

文章编号: 1008-8857(2025)01-0010-09

DOI: 10.13259/j.cnki.eri.2025.01.002

太阳能驱动吸附式大气集水技术研究进展

张杰, 王梓苗, 李偲加, 王佳韵

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 大气集水技术是解决干旱地区水资源短缺的关键。讨论了太阳能驱动吸附式大气集水系统的工作原理和影响集水性能的关键因素, 总结了多种吸附材料的功能结构、集水性能和最佳吸附条件, 比较了各种材料的优点和局限性。通过分析指出, 巧妙地组合吸附基质、导热材料及吸湿盐, 可达到强化复合吸附剂性能的目的。为提升材料的性能, 提出了改进建议, 包括改性活性炭、石墨烯官能团, 制备硅胶、气凝胶和金属有机框架复合材料, 共聚不同单体强化水凝胶性能, 制备复合吸湿盐与沸石/多孔材料。提出的吸附材料改进策略可为太阳能驱动吸附式大气集水技术研究提供参考。

关键词: 大气集水; 太阳能驱动; 吸附剂; 吸附; 解吸

中图分类号: TQ424

文献标志码: A

Recent research progress on solar-thermal-driven adsorption-based atmospheric water harvesting

ZHANG Jie, WANG Zimiao, LI Sijia, WANG Jiayun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Atmospheric water harvesting is pivotal in addressing water scarcity in arid regions. The working principles of solar-thermal-driven adsorptive atmospheric water harvesting systems and key factors influencing their performance are discussed in this study. The functional structures, water harvesting capabilities, and optimal adsorption conditions of various adsorbents are summarized. Their merits and limitations are comparatively analyzed. The analysis underscores the significance of adeptly integrating adsorbent substrates, thermally conductive materials, and hygroscopic salts to augment the efficacy of composite adsorbents. To enhance their performance, several recommendations are made, including the modification of activated carbon, functionalization of graphene, development of composites comprising silica gel, aerogel, and metal-organic frameworks, copolymerization of diverse monomers for improved hydrogel efficiency, and

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22208215、52006145); 上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1431500); 上海市晨光计划(19CG54); 上海理工大学“大学生创新创业训练计划”项目(XJ2022050)

第一作者: 张杰(1987—), 男, 讲师。研究方向: 含碳资源利用。E-mail: jiezhang2018@usst.edu.cn

通信作者: 王佳韵(1990—), 女, 副教授。研究方向: 空气取水。E-mail: jywang@usst.edu.cn

formulation of composite hygroscopic salts with zeolites/porous materials. The proposed strategies provide valuable insights for advancing research on solar-thermal-driven adsorptive atmospheric water harvesting technologies.

Keywords: atmospheric water harvesting; solar-thermal-driven; adsorbents; adsorption; desorption

淡水短缺是威胁社会和经济发展的全球挑战之一。太阳能作为一种清洁、可再生的能源,其在大气集水、光伏热系统和光热发电领域的应用展现出巨大潜力^[1-2],特别是在干旱地区。因此太阳能驱动的大气集水技术因其环境友好和效益高而备受关注^[3]。据联合国预测,到 2050 年将有 6 亿人面临缺水问题,这使得开发高效、低成本的大气集水技术变得尤为迫切^[4]。大气中蕴含大量的水蒸气,一旦能实现低成本、高效益的淡水提取,高达 13 000 万亿 L 的大气水将成为干旱地区的可持续水源。本文将探讨太阳能驱动吸附式大气集水系统的工作原理和影响集水性能的关键因素,综述多种吸附材料的功能结构、集水性能和最佳吸附条件,比较各种材料的优缺点,并分析如何强化吸附剂性能。研究成果将为太阳能驱动吸附式大气集水技术的发展提供重要的参考和指导。

1 大气集水技术的分类

大气水以云、近地雾气、空气中的水汽三种类型存在。从泛用性考虑,大气集水技术显示出可为干旱地区供水的巨大应用前景,并且较容易利用可再生能源(例如太阳能)驱动取水系统工作^[5]。Tu 等^[6]阐述了目前大气集水技术(AWHT)的进展,包括辐射冷却、太阳能蒸馏、基于吸附/解吸的集水技术等。Ahrestani 等^[7]介绍了冷凝结露法和吸附法两种大气集水技术。冷凝结露法主要利用制冷设备提供冷表面将湿空气冷凝至露点以下,并将析出的淡水收集。该方法一般适用于露点温度高于 10 °C 的环境工况。而基于吸附/解吸的集水技术对环境 and 气候的要求较低,能实现在一年中任何时间和天气产水^[3]。吸附剂可捕获大气中的水蒸气,并在太阳能驱动下析出淡水。该方法本质上是采用吸附-脱附循环来提高所处理空气的露点,使其在较高冷凝温度下依然能析

出淡水,特别适用于沙漠地区。因此,为降低能源供给成本,实现沙漠地区的淡水提取,利用可再生能源(特别是太阳能)驱动大气集水系统是吸附/解吸大气集水技术的重要发展方向。

