文章编号：1672-9897(2026)04-0088-09 doi：10.11729/syltlx20250122

基于导流网优化技术提高膜蒸馏组件内微流动与传热传质效率

徐佳琦，胡箫*，黎俊杰，符荣泽，朱祖超

浙江理工大学 全省复杂流动与流体工程装备重点实验室，杭州 310018

摘要：海水淡化膜组件内部存在多种类型的微米尺度流动通道，例如导流网丝之间的缝隙、导流网与膜之间的间隙等，这些复杂通道内的流动与传热传质特性对膜组件的产水性能具有重要影响。本文基于导流网优化技术，探究了导流网结构对膜蒸馏海水淡化组件内微流动传热传质效率的提升作用。通过自主搭建的直接接触式膜蒸馏实验平台，系统地分析了导流网结构、进料温度、NaCl 质量分数及流动方式等关键参数对膜蒸馏产水性能的影响。实验结果表明，进料温度的升高能显著提高产水量，而导流网的引入有效改善了膜表面的流场分布，缓解了浓差极化与温差极化现象。优化设计的导流网 2 在高温高盐（如 10.0%NaCl）工况下仍可使产水量较无导流网结构提升约 30%；在进料温度 60 ℃、NaCl 质量分数 0% 且采用对流方式的条件下，其产水量最高可达 15.38 L/(m^2·h)。对比不同流动方式，发现对流方式下的膜蒸馏产水量优于并流方式，与导流网配合使用可进一步提升系统效率。此外，研究还观察到导流网结构表面在高温下气泡聚集现象显著，其微观粗糙结构为水蒸气成核提供了有利条件，进一步强化了相变传质过程。研究证实，导流网通过流场调控、传质强化与膜支撑等多路径协同作用，显著提升了膜蒸馏过程的性能与稳定性，为高效膜蒸馏海水淡化系统的设计与工程应用提供了实验依据与理论参考。

关键词：海水淡化；膜蒸馏；微流动；导流网；传热传质

中图分类号：TK7；TK2；V211.7 **文献标识码：**A

Enhancing microscale flows and heat/mass transfer efficiency in membrane distillation modules through spacer optimization

Xu Jiaqi, Hu Xiao*, Li Junjie, Fu Rongze, Zhu Zuchao

Zhejiang Key Laboratory of Multiflow and Fluid Machinery, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

Abstract: This study explores how optimized spacer design enhances heat and mass transfer efficiency in microscale flows within membrane distillation seawater desalination modules. Various microscale flow channels exist inside these modules, such as gaps between spacer filaments and spaces between the membranes, influencing the water production performance of the membrane modules significantly. A lab-scale direct contact membrane distillation system is built to assess key parameters including spacer structure, feed temperature, salt concentration, and flow conditions on permeate flux. Higher feed temperature markedly increases water production. Introducing spacers improves flow distribution near the membrane surface, reducing both concentration and temperature polarization. Optimized spacer structures under high-temperature and high-salinity conditions boost permeate flux by about 30% compared to configurations without spacers. Using spacer 2, the maximum water production can reach up to 15.38 L/(m^2·h) under the following conditions: feed temperature of 60 ℃, saline concentration of 0%, and counter-current flow configuration. Counter-current flow outperforms co-current flow,

收稿日期：2025-12-26；**修回日期**：2026-01-25；**录用日期**：2026-02-09

基金项目：国家自然科学基金项目（52476039）；浙江省自然科学基金重点（青稞）项目（LQK26E060002）

* 通信作者 E-mail: huxiao@zstu.edu.cn

引用格式：徐佳琦，胡箫，黎俊杰，等. 基于导流网优化技术提高膜蒸馏组件内微流动与传热传质效率 [J]. 实验流体力学，2026，40(4)：88-96.
Xu Jiaqi, Hu Xiao, Li Junjie, et al. Enhancing microscale flows and heat/mass transfer efficiency in membrane distillation modules through spacer optimization[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(4): 88-96.

with further efficiency gains when combined with optimized spacers. At elevated temperatures, bubble formation on spacer surfaces becomes more pronounced. Microscale roughness provides numerous nucleation sites for vapor, enhancing interfacial phase-change mass transfer. Spacers enhance membrane distillation performance by regulating flow fields, intensifying mass transfer, and providing mechanical support to membranes. These findings offer valuable experimental and theoretical insights for designing efficient membrane distillation systems for seawater desalination.

Keywords: desalination; membrane distillation; microscale flow; spacers; heat and mass transfer

0　引　言

淡水资源短缺已成为制约全球社会经济可持续发展的主要因素。我国淡水资源先天不足，人均水资源占有量仅为 2057 m^3，约为全球平均水平的 1/4，是全球淡水资源最贫乏的国家之一[1-2]。伴随工业化与城镇化的快速推进，水资源供需矛盾持续加剧。据预测，全国用水总量将于 2030 年达到 6.375×10^{11} m^3，至 2050 年仍将维持在 6.047×10^{11} m^3 的高位水平，对经济社会发展构成严峻挑战[3]。目前，我国可利用水资源总量约 8.14×10^{11} m^3，而 2020 年实际用水总量已达 6.7×10^{11} m^3，开发利用率高达 82%，接近资源承载上限。受全球气候变化影响，生态用水被大量挤占，导致河流干涸、湿地退化、滩涂消失及流域生态系统功能严重失衡[4]。在沿海地区，工业化与人口集聚亦显著加大了水资源供需矛盾。在此背景下，利用储量丰富、易于获取的海水资源开展淡化处理，成为弥补淡水资源缺口的重要且可行路径[5]。

当前主流的海水淡化技术包括多级闪蒸（MSF）、多效蒸馏（MED）、反渗透（RO）和电渗析（ED）等传统方法。近年来，膜蒸馏（Membrane Distillation, MD）作为一种融合蒸馏与膜分离优势的新型技术，因其能利用低品位热能、理论截盐率接近 100%，且能在高盐、高质量分数环境下稳定运行，成为海水淡化及高盐废水处理领域颇具潜力的技术[6-8]。然而，受限于渗透通量偏低与能耗偏高等瓶颈，其大规模工程化应用仍然面临挑战。

