互贯网络树脂吸附木糖母液中色素的动态穿透特征

魏麒，张军伟*，贾彩敬

（江南大学化学与材料工程学院，无锡　214122）

摘要：为了探讨互贯网络树脂（PDVB/PGMT）吸附木糖母液中色素的动态穿透特征，研究了流速、温度、初始浓度及床层高径比等对色素吸附过程的影响规律，讨论了糖组分及色素的传质机制。结果表明，互贯网络树脂对木糖母液中的色素有选择性吸附的特征，其吸附行为符合 Henry 模型。平衡扩散模型适合描述色素和糖组分的动态穿透行为。高流速下组分的传质由轴向扩散主导，轴向扩散系数显著增大。初始浓度增加，组分穿透过程加快，组分的穿透体积相对稳定。高径比增大延长了溶质的停留时间，穿透体积增大，会加剧轴向扩散效应。PDVB/PGMT 树脂对木糖母液脱色的较佳工艺条件是：流速 1 mL/min、初始色素吸光度 0.68、木糖浓度 185 mg/mL、床层高径比 6.4∶1。在此条件下，PDVB/PGMT 树脂对色素的吸附容量为 19.71 mg/g。总糖损失率较低，树脂的复用性能较佳。

关键词：互贯网络树脂；木糖母液；脱色；动态吸附；穿透特征

中图分类号：TS201　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−2513 (2025) 11−0041−0007

doi：10.19804/j.issn1006−2513.2025.11.006

Dynamic breakthrough characteristics of pigments during adsorption from xylose mother liquor by interpenetrating polymer network resin

WEI Qi，ZHANG Junwei*，JIA Caijing

（School of Chemical and Material Engineering，Jiangnan University，Wuxi　214122）

Abstract：To explore the dynamic penetration characteristics of pigment during adsorption from xylose mother liquor by interpenetrating polymer network（IPN）resin（PDVB/PGMT），the effects of flow rate，temperature，initial concentration，and bed height−to−diameter ratio on the adsorption process were studied. The mass transfer mechanisms of both sugar components and pigments were analyzed. The results showed that the IPN resin exhibited selective adsorption towards pigments，and its adsorption behavior followed the Henry isotherm model. The equilibrium diffusion model was suitable to describe the dynamic breakthrough behavior of both pigments and sugar components. At higher flow rates，the axial diffusion became the dominant mass transfer mechanism，resulting in a significant increase in the axial diffusion coefficient. As the initial feed concentration increases，the breakthrough process accelerated，although the total volume remained relatively stable. Increasing the height−to−diameter ratio of resin bed extended solute retention time and enhanced the breakthrough volume，thereby intensified the axial diffusion effect. The optimal decolorization conditions for xylose mother liquor using PDVB/PGMT resin were established as follows：flow rate of 1 mL/min，initial pigments absorbance of 0.68，xylose concentration of 185 mg/mL，and bed

收稿日期：2025−02−22

基金项目：江苏省博士后基金项目（编号：1601073B）；江南大学自主科研计划重点项目（编号：JUSRT51720B）

作者简介：魏麒（2000−），男，硕士，研究方向：吸附分离技术。

***通信作者**：张军伟（1981−），男，博士，副教授，研究方向：吸附与色谱分离技术。E−mail：zjwseu@126.com

height−to−diameter ratio of 6.4:1. Under these conditions，the adsorption capacity of the resin for pigments reached 19.71 mg/g. The total sugar loss rate was low，and the resin demonstrated good reusability.

Keywords：interpenetrating polymer network resin；xylose mother liquor；decolorization；dynamic adsorption；breakthrough characteristics

木糖作为一种功能性糖醇在化工、食品等领域广泛应用[1]。木糖母液是生产木糖后剩余的深棕色粘稠液体[2]，含有大量的还原单糖。由于木糖母液的色泽较深，所含还原糖的分离提取存在难度，脱色精制是必不可少的环节。木糖母液中的色素通常含酚类、糠醛类等物质，这些物质多含羟基或羰基或氮杂环，既有亲水基团又含有疏水结构[3]。目前，木糖母液脱色主要用活性炭[4]，该介质有较好的脱色性能，然而其广谱吸附的特性会损失糖组分。树脂因其结构可调且能重复使用，是更具前景的脱色介质。考虑到木糖母液中色素类型及化学结构的复杂性，现有树脂尚不能满足脱色要求。

