

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

二硫化钼基光热材料的制备及水处理应用研究进展

谭尊健¹, 聂昌玲², 方国庆¹, 赵艳侠¹, 孙春意¹, 刘贝贝¹, 宋雯¹, 闫良国¹(¹ 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022; ² 济南建城建设工程有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 二硫化钼 (MoS_2) 作为一种新兴的光热材料, 具有宽光谱吸收和高光热转换能力, 在太阳能驱动界面水蒸发领域具有巨大的应用潜力, 迫切需要对 MoS_2 基光热材料在水处理应用的研究进展进行系统的总结与深入理解。本文首先介绍了 MoS_2 纳米片的制备方法, 并对比了不同制备方法的优缺点。其次, 归纳了 MoS_2 基光热材料在光热薄膜、气凝胶、水凝胶、海绵及其他三维多孔材料中的应用策略, 并讨论了光热转换、水传输、热管理及抗盐积累等结构设计优化对光热蒸发器性能的影响。最后, 分析了 MoS_2 基光热材料在海水淡化、重金属与有机污染物去除及抗菌等多功能水处理中的应用效果, 并对 MoS_2 基光热材料的未来发展方向进行了思考与展望, 以期高性能太阳能驱动界面水蒸发系统的构建和应用提供参考。

关键词: 二硫化钼; 光热材料; 界面蒸发; 水处理

中图分类号: TK519; TB34

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-18

Research Progress on the Preparation and Water Treatment Applications of Molybdenum disulfide based Photothermal Materials

TAN Zunjian¹, NIE Changling², FANG Guoqing¹, ZHAO Yanxia¹, SUN Chunyi¹, LIU Beibei¹, SONG Wen¹,
YAN Liangguo¹

(¹ School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China; ² Jinan Jiancheng Construction Engineering Co., Ltd., Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: Molybdenum disulfide (MoS_2) is an emerging photothermal material with wide spectral absorption and high photothermal conversion capability. It has great application potential in the field of solar-driven interface water evaporation and requires a systematic summary and in-depth understanding of the research progress of MoS_2 -based photothermal materials in water treatment applications. This review first introduces the preparation methods of MoS_2 nanosheets, and compares the advantages and limitations of different approaches. Subsequently, the application strategies of MoS_2 -based photothermal materials in films, aerogels, hydrogels, sponges, and other three-dimensional porous architectures are summarized. The influence of key structural design factors including photothermal conversion efficiency, water transport pathways, thermal management, and salt resistance on the performance of solar-driven evaporators is further discussed. Finally, the performance of MoS_2 -based photothermal materials in

收稿日期: 2026-03-31 修回日期: 2026-05-07

通信作者: 孙春意 (1990—), 男, 博士, 讲师, stu_suncy@ujn.edu.cn

第一作者: 谭尊健 (2002—), 男, 硕士研究生, 202421201444@stu.ujn.edu.cn

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2024M761142); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (C类) (22506054); 山东省自然科学基金项目 (ZR2024QE145); 济南大学科研启动项目 (XRC2416)

引用本文: 谭尊健, 聂昌玲, 方国庆, 赵艳侠, 孙春意, 刘贝贝, 宋雯, 闫良国. 二硫化钼基光热材料的制备及水处理应用研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–18

Citation: TAN Zunjian, NIE Changling, FANG Guoqing, ZHAO Yanxia, SUN Chunyi, LIU Beibei, SONG Wen, YAN Liangguo. Research Progress on the Preparation and Water Treatment Applications of Molybdenum disulfide based Photothermal Materials[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–18

multifunctional water treatment applications, including seawater desalination, heavy metal and organic pollutant removal, and antibacterial activity, is analyzed. Future development directions are also proposed, with the aim of providing guidance for the construction and practical application of high-performance solar-driven interfacial water evaporation systems.

Keywords: molybdenum disulfide; photothermal materials; interfacial evaporation; water treatment

引 言

随着社会的发展和科技的不断进步,人们对淡水的需求日益增多,水资源短缺问题已经成为现代社会面临的全球性挑战^[1]。在淡水短缺的巨大压力下,多种从海水或者废水中获得淡水的水处理技术被开发出来,包括电渗析、反渗透、纳滤及电容去离子等^[2-4]。但是这些技术面临着设备成本高、能耗大、处理费用高等问题,一定程度上限制了其广泛应用。因此,开发一种低成本、可持续能源驱动的水处理技术迫在眉睫,这对于缓解水资源短缺问题十分重要。

在各种类型的可持续能源中,太阳能因其取之不尽、用之不竭的供应、普遍性、高容量和环境友好性而被认为有很大的应用潜力^[5]。太阳能界面蒸发技术是一种将太阳能集中于液-气界面,通过光热转换使表层的水分子发生相变从而产生蒸汽的新型水处理方式^[6]。该技术的水处理性能主要依赖于光热材料的光热转换特性,目前常见的光热材料包括金属基材料^[7]、碳基材料^[8]、半导体材料^[9]和聚合物材料^[10]等。金属基材料具备优异的光热性能,但其多为贵金属,成本较高,难以大规模应用^[11,12]。碳基材料(如石墨烯、碳纳米管和氧化石墨烯)具有广泛的光谱吸收和较高的光热转换效率,但制备工艺复杂且成本较高^[13,14]。部分碳材料如石墨烯和碳纳米管具有一定的疏水性,会影响水分的输送,从而降低蒸发效率^[15,16],而氧化石墨烯(GO)虽然亲水性较好,但在水中易发生溶胀,影响了其长期稳定性^[17]。

二硫化钼(MoS_2)作为一种二维过渡金属硫化物(TMDs),具有窄带隙、宽光谱吸收和优异的光热转换性能,可以有效地将吸收的太阳能转化为热能^[18]。并且因为其表面缺乏亲水性官能团,以及其纳米片是通过范德华力构筑的刚性堆叠结构,可有效防止 MoS_2 在水溶液中的再分散,具有良好的稳定性。另外,硫(S)和钼(Mo)是地壳中储存丰富的元素,来源较为广泛,为 MoS_2 的大规模生产提供了充足的原料基础^[19]。因此, MoS_2 是太阳能收集的理想

光热材料,在太阳能界面蒸发领域中具有良好的应用潜力。此外, MoS_2 还具有丰富的催化活性位点,能够在蒸发水的过程中同步催化降解污染物,从而提升系统的多功能性。

近年来,已经有多篇综述总结了太阳能界面蒸发技术中常用光热材料的研究进展,其中关于碳基材料的研究较多^[20,21]。相比之下,有关 MoS_2 基光热材料的研究综述相对有限。Ibrahim等^[9]在其综述中重点介绍了 MoS_2 在太阳能蒸汽发电中的应用,主要总结其结构设计与性能提升;Liu等^[22]系统梳理了 MoS_2 的光热特性与应用,分析了金属硫化物半导体的优势;Gu等^[23]系统总结了TMDs通过不同结构调控方法来优化其性能并提升光热海水淡化效果的研究进展。然而,目前缺乏针对 MoS_2 基光热材料从材料制备、结构优化设计以及水处理应用的全方面系统综述。基于此,本文聚焦于 MoS_2 纳米片及其复合材料的制备策略、界面蒸发器的性能优化途径(包括光热转换、水传输、热管理及抗盐结晶设计)及其在太阳能驱动水处理中的多功能应用,并对其未来发展方向进行了展望,为相关研究提供参考与借鉴。

1 MoS_2 纳米片制备

MoS_2 纳米片的制备方法可以分为自上而下和自下而上两种方法。自上而下的剥离方法包括机械剥离法^[24]、化学剥离法^[25]和液相剥离法^[26]等。而自下而上的方法包括水热法^[27]、化学气相沉积(CVD)法和电化学沉积法等,不同制备方法所制备的纳米片可能有不同的尺寸和厚度,具有各自的优点与缺点,能够满足不同应用场景对 MoS_2 纳米片结构与性能的需求(表1)。

1.1 机械剥离法

机械剥离法通过利用外力克服 MoS_2 层间的范德华力,将块状 MoS_2 剥离为单层或少层纳米片。Budania等^[28]利用胶带从 MoS_2 晶体中剥离出薄层材料。球磨法也属于机械剥离法的一种,适用于大规

模生产。其原理是通过钢球与二维材料的碰撞和回弹作用,施加剪切力、滚动力和冲击力,从而破坏范德华力并实现剥离^[29]。例如,Liu等^[30]结合湿法球磨与交联发泡聚合制备了具有高机械稳定性和良好耐盐性的 MoS_2 基多孔水凝胶。该方法操作简单、产物质量较高,但产率较低、层数不可控,适用于实验室规模的基础研究。

1.2 化学剥离法

化学剥离法通过化学试剂插入 MoS_2 层间,削弱范德华力,再借助超声或搅拌等外力将其剥离为纳米片。Chim等^[31]采用锂离子插层法制备了化学剥离 MoS_2 (Ce-MoS_2),并证明其可作为高效、可扩展且环境友好的光热材料用于构建太阳能蒸发器。在剥离过程中, MoS_2 从2H相转变为1T相, Ce-MoS_2 中1T相占了约60%(图1a)。使用细菌纳米纤维素(BNC)作为聚合物基质,制备了 $\text{Ce-MoS}_2/\text{BNC}$ 双层气凝胶,其消光率(96%)高于块状 MoS_2/BNC 气凝胶(~90%)和纯BNC气凝胶(~10%)(图1b)。 $\text{Ce-MoS}_2/\text{BNC}$ 双层气凝胶比块状 MoS_2/BNC 双层气凝胶的消光率更高是由于 Ce-MoS_2 纳米片中1T相的带隙结构较小,从而提高了光吸收能力与光热转化效率。在 0.76 kW m^{-2} 和 5.35 kW m^{-2} 的光照强度下,所构建的 MoS_2 基光热材料分别实现了~76%和~81%的光热蒸发效率。化学剥离法工艺相对简单、成本较低、产率高并且产物多为1T相。然而,传统锂插层法对插层量的控制精度有限,但电化学剥离法能够有效解决这一问题。Yang等^[32]通过电化学方法在 MoS_2 粉末电极上进行恒流放电,将锂精确插入层间,形成锂插层 MoS_2 (Li-MoS_2),并通过超声处理获得高质量的少层 MoS_2 纳米片。该方法具有较高质量控制精度、所制备的纳米片产量高并且通过调控电流实现插层过程的可控性,有望实现大规模制备。尽管如此,化学剥离法多使用易燃药剂并且会发生相变,会适当限制其应用。

1.3 水热/溶剂热法

水热法是在高温高压的密闭水溶液体系中,以钼(Mo)源和硫(S)源为前驱体,通过控制温度、压力和反应时间等参数,使其发生反应形成 MoS_2 纳米片。溶剂热法与水热法类似,两者的主要区别在于水热法使用水作为溶剂,而溶剂热法使用有机溶剂来溶解前驱体。Guo等^[33]以钼酸铵和硫代乙酰胺为原料,在 200°C 水热条件下合成了具有1T/2H双相的花状 MoS_2 (FMoS_2),具有出色的宽光谱吸收能力

(图1c)。通过引入1T相和花状层级结构,1T/2H MoS_2 蒸发速率达到了 $1.52 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,光热转换效率比2H相 MoS_2 提高了20%。这一性能提升主要归因于两方面因素:一是由于花状层级结构增强了多重内反射(图1d),二是1T相具有较低的带隙(FMoS_2 为 0.9 eV ,2H MoS_2 为 1.6 eV),更容易生成电子空穴并通过非辐射弛豫转化为热能,实现了更高的光吸收(图1e)。

此外,水热/溶剂热法还可通过掺杂(如Fe、N)或与其他材料(如石墨烯、 TiO_2)复合,制备功能化的 MoS_2 复合材料。例如,Yuan等^[34]在钛网上原位生长 TiO_2 纳米线阵列($\text{TiO}_2 \text{ NWAs}$),然后通过水热法在其表面负载超薄 MoS_2 纳米片($\text{TiO}_2 \text{ NWAs@MoS}_2$),所制备的材料具有优异的光热性能,在1个太阳辐照下的光吸收率为96.5%,水蒸发速率为 $1.42 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。水热/溶剂热法因为操作简便、产量高、易复合等优势是实验室制备 MoS_2 纳米片常用的方法之一。该方法存在反应条件苛刻、可能引入杂质等问题,但是通过工艺优化与复合结构设计,有望进一步提升其在光热水处理中的应用潜力。

