第 45 卷第 1 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 45, No. 1
2024 年 2 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Feb. 2024

文章编号：1008-1542(2024)01-0015-11

海水淡化膜蒸馏膜的研究现状与展望

许　正[1,2]，李泽华[1,2]，苏铭晗[1,2]，王若琳[1,2]，牛春梅[1,2]，李田田[1,2]

（1. 河北科技大学材料科学与工程学院，河北石家庄　050018；
2. 河北省柔性功能材料重点实验室，河北石家庄　050018）

摘　要：海水淡化技术（热法和膜法）是一项有望使人类摆脱淡水资源短缺困境的有效方法，其中，膜蒸馏技术是一种能源消耗低、脱盐能力强且有望实现淡水经济可持续生产的新型膜分离技术，但是膜蒸馏性能在很大程度上受膜污染与温度极化的制约，严重阻碍了其规模化应用，为此，研究人员围绕膜改性做了系列研究，以提高膜抗污染性并最大限度地降低温度极化。从阻碍膜蒸馏发展的问题入手，简要介绍了膜污染与温度极化及其对膜蒸馏造成的不利影响，综合分析了当前通过构造特殊润湿性表面抵抗膜污染以及利用限域加热降低/消除温度极化的研究现状，并指出当今膜蒸馏膜面临的问题，认为未来对于膜蒸馏膜的研究应从以下几方面开展：1）选用高导热/高光吸收的材料制造有限域加热功能并具有特殊润湿性表面的膜；2）设计能够适应多元污染物进料液的膜蒸馏膜；3）构筑一体化的具有高导热/光吸收性亲水层的 Janus 膜。

关键词：膜分离；膜蒸馏；海水淡化；膜污染；温度极化；超疏水膜；超双疏膜；Janus 膜；限域加热

中图分类号：TQ028.8　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.7535/hbkd.2024yx01002

Research status and prospect of seawater desalination membrane distillation membrane

XU Zheng[1,2], LI Zehua[1,2], SU Minghan[1,2], WANG Ruolin[1,2], NIU Chunmei[1,2], LI Tiantian[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. Hebei Key Laboratory of Flexible Functional Materials, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Desalination technology, including thermal and membrane methods, holds great promise as a viable solution to alleviate the scarcity of freshwater resources. The membrane distillation technology, among various membrane separation technologies, exhibits remarkable potential for economic and sustainable freshwater production due to its low energy consumption and exceptional desalination capability. However, the performance of membrane distillation is significantly constrained by membrane fouling and temperature polarization, which severely impedes its large-scale implementation. Consequently, extensive research efforts have been devoted to membrane modification strategies aimed at enhancing fouling

收稿日期：2023-10-17；修回日期：2023-11-29；责任编辑：冯　民
基金项目：国家自然科学基金（22308085）；河北省自然科学基金（B2020208083）
第一作者简介：许正（1999—），男，河北保定人，硕士研究生，主要从事聚合物微孔膜、膜蒸馏方面的研究。
通信作者：李田田，博士。E-mail：litiantian669@163.com

许正，李泽华，苏铭晗，等. 海水淡化膜蒸馏膜的研究现状与展望 [J]. 河北科技大学学报，2024，45(1)：15-25.
XU Zheng, LI Zehua, SU Minghan, et al. Research status and prospect of seawater desalination membrane distillation membrane[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(1): 15-25.

resistance and minimizing temperature polarization. Based on this foundation, the present study provides a concise overview of membrane fouling and temperature polarization, elucidating their detrimental impacts on the progress of membrane distillation. The present study provides an analysis of the current research status regarding the mitigation of membrane fouling through the development of specialized wettable surfaces and the reduction of temperature polarization via controlled heating. Furthermore, this work highlights the existing challenges faced by membrane distillation membranes. It is recommended that future research on membrane distillation membranes should focus on the following aspects: 1) Utilizing materials with high thermal conductivity and strong light absorption properties to fabricate membranes with limited field heating functionality and specialized wettable surfaces; 2) Developing a versatile membrane distillation system capable of accommodating feed liquids containing multiple pollutants; 3) Designing an integrated Janus membrane, incorporating a hydrophilic layer with high thermal conductivity and light absorption capabilities.

Keywords: membrane separation; membrane distillation; seawater desalination; membrane fouling; temperature polarization; superhydrophobic membrane; superamphiphobic membrane; Janus membrane; confined heating

据世界水资源部门发布的报告显示,在过去的20年间世界人均淡水占有量减少20%以上,约40%的世界人口(约15亿人)面临淡水不足,其中3亿人处于长期"极度缺水"的状况中。随着人口的快速增长以及工业化进程的迅猛推进,无疑会进一步加剧淡水资源的短缺,如何解决淡水资源短缺问题将成为亟待解决的世界性难题之一[1-2]。海水淡化是解决淡水资源短缺的重要途径[3],目前反渗透技术在海水淡化领域占据主导性地位[4],但作为一种压力驱动膜分离工艺,其无法摆脱容易污染、能够处理的盐度极限低(约为70 000 mg/L)、以及操作压力高(约为6~8 MPa)等问题。近年来新兴的太阳能界面蒸发技术,通过将光热转化与脱盐合二为一极大地提升了对太阳能的利用率,但其较低的产水能力(在1个太阳的光照强度下仅有1.38~2.249 kg/(m^2 · h)[5-7]与需要特殊设计的淡水收集装置阻碍了在海水淡化方面的实际应用。而电容去离子技术作为一种新锐的海水淡化技术,拥有较高的脱盐效率与较低的成本,但当进料液盐浓度升高时,其能耗会随之急剧上升,因此处理高浓度盐水对于电容去离子技术来说无疑是一种挑战[8-9]。膜蒸馏(MD)是一种极具发展潜力的膜分离技术。区别于传统压力驱动膜分离技术,膜蒸馏技术以蒸汽压差驱动,独特的工作机理使MD技术在拥有极强的脱盐能力(接近100%)的同时,对进料液盐度变化的敏感性可忽略不计[10]。MD能够在较低的工作压力下运行,并且可以利用地热、工厂废热等低品位热能作为制造温差的能量来源[11],这意味着能源成本的降低以及更少的温室气体排放是一种经济可行的淡水获取手段。为了实现膜蒸馏海水淡化的工业化,人们通过对膜蒸馏膜、膜组件以及膜蒸馏参数配置的不断改进,使膜蒸馏的产水效率和能源效率得到了有效提高。通过与其他技术结合,膜蒸馏有望达到零液体排放,在可持续的海水淡化方面拥有很大前景。

疏水微孔膜作为MD过程中的关键组件,其性能在很大程度上决定着MD效率,对MD膜的一类重要研究就是通过对疏水微孔膜本体性能的调控来强化膜的传质能力,通过调控膜孔形态[12]、调节膜的孔隙率[13]等手段使MD的效率得到提高。但也有许多外部因素(如流体流速、膜两侧温差和支撑层结构等)能够对疏水微孔膜性能造成影响,使MD性能受到制约。在MD的应用中,待处理水体往往是复杂的,疏水膜表面易受到表面活性剂、无机盐结垢等物质的污染,这些污染物会堵塞膜孔,降低膜分离效率,甚至会降低膜的表面能,破坏疏水屏障,从而发生膜润湿现象,最终导致进料液穿透疏水微孔膜,使MD失效。传质往往伴随传热,当蒸汽透过疏水膜在另一侧冷凝时,会发生温度极化现象,导致膜两侧温差下降,由于水的蒸汽压随温度呈指数级上升,膜界面处水温度的降低会导致MD驱动力的显著下降[14]。因此开发一种能够有效缓解温度极化兼具抗污染能力的膜对MD技术的发展极为重要。针对诸如膜污染和温度极化现象带来的挑战,目前研究人员主要致力于改进疏水微孔膜的表面润湿性以及限域加热的研究,通过在MD膜上构建超疏水、超双疏表面,或构筑有润湿性差异的Janus膜,增强MD膜的抗污染能力。另一方面,通过对膜表面的改性,利用焦耳加热、太阳能加热等方式进行限域加热,可以使温度极化现象得到有效缓解,甚至能够消除温度极化带来的不利影响。

