

真空膜蒸馏技术在烟草纯露浓缩中的应用研究

张朝¹, 李艳芳¹, 章存勇¹, 田志豪², 刘文龙²,
张兵³, 田振峰¹, 黄兰¹, 李传润^{2,4}, 颜海洋^{2,4*}, 葛少林^{1*}

(1. 安徽省气溶胶解析调控及生物效应重点实验室, 合肥 231200; 2. 安徽中医药大学药学院, 合肥 230012; 3. 浙江省烟草质量监督检测站, 杭州 310001;
4. 安徽中医药大学制药工程技术研究中心, 合肥 230012)

摘要: 通过真空膜蒸馏技术对造纸法再造烟叶萃取液水蒸气蒸馏得到的烟草纯露进行浓缩。研究了不同操作条件对烟草纯露浓缩效果的影响, 对其传质、传热进行了讨论, 并对膜面污染进行表征分析。结果表明, 膜材质、渗透侧真空度、进料液温度、进料液流速对渗透通量和有机物保留率均有明显影响, 聚四氟乙烯(PTFE)材质的疏水疏油膜保留率更高; 在 70 °C、70 kPa 时渗透通量最高可达 12.74 L/(m²·h); 当流速为 0.5 cm/s 时, 有机物的保留率最高可以达到 94.8%。利用真空膜蒸馏技术浓缩烟草纯露具有良好的技术可靠性和经济竞争力。

关键词: 真空膜蒸馏; 烟草纯露; 再造烟叶; 浓缩

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)01-0119-10

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.01.013

纯露, 又称水精油, 是指水蒸馏萃取提炼精油过程中的副产物^[1]。纯露中除了含有少量精油成分之外, 还含有植物体内全部的水溶性物质, 易被皮肤吸收, 且温和无刺激^[2]。烟草纯露是常用的烟叶香料, 添加到再造烟叶中可以起到圆和烟香的作用。从废弃烟叶中提取的烟草纯露不仅可以变废为宝、保护环境; 还可以提质增效、降低生产成本。但在烟草萃取液浓缩过程中得到的烟草纯露常需经过进一步浓缩处理, 才能添加到再造烟叶中^[3]。河北中烟开发了一种同时制备烟草精油和烟草纯露的优化制法^[4], 但在浓缩的过程中需要进一步加入有机试剂萃取, 溶剂置换处理, 最终才能得到较高浓度、香味成分较

多的高质量烟草纯露。此外, 传统精馏浓缩操作温度较高, 由于一些热敏感物质的分解, 以及一些香气成分的损失^[5], 影响了烟草纯露的质量。

膜蒸馏是一种热驱动膜过程, 主要利用疏水膜两侧蒸汽压差作为传质驱动力来实现料液的分离^[6]。基于微孔疏水膜的膜蒸馏已经成功应用于海水淡化^[7-9]、废水处理^[10-13]、果汁浓缩^[14-17]等领域。在膜蒸馏工艺中微孔疏水膜只允许蒸气通过, 而其他组分被很好地富集保存。与传统精馏浓缩相比, 膜蒸馏具有较低的操作温度和较高的分离效率^[18]。真空膜蒸馏是膜蒸馏的一种, 真空膜蒸馏利用真空泵在膜渗透侧创造真空条件, 冷凝发生在膜组件外。

收稿日期: 2024-07-17; 修改稿收到日期: 2024-09-11

基金项目: 安徽省气溶胶解析调控及生物效应重点实验室开放课题(2022302); 国家重点研发计划项目(2022YFB3805100); 安徽省高校优秀青年科研项目(2022AH030063); 安徽中医药大学人才支持计划项目重大项目(2022rcZD005)

第一作者简介: 张朝(1985-), 男, 河北保定人, 硕士, 高级工程师, 主要从事烟草化学相关研究。* 通讯作者, 颜海洋, E-mail: oceanyan@ustc.edu.cn; 葛少林, E-mail: slge@ahycgy.com.cn。

引用本文: 张朝, 李艳芳, 章存勇, 等. 真空膜蒸馏技术在烟草纯露浓缩中的应用研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1): 119-128.

Citation: Zhang Z, Li Y F, Zhang C Y, et al. Application of vacuum membrane distillation technology in concentration of tobacco pure dew[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(1): 119-128.

真空膜蒸馏具有传导损失热量低,膜通量高等优点,本工作采用了一种平板式的膜组件,研究了真空膜蒸馏对烟草萃取液的浓缩效果,考察了不同操作条件对烟草纯露浓缩效果的影响,对其传质传热进行了讨论,并对膜污染的形成进行表征分析。

1 实验部分

1.1 材料

实验中所用的烟草纯露由安徽中烟工业有限责任公司技术中心提供。为了避免烟草纯露中的一些大分子不溶杂质对膜的污染堵塞,在实验前对烟草纯露进行抽滤预处理去除悬浮物。实验所用膜为购自微纳过滤技术(南通)有限公司的聚四氟乙烯(PTFE)平板蒸馏膜,其相关参数如表 1 所示。实验过程中所用的 COD 液体检测试剂均为连华科技有限公司提供。

1.2 实验装置及过程

实验所用装置如图 1 所示。实验过程每次投料 300 mL,置于 500 mL 三颈烧瓶中,采用恒温磁力搅拌器(SZCL-1000,上海力辰仪器科技公司)加热搅拌,通过蠕动泵(BT600L,保定雷弗流体科技公司)

将进料液泵入膜组件(有效膜面积 40.5 cm²)进料侧(横截面积 1.35 cm²)。渗透侧通过循环水式多用真空泵(SHK-Ⅲ,郑州科泰实验设备有限公司)施加真空,采用蛇形冷凝管冷凝,冷凝液用三颈烧瓶进行收集。每 25 min 量取 1 次冷凝液,并从进料浓缩液取样,每组实验运行 125 min 结束。采用电量检测计检测整个运行装置(包括水浴锅、蠕动泵、循环水式真空泵)能耗。

表 1 平板蒸馏膜相关参数

Table 1 Related parameters of flat distillation membrane			
膜种类	孔径/ μm	厚度/ μm	是否有支撑层
疏水膜	0.2	230	是
疏水疏油膜	0.2	250	是