2 太阳能驱动吸附式大气集水系统的工作原理

太阳能驱动吸附式大气集水(SAWH)系统是一种利用太阳能在一定相对湿度条件下从大气中提取水的高效解决方案^[8]。该系统工作过程主要包含水汽吸附、吸附剂再生、水蒸气冷凝。吸附-再生-冷凝法利用干燥剂在夜间从潮湿的空气中吸收水分,而后在太阳能驱动下将水从干燥剂中解吸,产生的水蒸气经冷却后凝结为淡水并被收集,同时冷凝热释放至环境中。图 1 为太阳能驱动吸附式大气集水示意图。

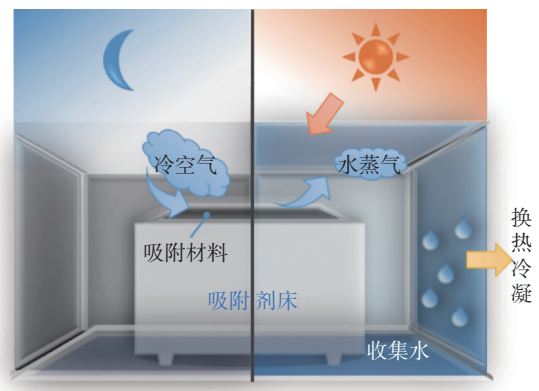


图 1 太阳能驱动吸附式大气集水示意图
Fig. 1 Schematic diagram of solar-thermal-driven adsorption-based atmospheric water harvesting

3 SAWH 系统性能的影响因素

SAWH 系统性能受到太阳能的利用效率、

环境参数、系统结构和策略、吸附剂类型和特性等影响^[9]。在水吸附-脱附循环中,与热量和质量传递相关的系统与策略设计是提高系统集水性能的重要因素,而吸附剂材料是影响整个系统集水性能的关键。吸附剂的吸附特性包括等温吸附性能及动态吸附特性,解吸能力则由驱动温度、解吸动态特性、水分残余量决定。吸附-再生-冷凝法主要利用吸附剂自发吸附空气中的水蒸气。除气候条件和设备因素外,吸附材料的孔道结构、亲水性、导热性和稳定性等也直接影响系统的水产量和能耗^[10]。理想的吸附剂材料能够在宽相对湿度范围内吸水,并随温度的升高脱水再生,且价格低廉,易于大规模推广使用,因而不同吸附材料/基质的研发受到广泛关注。目前,已有多种类型的吸附剂被用于大气集水,如固态吸湿剂、金属有机框架(MOF)、水凝胶等^[11]在大气集水方面均展现出巨大应用潜力。

4 太阳能驱动吸附式大气集水系统的吸附剂研究

4.1 常用吸附剂的性质

4.1.1 活性炭/活性炭纤维/碳纳米管

活性炭以非石墨微晶结构为主,表面布满了分子大小的“孔”(空隙、空间、位点、孔隙等)。这些孔道表面碳原子附近的范德华力是吸附过程的驱动力。活性炭纤维(ACF)是继颗粒活性炭、粉状活性炭之后的第三代活性炭,具有比表面积大、微孔均匀、稳定性好等优点,能吸附 H_2O ,被广泛用作吸附剂基质。Chen等^[12]以商用ACF为基础,采用真空活化法制备高比表面积活性炭纤维。结果表明,利用该方法制备的活性炭纤维的孔隙结构得到显著改善。经过 $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 下活化2h的活性炭纤维,作为吸附剂在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下其水吸附量最大可达 1.36 g/g (水吸附量均以 g/g 表示,指单位质量吸附剂的吸附水量),比商用ACF的(0.64 g/g)高出112.50%。为提高复合材料的载盐量和吸水性并防止渗漏,Ejeian等^[13]制备了 $\text{LiCl/MgSO}_4/\text{ACF}$ 二元盐复合材料M10LS,其水吸附量达到 2.29 g/g 。在夏季,采用该材料的集水设备可从相对湿度(RH)

35%的空气中集水,水吸附量为 0.92 g/g 。Wang等^[14]报道了一种强制风冷概念的验证装置,用于岛屿空气集水。该装置采用 21 kg 活性炭纤维毛条-硅溶胶- LiCl30 复合吸附剂材料ACFF/silica/ LiCl30 ,在模拟岛屿条件下,利用空气冷却,每昼夜循环中可产生高达 7.7 kg 水(在 $31\text{ }^\circ\text{C}$ 和63%RH下吸附),热效率为0.37,水吸附量为 $0.7\sim 1.6\text{ g/g}$ 。针对低相对湿度下从大气集水面临的困难,Guo等^[15]制备了由生物质和吸湿盐组成的超吸湿性聚合物薄膜(SHPF),其在15%~30%RH下表现出高吸水性,水吸附量为 $0.64\sim 0.96\text{ g/g}$ 。凭借优异的快速吸附-解吸动力学性能,SHPF在干旱环境中每天可完成14~24个吸附-解吸循环,每 kg SHPF可产生 $5.8\sim 13.3\text{ L}$ 水。通过改善ACF表面含氧官能团性能,重构孔隙结构,可增强ACF在低相对湿度范围内的水蒸气吸附能力。

