

基于吸附原理的高效湿空气集水技术研究与应用

马宇轩¹, 汪月华¹, 王玉莹², 刘峻彤¹, 宋海¹, 何扬扬¹, 李娟娟¹, 夏登辉¹, 雍兴跃^{1*}

¹北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室, 北京

²北京空间飞行器总体设计部航天器热控全国重点实验室, 北京

收稿日期: 2024年9月24日; 录用日期: 2024年10月11日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

水是人类赖以生存和发展不可缺少的最重要的物质资源之一。随着工业的发展和世界人口的增长, 人类社会对淡水量的需求逐渐上升。然而, 在世界上, 淡水资源不仅缺乏而且分布不均。长期以来, 人们一直面临着淡水资源缺乏供给的挑战。由此, 人们对大气集水技术产生了极大的兴趣, 并付诸实践, 取得了大气集水技术的进步与发展。本文对空气集水技术的分类、原理及其应用进行了综述, 并对比了不同集水技术的优缺点, 重点地阐述基于吸附原理的空气集水技术的研究及其应用。最后, 提出了吸附集水技术代替空调除湿和高湿度海洋环境中收集淡水的期望。

关键词

空气集水, 分类与原理, 空调除湿, 吸附集水, 吸水剂

Research and Application of the High Effective Moist Atmospheric Water Harvesting Technologies Based on Absorption Principle

Yuxuan Ma¹, Yuehua Wang¹, Yuying Wang², Juntong Liu¹, Hai Song¹, Yangyang He¹, Juanjuan Li¹, Denghui Xia¹, Xingyue Yong^{1*}

¹State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing

²National Key Laboratory of Spacecraft Thermal Control, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing

Received: Sep. 24th, 2024; accepted: Oct. 11th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

Water is one of the vital material resources that support human survival and development. With the

作者简介: 马宇轩(2004-), 男, 双培生, 应用化学专业, Email: 1325211015@qq.com

*通讯作者 Email: yongxy@mail.buct.edu.cn

文章引用: 马宇轩, 汪月华, 王玉莹, 刘峻彤, 宋海, 何扬扬, 李娟娟, 夏登辉, 雍兴跃. 基于吸附原理的高效湿空气集水技术研究与应用[J]. 水资源研究, 2024, 13(6): 651-659. DOI: 10.12677/jwrr.2024.136073

development of industries and the growth of the global population, human society demand for fresh water has been increasing steadily. However, freshwater resources are insufficient and unevenly distributed worldwide, and humanity has consistently faced the challenge of freshwater scarcity. Therefore, it is interesting in atmospheric water harvesting technologies, which have been put into practice and have made significant progress and development. This paper reviews the classification, principles, and applications of atmospheric water harvesting technologies, compares atmospheric water harvesting technologies based on the absorption principle, and mainly introduces their applications. Finally, it is proposed that absorption-based water harvesting technologies could replace air conditioning dehumidification technology, and that this kind of technology could be used to harvest fresh water in ocean atmospheric environments with high humidity, such as the South China Sea.

Keywords

Harvesting Water from Atmosphere, Classification & Principles, Air Conditioning Dehumidification, Based-Absorption Harvesting Water, Water Absorbents

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水是万物之源，是人类赖以生存和发展中不可缺少的最重要的物质资源之一。据调查，虽然在地球上的储量达 3.5×10^8 亿 m^3 ，但是在地球上的淡水却仅占 2.5% 左右[1] [2]。随着工业的发展和世界人口的增长，人类社会对淡水量的需求逐渐上升。而今，工、农业及城市用水较 20 世纪初分别上升了 26 倍、5 倍及 18 倍。因此，2002 年 8 月，在联合国召开的可持续发展峰会上，提出将水危机列为未来人类面临的严重挑战之一。据报道，超过 40 亿人都面临水资源短缺问题[3]。因此，寻找替代水资源并充分利用，则是全球生存的迫切需要。

为了缓解用水危机，各个国家都开始探索、寻求解决淡水资源匮乏的方法。其中，大气集水技术引起了人们的极大兴趣。所谓大气集水(AWH)技术，则是通过从空气中获取水分来产生淡水的方法，可以在没有集中设施、地理和水文限制的情况下实现可持续的水运输[4]。众所周知，在自然界中，空气就是一个巨大的天然水库，可以汇聚成云，形成降水天气促进地球上的水循环。在大气中的水蒸气则是一种可再生的淡水资源，估计含有约 1.29×10^{13} m^3 的水，这为从大气中提取水提供了可能性。在大气中，水主要以云、雾和水蒸汽的形式存在，是丰富的替代水资源。然而，在水的利用方面，往往被大多数人所忽视[5]。

