文章编号:1007 - 4252(2022)03 - 0003 - 212 DOI:10.20027/j.gncq.2022.0025

基于气凝胶的界面太阳能光蒸汽转化技术的研究进展

党 菁,张 豪,周子权,赵春波,赵 嵘,戚剑飞,杨 鹏,万艳芬*
(云南大学 材料与能源学院,昆明 650000)

摘要: 淡水,乃是具有战略意义的全球性问题,对人类生存、经济发展和社会进步至关重要。面向碳中和、碳达峰目标探寻绿色环保的水淡技术,研究者将目光投向了新兴的太阳能海水淡化技术。近年来,新型界面太阳能光蒸汽转化系统因其高效的产水效率、可编程的蒸发装置和丰富的材料选择而迅速成为海淡技术的典型代表,界面系统的构筑主要包括光吸收器材料设计制备和蒸发装置的构建。在众多光热材料候选者中,气凝胶因其轻质、多孔以及低热导率而脱颖而出,表现出了优异的光吸收、热管理和水输运能力,并为光吸收器和蒸发器一体化提供了极佳的实现途径。如何通过调控气凝胶的组成与结构以及蒸发器的构建,减少其在光蒸汽转化过程中的能量损失,并将其投入实际运用正逐渐成为该领域的研究重点。本文系统地梳理并阐述了近年来气凝胶用于界面太阳能光蒸汽转化技术的研究进展,详细分类讨论了不同材料的光热转化机制以及不同种类气凝胶的性能特点,探讨了气凝胶在海水淡化方面的最新应用,同时分析了其优缺点及所面临的挑战,并简单总结了气凝胶的结构设计与亲疏水改性方法,最后对应用于界面太阳能光蒸汽转化的气凝胶材料进行了总结与展望。

关键词: "双碳"目标;气凝胶;太阳能海水淡化;界面太阳能光蒸汽转化;能源转换
中图分类号: TK51 **文献标志码:** A

Research Progress of Aerogels for Interfacial Solar-Vapor Conversion Technology

DANG Qing, ZHANG Hao, ZHOU Zi-quan, ZHAO Chun-bo, ZHAO Rong, QI Jian-fei, YANG Peng, WAN Yan-fen*
(School of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming 650000, China)

Abstract: Freshwater is a global problem of great strategic significance, which is paramount to human survival, economic development and social progress. Facing the goal of carbon neutrality and carbon peak, aiming at exploring green and eco-friendly seawater desalination technology, researchers have fo-

收稿日期: 2022-03-02; **修订日期:** 2022-04-18
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071282);云南省应用基础研究计划重点项目(202001BB050046);云南省科技厅-云南大学双一流建设重点项目(2019FY003013).
作者简介: 党 菁(1999-),本科生,主要研究方向为太阳能海水淡化功能材料.
通信作者: 万艳芬(1981-),博士生导师,副教授,主要研究方向为新能源纳米材料与自供能可穿戴柔性电子器件(E-mail:yfwan@ynu.edu.cn).

cused on the emerging solar driven seawater desalination technology. In recent years, the new interfacial solar-vapor conversion (ISVC) technology has rapidly become one of the prior strategies for seawater desalination due to its high water production rate, programmable evaporator device and abundant material precursors. At the same time, among many candidates for photothermal materials, aerogels show the excellent properties involving light absorption, thermal management and water transportation benefitting from their lightweight, porous microstructure and low thermal conductivity, and provide the possibility to integrate light-absorbers and evaporators into one body. How to adjust the composition and structure of aerogels becomes the focus towards reducing the energy loss and practical application. In this paper, we systematically illustrated the research progress of ISVC system based on aerogels, and discussed mechanism of photothermal conversion and the performance characteristics of different types of aerogels in detail and the latest applications, simultaneously analyzed their merits and facing challenges in actual seawater desalination, summarized the hydrophilic or hydrophobic modification methods and structural design of materials briefly. Finally, we predict the prospect of the ISVC aerogels.

Key words: Dual carbon goals; Aerogels; Solar seawater desalination; Interface solar-vapor conversion; Energy conversion

0　引言

地球人口持续增长、生态失衡、资源过度开发不可逆转地引发了能源危机和淡水危机,人类急需探寻清洁、低碳、可再生、可循环的能源利用方式以保障未来生存及可持续发展[1-3]。"淡水"作为人类赖以生存的必需品,也是各国的首要民生问题,一直备受关注。然而,当下人类所面临的淡水危机十分严重,保障与提升淡水资源供给能力至关重要! 随着"双碳"目标与清洁能源共享发展理念不断深入,作为"开源"的重要补给储备,海水淡化被视作"解渴"的首善之选,世界各国都在努力寻找低碳、环保和可持续发展的策略以提供绿色水淡的解决途径。

目前传统海水淡化技术主要利用反渗透法,但其仍存在许多问题,例如消耗能源过多以及废水的处理排放,这便限制了该技术在偏远贫困地区的推广应用。因此,我们亟需寻找更加清洁环保、低成本的方式进行高效海水淡化,首要任务是找到可持续利用的清洁能源(一级能源)与高效能源转换的方法。

太阳能作为一切生命的终极能源之源,取之不尽用之不竭,其利用与转换一直是人们最为关注的焦点之一,尤其太阳能热利用一直以来都与人类生存与生活紧密相关。在淡水问题日趋严峻的今天,研究者为了加快淡水供应的海陆空水循环,提出了环保节能的淡水解决方案——太阳能海水淡化[4-5]。太阳能海水淡化技术的发展经历了两个重要阶段。第一阶段是通过光吸收体(如纳米流体)获取太阳光进行光热转化进而加热水体来产生水蒸气[6-7],如图 1(a)所示,该悬浮体系是将光热材料分散在工质中。这种系统通常为了实现液体的大量加热而依赖于昂贵且笨重的光学浓缩系统,并且该系统容易造成各种热损失,比如会对未参与蒸汽产生的部分液体进行不必要的加热,因此导致相对较低的效率[4-5]。第二阶段起于 2014 年,Chen 提出了构建新型界面太阳能蒸汽产生系统(interfacial solar steam generation, ISSG),如图 1(b)所示,从此大幅度提高了太阳能海水淡化的效率和推广可行性[8]。该界面系统以微纳结构光热材料作为光吸收体,在实现高效太阳光光吸收的同时还表现出杰出的光热转化行为,更大的优势在于该界面系统能够将光热转化所产生的热能局域在界面有限空间内,使得热辐射和热对流等形式的热损失得到有效抑制,从而实现高效的光蒸汽转换。ISSG 系统亦被称为界面太阳能光蒸汽转化(Interfacial Solar-Vapor Conversion, ISVC)系统,已然成为当前太阳能海水淡化的研究技术前沿。ISVC 系统通常是双层结构亦或一体化结构,但都要包含两部分,即光吸收层(光热材料)和基底(水输运材料)。常用的光热转化材料主要有半导体、金属、碳材料和高分子有机材料[9-20],基底通常有纸[21]、膜[22]、布[23]、生物质[24]、气凝胶[16,25]、水凝胶[26]、有机泡沫[27]等。

界面太阳能海水淡化研究中，气凝胶在众多材料候选者中备受青睐[10,14,16,28-30]，因其独特丰盈的三维多孔结构和轻盈的质地而在光吸收、热管理和水输运方面均具有优异表现，且还可规模化制备，成为 ISVC 系统的理想基底选材。将各具特色的光热材料负载到气凝胶中构建光热蒸发装置，研究结果表现出了优异的能量转换性能(见表 1)，这得益于其独特的优势：(1) 兼具粗糙的宏观表面和内部多孔微纳结构，增加了入射光的光吸收和多级光反射，极大提高了材料对太阳能的吸收；(2) 气凝胶极高的孔隙率使得其导热系数很低，有效地将能量转换所产生的热量限制在水汽界面，加大抑制了热量损失，微纳多孔结构使得内部空气和蒸汽被分离成小单元，大大降低了宏观对流热交换；(3) 相互连通的多孔网络为快速水输送和蒸汽逸出提供了大量通道，从而大大提高了蒸发效率；(4) 气凝胶具有自漂浮性，可以与光热材料复合形成双层或一体化的蒸发器，利于海水淡化技术的实际运用。另外经过结构形貌的合理设计和调整，还能进一步促进太阳光的吸收及提高耐盐性[28-30]。

气凝胶自 1931 年问世以来[31]，已经被用来合成出多种气凝胶材料，比如碳气凝胶[32-34]、聚合物气凝胶[35-36]、硅气凝胶[37-38]、无机气凝胶[39]以及复合气凝胶[40-42]等。由表 1 可知，目前关于 ISVC 碳气凝胶的研究最多，并且其太阳能水蒸气转换速率优异，碳纳米管(Carbon nanotube，CNT)薄膜与聚乙烯醇(polyvinyl alcohol，PVA)/CNT 气凝胶[43]组成的光热系统表现出了目前最高的水蒸发速率，在太阳光辐照强度为 1 kW·m^{-2}(即 1 Sun)下达到了 4.2 kg·m^{-2}·h^{-1}，其次是碳化香蒲气凝胶系统在 1 Sun辐照强度下达 4.12 kg·m^{-2}·h^{-1}，随后是具有多个垂直通道的还原氧化石墨烯(Reduced graphene oxide，rGO)气凝胶[32]与 N 掺杂玉米稻草/氧化石墨烯(Graphene oxide，GO)气凝胶[33]。贵金属也是热门的光热转化材料，海参状纳米 Au-PVA 气凝胶[44]达到 2.7 kg·m^{-2}·h^{-1}的水蒸发速率，其余气凝胶的水蒸发效率大都在 1～2 kg·m^{-2}·h^{-1}之间。(本文所提水蒸发速率与转换效率数据如无特殊说明，均为在 1 Sun 太阳辐照下测试得到。)

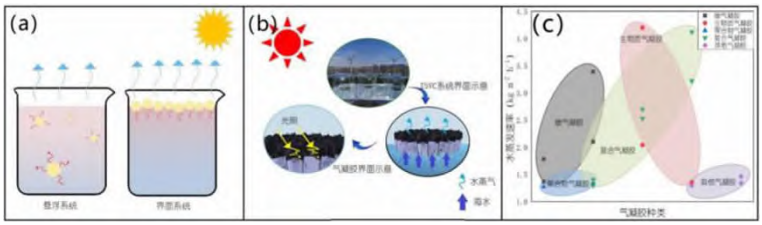

图 1 (a) 悬浮体系与界面系统的太阳能光蒸汽转化示意图；(b) 基于气凝胶的 ISVC 系统示意图；(c) 近四年内各类 ISVC 气凝胶水蒸发速率汇总图(截至更新日期 2022.3.18)

Fig. 1 Schematicillustration for (a) solar light-vapor conversion system between suspension system and interfacial system and (b) ISVC system based on aerogels; (c) Summary diagram of water evaporation rate of various types of ISVC aerogels within recent four years (updated before 2022.3.18)

表 1 近年来气凝胶用于 ISVC 系统的汇总

Table1 Summary of aerogels applied to ISVC system recently

气凝胶	比表面积 (m^2·g^{-1})	孔隙率 (%)	孔径	光吸收率 (%)	热导率 (mW·m^{-1}·K^{-1})	水蒸发速率 (kg·m^{-2}·h^{-1})	转换效率(%)	参考文献
CMP 碳气凝胶	826	92	1.93 nm	99 (200～2 500 nm)	192	1.4406	86.8	[25]
超黑碳气凝胶	-	-	微孔(<2 nm)、中孔(2～100 nm)	96.79 (400～2 000 nm)	33.45～71.14 (室温)	1.37	87.51	[11]
富含缺陷的 rGO 气凝胶	-	-	-	99	7.5	1.78	91	[34]

