



DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0770

二硫化钼作为海水淡化材料的研究进展

郭其景¹, 詹伟泉¹, 王清森², 贾菲菲¹, 宋少先¹

(¹ 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; ² 瓜纳华托大学矿物、冶金与地质工程学部, 墨西哥 瓜纳华托 36000)

摘要: 海水淡化是从丰富的海水资源中提取清洁淡水的技术, 是解决淡水资源短缺的重要途径。传统的海水淡化技术在实际应用中已经暴露出高成本、高能耗和低效率等缺点, 因此开发海水淡化新兴技术及材料成为研究重点。二硫化钼 (MoS_2) 是典型层状过渡金属硫化物, 因其化学稳定、吸光能力优异等优点, 在海水淡化领域具有极大的应用前景。作为一种高效环保的海水淡化材料, MoS_2 及其复合材料在改善传统脱盐工艺和发展新兴脱盐技术中已得到广泛研究。本文主要论述和分析 MoS_2 基材料在电容去离子、膜脱盐及太阳能脱盐等海水淡化应用中的研究进展以及在工业化应用中面临的挑战, 并展望其今后在脱盐领域的发展方向。

关键词: 二硫化钼; 电容去离子; 膜脱盐; 太阳能脱盐

中图分类号: P747; X-1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613 (2021) 03-1456-13

Research progress of molybdenum disulfide as a material for seawater desalination

GUO Qijing¹, ZHAN Wei-quan¹, WANG Qing-miao², JIA Fei-fei¹, SONG Shao-xian¹

(¹ School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

² Department of Mines, Metallurgy and Geology Engineering, University of Guanajuato, Guanajuato 36000, Mexico)

Abstract: Seawater desalination is to extract clean fresh water from abundant seawater resources, being an important way to solve the shortage of fresh water resources. The traditional seawater desalination technologies strongly have exposed the shortcomings of high cost, high energy consumption and low efficiency in practical applications. Therefore, the development of new technologies and materials for desalination has become the focus of research. Molybdenum disulfide (MoS_2) is a typical layered transition metal sulfide. Because of its chemical stability and excellent light absorption capabilities, it has great application prospects in the field of seawater desalination. As an efficient and environmentally friendly seawater desalination material, MoS_2 has been extensively studied in improving traditional desalination processes and developing emerging desalination technologies. This article focused on the research progress of MoS_2 materials in the application of capacitive deionization, membrane desalination and solar desalination, as well as the challenges of MoS_2 in the industrialization of these three desalination technologies. The future development of MoS_2 materials in the field of desalination was also discussed.

Keywords: molybdenum disulfide; capacitive desalination; membrane desalination; solar desalination

收稿日期: 2020-05-09; 修改稿日期: 2020-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金 (51974216, 51704212, 51704220); 湖北省自然科学基金 (2019CFB536)。

第一作者: 郭其景 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为太阳能海水淡化。E-mail: guoqijing1120@163.com。

通信作者: 贾菲菲, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为矿物材料、水处理、湿法冶金。E-mail: feifeijia@whut.edu.cn。

引用本文: 郭其景, 詹伟泉, 王清森, 等. 二硫化钼作为海水淡化材料的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1456-1468.

Citation: GUO Qijing, ZHAN Wei-quan, WANG Qing-miao, et al. Research progress of molybdenum disulfide as a material for seawater desalination[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1456-1468.

淡水需求量和可利用量在时空分布上的不均衡造成了全球淡水资源短缺,并随着人口增长、城市扩张、工业化发展、气候变化和水环境恶化,淡水资源匮乏进一步加剧。目前,超过三分之一的人口生活在淡水资源稀缺地区,水危机给人类生存构成了严重威胁。海水约占全球地表水资源的97.5%^[1],因此高效利用海水资源可有效缓解水危机问题,脱盐是高效开发海水资源必不可缺的环节。目前,常用的脱盐方法有膜脱盐[如反渗透(RO)等]^[2]和热蒸馏(如多级闪蒸、多效蒸馏等)^[3-4]等。传统的膜脱盐材料表面易结垢堵塞微孔,降低脱盐效率,且生产的淡水水质较差;热蒸馏脱盐需消耗大量能量,经济成本高且不环保。传统的脱盐方法在实际应用中已经暴露出高成本、高能耗和低效率等缺点。近年来随着科技的发展,脱盐材料和工艺技术已得到进一步发展,电容去离子(CDI)、太阳能脱盐和改进的膜脱盐因设备简单、成本低等优点广受关注,开发高效环保的脱盐材料也成为研究重点。

碳基材料,如碳球^[5]、炭黑^[6]、石墨烯、氧化石墨烯(GO)、还原氧化石墨烯(RGO)和碳纳米管(CNT)等^[7-8]已被用于各种脱盐技术,但这些材料合成步骤繁琐且成本较高。此外,石墨烯^[9]、CNT^[10]和炭黑^[11]等材料的疏水性会降低其脱盐效率,亲水性GO溶胀后易溶解于水溶液中从而限制其应用^[12-13]。MoS₂作为一种典型的过渡金属硫化物(TMD),具有S-Mo-S层状结构,层间通过范德华力连接,熔点为1185℃,具有热和力学稳定性,不易被氧化,MoS₂的低细胞毒性避免了MoS₂基材料的潜在环境风险。因其带隙较窄而具有宽谱吸收性能,MoS₂基材料已被广泛制备和研究,应用于制氢^[14-15]、超级电容器^[16-17]、传感器^[18]、消毒^[19]和光催化^[20]等领域。MoS₂基薄膜材料在污水处理方面有优异的性能,在水溶液中具有稳定的稳定性;MoS₂纳米材料带隙可控,边缘具有不饱和悬键,导带位于0eV左右,具有良好的光催化还原性能;MoS₂掺杂材料在光电器件上相对于其他材料具有更优异的灵敏度;MoS₂复合材料在吸附重金属时具有优异的吸附性能和循环稳定性。MoS₂因其高比表面积、层状结构以及极好的电化学稳定性,在CDI中被广泛研究;由于其层状结构,MoS₂易形成类石墨烯的二维(2D)形态,该形态提供的较大表面积和2D渗透性通道利于水分子运输,因此MoS₂可用于制备半透膜或用于膜修饰改善商业半透膜的脱盐性

能;MoS₂的强吸光性能及高光热转换效率使其在太阳能脱盐领域中有重要的应用前景。基于特殊的结构及优异的物理化学特性,MoS₂在改善传统脱盐工艺和发展新兴脱盐技术中具有很大的应用潜力。

当前,关于MoS₂在海水淡化领域的研究主要集中在材料优化和配制设计以实现高效脱盐。本文概述了目前MoS₂在电容去离子、膜脱盐和太阳能脱盐等方法中的研究进展,分析MoS₂在3种脱盐方法实际应用中面临的挑战,并展望MoS₂在脱盐领域的应用前景。

1 MoS₂在海水淡化中的应用

1.1 电容去离子

CDI基于离子电迁移从盐水中去除带电离子从而实现海水淡化,尤其适用于低盐浓度的处理。CDI的原理类似于双电层电容器,主要包括4个步骤:①盐离子在固液界面的传质;②双电层内部离子的电吸附和能量储存;③盐离子在电极和盐水之间的传质;④盐水中的离子扩散^[21]。CDI的特点是运行效率高、系统组件和配制简单、自动化程度高、能耗低且无二次污染^[22-23]。但是,副反应(阳极氧化反应、阴极还原反应和同离子排出)增加了能量损失并导致出水水质波动,影响CDI的进一步发展^[24-25]。高性能的CDI电极材料应同时具有电容量高、反应速率快、化学稳定性高和成本低等特点,从而促进盐离子的脱除以及大规模应用。目前对MoS₂基电极的研究规模为电解槽水平,通过对电极施加电压(0.8~1.6V)实现脱盐,使用蠕动泵将NaCl溶液循环驱动通过电极,并用电导仪在线监测溶液的电导率,计算电极材料的盐离子吸附性能。

1.1.1 MoS₂电极

层状MoS₂的高比表面积、层间较弱的范德华力以及较大的层间距,有助于离子嵌入和离子传输^[26]。将纯MoS₂直接用作CDI电极材料,其离子质量去除能力在0.8V电压下为8.8mg/g^[27],在1.2V电压下为9.97mg/g^[28]。MoS₂差的水润湿性和基面惰性不利于电解质进入其表面,在固液界面形成高转移阻力,并降低电化学表面的利用率,限制CDI性能。通过改善MoS₂亲水性、增加基面负电荷和提高层间距,可进一步增强MoS₂电极材料的脱盐性能。Xing等^[29]通过化学剥离法制备MoS₂(ce-MoS₂),剥离后其表面暴露的大量负电荷增强