1.4 其他方法

除了上述提到的 MoS_2 作为光热材料时的常用制备方法外,液相剥离法、化学气相沉积(CVD)法和电化学沉积法也是常用的 MoS_2 纳米片制备技术。液相剥离法是指通过溶剂分散块状 MoS_2 ,然后通过超声或离心处理削弱其层间的范德华力,使其剥离成 MoS_2 纳米片^[35]。该方法工艺简单、成本低、并且产物质量较好,但是产率较低、纳米片的尺寸较小。CVD法则是指在高温下使气态Mo源与S源发生反应并沉积形成高质量、均匀的 MoS_2 薄膜,该方法具有产物质量好、尺寸与厚度可控等优点。具有制备大规模、高质量光热薄膜方面的潜力,能够在晶圆尺度上获得层数均一、缺陷较少的连续薄膜,这对于构建大面积、稳定可靠的光热蒸发器也十分重要。然而,CVD法通常需要高温($>600^\circ\text{C}$)、高真空以及昂贵的前驱体,导致其生产成本较高、产量相对较低,并且CVD法的高温条件使其难以直接在柔性、低耐热基底上直接生长,必须先生长再转移,工艺复杂,限制了其在低成本、大规模水处理应用中的普及。因此,开发常压、低温、快速沉积的CVD工艺是未来的重要研究方向。综上,选择制备方法时需要根据材料的质量、产量、成本及应用场景的具体需求来选择,而开发绿色、低能耗、可大规模生产

的纳米片制备工艺是未来的研究重点。

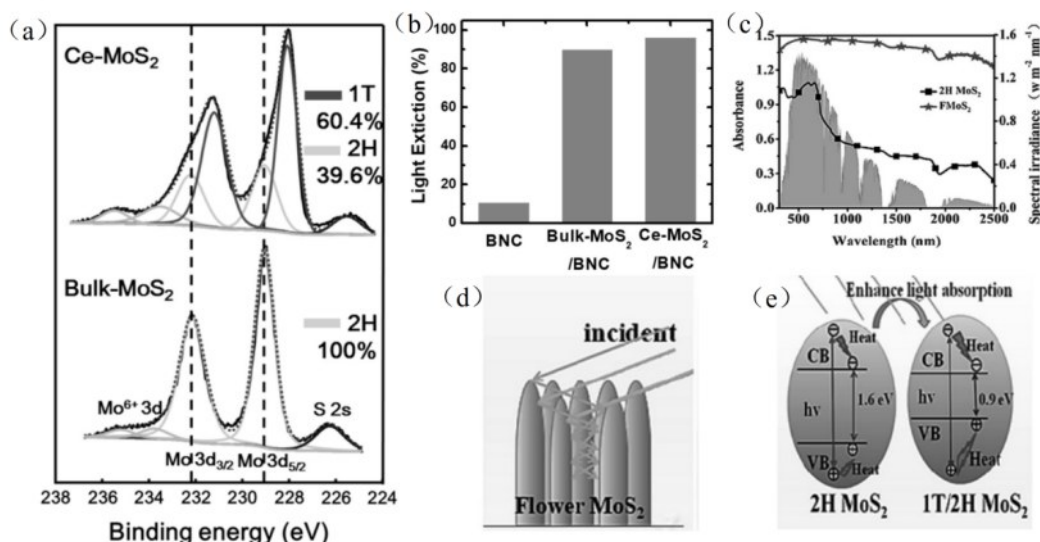


图1 (a)Ce-MoS₂和块状MoS₂的XPS光谱^[31]; (b)原始BNC、块状MoS₂/BNC和Ce-MoS₂/BNC消光率^[31]; (c)2H MoS₂和FMoS₂的UV-Vis-NIR吸收光谱^[33]; (d,e)FMoS₂增强光吸收的示意图^[33]

Fig.1 (a) Ce- MoS₂ and bulk-MoS₂ XPS spectra^[31]; (b) Pristine BNC, bulk MoS₂/BNC, and Ce-MoS₂/BNC light extinction^[31]; (c) UV-VIS-NIR absorption spectra of 2H MoS₂ and FMoS₂^[33]; (d,e) Schematic illustration for FMoS₂ enhanced light absorption^[33]

表1 二硫化钼纳米片制备工艺特性及其应用场景

Table 1 The preparation process characteristics of molybdenum disulfide nanosheets and their application scenarios

类别	制备方法	优点	缺点	主要适用场景	参考
自上而下法	机械剥离法	质量较高、操作简单	产率低、层数不可控	基础物理研究	[36]
	液相剥离法	简单、成本低、质量较好	产率低、尺寸小	实验室少量制备	[37]
	化学剥离法	高产率、可得1T相	发生相变、使用易燃药剂	大规模制备1T相材料	[38]
自下而上法	水热/溶剂热法	产量高、易复合	条件苛刻、有杂质	复杂形貌与复合材料研发	[39]
	化学气相沉积	质量好、尺寸与厚度可控	高温要求、成本高	高性能电子器件	[40]

2 MoS₂基光热材料

MoS₂作为一种具有良好应用前景的太阳能光热材料,目前其应用形式从单一的纳米片结构发展为多种不同形态,使其可以适应不同的应用场景,拓展了其在界面蒸发系统中的广泛应用。目前,基于MoS₂的光热材料体系主要包括光热薄膜、水凝胶、气凝胶、海绵及其他各类三维多孔材料(图2)。通过将材料进行合理的结构设计,可以在充分发挥MoS₂宽光谱吸收和高光热转换效率优势的同时,构建高效的水传输通道、有效的热管理结构以及稳定的蒸汽逸散路径,为实现高蒸发效率的太阳能驱动界面蒸发提供了材料基础。

2.1 光热薄膜

MoS₂基光热薄膜通常通过水热法、化学气相沉

积和物理气相沉积等方法制备,其六方层状结构赋予材料良好的光吸收与光热转换性能。该类薄膜主要包括纯MoS₂薄膜、金属掺杂MoS₂薄膜、MoS₂/氧化物异质结薄膜及多元复合薄膜等。

近年来,研究者通过调控纳米结构、优化制备方案与界面工程等策略,显著提高了薄膜的光热蒸发性能。例如,Yang等^[41]通过CVD法制备了单壁碳纳米管(SWNT)薄膜作为基底材料,然后通过水热反应获得了均匀涂覆在SWNT表面的非晶体MoS₂,在进一步退火处理后,无定形的MoS₂转化为结晶的MoS₂纳米片,以此制备了SWNT-MoS₂复合薄膜(图3a)。SWNT薄膜与MoS₂纳米片之间的协同光热效应使其具有优异的太阳光谱吸收能力,超薄的多孔结构有效地促进了水蒸气的快速逃逸使其拥有高的蒸发效率。Zheng等^[42]通过改性水热法制备了一

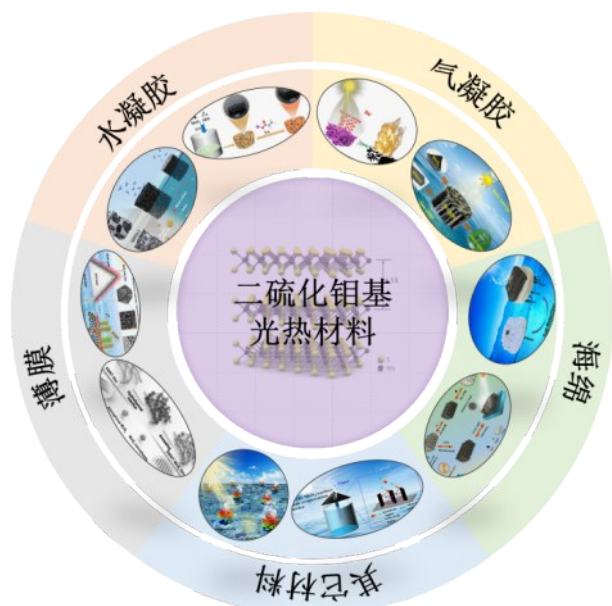


图2 二硫化钼基光热材料的分类

Fig.2 Classification of Molybdenum disulfide-based photothermal materials

级叶状 MoS_2/GO 纳米片,并将其自组装成具有二级纳米孔结构的薄膜, MoS_2 与GO的异质结构使得激子和空穴的耦合产生的热集中在异质结表面,增强了光热效率,并且 MoS_2 和GO纳米片之间的毛细效应创建了弯月面状通道,增加了蒸发表面积,从而促进了水的蒸发,使其在1个太阳辐照下蒸发速率可达 $1.69 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,并且具有良好的自清洁能力。Cui等^[43]在碳布(CF)基底上通过溶剂热法合成了一种多功能的 MoS_2 膜(MoS_2/CF),在1个太阳辐照下,该膜的蒸发速率为 $2.07 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,并且可以在蒸发水的同时实现对罗丹明B大约82%的降解率。Chang等^[44]在玻璃织物上通过水热法原位生长 MoS_2 纳米片,制备了柔性可定制薄膜(MGF)。该结构具有粗糙表面和纤维间隙,不仅可以增加光的反射使光吸收增强,还可以提供良好的蒸汽逃逸通道。MGF薄膜在1个太阳辐照下蒸发速率为 $1.85 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,光热转换效率达94%。Li等^[45]通过水热法将1T/2H MoS_2 纳米花负载到碳化后的碳纳米管@聚丙烯腈($\text{CNT}@\text{C}$)多孔膜上,制得了 $\text{MoS}_2\text{-CNT}@\text{C}$ 膜。 $\text{CNT}@\text{C}$ 的多孔结构有助于水分输送,而 MoS_2 纳米花可以增强内部反射,从而提高了对光的吸收,在1个太阳辐照下蒸发速率达 $2.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。综上所述,通过水热法、化学气相沉积等原位技术可制备出具有优异光热性能的 MoS_2 基薄膜。通过调控纳米结构、优化制备方案及界面工程等策略,能够有

效提升材料的光吸收能力、水传输能力等,从而获得具有高效的光热转换效率和蒸发性能的光热薄膜。

2.2 气凝胶

气凝胶是一种具有丰富三维多孔网络结构的材料,其孔隙率通常高于90%,高的孔隙率有利于促进水分的传输。通过将 MoS_2 或其复合材料分布于气凝胶骨架中,不仅可以保留 MoS_2 的优异特性,还能充分利用气凝胶的高比表面积与低密度优势。构建高质量 MoS_2 气凝胶的挑战在于其纳米片通常缺乏强连接位点的官能团。因此,引入官能团将 MoS_2 功能化改性是解决这一问题的有效途径。例如,Wang等^[46]将功能化 MoS_2 纳米片、壳聚糖和戊二醛在水中充分混合,然后经过冷冻干燥制得了三维 MoS_2 气凝胶。由于引入了具有多种亲水官能团的聚多巴胺(PDA)和壳聚糖分子,因此水分子可以轻松、快速地穿过气凝胶相互连接的孔道,并且该气凝胶具有高孔隙率和机械稳定性,太阳光谱吸收率超过95%,在1个太阳辐照下,光热转换效率达到88.0%。Liu等^[47]以 MoS_2 和还原氧化石墨烯(rGO)为原料,采用一步水热和真空冷冻干燥法制备了 $\text{MoS}_2\text{-rGO}$ 气凝胶(MGA)(图3b),该气凝胶具有垂直疏松的水通道和良好力学性能,垂直孔道可缩短水传输路径,降低流动阻力,在1个太阳辐照下,蒸发速率为 $1.72 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,光热转换效率为86.5%。Ye等^[48]以 MoS_2 为光热材料、聚乙烯醇(PVA)为气凝胶骨架材料、聚氨酯(PU)泡沫为支撑材料,制备了 PU-MoS_2 气凝胶。PU泡沫具有良好的隔热性能、较高的机械强度、耐久性以及易于加工成型等特点,PVA作为骨架结构可以复合光热材料和载体材料,其强亲水性有利于气凝胶内部海水的传输。三种材料复合使该材料具有宽光谱吸收、高孔隙率、亲水性、良好保温性和机械强度,在1个太阳辐照下蒸发速率为 $1.22 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。 MoS_2 基气凝胶通过功能化改性与多级结构设计,优化了光捕获、水传输及热局域化性能,实现了高效太阳能水蒸发。