1.3 测试方法

通过化学需氧量衡量有机物浓度^[19],采用多参数水质测定仪[5B-3B(V11),连华科技有限公司]测量浓度。通过扫描电子显微镜(Quattro S,美国赛默飞公司)分析实验前后膜污染程度,通过接触角测定仪(DAS30S,德国 KRUSS 公司)测定膜面接触角分析膜的疏水性变化。

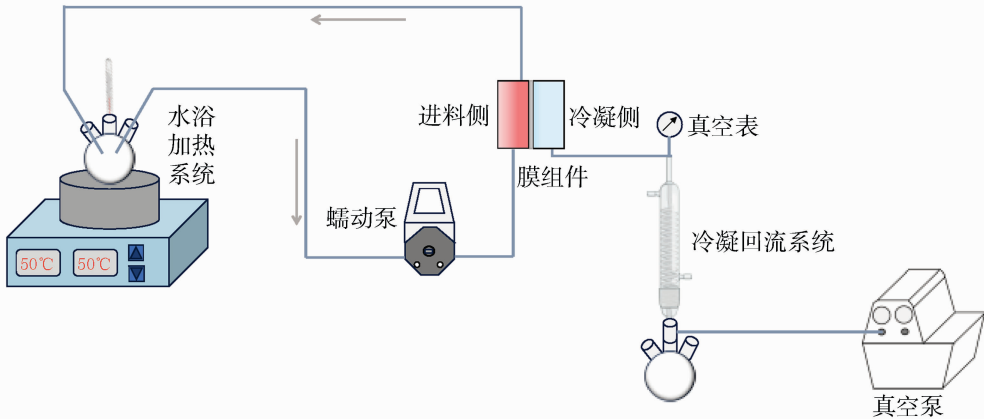


图 1 真空膜蒸馏实验装置流程图

Fig. 1 Flow chart of experimental apparatus for vacuum membrane distillation

1.4 性能指标

以渗透通量(J)、有机物保留率(R_o)、水回收率(R_w)、能耗(E)为主要性能指标,评价在不同操作条件下真空膜蒸馏的性能变化。其中,渗透通量(J)采用式(1)进行计算:

$$J=\frac{\Delta V}{A\cdot\Delta t}\tag{1}$$

式中: J 为渗透通量,L/(m²·h); ΔV 为冷凝液体积,L; A 为有效膜面积,40.5 cm²; Δt 为操作时间,h。

有机物保留率(R_o)和水回收率(R_w)可根据式(2)及式(3)进行计算:

$$R_o=\frac{C_1\times V_1}{C_0\times V_0}\times100\%\tag{2}$$

$$R_w=\frac{V_2}{V_0}\times100\%\tag{3}$$

式中: C_0 、 C_1 为进料液和浓缩液的有机物质量浓度,mg/L; V_0 、 V_1 、 V_2 分别为进料液、浓缩液和冷凝液的体积,mL。

能耗(E)可根据式(4)计算^[20]:

$$E=\frac{Q}{\Delta V} \tag{4}$$

式中: E 为能耗, $\text{kW}\cdot\text{h/L}$; Q 为电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; ΔV 为冷凝液体积, L .

2 结果与讨论

2.1 不同膜对真空膜蒸馏性能的影响

膜的材质和性能是影响真空膜蒸馏的主要因

素,选用 PTFE 材质的疏水膜和疏水疏油膜作为比较. 在渗透侧真空度 40 kPa,进料液 70 ℃,进料流速 2 cm/s 的条件下,研究不同膜对于真空膜蒸馏浓缩烟草纯露性能的影响,结果如图 2 所示.

如图 2(a)所示,两种膜在运行过程中,渗透通量都保持在一个较为稳定的范围,疏水膜渗透通量高于疏水疏油膜. 这是因为相较于疏水疏油膜,疏水膜更薄透气性更高,对蒸气的传质阻力更低,更利于蒸气的传质^[21].