了对阳离子的吸引,因剥离增大的层间距有助于离子嵌入和吸附,使其具有 $16.51\text{mg}/\text{cm}^3$ 的离子体积去除能力,并在极低盐浓度 ($50\text{mmol}/\text{L}$) 下仍具有良好的脱盐性能。Jia 等^[27]通过热处理改性制备富含缺陷的 MoS_2 (T-MoS_2),发现缺陷端 Mo 在水溶液中会被氧化成 MoO_3 ,并以 HMoO_4^- 或 MoO_4^{2-} 的形式溶解于水溶液中,导致在 MoS_2 上形成大量负电荷缺陷,促进电极表面对 Na^+ 的静电吸引,并且 T-MoS_2 的电荷转移电阻 (2.583Ω) 小于 MoS_2 (5.535Ω),有利于传输电解离子,与未改性 MoS_2 ($12.8\text{mg}/\text{g}$) 相比, T-MoS_2 电吸附能力大幅提高 ($35\text{mg}/\text{g}$)。此外,为提高 MoS_2 亲水性, Wang 等^[28]通过聚多巴胺 (PDA) 改性 MoS_2 制备形成 MoS_2/PDA 复合材料,该材料良好的润湿性、丰富的表面负电荷和较低的内阻使其通过静电作用在双电层中捕获的 Na^+ 数量明显增加,显示出优异的比电容 ($99.9\text{F}/\text{g}$)、电吸附速率 (少于 9min) 和脱盐能力 ($14.80\text{mg}/\text{g}$)。因此,通过改善 MoS_2 亲水性或增加其表面负电荷可提升 MoS_2 在 CDI 中的脱盐性能。

1.1.2 MoS_2 杂化电极

MoS_2 的低电导率导致其在 CDI 应用中储能效果较差,因此前人通过将 MoS_2 与具有良好导电性和力学稳定性的碳基材料组合形成杂化电极的方式,提高 MoS_2 基电极材料的脱盐性能^[30-31]。Peng 等^[32]制备了 MoS_2/rGO 杂化电极,发现花状 MoS_2 与 rGO 的无序缠结结构增加的比表面积 (可达 $28.746\text{m}^2/\text{g}$) 有助于容纳和吸附更多的 Na^+ ,使其在 $200\text{mg}/\text{L}$ NaCl 溶液中最大脱盐量可达 $16.82\text{mg}/\text{g}$ 。Srimuk 等^[33]合成的 MoS_2 /碳纳米管杂化电极中阳离子和阴

离子均可以通过法拉第反应嵌入 MoS_2 的层状结构实现脱盐,并在不同物质的量浓度下循环 25 次均能实现稳定脱盐。该杂化电极在 $100\text{mmol}/\text{L}$ 和 $500\text{mmol}/\text{L}$ 溶液中去掉每个离子的能耗分别为 21.1kT 和 24.6kT ,与完善技术 (如传统反渗透脱盐) 相比,已具有规模化应用的希望。Han 等^[34]制备的 MoS_2 /石墨烯杂化电极大多为中孔结构,可降低转移阻力并提供优异的离子转移通道,有效地提高电极对 NaCl 的体积吸附容量 ($14.3\text{mg}/\text{cm}^3$),在 1.2V 电压下对 $100\text{mg}/\text{L}$ NaCl 溶液的处理显示出 50 次 CDI 循环稳定性,并且该电极在低浓度水溶液中对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 等重金属的去除率可达 90% 以上。Tian 等^[35]合成的 MoS_2 /石墨氮化碳复合材料中杂原子 N 可以提高其电荷转移能力和润湿性,电极能耗为 $50.498\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。 MoS_2 /石墨氮化碳同时存在微孔和中孔,比表面积和总孔体积分别为 $174.26\text{m}^2/\text{g}$ 和 $0.187\text{cm}^3/\text{g}$,远大于石墨氮化碳 ($32.81\text{m}^2/\text{g}$ 和 $0.069\text{cm}^3/\text{g}$) 和 MoS_2 ($67.61\text{m}^2/\text{g}$ 和 $0.066\text{cm}^3/\text{g}$),较大的比表面积和孔体积提供了更多的离子吸附位点,并且丰富的负电荷使双电层可吸引更多带正电的 Na^+ ,使该电极最大电吸附容量可达 $24.5\text{mg}/\text{g}$,至少在 10 个吸附-解吸循环中具有很高的稳定性。

表 1 归纳对比了近几年 MoS_2 基电极材料的脱盐性能。与原始 MoS_2 相比,改性 MoS_2 电极和 MoS_2 杂化电极在较低电压下 ($0.8\sim 1.6\text{V}$),比电容、电吸附容量、离子去除能力均有明显提高。总之, MoS_2 及其复合材料作为 CDI 电极可提高电吸附能力,使 CDI 系统适用于各种浓度的盐水,并且 MoS_2 基材料的电化学稳定性确保其具有良好的再生性,高体积

表 1 MoS_2 基电极材料的脱盐性能

材料	NaCl 溶液浓度	应用电压 /V	最大电吸附容量 /mg·g ⁻¹	离子质量去除能力 /mg·g ⁻¹	离子体积去除能力 /mg·cm ⁻³	比电容/F·g ⁻¹	参考文献
MoS ₂	100mg·L ⁻¹	0.8	12.8	8.8		74.22 (5mV·s ⁻¹)	[27]
MoS ₂	200mg·L ⁻¹	1.2	10.97	9.79		75 (1mol·L ⁻¹ NaCl, 10mV·s ⁻¹)	[28]
MoS ₂ /PDA	200mg·L ⁻¹	1.2	16.94	14.8		99.9 (1mol·L ⁻¹ NaCl, 10mV·s ⁻¹)	[27]
热处理 MoS ₂	100mg·L ⁻¹	0.8	35	24.6		221.35 (5mV·s ⁻¹)	
ce-MoS ₂ 纳米片	400mmol·L ⁻¹	1.2		8.81	16.51	109.7 (1mol·L ⁻¹ NaCl, 10mV·s ⁻¹)	[29]
MoS ₂ /rGO	200mg·L ⁻¹	1.0	19.06	16.82		198.6 (1A·g ⁻¹ 的电流密度下)	[32]
MoS ₂ /碳纳米管	5mmol·L ⁻¹	0.8		10	40	正电极极化 200	[33]
	25mmol·L ⁻¹			13	65	负电极极化 210	
	100mmol·L ⁻¹			18	90	(1mol·L ⁻¹ NaCl, 5mV·s ⁻¹)	
	500mmol·L ⁻¹			25	125		
MoS ₂ /石墨烯	500mg·L ⁻¹	1.2		19.4	14.3	146.1 (0.5mol·L ⁻¹ NaCl, 5mV·s ⁻¹)	[34]
						47.9 (0.5mol·L ⁻¹ NaCl, 50mV·s ⁻¹)	
MoS ₂ /g-C ₃ N ₄ 电极	250mg·L ⁻¹	1.6	24.5	24.16		118.3F·g ⁻¹ (1A·g ⁻¹)	[35]
						61.7F·g ⁻¹ (10A·g ⁻¹)	

吸附容量的 MoS_2 基电极材料为 CDI 设备的小型化开辟了新的途径。

1.2 膜脱盐

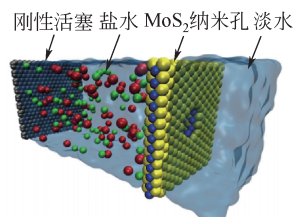
膜脱盐是利用半透膜将溶液中不同组分进行分离、浓缩和纯化的过程,主要包括反渗透(RO)、纳滤(NF)、正渗透(FO)等膜分离技术。由于没有官能团,堆叠 MoS_2 纳米片形成的薄膜具有相对光滑和刚性的纳米通道^[36],可降低水分子通过纳米孔的运输阻力^[37],且相邻 MoS_2 纳米片之间的范德华力和水合作用力可以保持 MoS_2 薄膜的稳定性。 MoS_2 基复合材料已被证明可用作高性能膜,还可用于修饰商业半透膜进一步提高其脱盐性能,降低生产清洁淡水的能耗和成本。目前对 MoS_2 基薄膜的研究尚处于理论验证和实验室研究阶段,薄膜尺寸大多为厘米级水平。对膜脱盐性能的评估是通过收集渗透液体积计算薄膜水通量,通过电导仪测定盐浓度计算盐离子截留率。

1.2.1 反渗透(RO)脱盐

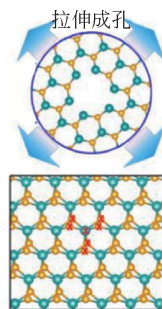
目前,RO是应用最广泛的膜脱盐工艺。RO脱盐是将半透膜置于海水和纯水之间,在海水侧施加压力促进水通过离子排斥膜[图1(a)]^[38]。传统RO脱盐能源需求和经济成本较高,材料主要为基于聚酰胺的复合材料薄膜(TFC),表面易结垢不利于循环使用^[39],因此探索新的RO脱盐材料成为研究重点。近几年研究发现 MoS_2 基薄膜具有优异的脱盐性能,可降低传统RO脱盐的能耗和成本,并在一定程度缓解膜结垢问题。

