing wave design, optimization, and scaling rules of simulated moving bed systems with linear isotherms [J]. *Journal of Chromatography A*, 2017, 1493(5): 19–40.
- [12] Rodrigues A E. *Simulated moving bed technology: Principles, design and process applications* [M]. United States: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2015.
- [13] 余卫芳,刘玉明,朱磊,等.模拟移动床反应器中合成乙酸甲酯过程的多目标优化[J]. *高校化学工程学报*, 2012, 26(5): 895–900.
- [14] 吴献东,金晓明,苏宏业.基于 NSGA-II 的模拟移动床色谱分离过程多目标操作优化[J]. *化工学报*, 2007, 58(8): 2038–2044.
- [15] Tie S, Sreedhar B, Donaldson M, *et al.* Experimental evaluation of simulated moving bed reactor for transesterification reaction synthesis of glycol ether ester [J]. *Adsorption*, 2019, 25(4): 795–807.
- [16] Zhang Z Y, Hidajat K, Ray A K, *et al.* Multi-objective optimization of SMB and varicol process for chiral separation [J]. *AIChE Journal*, 2002, (12): 2800–2816.
- [17] Jiang X X, Zhu L, Yu B, *et al.* Analyses of simulated moving bed with internal temperature gradients for binary separation of ketoprofen enantiomers using multi-objective optimization: Linear equilibria [J]. *Journal of Chromatography A*, 2018, (1531): 131–142.
- [18] Schmidt-Traub H. *Preparative chromatography* [M]. Germany: WILEY-VCH, 2005.
- [19] Xu J, Zhu L, Xu G Q, *et al.* Determination of competitive adsorption isotherm of enantiomers on preparative chromatographic columns using inverse method [J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, (1273): 49–56.
- [20] Xu J, Jiang X X, Guo J H, *et al.* Competitive adsorption equilibrium model with continuous temperature dependent parameters for naringenin enantiomers on Chiralpak AD column [J]. *Journal of Chromatography A*, 2015, (1422): 163–169.
- [21] Agrawal N, Rangaiah G P, Ray A K, *et al.* Design stage optimization of an industrial low-density polyethylene tubular reactor for multiple objectives using NSGA-II and its jumping gene adaptations [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, (62): 2346–2365.
- [22] Gong D W, Jing S, Miao Z. A set-based genetic algorithm for interval many-objective optimization problems [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2018, 22(1): 47–60.
- [23] Lee F C, Rangaiah G P, Ray A K. Multi-objective optimization of an industrial penicillin V bioreactor train using non-dominated sorting genetic algorithm [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2007, (3): 586–598.
- [24] Tarafder A, Lee B C S, Ray A K, *et al.* Multi-objective optimization of an industrial ethylene reactor using a non-dominated sorting genetic algorithm [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, (44): 124–141. ■

赢创完成向 SABO 出售 TAA 衍生物业务

赢创完成向意大利化学品公司 SABO 出售三丙酮胺 (TAA) 衍生物业务。这一举措标志着公司在持续优化产品组合、专注于特种化学品方面更进一步。

意大利化学品公司 SABO 是世界领先的光稳定剂制造商之一, TAA 衍生物是生产光稳定剂的原材料。本次收购的具体金额不作披露。本次交易于 2022 年 10 月中旬公布,并于 2022 年 12 月 29 日正式完成交易。

赢创董事长库乐满表示:“我们希望持续推进特种化

学品业务的盈利性增长,因此需要剥离与当前的战略焦点不匹配的业务,此外,我们需要确保被剥离的业务在新的所有者手中能够实现更好的发展。”TAA 衍生物业务曾隶属于赢创特种添加剂业务部门。

SABO 董事长兼首席执行官 Germano Peverelli 表示:“收购赢创的 TAA 业务可推动 SABO 进入新的增长阶段。新的尖端科技、专利工艺以及德国、中国与意大利的生产设施的整合将强化我们的制造优势,造福员工和客户。”(杨惠莹)