

模拟移动床利用安全因子法分离 第三代高纯果糖

曹龙奎¹, 王菲菲², 于 宁³

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江省农产品加工工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319;

2. 黑龙江农业经济职业学院, 黑龙江 牡丹江 157041; 3. 黑龙江省乳品工业技术开发中心, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要: 目的: 研究以果葡糖浆为原料, 利用模拟移动床法(simulated moving bed, SMB), 从果葡糖浆中分离第3代高纯度果糖的工艺方法。方法: 首先通过对分离度影响因素的分析, 进行单柱脉冲实验, 确定树脂型号、进料体积、进料流速、进料浓度以及操作温度等操作参数, 然后通过安全因子法得到SMB的简易参数设计方法, 确定模拟移动床的理论参数, 并在实验中修正得到实际的最佳参数。结果: 理论模拟结果很好的吻合实验结果, 实验得到模拟移动床最佳参数为切换时间469s、进料流速0.325L/h、洗脱液流速1.574L/h、提取液流速0.902L/h、提余液流速0.951L/h、循环流速1.897L/h; 通过模拟移动床法分离第3代高纯果糖纯度为99.91%、得率为80.32%、葡萄糖纯度为92.34%、得率为90.13%。

关键词: 模拟移动床; 安全因子法; 参数设计; 高纯果糖

Conversion of High Fructose Corn Syrup F₄₂ to F₉₀ with Simulated Moving Bed by Safety Factor Method

CAO Long-kui¹, WANG Fei-fei², YU Ning³

(1. Agri-Food Processing Development Centre of Heilongjiang, College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Heilongjiang Agricultural Economy Vocational College, Mudanjiang 157041, China;

3. Heilongjiang Research Center of Dairy Industry Technology, Harbin 150086, China)

Abstract: Purpose: To prepare high fructose corn syrup F₉₀ (with a fructose content of 90%) from F₄₂ (with a fructose content of 42%) by simulated moving bed chromatography (SMB). Methods: The effects of resin type, feeding volume and rate, corn syrup concentration and operating temperature on separation degree were investigated by single-column pulse experiments. The theoretical SMB parameters were identified by the safety factor method and experimentally modified to be the optimal parameters. Results: The theoretically stimulated and experimental results showed good agreement. The optimal SMB parameters were switching time 469 s, feeding rate 1.574 L/h, elution solution flow rate 0.325 L/h, extraction solution flow rate 0.902 L/h, raffinate flow rate 0.951 L/h, and cycling flow rate 1.897 L/h. The yield and purity in the final product were 80.32% and 99.91% for fructose and 90.13% and 92.34% for glucose, respectively,

Key words: simulated moving bed; safety factor method; parameter design; high pure fructose

中图分类号: TQ021.8; TS244.12; TS203 文献标识码: A 文章编号: 1002-6630(2011)14-0034-06

果糖是自然界中存在的最甜的糖品, 由于它在水果和浆果中广泛存在, 因而被称为果糖^[1]。成分组成主要是果糖和葡萄糖, 故称为果葡糖浆。根据果糖含量的不同, 果葡糖浆分为3种: F₄₂糖(一代果葡糖浆, 果糖含量42%), F₅₅糖(二代果葡糖浆, 果糖含量55%)和F₉₀糖(三代果葡糖浆, 果糖含量90%)。果糖除能良好的应用于食品行业, 且在医疗行业应用广泛, 被美、

英、德、日等国家收录入药典, 在某些国家已成为仅次于葡萄糖的第二大注射液。但我国实际产量不足, 且多以F₄₂糖为主, 医药市场的果糖全靠进口解决。

模拟移动床(simulated moving bed, SMB)是常用的连续操作的色谱分离设备, 可用来分离物理、化学性质十分接近的混合物, 如同分异构体等^[2]。1961年Broughton^[3]首次提出模拟移动床概念, 它是一种连续制

收稿日期: 2009-11-27

基金项目: 黑龙江省科技厅重点攻关项目(GB07B408)

作者简介: 曹龙奎(1965—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工工艺与设备。 E-mail: longkuicao@yahoo.com.cn