本文将对空气集水技术的分类、原理及其应用进行简要的综述。在此基础上，将进一步阐述基于吸附原理的空气集水技术的研究及其应用前景，提出了吸附集水技术代替空调除湿和在高湿度海洋环境中收集淡水的期望。

2. 空气集水技术分类与工作原理

2.1. 集水技术分类

空气集水是从环境湿空气中提取、获取水的过程。一方面，利用空气集水技术收集水，不仅可以起到补充淡水资源的作用，而且该技术对环境不会产生负面影响；另一方面，空气集水技术可以在没有任何传统水源和大型的基础设施的情况下发挥作用。现有的空气集水技术主要分为冷凝技术、吸附技术和其他收集技术等三大类，如图 1 所示[2] [6]。

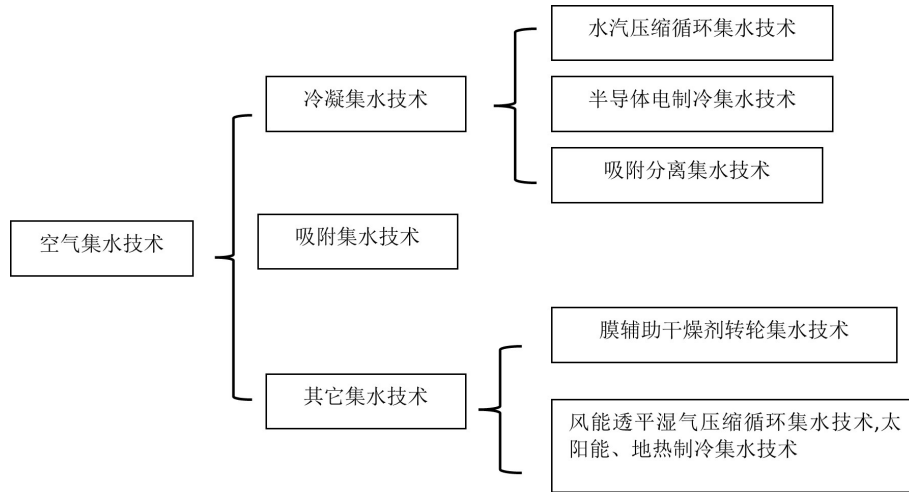


图 1. 空气集水技术分类

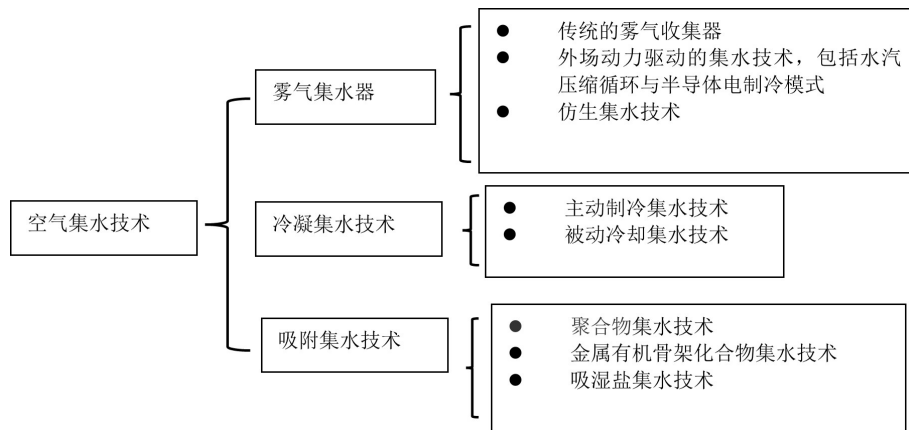


图 2. 不同的空气集水技术

如图 1 所示，在冷凝技术中，进一步分为水汽压缩循环、热电冷却和吸附式制冷机技术。其中，水汽压缩循环技术可以应用于湿气集水和空调除湿。也有将现有的空气集水技术分为雾气集水器、冷凝技术和基于吸附原理的集水技术[4]。总体来讲，可以将不同的集水技术分为主动式和被动式集水技术两个大类[5]。

