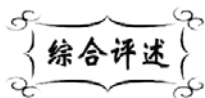


中图分类号: TM914.4
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2019) 04-0235-21
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2019.04.002



新型太阳能蒸汽系统及光热材料研究进展

苗蕾, 邓梓阳, 周建华, 刘朋飞, 刘静

桂林电子科技大学材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004

摘要: 新型太阳能蒸汽技术是一种绿色环保的太阳能光热利用技术, 因其简单高效且应用前景广泛而备受关注。高效的太阳能蒸汽系统应该同时具有优异的热管理能力、水输入和水蒸发性能以及具有宽光谱吸收光热层。本文首先从新型太阳能蒸汽系统出发, 介绍分散型和漂浮型蒸汽系统, 并阐述了两种蒸汽系统的基本原理、各自特点以及系统装置的研究进展; 而后较为详细地介绍了各类光热材料的性能、光热转换机理及制备方法; 最后探讨了新型太阳能蒸汽系统目前存在的问题以及今后的主要研究方向。

关键词: 太阳能; 蒸汽系统; 光热材料; 水处理

Research Progress of Emerging Solar-Driven Steam Generation System and Photothermal Materials

MIAO Lei, DENG Zi-Yang, ZHOU Jian-Hua, LIU Peng-Fei, LIU Jing

School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract: Emerging solar steam generation is an environment-friendly solar thermal utilization technology, which attracts much attention from the public owing to its high efficiency and wide application areas. Efficient solar steam generator must have the low thermal conductivity, the high efficiency water transportation and evaporation, and the photothermal materials with broadband sunlight absorbability. Based on the types of emerging solar-driven steam generation system (SSGS), this review firstly introduces the suspending SSGS and the floating SSGS and explain their fundamental mechanism, operation trait and research progress. Then the properties, photothermal conversion mechanism and preparation methods of various photo-thermal materials are be presented. Finally, the existing problems of the SSGS and the main research directions about this field are discussed.

Keywords: Solar energy; Steam generation system; Photothermal material; Water treatment

收稿日期: 2018-10-23

收到修改稿日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51572049, 51602068); 广西自然科学基金 (2015GXNSFFA139002)。

通讯作者: 苗蕾 (1972-), 女, 辽宁锦州人, 教授。E-mail: miaolei@guet.edu.cn。

水是生命之源。无论是日常生活还是农业种植或工业生产, 水资源的质与量都起着至关重要的作用。随着人口数量的增加以及人们生活水平的提高, 各种工业废水、生活污水的直接排放使得大量水体受到污染, 加剧了水资源短缺。太阳能水蒸发是一种传统的太阳能热利用技术, 可用于生成纯净水, 在解决水资源短缺问题的同时, 减少化石能源的使用, 避免对环境造成污染。

传统的太阳能水蒸发技术是对液体整体进行加热。但由于水分子仅吸收红外光波段的太阳光, 且蒸发仅发生在气液界面间, 从而导致蒸汽产生效率极低。近年来, 随着新材料的发明以及新技术的发展, 科学家们提出了将光热转化材料用于太阳能水蒸发的观点^[1]。

1 太阳能利用

能源是人类生活、生产的重要物质基础, 对国家的经济发展与国家安全有重要的影响。近年来, 我国能源消费总量逐年上升, 国家对环境保护也日益重视, 积极推动可再生能源及清洁能源的利用, 以减少能源使用对环境造成污染。太阳能是地球上最基本的能源, 绝大部分的能源都直接或者间接地来源于太阳辐照 (图 1)。同时, 太阳能具有分布范围广、无穷无尽、绿色安全等优点, 是一种具有广泛应用前景、被视为可取代传统化石能源的清洁能源。

1.1 太阳光谱及能量分布

太阳是一颗恒星, 通过其内部时刻发生的核聚变向空间周围不断发射电磁辐射。太阳光谱用以描述太阳辐射的电磁波能量与波段之间的关系。太阳辐射的绝大部分能量主要分布在 $0.15\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$ 波段范围。波段位于 $0.4\ \mu\text{m} \sim 0.75\ \mu\text{m}$ 范围内的电磁辐射由于可以被人类视网膜所接受, 被称为可见光, 约占太阳总辐射能量的 43%。波段范围大于 $0.75\ \mu\text{m}$ 属于红外光, 约占太阳总辐射能量的 50%。波段范围小于 $0.4\ \mu\text{m}$ 的属于紫外光, 占太阳总辐射能量最少, 仅为 7% 左右^[3]。

每年到达地球表面的太阳能辐射为四百万艾焦耳 ($1\ \text{艾焦耳} = 10^{18}\ \text{J}$), 而其中约有 5 万艾焦耳是容易获得的^[4]。丰富的太阳能资源可以满足地球上所有的社会生活及工业应用等需求。从图 2 可以看出, 全球的太阳能消耗量从 2000 年至 2016 年, 呈指数形式的增长。

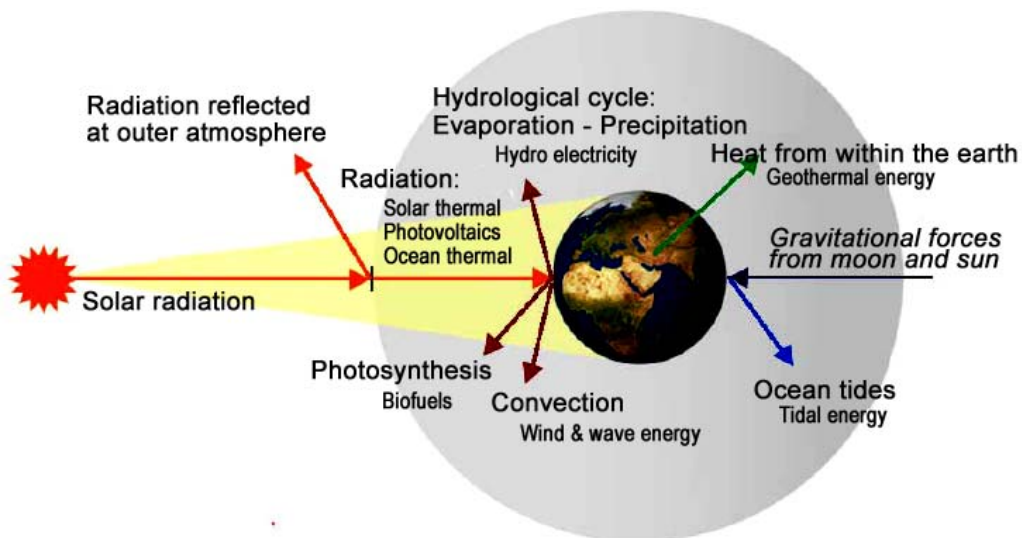


图 1 可再生能源的三种来源^[2]
Figure 1 Three sources of renewable energy^[2]

1.2 太阳能利用方式

能量的收集、存储、运输、转换及利用一直是科学及社会的研究与发展热点。目前,太阳能的利用主要有以下三种基本方式:太阳能光伏、太阳能光热以及太阳能光化学。

(1) 太阳能光伏应用: 太阳能光伏应用是一种将太阳能直接转化成为电能的太阳能利用形式,其原理是基于光生伏打效应。基本上,光伏器件核心在于以半导体 $p-n$ 结为基本结构的光吸收层。由于 p 型半导体和 n 型半导体的功函数不同,在两者界面处会形成内建电场。当太阳光照射至太阳能电池活性吸收层上,能量高于能带间隙的光子被吸收,产生空穴-电子对。在内建电场的作用下,载流子分别在相应的势垒区边界积累,重新形成电场,从而产生光电压。 $p-n$ 结与外部负载连接形成通路后则产生电流^[6]。

