

# 吸附式大气集水技术的探讨、优化与应用突破

李吉焱, 邢郭宇, 谯敏, 孙寒雪

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 吸附式大气集水技术利用吸湿材料从空气中吸附水蒸气, 通过太阳能驱动解吸, 经冷凝收集生产新鲜液态水, 已被公认为是干旱地区分散供水的一种有前途的技术。为尽快实现该技术在日常生活、工农业生产等方面的实际应用, 进行了大量的探索和实践, 并取得了一些突破。该文在简要介绍了吸附式大气集水的吸附、解吸、冷凝收集的技术过程基础上, 针对解吸阶段进行了着重探讨; 详细总结了吸湿材料的吸湿和解吸机理; 基于材料结构和集水器设计, 阐明了提高解吸能力和冷凝效果的优化策略; 最后, 从基础研究和实际应用方面概述太阳能驱动吸附式大气集水技术目前面临的挑战, 并对其未来发展方向进行了展望。

**关键词:** 大气集水; 吸湿材料; 解吸行为; 结构优化

中图分类号: TU991.114 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2024) 09-1877-10

## Exploration, optimization and breakthrough in application of adsorption-based atmospheric water harvesting technology

LI Jiyan, XING Guoyu, QIAO Min, SUN Hanxue

(School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Adsorptive atmospheric water harvesting technology, utilizing hygroscopic materials to adsorb water vapor from the air, achieving water desorption driven by solar energy, and harvesting fresh liquid water through condensation, has been recognized as a promising technology for non-central water supply in arid areas. In order to quickly realize the practical application of this technology in daily life, industrial and agricultural production *etc.*, numerous explorations and practices have been carried out and breakthroughs have been achieved. In this review, the technical process of adsorption, desorption and condensation collection in adsorption atmospheric water harvesting was briefly introduced, with the desorption stage specifically described. The hygroscopic and desorption mechanisms of moisture-absorbing materials were then summarized in detail. The optimization strategies, based on material structure and collector design, to improve the desorption capacity and condensation effect were further elucidated. Finally, the existing challenges in terms of both basic research and practical application, as well as the future development directions were discussed.

**Key words:** atmospheric water harvesting; hygroscopic materials; desorption behavior; structural optimization

水资源短缺问题已经成为全球面临的挑战。预计到 2050 年, 由于人口增长、气候变化、自然资源的不可持续消耗等因素, 全球一半以上的人口将面临严重的缺水压力<sup>[1]</sup>。因此, 淡水生产的研究逐渐上升到前所未有的高度, 可利用海水或废水, 采用常规的淡水生产以及水净化技术 (如反渗透、多级

闪蒸等) 来缓解水资源短缺问题<sup>[2-3]</sup>。但这些技术需要大量集中、频繁维护的基础设施, 且这些技术难以在内陆地区或经济不发达的农村地区实施。相比之下, 大气集水技术有望成为一种替代常规生产淡水的很有前途的技术<sup>[4]</sup>。大气集水技术通过 3 种方式实现, 分别是雾收集、露收集、吸附式收集。雾

收稿日期: 2023-09-25; 定用日期: 2023-11-06; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230810

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52366006、52066012); 甘肃省杰出青年基金 (23JRRA808); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划

作者简介: 李吉焱 (1986—), 女, 副教授, E-mail: lijian@lut.edu.cn.

收集、露收集的直接冷凝策略需要耗费较多的人力及物力,而且对气候以及地区的依赖度较高<sup>[5]</sup>。吸附式收集利用吸湿材料自发地收集大气中的水,将其储存在材料内部,有效地利用太阳光等低品位能量产生的热量作为驱动力,促进吸湿材料内的水释放成为水蒸气,再将水蒸气通过直接冷凝或其他技术手段转变成液滴,完成大气中水分的收集。由此可见,吸附式收集无疑大大减少了能量消耗,即使在低相对湿度(RH)下也可以通过选用吸湿效果好的吸附剂对空气中的水分子进行吸附<sup>[6]</sup>。此外,全球大部分地区太阳辐照强度都很理想,更加有利于此项技术的广泛应用<sup>[7]</sup>。目前,基于吸附的太阳能驱动空气集水(SAWH)技术的相关研究已经得到了广泛关注,并最有可能成为具有经济效益和可扩展的大气水收集技术<sup>[8-10]</sup>。

基于吸附的大气集水技术主要是由吸湿、解吸、冷凝收集3个阶段组成,集水过程示意图如图1所示。性能良好的吸湿材料是整个集水过程的关键和前提,需要具备吸附快、吸附量大、结构稳定等性能<sup>[11]</sup>。与吸附阶段相比,解吸以及冷凝收集阶段的重要性也不可忽略,解吸能力、冷凝收集策略也是决定大气集水系统在理论或者实际情况下最终收集多少水分的另一关键。目前,已经在吸湿材料以及冷凝策略方面不断创新改进,并取得了丰硕的成果<sup>[12-15]</sup>,但对于解吸阶段的机理并没有深入探索,导致吸湿材料的良好优势在最后关键的解吸步骤中成为劣势。为了吸湿材料的整体优化以及加速大气集水技术的应用推广,有必要对大气集水吸湿材料的解吸行为进行重点研究。

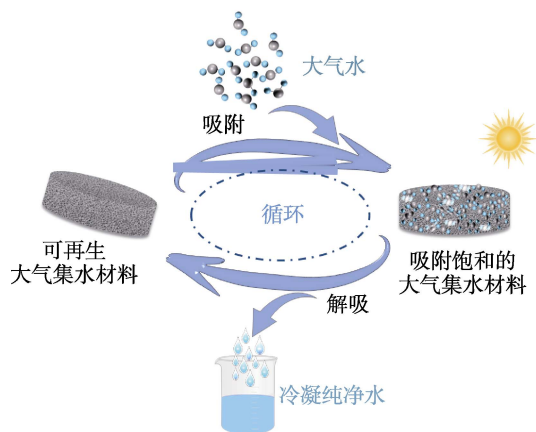


图1 基于吸附的大气集水过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adsorption-based atmospheric water harvesting process

综合来看,解吸温度高、解吸率低是基于吸附的大气集水技术存在的问题之一,为尽快实现该技术在日常生活、工农业生产等方面的实际应用,如

何以最小的能量需求去释放吸附水是关键。

本文简要介绍了吸湿机理、解吸机理和冷凝收集手段,着重对解吸阶段进行了详细综述。此外,基于吸附材料以及集水器的结构进行了探索,总结了提高解吸能力以及冷凝效率的优化策略。最后,从基础研究和实际应用方面概述了太阳能驱动的大气集水技术面临的挑战,并对该技术的未来发展进行了展望。

## 1 吸湿的基本原理和核心问题

在一定程度上,解吸是吸附的逆过程,因此,解吸行为与水分子的吸附机理密切相关。为了在低RH条件下实现高吸附容量,吸附剂需要对水分子具有高的亲和力。但过强的键合作用将严重限制太阳能驱动的脱附过程,所以在设计高性能吸湿材料时,从分子水平理解平衡水与吸附剂间的相互作用是非常重要的。根据吸湿机理,吸附式大气集水材料对水的吸附主要存在物理吸附、化学吸附及两者兼具的吸附行为。本节将详细分析吸附原理,阐明吸附剂结构与性能之间的关系。