固有缺陷的 MoS_2 是渗水和除盐的起点,但缺陷孔径太小无法通过水分子,若将所需直径的纳米孔以可控的方式引入单层 MoS_2 薄膜中,则可实现有效透水,并随着纳米孔直径接近水合离子大小,纳米多孔膜可拦截各种类型离子,实现高效脱盐。单层 MoS_2 膜的厚度约为 1.0nm ^[40],杨氏模量为 $(270\pm 100)\text{GPa}$,与钢相当,但远低于石墨烯(约 1TPa)^[41],因此 MoS_2 薄膜对机械应变较石墨烯敏感。Li等^[42]通过分子模拟在单层 MoS_2 薄膜引入机械应变,形成尺寸可调的纳米孔,如图1(b)所示^[42],当除去 Mo 原子周围6个 S 原子形成开孔时,纳米孔边缘的 Mo 原子带正电,对阳离子具有较高的库仑阻力。空间效应和静电效应的协同作用有效地阻止离子通过单层 MoS_2 薄膜。此外,连接纳米孔内外水分子的单链氢键大大降低了纳米孔对水分子的能垒,提高了薄膜水通量[图1(c)]^[43]。

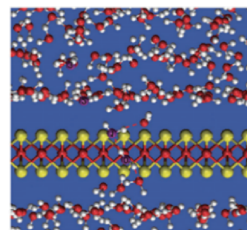
盐离子的排斥主要取决于纳米孔尺寸,但水通



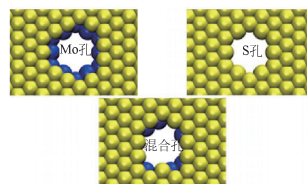
(a) MoS_2 单层膜在RO中的原理^[38]



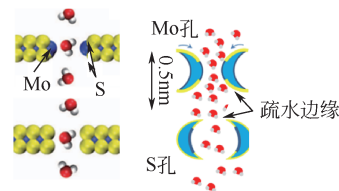
(b) 在单层 MoS_2 薄膜中引入机械应变,红叉标记的原子被去除以产生纳米孔^[42]



(c) 红色虚线表示水分子通过纳米孔形成的氢键^[43]



(d) MoS_2 薄膜的3种孔径类型^[38]



(e) 左侧为水分子通过Mo孔和S孔的图,右侧为其卡通图^[38]

图1 MoS_2 单层膜在RO中的模拟

(a)、(d)、(e)中: Mo—蓝色; S—黄色; 水—透明的蓝色; 离子—红色和绿色; 石墨烯片—灰色

量除了受孔径影响外,还取决于纳米孔结构。 Mo 原子周围水接触角接近于 0° ^[44],具有强亲水性,在所有孔边缘类型中[Mo孔、S孔和混合孔,图1(d)],Mo孔透水性最佳,其次是混合孔,S孔最差。如图1(e)所示,Mo孔在入口处有一个带有疏水S位的收

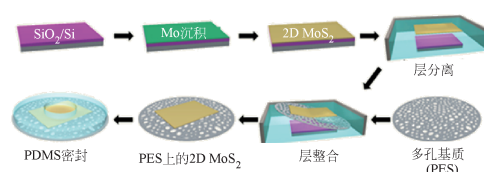
缩中心,而S孔具有一个膨胀中心,在Mo孔情况下,水分子在孔边缘的S疏水位点滑动并被孔中心的Mo亲水位点吸引,疏水和亲水位点的排列以及孔的圆锥形形状可增加水通量^[38]。Kou等^[43]模拟了仅有混合孔的MoS₂单层膜,发现水通量随孔径增大而增加,但由于折中效应,大孔对盐离子的截留率非常低,模拟结果显示直径为0.74nm的孔赋予单层MoS₂膜适当的透水性和完美的除盐性能,透水率比商业RO膜材料大2~5个数量级^[38]。

上述研究大多处于理论验证阶段,将其转向实验阶段尚存在一些重大的技术难题,包括制备大面积单层MoS₂薄膜以及在膜上生成尺寸和类型可控的纳米孔。如图2(a)~(c)所示^[45],Li等^[45]通过化学气相沉积在聚醚砜膜基材上形成的二维MoS₂层状膜具有厚度均匀(约7nm厚)且连续的MoS₂层,该膜的纳米孔和层间范德华间隙可轻松通过水分子,而水合离子因尺寸较大被有效排斥[图2(d)]。Zhang等^[46]通过一种高效的多酚辅助TMDs水性剥离方法制备了单宁酸(TA)功能化的MoS₂纳米片(TAMoS₂),TA的多酚基团与水存在较强的偶极-偶极相互作用,增强了膜的亲水性,有助于膜对水分子的长距离吸引,当在MoS₂中掺入1%(质量分数)的TAMoS₂时,该杂化膜在静态扩散条件下具有约32L/(m²·h)的水通量和超过97%的阳离子截留率。目前实验合成的MoS₂膜大多为多层膜,并且无法调控纳米孔的类型和尺寸。

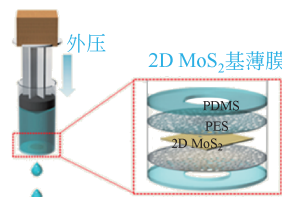
除了用MoS₂直接制备RO膜外,还可将其用于修饰商业RO膜以提高脱盐性能。将二维纳米材料掺入复合材料薄膜(TFC)的聚酰胺层可提高膜的分离性能^[47]。Li等^[48]将MoS₂纳米片作为填料对TFC进行原位改性制备了渗透率高、选择性强且耐污的纳米复合薄膜(TFN)[图2(e)]。与TFC相比,TFN中MoS₂纳米片的亲水位点增加了水通量,带负电MoS₂的静电排斥和膜基质的筛分效应为盐离子构建了屏障。当有机相中的MoS₂质量分数为0.01%时,TFN水通量[92.9L/(m²·h)]是TFC的1.2倍,且脱盐率高达98.6%。TFN优异的防污性能归因于以下两点:①TFN表面带负电的MoS₂纳米片与牛血清白蛋白发生静电排斥;②相对平坦的膜表面不利于污垢附着。

1.2.2 纳滤(NF)脱盐

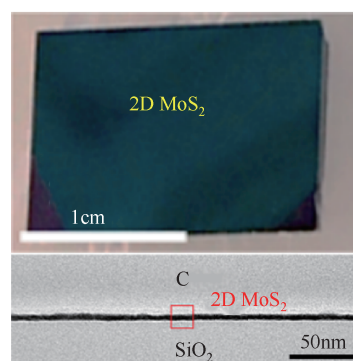
NF又称低压反渗透,是介于反渗透和超滤之间的压力驱动工艺。纳滤膜的水通量高并对多价离子和分子量大于200的有机化合物具有较高的截留



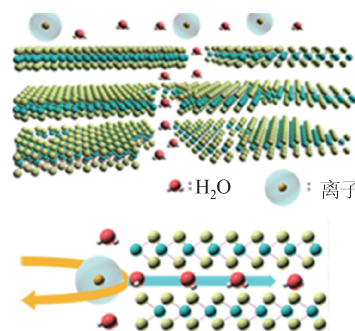
(a) CVD-2D MoS₂层状膜制备流程^[45]



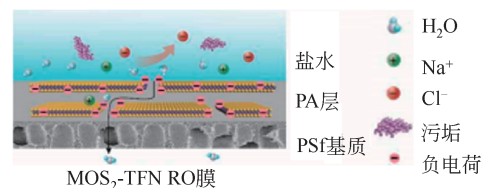
(b) CVD-2D MoS₂层状膜应用装置^[45]



(c) 在SiO₂/Si基板上生长的2D MoS₂层的光学图像及其横截面TEM图^[45]



(d) 水分子通过层状MoS₂纳米孔的示意图及侧视图^[45]
(说明层间范德华间隙可通过水分子截留水合离子)

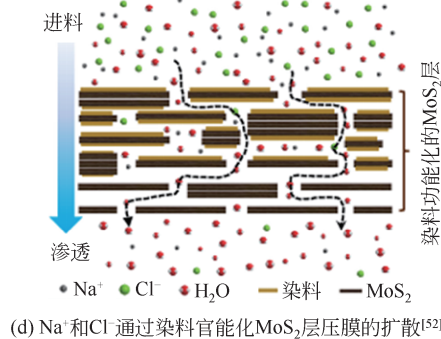
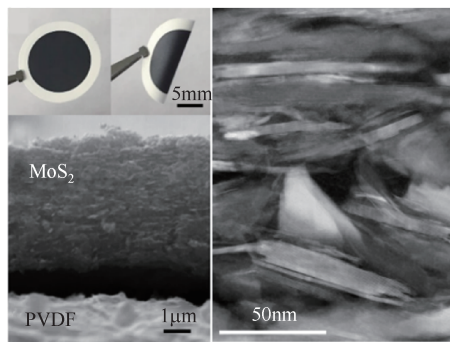
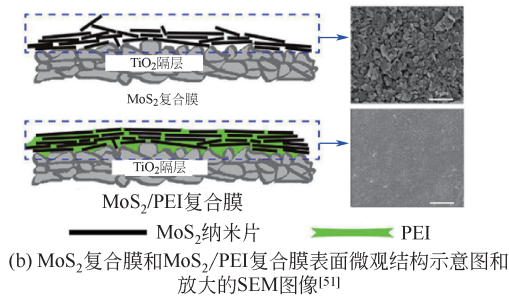
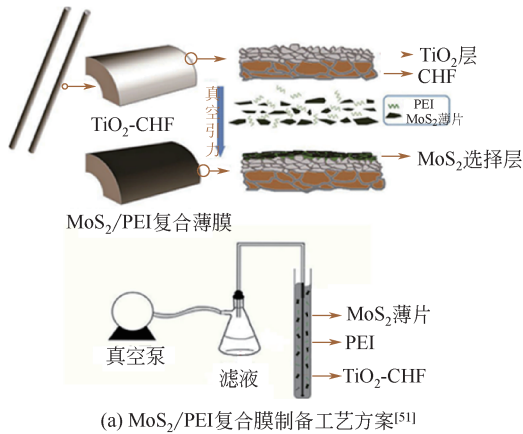