备色谱技术,吸取了固定床和移动床工艺各自的优点而设计的工艺。20世纪70年代到80年代SMB色谱技术主要应用于石油及食品的分离;到90年代以来,SMB技术开始用于药物尤其是手性药物的分离^[4],并且逐步进入其他应用领域,例如精细化工、化妆品和香料工业等。在国外工业中SMB已经成为一种通用性的操作单元,例如比利时药品公司UCB Pharma利用SMB来分离旋光异构体,已达十吨级的规模^[5]。20世纪80年代中期,由美国UOP公司将SMB技术并配以含有 Ca^{2+} 的离子交换树脂或分子筛作为分离介质用于果糖与葡萄糖的分离,经过研究与发展,利用SMB分离后,在提取液中果糖浓度为90%~94%,回收率在90%以上;提余液中葡萄糖的质量分数也大于80%^[6]。SMB还广泛用于其他糖类的生产中,如在其他单糖的分离中,如木糖和阿拉伯糖以及木糖和葡萄糖的分离^[7-8]。模拟移动床分离果葡糖浆的技术,在国外已经实现了大规模的应用^[9],我国的应用研究也有了很大的进步,经过SMB分离后可得到95%的果糖。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

F₄₂果葡糖浆(质量分数60%)、离子水 自制;漂莱特PCR-642型 Ca^{2+} 树脂 山东胶南金泰源海洋科技公司;701型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂 安徽三省树脂科技有限公司。

1.2 仪器与设备

一根 $\phi 1000\text{mm} \times 10\text{mm}$ 不锈钢单柱(可升温)、模拟移动床 自制;TBP-1002双柱塞输液泵 上海同田生物技术有限公司;阿贝折射仪 上海长方光学仪器有限公司;1200高效液相色谱 美国安捷伦科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 模拟移动床分离过程工艺

典型的SMB是将多个色谱柱通过多通阀、泵等串联成闭合环路,通过不断切换阀门改变各股物料进出口位置,实现固液两相的相对移动,进行不同组分的分离提取。它既有固定床吸附操作简单的优点,又有移动床连续操作的能力,适合大规模工业化生产。

本实验分离高纯度果糖功能区域的划分为4个区如图1所示,分别为:一精段3根、吸附段3根、二精段2根和解析段4根。它有两个入口和两个出口:进料FA和B和解析剂D通过入口连续进入系统,同时提取液AD、提余液BD通过出口流出。在操作工程中,液体的出入口位置按照一定的切换时间沿图1所示的切换方向切换一次,来模拟固定相吸附剂相对于流动相逆向流动,从而达到和真实移动床等同的效果。对于特定

的分离目标,选择恰当的分离参数,经过一段时间运行后系统将会达到周期性的稳定状态。

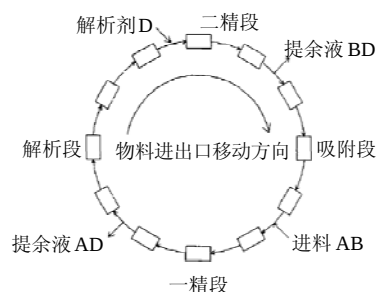


图1 模拟移动床结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulated moving bed

1.3.2 单柱脉冲实验

在柱中装填一定量的树脂,用去离子水冲洗干净后,备用。调整蠕动泵为一定转速,以去离子水为洗脱剂,进行进样。进样后每4mL收集一个样品,利用高效液相色谱法检测样品中果糖和葡萄糖的质量分数及纯度。以分离度为指标,选择适合的树脂,以及最适的进料体积、进料流速、进料浓度以及操作温度等操作参数^[10]。

1.3.3 SMB简易参数设计

模拟移动床的参数估计需要进行复杂的数值模拟和大量的SMB实验摸索^[11],并且对于不同的带分离体系要进行不同的工作,这需要极大的工作量和工作时间。本实验利用安全因子法,它主要要求测定竞争吸附等温线,得到一些竞争性吸附数据,由此对SMB的分离系统设计其操作参数,得到SMB分离果葡糖浆的理论参数^[12]。