### 1.1 物理吸附

物理吸附是吸附剂和被吸附物质之间通过分子间范德华力产生的吸附,其特点是:吸附热小、吸附速率高、无选择性、可逆,通常发生在接近气体液化点的温度,一般是多层吸附。物理吸附在SAWH中较为常用,其中,吸附剂的结构和表面性质决定了吸附能力和动力学<sup>[16]</sup>。大气集水中的物理吸附行为主要有材料通过表面或内部的孔道结构(微孔或大孔)进行毛细作用及水分子与水分子之间连接的多层吸附。

固体吸附剂,如硅胶、沸石、有机金属框架(MOFs)材料等,是一类比表面积很大的多孔材料。当吸附剂含有多孔结构时,吸附不仅发生在表面,还发生在孔隙中。由于固体吸附剂表面的水蒸气分压低于空气中水蒸气分压,所以收集空气中的水分成为可能。沸石属于硅酸盐类材料,具有多种微孔结构,在表面吸附和毛细管的凝结作用下吸收空气中的水分<sup>[17]</sup>。物理吸附是分子间的作用力引起的吸附,结合力(范德华力)较弱、吸附热较小、吸附和解吸速度较快,被吸附的水较容易被解吸出来,这对解吸是有利的。

### 1.2 化学吸附

化学吸附是吸附质分子与固体表面原子(或分子)发生电子的转移、交换或共有,形成吸附化学键的吸附。大气集水中的化学吸附行为主要有潮解盐的水合作用以及材料表面或内部亲水官能团与水

分子相互作用发生的单层化学吸附。吸附以及氢键形成的过程都是放热, 在无其他能量输入的情况下, 化学吸附具有选择性且过程不可逆。

无水盐对水蒸气的化学吸附是一种水热水合反应<sup>[18]</sup>。如固体 LiCl 和 CaCl<sub>2</sub>, 其盐晶体的空位和吸收的水分子之间形成了配位键, 产物为 LiCl·H<sub>2</sub>O 和 CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O。此外, 引入能与水分子形成氢键的官能团也是提高吸附剂表面亲水性的常用方法。常见的亲水性官能团有一OH、—NH<sub>2</sub>、—COOH、—SO<sub>3</sub>H、—CONH<sub>2</sub> 等<sup>[19]</sup>。这些亲水性官能团具有孤对电子和空位, 可以作为周围水分子的供体和受体与水形成氢键, 并通过氢键或静电相互作用与水分子结合, 从而使具有亲水性官能团的材料表现出亲水吸湿行为<sup>[20]</sup>。

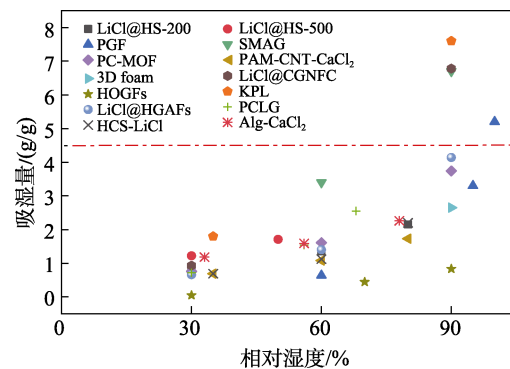
### 1.3 物理吸附与化学吸附相结合

事实上, 吸湿材料的吸湿行为并不能用单一的物理吸附或化学吸附机理来解释, 其过程综合了这2种吸附。如硅胶不仅具有微孔结构(孔径<2 nm), 还存在大量的表面羟基, 通过分子间的作用力, 羟基与空气中的水分子形成氢键, 完成表面吸附, 随后多层吸附水通过微孔结构在材料内部进行传输和储存。低成本、商业可用性以及无毒性使硅胶广泛应用在吸附技术中, 但硅胶的低导热性以及低吸附容量(尤其是在低RH下)限制了其在SAWH中的使用<sup>[21]</sup>。此外, 潮解盐的吸水行为除了化学水合作用外, 同样包括物理潮解作用<sup>[22]</sup>。随着水吸附的进行, 潮解盐最终溶解在从空气中捕获的水中形成盐溶液, 随后盐溶液可继续通过物理吸附捕获液体表面的水蒸气分子, 并由于浓度差将其转移至盐溶液中, 这种自发的转移为连续产水提供了机会。值得注意的是, 亲水性官能团与水分子形成氢键后, 吸附的水分子可以通过氢键定向排列, 在吸附剂表面形成有序的构型, 从而导致不同的偶极矩, 进一步促进周围水分子的多层吸附。

结合以上分析, 吸湿性复合材料的吸湿机理同样是基于物理吸附和化学吸附。如大多数吸湿性聚合物<sup>[23-25]</sup>, 它们提供了无数的亲水位点来捕获第一层有序的水分子, 提供巨大的比表面积来保证足够的多层吸附, 并提供有效的纳米级孔隙进行大量的毛细冷凝, 此时材料的吸水能力可由官能团数量、比表面积或孔体积决定。对于盐基复合材料, 引入的吸湿因子——无机盐类, 其含量在一定程度上决定了盐基复合材料的吸水能力。吸湿因子进行化学吸附, 通过形成氢键、电子相互作用或共价相互作用来捕获水分子, 部分结合水作为额外的活性中心诱导多层吸附行为, 随后也在众多纳米级孔隙中发生毛细凝聚, 多孔基质则负责储存和封装收集的

水。因此, 对于该材料来说, 在给定的环境条件下, 水的吸附能力取决于盐的选择、负载量以及基质设计<sup>[26-29]</sup>。

经过不断努力和探索, 目前的吸湿材料即使在较低的相对湿度环境下, 也同样表现出优异的吸附行为。图2为不同复合材料在低、适中和高相对湿度下的吸湿能力。从图2可以直观地看出, 无论是哪种吸附方式, 或是什么类型的复合材料, 材料的吸湿能力均随着相对湿度的增加而增强, 在较高的相对湿度(>80%)下, 如果吸湿量处于4.5 g/g以上, 那么属于吸湿能力较强的材料, 因此, 可将其仔细研究并为现有材料的优化改进提供思路。如吸湿量最优的κ-卡拉胶(KC)/聚吡咯(PPy)/LiCl(KPL)材料<sup>[30]</sup>选取了具有独特的温度响应取向(双螺旋聚集)的KC、Li<sup>+</sup>辅助的溶胶-凝胶转变和合理的加工工艺(挤出、凝胶化和真空干燥), 使KPL形成多孔壳的珠状中空结构, 特殊的中空结构为吸附水的存储提供了充足的空间, 吸湿量超越了大部分材料。即使大多数吸湿能力好的材料已具备了在较宽相对湿度范围内的使用性能, 理论上可实际应用于不同环境, 但仍缺少在日常生活、工农业生产中的应用数据, 因此缩短实验室小型实验与大规模应用之间的距离仍任重道远。



LiCl@HS-200 为 LiCl 先驱体溶液的质量浓度为 200 g/L 的微型多孔壁 SiO<sub>2</sub> 球; LiCl@HS-500 为 LiCl 先驱体溶液的质量浓度为 500 g/L 微型多孔壁 SiO<sub>2</sub> 球; PGF 为多孔聚丙烯酸钠/石墨烯框架; SMAG 为超级吸湿凝胶; PC-MOF 为聚合物-有机金属框架; PAM-CNT 为聚丙烯酰胺-碳纳米管; CGNFC 为纤维素/石墨泡沫; HOGFs 为吸湿性有机凝胶纤维; HGAFs 为孔状石墨烯气凝胶纤维; PCLG 为蜂窝凝胶吸附剂; HCS 为空心碳球; Alg 为海藻酸盐

图2 材料吸湿能力分布图<sup>[28-41]</sup>

Fig. 2 Distribution of moisture absorption capacity of materials<sup>[28-41]</sup>