自 1839 年光生伏打效应第一次被 Becquerel 发现至今,科学家们对光生伏打效应的机理解释、新吸光材料的制备、新型太阳能电池结构设计和太阳能电池性能评估等进行了不断的探索。目前而言,得到研究的太阳能电池主要有晶体硅电池、有机太阳能电池、钙钛矿太阳能电池和薄膜太阳能电池等。

晶体硅太阳能电池的研究时间最长、技术最为成熟,已投入生活、生产中使用。目前,企业所使用的硅电池光电转换效率约为 16% (理论上说,晶体硅太阳能电池的最高转换效率为 29.1%)。日本 Yoshikawa 等人^[7]报道了利用工业兼容方法制备大面积晶体硅太阳能电池,结合了交叉接触及无定形硅/多晶硅异质结的优点,对于面积仅有 180.4 cm² 的器件,其整体光电转化效率达到 26%。苏州大学孙宝全课题组^[8]利用钙钛矿纳米颗粒对短波长的吸收所形成的局域电场,使载流子在电极上被收集;将钙钛矿纳米颗粒与 n 型晶体硅结合得到具有“场效应”的太阳能电池,其电池转换效率与参比电池相比,提升了 12%。

2008 年, Kojima 等人^[9]首次报道了钙钛矿 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 太阳能电池,得到了 2.2% 的电池效率。钙钛矿材料具有制备简单、对太阳光吸收能力强和载流子复合速率低等优点而被科学界所追捧。2017 年,韩国科学家^[10]将碘负离子加入至有机阳离子溶液中,通过分子内交换过程形成钙钛矿层。结果表明,碘负离子的引入有助于减少高能缺陷的浓度,从而使得电池转换效率达到 22.1%,该转换效率为目前最高。

大规模地使用钙钛矿太阳能电池,除了要求其具有高的电池转换效率外,还需要有好的稳定性及均一性等特点。Chen 等人^[11]利用无溶剂非真空的气体驱动挤压方法制备出了面积大且均匀性好的钙钛矿太阳能电池。经过认证,面积为 36.1 cm² 的钙钛矿太阳能电池具有 12.1% 的电池转换效率。Mali 等人^[12]用共沉淀法制备了以纳米多孔 p 型 NiO_x 作为空穴传输层的倒装式钙钛矿太阳能电池;同时以 n 型 ZnO 作为掩盖层,有效地避免了银电极向电子传输层的原子扩散,从而增加了钙钛矿太阳能电池在空气中的稳定性。

尽管太阳能光伏技术可以直接将光能转化为电能,但其高昂的造价成本是制约其进一步发展的重要因素。对于偏远山区或者是电网难以架接的地区,太阳能电池的使用不失为一个很好的解决能源问题的方法。

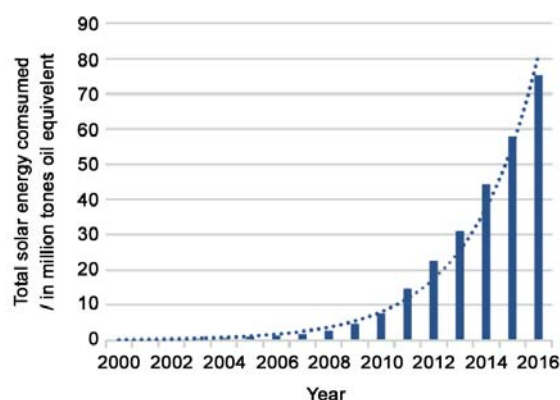


图2 全球太阳能消耗量 (百万吨石油当量)^[5]
Figure 2 Total solar energy consumed in million tones oil equivalent

(2) **太阳能光热应用:** 相对于太阳能光伏应用而言, 太阳能光热应用增加了对近红外波段的吸收, 因此其对太阳光的能量利用效率更高。根据太阳能光热的应用形式不同, 其对应的工作温度范围也不同, 一般分为高温区、中温区及低温区。

太阳能集热器用于吸收太阳光并将热量传递给工作介质, 是太阳能光热应用系统的重要组成部分, 可以分为平板式太阳能集热器和真空管式太阳能集热器两大类。同时, 根据是否聚光可以分为聚光式及非聚光式太阳能集热器。

真空管式集热器是在真空 U 型管内侧管壁底部覆盖一层太阳能选择性吸收涂层, 同时在其内部插入一铜管以增加热传导。当太阳光照射到太阳能选择性吸收涂层表面, 太阳光被吸收且转化为热量, 产生的热量通过铜管传递给工作介质, 对流体进行加热^[13]。对于选择性吸收涂层, 由于其自身特殊的结构, 在可见光至近红外波段具有极高的太阳光吸收率, 而在远红外波段则具有极低的热发射率^[14]。因此, 该涂层可以在较高的温度下减少因辐射换热而传递的热量。

在居民日常生活及工业生产中, 太阳能对水进行加热是一种低成本且高效的低温太阳能热利用方式。太阳能热水器系统由两部分组成: 集热单元和储热单元。集热单元的核心是带有选择性吸收涂层的吸收板。针对水的热容比较大, 需要长时间或者高光强的照射才能使水温有所上升的问题, 太阳能热水器系统可以分为主动式与被动式。主动式太阳能热水器系统是指直接利用太阳能对水进行加热, 而被动式太阳能热水器系统则是通过热传导介质来加热水^[15]。

高温太阳能热利用 (如太阳能热发电) 所使用的一般为聚光型集热器。太阳能热发电系统通过大量的反射镜将太阳光反射并聚集在集热器, 太阳光被集热器所吸收转化为热能, 接着通过换热系统将热量用于产生高温高压蒸汽; 最后, 蒸汽推动汽轮机运作从而大规模发电^[16]。由于技术的进步、

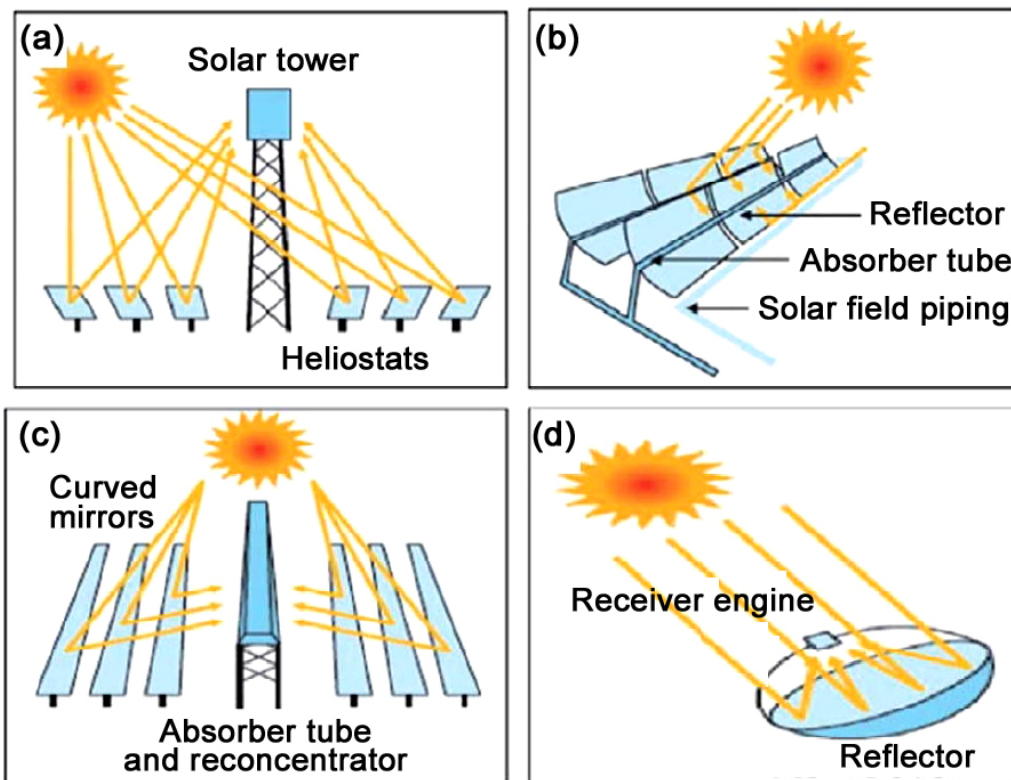


图 3 太阳能热发电系统^[17]: (a) 塔式系统; (b) 槽式系统; (c) 线性菲涅尔系统; (d) 蝶式系统
Figure 3 Solar thermal power systems: (a) tower-based system; (b) trough-based system;
(c) linear Fresnel-based system; (d) dish-based system