1 膜蒸馏概述

1.1 膜蒸馏机理及特点

MD是一种利用疏水微孔膜分离进料液中非挥发性组分的新型膜分离技术。与常规压力驱动膜分离技术不同,膜蒸馏技术通过膜两侧温差产生的蒸汽压差驱动。由于表面张力的存在,疏水微孔膜将进料液与渗

透液隔绝于膜两侧，水无法直接透过膜达到另一侧。当膜两侧存在一定的温差时，由于膜两侧水体存在蒸汽压差，水分子能够以蒸汽的形式通过膜传质到另一侧冷凝为淡水[15]，如图 1 所示。这种独特的膜分离机制，使得膜蒸馏技术有着超乎寻常的脱盐能力，理论上能够将所有非挥发性物质截留在进料液中。MD 的分离过程不涉及其他膜分离过程中常见的孔径筛分与电荷排斥机制，这使得其对进料液盐度变化的敏感性可以忽略不计，MD 技术能够处理的盐度极限很高，比如能够处理总溶解固体含量高达 360 000 mg/L 的页岩气采出水[16]。由于温差呈指数级影响着蒸汽压差，膜两侧存在少量温差即可满足 MD 的运行，这意味着在较低的操作温度和压力下，就能够达到较高的脱盐能力，因此地热、工业废热、太阳能等难以利用的低品位能源可以被 MD 所使用。

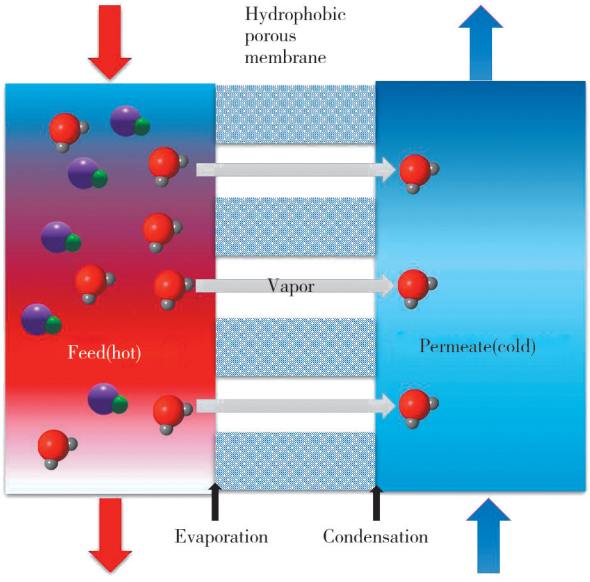


图 1　膜蒸馏机理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the membrane distillation mechanism

1.2　膜蒸馏分类

目前研究的 MD 过程，根据渗透液收集方式可分为直接接触式膜蒸馏（DCMD）、真空膜蒸馏（VMD）、气隙式膜蒸馏（AGMD）和扫气式膜蒸馏（SGMD），如图 2 所示。DCMD 被认为是最简配置，其简单高效的特点，比较适用于海水淡化、果汁浓缩以及中药提取等领域。VMD 在膜的渗透侧施加低压，迫使蒸汽透过膜孔，在膜组件外冷凝成淡水，适用于处理热敏感的化合物溶液，其在较低的温度下就能够获得较高的通量，但极化效应会严重影响膜的寿命，因此对膜要求较

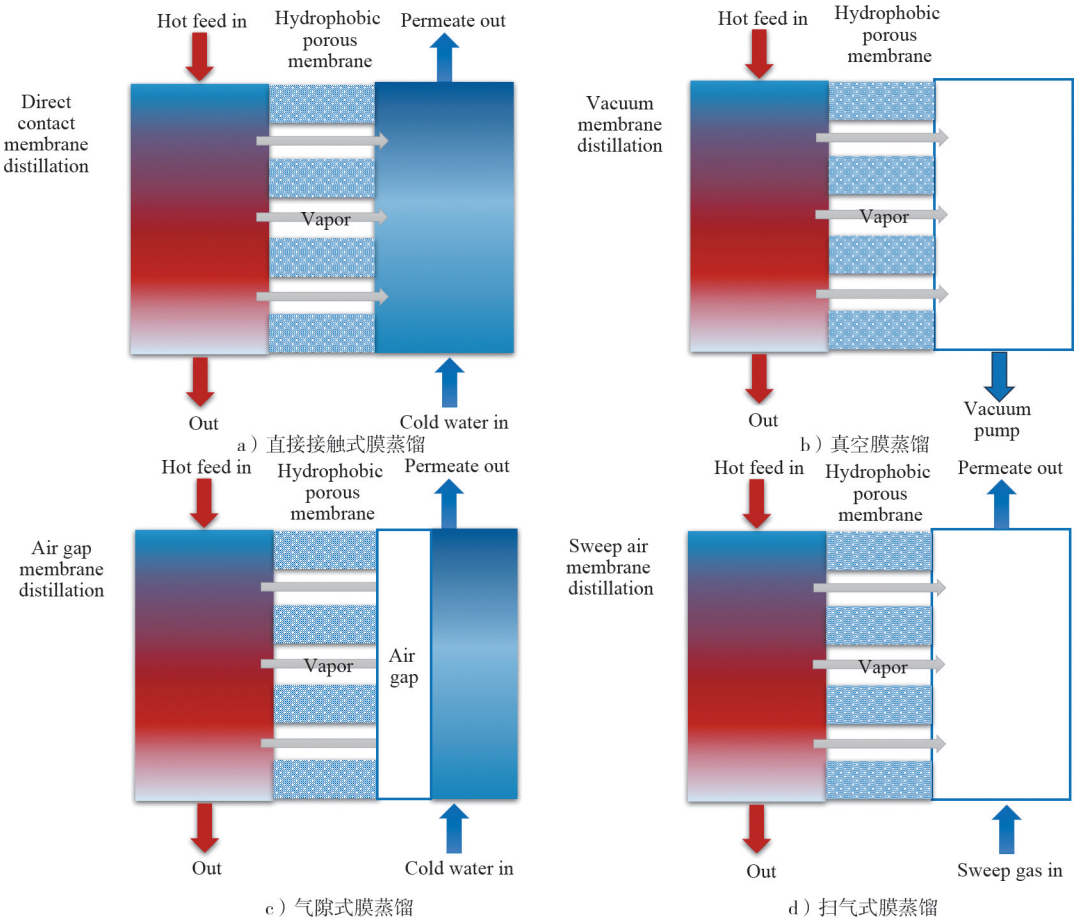


图 2　不同类型的膜蒸馏

Fig. 2　Different types of membrane distillation

高[17]。AGMD 的特点是在渗透侧增加一层空气间隙，使水蒸气透过微孔膜后在气隙中凝结，气隙的引入显著减小了膜蒸馏过程的热损耗，但其升高了传质阻力，为了获得较高的渗透通量一般需要在膜两侧提供更高的温差[18]。与 AGMD 相似，SGMD 向膜表面吹扫惰性气体，利用惰性气流收集透过膜孔的水蒸气，这种做法的好处是降低部分热量损失，并加快传质过程，但其复杂的结构大大增加了成本[19]。

1.3 膜蒸馏膜的特点

MD 的效果与效率很大程度上由疏水微孔膜决定，理想的膜应具有高液体进入压力(LEP)、高渗透通量、低导热系数、优异的化学稳定性和热稳定性以及优良的机械强度等特点[20]。LEP 是用来衡量膜抗润湿能力的重要指标，当液体穿透膜孔时所需的最小静水压力即为 LEP，较高的 LEP 能够为膜带来更优异的抗浸润能力[21]。渗透通量是生产效率的重要体现，孔隙率、孔径和厚度是导致高渗透率的关键因素。更低的导热系数能够降低在膜运行过程中的传热热损失，有利于降低温度极化，保持传质驱动力。为了使膜在 MD 过程中面对成分更复杂的进料液时拥有更长的使用寿命，具有优良化学稳定性、热稳定性以及机械强度的聚偏氟乙烯(PVDF)[22]、聚四氟乙烯(PTFE)[23]、聚丙烯(PP)[24]等疏水材料常被用于制备疏水微孔膜。