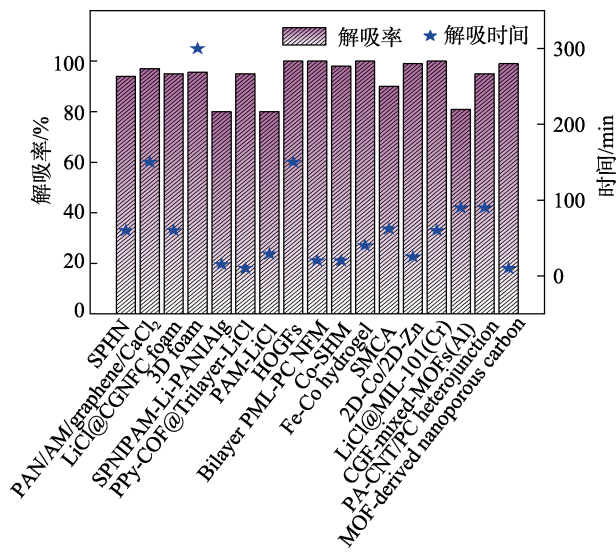
## 2 解吸机理和高效解吸方法

解吸机理是通过加热的方式使集水材料内局部水蒸气分压大于环境水蒸气分压, 在此压力差的作用下, 将水以蒸汽的形式从材料中迁移解吸出来。



考虑到能源消耗问题，太阳能作为不稳定的低品味能源，常被作为能源输入进行加热解吸，并且 SAWH 技术已经取得了一定的进展，但需对该技术的解吸行为进一步探索。

近年来，研究人员对材料的吸湿、循环等性能进行了研究，并逐步对吸湿材料的解吸率有所关注，具体研究了材料在不同模拟光照强度或户外真实环境下的最终解吸率。图 3 列举了部分材料在不同时间内的解吸能力数据。从图 3 可看出，绝大部分材料的解吸率已经达到了 97% 以上。但材料的解吸率仅仅是评判材料性能的标准之一，全面性能的提高才是最终的目标。



SPHN 为超亲水性光热中空纳米纤维；PAN/AM/graphene/CaCl<sub>2</sub> 为聚丙烯腈/丙烯酰胺/石墨烯/CaCl<sub>2</sub> 复合水凝胶；SPNIPAM-Li-PANIAlg 为磺酸基聚(N-异丙基丙烯酰胺)/锂/聚苯胺海藻酸盐；PML-PC NFM 为聚丙烯腈/MIL-101(Cr)/LiCl/聚丙烯腈/炭黑复合纳米纤维膜；Co-SHM 为基于铬络合物的超级吸湿材料；SMCA 为太阳能驱动纤维素气凝胶；CGF 为壳聚糖涂层玻璃纤维纸；PA-CNT/PC 为聚阴离子/聚阳离子碳纳米管；MOF-derived nanoporous carbon 为有机金属框架衍生的纳米多孔碳

图 3 材料解吸能力分布图<sup>[25,29,36-37,42-54]</sup>

Fig. 3 Distribution of material desorption capacity<sup>[25,29,36-37,42-54]</sup>

根据等温吸附规律，材料的解吸过程更容易发生在高温、低湿度的环境下<sup>[39,55]</sup>。解吸是吸附的逆过程，因此根据以上的吸附行为可大致反推出解吸过程的每个步骤。此外，解吸速率及所需能量能耗与水的存在形式有很大关系，水在吸湿材料中的存在形式有 3 种，分别是结合水、结晶水与游离水。其中，结合水与主体以化学键（通常是配位键）方式结合，较难脱附；结晶水通常与主体以氢键方式结合，加热后便可脱附；而游离水与主体以物理作用（如范德华力）结合，能通过更简单的加热方式脱附。为了达到低温驱动解吸的目的，有必要在光吸收、热利用以及优化材料结构方面寻求更全面的策略，以实现更好的解吸性能，以便进行后续的冷

凝集水过程。

总体来说，解吸过程主要受光热性能、传热性能和传质性能的影响。若要提高解吸能力，需要考虑以上 3 个方面。一些研究者从设备或系统方面做出改进优化，如通过使用太阳光聚光器充分利用太阳光<sup>[56]</sup>、增加空气热交换器加速蒸汽流通<sup>[57]</sup>等，这些外围设备能极大增加解吸率。

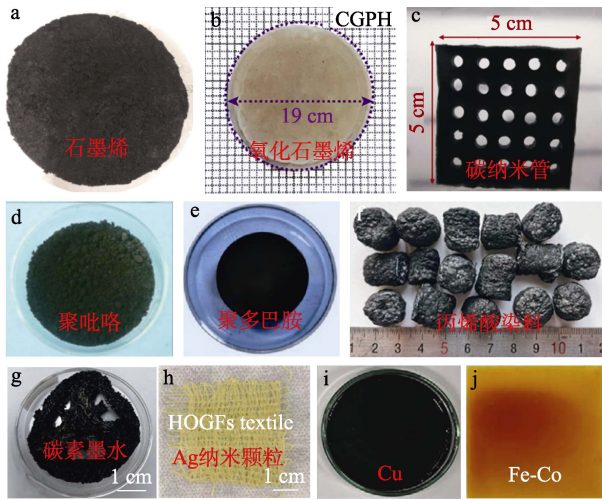
良好的传质和传热是保证低温驱动解吸的关键。在保证不影响最终平衡含水率的条件下，最大限度地推进解吸过程，使吸附水的解吸率达到理论极限。基于此，提高材料的升温速率使之尽快达到解吸所需温度或降低材料本身所需的解吸温度是有效的策略。其中，提高材料升温速率的手段包括吸湿材料中光热材料的有效利用、添加导热性能良好的物质等；降低解吸温度的方法主要有调节材料的孔径结构、官能团数目以及 3D 柔性网络的交联度等。

### 2.1 提高材料升温速率

SAWH 解吸过程中的能量转换包括 2 个过程，一是光到热的转换；二是水吸热汽化。高效吸光是实现高效解吸的第一步，吸湿材料只有吸收大量的太阳能，才会产生足够的热能。为了使 SAWH 尽快投入到实际应用，一些现实因素不得不纳入考虑范围。在白天解吸的过程中，为保证在常规甚至减弱的阳光强度下进行正常的解吸，吸湿材料通常要与光热转换材料相结合。碳基材料，如最常见的石墨烯、炭黑、碳纳米管等，具有成本低、导热性好、比表面积大、光热转换性能好等优点，并且在整个太阳光谱范围内具有很强的吸收能力，已成为 SAWH 中光热转换的优良材料，其产生热量的基本机制来自于分子的热振动<sup>[58]</sup>。金属-半导体材料在复合吸湿材料中也较常使用，其光吸收带隙较宽，材料表面升温速率快且温度高，具有优异的光热转换效果<sup>[59-60]</sup>。大量实验<sup>[23,35,39,61-62]</sup>证明，适量添加光热材料并不会对吸湿率造成影响，如海藻酸钠(SA)/LiCl 和氧化石墨烯(GO)/SA/LiCl 水凝胶在 25 °C、RH=80% 条件下的吸湿量相似，均在 1.92 g/g 左右<sup>[63]</sup>。目前，吸湿材料与光热转换材料相结合的方法已被成功应用，并取得了很好的成效，图 4 为掺杂了不同光热材料的吸湿材料的光学照片，因掺杂了石墨烯(图 4a)<sup>[64]</sup>、碳纳米管(FCNT)(图 4c)<sup>[62]</sup>、PPy(图 4d)<sup>[42]</sup>、聚多巴胺(PDA)(图 4e)<sup>[65]</sup>、丙烯酸染料(图 4f)<sup>[36]</sup>和英雄碳素墨水(图 4g)<sup>[66]</sup>，材料变得更黑、更吸光，其吸光率均>90%；而添加了具有高导热性的 GO(图 4b)<sup>[27]</sup>和金属粒子(图 4h~j)<sup>[24-25,37]</sup>的复合材料具有更出色的光热转换能力，可以满足解吸所需要的热量。基于已有的材料及策略，接下来进一步讨论多种有效的光吸收策略，并通过设计光热纳米材料、