针对上述问题，国内外学者开展了广泛研究。刘子强等[9] 指出，膜蒸馏在高质量分数、高危害废水处理中潜力巨大，但其规模化推广受制于高热能消耗。王永轩等[10] 通过在膜表面及孔道内同步构建疏水纳米结构，成功开发出超疏水膜，在高盐废水中表现出优异的抗润湿性、稳定的通量与近 100% 的脱盐率。吴胜友等[11] 采用聚二甲基硅氧烷（PDMS）与无氟硅烷偶联剂协同改性聚偏氟乙烯（PVDF）微孔膜，构建了兼具低表面能与微纳凸起结构的超疏水表面，显著缓解了蒸馏膜的结垢与润湿问题，改性后膜通量由 23.8 kg/(m^2·h) 提升至 35.3 kg/(m^2·h)。尽管对膜的改进在实验室条件下已取得显著成果，但受限于当前材料技术瓶颈、操作复杂及成本高等应用难题，仍亟需开发简便、高效且可规模化推广的膜材料改性工艺[12]。吴江波等[13] 在气隙式膜蒸馏流道中引入了半圆柱挡板，该设计可增强流动混合，使产水量与热效率分别提升 8.7% 和 4.8%。Swaidan 等[14] 则利用微观分形结构膜抑制石膏结垢，其中 45°内凹分形图案效果最优，纯水通量提升 35%～37%，并在 16 h 的污染测试中保持了较高的产水率。但上述方法普遍存在难以大规模应用、设备维护困难等问题，因此，对膜组件中的导流网进行优化成为更具工程可行性的途径。综上，通过优化膜组件几何构型以增强料液湍流、提升传热系数，并结合多效集成与过程强化策略实现热量高效回收，是突破膜蒸馏能耗瓶颈的有效路径。

随着微纳技术的高速发展，微尺度下流体的流动、换热及相变行为备受关注，是制约微纳系统能量转换、存储及输运的关键科学问题[15-17]。在膜蒸馏微尺度流动研究方面，现有工作多聚焦于膜组件内的微米级通道[18]。Khatab 等[19] 提出一种新型直接接触膜蒸馏流道构型，通过消除传统设计中的流动死区、强化热对流，使系统性能提升 47%～84%。宋善鹏[20] 研究发现，固–液界面存在由微纳米气泡形成的气膜，降低了剪切力并引发滑移效应，从而产生减阻效果，但由于气膜中空气导热性差，一定程度上抑制了传热。然而，上述研究均未系统探讨导流网在膜蒸馏中的潜在价值。导流网作为关键的湍流促进装

置，具有微米级精细结构，不仅可有效支撑分离膜，还能增强膜表面流动混合、减薄浓度边界层，并构建微纳尺度传质通道，从而显著强化传热传质过程，提高膜蒸馏海水淡化的效率。

在传统的压力驱动膜分离过程（如反渗透和纳滤）中，导流网主要起支撑膜表面、增强湍流、减少浓差极化以及促进传质的作用，其结构参数（如厚度、几何形状等）已被广泛研究，并被证明对系统压降与通量具有显著影响。然而，在膜蒸馏这一以热驱动为主的非压力驱动过程中，导流网不仅影响流体动力学行为，还可能通过改变局部温度分布和蒸汽传质路径，进而影响跨膜通量与热效率。目前，针对导流网在膜蒸馏中作用机制的系统研究较为有限。基于此，本文研究导流网结构对膜蒸馏海水淡化系统产水效率的提升作用。首先，参考商用导流网结构，设计 2 种不同构型的导流网；其次，研究进料温度、导流网结构及 NaCl 质量分数等关键参数对系统产水量的影响，并筛选出最优导流网；然后，研究流动方式对膜蒸馏产水量的影响及导流网在其中发挥的作用；最后，分析导流网及膜通道表面的微尺度气泡分布。该工作可为未来高效海水淡化系统的组件优化与工程应用提供理论依据与实验支撑，并可为提高海水淡化效率、降低能耗提供新思路。

1 实 验

1.1 实验系统

本文设计了一套带有导流网的膜蒸馏海水淡化系统，其结构如图 1 所示。该系统主要由膜蒸馏单元、导流网组件及循环模块构成。加热系统采用恒温水浴锅，冷却装置采用恒温冷却槽。膜池由亚克力材料制成，内部膜通道尺寸为 40 mm × 80 mm × 0.8 mm。实验选用双面疏水聚四氟乙烯（PTFE）膜，其孔径为 0.22 μm，膜厚 0.23 mm，有效膜面积为 0.0072 m^2，膜片通过膜池固定。导流网置于进料侧膜表面，其示意图如图 2（a）所示，基本结构为矩形，表面布满规则排列的支撑柱，整个通道厚度约为 800 μm，导流网厚度约为 600 μm，导流网丝直径范围为 300～600 μm，具体参数见表 1。

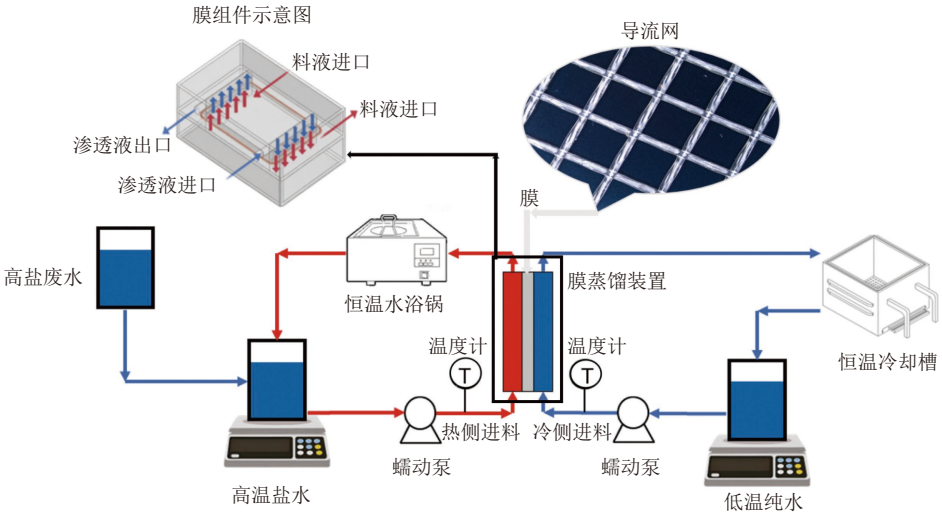


图 1 带有导流网的膜蒸馏海水淡化系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a membrane distillation seawater desalination system with a flow distributor