互贯组装技术可以将疏水性及亲水性两种聚合物网络结合，赋予树脂双亲的特性[5]。然而，有关互贯网络树脂应用糖液脱色的研究报道还较少。互贯网络树脂用于糖液脱色，不仅要对其结构设计调控，还需研究树脂脱色的动态性能及过程，以明确其适用的普适性。本研究主要是通过探讨固定床中互贯网络树脂动态吸附木糖母液色素时的穿透特征，以明确流速、温度、浓度、床层高径比等参数影响规律；建立动态穿透数学模型，对色素及糖组分的穿透曲线进行预测，揭示动态吸附色素过程的内在规律，为互贯网络树脂吸附木糖母液中的色素提供理论研究参考。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用的互贯网络树脂（简称PDVB/PGMT树脂）为自制，其中一网为聚二乙烯苯网络，另一网主链为聚甲基丙烯酸缩水甘油酯并经进一步的胺化[6]。PDVB/PGMT树脂的比表面积约为190 m^2/g、平均孔径为17.5 nm。PDVB/PGMT树脂使用前须预处理，先用4倍树脂体积的2% NaOH和95%乙醇混合液浸泡树脂24小时，再用去离子水洗涤至中性，真空干燥后备用。木糖母液由山东某生物科技公司提供，制备方法为：将原料洗涤除杂后加入0.2 wt%硫酸于100 ℃下进行预水解1 h，随后加入1 wt%硫酸于120 ℃下进行深度水解2 h。水解完成后进行酸碱中和，再通过离子交换进一步除杂，之后依次进行浓缩脱色、蒸发结晶得到木糖纯度大于40%的木糖母液。其中总糖、酚类有机物及糠醛含量分别是256.72、1.15、0.29 mg/mL。

由于木糖母液中色素的复杂性，实验将收集的木糖母液样品稀释四倍后，在420 nm波长下测定其吸光度值，以此计算树脂对色素的吸附容量。树脂对色素的吸附容量用 q_A（1/g）表示。

总糖含量的测定采用3,5−二硝基水杨酸（DNS）法，糖的吸附容量用 q_e（mg/mL）表示。

木糖母液的脱色率（%）按式（1）计算：

$$D/\% = \frac{A_0 - A_e}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

总糖的损失率（%）按式（2）计算：

$$S/\% = \frac{R_0 - R_e}{R_0} \times 100 \quad (2)$$

式中，A_0和A_e为脱色前后木糖母液的吸光度；R_0和R_e为脱色前后木糖母液中的总糖含量，mg/mL。

1.2 模型参数测定

用示踪剂法测定树脂床层的孔隙率 ε_e[7]。3 mL甲醇注入装填PDVB/PGMT树脂的色谱柱中（直径1 cm，树脂层高 L 为25 cm，下同），用去离子水以1～5 mL/min的流速（u）进行洗脱。测定甲醇在不同流速下对应的保留时间 t_R，根据甲醇的保留时间与 L/u 的线性关系，按式（3）计算得到树脂床层的孔隙率 ε_e。

$$t_R = \varepsilon_e \frac{L}{u} \quad (3)$$

轴向扩散系数（D_{ax}）根据实验数据拟合计算获得。将3 mL的100 mg/mL糖组分溶液注入装

填 PDVB/PGMT 树脂的色谱柱中，使用去离子水以 1～5 mL/min 的流速洗脱，测定糖组分在不同流速下对应的保留时间 t_R。通过一阶矩（μ_1）确定保留时间 t_R 与 L/u 的线性关系后，进行二阶矩（μ_2）分析以确定理论塔板高度（*HETP*）与表观线速度（u_{int}）的线性关系，拟合得到轴向扩散系数 D_{ax} [8]。