4.1.2 石墨烯

石墨烯具有良好的导热性和电子传递性,有利于传热和吸附过程的进行。利用超声波分散、冻干和化学还原技术,Yao等^[16]开发了一种基于多孔聚丙烯酸钠/石墨烯框架(PGF)的复合吸附剂材料,其可在宽相对湿度范围内主动吸收雾霾环境中的水分,去除水中杂质,并在太阳能驱动下产生清洁水。拥有丰富官能团的多孔聚丙烯酸钠均匀分布于氧化石墨烯片表面,两者以范德华力和氢键相互结合。在100%RH时,PGF水吸附量为 5.20 g/g ;在15%RH时,水吸附量为 0.14 g/g ,杂质去除率达97%。赵惠忠等^[17]利用石墨烯与 LiCl 合成复合吸附剂石墨烯-13X LiCl (13X指钠X型硅铝酸盐的分子筛),发现添加石墨烯会增大吸附剂的比表面积、孔体积和孔径,使吸附剂表现出优越的吸水能力,同时石墨烯的高导热性还能促进吸附剂解吸脱水。复合吸附剂3G-MZ在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 和60%RH下的吸附能力最强,对水蒸气的吸附量最大为 0.587 g/g ,为13X的2.7倍,解吸量为 0.5 g/g 。尽管加入石墨烯能改善复合吸附剂的孔隙结构特性,但其吸附性能未随石墨烯质量分数的增加进一步提高。因为对水蒸气的吸附性能不仅取决于吸附剂的孔隙结构,还取决于孔隙中盐溶液对水分子的吸收。

4.1.3 硅胶

硅胶具有开放的多孔结构, 其纳米级微孔结构表面分布着大量羟基。羟基与空气中的水分子产生亲合力, 从而实现对水分子的高亲和性吸附。Mulchandani 等^[18]在硅胶表面应用光热纳米材料以提供局部热源, 从而迅速提高吸附剂表面温度以改善材料吸附动力学特性, 增加水蒸气解吸量。该吸附剂分别在 40%、60% 和 80%RH 下吸附水, 在 1000 W/m^2 太阳辐照度下进行解吸。经质量分数为 5% 炭黑涂层修饰的硅胶在 40%RH 下每天可完成超过 10 个吸附-解吸循环, 每 12 h 吸附剂的水吸附量为 0.47 g/g , 比裸硅胶吸附剂 1 个标准循环产生的水量多 10 倍。Essa 等^[19]在双坡半圆柱形盆式太阳能蒸馏器上测试了一种新型高吸湿性硅胶干燥剂。该吸湿性硅胶的性能与橙色硅胶的类似, 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 50%RH 下, 吸湿性硅胶水吸附量为 0.25 g/g 。固相硅胶吸附剂材料可以在较宽的相对湿度 ($20\% \sim 100\%$) 和温度 ($20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$) 范围内吸附和浓缩水蒸气。Kumar 等^[20]采用商用橙色硅胶吸附剂在夜间吸水, 次日将吸附剂暴露在太阳 (平均辐照度为 780 W/m^2) 下, 每 kg 吸附剂日产水量可达 98 g。在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20\% \sim 90\%$ RH 下, 橙色硅胶水吸附量为 $0.09 \sim 0.29 \text{ g/g}$ 。

4.1.4 水凝胶

近年来, 水凝胶逐渐在大气集水研究领域受到研究人员的关注。水凝胶因其与应用材料的高相容性, 可用于改善吸附材料的机械性能、光热性能和导热性能。Li 等^[21]以聚丙烯酰胺 (PAM) 构筑水凝胶网络, 以碳纳米管 (CNT) 作为光热组分, 制备了 PAM-CNT- CaCl_2 水凝胶复合吸水材料。在 35%、60% 和 80%RH 下, 吸附剂的水吸附量分别为 0.74 、 1.10 和 1.75 g/g , 且在常规太阳辐照度下几乎释放了所有捕获水。Entezari 等^[22]首次提出了二元聚合物盐组合应用的概念, 将官能化碳纳米管包埋在水凝胶结构中以增加太阳光谱吸收量、光热转换系数并增强材料的机械柔性。二元聚合物盐提升了材料的亲水性, 其多孔结构促进了水蒸气扩散。这些特性使得复合材料 Bina/FCNT 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 70%RH 下水吸附量达 5.60 g/g 。即便在低 RH 下, 如 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和