国家政策的推动以及对能源的需求, 太阳能热发电技术在过去的几年间得到快速发展。根据反射聚光形式不同, 集热器可以分为线聚焦系统及点聚焦系统。前者可以获得较高的光学聚光比。而根据反光镜的几何构型及位置的不同, 集热器也可以分为塔式系统、槽式系统、线性菲涅尔系统和蝶式系统 (图 3)。

通常, 太阳能热发电系统由集热系统、换热系统、发电系统及储热系统组成。不同的聚光形式决定了其局部的温度范围。图 3 所示四种聚光式太阳能热发电系统的最高局部温度依次分别是大于 1000°C、550°C、550°C 及 1200°C。

由于地球自转现象, 太阳的方位角会时刻发生变化, 因此在太阳能热发电系统中需要使用追踪装置以跟踪太阳方位角度变化, 提高聚光式太阳能集热器的收集效率。同时, 考虑到多变的天气条件和电能产生及使用在时间上的不匹配, 还会使用蓄热系统 (显热蓄热、潜热蓄热和化学蓄热等) 将来自集热器的部分热量进行存储, 以备使用。

(3) 太阳能光化学应用: 太阳能光化学应用是指将太阳能转化为化学能的一种技术。当分子通过直接或者间接方式吸收光子能量时会变成激发态, 容易发生化学反应。光化学反应分为光分解反应与光化合反应^[18]。

地球上水资源丰富, 同时氢能属于一种清洁能源, 因此通过光催化作用将水催化分解为氧气与氢气是一种极具应用前景的能源转换技术。可以用于光催化水分解的材料一般是半导体材料 (如 TiO₂、ZnO、Cu₂S 等)。根据固体物理理论, 半导体材料的电子结构中存在价带和导带, 因此可以吸收能量高于带隙的光子。若要实现光催化水分解反应, 则要求相应半导体材料价带与导带满足一定条件。其基本原理是当光子的能量高于半导体的带隙时, 光子便被吸收。半导体中价带电子吸收能量后激发跃迁至导带, 产生空穴-电子对。电子和空穴各自向材料表面迁移与反应。导带的电子载流子将水分子中的氢离子还原为氢气, 同时价带的空穴载流子将水分子中的氧负离子氧化为氧气, 从而达到催化光解水产生氢气和氧气的目的^[19]。

在自然界中, 最普遍的光化学应用是植物的光合作用。杨培东课题组^[20]在 2016 年首次实现了人工光合作用, 他们通过化学沉积法将硫化镉纳米颗粒沉积在热醋穆尔氏菌体表面。由于硫化镉纳米颗粒具有合适的用于光反应合成的能带结构, 它可以吸收部分光能, 形成空穴-电子对。电子转移运输至热醋穆尔氏菌体内, 通过 Wood-Ljungdahl 方式, 一方面将二氧化碳合成醋酸, 另一方面, 半胱氨酸则吸收空穴载流子形成胱氨酸。

1.3 太阳能在水处理方面应用

人体的 70% 由水组成。正常一个成年人饮用水的消耗量为每天 2 L ~ 4 L, 婴儿为每天 0.75 L^[21]。在人类文明史发展的开端, 四大文明古国无一不是沿着江河而建立并发展起来的。目前而言, 水资源安全是最受关注的全球性问题之一。据联合国相关组织统计, 到 2050 年全球将有 80 亿人口。随着人口的激增以及居民生活品质的提升, 淡水的需求量将会是目前的两倍甚至四倍。在其他国家和地区, 由于自然气候环境以及近年来厄尔尼诺现象的影响, 可以从自然界中获得的纯净水资源日趋减少, 而用于生活、生产的水资源消耗却不断增多。农业用水主要用于农作物灌溉以确保其生长。全球能源的获取、处理及运输也同样需要消耗大量的水。据统计显示^[22], 在所有水资源的消耗量当中, 70% 用于农业灌溉, 20% 用于工业生产, 而仅有 10% 用于居民生活。

根据世界卫生组织的规定^[23], 可饮用水中允许的盐度为 500 ppm。尽管地球表面 71% 被海洋所覆盖, 但基本上都是含有一定盐度的水 (水的盐度范围为 35000 ppm ~ 45000 ppm), 不适宜直接饮用。而大部分的淡水资源是在两极冰川或者山上积雪中, 难以被开发利用。人类只能利用未被污染的地表水或地下水进行饮用。然而, 随着农业、工业的发展及生活废水的排放, 部分可以利用的淡水资

源受到了污染, 从而加剧了水资源危机。

太阳能是一种储量极其丰富的可再生清洁能源。随着技术的发展, 太阳能可以用于海水淡化及污水处理等方面, 以缓解水资源短缺危机。下面将对太阳能在海水淡化及污水处理中的应用情况进行简要介绍。

(1) 太阳能海水淡化: 根据历史记载^[22], 最早的太阳能海水蒸发技术出现在 15 世纪, 是由一名阿拉伯炼金术师所提出的。传统的海水淡化方法分为膜蒸馏法 (电渗析和反渗透膜法) 与非膜蒸馏法 (多效蒸馏法和多级闪蒸法等)^[24]。膜蒸馏过程中需要外部系统通过使用化石能源来提供电能或者压力以实现海水淡化。非膜蒸馏法则将化石能源作为热源, 将海水进行加热蒸发, 然后再冷凝。然而, 化石能源在使用过程中所排出的温室气体及污染物将对环境造成极大的破坏。在太阳光充足且海水资源丰富的地区, 将太阳能技术与海水淡化技术相结合, 则可以同时解决环境污染以及饮用水短缺问题。

根据集热系统与脱盐系统是统一还是分离的空间关系, 太阳能海水淡化技术可以分为直接式和间接式两类^[25]。间接式系统一般是基于太阳能热效应或太阳能光效应^[26]。太阳能光效应是指将海水淡化装置与太阳能光伏技术相结合, 通过太阳能光伏转化的电能以提供如电渗析或反渗透技术中电力的使用。太阳能热效应则是利用集热器将光能转化热能, 加热海水进行蒸发。

太阳池是模拟自然界中水循环过程的一种海水淡化技术。其具体过程是: 海水通过吸收太阳光加热后产生蒸汽; 蒸汽在盖板处冷凝为水, 随后被收集。一般会把太阳池内表面涂成黑色, 以增加系统对太阳光的吸收。根据是否存在额外的加热方式, 太阳池可以分为主动式与被动式两大类。主动式太阳池可以通过减少蒸发液体量, 将黑色染料投放至水体中或者减少边界热损失以加强其热效应或者淡水产量。而被动式则是通过额外的加热以增加进入系统内部的热能, 从而提升太阳池纯水的产量。在太阳池中, 产生的蒸汽如果得不到及时冷凝就会使得系统内部湿度增加, 降低液体蒸发速率。此外, 蒸汽在冷凝板表面放热液化, 减小了蒸汽与冷凝板之间的温度差异, 降低了气体的冷凝效果, 这些都会使得系统整体的纯水获得量减少^[27]。

太阳能多级闪蒸法主要是在集热系统中, 利用太阳能集热器将太阳能转变为热能, 热量用于加热海水, 将具有一定温度的海水注入蒸发系统中。蒸发系统内部的压力因抽真空原因而小于液体蒸汽压, 从而加速液体汽化。