图 2（b）展示了 3 种导流网的实际构型：商用导流网呈菱形网状；导流网 1 与导流网 2 结构相似，但后者更为规整、表面光滑，更有利于流体均匀流动。结合表 1 所示参数可见，尽管三者均为 90°交叉编织且厚度一致，其结构差异主要体现在以下 3 个方面。首先，在几何一致性方面，导流网 1 的丝径范围较宽（310～600 μm），极差达 290 μm，表明其制造工艺控制较粗放，易造成局部流阻不均；相比之下，导流网 2 的丝径波动仅为 80 μm，体现出更高的编织精度，保障了流道尺寸的一致性。其次，在网格密度方面，导流网 2 的网格间距为 3950 μm，略小于商用导流网（4000 μm）和导流网 1（4050 μm）；在相同厚度下，更小的间距意味着单位面积内流道数量更多，可有效增强湍流扰动、抑制浓度边界层与温度边界层的发展。最后，在表面质量与结构规整性方面，商用导流网因工业压制存在表面压痕，导流网 1 则因丝径不均导致网格松紧不一，而导流网 2 表面光滑、网格排列高度规整，显著减少了流动死区，促进了近膜

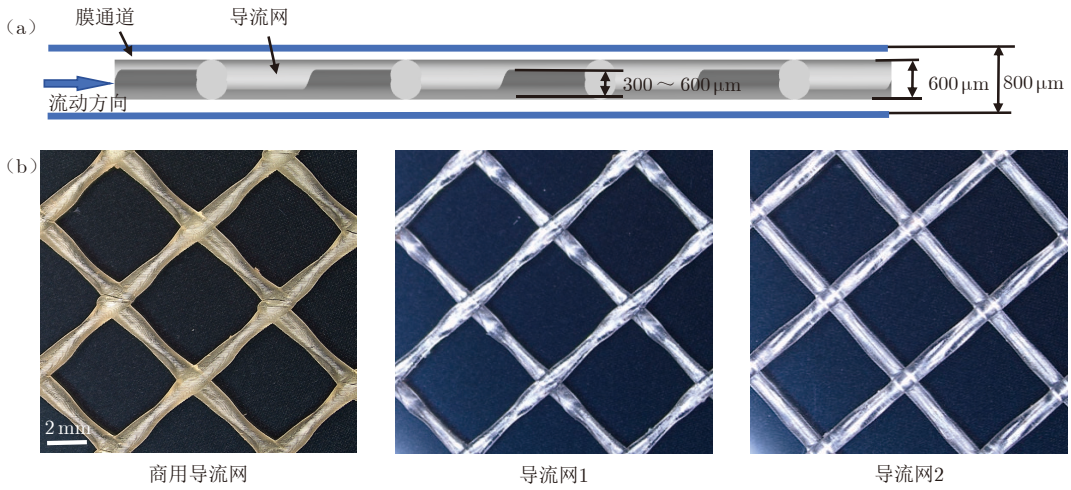


图 2　膜组件的截面示意图以及不同导流网在显微镜下的照片

Fig. 2　Cross-sectional diagram of the membrane module and images of different flow distributors under microscope

表 1　导流网具体参数表

Table 1　Specific parameters of the spacers

参数	商用导流网	导流网1	导流网2
丝径	360～570 μm	310～600 μm	510～590 μm
网格间距	4000 μm	4050 μm	3950 μm
厚度	600 μm	600 μm	600 μm
网丝夹角	90°	90°	90°
表面形貌特征	表面粗糙，局部有压痕	表面平整，编织均匀	表面光滑，网格高度规整

区流体的均匀分布。上述 3 点共同构成了导流网 2 在结构层面的本质优势，为其在膜蒸馏过程中实现更高通量和更强抗极化能力提供了坚实的物理基础。

为模拟不同质量分数条件，实验配制了 3 种盐水，分别代表清水、海水和浓盐水，质量分数依次为 0%、3.5% 和 10.0%。

整个膜蒸馏过程分为进料侧和渗透侧 2 个独立又相互关联的循环回路。在进料侧回路中，料液（如盐水）从带有高盐废水的水罐出发，经蠕动泵输送至膜组件进料侧，而后流入料液罐并返回至水浴锅加热，全程采取保温措施以减少热损失。在渗透侧回路中，纯水作为渗透液，在恒温冷却槽的作用下经蠕动泵驱动循环，流经膜组件渗透侧后进入渗透液罐，最终返回冷却槽。当高温进料液流过疏水膜表面时，由于膜的疏水性，液态水无法进入膜孔；水分子在吸热汽化后，以蒸汽形式穿过膜孔，在蒸气压差驱动下从热侧迁移至冷侧，并在低温侧重新凝结为纯净水，从而实现高效的海水淡化。此外，系统利用 NTC 型热电偶实时监测温度变化，电子天平每 s 自动采集 5 个质量数据点，确保对渗透液质量变化的精准记录。