2.3 水凝胶

水凝胶是一类具有三维交联高分子网络结构的材料,能够吸收并保留大量水分,是太阳能界面蒸发常用的一类基底。水凝胶中的高分子链可以通过氢键、离子键等物理交联或者共价键等化学交联形成网络,将 MoS_2 组分包裹其中,同时为材料提供良好的柔韧性、亲水性和生物相容性,并且由于

其优异的孔隙结构,在一定程度上可以解决材料表面的盐沉积问题^[49,50],进一步提升 MoS_2 基水凝胶的稳定性。Liu 等^[30]开发了一种交联泡沫聚合技术,制备了一种高度稳定耐盐水凝胶($\text{SMoS}_2\text{-PH}$)(图 3c)。该水凝胶在 1 个太阳辐照下蒸发速率高达 $3.30 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,由于丰富多孔结构使其抗盐性能良好,并且表现出优异的长期稳定性,可在海水表面高性能连续运行 15 天。Chen 等^[51]通过酯化反应将 MoS_2 与羟丙基纤维素(HPC)链功能化,又通过一系列交联反应制备了多孔 HPC- MoS_2 /HPC 水凝胶。 MoS_2 -HPC 中的阴离子基团的作用和较大的比表面积使该水凝胶能有效吸附水溶液中染料,并且光照下还可以降解所吸附的染料,实现循环使用。Li 等^[52]采用自然沉积法制备了梯度型碳点(CDs)/ MoS_2 /PVA 水凝胶。通过将 CDs/ MoS_2 纳米花自然地沉积在模具的底部,形成了上下表面光热材料分布不对称的蒸发器。在蒸发过程中,将较高的下底面浓度转化为上表面浓度,以实现蒸发器表面的集热,减少水从蒸发器下端向上输送时的热损失,从而改善热管理。这种创新的设计有效地将热量集中在水凝胶的上表面,同时保持结构通道的通畅性。在 1 个太阳辐照下,水凝胶的蒸发速率为 $1.49 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,光热转化效率为 92.5%。Li 等^[53]则将具有聚多巴胺(PDA)涂层的光热 MoS_2 中空纳米球与聚乙烯醇(PVA)水凝胶基质相结合,PDA 涂层与中空结构增强了对光的吸收,制备了具有良好光吸收性能的水凝胶复合材料。综上, MoS_2 基水凝胶具有可调控的交联网络与多孔结构,可以有效的克服蒸发过程中的盐结晶、热损耗与污染物积累等问题,是太阳能界面蒸发的良好材料。

2.4 海绵

海绵材料具有高比表面积和复杂的孔隙结构,能够有效地吸收太阳能并将其转化为热能,加速界面水蒸发,在水分蒸发方面具有天然优势。常见的海绵基底有三聚氰胺海绵、聚氨酯海绵等,具有质量轻、结构稳定及水传输能力强等优势,是构建太阳能界面蒸发器的理想基底。Xiao 等^[54]通过浸渍-干燥-交联工艺,制备了 MoS_2 /海藻酸钠(SA)包裹三聚氰胺(MF)泡沫复合海绵($\text{MoS}_2/\text{SA}@\text{MF}$)。海藻酸钠可以改善其亲水性,而 MF 海绵能够通过毛细管力有效地将水抽吸到顶部表面。将其裁剪成不同尺寸的蒸发器进行性能测试,其中 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的蒸发器在 3.5 wt% NaCl 溶液和 1 个太阳辐照下,蒸发

速率为 $1.92 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,光热转换效率达到 90%。Yin 等^[55]将负载 MoS_2 的硼纳米片(BNs)与具有优良孔隙结构魔芋葡甘露聚糖海绵(KS)结合,构建了低成本的高效光热蒸发器(KBMS)。BNs 具有更窄的带隙,与 MoS_2 结合有利于提升光热性能,KBMS 在全光谱范围内的光吸收率达 95.0%,并且由于其独特的三维多孔结构设计,使其具有快速水分蒸发和优异的耐盐性,在 1 个太阳辐照下,实现了 $1.54 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 蒸发速率和 96.4% 的光热转换效率。Zhong 等^[56]通过一步水热法制备了 MoS_2 /还原氧化石墨烯纳米片(RMO),并以聚氨酯海绵为载体构建了一种用于太阳能海水淡化的 E 形结构蒸发器(ERMOPU)(图 3d)。利用 rGO/ MoS_2 复合材料的协同光吸收增强作用,实现了良好的宽带太阳能集热,该蒸发器在 1 个太阳辐照下的蒸发速率和光热转换效率分别可达 $2.03 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 95.4%,证明了表面结构设计能够显著增强光热转换与水蒸发性能。总体而言,海绵载体通过可扩展复合工艺和多级孔结构设计,实现了 MoS_2 优异的光热性能与海绵的水输运能力的协同,为构建低成本、高性能的太阳能界面蒸发系统提供了有效途径。

2.5 其他三维多孔材料

三维多孔结构通常具有较高的比表面积和复杂的内部孔道结构,这种结构可以显著增加与太阳光的接触面积,并且复杂的孔道可以使太阳光在内部进行多次散射从而延长光传播路径,进一步提升光谱吸收与光热转换效率。同时,丰富的孔道网络还能作为水传输的通道,保证蒸发器表面水分的持续供应。因此,三维多孔结构在太阳能界面蒸发领域得到广泛关注。除了气凝胶、水凝胶与海绵外,近年来以丝瓜、蘑菇和松果等天然生物质为基底的多孔结构也受到广泛关注。这类材料具有来源广泛、成本低廉、可再生且可生物降解等优势,符合绿色可持续发展的理念。同时,其天然形成的多级多孔结构可依靠毛细作用实现高效的自发水输运,从而为界面蒸发过程提供稳定的水分供应。例如,Wu 等^[57]以天然丝瓜海绵作为基底材料,通过水热法丝瓜海绵上负载 MoS_2 纳米片和碳颗粒,构建了三维复合太阳能蒸发器(HLMC),其双层孔隙结构有利于高效盐分抑制,由于丝瓜的亲水性和多孔性骨架,以及 MoS_2 纳米片和碳颗粒的光吸收和光热转换效应,该蒸发器在 1 个太阳辐照下,光热转换效率为 94%,蒸发速率高达 $3.45 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

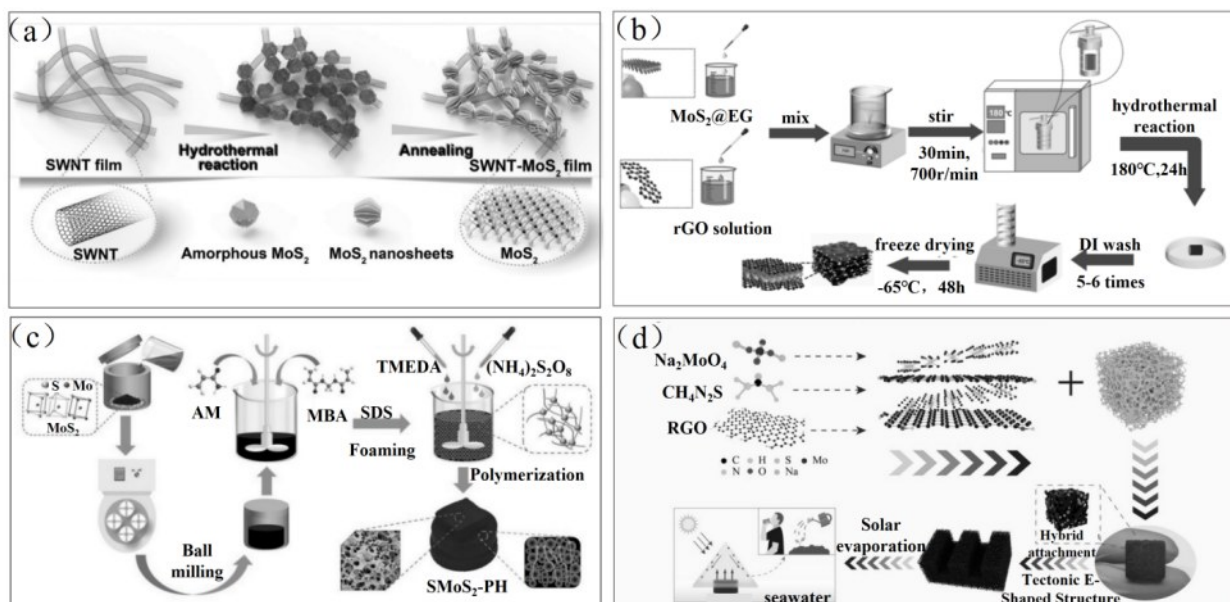


图3 (a)单壁碳纳米管(SWNT)-MoS₂薄膜制备工艺示意图^[41]; (b)MoS₂-氧化还原石墨烯(rGO)气凝胶(MGA)的制备工艺^[47]; (c)可伸缩的MoS₂基多孔水凝胶(SMoS₂-PH)的制备工艺^[30]; (d)E型蒸发器的研制及应用^[56]

Fig.3 (a) Schematic diagram of the fabrication process for single-walled carbon nanotube (SWNT)-MoS₂ films^[41]; (b) Fabrication process of MoS₂-reduced graphene oxide (rGO) aerogel (MGA)^[47]; (c) Illustration of the fabrication process for stretchable MoS₂-based porous hydrogel (SMoS₂-PH)^[30]; (d) Preparation and application of the E-shaped evaporators^[56]

综上所述,不同形态的MoS₂基光热材料的制备方法和应用场景也各不相同,但都具有出色的蒸发性能,在太阳能驱动水处理领域展现出显著优势和应用潜力。并且不同关键设计参数与性能也不同(表2),其中水热法应用最多,因为生成的纳米花结构本身可以增加光反射提升光热性能,与其他材料复合可以实现协同光热效益,而构建多孔结构则是提升水传输的关键。通过将MoS₂负载到薄膜、水凝胶、气凝胶、海绵及其他三维多孔结构上构建不同的材料形态,不仅可以利用MoS₂本身的优异光热性能,还能充分发挥各自基底材料的结构优势,实现高效太阳能界面蒸发。

3 MoS₂基蒸发器的结构设计

不同形态的MoS₂基光热材料都有着良好的光热蒸发性能,并且有着自己独特的优势,这主要是由于他们在光热转换、热管理以及水传输这些关键环节上的精心设计。光热薄膜凭借高效的光吸收与局域加热,可以实现快速蒸发;多孔海绵通过贯通的大孔促进供水和蒸汽的逸出;气凝胶通过高孔隙和隔热特性可以有效抑制热散失;水凝胶通过亲水网络构建连续的水输送通道,并且有效增强抗盐性能。因此,蒸发器的整体性能本质上取决于光热

材料特性与微观结构设计这两个方面在光吸收、能量转化、水输运调控及盐分迁移控制等多过程中的协同耦合机制,围绕太阳能收集与光热转换、水传输、热管理以及抗盐积累等关键环节展开系统优化,是实现高效界面蒸发的重中之重。

3.1 太阳能收集与光热转换

光热材料是太阳能界面蒸发系统的核心,太阳能的收集与光热转换都是光热材料在发挥着作用。MoS₂作为常见的半导体材料,具有优异的光学性质、窄带隙与宽光谱吸收,是良好的光热材料,当高于带隙的光子能量照射MoS₂时,MoS₂中电子-空穴对的形成会被刺激,随后电子-空穴对弛豫至导带和价带边缘,通过非辐射弛豫释放热能(图4a)。因为MoS₂具有窄带隙,大多数入射光子的能量高于其带隙能量,因此很容易生成电子空穴并通过非辐射弛豫转化为热能。同时还可以通过各种方法进一步提高MoS₂光热材料的光吸收能力和光热转换效率。如调整MoS₂纳米材料的尺寸和形状,制备纳米片、纳米花、多孔结构或垂直排列的MoS₂,增加比表面积和光散射路径,从而增强光吸收。例如,Li等^[53]通过聚多巴胺(PDA)包覆MoS₂的中空纳米粒子作为光热材料,其特殊结构(图4b)可以使阳光在其内部进行多次反射从而减少光损失,而且PDA的热振

表2 MoS₂基光热材料的关键设计参数与性能对比Table 2 Key Design Parameters and Performance Comparisons of MoS₂-Based Photothermal Materials