胡萝卜气凝胶	–	–	37 μm	88.3 (250 ~ 2 500 nm)	–	2.04	~ 100	[45]
马铃薯多孔碳气凝胶	–	60.8	50 ~ 80 μm	96.19	86(干燥)、181(湿润)	1.48	86	[46]
脱木质素木材气凝胶	–	–	–	–	250	1.3	89	[12]
CMP 气凝胶	–	>94	–	–	22	–	81	[35]
凝胶乳液聚合物气凝胶	–	–	14.7 μm	> 92 (200 ~ 1 500 nm)	32	1.27	90.3	[47]
Fe_3Si 气凝胶	498	–	8.8 nm	–	40	2.08	91.8	[40]
Au 纳米花 – 3D 复合硅胶	809	–	3.5 ~ 4 nm	–	–	1.356	85	[37]
N 掺杂的 GO 网格环形气凝胶	529.6	88	5 nm	–	260 ~ 290	2.53	74.8	[29]
棉–CuS 纳米笼–琼脂糖气凝胶	–	–	–	94 ~ 95.5 (290 ~ 1 400 nm)	40	1.63	94.9	[17]
MnO_2 – rGO – PPy 气凝胶	1 142.7	–	19.5 nm	约 100	218.82(湿润)	1.3542	93.8	[18]
HAP 气凝胶	41	95.26	–	96.0	38.7	1.34	89.4	[19]
垂直排列的 Janus MXene 气凝胶	–	–	5 ~ 35 μm	96 (200 ~ 2 500)	–	1.46	87	[20]
Fe_3O_4 改性纤维素碳气凝胶	–	–	–	97	44	2.1	–	[48]
生物质多孔碳/PVA 海绵	668	–	10 ~ 400 nm	–	–	1.386	90.88	[49]
rGO–木基气凝胶	–	–	–	–	–	1.351	90.89	[50]
TiN@ SiO_2 气凝胶	–	–	–	–	12 ~ 18	1.34	84.5	[38]
N 掺杂玉米秸秆/石墨烯气凝胶	–	91.6	–	–	39.7	3.22	–	[33]
$CuFeSe_2$ –石墨烯气凝胶	230	78.3	26 μm	–	62	–	82	[42]
聚多巴胺/纤维素气凝胶	–	–	–	–	–	1.36	86	[51]
纳米纤维素/PVA 气凝胶	–	95	–	94	–	1.4	–	[52]
掺杂诱导发光光热分子的全纤维气凝胶	–	–	–	–	–	1.43	86.5	[36]

Fe^{3+}/鞣酸@纤维素泡沫	–	–	–	–	54～318	1.28	77.2	[53]
HNb_3O_8–PAM 气凝胶	–	–	–	90	40	1.4	91	[54]
海参状纳米 Au–PVA 气凝胶	–	–	–	92.9	–	2.7	79.3	[44]
MXene–GO–SA 气凝胶	–	90.93	–	–	810	1.27	90.7	[55]
具有垂直通道的 rGO 气凝胶	–	–	46μm	97	3.2	3.39	104.1	[32]
Janus 壳聚糖气凝胶	–	–	10.31～15.85μm	–	53	1.76	91	[28]
碳化香蒲气凝胶	–	–	2～30μm	93.2	–	4.12	105.8	[56]
玉米秸秆微晶纤维素气凝胶	–	70.70	10～300μm	92	37	1.44	88	[57]
玉米秸秆氧化微晶纤维素气凝胶	–	71.52	1～280μm	95	43	1.36	84	[57]
PPy/PVA Janus 气凝胶	–	–	–	–	325	1.68	94.7	[58]
3D 打印间苯二酚–甲醛气凝胶	613	–	13.4 nm	–	–	1.57	88.38	[59]
浮石–C–Ag^+气凝胶	230	72.8	2.6μm	94.9	52.7	1.395	88.80	[60]
PVA–ATP–GO 气凝胶	20	92	50 nm 左右	94	167	1.4914	89.5	[61]
C–PVA 气凝胶	6.33	76.8	100μm	98	–	2.1	89.8	[62]
CNT 薄膜 PVA/CNT 气凝胶	–	–	–	91.4(可见光波段) 94.6%(红外波段)	20	4.2	–	[43]
杨梅丹宁–GO 气凝胶	400	–	–	93.5	–	1.80	95.5	[41]
聚合物–rGO 气凝胶	27.2	94	3.79 nm	–	537	1.74	98.4	[63]
硬脂酸–共晶镓铟–木质素/纤维素纳米晶气凝胶	–	–	–	94	76.46	1.29	94	[30]

近年来，许多文献报道了 ISVC 系统的构筑与性能研究，各种各样的三维多孔材料被广泛研究，气凝胶因其质轻孔多、良好的热调控性能而备受关注。本文就应用于 ISVC 系统的气凝胶进行了详细的梳理和总结，系统地阐述了光热转化机理、气凝胶原材料的选择、气凝胶的结构设计和亲疏水改性方法，最后结合气凝胶的研究现状，探讨了光热气凝胶发展所面临的挑战，并展望了气凝胶在未来海水淡化应用中的发展前景。

1 光热转化机理

1.1 光热性能表征

气凝胶是典型的水汽界面材料，通过光热转化

对材料表面水层进行加热产生蒸汽,其中光热材料的光蒸汽转换性能常用以下几个参数进行评定:

①水蒸发速率 ΔM:

$$\Delta M = \frac{dm}{Adt} \tag{1}$$

其中,m 为光热转化中水蒸发质量; A 为材料有效表面积; t 为光热转化的有效时间。

②蒸汽转化效率 η_s:

$$\eta_s = \frac{\Delta M \cdot h}{Q \cdot A} \tag{2}$$

其中,ΔM 是水蒸发速率; h 为标准大气压水汽化的焓变; Q 为入射光强; A 为有效光照面积。

③能量转换效率 η_e:

$$\eta_e = \frac{\Delta m \cdot h_{LV}}{I \cdot s \cdot t} \tag{3}$$

其中,Δm 为光照过程中水的蒸发质量,h_{LV} 为该温度下水汽化的焓变,I 为太阳能照明的功率密度,s 为光照面积,t 为光照时间。

三个参数中蒸汽转化效率和能量转换效率最能直观反应气凝胶将光能量转变为热能的能力,在选取太阳能光热转化材料时,在性能方面应考虑光吸收率和光热转化效率[46]。目前,作为太阳能光热转化吸收层的材料主要有半导体、金属、碳材料以及高分子材料,其热转化机理各不相同。气凝胶可以复合各种具有光热性能的材料,或者以它们作为前驱体,制备出具有高光吸收率、稳定性的材料用于太阳能热蒸汽系统。

1.2　材料光热转化机理

用于 ISVC 气凝胶的光热转化材料包括半导体、贵金属、碳和有机材料。

对于贵金属而言,如图 2(a) 所示,当光线入射到由贵金属构成的纳米颗粒上时,会出现局域表面等离子激元共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR) 效应,导致三个连续现象,即近场增强、热电子产生和光热转化。到目前为止,Au 和 Ag 是光热转化中最常用的等离子金属[47-48],Au 显示出在可见近红外光波段内优异的 LSPR 效应和化学稳定性,而 Ag 则在光学频率范围内显示出高 LSPR 效应和低等离子激元损耗[4]。具有 LSPR 的粒子结合气凝胶在电化学和催化领域也有较为广泛的应用。

半导体对近红外光具有独特的吸收特性,根据吸收原理的不同,可将其分为两大类。第一类是由 LSPR 效应引起的近红外吸收,类似于贵金属纳米颗粒表面的 LSPR 效应,该材料对近红外光的吸收强度与吸收波长主要受缺陷结构浓度影响; 第二类是具有本征吸收带隙的本征半导体材料,如图 2(b) 所示,其在产生非辐射弛豫使能量以声子的形式释放时,引起晶格的局部加热,从而形成光热效应,该类材料对近红外光的吸收主要取决于其本征吸收带隙。目前用于 ISVC 系统中作为光热材料的半导体有 $CuFeSe_2$[42]、CuS[17]、HNb_3O_8[49]、Bi_2S_3[50]、Bi_2MoO_6[51] 等。

碳材料具有密度高且疏松的 π 电子云群,能级比较接近,可以吸收光能,并且通过晶格振动的形式将吸收得到的光能转换为热能,如图 2(c) 所示。碳材料主要包括两种杂化方式,即 sp^2 及 sp^3 杂化,具有比较宽的可见光吸收范围。一方面,由于 π 键的电子键合强度较低,因此 π 键通常比 σ 键弱; 另一方面,大多数碳单键在 σ 和 σ^* 之间具有较大的能带间隙,所以在太阳辐射下无法实现从 σ 到 σ^* 的转变。随着 π 键数量的增加,占据最高的分子轨道和占据最低的分子轨道之间的能隙减小[52],可见光当中的绝大部分能量的光子都可以被电子吸收从而使得本身处于激发态,而处于激发态的电子,若回落至基态时会放出热量,则会促使局部温度升高,同时热量也会向周围的材料和环境扩散[53],从而导致材料的宏观温度升高。CNT[14]、石墨烯[13,29,34,54,55]、碳黑[56]、碳泡沫[57]、碳海绵[58]、生物质碳颗粒[51] 在光热转化材料中的应用皆有文献报道。

有机光热转化材料具有高的光吸收率、光稳定性、光热转化效率以及良好的生物相容性,目前研究发现的有机光热转化材料有小分子染料类和共轭高分子类有机物。研究较多的小分子染料类主要应用于荧光成像和光热治疗[59],共轭高分子类则有部分用于界面光蒸汽转换,如 CMP[25,35] 以及 PPy[18]。有机纳米材料的光热转化机理与碳基材料相似,如聚多巴胺是一种重要的类黑色素生物高聚物,由于其与黑色素的结构相似,因此具有许多天然黑色素的显著特性,可以吸收 99% 的入射光子能量,并在几十皮秒内迅速转化为热量,从而保护生物免受紫外线伤害[60]。

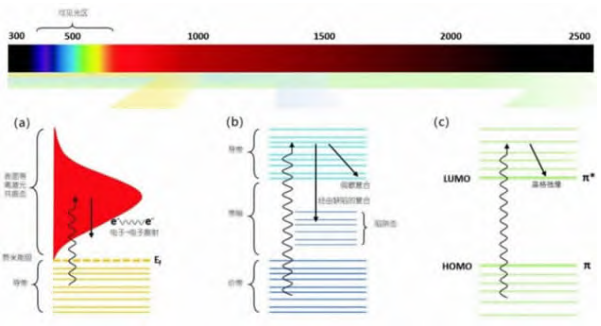

图 2 (a) 金属;(b) 半导体;(c) 碳材料的光热转化机理示意图[9]

Fig. 2 Schematicillustration of photothermal conversion mechanism of (a) Metal; (b) Semiconductor; (c) Carbon materials[9]

2 ISVC 气凝胶

气凝胶是一种具有凝胶网络构造且结构中分散介质为气体的纳米多孔材料,其内部孔洞和基本组成颗粒的尺寸均处于纳米级。气凝胶具备密度低、比表面积高、孔隙率高(可达到 99.9%)、孔隙分布均匀等结构特性,使得气凝胶拥有耐高温性和较低的热导率、折射率。根据前驱体的来源不同,ISVC 气凝胶材料可分为碳气凝胶、生物质气凝胶、有机气凝胶、复合气凝胶及其他类型气凝胶,各自表现出不一样的产水效率,如图 1(c) 所示。

