基于三维圆锥设计的空气取水性能强化

邓芳芳, 王晨曦, 陈芷荟, 王如竹*

上海交通大学机械与动力工程学院制冷与低温研究所, 上海 200240

* 联系人, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn

2022-01-06 收稿, 2022-02-18 修回, 2022-02-22 接受, 2022-02-23 网络版发表

上海市科技兴农项目(2019-02-08-00-08-F01124)资助

摘要 吸附剂材料和系统结构是影响吸附式空气取水效果的两大关键因素。目前, 已开发的水凝胶、金属有机框架材料以及高吸湿复合物等吸附剂已具有非常优越的取水潜力, 而传统的依靠材料堆积的系统结构, 导致整体的吸附动力学特性较差, 制约了系统的取水性能。为了解决这一问题, 本文采用活性炭纤维浸渍氯化锂作为吸附剂, 通过三维圆锥形结构设计, 在不牺牲材料性能的前提下, 优化了系统的传热传质性能, 进而在吸附和解吸方面分别实现了1.6和1.3倍的性能提升。

关键词 圆锥, 空气取水, 活性炭纤维, 氯化锂, 吸附

随着人口日益激增、全球气候变暖、环境污染等问题的出现, 大自然的水循环失衡, 有限的淡水资源已不足以支撑人类的用水需求^[1]。为了解决水资源短缺的问题, 人类迫切需要利用可持续发展的科技策略, 人为地“干预”水循环过程, 从而获取或富集可用的淡水。例如, 近年来发展迅速的海水淡化技术, 通过蒸馏、光热蒸发等手段从海水中提取人类所需要的淡水^[2,3]; 污水回收技术, 采用提纯、蒸馏、蒸发等手段对生活、工业用水进行处理, 得到可供城市利用的洁净水^[4]; 而新兴发展的空气取水技术, 通过富集大气中的水蒸气并将之冷凝收集, 从而得到干净的饮用水^[5]。

大气中的水蒸气约占全球湖泊水的10%, 可视为一个巨大的“清洁水库”。空气取水以大气为源, 不受地理限制, 比海水淡化、污水处理等技术更适合用于偏远离网的干旱地区。空气取水主要分为基于制冷的冷凝取水、高湿度下的雾捕集、露水收集以及基于吸附的空气取水。其中, 基于制冷的冷凝取水需要把湿空气降温至其露点温度, 在中低湿度地区的能耗很高, 效率很低, 不太适用; 雾捕集、露水收集通过捕捉空气中的小

水雾或小水滴, 只能用于高湿度地区^[6]; 基于吸附的空气取水, 可以在全湿度范围富集水蒸气, 然后利用太阳能驱动解吸, 再冷凝获取淡水, 非常适用于解决干旱地区的缺水问题。

目前, 硅胶、沸石等传统吸附剂, 水凝胶、金属有机框架材料(metal-organic framework, MOF)等新型吸附剂, 基质填盐等复合吸附剂, 使空气取水在材料层面实现了全范围的优越性能^[7-9]。而在系统层面, 空气取水遇到了重大瓶颈, 器件的传热传质问题难以攻破, 最终的系统取水性能远低于单位质量的材料性能。材料用于器件中时, 为了获得较大的取水量, 不可避免地需要通过堆积、叠加等手段加大材料用量。而厚重的吸附剂会恶化系统的传热传质条件, 使材料的吸附动力学特性大幅下降, 在有限的时间无法充分发挥材料的吸附-解吸性能, 从而影响整体的取水效果^[10]。

为了解决这一问题, 本文采用具有优越吸附-解吸特性的活性炭纤维浸渍氯化锂(lithium chloride, LiCl)作为吸附剂, 设计了一种三维圆锥形吸附体结构。该圆锥状配置在增加有限空间的材料用量的同时, 不牺牲

引用格式: 邓芳芳, 王晨曦, 陈芷荟, 等. 基于三维圆锥设计的空气取水性能强化. 科学通报, 2022, 67: 906-912

Deng F F, Wang C X, Chen Z H, et al. Three-dimensional conical adsorbent design for enhancing atmospheric water harvesting performance (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 906-912, doi: 10.1360/TB-2022-0025

材料本身的传热传质条件, 可以实现材料和系统性能的双赢. 通过设计一系列的吸附和解吸实验, 验证了该三维设计策略的优势——圆锥状结构比同条件下圆片状结构的吸附和解吸性能分别提升了1.6和1.3倍.