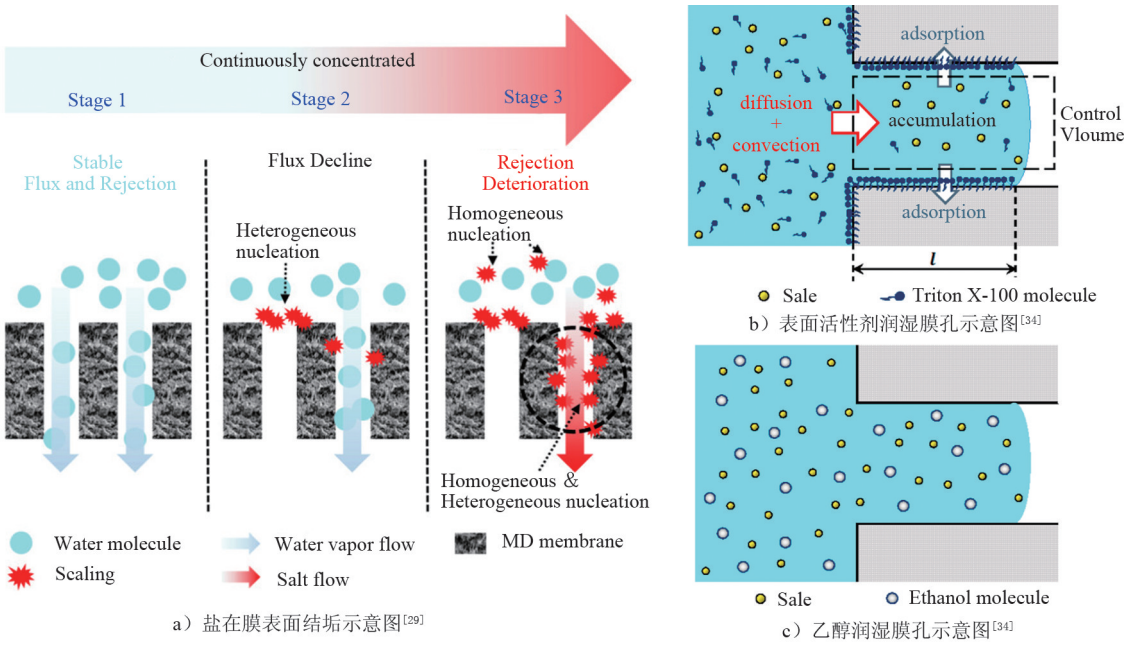
1.4 膜蒸馏存在的问题

相比于传统的热蒸馏法与其他压力驱动膜分离技术，纵然 MD 技术在成本上更加经济，在能耗上更加环保，但由于温度极化、膜润湿、膜污染等不利因素的影响，通量与脱盐性能的长期稳定性受到极大的挑战，这极大地制约了 MD 的工业化应用。

1.4.1 膜污染

膜污染是膜分离工艺中遭遇的普遍问题，特别是在纳滤、反渗透这样的传统压力驱动的膜分离技术中，膜污染会严重影响分离效率。由于进料液的复杂性，MD 过程中出现的膜污染的种类与机理十分复杂[25]，比如通过表征海水脱盐得到的污染物，发现其为有机、无机、生物污染物亦或是几种污染物的组合体。

无论是将 MD 用于海水淡化还是废水回收，其进料液中都含有成分复杂的无机盐，因此，首先要解决无机污染物对膜造成的污染[26]。在膜运行过程中，淡水不断地透过疏水微孔膜到达渗透侧，此时进料液可以看作被不断浓缩，这加速了无机盐在溶液中或界面的均匀或非均匀成核[27-28]。由于水的不断减少，以及溶液中的热量随着蒸汽传质的损失，一层高浓盐水聚集在膜附近，进料液甚至能够在这个区域达到过饱和。如此一来，随着盐分在膜表面结晶成核以及溶液中的盐结晶的沉积，在膜表面将形成结垢[29]，如图 3 a)所示。膜结垢初期在膜蒸馏性能方面的反映是膜通量的逐渐下降，因为膜表面的膜孔被结晶堵塞，占据蒸汽的传质通道[30]。盐结晶往往是亲水的，膜孔附近的盐结晶逐渐向膜孔内部发展，在盐结晶诱导下疏水膜被润湿，此时渗透液的电导率迅速增长，这标志着 MD 失效。通过不断地结晶-生长-沉积，结晶会在膜表面形成沉积



a) 盐在膜表面结垢示意图[29]

b) 表面活性剂润湿膜孔示意图[34]

c) 乙醇润湿膜孔示意图[34]

图 3 膜蒸馏过程中的常见污染

Fig. 3 Common contamination in membrane distillation process

层，这些沉积层不仅会增加膜的传质阻力，还会提高膜的热阻，从而导致更加严重的温度极化[31]。

由于膜表面的疏水性，当膜表面与有机物接触时，有机物很容易通过多种相互作用黏附到膜表面，形成有机污染[32]。在 MD 研究中常见的是以腐殖酸（HA）为代表的天然有机物，以及以表面活性剂为代表的两亲性物质。HA 在进料液中容易与钙离子等金属离子形成络合物，以类似凝胶的形式沉积于膜表面，使传质阻力大大增加[33]。表面活性剂由亲水头部与疏水尾部组成，亲水亲油值较低的表面活性剂极易黏附在疏水膜表面形成单分子层，亲水部分能够削弱膜的表面张力，使膜孔更容易被润湿（见图 3 b））[34]。含油废水也是经常被讨论的话题，油滴极易以疏水-疏水相互作用黏附到膜表面，造成严重的孔堵塞，使渗透通量发生显著降低[35]。此外，如图 3 c）所示，工业废水中的诸如乙醇等低表面能液体，亦容易通过溶胀的方式浸润膜孔[34]。

1.4.2　温度极化

在 MD 中，温度极化现象同样是一个重要且难以规避的问题。本质上，温度极化描述了 MD 过程中进料液本体与膜界面温度存在差异的现象。在 MD 传热过程中，热量先由温度较高的进料液本体以热对流的方式传递到进料侧的膜表面，进料液中的水分子在膜表面汽化时会吸收膜附近的热量，造成了进料侧膜表面温度低于进料液主体温度[36]。水蒸气分子穿过膜孔达到渗透侧冷凝放热，进而以热对流的方式传递到冷侧主体溶液，因此冷侧膜表面温度高于主体溶液温度。如此产生的温度差使得膜两侧产生温度边界层，进而在膜表面与进料液主体之间形成一定的温度分布，这种现象称为温度极化，如图 4 所示[37]。根据 Antoine 方程，进料液温度与蒸汽压之间呈指数关系[38-39]，因此温度的下降会导致蒸汽压差的大幅度变化，这会降低 MD 的传质驱动力，将严重减少膜的渗透通量。有研究表明随着温度极化的发生，驱动力的降低将导致水蒸气传质减少 50～80%[40]。温度极化效应会导致膜两侧的温度梯度降低，造成通量不稳定，降低了能源的使用效率，这使得温度极化成为 MD 大规模商业化的主要绊脚石之一。

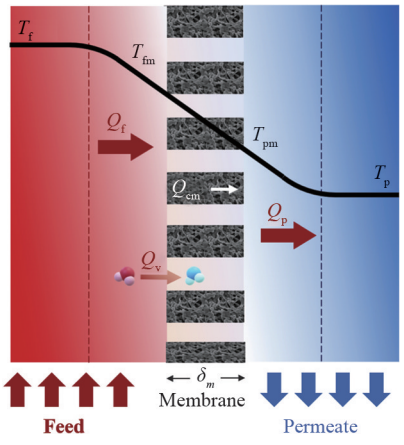


图 4　直接接触膜蒸馏中传热与温度极化示意图[37]

Fig. 4　Schematic diagram of heat transfer and temperature polarization in direct contact membrane distillation[37]