2.2. 集水技术原理

2.2.1. 雾气集水技术

雾气集水技术的原理是利用网状材料捕捉空气中的雾滴，通过重力作用收集水滴。雾气集水技术是目前国际上最常用的方法，技术成熟、成本低、易安装、对环境友好。但是，存在着收集效率低、网孔易堵塞、受地理环境限制，只能运用在空气中湿度较大的地区等缺点。

目前，主要有三种雾气集水技术，如图 2 所示。大多数传统的雾气集水器只能捕获流动雾中的一部分液滴，收集效率较低。这是因为有些液滴会穿过网格而不会碰到网格纤维，有些液滴可能会与网格纤维发生弹性碰撞，回到气流中。如今，对传统的雾气集水技术的大部分改进工作都主要集中在对传统雾气集水器的网格拓扑的研究。然而，为了解决风速、大气湿度、液滴大小和其他地理环境因素的限制，在网格表面的功能提升和制备具有持久功能表面等方面的研究还不够深入。

1) 传统的雾气集水技术

传统集雾技术是通过将网格材料暴露在雾气团中实现。一些雾滴通过撞击沉积在网格材料上，集积形成更大的水滴，这些水滴被重力收集并流入排水管，最终进入水箱或分配系统。传统的雾气集水技术装置成本低、安装方便且技术成熟。不足的是集水效率低，铺集网眼容易堵塞，应用受地理环境限制。此外，对网格表面功能化的研究亟待深入。

2) 外场驱动的雾气集水技术

所谓外场驱动的雾气集水技术，即采用静电雾气集水器，通过外场静电作用，主动地控制液滴进行集水。这种方法相较于传统雾气集水器，提高了雾气集水效率和能量利用效率，降低了雾气集水器的建设成本，提高气动效率。可以想见，如果使用导线阵列而不是网格时，雾滴可以穿过导线，降低效率。同样，当采用静电方法收集网格上的雾滴时，网格的低脱落率和堵塞也会降低系统的效率。研究表明[7]，如果将传统的网格和电驱动技术结合起来，可以最大限度地减少雾滴脱落率和单个电线周围液滴的空气动力学偏差，使得集成雾气集水总效率达到 84%，高于单独技术使用时的效率。与传统的雾气集水器相比，集成技术的能源效率可以提高 100 倍。缺点是技术比较创新，尚不够成熟，内部流动的驱动机制仍有待进一步研究。

3) 仿生雾气集水技术

这种仿生集水技术则是模仿在自然界中生物(比如沙漠甲虫、蜘蛛丝、仙人掌)的特殊结构，合成基于光刻、不同润湿性材料的重组、喷墨打印、激光烧蚀等方法制备的高效集水材料结构。采用这种仿生学方式，使用具有亲水-疏水交替图案的表面、模仿蜘蛛丝和仙人掌结构的微纳米复合材料等，可以在高湿环境中获得超高的单位质量或单位面积的集水效率。虽然制造过程复杂，成本高，寿命短，仿生材料限制了性能及实际应用。然而，这种仍具有弹性优异、耐腐蚀和具生物相容性的优势。

2.2.2. 冷凝集水技术

冷凝技术是通过使用包括水汽压缩循环冷凝(VCR)、半导体电冷却(TEC)、吸附/吸收制冷、电磁制冷等技术在内的装置。利用这些装置的目的在于降低空气温度至露点以下，使水蒸气冷凝成液态水。这种技术相对成熟、适用于高湿度环境、产水量大。相比于其他集水技术，其能耗高、成本高、可能产生环境污染，不适合低湿度环境，更加容易受环境因素的影响，是一种主动式集水模式[5]。

2.2.3. 吸附集水技术

对于吸附集水，即使用基于硅胶、沸石、金属有机骨架(MOFs)、高分子凝胶等吸附材料加工的集水装置。首先，利用吸附材料通过物理或化学作用捕获空气中的水汽。然后，通过加热或减压等方式，使水汽脱附并进行冷凝收集，从而得到纯净的水。这种方法同样是一种主动式集水模式，在低湿度环境下表现良好，可以调节吸附材料的吸附、解吸行为[5]。同时，吸附材料选择多种多样，系统灵活性也高。局限之处在于过度依赖吸附材料性能、研究仍处于初级阶段、难以商业化。此外，再生能耗高，部分材料成本较高，长期稳定性需验证，是目前主要研究热点。目前，吸附集水技术常用的吸附剂材料主要有三种类型——沸石类、金属有机框架(MOFs)、吸湿盐复合材料等。在此基础上，通过不同的化学修饰方式，可以进一步提升吸附剂材料的吸水性能。