1.2　实验流程与方法

实验前，首先向进料侧料液罐中加入 2.0 L 配制好的盐水（质量分数分别为 0%、3.5%、10.0%），向渗透侧渗透液罐中加入 2 L 纯净水。随后打开管路中的开关阀门，启动各回路的循环泵，缓慢调节进料侧和渗透侧流量至设定值 240 mL/min。检查管路密封性及流体循环情况，并确保膜组件内无气泡，以保证传热传质过程稳定。

系统运行准备就绪后，根据实验设计设定水浴锅温度，使进料温度依次稳定在 35、40、45、50、55、60 ℃，以模拟不同温度下的产水情况。渗透侧入口温度通过低温恒温槽控制在 20 ℃。

待系统运行稳定后开始实验。实验过程中，渗透液质量由电子天平实时称量，电子天平与计算机连接；与此同时，进料侧与渗透侧的进出口温度和流量通过热电偶与流量计同步记录。每组实验重复 3 次，结果取平均值。为保持 NaCl 质量分数相对稳定，每间隔 15 min 使用盐度计测量料液罐中 NaCl 质量分数，并补充适量纯净水以补偿蒸发损失。

本实验采用单因素实验方法，具体设置如下：

1）探究导流网结构与进料温度对膜蒸馏产水效

率的影响。分别使用 3 种导流网，在进料温度 35～60 ℃，NaCl 质量分数 0%、3.5%、10.0%，渗透侧流量 240 mL/min 的条件下进行实验。

2）探究进料 NaCl 的质量分数对膜蒸馏产水效率的影响。在所选导流网条件下，进料温度 35～60 ℃，NaCl 质量分数 0%、3.5%、10.0%，渗透侧流量保持 240 mL/min。

3）探究流动方式与进料温度对膜蒸馏产水效率的影响。分别采用并流和对流 2 种流动方式，进料温度 35～60 ℃，NaCl 质量分数 0%、3.5%、10.0%，渗透侧流量保持 240 mL/min。

4）探究膜蒸馏过程中气泡的成因及导流网对气泡行为的影响。对比不同温度下气泡密度、形态的变化，以及有无导流网时气泡分布的差异。

1.3 系统性能表征

本文采用产水量来衡量系统的产水性能。产水量定义为单位时间内通过单位膜面积的水的总体积，是评价膜蒸馏海水淡化系统性能的重要指标。取 3 次重复实验的平均产水量作为最终结果，相同工况下 3 次实验结果的相对偏差均小于 10%。产水量 j_v 由式(1)计算：

$$j_v = \frac{V}{S \cdot \Delta t} \tag{1}$$

式中：V（$V = M/\rho$）为同一工况下产出的淡水总体积，M 为产出淡水的质量，ρ 为水的密度；S（S = 0.0072 m^2）为膜有效面积；Δt 为单次实验运行时间。

2 结果与讨论

2.1 导流网结构的影响

本节实验保持渗透侧温度为 20 ℃ 不变，仅改变进料侧温度，以产水量为指标对比了带有不同结构导流网的膜蒸馏系统性能。研究对象包括无导流网、商用导流网以及本研究设计的 2 种新型导流网。当进料侧与产水侧的流动方向一致时，称为并流。图 3 比较了 NaCl 的质量分数为 0% 时，进料温度对不同导流网结构下产水量的影响规律。

由图 3 可进一步揭示导流网结构对膜蒸馏性能的影响规律。首先，从整体趋势来看，所有实验组（包括无导流网、商用导流网、导流网 1 和导流网 2）的产水量均随进料温度升高而单调递增，这与膜蒸馏过程中蒸汽压差随温度呈指数增长的基本热力学原理一致。然而，各曲线增长斜率存在显著差异，其中导流网 2 对应的曲线最为陡峭，表明其对温度变化的响应最为灵敏，具有最强的传热传质强化能力。导流网 1 与无导流网的曲线几乎平行且重叠，说明该结构未能有效利用温度升高所带来的传质驱动力，对传热传质的强化作用甚微。

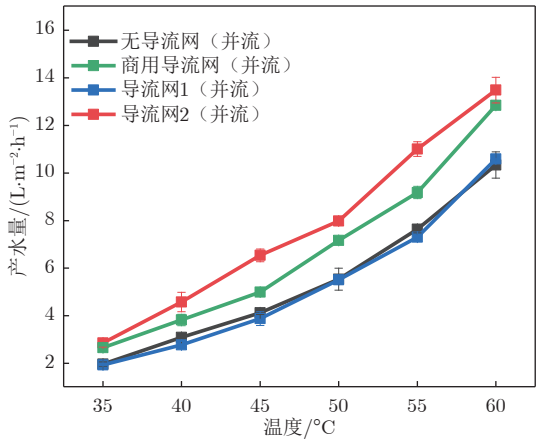


图 3 不同进料温度下，不同导流网的膜蒸馏产水量变化曲线

Fig. 3 Membrane distillation permeate flux profiles for different spacers at various feed temperatures

在低温区间（35～45 ℃），各组产水量差距较小，导流网 2 仅略优于商用导流网，而导流网 1 与无导流网几乎无差别。这表明在低热驱动力条件下，导流网的结构优势尚未充分显现，流体雷诺数较低，流动仍以层流为主，湍流促进效应有限。然而，当温度升至 50 ℃ 以上时，导流网 2 的产水量迅速增加。在 55 ℃ 时，其产水量较无导流网组高出约 22%；在 60 ℃ 时达到峰值 13.45 L/(m^2·h)，较无导流网（约 10.31 L/(m^2·h)）提升约 28%，较商用导流网亦有小幅提升。这一非线性加速增长现象说明，导流网 2 具有更优化的孔隙连通性以及更合理的丝径与网格间距比，这些微结构特征在高雷诺数下能更有效地激发涡流形成、增强微通道内的流动混合，显著削弱温度边界层和浓度边界层。

综上，图 3 不仅验证了温度对膜蒸馏性能的主导作用，更清晰地揭示了导流网微观结构设计的关键性。只有具备合理几何参数与流道拓扑的导流网（如导流网 2），才能在宽温域内持续、高效地强化传热传质过程，实现性能的跨越式提升。因此，选择导流网 2 作为最优导流网。