2.1 碳气凝胶

碳气凝胶是一种新型的轻质多孔非晶态纳米碳材料,其物理化学性能优异,具有复杂的三维网络拓扑结构,比表面积高达 600 ~ 1 000 $m^2 \cdot g^{-1}$、孔隙率达 80% ~ 98%[61]。现阶段在太阳能光热转化领域[11,25,34,54-55],碳气凝胶表现出极大的应用前景,最大亮点是其可将 ISVC 光吸收层和基底集成一体化。在碳气凝胶制备上,常用前驱体有石墨烯、CNT 以及纤维素、壳聚糖这些有机高分子,还包括自然界中多种多样的生物质,来源广泛。

石墨烯作为典型的二维纳米材料,独特的尺寸形貌和高效广谱吸收能力使其具有优异的导热性、光吸收性、低摩尔比热以及高比表面积,被认为是极高效的光热转化候选材料之一。北京化工大学于中振团队[32]通过定向冷冻干燥制备了具有多个垂直通道的 rGO 气凝胶作为太阳能热能转换器,其测试装置如图 3(a) 所示,其平均水蒸发速率达到 3.39 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$。该研究首次证明,动态伸缩是调节气凝胶孔道中水态的有效策略,通过优化压缩使得气凝胶网络中的液态水在太阳光光热转化中吸热并完成瞬态水蒸发,该过程中水的蒸发焓降低。清华大学曲良体课题组[34]制备得到功能化基团和富含缺陷的 rGO 气凝胶。如图 3(b) 所示,rGO 气凝胶表面温度高达 88.9 ℃,获得 1.78 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 的水蒸发速率,能量转换效率达 91%。石墨烯气凝胶[34,54]因制备方法的不同而性能有所差异,但由于成本和制备技术等问题,导致石墨烯在碳气凝胶的后续应用方面受到限制。

以聚合物为前驱体,经过碳化得到的气凝胶具有丰富的多孔结构和更大的比表面积,其制备过程主要经过聚合、干燥、碳化、活化等操作步骤[61]。溶胶内部的分子可以通过化学键、氢键、范德华力等相互作用发生聚合与交联达到凝胶化,从而拥有丰富网状结构,碳化处理则是对气凝胶进行热裂解,在不破坏气凝胶三维网状结构的同时,对气凝胶表面进行化学改性和结构改性,再采用物理或化学方法对气凝胶材料进一步进行活化处理,可显著增加微孔以及中孔的数量,提高比表面积。同济大学杜艾课题组[11]制备得到了具有微孔、中孔和大孔的超黑碳气凝胶,最后利用 CO_2 活化法来提高其微孔含量。超黑碳气凝胶表现出 1.37 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 的蒸发速率,87.51% 的能量转换效率。兰州理工大学李安团队[25]以共轭微孔聚合物(Conjugated Microporous Polymer, CMP) 纳米管为前驱体所制备的碳气凝胶,形成了分层的纳米多孔网络结构,相比于石墨烯气凝胶可获得更大的比表面积,比表面积高达 826 $m^2 \cdot g^{-1}$,表现出 86.8% 的能量转换效率。3D 打印也是聚合物溶胶-凝胶成型为气凝胶的方法之一。同济大学周斌团队[62]利用 3D 打印技术得到了聚合物气凝胶,而后再进行碳化得到碳气凝胶,这为气凝胶的制备提供了新思路。

与此同时,研究人员一直致力于开拓基于其他前驱体制备碳气凝胶的研究。中科院兰州化物所张俊平等人[63]受天然植物蒸腾作用和毛细作用的启发,通过碳化 Fe_3O_4 改性的废纸纤维素得到了具有导电性和磁性的 Janus 碳气凝胶,如图 3(c) 所示,其表现出 2.1 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 的高蒸发速率,同时具备优异的高效连续脱盐性能。南京工业大学朱亮亮团队[28]制备了只有上半层被碳化的 Janus 壳聚糖气凝

胶,其微观结构如图 3(d) 所示,具有竖直通道。Janus 壳聚糖气凝胶在各种溶液中具有良好的溶胀性能,促进了液体在其三维大孔隙中的芯吸和储存能力,从而推动自供水及热局部化的太阳能光蒸汽转换,与非膨胀海绵材料相比,延长了有效蒸发时间。

概括而言,制备碳气凝胶的前驱体多种多样,原料广泛且易于获得。碳气凝胶材料应用范围广,可以用在电极材料[64-65]、吸附材料[66-67]、电磁屏蔽[21]以及光热转化等领域[68],目前在光热转化领域中,碳气凝胶最高可达到 104.1% 的能量转换效率[32],性能高效优异,是太阳能光热转化的优选材料。然而部分碳气凝胶原材料昂贵且制备工艺复杂,如石墨烯、CNT,尽管在光热转化方面表现优秀,但其后续应用受到极大限制。同时整体碳化的气凝胶亲水性大大下降,需要进行额外的表面改性步骤,增加了制备过程的复杂性,因此碳材料更适合作为光热转化材料存在于复合气凝胶中。

2.2　生物质气凝胶

近年来,人们对生物质的关注度和利用率越来越高,这源于生物质源的丰富性和易获得性。生物质是自然界光合作用形成的各种有机体,一是具有可再生、可降解且对环境无污染的优势,顺应了当今绿色能源的发展潮流; 二是其成本低廉,使其后端材料应用易于实现和推广。最重要的是生物质具有独特的原生多孔结构为生物质气凝胶的液态水输运和气态水逸散保留了原生通道,并且其粗糙表面及独特结构又可大大增强生物质气凝胶表面的陷光作用,使光经过多次反射与折射导致大部分光被光热层吸收。

许多生物质的特殊形态为研究者提供了很好的仿生启发。生物质前驱体经过简单碳化处理即可得到一体式 ISCV 蒸发器,如香蒲[69]、胡萝卜[72]、马铃薯[45]、向日葵[73]等,虽然密度高于传统气凝胶,但仍具有超轻多孔的气凝胶特性,故在本文中一并讨论。山东大学陈厚课题组[69]将香蒲在氮气中进行简单碳化得到香蒲碳材料。他们构建的一体式 3D 太阳能光蒸汽转化系统,其水蒸发速率高达 4.12 kg·m^{-2}·h^{-1},转换效率高达 105.8%。深圳大学梁华伟团队[72]碳化乙醇处理后的胡萝卜得到了高能量转换效率(127.8%) 的太阳能光热蒸发器,水蒸发速率达到了 2.04 kg·m^{-2}·h^{-1}。

木材经过一定处理则可成为气凝胶。东北林业大学王成毓等人[74]将去除木质素和部分半纤维素的木材与 GO 结合得到光热气凝胶,天然排列的纤维素可以为气凝胶中复杂的网络结构提供足够的毛细力,可以提供亲水性的运水通道。该系统表现出 90.89% 的能量转换效率,1.351 kg·m^{-2}·h^{-1}的蒸发速率。生物质中的提取物也可制备成气凝胶,兰州理工大学李吉焱课题组[75]从玉米秸秆提取出微晶纤维素和氧化微晶纤维素,利用离子液体辅助制备得到具有低弯曲率通道的生物质气凝胶,碳化玉米秸秆粉末被涂敷在气凝胶表面作为光热层。

生物质原生多孔多管结构和粗糙表面为生物质气凝胶的制备及应用提供了得天独厚的优势,例如香蒲由中央主干维束管和白色空心绒毛组成,如图 3(e) 所示,绒毛垂直于中心柱生长,构成的复杂三维拓扑形态增强了气凝胶水运输和光吸收能力[69]; 如图 3(f) 所示,木材通过除去疏水的木质素,留下亲水的纤维素和半纤维素可以提高其水输送能力,还可以在木材中引入额外的空隙和缺陷,进一步降低导热性[12],去除木质素和部分半纤维素可以使通道排列竖直成为重量极轻的层状结构[74]。且由于生物质的丰富性、多样性,生物质气凝胶的发展前景极大。目前生物质气凝胶基底主要有碳化和未碳化两种存在形态,碳化气凝胶如上述所说其亲水性较差,而未碳化气凝胶由于生物质可降解性而对保存条件要求较高,否则易腐烂而丧失光蒸汽转换能力。

2.3　聚合物气凝胶

聚合物气凝胶是高聚物分子与胶体粒子之间以氢键或范德华力相结合而形成的具有多孔网络的有机化合物,在干燥过程中收缩小,一般都具有良好的力学性能、环境稳定性以及极低的密度和热导率[76]。根据聚合物类型和制备条件的不同,聚合物气凝胶的结构可以在胶状纳米颗粒、微纳纤维网络以及片状骨架之间变换[77]。

其中,CMP 是一种具有刚性 π 共轭骨架结构、比表面积大、结构清晰、可调多孔结构以及良好物理共化学稳定性的多孔有机聚合物[70,78]。李安团队[35]报道了以 1,3,5-三乙烯基苯、1,4-二溴代苯和二溴联苯为原料通过交联反应制备得到的 CMP 气凝胶,如图 3(g) 所示。气凝胶中的 CMP 纳米管如图 3(h) 所示,具有优异的柔韧性和优异的力学性

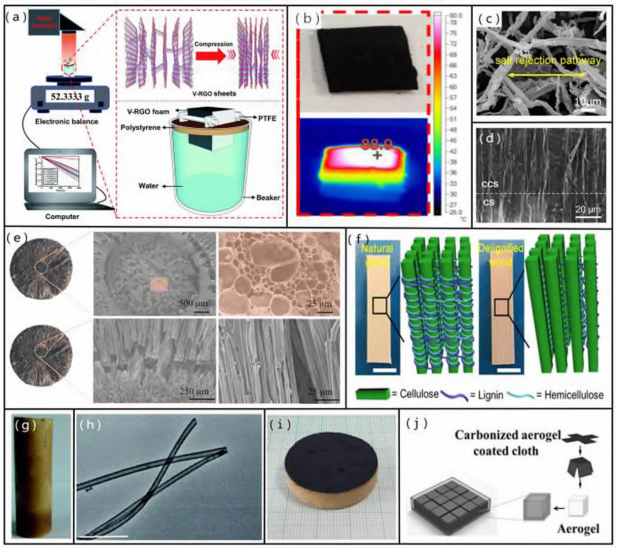

图 3 (a) 具有垂直多孔通道的 rGO 气凝胶的 ISVC 示意图及实验装置的原理图[32]；(b) 富含缺陷的 rGO 气凝胶在 1 Sun 太阳辐照下的表面温度[34]；(c) Fe_3O_4 改性的纤维素基碳气凝胶的 SEM 图[63]；(d) Janus 壳聚糖气凝胶 SEM 图[28]；(e) 碳化香蒲俯视图的 SEM 图[69]；(f) 木材脱木质素前后实物图及示意图[12]；(g) CMP 气凝胶实物图[35]；(h) CMP 气凝胶的 TEM 图，比例尺为 1 μm[35]；(i) 涂覆 PPy 后的 CMP 气凝胶实物图[70]；(j) 太阳能蒸汽发生系统的制作流程图: 棉布包裹的气凝胶再涂覆了一层碳化气凝胶[71]