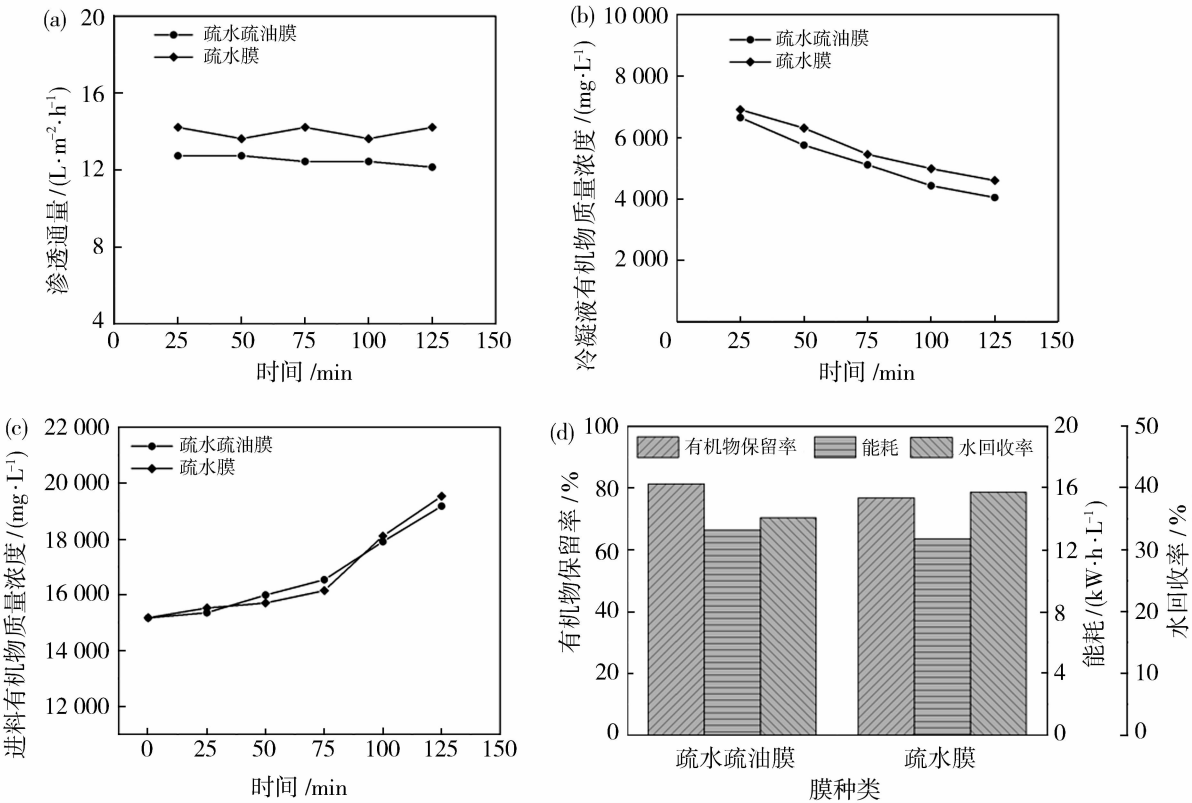


图 2 不同膜对通量(a)、冷凝液有机物含量(b)、浓缩液有机物含量(c)、有机物保留率、能耗和水回收率(d)的影响
Fig. 2 The effects of different membranes on permeation flux (a), organic matter content of condensate (b), organic matter content of concentrated liquid (c), organic matter retention, energy consumption and water recovery (d)

通过图 2(b)可以看到,两种膜实验时,冷凝液中的有机物含量随着实验运行呈现下降趋势. 这是因为在实验前期进料液中低沸点、易挥发的有机物浓度较高;而随着实验的进行,其在进料液中的浓度下降,在边界层中所占的相对饱和和分压降低,导致后续冷凝液中的有机物含量下降. 与疏水膜相比,疏水疏油膜的表面自由能更低^[22],疏水性能更优异且对水溶性和油溶性物质均有较好的排斥作用. 当采用疏水膜进行实验时,冷凝液中有机物质量浓度为 6 903 mg/L,而采用疏水疏油膜进行实验时为 6 647 mg/L,这主要是因为疏水疏油膜更低的表面

自由能及更高的疏水性.

如图 2(c)、2(d)所示,两种膜实验后的进料液都得到了明显的浓缩,在采用疏水膜时进料液有机物质量浓度从 15 174 mg/L 上升到了 19 400 mg/L,而采用疏水疏油膜时进料液有机物质量浓度从 15 174 mg/L 上升到了 19 174 mg/L. 当采用疏水膜实验时,进料液最终的水回收率更高,最终能耗也要略低,这主要是因为疏水膜透气性更好,渗透通量更高,水回收率更高. 但是由于疏水膜自身特性,导致在浓缩的过程有更多的组分损失,在该实验条件下采用疏水疏油膜时,有机物保留率可以提高到 81.

3%。综上所述,为了得到更高的有机物保留率,采用 PTFE 材质的疏水疏油膜进行后续实验。

2.2 渗透侧真空度对真空膜蒸馏性能的影响

对于真空膜蒸馏来说,渗透侧真空度是其主要

传质驱动力^[23],真空度越高越有利于蒸气传质. 选用 PTFE 材质的疏水疏油膜,在进料液 70 ℃、进料流速 2 cm/s 的条件下,研究不同渗透侧真空度对于真空膜蒸馏浓缩烟草纯露的影响,结果如图 3 所示。

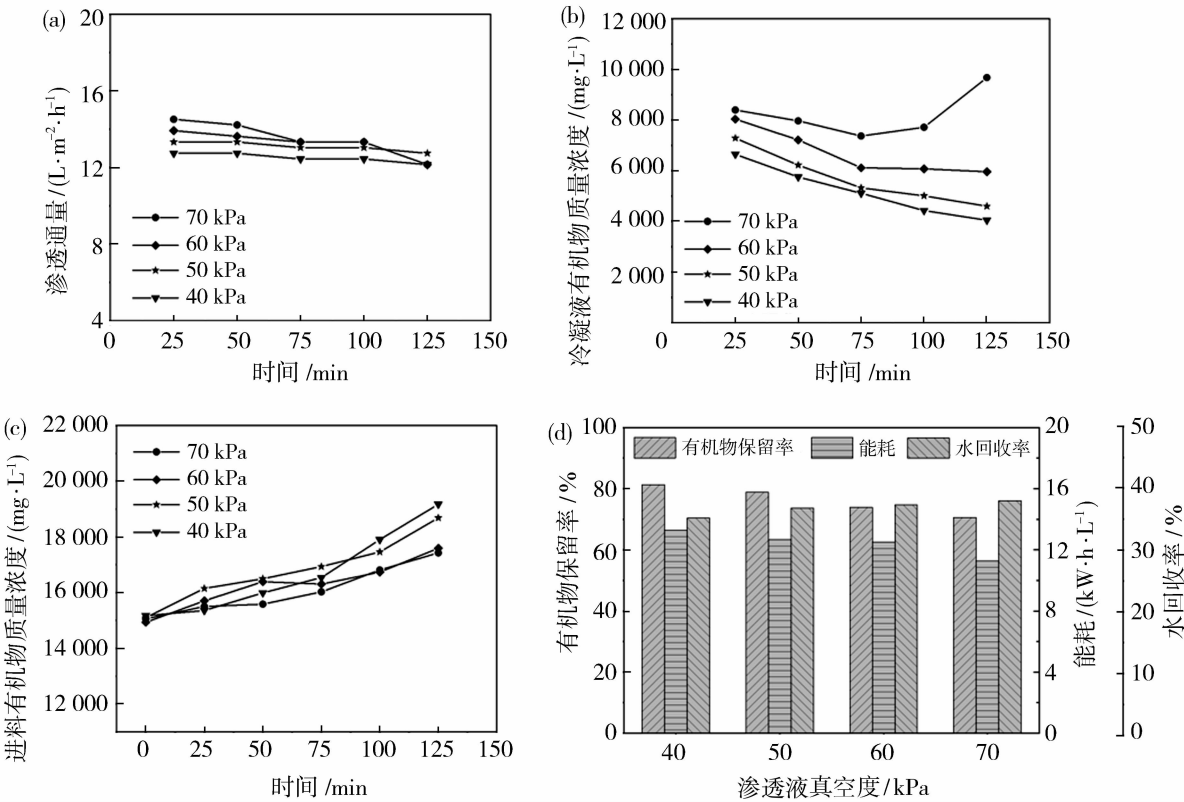


图 3 渗透侧真空度对通量(a)、冷凝液有机物含量(b)、浓缩液有机物含量(c)、有机物保留率、能耗和水回收率(d)的影响

Fig. 3 The effects of the permeating side vacuum on permeation flux (a), organic matter content of condensate (b), organic matter content of concentrated liquid (c), organic matter retention, energy consumption and water recovery (d)