太阳能多效蒸发法是将多个单蒸发器串联使用, 同时后一个蒸发器的内部蒸汽压低于前一个蒸发器。其对海水的加热方式与太阳能多级闪蒸法相同, 不同点在于, 前一个蒸发器产生的二次蒸汽通过管道进入在下一级蒸发器中时, 蒸汽与海水进行热交换, 从而使管内蒸汽进行液化, 同时其液化过程中释放的温度用于该级液体的加热蒸发。相对于太阳能多级闪蒸法, 该方法可以极大减少热能的用量^[28]。

太阳能反渗透法的核心部件在于半透膜, 其仅仅可以让溶剂分子通过, 而溶质分子却无法通过。根据道南平衡, 当半透膜放置在海水与淡水之间时, 由于渗透压的存在, 水分子会自发地从淡水一侧向海水一侧移动。然而, 当作用在海水侧的外力大于渗透压时, 水分子则会反向地从海水一侧向淡水一侧渗透。在通常的反渗透法海水淡化过程中, 其需要 2.5 kWh/m^3 的增压能量, 该能量由电力驱动的高压泵获得。而在太阳能反渗透法中, 太阳能光伏技术将太阳光以聚焦形式在太阳能电池中转化电能, 从而推动高压泵运转。海水在经过半透膜之前需先进行前处理工序, 以避免海水中的杂质对半透膜造成腐蚀或者污染, 从而提高其脱盐效率及延长使用寿命。

由于海水淡化的普通电渗析法是将阴离子交换膜和阳离子交换膜放置在海水水体内部, 在直流电场驱动作用下, 海水中的阴阳离子做定向运动, 同时, 离子交换膜的存在使得电池中部海水的阴阳离子浓度降低, 从而实现海水淡化。对于太阳能电渗析法, 其电力来源是通过太阳能光伏技术而

得到的。

目前而言, 尽管太阳能海水淡化技术已经可以使用, 然而由于其制造成本高昂、系统体积庞大, 不利于在偏远、贫困地区甚至是家庭使用。

(2) 太阳能污水处理: 随着农业与工业的发展, 水体污染问题越来越受到社会重视。在农业灌溉中, 大部分污染物 (如重金属离子、难降解有机物、氨氮、化学需氧量、挥发酚等) 未经处理直接排放进入水体中, 对环境造成破坏。难降解有机物具有剧毒性, 也可能诱变癌症。重金属离子具有富集效应, 一旦排放进入水体便会随着食物链转移至人体内并集聚。若重金属离子在人体内浓度超过一定限度, 则致使人的神经系统衰竭和肾功能缺失, 甚至会导致人类死亡。因此, 对在生产过程中产生、造成的污水进行排放前的处理刻不容缓。传统的污水处理方法有吸附法、絮凝法、高级氧化法、反渗透法等^[29]。

对于重金属而言, 其原子质量在 63.5 至 200.6 之间, 比重大于 $4 \text{ g/cm}^3 \pm 1 \text{ g/cm}^3$ ^[30], 主要源于印刷电路板、木头处理厂、印染工业、皮革厂等化工制造业。吸附法与膜过滤法由于具有强的重金属处理能力、便于操作以及低能耗^[31]等特点而被视为最有发展前景的重金属污水处理技术。

根据吸附的起因, 吸附法可分为化学吸附法、物理吸附法和生物吸附法。传统的重金属离子吸附剂有活性炭、沸石、生物材料及工业固体废弃物等。新型纳米材料 (如碳纳米管、石墨烯及其衍生物、纳米氧化铁、氧化钨等) 具有大的比表面积、强的表面活性及特殊的亲和力, 因此在重金属离子吸附中表现出比块体材料更强的吸附能力^[32]。同时, 吸附质原始浓度、温度、pH 值、吸附剂量、接触时间、搅拌速度等因素都会影响重金属离子的去除效果。

可以根据膜的孔径大小, 膜过滤法可以分为超滤法 (5 nm ~ 20 nm)、纳滤法 (0.5 nm ~ 2 nm) 和反渗透法等。前两种方法的原理是通过滤膜孔径大小来阻隔相应大小、含有重金属离子的大分子, 而水分子或者小分子则可以通过滤膜。对于超滤法, 可以通过向污水中添加表面活性剂, 使得重金属离子被包裹在胶束或者聚合物大分子中形成大颗粒。由于该颗粒粒径过大, 无法通过滤膜, 从而实现重金属离子的去除。反渗透法的原理与半渗透膜进行海水淡化的原理类似, 此处不再赘述。

难降解有机物一般是通过高级氧化法或生物降解法进行降解, 使之转变为无毒的有机小分子, 再将处理过后的水体排放至环境。也或者通过生物吸附法, 将难降解有机物进行吸附。

高级氧化法是指利用具有强氧化性的羟基自由基进攻有机污染物、使之完全降解的一种方法^[33]。羟基自由基具有极强的氧化性, 可以通过臭氧分子、芬顿或光/芬顿法、光催化氧化法产生。

芬顿法是由法国科学家 Fenton 于 1894 年在研究氢离子对过氧化氢氧化酒石酸的过程中所提出的一种高级氧化法。其核心反应是 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应, 生成 Fe^{3+} 、 OH^- 和 OH^\bullet , 而后羟基自由基与有机污染物进行反应。同时, 为了提高普通芬顿法体系中 H_2O_2 的有效利用率, 实验会在反应过程中使用紫外光或者可见光, 以促进产生更多的 OH^\bullet 。

光催化法降解有机污染物的原理与太阳能光化学分解水是类似的, 都是利用可吸收紫外光或者可见光的半导体材料在光照下产生空穴-电子对以进行氧化还原反应。二氧化钛由于制备工艺成熟、成本低和化学性质相对稳定而一直被用于光催化降解有机物的研究。

在含有重金属离子的污水处理过程中, 太阳能主要用作动力源, 通过光电或者光热电转换以提供电能, 减少在原来污水处理技术中对化石能源的依赖与消耗。而对于难降解有机物的污水处理, 太阳光则用于激发羟基自由基的产生, 在实际处理中, 以光催化 TiO_2 反应及 UV/Fenton 反应为主要的对象^[34]。

然而, 目前大多数的废水都是含有多种污染物。若要将全部污染物去除则要求多种方法、技术的联合使用, 这无疑增加了成本与操作的复杂性。因此, 需要提出一种可以同时处理多种污染物的方法, 以达到简单、高效的污水处理效果^[34]。

2 新型太阳能蒸发系统

在自然界中, 水从液态变为气态是一种十分普遍的相变现象。以太阳能驱动水的蒸发直接获得蒸汽从而获得纯净水是一种常见的太阳能热利用形式。蒸发与冷凝是同一相变过程的两个相反方向, 同时一定温度的蒸汽自身也带有一定的能量, 可以用于物质分离、动力输送。因此, 太阳能水蒸发技术在大规模发电、海水淡化、污水处理、医疗消毒、蒸馏分离等方面均有着广泛的应用前景, 对于沿海、偏远、贫困地区的淡水获取及医疗卫生均具有现实意义。

在工业应用中, 蒸汽获取有两种方式。一种方式是通过燃烧煤炭或者其他化石能源、生物残余物来加热水, 从而产生蒸汽。另一种方式则是利用多个反射镜来聚焦太阳光, 从而加热水产生蒸汽。然而, 使用聚光方式进行集热会使得整个太阳能水蒸发系统造价高且效率低。在过去几十年间, 科学家们致力于研究、发展及优化太阳能水蒸发系统, 提出了更高效、更简易的太阳能水蒸发系统, 有助于加快液体的蒸发。例如将黑色塑料膜放置在太阳能海水池的内表面底部或者将水池内表面涂黑, 以增强其对太阳光的吸收, 然而该方法仅能使蒸汽产生速率提升 10%。2011 年, Zeng 等人^[1]提出了利用漂浮的、具有强光吸收能力的磁性碳纳米材料使得太阳能水蒸发速度加快。类似地, Neumann 等人^[35]提出了将贵金属纳米材料作为光热转化中心, 设计了分散型太阳能水蒸发系统。