2.2 NaCl 质量分数的影响

本文采用 3 种质量分数的盐水分别模拟淡水（0%）、海水（3.5%）和浓盐水（10.0%），在此基础上进一步考察了进料温度与 NaCl 质量分数对膜蒸馏产水性能的影响。不同进料温度与 NaCl 质量分数条件下产水量的变化曲线如图 4 所示。

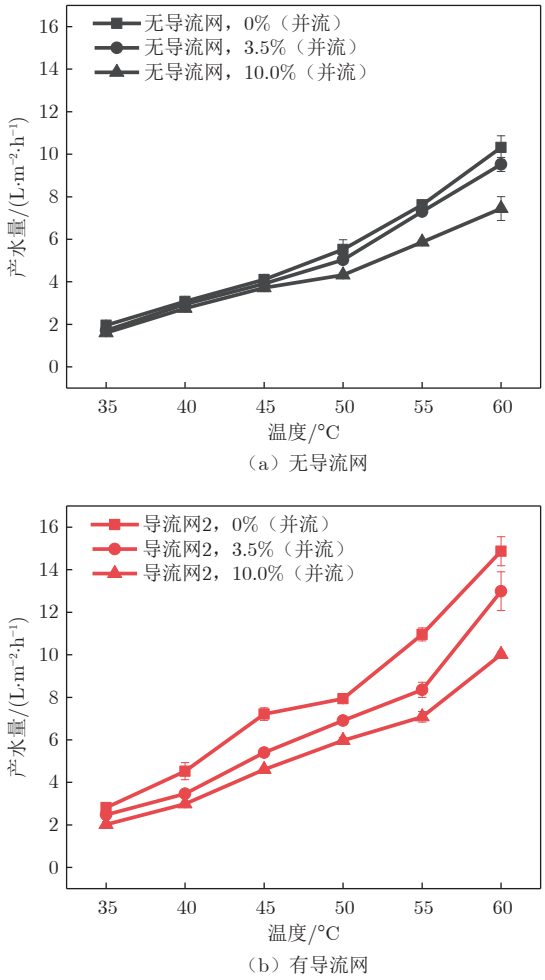


图 4　不同 NaCl 质量分数下，有、无导流网时膜蒸馏产水量的变化

Fig. 4　Variation in membrane distillation permeate flux with and without a spacer under different brine concentrations

由图 4 可知，NaCl 质量分数对膜蒸馏产水性能具有显著影响，且这种影响在不同温度条件下呈现系统性变化规律。在无导流网工况（图 4(a)）下，随着 NaCl 质量分数的增加，各温度点对应的产水量均呈明显下降趋势，且下降幅度随温度升高而加剧。例如，在 35 ℃ 时，0%、3.5% 和 10.0%NaCl 质量分数下的产水量分别约为 1.95、1.70 和 1.60 L/(m²·h)，差异较小；当温度升至 60 ℃ 时，三者分别达到约 10.31、9.52 和 7.44 L/(m²·h)，高 NaCl 质量分数组与低 NaCl 质量分数组之间的差距扩大至近 2 倍。这一现象表明，虽然温度提升能有效增强蒸汽压差和分子扩散速率，但在高盐环境下，其增益效应受到严重削弱。

相比之下，采用导流网 2 后（图 4(b)），3 条曲线的整体位置上移，说明导流网有效缓解了 NaCl 质量分数带来的负面影响。尤其是在 10.0%NaCl 质量分数下，产水量从 7.44 L/(m²·h) 提升至 10.04 L/(m²·h)，增幅达 34%。这表明导流网的强化作用在高盐条件下更具价值：其通过微结构扰动增强流体混合，破坏浓差边界层，使膜表面的盐分得以更快速地被主流带走，从而维持较高的有效传质驱动力。此外，导流网的存在还改善了流场分布均匀性，减少了局部滞流区，避免了因流速不均导致的局部盐析或结垢风险，提高了系统的抗污染能力和运行稳定性。

综上所述，NaCl 质量分数是决定膜蒸馏系统性能的关键参数之一。高盐环境不仅直接降低产水通量，还削弱了温度提升所带来的增益效果，加剧了浓差极化问题。而导流网通过优化近膜面流体动力学条件，能够有效抵消高盐带来的负面效应，尤其在严苛工况下展现出更强的适应性与强化潜力，为实现高盐废水的高效处理提供了可行的技术路径。

2.3　流动方式的影响

在并流实验的基础上，将进料侧与产水侧的流动方向设置为逆向，即对流，以分析流动方式的影响。实验采用导流网 2 进行膜蒸馏测试，分别配制了 3 种不同盐度的溶液以模拟典型工况：淡水（0%）、海水（3.5%）及浓盐水（10.0%）。实验设置了不同流动条件的对比组。图 5 展示了各盐度条件下不同流动方式对应的产水量变化曲线。

由图 5 可知，流动方式对膜蒸馏系统的产水性能具有显著影响。在相同工况（如进料温度、NaCl 质量分数、流量等）下，不同流动模式的产水量差异显著。如图 5(a)所示，在 NaCl 质量分数为 0%、温度为 60 ℃ 的工况下，对流模式产水量为 10.78 L/(m²·h)，略高于并流模式的 10.31 L/(m²·h)，二者差距约为 5%；而有导流网时（图 5(b)），对流模式的产水量为 15.38 L/(m²·h)，并流仅为 13.46 L/(m²·h)，二者差距超过 14%。对流模式的产水量均高于并流模式，其原因在于对流通过将料液侧与渗透侧设置为逆向流动，实现了更均匀的温度分布。在入口端，高温料液与低温渗透侧接触，产生的蒸气压差最大；沿程温差维持较好，从而使整个膜表面的平均传质推动力显著提高，且变化平缓，避免了并流模式中出现的“推动力衰减”问题。对流模式的产水曲线更陡峭，表明其对温度变化的响应更灵敏，热能利用率更高。