$$\mu_1 = \frac{L}{u_{int}}(1+G) \tag{4}$$

$$\mu_2 = 2\left(\frac{L}{u_{int}}\right)^2\left[G^2\frac{\varepsilon_e}{1-\varepsilon_e}\frac{r_p u_{int}}{3k_{eff}L} + \frac{D_{ax}}{u_{int}L}(1+G)^2\right] \tag{5}$$

$$G = \frac{1-\varepsilon_e}{\varepsilon_e}\left[\varepsilon_p + (1-\varepsilon_p)H\right] \tag{6}$$

$$HETP = \frac{L}{N} = \frac{\mu_2 L}{\mu_2^{\ 2}} = \frac{2D_{ax}}{u_{int}} + 2\left(\frac{G}{1+G}\right)^2\frac{\varepsilon_e}{1-\varepsilon_e}\frac{r_p}{3k_{eff}}u_{int} \tag{7}$$

1.3 动态吸附穿透实验

单次穿透实验：将树脂以湿法装入色谱柱中，柱温保持在 25～60 ℃，以 2 mL/min 流速连续注入木糖母液，流出液用自动部分收集器收集；用紫外分光光度法测定样品的吸光度，用二硝基水杨酸法测定还原糖的含量 [9]。

多阶梯穿透实验：浓度分别为 130、185 和 231 mg/mL 的木糖母液，以 2 mL/min 流速先将低浓度木糖母液注入色谱柱，待吸附平衡后切换更高浓度的木糖母液注入色谱柱，获得不同浓度母液时对应的动态平衡吸附容量 [10]。

1.4 动态穿透过程模拟

假设吸附过程中无化学反应、忽略径向扩散和相间传质阻力；仅考虑轴向扩散，并假定 D_{ax} 值恒定 [11]。在上述基础上建立平衡扩散模型（简称 ED 模型），并探讨该模型描述 PDVB/PGMT 树脂动态吸附木糖母液中色素的穿透特征。对柱子进行流动相的质量衡算，可得式（8）；初始条件和边界条件见（式 9−11）。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial z} = D_{ax}\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{1-\varepsilon_e}{\varepsilon_e}\frac{\partial q}{\partial t} \tag{8}$$

初始条件：

$$c(z,0) = 0 \quad (0 \leqslant z \leqslant L) \tag{9}$$

边界条件：

$$z = 0: \quad D_{ax}\frac{\partial c(0,t)}{\partial z} = u\left[c(0,t) - c_{Fe}\right] \tag{10}$$

$$z = L: \quad \frac{\partial c(L,t)}{\partial z} = 0 \tag{11}$$

2 结果讨论

2.1 树脂动态吸附行为

在动态吸附过程中，穿透曲线的形态不仅能揭示吸附质的理化特性、操作参数的调控，还直观反映了传质动力学，成为衡量吸附分离效能的关键指标 [12]。在 298、313 及 333 K 三个不同温度条件下，设计了多阶梯前沿分析的吸附穿透实验（图 1，其中 *A* 代表色素组分的吸光度，*C* 指示糖组分的浓度）。结果表明，糖组分优先穿透吸附床层并迅速达到吸附平衡状态，相比之下，色素组分表现出滞后流出特性。这一趋势的根本原因在于色素组分中含酚类、糠醛类等物质，这些物质所含的酚羟基、羧基等官能团与树脂表面的氨基之间发生了静电中和作用或形成了氢键。同时，色素分子结构中的芳香环部分能通过 π－π 堆积效应与树脂中的苯环发生相互作用，这些多重作用共同导致色素分子被吸附在树脂的活性位点上，延迟了其流出床层的时间。

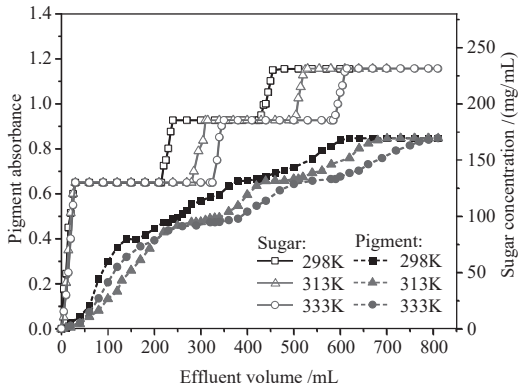

图 1 不同温度下色素和糖组分的多阶梯穿透曲线

Figure 1 Multi−step penetration curve of pigment and sugar at different temperatures