类型	材料	制备方法	关键设计策略	光吸收率(%)	蒸发速率(kg m ⁻² h ⁻¹)	光热转换效率(%)	参考文献
光热薄膜	SWNT-MoS ₂	CVD+水热+退火	SWNT与MoS ₂ 协同+超薄结构	~82	6.6 ^①	~89	[41]
	MoS ₂ /GO	改性水热	仿生二级纳米孔+自组装	~97.3	1.69	~96.6	[42]
	MoS ₂ /CF	溶剂热	碳布多孔骨架+MoS ₂ 负载	~91.5	2.07	~88.7	[43]
	MGF	水热	粗糙表面+纤维间隙	-	1.85	~94.0	[44]
	MoS ₂ -CNT@C	水热	1T/2H MoS ₂ 纳米花+多孔CNT	-	2.53	-	[45]
气凝胶	3D MoS ₂ 气凝胶	冷冻干燥	戊二醛交联功能化MoS ₂	>95	1.27	~88.0	[46]
	MoS ₂ -rGO	水热+冷冻干燥	垂直疏松水通道	~86.3	1.72	~86.5	[47]
	PU-MoS ₂	冷冻干燥	PU泡沫支撑+PVA骨架	-	1.22	-	[48]
	Ce-MoS ₂ /BNC	冷冻干燥	1T相MoS ₂ +双层结构	~96	6.15 ^②	~81.4	[31]
水凝胶	SMoS ₂ -PH	交联发泡聚合	湿法球磨MoS ₂ +交联发泡	~81.9	3.30	~93.4	[30]
	HPC-MoS ₂ /HPC	酯化+交联	MoS ₂ 与HPC链共价键合	-	-	~86.5	[51]
	CDs/MoS ₂ /PVA	自然沉积	梯度型结构+碳点沉积	>95	1.49	~92.5	[52]
	MoS ₂ @PDA	真空吸附	中空MoS ₂ 纳米球+PDA涂层	~95.6	5.41	~93.7	[53]
海绵	MoS ₂ /SA@MF	浸渍-干燥-交联	水渠孔道设计+海藻酸钠包裹	~81.9	1.92	~90	[54]
	BNs@MoS ₂ KGM	水热	硼纳米片复合MoS ₂ +多孔KGM	~95.0	1.54	~96.4	[55]
	ERMOPU	水热	rGO/MoS ₂ 异质结构+E形结构	>95	2.03	~95.4	[56]
	CuS-MoS ₂ /PVA	水热	CuS-MoS ₂ 协同+疏水表面	~95.6	1.92	~91.5	[59]
其他三维多孔材料	MoS ₂ /C丝瓜络海绵	水热	MoS ₂ 纳米片负载碳颗粒+双层孔隙	~94	3.45	~94	[57]
	MoS ₂ /松果	水热	MoS ₂ 纳米花+垂直鳞片结构	~85	1.85	~97	[82]
	Zn-MoS ₂ /高粱秸秆	水热	Zn掺杂1T-MoS ₂ +锥形结构	~94	3.46	-	[73]

注:蒸发速率默认在1 kW m⁻²光照强度下;①为5 kW m⁻²光照强度下;②为5.35 kW m⁻²光照强度下

动与MoS₂的非热弛豫效应也可以协同增强光吸收,该结构设计使其具有优异的光热转换性能。与花状结构相比,中空结构更利于热局域化而花状结构具有更高的比表面积,有利于后续水分子吸附与传输。另外,构建异质结也是提升光热性能的有效途径之一。Jin等^[58]以碳纤维为结构支撑材料,壳聚糖气凝胶为骨架结构,以具有二维异质结构的1T MoS₂-MXene为有效的光热转换材料,制备了三维蒸发器(JMMC)。该异质结通过提高亲水性,确保了高效供水并显著降低蒸发焓,使JMMC的蒸发速率达到了2.29 kg m⁻² h⁻¹,光热转换效率为93.8%。此外,MoS₂与贵金属、其他半导体或碳材料的复合也能产生协同增强效应。如Liu等^[59]制备了硫化铜(CuS)-MoS₂/PVA疏水海绵,CuS和MoS₂的结合显著提高了表面疏水性,最大限度地减少了表面的水分积聚。此外,CuS-MoS₂复合材料的协同光热效应加速了PVA海绵的水分蒸发速率,使该海绵在1个太阳辐照下达到了1.92 kg m⁻² h⁻¹蒸发速率和91.5%的光热转换效率。Cheng等^[60]将等离子体Ag纳米颗

粒、MoS₂纳米花和聚多巴胺(PDA)混合负载于水凝胶基底上,构建了一种高效太阳能蒸发器,多种光热材料的合作使蒸发器具有广泛的光谱吸收能力、优异的光热转换效率及良好的抗菌性能,在1个太阳辐照下蒸发速率可达2.79 kg m⁻² h⁻¹。除此之外,元素掺杂(如Fe、Co、Ni或C、N、P)也是一种有效调节MoS₂光响应范围至近红外区域的策略。例如,Zheng等^[61]通过C掺杂MoS₂制备了形状可控的多孔纤维膜,然后利用模压成型的方法制备了不同形状的三维蒸发器,其中,玫瑰型蒸发速率高达8.91 kg m⁻² h⁻¹,远超平面蒸发器的性能。综上,通过纳米结构调控、异质结构筑、元素掺杂及宏观结构优化,均能显著提升MoS₂的光热性能,纳米结构工程适用于提升光吸收上限,异质结构筑适合宽光谱响应,元素掺杂则能精准调控能带。将他们进一步协同使用,虽然制备方法可能会复杂,但有望实现更高性能。

3.2 水传输

水传输系统在太阳能界面蒸发系统中也扮演

着重要的角色,是维持太阳能界面蒸发器能够长期稳定运行的关键。它的作用是将待处理的水持续输送到蒸发器的界面,将水传输速率与蒸发速率相匹配,避免蒸发器因供水不足导致蒸发效率下降,同时避免水过量输送引起热对流损失。在应用于海水淡化时,快速稳定的水传输可减少盐分在蒸发界面结晶。而在污水处理中,水传输系统可以避免污染物在蒸发界面富集。研究表明,通过构建具有适当亲水性和分级孔道的三维多孔结构,可以有效实现水传输速率与蒸发速率的动态平衡。例如,Li等^[62]以香蒲碳纤维(CCF)和 MoS_2 为光热材料,使用PVA/壳聚糖作为骨架,通过化学/离子交联制备了具有三维多孔性和超亲水性的复合气凝胶,由于该气凝胶独特的多孔结构和超亲水性,使气凝胶表面在蒸发过程中有足够的水分供应,因此该气凝胶具有出色的蒸发性能。Wu等^[57]通过水热法在天然丝瓜海绵上负载了 MoS_2 纳米片和碳颗粒制备了三维蒸发器(HLMC),该蒸发器具有优异太阳能蒸发性能和出色抗盐性能,这主要是因为丝瓜海绵的亲水性大孔结构、丝瓜纤维的微孔道以及圆柱形HLMC蒸发器的不对称结构(图4c),该结构可以利用毛细作用实现快速水传输,显著抑制盐积累。因此,设计良好的孔道结构和控制材料的润湿性是水传输系统的关键所在,通过这些设计可以将水供给与蒸发速率相匹配,从而提升蒸发器的长期稳定性。

3.3 热管理

有效的热管理对于提升蒸发器的蒸发效率也非常重要,设计热管理可以将光热转换产生的热能尽可能限制在蒸发表面,从而减少热损失。通过材料本身的调控以及蒸发器的结构设计都可以增强热管理。材料调控主要是指选择可以将热量限制在蒸发表面的材料而在蒸发器结构方面,通过将低维水通道与热绝缘体组合,可以有效减少热量向水体传导。例如,Ying等^[63]由海胆状 $\text{MoS}_2/\text{Mo}_3\text{N}_6/\text{C}$ 上层和生物质明胶底物构建了双层结构的气凝胶。上层的 $\text{MoS}_2/\text{Mo}_3\text{N}_6/\text{C}$ 具有优异的光吸收($\sim 97\%$)和显著的光热转换效率($\sim 73.6\%$),生物质明胶基质不仅保持了优异的亲水性,而且具有固有的多孔性和低导热性,可以防止热量从蒸发层扩散到下面的大块水,大大减少了蒸发过程中的热损失。Li等^[53]通过结构优化降低热损失,通过将有聚多巴胺(PDA)涂层的光热 MoS_2 空心纳米球与聚乙烯醇(PVA)水凝胶基质相结合,用不同的制备方法制备了两种水

凝胶复合材料(MPPH-I和MPPH-S)。其中,通过真空吸附法制备的MPPH-S结构中, MoS_2 空心纳米球附着在水凝胶内部孔壁上,低维水通道设计与水凝胶固有的隔热特性相结合,有效限制了靠近界面的水路热损失(图4d),并且还通过调控水凝胶的暴露高度,降低了纵向的传热速率,进一步提升了整体热管理能力。由此可以看出,暴露高度对于热管理和水传输都十分重要。因此,通过使用低导热材料与设计分离式、低维化的蒸发器结构,可以有效抑制热传导、对流及辐射损失,显著提高蒸发器的热管理能力,从而提高蒸发器的蒸发性能。

3.4 抗盐积累

在提升蒸发器蒸发效率的同时,还需要蒸发器具有良好的抗盐积累能力,以确保其可以长期有效的进行太阳能脱盐。在太阳能蒸发器持续运行的过程中,由于水分被不断蒸发,蒸发器表面的盐浓度越来越高,使盐分在蒸发器表面积聚结晶,水的传输路径被盐结晶堵塞导致蒸发速率下降,从而影响水传输。因此,增强蒸发器的抗盐积累能力不仅可以稳定光热转换效率、降低维护成本,也为后续处理高盐废水奠定了基础^[64]。提高蒸发器抗盐积累能力的方法有很多,其中结构设计是提升抗盐积累的重要手段之一,通过设计定向的孔道结构,可利用对流作用促进盐离子的快速扩散与回流,例如,Xiao等^[54]制备了 MoS_2 -海藻酸钠水凝胶包裹的三聚氰胺复合海绵($\text{MoS}_2/\text{SA@MF}$),并且在海绵上精心设计了孔道和水渠结构(图4e),由于复合材料固有双峰多孔结构以及设计的孔道和水渠结构,显著增强了水传输能力和盐离子的对流扩散能力,从而加速盐分回流达到了抑制盐结晶的目的。Xu等^[65]通过在过渡金属硼化物-碳氮化物基体上负载1T/2H相 MoS_2 ,构建了一种多功能陶瓷复合材料(图4f),该复合材料具有超亲水以及三维互连多孔结构,这些性质使其具有优异的盐分自清洁能力、结构稳定性和耐久性。除了结构调控外,基于表面电荷调控策略同样可有效抑制盐结晶。例如,Zhao等^[66]制备了一种海绵状聚电解质复合水凝胶(MPS),其介孔壁固定 $-\text{COO}^-$ 基团在盐水中解离并束缚 Na^+ ,在凝胶-溶液界面上建立了Donnan平衡(图4g),显著抑制盐离子向内扩散并降低蒸发器表面的盐浓度,从而有效限制盐结晶、保证蒸发器的长期稳定运行。此外,界面工程设计策略也是抗盐积累的重要方法。通过构建亲疏水异质结构或Janus型蒸发器,

可以将蒸发区域与盐分输送路径分离开来。例如, Patra 等^[67]结合了光热和焦耳热效应构建了一种全天候、抗盐结晶蒸发器, 蒸发器的顶层为亲水性 MoS_2 涂层碳布, 底层是银浆涂覆的疏水碳布, 蒸发器整体放置在经过特殊切割的聚乙烯醇(PVA)泡沫上。该分离结构将蒸发区域限定在疏水碳布底部与PVA泡沫的三角界面, 凭借PVA泡沫超高润湿性实现水分的均匀分布, 有效抑制了盐结晶与积累通过多尺度的结构设计与表面性质的调控等手段, 可显著缓解盐结晶现象甚至避免盐结晶, 提高蒸发器的长期稳定性并降低成本。尽管 Janus 蒸发器和 Donnan 平衡的聚电解质体系在常规海水条件下均表现出优异的抗盐性能, 但在处理极高盐溶液(如饱和卤水)时仍面临显著挑战。对于 Janus 结构而言, 疏水层可有效抑制盐水向上渗透, 但在极端蒸发条件下, 若水分补给速率无法与蒸发速率保持动态平衡, 盐离子仍可能在蒸发界面附近局部富集并达到过饱和状态, 从而诱发盐结晶并逐渐堵塞水传输通道。对于基于 Donnan 排斥作用的聚电解质体系, 高离子强度会压缩双电层, 静电排斥减弱, 从而降低对盐离子的筛分与排斥能力, 使部分盐离子仍可进入蒸发界面并发生结晶沉积。因此, 未来仍需发展更高效的主动排盐策略(如调控盐离子定向迁移或诱导可控结晶过程), 或探索新型结构设计, 以实现蒸发器在极端高盐环境下的长期稳定运行。