如图 3(a)所示,当渗透侧真空度从 40 kPa 升高到 70 kPa 时,前 25 min 的渗透通量从 12.74 L/(m²·h)上升到 14.52 L/(m²·h),由于膜污染的出现,随着实验的运行,渗透通量开始下降. 在 70 kPa 下,实验进行到 125 min 时渗透通量下降到了 12.15 L/(m²·h). 这主要是因为渗透通量越高,膜面极化现象越严重,膜面污染也越严重^[24]. 此外,较高的真空度会导致膜的疏水性变差,加速膜面润湿. 如图 3 (b)所示,当渗透侧真空度从 40 kPa 上升到 70 kPa 时,冷凝液中前 25 min 有机物质量浓度从 6 647 mg/L 上升到了 8 396 mg/L,这是因为传质驱动力增加,有利于低沸点易挥发组分的蒸发迁移. 此外,在 70 kPa 的条件下,实验进行到 75~125 min 时冷凝液有机物含量开始增加,这主要是因为高负压导致膜面润湿,导致进料侧部分溶液泄漏到了冷凝侧.

如图 3(c)所示,在 40 kPa 时进料液有机物质量

浓度从 15 174 mg/L 提升到 19 174 mg/L,而在 70 kPa 条件下,进料液有机物质量浓度从 15 059 mg/L 仅提升到 17 426 mg/L. 这是因为在长期高压条件下,更多的有机物损失和泄漏. 如图 3(d)所示,增加渗透侧真空度虽然可以增加渗透通量,降低运行能耗,但同时也会降低有机物保留率,当渗透侧真空度从 40 kPa 增加到 70 kPa 时,有机物保留率从最开始的 81.3%降低到了 70.6%. 如图 3(d)所示,渗透侧真空度的增加对于水回收率和能耗的影响不明显. 虽然升高渗透侧真空度可以提高传质驱动力,在一定程度上增加渗透通量,但是会大大降低有机物保留率,加大膜面润湿风险. 因此,在实际应用中应该适当降低渗透侧真空度,以增加装置长时间运行的稳定性.

2.3 进料液温度对真空膜蒸馏性能的影响

真空膜蒸馏是一种热驱动膜技术,因此温度是

影响膜蒸馏性能的主要因素之一^[25],采用疏水疏油膜,在 40 kPa、2 cm/s 的条件下进行实验,考察进料

液温度对真空膜蒸馏浓缩烟草纯露的影响,结果如图 4 所示。

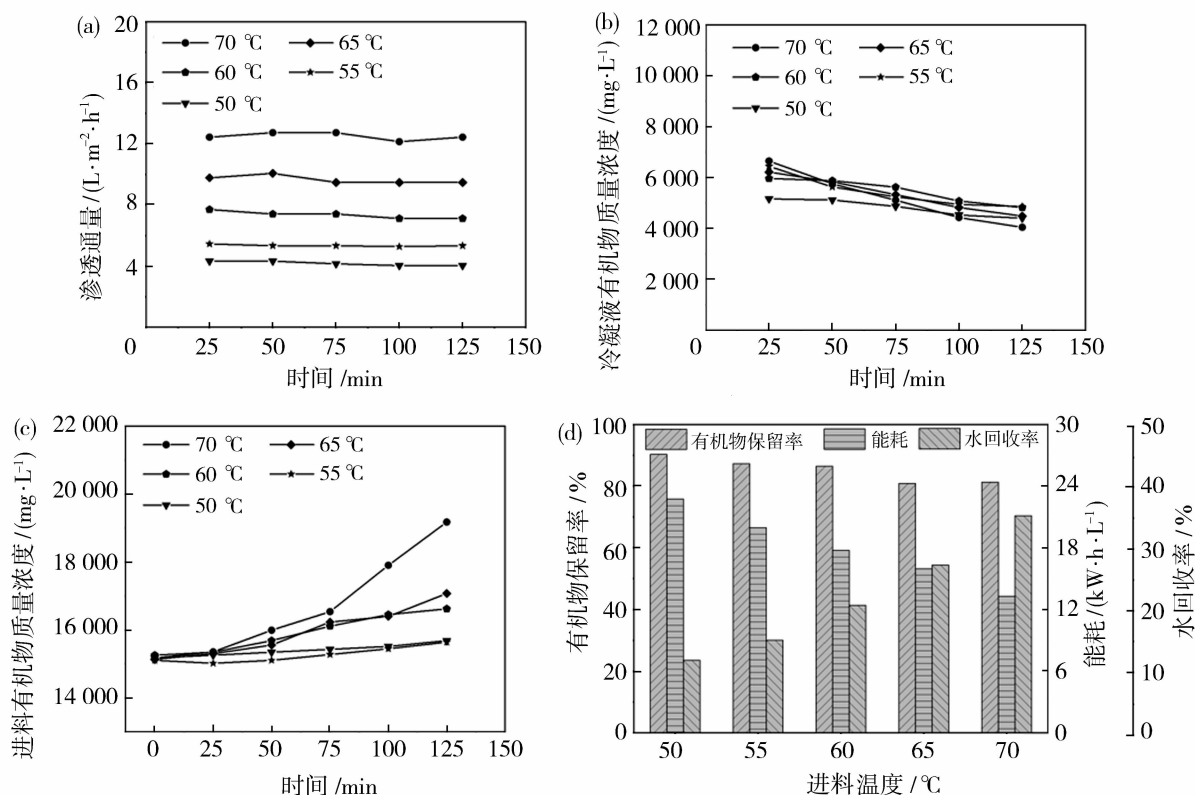


图 4 进料温度对通量(a)、冷凝液有机物含量(b)、浓缩液有机物含量(c)、有机物保留率、能耗和水回收率(d)的影响
Fig. 4 The effects of feed temperature on permeation flux (a), organic matter content of condensate (b), organic matter content of concentrated liquid (c), organic matter retention, energy consumption and water recovery (d)