2　MD 领域微孔膜研究进展

由于 MD 以蒸汽压差驱动的独特机制，以及其更高的盐度处理极限，能够处理成分更复杂、污染物浓度更高的进料液的独特优势，使得膜污染与温度极化现象在膜蒸馏过程中广泛存在。这些状况，造就了在现实应用场景下，膜蒸馏长期性能的不稳定性以及膜使用寿命问题。针对 MD 过程中出现的膜污染与温度极化，当前对于膜本体的研究中主要通过赋予膜表面特殊润湿性以提高膜的抗污染能力，而在降低或消除温度极化方面，相对于对膜本体的改性，对膜表面进行限域加热的方法更加令人津津乐道。

2.1　超疏水膜

通过对荷叶表面的观察，启发了人们对超疏水表面的研究[41]。超疏水表面被定义为水接触角大于 150° 的表面，超疏水表面通过表面的粗糙结构捕获空气，在膜表面形成 Cassie-Baxter 润湿状态[42-43]。荷叶表面的超疏水性与自清洁性来源于其表面的乳突状蜡质结构，这为人们提供了一个可行的方向，即超疏水表面是低表面能与足够粗糙的表面结构的组合[44]。将类似于荷叶表面的结构载入到疏水微孔膜的表面是现实可行的，超疏水表面的引入赋予了疏水膜自清洁能力，特殊的润湿状态有力地增强了膜的抗污染能力。基于仿生学设计超疏水膜通常是一种喜闻乐见的方法[45]。SHAN 等[46]通过聚多巴胺涂层与银纳米颗粒在 PVDF 膜表面设计了类似于荷叶表面的结构，成功使膜的水接触角由 126.1°提升至 167.6°。从表面化学改性[47]、纳米材料涂层[48]、气相化学沉积[49]到静电纺丝[50]、等离子刻蚀[51]、光刻蚀[52]等方法都能够被用于超疏水膜的制造。在实践中，均相聚合物膜受膜污染与温度极化的影响无法满足 MD 的产业化需要。利用含氟物质对微孔疏水膜功能化能够有效降低膜的表面能，但仅改变膜的表面能无法达到令人满意的接触角。显然，在超疏水表面的制造中，膜表面的粗糙结构设计有着更高的贡献。形成超疏水表面的重点在于制造合适的微纳米结构，当下常常将 SiO_2[53]、TiO_2[54]等颗粒以及碳纳米管[55]、氧化石墨烯[56]等纳米材料用于微纳结构的

制备。在LI等[57]的一项研究中使用聚多巴胺纳米颗粒(PDANP)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)对聚偏氟乙烯(PVDF)膜进行疏水改性,在使用真空膜蒸馏处理含有碳酸钙的进料液时,改性膜在24 h的测试中表现出稳定的通量与截盐率,而PVDF原膜的通量下降至初始时的68.09%,截盐率亦出现严重下降。这表明超疏水表面的疏水层级结构与气隙,能够有效减少液体与膜表面的相互作用,从而降低污染物与膜体的接触概率[57]。同时较低的表面能是在膜表面成核的不利因素,超疏水膜表面的结晶生长也会受到限制[58],超疏水膜在应对抗结垢问题时往往能够有更加亮眼的表现。尽管如此,在长期的MD运行中,膜表面也会因为油滴在膜表面的积累和低表面张力物质的附着,使膜被污染和润湿。

2.2 超双疏膜

对于MD来说,膜润湿是一个相当严重的问题。在膜润湿发生时,进料液能够轻易地通过被润湿的膜孔到达渗透测,当疏水微孔膜失去隔绝进料液与渗透液的能力时,在MD机理层面MD失效,在大多数MD失效的情况中膜润湿是主要元凶。因此,设计具有超双疏表面的膜相当重要,超双疏表面无论对于低表面能液体还是高表面能液体都能产生优异的排斥性,是解决膜润湿问题的可行解决方案[59-60]。与超疏水表面类似,超双疏表面的形成依赖特殊的凹入结构与低表面能。构造凹入结构是超双疏膜制造的核心。凹入结构指切面投影面积从上到下依次减小的特殊粗糙结构[61],当液面接触凹入结构间的气穴时,液面向下凹入气穴,使界面间的静牵引力指向远离膜表面的方向[62],极大增强了膜的抗浸润能力。超双疏膜拥有更强的气穴捕获能力与保持能力,这使得在长时间的MD过程中,超双疏膜能够更好地被表面气穴甚至是气层保护。

自从这种对低表面能液体有显著排斥的表面被发现以来,在低表面能与凹入结构相结合的策略指导下,利用静电纺丝[63]、气相刻蚀、反向压印光刻[63]、原子层沉积[64]等方法在各种材料表面成功制备了超双疏表面。基于超双疏膜在抗润湿方面的优异表现,已经有相当多的研究报道了用于MD的超双疏膜。通过静电相互作用或化学沉积的方式,将纳米颗粒固定在膜表面,是一种制备超双疏膜的经典方法,比如LI等[65]以均苯三甲酰氯为桥梁将硅纳米颗粒结合到PVDF膜表面,制得了坚固的超双疏膜,水、二碘甲烷与乙二醇在膜表面都能够表现出超过150°的高接触角,并且处理焦化废水120 h后,超双疏膜的通量仅出现了6.2%的下降,而PVDF膜的通量则下降了65.3%。静电纺丝是一种制造超双疏膜的理想方法。CHUL WOO等[66]通过静电纺丝与CF_4等离子体处理相结合的手段开发了超双疏膜,通过15 min的等离子体处理,将膜的水接触角由133.6°提高至160.6°,并对甲醇、矿物油等低表面能液体展现出优异的排斥性。同时纺丝产生的纤维网络结构为制造凹入结构提供了天然的有利条件,可以将二氧化硅颗粒等纳米材料在静电纺丝膜表面沉积来获得凹入结构[67]。DIZGE等[68]在电纺得到的纤维素纳米纤维膜上以溶胶-凝胶法在纤维表面生长SiNPs,并通过化学气相沉积降低其表面能,成功制得了超双疏膜,在以直接接触膜蒸馏处理含有高达0.4 mmol/L十二烷基硫酸钠的进料液时超双疏膜保持了稳定的渗透通量与优异的截盐率,而作为对比的PVDF膜与PTFE膜则出现了不同程度的润湿。超双疏膜凭借其独特的凹入结构,有效增强了面对低表面能污染物时的抗浸润性能。在处理含有十二烷基硫酸钠(SDS)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)等表面活性剂的进料液时,能够在很长时间内保持稳定的MD性能。在一些研究中,人们发现超双疏膜在处理由表面活性剂乳化的油/水乳液时,表现出极佳的抗油污性能,这是由于在油/水界面上附着了大量表面活性剂,表面活性剂的亲水头部朝向外侧,在很大程度上隔绝了油滴与膜表面的疏水-疏水相互作用[69]。然而,超双疏膜在处理未经表面活性剂处理的含油进料液时,由于油滴与膜表面发生疏水-疏水相互作用,尽管凹入结构的存在阻止了膜孔的润湿,但超双疏膜表面依然会受到严重污染。

2.3 Janus膜

对于抵抗油滴等非极性污染物,构造膜两侧具有非对称浸润性的Janus膜是一种行之有效的方法。在疏水微孔膜表面构造亲水层,在与水接触时,膜表面的亲水基团与水分子间形成氢键,从而在膜表面产生水合层。水合层在膜表面起着屏障的作用,能够阻止非极性污染物向膜表面的传输[70],油滴等非极性污染物若想扩散到膜表面则需要极大的能量来破坏水合层[71]。对膜的亲水改性往往有利于膜蒸馏性能的提升。制备能够用于MD的Janus膜最简单直接的方法是在疏水基质上制备亲水层[72],通过将一些亲水颗粒或大分子以喷涂、抽滤或涂覆等方式结合到疏水膜表面,即可得到Janus膜。JIA等[73]通过顺序电喷涂的方式制备了具有超亲水表面的Janus膜,并且拥有水下超疏油特性。这种特性使其能够抵御0.3 mmol/L SDS的润湿,且在处理盐水包油乳液的膜蒸馏测试时,在长达10 h的时间里不被污染。这类方法通常需要多个步骤,并且分层问题在许多文献中被提及。一体化膜被认为能够改善亲/疏水界面的结合力,进而避免分层现