Fig. 3 (a) Schematic illustration of a ISVC system and the experimental device based onrGO aerogels with vertical porous channels[32]; (b) Surface temperatures of defect-abundant rGO aerogel in dry condition under solar illumination of 1 Sun[34]; (c) SEM images of the Fe_3O_4 modified cellulose carbonized aerogels[63]; (d) The SEM images of chitosan aerogels[28]; (e) SEM images of the top view of the carbonized cattail[69]; (f) Images of wood before and after delignification (scale bars = 1 cm)[12]; (g) Picture of CMP aerogel[35]; (h) TEM image of CMP aerogel. Scale bar: 1 μm[35]; (i) Picture of the PPy coated CMP areogels[70]; (j) Flowchart of the fabrication of the solar vapor generation system: the pristine aerogel was wrapped with cotton fabric, and the fabric was coated with the carbonized aerogels[71]

能，能够在 75% 应变载荷下达到 0.54 Mpa 的抗压强度。其制备工艺简单，加工性能也较好，构建的 CMP 气凝胶涂覆碳黑后可实现高达 81% 的能量转换效率。同样，2020 年李安团队[70]制备得到高机械强度的富 N 的 CMP 气凝胶，在顶部喷涂聚吡咯(Polypyrrole，PPy)后可作为太阳能蒸汽发生器，如图 3(i)，能量转换效率可达到 80%。

除此之外，陕西师范大学苗荣等人[71]通过溶胶-凝胶法，使凝胶乳液脱气、聚合，又经碳化处理后得到了亲水性碳化气凝胶，表现出优异的吸光能力。如图 3(j) 所示，将碳化气凝胶涂在棉布上，并将其包裹在另一疏水气凝胶上，使光蒸汽系统可漂浮在水上，具有良好的耐用性、稳定性和吸附性。深圳大学王东等研究人员[36]将聚偏氟乙烯-六氟丙烯复合聚集诱导发光光热分子和聚己内酯混合均匀后通过冷冻干燥法成型为上层亲水、底层疏水气凝胶。气凝胶中聚集诱导发光光热分子的加入对光激发时分子内的运动有促进作用，会使得纳米纤维网络上的水分加热，同时减少由热传导产生的能量损失，进而可以提高光热转化效率。

PVA[14,44,79-80]、壳聚糖[28,81]、海藻酸钠(sodium alginate，SA)[15-16,82]、纤维素[36,75,83-84]等都是制备气凝胶的优秀前驱体备选，且材料成本低廉，适用于大规模整体制造。这些聚合物常用于各种复合气凝胶中保证其成型与机械性能稳定，纯聚合物气凝胶由于光吸收能力一般较低而少见。

2.4 复合气凝胶

单一气凝胶往往很难同时兼具优异的光热转化性能、机械稳定性和输水能力等，一方面气凝胶本身骨架较脆，机械性能的不足致使其无法应用于实际，另一方面多种材料添加改性有利于气凝胶的多功能化，可以获得更加优异的光热性能。两种或两种以上材料通过复合制备的气凝胶，可以完成多性能兼容的目标，一些光热材料成分的添加既可提高复合气凝胶的能量转换率又可增强稳定性以及增添一些新的功能，比如 Fe_3Si 气凝胶[40]结构稳定且具有光热转化的能力，在腐蚀性溶液中也可工作; 杨梅丹宁与 GO 复合的双功能气凝胶[41]不但有优异的光蒸汽转换能力，还可进行高效海洋铀提取; 高粘度流体和高耐腐蚀性在 $CuFeSe_2$ 负载的石墨烯气凝胶[42]中快速扩散，可用于处理海上石油泄漏。复合气凝胶的多样性体现出该材料的可拓展潜力和潜在的应用价值。

2.4.1 硅基气凝胶

SiO_2 气凝胶是一种由纳米级 SiO_2 微颗粒相互聚集构成的轻质固体材料，含有纳米介孔结构，同时具

有低密度、高孔隙率、高比表面积、低导热系数、低介电性等特性,也是作为 ISVC 气凝胶的良好选择之一。研究人员选择一些同样具备优异光热转化能力的纳米材料或成分添加到硅基橡胶中,使该复合气凝胶的光热性能显著提高。

新加坡国立大学何锦韦课题组[37]等将 Au 纳米花添加到 3D 复合硅胶中,如图 4(a) 所示,多孔 SiO_2 骨架使其具有较高的机械稳定性、防污性和绝热性能。呈各向异性的 Au 纳米花,其尖端具有极强的 LSPR 效应并且尖端之间会产生极大增强的电磁场耦合,进而可以在广谱范围内产生可持续的增强光热转化效应,可获得的蒸发率为 1.356 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,能量转换效率为 85%。香港城市大学安京珍等人[38]将 SiO_2 气凝胶与涂有等离子激元 TiN 纳米颗粒的聚偏氟乙烯膜结合,得到了高效太阳能驱动的界面蒸发系统,如图 4(b) 所示。由于等离子激元 TiN 纳米颗粒的宽带光吸收和优越的光热转化特性,该系统能以 1.34 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$的速率高效地生产清水,能量转换效率达 84.5%。硅基气凝胶不仅能够单独作为太阳能光蒸汽转化系统的基底,还能与水凝胶复合,增强复合材料的性能。PVA 复合水凝胶[35]中因为 SiO_2 气凝胶微粒的存在而获得自浮性和低导热率,热量可被气凝胶限制以进行局部加热,进一步提高其光热转化效率。

硅元素同样广泛存在于自然界的各种矿物质中,李吉焱等人[36]以自然界中直接获得的浮石经过切割清洗后直接作为气凝胶使用,并附上 C 和 Ag^+ 作为光热层,成为转换效率高、耐盐、抑菌、抑藻、可降解染料的多功能 ISVC 系统。此外,富含 Si 的凹凸棒石(Attapulgite, ATP) [37]也是气凝胶前驱体选择之一。

除了在 SiO_2 气凝胶中添加光热材料,研究人员还发现了含有硅元素的新型光热材料。河北大学李亚光团队[40]报道的 Fe_3Si 气凝胶具有 2 ~ 3 nm 的窄介孔、完全吸收阳光和优异的抗腐蚀性能,是一种新型的光热材料。海水蒸发率达到 2.08 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,能量转换效率为 91.8%,显著超过了传统的光热蒸发理论极限(<1.5 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) 。

硅来源广泛、成本低廉,在制备合成太阳能光蒸汽转化系统中是较理想的前驱体之一。但是硅胶与其他气凝胶相比,热导率低但亲水性较差,不具备优势,通过与其他材料交联可改善气凝胶整体的亲水性,提高水运输能力。而基于含硅元素的矿物质和化合物的 ISVC 气凝胶还有待研究人员的进一步探索。

2.4.2 碳基气凝胶

当碳材料单独形成气凝胶时是通过范德华力直接相互交联,常会导致其网络结构不完善或机械稳定性差,因此碳材料往往与聚合物结合形成复合气凝胶以增强碳气凝胶网络结构,例如 PVA[14,43,88]、聚丙烯酰胺(cpolyacrylamids, PAM) [13]、聚对苯撑苯并二噁唑纳米纤维[89]等。

中科院苏州纳米所张永毅团队[43]通过浮动 CVD 法合成了棉花状的 CNT 泡沫,再将其制成薄膜和 PVA/CNT 气凝胶。疏水性 CNT 薄膜作为加热层,亲水性 PVA/CNT 气凝胶充当蒸发层,组合成具有增强热局部化功能的 ISVC 系统,如图 4(c) 所示。在太阳辐照下,由于润湿性的差异,CNT 膜的温度高于 PVA/CNT 气凝胶,加热层的热能连续转移到蒸发层中,形成梯度加热效应,大大提高水的蒸发速率,达到了 4.2 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,是目前光热气凝胶中水蒸发速度最高的。南开大学胡献刚团队[42]将四亚乙基五胺和 GO 复合得到了石墨烯气凝胶,然后将 $CuFeSe_2$ 负载在气凝胶上,其中 $CuFeSe_2$ 具有窄禁带(0.16 eV) 和高光热效率(82%) ,得到的复合气凝胶具有很强的光吸收率和高光热转化效率。

各种碳材料中,二维石墨烯片由于其独特的电磁限域效应、宽谱光吸收、良好的机械稳定性等成为一种关键且有吸引力的光热材料[29]。通过 N 掺杂也能适当提高石墨烯基气凝胶的亲水性和光蒸汽转换效率。东南大学代云茜等研究者[29]制备了具有 N 掺杂的 GO 网格结构的环形复合气凝胶,如图 4(d) 所示,大大提高了水的输送和蒸发速度,同时具备良好的抗盐功能,在 1 Sun 的辐照强度下实现了 2.53 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$的蒸发速率。山东大学高宝玉研究团队[33]采用低温常压干燥自组装法制备了 N 掺杂的玉米秸秆/石墨烯复合气凝胶。基于石墨烯的网络结构,通过调控生物质资源玉米稻草的添加量,可以增强其孔隙结构与表面粗糙程度,增强水与空气的接触面积,加速水的运输。N 掺杂使其具有更优异的热稳定性与光吸收能力。同时,N 掺杂玉米秸秆/石墨烯气凝胶中固有的亲水性纤维链的存在,有助于减少水的蒸发,能够有效提高该复合气凝胶的水蒸发率,表现出 3.22 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$的高蒸发速率(1 Sun) 。

碳材料通过复合其他材料可解决亲水性差、机械性能不稳定的问题，但还需要继续探索其他性能优秀且价格低廉的碳材料，为碳基气凝胶的后续应用提高竞争力。

2.4.3 纤维素基气凝胶

纤维素是一种机械强度高、柔性强、官能团含量丰富、储量巨大的可再生天然聚合物，是制备多孔气凝胶的一种优良前驱体。纤维素基气凝胶是一种可再生、生物相容性好并且可生物降解的各向同性三维网络结构，同时兼备高比表面积（100 ~ 1 600 $m^2 \cdot g^{-1}$）、高孔隙率（80% ~99.8%）与低密度等特点。

纤维素在气凝胶中主要起成型和维持机械稳定性的作用，通常是结合其他材料得到 ISVC 气凝胶，如 CNT[33]、PPy[15]、rGO[16]、聚多巴胺[34]等等。南京林业大学付宇课题组[30]受无籽向日葵的启发，设计了具有倒金字塔的表面结构，将纤维素纳米晶、木质素与 PVA 复合得到气凝胶，硬脂酸与共晶镓铟作为光热层。如图 4（e）所示，该设计不仅减少多级光反射且提高了能量损失补偿。另外，生物质废料还可以更好地用作纤维素提取的原料[30]。中国海洋大学徐晓峰团队[30]从藻类植物浒苔中提取纳米纤维素，与 PVA、戊二醛、聚苯胺复合得到气凝胶。纯纳米纤维素气凝胶中存在由羟基形成的亲水性氢键网络结构，但是具有一定的脆性，加入少量 PVA 后通过交联形成双网络结构，既能保持有效的保水和输运能力，还可显著提高其机械强度和抗变形能力。

纤维素来源广泛、价格低廉且环境友好，通过与不同物质的复合，极大地促进了纤维素基气凝胶的光吸收率和光蒸汽转换效率。同样由于纤维素的可降解性导致其在潮湿环境下易腐烂，不利于纤维素基气凝胶的长期使用；纤维素需要经过特殊工艺才能得到具有垂直排列通道的气凝胶，以增加其在海水淡化过程中的抗盐能力和耐久性，而复杂的制备过程又限制了其应用。