综上所述, MoS_2 基蒸发器的结构设计是提升太阳能界面蒸发系统性能的重要方法。通过对光热材料、水传输、热管理以及抗盐积累等方面进行优化与调控可以显著提升蒸发器的蒸发效率、长期稳定性和抗盐积累能力。

4 MoS_2 基光热材料水处理应用

近年来, 太阳能驱动界面蒸发技术因为能耗低、成本低和环境友好等优势, 在水处理领域受到了广泛关注^[68]。 MoS_2 基光热材料凭借出色的光热特性成为了构建太阳能界面蒸发系统的理想光热材料。通过将 MoS_2 作为光热材料构建的太阳能蒸发器不仅能够实现高效太阳能海水淡化, 还可以在蒸发水的同时进行催化、吸附及抗菌效应, 同步去除水体中的有机污染物、重金属离子和病原微生物等, 在水处理领域展现出了十分广阔的应用前景。

4.1 海水淡化

海水淡化是解决严重的水资源短缺问题在技术和经济上最可行的方法之一^[69]。太阳能界面蒸发作为一种绿色、低能耗的海水淡化策略, 已经得到了人们的广泛关注, 基于 MoS_2 基光热材料的太阳能驱动界面蒸发体系, 可以充分 MoS_2 的光热特性, 显著增强光热转换效率, 获得高纯度的淡水, 并且该技术无需复杂的外部供水以及后处理设备, 在海水淡化中具有广阔的应用前景^[70]。Wang 等^[71]开发了一种双层 MoS_2 /聚氨酯(PU)海绵蒸发器(MPU-PPU), 顶层 MoS_2 -PU 起到吸收太阳能和光热转换的作用, 底层的 PDA-PU 起到保温层和水泵的作用(图 5a)。在 1 个太阳辐照下, 处理 NaCl 溶液的蒸发速率达到 $1.20 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 并且处理后水中的 Na^+ 和 Cl^- 浓度分别降至 1.3 mg L^{-1} 和 6.9 mg L^{-1} , 符合 WHO 饮用水标准(图 5b)。Jiang 等^[72]受植物木质部结构启发, 选用纤维素纳米纤维(CNF)和 MoS_2 纳米片为光热材料, 采用定向冷冻干燥技术制备了具有垂直多孔结构的 CNF/ MoS_2 气凝胶(CMOA)(图 5c), 蒸发器的超亲水性和内部垂直孔结构使其具有较高的储水、输送以及抗盐能力。在 1 个太阳辐照下的蒸发速率达到 $1.81 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 其对主要盐离子的截留率超 99.99%(图 5d), 并对其进行户外水蒸发实验(图 5e), 蒸发器被放置在丙烯酸壳体的中间, 使水汽能够在盖子内表面冷凝, 并流入底部的集水容器。温度和湿度计以及光功率密度计用于实时监测白天的温度、湿度和光强变化, 在室外的日产水量达到了 10.3 kg m^{-2} , 在海水淡化中具有很大的应用潜力。Zhang 等^[73]通过简单的一步水热法制备了锌掺杂 1T- MoS_2 (Zn-MoS_2), 然后利用 Zn-MoS_2 改性的生物废弃物高粱秸秆(ZnMoSSE)构建了不同结构的三维太阳能蒸发器, 其中锥形蒸发器可以显著扩大蒸发表面积, 使蒸发速率达到 $3.46 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。通过将锥形蒸发装置置于填充聚乙烯泡沫的塑料瓶中, 构建了由沙层包围的户外太阳能海水淡化系统装置(图 5f), 结合沙层隔热与风能驱动, 可以实现全天候稳定产水, 日产水量高达 23.23 kg m^{-2} , 并且产出的水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度均符合 WHO 饮用水标准。

不同 MoS_2 基光热材料的太阳蒸发性能总结于表 3, 在 1 个太阳辐照下, 蒸发速率范围在 $1.27\text{--}5.41 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 之间, 其中, MoS_2 @PDA 水凝胶具有 $5.41 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的最高的蒸发速率, Zn-MoS_2 改性高粱秸秆与

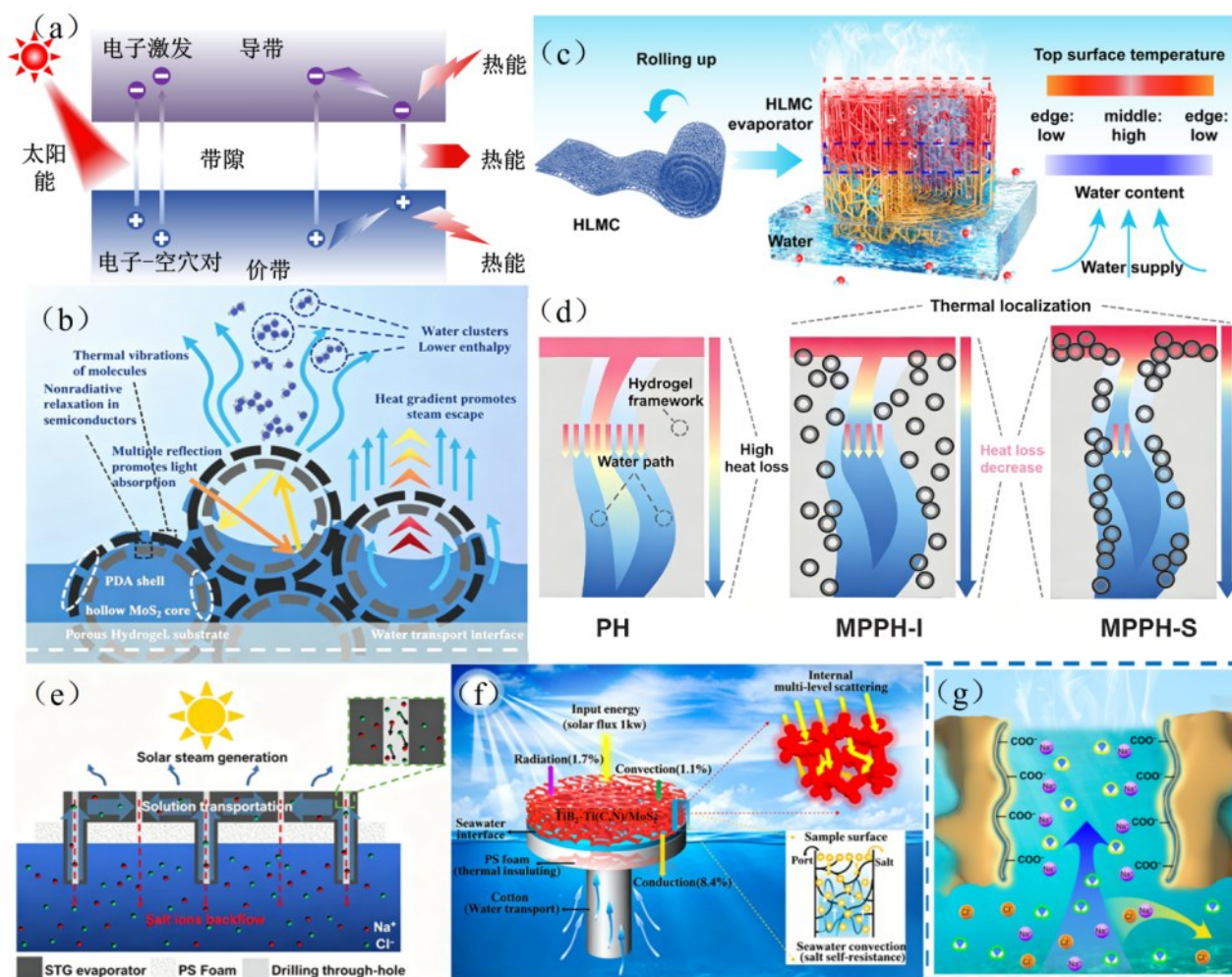


图4 (a) MoS₂的光热机理示意图; (b) 聚多巴胺(PDA)涂层的 MoS₂中空纳米球空心结构的高效光热转换和热局域化示意图^[53]; (c) 含 MoS₂纳米片和碳颗粒构建三维复合蒸发器(HLMC)制备及表面温度分布示意图^[57]; (d) 中空纳米结构与界面组装对热局域化增强示意图^[53]; (e) 太阳能蒸汽发电(STG)蒸发器的抗盐机制示意图^[54]; (f) 蒸发器的热损失、多次散射和盐循环示意图^[65]; (g) MoS₂聚电解质海绵(MPS)截盐机理示意图^[66]

Fig.4 (a) Schematic diagram of photothermal mechanism of MoS₂; (b) Schematic diagram illustrating the efficient photothermal conversion and thermal localization of hollow structures of MoS₂ nanospheres coated with polydopamine (PDA)^[53]; (c) Schematic illustration of the fabrication of a three-dimensional composite evaporator (HLMC) incorporating MoS₂ nanosheets and carbon particles, and the corresponding surface temperature distribution^[57]; (d) Schematic illustration of the enhancement of thermal localization by hollow nanostructure and interface assembly^[53]; (e) Schematic diagram of the basic mechanism of salt rejection performance of solar steam generation (STG) evaporators^[54]; (f) Schematic diagram of heat loss, multi-scattering, and salt circulating of the evaporator^[65]; (g) Schematic diagram of the salt rejection mechanism of MoS₂ polyelectrolyte sponge(MPS)^[66]

MoS₂/C 丝瓜络海绵蒸发速率分别为 3.46 kg m⁻² h⁻¹ 与 3.45 kg m⁻² h⁻¹, 也具有有良好的蒸发性能。多数 MoS₂ 基光热材料的光热转换效率集中在 80–97% 之间, 并且在不同基底中均能保持较高的蒸发性能。因此, 高的蒸发速率与光热转换效率表明 MoS₂ 基光热材料在高效太阳能脱盐领域具有显著应用潜力。

4.2 重金属离子去除

太阳能界面蒸发过程中, 水快速转化为蒸汽,

重金属离子被高效截留。与一些传统的重金属去除方法(如化学沉淀法、离子交换法等)相比, 太阳能界面蒸发不受重金属离子种类和浓度的限制, 能够处理多种重金属离子混合的复杂废水。MoS₂ 去除重金属主要依靠表面硫原子与重金属离子间的酸碱络合作用, 以及离子交换与静电吸引实现高效吸附。其层状结构可通过插层法或水热法拓宽层间距, 充分暴露内部活性硫位点; 高比表面与丰富

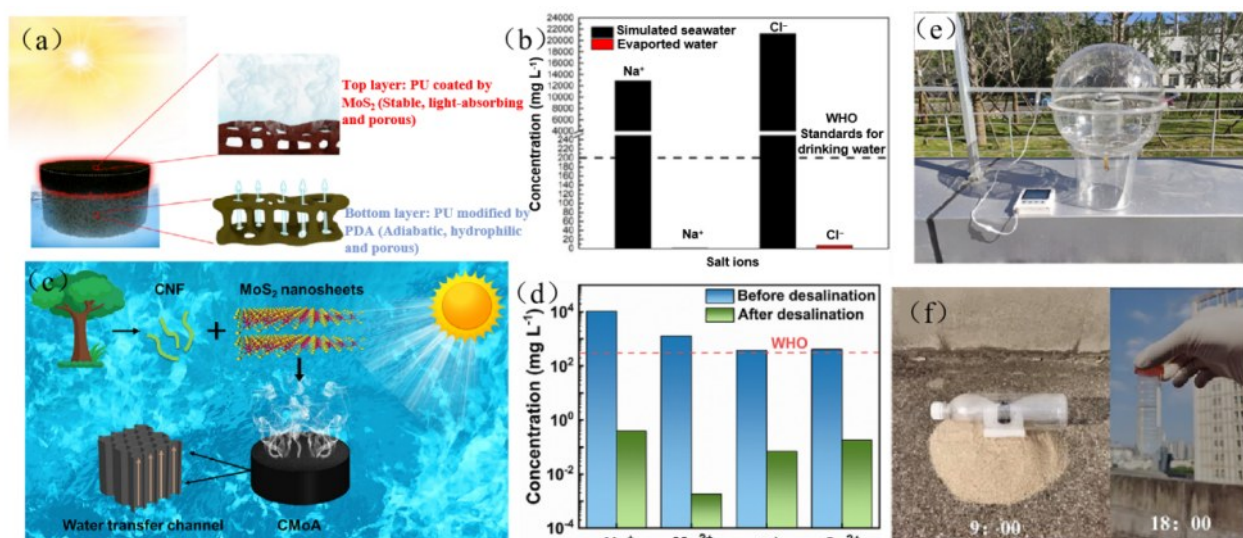


图5 (a)双层 MoS₂/聚氨酯(PU)海绵蒸发器(MPU-PPU)光热脱盐示意图^[71]; (b)双层 MoS₂/聚氨酯(PU)海绵蒸发器(MPU-PPU)太阳能脱盐前后水溶液中离子浓度比较^[71]; (c)太阳驱动的水蒸发的纤维素纳米纤维(CNF)/MoS₂气凝胶(CMoA)示意图^[72]; (d)在1个太阳辐照下纤维素纳米纤维(CNF)/MoS₂气凝胶(CMoA)脱盐前后离子浓度^[72]; (e)用于户外水蒸发的简单设备, 包含球形冷凝板、太阳能蒸发器、集湿器以及温度和湿度检测器^[72]; (f)户外实验过程中 ZnMoSSE 基太阳能海水淡化原型装置的光学实拍图^[73]