1 材料和方法

(i) 实验试剂和仪器. 本实验所用试剂主要有活性炭纤维毡(active carbon fiber, ACF; 厚度3 mm)、无水氯化锂等. 所用仪器分别有电热鼓风干燥箱、称重电子天平、恒温恒湿箱、去离子水机器、太阳能模拟光源、红外相机、ASAP麦克比表面积与孔隙度分析仪、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、紫外-可见-近红外分光光度计等.

(ii) 吸附剂的制备. 将干燥的活性炭纤维毡剪成直径6.6 cm的圆片和母线长6 cm的圆锥展开扇形面, 同时保持圆片和立体圆锥具有相同的投影面积(圆锥锥角约60°). 配置200 mL质量分数为20%的LiCl水溶液, 将上述圆片和缝合的立体圆锥浸渍在LiCl溶液中. 待LiCl溶液均匀扩散48 h, 再置于鼓风干燥箱中120°C下干燥12 h. 最终得到完全干燥的圆片和圆锥状的ACF-LiCl吸附剂, 分别命名为Circle和Cone.

(iii) 分析与测试. 采用扫描电子显微镜对材料进行形貌结构的表征和组成元素的能谱分析(energy dispersive spectrometer, EDS). 利用紫外-可见光-近红外分光光度计对含水和干燥状态的纯ACF和ACF-LiCl材料进行太阳能光谱范围的吸光率分析, 探究材料的光热特性.

(iv) 吸附和解吸实验. 利用恒温恒湿箱设定25°C、相对湿度(relative humidity, RH)为60%的稳定工况, 对完全干燥的Circle和Cone进行12 h的吸附性能测试; 同时利用电子天平连接电脑, 实时记录两个样品的质量变化. 将上述吸附饱和的Circle和Cone放置在太阳能模拟光源下进行2 h的光热解吸, 光照强度为 1000 W m^{-2} , 室内温度稳定在约23°C, RH为42%; 两样品在模拟光源下的质量和表面温度变化分别通过连接电脑的电子天平和红外相机记录.

2 结果与讨论

2.1 样品的宏观和微观表征

图1(a)和(b)分别为实验组的Cone和对照组的Circle, 二者使用同样的ACF-LiCl材料, 且具有相同的投影面积

图1 Cone和Circle的宏观结构分析. Cone (a)和Circle (b)的光热解吸过程分析; (c) Cone和Circle的材料面积展开图; (d) Cone和Circle的投影面积、气固接触面积比较

Figure 1 The macro structural analysis of adsorbents with the cone configuration and the circle configuration, respectively. Analysis of the desorption process driven by solar energy related to the cone configuration (a) and the circle configuration (b); (c) unwrapped surface areas of the cone configuration and the circle configuration; (d) comparison of the projected area and the exposed area between the cone configuration and the circle configuration

面积. 图中蓝色方框为用于支撑吸附剂的塑料支架, 蓝色方块为表面包裹铝箔的挤塑泡沫板, 用以保证圆片状与圆锥状吸附剂表面接收到相同的太阳强度; 另外, 具有高反射率的铝箔和低热导率的挤塑泡沫板具有隔热的作用, 可避免圆片状吸附剂材料将光热转换的热量向下损失. 图1(c)是二者展开的面积示意图, 与Circle相比, Cone在相同的投影面积下可以设置更多的吸附剂材料. 图1(d)是二者的投影面积和气固界面面积的对比, 可以发现, Cone与环境大气的接触面积是Circle的1.9倍.