(e) MoS₂改性TFN膜的脱盐基质^[48]

图2 MoS₂在RO中的应用

率,运行压力和经济成本较低^[49-50],但是纳滤膜对盐离子截留率不高,因此探索新的膜材料和膜构建方法仍需要不断发展。

如图3(a)所示,Zhang等^[51]在陶瓷中空纤维上构建的MoS₂复合膜具有出色的纳滤性能和优异的稳

图3 MoS₂在NF中的应用

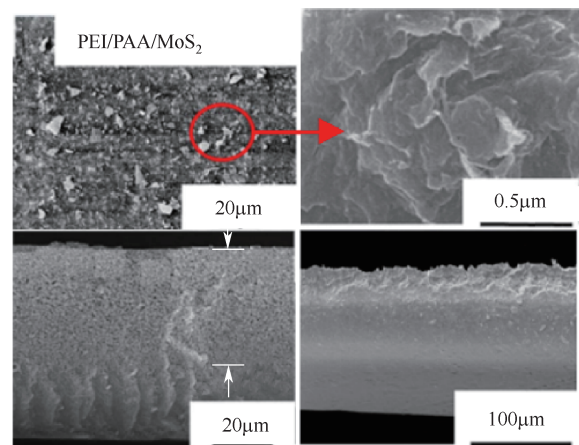
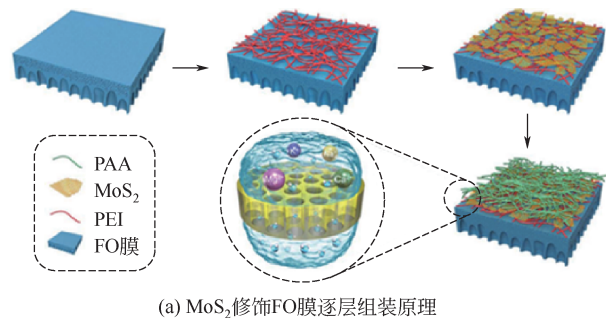
定性, 聚乙烯亚胺 (PEI) 增强了相邻 MoS₂ 纳米片以及 MoS₂ 层和基材间的界面黏合力, 形成紧密整齐的分层[图 3(b)]. PEI 使膜表面亲水且带正电, 从而使复合膜具有出色的脱盐性能, 对重金属离子 (Cu²⁺、Zn²⁺、Mn²⁺、Ni²⁺) 具有大于 90% 的高截留

率, 可在脱盐的同时去除重金属, 提高清洁水水质。但陶瓷在大规模应用中成本昂贵。Hirunpin 等^[52]发现 MoS₂ 薄膜功能化引起的界面电荷变化可调节膜的纳滤性能。通过聚偏二氟乙烯 (PVDF) 支撑膜抽滤形成的 MoS₂ 薄膜具有层状结构[图 3(c)]. 如图 3(d) 所示, 该层状膜经阳离子染料结晶紫或阴离子染料日落黄官能化后, 膜表面的静电排斥效应降低了 Na⁺/Cl⁻ 的渗透性, 水通量提高至 GO 膜的 5 倍。

1.2.3 正渗透(FO)脱盐

FO 是以膜两侧的渗透压差为驱动力自发实现水传递的分离过程。FO 技术推广的障碍是缺乏具有高透水性、高溶质截留率、优异防污性能和良好稳定性的膜^[53]。内部浓度极化 (ICP) 和膜结垢是限制 FO 膜性能的主要因素^[54]。

经 MoS₂ 改性后, FO 膜的亲水性和高孔隙率有利于降低 ICP 问题, 并且 MoS₂ 的共轭结构可缓解膜结垢问题^[55]。如图 4(a) 所示, Li 等^[56]通过 MoS₂ 逐层沉积制备了改性 FO 膜, 在图 4(b) 中, MoS₂ 被涂覆在 FO 膜表面, 整个膜材料相对较薄 (约 180 μm), 活性层厚约 45 μm。MoS₂ 的负载赋予 FO 膜更高的孔隙率和平均孔径, 表现出更高的水通量和更低的

图4 MoS₂在FO中的应用^[56]

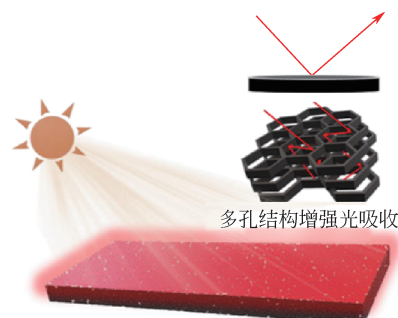
反向溶质扩散, 可实现 $27.15\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的跨膜水通量 (比市售聚醚砜 FO 膜高 35.34%) 和 $16.42\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的盐离子反向通量 (比空白 FO 膜减少 35.91%)。改性后的 FO 膜表面由粗糙变得平滑, 有效地缓解了结垢问题。此外, 膜表面与污染物形成的结合键极易被流水清除, 不会堵塞微孔, 提高了对膜表面污垢的液压清洁效率。

1.3 太阳能脱盐

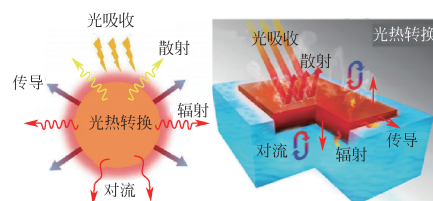
太阳能脱盐通过光热材料将太阳能转化为热能, 加热海水/咸水实现蒸发脱盐获取淡水。与 CDI 和膜脱盐相比, 太阳能脱盐不易受水质影响, 并且由于减少常规能源 (化石燃料和天然气等) 的消耗而降低生产成本。几乎所有无机光热材料的折射率都大于 2, 光反射率大于 11%^[57-58], 所以太阳能蒸发器通常设计为粗糙多孔结构来降低折射和反射光损失^[59]。材料界面的光作用效果及太阳能蒸发系统分类情况如图 5 所示。此外, 如图 5(a) 所示, 与平滑表面相比, 粗糙多孔结构能有效地降低对入射光角度的依赖, 并在孔道中实现多重内反射提高蒸发器吸光性能^[57, 61]。为避免传导、对流或辐射产生的系统性热损失 [图 5(b)], 太阳能蒸发器必须能够进行有效光吸收和高效光热转换, 并通过降低材料导热性或者添加外部隔热材料/组件等方法将热量有效地传递到液-气相变过程^[63]。 MoS_2 的声子平均自由程较短, 比石墨烯和 GO 具有更低的导热性, 有利于局部热效应^[64]。另外, MoS_2 具有出色的光吸收率和优异的光热转化性能, 是太阳能脱盐的理想材料。如图 5(c) 所示, 太阳能蒸发系统分为界面蒸发系统和体积蒸发系统。目前, 界面系统的 MoS_2 基蒸发器尺寸为厘米级水平, 体积系统的 MoS_2 基材料尺寸为纳米水平, 均处于实验室研究阶段。在进行脱盐实验时, 将蒸发器置于烧杯或培养皿中, 以氙气灯为光源, 在室温下通过电子天平和计算机实时记录水质变化, 并计算相应的蒸发速率和蒸发效率。

1.3.1 界面蒸发系统

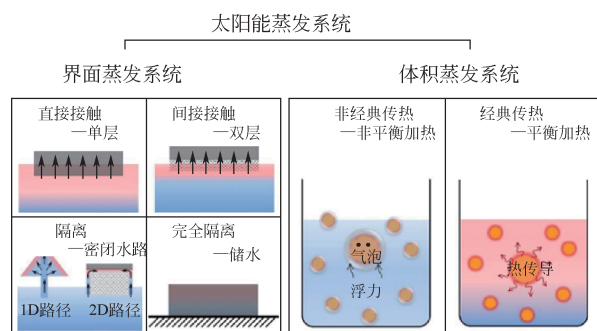
界面蒸发系统是将光热转换限制在液-气界面处, 液相侧非常薄的水分子因具有高能态而发生液-气相变产生水蒸气^[65], 仅界面水被加热, 大幅减少向非蒸发部分的热损失。界面蒸发系统可分为直接接触、间接接触、隔离 (密闭水路) 和完全隔离 (储水) 系统 [图 5(c)]。 MoS_2 基蒸发器在界面蒸发系统中按其存在形态主要分为 3 种: ①光热薄