象的发生。在亲水层厚度适宜时，亲水层的存在使部分进料液能够在膜孔中蒸发，这扩大了水分子汽化的有效面积，有助于提高传质[74]。基于相转化时不同聚合物在凝固浴中的相转化速度不同，能够通过不同聚合物的相分离制备一体化的 Janus 膜，例如 LIU 等[75]采用热致相分离制备了 PVDF-PVA 一体化 Janus 膜。与之类似，在含有至少 2 种物质的复合铸膜液中，不同物质在凝固浴中存在溶解度差异，在相转化过程中一些物质会出现向界面迁移的现象，如此亦能制得一体化、具有不同润湿性的 Janus 膜[76-77]。一种极具潜力的方法是将亲水层构筑在渗透侧，BHADRA 等[78]通过在渗透测构建碳纳米管亲水层使膜拥有了高达 121 kg/(m^2 · h)的渗透通量，其通量相比于没有亲水层的膜增加了 37%，在渗透侧的亲水层能够通过加速冷凝解吸附的方式，促进水蒸气传质。

毫无疑问，Janus 膜在处理含油废水与含有低表面能液体的进料液时有着更高的效率和使用寿命，应用潜力极高。正如同 Janus 膜会在不同表面展现截然不同的特性一样，Janus 膜在 MD 中的应用同样是利弊共存的，除了 Janus 膜自身易发生的分层、堵孔等缺陷，更加值得注意的是，Janus 膜的亲水表层使得无机盐能够进入亲水层，在其膜孔内结晶，这可能造成更加严重的膜结垢现象。

2.4　限域加热

MD 的传热驱动力来源于膜两侧温差，在 MD 过程中会难以避免地出现温度损失，发生温度极化现象，严重降低 MD 的工作效率。为了消除温度极化现象，对膜或膜附近的水体进行限域加热的方法得到了广泛关注[79-80]。通过对膜表面或膜附近的进料液加热的方式，补充因为散热或汽化潜热损失的热量维持膜表面的温度，这种主动的加热使温度极化现象得以减弱，并有可能带来更高的渗透通量。限域加热技术主要聚焦于光热加热[81]、电热加热[82-83]、微波加热以及感应加热[84]4 种方法。

电热加热技术主要借助电流在通过导电材料时产生的焦耳效应以加热膜表面，使膜表面保持较高的温度来减少温度极化。DUDCHENKO 的团队首先将电热加热用于膜蒸馏[85]，其利用碳纳米管膜作为导电材料对高盐进料液进行加热，但在足够加热的电压下碳纳米管膜并不稳定。因此，坚固可靠的膜蒸馏膜与合适的操作参数(电压和频率等)是电热加热技术中的 2 个关键部分。AHMED 等[82]将导电碳纳米结构(CNS)层涂覆在聚丙烯膜表面制成了一种导电复合膜，通过对膜施加 24 V 的交流电，当进料液温度在 40 ℃时，复合膜的平均通量相比于基膜提升了将近 75%。这无疑为解决温度极化问题提供了一种新途径，但在膜系统设计、提升能量利用率及操作参数的优化上存在较大的改进空间。

微波加热是常见的一种加热方法。微波是一种电磁辐射，一些物质能够吸收这些电磁辐射中的能量并将其转化为热量。ROY 等[86]将微波加热与膜蒸馏结合开发了微波诱导膜蒸馏技术(MIMD)。利用微波对进料液进行加热，这种新型膜蒸馏技术与传统膜蒸馏相比其通量增加了 52%，研究人员将通量的增加归结于非热效应的出现破坏了与氢键相连的咸水团簇。在他们的另外一项研究中，使用碳纳米管固定化膜处理含碳酸钙、硫酸钙与硫酸钡的进料液，与常规膜蒸馏相比，在微波加热的过程中膜表面的结垢减少了 50%～79%[87]。在结垢显著减少的同时，研究发现 MIMD 过程中产生的结垢颗粒小于常规膜蒸馏。

电磁感应加热依托于交变磁场在穿过导电材料时产生的涡流而开发，涡流在消散的过程中会转化为热能从而实现对膜表面的加热。ANVARI 等[88]通过在聚四氟乙烯膜上喷涂氧化铁-碳纳米管涂层制备了一种用于真空膜蒸馏的高频磁场自加热膜，通过 283 kHz 频率的线圈对膜进行加热，在较低的进料流速(2.33 cm/min)下达到了 4 kg/(m^2 · h)的较高通量。与传统的真空膜蒸馏相比显著提升了渗透通量并降低了比热能消耗。QING 等[89]将铁的氧化物与导电聚合物聚苯胺(PANI)混合，基于聚四氟乙烯膜制成了电磁感应膜，这使得膜拥有了高达 88%的热效率，而一般电磁感应膜的热效率仅为 20%～58%。另外，文中表明，提升渗透测流速与电磁感应功率有利于通量的提升，而提升进料液流速则会降低渗透通量，这与水/膜的接触时间降低有关。ANVARI 等[90]报道了感应加热技术有利于缓解硫酸钙在膜表面结垢，认为这是在高频磁场的作用下进料液中离子的高频运动与相互碰撞的结果。

近年来，低能量输入的光热加热技术广受青睐。光热加热方法的核心是将金属纳米材料、碳基材料等具有较高光热吸收效率的材料负载于膜表面，在吸收特定波长的光后，将光能转化为热能[91]，从而达到对膜表面及其附近的进料液限域加热的作用。光热转化 MD 技术是一种新型绿色的淡水回收技术，光能的介入减少了能源的消耗，这或许是光热 MD 受到青睐的原因之一。金属纳米颗粒在特定波长下产生的热等离子体效应，能够对 MD 性能产生惊人的影响。POLITANO 等[92]通过在聚偏氟乙烯膜中加入金纳米颗粒，在紫外线的照射下使渗透通量提高 11 倍。碳基材料非常利于光热转化，石墨烯、碳纳米管、炭黑等碳基材料由于

能够对光进行广谱吸收，因而经常被用于制造各种光热转化材料。CHEN等[93]借助聚多巴胺将炭黑固定在PVDF膜上，在仅有一个太阳光照的情况下，渗透通量增加了54.9%。聚多巴胺这种类黑色素新型材料，在光热转化方面同样极具潜力。WU等[94]将聚多巴胺负载到PVDF膜上，以其优异的光吸收能力，在消除了温度极化的同时增加了蒸汽的传质驱动力，渗透通量对比基膜增长了惊人的19倍。在当前节能减排的大背景下，将太阳能这种可再生能源用于对MD的限域加热，不仅是解决温度极化、增进传质驱动力的有效手段，更为减少海水淡化造成的碳排放以及降低海水淡化成本提供了新思路。

3 问题与展望

在淡水资源日益短缺的现实背景下，在碳达峰、碳中和的时代愿景下，如何发展一种低能耗、低碳排放、经济可行的海水淡化技术，实现海水淡化的高效率低成本化，是全世界面临的科学技术挑战。现行的能够大规模海水淡化的技术，大多伴随着较高的能量消耗，相比之下能够利用低品位热能和可再生资源淡化高盐水体，且有望实现经济可持续淡水规模化生产的MD技术，在目前的时代背景下更具实用性。虽然MD技术在海水淡化方面的应用极具潜力，但正如上文所述，膜污染与温度极化2个问题严重阻滞了MD的规模化应用。作为MD技术的核心部件，开发新型的MD膜以解决膜污染与温度极化一直是MD技术进步的重心之一，当下人们主要从改变膜表面润湿性与限域加热等方向分别解决膜污染与温度极化，但依然存在一些亟待解决的问题。

1)当前，无论是超疏水、超双疏还是Janus膜，对于膜污染的抵抗均未达到万无一失的效果，即便能够有效抵抗膜污染，其亦无法逃脱温度极化带来的负面影响。同样，限域加热虽然能有效解决温度极化问题，但膜污染现象仍无法避免，从而使膜蒸馏性能的长期稳定性受到挑战。