随着床层温度从 298 K 逐步提升至 333 K，两组分的穿透曲线均呈现出向右偏移的趋势（图 1）。尤为值得关注的是，在第一阶梯浓度条件下，糖组分所受温度影响相对有限，色素组分对温度变化较为敏感。此现象表明，在吸附过程中色素与糖组分之间存在着竞争性 [13]，尤其是在低浓度环境下，色素分子凭借其特性占据了树脂上较多的活性吸附位点。随着溶液浓度的不断攀升，糖组分与树脂之间的吸附相互作用逐步增强，由此引发的竞争效应也愈发激烈。此时，温度的升高加速了分子的热运动，使得更多树脂表面的活性位点得以与糖组分发生有效接触并产生吸附作用。在进入第二阶梯浓度范围后，糖组分所受的温度影响变得尤为显著。这一结果为调控和优化吸附分离过程提供了重要依据。

拟合吸附等温线时，Henry 模型有较佳的拟合效果，其相关系数 R^2 高达 0.999 以上（图 2）。

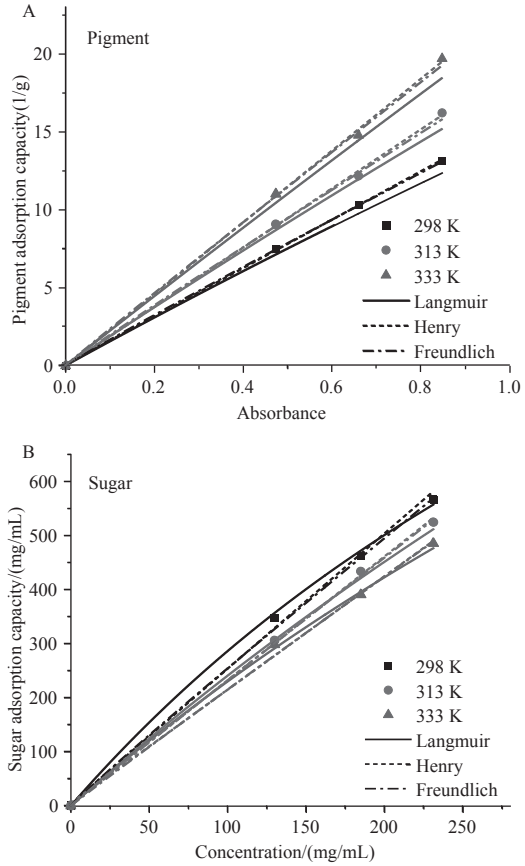

图 2　不同吸附模型拟合色素和糖组分的吸附等温线

Figure 2　Different adsorption models fit adsorption isotherms for pigment and sugar

色素组分的吸附平衡常数（K_H）高于糖组分，这说明树脂对色素有选择性吸附的优势。当温度升高时，色素组分的 K_H 值从 15.53 增加到 23.03，这说明分子热运动对色素分子与树脂间的疏水作用和 π－π 堆积作用影响较大。相比之下，糖组分的 K_H 值从 3.54 略微变化至 3.40，这说明升高温度对糖分子间氢键作用的影响不明显。

2.2　流速对穿透过程的影响

流速的变化对传质动力学有显著影响，进而影响穿透曲线的形态。分别在三种不同流速条件下，探讨了流速对动态脱色过程的影响（图 3）。流速从 1 mL/min 增加至 4 mL/min，色素的穿透体积从 49 mL 减少至 28 mL，糖组分的穿透体积从 4 mL 下降至 2 mL。较高流速条件下，糖液在树脂床层中的停留时间缩短，色素和糖组分与树脂活性位点的接触时间不足，导致吸附过程未能达到平衡状态即被流体带出床层，此时穿透点提前出现，对应的穿透体积随之下降。