2.2.4. 露水收集技术

露水是指当空气温度降到露点温度以下时，在物体表面上凝结的水。由于露水收集技术不受气候条件的影响，被认为是一种可用于替代现有其他技术的新手段，向对环境最敏感的地区提供水。常见的露水收集装置有水汽压缩冷凝器、半导体电制冷器(TEC)、辐射冷却冷凝器等。水汽压缩冷凝器则是通过制冷循环降低空气温度，热电制冷器则利用热电效应在特定结点上产生温度差，从而实现冷却效果。辐射冷却可以降低表面温度低于露点，导致大气中水蒸气的凝结和产生可收获的水。这种技术虽然成熟，产水量大，适用于高湿度环境，但是能耗高，依赖外部电源，对环境湿度要求较高，冷却设备成本高。

2.3. 四种空气集水技术的比较

以下对于上述的空气集水技术进行对比分析，结果如表 1 所列[4]。

表 1. 空气集水技术的比较

集水技术	主要装置	优势	缺点	
雾 气 集 水 技 术	传统雾气集水器	标准雾气集水器，大型雾气集水器，“埃菲尔”3D 雾气集水器、标准的全尺寸雾气集水器、“竖琴”和“对角竖琴”雾气集水器	成本低、安装方便且技术成熟	集水效率低。网眼容易堵塞，对网格表面功能化的研究还不够。应用受地理环境限制
	外场驱动雾气集水技术	静电雾气集水器	相较于传统雾气集水器，提高了集雾效率和能量利用效率。降低建设成本，提高气动效率	内部流动的驱动机制仍有待进一步研究
	仿生雾气集水技术	具有亲水-疏水交替图案的表面、模仿蜘蛛丝和仙人掌结构的微纳米复合材料等	在高湿环境中具有超高的单位质量或单位面积的集水效率，具有优异的弹性、耐腐蚀和生物相容性	制造过程复杂，成本高，寿命短，仿生材料限制了它们的性能及实际应用
冷凝集水技术	蒸汽压缩循环(VCR)、热电制冷(TEC)、吸附/吸收制冷、电磁制冷等系统	技术相对成熟、适用于高湿度环境、产水量大	能耗高、成本高、可能产生环境污染，不适合低湿度环境	
吸 附 集 水 技 术	硅胶与沸石吸附剂	硅胶、沸石	高吸附能力，适合高湿度环境，成本低	再生能耗高，低湿度下性能受限，吸附容量有限
	金属有机框架	MOF 层、太阳能集热器(用于再生)、冷凝收集系统	能在低湿度下有效工作，具有高吸附容量和选择性	规模合成成本高，长期稳定性待验证
	吸湿盐复合材料	复合吸湿材料层、加热系统、收集系统	吸湿能力强，有较高的吸附容量，再生过程可通过太阳能等可再生能源驱动	吸湿盐可能结块影响性能，存在溶解和腐蚀问题
	智能响应性水凝胶	智能响应性水凝胶层、温控系统、收集系统	能在低能耗下实现水的收集和释放	材料成本和长期稳定性不足
露水收集技术	蒸汽压缩冷凝器、热电制冷器(TEC)、辐射冷却冷凝器等	技术成熟，产水量大，适用于高湿度环境	能耗高，依赖外部电源，对环境湿度要求较高，冷却设备成本高	

表 1 所列空气集水技术的优缺点可以看出，虽然雾气集水系统已经发展得很成熟且成本效益高，但是整个雾气捕获、液滴形成、液滴输送和收集分离的过程难持续进行，产水效率较低。对于主动冷凝集水技术，在通常情况下，需要能量输入保证集水装置的连续运行，可以用于实际工业生产过程。被动冷凝集水技术虽然不需要能量输入，但是受环境温度、湿度、风速、风向和水汽量的影响。因此，不适合大规模地应用。

尽管基于吸附原理的集水技术可以自动从环境中捕获水分，适用于达不到饱和湿度的大气环境，可以在较宽湿度范围内的大气环境中应用，并且具有较大的从空气中集水的能力。然而，在吸水剂吸附水汽和释放被吸附水的过程，都会有着不同的能量和温度要求。例如，具有强亲水性的吸附剂不可避免地会使收集的水难以释放，并且需要较大的外部能量输入进行水的解吸。在吸附系统的运行过程中，吸附剂的泄漏可能会腐蚀集水设备，污染收集的清洁水。