2)MD技术往往需要应对成分复杂的自然水体或工业废水，需要面对种类繁杂的有机污染、生物污染与无机盐结构，这将在膜表面造成更加复杂的污染，对混合污染的研究应当得到重视。

3)当前大多数对膜蒸馏膜进行改进的工作，往往伴随十分复杂的制备工艺，对于大规模应用相当不利，简单高效的工艺对于推进膜蒸馏技术的发展更加具有实际意义。

4)在实际应用中，面对水流的冲刷，基体与涂层之间的稳定性往往会受到挑战，这在特殊润湿性表面的改性膜中是广泛存在的问题。因此，未来对于表面改性膜涂层稳健性的研究是十分必要的。

综上，在当前水资源短缺加剧、节能减排的大环境下，迫切需要研发MD效率更高、抗污染能力更强、能源消耗更小的新型MD膜。制备有限域加热功能的特殊表面润湿性MD膜将成为未来研究的重要方向，在此思路下结合现状分析，其重点主要为以下几方面。

1)选用高导热/高光吸收的材料制造有限域加热功能并具有特殊润湿性表面的MD膜，在MD运行时辅以光热限域加热，同时增强膜的抗污染性、光吸收性和传质推动力，在有力抵抗污染的同时消除温度极化。

2)在光热辅助MD中具有不对称润湿性的Janus膜是一个比较理想的选择，其适应具有多元污染物的进料液，表面高导热性与光吸收性的亲水层有利于传质驱动力的保持与水通量的提升。

3)通过相转化构筑一体化、具有高导热/光吸收性亲水层的Janus膜，在增强膜的抗污染性、消除温度极化、增强传质推动力的同时提升膜的间层稳定性。Janus膜在膜蒸馏过程中的无机盐结垢现象也将得到缓解，基于相转化的一体化构筑方法对MD膜的规模化生产非常有利。

参考文献/References：

[1] ZENG Zhao，LIU Junguo，SAVENIJE H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality[J]. Ecological Indicators，2013，34：441-449.

[2] 宋立全. 生态文明视野下的水资源保护及利用途径[J]. 长江技术经济，2022，6(sup1)：17-19.
SONG Liquan. Water rources protection under the perspective of ecological civilization and the way to use[J]. Technlogy and Economy of Changjiang，2022，6(sup1)：17-19.

[3] HOSSEINZADEH A，ZHOU J L，ALTAEE A，et al. Effective modelling of hydrogen and energy recovery in microbial electrolysis cell by artificial neural network and adaptive network-based fuzzy inference system[J]. Bioresource Technology，2020，316. DOI：10.1016/j.biortech.2020.123967.

[4] LI Xiong，YU Xufeng，CHENG Cheng，et al. Electrospun superhydrophobic organic/inorganic composite nanofibrous membranes for membrane distillation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2015，7(39)：21919-21930.

[5] QU Mengnan，ZHAO Yue，GE Jianwei，et al. Multi-Functional Janus hollow solar evaporator based on copper foam for non-contact high-efficiency solar interfacial distillation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2023，15(30)：36999-37010.

[6] YUE Dongmin，LI Bingbing，SUN De，et al. Electrochemically prepared coniferous leaf-like nickel black membrane for desalination by solar-thermal energy conversion[J]. Nano Research，2023，16(7)：10358-10368.
[7] ARUNKUMAR T，WILSON H M，LIM H W，et al. Peanut shell-derived photothermal absorber for solar desalination[J]. Desalination，2023，565. DOI：10. 1016/j. desal. 2023. 116901.
[8] MA Jie，ZHAI Chunxiao，YU Fei. Review of flow electrode capacitive deionization technology：Research progress and future challenges[J]. Desalination，2023，564. DOI：10. 1016/j. desal. 2023. 116701.
[9] 吴浩，庞义炜，成怀刚，等. 海水淡化用碳基电极材料及电容去离子技术研究进展[J]. 化学通报，2022，85(8)：898-908.
WU Hao，PANG Yiwei，CHENG Huaigang，et al. Carbon-based electrode materials and capacitive deionization technology for seawater desalination[J]. Chemistry，2022，85(8)：898-908.
[10] DESHMUKH A，BOO C，KARANIKOLA V，et al. Membrane distillation at the water-energy nexus：Limits，opportunities，and challenges [J]. Energy & Environmental Science，2018，11(5)：1177-1196.
[11] HENDERYCKX Y. Diffusion doublet research[J]. Desalination，1967，3(2)：237-242.
[12] HOU Youmin，SHAH P，CONSTANTOUDIS V，et al. A super liquid-repellent hierarchical porous membrane for enhanced membrane distillation[J]. Nature Communications，2023，14(1). DOI：10. 1038/s41467-023-42204-7.
[13] ABDELRAZEQ H，KHRAISHEH M. Porosity effect of polystyrene membranes on desalination performance：A combined experimental and numerical heat and mass transfer study in direct contact membrane distillation [J]. Polymers，2023，15 (8). DOI：10. 3390/polym15081821.
[14] KUANG Zhengfei，LONG Rui，LIU Zhichun，et al. Analysis of temperature and concentration polarizations for performance improvement in direct contact membrane distillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2019，145. DOI：10. 1016/j. ijheatmasstransfer. 2019. 118724.
[15] JU Jingge，FEJJARI K，CHENG Yi，et al. Engineering hierarchically structured superhydrophobic PTFE/POSS nanofibrous membranes for membrane distillation[J]. Desalination，2020，486. DOI：10. 1016/j. desal. 2020. 114481.
[16] SHAFFER D L，ARIAS CHAVEZ L H，BEN-SASSON M，et al. Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water：Drivers，technologies，and future directions[J]. Environmental Science & Technology，2013，47(17)：9569-9583.
[17] DONG Chuanshuai，HUANG Yang，ZHANG Lizhi. Slug flow-enhanced vacuum membrane distillation for seawater desalination：Flux improvement and anti-fouling effect[J]. Separation and Purification Technology，2023，320. DOI：10. 1016/j. seppur. 2023. 124178.
[18] SHAHU V T，THOMBRE S B. Air gap membrane distillation：A review[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy，2019，11(4). DOI：10. 1063/1. 5063766.
[19] SAID I A，CHOMIAK T，FLOYD J，et al. Sweeping gas membrane distillation (SGMD) for wastewater treatment，concentration，and desalination：A comprehensive review[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification，2020，153. DOI：10. 1016/j. cep. 2020. 107960.
[20] ALKHUDHIRI A，DARWISH N，HILAL N. Membrane distillation：A comprehensive review[J]. Desalination，2012，287：2-18.
[21] RÁCZ G，KERKER S，KOVÁCS Z，et al. Theoretical and experimental approaches of liquid entry pressure determination in membrane distillation processes[J]. Periodica Polytechnica Chemical Engineering，2014，58(2)：81-91.
[22] ZOU Dong，LEE Y M. Design strategy of poly (vinylidene fluoride) membranes for water treatment[J]. Progress in Polymer Science，2022，128. DOI：10. 1016/j. progpolymsci. 2022. 101535.
[23] ZHANG Wei，YU Shuili，LI Ping，et al. Preparation Janus membrane via polytetrafluoroethylene membrane modification for enhanced performance of vacuum membrane distillation desalination[J]. Separation and Purification Technology，2023，313. DOI：10. 1016/j. seppur. 2023. 123465.
[24] GRYTA M. Application of polypropylene membranes hydrophilized by plasma for water desalination by membrane distillation[J]. Desalination，2021，515. DOI：10. 1016/j. desal. 2021. 115187.
[25] HORSEMAN T，YIN Yiming，CHRISTIE K S，et al. Wetting，scaling，and fouling in membrane distillation：State-of-the-art insights on fundamental mechanisms and mitigation strategies[J]. ACS ES & T Engineering，2020，1(1)：117-140.
[26] WANG Peizhi，CHENG Wei，ZHANG Xiaolei，et al. Engineering a protective surface layer to resist membrane scaling and scale-induced wetting in membrane distillation for the treatment of hypersaline wastewater[J]. Chemical Engineering Journal，2023，452. DOI：10. 1016/j. cej. 2022. 139167.
[27] SHAFFER D L，TOUSLEY M E，ELIMELECH M. Influence of polyamide membrane surface chemistry on gypsum scaling behavior[J]. Journal of Membrane Science，2017，525：249-256.
[28] TIJING L D，WOO Y C，CHOI J S，et al. Fouling and its control in membrane distillation—a review[J]. Journal of Membrane Science，2015，475：215-244.
[29] TONG Tiezheng，WALLACE A F，ZHAO Song，et al. Mineral scaling in membrane desalination：Mechanisms，mitigation strategies，and feasibility of scaling-resistant membranes[J]. Journal of Membrane Science，2019，579：52-69.
[30] GRYTA M. Fouling in direct contact membrane distillation process[J]. Journal of Membrane Science，2008，325(1)：383-394.
[31] MENG Yuchuan，ZHONG Qiao，LIU Yujie，et al. Evaluating membrane cleaning for organic fouling in direct contact membrane distillation [J]. Journal of Cleaner Production，2023，410. DOI：10. 1016/j. jclepro. 2023. 137319.
[32] WANG Xitong，LI Pan，YE Yubing，et al. Modification of the distribution of humic acid complexations by introducing microbubbles to membrane distillation process for effective membrane fouling alleviation[J]. Journal of Environmental Management，2023，348. DOI：10. 1016/j. jenvman. 2023. 119171.
[33] TANG Min，HOU Deyin，DING Chunli，et al. Anti-oil-fouling hydrophobic-superoleophobic composite membranes for robust membrane distillation performance[J]. The Science of the Total Environment，2019，696. DOI：10. 1016/j. scitotenv. 2019. 133883.
[34] WANG Zhangxin，CHEN Yuanmiaoliang，SUN Xiangming，et al. Mechanism of pore wetting in membrane distillation with alcohol vs. surfactant[J]. Journal of Membrane Science，2018，559：183-195.
[35] KIM J，KIM H W，TIJING L D，et al. Elucidation of physicochemical scaling mechanisms in membrane distillation (MD)：Implication to