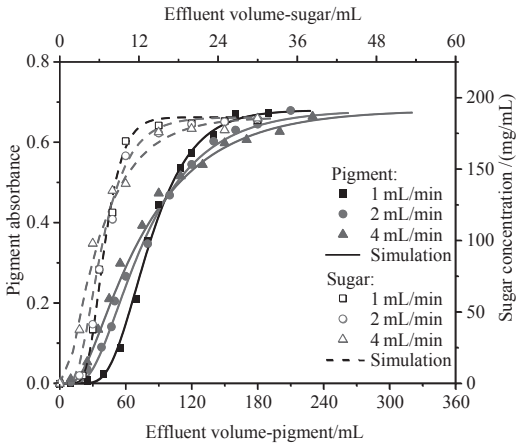

图 3　不同流速时色素和糖组分在 PDVB/PGMT 树脂上的穿透曲线

Figure 3　Penetration curve of pigment and sugar on PDVB/PGMT resin at different flow rates

在流速较快条件下，溶质从流体主体传递至颗粒表面的速率加快，这导致外传质速率超过内扩散速率。由于内扩散速率相对滞后，溶质会在颗粒表面迅速累积，促使吸附区域不断扩展。穿透曲线上出现了平缓化趋势。“波前理论”指出，流速的变化会影响床层中溶质浓度前沿的传播形态 [14]。当流速升高时，吸附区域会变得更加分

散。这种分散效应在穿透曲线上表现为曲线宽度的增大，意味着树脂的有效利用程度有所降低。

根据上述穿透曲线的特征行为，选用不同的色谱模型对组分的穿透过程进行拟合分析。当流速较高时，轴向扩散效应显著。此时 ED 模型（轴向扩散模型）模拟的组分流出曲线与实验数据点吻合度较高。此外，随着流速的增加，色素和糖组分的 D_{ax} 呈增加趋势，其中色素的 D_{ax} 由 1.87 cm²/min 增加到 12.61 cm²/min，糖组分的 D_{ax} 由 1.86 cm²/min 上升至 16.09 cm²/min。根据对流－扩散方程的理论，D_{ax} 与穿透曲线的倾斜程度之间存在着关联性 [15]。D_{ax} 增大意味着轴向扩散作用显著增强，导致吸附区域发生了扩展，穿透曲线的斜率随之下降。因此，选择流速为 1 mL/min 时可以确保树脂对木糖母液的充分吸附。

2.3 初始浓度对穿透过程的影响

料液初始浓度是动态吸附过程中的关键操作变量，对穿透行为有显著影响。木糖母液的吸光度分别为 0.48、0.68 和 0.85（糖组分对应的浓度为 130.59、185.01 和 231.25 mg/mL）条件下进行了穿透实验（图 4）。结果表明，糖液初始浓度的提升，两组分的穿透曲线前倾趋势增加。根据菲克定律 [16]，增加浓度梯度可以强化传质驱动力，能加速树脂的吸附过程。较高初始浓度下，吸附剂达到饱和状态的时间减少。当吸附剂接近饱和，剩余的吸附质会迅速突破床层，导致出口处吸附质浓度急剧攀升，此时穿透曲线变得较为陡峭。

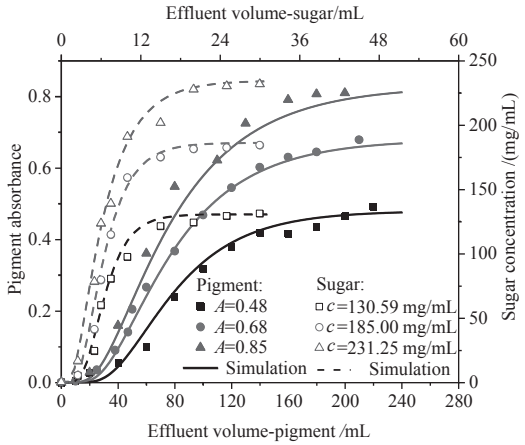

图 4 不同初始浓度时色素和糖组分在 PDVB/PGMT 树脂上的穿透曲线

Figure 4 Penetration curve of pigment and sugar on PDVB/PGMT resin at different initial concentrations