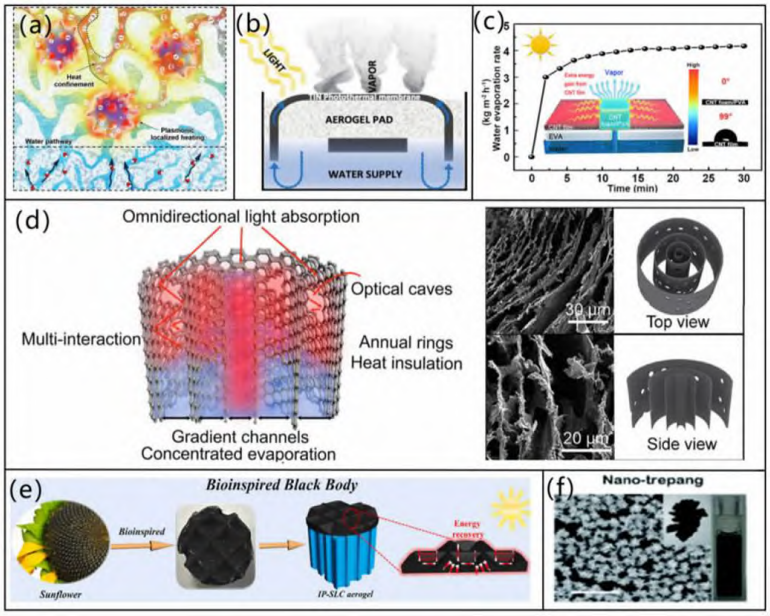

图 4 （a）Au 纳米花-硅胶内部微观结构[37]；（b）TiN@SiO_2 气凝胶 ISVC 系统示意图[38]；（c）基于 PVA/CNT 气凝胶和 CNT 薄膜的 ISVC 系统示意图[43]；（d）N 掺杂的石墨烯网格的环形气凝胶示意图和 SEM 图[29]（上为俯视图，下为侧视图）[29]；（e）硬脂酸-共晶镓铟/木质素-纤维素纳米晶气凝胶表面制备示意图[30]；（f）海参状纳米 Au 的 SEM 图（插图为纳米颗粒在水分散体中的 TEM 图和实物图，比例尺为 500 nm）[44]

Fig. 4Schematic diagrams of (a) Au nanofloewers in silica gel[37]; (b) ISVC system based on TiN@SiO_2 aerogels[38]; (c) ISVC system based on PVA/CNT aerogels and CNT membrane[43]; (d) The ring-like N-rGO aerogel from the top view and the side view[29]; (e) Stearic acid-Eutectic gallium indium/Lignin-cellulose nanocrystals aerogels[30]; (f) The SEM image of the nano-trepang (inset images are corresponding TEM images and photographs of the NP aqueous dispersion, scale bar: 500 nm)[44]

2.4.4 金属基气凝胶

金属化合物在光热气凝胶中既能充当使太阳光-蒸汽转换的光热材料,也能在气凝胶中增强其机械强度,与传统的低机械强度气凝胶材料相比具有很大的优越性。李安团队[18]报告了由 MnO_2 纳米线和 rGO 组成的一体式气凝胶,并在其表面原位包覆 PPy,以构建高效太阳能蒸汽产生的光热转化层。MnO_2 纳米线的存在使其能够保持一定的机械强度(在 30% 的应变下为 0.08 MPa),从而使其在机械性能上能够承受恶劣的环境。且其光学吸收能力超强(约为 100%),在 1 Sun 的辐照下具有 93.8% 的能量转换效率和 1.587 kg·m^{-2}·h^{-1} 的水蒸发速率,可作为一种太阳能蒸汽海水淡化的高效光热材料。

金属或金属化合物在太阳能光蒸汽转化系统中更常充当光热材料的角色。南澳大利亚大学徐浩兰等人[17]利用 CuS 纳米笼、脱脂棉与琼脂糖组合在一起,生产出了高韧性、稳定且具有大孔结构的光热气凝胶,其比表面积高达 1 142.7 m^2·g^{-1}。在 1 Sun 的太阳辐照下,水蒸发速率为 1.63 kg·m^{-2}·h^{-1},能量转换效率高达 94.9%,并且在至少 15 次循环后性能没有降低。何锦韦课题组[49]利用氧空位(Ov)缺陷丰富的半导体 HNb_3O_8(D-HNb_3O_8)纳米片和 PAM 制备了实现光化学和光热一体化的气凝胶。D-HNb_3O_8 能够吸收太阳光全谱、紫外线驱动的光催化和可见光-近红外光诱导的光热加热,显示出 1.4 kg·m^{-2}·h^{-1} 的高太阳能蒸汽生成率,能量转换效率高达 91%。贵金属也是光热材料的优良备选之一,香港城市大学李振声团队[44]通过在单个纳米颗粒水平上合理调节各向异性,如图 4(f)所示,制备出了海参状的纳米 Au 颗粒,在单粒子尺度上产生了集体 LSPR 效应,并且在整个太阳光谱范围内表现出良好的光吸收能力(92.9%),将其与 PVA 复合组成了强光谱吸收的等离子体气凝胶网络,可获得 2.7 kg·m^{-2}·h^{-1} 的稳定太阳蒸发率。

金属气凝胶在催化、传感、吸附、能量收集转换等方面具有广泛应用[91-92],但目前未应用于 ISVC 系统,且由于其成本高、制备工艺复杂而受限,因此还存在很大的研究空间。

2.5　其他气凝胶

2.5.1 HAP 气凝胶

羟基磷灰石(hydroxyapatite,HAP)是天然无机矿物,具有高生物相容性、高热稳定性和优异的耐火性能,以 HAP 为基底的气凝胶具有优异的物理性能和可调的亲水性/疏水性,在吸附分离、隔热、阻燃等领域具有广阔的应用前景。中科院上海硅酸盐研究所熊志超等人[19]利用超长 HAP 纳米线,与 CNT 结合成自漂浮气凝胶,其中 HAP 纳米线具有超高长径比和高柔韧性,所构建的孔壁上覆盖着丰富的 CNT,形成的纳米多孔结构如图 5(a)所示,保证了水蒸气的快速生成与逸出。该气凝胶具有较高的太阳光吸收率(96.0%),水蒸发率达 1.34 kg·m^{-2}·h^{-1},能量转换效率达 89.4%。

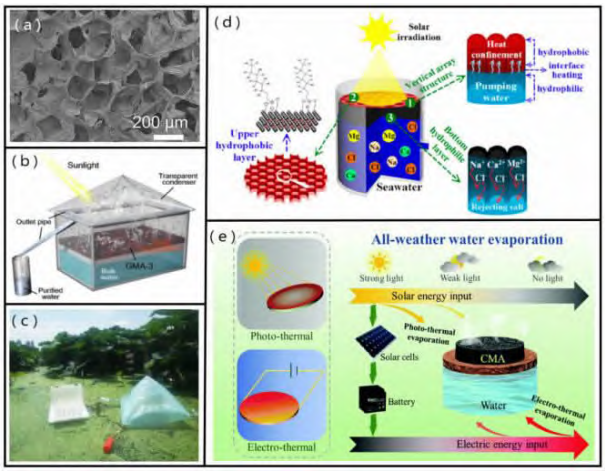

图 5　(a) 多孔 HAP/CNT 双层气凝胶的 SEM 图[19];(b) 基于 MXene-GO-SA 气凝胶的 ISVC 系统示意图[82];(c) MXene-GO-SA 气凝胶 ISVC 系统(左)和商用太阳能蒸馏器产品(右)的对照图[82];(d) Janus MXene 气凝胶高效 ISVC 系统原理图及抗盐设计[20];(e) 基于 CMAs 光热和电热协同转换的全天候蒸汽发生系统的概念示意图[93]

Fig. 5 (a) SEM images of the HAP/CNT bilayer aerogel with a porous structure[19]; (b) Schematic diagrams of a ISVC systems based on MXene-GO-SA aerogels[82]; (c) A comparison between the MXene-GO-SA aerogels based ISVC systems (left) and a commercial solar still product (right)[82]; (d) Schematic illustration of a high-efficiency ISVC system based on Janus MXene aerogels and the salt resistance strategy[20]; (e) Conceptual scheme of the all-weather steam generation system based on the synergistic photo-thermal and electro-thermal conversion of CMAs[93]

目前,HAP 气凝胶应用于光热转化、海水淡化的相关文献还比较少,但是已经报道的各种各样的 HAP 气凝胶[39,81],被大量用于制备隔热防火材料,

它们都具有极好的阻热性能和多孔结构，符合光热转化系统基底的要求。在这些已经制备出的气凝胶基础上再加以改进，可以应用到光热转化领域，具有良好的研究前景。

2.5.2 MXenes 基气凝胶

MXenes 2D 层状材料的独特结构和丰富表面化学性质赋予了其许多独特性能，如良好的金属导电性（~8 000 S·cm^{-1}）、表面亲水性和超高的内部光热转化效率[10,20,93-94]。目前，MXenes 的光热转化机理还不完全清楚，但研究发现 MXenes 材料具有很强的光吸收和 LSPR 效应，因此具有优异的光热转化性能[93]。

湖北大学王贤保课题组[92]利用 $Ti_3C_2T_x$、GO 与 SA 制备了三维多孔气凝胶，蒸发率为 1.29 kg·m^{-2}·h^{-1}，光热转化效率高达 90.7%。并且如图 5(b，c) 所示，在自然环境中的应用也取得了良好效果，其蒸发速率峰值均出现在白天 12:00~14:00 之间，夏季达到 1.25 kg·m^{-2}·h^{-1}，冬季达到 0.73 kg·m^{-2}·h^{-1}。大连理工大学陈硕团队[20]制备出具有垂直排列通道、疏水上层和亲水底层的 Janus MXene(Ti_3C_2) 气凝胶，在毛细水输运、光吸收和蒸汽逸出方面具有竞争优势。他们利用了理论光热转化效率为 100% 的 Ti_3C_2，如图 5(d) 所示，结合 Janus 结构，其蒸发率达 1.46 kg·m^{-2}·h^{-1}，转换效率达 87%，且具有高度稳定的水蒸发率。

太阳能光蒸汽转化系统也可与传统电池结合，四川大学包睿莹等人[93]制备了具有优异的亲水性和隔热性能的交联 MXene 气凝胶(crosslinked MXene aerogels，CMAs)，加上太阳能电池组件构成的蒸汽生成系统能够全天候蒸汽生成，如图 5(e) 所示，CMAs 将太阳光转换为热能用于蒸汽发电，SC-B 在晴天将太阳光转换为电能，光热和电热过程的协同耦合，在 0.5 kW·m^{-2}光能和 2.5 V 电压输入的组合能量输入下，蒸发率为 1.624 kg·m^{-2}·h^{-1}，远高于 1 Sun 辐照下获得的 1.337 kg·m^{-2}·h^{-1}的蒸发率。

同样，由于其独特的结构和优异的导电性，MXenes 气凝胶在电磁屏蔽、电化学、传感器研究中也存在着巨大潜力[56,95-98]。

3 气凝胶热管理及设计

3.1 气凝胶的热导率

气凝胶在光热转化过程中，不仅被要求能将太阳能量进行有效吸收，更要抑制在热传导、对流和热辐射中的热量损失。对材料的热性能进行分析以及对材料器件进行合理设计将有效地降低热损失，对提升材料的光热转化性能至关重要。