对于吸附过程, Cone的厚度依然是3 mm, 材料内部的吸湿因子与外界湿空气具有充分的接触面积. 在相同的环境气流条件下, Cone与Circle具有相同的空气侧、气固界面和内部扩散阻力, 二者与游离的水分子具有相同的碰撞接触概率. 通过形状配置, 圆锥可以在有限的系统占地面积内设置更多的吸附剂用量, 在不

限制材料本身传热传质的条件下, 可以大大提高系统在有限时间的水蒸气吸附性能. 对于太阳光驱动的解吸过程, 当入射光进入吸附剂材料时, Cone有助于太阳光在圆锥内部进行多次反射, 从而实现更高的光热转换效率^[1]. 另外, 在相同的光照面积下, Cone需要利用这部分热量去“加热”更多的吸附剂材料, 导致吸附剂主体的解吸温度相比圆片状结构略低. 较低的解吸温度可以减小吸附剂与环境大气的温差, 从而保证即使呈现较大的接触面积, 也不会导致过大的热损. 因此, 圆锥状结构更有助于吸附剂进行太阳能驱动的被动解吸过程.

通过一系列的微观形貌和特性分析, ACF-LiCl吸附剂在材料角度的性能得到了验证. 根据不同倍数下ACF和ACF-LiCl的SEM和EDS图(图2(a)~(f)), 可以清晰地看到, ACF由约16 μm 的碳纤维错综排列, 主要由C元素组成; ACF-LiCl中错综的纤维丝表面附着大量的

图2 纯ACF和ACF-LiCl的材料特性表征. 纯ACF在1500× (a)和3000× (c)下的扫描电子显微镜图片; ACF-LiCl在1500× (b)和5000× (f)下的扫描电子显微镜图片; 纯ACF (d)和ACF-LiCl (e)的元素分布图; (g) LiCl在不同温度和水蒸气分压下的平衡状态点; (h) 纯ACF和ACF-LiCl分别在干、湿状态下的太阳光吸收率

Figure 2 Characterizations of pure ACF and ACF-LiCl. The SEM images of pure ACF in 1500× (a) and 3000× (c) magnifications; the SEM images of ACF-LiCl in 1500× (b) and 5000× (f) magnifications; the EDS images of pure ACF (d) and ACF-LiCl (e); (g) the equilibrium state of LiCl at different temperatures and water vapor pressures; (h) the sunlight absorbance of pure ACF and ACF-LiCl in dry or wet states

LiCl颗粒, 经计算得LiCl的质量分数约为77%.

因为纯ACF由疏水的活性炭纤维经堆积、压实形成, 其本身几乎不具有捕捉水蒸气的能力. 而LiCl是一种非常常见的具有较强吸湿性的无机盐, 可以捕捉并液化水蒸气, 并将其储存在ACF的孔隙中. 图2(g)呈现了LiCl在不同温度和水蒸气分压下的平衡状态. 随着水蒸气分压的增加, LiCl分别经历无水盐、含水结晶盐、LiCl浓溶液和LiCl稀溶液等几个阶段, 即随着相对湿度的增加, ACF-LiCl吸附剂的水蒸气吸附量基本呈线性增加^[12,13]. 本文选取20%的LiCl溶液浸渍ACF, 可以保证吸附剂在相对湿度低于80%的条件下不发生液解、泄漏, 同时具有优越的吸湿特性. 图2(h)给出了纯ACF和ACF-LiCl分别在干燥和含水状态的太阳光吸收率. 可以看出, 除干燥的ACF-LiCl由于承载大量白色的盐颗粒, 吸收率只有60%~70%, 其他样品的全光谱吸收率均在90%以上. 对于光热驱动的解吸过程, 材料温度最高可达90℃, 此时LiCl处于结晶状态, 材料无法彻底解吸; 解吸终了得益于ACF纤维网络的毛细作用, 盐颗粒倾向于附着在纤维表面和孔道中, 而不会浮于材料表面. 这意味着在整个解吸过程中, ACF-LiCl吸附剂绝大部分时间处于吸收率高于90%的湿润状态, 小部分时间处于吸收率不低于70%的半干燥状态, 即材料一直具有良好的光热特性.