然而，比较而言，基于吸附原理的空气集水技术具有较高集水效率、合理产水量，而建造、运行等成本合理等优势。虽然吸水剂的再生循环需要消耗一定的能源，但是可以利用诸如太阳能这些低级能源和一些废热。为此，为了满足一些特殊的安全饮水需求，吸附集水技术仍然是一种潜在的解决方案，同时以研制、应用高性能吸水剂材料为关键技术的集成集水技术，仍然是新一代空气集水技术装置的研究趋势之一[8]-[11]。

3. 吸附集水技术的应用与前景

吸附集水技术是指用固体或液体吸附剂，先吸附空气中的水汽，再通过解吸、冷凝至露点形成液态水[12]。这种集水技术即使在湿度较低的环境中也可以用于取水，其环境适用性较好。当然，这项技术的关键材料即是吸附剂。下面介绍常见的用于吸附集水技术的吸附剂材料。

3.1. 吸附剂材料

3.1.1. 沸石类

沸石即硅酸铝钾盐，其主要成分为铝硅酸盐矿物，具有架状结构，耐高温，成本较低，适合高湿度环境。但是，在低湿度环境中，其吸附能力较低，并且存在着导热性较差，再生能耗高，吸附容量受限的缺点。尽管如此，对于人造沸石，对其吸附能力较低，导热性较差的缺点进行了改善，是目前唯一的高温吸附剂。即使在温度 100℃ 和湿度 1.3% 的条件下，其吸附能力也能达到 15%，是活性氧化铝的 10 倍，是硅胶的 10 倍以上[13]。

3.1.2. 吸湿盐复合材料

吸湿盐，一种调节空气湿度的盐类，可以吸收周围的水分将其保留在晶格中。常见的吸湿盐包括氯化钙，硫酸钙，氯化钾，氯化钠等。一般地，将吸湿盐如氯化钙嵌入多孔基质，如硅胶、MOFs、聚合物凝胶中，就可以提高吸湿效率和循环稳定性。复合吸湿材料通过加热就可以脱水再生而循环应用。研究表明[14]，吸湿性盐的吸附性能是环境相对湿度的线性函数，其吸湿能力强，有较高的吸附容量。再生过程可通过太阳能等可再生能源驱动，在干旱地区具有较强的竞争力，适用于太阳能空气集水系统。

3.1.3. 金属有机框架(MOFs)

金属有机骨架(MOFs)材料是由无机团簇(金属离子)和有机配体(离子之间的键)通过强配位键自组装，形成的一类具有周期性网络结构的晶态多孔材料，具有高度的孔隙度、可调控的孔径大小、高比表面积和发达的表面化学反应性。在过去的几十年里，多达 20,000 种 MOFs 得到了合成。利用 MOFs 材料的高孔隙率和可调控的表面性质，通过物理吸附和化学吸附，可以完成对水汽的捕获，特别是适用于低湿度环境中的空气集水应用[9]。然而，遗憾的是金属有机骨架(MOFs)材料存在着在吸水后的稳定性较差，导致循环利用率不高的缺点[13]。

3.1.4. 智能响应性水凝胶

利用智能响应性水凝胶，可以从大气中捕获水并将其储存在聚合物网络中。水凝胶具有可调的分子结构，如亲水性官能团和离子位点，在吸水过程中会膨胀，不受其原始孔隙体积的限制。这些特性促成了它们的超强吸水性。鉴于温度和风速等外部因素的影响，可能会导致水凝胶在循环过程中亲水性盐的损失。为此，开发了一种光响应性多层孔核壳的水凝胶。该水凝胶由具有开放孔结构的壳型聚丙烯酸钠(PAAS)水凝胶和具有大孔径的核型热敏型聚 n-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm)水凝胶组成。核心层和壳层之间的协同作用，加速了水的捕获、运输和储存，实现了连续和高容量的水吸附，并且利用温度响应性聚合物(如 PNIPAM)的相变特性，实现了在低能耗条件下的水汽吸收和液态水的释放[4]。

