

Research and Development of Key Technologies for Hemicellulose Ultra-Concentration and Exploration of Pathways to Improve Separation Efficiency

Jie Liu Yungang Luo Hongwei Qiao Yiling Chen Yufeng Xu

Korla Zhongtai Textile Technology Co., Ltd., Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract

Hemicellulose is widely used in fields such as bio-based materials, food additives, pharmaceutical intermediates, and new energy materials. However, current industrial extraction and separation technologies for hemicellulose generally suffer from low extraction solution concentration, complex impurity components, and poor separation efficiency, severely impacting subsequent processing and production stages. Based on this consideration, this paper focuses on the key technology of hemicellulose extreme concentration, systematically elaborating on three major technical aspects: composite membrane separation and concentration, vacuum membrane distillation concentration, and alcohol precipitation-membrane separation synergistic concentration. Targeted pathways for improving hemicellulose separation efficiency are proposed, aiming to provide theoretical insights and practical references for the industrial production of hemicellulose.

Keywords

hemicellulose; extreme concentration; key technologies; separation efficiency; career path

半纤维素极限浓缩关键技术研发与分离效率提升路径探索

刘洁 罗云刚 乔宏威 陈依玲 徐玉凤

库尔勒中泰纺织科技有限公司, 中国·新疆 库尔勒 841000

摘要

半纤维素在生物基材料、食品添加剂、医药中间体、新能源材料等领域得到广泛应用,但是,就当前的半纤维素工业化提取与分离技术来看,普遍存在提取液浓度低、杂质组分复杂、分离效率不佳的问题,使得半纤维素的后续加工生产环节受到严重影响。基于对这一方面的考虑,本文将半纤维素极限浓缩关键技术作为研究对象,就复合膜分离浓缩、真空膜蒸馏浓缩、醇沉-膜分离协同浓缩三大关键技术要点予以系统阐述,针对性提出半纤维素分离效率提升路径,旨在为半纤维素工业化生产提供理论借鉴与实践参考。

关键词

半纤维素; 极限浓缩; 关键技术; 分离效率; 提升路径

1 引言

在半纤维素提取、浓缩、分离环节,浓缩效果差、分离效率低的难题始终影响着提取液的高值化利用,限制了半纤维下游产业的规模化发展,同时,也浪费了大量的生物质资源。为突破半纤维素极限浓缩的技术壁垒,提升分离效率,需要从原料预处理、多元技术协同、操作参数精准调控、设备结构优化改进等多个层面着手,以探索出一条经济性与实用性兼备的分离效率提升路径。

【作者简介】刘洁(1989-),男,中国甘肃白银人,本科,工程师,从事人造纤维素纤维研究。

2 半纤维素极限浓缩关键技术研发

2.1 复合膜分离浓缩技术

复合膜分离浓缩技术的基本原理是借助于多层不对称膜结构设计与功能层界面改性,实现半纤维素大分子与溶剂、小分子杂质的高效分离。与单一膜材料相比,复合膜具有高截留、低通量的特点,快速透过水分、单糖、有机酸、无机盐等小分子杂质。并且,采用复合膜进行分离浓缩作业,全过程均可以在常温、低压条件下进行,无需相变、无需添加化学分离试剂,最大程度保留半纤维素的天然分子结构、聚合度与生物活性。并且该技术操作简便、设备占地面积小、自动化水平高。

比如利用耐碱纳滤-超滤复合膜对竹材半纤维素水解液进行浓缩操作时,主要采用聚砜超滤支撑层与聚酰胺纳滤功

能层复合制备,通过界面聚合工艺调控功能层孔径,将截留分子量精准设定为 800Da,适配竹材半纤维素分子量分布区间,工艺操作压力稳定控制在 2.5MPa,料液温度恒定维持在 45℃,料液流速调控为 2.0m/s 以缓解浓差极化现象。在连续稳态运行工况下,该复合膜体系对半纤维素的截留率达到 98.6%,初始膜通量稳定在 18.2L/(m²·h),连续运行 12h 后膜通量衰减率仅 6.3%,经过多级浓缩处理后,半纤维素质量浓度能够从初始的 12.5g/L 提升至 68.3g/L,浓缩倍数达 5.47 倍,计算公式如下:

$$N = \frac{C_1}{C_0} \quad (1)$$

公式(1)中,N为浓缩倍数,C₁为浓缩后半纤维素质量浓度(g/L),C₀为初始半纤维素质量浓度(g/L),利用该公式能够精准量化浓缩效果,为工艺参数优化、浓缩效率评估提供重要的参考依据。

表 1 真空膜蒸馏浓缩技术浓缩玉米芯半纤维素料液的技术参数

技术参数	数值	参数说明
进料温度	65℃	半纤维素料液进入膜组件的控制温度
料液流速	1.5L/min	膜组件进料侧料液循环流动速率
膜下游真空度	0.095MPa	膜组件渗透侧真空压力控制值
初始膜通量	11.9kg/(m ² ·h)	浓缩启动阶段单位膜面积水分通量
8h 稳定膜通量	9.5kg/(m ² ·h)	连续运行 8h 后稳态单位膜面积水分通量
半纤维素截留率	99.99%	体系对半纤维素大分子的截留效率
极限浓缩倍数	5.9 倍	浓缩前后半纤维素质量浓度比值
能耗降低率	40% 以上	相比传统蒸发浓缩的能耗优化幅度