气凝胶热量输送的过程中，热量主要在固体传导、气体对流和对外辐射中损失，所以热导率可以近似为结构中的固体、气体传导率和热对流、热辐射过程中的传导率之和[99-100]：

$$\lambda_T = \lambda_S + \lambda_G + \lambda_C + \lambda_R \tag{4}$$

其中 λ_T 为气凝胶总的热导率；λ_S 为气凝胶固体热导率；λ_G 为气体热导率；λ_C 和 λ_R 分别为热对流和热辐射过程的传导率。

固体热导率可以根据气凝胶复合组分中单个有效传导值的加权平均值来加以计算：

$$\lambda_S = \frac{\lambda^*}{\lambda^* \dfrac{R_k}{d} + 1} \tag{5}$$

其中，λ^* 为固体有效传导值；d 为固体颗粒尺寸；δ 为孔径大小；R_k 为组分之间的界面热阻。

气体热导率可根据公式(6) 计算：

$$\lambda_G = \frac{\lambda_{g0}\Pi}{2\beta K_n + 1} \quad K_n = \frac{l_g}{\delta} \tag{6}$$

其中 λ_{g0} 为标准自由空间气体热导率，Π 为气凝胶孔隙率；气凝胶中 β 约等于 2；K_n 为 Knudsen 数，数值上等于气体分子的平均自由程 l_g 与孔径 δ 的比值。

研究表明，气凝胶的热导率主要决定因素是气凝胶内部固体的导热系数 λ_S 和气体导热系数 λ_G，所以气凝胶的整体密度决定了本身的导热能力，进而影响到了太阳能热蒸汽的产生效率，因此通过调控气凝胶的结构可以有效减少蒸发过程中的热量损失。

3.2 气凝胶的结构设计

根据固体、气体热导率公式(5)-(6)，可以分析得出，拟提升总体热导率，材料本身需要减小孔径(δ)、减小固体颗粒尺寸(d) 或者提升材料元件的界面热阻(R_k)。孔径和尺寸的降低会得到非常高的比表面积，多孔结构可使入射光在孔洞里经过多次反射和折射，以此降低材料反射率、增加吸收率，通

过调控孔径还可以改变材料的水输运能力。ISVC 气凝胶一般采用冷冻干燥、活化等方法调控孔径,如利用定向冷冻干燥法可获得具有垂直通道的气凝胶,有助于其光吸收、水运输以及抗盐能力的提升[20,32];超黑碳气凝胶[11]通过 CO_2 活化法可提高其微孔含量,增强了其光吸收能力。

太阳光吸收率是光热转化的一个关键参数,它决定了输入能量的多少,其关键之处在于光热转化材料的固有特性以及合理的宏观和微观结构设计[4]。一般来说,平面光热材料由于其光滑的表面,只允许一次反射,导致太阳吸收率较低。密集堆积的薄膜也往往表现出微弱的光吸收,其转换效率不如具有粗糙表面和三维结构的光吸收器,它们可以通过吸收多次反射光来提高太阳光吸收率。因此气凝胶的表面设计对光吸收能力至关重要,如陈硕等人[20]对 MXene 膜和有/无垂直通道的 Janus MXene 气凝胶之间的水蒸发率进行了比较,如图 6(a-c) 所示,照射在气凝胶表面的入射光通过其垂直排列的结构散射到 MXene 气凝胶内部,随着散射光的透射,可以被进一步吸收,从而提高了光的利用率。相比之下,照射在 MXene 膜和无垂直通道的气凝胶上的入射光具有相对较高的反射,实验结果也显示具有垂直通道的 MXene 气凝胶的水蒸发率最高,分别比无垂直通道的气凝胶和 MXene 膜高出 13% 和 32%。粗糙表面同样可以增强气凝胶的吸光率[30,101]。

气凝胶的整体形状结构对其光蒸汽转化能力也有影响,如香港科技大学杨晶磊等人[55]受洋葱独特结构特点的启发,通过采用自组装湿法-纺丝工艺来批量生产 rGO 气凝胶杂化微珠,凝胶珠的垂直截面形貌显示出典型的核壳结构,在随机的胞核周围有 rGO 片的圆形壳,该结构具有良好的蒸汽运输水通道和功能改善性,赋予洋葱状气凝胶高效的光热转化性能,如图 6(d) 所示。

气凝胶结构设计对光热转化性能至关重要,如何设计和制备出多孔、高比表面积、合适的润湿性和高效的水蒸气运输通道的气凝胶,是目前气凝胶用于光热转化领域研究的重要突破方向。

3.3　气凝胶的亲疏水改性

气凝胶独特的三维自支撑体系使材料可以漂浮于水气界面,借助于三维体系毛细运输管道,可以很大程度上减少热对流和散失,提高了光热蒸汽转化效率。但对于固体材料来说,固体表面的润湿性由表面的化学组成和微观几何结构共同决定,是影响界面性能的一大重要因素,对于界面太阳能热蒸汽的产生至关重要。对于气凝胶来说,运输过程一般分为两个阶段: 润湿和毛细作用力运输过程,亲水气凝胶可以部分或全部被水润湿,提高其水通道运输速率。在用于太阳能光热转化的气凝胶制备中,改变其亲疏水性的方法通常有以下几点: 酸碱反应法、有机反应法、等离子体处理和热处理。

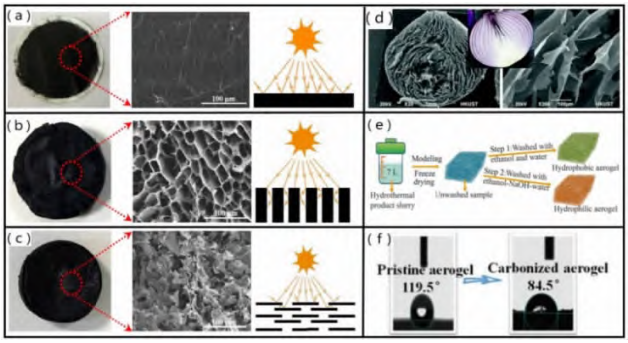

图 6　(a) 无垂直通道的 Janus MXene 气凝胶; (b) 带有垂直通道的 Janus MXene 气凝胶和(c) MXene 膜的实物图、SEM 图以及反射光的对比示意图[20]; (d) rGO 气凝胶杂化微珠的 SEM 图,插图为洋葱剖面图[55]; (e) HAP 纳米线气凝胶的亲疏水调控[59]; (f) 原始气凝胶与碳化气凝胶的水接触角变化[71]

Fig. 6 Picture, SEM diagram and diagram of reflected light of (a) Janus MXene aerogels; (b) Janus MXene aerogels with vertical channels and (c) MXene membrane[20]; (d) SEM images of hybrid beads based on rGO aerogels, the illustration shows the onion section[55]; (e) Schematic illustration of the preparation of the new kind of HAP nanowire aerogel[59]; (f) Water contact angles of the pristine and carbonized aerogels[71]

3.3.1 酸碱反应法

酸碱反应法是将气凝胶用酸或碱溶液浸泡或洗涤,通过与酸或碱发生化学反应从而调控其亲疏水性。对于碳材料,与酸碱发生反应会破坏其基本结构及表面形貌,降低结构有序性,并改变比表面积、孔体积等孔结构参数,同时改变其含氧官能团含量。碳表面氧含量增加会导致其极性增强,则亲水性增加,碳表面氧含量降低则正好相反。用过硫酸铵/硫酸溶液处理空心 CNT 气凝胶[25],可赋予其超亲水

润湿性，有利于水分子的快速运输，以增加光蒸汽转换效率。

对于其他材料，酸碱可以帮助洗去反应原料的残留物，进而调控亲疏水性。例如 HAP 纳米线气凝胶[39]表面亲疏水性可以通过不同的洗涤方法进行调节，如图 6(e)，将冻干样品浸入乙醇中以去除吸附在表面的油酸基团，由于静电作用只剩下一层油酸根离子，再用水洗涤，冷冻干燥后得到疏水性 HAP 纳米线气凝胶；而用 NaOH 洗涤则可以与表面吸附的油酸根离子反应，使其溶解，得到亲水性 HAP 纳米线气凝胶。

3.3.2 有机反应法

有机物可将其官能团嫁接在气凝胶上或与其发生其他化学反应，以改变其亲疏水性。植酸和 Fe^{3+} 在 MnO_2 纳米线表面可形成配位络合物得到 MnO_2 超亲水纳米线[102]，使得后续制备的气凝胶水传输效率大大提高。

硅烷偶联剂也是一种重要的表面处理剂，其中硅烷氧基对无机物具有反应性，有机官能基则对有机物具有反应性或相容性。因此，当硅烷偶联剂介于无机和有机界面之间，可形成有机基体-硅烷偶联剂-无机基体的结合层，则可以轻松调控气凝胶的亲疏水性。利用含氟烷基硅烷，将 MXene 气凝胶[20]上层改性为疏水，得到具有疏水上层和亲水底层的 Janus MXene 气凝胶，以防止海水盐分积累，堵塞孔道。Fe_3Si 气凝胶[40]用三甲基氯硅烷正庚烷溶液处理后得到疏水气凝胶，可用于高腐蚀性水蒸发。全氟辛基三氯硅烷[79]也是一种用于气凝胶亲疏水改性的表面处理剂。

3.3.3 等离子体处理

在众多的表面改性技术中，等离子体处理被认为是最有优势、最先进的表面改性技术，被广泛应用于聚合物的表面改性，处理后的表面性质如疏水性、化学结构、粗糙度和导电性等均进行了改性，以满足特定的要求。

等离子体处理可使材料表面部分化学键断裂，从而获得各种表面官能团和粗糙结构，以方便地改变表面的润湿性[103]。通过氧等离子体处理后，材料表面的接触角明显减小，获得了改性后亲水的石墨烯气凝胶[54]，可以有效促进水传输到蒸发表面。Fe_3O_4 改性的纤维素气凝胶[63]通过 O_2 等离子体活化得到了超亲水外表面和超疏水内部的 Janus 结构，外表面为超快供水和盐扩散提供了传输通道，而超疏水的内部则通过阻止水/盐的渗透起到隔热的作用，大大提高了其能量转换效率。

3.3.4 热处理

对于碳材料而言，在惰性气体中进行热处理能够除去含氧官能团，从而提高其疏水性。而对于聚合物气凝胶而言，在经过碳化处理后从疏水转变为亲水，其水接触角从 119.5°降为 84.5°[71]，如图 6(f)所示。

而石墨烯不同于其他碳材料，在氩气气氛下 550 ℃热脱附后，石墨烯/石墨的水接触角从 80°降至 55°，但是暴露于空气中后，碳氢化合物被快速吸附到石墨表面，从而恢复其表面疏水性[104-106]。N 掺杂的石墨烯气凝胶[104]随着热处理温度从 200 ℃增加到 1 000 ℃，气凝胶越来越亲水，并且能够在空气中保持数周的超湿润性能，这是由于水分子优先吸附在 N 掺杂的位置，显著抑制了空气中碳氢化合物的吸附。

4 总结与展望

轻盈质地、多孔网络、高比表面积赋予了气凝胶高光吸收、低热导和快速水输运的性能，作为一种极有潜力的光热材料在太阳能光蒸汽转化应用领域备受青睐。新型 ISVC 气凝胶的快速发展有助于我国“双碳”目标的推进与实现，此过程中许多具有优异光热转化性能的材料被开发出来。本文详细介绍了以碳材料为基础的碳气凝胶，如 GO 气凝胶、CNT 气凝胶等，作为目前研究成果最多的 ISVC 气凝胶表现出了高效的光蒸汽转化性能却仍受制于前驱体的高昂价格；生物质气凝胶如胡萝卜基、木材基气凝胶符合绿色化学的要求，具备制造成本低、环境友好、来源广泛等优势也存在保管条件高和亲水性差的问题；聚合物气凝胶材料成本低廉，适用于大规模整体制造但通常需要加入额外的光热材料；复合气凝胶可结合多种材料，是实现多功能、高性能气凝胶制备的最优选择。MXenes 和 HAP 等新材料的加入，更使得气凝胶在生物相容性、功能多样性和结构可设计性上有了进一步的拓展和提高。本文简要介绍了四种材料的光热转化机理，从 ISVC 气凝胶的热管理进一步地阐述了其结构设计原则，最后探讨了气凝胶的亲疏水改性方法。