穿透体积 V 由吸附剂的吸附量 Q、吸附质的初始浓度 C_0 以及进料流量 F 共同决定。吸附质的初始浓度 C_0 增大时，这意味着单位时间内进入吸附柱的吸附质总量增加，导致穿透体积减小。然而实验结果显示，提高组分的初始浓度对穿透体积的影响不显著。这一现象可通过 Langmuir–Fick 模型解释 [17]；在高浓度时，溶质分子间的竞争吸附相对减弱，更多吸附位点能被占据，提高了树脂的吸附量。这种吸附量的增加可能抵消了浓度增大导致穿透体积减小的趋势。

初始浓度的增加，色素和糖组分的轴向扩散系数 D_{ax} 分别从 7.09 cm²/min 和 5.11 cm²/min 增至 12.66 cm²/min 和 14.52 cm²/min。根据轴向弥散模型的理论 [18]，增大 D_{ax} 会导致溶质在吸附柱内的分布变得更分散，增加了溶质分子的吸附路径，延缓了溶质的穿透过程，导致穿透体积有所增大。结合前文所述可推测，穿透体积的稳定可能是动态吸附效率提升与轴向扩散效应平衡的结果。值得注意的是，组分的 D_{ax} 较大时，可能会引发严重的返混现象，影响脱色效果的稳定性。初始浓度选取色素吸光度为 0.68、木糖浓度为 185 mg/mL 时既可以提高树脂吸附利用率，又保证了木糖母液得到充分脱色。

2.4 床层高径比对穿透过程的影响

吸附剂床层的高径比是一个对组分扩散传质和停留时间有显著影响的关键参数。图 5 是高径比为 6.4∶1、10.2∶1 和 14.1∶1 时的色素和糖组分的穿透曲线。高径比从 6.4∶1 增加到 14.1∶1，两组分的穿透曲线均有延迟现象。这种趋势主要归因于床层高径比的增大延长了流体在床层内部的流动路径，导致吸附质分子在床层内的停留时间增加，增加了它们与树脂上活性位点相遇并被吸附的概率。高径比增加时，壁面效应对流体流速的影响愈发显著 [19]。壁面附近的流体流速相较于中心区域较慢，且随着床层高度的增加，这种流速差异带来的累积影响愈发明显，导致了流体在柱内流速分布的不均匀性加剧。

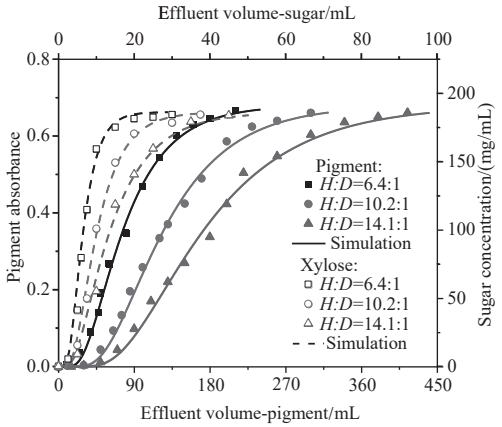

图 5　不同床层高径比时色素和糖组分在 PDVB/PGMT 树脂上的穿透曲线

Figure 5　Penetration curve of pigment and sugar on PDVB/PGMT resin at different bed height−diameter ratios

考虑到高径比的增大会改变吸附剂本身性质，产生较大的轴向扩散效应，因此仍用 ED 模型对实验值进行拟合。拟合得到的色素组分 D_{ax} 由 10.56 cm^2/min 增加到 17.56 cm^2/min，糖组分 D_{ax} 由 17.70 cm^2/min 增加到 22.41 cm^2/min，验证了前文中轴向扩散效应随高径比增大而增强。由于轴向扩散效应的增强延长了穿透曲线，穿透体积增大，有利于增强树脂对木糖母液的脱色效果。根据欧根方程：$\frac{\Delta P}{L}=150\frac{(1-\varepsilon)^2 u\mu}{\varepsilon^3(\phi_s d_e)^2}+1.74\frac{(1-\varepsilon)\rho u^2}{\varepsilon^3(\phi_s d_e)}$，$\Delta P$ 为压力降，ρ 为流体的密度，ϕ_s 为固体离子的球形因子）；在其他条件一定下，当床层高径比过大时压力降呈指数增长，不仅增加能耗，还会引起树脂颗粒破碎和床层沟流现象 [20]。结合脱色效率以及床层压降，应选择床层高径比为 6.4∶1 以确保树脂的完全脱色。