光热材料的 3D 结构来实现。



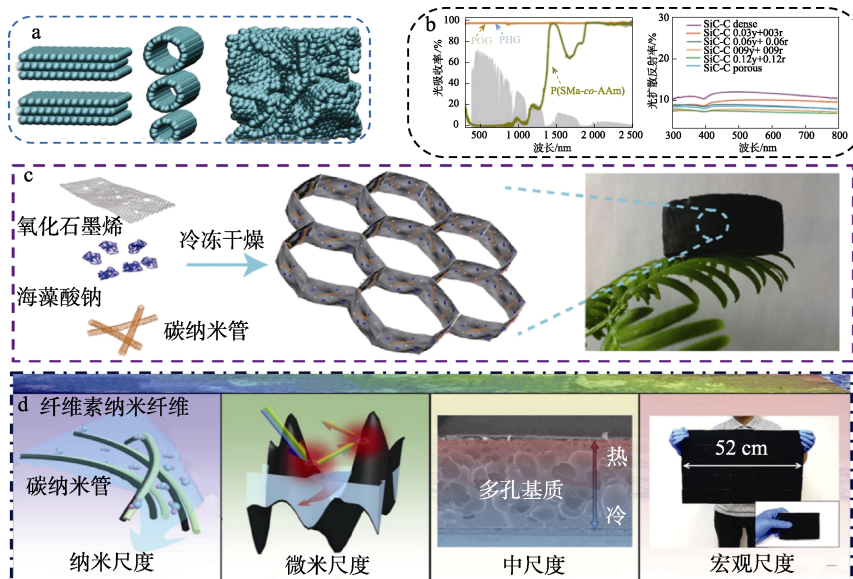
CGPH 为掺杂  $\text{CaCl}_2$  和 GO 的聚(*N*-异丙基丙烯酰胺)水凝胶; HOGFs textile 为吸湿性有机凝胶纤维织物  
图 4 掺杂了不同光热材料的吸湿材料的光学照片<sup>[24-25,27,36-37,42,62,64-66]</sup>  
Fig. 4 Optical photographs of hygroscopic materials doped with different photothermal materials<sup>[24-25,27,36-37,42,62,64-66]</sup>

SAWH 技术采用的复合吸湿材料一般是将光热材料分散在材料表面及其内部, 内部热传导将热从材料的上表面传递到其内部, 从而保持吸湿材料均匀的解吸温度。光吸收体应充分吸收入射光并尽量减少反射, 几种有效光吸收策略见图 5。如图 5a 所示, 碳材料的阵列、孔隙和分层纳米结构可减少光反射带来的能量损失<sup>[67]</sup>, 这些分层纳米结构增加了光路的长度, 导致光在材料内更容易散射。同时,

当纳米结构的尺寸缩小到接近太阳辐射波长的 100 nm 时, 入射光可以在材料内折射。内部折射和散射将光捕获在这些纳米结构中, 直到被材料吸收, 最终增加了光捕获<sup>[68-69]</sup>。结果发现, 将碳材料与其他光热性能好的材料复合, 可制备金属-碳材料、碳-碳材料或碳-聚合物材料等混合光热材料, 其协同光吸收能显著提高光吸收性能, 并有效提高复合材料的热导率<sup>[70-71]</sup>。如图 5b 所示, 碳化硅-碳 (SiC-C) 复合光热材料的光扩散反射率 $<10\%$ <sup>[71]</sup>, PPy-PDA 的协同光吸收率高达 97%<sup>[23]</sup>。因此, 可以考虑将复合光热材料应用到集水材料中。

另外, 可将吸光碳基材料做成 3D 结构, 3D 碳材料具有更多可减少光反射的纳米层<sup>[72]</sup>, 比 2D 碳材料表现出更好的光吸收性能, 如 HU 等<sup>[61]</sup>通过冻干法合成了由 GO、SA、CNT 连接的多孔框架 (图 5c)。还可将吸湿材料的表面构建成 3D 的不均匀光接收面, 通过增加光的散射路径来实现对光的有效多次吸收, 如 LI 等<sup>[73]</sup>使用 CNTs 和纤维素纳米纤维 (CNFs) 制造的具有改善光吸收的微尺度皱 w-褶皱结构 (图 5d), 其光热转换效率达到 95.8%。

太阳能驱动的解吸过程与热传递过程有紧密的关系。将碳基材料分散在吸湿材料中, 可同时获得高热导率和优异的光热性能。为了实现更好的传热, 需增加导热性减小热阻, 因此, 另一种策略是通过额外加入高导热材料来增加导热性。但该法必须考虑添加剂对质量传输造成的阻碍, 还需实验进一步验证。



PHG 为光热水凝胶; POG 为光热有机凝胶; P(SMa-co-AAm)为聚甲基丙烯酸钠/聚丙烯酰胺; SiC-C 为多孔碳化硅和碳复合物, 其中 y 为酵母, r 为黏米粉, SiC-C 0.03y+0.03r 代表 SiC-C 中分别加入 0.03 g 酵母和黏米粉, 下同  
图 5 设计的碳材料的阵列、孔隙和分层纳米结构 (a)<sup>[67]</sup>; 混合光热材料的协同光吸收图 (b)<sup>[23,71]</sup>; 光热材料的 3D 结构图 (c)<sup>[61]</sup>; 不同尺度 w-褶皱结构图 (d)<sup>[73]</sup>  
Fig. 5 Arrays, pores and layered nanostructures of designed carbon materials (a)<sup>[67]</sup>; Synergistic light absorption maps of hybrid photothermal materials (b)<sup>[23,71]</sup>; 3D structural maps of photothermal materials (c)<sup>[61]</sup>; Maps of wrinkled w-pleat structures at different scales (d)<sup>[73]</sup>

Fig. 5 Arrays, pores and layered nanostructures of designed carbon materials (a)<sup>[67]</sup>; Synergistic light absorption maps of hybrid photothermal materials (b)<sup>[23,71]</sup>; 3D structural maps of photothermal materials (c)<sup>[61]</sup>; Maps of wrinkled w-pleat structures at different scales (d)<sup>[73]</sup>

## 2.2 降低解吸温度

若要从材料的结构方面进行优化,了解水的结合方式以及键能大小等基本原理和参数极其重要。

捕获水层通过非共价键与聚合物链缔合,导致水结合到材料内部,属于结合水,如羟基化形成的结合水或吸湿盐通过水合作用捕获的水;基于亲水性官能团捕获的水和后续氢键结合的水为中间水;基于物理吸附的水为游离水,它们与材料所含结构几乎不缔合,属于自由水。

与氢键、电子相互作用等非共价相互作用不同,共价相互作用主要包括离子键和配位键,由于离子或配位相互作用的结合能较高(约 450 kJ/mol),因此,通过共价相互作用的化学吸附比其他吸附具有更高的能垒。相比之下,氢键具有合适的键能(9.7~29.0 kJ/mol),比范德华力(7.7 kJ/mol)强,但远低于完全共价键 O—H 键(459.3 kJ/mol)<sup>[74-75]</sup>,其为水的高效吸附和易脱附之间提供了良好平衡。因此,在 SAWH 中得到了广泛应用。