1.3.4 SMB参数优化设计

通过模拟移动床的实际操作,将理论值在实验中进行修正优化,得出最适的制备高纯度果糖的SMB参数。

1.3.5 指标测定

糖液的折光(固形物含量)由阿贝折射仪得出;果糖及葡萄糖纯度和质量分数的测定在高效液相色谱上进行,色谱条件:色谱柱:Reze $\times$ RPM-Monosaccharide Pb柱;检测器:G1362A示差折光检测器;柱温:75 $^{\circ}\text{C}$;流动相:水;流速:0.8mL/min;进样量:20 μL 。

$$\text{分离度}^{[13]}(R)=2 \times \frac{t_2-t_1}{W_2+W_1}$$

式中: t_2 为果糖保留时间/min; t_1 为葡萄糖保留时间/min; W_1 为葡萄糖色谱峰峰宽/min; W_2 为果糖色谱峰峰宽/min。

$$\text{分离后果糖得率/\%} = \frac{\text{果糖量} \times \text{果糖折光} \times \text{液相测果糖浓度}}{\text{原料量} \times \text{原料液折光} \times \text{原料液中果糖浓度}}$$

$$\text{分离后葡萄糖得率/\%} = \frac{\text{葡萄糖量} \times \text{葡萄糖折光} \times \text{液相测葡萄糖浓度}}{\text{原料量} \times \text{原料液折光} \times \text{原料液中葡萄糖浓度}}$$

2 结果与分析

2.1 单柱脉冲实验参数的确定

2.1.1 不同树脂对分离度的影响

分别装填漂莱特 PCR-642 Ca^{2+} 、701 型强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂, 进样温度为 60°C , 进样体积为 18mL, 进样质量分数为 60%(果糖为 44.6%, 葡萄糖为 54.5%), 流速为 1.62mL/min, 用去离子水洗脱。在相同条件下进行实验, 结果见表 1。

表 1 不同树脂对分离度的影响
Table 1 Effect of resin type on separation degree

树脂	葡萄糖最高 纯度 /%	果糖最高 纯度 /%	葡萄糖最 高质量分数 /%	果糖最高 质量分数 /%	分离度
PCR-642 Ca^{2+}	90.11	98.02	13.76	9.166	0.53
701 型树脂	89.13	90.62	11.67	8.34	0.47

由表 1 可以看出, 不同树脂对果葡糖浆有一定的影响。利用 PCR-642 Ca^{2+} 树脂的分离度大于 701 型树脂, 因此选用 PCR-642 Ca^{2+} 树脂。

2.1.2 柱温对分离度的影响

取漂莱特 PCR-642 Ca^{2+} 树脂装柱, 其他条件与 1.1.1 节相同, 分别在 50°C 、 55°C 、 60°C 、 65°C 、 70°C 的操作温度进行实验, 计算不同条件下的分离度, 结果见图 2。

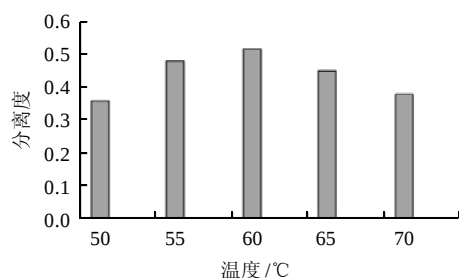


图 2 柱温对分离度的影响

Fig.2 Effect of column temperature on separation degree

如图 2 所示, 分离度随着柱温的增加而增大, 当温度达到 60°C 时, 分离度最高。随着操作温度的升高可促进分离过程的进行, 使分离效果提高, 但由于吸附过程放热, 温度过高, 反而会影响吸附分离的效果。当温度超过 65°C 时, 果糖液会发生变黄, 有氧化分解

的现象。采用 SAS 8.2 统计软件对其进行处理, 在 3 次重复的因素分析中, $F=129.90$, $P < 0.001$, 相关系数为 0.981118, 说明柱温对分离效果有显著差异。

2.1.3 洗脱流速对分离度的影响

其他条件不变, 调节去离子水洗脱流速为 0.35、0.81、1.62、2.42、3.53mL/min, 计算不同条件下的分离度, 结果见图 3。

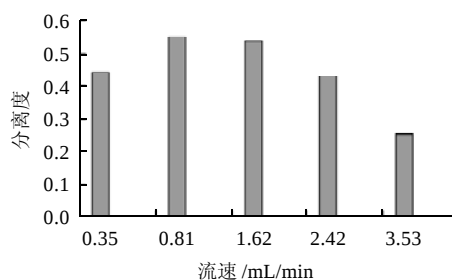


图 3 流速对分离度的影响

Fig.3 Effect of elution solution flow rate on separation degree

由图 3 可知, 洗脱流速对果葡糖浆的分离有很大的影响。在低洗脱流速下, 吸附剂对果糖的吸附充分, 分离效果好, 洗脱流速快, 使组分在柱中的停留时间短, 溶液中的离子来不及扩散到树脂内部, 分离时间短, 分离效果差。因此, 选择 1.62mL/min 为较合适的洗脱流速。采用 SAS 8.2 统计软件对其进行处理, 在 3 次重复的因素分析中, $F=437.10$, $P < 0.001$, 相关系数为 0.994313, 说明洗脱流速对分离效果有显著差异。