Fig.5 (a) Schematic diagram of the working mechanism of the double-layer MoS₂/polyurethane (PU) sponge evaporation solar desalination evaporator (MPU-PPU)^[71]; (b) Comparison of ion concentrations in the water solution before and after solar desalination using the double-layer MoS₂/polyurethane (PU) sponge evaporator (MPU-PPU)^[71]; (c) Schematic diagram of solar-driven water evaporation of cellulose nanofibers (CNF)/MoS₂ nanosheets aerogel (CMoA)^[72]; (d) Ion concentration before and after desalination of cellulose nanofibers (CNF)/MoS₂ nanosheets aerogel (CMoA) under 1 sun irradiation^[72]; (e) Simple equipment for outdoor water evaporation, containing the spherical condensing plate, solar evaporator, moisture collector, and temperature and humidity detector^[72]; (f) Optical picture of ZnMoSSE based-solar desalination prototype during the outdoor experiment^[73]

边缘缺陷进一步提升吸附容量与速率。MoS₂对 Hg²⁺、Pb²⁺等软酸型重金属具有极强特异性与选择性,吸附性能显著优于传统碳基吸附材料^[74],而光热效应在此过程中起到辅助促进作用:局部升温可增强溶液中离子的扩散速率并加快其向活性位点的传质过程,从而提升整体吸附效率。Li等^[75]将水热合成的 MoS₂/C 微珠静电组装在聚电解质功能化的 PU 海绵制备了三维蒸发器(MoS₂/C@PU),具有 88% 的光热转换效率,其高孔隙率结构可以保障高效水输运与热管理,还可以在太阳能界面蒸发过程中特异性高效吸附 Hg²⁺,将有害汞从 200 μg L⁻¹降低至 1 μg L⁻¹这一可饮用水平,符合美国环境保护署(EPA)所制定的标准。同时对 Ni²⁺的去除率也高达 99.6%。除此之外,MoS₂基蒸发器还可去除其他多种重金属离子。例如, Yang 等^[76]构建的垂直孔道 MoS₂-MXene/壳聚糖气凝胶对多种重金属离子(如 Cu²⁺、Cr³⁺、Cd²⁺、Zn²⁺和 Pb²⁺)去除率达到 99.9%,其出水浓度显著降至约 0.1 mg L⁻¹(图 6a)。Yin 等^[55]则将含硼

Ns@MoS₂负载到魔芋葡甘露聚糖(KGM)海绵上制备了蒸发器(KBMS),在实现高蒸发速率(1.54 kg m⁻² h⁻¹)和高光热转换效率(96.5%)的同时,凭借 KGM 海绵中羟基的螯合作用,使多种重金属离子浓度降低 4~5 个数量级,对模拟废水中离子去除效率接近 100%。这些研究充分表明,MoS₂基蒸发器在高效海水淡化的同时,还对多种重金属污染物的具有良好的去除效率。

4.3 有机物去除

在光照条件下,MoS₂可产生的光生电子与空穴,然后与水分子或者溶解氧反应生成羟基自由基、超氧自由基等高活性氧物种。这些活性物种可通过氧化还原反应降解水体中的有机污染物,并最终使其变为 CO₂和 H₂O,达到去除水中有机污染物的效果^[77-79]。Fu 等^[80]通过在三聚氰胺泡沫(MF)上负载 MoS₂,构建了一个可以蒸发水与催化降解污染物的双功能蒸发器(MoS₂-MF),MoS₂为蒸发器提供了强光吸收能力和有效的光热转换,此外,MoS₂具

有良好的过氧单硫酸盐活性,使 $\text{MoS}_2\text{-MF}$ 的苯酚去除率达到66.8%,在含 Cl^- 的盐水中提高到80.07%。Chang等^[81]采用硼掺杂 $\text{MoS}_2(\text{B-MoS}_2)$ 作为光吸收剂与催化剂构建了一种新型的双功能蒸发器,在1个太阳辐照下,蒸发速率达到 $2.31 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,同时对四环素在1 h内的降解率可达80.7%(图6b-c)。Wu等^[82]通过水热法在三维松果(HP)基底上原位生长 MoS_2 纳米花制备了蒸发器(HPM),天然松果独特的垂直通道和螺旋鳞片结构不仅可以大量水分向上输送到蒸发表面,还可以吸收更多不同入射角的太阳光,使蒸发速率达 $1.85 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,光热转换效率为96%,并可以实现对亚甲基蓝和罗丹明B等有机污染物的光催化降解(图6d),原位生长的 MoS_2 纳米花使HPM兼具光热转换与光催化功能,从而协同提升产热效率与水蒸发速率,实现高效太阳能利用与污染物降解能力。在光照条件下, MoS_2 受紫外激发产生光生电子-空穴对,激发电子快速转移至导电HP基底,空穴则留在 MoS_2 价带,有效抑制载流子复合、延长载流子寿命,进而增强光催化反应。HP与 MoS_2 协同拓宽有效光谱范围:光降解主要利用紫外-可见光,水蒸发主要利用可见-红外光,实现全太阳光谱高效利用,使HPM在全光谱驱动水净化方面具备显著优势。Lv等^[83]通过水热法制备了二维 $\text{MoS}_2/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$ 复合材料,在实现 $1.54 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 蒸发速率的同时,对染料废水的光降解效率达到了98.7%,避免了染料废水的二次污染问题。上述研究表明, MoS_2 基光热材料在高效蒸发水的同时可以实现有机污染物的降解,在太阳能驱动水净化中展现出优异的应用潜力。

4.4 抗菌应用

MoS_2 基光热材料除了可以应用在海水淡化、重金属离子去除及有机污染物降解方面外,还对水中的细菌具有很好的抑制作用,可进一步提升出水的水质。其抗菌灭活机制主要为: MoS_2 在太阳光/可见光/近红外光照射下,通过光热效应、光催化活性氧化、物理膜损伤与离子干扰可实现协同抗菌灭活。其窄带隙结构可高效捕获全光谱光能并转化为局域高温,使细菌膜破裂、蛋白热变性;同时激发产生电子-空穴对,生成 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 等活性氧(ROS),引发氧化应激破坏胞内生物大分子;二维纳米片的锋利边缘可物理穿刺细胞壁,微量离子释放进一步干扰代谢。光热与光催化相互促进,显著提升载流子分离效率与ROS产量,从而实现对细菌的高效灭

活^[84]。例如,Li等^[52]在碳点溶液环境中合成了一种多缺陷的 MoS_2 纳米花(CDs/MoS_2),该材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率分别高达94%和99%(图6e-f)。Li等^[75]则制备了 $\text{MoS}_2/\text{C@PU}$ 复合海绵,使用该海绵在处理被细菌和金属离子污染的水样时,通过一步太阳能蒸煮过程便实现了高效消毒,处理后水样的细菌检测结果由阳性转为阴性。这些研究证明了 MoS_2 基光热材料在抗菌方面具有出色性能,同时展现出在水处理中的多重功能潜力。

5 总结与展望

本综述系统总结了 MoS_2 基光热材料在水处理应用领域的相关研究进展,阐明了 MoS_2 纳米片机械剥离、化学剥离、水热/溶剂热等制备方法的特性与适用场景,归纳了 MoS_2 基光热材料在薄膜、气凝胶、水凝胶、海绵及其他三维多孔结构中的应用策略,并从光热转换增强、水传输调控、热管理优化及抗盐积累设计等方面阐述了蒸发器结构对性能的影响机制,探讨了该类材料在海水淡化、重金属与有机污染物去除及抗菌等多功能水处理中的应用效果,为太阳能驱动界面水蒸发系统的构建提供了重要参考。

尽管目前 MoS_2 基光热材料的研究已经取得了显著进展,但是规模化应用还面临着很多挑战,例如现有 MoS_2 纳米片制备工艺存在产率低、相结构调控不精确、缺少绿色低碳低成本合成方法等问题,关于多元复合结构的界面相容性与协同作用机制研究不深入,并且在实际复杂水体中材料的长期稳定性、抗污染和抗盐积累能力需要进一步提升,光热转换与催化降解的协同效率有待进一步优化。

未来有关 MoS_2 基光热材料的研究需要开发绿色低碳成本的纳米片制备技术,精准调控 MoS_2 的相结构与纳米形貌;构建具有多功能的复合光热材料,并深入研究多功能耦合下的光热材料的界面反应机制;优化蒸发器的结构设计,提升其在高盐、高污染水体中的长期运行性能;同时借助人工智能辅助材料筛选与结构优化,开发低成本、多功能的 MoS_2 基太阳能蒸发器,使 MoS_2 基光热材料实现从实验室研究向工程化应用的转化。

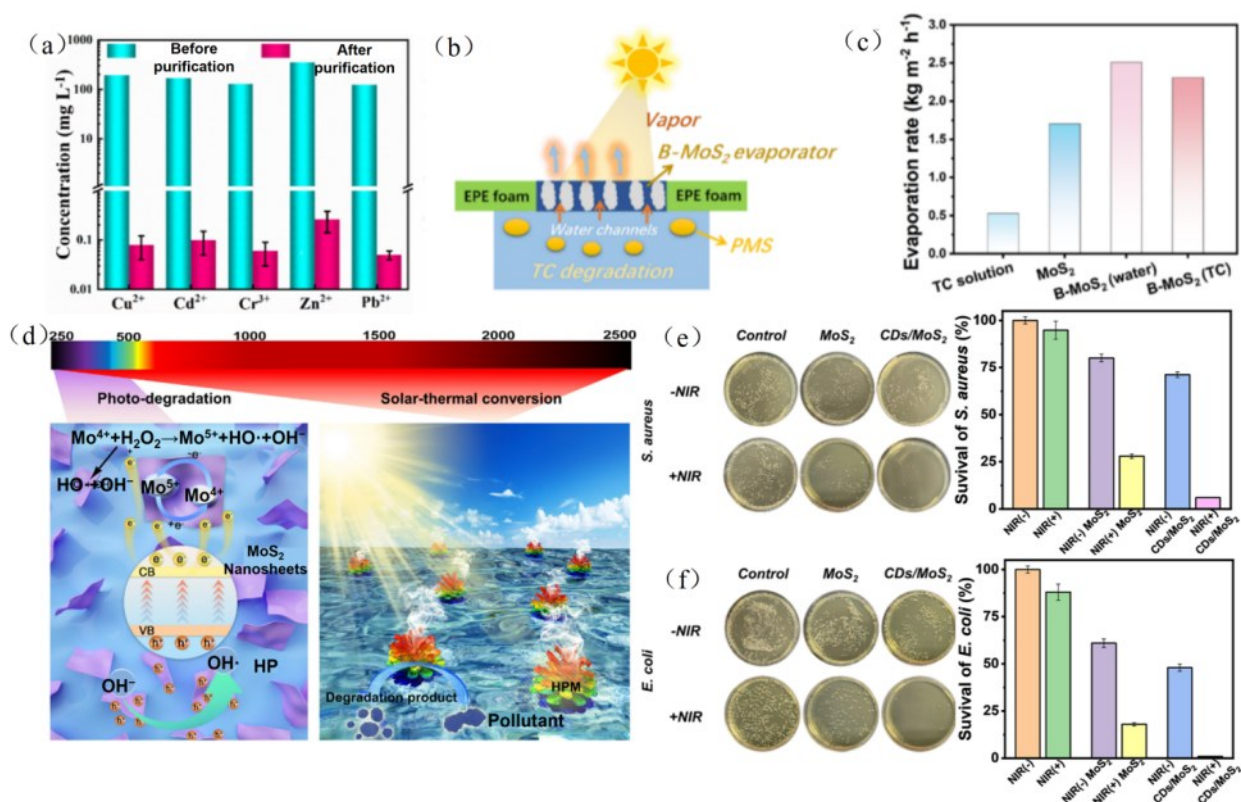


图6 (a)MoS₂-MXene/壳聚糖气凝胶太阳能脱盐前后五种重金属离子浓度^[76];(b)硼掺杂二硫化钼(B-MoS₂)光热蒸发装置示意图^[81];(c)不同蒸发器在1太阳照射下对四环素溶液的蒸发速率^[81];(d)太阳光照下原位修饰MoS₂的水热松果(HPM)的光热和光催化机理示意图^[82];(e)金黄色葡萄球菌和(f)大肠杆菌菌落照片和活性^[52]