虽然光热气凝胶已经取得重大进展，但现阶段

依旧存在以下问题:

(1) 气凝胶具有脆弱的骨架,尤其是 GO、MXene 等材料,即使通过加入某些改性材料,其机械强度仍然不足以满足某些实际应用;

(2) 在可扩展制造和在大面积水体中的使用中,仍需要将气凝胶进一步拓展。因此需要一种新的制备方法实现气凝胶的宏量制备,从而在大面积水体中可以应用并获得高效的太阳蒸汽;

(3) 气凝胶在一些污水和高盐度的海水蒸发应用中,不可避免地会造成材料的污染和盐分积累,从而破坏或堵塞气凝胶孔道导致蒸汽功能失效,如何提高其耐久性以适用于实际环境也是重要研究方向之一。

在追求气凝胶功能的全面性时,如何选择无机、有机材料与气凝胶进行复合、设计内部多孔结构、运输水汽通道、平衡蒸汽系统和制造成本之间的问题,都还在进一步地创新解决。但随着气凝胶在光热转化领域的发展,光热气凝胶在不久的将来会为解决人类水资源紧缺问题和太阳能资源利用等方面做出巨大的贡献。

参考文献:

[1] Wang C, Yan B, Zheng J, et al. Recent Progress in Template-Assisted Synthesis of Porous Carbons forSupercapacitors [J]. Advanced Powder Materials, 2022, 1(2): 100018.

[2] Jing H, Zhu P, Zheng X, et al. Theory-oriented screening and discovery of advanced energy transformation materials inelectrocatalysis [J]. Advanced Powder Materials, 2022, 1(1): 100013.

[3] Sun J,Guo N, Song T, et al. Revealing the interfacial electron modulation effect of CoFe alloys with CoCX encapsulated in N-doped CNTs for superior oxygen reduction [J]. Advanced Powder Materials, 2022, 1(3): 100023.

[4] Zhu L, Gao M,Peh C K N, et al. Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: Advanced designs and applications [J]. Nano Energy, 2019, 57: 507-518.

[5] Zhu L, Gao M,Peh C K N, et al. Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications [J]. Materials Horizons, 2018, 5(3): 323-343.

[6] Colangelo G, Favale E, De Risi A, et al. A new solution for reduced sedimentation flat panel solar thermal collector using nanofluids [J]. Applied Energy, 2013, 111: 80-93.

[7] Ladjevardi S M, Asnaghi A, Izadkhast P S, et al. Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption [J]. Solar Energy, 2013, 94: 327-334.

[8] Ghasemi H, Ni G, Marconnet A M, et al. Solar steam generation by heat localization [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4449.

[9] Gao M, Zhu L,Peh C K, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production [J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(3): 841-864.

[10] Hu X, Zhu J. Tailoring Aerogels and Related 3D Macroporous Monoliths for Interfacial Solar Vapor Generation [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(3): 40649.

[11] Wang H, Du A, Ji X, et al. Enhanced Photo-Thermal Conversion by Hot-Electron Effect in Ultra-Black Carbon Aerogel for Solar Steam Generation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11: 42057-42065.

[12] Chen Z, Dang B, Luo X, et al. Deep Eutectic Solvent-AssistedIn Situ Wood Delignification: A Promising Strategy To Enhance the Efficiency of Wood-Based Solar Steam Generation Devices [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(29): 26032-26037.

[13] Hu C S, Li H J, Wang J Y, et al. Mushroom-Like rGO/PAM Hybrid Cryogels with Efficient Solar-Heating Water Evaporation [J]. ACS Applied Energy Materials, 2019, 2(10): 7554-7563.

[14] Hu G, Cao Y, Huang M, et al. Salt-Resistant Carbon Nanotubes/Polyvinyl Alcohol Hybrid Gels with Tunable Water Transport for High-Efficiency and Long-Term Solar Steam Generation [J]. Energy Technology, 2020, 8(1): 1900721.

[15] Mu P, Bai W, Fan Y, et al. Conductive hollow kapok fiber-PPy monolithic aerogels with excellent mechanical robustness for efficient solar steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(16): 9673-9679.

[16] Storer D P, Phelps J L, Wu X, et al. Graphene and Rice-Straw-Fiber-Based 3D Photothermal Aerogels for Highly Efficient Solar Evaporation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(13): 15279-15287.

[17] Wu X, Robson M E, Phelps J L, et al. A flexiblephotothermal cotton-CuS nanocage-agarose aerogel towards portable solar steam generation [J]. Nano Energy, 2019, 56: 708-715.

[18] Zhang Z, Mu P, Han J X, et al. Superwetting and mechanically robust MnO_2 nanowire-reduced graphene oxide

monolithic aerogels for efficient solar vapor generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(30): 18092-18099.

[19] Qin DD, Zhu Y J, Chen F F, et al. Self-floating aerogel composed of carbon nanotubes and ultralong hydroxyapatite nanowires for highly efficient solar energy-assisted water purification [J]. Carbon, 2019, 150: 233-243.

[20] Zhang Q, Yi G, Fu Z, et al. Vertically Aligned JanusMXene-Based Aerogels for Solar Desalination with High Efficiency and Salt Resistance [J]. ACS Nano, 2019, 13(11): 13196-13207.

[21] Liu S, Huang C, Luo X, et al. High-performance solar steam generation of a paper-based carbon particle system [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 566-572.

[22] Zhang W, Guan H, Zhong T, et al. Wearable Battery-Free Perspiration Analyzing Sites Based on Sweat Flowing on ZnO Nanoarrays [J]. Nano-Micro Letters, 2020, 12(1): 105.

[23] Guo Z, Wang G, Ming X, et al. PEGylated Self-Growth MoS2 on a Cotton Cloth Substrate for High-Efficiency Solar Energy Utilization [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(29): 24583-24589.

[24] Liu J, Liu Q, Ma D, et al. Simultaneously achieving thermal insulation and rapid water transport in sugarcane stems for efficient solar steam generation [J]. Journal ofMaterials Chemistry A, 2019, 7(15): 9034-9039.

[25] Mu P, Zhang Z, Bai W, et al. Superwetting Monolithic Hollow-Carbon-Nanotubes Aerogels with Hierarchically Nanoporous Structure for Efficient Solar Steam Generation [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(1): 1802158.

[26] Hu N, Xu Y, Liu Z, et al. Double-layer cellulose hydrogel solar steam generation for high-efficiency desalination [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 243(1): 116480.

[27] Chen Q, Pei Z, Xu Y, et al. A durable monolithic polymer foam for efficient solar steam generation [J]. Chemical Science, 2018, 9(3): 623-628.

[28] Liu Z, Qing R K, Xie A Q, et al. Self-contained Janus Aerogel with Antifouling and Salt-Rejecting Properties for Stable Solar Evaporation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(16): 18829-18837.

[29] Meng X, Yang J, Ramakrishna S, et al. Gradient Vertical Channels within Aerogels Based on N-Doped Graphene Meshes toward Efficient and Salt-Resistant Solar Evaporation [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(12): 4955-4965.

[30] Wei Z, Cai C, Huang Y, et al. Biomimetic surface strategy of spectrum-tailored liquid metal via blackbody inspiration for highly efficient solar steam generation, desalination, and electricity generation [J]. Nano Energy, 2021, 86: 106138.

[31] Kistler S S. Coherent Expanded Aerogels and Jellies [J]. Nature, 1931, 127(3211): 741-741.

[32] Li W, Tian X, Li X, et al. Ultrahigh solar steam generation rate of a vertically aligned reduced graphene oxide foam realized by dynamic compression [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(26): 14859-14867.

[33] Kong Y, Dan H, Kong W, et al. Self-floating maize straw/graphene aerogel synthesis based on microbubble and ice crystal templates for efficient solar-driven interfacial water evaporation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(46): 24734-24742.

[34] Zhang P, Liao Q, Zhang T, et al. High throughput of clean water excluding ions, organic media, and bacteria from defect-abundant graphene aerogel under sunlight [J]. Nano Energy, 2018, 46: 415-422.

[35] Mu P, Bai W, Zhang Z, et al. Robust aerogels based on conjugated microporous polymer nanotubes with exceptional mechanical strength for efficient solar steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(37): 18183-18190.

[36] Li H, Wen H, Li J, et al. Doping AIEPhotothermal Molecule into All-Fiber Aerogel with Self-Pumping Water Function for Efficiency Solar Steam Generation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(23): 26033-26040.

[37] Gao M, Peh C K, Huy Thong P, et al. Solar Absorber Gel: Localized Macro-Nano Heat Channeling for Efficient Plasmonic Au Nanoflowers Photothermic Vaporization and Triboelectric Generation [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(25): 1800711.

[38] Farid M U, Kharraz J A, Wang P, et al. High-efficiency solar-driven water desalination using a thermally isolated plasmonic membrane [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271: 122684.

[39] Zhang Y G, Zhu Y J, Xiong Z C, et al. Bioinspired Ultralight Inorganic Aerogel for Highly Efficient Air Filtration and Oil-Water Separation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(15): 13019-13027.

[40] Zhang F, Li Y, Bai X, et al. Synthesis of mesoporous Fe_3 Si aerogel as a photothermal material for highly efficient and stable corrosive- water evaporation [J]. Journal of

Materials Chemistry A, 2018, 6(46): 23263-23269.

[41] Wu F, Liu D, Li G, et al. Bayberry tannin directed assembly of abifunctional graphene aerogel for simultaneous solar steam generation and marine uranium extraction [J]. Nanoscale, 2021, 13(10): 5419-5428.

[42] Sun A, Hou X, Hu X. Super-performance photothermal conversion of 3D macrostructure graphene-$CuFeSe_2$ aerogel contributes to durable and fast clean-up of highly viscous crude oil in seawater [J]. Nano Energy, 2020, 70: 104511.

[43] Cao P, Zhao L, Zhang J, et al. Gradient Heating Effect Modulated by Hydrophobic/Hydrophilic Carbon Nanotube Network Structures for Ultrafast Solar Steam Generation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(16): 19109-19116.

[44] Huang Z, Li S, Cui X, et al. A broadband aggregation-independentplasmonic absorber for highly efficient solar steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(21): 10742-10746.

[45] Wang C, Wang J, Li Z, et al. Superhydrophilic porous carbon foam as a self-desalting monolithic solar steam generation device with high energy efficiency [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(19): 9528-9535.

[46] **孟周琪. 有机/无机杂化纳米光热转化材料的合成及其在肿瘤治疗中的应用研究** [D]. **东华大学**, 2017.

[47] Gao M, Connor P K N, Ho G W. Plasmonic photothermic directed broadband sunlight harnessing for seawater catalysis and desalination [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(10): 3151-3160.

[48] Zhou L, Tan Y, Ji D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadbandplasmonic absorbers for solar steam generation [J]. Science Advances, 2016, 2(4): 1501227.

[49] Yang M Q, Tan C F, Lu W, et al. Spectrum Tailored Defective 2D Semiconductor Nanosheets Aerogel for Full-Spectrum-Driven Photothermal Water Evaporation and Photochemical Degradation [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(43): 2004460.