(a) 平面结构和多孔结构光反射对比^[60]



(b) 光热转换示意图^[62]与界面光热转换^[63]



(c) 太阳能蒸发系统分类^[62]

图 5 材料界面的光作用效果及太阳能蒸发系统分类

膜^[66-67]; ②负载 MoS_2 到低密度基质上, 形成自浮式双层结构^[68-69]; ③气凝胶^[70-71]。

(1) 光热薄膜 MoS_2 基光热薄膜通常用于直接接触系统, 为了减少膜的生物或胶体结垢, 通常使用低粗糙度的亲水膜表面^[72]; 为了提高蒸发效率, 通常将膜设计为纳米多孔结构以提供蒸汽通道并在孔道内实现多重反射^[73]。Yang 等^[66]制备的 MoS_2 /碳纳米管复合多孔光热薄膜 (厚约 120nm), 协同 MoS_2 优异的光吸收性能和碳纳米管高机械强度, 如图 6 所示, MoS_2 纳米片在单壁碳纳米管表面相互连接组成连续均匀的 MoS_2 层, 形成的二维多孔网络结构有利于蒸汽快速传输, 并且较低的导热性 [$0.06\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 可减少热传导损失, 使其在 $5\text{kW}/\text{m}^2$ 光照下, 蒸发效率达到 91.5%, 蒸发通量在大气条件下可达 $6.6\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 在真空条件下高达 $15.6\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。常宇虹^[67]在玻璃纤维布上生长 MoS_2 纳米片形成疏松多孔的 MoS_2 基光热薄膜具有柔韧性和稳定性, 可

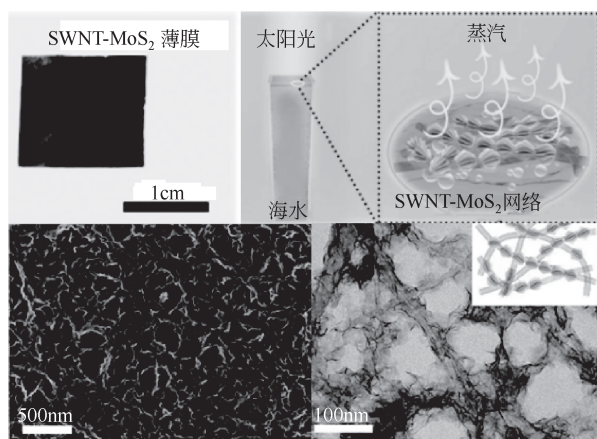


图6 SWNT-MoS₂膜的照片、蒸汽生成原理及其SEM、TEM图^[66]

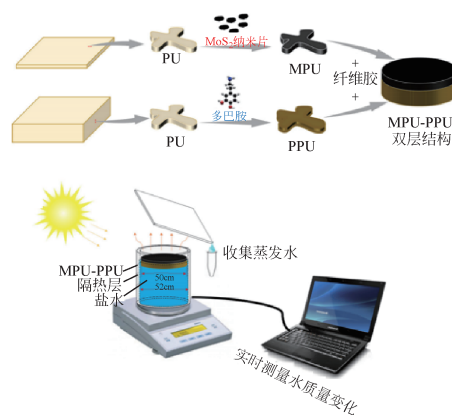
根据需求裁剪为任意形状,在1kW/m²光照下水蒸发速率为1.85kg/(m²·h),蒸发效率达到94%,在15次循环后仍能保持稳定的蒸发速率,并且不受水质影响。

(2) 双层结构 上层蒸发层用于吸收太阳光并进行光热转换,下层通常为耐高温且具有极低热导率的材料作为保温层实现热定位。通过简单的顶装备料工艺将MoS₂基材料置于聚氨酯海绵(PU)、聚苯乙烯和聚乙烯泡沫等低密度基质上形成自浮式双层结构。双层结构根据水传输路径的不同可用于间接接触、隔离和完全隔离系统。

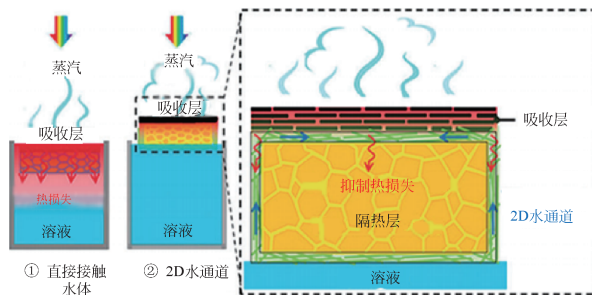
在间接接触系统中,亲水底层除了作为保温层外,还通过毛细作用稳定地为蒸发层提供水源,底层的润湿性对蒸发效率有较大影响^[74]。如图7(a)所示,MoS₂通过静电作用嵌入3D多孔PU海绵(MPU)作为蒸发层,亲水性聚多巴胺(PDA)改性PU海绵(PPU)作为隔热层和水泵,形成的MoS₂基三维(3D)蒸发器在1.0kW/m²的低照度下具有86.2%的高蒸发效率,在更高的光照下(1.5~2.5kW/m²),蒸发效率超过90%^[68]。

隔离系统中,蒸发层为平面或立体结构,一般以聚苯乙烯或聚乙烯泡沫为支撑层,由于泡沫的闭孔结构无法用于水传输,需要与亲水材料(无尘纸等)联用。如图7(b)所示,将无尘纸包裹在泡沫外形成2D密闭水传输路径,泡沫和无尘纸分别充当隔热层和水泵的作用。Guo等^[69]通过水热法自生长MoS₂到棉布基质(CC),并用聚乙二醇(PEG)改善亲水性,形成的PMoS₂-CC复合材料具有良好透气性和亲水性,将其置于无尘纸包裹的聚苯乙烯泡沫上,形成的双层结构在1~5kW/m²的光照下可实

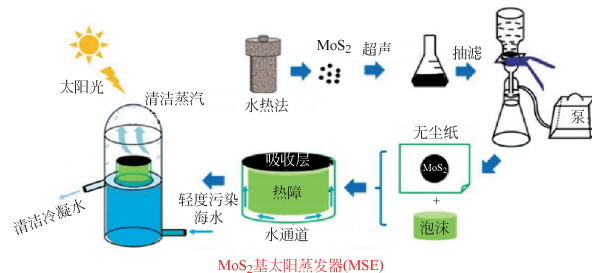
现(80.5%~90%)±3.5%的蒸发效率。如图7(c)所示,另一种MoS₂基蒸发器MSE的顶层由MoS₂悬浮液抽滤到无尘纸形成,底层为无尘纸包裹的聚乙烯泡沫,MSE在高效蒸发水的同时能有效去除色氨酸和腐殖酸类有机污染物,提高出水水质^[76]。另外,在太阳能辅助制备的多孔网络2H-MoS₂凹膜下添加支撑层也可形成2D密闭水路,在图8(a)中,真空抽滤形成的2H-MoS₂层状薄膜在光照条件下,因水蒸发速率加快导致片层破坏形成的凹陷表面和疏松多孔结构可实现光的有效吸收,使凹膜显示出优异的蒸发通量[(1.68±0.08)kg/(m²·h),1kW/m²],蒸发效率在1kW/m²和3kW/m²光照下分别达到83.8%±0.8%和91.5%±1.1%,且该蒸发器能够捕获超过99.9%的重金属离子,即使在极限pH(pH为1~3



(a) MPU-PPU的制备及其脱盐设备^[68]

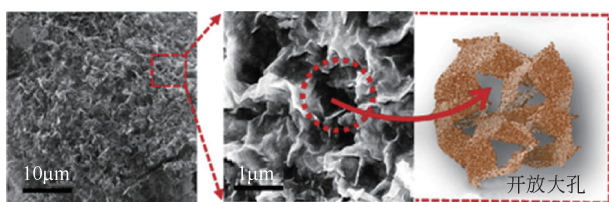


(b) 直接接触与2D水传输路径的脱盐设备^[75]

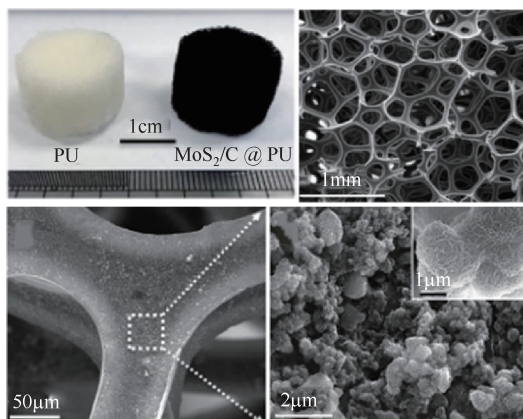


(c) MSE的制备及其脱盐设备^[76]