2.5　树脂解吸复用性能

通过动态洗脱实验分析了树脂的解吸性能。在实验中，用体积比为 8:2 的 3% NaOH/ 乙醇溶液作为混合洗脱剂体系；此时洗脱峰吸光度值是原料液的 2 倍（A_0 为原液的吸光度，A_v 为解吸后原液的吸光度），优于单一溶剂的洗脱效果。混合洗脱剂体系有如此优异的解吸性能，主要是 NaOH 和乙醇之间的协同效果。一方面，NaOH 能中和树脂表面的电荷，削弱色素分子与树脂之间强烈的离子交换作用；另一方面，乙醇组分可降低溶液黏度，增强溶剂分子向树脂孔道内部的渗透能力，破坏色素与树脂基质间的疏水相互作用及氢键结合。

随着洗脱剂流速的增大，洗脱峰的吸光度从 2 降至 1.3，且洗脱峰出现了前移或峰宽减小的现象。这可能是流速增大导致流体在床层中的停留时间缩短，减少了洗脱剂与吸附位点的接触时间，不能充分发挥洗脱剂的解吸作用。因此，较低流速有利于解吸剂分子渗透至树脂内部孔道，提高 PDVB/PGMT 树脂的解吸程度。此外，重复实验的结果表明，树脂的脱色性能衰减趋势较小，总糖损失率较低，因此树脂在高效去除色素的同时最大限度地保留糖组分。

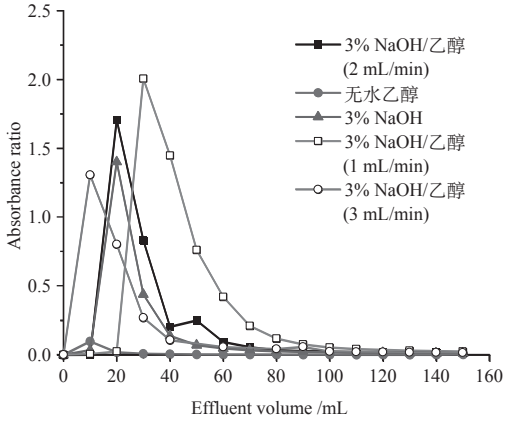

图 6　不同解吸剂及流速时 PDVB/PGMT 树脂的解吸曲线

Figure 6　Desorption curves of PDVB/PGMT resin with different desorption agents and flow rates

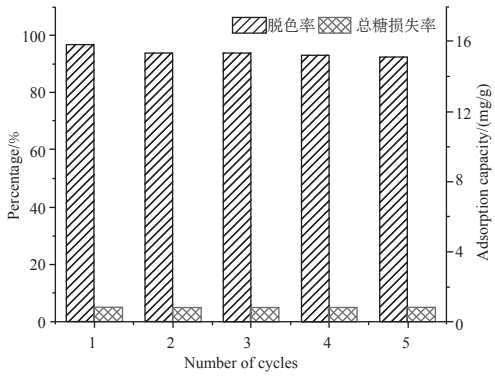

图 7　PDVB/PGMT 树脂的复用性能

Figure 7　Regeneration performance of PDVB/PGMT resin

3 结论

PDVB/PGMT 树脂对色素有显著的选择性吸附优势，且吸附过程符合 Henry 模型。色素平衡常数受温度影响较大，温度升高有利于两组分的分离。穿透体积受流速和床层高径比影响显著，轴向扩散系数 D_{ax} 与流速、初始浓度和床层高径比均呈正相关。确定 PDVB/PGMT 树脂对木糖母液脱色的最佳工艺条件为：流速 1 mL/min、初始色素吸光度 0.68、木糖浓度 185 mg/mL、床层高径比 6.4∶1。在此条件下，PDVB/PGMT 树脂对色素的吸附容量为 19.71 mg/g。选用体积比 8:2 的 3% NaOH/ 乙醇混合洗脱剂在低流速可实现色素高效解吸，且树脂经 5 次循环后仍保持 94% 以上的脱色率，复用性能较佳。

参考文献：

[1] Park Y C，Oh E J，Jo J H，et al. Recent advances in biological production of sugar alcohols [J]. Current Opinion in Biotechnology，2016，37：105−113.