总的来说, 本文采用ACF-LiCl吸附剂制备的Cone和Circle, 利用LiCl的吸湿特性来吸附水蒸气, ACF的毛细力来储存液态水, 以及黑色ACF天然的光热特性来实现被动解吸, 制备工艺简单易行, 且材料柔性好、易成形, 平衡吸附性能较为客观. 因此, 采用ACF-LiCl吸附剂设计Cone和Circle非常合适.

2.2 Circle和Cone的吸附性能分析

图3(a)是两种样品在25℃、RH 60%下进行12 h吸附性能的实物图. 图3(b)和(c)分别呈现了两种样品随时间变化的单位面积吸湿量和单位质量吸湿量. 保持投影面积一致, 12 h后, Cone和Circle分别实现了约2.4和1.5 kg m⁻²的吸湿量, Cone的性能约为Circle的1.6倍. 在材料角度, Cone和Circle基本达到吸附饱和, 即具有2.3~2.4 g g⁻¹的单位质量吸湿量(图3(c)). 结果表明, 不同的形状配置不影响材料本身的单位用量吸湿量, 但Cone可明显提升单位占地面积下的系统取水性能.

同时, 图3(c)中两样品在4~6 h内已达到饱和吸湿量的90%. 得益于三维圆锥配置, 圆锥状材料在空间维度上增加吸附剂用量, 不牺牲单位吸附剂材料与环境水蒸气的气固接触面积. 在有限的系统占地面积条件下, 圆锥配置一方面保证了材料的吸附性能; 另一方面又提高了吸附剂的空间堆积量, 进而获得较高的吸湿

图3 两种配置的吸附实验比较. (a) Cone和Circle的光学照片; 两种配置在25℃、RH 60%下吸湿12 h的单位面积吸湿量(b)和单位质量吸湿量(c)
Figure 3 The comparison of adsorption performance between the cone configuration and the circle configuration. (a) The optical photographs of the two kinds of adsorbents; the water uptake per area (b) and per mass (c) of the two adsorbents at 25℃ and RH 60% for 12 h

总量.

因此可以证明,圆锥状的吸附剂配置,在提升系统取水量的同时,不仅不牺牲材料本身在12 h内的吸湿性能,而且保证了吸附过程的传热传质特性,呈现出非常优越的吸附动力学特性,对于空气取水系统的优化改善具有很大的进步意义.

2.3 Circle和Cone的解吸性能分析

图4(a)展示了两样品的解吸实验配置. 图4(b)展示了2 h的解吸过程中, Circle和Cone表面温度的变化情况. 二者的温度在10 min内迅速升高,然后在后续时间内缓慢上升,且Circle的表面温度始终比Cone的高

图4 两种配置的解吸实验比较. (a) 模拟光源下的解吸实验配置; (b) 两种配置在光热解吸实验中的表面最高温度和平均温度变化情况; 两种配置在辐照强度 1000 W m^{-2} 、 23°C 、RH 42%下的单位面积解吸速率(c)和解吸比(d); Circle (e)和Cone (f)分别经历0、1、2 h时的温度分布红外图

Figure 4 The comparison of desorption performance between cone and circle configurations. (a) The desorption experiment set of the two samples in the sunlight simulator; (b) the maximum and average values of surface temperatures for the two configurations when exposed to the sunlight simulator; the desorption rate per area (c) and the desorption ratio (d) of the two samples with 1000 W m^{-2} of solar irradiation intensity, 23°C of ambient temperature, and 42% of relative humidity; the infrared (IR) photos of the circle configuration (e) and the cone configuration (f) when exposed to the sunlight in 0, 1 and 2 h

10°C. 这是因为在相同投影面积、相同光照强度下, 两种配置的样品能获得几乎相等的光热转换能量. Cone的材料用量是Circle的1.8倍, 意味着相同的热量需要加热和解吸1.8倍的吸附剂材料, 且Cone更大的气固接触面积也意味着更大的换热损失. 这些原因综合导致了Cone具有更低的解吸温度(图4(e)和(f)).