2.3 醇沉 - 膜分离协同浓缩技术

醇沉-膜分离协同浓缩技术有效解决了单一醇沉工艺溶剂消耗量大、固液分离困难、溶剂回收成本高、浓缩效率有限等问题,具有浓缩周期短、极限浓缩倍数高、浓缩过程污染小的特点。该技术以食品级乙醇作为沉淀剂,调控料液体系的乙醇浓度、pH 值、温度与搅拌参数,能够使溶解状态的半纤维素分子快速聚集、析出形成沉淀,实现半纤维素的初步高效富集,大幅提升料液中半纤维素固含量,降低后续膜分离工段的处理负荷。之后,再通过膜分离技术对醇沉混合悬浊液进行精准固液分离,高效截留半纤维素沉淀,并快速透过乙醇溶剂与小分子水溶性杂质,使半纤维素精浓缩与溶剂同步回收。

比如利用该技术浓缩杨木半纤维素提取液,首先向杨木半纤维素提取液中匀速添加无水乙醇,调控体系乙醇体积分数至 75%,调节体系 pH 值至 7.0,在 25℃ 恒温条件下以 60r/min 转速搅拌 30min,促进半纤维素分子充分聚集沉淀,初步富集处理后,半纤维素固相含量从初始 3.1% 提升至 32.6%。然后,将醇沉后得到的半纤维素悬浊液,送入截留分子量 1000Da 的耐醇纳滤膜系统,在操作压力 1.8MPa、料液温度 30℃、错流流速 1.2m/s 的工艺条件下,进行固液

2.2 真空膜蒸馏浓缩技术

该技术突破了传统热浓缩、单一膜分离的工艺局限,操作温度仅需要 60-70℃,远低于传统蒸发浓缩温度,属于低温浓缩工艺,可彻底避免高温环境下半纤维素多糖链断裂、降解、变色等问题,最大程度保留半纤维素的分子完整性与功能活性。并且,在真空负压环境下,能够大幅降低水的沸点,提升水分传质驱动力,减少热量损耗,其疏水膜可以完全截留半纤维素大分子,与单一膜分离技术相比,浓缩极限优势表现得尤为明显^[1]。

比如利用真空膜蒸馏浓缩技术对玉米芯半纤维素料液进行浓缩处理,其浓缩结果表明:该技术对半纤维素的截留率高达 99.99%,几乎实现半纤维素的零流失。经过浓缩处理后,料液中半纤维素质量浓度从初始 15.2g/L 提升至 89.7g/L,并且料液中糠醛、乙酸等发酵抑制物浓度从 0.46g/L 降至 0.23g/L,具体的技术参数如表 1 所示。

分离与乙醇溶剂回收。该纳滤膜系统对醇沉后半纤维素沉淀的截留率达 99.2%,乙醇溶剂透过率达 89.5%,半纤维素最终质量浓度达到 102.3g/L,总浓缩倍数达 8.18 倍,远高于单一膜分离或单一醇沉工艺。另外,该技术不仅实现半纤维素的超高倍数浓缩,还能够同步深度脱除料液中的水溶性多糖、无机盐、色素等杂质,浓缩后半纤维素产物纯度超过 92%,完全满足食品、医药、功能材料等高端领域的应用要求^[2]。

3 半纤维素分离效率提升路径

3.1 原料定向预处理改性

导致半纤维素分离效率低的主要原因是由于农林生物质原料天然的细胞壁致密结构所致,

针对这一问题可以通过对原料的定向预处理改性,提高分离效率。这一措施的关键是高效破坏生物质细胞壁的致密超分子结构,选择性断裂半纤维素与木质素之间的酯键、醚键等共价键连接,增大原料孔隙率与比表面积,从源头降低后续分离过程的传质阻力与解离难度。以玉米芯原料的定向预处理改性为例,主要利用蒸汽爆破-酸碱协同改性方式,通过瞬间泄压产生的机械剪切力与热化学作用,初步破坏玉

米芯细胞壁致密结构。这一过程的蒸汽爆破压力为 1.8MPa、高温保压时间 90s。这道工序结束后,采用浓度 0.5% 的稀硫酸溶液,在 80℃ 恒温条件下辅助处理 60min,选择性断裂半纤维素与木质素之间的连接键,再通过 1% 氢氧化钠溶液常温中和调节料液 pH 值,完成全流程定向预处理改性。经过预处理之后的玉米芯原料细胞壁结晶度从原始的 62.3% 大幅降至 31.7%,原料内部孔隙率提升 4.2 倍,半纤维素与木质素的结合键断裂率高达 89.6%,半纤维素的溶出活性显著提升,为验证分离效率的提升效果,可以利用下面的方式计算原料细胞壁解离效率:

$$\eta = \left(1 - \frac{X_1}{X_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

