

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190172

基于膜蒸馏的热敏料液常压低温浓缩装置性能模拟

雷文芳, 谢继红, 陈东, 金程
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 以热敏料液的常压、低温、低能耗浓缩分离为目标,设计了一种热泵-气隙式膜蒸馏集成装置,介绍了其工作过程和特点.给出了装置中基本单元的特性方程,对装置的造水比和产水速率等性能指标随中空纤维疏水膜长度、中空纤维疏水膜数量、膜平均孔径、料液质量流量、料液进膜蒸馏组件温度、吸热液进膜蒸馏组件温度等关键参数的变化规律进行计算模拟,可为热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的优化设计和调控提供参考.

关键词: 热敏料液; 热泵; 气隙式膜蒸馏; 模拟分析; 造水比; 产水速率

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2020)06-0025-04

Performance Simulation of the Concentration Device for Heat Sensitive Liquid at Atmospheric Pressure and Low Temperature Based on Membrane Distillation

LEI Wenfang, XIE Jihong, CHEN Dong, JIN Cheng

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A heat pump-air gap membrane distillation integrated device was designed for low energy consumption concentration and separation of the heat sensitive liquid at atmospheric pressure and low temperature. The working process, the characteristics of the device and the characteristic equations of basic units in the device were introduced in this paper. The device performance indexes such as gained output ratio and water production rate, which could change with the key parameters, including the length and number of hollow fiber hydrophobic membrane, membrane pore diameter, flow rate of feed liquid, as well as the temperature of feed and endothermic liquid into the membrane distillation module, were calculated and simulated. The results could provide some reference for the optimization and regulation of the device.

Key words: heat sensitive liquid; heat pump; air gap membrane distillation; simulation analysis; gained water output ratio; water production rate

食品、生物、化工、制药等领域有多种热敏料液需要浓缩处理,如茶液、药液、果蔬汁、牛奶和化学品溶液等.常用的热敏料液低温浓缩方法有真空蒸发浓缩、冷冻浓缩和膜蒸馏浓缩等.其中:真空蒸发浓缩需要抽真空装置,整个装置的气密性、承压性要求高,投资较大,抽真空能耗也较高;冷冻浓缩在料液浓度较高时所结冰中的溶质夹带较严重;膜蒸馏可以实现常压下低温浓缩^[1],对料液黏度、浓度、起泡性等的适用性较好,具有较好的综合优势.

膜蒸馏是利用疏水微孔膜允许气体通过而液体被截留的特性,热料液中的易挥发组分(如水分)在膜表面汽化后穿过膜孔,而其他组分被拦截,从而实现料液的浓缩^[2-3].膜蒸馏有直接接触式、气隙式、真空式、气扫式和吸收式等类型^[4-5],其中气隙式膜蒸馏在低温下处理热敏料液时,热效率高、结构简单,易于产业化应用^[6].

气隙式膜蒸馏工作时,料液侧需要热能加热料液,使易挥发组分汽化,气隙侧需要冷能对跨膜蒸气

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576004)

作者简介: 雷文芳(1993—),女,山西太原人,硕士研究生;通信作者: 谢继红,副教授, xiejihong@tust.edu.cn

进行冷凝;热泵可消耗少量电能同时制取多倍热能和冷能^[7],基于气隙式膜蒸馏和热泵两种技术的优势,设计了一种热泵-气隙式膜蒸馏集成装置,可实现热敏料液的常压、低温、低能耗浓缩.

1 热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的工作原理

热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的流程如图 1 所示. 热泵-气隙式膜蒸馏集成装置包括 3 个循环单元: 热泵工质循环单元、料液循环单元和吸热液循环单元. 热泵工质循环单元由压缩机、加热器、膨胀阀和冷却器构成,回路中充入热泵工质;料液循环单元由料液罐、料液泵、加热器、调节阀、膜蒸馏组件构成,料液在回路中循环;吸热液循环单元由吸热液罐、吸热液泵、调节阀、膜蒸馏组件、辅冷器和冷却器构成,吸热液在回路中循环.