对吸湿材料进行改性,使水分子以较低的结合能被捕获进入材料,提高中间水含量,可降低解吸能耗,有利于太阳能低温驱动脱附过程的完成。吸湿性复合材料中基质的交联密度、网络结构和亲水官能团的数量不仅对其吸水性能有显著影响,而且决定了中间水、结合水和自由水的比例<sup>[76]</sup>。通过改变单体或聚合物的比例,从而调节材料中亲水官能团的数量,进一步影响吸水能力和中间水的相对含量,以减少不能依靠太阳捕获到的结合水的相对含量<sup>[77]</sup>。

设计水传输通道和孔隙结构同样是降低解吸能耗的一种有效措施。减小水蒸气从材料内部到外界空气中的传质阻力,必须考虑到孔隙结构的优化。一般来说,运动的水分子之间的碰撞是一种自然现象,是不可避免的,但减少水分子的扩散距离是可行的。因此,可减小材料的厚度来减少传质阻力,使水分子具有较短的迁移距离。材料内部的水可通过合理构建多孔结构来减轻迂曲度或顺应水分子的自然迁移,该法主要是减少水分子与孔壁的黏滞摩擦,减少运动中的水分子之间的碰撞<sup>[78-79]</sup>。常用的构建方法有:通过定向冷冻干燥使材料具有垂直排列的孔道结构(图 6a)<sup>[80]</sup>来顺应水分子的迁移;通过发泡剂制造更多大孔(图 6b)<sup>[81]</sup>来促进传质等。

值得注意的是,吸湿材料的形状、大小及厚度都会对实际应用产生一定影响。如材料结构为粉末状或颗粒状,若增加材料的剂量则会导致传热和传质效率的降低。在这种情况下,晶间空间充满了几乎静止的空气,增加了材料的总热阻,降低了吸附剂的热导率,进一步干扰了均匀的解吸温度<sup>[82]</sup>。且

在脱附过程中,阻碍了水蒸气进入环境过程中的传输通道。此外,从传质的角度来看,具有大的比表面积和小的厚度的材料更有利于快速的吸附和脱附。基于此,可从以下方面进行吸湿材料的优化设计,如增大材料的比表面积、优化材料的厚度、改变吸附剂的形貌(蜂窝状等),但同时还需考虑平衡吸附容量、热阻和占用面积等因素。此外,在实际户外解吸的环境下,应避免材料相互堆叠,增加与空气的接触面积,提高传质与传热效率,以便更完全地进行吸/脱附。但提高颗粒间的孔隙率会导致吸附剂床的体积增大,从而增加总扩散长度和达到吸附平衡所需的时间。因此,在优化材料的结构时必须要多方面、综合考虑每个环节间的影响,不能独一而论。

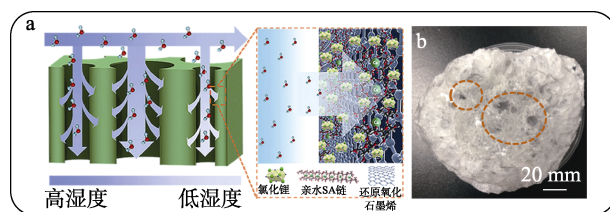


图 6 孔隙结构的优化:水蒸气从环境空气到垂直排列的纳米复合吸附剂的传输路径示意图(a)<sup>[80]</sup>;大孔水凝胶的照片(b)<sup>[81]</sup>

Fig. 6 Optimization of pore structure: Schematic diagram of water vapor transport path from ambient air to vertically aligned nanocomposite adsorbent (a)<sup>[80]</sup>; Photograph of macroporous hydrogel (b)<sup>[81]</sup>

## 2.3 改变外界环境

以上是从材料自身出发做出的结构优化,若在吸湿材料确定的情况下想要达到较高的解吸率,必须依赖外界环境。高温、低相对湿度环境有利于解吸,达到这些条件需要额外的能量输入及物资消耗,对于一些经济欠发达地区无疑是增加负担。此外,吸附水蒸发的快慢与空气流动的速度有关,流动速度越高,蒸发越快,可有效利用风能进行辅助达到快速解吸的目的。但以上改变外界环境条件仅适用于小型的室内测试,并不能扩大适用范围应用到所有地区,这在一定程度上阻碍了 SAWH 的推广,也违背了该技术的最大优点:无地域限制、绿色经济。但利于解吸的高温、低相对湿度以及高空气流动速度的条件,可为大气集水户外测试装置的改进设计提供思路指引。

## 3 冷凝集水阶段设计分析

集水过程通常是在封闭环境下进行的,即水蒸气从吸湿材料中解吸后,在蒸汽梯度压力的驱动下扩散到冷凝器中,然后被冷凝液化成水滴,并附着



在集水器上面, 最后被收集的整个过程。虽然吸附剂本身的性能是决定集水效率的关键, 但集水过程同样与冷凝策略以及集水器的设计密切相关, 以下简要介绍冷凝水收集的优化策略。

冷凝集水过程主要包括冷凝水的形成、生长以及滴落收集。为实现较高的水形成效率, 首先需要确保冷凝要足够快速, 这是水形成的关键。通过降低冷凝器的温度可有效增强冷凝, 但水蒸气液化放出的热量传递到冷凝器后, 会不可避免地导致冷凝器温度升高, 从而降低传热效率<sup>[5]</sup>。因此, 可通过选用具有高热容的冷凝器、加入蓄冷材料、使用红外反射涂层<sup>[83]</sup> (图 7a) 等方式来有效解决热管理问题。其次, 冷凝器的放置位置也会对高效 SAWH 造成一定的影响, 通常情况下, 冷凝器是平行放置在吸附剂床层的上方或下方: 若位于上方, 冷凝水的附着会影响太阳光的利用率以及材料的解吸率, 甚至冷凝水会面临再次蒸发的风险; 若位于下方, 又会增加解吸出来的水蒸气扩散到其表面的阻力。综合考虑, 将整个集水系统从之前的垂直布局转换为倾斜布局, 即冷凝器的相对位置为倾斜的上下布置

(图 7b)<sup>[84]</sup>。此优化方案既消除了冷凝水对阳光吸收的影响, 又减小了水蒸气的迁移阻力。冷凝水的成核生长以及滴落过程对集水器表面有较高的要求, 无论表面是亲水或疏水, 都难以同时实现快速成核和快速液滴去除: 亲水性表面可能有助于成核, 但对水的高保留性也会阻碍水滴的去除; 疏水表面相反, 有助于冷凝水的去除但不利于水滴的成核生长<sup>[85]</sup>。结合两者的优缺点, 并受沙漠甲虫的启发, 将冷凝器表面设计成具有亲水性顶部和蜡覆盖的疏水性斜坡的混合润湿性表面 (图 7c), 可使集水性提高, 并为冷凝器表面的设计提供了新途径<sup>[86]</sup>。此外, 可优化集水器的结构设计, 将集水器设计为 2 个冷凝表面, 如图 7d 所示<sup>[87]</sup>, 当水蒸气在顶部冷凝器表面上冷凝时, 释放的冷凝热通过热接触传递到底部吸附剂层, 并再次循环用于解吸, 冷凝水在底部冷凝器表面进行收集, 在有效增强热量利用的同时又提高了水的生产效率。但值得注意的是, 集水器中的太阳能吸收器、冷凝器以及所有部件之间的系统设计对获得高性能集水效率同等重要, 因此在优化设计时需全面考虑。