如图 4(a)所示,进料液温度对渗透通量有显著影响,当进料液温度从 50 °C 上升到 70 °C 时,前 25 min 渗透通量从 4.33 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 上升到 12.44 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,这主要是因为进料侧饱和蒸汽压的快速增加。根据 Antoine 方程^[26][式(5)],边界层饱和蒸汽压与膜表面温度呈指数关系,升高进料液温度,进料侧边界层饱和蒸汽压急剧增加,导致渗透通量大幅度增加。

$$\lg p = 10.1962 - \frac{1730.630}{T - 39.724} \quad (5)$$

如图 4(b)所示,当进料液温度从 70 °C 下降到 50 °C 时,冷凝液有机物质量浓度从 6 647 mg/L 下降至 5 160 mg/L 。这是因为温度增加提高了低沸点物质在边界层的相对分压^[27],而水分子和其他高沸点物质的相对分压下降,因此在高温时有更多的有机物损失。如图 4(c)所示,进料液温度越高,烟草纯露浓缩后有机物含量越高,这得益于温度上升增加了渗透通量,提高了系统的运行效率。

如图 4(d)所示,随着进料液温度的降低,有机物保留率增加,从 70 °C 时的 81.3% 上升到了 50 °C 的 90.3%。这是因为温度越低,易挥发组分在边界层所占的相对分压越低,越有利于其与水蒸气的分离。但同时需要注意的是,温度降低导致渗透通量下降^[25],水回收率下降,降低了系统的运行处理能力,导致能耗的急剧增加。因此,在实际应用中为了兼顾能耗经济因素,应当选择适当的进料液温度。

2.4 进料流速对真空膜蒸馏性能的影响

流速主要影响真空膜蒸馏的传质和传热,并进一步影响膜面污染和膜的润湿^[28],选用 PTFE 材质的疏水疏油膜,在进料液 60 °C、渗透侧 40 kPa 的条件下,考察不同进料流速对真空膜蒸馏运行性能的影响,结果如图 5 所示。

如图 5(a)所示,当进料液流速从 0.5 cm/s 增加到 4 cm/s ,前 25 min 渗透通量从 4.03 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增加到 8.89 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。温度和浓度极化会影响

膜表面边界层的水分蒸发,提高进液流速可以在膜表面产生不对称扰动,减弱温度和浓度极化的影响,最终提高传热传质效率,增加渗透通量的同时也能更好的降低由于浓差极化带来的膜污染^[28].

如图 5(b)所示,当流速增加到 4 cm/s 时,前 25 min 冷凝液有机物质量浓度从 4 416 mg/L 增加到了 6 212 mg/L. 这是因为进料液温度是影响冷凝液的主要因素之一,流速越低温度极化越严重^[29],

膜面实际温度越低,低沸点物质在边界层所占的相对饱和分压越低,降低了与水蒸气的跨膜竞争. 如图 5(c)所示,由于高流速带来的高渗透通量,在 4 cm/s 的流速下,进料液有机物含量从 15 103 mg/L 浓缩到了 16 895 mg/L. 如图 5(d)所示,当流速从 4 cm/s 降低至 0.5 cm/s 时,有机物保留率从 84.3% 增加到了 94.8%,这说明采用真空膜蒸馏浓缩烟草纯露是一种行之有效的方法.

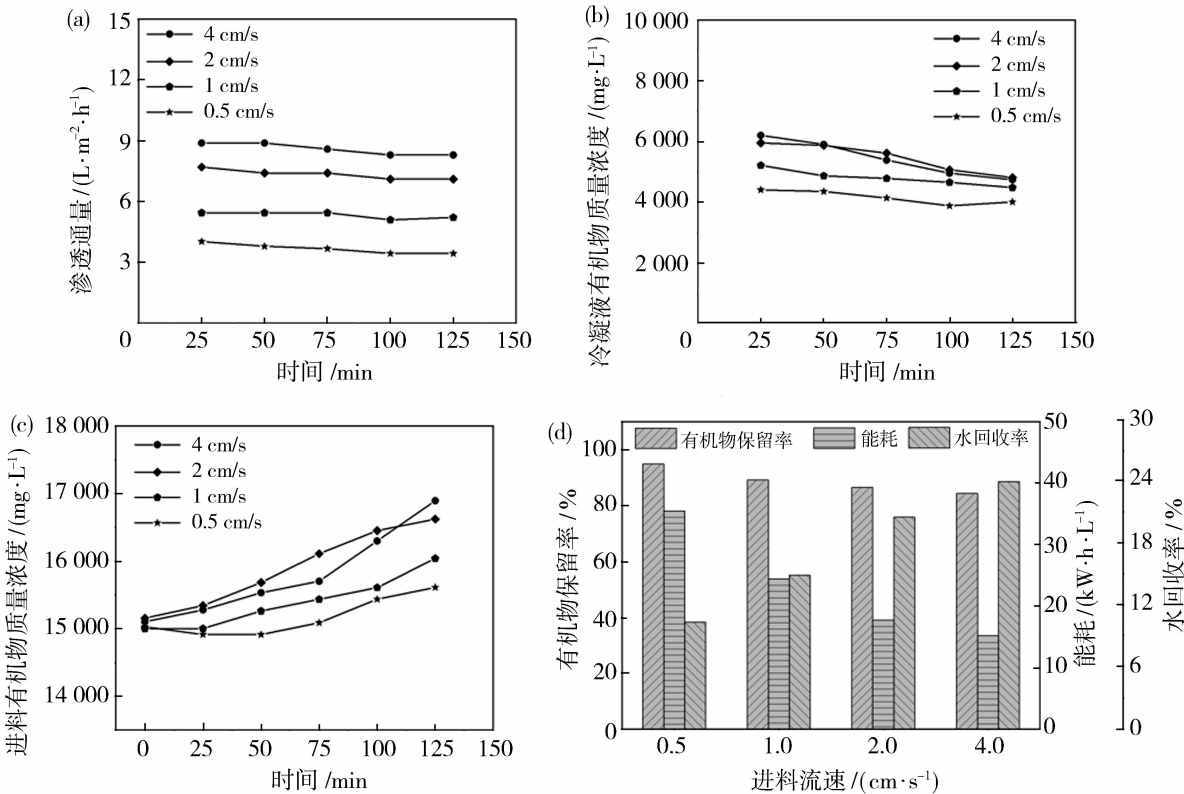


图 5 进料流速对通量(a)、冷凝液有机物含量(b)、浓缩液有机物含量(c)、有机物保留率、能耗和水回收率(d)的影响
Fig. 5 The effects of feed velocity on permeation flux (a), organic matter content of condensate (b), organic matter content of concentrated liquid (c), organic matter retention, energy consumption and water recovery (d)

2.5 膜污染研究

2.5.1 实验前后膜面接触角分析

膜表面的接触角(润湿性)是一种界面特性^[30],由固体基材和水的表面张力决定,在空气、液体和固体相遇的界面处测量,对于表面接触角测量采用 Young 方程拟合.