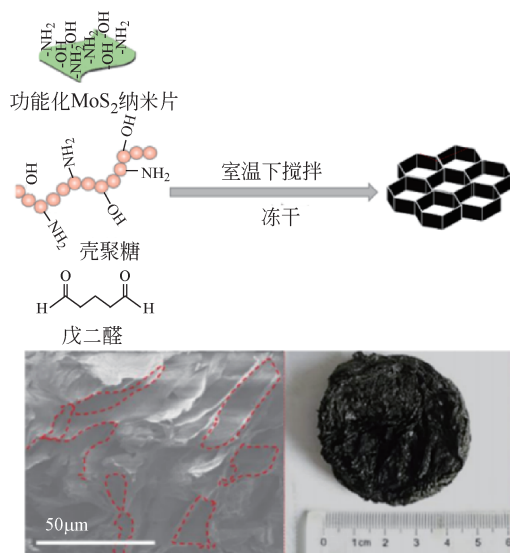
图7 太阳能脱盐设备



(a) 2H-MoS₂膜在太阳照射下形成凹陷表面的SEM图^[77]
(由MoS₂纳米片折叠或堆叠形成开孔)



(b) 组装MoS₂/C微珠前后PU海绵照片及MoS₂/C@PU海绵的SEM图^[78]



(c) MoS₂气凝胶的生成原理、SEM图及其照片^[70]

图8 太阳能蒸发器结构表征

和10~12)下也能稳定运行^[77]。

当蒸发层为立体结构时,蒸发器可用于隔离或完全隔离系统。在隔离系统中,将3D蒸发层完全暴露在空气中,增加的侧壁蒸发面可提高蒸发效率;在完全隔离系统中,将3D蒸发层作为储水器不与流体接触可实现严格的隔热效果,能进一步提高蒸发性能。如图8(b)所示, Li等^[78]将MoS₂/C微珠附着在PU海绵上制备的3D蒸发层MoS₂/C@PU中, MoS₂/C微珠紧密均匀地锚固在PU表面。该蒸发层

在隔离系统暴露侧壁蒸发面时蒸发速率达到1.58kg/(m²·h)(1kW/m²光照),比将MoS₂/C@PU直接放置水中提高了60%。若将MoS₂/C@PU作为储水器(完全隔离系统)进一步减少底部接触热损失,蒸发速率提高到1.68kg/(m²·h)。将圆柱形MoS₂/C@PU裁剪为齿轮状后蒸发面进一步增大,在隔离和完全隔离系统中蒸发速率分别增至1.84kg/(m²·h)和1.95kg/(m²·h),分别比裁剪前提高16.5%和16.1%。将该蒸发器用于处理天然河水时,除了降低水碱度和硬度外,还具备消毒功能。此外,MoS₂中的富硫原子能有效吸附水体中的汞,将重金属汞含量降至可饮用水水平。

(3) 气凝胶 气凝胶是MoS₂基蒸发器的另一种形态,多用于直接接触系统。如图8(c)所示, Wang等^[70]以壳聚糖为骨架,以戊二醛为交联剂制备的单层MoS₂气凝胶具有高机械强度和高孔隙率,热导率在室温下约为0.37W/(m·K),有利于减少热损失,在1kW/m²的低辐照下蒸发速率[1.3554kg/(m²·h)]约为纯水的5.3倍,冷凝水中的Na⁺和Cl⁻浓度分别达到1.3mg/L和6.9mg/L,远低于WHO的标准。除单层气凝胶外, Ghim等^[71]通过新型自下而上的生物制造工艺,在细菌纳米纤维素(BNC)生长过程中加入化学剥离MoS₂合成ce-MoS₂/BNC双层气凝胶,该双层气凝胶在0.76kW/m²和5.35kW/m²光照下蒸发效率分别为76%和81%,并且ce-MoS₂的低细胞毒性降低了蒸发器的潜在环境风险。

这3种形态的MoS₂基蒸发器均采用“气-液界面光热转化”低能耗绿色工艺,均具有良好的循环稳定性,回收的冷凝水达到世界卫生组织(WHO)规定的饮用水安全标准。MoS₂基蒸发器的蒸发速率和蒸发效率随光照强度的增加而增加,并且部分蒸发器能有效去除水体中的有机物和重金属离子,提高出水水质。这些蒸发器的辅助材料通常为海绵、泡沫、无尘纸、棉布等低成本材料,并且无需外部泵等机械组件,几乎不需要维护,在小规模和分布式操作的应用中具有突出优势。

1.3.2 体积蒸发系统

体积蒸发系统通过分散在工作流体中的纳米材料吸收太阳能进行光热蒸发。太阳能吸收器吸收光子能量产生的大量微热源通过热传导与液体介质达到平衡。Wang等^[79]将MoS₂与磁性物质联用,克服MoS₂在水溶液中的分散性差和不易回收的缺陷,避免材料浪费和环境污染。在聚多巴胺功能化的MoS₂纳米片上原位生长纳米Fe₃O₄,形成的磁性纳

米颗粒在水溶液中能够长期稳定分散。粗糙表面有助于提高磁性 MoS₂ 纳米片的吸光性能，使其对太阳光的吸收能力达到 96% 的超高水平。随着光照强度从 1kW/m² 增加到 2.5kW/m²，该体积蒸发系统的蒸发速率从 1.0kg/(m²·h) 增加到 3.2kg/(m²·h)，相应的蒸发效率从 62.5% 增加到 79.2%。

表 2 归纳了近几年 MoS₂ 太阳能蒸发器的蒸发性能。由表 2 可见，MoS₂ 基光热材料均具有优异的光吸收性能和水蒸发速率。在界面蒸发系统中，MoS₂ 基蒸发器将转换的热能限制在界面，仅加热表面水分子，蒸发效率较高；但在体积蒸发系统中，液体介质不可避免地被磁性 MoS₂ 纳米颗粒加热，该蒸发系统由于易受到辐射，传导和对流的热损失，在相同光照条件下远低于大多数界面蒸发系统的蒸发效率。

2 前景展望

MoS₂ 基脱盐材料在脱盐性能、环境影响、能源需求、技术要求、生产成本和循环性能等方面均展现巨大优势。MoS₂ 基材料大幅提高了传统方法的脱盐性能并降低了脱盐工艺对环境和人类健康的潜在风险，有望为人类提供高质量清洁水，从而缓

解淡水资源短缺问题。但是对 MoS₂ 基脱盐材料的研究尚处于实验室水平，将这些实验室规模的技术转换为商业生产应用，仍面临着一些挑战。

目前，MoS₂ 电容去离子法主要研究将 MoS₂ 或改性 MoS₂ 材料作为 CDI 电极材料以提高电吸附能力，但关于 MoS₂ 基电极材料改性机理以及离子电迁移过程中水力条件对脱盐能力的影响等理论研究还有待加强。MoS₂ 膜脱盐法尚存在无法制备大面积单层 MoS₂ 薄膜、无法实现膜上纳米孔尺寸类型可调等问题，离实际应用仍有一段差距。但是，对厘米级高结晶度 MoS₂ 薄膜的研究为制备大面积单层 MoS₂ 薄膜提供了希望，此外在薄膜的支撑材料引入机械应变或通过电子束和电流等诱导薄膜产生空位或纳米孔，为精准可控地调节膜表面纳米孔尺寸和形状提供了可能。在 MoS₂ 太阳能脱盐中，如何提高 MoS₂ 基光热材料在低照度（1kW/m²）下的脱盐性能是目前研究的重点，此外，如何有效地冷凝和收集气化水以及防止盐和其他溶质在蒸发器表面或孔隙中的沉积仍是该方法实现规模应用面临的巨大挑战。因 MoS₂ 具有优异的重金属络合能力、光催化降解能力，将 MoS₂ 基脱盐系统应用于光催化、废水处理和能源生产等领域在未来值得深入

表 2 MoS₂ 基太阳能蒸发器的水蒸发性能

分类	材料形态	光热材料	光照强度 /kW·m ⁻²	蒸发速率 /kg·m ⁻² ·h ⁻¹	蒸发效率 /%	光吸收率/%	参考文献
界面蒸发系统	光热膜	SWNT/MoS ₂ 复合膜	5	大气 6.6 真空 15.6	91.5	82	[66]
		MoS ₂ /GF 膜	1	1.85	94		[67]
		MoS ₂ /棉布基质+EPS (PMoS ₂ -CC)	1	1.3	80.1	>90 (200~2000nm)	[69]
			5	7.03	90.3	>80 (2000~2500nm)	
		MoS ₂ /海绵双层结构	1	1.204	86.2		[68]
			1.5~2.5	1.9~3.36	>90		
		MoS ₂ /C@PU+EPS	1	1.95		98 (500~2000nm)	[78]
		2H-MoS ₂ 凹膜+EPS	1	1.68±0.08	83.8±0.8		[77]
			3	4.5	91.5±1.1		
		MoS ₂ /无尘纸/EPE	1	1.27	80		[76]
			2	1.95	61		
			5	5.90	67		
	气凝胶	MoS ₂ 气凝胶	1	1.36	85.4	95 (200~2500nm)	[70]
			1.5	2.16	90.1		
			2	2.97	93.0		
			3	4.56	95.3		
		ce-MoS ₂ /BNC 双层气凝胶	0.76	0.81	75.7		[71]
			5.35	6.15	81.4		
体积蒸发系统	磁流体	磁性 MoS ₂ 纳米片 (1.0g·L ⁻¹)	1	1	62.46	96 (200~2500nm)	[79]
			1.5	1.69	70.77		
			2	2.39	75.00		
			2.5	3.16	79.20		