除了上述几种吸附剂外，还有碳基化合物和生物基吸水剂。对于碳基化合物吸水剂，常见的有活性炭，既可以作为吸水干燥剂，也可以作为净化剂。活性炭主要由石墨微晶组成，其微晶结构的层间距在 0.34~0.35 nm 之间，微孔比表面积占活性炭比表面积的 95% 以上[6]，其吸附能力主要与孔隙大小和结构有关。比较起来，活性炭易饱和，吸水能力有限。对于生物基吸水剂，优势在于具有生物降解能力，对环境友好。常见的生物基吸水剂，有椰子壳和榴莲壳纤维。与沸石和硅胶比较，虽然其吸水集水能力较低，但是解吸释放水的能量需求较

低。此外，生物基干燥剂总体较为不稳定，存在着易分解等缺陷[14]。

3.2. 吸附集水技术与装置

一般地，在吸附剂的吸附作用下，大气中的水汽被吸附到吸附剂表面，逐渐达到饱和状态，期间释放出一定的热量。当对吸水饱和的吸附剂进行解析再生时，需要加热，附着在吸附剂表面的水汽经加热得以水蒸气的形式释放出来。在吸附剂解析再生过程中，需要加热，输入热量。最后，利用冷凝器对释放出来的水蒸气进行冷凝冷却，得到纯净水。如图 2 所示[9]。

从图 3(a)所示可知，左侧是空气吸水装置，潮湿空气从吸水塔底端进入吸水塔，水汽吸附在吸水剂表面，气相转化为液相，这是一个放热过程。右侧是吸水剂解吸再生装置系统，即向吸水饱和的吸水剂加热，吸附水解吸为水蒸汽。水蒸汽进入冷凝器冷凝得到纯净水。不凝气再次从饱和吸水塔底端进行吸水塔吸水剂填料层，进一步利用其预热。图 3(b)所示为阶梯吸附集水装置系统。在这个集水系统中，同样包括了吸水塔再生和冷凝产水两个部分。其中，可以将左侧吸水塔产生冷凝热量用于右侧再生塔的加热解吸脱水。由此可见，基于吸附法集水技术装置系统，通过优化设计，同样可以达到高效、低能耗、稳定运行和可再生性的目标。

由图 3 可知，吸水剂在吸收空气中的水汽时，水汽转变为水，即气相转化为液相，是一个放热过程。如果吸水剂本身具有较大的热容量，那么在吸收水汽的过程中，吸水剂本身温度上升缓慢且有限，这将有益于水汽的吸收。其二，吸水剂本身具有较高的吸水率，即载水能力，也是必须的，且越大越好。这样，可以提升吸水剂的载水能力，减少吸水剂的加热再生循环的次数，有利于节能降耗、减小碳排放。当吸水剂吸附饱和后，就要对吸水剂加热解吸，释放出水蒸汽。最后，水蒸汽通过冷凝得到洁净水。基于此，理论上需要吸水剂的吸收水