如表 2 所示,两种蒸馏膜均呈现良好的疏水性,初始的疏水疏油膜接触角为 131.5°,而疏水膜的接触角为 122.9°,这是因为疏水疏油膜相较疏水膜具有更低的表面活化能,呈现出更高的疏水性^[22]. 如表 2 所示,在 40 kPa、70℃、2 cm/s 的条件下,疏水膜和疏水疏油膜的接触角均有所下降,这是因为烟

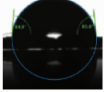

草纯露中化合物种类复杂,其中存在的一些表面活性剂会附着在膜表面,减小液体与蒸馏膜表面之间的接触角^[31],从而导致润湿.

在 70 kPa、70℃、2 cm/s 的条件下疏水疏油膜的接触角为 69°,而在 40 kPa、70℃、2 cm/s 的条件下的疏水疏油膜的接触角为 84.3°,在 40 kPa、50℃、2 cm/s 的条件下的疏水疏油膜的接触角为 99.6°. 这是因为温度、压力下降,膜两侧的绝对蒸汽压差下降,降低了膜的渗透通量并且削弱了极化现象,减少了膜表面的污染和润湿^[30-31].

在 40 kPa、60℃、4 cm/s 条件下的疏水疏油膜接触角为 105.1°,在 40 kPa、60℃、0.5 cm/s 条件

下的疏水疏油膜接触角为 96.3°. 这是因为较高的进料流速减少了膜污染和温度极化,较大的纵向剪切力减少了烟草纯露中表面活性物质在膜表面的积累^[32].

表 2 不同实验下膜面接触角测试结果
Table 2 Test results of membrane contact angle under different experiments

膜种类	渗透侧真空度/kPa	进料液温度/℃	进料液流速/(cm·s ⁻¹)	接触角/(°)	图示
疏水疏油膜	—	—	—	131.5	
疏水膜	—	—	—	122.9°	
疏水疏油膜	40	70	2	84.3°	
疏水膜	40	70	2	71.7°	
疏水疏油膜	70	70	2	69°	
疏水疏油膜	40	50	2	99.6°	
疏水疏油膜	40	60	4	105.1°	
疏水疏油膜	40	60	0.5	96.3°	

2.5.2 实验前后膜形貌分析

真空膜蒸馏是一个复杂的传质和传热过程,渗透侧真空度、进料温度和流速都会影响膜污染,而膜污染会使传热阻力增大,导致蒸发面积减少降低通量^[33]. 通过对实验前后的膜进行电镜扫描分析膜污染情况,其结果如图 6 所示.

如图 6(a₁)、6(g₁)所示,PTFE 材质的疏水膜和疏水疏油膜中间由静电纺丝纤维交织形成的多孔结构清晰可见. 图 6(b₁)、6(h₁)为疏水疏油膜和疏水膜实验后的扫描电镜图,实验过后两种膜表面都零星出现一层污染层,在图 6(b₁)左下角出现了些许污染堵塞膜孔,导致在实验后期疏水疏油膜通量下降^[33]. 如图 6(a₂)、6(g₂)所示,PTFE 材质的疏水疏油膜的表面功能层略厚于疏水膜,这导致 PTFE 疏水疏油膜的通量要比疏水膜低. 从图 6(b₂)、6(h₂)中可以看到,两种膜断面均出现零星颗粒污染物附

着,污染物主要出现在无纺布的支撑层中.

如图 6(b₁)、6(c₁)所示,由于膜两侧驱动力的增加,导致在高压条件下更多的固体悬浮物沉积在膜表面形成沉积层,并加速膜的润湿,降低了有机物保留率^[34]. 如图 6(b₂)、6(c₂)所示,随着渗透侧真空度的增加,膜断面出现了大量的颗粒物污染,这是由于膜面污染层润湿所导致.

如图 6(b₁)、6(d₁)所示,由于温度对进料侧饱和蒸汽压的大幅影响,降低了膜两侧的绝对压差,减少了膜表面的污染沉积. 同时,浓度也是影响膜污染的原因之一,由于较低温度条件下进料液有机物浓度较低,减少了膜污染的出现^[24]. 如图 6(b₂)、6(d₂)所示,当进料侧温度升高时,靠近冷凝侧存在零星污染,随着进料侧温度的降低,出现在支撑层的污染明显减少.

如图 6(e₁)、6(f₁)所示,在 4 cm/s 条件下实验后的膜表面仅出现少许腐蚀污染,并未出现较大的悬浮颗粒物沉积,而在 0.5 cm/s 条件下实验后的膜表面出现了较大的悬浮颗粒物沉积,而并未发现明显的腐蚀污染.原因之一是在高流速下,较强纵向剪切力对较大的悬浮颗粒物影响明显^[32],不利于其在

膜表面沉积,而对体积较小的有机物形成的腐蚀污染的影响较弱.此外,渗透通量越高,有机物跨膜越多,越容易导致这种腐蚀污染的形成.如图 6(e₂)、6(f₂)所示,流速降低导致膜内部污染加重,污染层附着在无纺布支撑层并堵塞膜孔,进一步导致通量下降.