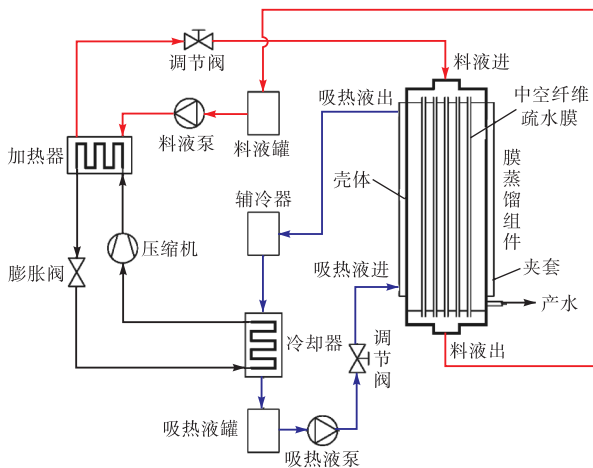


图 1 热泵-气隙式膜蒸馏集成装置流程图

Fig. 1 Flow chart of the heat pump-air gap membrane distillation integrated device

热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的工作过程为: 热泵工质在加热器中冷凝放热, 加热料液, 热的料液进入膜蒸馏组件的中空纤维疏水膜内, 料液中易挥发组分(如水分)在膜表面汽化, 穿过膜孔到达膜外的气隙侧(即中空纤维疏水膜与壳体之间的空气); 吸热液进入膜蒸馏组件给壳体降温, 将气隙侧跨膜蒸气在壳体内侧冷凝, 并吸收蒸气释放的冷凝潜热, 吸热液流出膜蒸馏组件后进入辅冷器和冷却器, 并在冷却器中将热能传递给热泵工质; 热泵工质吸收的热能经热泵压缩机升压升温后再通过加热器给料液提供热能; 跨膜蒸气冷凝产生的冷凝水通过膜蒸馏组件右下方出口排出.

热泵-气隙式膜蒸馏集成装置中, 料液在膜表面的汽化是在常压和低于沸点的低温下进行的, 并通过热泵回收跨膜蒸气冷凝放出的热能来加热料液, 使热敏料液浓缩过程具有常压、低温、低能耗等特点.

2 热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的特性方程

膜蒸馏组件热负荷方程为

$$Q_m = q_m c_f (T_{fi} - T_{fo}) \quad (1)$$

式中: Q_m 为膜蒸馏组件热负荷, W; q_m 为膜蒸馏组件中料液质量流量, g/s; c_f 为料液比热容, kJ/(kg·K); T_{fi} 为进膜蒸馏组件时料液的温度, K; T_{fo} 为出膜蒸馏组件时料液的温度, K.

膜蒸馏组件的料液侧膜表面温度方程^[8]为

$$T_{fh} = T_{fm} = \frac{Q_m}{\alpha_{mi} A_{mi}} \quad (2)$$

式中: T_{fh} 为料液侧膜表面温度, K; T_{fm} 为料液平均温度, K; α_{mi} 为料液在中空纤维疏水膜内对流换热系数, W/(m²·K); A_{mi} 为膜蒸馏组件内中空纤维疏水膜内表面积, m².

膜蒸馏组件的壳体表面温度方程为

$$T_{sc} = T_{ec} = \frac{Q_m}{\alpha_{ec} A_s} \quad (3)$$

式中: T_{sc} 为壳体表面温度, K; T_{ec} 为吸热液平均温度, K; α_{ec} 为吸热液对流换热系数, W/(m²·K); A_s 为壳体表面积, m².

膜蒸馏组件的膜通量方程^[9-10]为

$$J_m = \left(\frac{3.6}{R_m + R_k + R_{ag}} \right) (P_{fh} - P_{sc}) \quad (4)$$

式中: J_m 为膜通量, kg/(m²·h); R_m 为跨膜分子扩散质阻, (m²·s·Pa)/g; R_k 为跨膜努森扩散质阻, (m²·s·Pa)/g; R_{ag} 为气隙质阻, (m²·s·Pa)/g; P_{fh} 为料液侧膜表面蒸气压力, Pa; P_{sc} 为壳体表面蒸气压力, Pa.