注：EPS—聚苯乙烯泡沫；EPE—聚乙烯泡沫。

探讨。

3 结语

MoS₂基脱盐材料在电容去离子、膜脱盐和太阳能脱盐中具有很好的应用前景,并取得了一定进展。在电容去离子中,通过改善 MoS₂的亲水性、增加表面负电荷或将 MoS₂与碳基材料协同克服储能缺陷,可提高 MoS₂基电极材料的脱盐性能,为 CDI 设备的小型化开辟了新的途径;在膜脱盐中,MoS₂纳米多孔膜具有高水通量和盐离子截留率,将 MoS₂用于膜修饰时可以在大幅提高商业半透膜脱盐性能的同时降低脱盐成本,并在一定程度上缓解膜结垢问题;在太阳能脱盐中,由可再生清洁能源太阳能驱动的蒸发脱盐成本较低且不易受水源水质影响,并且优异的光吸收和光热转换性能使 MoS₂基蒸发器在界面蒸发系统和体积蒸发系统中均具有较高的蒸发速率和蒸发效率。MoS₂基脱盐材料均具有良好的循环稳定性,并且一些 MoS₂基脱盐材料在进行高效脱盐的同时能够去除重金属和有机污染物,在极限 pH 环境中也能稳定运行,有利于处理更复杂水体并提高出水水质。本综述在分析 MoS₂材料在脱盐中研究现状的同时,也提出了未来需要关注及发展的方向,对 MoS₂基纳米材料及脱盐技术的发展具有重要指导意义。

参考文献

- [1] 彭珂珊. 21 世纪中国水资源危机[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(5): 13-16.
PENG Keshan. China water resource crisis in the 21th century[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(5): 13-16.
- [2] AMY Gary, GHAFFOUR Noredine, LI Zhenyu, et al. Membrane-based seawater desalination: present and future prospects[J]. Desalination, 2016, 401: 16-21.
- [3] GAMBLER Adrian, BADREDDIN Essameddin. Dynamic modelling of MSF plants for automatic control and simulation purposes: a survey[J]. Desalination, 2004, 166: 191-204.
- [4] SAYYAADI Hoseyn, SAFFARI Arash. Thermoeconomic optimization of multi effect distillation desalination systems[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1122-1133.
- [5] ZHOU Jianguo, SUN Zhenlong, CHEN Mingqi, et al. Macroscopic and mechanically robust hollow carbon spheres with superior oil adsorption and light-to-heat evaporation properties[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(29): 5368-5375.
- [6] LIU Zhejun, SONG Haomin, JI Dengxin, et al. Extremely cost-effective and efficient solar vapor generation under nonconcentrated illumination using thermally isolated black paper[J]. Global Challenges, 2017, 1(2): 1600003.
- [7] YANG Yang, ZHAO Ruiqi, ZHANG Tengfei, et al. Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification[J]. ACS Nano, 2018, 12(1): 829-835.
- [8] HU Xiaozhen, XU Weichao, ZHOU Lin, et al. Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one sun[J]. Advanced Materials, 2017, 29(5): 1604031.
- [9] SEO Donghan, PINEDA Shafique, WOO Yunchul, et al. Anti-fouling graphene-based membranes for effective water desalination[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 683.
- [10] DONG Yingchao, MA Lining, TANG Chuyang, et al. Stable superhydrophobic ceramic-based carbon nanotube composite desalination membranes[J]. Nano Letters, 2018, 18(9): 5514-5521.
- [11] SHAO Yue, JIANG Zhiping, ZHANG Yunjing, et al. All-poly(ionic liquid) membrane-derived porous carbon membranes: scalable synthesis and application for photothermal conversion in seawater desalination[J]. ACS Nano, 2018, 12(11): 11704-11710.
- [12] YE Che Ning, RAIDONGIA Kalyan, SHAO Jiaojing, et al. On the origin of the stability of graphene oxide membranes in water[J]. Nature Chemistry, 2015, 7(2): 166-170.
- [13] JOSHI R K, CARBONE P, WANG F C, et al. Precise and ultrafast molecular sieving through graphene oxide membranes[J]. Science, 2014, 343(6172): 752-754.
- [14] YANG Lei, ZHONG Ding, ZHANG Jingyu, et al. Optical properties of metal-molybdenum disulfide hybrid nanosheets and their application for enhanced photocatalytic hydrogen evolution[J]. ACS Nano, 2014, 8(7): 6979-6985.
- [15] CAO Linyou, YU Yifei, HUANG Shengyang, et al. Layer-dependent electrocatalysis of MoS₂ for hydrogen evolution[J]. Nano Letters, 2014, 14(2): 553-558.
- [16] WU Jinzhu, LI Beibei, FENG Yaxiu, et al. Silicon quantum dot-assisted synthesis of MoS₂/rGO sandwich structures with excellent supercapacitive performance[J]. New Journal of Chemistry, 2019, 43(22): 8660-8668.
- [17] YANG M H, JEONG J M, HUH Y S, et al. High-performance supercapacitor based on three-dimensional MoS₂/graphene aerogel composites[J]. Composites Science & Technology, 2015, 121: 123-128.
- [18] PERKINS F K, FRIEDMAN A L, COBAS E, et al. Chemical vapor sensing with mono layer MoS₂[J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 668-673.
- [19] SARKAR Depanjan, MONDAL Biswajit, SOM Anirban, et al. Holey MoS₂ nanosheets with photocatalytic metal rich edges by ambient electrospray deposition for solar water disinfection[J]. Global Challenges, 2018, 2(12): 1800052.
- [20] ZHAN Weiquan, YUAN Yuan, YANG Bingqiao, et al. Construction of MoS₂ nano-heterojunction *via* ZnS doping for enhancing *in-situ* photocatalytic reduction of gold thiosulfate complex[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 394: 124866-124875.
- [21] YIN Huajie, ZHAO Shenlong, WAN Jiawei, et al. Three-dimensional graphene/metal oxide nanoparticle hybrids for high-performance capacitive deionization of saline water[J]. Advanced Materials, 2013, 25(43): 6270-6276.
- [22] ZHANG Jing, FANG Jianhui, HAN Jinlong, et al. N, P, S co-doped hollow carbon polyhedra derived from MOF-based core-shell nanocomposites for capacitive deionization[J]. Materials for Energy and Sustainability, 2018, 6(31): 15245-15252.
- [23] TANG Wangwang, KOVALSKY Peter, CAO BAichuan, et al. Investigation of fluoride removal from low-salinity groundwater by single-pass constant-voltage capacitive deionization[J]. Water Research, 2016, 99: 112-121.
- [24] ZHANG Changyong, HE Di, MA Jinxing, et al. Faradaic reactions in capacitive deionization (CDI)-problems and possibilities: a review[J]. Water Research, 2018, 128: 314-330.