[50] Geng X, Zhang D, Zheng Z, et al. Integrated multifunctional device based on Bi2S3/Pd: Localized heat channeling for efficient photothermic vaporization and real-time health monitoring [J]. Nano Energy, 2021, 82: 105700.

[51] Jiang H, Geng X, Li S, et al. Multi-3D hierarchical biomass-based carbon particles absorber for solar desalination and thermoelectric power generator [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 59: 180-188.

[52] **陈宇超, 沙畅畅, 王心妤**, et al. **基于光热转化的吸收材料与转换机理研究进展** [J]. **能源研究与利用**, 2019, 004: 23-31, 55.

[53] **章潇慧, 于浩然. 光热转化材料的研究现状与发展趋势** [J]. **新材料产业**, 2019, 304(03): 64-75.

[54] Fu Y, Wang G, Ming X, et al. Oxygen plasma treated graphene aerogel as a solar absorber for rapid and efficient solar steam generation [J]. Carbon, 2018, 130: 250-256.

[55] Feng X, Zhao J, Sun D, et al. Novel onion-like graphene aerogel beads for efficient solar vapor generation under non-concentrated illumination [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(9): 4400-4407.

[56] Song J, Guo X, Zhang J, et al. Rational design of free-standing 3D porous MXene/rGO hybrid aerogels as polysulfide reservoirs for high-energy lithium-sulfur batteries [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(11): 6507-6513.

[57] Lin X, Chen J, Yuan Z, et al. Integrative solar absorbers for highly efficient solar steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(11): 4642-4648.

[58] Zhu L, Gao M, Peh C K N, et al. Self-Contained Monolithic Carbon Sponges for Solar-Driven Interfacial Water Evaporation Distillation and Electricity Generation [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(16): 1702149.

[59] Zheng X, Xing D, Zhou F, et al. Indocyanine Green-Containing Nanostructure as Near Infrared Dual-Functional Targeting Probes for Optical Imaging and Photothermal Therapy [J]. Molecular Pharmaceutics, 2011, 8(2): 447-456.

[60] Jiang Q, Derami H G, Ghim D, et al. Polydopamine-filled bacterial nanocellulose as a biodegradable interfacial photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(35): 18397-18402.

[61] **黄舜天, 锁　浩, 崔　升**, et al. **碳气凝胶在电化学领域中的应用研究进展** [J]. **材料导报**, 2018, 32(S1): 10-15+36.

[62] Yang J, Wang H, Zhou B, et al. Versatile Direct Writing of Aerogel-Based Sol-Gel Inks [J]. Langmuir, 2021, 37(6): 2129-2139.

[63] Li L, Hu T, Li A, et al. Electrically Conductive Carbon Aerogels with High Salt-Resistance for Efficient Solar-Driven Interfacial Evaporation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(28): 32143-32153.

[64] Qiu X, Xu D, Ma L, et al. Preparation of Manganese Oxide/Graphene Aerogel and Its Application as an Advanced

Supercapacitor Electrode Material [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12(3): 2173-2183.

[65] Luo G, Wang Y, Gao L, et al. Graphene bonded carbon nanofiber aerogels with high capacitive deionization capability [J]. Electrochimica Acta, 2018, 260: 656-663.

[66] Yu X, Wei Y, Liu C, et al. Ultrafast and deep removal of arsenic in high-concentration wastewater: A superior bulk adsorbent of porous Fe_2O_3 nanocubes-impregnated graphene aerogel [J]. Chemosphere, 2019, 222: 258-266.

[67] Chen M, Li Z, Geng Y, et al. Adsorption behavior of thorium on N,N,N′,N′-tetraoctyldiglycolamide (TODGA) impregnated graphene aerogel [J]. Talanta, 2018, 181: 311-317.

[68] 廖述驰，田丽蓉，何 苗, et al. 气凝胶微球的制备和应用 [J]. 高分子通报, 2017, (10): 33-40.

[69] Zhang C, Yuan B, Liang Y, et al. Solar vapor generator: A natural all-in-one 3D system derived from cattail [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 227: 111127.

[70] Zhu Z, Mu P, Fan Y, et al. Highly efficient solar steam generation ofbilayered ultralight aerogels based on N-rich conjugated microporous polymers nanotubes [J]. European Polymer Journal, 2020, 126: 109560.

[71] Liu J, Yang H, Liu K, et al. Gel-Emulsion-Templated Polymeric Aerogels for Water Treatment by Organic Liquid Removal and Solar Vapor Generation [J]. ChemSusChem, 2020, 13(4): 749-755.

[72] Long Y, Huang S, Yi H, et al. Carrot-inspired solar thermal evaporator [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(47): 26911-26916.

[73] Wilson H M, Ahirrao D J, Ar S R, et al. Biomass-derived porous carbon for excellent low intensity solar steam generation and seawater desalination [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 215(15): 110604.

[74] Chao W, Sun X, Li Y, et al. Enhanced Directional Seawater Desalination Using a Structure-Guided Wood Aerogel [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(19): 22387-22397.

[75] Li J, Zhou X, Jing Y, et al. Ionic Liquid-Assisted Alignment of Corn Straw Microcrystalline Cellulose Aerogels with Low Tortuosity Channels for Salt-Assistance Solar Steam Evaporators [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(10): 12181-12190.

[76] 陈 颖，邵高峰，吴晓栋, et al. 聚合物气凝胶研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(13): 55-62+70.

[77] Zuo L, Zhang Y, Zhang L, et al. Polymer/Carbon-Based Hybrid Aerogels: Preparation, Properties and Applications [J]. Materials, 2015, 8(10): 6806-6848.

[78] Zhang W, Sun H, Zhu Z, et al. N-doped hard carbon nanotubes derived from conjugated microporous polymer forelectrocatalytic oxygen reduction reaction [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2270-2280.

[79] Wen B, Zhang X, Yan Y, et al. Tailoringpolypyrrole-based Janus aerogel for efficient and stable solar steam generation [J]. Desalination, 2021, 516: 115228.

[80] Yang L, Li N, Guo C, et al. Marine biomass-derived composite aerogels for efficient and durable solar-driven interfacial evaporation and desalination [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 417(1): 128051.

[81] Zhu J, Xiong R, Zhao F, et al. Lightweight, High-Strength, and Anisotropic Structure Composite Aerogel Based on Hydroxyapatite Nanocrystal and Chitosan with Thermal Insulation and Flame Retardant Properties [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(1): 71-83.

[82] Ming X, Guo A, Zhang Q, et al. 3D macroscopic graphene oxide/MXene architectures for multifunctional water purification [J]. Carbon, 2020, 167: 285-295.

[83] Jiang F, Liu H, Li Y, et al. Lightweight, Mesoporous, and Highly Absorptive All-Nanofiber Aerogel for Efficient Solar Steam Generation [J]. ACS Applied Materials &Interfaces, 2018, 10(1): 1104-1112.

[84] Zou Y, Zhao J, Zhu J, et al. A Mussel-InspiredPolydopamine-Filled Cellulose Aerogel for Solar-Enabled Water Remediation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(6): 7617-7624.

[85] Tan M, Wang J, Song W, et al. Self-floating hybrid hydrogels assembled with conducting polymer hollow spheres and silica aerogelmicroparticles for solar steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(3): 1244-1251.

[86] Li J, Jing Y, Zhou X, et al. Multifunctionalphotothermal materials based on natural pumices for high efficiency solar-driven interface evaporator [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(14): 20132-20142.

[87] Mu P, Song L, Geng L, et al. Aligned Attapulgite-based aerogels with excellent mechanical property for the highly efficient solar steam generation [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 271: 118869.

[88] Huang Z, Wan Y, Liang J, et al. Multi-Synergistic Removal of Low-Boiling-Point Contaminants with Efficient

Carbon Aerogel-Based Solar Purifier [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(27): 31624-31634.

[89] Chen M, Lin X, Zeng C, et al. Poly(p-phenylene benzobisoxazole) nanofiber/reduced graphene oxide composite aerogels toward high-efficiency solar steam generation [J]. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 612: 125997.

[90] Fang Q, Li T, Chen Z, et al. Full Biomass-Derived Solar Stills for Robust and Stable EvaporationTo Collect Clean Water from Various Water-Bearing Media [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(11): 10672-10679.

[91] Gao W, Wen D. Recent advances of noble metal aerogels inbiosensing [J]. VIEW, 2021, 2(3): 20200124.

[92] Xu K, Wang Q. Simple self-organization-based synthesis of gold nanoparticle-implantedZnO aerogels with good sensing performance to gaseous ethanol [J]. Nanotechnology, 2022, 33(21): 215601.

[93] Zhao X, Peng L M, Tang C Y, et al. All-weather-available, continuous steam generation based on the synergistic photo-thermal and electro-thermal conversion by MXene-based aerogels [J]. Materials Horizons, 2020, 7(3): 855-865.

[94] Harris K J,Bugnet M, Naguib M, et al. Direct Measurement of Surface Termination Groups and Their Connectivity in the 2D MXene V_2CT_x Using NMR Spectroscopy [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119(24): 13713-13720.

[95] Van-Tam N, Min B K, Yi Y, et al. MXene($Ti_3C_2T_X$)/graphene/PDMS composites for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding skins [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 393: 124608.

[96] Zhao S, Zhang H B, Luo J Q, et al. Highly Electrically Conductive Three-Dimensional Ti3C2TX MXene/Reduced Graphene Oxide Hybrid Aerogels with Excellent Electromagnetic Interference Shielding Performances [J]. ACS Nano, 2018, 12(11): 11193-11202.

[97] Zhang X,Lv R, Wang A, et al. MXene Aerogel Scaffolds for High-Rate Lithium Metal Anodes [J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2018, 57(46): 15028-15033.

[98] Li L, Zhang M, Zhang X, et al. New Ti_3C_2 aerogel as promising negative electrode materials for asymmetric supercapacitors [J]. Journal of Power Sources, 2017, 364: 234-241.

[99] 张贺新, 赫晓东, 何　飞. 气凝胶隔热性能及复合气凝胶隔热材料研究进展 [J]. 材料工程, 2007, (S1): 94-97.

[100] Ye G, Wan Y, Wu J, et al. Multifunctional device integrating dual-temperature regulator for outdoor personal thermal comfort and triboelectricnanogenerator for self-powered human-machine interaction [J]. Nano Energy, 2022, 97: 107148.

[101] Li N,Qiao L, He J, et al. Solar-Driven Interfacial Evaporation and Self-Powered Water Wave Detection Based on an All-Cellulose Monolithic Design [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(7): 2008681.

[102] Wang C, Liang W, Yang Y, et al. Biomass carbon aerogels based shape-stable phase change composites with high light-to-thermal efficiency for energy storage [J]. Renewable Energy, 2020, 153: 182-192.

[103] Reddy AB , Reddy G S M , Sivanjineyulu V, et al. Hydrophobic/Hydrophilic Nanostructured Polymer Blends [J]. Design & Applications of Nanostructured Polymer Blends & Nanocomposite Systems, 2016: 385-411.

[104] Deng X,Nie Q, Wu Y, et al. Nitrogen-Doped Unusually Superwetting, Thermally Insulating, and Elastic Graphene Aerogel for Efficient Solar Steam Generation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(23): 26200-26212.

[105] Martinez-Martin D,Longuinhos R, Izquierdo J G, et al. Atmospheric contaminants on graphitic surfaces [J]. Carbon, 2013, 61: 33-39.

[106] Kozbial A, Zhou F, Li Z, et al. Are Graphitic Surfaces Hydrophobic? [J]. Accounts of Chemical Research, 2016, 49(12): 2765-2773.