[2] 曹玉华，王关斌，邱学良，等 . 色谱分离树脂在木糖醇母液中的应用研究 [J]. 中国食品添加剂，2020，31（2）：54−58.

[3] 詹淑玉 . 从分子结构信息预测药物的血浆蛋白结合率 [D]. 杭州：浙江大学，2006.

[4] Aljohani H，Ahmed Y，El−Shafey O，et al. Decolorization of turbid sugar juice from sugar factory using waste powdered carbon [J]. Applied Water Science，2018，8（1）：48.

[5] Silverstein M S. Interpenetrating polymer networks：So happy together? [J]. Polymer，2020，207：122929.

[6] 贾彩敬 . 互贯网络强碱树脂设计制备及其对木糖母液的脱色性能 [D]. 无锡：江南大学，2022.

[7] 董青，李敏，杨亦文，等 . 模拟移动床色谱分离二十碳五烯酸乙酯和二十二碳六烯酸乙酯 [J]. 色谱，2018，36（9）：858−865.

[8] Li M，Bao Z B，Xing H B，et al. Simulated moving bed chromatography for the separation of ethyl esters of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid under nonlinear conditions [J]. Journal of Chromatography A，2015，1425：189−197.

[9] Liang L，Liu G M，Yu G Y，et al. Simultaneous decoloration and purification of crude oligosaccharides from pumpkin（*Cucurbita moschata* Duch）by macroporous adsorbent resin [J]. Food Chemistry，2019，277：744−752.

[10] Vente J A，Bosch H，de Haan A B，et al. Evaluation of sugar sorption isotherm measurement by frontal analysis under industrial processing conditions [J]. Journal of Chromatography A，2005，1066（1−2）：71−79.

[11] Yao H M，Tian Y−C，Tadé M O. Using wavelets for solving SMB separation process models [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2008，47（15）：5585−5593.

[12] 刘伟，蔡荣华，张慧峰，等 . 新型大孔树脂吸附浓海水中溴的工艺研究 [J]. 盐业与化工，2012，41（5）：20−24.

[13] 殷江宇 . 蔗汁色素在阳离子淀粉磁性纳米粒子上的竞争吸附机制 [D]. 南宁：广西大学，2023.

[14] Thomas H C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system [J]. Journal of the American Chemical Society，1944，66（10）：1664−1666.

[15] 孙优 . 色谱模型的高精度数值方法 [D]. 湘潭：湘潭大学，2022.

[16] 秦丽红，张凤宝，张国亮，等 . NTS 在大孔吸附树脂上的吸附动力学及机理 [J]. 化学工业与工程，2007，24（3）：245−248.

[17] Xia J，Wang X P，Wang X，et al. Hysteresis dynamic modeling and analysis of flexible nano silver–polyvinyl alcohol humidity sensor based on the microscopic process and Langmuir–fick theory [J]. ACS Omega，2022，7（17）：14994−15004.

[18] 叶长燊，王中来 . 固定床吸附的动力学模型及吸附剂形状因子的影响 [J]. 离子交换与吸附，2000，16（5）：392−399.

[19] 谢刚，贾忠伟，杨青彦，等 . 流变模型壁表面对流体吸附作用的研究 [J]. 黑龙江大学自然科学学报，2002，19（4）：103−105.

[20] Song M K，Jiao P F，Qin T T，et al. Recovery of lactic acid from the pretreated fermentation broth based on a novel hyper−cross−linked meso−micropore resin：Modeling [J]. Bioresource Technology，2017，241：593−602.

《中国食品添加剂》杂志—中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊、CACJ中国应用型核心期刊

欢迎您通过唯一渠道—本刊在中国知网的期刊编审系统投稿

网　址：https://zstj.cbpt.cnki.net