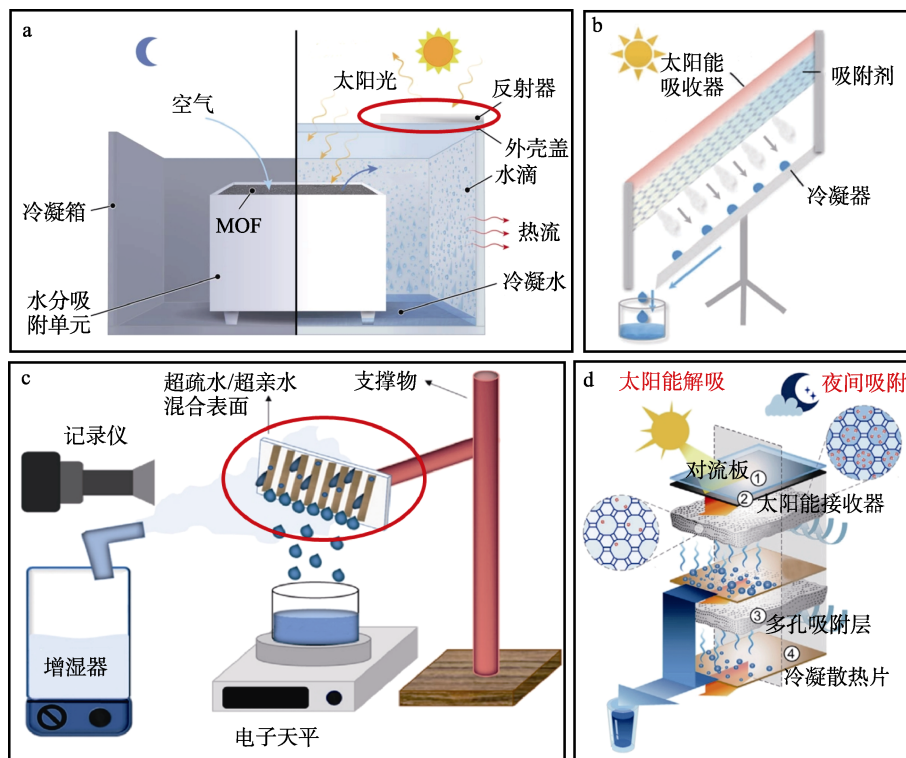


图 7 使用红外反射涂层以最小化冷凝器单元的温度升高 (a)<sup>[83]</sup>; 冷凝集水阶段优化策略: 改变冷凝器倾斜角度以平衡太阳能吸收率和冷凝性能 (b)<sup>[84]</sup>; 超疏水/超亲水杂交冷凝表面实现高效集水 (c)<sup>[86]</sup>; 双冷凝表面以增强热量利用 (d)<sup>[87]</sup>

Fig. 7 Use of infrared reflective coatings to minimize the temperature rise in the condenser unit (a)<sup>[83]</sup>; Optimization strategies for the condensation collection stage: Varying the condenser tilt angle to balance solar absorptivity and condensation performance (b)<sup>[84]</sup>; Super-hydrophobic/super-hydrophilic hybrid condensing surfaces to achieve high efficiency of water collection (c)<sup>[86]</sup>; Dual condensing surfaces to enhance heat utilization (d)<sup>[87]</sup>



## 4 吸附式大气集水技术的优化应用

基于上述吸附式大气集水技术过程的分析,从提高传质和传热等方面对各个阶段不断进行改善,以实现集水系统在吸附、解吸以及冷凝收集过程的高效运行。以下结合典型的材料实例进行分析。

根据吸湿机理,增加水的吸附位点可增加材料的吸湿率。ENTEZARI 等<sup>[88]</sup>对海藻酸钠进行修饰,通过  $\text{Li}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  占据 G-嵌段和 M-嵌段中更多的阳离子位置来增加吸附容量,并通过功能化的 FCNT 来增加太阳光的光谱吸收和提供更多的水分运输通道,最终制备了低成本的二元聚合盐/FCNT (Bina/FCNT) 复合材料。XU 等<sup>[80]</sup>制备了具有垂直排列多孔结构的  $\text{LiCl}@r\text{GO-SA}$  ( $r\text{GO}$  为还原氧化石墨烯) 材料,顺应了水分子的迁移,减小了传质阻力,表现出快速的吸附-解吸动力学。另外,热响应性材料也逐渐在大气集水技术中展开应用。ZHAO 等<sup>[34]</sup>将吸湿性氯掺杂聚吡咯 (PPy-Cl) 和具有可切换亲水性的聚(*N*-异丙基丙烯酰胺)相结合,制备了超吸水水凝胶 (SMAG)。该材料的应用有效降低了集水系统设计的复杂性,因为在一般情况下,大气中的水需要经历 3 次相变才能成为最后的冷凝水,而热响应性聚合物不需要冷源来帮助释放凝结热,可随温度的变化直接渗出液态水,在降低能源消耗的同时又提高了解吸率。对高效的 SAWH 来说,仅针对吸湿材料进行改进远达不到理想的目的,通常需要结合集水系统做进一步的优化。

在冷凝集水阶段的设计分析中已对冷凝器的优化方案进行了讨论,接下来针对吸附剂床层以及集水器件的巧妙设计做阐述。从优化传热的角度出发,将高热材料或其他高导热材料分散到吸湿材料中是最常用的方法,如 KIM 等<sup>[12]</sup>将 MOF-801 渗透到泡沫铜平面中,LI 等<sup>[62]</sup>将 CNT 分散在聚丙烯酰胺 (PAM)- $\text{CaCl}_2$  中等。从传质角度看,吸附剂的堆积密度极为关键,低密度阻碍颗粒间扩散,会对传质造成影响;但材料间孔隙度过高会导致吸附剂床体积增大,增加装置的成本以及设计难度。因此,KIM 等<sup>[89]</sup>和 LAPOTIN 等<sup>[90]</sup>根据特征扩散参数以及软件模拟分析,优化出了特定吸附剂的填充密度。WANG 等<sup>[91]</sup>设计的蜂窝状吸附床以及 DENG 等<sup>[11]</sup>设计的吸附树,均为提高吸附-解吸动力学性能以及集水系统的独特设计提供了思路。总体来看,目前,以夜间吸附、白天解吸的循环模式运行的集水系统较为普遍,但产水量显然不能够满足大众日常用水的需求。为加快 SAWH 技术的应用步伐,应对集水系统进行合理设计,HANIKEL 等<sup>[92]</sup>制造了一个光

伏 SAWH 系统,同样使用太阳光作为能源输入,光伏模块的加入实现了主动的吸附-解吸循环。

## 5 结束语与展望

大气集水作为在气候和地理上独立的水生产技术,为缓解淡水危机做出了极大的贡献。吸附、解吸、冷凝收集的 3 个过程相互独立又相互影响,通过改善传质与传热可充分发挥材料的性能、促进冷凝,可加强吸湿材料的循环与再生,从而提高 SAWH 的整体性能。然而,对吸湿性材料的脱附机理并没有系统的整理总结,全面理解仍有难点,这阻碍了集水器件的优化设计和广泛应用。鉴于此,本文简要介绍了集水的全过程,总结了吸附式大气集水材料的吸湿机理以及解吸机理,并着重阐明提高解吸能力的优化策略,为发展新型、绿色集水材料提供新的研究思路。尽管基于吸附的 SAWH 技术取得了惊人的进步,但要使该项技术改善人们的生产生活,还有很长的路要走,目前该技术存在以下 4 个方面的挑战:

(1) 虽然大量集水材料的性能均满足大气集水的要求,但太阳能驱动的解吸过程在一些光照不足的地区或阴天无光照的情况下是无法开展的。为了扩大该技术的应用范围、实现稳定的高效产水,应考虑采用其他绿色节能的方法进行加热解吸,如潮汐能发电加热等;

(2) 大气水需经历 3 次相变才能成为最后的冷凝水,因此,亟须开发新型的吸湿材料或集水设备来降低产水过程的复杂性以减少热损失;

(3) 由于缺乏 SAWH 的长期稳定性和大规模实施数据,如何将先进的吸湿材料集成到设备中而不损害其固有性能,仍是非常具有挑战性的课题;

(4) 吸附环境处于开放状态,避免恶劣环境下的尘土、大分子颗粒物等污染物的附着以及解决吸附剂表面的堵塞问题仍具有一定挑战性。此外,吸附剂的污染是否会对冷凝水质量产生影响还需进一步考察。

### 参考文献:

- [1] SALEHI M. Global water shortage and potable water safety: Today's concern and tomorrow's crisis[J]. *Environment International*, 2022, 158: 106936.
- [2] LI J Y, JING Y J, XING G Y, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation for water treatment: Advanced research progress and challenges[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(36): 18470-18489.
- [3] TOTH A J. Modelling and optimization of multi-stage flash distillation and reverse osmosis for desalination of saline process wastewater sources[J]. *Membranes*, 2020, 10(10): 265.
- [4] LI J Y (李吉焱), XING G Y (邢郭宇), JING Y J (景艳菊), *et al.* Solar-driven atmospheric water harvesting: Progress and prospect[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2023, 40(6): 1214-1224, 1293.

- [5] 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.
- [6] ZHANG Z B, WANG X, LI H Y, *et al.* A humidity/thermal dual response 3D-fabric with porous poly(*N*-isopropyl acrylamide) hydrogel towards efficient atmospheric water harvesting[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 653: 1040-1051.
- [7] FENG Y, CHEN D M, ZHAO X Y. Improved empirical models for estimating surface direct and diffuse solar radiation at monthly and daily level: A case study in North China[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2019, 43(1): 80-94.
- [8] SUN Z F (孙自法). New international study: Atmospheric water harvesting using solar energy could provide drinking water for 1 billion people[J]. *Henan Science and Technology (河南科技)*, 2021, 40(31): 2.
- [9] BILAL M, SULTAN M, MOROSUK T, *et al.* Adsorption-based atmospheric water harvesting: A review of adsorbents and systems[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 133: 105961.
- [10] CHEN Z H, SHI J W, LI Y Q, *et al.* Recent progress of energy harvesting and conversion coupled with atmospheric water gathering[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 246: 114668.
- [11] DENG F F, XIANG C J, WANG C X, *et al.* Sorption-tree with scalable hygroscopic adsorbent-leaves for water harvesting[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(12): 6576-6586.
- [12] KIM H, RAO S R, KAPUSTIN E A, *et al.* Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1191.
- [13] POREDOŠ P, SHAN H, WANG C X, *et al.* Sustainable water generation: Grand challenges in continuous atmospheric water harvesting[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(8): 3223-3235.
- [14] ZHANG H L, ZHOU Z L, DU J, *et al.* Starch-derived photoresponsive high-efficiency hygroscopic hydrogel for all-weather atmospheric water harvesting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 416: 137897.
- [15] SHAN H, POREDOŠ P, YE Z Y, *et al.* All-day multicyclic atmospheric water harvesting enabled by polyelectrolyte hydrogel with hybrid desorption mode[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(35): 2302038.
- [16] XIAO C, SHI P F, YAN W M, *et al.* Thickness and structure of adsorbed water layer and effects on adhesion and friction at nanoasperity contact[J]. *Colloids and Interfaces*, 2019, 3(3): 55.
- [17] TEO H W B, CHAKRABORTY A, FAN W. Improved adsorption characteristics data for AQSOA types zeolites and water systems under static and dynamic conditions[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 242: 109-117.
- [18] SÖGÜTOĞLU L C, STEIGER M, HOUBEN J, *et al.* Understanding the hydration process of salts: The impact of a nucleation barrier[J]. *Crystal Growth & Design*, 2019, 19(4): 2279-2288.
- [19] ZHANG Y X, NANDAKUMAR D K, TAN S C. Digestion of ambient humidity for energy generation[J]. *Joule*, 2020, 4(12): 2532-2536.
- [20] ZHANG M B, LIU R B, LI Y X. Diversifying water sources with atmospheric water harvesting to enhance water supply resilience[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7783.
- [21] 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.
- [22] HORST D, ZHANG Q, SCHMIDT E. Deliqueszenz und effloreszenz hygroskopischer salzpartikeln in partikel-wand-und partikel-partikel-kontakten[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2018, 91: 46-54.
- [23] NI F, QIU N X, XIAO P, *et al.* *Tillandsia*-inspired hygroscopic photothermal organogels for efficient atmospheric water harvesting[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(43): 19237-19246.
- [24] YANG J, ZHANG X P, QU H, *et al.* A moisture-hungry copper complex harvesting air moisture for potable water and autonomous urban agriculture[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(39): 2002936.
- [25] WU H F, XIONG Y L, YU D H, *et al.* Fe-Co controlled super-hygroscopic hydrogels toward efficient atmospheric water harvesting[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(48): 18022-18032.
- [26] YANG K J, PAN T T, LEI Q, *et al.* A roadmap to sorption-based atmospheric water harvesting: From molecular sorption mechanism to sorbent design and system optimization[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(10): 6542-6560.
- [27] WANG X J, YANG D Z, ZHANG M, *et al.* Super-hygroscopic calcium chloride/graphene oxide/poly(*N*-isopropylacrylamide) gels for spontaneous harvesting of atmospheric water and solar-driven water release[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(29): 33881-33891.
- [28] GONG F, LI H, ZHOU Q, *et al.* Agricultural waste-derived moisture-absorber for all-weather atmospheric water collection and electricity generation[J]. *Nano Energy*, 2020, 74: 104922.
- [29] CHEN B, JING S S, CHEN Q Y, *et al.* All-natural, eco-friendly composite foam for highly efficient atmospheric water harvesting[J]. *Nano Energy*, 2023, 110: 108371.
- [30] HE J T, LI N, WANG S X, *et al.* Hygroscopic photothermal beads from marine polysaccharides: Demonstration of efficient atmospheric water production, indoor humidity control and photovoltaic panel cooling[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(15): 8556-8567.
- [31] YANG K J, SHI Y, WU M C, *et al.* Hollow spherical SiO<sub>2</sub> micro-container encapsulation of LiCl for high-performance simultaneous heat reallocation and seawater desalination[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(4): 1887-1895.
- [32] 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.
- [33] YILMAZ G, MENG F L, LU W, *et al.* Autonomous atmospheric water seeping MOF matrix[J]. *Science Advances*, 2020, 6(42): eabc8605.
- [34] ZHAO F, ZHOU X Y, LIU Y, *et al.* Super moisture-absorbent gels for all-weather atmospheric water harvesting[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(10): 1806446.
- [35] 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.
- [36] LIN Y X, SHAO K, LI S, *et al.* Hygroscopic and photothermal all-polymer foams for efficient atmospheric water harvesting, passive humidity management, and protective packaging[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(7): 10084-10097.
- [37] ZHANG C, XIAO P, ZHANG D, *et al.* Wet-spinning knittable hygroscopic organogel fibers toward moisture-capture-enabled multifunctional devices[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 5(2): 588-602.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] KALLENBERGER P A, FRÖBA M. Water harvesting from air with a hygroscopic salt in a hydrogel-derived matrix[J]. *Communications Chemistry*, 2018, 1(1): 28.
- [42] HAN X F, ZHONG L S, ZHANG L, *et al.* Efficient atmospheric water harvesting of superhydrophilic photothermic nanocapsule[J].