近年来, 科学家们提出了一种新型太阳能水蒸发系统 (Solar-Driven Steam Generation System, SSGS), 它相比于传统的太阳能水蒸发系统而言具有以下特点: (1) 通过向待蒸发液体中加入光热转化材料, 以克服因水的比热容过大而导致液体升温过慢的问题; (2) 光热转化材料与液体之间紧密接触, 可以使得转化得到的热量直接传导给周围的液体, 减少因经过传热介质而引起的热量损失; (3) 这种新型的太阳能水蒸发系统, 操作简单、结构简易且蒸汽产生效率高, 适用于在偏远地区或者贫困地区使用。

根据光热转化材料与待蒸发液体的空间位置关系, 新型的太阳能水蒸发系统可以分为分散型太阳能水蒸发系统和漂浮型太阳能水蒸发系统两大类^[36] (图 4)。在分散型太阳能水蒸发系统中, 光热材料 (如贵金属纳米颗粒、碳材料等) 通过添加合适的表面活性剂, 使之分散在水里面 (相当于形成纳米流体)。而在漂浮型太阳能水蒸发系统中, 光热材料通过疏水改性或者沉积在亲水性漂浮层表面, 形成的光热转化层漂浮在气-液界面。

为了评价系统的太阳能水蒸汽性能, Ni 等人^[37]提出以下公式计算蒸汽效率 η :

$$\eta = \frac{\dot{m}h_{LV}}{c_{opt}q_i} \quad (1)$$

式中, \dot{m} 为在标准大气压下水的质量速率通量, $c_{opt}q_i$ 为太阳光模拟器的光功率密度, h_{LV} 为水的全

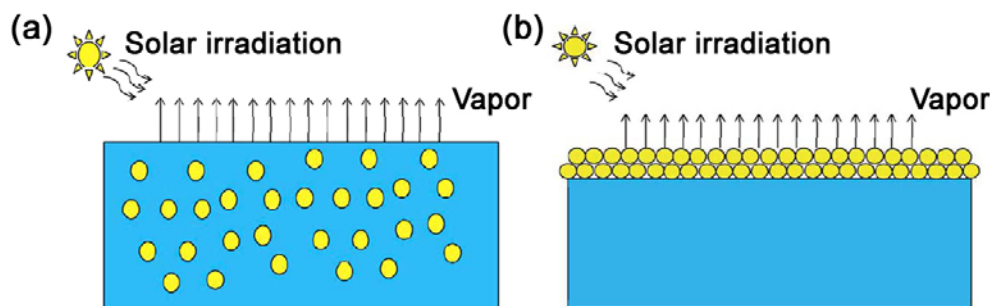


图 4 新型太阳能水蒸发系统^[36]: (a) 分散型太阳能水蒸发系统; (b) 漂浮型太阳能水蒸发系统
Figure 4 The novel solar-driven steam generation systems: (a) suspensing SSGS and (b) floating SSGS

热 (水的潜热和显热之和)。其中, 全热 h_{LV} 可表示为:

$$h_{LV} = C \times \Delta T + \Delta h_{\text{vap}} \quad (2)$$

式中, C 为水的比热容 ($C = 4.18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ΔT 为水的升高温度, Δh_{vap} 为相应温度下水的汽化焓。

通过计算 SSGS 中的热量流失可进一步证实蒸汽效率的准确性。太阳能蒸汽系统中热量流失主要包括三部分: 热辐射流失 Φ 、热对流流失 Q_{cv} 和热传导流失 Q_{cd} , 分别根据以下公式计算。

$$\Phi = \omega A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

$$Q_{\text{cv}} = hA(T_1 - T_2) \quad (4)$$

$$Q_{\text{cd}} = Cm\Delta T \quad (5)$$

其中, ω 为吸光材料的辐射率 ($\omega = 0.95$), $\sigma = 5.6 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, T_2 为吸光材料表面的平均温度, T_1 为蒸汽的温度, h 为热传导系数 ($h = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), A 为吸光材料的面积, C 为水的比热容 ($C = 4.18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ΔT 为在一定时间内水上升的温度。

接下来, 我们将对这两种太阳能水蒸发系统蒸汽产生的基本机理、各自特点以及系统装置的研究进展进行简要的回顾。

2.1 分散型 SSGS

分散型太阳能水蒸发系统是通过表面改性手段, 将具有光热转化效应的纳米材料悬浮在待蒸发液体中。当太阳光照射到分散型太阳能水蒸发系统时, 太阳能被纳米材料吸收并转化为热能。随之, 热量经过热传导传递给周围的水分子, 使后者蒸发。

在该系统中, 工作流体与纳米颗粒所形成的系统实质上是一种纳米流体。纳米流体的概念最早是由 Choi^[38] 在 1995 年提出的, 具体是将纳米颗粒加入至流体中以改变流体的热物理特性, 从而增强原工作流体在使用过程中的热传导性能。一般会选择使用具有良好热传导性能的金属纳米颗粒作为引入的纳米颗粒。2010 年, Otanicar 等人^[39] 将纳米流体用于太阳能集热器中, 利用对太阳光有吸收作用的光热转化材料 (如碳纳米材料和贵金属纳米颗粒) 作为纳米流体中的分散物质, 在增加流体系统对太阳光吸收的同时提高流体内部热交换能力, 从而提高整体光热转换效率。

2012 年, Neumann 等人^[35] 对比研究了 Au/SiO₂ 纳米核-壳材料与水溶性 N115 碳纳米颗粒在太阳能水蒸发过程中的性能。在 1000 倍太阳的高光强 (1000 kW/m^2) 下, 将装有纳米流体的真空管放在冰浴中, 监测蒸汽产生过程中装置内部气体压力及纳米流体的温度 (图 5)。结果表明, 在同样的光照强度下, Au/SiO₂ 纳米流体可以产生更多的蒸汽, 且蒸汽产生的速率更快。在刚开始的 50 s 内, 流体温度增加 17°C, 相比之下, 碳纳米流体仅升温 5°C。在非冰浴条件下, Au/SiO₂ 纳米流体产生接近 110°C 的高温蒸汽, 可以用于医疗杀菌。能量效率分析结果表明, 由于该实验是在极高光强下进行, 蒸汽产生效率仅为 24%。同时, Halas 等人还将 Au/SiO₂ 纳米颗粒用于水-乙醇蒸馏实验, 蒸馏物中所得的乙醇含量高于普通蒸馏方法。鉴于基于 Au/SiO₂ 纳米流体分散型太阳能水蒸发系统光热转化效率低, Ni 等人^[40] 在水蒸发系统装置外部用泡沫材料作为绝热层, 以减少装置与环境之间的热交换, 同时利用碳材料作为光热转化材料来降低成本。在 10 kW/m^2 光照条件下, 可以得到约 69% 的蒸汽产生效率。

对于分散型太阳能水蒸发系统, 就目前而言, 蒸汽产生的解释机理有以下三种:

(1) Neumann 等人^[35] 提出, 蒸汽的产生经历了以下几个过程: (i) 入射光被贵金属纳米颗粒通过等离子体共振吸收效应所吸收后转化为热量快速地传递给相邻的液体; (ii) 纳米颗粒加热其附近很