20%RH 下, 该复合材料的水吸附量依然可达 1.40 g/g , 与昂贵的 MOF 材料吸附性能相当。基于抗聚电解质效应, Lei 等^[23]开发了聚两性离子水凝胶 PDMAPS-LiCl。该材料在 30%RH 下 120 min 内水吸附量为 0.66 g/g 。Wang 等^[24]开发了一种超高单位体积含水量和低温驱动的水凝胶基复合吸附剂 (PCLG)。该吸附剂在 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 40%RH 下的水吸附量为 2.55 g/g 。与片状结构机组相比, 蜂窝优化结构原型机组的吸水量提高了 50% 以上。该装置 1 m^2 吸附剂在潮湿条件 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 75%RH) 下产水量为 3.8 kg, 在沙漠条件 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 30%RH) 下产水量为 1.08 kg。在 730 W/m^2 太阳辐照度下, 该 PCLG 取水装置在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷凝温度下 1 m^2 吸附剂的日集水量为 2.9 L。该装置在全球范围内单位面积 (1 m^2) 吸附剂集水量最高可达 6 L, 可见只需配置 $1 \sim 2 \text{ m}^2$ 吸附剂的该装置就能满足沙漠地区一个成年人的日用水需求。

4.1.5 气凝胶

气凝胶作为一种良好的吸附材料, 具有密度低、比表面积高、对各种污染物吸附能力强等优点。Wang 等^[25]设计了一种耐盐性氧化石墨烯纤维素复合气凝胶 (GO-based 气凝胶)。该材料具有数百 μm 的大孔径, 可负载质量分数为 50% 的 CaCl_2 。该材料在 40%、60%、80%、98%RH 下的水吸附量分别为 0.34 、 0.84 、 1.35 、 1.82 g/g 。Hou 等^[26]研究了一种多功能的气凝胶纤维 (LiCl@HGAFs)。该材料具有高比表面积和良好的吸水动力学特性, 可实现水吸附量 4.15 g/g (90%RH 下)。且吸附剂可通过光热和电热方法再生, 在加热和冷却模式下, 性能系数分别为 1.72 和 0.70。随着集水量的增加, LiCl@HGAFs 表现出广泛的微波吸收特性 (带宽为 9.69 GHz), 以及良好的阻抗匹配和高衰减常数 (值为 585)。多功能的 LiCl@HGAFs 为水收集、热分配和微波吸收等应用开辟了一条新途径。

4.1.6 金属有机框架

MOF 是由金属离子或簇与有机配体通过配位键组成的一种新型多孔吸附材料, 具有孔隙率高 (达 90%)、比表面积大、易功能化等特点。在其制备过程中可同时优化材料的稳定性、亲水性

和孔径参数,且在低相对湿度下该材料往往具有优异的吸附性能。目前,世界各地的研究者已经设计和合成了 20 000 多种 MOF^[27]。由于 MOF 具有高吸附性能和靶向设计的潜力,它在跨学科应用中展现出前所未有的广阔前景。Kim 等^[28]搭建以 MOF-801 材料为核心的空气取水装置。在 25 °C 和 20%RH 的干旱工况下该装置水吸附量为 0.25 g/g。Hu 等^[29]以空心铬基 MOF 材料 MIL-101(Cr)为基础合成了碳纳米管修饰铬基 MOF 颗粒(HMC-2),并将其用于太阳能驱动的大气集水,结果表明 HMC-2 具有良好的水吸附性能和快速的解吸动力学性能。蚀刻形成的分层多孔 MIL-101(Cr)颗粒具有高活性的缺陷位点和低传质阻力,从而促进了水分子的吸附和扩散。HMC-2 在 25 °C 和 90%RH 下最大水吸附量为 1.074 g/g。在碳纳米管和空心 MIL-101(Cr)的协同作用下,HMC-2 展现出良好的光热转换特性,从而提高了其解吸动力学性能。在太阳光照射下,HMC-2 的最大水吸附量可在 90 min 内完全解吸,材料的单次吸附-解吸周期为 210 min。Abtab 等^[30]为制备具有高孔隙率和高稳定性的可调控多孔固体,研制出一种化学和水解性能稳定的铬基金属有机框架(Cr-soc-MOF-1)。该材料具有特殊的孔隙率、极高的稳定性和出色的吸附性能。在 25 °C 和 70%RH 下,该材料的水吸附量达到 1.95 g/g,并在超过 100 次吸附-解吸循环中仍保持吸水率不变。鉴于介孔金属有机框架具有优异的水吸附性能,Rieth 等^[31]评估了在沙漠地区 Co₂Cl₂BTDD 材料取水的潜力。通过调控材料的孔径使其大于产生水的毛细作用时的临界直径,从而实现了材料在水吸附和脱附之间的可逆性。在夜间 25 °C 和 30%RH 下,该吸附剂水吸附量为 0.82 g/g。

4.1.7 改性沸石/多孔无机材料/多孔聚合物

沸石是一种具有孔隙结构的固体晶体骨架材料。水分子进入沸石后,会受到孔隙内的正电荷的极化作用,并通过范德华力被吸附在孔隙内。随着吸附过程的进行,水分子会逐渐被孔隙中的其他水分子吸附,直到孔隙内充满水分子。在 30%RH 时,AlPO₄-34 和 AlPO₄-LTA 沸石水吸附量分别为 0.29 g/g 和 0.38 g/g^[32]。Mittal 等^[33]