膜蒸馏组件的有效热负荷方程为

$$Q_{eff} = \frac{J_m r_w A_{mi}}{3.6} \quad (5)$$

式中: Q_{eff} 为有效热负荷, W; r_w 为跨膜蒸气的汽化潜热, kJ/kg.

膜蒸馏组件的无效热负荷方程为

$$Q_{cet} = \frac{T_{fh} - T_{sc}}{\frac{\delta_{ag}}{\lambda_a A_s} + \frac{\delta_m}{\lambda_m A_{mo}}} \quad (6)$$

式中: Q_{lost} 为无效热负荷, W; A_{mo} 为中空纤维疏水膜

外表面积, m^2 ; λ_m 为膜当量热导率, $W/(m \cdot K)$; λ_a 为气隙内空气热导率, $W/(m \cdot K)$; δ_{ag} 为气隙宽度, m ; δ_m 为膜壁厚, m .

膜蒸馏组件的热效率方程为

$$\eta_m = \frac{Q_{eff}}{Q_{lost} + Q_{eff}} \quad (7)$$

式中: η_m 为膜蒸馏组件热效率, 无因次.

热泵制热量方程为

$$Q_h = q_m c_f (T_{foh} - T_{fih}) \quad (8)$$

式中: Q_h 为热泵制热量, W ; T_{foh} 为出热泵时料液的温度, K ; T_{fih} 为进热泵时料液的温度, K .

热泵制热系数方程^[11]为

$$COP = \frac{C_{hp} T_{rc}}{T_{rc} - T_{re}} \quad (9)$$

式中: COP 为热泵制热系数, 无因次; C_{hp} 为热力学完善度系数, 无因次; T_{rc} 为热泵工质冷凝温度, K ; T_{re} 为热泵工质蒸发温度, K .

热泵压缩机功率方程为

$$P_{com} = \frac{Q_h}{COP} \quad (10)$$

式中: P_{com} 为热泵压缩机功率, W .

装置的产水速率方程为

$$M_w = J_w A_{mi} \quad (11)$$

式中: M_w 为产水速率, kg/h .

装置造水比方程(造水比近似为装置相对于料液单效蒸发的节能倍率)^[12]为

$$GOR = \frac{M_w r_w}{3.6 P_{com}} \quad (12)$$

式中: GOR 为装置造水比, 无因次.

3 热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的性能模拟分析

基于上述方程, 利用 Visual Basic 编制了热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的性能模拟软件, 对热泵-气隙式膜蒸馏集成装置的性能指标随关键参数的变化规律进行了计算模拟, 计算基准参数如下: 料液为 11°Brix 的苹果汁, 中空纤维疏水膜材料为聚丙烯 (PP), 其内直径为 1.00 mm, 外直径为 1.80 mm, 膜平均孔径为 0.2 μm , 膜孔隙率为 0.7, 长度为 1000 mm, 数量为 100 根, 膜蒸馏组件壳体材料为聚氯乙烯 (PVC), 内直径为 50.0 mm, 夹套当量直径为 10 mm, 料液质量流量和吸热液质量流量均为 10 g/s, 进膜蒸馏组件时料液的温度为 60 $^{\circ}C$, 进膜蒸馏组件时吸热

液的温度为 40 $^{\circ}C$.

在其他参数取基准参数时, 中空纤维疏水膜长度对装置性能的影响如图 2 所示.

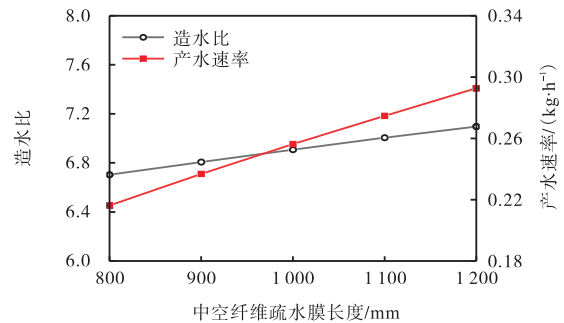


图 2 中空纤维疏水膜长度对装置性能的影响

Fig. 2 Effect of hollow fiber length on device performance

由图 2 可知: 随着中空纤维疏水膜长度增加, 装置产水速率和造水比均增大. 这是由于中空纤维疏水膜长度增加时, 膜面积增加, 膜通量基本保持不变, 所以产水速率和热负荷增大, 则料液进出膜蒸馏组件的温降增大, 使膜两侧温差减小, 从而使热泵工质冷凝和蒸发的温差减小, 热泵制热系数增加, 造水比增大.