图4(c)和(d)展示了两种样品在2 h解吸下的单位面积解吸量和解吸比. 其中, Cone和Circle的平均单位面积解吸速率分别为2和1.53 kg m⁻². Cone的单位面积解吸速率是Circle的1.3倍, 表明在系统层面, 圆锥配置也具有一定的优势. 这是因为Cone的锥形结构有助于提高系统的光热利用率, 且较低的解吸温度有助于减小材料和环境的换热温差, 从而适度减少热损^[14]. 图4(d)中, Cone实现了约40%的解吸率, 而Circle实现了约48%的解吸率. 这是由于Cone较低的解吸温度限制了材料内部液态水的脱离和逃逸速度. 但在后续时间内, Cone

比Circle具有更快的解吸潜能. 对于一天中8~9 h的光照条件, 圆锥状吸附剂可以完成更多的水蒸气解吸, 并且能更充分地利用白天的太阳能, 从而提升空气取水系统的解吸性能.

3 结论

根据上述实验结果, Cone在相同占地面积下, 使系统的吸附性能和解吸性能分别提升了1.6和1.3倍. 而按照理论计算, 在相同的冷凝条件下, 假设Cone和Circle系统的冷凝回收率一致, 则Cone可以使系统的空气取水性能提升1.5~2.1倍. 结果表明, 通过这一三维设计策略, 可以使取水系统在加大材料用量、保证单位材料用量性能的前提下, 完成对材料、空间、时间等多个层面的高效利用, 最终实现非常可观的系统取水效果. 这一新概念的提出, 为空气取水技术在系统层面的优化发展提供了一种新的策略指导.

参考文献

- 1 Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 2011, 333: 712–717
- 2 Tao P, Ni G, Song C, et al. Solar-driven interfacial evaporation. *Nat Energy*, 2018, 3: 1031–1041
- 3 Zheng Z Y, Li F C, Li Q, et al. State-of-the-art of R&D on seawater desalination technology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2344–2370 [郑智颖, 李凤臣, 李倩, 等. 海水淡化技术应用研究及发展现状. 科学通报, 2016, 61: 2344–2370]
- 4 Sun Z Y, Wang J J, Wu Q L, et al. Plasmon based double-layer hydrogel device for a highly efficient solar vapor generation. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1901312
- 5 Tu Y D, Wang R Y, Zhang Y N, et al. Progress and expectation of atmospheric water harvesting. *Joule*, 2018, 2: 1452–1475
- 6 Kim H, Rao S R, Kapustin E A, et al. Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates. *Nat Commun*, 2018, 9: 1191
- 7 Ejeian M, Wang R Z. Adsorption-based atmospheric water harvesting. *Joule*, 2021, 5: 1678–1703
- 8 Yu N, Wang R Z. Comparison study on the sorption properties of silica gel- and activated carbon-LiCl composite sorbents (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2029–2035 [余楠, 王如竹. 以硅胶和活性炭为基质的复合吸附剂吸附性能的对比. 科学通报, 2015, 60: 2029–2035]
- 9 Sun X J, Wang C P, Pan X Y, et al. MOFs-derived porous carbon materials for gas adsorption and separation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3590–3603 [孙雪娇, 王晨鹏, 潘晓阳, 等. MOFs基多孔碳材料在气体吸附与分离中的应用. 科学通报, 2021, 66: 3590–3603]
- 10 LaPotin A, Zhong Y, Zhang L N, et al. Dual-stage atmospheric water harvesting device for scalable solar-driven water production. *Joule*, 2021, 5: 166–182
- 11 Shi Y, Li R Y, Jin Y, et al. A 3D photothermal structure toward improved energy efficiency in solar steam generation. *Joule*, 2018, 2: 1171–1186
- 12 Wang J Y, Liu J Y, Wang R Z, et al. Experimental investigation on two solar-driven sorption based devices to extract fresh water from atmosphere. *Appl Therm Eng*, 2017, 127: 1608–1616
- 13 Wang W W, Xie S T, Pan Q W, et al. Air-cooled adsorption-based device for harvesting water from island air. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 141: 110802
- 14 Li X Q, Li J L, Lu J Y, et al. Enhancement of interfacial solar vapor generation by environmental energy. *Joule*, 2018, 2: 1331–1338