the control of inorganic fouling[J]. Desalination,2022,527. DOI: 10.1016/j.desal.2022.115573.
[36] MANAWI Y M,KHRAISHEH M A M M,FARD A K,et al. A predictive model for the assessment of the temperature polarization effect in direct contact membrane distillation desalination of high salinity feed[J]. Desalination,2014,341:38-49.
[37] YUN Yanbin,MA Runyu,ZHANG Wenzhen,et al. Direct contact membrane distillation mechanism for highconcentration NaCl solutions [J]. Desalination,2006,188(1/3):251-262.
[38] SRISURICHAN S,JIRARATANANON R,FANE A J. Mass transfer mechanisms and transport resistances in direct contact membrane distillation process[J]. Journal of Membrane Science,2006,277(1/2):186-194.
[39] ABU-ZEID M A E R,ZHANG Yaqin,DONG Hang,et al. A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique[J]. Desalination,2015,356:1-14.
[40] ANVARI A,AZIMI YANCHESHME A,KEKRE K M,et al. State-of-the-art methods for overcoming temperature polarization in membrane distillation process:A review[J]. Journal of Membrane Science,2020,616. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118413.
[41] XU Shuangshuang,WANG Qing,WANG Ning. Chemical fabrication strategies for achieving bioinspired superhydrophobic surfaces with micro and nanostructures:A review[J]. Advanced Engineering Materials,2021,23(3). DOI: 10.1002/adem.202001083.
[42] BARGHI F,ENTEZARI M,CHINI S F,et al. Effect of initial wetting state on plastron recovery through heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,156. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119705.
[43] RAJAK A,RÜHE J. High hysteresis suspended wetting state:A wetting regime for controlled trapping of drops on micro-trench covered surfaces[J]. Advanced Materials Interfaces,2022,9(28). DOI: 10.1002/admi.202201018.
[44] GOHARSHENAS MOGHADAM S,PARSIMEHR H,EHSANI A. Multifunctional superhydrophobic surfaces[J]. Advances in Colloid and Interface Science,2021,290. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102397.
[45] 包康,景宜,亓健伟. 仿生水稻叶各向异性聚偏氟乙烯超疏水膜的构建及性能研究[J]. 应用化工,2023,52(1):78-85.
BAO Kang,JING Yi,QI Jianwei. Construction and properties of bionic rice leaf anisotropic polyvinylidene fluoride superhydrophobic membrane[J]. Applied Chemical Industry,2023,52(1):78-85.
[46] SHAN Huiting,LIU Jun,LI Xipeng,et al. Nanocoated amphiphobic membrane for flux enhancement and comprehensive anti-fouling performance in direct contact membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science,2018,567:166-180.
[47] LI Meng,CAO Yang,ZHANG Xuan. Hierarchically structurednanoparticle-free omniphobic membrane for high-performance membrane distillation[J]. Environmental Science & Technology,2023,57(14):5841-5851.
[48] CAO Han,MAO Yanpeng,WANG Wenlong,et al. ZIF-8 based dual scale superhydrophobic membrane for membrane distillation[J]. Desalination,2023,550 10.1016/j.desal.2023.116373.
[49] SU Chunlei,HORSEMAN T,CAO Hongbin,et al. Robust superhydrophobic membrane for membrane distillation with excellent scaling resistance[J]. Environmental Science & Technology,2019,53(20):11801-11809.
[50] WANG Xue,WANG Huanyuan,SUN Yingying,et al. Preparation of highly adhesion hydrophobic membrane and superhydrophobic membrane via electrospinning[J]. Advanced Engineering Materials,2023,25(24). DOI: 10.1002/adem.202300806.
[51] IOANNOU D,HOU Youmin,SHAH P,et al. Plasma-induced superhydrophobicity as a green technology for enhanced air gap membrane distillation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2023,15(14):18493-18504.
[52] AZEEM M A,LAWAL D U,AL ABDULGADER H,et al. Enhanced performance of superhydrophobic polyvinylidene fluoride membrane with sandpaper texture for highly saline water desalination in air-gap membrane distillation[J]. Desalination,2022,528 10.1016/j.desal.2022.115603.
[53] GUO Hanyu,GAO Haifu,YAN An,et al. Treatment to surfactant containing wastewater with membrane distillation membrane with novel sandwich structure[J]. Science of the Total Environment,2023,867. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161195.
[54] WU Xunhui,LIEW Y K,LIM W M,et al. Blood compatible and noncytotoxic superhydrophobic graphene/titanium dioxide coating with antibacterial and antibiofilm properties[J]. Journal of Applied Polymer Science,2023,140(11). DOI: 10.1002/app.53629.
[55] YANG Yi,FAN Xinfei,XU Yuanlu,et al. A superhydrophobic carbon nanotube hollow fiber membrane for electrically self-heating membrane distillation[J]. Desalination,2022,541 10.1016/j.desal.2022.116044.
[56] MAO Yangyang,HUANG Qingbo,MENG Baochun,et al. Roughness-enhanced hydrophobic graphene oxide membrane for water desalination via membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science,2020,611 10.1016/j.memsci.2020.118364.
[57] LI Chang,LIU Wenli,MAO Jiaming,et al. Superhydrophobic PVDF membrane modified by dopamine self-polymerized nanoparticles for vacuum membrane distillation[J]. Separation and Purification Technology,2023,304. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122182.
[58] SUNNY S,VOGEL N,HOWELL C,et al. Lubricant-Infused nanoparticulate coatings assembled bylayer-by-layer deposition[J]. Advanced Functional Materials,2014,24(42):6658-6667.
[59] 李建国. 超双疏复合膜的制备及用于膜蒸馏处理焦化废水的研究[D]. 太原:山西大学,2018.
LI Jianguo. Preparation ofComposite Membrane with superamphiphobic Properties for Coking Wastewater Treatment by Membrane Distillation[D]. Taiyuan:Shanxi University,2018.
[60] ZHAO Yurong,XING Xing,XU Congbin,et al. ZnO nanorod induced omniphobic polypropylene membrane for improved antiwetting performance in membrane distillation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2022,61(17):5963-5970.
[61] WANG Liming,MCCARTHY T J. Covalently attached liquids:Instant omniphobic surfaces with unprecedented repellency[J]. Angewandte Chemie International Edition,2016,55(1):244-248.
[62] CHEN L H,CHEN Yirui,HUANG A,et al. Nanostructure depositions on alumina hollow fiber membranes for enhanced wetting resistance during membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science,2018,564:227-236.
[63] LU Nan,YAN Lijuan,MA Yingjiao,et al. Electrospun modified SiO2 nanofiber membranes as superamphiphobic self-cleaning filters with high heat stability for efficient particle matter capture[J]. ACS Applied Nano Materials,2022,5(7):9871-9881.
[64] FENG Shasha,ZHONG Zhaoxiang,ZHANG Feng,et al. Amphiphobic polytetrafluoroethylene membranes for efficient organic aerosol removal[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2016,8(13):8773-8781.