以 PAM 超孔水凝胶(SPHs)和沸石(AQSOA-Z02)为原料,制备了具有优异吸水性能的高效固体吸附剂。在 25 °C 和 90%RH 下,利用沸石孔道毛细凝聚作用和亲水性官能团的吸附作用,可使吸附剂水吸附量从无沸石结构下的 0.77 g/g 提高至 0.89 g/g。Nguyen 等^[34]制备了一种多孔、二维亚联的共价有机框架材料(COF-432)。该材料具有中空的方形网格拓扑结构,以及优良的抗水解性能,在低 RH 下具有陡峭且无迟滞的吸水特性曲线。在 25 °C 和 34%RH 下,该材料的最大水吸附量达 0.30 g/g。

将光热纳米材料和 LiCl 组合,可制备具有强亲水多孔结构的大型固体吸附剂,以实现快速集水。Li 等^[35]开发了一种由纳米碳空心胶囊和位于胶囊内部的 LiCl 组成的新型纳米吸附剂(HCS-LiCl)。在 25 °C 和 60%RH 下,该材料在 3 h 内水吸附量为 1.0 g/g,在 1 000 W/m² 太阳辐照度下仅 0.5 h 即释放出 92% ~ 100% 的吸附水。与纯 LiCl 相比,该材料的吸附动力学性能显著增强。该材料在低相对湿度(20%)下水吸附量为 0.4 g/g,在高相对湿度(80%)下水吸附量大于 2.0 g/g。Wang 等^[36]利用 LiCl、纳米纤维化纤维素亲水骨架和石墨烯,开发出一种微米级和纳米级通道互连的纳米多孔双层结构吸湿气凝胶(NBHA)。在室外温度为 24 °C 和 RH 分别为 18%、33% 和 42% 下,NBHA 的水吸附量分别为 0.55、0.80 和 0.92 g/g。在 25 °C 和 95%RH 的恒温室中,该材料水吸附量可达 2.23 g/g。NBHA 具有高效储水性能,即使在 18%RH 下,也能快速吸收大气水。通过 MOF 前驱体热转化合成的纳米多孔碳同样具有高亲水性,可在相对湿度小于等于 80% 下捕获水蒸气的同时实现太阳能驱动的快速解吸。Song 等^[37]研究了一种高集水产率的 MOF 衍生纳米多孔碳,它具有快速的吸附动力学性能和优异的光热性能。在 25 °C 和 40%RH 下,该材料水吸附量为 0.252 g/g;即便在 30%RH 下,该材料水吸附量仍为 0.180 g/g。

Li 等^[38]采用多孔聚四氟乙烯薄膜封装负载 LiCl 的活性碳纤维毡,制备得到锂膜封装复合吸附剂(HMS-Li)。HMS-Li 是一种可扩展、低成本、高性能的复合吸附剂,可配合便捷式大气

集水设备使用。Li 等^[38]采用湿空气状态热力学框架, 利用吸附剂与冷凝器温差大的特点, 研制出中空保温网结构装置, 使取水装置的产水率提高了 20.5%。在 30 °C 和 70%RH 下, 经过 12 h 的吸附, HMS-Li 最大水吸附量达到 2.59 g/g, 高于未经封膜的吸附剂 HS-Li 的水吸附量 2.20 g/g。在室外实验中该装置单日单位质量 (1 kg)、单位太阳能照射面积(1 m²)分别实现了 34.8、1 399.28 g 的水生产量。因此, 采用可扩展、高效的被动式 SAWH 设备并配合低成本、高性能的复合吸附剂, 可在实际场景中实现低成本、高效取水的目的。

4.2 不同吸附剂的性能比较

通过调研将不同吸附剂的水吸附量和水脱附率分别列于表 1 和表 2 中。由表 1 中可知, 相对于其他材料, 水凝胶材料在宽温度、湿度范围表现出更强的吸水性能。Entezari 等^[22]研发的二元聚合物盐水凝胶复合吸附剂 Bina/FCNT, 即便在 20%RH 下, 水吸附量仍能达到 1.40 g/g。在低相对湿度(≤40%)下 MOF 材料和多孔复合材料展现出优越的吸附性能, 其中 NBHA 纳米多孔材料在 18%RH 下水吸附量可达 0.55 g/g。在中等相对湿度范围(40% ~ 80%), 除水凝胶材料外, 活性炭材料和多孔复合材料也展现出优越的吸水性能, 其中 M10LS 复合材料在 70%RH 下水吸附量达到 2.29 g/g。相比之下, 硅胶材料的吸水性能较差。在高相对湿度(≥80%)下, 气凝胶和纳米多孔材料表现出优异的吸水性能, 其中 LiCl@HGAFs 在 90%RH 下的水吸附量高达 4.15 g/g。由表 2 中可见, 在水脱附过程中, MOF-801、HMC-2 等 MOF 材料更具优势, 可将水脱附率提高至 90% 以上。硅胶材料更适用于低温脱附, 在 43 °C 下其水脱附率可达 92.5%。纳米多孔材料和水凝胶也能在低温下有效解吸水。活性炭和石墨烯材料在较高温度(70 ~ 90 °C)下展现出高水脱附率, 其中 M10LS 材料在 80 °C 下的水脱附率可达 100%。