Summary for “基于三维圆锥设计的空气取水性能强化”

Three-dimensional conical adsorbent design for enhancing atmospheric water harvesting performance

Fangfang Deng, Chenxi Wang, Zhihui Chen & Ruzhu Wang*

Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

* Corresponding author, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn

Recently, atmospheric water harvesting (AWH), which could relieve serious water scarcity, has attracted widespread interest around the world. Sorption-based atmospheric water harvesting (SAWH), due to its portability, easy availability, wide suitability, and low energy consumption, overmatches other AWH technologies, such as fog capture, dew collection, and water condensation based on refrigeration. As for the SAWH technology, adsorbent material and structural design of the SAWH device are the most significant factors that affect its performance. In terms of material, numerous developed hydrogels, MOFs, and hygroscopic composites have exhibited promising potential when applied in SAWH systems in a wide range of relative humidity. However, in terms of the device, research related to structural design and optimization is usually ignored. Conventional systemic structure by stacking numerous materials is frequently exploited to increase the dosage of adsorbent materials, in order to promote integral water productivity. Nevertheless, in this case systemic heat and mass transfer properties will worsen, which further leads to the degradations of sorption capacity per mass adsorbent and integral water productivity in time-limited processes. Therefore, both dosage of adsorbents and sorption capacity per mass adsorbent should be ensured to realize promising SAWH performance.

In this work, a three-dimensional conical structure is proposed to satisfy the above requirements. It could increase the dosage of adsorbents in a limited projected area without impairing systemic adsorption and desorption kinetics. Therein, a flexible hygroscopic adsorbent material is acquired to be fixed and configured into a conical shape. In addition to the high preparation cost, excellent MOF usually is powdery, which is tough to be exploited in an AWH device. As for the hygroscopic hydrogel, its complicated fabrication method and weak rigidity impede its practical application. Therefore, these novel adsorbents are unsuitable to be assembled into conical structures. The commercial cheap active carbon fiber (ACF), which possesses a porous structure and high photothermal property, is very suitable as the network structure to hold the hygroscopic factor. By impregnating LiCl in ACF, the scalable outstanding ACF-LiCl (water uptake: 2.2 g g^{-1} at 25°C and RH 60%) is developed to be configured into a three-dimensional cone shape (it is named as Cone; the control sample is named as Circle).

A series of adsorption and desorption experiments have been conducted to demonstrate and explore the performance of Cone. Compared to conventional Circle, the systemic adsorption and desorption performances of Cone have been improved by 1.6 and 1.3 times, respectively. And the total water productivity of Cone is evaluated to be 1.5–2.1 times higher than that of Circle. It is mainly attributed to the innovative combination of super hygroscopic ACF-LiCl adsorbent and desirable conical structure. The exhibited ACF-LiCl adsorbent possesses considerable water capacity per mass material, while the promising conical structure with sufficient adsorbent materials endows the whole SAWH system with rapid dynamic property. Therefore, enough adsorbent dosage, impervious sorption capacity per mass material, and enhanced systemic heat and mass transfer property are together achieved to break through current bottlenecks in the SAWH field. The original strategy referring to SAWH's structural design from 2D to 3D is firstly introduced in this work, which is beneficial to promoting sustainable development in the arid regions with affordable water.

cone, atmospheric water harvesting, active carbon fiber, LiCl, sorption

doi: [10.1360/TB-2022-0025](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0025)