同时，在 60 ℃、0% 质量分数工况下，采用导流网 2 的对流产水量较无导流网时提高约 42%。这说明导流网的强化作用与流动方式之间存在协同效应：导流网通过扰动流场增强了边界层破坏能力，而对流模式则提供了更优的宏观传质环境，两者结合

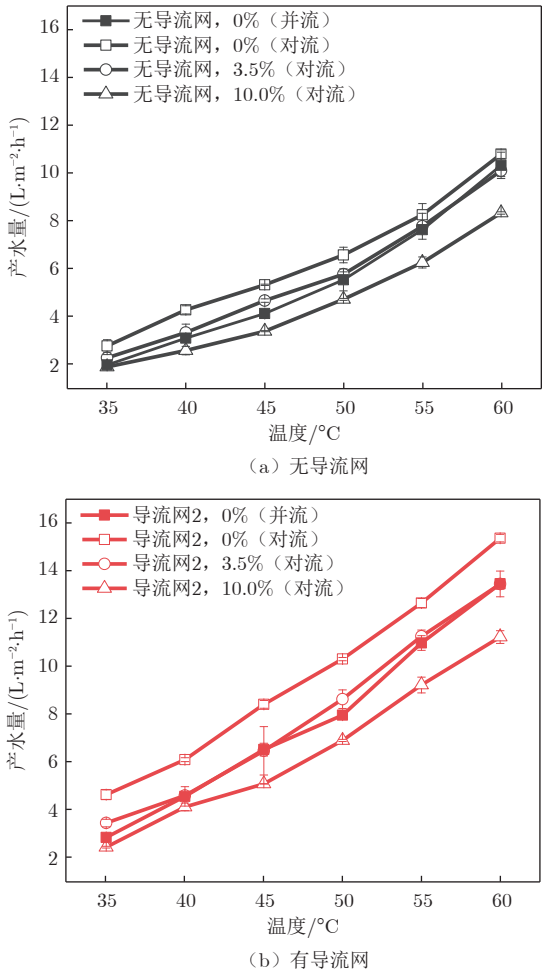


图 5 不同流动方式下，有、无导流网时膜蒸馏产水量的变化

Fig. 5 Variation in membrane distillation permeate flux with and without a spacer under different flow configurations

可实现“双效叠加”。导流网在对流模式下更能发挥其促进湍流、加速混合的优势，从而最大化地利用逆向流动带来的温度优势。

此外，图 5 还显示，在 NaCl 质量分数为 3.5% 的条件下，无论有、无导流网，对流模式的产水量均与 0% 盐度下的并流模式相近，说明对流方式不仅提升了热效率，还在一定程度上补偿了 NaCl 质量分数增加带来的传质损失。这一结果进一步凸显了对流模式在复杂工况下的优越性：其不仅能增强传热传质的协同效应，还能有效缓解浓差极化和盐析风险。特别是在高盐环境下，逆向流动有助于快速带走膜表面富集的盐分，减少结晶沉积的可能性，延长膜寿命并维持长期稳定运行。

综上所述，图 5 直观地展示了流动方式作为膜蒸馏系统核心设计参数的重要地位。对流模式凭借其优异的温差维持能力、更强的传质推动力及对极化效应的抑制作用，在所有测试条件下均表现出优于并流模式的性能。尤其在高温、高盐等挑战性工况下，对流方式配合优化的导流网结构，能够显著提升系统效率与稳定性，是实现高效、可持续膜蒸馏脱盐的关键技术路径。

2.4 气泡形态随温度的变化

实验过程中，在导流网及膜表面观察到了微尺度气泡。为进一步探究其形成机理，本节开展了相关分析与讨论。

如图 6 所示，实验图像清晰揭示了气泡在导流网结构中的分布规律及其随温度变化的演化特征。在 35 ℃ 低温工况下，无导流网组（图 6(a)）无明显气泡，表明蒸汽生成有限，产水量较低。而有导流网组（图 6(d)）气泡数量稀少、尺寸微小、边界清晰，主要以孤立形式分散于导流网丝表面及单元内部。当温度升至 60 ℃ 时，无导流网组（图 6(b)）膜表面呈现少量半球形透明气泡，内部嵌套微泡，显示出较为明显的汽化活动。而有导流网组（图 6(e)）则更为明显，气泡密度与尺寸显著增加，导流网单元内出现大量直径超过 5 mm 的大气泡，并伴有明显的堆叠与融合现象，形成“气泡簇”。导流网促进气泡生成的原因在于其通过提供成核位点、改变流场结构、增强局部传热传质以及物理捕获气泡等多重机制，共同促进了气泡的生成、聚集与稳定存在。大气泡集中于导流网封闭单元内，小气泡则附着于网丝交点处。这一分布源于局部流场差异：节点区域因流体受阻产生强剪切力与湍流，抑制气泡生长并促使其快速脱离；而单元内部流道开阔、剪切力弱，易形成流动死区，利于气泡滞留与聚集。这体现了导流网在膜蒸馏中超越“单纯支撑”的功能性角色——它主动参与并调控了汽–液两相行为，是实现高效、稳定运行的关键组件。

在 35 和 60 ℃ 条件下，分别对比了无导流网（图 6(c)）与导流网 2（图 6(f)）时的气泡密度及对应膜通量：35 ℃ 时，引入导流网后气泡密度从 8 个/cm^2 增至 123 个/cm^2，膜通量由 1.95 L/(m^2·h) 提升至 2.84 L/(m^2·h)；60 ℃ 时，气泡密度从 214 个/cm^2 大幅增至 1688 个/cm^2，膜通量同步从 10.31 L/(m^2·h) 升至 13.47 L/(m^2·h)。将 4 组工况下的气泡密度与膜通量进行关联分析，发现二者呈同步增加的趋势，且导流网 2 的气泡密度在同一工况下始终高于无导流网，表明气泡密度可作为系统蒸发强度和传质效率的有效可视化指标。