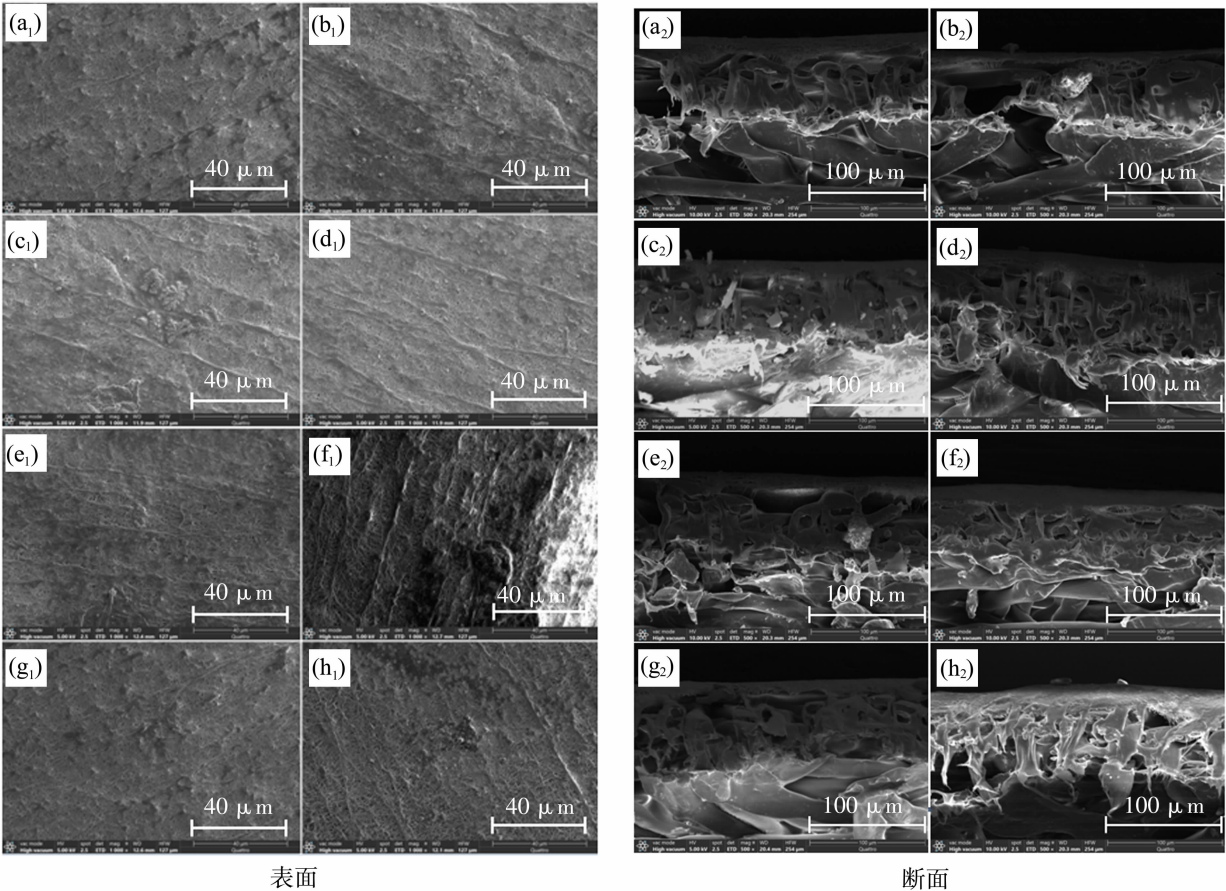


图 6 实验前后膜表面及断面扫描电镜图
Fig. 6 SEM images of surface and cross-section of membranes before and after the experiments

3 结论

探讨了真空膜蒸馏不同工艺条件对烟草纯露浓缩效果的影响,验证了真空膜蒸馏浓缩烟草纯露的有效性和可行性.疏水疏油膜由于其优异的疏水性表现出更高的有机物保留率,进料液温度增加会显著增加渗透通量,降低保留率和能耗;进料液流速增加会显著增加渗透通量、保留率和能耗,并且在一定程度上减弱极化现象,减少膜污染的形成,增

加真空膜蒸馏过程中的传质传热效率.在实际工业生产中,针对蒸馏膜表面出现的膜污染进行清洗,恢复膜的疏水性,可以保证连续操作的稳定性和浓缩效率.

当选用疏水疏油膜时,在进料液温度 60 °C、渗透侧真空度 40 kPa、流速为 0.5 cm/s 的条件下有机物的保留率可以达到 94.8%.因此,真空膜蒸馏浓缩烟草纯露展现出良好的应用潜力,为烟草纯露的浓缩提出了一种新方案,并对其他植物提取液或纯

露的膜法浓缩提供了借鉴意义。

参考文献:

- [1] 周颖, 洪传冰, 陈姚宇, 等. 玫瑰纯露的提取及其在天然护肤产品中的应用[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(22): 134—137.
- [2] 张洪广, 张晓斌, 胡勇, 等. 玫瑰纯露的制备及其在化妆品中的应用[J]. 广东化工, 2020, 47(18): 103—104.
- [3] 杜飞. 烟用酒香型发酵料液研制[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [4] 戴亚, 张艳芳, 苏国岁, 等. 一种同时制备烟草精油和烟草露的方法[P]. 中国: CN202011313173.0. 2022-03-11.
- [5] Criscuoli A. Osmotic distillation and vacuum membrane distillation for juice concentration: A comparison in terms of energy consumption at the permeate side[J]. Sep Purif Technol, 2021, 278: 119593.
- [6] Drioli E, Ali A, Macedonio F. Membrane distillation: Recent developments and perspectives[J]. Desalination, 2015, 356: 56—84.
- [7] Zhang Z, Atia A A, Andrés-Mañas J A, *et al.* Comparative techno-economic assessment of osmotically-assisted reverse osmosis and batch-operated vacuum-air-gap membrane distillation for high-salinity water desalination[J]. Desalination, 2022, 532: 115737.
- [8] Anshul Y, Pawan K L, Vinod K S. Membrane distillation crystallization technology for zero liquid discharge and resource recovery: Opportunities, challenges and futuristic perspectives[J]. Sci Total Environ, 2022, 806: 150692.
- [9] Schwantes R, Chavan K, Winter D, *et al.* Techno-economic comparison of membrane distillation and MVC in a zero liquid discharge application[J]. Desalination, 2018, 428: 50—68.
- [10] Ren M, Ning P, Xu J, *et al.* Concentration and treatment of ceric ammonium nitrate wastewater by integrated electrodialysis-vacuum membrane distillation process[J]. Chem Eng J, 2018, 351: 721—731.
- [11] Nthunya N L, Chong C K, Lai O S, *et al.* Progress in membrane distillation processes for dye wastewater treatment: A review[J]. Chemosphere, 2024, 360, 142347.
- [12] 刘燕, 夏天天, 孙位仕, 等. 电渗析-真空膜蒸馏集成膜法回收离子液体[J]. 化工学报, 2018, 69(9): 3905—3913.
- [13] Suwaileh W, Johnson D, Jones D, *et al.* An integrated fertilizer driven forward osmosis- renewables powered membrane distillation system for brackish water desalination: A combined experimental and theoretical approach[J]. Desalination, 2019, 471: 114126.
- [14] Al-Asheh S, Banat F, Qtaishat M, *et al.* Concentration of sucrose solutions via vacuum membrane distillation[J]. Desalination, 2005, 195(1): 60—68.
- [15] Nene S, Kaur S, Sumod K, *et al.* Membrane distillation for the concentration of raw cane-sugar syrup and membrane clarified sugarcane juice[J]. Desalination, 2002, 147(1/2/3): 157—160.
- [16] Áron K, Erika Békássy M E, Vatai G. Production of black-currant juice concentrate by using membrane distillation[J]. Desalination, 2008, 241(1): 309—314.
- [17] Criscuoli A, Drioli E. Vacuum membrane distillation for the treatment of coffee products[J]. Sep Purif Technol, 2019, 209: 990—996.
- [18] Abu-Zeid E A M, Zhang Y, Dong H, *et al.* A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique[J]. Desalination, 2015, 356: 1—14.
- [19] 杨毅, 赵睿, 郑振泽, 等. 城市污水处理厂二级出水 DOM 的荧光组分、分子特性和来源[J]. 环境工程, 2024, 42(12): 66—72.
- [20] Zhang Y, Ji Z, Yan H, *et al.* Water recovery from cleaning wastewater of traditional Chinese medicine processing via vacuum membrane distillation: parameters optimization and membrane fouling investigation[J]. Chem Eng Res Des, 2022, 188: 555—563.
- [21] Han M, Dong T, Hou D, *et al.* Carbon nanotube based Janus composite membrane of oil fouling resistance for direct contact membrane distillation[J]. J Membr Sci, 2020, 607: 118078.
- [22] Leow L T H, Haan Y T, Ebrahim M, *et al.* Development and optimization of low surface free energy of rGO-PVDF mixed matrix membrane for membrane distillation[J]. Sep Purif Technol, 2023, 305: 122428.
- [23] Goh S, Zhang Q, Zhang J, *et al.* Impact of a biofouling layer on the vapor pressure driving force and performance of a membrane distillation process[J]. J Membr Sci, 2013, 438: 140—152.
- [24] Warsinger M D, Swaminathan J, Guillen B E, *et al.* Scaling and fouling in membrane distillation for desalination applications: A review[J]. Desalination, 2015, 356: 294—313.
- [25] Yuan Z, Yu Y, Sui X, *et al.* Carbon composite membranes for thermal-driven membrane processes[J].

- Carbon, 2021, 179: 600—626.
- [26] 张岩松, 赵 艳, 纪 政, 等. 真空膜蒸馏处理中药姜黄清洗废水工艺研究[J]. 膜科学与技术, 2023, 43(1): 133—138.
- [27] Kew-Ho L, Choongkyun Y, Jiwon K. Separation recovery of dilute organics from aqueous solution by membrane distillation and selective condensation hybrid process[J]. Sep Purif Technol, 2022, 300: 121813.
- [28] Zhu Z G, Wang W, Zhang Q Y, *et al.* Insight into the feed/permeate flow velocity on the trade-off of water flux and scaling resistance of superhydrophobic and welding-pore fibrous membrane in membrane distillation[J]. J Membr Sci, 2021, 620: 118883.
- [29] Song L, Huang Q, Huang Y, *et al.* An electro-thermal braid-reinforced PVDF hollow fiber membrane for vacuum membrane distillation[J]. J Membr Sci, 2019, 591: 117359.
- [30] Lalia S B, Janajreh I, Hashaikeh R. A facile approach to fabricate superhydrophobic membranes with low contact angle hysteresis[J]. J Membr Sci, 2017, 539: 144—151.
- [31] Dumée F L, Gray S, Duke M, *et al.* The role of membrane surface energy on direct contact membrane distillation performance[J]. Desalination, 2013, 323: 22—30.
- [32] Zuo G, Wang R. Novel membrane surface modification to enhance anti-oil fouling property for membrane distillation application[J]. J Membr Sci, 2013, 447: 26—35.
- [33] Lu Z, Yan Z, Chang H, *et al.* New insights into anti-fouling property and interfacial mechanism in photo-Fenton membrane distillation[J]. Chem Eng J, 2024, 492: 151981.
- [34] Marcello S. Long-term performance of membrane distillation process[J]. J Membr Sci, 2005, 265(1/2): 153—159.

Application of vacuum membrane distillation technology in concentration of tobacco pure dew

ZHANG Zhao¹, LI Yanfang¹, ZHANG Cunyong¹, TIAN Zhihao²,
LIU Wenlong², ZHANG Bing³, TIAN Zhenfeng¹, HUANG Lan¹,
LI Chuanrun^{2,4}, YAN Haiyang^{2,4}, GE Shaolin¹

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Aerosol Analysis, Modulation and Biological Effect, Hefei 231200, China; 2. College of pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China; 3. Zhejiang Province Tobacco Quality Supervision and Testing Station, Hangzhou 310001, China; 4. Pharmaceutical Engineering Technology Research Center, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China)

Abstract: The tobacco pure dew obtained from steam distillation of the extract of reconstituted tobacco leaves was concentrated by vacuum membrane distillation. The influence of different operating conditions on the concentration of tobacco pure dew were investigated, in which the mass and heat transfer were discussed, and the surface contamination was characterized and analyzed. Results show that the membrane material, the vacuum degree on the permeating side, the temperature of the feed liquid, and the flow rate of the feed have obvious effects on the permeation flux and the retention rate, and the hydrophobic and oleophobic membrane based on PTFE has higher retention rate. The maximum permeable flux can reach 12.74 L/(m² · h) at 70 °C and 70 kPa, and the highest organic matter retention rate can reach 94.8% at the velocity of 0.5 cm/s. Therefore, the vacuum membrane distillation exhibits an excellent technical reliability and economic competitiveness in the concentration of tobacco pure dew.

Key words: vacuum membrane distillation; tobacco pure dew; reconstituted tobacco leaves; concentration