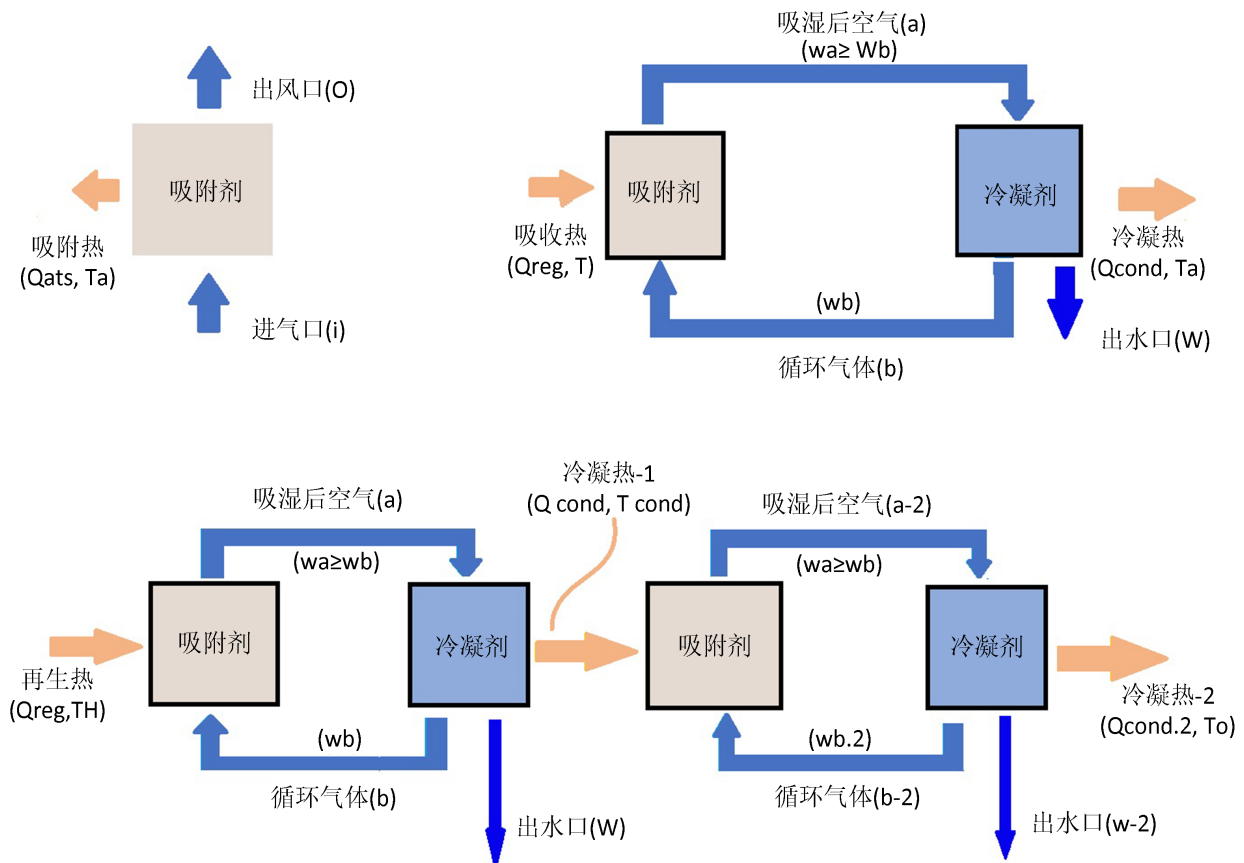


图 3. 吸附集水装置系统示意图

最好为物理吸附，使得解吸温度较低。在这种情况下，吸水剂解吸水的能耗降低，同样有益于节能降耗和减小碳排放。

3.3. 吸水剂的发展与吸附集水技术的应用前景

如上所述，作为一种良好的吸水剂，不但吸水性能好、载水能力大，而且要求解吸温度低、本身具有一定的蓄热能力。此外，需要具有良好的机械抗压强度，循环耐久性。基于此，近年来，大量研究将吸湿性盐颗粒浸渍到多孔材料中制造复合集水材料，并将其用于集水材料冷却、吸附冷却和热泵系统中[3]。这些复合集水材料的吸水能力都高于组成复合材料的各纯组分。多孔材料的孔隙结构用作吸湿性盐的支撑基质，使得吸湿盐与空气接触的表面积增加，体积膨胀和结块的速度减慢，从而使水的吸收率得到了提高[15]。这样，既解决了吸湿性盐吸湿后潮解导致吸湿能力下降的问题，又解决了多孔材料吸附容量低的问题，从而实现了 $1 + 1 > 2$ 的效果[16][17]。

期间，人们重点地关注到了利用一些价格低廉、生态友好的天然矿物，比如堇青石、蒙脱土、膨润土等原材料，加工制备成为具有多孔结构和高比表面积的多孔陶瓷[13]。这种多孔陶瓷内部有大量彼此相通的气孔，具有体积密度小、孔隙率大、比表面积大、力学性能好、耐高温、耐腐蚀、高的化学稳定及尺寸稳定性特点。最后，浸渍吸湿盐，就成为复合吸水材料。这样，不但克服多孔陶瓷吸湿性能差的缺点，而且发挥了多孔陶瓷载水量大、具有一定热容量，强度高等特点。

事实上，吸附集水技术有着远大的前景。一方面，在我国南海，鉴于淡水缺乏，那么基于吸附集水技术的集成应用，利用太阳能作为集水系统动力电源和吸水剂再生能源，采集淡水，将具有潜在应用前景。目前，随着吸附集水技术研发的进步，相信在不断地创新发展之下，吸附集水技术能有更进一步的发展。可以想见，吸附集水技术在南海地区用于采集淡水，将大有应用前途。另一方面，基于吸附集水技术是利用吸水剂将空气中的水汽吸附，这样就可以降低空气的湿度。为此，吸附集水技术及装置可以代替现有的制冷除湿技术及空调除湿装置，用于潮湿地区局域空间的空气质量控制，特别是用于包括船舶舱室、飞行器内部的空气质量控制，将具有更为广阔的应用前景。