值得注意的是，气泡在此膜蒸馏组件中是传质

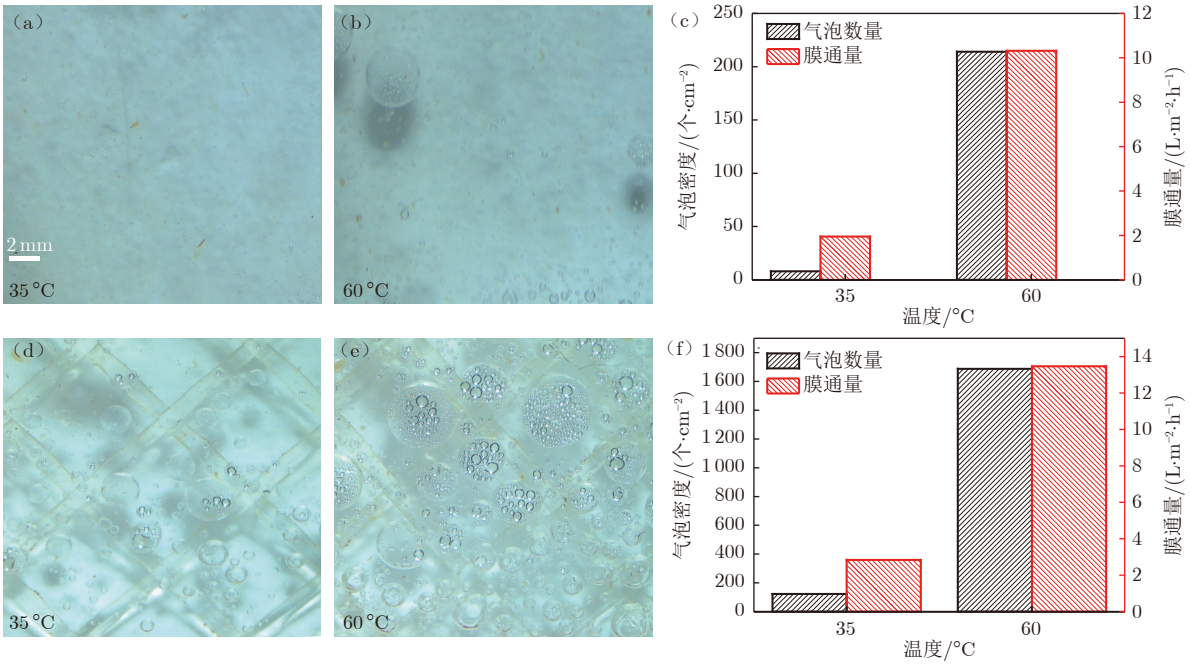


图 6　不同温度下，有、无导流网的膜蒸馏膜表面气泡图以及气泡密度与膜通量相关性图

Fig. 6　Bubble diagrams of membrane distillation membrane surfaces with and without a spacer at different temperatures, along with plots showing the correlation between bubble density and membrane flux

强化的积极信号。首先，气泡的周期性生长与脱离可诱发微尺度流体扰动，形成流动混合效应，有效削弱膜面的浓度边界层与温度边界层。其次，气泡密度、尺寸与分布直接反映系统的蒸发强度和产水通量，是性能的可视化指标——高温下气泡密集且体积大，恰对应高通量运行状态。此外，气泡的存在有助于将膜孔逸出的蒸汽有序引导至导流网结构中排出，避免蒸汽在膜面持续积聚导致干斑或润湿，从而保护疏水膜的长期稳定性。

综上，气泡行为是膜蒸馏过程中热力学驱动与结构响应共同作用的结果。合理利用气泡的“自强化”特性，并以气泡分布为反馈依据优化导流网设计（如调整孔隙梯度、减少死区），有望实现高通量、高稳定性膜蒸馏系统的开发。

3　结　论

本文设计并搭建了一套基于导流网的膜蒸馏实验系统，系统考察了导流网结构、进料温度、流动方式及 NaCl 质量分数等关键参数对系统产水性能的影响，深入揭示了通过优化导流网微结构以提升膜蒸馏组件内微流动传热传质效率的可行性与机理。主要结论如下：

1）导流网能够显著提升产水性能。在 60 ℃、0% 盐度、对流条件下，优化导流网 2 的通量达到 15.38 L/(m²·h)，较无导流网（10.31 L/(m²·h)）提升了 49.2%；即使在 10.0% NaCl 高盐工况下，仍保持 34.98% 的通量增益。这主要是因为导流网 2 表面光滑、网格高度规整且网格间距小，能够有效增强膜通道中的流动混合。在 60 ℃ 工况下，其通量较商用导流网高 5%～8%，较导流网 1 提升了 28%。

2）膜表面的气泡密度可直接反映系统蒸发强度和产水通量。在 60 ℃ 条件下引入导流网后，膜表面气泡密度从 214 个/cm² 增至 1688 个/cm²（增加约 6.9 倍），通量从 10.31 L/(m²·h) 增至 13.47 L/(m²·h)，证实导流网通过提供成核位点促进气泡生成，进而强化相变传质。

综上，优化导流网可在典型工况下稳定实现 30%～50% 的产水通量提升，为高效膜蒸馏组件设计提供了明确的结构优化方向。未来可结合 3D 打印等先进制造技术，定制化设计梯度孔隙或仿生流道导流网，以进一步提升高盐废水处理、太阳能驱动膜蒸馏等场景下的系统能效与长期稳定性。

参考文献：

[1]　赵勇，李微，何凡，等. 中国水资源短缺标准与分区评价[J]. 中国水利，2024(15)：13-19.
Zhao Yong, Li Wei, He Fan, et al. Water resources scarcity standards and zoning evaluation in China[J]. China Water Resources, 2024(15): 13-19.
doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2024.15.006