Fig.6 (a)Concentration of five heavy metal ions before and after solar-powered desalination by of MoS₂-MXene/ chitosan aerogel^[76];(b) Schematic diagram of boron-doped molybdenum disulfide (B-MoS₂) solar-thermal evaporation device^[81];(c)Evaporation rate of different evaporators under 1-sun irradiation for tetracycline solution^[81];(d)Schematic illustrating the solar-thermal and photocatalytic mechanisms of the hydrothermal pinecone with in situ decorated MoS₂ (HPM) under solar light irradiation^[82], The photographs and viability of (e) *S. aureus* colonies and (f) *E. coli* colonies^[52]

表3 不同MoS₂基光热材料的光热蒸发性能

Table 3 Solar evaporation performance of different molybdenum disulphide based photothermal materials

材料名称	光吸收率(%)	光照强度 (kW m ⁻²)	不同光照时间下材料表面局域温度		蒸发速率 (kg m ⁻² h ⁻¹)	光热转换效率 (%)	参考文献
			时间 (min)	温度 (°C)			
花状 1T/2H MoS ₂	—	1	3.33	43.0	1.52	~ 90	[33]
磁性 MoS ₂ 纳米片	~ 96	2.5	60	55.0	3.16	~ 79.2	[85]
MoS ₂ /CF 膜	~ 91.51	1	1.67	59.9	2.07	~ 88.7	[43]
SWNT-MoS ₂ 杂化薄膜	~ 82	5	10	44.6	6.6	~ 91.5	[41]
层状 MoS ₂ /GO 膜	~ 97.3	1	10	47.9	1.69	~ 96.6	[42]
SMoS ₂ -PH 水凝胶	~ 81.9	1	30	37.7	3.30	~ 93.4	[30]
CDs/MoS ₂ @PVA 水凝胶	> 95	1	15	42.3	1.49	~ 92.5	[52]
MoS ₂ @PDA 水凝胶	~ 95.6	1	10	37.5	5.41	~ 93.7	[53]
MoS ₂ /锂蒙脱石气凝胶	~ 96.54	1	10	38.4	1.32	~ 85.99	[86]
3D MoS ₂ 气凝胶	~ 95	1	60	61.0	1.27	~ 88	[46]
ANF/MoS ₂ @MXene 气凝胶	> 82	1	60	47.5	1.42	~ 95.84	[87]
Ce-MoS ₂ /BNC 双层气凝胶	~ 96	5.35	1	72.0	6.15	~ 81.4	[31]
MoS ₂ -rGO 气凝胶	~ 86.3	1	60	66	1.72	~ 86.5	[47]
MoS ₂ EPE 泡沫	> 90	1	5	40.1	1.27	~ 80	[88]
MoS ₂ /BCF 复合材料	~ 93	1	180	36	1.49	~ 88.3	[89]
Ti ₃ C ₂ /MoS ₂ 纳米复合材料	~ 92.4	1	60	60.8	1.36	~ 87.2	[90]
MoS ₂ /C 丝瓜络海绵	~ 94	1	60	35.6	3.45	~ 94	[57]
MoS ₂ /C @PU 海绵	~ 98	1	60	38.5	1.95	~ 88	[75]
B-MoS ₂ @MF 海绵	~ 94.3	1	60	41.7	2.51	~ 94.2	[81]
MoS ₂ -MEPCM	~ 96.86	1	105	47.0	2.06	~ 95.3	[91]
BNs@MoS ₂ KGM	~ 95.0	1	30	41.0	1.54	~ 96.4	[55]
MoS ₂ -PVA@PU 海绵	> 85	1	—	—	1.35	~ 83	[92]
MoS ₂ -MF 海绵	~ 96	1	30	31.0	2.75	—	[80]
Zn-MoS ₂ 改性高粱秸秆	~ 94	1	—	—	3.46	—	[73]
负载 MoS ₂ 松果	~ 85	1	10	30.1	1.85	~ 97	[82]

注: ANF: 芳纶纳米纤维气凝胶; EPE: 可膨胀聚乙烯; BCF: 生物炭泡沫; MEPCM: 磁性相变微胶囊

参考文献

- [1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016, **2**(2): e1500323.
- [2] 闫军营, 王龔莹, 李瑞瑞, 等. 选择性电渗析: 机遇与挑战[J]. 化工学报, 2023, **74**(1): 224-236.
Yan J Y, Wang H Y, Li R R, et al. Selective electrodialysis: opportunities and challenges[J]. CIESC Journal, 2023, **74**(1): 224-236.
- [3] 王钰, 冯英楠, 王涛, 等. 原位生长构筑纳米复合纳滤膜: 膜制备与应用[J]. 化工学报, 2025, **76**(9): 4723-4736.
Wang Y, Feng Y N, Wang T, et al. Constructing nano-composite nanofiltration membranes by in-situ growth: membrane preparation and application[J]. CIESC Journal, 2025, **76**(9): 4723-4736.
- [4] 贺舒敏, 熊伟, 高小龙, 等. 电容去离子技术在水处理中的研究进展[J]. 化工进展, 2025, **44**(11): 6660-6673.
He S M, Xiong W, Gao X L, et al. Research progress of capacitive deionization technology in water treatment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, **44**(11): 6660-6673.
- [5] Gong J L, Li C, Wasielewski M R. Advances in solar energy conversion[J]. Chemical Society Reviews, 2019, **48**(7): 1862-1864.
- [6] Zhang L B, Tang B, Wu J B, et al. Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating[J]. Advanced Materials, 2015, **27**(33): 4889-4894.
- [7] Yu B, Zhang Y, Wang Y, et al. Recent advances and challenges of metal-based materials for solar steam generation[J]. Advanced Functional Materials, 2023, **33**(51): 2307533.
- [8] Qiu Z H, Zhao G Y, Sun Y, et al. Carbon-based photothermal materials for the simultaneous generation of water vapor and electricity[J]. New Carbon Materials, 2023, **38**(6): 997-1017.
- [9] Ibrahim I, Seo D H, McDonagh A M, et al. Semiconductor photothermal materials enabling efficient solar steam generation toward desalination and wastewater treatment[J]. Desalination, 2021, **500**: 114853.