公式(2)中, η 为原料细胞壁解离效率, X_1 为预处理后原料结晶度, X_0 为原料原始结晶度,利用该公式能够有效验证经过改性处理后半纤维素分离效率的提升效果。该技术可以根据不同生物质原料的组分特性、细胞壁结构差异,灵活调整预处理强度与作用方式,适配玉米芯、秸秆、竹材、木材等各类农林原料的预处理需求。另外,在预处理过程中,通过控制温度、压力、试剂浓度、处理时间等关键参数,精

准平衡细胞壁解构效果与半纤维素保护力度,杜绝过度预处理引发的半纤维素降解、杂质溶出增多、试剂残留等问题,使得化学试剂用量大幅降低,废水排放大幅减少,其环保性与经济性进一步凸显^[3]。

3.2 分离体系耦合强化

该处理方法整合两种及以上不同分离工艺,构建协同互补的新型分离体系,可强化半纤维素与木质素、纤维素及小分子杂质的分离效果,改善浓差极化、膜污染、分离滞后等问题。以超声辅助-膜分离耦合技术分离竹材半纤维素为例,在操作压力 2.2MPa、料液温度 40℃、错流流速 1.5m/s 的条件下,超声能破坏胶体团聚与悬浮杂质,缓解浓差极化,加快半纤维素传质,显著提升分离效率。除该技术外,微波辅助萃取、酶解-膜分离、萃取-吸附等耦合体系,可依据料液特性与工况灵活选用。这类耦合工艺既能提高半纤维素收率、分离速率与产物纯度,深度脱除杂质,减轻后续处理压力、降低生产成本;同时设备模块化、可控性好,便于工业化放大与自动化生产,有效破解了半纤维素传统分离效率低、能耗高、污染突出的行业难题,也是目前生物质精炼领域的主流技术方向。数据如表 2 所示。

表 2 超声辅助-膜分离耦合强化体系的分离效率提升数据

分离工艺	膜通量 (L/(m ² ·h))	半纤维素分离收 (%)	木质素脱除率 (%)	分离周期 (h)	膜污染衰减率 (%)
单一膜分离	13.9	67.2	61.5	8.0	12.4
超声-膜分离耦合	21.3	82.6	79.2	4.8	5.8
工业化提升幅度	+52.7%	+15.4%	+17.7%	-40%	-6.6%

3.3 精准调控分离过程

针对半纤维素浓缩过程中的提取液分离过程,可以基于半纤维素分离热力学、动力学机理进行精准调控,建立分离参数与分离效率、产物品质的量化关联模型,实现对分离全流程关键参数的实时监测、精准调控与动态优化,最大化匹配半纤维素溶出、传质、截留、纯化的最优工艺条件,以减少非目标副反应与半纤维素无效损失,保障分离过程始终处于高效、稳定、可控的最优运行状态。比如对采用膜分离技术的过程参数进行调控时,可以基于响应面法与正交试验设计,系统分析料液 pH 值、分离温度、进料流速、操作压力、浓缩比等关键参数对分离效率的交互影响规律,建立半纤维素分离效率多参数响应优化模型,最终确定最优精准调控工艺条件与参数,其中:料液 pH 值 8.5、分离温度 42℃、进料流速 1.8m/s、操作压力 2.0MPa、浓缩比 5:1。经过精准调控处理,半纤维素与膜表面的静电排斥作用达到最优状态,能够有效避免半纤维素在膜表面的吸附损失,并且分离效率、产物品质与工艺经济性均实现同步优化^[4]。

从上面列举的例子可以看出:针对各项分离工艺参数进行实时动态调整,能够持续维持高效分离状态。这一过程无需人工反复试错,便可以快速锁定最优参数区间,大幅缩短工艺调试周期,降低人为操作误差带来的效率损失。与此同时,该提升路径无需对现有生产设备进行大规模改造,仅

通过工艺参数的精准优化即可实现分离效率的显著提升,具有投资成本低、操作简便、适配性强、见效快等优势,这就给降本增效目标的实现创造了有利条件。

4 结语

通过对复合膜分离浓缩、真空膜蒸馏浓缩、醇沉-膜分离协同浓缩三大关键技术基本原理及应用优势的分析,能够发现半纤维素极限浓缩已经逐步形成一个科学、高效、完整、成熟的技术体系,浓缩效果显著提升。而在分离效率提升方面,通过原料定向预处理改性、分离体系耦合强化、精准调控分离过程,极大强化了半纤维素分离技术的高效性、经济性与环保性,这就为半纤维素的规模化、工业化生产与应用提供了强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 陈志文,巨朝阳,余梦婷,等.木质纤维素生物质转化分子模拟研究进展[J].化工生产与技术,2025,31(06):22-29+8-9.
- [2] 杨成,袁然,李蒙.华中地区南荻生物质品质性状分析与半纤维素糖化研究[J].湖南农业科学,2025,(11):37-42.
- [3] 冯万里,曾新堂,贾梓裕,等.大豆皮半纤维素的提取工艺优化及其酯化改性研究[J].粮食与油脂,2025,38(10):16-23.
- [4] 林政明,杜桂涛,余晗,等.半纤维素基高内相Pickering乳液的制备与应用[J].林产化学与工业,2026,46(01):45-55.