2.1.4 进样质量分数对分离度的影响

其他条件不变, 分别使果葡糖浆质量分数调为 40%、50%、60%、70%、80% 开始进样, 计算不同条件下的分离度, 结果见图 4。

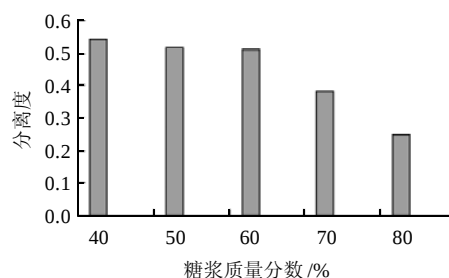


图 4 糖浆质量分数对分离度的影响

Fig.4 Effect of syrup concentration on separation degree

由图 4 可知, 随着糖浆质量分数的增大, 分离度逐渐减小。这是由于糖浆质量分数增加柱的负荷增大且分离速度下降, 从而使分离度下降。而糖浆质量分数低, 虽分离效果好, 但生产效率低。因此, 确定 60% 为最佳进样质量分数。采用 SAS 8.2 统计软件对其进行

处理, 在3次重复的因素分析中, $F=457.50$, $P < 0.001$, 相关系数为0.994565, 说明进样质量分数对分离效果有显著差异。

2.1.5 进样量对分离度的影响

其他条件不变, 分别将10、14、18、22、26mL糖液引入柱子, 计算不同条件下的分离度, 结果如图5所示。

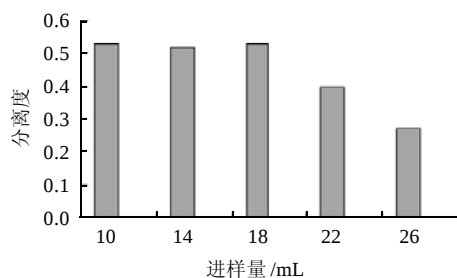


图5 进样量对分离度的影响

Fig.5 Effect of feeding volume on separation degree

由图5可知, 随着糖浆进料量的增大, 果糖与葡萄糖分离度逐渐减小。由于进料量的增加, 加重柱子的负担, 是果糖吸附效果差, 导致分离度降低。增大进料量, 要想得到较好的分离效果, 要使柱子更长。因此, 在保证分离度较高的情况下, 兼顾生产效率, 确定18mL为最佳进料量。采用SAS 8.2统计软件对其进行处理, 在3次重复的因素分析中, $F=407.10$, $P < 0.001$, 相关系数为0.993896, 说明进样量对分离效果有显著差异。

2.1.6 果葡糖浆的分离曲线

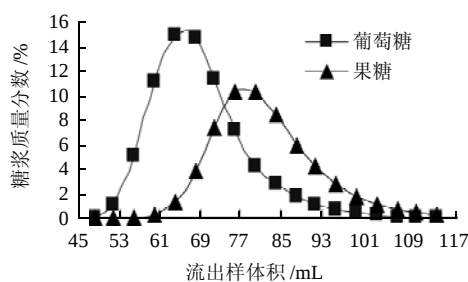


图6 洗脱曲线

Fig.6 Elution curves of fructose and glucose

由图6可知, 洗脱液按顺序分为几部分, 最先部分为稀糖液, 糖分主要为葡萄糖, 混有少量果糖; 第2部分为浓糖液, 主要为葡萄糖, 但混有相当量的果糖; 第3部分, 主要为果糖, 但有相当一部分葡萄糖; 第4部分为浓糖液, 主要为果糖, 有少量葡萄糖。