- [10] Liu J, Zou X L, Cai Z D, et al. Polymer based phase change material for photo-thermal utilization[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, **220**: 110852.
- [11] Wu T, Li H X, Xie M H, et al. Incorporation of gold nanocages into electrospun nanofibers for efficient water evaporation through photothermal heating[J]. *Materials Today Energy*, 2019, **12**: 129–135.
- [12] Zhang A R, Zhang Y P, Liu Z M, et al. Anisotropic gold nanostructures applied to improve solar energy conversion[J]. *Applied Materials Today*, 2022, **29**: 101575.
- [13] Cai W, Pan Y, Feng X M, et al. Cicada wing-inspired solar transmittance enhancement and hydrophobicity design for graphene-based solar steam generation: a novel gas phase deposition approach[J]. *Applied Energy*, 2022, **320**: 119322.
- [14] Zhang Z Y, Liu H Y, Kong Z, et al. Mushroom-like graphene nanosheets/copper sulfide nanowires foam with Janus-type wettability for solar steam generation[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, **5**(4): 4931–4937.
- [15] Chang J, Shi Y, Wu M C, et al. Solar-assisted fast cleanup of heavy oil spills using a photothermal sponge[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, **6**(19): 9192–9199.
- [16] Qi X Y, Li C X, Zou X, et al. Super-hydrophobic graphene-based high elastic sponge with superior photothermal effect for efficient cleaning of oil contamination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **476**: 146317.
- [17] Han Z Y, Huang L J, Qu H J, et al. A review of performance improvement strategies for graphene oxide-based and graphene-based membranes in water treatment[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, **56**(16): 9545–9574.
- [18] Huang L J, Li G Q, Gurarslan A, et al. Atomically thin MoS₂ narrowband and broadband light superabsorbers[J]. *ACS Nano*, 2016, **10**(8): 7493–7499.
- [19] 刘娜, 张波, 马廷灿. 二硫化钼国际研究态势分析[J]. *世界科技研究与发展*, 2025, **47**(S1): 28–41.
- Liu N, Zhang B, Ma T C. Analysis of the international research trend of molybdenum disulfide[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2025, **47**(S1): 28–41.
- [20] Guan W X, Guo Y H, Yu G H. Carbon materials for solar water evaporation and desalination[J]. *Small*, 2021, **17**(48): 2007176.
- [21] Li Y M, Shi Y Y, Wang H W, et al. Recent advances in carbon-based materials for solar-driven interfacial photothermal conversion water evaporation: Assemblies, structures, applications, and prospective[J]. *Carbon Energy*, 2023, **5**(11): e331.
- [22] Liu P, Li X Y, Xu L, et al. Recent progress in interfacial photo-vapor conversion technology using metal sulfide-based semiconductor materials[J]. *Desalination*, 2022, **527**: 115532.
- [23] Gu C, Ji H C, Xu K Y, et al. The recent progress of transition metal dichalcogenides-based photothermal materials for solar water generation[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2025, **36**(8): 110565.
- [24] Liu J B, Hu J Y, Liu C, et al. Mechanically exfoliated MoS₂ nanosheets decorated with SnS₂ nanoparticles for high-stability gas sensors at room temperature[J]. *Rare Metals*, 2021, **40**(6): 1536–1544.
- [25] Cao S Y, Deshmukh A, Wang L, et al. Enhancing the permselectivity of thin-film composite membranes interlayered with MoS₂ nanosheets via precise thickness control[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(12): 8807–8818.
- [26] Taymazov D, Zhang H, Li W X, et al. Construction of MoS₂ hybrid membranes on ceramic hollow fibers for efficient dehydration of isopropanol solution via pervaporation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, **277**: 119452.
- [27] Wang D Z, Zhang X Y, Bao S Y, et al. Phase engineering of a multiphasic 1T/2H MoS₂ catalyst for highly efficient hydrogen evolution[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, **5**(6): 2681–2688.
- [28] Budania P, Baine P T, Montgomery J H, et al. Effect of post-exfoliation treatments on mechanically exfoliated MoS₂[J]. *Materials Research Express*, 2017, **4**(2): 025022.
- [29] Islam M A, Serles P, Kumral B, et al. Exfoliation mechanisms of 2D materials and their applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, **9**(4): 041301.
- [30] Liu P, Hu Y B, Li X Y, et al. Enhanced solar evaporation using a scalable MoS₂-based hydrogel for highly efficient solar desalination[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, **61**(37): e202208587.
- [31] Ghim D, Jiang Q S, Cao S S, et al. Mechanically interlocked 1T/2H phases of MoS₂ nanosheets for solar thermal water purification[J]. *Nano Energy*, 2018, **53**: 949–957.
- [32] Yang R J, Mei L, Zhang Q Y, et al. High-yield production of mono- or few-layer transition metal dichalcogenide nanosheets by an electrochemical lithium ion intercalation-based exfoliation method[J]. *Nature Protocols*, 2022, **17**(2): 358–377.
- [33] Guo Z Z, Chen Z H, Shi Z X, et al. Stable metallic 1T phase engineering of molybdenum disulfide for enhanced solar vapor generation[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, **204**: 110227.
- [34] Yuan B H, Meng L S, Zhang C F, et al. Enhancement of pollutant degradation and solar-driven water evaporation by architecting hierarchical 1D/2D TiO₂ @ MoS₂ core-shell networks[J]. *Applied Surface Science*, 2021, **570**: 151143.
- [35] Lee K, Kim H Y, Lotya M, et al. Electrical characteristics of molybdenum disulfide flakes produced by liquid exfoliation[J]. *Advanced Materials*, 2011, **23**(36): 4178–4182.
- [36] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS₂ transistors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **6**(3): 147–150.
- [37] Coleman J N, Lotya M, O'Neill A, et al. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials[J]. *Science*, 2011, **331**(6017): 568–571.
- [38] Chou S S, Huang Y K, Kim J, et al. Controlling the metal to semiconductor transition of MoS₂ and WS₂ in solution[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, **137**(5): 1742–1745.
- [39] Midya A, Ghorai A, Mukherjee S, et al. Hydrothermal growth of few layer 2H-MoS₂ for heterojunction photodetector and visible light induced photocatalytic applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, **4**(12): 4534–4543.
- [40] Shi Y M, Li H N, Li L J. Recent advances in controlled synthesis of two-dimensional transition metal dichalcogenides via vapour deposition techniques[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, **44**(9): 2744–2756.
- [41] Yang X D, Yang Y B, Fu L N, 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, 2018, **28**(3): 1704505.
- [42] Zheng H T, Fan J H, Chen A Y, et al. Enhancing solar-driven water purification by multiscale biomimetic evaporators featuring lamellar MoS₂/GO heterojunctions[J]. ACS Nano, 2024, **18**(4): 3115–3124.
- [43] Cui L F, Che H N, Liu B, et al. Multifunctional MoS₂ membrane for integrated solar-driven water evaporation and water purification[J]. Communications Materials, 2024, **5**: 94.
- [44] Chang Y H, Ma X B, Zhao P F. A flexible hierarchical MoS₂ nanosheet coated glass fabric *via* direct hydrothermal deposition for efficient solar-driven steam generation[J]. New Journal of Chemistry, 2023, **47**(10): 4628–4635.
- [45] Li S, Liu T, Yao Y, et al. MoS₂ supported hydrophilic porous membrane for solar water evaporation[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **353**: 128566.
- [46] Wang Q M, Guo Q J, Jia F F, et al. Facile preparation of three-dimensional MoS₂ aerogels for highly efficient solar desalination [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, **12**(29): 32673–32680.
- [47] Liu X, Zhu Q Z, Wu W J. Application of molybdenum sulfide-graphene aerogel for solar energy-driven interfacial evaporation [J]. Separation and Purification Technology, 2025, **354**: 128864.
- [48] Ye M M, Ye X Z, Zhou X H, et al. Polyurethane foam loaded MoS₂ aerogel for efficient solar evaporation with excellent salt-rejection property[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, **12**(6): 114680.
- [49] Wu X, Lu Y, Ren X H, et al. Interfacial solar evaporation: from fundamental research to applications[J]. Advanced Materials, 2024, **36**(23): 2313090.
- [50] Wu X, Wang Y D, Wu P, et al. Dual-zone photothermal evaporator for antisalt accumulation and highly efficient solar steam generation[J]. Advanced Functional Materials, 2021, **31** (34): 2102618.
- [51] Chen P P, Liu X Y, Jin R D, et al. Dye adsorption and photo-induced recycling of hydroxypropyl cellulose/molybdenum disulfide composite hydrogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, **167**: 36–43.
- [52] Li J Q, Li C, Chen L, et al. A gradient photothermal hydrogel with carbon-dots deposited molybdenum disulfide nanoflowers as photothermal centers for efficient solar-driven water evaporation and treatment[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, **55**: 105433.
- [53] Li W J, Li J H, Ding L L, et al. Interfacial assembled hydrogel evaporator for highly efficient thermal management and photothermal coupled water splitting reaction[J]. Advanced Functional Materials, 2024, **34**(52): 2411387.
- [54] Xiao J X, Guo Y, Luo W Q, et al. A scalable, cost-effective and salt-rejecting MoS₂/SA@melamine foam for continuous solar steam generation[J]. Nano Energy, 2021, **87**: 106213.
- [55] Yin J C, You X, Zhang Z X, et al. Boron nanosheets loaded with MoS₂ porous sponges for water purification[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, **41**: 102048.
- [56] Zhong P J, Huang Y Q, Hu Q L, et al. Synergistic rGO/MoS₂ E-shaped evaporators: efficient solar desalination and water purification via enhanced photothermal conversion and structural optimization[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, **17** (28): 40457–40466.
- [57] Wu J, Zhang T T, Qu J, et al. Hydrothermally modified 3D porous loofah sponges with MoS₂ sheets and carbon particles for efficient solar steam generation and seawater desalination[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, **15**(24): 29457–29467.
- [58] Jin L, Zhang L, Liang H, et al. Large-Scale carbon Fiber-Based Solar-Driven evaporator with 1T MoS₂-MXene Heterostructure: Towards reliable mechanical performance and efficient seawater desalination[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **497**: 154469.
- [59] Liu Y Y, Lao Y J, Wang Y S, et al. Synergistic photothermal conversion in CuS-MoS₂/poly (vinyl alcohol) sponge for efficient solar water evaporation[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **359**: 130860.
- [60] Cheng L, Li C P, Wu X Q, et al. Hierarchical structure design of MoS₂/PDA/Ag-hybrid hydrogel system enhances all-environment solar water purification[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **359**: 130624.
- [61] Zheng H T, Chen A Y, Li X, et al. Boosting solar-powered steam efficiency of 3D evaporators by shape-controllable C/MoS₂ porous fibers[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **512**: 162189.
- [62] Li J H, Liu Q H, Zhang Y, et al. Tri-dimensional porous cattails carbon fiber/MoS₂ composite aerogel for desalination and oil - water emulsion purification[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **369**: 133113.
- [63] Ying L R, Liang F, Huang Z, et al. Self-floating gelatin aerogel integrated urchin-like MoS₂/Mo₅N₆/C with hybrid photothermal enhancement for salt-resistant solar desalination[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **474**: 145709.
- [64] Yang Z, Li D W, Zhu Y X, et al. Developing salt-rejecting evaporators for solar desalination: a critical review[J]. Environmental Science & Technology, 2024, **58**(20): 8610–8630.
- [65] Xu R Q, Cui H Z, Sun K Y, et al. Controllable 3D interconnected featured pore structure of transition metal borides-carbonitride/ MoS₂ for efficiently solar evaporation and wastewater purification [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, **446**: 137275.
- [66] Zhao J M, Chu A Q, Chen J L, et al. Spongy polyelectrolyte hydrogel for efficient Solar-Driven interfacial evaporation with high salt resistance and compression resistance[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **485**: 150118.
- [67] Patra A S, Lim H W, Suh Y, et al. Synergistic photothermal and electrothermal seawater desalination by a MoS₂-coated carbon cloth-based sandwich evaporator with superior anti-salt fouling performance[J]. Desalination, 2025, **601**: 118571.
- [68] Chen C J, Kuang Y D, Hu L B. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. Joule, 2019, **3**(3): 683–718.
- [69] Darre N C, Toor G S. Desalination of water: a review[J]. Current Pollution Reports, 2018, **4**(2): 104–111.
- [70] Zhang C F, Yuan B H, Liang Y, et al. Carbon nanofibers enhanced solar steam generation device based on loofah biomass for water purification[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, **258**: 123998.
- [71] Wang Q M, Jia F F, Huang A H, et al. MoS₂@sponge with double layer structure for high-efficiency solar desalination[J]. Desalination, 2020, **481**: 114359.
- [72] Jiang Y, Liu M J, Zhang X Y, et al. Construction of a biomimetic wood structure with cellulose nanofiber/molybdenum disulfide hybrid aerogel for highly-efficient solar-driven interfacial evaporation[J]. Desalination, 2023, **568**: 117023.

- [73] Zhang L, Liu G, Wu L P, et al. Integrated light adsorption and thermal insulation of Zn doping 1T phase MoS_2 -based evaporation prototype for continuous freshwater generation[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **454**: 140298.
- [74] Wang Z Y, Mi B X. Environmental applications of 2D molybdenum disulfide (MoS_2) nanosheets[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(15): 8229–8244.
- [75] Li W G, Tekell M C, Huang Y, et al. Synergistic high-rate solar steaming and mercury removal with MoS_2/C @ polyurethane composite sponges[J]. Advanced Energy Materials, 2018, **8**(32): 1802108.
- [76] Yang Z Y, Wei N, Xue N, et al. Highly efficient $\text{MoS}_2/\text{MXene}$ aerogel for interfacial solar steam generation and wastewater treatment[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, **656**: 189–199.
- [77] Wu M H, Li L, Liu N, et al. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a co-catalyst for photocatalytic degradation of organic contaminants: a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, **118**: 40–58.
- [78] Thayil R, Gandi S, Parne S R, et al. Recent advances and perspectives of molybdenum disulfide and molybdenum disulfide based nanocomposites for adsorption and photocatalytic degradation of organic dyes: a review[J]. Journal of Materials Science, 2024, **59**(8): 3225–3252.
- [79] Yuan Y, Guo R T, Hong L F, et al. Recent advances and perspectives of MoS_2 -based materials for photocatalytic dyes degradation: a review[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, **611**: 125836.
- [80] Fu Y L, Xie L T, Li J, et al. Simultaneous solar-driven interfacial evaporation and phenol degradation using three-dimensional MoS_2 -melamine foam[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **500**: 156929.
- [81] Chang M M, Yang R R, Lai X J, et al. Photothermic-catalytic bifunctionality of boron-doped molybdenum disulfide nanosheets enabling simultaneous solar evaporation and antibiotic destruction [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **499**: 156716.
- [82] Wu J, Qu J, Yin G, et al. Omnidirectionally irradiated three-dimensional molybdenum disulfide decorated hydrothermal pinecone evaporator for solar-thermal evaporation and photocatalytic degradation of wastewaters[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, **637**: 477–488.
- [83] Lv X B, Dong J, Yuan B H, et al. 2D/2D $\text{MoS}_2/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$ heterojunction for simultaneous realization of solar water evaporation and photocatalytic dye degradation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, **965**: 171382.
- [84] Rasheed F A, Nouri M, Massahi T, et al. Molybdenum disulfide-based hybrid catalysts at the forefront of water treatment: a review of the innovative solutions for effective bacterial disinfection[J]. Results in Engineering, 2025, **26**: 104665.
- [85] Wang Q M, Qin Y, Jia F F, et al. Magnetic MoS_2 nanosheets as recyclable solar-absorbers for high-performance solar steam generation[J]. Renewable Energy, 2021, **163**: 146–153.
- [86] Guo Q J, Yi H, Jia F F, et al. Vertical porous MoS_2 /hectorite double-layered aerogel as superior salt resistant and highly efficient solar steam generators[J]. Renewable Energy, 2022, **194**: 68–79.
- [87] Jiang M M, Zheng R Q, Wang M J, et al. A MoS_2 -based evaporator with porous structure and interlayer channels for solar desalination and photocatalytic degradation[J]. Solar Energy, 2024, **279**: 112853.
- [88] Chen R, Wang X, Gan Q M, et al. A bifunctional MoS_2 -based solar evaporator for both efficient water evaporation and clean freshwater collection[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, **7** (18): 11177–11185.
- [89] Zhang X F, Wu G, Yang X C. MoS_2 nanosheet-carbon foam composites for solar steam generation[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, **3**(10): 9706–9714.
- [90] Xu R Q, Wei N, Li Z K, et al. Construction of hierarchical 2D/2D $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{MoS}_2$ nanocomposites for high-efficiency solar steam generation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, **584**: 125–133.
- [91] Shen H H, Zheng Z H, Liu H, et al. A solar-powered interfacial evaporation system based on MoS_2 -decorated magnetic phase-change microcapsules for sustainable seawater desalination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, **10**(48): 25509–25526.
- [92] Yu Q H, Wang Q M, Feng T, et al. A novel functionalized MoS_2 -based coating for efficient solar desalination[J]. Materials, 2023, **16**(8): 3105.