在其他参数取基准参数时, 中空纤维疏水膜数量对装置性能的影响如图 3 所示.

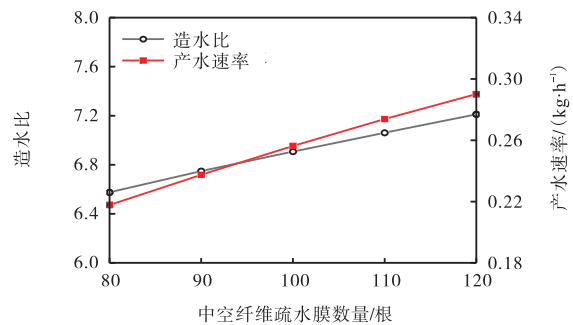


图 3 中空纤维疏水膜数量对装置性能的影响

Fig. 3 Effect of the number of hollow fibers on device performance

由图 3 可知: 中空纤维疏水膜数量增加时, 装置造水比和产水速率均增大. 这是由于当中空纤维疏水膜数量增加时, 膜面积增加, 气隙减少, 装置产水速率和热负荷增大, 则料液进出膜蒸馏组件的温降增大, 使膜两侧温差降低, 从而使无效热负荷减少, 所以热效率增加, 造水比增大.

在其他参数取基准参数时, 膜平均孔径对装置性能的影响如图 4 所示. 由图 4 可知: 随着膜平均孔径增大, 装置产水速率和造水比均增大, 但增大不明显. 这是由于膜平均孔径增加时, 水蒸气更容易穿过膜

壁,膜通量增大,使有效热负荷增加,从而使膜蒸馏组件热效率增大,所以产水速率和造水比均增大。

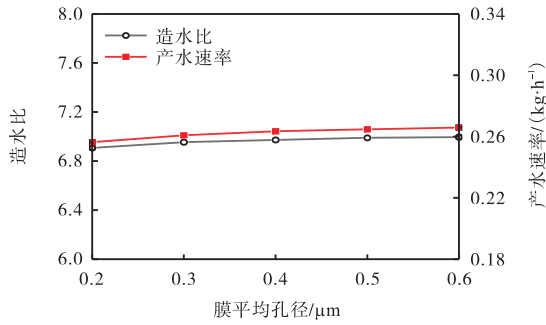


图4 膜平均孔径对装置性能的影响

Fig. 4 Effect of membrane pore diameter on device performance

在其他参数取基准参数时,料液质量流量(吸热液质量流量和料液质量流量保持相同)对装置性能的影响如图5所示。

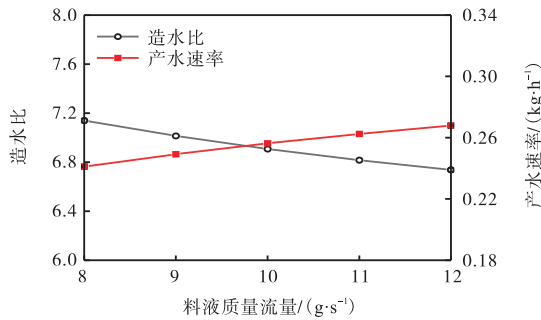


图5 料液质量流量对装置性能的影响

Fig. 5 Effect of feed liquid flow rate on device performance

由图5可知:随着料液质量流量增大,装置产水速率增大,造水比减小。这是由于料液质量流量增加时,料液换热系数和吸热液换热系数增大,使膜两侧温差增大,膜通量增加,从而产水速率增大;同时气隙大小不变,所以热效率基本不变,而膜两侧温差增大使热泵工质冷凝和蒸发的温差也增加,导致热泵制热系数减小,造水比减小。