4. 结论与前景

水资源短缺是一个普遍存在的全球性问题。鉴于大气是一个巨大的可用水源，本文主要对当前世界上所用空气集水技术进行了总结。但是，所有这些技术目前都面临着一些挑战。不管如何，不同技术和设备的集成系统将是大气集水的未来趋势。与此同时，不同技术的集成应用将有助于我们克服地理、气候和经济上的限制，并为安全用水提供一定的保障。此外，将空气集水技术拓展应用于海洋环境中的淡水制备、局域空间的空气湿度控制，将为集水技术的应用开创新的天地。

参考文献

- [1] NIKKHAH, H., AZMI, W. M. B. W., NIKKHAH, A., NAJAFI, A. M., BABAEI, M. M., FEN, C. S., et al. A comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies: From thermodynamic concepts to mechanism and process development. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103728. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103728>
- [2] KANDEAL, A. W., JOSEPH, A., ELSHARKAWY, M., ELKADEEM, M. R., HAMADA, M. A., KHALIL, A., et al. Research progress on recent technologies of water harvesting from atmospheric air: A detailed review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 52: 102000. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102000>
- [3] CHEN, Z., SONG, S., MA, B., LI, Y., SHAO, Y., SHI, J., et al. Recent progress on sorption/desorption-based atmospheric water harvesting powered by solar energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111233. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111233>
- [4] WANG, M., LIU, E., JIN, T., ZAFAR, S., MEI, X., FAUCONNIER, M., et al. Towards a better understanding of atmospheric water harvesting (AWH) technology. *Water Research*, 2024, 250: 121052. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121052>

- [5] ZENG, W., YOU, T. and WU, W. Passive atmospheric water harvesting: Materials, devices, and perspectives. *Nano Energy*, 2024, 125: 109572. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109572>
- [6] TU, R., HWANG, Y. Reviews of atmospheric water harvesting technologies. *Energy*, 2020, 201: 117630. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117630>
- [7] SIDDIQUI, M. A., AZAM, M. A., KHAN, M. M., IQBAL, S., KHAN, M. U. and RAFFAT, Y. Current trends on extraction of water from air: An alternative solution to water supply. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 20: 1053-1080. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03965-8>
- [8] LI, R., SHI, Y., WU, M., HONG, S. and WANG, P. Improving atmospheric water production yield: Enabling multiple water harvesting cycles with nano sorbent. *Nano Energy*, 2020, 67: 104255. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104255>
- [9] KIM, H., RAO, S. R., LAPOTIN, A., LEE, S. and WANG, E. N. Thermodynamic analysis and optimization of adsorption-based atmospheric water harvesting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120253. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120253>
- [10] CHAITANYA, B., BAHADUR, V., THAKUR, A. D. and RAJ, R. Biomass-gasification-based atmospheric water harvesting in INDIA. *Energy*, 2018, 165: 610-621. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.183>
- [11] KWAN, T. H., YUAN, S., SHEN, Y. and PEI, G. Comparative meta-analysis of desalination and atmospheric water harvesting technologies based on the minimum energy of separation. *Energy Reports*, 2022, 8: 10072-10087. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.175>
- [12] 陶国林, 汪毅, 刘志君, 等. 沙漠/干旱地区 MOFs 吸附式空气取水技术[J]. *陆军工程大学学报*, 2022, 1(4): 87-92.
- [13] 李娟娟. 多孔吸水陶瓷的制备及其应用研究[M]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- [14] 李鑫, 李忠, 韦利飞, 等. 除湿材料研究进展[J]. *化工进展*, 2004, 23(8): 811-815.
- [15] TU, Y., WANG, R., ZHANG, Y. and WANG, J. Progress and expectation of atmospheric water harvesting. *Joule*, 2018, 2(8): 1452-1475. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015>
- [16] ZHENG, X., GE, T. S., HU, L. M. and WANG, R. Z. Development and characterization of mesoporous silicate-licl composite desiccants for solid desiccant cooling systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(11): 2966-2973. <https://doi.org/10.1021/ie504948j>
- [17] ARISTOV, Y. I. New family of solid sorbents for adsorptive cooling: Material scientist approach. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 16: 63-72. <https://doi.org/10.1134/s1810232807020026>