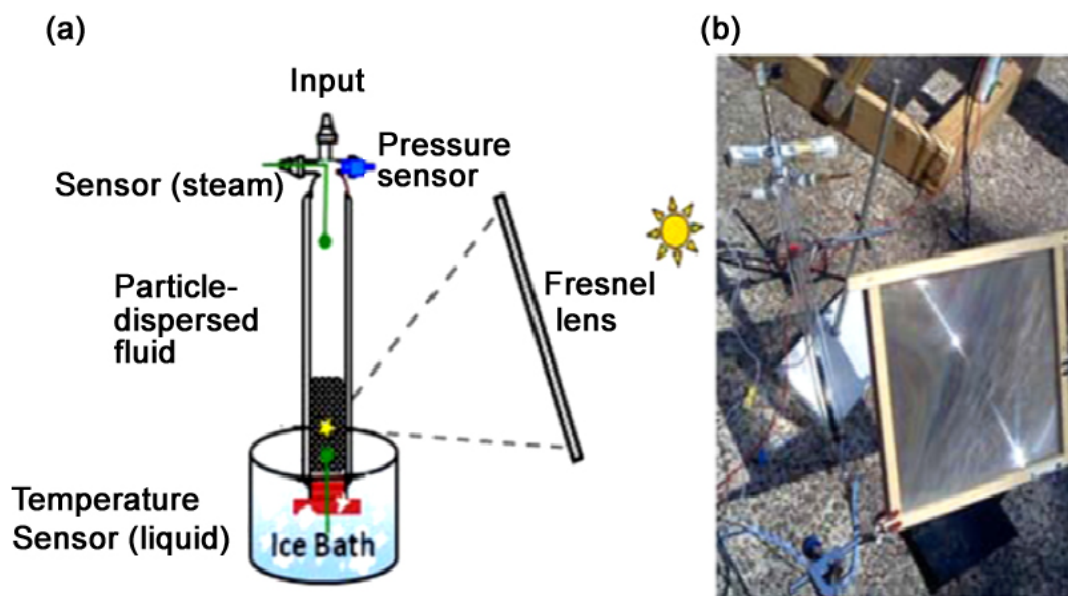


图 5 Au/SiO₂ 纳米流体分散型太阳能水蒸发实验^[35]: (a) 模型图; (b) 实物图
Figure 5 (a) Schematic map and (b) physical map for Au/SiO₂ nanofluid-based volumetric solar steam generation experiment

薄的液体层, 从而在纳米颗粒周围形成蒸汽层; 由于蒸汽的热导率相对较低, 阻止了热量从纳米颗粒向液体的进一步传递; (iii) 在持续光照条件下, 蒸汽层逐渐增厚至数百微米, 产生的纳米气泡密度相对于当量的水而言较小, 从而产生了浮力; (iv) 在浮力作用下, 纳米气泡到达液体表面, 释放蒸汽。随后, 纳米颗粒重新进入水体中, 进行下一个循环。

(2) Ni 等人^[40]通过在相对低光照强度 (10 kW/m^2) 下对碳黑及石墨化碳黑纳米流体太阳能水蒸发行为进行研究, 通过实验及理论模拟, 提出液体的整体加热从而产生蒸汽。

(3) Zeiny 等人^[41]对 Au 分散液进行大量研究后提出, 在较高光强下, 纳米流体内部存在一定的温度梯度, 同时由于金纳米颗粒的局域等离子体共振吸收效应, 在液面附近产生一个过热区。快速的蒸汽产生则是发生在过热区内。

蒸汽产生机理对于理论研究及实际应用均具有重要的意义。然而, 以上三种不同的机理解释是各个团队在不同的实验条件下观察到不同的物理现象, 从而提出的不同机理。分散型太阳能水蒸发系统的蒸汽产生机理仍有待进一步的实验验证与理论解释。

2.2 漂浮型 SSGS

尽管分散型太阳能水蒸发系统的蒸汽产生机理还未明确, 但是有一点值得肯定的是, 由于纳米颗粒在待蒸发液体内部呈分散状态, 使得一部分热量用于液体的整体加热, 这部分热量对于实际蒸发是无效的。实验证明, 大部分的光被纳米流体中靠近表面的部分纳米颗粒所吸收, 从而导致在液体内部沿着光路方向存在一个明显的温度梯度分布^[42]。因此, 相比于分散型太阳能水蒸发系统, 漂浮型太阳能水蒸发系统在蒸汽产生过程中, 对太阳能的能量利用效率更高。而这一结论最早已经被 Zeng 等人^[1]通过漂浮型太阳能水蒸发实验所验证。

2011 年, Zeng 等人^[1]将 Fe₃O₄/C 纳米复合材料作为光热转化中心, 设计出了漂浮型太阳能水蒸发系统。由于 Fe₃O₄/C 纳米颗粒表面具有疏水性, 可以自漂浮在气-液界面, 仅需要约 $200 \mu\text{m}$ 厚度、 115 g/m^2 的 Fe₃O₄/C 纳米颗粒便可使浓度为 3.5% 的盐水加速蒸发, 且同样条件下, 蒸发速度是纯盐

水蒸发的 1.3 倍。同时,他们还将分散型太阳能水蒸发系统及漂浮型太阳能水蒸发系统进行了对比,结果表明漂浮型太阳能水蒸发系统的蒸汽产生性能优于分散型太阳能水蒸发系统。液体蒸发是一种发生在界面的相变,而对于漂浮型太阳能蒸发系统,其表面液体温度高于分散型太阳能水蒸发系统的液体表面温度,从而有助于增加表面蒸发速率。

同样, Wang 等人^[43]受启发于植物的局域控制蒸发表面,也提出了漂浮型太阳能水蒸发系统,将热量局域地限制在气-液界面,以避免过多热量通过对流传热过程传递给非蒸发液体 [图 6 (a)]。该系统用一层纳米金片作为光热转化材料放置于待蒸发液体表面,底部液体通过来自材料结构内部的毛细管作用力引至材料表面。由于材料具有光谱吸收宽、蒸发面积大、抑制热量传递等特点,在 5.09 W/cm^2 的 520 nm 激光照射下,漂浮型太阳能水蒸发系统的蒸汽产生速率是分散型太阳能水蒸发系统的 2 倍,且蒸汽产生效率从 20% 提升至 44%。

在纳米金片漂浮型太阳能水蒸发系统中,光热转化材料直接与整个液体接触,可以确保水的有效供给。然而,液体本身就是一种导热介质(如水的导热率为 $0.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),可以作为热传导的一种途径。根据温度分布分析可以知道,部分热量以热传导形式从金片传递至底部液体。因此, Liu 等人^[44]通过模拟人类皮肤细胞的支撑及提高机械稳定性的作用,将纳米金片沉积在无尘纸上。其低热导率可以有效地阻碍热量从纳米金片传递到底部液体,从而在液体内部上表面形成一个“热区”。同时,其微观的三维结构可以增加蒸发面积。在 4.5 kW/m^2 的模拟太阳光条件下照射 15 min,其蒸发速率为 1.71 mg/s^1 ,是单独无尘纸蒸发的 63 倍;而蒸汽产生能量效率为 77.8%。

Ghasemi 等人^[45]在 2014 年类似地设计出了用于太阳能界面水蒸发系统的双层结构 [图 6 (b)]。其上层以一层 5 mm 厚、剥离的石墨鳞片作为光热吸收-转换体,同时具有亲水性及多孔结构,而底层则采用 10 mm 厚的碳泡沫,因其具有低热导率性、厚度较大等特点,可以有效地抑制热量从上层的光热转化层传递到底部的液体。同时,由于碳泡沫内部具有开闭孔道,因此可以漂浮在液面之上。在太阳能水蒸发过程中,碳泡沫自身的亲水性保证了液体能及时输送至上层的光热材料表面。该双层结构系统在 1 kW/m^2 和 10 kW/m^2 的光照强度下,所得到的蒸汽产生效率分别为 64% 及 85%。

为了进一步减少热传导的维度, Li 等人^[46]设计了三层结构,分别由聚乙烯泡沫作为底部的绝热层,一层纤维素布将聚乙烯泡沫包裹着作为二维水的运输通道,最后用氧化石墨烯片作为顶层的光热转化材料 [图 6 (c)]。装置的设计特点是在保证水量充足的前提下,减少了热传导通道。在光照强度为 1 kW/m^2 时,其蒸汽产生效率便高达 80%。他们还系统地研究了容器装置及待蒸发液体体积对漂浮型太阳能水蒸发系统性能的影响。研究表明,不同的容器装置,无论其是否具有保温效果,其对液体蒸发量的影响不显著。在有二维水通道的漂浮型太阳能水蒸发系统中,其蒸汽产生量与待蒸发液体量无关,且可以随着液体量的减少仍保持稳定的蒸汽产生量及蒸汽产生效率。