- Small, 2023, 19(47): 2303358.
- [43] UDDIN M N, RAB M F, ISLAM A, *et al.* Nanostructured hybrid hydrogels for solar-driven clean water harvesting from the atmosphere[J]. *Materials*, 2022, 15(21): 7538.
- [44] MAITY D, TEIXEIRA A P, FUSSENEGGER M. Hydratable core-shell polymer networks for atmospheric water harvesting powered by sunlight[J]. *Small*, 2023, 19(47): e2301427.
- [45] XIA M, CAI D, FENG J B, *et al.* Biomimetic hygroscopic fibrous membrane with hierarchically porous structure for rapid atmospheric water harvesting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(26): 2214813.
- [46] LU H Y, SHI W, ZHANG J H, *et al.* Tailoring the desorption behavior of hygroscopic gels for atmospheric water harvesting in arid climates[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(37): 2205344.
- [47] ZHANG Y F, WU L, WANG X F, *et al.* Super hygroscopic nanofibrous membrane-based moisture pump for solar-driven indoor dehumidification[J]. *Nature communications*, 2020, 11(1): 3302.
- [48] ZHANG X P, YANG J C, BORAYEK R, *et al.* Super-hygroscopic film for wearables with dual functions of expediting sweat evaporation and energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2020, 75: 104873.
- [49] SUN J M, AN B, ZHANG K, *et al.* Moisture-indicating cellulose aerogels for multiple atmospheric water harvesting cycles driven by solar energy[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(43): 24650-24660.
- [50] LUO Y H, WANG C, MA S H, *et al.* Humidity reduction by using hetero-layered metal-organic framework nanosheet composites as hygroscopic materials[J]. *Environmental Science: Nano*, 2021, 8(12): 3665-3672.
- [51] XU J X, LI T X, CHAO J W, *et al.* Efficient solar-driven water harvesting from arid air with metal-organic frameworks modified by hygroscopic salt[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(13): 5202-5210.
- [52] LUO F, LIAO T T, LIANG X H, *et al.* Two-linker MOFs-based glass fiber paper monolithic adsorbent for atmospheric water harvesting in arid climates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373: 133838.
- [53] 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.
- [54] LU W H, DING T P, WANG X Q, *et al.* Anion-cation heterostructured hydrogels for all-weather responsive electricity and water harvesting from atmospheric air[J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107892.
- [55] TAO G L, CHEN X, WANG Y, *et al.* Metal organic frameworks for atmospheric water harvesting in desert environments: A comparative study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138296.
- [56] SRIVASTAVA S, YADAV A. Extraction of water particles from atmospheric air through a Scheffler reflector using different solid desiccants[J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2018, 41(12): 1357-1369.
- [57] EJEIAN M, WANG R Z. Adsorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Joule*, 2021, 5(7): 1678-1703.
- [58] 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.
- [59] LI J, ZHANG W, JI W H, *et al.* Near infrared photothermal conversion materials: Mechanism, preparation, and photothermal cancer therapy applications[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(38): 7909-7926.
- [60] LI J Y (李吉焱), LIU M C (刘美辰), JING Y J (景艳菊), *et al.* Solar interface evaporation collaborative power generation: Progress and prospect[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(10): 1945-1952, 1963.
- [61] HU X Z, XU W C, ZHOU L, *et al.* Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one sun[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(5): 1604031.
- [62] LI C F, WANG J Y, DENG C H, *et al.* Protocol for atmospheric water harvesting using *in situ* polymerization honeycomb hygroscopic polymers[J]. *STAR Protocols*, 2022, 3(4): 101780.
- [63] MIN X Z, WU Z, WEI T Q, *et al.* High-yield atmospheric water harvesting device with integrated heating/cooling enabled by thermally tailored hydrogel sorbent[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(7): 3147-3153.
- [64] WANG X Y, LI X Q, LIU G L, *et al.* An interfacial solar heating assisted liquid sorbent atmospheric water generator[J]. *Angewandte Chemie*, 2019, 131(35): 12182-12186.
- [65] ZHANG Z B, WANG Y J, LI Z, *et al.* Sustainable hierarchical-pored paas-nipaaam hydrogel with core-shell structure tailored for highly efficient atmospheric water harvesting[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(49): 55295-55306.
- [66] DENG F F, WANG C X, XIANG C J, *et al.* Bioinspired topological design of super hygroscopic complex for cost-effective atmospheric water harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106642.
- [67] ZHANG S T, ZHENG M B, TANG Y J, *et al.* Understanding synthesis-structure-performance correlations of nanoarchitected activated carbons for electrochemical applications and carbon capture[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(40): 2204714.
- [68] 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.
- [69] KANDEAL A W, JOSEPH A, ELSHARKAWY M, *et al.* Research progress on recent technologies of water harvesting from atmospheric air: A detailed review[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 52: 102000.
- [70] LI W, TAO C C, TANG J P, *et al.* Cu-modified La<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/TiO<sub>2</sub> composite materials: Preparation, characterization and photothermal properties[J]. *Dalton Transactions*, 2022, 51(32): 12192-12197.
- [71] SHI L, SHI Y, LI R Y, *et al.* SiC-C composite as a highly stable and easily regenerable photothermal material for practical water evaporation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(7): 8192-8200.
- [72] YANG J L, PANG Y S, HUANG W X, *et al.* Functionalized graphene enables highly efficient solar thermal steam generation[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(6): 5510-5518.
- [73] LI K R, GAO M M, LI Z P, *et al.* Multi-interface engineering of solar evaporation devices *via* scalable, synchronous thermal shrinkage and foaming[J]. *Nano Energy*, 2020, 74: 104875.
- [74] FEYEREISEN M W, FELLER D, DIXON D A. Hydrogen bond energy of the water dimer[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(8): 2993-2997.
- [75] ZHANG Z H, LI X M, YIN J, *et al.* Emerging hydrovoltaic technology[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(12): 1109-1119.
- [76] GUO Y H, BAE J, FANG Z W, *et al.* Hydrogels and hydrogel-derived materials for energy and water sustainability[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(15): 7642-7707.
- [77] ZHAO X, MENG X T, ZOU H Q, *et al.* Nano-enabled solar driven-interfacial evaporation: Advanced design and opportunities[J]. *Nano Research*, 2023, 16(5): 6015-6038.
- [78] LI J L, WANG X Y, LIN Z H, *et al.* Over 10 kg/(m<sup>2</sup>·h) evaporation rate enabled by a 3D interconnected porous carbon foam[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 928-937.
- [79] LIANG X C, ZHANG X J, HUANG Q C, *et al.* Simple preparation of external-shape and internal-channel size adjustable porous hydrogels by fermentation for efficient solar interfacial evaporation[J]. *Solar Energy*, 2020, 208: 778-786.
- [80] XU J X, LI T X, YAN T S, *et al.* Ultrahigh solar-driven atmospheric water production enabled by scalable rapid-cycling water harvester with vertically aligned nanocomposite sorbent[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(11): 5979-5994.