表 3 为典型吸水材料的类型、优缺点和性能强化策略。石墨烯、活性炭、硅胶等作为基础的多孔吸附剂, 其吸附动力学性能较差, 因此可将其与另一种性能良好的材料组合制成复合材料,

以提高其吸水性能。虽然水凝胶等吸湿性高分子吸附剂的吸水性能较好, 但仍需通过共聚不同单体来增强其吸水性能, 其中吸湿盐在水凝胶吸附取水时发挥了关键作用。MOF 材料展现出优越

表 1 不同吸附剂的水吸附量^[9-23,25-35]
Tab. 1 Water absorption of different adsorbents^[9-23,25-35]

类别	材料	相对湿度/%	水吸附量/(g·g ⁻¹)
活性炭	ACF	30	1.36
	M10LS	70	2.29
	ACFF/silica/LiCl30	63	0.7~1.6
	SHPF	15~30	0.64~0.96
石墨烯	PGF	15/100	0.14/5.20
	石墨烯-13XLiCl	60	0.59
硅胶	经质量分数5%炭黑涂层修饰的硅胶	40	0.47
	吸湿性硅胶	50	0.25
	橙色硅胶	20/35/50/90	0.09/0.12/ 0.22/0.29
水凝胶	PAM-CNT-CaCl ₂ 水凝胶	35/60/80	0.74/1.10/1.75
	Bina/FCNT	20/70	1.40/5.60
	PDMAPS-LiCl	30	0.66
	PCLG	40	2.55
气凝胶	GO-based气凝胶	40/60/80/98	0.34/0.84/ 1.35/1.82
	LiCl@HGAFs	30/60/90	0.66/1.40/4.15
MOF	MOF-801	20	0.25
	HMC-2	90	1.074
	Cr-soc-MOF-1	70	1.95
	Co ₂ Cl ₂ BTDD	30	0.82
改性沸石/ 多孔无机材料/ 多孔聚合物	AlPO ₄ -34	30	0.29
	AlPO ₄ -LTA	30	0.38
	COF-432	34	0.30
	HCS-LiCl	20/60	0.4/1.0
	NBHA	18/33/42/95	0.55/0.80/ 0.92/2.23
	MOF衍生 纳米多孔碳	30/40	0.180/0.252
	HMS-Li	70	2.59
	HS-Li	70	2.20

表2 不同吸附剂的水脱附率^[10,12-15,18-23,25-26,35]Tab.2 Water desorption percentages for different adsorbents^[10,12-15,18-23,25-26,35]

类别	材料	脱附温度/°C	水脱附率/%
活性炭	ACF	90	100
	M10LS	80	100
	ACFF/silica/LiCl30	80	93
	SHPF	60	87
石墨烯	PGF	83	100
	石墨烯-13XLiCl	80	85
硅胶	经质量分数5%炭黑涂层修饰的硅胶	40/38/43	61.2/82.1/92.5
水凝胶	PAM-CNT-CaCl ₂ 水凝胶	55/66/75	80/89/97
	Bina/FCNT	60/70/80	36/58/65
	PDMAPS-LiCl	80	80
	PCLG	52	66
气凝胶	GO-based气凝胶	78	30
	LiCl@HGAFs	47	83
MOF	MOF-801	65	91
	HMC-2	121	100
改性沸石/ 多孔无机材料/ 多孔聚合物	HMS-Li	52	85
	HS-Li	52	86

的吸附-解吸能力，但 MOF 材料的高成本限制了其在大气集水技术中的推广应用，后续研发重

点将聚焦具有竞争力的 MOF 材料。对比各类复合吸附剂的特性和制备方法发现，高性能吸附材料均由性质不同的吸附基质、导热材料和吸湿盐耦合而成，从而最终达到强化复合吸附剂吸附性能的目的。

5 结语

太阳能驱动吸附式集水技术是离网分布式供水的重要途径，而高性能吸附剂是大气集水技术的核心。本文阐述了典型吸水材料的吸附机理和特点，总结了在特定温度、湿度条件下材料的吸附水和脱附水能力，系统地比较和评价了各吸附剂性能。目前，大气集水技术在开发高性能吸附材料和提升集水循环性能方面取得了重大进展。为促进大气集水技术的规模化应用，未来仍须在以下几个方面开展研究。

(1)在吸附水方面，MOF 材料具有高比表面积和可调孔径等优势，具有良好的吸附/脱附动力学性能，但其合成工艺复杂、易受杂质影响以及成本较高等因素均限制其应用，未来可开发新合成方法和新配体，制备经济实惠且结构稳定的 MOF 材料；水凝胶材料具有吸水性能良好、易于制备、成本低廉的优点，但吸水速率较低、易降解、无孔等因素制约其发展，通过单体聚合及原位孔隙制备等方法有望改善其吸附动力