太阳光的能量密度一般为 1 kW/m^2 ,能量密度较低难以使光热转换材料达到足够高的温度并产生蒸汽。光学聚光是用于实现光热转化材料达到高温的手段。然而,聚光系统的使用必定会增加整个系统的运作成本。为了在一个光强下仍然可以产生蒸汽, Ni 等人^[47]采用商业型的选择性吸收涂层(蓝膜)作为光热转化材料,其极低的发射率有利于在材料表面达到高温。同时,特别设计了蒸发槽结构,将蓝膜放置于保温泡沫上,蓝膜表面用气泡膜包装料覆盖以减少因对流换热而导致的热量损失。此外,在蓝膜与底层泡沫之间插入一块棉布作为水的二维扩展通道。向泡沫内部部分钻孔,填充海绵作为液体的输送通道 [图 6 (d)]。当热聚焦度高的时候,其产生的蒸汽温度可以达到 100°C ,但由于蒸汽产生量少,其整体蒸汽产生效率较低。相比之下,热聚焦较低时产生的蒸汽量较多,且蒸汽效率也有所提升。

此外, Li 等人^[48]还提出了一种三维表面蒸发及一维水运输通道相结合的漂浮型太阳能水蒸发系统。如图 6 (e) 所示,将三维表面做成圆锥形,使得系统在维持稳定的太阳光照射前提下具有较大的

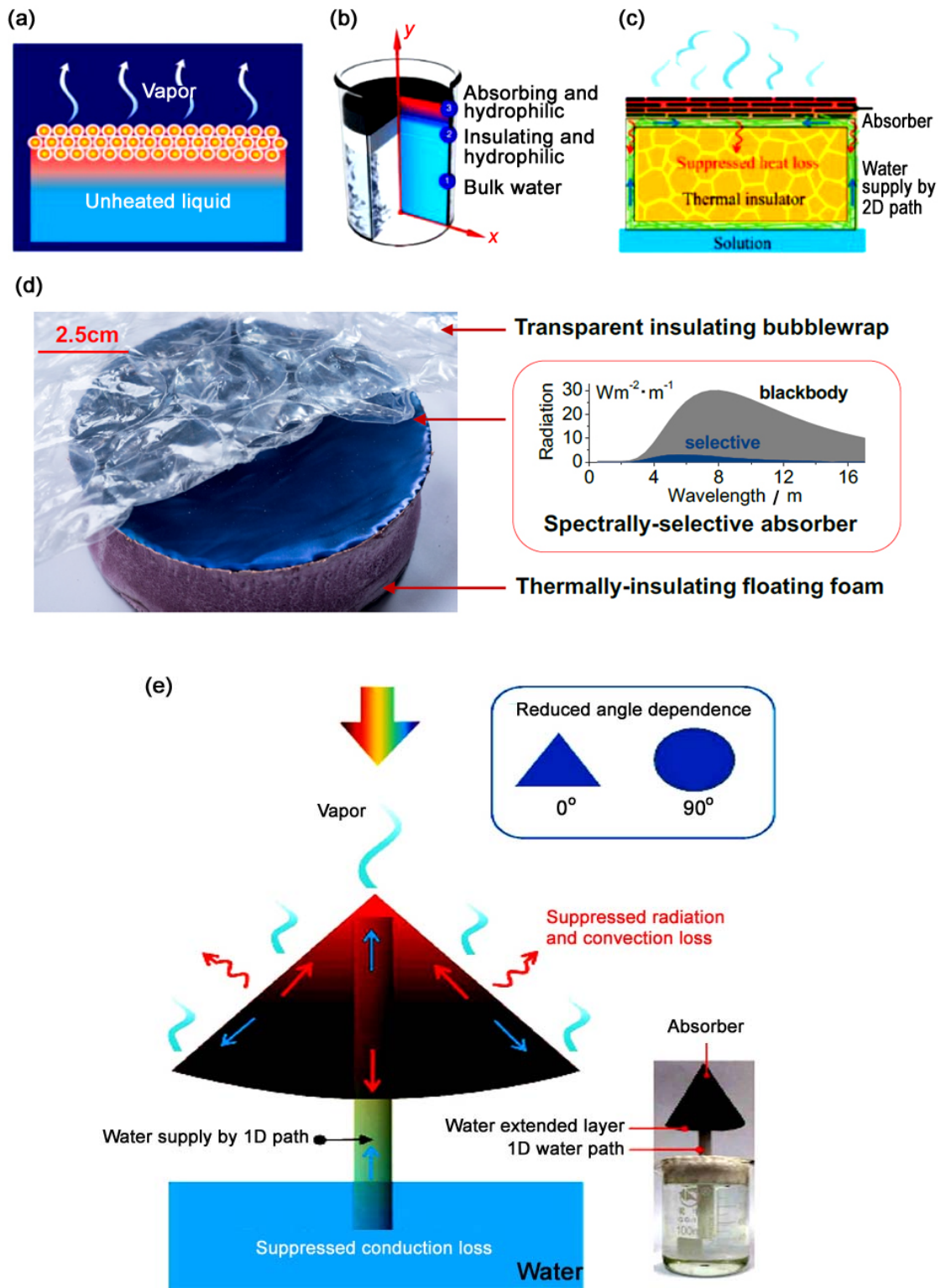


图 6 太阳能水蒸发装置系统: (a) 无隔热层^[43]; (b) 有隔热层^[45]; (c) 无隔热层, 二维水输运通道^[46]; (d) 二维光热材料, 一维水输运通道^[47]; (e) 三维光热材料, 一维水输运通道^[48]

Figure 6 Solar steam generation systems: (a) without thermal insulator; (b) with thermal insulator; (c) without thermal insulator with two-dimensional water transport channel; (d) two-dimensional photothermal materials with one dimensional water transport channel; (e) three-dimensional photothermal materials with one dimensional water transport channel

蒸发面积,同时,无论太阳光从哪个角度入射,仍有比二维表面更强的光吸收能力。一维的水运输通道及物理上保温层与底部液体的隔离,可以有效地抑制热量往下传导至底层液体。在一个太阳光照强度下,其蒸汽产生效率为85%。

3 新型 SSGS 光热转化材料

光热转化材料是太阳能光热利用的核心。目前,最常见的光热转化材料有四大类,分别为金属纳米颗粒、陶瓷材料、高分子有机化合物和碳材料。不同的材料体系,其光热转化机理有所不同。

3.1 金属纳米颗粒

金属纳米颗粒用作光热转化材料,主要是基于局域等离子体共振效应。常见的用于光热转化应用的金属纳米颗粒有金、银、铜和铝等^[49]。根据固体物理理论,金属可以视为一种由等量的自由电子和离子核所组成的等离子体。入射电磁波的电场使得贵金属纳米颗粒中位于导带的自由电子相对于质量更大的离子核产生极化现象。随后,在贵金属纳米颗粒表面因净电荷的差异形成一种回复力,使得自由电子群以一定周期振荡,这种共振被称为局域等离子体共振,振荡的频率称为局域等离子体共振频率。当入射电磁波频率与纳米颗粒的共振频率相同时,光子的能量被电子所吸收,便会产生价带电子的带间跃迁。通过非辐射能量弛豫过程将光能转换为热能,在升高纳米颗粒温度的同时把热量传递至周围环境^[50]。