在其他参数取基准参数的条件下,进膜蒸馏组件时料液的温度对装置性能的影响如图6所示。由图6可知:随着进膜蒸馏组件时料液的温度升高,装置产水速率增大,造水比减小。这是由于进膜蒸馏组件时料液的温度升高,膜两侧温差增加使膜通量增加,从而产水速率增加;同时膜两侧温差增加使热泵工质冷凝和蒸发的温差增大,热泵制热系数减小,而膜热侧温度升高使有效热负荷增加,所以热效率增加,但热效率增加幅度不大,二者叠加后造水比减小。

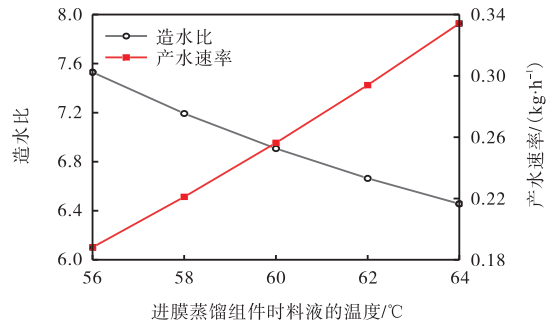


图6 进膜蒸馏组件时料液的温度对装置性能的影响

Fig. 6 Effect of feed liquid temperature on device performance

在其他参数取基准参数的条件下,进膜蒸馏组件时吸热液的温度对装置性能的影响如图7所示。

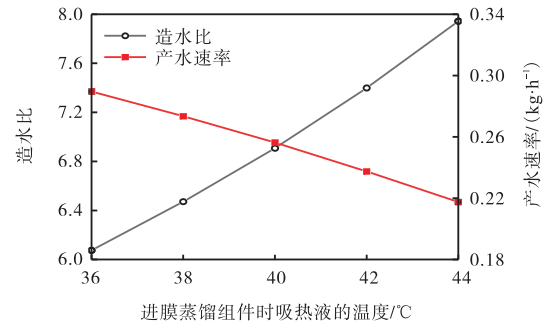


图7 进膜蒸馏组件时吸热液的温度对装置性能的影响

Fig. 7 Effect of endothermic liquid temperature on device performance

由图7可知:随着进膜蒸馏组件时吸热液的温度升高,装置产水速率减小,造水比增大。这是由于进膜蒸馏组件时吸热液的温度升高,膜两侧温差减小,导致膜通量减小,从而产水速率减小;同时膜两侧温差减小使热泵工质冷凝和蒸发的温差减小,热泵制热系数增大,而膜两侧温差减小使无效热负荷减小,热效率增大,二者综合后造水比增大。

4 结 语

所设计的热泵-气隙式膜蒸馏集成装置可使热敏料液实现常压、低温、低能耗浓缩,其性能指标随关键参数的变化规律如下:增加中空纤维疏水膜长度、中空纤维疏水膜数量、膜平均孔径时,装置的产水速率和造水比均随之上升;增加料液质量流量、进膜蒸馏组件时料液的温度,装置产水速率上升,但造水比下降;增加进膜蒸馏组件时吸热液的温度,装置产水速率下降,但造水比上升。

(下转第49页)

操作性。

参考文献:

- [1] 赵玉灵. 近30年来我国海岸线遥感调查与演变分析[J]. 国土资源遥感, 2010(增刊): 174-177.
- [2] 姚晓静, 高义, 杜云艳, 等. 基于遥感技术的近30a海南岛海岸线时空变化[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1): 114-125.
- [3] 徐进勇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 2000—2012年中国北方海岸线时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 651-660.
- [4] 王娟, 卜志国, 崔先国, 等. 遥感技术在海岸带监测中的应用: 以天津滨海新区为例[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 20-25.
- [5] 袁敏杰, 李伟芳, 江汪奇, 等. 基于遥感和GIS的舟山岛岸线资源时空变迁及其利用演进研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(3): 335-344.
- [6] 李亚宁, 王倩, 郭佩芳, 等. 近20a来渤海岸线演替及其开发利用策略[J]. 海洋湖沼通报, 2015(3): 32-38.
- [7] 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 2010—2015年环渤海海岸线时空变迁监测与分析[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 128-138.
- [8] 姜义, 李建芬, 康慧, 等. 渤海湾西岸近百年来海岸线变迁遥感分析[J]. 国土资源遥感, 2003, 58(4): 54-58.
- [9] 李建国, 韩春花, 康慧, 等. 滨海新区海岸线时空变化特征及成因分析[J]. 地质调查与研究, 2010, 33(1): 63-70.
- [10] 杨艳丽, 孙艳玲, 杜晋苗. 2001—2013年天津滨海新区海岸带时空变化特征[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2016, 36(5): 46-50.
- [11] 叶小敏, 丁静, 徐莹, 等. 渤海湾近30年海岸线变迁与分析[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(2): 56-62.
- [12] 孙百顺, 左书华, 谢华亮, 等. 近40年来渤海湾岸线变化及影响分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2017(4): 139-148.
- [13] 孙晓宇, 吕婷婷, 高义, 等. 2000—2010年渤海湾岸线变迁及驱动力分析[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 413-419.
- [14] 孙伟富, 马毅, 张杰, 等. 不同类型海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究[J]. 测绘通报, 2011(3): 41-44.

责任编辑: 周建军

(上接第28页)

上述关键参数中, 中空纤维疏水膜长度、中空纤维疏水膜数量、进膜蒸馏组件时料液的温度、进膜蒸馏组件时吸热液的温度对装置造水比和产水速率的影响显著, 在该装置的设计和调控中, 可根据目标要求参照上述规律进行优选; 而膜平均孔径和料液质量流量对装置的性能指标影响不明显, 因此制作膜蒸馏组件时可选择较小的膜平均孔径, 可延缓膜亲水化的速度和延长膜的使用周期, 并且可采用相对小的料液质量流量, 从而减少泵的能耗。

参考文献:

- [1] 郭智, 张新妙, 章晨林, 等. 膜蒸馏过程强化及优化技术研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(4): 981-987.
- [2] 申龙, 高瑞昶. 膜蒸馏技术最新研究应用进展[J]. 化工进展, 2014, 33(2): 289-297.
- [3] 刘羊九, 王云山, 韩吉田, 等. 膜蒸馏技术研究及应用进展[J]. 化工进展, 2018, 37(10): 3726-3736.
- [4] Alkudhiri A, Darwish N, Hilal N. Membrane distillation: A comprehensive review[J]. Desalination, 2012, 287: 2-18.
- [5] Gryta M. Osmotic MD and other membrane distillation variants[J]. Journal of Membrane Science, 2005, 246(2): 145-156.
- [6] 郭智, 张新妙, 栾金义, 等. 气隙式膜蒸馏技术研究进展[J]. 现代化工, 2017, 37(4): 16-19.
- [7] Chua K J, Chou S K, Yang W M. Advances in heat pump systems: A review[J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3611-3624.
- [8] Edwie F, Chung T S. Development of hollow fiber membranes for water and salt recovery from highly concentrated brine via direct contact membrane distillation and crystallization[J]. Journal of Membrane Science, 2012, 421/422: 111-123.
- [9] Guan G, Yang X, Wang R, et al. Evaluation of hollow fiber-based direct contact and vacuum membrane distillation systems using aspen process simulation[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 464(16): 127-139.
- [10] 贾晓敏, 陈东, 谢继红, 等. 典型膜蒸馏技术的性能及发展分析[J]. 化工装备技术, 2016, 37(2): 19-23.
- [11] 马一太, 凌泓. 制冷与热泵产品热力学完善度的原理与实例[J]. 流体机械, 2011, 39(3): 71-74.
- [12] Swaminathan J, Chung H W, Warsinger D M, et al. Energy efficiency of permeate gap and novel conductive gap membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 502: 171-178.

责任编辑: 周建军