2.2 SMB 参数优化设计

2.2.1 实验参数的设定

由于在单柱脉冲实验已经得到一些重要的参数, 在此阶段所需的只是一次而简单的实验步骤, 并不需要使用SMB装置。

2.2.2 吸附等温线的起始斜率

在一个单组分系统中, 吸附等温线给出了在特定温度下达到平衡固定相质量浓度 $\bar{C}$ /(g/L)与流动相质量浓度 C /(g/L)之比。低质量浓度时, 吸附等温线是线性的, 可以写成:

$$\bar{C}_i = \bar{K}_i \times C_i \quad (1)$$

式(1)中: K 为吸附等温线斜率, 利用保留时间即可得到吸附等温线的初始斜率(K_0), 这需要在单柱上进行脉冲实验得到, 然后通过式(2)可以求得这个保留时间:

$$t_R = t_0 \times \left[1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \times \bar{K} \right] \quad (2)$$

式(2)中: $t_0 = \varepsilon V/Q$, 为零保留时间; ε 是床层空隙率(其值通常在0.36~0.4之间); t_R 为保留时间/min; $\bar{K}$ 为固体吸附力系数。方程(2)为完整的吸附等温线^[14], 只有在线性条件下才是有效的, 通过零保留时间, 可以计算出两种糖的保留时间。

本试验设计12柱SMB系统, 将F-42果葡糖浆溶液(葡萄糖质量分数54.5%和果糖质量分数44.6%)在一根1m×10mm(体积78.5mL)的色谱柱上, 以1.62mL/min的纯水作为洗脱剂, 得到保留时间 $t_{\text{葡萄糖}}=39.51\text{min}$ 、 $t_{\text{果糖}}=50.61\text{min}$, 压力降为0.3MPa。得到零保留时间为 $t_0=19.38\text{min}$ 。

因此可以得到吸附等温线的初始斜率:

$$\bar{K}_{\text{葡萄糖}} = \frac{T - t_0}{t_0} \times \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = 0.69$$

$$\bar{K}_{\text{果糖}} = \frac{t - t_0}{t_0} \times \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = 1.07$$

2.2.3 计算真实移动床(ture moving bed, TMB)

对于给定的进料质量浓度, TMB的设计主要是对不同流率的选择: 循环、进料、洗脱、萃出、残液和固体流率(等效于SMB中的进出口切换周期)。为了在残液中回收弱吸附组分A和在萃取液中回收强吸附组分B, 使它们必须满足表2中的条件。

对表2中的所有不等式引入一个相同的因子, 可得到:

$$\frac{Q_I}{M \bar{K}_B} = \beta; \frac{Q_{II}}{M \bar{K}_A} = \beta; \frac{Q_{III}}{M \bar{K}_B} = 1/\beta; \frac{Q_{IV}}{M \bar{K}_A} = 1/\beta \quad (3)$$

表2 达到分离的TMB内部流率约束

Table 2 Internal TMB flow rate constraints to achieve separation

条带	物理约束	数学表达
I	B净流右移	$\frac{Q_I}{M^* \bar{K}_B} > 1$
II	A净流右移	$\frac{Q_{II}}{M^* \bar{K}_A} > 1$
III	B净流右移	$\frac{Q_{III}}{M^* \bar{K}_B} < 1$
IV	A净流右移	$\frac{Q_{IV}}{M^* \bar{K}_A} < 1$

由于在线性吸附条件下, 两组分存在式(1)的关系, 式(3)可改写成:

$$M^* = \frac{Q_F}{K_B/\beta - K_A/\beta}; Q_{Rec}^{TMB} = Q_I^{TMB} = \beta \times M^* \times \bar{K}_B$$

$$Q_{Ext}^{TMB} = M^* \times (\bar{K}_B - \bar{K}_A) \times \beta; Q_{Raf}^{TMB} = M^* \times (\bar{K}_B - \bar{K}_A) / \beta \quad (4)$$

当选定了 β 后, 就可以得到一个TMB中的所有流率了。 β 是一个安全因子, 当 β 接近于1时, SMB在最大负载下工作, 这时它对于塔板数和流率的变化显得很敏感。当 β 值增加时, 系统的生产率有所降低, 但是更为稳健。实际上, β 值通常是在1.00~1.05之间^[15]。另外, 根据方程(4)还可以得到式(5)中约束条件, 这个关系仅对线性吸附等温线有效。

$$1 < \beta < \sqrt{\frac{\bar{K}_B}{\bar{K}_A}} \quad (5)$$

2.2.4 计算模拟移动床(SMB)