[65] LI Jianfeng，GUO Shujuan，XU Zhaozan，et al. Preparation of omniphobic PVDF membranes with silica nanoparticles for treating coking wastewater using direct contact membrane distillation：Electrostatic adsorption vs. chemical bonding[J]. Journal of Membrane Science，2019，574：349-357.

[66] CHUL WOO Y，CHEN Ying，TIJING L D，et al. CF4 plasma-modified omniphobic electrospun nanofiber membrane for produced water brine treatment by membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2017，529：234-242.

[67] WANG Zhangxin，ELIMELECH M，LIN Shihong. Environmental applications of interfacial materials with special wettability[J]. Environmental Science & Technology，2016，50(5)：2132-2150.

[68] DIZGE N，SHAULSKY E，KARANIKOLA V. Electrospun cellulose nanofibers for superhydrophobic and oleophobic membranes[J]. Journal of Membrane Science，2019，590. DOI：10.1016/j.memsci.2019.117271.

[69] WANG Zhangxin，LIN Shihong. Membrane fouling and wetting in membrane distillation and their mitigation by novel membranes with special wettability[J]. Water Research，2017，112：38-47.

[70] HAN Minyuan，DONG Ting，HOU Deyin，et al. Carbon nanotube based Janus composite membrane of oil fouling resistance for direct contact membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2020，607. DOI：10.1016/j.memsci.2020.118078.

[71] ANJALI DEVI D，SMITHA B，SRIDHAR S，et al. Pervaporation separation of isopropanol/water mixtures through crosslinked chitosan membranes[J]. Journal of Membrane Science，2005，262(1/2)：91-99.

[72] KIM D，PARK A，CHOI Y，et al. Facile fabrication of Janus membranes with antifouling properties for membrane distillation[J]. ACS Applied Polymer Materials，2023，5(10)：8474-8482.

[73] JIA Wei，KHARRAZ J A，SUN Jiawei，et al. Hierarchical Janus membrane via a sequential electrospray coating method with wetting and fouling resistance for membrane distillation[J]. Desalination，2021，520. DOI：10.1016/j.desal.2021.115313.

[74] LI Meng，LU Kangjia，WANG Lianjun，et al. Janus membranes with asymmetric wettability via a layer-by-layer coating strategy for robust membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2020，603. DOI：10.1016/j.memsci.2020.118031.

[75] LIU Yanfei，XIAO Tonghu，BAO Chenghuan，et al. Fabrication of novel Janus membrane by nonsolvent thermally induced phase separation (NTIPS) for enhanced performance in membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2018，563：298-308.

[76] ZHU Zhigao，LIU Zhiquan，ZHONG Lingling，et al. Breathable and asymmetrically superwettable Janus membrane with robust oil-fouling resistance for durable membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2018，563：602-609.

[77] SONG Haiming，CHEN Cheng，SHUI Xiaoxue，et al. Asymmetric Janus membranes based on in situ mussel-inspired chemistry for efficient oil/water separation[J]. Journal of Membrane Science，2019，573：126-134.

[78] BHADRA M，ROY S，MITRA S. A bilayered structure comprised of functionalized carbon nanotubes for desalination by membrane distillation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2016，8(30)：19507-19513.

[79] LOKARE O R，TAVAKKOLI S，KHANNA V，et al. Importance of feed recirculation for the overall energy consumption in membrane distillation systems[J]. Desalination，2018，428：250-254.

[80] 李璟孜. 基于石墨烯-MOF 材料的光热膜蒸馏过程的分离性能及 VOCs 脱除研究[D]. 上海：东华大学，2023.
LI Jingzi. SeparationPerformance and VOCs Removal of Graphene-MOF Materials in the Photothermal Membrane Distillation Process [D]. Shanghai：Donghua University，2023.

[81] ALMARZOOQI N，HONG S，VERMA P，et al. Photothermal surface heating membrane distillation using 3D-printed Ti3C2Tx MXene-based nanocomposite spacers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2023，15(17)：20998-21007.

[82] AHMED F E，LALIA B S，HASHAIKEH R，et al. Enhanced performance of direct contact membrane distillation via selected electrothermal heating of membrane surface[J]. Journal of Membrane Science，2020，610. DOI：10.1016/j.memsci.2020.118224.

[83] BOO C，ELIMELECH M. Carbon nanotubes keep up the heat[J]. Nature Nanotechnology，2017，12(6)：501-503.

[84] PAN Meilan，TAN Yongzen，CHEW J W. Superior membrane distillation by induction heating of 3D rGO/Nafion/Ni foam for water treatment[J]. Journal of Membrane Science，2020，616. DOI：10.1016/j.memsci.2020.118609.

[85] DUDCHENKO A V，CHEN Chuxiao，CARDENAS A，et al. Frequency-dependent stability of CNTjoule heaters in ionizable media and desalination processes[J]. Nature Nanotechnology，2017，12(6)：557-563.

[86] ROY S，HUMOUD M S，INTRCHOM W，et al. Microwave-induced desalination via direct contact membrane distillation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering，2018，6(1)：626-632.

[87] HUMOUD M S，INTRCHOM W，ROY S，et al. Reduction of scaling in microwave induced membrane distillation on a carbon nanotube immobilized membrane[J]. Environmental Science：Water Research & Technology，2019，5(5)：1012-1021.

[88] ANVARI A，KEKRE K M，AZIMI YANCHESHME A，et al. Membrane distillation of high salinity water by induction heated thermally conducting membranes[J]. Journal of Membrane Science，2019，589. DOI：10.1016/j.memsci.2019.117253.

[89] QING Weihua，HU Zhifeng，MA Qingquan，et al. Conductive Fe_3O_4/PANI@PTFE membrane for high thermal efficiency in interfacial induction heating membrane distillation[J]. Nano Energy，2021，89. DOI：10.1016/j.nanoen.2021.106339.

[90] ANVARI A，KEKRE K M，RONEN A. Scaling mitigation in radio-frequency induction heated membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2020，600. DOI：10.1016/j.memsci.2020.117859.

[91] PAN Zihe，MAO Yafei，AI Xin，et al. Photothermal membranes for water treatment and anti-fouling performances：A review[J]. Journal of Cleaner Production，2023，412. DOI：10.1016/j.jclepro.2023.137335.

[92] POLITANO A，ARGURIO P，DI PROFIO G，et al. Photothermal membrane distillation for seawater desalination[J]. Advanced Materials，2017，29(2). DOI：10.1002/adma.201603504.

[93] CHEN Yirui，XIN Ruikun，HUANG Xiaochuan，et al. Wetting-resistant photothermal nanocomposite membranes for direct solar membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science，2021，620. DOI：10.1016/j.memsci.2020.118913.

[94] WU Xuanhao，JIANG Qisheng，GHIM D，et al. Localized heating with a photothermal polydopamine coating facilitates a novel membrane distillation process[J]. Journal of Materials Chemistry A，2018，6(39)：18799-18807.