[2] 黄晓家, 单聪, 卢金锁, 等. 基于统计数据的我国水资源承载力研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(6): 1-8.
Huang Xiaojia, Shan Cong, Lu Jinsuo, et al. Water resources carrying capacity in China: a statistical analysis[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(6): 1-8.
doi: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.001

[3] 易信. 中长期我国经济增长趋势及对水资源需求影响的研究[J]. 中国水利, 2020(19): 37-39.
Yi Xin. Research on economic growth trend in medium and long term of our country and the water resources demand influences[J]. China Water Resources, 2020(19): 37-39.
doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2020.19.020

[4] 霍守亮, 张含笑, 金小伟, 等. 我国水生态环境安全保障对策研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 1-7.
Huo Shouliang, Zhang Hanxiao, Jin Xiaowei, et al. Countermeasures for assuring water ecological environment security in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 1-7.
doi: 10.15302/J-SSCAE-2022.05.001

[5] Lin S S, Zhao H Y, Zhu L P, et al. Seawater desalination technology and engineering in China: a review[J]. Desalination, 2021, 498: 114728.
doi: 10.1016/j.desal.2020.114728

[6] 张茜. 海水淡化技术发展与应用现状研究[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(2): 94-96.
Zhang Qian. Research on the development and application status of seawater desalination technology[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025, 43(2): 94-96.
doi: 10.3969/j.issn.1008-9500.2025.02.026

[7] Liu H B, Li B, Guo L W, et al. Current and future use of membrane technology in the traditional Chinese medicine industry[J]. Separation & Purification Reviews, 2022, 51(4): 484-502.
doi: 10.1080/15422119.2021.1995875

[8] Samadi A, Ni T L, Fontananova E, et al. Engineering antiwetting hydrophobic surfaces for membrane distillation: a review[J]. Desalination, 2023, 563: 116722.
doi: 10.1016/j.desal.2023.116722

[9] 刘子强, 高海富, 刘雅庆, 等. 膜蒸馏过程能耗优化研究进展: 从核心组件创新到系统工艺集成[J]. 水处理技术, 2025, 51(10): 28-36, 42.
Liu Ziqiang, Gao Haifu, Liu Yaqing, et al. Research progress on energy consumption optimization in membrane distillation process: from core membrane module innovation to integration of membrane process system[J]. Technology of Water Treatment, 2025, 51(10): 28-36, 42.
doi: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2025.10.004

[10] Wang Y, Chen Z, Huang C, et al. Superhydrophobic membranes with enhanced pore surface hydrophobicity for stable membrane distillation of hypersaline wastewater[J]. Science China (Materials), 2025, 68(11): 4155-4163.
doi: 10.1007/s40843-025-3574-9

[11] 吴胜友, 黄岩, 杨浩, 等. 超疏水 PVDF 膜的制备及其膜蒸馏性能[J]. 应用化工, 2025, 54(9): 2272-2277.
Wu Shengyou, Huang Yan, Yang Hao, et al. Preparation of superhydrophobic PVDF membrane and its membrane distillation performance[J]. Applied Chemical Industry, 2025, 54(9): 2272-2277.
doi: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20250826.018

[12] 马全, 孟昕, 金央, 等. F-Si-PCPA-PVDF 超疏水膜的制备及其膜蒸馏性能研究[J]. 无机盐工业, 2026, 58(2): 28-35.
Ma Quan, Meng Xin, Jin Yang, et al. Study on preparation of F-Si-PCPA-PVDF superhydrophobic membrane andits membrane distillation performance[J]. Norganic Chemicals Industry, 2026, 58(2): 28-35.
doi: 10.19964/j.issn.1006-4990.2025-0111

[13] 吴江波, 马峰, 杜小泽, 等. 新型流道强化气隙式膜蒸馏的实验研究[J]. 兰州理工大学学报, 2025, 51(3): 41-47.
Wu Jiangbo, Ma Feng, Du Xiaoze, et al. Experimental study of a new flow channel enhanced air gap membrane distillation[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2025, 51(3): 41-47.
doi: 10.3969/j.issn.1673-5196.2025.03.006

[14] Swaidan B, Paul I, Yu S C M. Hierarchical fractal surface patterns for enhanced gypsum scaling resistance in membrane distillation: a computational fluid dynamics analysis[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 78: 108700.
doi: 10.1016/j.jwpe.2025.108700

[15] 过增元. 国际传热研究前沿: 微细尺度传热[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 1-6.
Guo Zengyuan. Frontier of heat transfer: microscale heat transfer[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(1): 1-6.
doi: 10.3321/j.issn:1000-0992.2000.01.001

[16] 周兆英, 叶雄英, 崔天宏, 等. 微米纳米技术及微型机电系统[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(1): 1-7.
Zhou Zhaoying, Ye Xiongying, Cui Tianhong, et al. Microtechnology/nanotechnology and mems[J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(1): 1-7.

[17] 张龙艳. 微尺度下流体的流动换热及核化沸腾的分子动力学研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
Zhang Longyan. Molecular dynamics simulation of fluid flow and heat transfer and nucleate boiling in microscale[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

[18] 张灿, 祁影霞. 微纳尺寸微通道流动与换热研究综述[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(3): 154-161.
Zhang Can, Qi Yingxia. Review on the flow and heat transfer in micro and nanochannels[J]. Energy Research and Information, 2020, 36(3): 154-161.
doi: 10.13259/j.cnki.eri.2020.03.005

[19] Khatab M Z, Abdelsamie M M, Arafat H A, et al. A novel planar module design for improved direct contact membrane distillation: experimental and computational fluid dynamics insights[J]. International Journal of Thermofluids, 2025, 29: 101391.
doi: 10.1016/j.ijft.2025.101391

[20] 宋善鹏. 超疏水微通道内水流动与传热特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Song Shanpeng. Investigations on water flow and heat transfer in the super-hydrophobic micro-channel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.



作者简介:
徐佳琦(2005—), 男, 浙江缙云人, 本科生。研究方向: 膜蒸馏海水淡化。
E-mail: xjq929599416@163.com

(编辑: 秦虹)