表3 典型吸水材料的类型、优缺点和性能强化策略

Tab.3 Types, merits and limitations, and performance enhancement strategies of typical water absorbents

类型	优点	缺点	性能强化策略
活性炭类	高比表面积，可通过物理吸附和化学吸附集水	未改性时吸水性能较差	进行官能团改性，或与另一种性能良好的材料组合，制成复合材料
石墨烯	高导热性，多孔结构和惰性化学性能	吸附动力学性能差	
硅胶	低成本，高商业可用性，低再生温度，良好的吸附动力学特性	在低相对湿度条件下吸附能力一般	与另一种性能良好的材料组合，制成复合材料
气凝胶	高比表面积，可通过络合配位等与离子或分子形成相互作用	未改性时功能单一，难以应对复杂环境	与导热材料、吸湿盐组合，制成复合吸附剂
水凝胶	高吸附量，循环稳定性高且在宽相对湿度范围适用，与改性材料高相容	非多孔结构，需要制造孔隙且吸附速率较慢	共聚两种或两种以上不同单体以强化性能
MOF	高稳定性，易于根据不同有机连接剂和无机构建块在分子水平上调节孔隙结构和化学性质	价格昂贵，暂时难以商业化	优化MOF吸附性能，开发低成本MOF，与其他性能良好的材料制成复合材料
沸石及纳米多孔材料	内部孔隙发达，根据孔隙的大小可选择性地吸附水分子	导热性差，水解吸温度较高，对环境要求较高	与纳米多孔材料、吸湿盐组合，形成复合材料

学性能并提升制备效率;石墨烯、硅胶、气凝胶、沸石等单一材料成本相对较低,但吸水性能有限,可与高性能材料组成复合材料,从而增强吸水性能。

(2)在脱附水方面,MOF和硅胶材料展现出卓越的低温解吸水性能,而活性炭和石墨烯材料必须在较高温度下方能有效脱附水。可通过改性材料的表面官能团,适当减弱范德华作用力,以降低脱附温度。

(3)在复杂多变的大气集水环境下,单一吸附剂很难满足应用需求,常采用复合吸附剂以获得优异性能。根据不同集水地区的温度、湿度特性,针对性地调控吸附基质、导热材料及吸湿盐比例,从而达到强化复合吸附剂吸附性能的目的。

(4)为充分发掘复合吸附剂的应用潜力,可开发如双级大气集水设备、膜封装复合吸附剂大气集水装置等新型可扩展设备,以增强吸附过程的传热传质效率,降低解吸和冷凝过程的能量损失。

未来优化吸附材料的微观结构,改善吸附基质的亲水性,增强复合材料的热导率,并研制高效益低成本的吸附-解吸装置,是实现大气集水技术规模化应用面临的挑战。太阳能驱动吸附式集水技术正蓬勃发展,逐渐成为一种具有前景和潜力的选择,并为缓解全球淡水短缺问题提供了可持续且可靠的技术方案。

参考文献:

- [1] 文楚琳,关欣,杨曼莹,等.基于相变微胶囊悬浮液的太阳能光伏热系统的研究进展[J].能源研究与信息,2024,40(1):18-25.
- [2] 金满,徐洪涛,张剑飞,等.太阳能辅助地源热泵联合供暖系统模拟研究[J].上海理工大学学报,2021,43(2):111-117.
- [3] 叶继涛,陈儿同,贺运红,等.太阳能半导体制冷结露法空气取水器取水率的数值模拟[J].上海理工大学学报,2003(1):32-35.
- [4] POREDOŠ P, WANG R Z. Sustainable cooling with water generation[J]. Science, 2023, 380(6644): 458-459.
- [5] WANG J Y, HUA L J, LI C F, et al. Atmospheric water harvesting: critical metrics and challenges[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(12): 4867-4871.
- [6] TU Y D, WANG R Z, ZHANG Y N, et al. Progress and expectation of atmospheric water harvesting[J]. Joule, 2018, 2(8): 1452-1475.
- [7] AHRESTANI Z, SADEGHZADEH S, EMROOZ H B M. An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water supply[J]. RSC Advances, 2023, 13(15): 10273-10307.
- [8] SADEK S, DENG S, ZHAO J, et al. Solar-powered adsorption-based atmospheric water harvesting systems: Principles, materials, performance analysis, and configurations[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 54: 102874.
- [9] GADO M G, NASSER M, HASSAN A A, et al. Adsorption-based atmospheric water harvesting powered by solar energy: Comprehensive review on desiccant materials and systems[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 160: 166-183.
- [10] EJEIAN M, WANG R Z. Adsorption-based atmospheric water harvesting[J]. Joule, 2021, 5(7): 1678-1703.
- [11] SHI W, GUAN W X, LEI C X, et al. Sorbents for atmospheric water harvesting: from design principles to applications[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2022, 61(43): e202211267.
- [12] CHEN J, YU Q F, LI M, et al. Preparation of high specific surface area activated carbon fiber by high-temperature vacuum activation and its superior water vapor adsorption for air humidity control[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(6): 2469-2493.
- [13] EJEIAN M, ENTEZARI A, WANG R Z. Solar powered atmospheric water harvesting with enhanced LiCl/MgSO₄/ACF composite[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115396.
- [14] WANG W W, XIE S T, PAN Q W, et al. Air-cooled adsorption-based device for harvesting water from island air[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110802.
- [15] GUO Y H, GUAN W X, LEI C X, et al. Scalable super hygroscopic polymer films for sustainable moisture harvesting in arid environments[J]. Nature Communications, 2022, 13: 2761.
- [16] YAO H Z, ZHANG P P, HUANG Y X, et al. Highly efficient clean water production from contaminated air with a wide humidity range[J]. Advanced Materials, 2020, 32(6): 1905875.