- [25] HEMMATIFAR Ali, PALKO James W, STADERMANN Michael, et al. Energy breakdown in capacitive deionization[J]. Water Research, 2016, 104: 303–311.
- [26] ACERCE Muharrem, VOIRY Damine, CHHOWALLA Manishi. Metallic 1T phase MoS_2 nanosheets as supercapacitor electrode materials[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 313–318.
- [27] JIA Feifei, SUN Kaige, YANG Bingqiao, et al. Defect-rich molybdenum disulfide as electrode for enhanced capacitive deionization from water[J]. Desalination, 2018, 446: 21–30.
- [28] WANG Qingmiao, JIA Feifei, SONG Shaoxian, et al. Hydrophilic MoS_2 /polydopamine (PDA) nanocomposites as the electrode for enhanced capacitive deionization[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 236: 116298–116306.
- [29] XING Fei, LI Tao, LI Junye, et al. Chemically exfoliated MoS_2 for capacitive deionization of saline water[J]. Nano Energy, 2017, 31: 590–595.
- [30] HUANG Kejing, WANG Lan, LIU Yujie, et al. Layered MoS_2 -graphene composites for supercapacitor applications with enhanced capacitive performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(32): 14027–14034.
- [31] DAVID Lamuel, BHANDAVAT Romil, SINGH Gurpreet. MoS_2 /graphene composite paper for sodium-ion battery electrodes[J]. ACS Nano, 2014, 8(2): 1759–1770.
- [32] PENG Weijun, WANG Wei, HAN Guihong, et al. Fabrication of 3D flower-like MoS_2 /graphene composite as high-performance electrode for capacitive deionization[J]. Desalination, 2020, 473: 114191.
- [33] SRIMUK Pattarachai, LEE Juhan, FLEISCHMANN Simon, et al. Faradaic deionization of brackish and sea water *via* pseudocapacitive cation and anion intercalation into few-layered molybdenum disulfide [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(30): 15640–15649.
- [34] HAN Jinlong, YAN Tingting, SHEN Junjie, et al. Capacitive deionization of saline water by using MoS_2 -graphene hybrid electrodes with high volumetric adsorption capacity[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(21): 12668–12676.
- [35] TIAN Shichao, ZHANG Xihui, ZHANG Zhenghua. Capacitive deionization with $\text{MoS}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ electrodes[J]. Desalination, 2020, 479: 114348.
- [36] WANG Zhongying, MI Baoxia. Environmental applications of 2D molybdenum disulfide (MoS_2) nanosheets[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(15): 8229–8244.
- [37] WANG Zhongying, TU Qingsong, ZHENG Sunxiang, et al. Understanding aqueous stability and filtration capability of MoS_2 membranes[J]. Nano Letters, 2017, 17(12): 7289–7298.
- [38] HEIRANIAN Mohammad, FARIMANI Amir Barati, ALURU Narayana R. Water desalination with a single-layer MoS_2 nanopore[J]. Scientific Reports, 2015, 6: 8616.
- [39] LARSON R E, CADOTTE J E, PETERSEN R J. The FT-30 seawater reverse osmosis membrane—element test results[J]. Desalination, 1981, 38: 473–483.
- [40] RADISAVLJEVIC B, RADENOVIC A, BRIVIO J, et al. Single-layer MoS_2 transistors[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(3): 147–150.
- [41] BERTOLAZZI Simone, BRIVIO Jacopo, KIS Andras. Stretching and breaking of ultrathin MoS_2 [J]. ACS Nano, 2011, 5(12): 9703–9709.
- [42] LI Weifeng, YANG Yanmei, JEFFREY K, et al. Tunable, strain-controlled nanoporous MoS_2 filter for water desalination[J]. ACS nano, 2016, 10(2): 1829–1835.
- [43] KOU Jianlong, YAO Jun, WU Lili, et al. Nanoporous two-dimensional MoS_2 membranes for fast saline solution purification[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(32): 22210–22216.
- [44] LIU Yunhui, BO Wang, LI Ersong, et al. The preparation of a strawberry-like super-hydrophilic surface on the molybdenum substrate[J]. Colloids & Surfaces A, 2012, 404: 52–55.
- [45] LI Hao, KO Taejun, LEE Myeongsang, et al. Experimental realization of few layer 2D MoS_2 membranes of near atomic thickness for high efficiency water desalination[J]. Nano Letters, 2019, 19(8): 5194–5204.
- [46] ZHANG Chao, HU Dengfeng, XU Jingwei, et al. Polyphenol-assisted exfoliation of transition metal dichalcogenides into nanosheets as photothermal nanocarriers for enhanced antibiofilm activity[J]. ACS Nano, 2018, 12(12): 12347–12356.
- [47] ABDIKHEIBARI Sara, LEI Weiwei, DUMEE Ludovic F, et al. Novel thin film nanocomposite membranes decorated with few-layered boron nitride nanosheets for simultaneously enhanced water flux and organic fouling resistance[J]. Applied Surface Science, 2019, 488: 565–577.
- [48] LI Yi, YANG Shishi, ZHANG Kaisong, et al. Thin film nanocomposite reverse osmosis membrane modified by two dimensional laminar MoS_2 with improved desalination performance and fouling-resistant characteristics[J]. Desalination, 2019, 454: 48–58.
- [49] HILAL N, AL-ZOUBI H, DARWISH N A, et al. A comprehensive review of nanofiltration membranes: treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy[J]. Desalination, 2004, 170(3): 281–308.
- [50] MOHAMMAD A W, TEOW Y H, ANG W L, et al. Nanofiltration membranes review: recent advances and future prospects[J]. Desalination, 2015, 356: 226–254.
- [51] ZHANG Hao, TAYMAZOV Dovletjan, LI Mengping, et al. Construction of MoS_2 composite membranes on ceramic hollow fibers for efficient water desalination[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 592: 117369.
- [52] HIRUNPIN Visit, PRESTAT Eric, WORRALL Stephen D, et al. Desalination and nanofiltration through functionalized laminar MoS_2 membranes[J]. ACS Nano, 2017, 11(11): 11082–11090.
- [53] ZHAO Dieling, CHEN Shucheng, WANG Peng, et al. A dendrimer-based forward osmosis draw solute for seawater desalination[J]. Industrial Engineering Chemistry Research, 2014, 53(42): 16170–16175.
- [54] BUI Nhu Ngoc, MCCUTCHEON Jeffrey R. Hydrophilic nanofibers as new supports for thin film composite membranes for engineered osmosis[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 47(3): 1761–1769.
- [55] LIU Caihong, LEE Jongho, MA Jun, et al. Antifouling thin-film composite membranes by controlled architecture of zwitterionic polymer brush layer[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 2161–2169.
- [56] LI Mengna, SUN Xuefei, WANG Lin, et al. Forward osmosis membranes modified with laminar MoS_2 nanosheet to improve desalination performance and antifouling properties[J]. Desalination, 2018, 436: 107–113.
- [57] HEDAYATI Mehdi Keshavarz, ABDELAZIZ Moheb, ETRICH Christoph, et al. Broadband anti-reflective coating based on plasmonic nanocomposite[J]. Materials, 2016, 9(8): 636.
- [58] HEDAYATI Mehdi Keshavarz, ELBAHRI Mady. Antireflective coatings: conventional stacking layers and ultrathin plasmonic metasurfaces, a mini-review[J]. Materials, 2016, 9(6): 497.
- [59] CAI Jinguang, QI Limin. Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays[J]. Materials Horizons, 2015, 2(1): 37–53.
- [60] JUN Youngshin, WU Xuanhao, GHIM Deoukchen, et al. Photothermal membrane water treatment for two worlds[J]. Accounts of Chemical

- Research, 2019, 52(5): 1215–1225.
- [61] WANG Peng. Emerging investigator series: the rise of nano-enabled photothermal materials for water evaporation and clean water production by sunlight[J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, 5(5): 1078–1089.
- [62] ZHU Liangliang, GAO Minmin, PEH Connor Kang Nuo. Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications[J]. *Materials Horizons*, 2018, 5(3): 323–343.
- [63] GAO Minmin, ZHU Liangliang, PEH Connor Kangnuo, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production[J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(3): 841–864.
- [64] ZHANG Gang, ZHANG Yongwei. Thermal properties of two-dimensional materials[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 23(3): 034401.
- [65] ZHANG Lianbin, TANG Bo, WU Jinbo, et al. Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(33): 4889–4894.
- [66] YANG Xiangdong, YANG Yanbing, FU Linna, et al. An ultrathin flexible 2D membrane based on single-walled nanotube-MoS₂ hybrid film for high-performance solar steam generation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 28(3): 1704505.
- [67] 常宇虹. 纳米过渡金属氧族化合物的太阳能光热蒸汽转化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- CHANG Yuhong. Nano transition metal chalcogen compounds for solar steam generation[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [68] WANG Qingmiao, JIA Feifei, HUANG Anhua, et al. MoS₂@sponge with double layer structure for high-efficiency solar desalination[J]. *Desalination*, 2020, 481: 114359–114365.
- [69] GUO Zhenzhen, WANG Gang, MING Xin, et al. PEGylated self-growth MoS₂ on cotton cloth substrate for high-efficiency solar energy utilization[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(29): 24583–24589.
- [70] WANG Qingmiao, GUO Qijing, JIA Feifei, et al. Facile preparation of 3D MoS₂ aerogels for highly efficient solar desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(29): 32673–32680.
- [71] GHIM Deukchen, JIANG Qisheng, CAO Sisi, et al. Mechanically interlocked 1T/2H phases of MoS₂ nanosheets for solar thermal water purification[J]. *Nano Energy*, 2018, 53: 949–957.
- [72] VRIJENHOEK Eric M, HONG Seungkwan, ELIMELECH Menachem. Influence of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2001, 188(1): 115–128.
- [73] JIANG Qisheng, TIAN Limei, LIU Kengkou, et al. Bilayered biofoam for highly efficient solar steam generation[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(42): 9400–9407.
- [74] YU Shengtao, ZHANG Yao, DUAN Haoze, et al. The impact of surface chemistry on the performance of localized solar-driven evaporation system[J]. *Scientific reports*, 2015, 5: 13600.
- [75] LI Xiuqiang, XU Weichao, TANG Mingyao, et al. Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(49): 13953–13958.
- [76] CHEN Rong, WANG Xun, GAN Qimao, et al. A bifunctional MoS₂-based solar evaporator for both efficient water evaporation and clean freshwater collection[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(18): 11177–11185.
- [77] ZHANG Lei, MU Li, ZHOU Qixing, et al. Solar-assisted fabrication of dimpled 2H-MoS₂ membrane for highly efficient water desalination[J]. *Water Research*, 2020, 170: 115367.
- [78] LI Weigu, TEKELL Marshall C, HUANG Yun, et al. Synergistic high-rate solar steaming and mercury removal with MoS₂/C@polyurethane composite sponges[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(32): 1802108.
- [79] WANG Qingmiao, QIN Yi, JIA Feifei, et al. Magnetic MoS₂ nanosheets as recyclable solar-absorbers for high-performance solar steam generation[J]. *Renewable Energy*, 2020, 163: 146–153.