表3 SMB和对应TMB的联系

Table 3 Relationship between SMB and TMB

TMB	SMB
稳态	周期性稳态
	周期性切换进料-采出点
固体流率: M^*	$\Delta T = \frac{(1-\varepsilon) \times V_\varepsilon}{M^*}$ (10)
内部流率: $Q_K^{TMB} = I, II, III, IV$	内部流率: $Q_K^{SMB} = Q_K^{TMB} + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \times M^*$
洗脱液、萃出液、进料液和残液流率: $Q_{Elu}^{TMB}, Q_{Ext}^{TMB}, Q_{Feal}^{TMB}, Q_{Raf}^{TMB}$	洗脱液、萃出液、进料液和残液流率: $Q_{Elu}^{SMB}, Q_{Ext}^{SMB}, Q_{Feal}^{SMB}, Q_{Raf}^{SMB}$

TMB概念和SMB概念是近似的, 对于一个TMB可以直接找到其最优操作条件并且模拟这种过程, 那么利用他们之间的相似性, 就可以设计一个SMB操作条件。表3为SMB和TMB之间的联系。

通过表3中两者之间的关系, 就可以从TMB的流率来求解出SMB的各个流率, 并可以模拟出完整的

SMB行为以此来精确选择所需的配置。

由于待分离混合物总浓度60%, 计算得出质量浓度为594g/L, 且SMB处理量为0.2kg/h, 所以进料流率为0.34L/h, 设 $\beta=1.05$, 可得 M^* 、 Q_{Rec}^{TMB} 、 Q_{Ext}^{TMB} 、 Q_{Raf}^{TMB} 。

那么由公式得到 $Q_K^{SMB} = Q_K^{TMB} + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \times M^*$ 得到 Q_{Elu}^{SMB} 、 Q_{Ext}^{SMB} 、 Q_{Feal}^{SMB} 、 Q_{Raf}^{SMB} , 理论结果见表4。

表4 SMB理论工作参数

Table 4 Theoretical operating parameters of SMB

参数	操作温度/℃	切换时间/s	进料液流量 Q_F (L/h)	洗脱液流量 Q_{Elu} (L/h)	萃取液流量 Q_{Ext} (L/h)	萃余液流量 Q_{Raf} (L/h)	循环液流量 Q_{Rec} (L/h)
数值	60	462	0.34	1.56	1.01	0.97	1.56

2.3 SMB参数优化设计

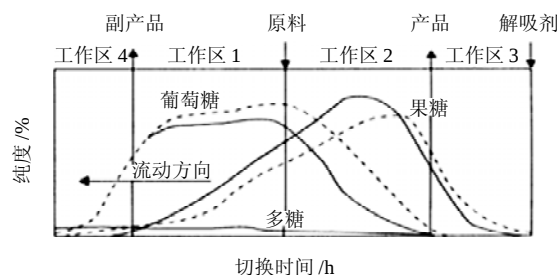


图7 切换时间延长对分离效果的影响

Fig.7 Effect of increasing switching time on separation degree

延长切换时间导致各区的保留体积增加, 如图7所示, 这会提高区2内的纯度和区3内的得率, 但同样降低了区4内的纯度和区1内的得率。当改变切换时间进行调整不再有效时, 应通过改变区内流速进行调整。这是SMB系统中一种微调的方法。即改变 Z_3/Z_{avg} (Z_{avg} 为区1和区2流速的平均值)的比率和 Z_4/Z_{avg} 的比率, 也可单独改变其中一种。如图8所示, 提高 Z_3/Z_{avg} 提高了果糖的回收率, 相反, 降低 Z_4/Z_{avg} 比率也可以提高果糖纯度。因此, 本实验要得到高纯度果糖, 其纯度在99%以上, 就应该相应地延长切换时间, 对各个区域流速进行微调。