- [17] 赵惠忠, 刘涛, 黄天厚, 等. 石墨烯-13X/LiCl 复合吸附剂开式吸附-解吸性能 [J]. 化工进展, 2021, 40(2): 969 - 976.
- [18] MULCHANDANI A, MALINDA S, EDBERG J, et al. Sunlight-driven atmospheric water capture capacity is enhanced by nano-enabled photothermal desiccants[J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(9): 2584 - 2594.
- [19] ESSA F A, ELSHEIKH A H, SATHYAMURTHY R, et al. Extracting water content from the ambient air in a double-slope half-cylindrical basin solar still using silica gel under Egyptian conditions[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 39: 100712.
- [20] KUMAR P M, ARUNTHATHI S, PRASANTH S J, et al. Investigation on a desiccant based solar water recuperator for generating water from atmospheric air[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 7881 - 7884.
- [21] LI R Y, SHI Y, ALSAEDI M, et al. Hybrid hydrogel with high water vapor harvesting capacity for deployable solar-driven atmospheric water generator[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(19): 11367 - 11377.
- [22] ENTEZARI A, EJEIAN M, WANG R Z. Super atmospheric water harvesting hydrogel with alginate chains modified with binary salts[J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(5): 471 - 477.
- [23] LEI C X, GUO Y H, GUAN W X, et al. Polyzwitterionic hydrogels for efficient atmospheric water harvesting[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(13): e202200271.
- [24] WANG J Y, DENG C H, ZHONG G D, et al. High-yield and scalable water harvesting of honeycomb hygroscopic polymer driven by natural sunlight[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(7): 100954.
- [25] WANG X Y, LI X Q, LIU G L, et al. An interfacial solar heating assisted liquid sorbent atmospheric water generator[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(35): 12054 - 12058.
- [26] HOU Y L, SHENG Z Z, FU C, et al. Hygroscopic holey graphene aerogel fibers enable highly efficient moisture capture, heat allocation and microwave absorption[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1227.
- [27] CHEN Z H, SONG S Y, MA B C, et al. Recent progress on sorption/desorption-based atmospheric water harvesting powered by solar energy[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111233.
- [28] KIM H, YANG S, RAO S R, et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight[J]. *Science*, 2017, 356(6336): 430 - 434.
- [29] HU Y, FANG Z, WAN X Y, et al. Carbon nanotubes decorated hollow metal-organic frameworks for efficient solar-driven atmospheric water harvesting[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 133086.
- [30] ABTAB S M T, ALEZI D, BHATT P M, et al. Reticular chemistry in action: a hydrolytically stable MOF capturing twice its weight in adsorbed water[J]. *Chem*, 2018, 4(1): 94 - 105.
- [31] RIETH A J, YANG S, WANG E N, et al. Record atmospheric fresh water capture and heat transfer with a material operating at the water uptake reversibility limit[J]. *ACS Central Science*, 2017, 3(6): 668 - 672.
- [32] KRAJNC A, VARLEC J, MAZAJ M, et al. Superior performance of microporous aluminophosphate with LTA topology in solar-energy storage and heat reallocation[J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(11): 1601815.
- [33] MITTAL H, AL ALILI A, ALHASSAN S M. Adsorption isotherm and kinetics of water vapors on novel superporous hydrogel composites[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 299: 110106.
- [34] NGUYEN H L, HANIKEL N, LYLE S J, et al. A porous covalent organic framework with voided square grid topology for atmospheric water harvesting[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(5): 2218 - 2221.
- [35] LI R Y, SHI Y, WU M C, et al. Improving atmospheric water production yield: Enabling multiple water harvesting cycles with nano sorbent [J]. *Nano Energy*, 2020, 67, 104255
- [36] WANG M Z, SUN T M, WAN D H, et al. Solar-powered nanostructured biopolymer hygroscopic aerogels for atmospheric water harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105569.
- [37] SONG Y, XU N, LIU G L, et al. High-yield solar-driven atmospheric water harvesting of metal-organic-framework-derived nanoporous carbon with fast-diffusion water channels[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17(8): 857 - 863.
- [38] LI C F, PAN Q W, YING W J, et al. Atmospheric water harvesting with scale-up potentials using natural sunlight and passive cooling[J]. *Natural Sciences*, 2023, 3(1): e20220038.