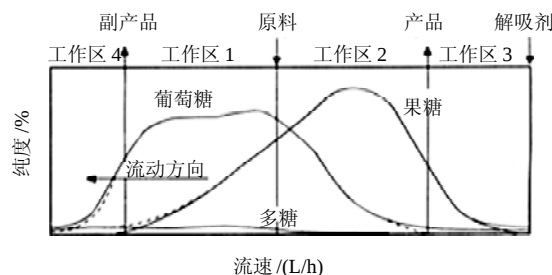


图8 工作区流速提高对分离效果的影响

Fig.8 Effect of work zone flow rate on separation degree

表5 SMB实际工作参数

Table 5 Experimental operating parameters of SMB

参数	操作	切换时	进料液流	洗脱液流	提取液流	提余液流	循环液流
	温度/℃	间 t/s	量 Q_F /(L/h)	量 Q_{Eld} /(L/h)	量 Q_{Ext} /(L/h)	量 Q_{Rsd} /(L/h)	量 Q_{Rsc} /(L/h)
数值	60	469	0.325	1.574	0.902	0.951	1.897

经过微调得到实际的最佳操作条件,如表5所示。在该条件下,最终在提取液出口得到纯度为99.91%的果糖,得率为80.32%,在提余液出口得到葡萄糖92.34%,得率为90.13%。

3 结 论

3.1 通过单柱脉冲实验,以分离度为指标,得到漂莱特PCR-642 Ca^{2+} 树脂有较好的吸附效果,最佳进样条件:柱温60℃、进样质量分数60%、洗脱流速1.62mL/min、进样量18mL。

3.2 利用单柱脉冲实验所得结果,通过安全因子法得到SMB的简易参数设计方法,确定模拟移动床的理论参数。

3.3 通过模拟移动床的实际操作,将理论值在实验中进行优化,得到最适的制备高纯果糖的SMB参数:切换时间469s、进料流速0.325L/h、洗脱液流速1.574L/h、提取液流速0.902L/h、提余液流速0.951L/h、循环流速1.897L/h。在该操作条件下,果糖纯度达到99.91%,得率为80.32%,葡萄糖纯度为92.34%,得率为90.13%。

参考文献:

[1] 杨瑞金,潘允鸿,王文生,等. 化学法分离果糖和葡萄糖[J]. 冷饮与

速冻食品工业, 1997(3): 28-31.

- [2] 徐以撒,杨柳新,徐鸽. 用自制模拟移动床色谱分离果葡糖浆[J]. 江苏工业学院学报, 2003, 15(4): 22-24.
- [3] CHUNG S F, WEN C Y. Longitudinal dispersion of liquid flowing through fixed and fluidized beds[J]. American Institute of Chemical Engineers, 1968, 14(6): 857-866
- [4] ZHANG Z, MASSOTTI M, ORBIDELI M. Power feed: an innovation to the simulated moving bed technology[J]. J Chromatogr A, 2007, 24(4): 235-236.
- [5] AHUJA S. Handbook of Bioseparations[M]. New York: Academic Press, 2000: 453-455.
- [6] BESTE Y A, LISSO M, WOZNY G, et al. Optimization of simulated moving bed plants moving bed plants with low efficient stationary phases: separation of fructose and glucose[J]. Journal of chromatography A, 2000, 868(2): 169-188.
- [7] MINCEVA M, RODRIGUES A E. Modeling and simulation of a simulated moving bed for the separation of p-xylene[J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41(14): 3454-3461.
- [8] MUNS Y, XIE Y, KIN J H, et al. Optimal design of a size-exclusion tandem simulated moving bed for insulin purification[J]. Ind Eng Chem Res, 2003, 42(9): 1977-1993.
- [9] SCHENCK F W, HEBEDA R E. Starch hydrolysis products [M]. New York: VCH Publishers Inc, 1996: 341.
- [10] 熊结青, 史清洪. 连续式色谱分离系统分离果糖的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 41-42.
- [11] MAZZOTTI S G, MORBIDELLI M, ROBUST M. Design of binary countercurrent adsorption separation processes[J]. AIChE, 1993, 39(3): 471-492.
- [12] 方煜宇, 万红贵. 模拟移动床的简易参数设计方法[J]. 中国甜菜糖业, 2006(3): 6-10.
- [13] 杨瑞金, 潘允鸿, 王文生. 果糖液的结晶性能研究[J]. 无锡轻工大学学报, 1996, 15(2): 115-118.
- [14] NICOUUD R M. Seidel morgenstern[J]. Isolation and Purification, 1996(2): 165-200.
- [15] MARIANA S, DIANA C. Dextran and fructose separation on an SMB continuous chromatographic unit[J]. Biochem Eng J, 2002, 12(3): 215-221.