影响等离子共振频率位置及大小的因素很多,取决于贵金属纳米材料组成、粒径大小、形貌、组成、排列以及周围的环境^[51-53]。对于金纳米颗粒而言,其等离子体共振吸收波长为520 nm^[54],而银纳米颗粒的共振吸收峰则在390 nm^[55]。不同纳米颗粒的形貌也会影响其最大吸收峰波长的频率。球形的金纳米颗粒仅有位于520 nm的单吸收峰,而金纳米棒则同时存在横向与纵向的共振吸收峰,横向吸收峰的位置为520 nm固定不变,纵向共振吸收峰的位置则会随着金纳米棒纵横比的增大而发生红移^[56]。Oldenburg等人^[57]首先合成了Au-SiO₂纳米核-壳结构,其共振吸收波长随着核层与壳层的厚度不同而改变。由于贵金属纳米颗粒在局域等离子体共振条件下会产生局域的强电场,因此也可以用于表面增强拉曼散射、传感器、成像、药物治疗等方面^[58]。

3.2 陶瓷材料

陶瓷材料有氧化物、碳化物、氮化物及硫化物等,种类广泛,通常是由高温烧结制得,具有良好的稳定性及无毒性。陶瓷材料一般有两种光热转化机制。第一种类似于金属纳米颗粒的等离子共振吸收效应^[59-61],另一种则是基于半导体的带隙吸收机理^[62]。如前文所述,根据能带理论,半导体材料的能带结构中有导带和价带,导带与价带之间为带隙。当光子能量高于半导体带隙能量时可以激发电子,产生空穴-电子对。空穴-电子对通过非辐射弛豫方式产生热量且逐渐地移动至带隙边缘进行复合,同时产生热量。

白色的纳米TiO₂光学带隙为3.30 eV,一般仅能吸收紫外光波段的光子。Chen等人^[63]在2011年利用氢气还原纳米级TiO₂,在其表面形成一无序的纳米相TiO₂以调控其能带结构,成功制备黑色纳米TiO₂。Huang等人^[64]与Ye等人^[62]相继提出了利用金属还原法将商业型二氧化钛还原成黑色二氧化钛并应用在太阳能水蒸发领域。Ishii等人^[61]通过理论与实验研究了TiN、Au与C纳米颗粒的太阳能光热转化能力。理论研究结果显示,TiN纳米颗粒具有表面等离子体共振效应,与碳纳米颗粒相比,其吸收光谱与太阳光光谱相接近,具有更高的太阳光吸收能力。在太阳能水蒸汽实验中,TiN纳米颗粒具有更高的太阳光吸收效率,所以其所产生的蒸汽量最多。

3.3 高分子有机物

一般有机物中, 其外层电子主要有三类: (1) 用于形成单键的 σ 价电子; (2) 来自于杂原子的 n 价电子, 由于单独存在时不具有离域效应, 因此一般不参与导电; (3) 由原子 p 轨道电子重叠后所共同构成的 π 电子, 形成双键, 具有有限的离域效应。当多个 π 电子分别以单键相互连接时, 便形成共轭 π 键。此时, π 键中的电子可以在分子整体中运动。同时, 它们具有的疏松 π 电子在能级上紧密相连, 所以具有宽的光谱吸收能力。

Wang 等人^[65]将聚吡咯作为光热材料负载到不锈钢网基底上, 同时通过氟硅烷修饰处理变为疏水性, 使之漂浮在液面之上, 用于漂浮型太阳能水蒸发系统。在 1 kW/m^2 的光照强度下, 蒸汽产生速率达到 $0.92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 且系统的蒸汽产生效率为 58%。

3.4 碳材料

碳材料 (如传统的碳黑、石墨、碳纳米管、氧化石墨烯、石墨烯、石墨炔等) 一般都是呈现黑色。无定形碳主要是由混合的 sp^2 与 sp^3 成键相互组合, 是一种不具有长程有序特点的固体碳材料, 通常含有氢元素与氮元素^[66]。碳材料对光有宽吸收的原因同样也是疏松的 π - π 能级结构存在, 从而有利于提高材料的光学吸收能力^[66]。

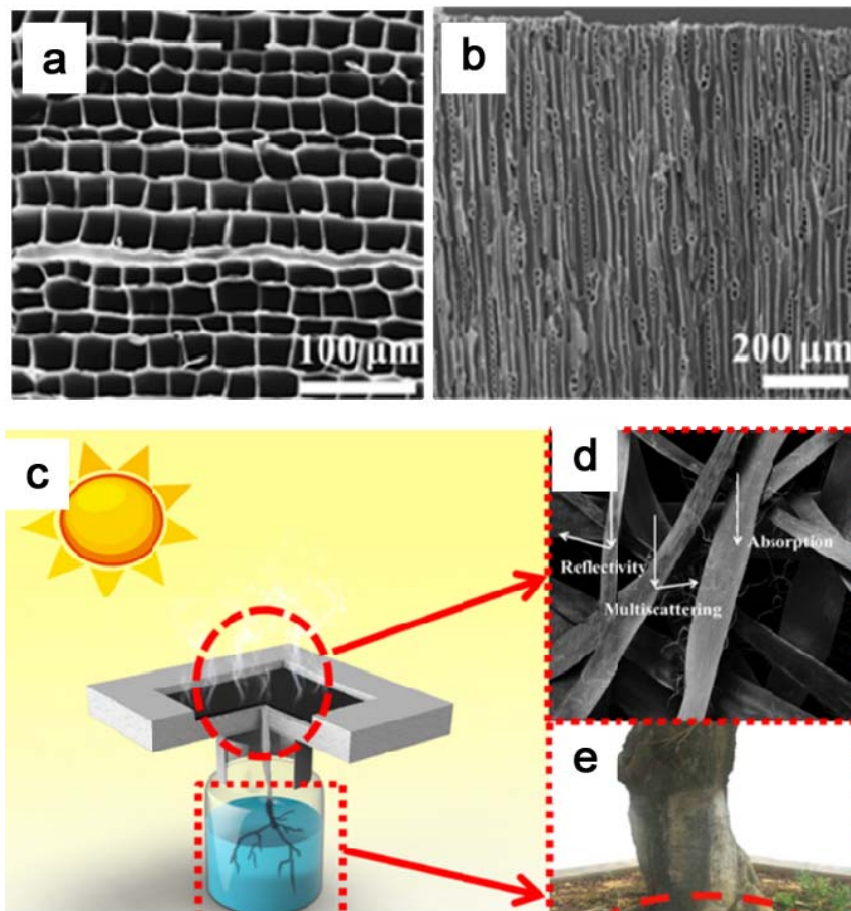


图 7 (a) 碳化木片顶部 SEM 图; (b) 碳化木片截面 SEM 图; (c) MTS 装置系统; (d) 入射光与 ISP-Black 样品的三种作用方式; (e) 树根

Figure 7 SEM images of (a) top face and (b) cross-sectional view of the carbonized wood; (c) Mimetic tree system; (d) the three paths of interaction between the incoming light and ISP-Black sample; (e) the tree root

最近, Wang 等人^[67]将碳纳米管纳米流体应用在分散型太阳能水蒸发系统中。他们研究了光照强度和碳纳米管的浓度对系统蒸汽产生效率的影响。另外, 部分生物材料 (如木头^[68]、蘑菇^[69]等) 可以通过表面或整体碳化变为碳黑颗粒, 用于太阳能水蒸发。Ning 等人^[69]将蘑菇在 500°C 氩气气氛热处理 12 h 得到碳化蘑菇。碳化蘑菇由于其自身具有优良的亲水性、一维水运输通道及顶部的锥形结构等特点, 在一个太阳光照强度下, 其蒸汽产生效率为 78%。该工作为光热材料的选择与制备提供了一个新思路。

本文作者所在课题组通过在氮气气氛高温碳化木头获得具有规则孔道结构的碳化木片 (图 7)。竖直的孔道一方面提高了材料的光学吸收性能, 另一方面为水分的运输提供了渠道, 是一种理想的太阳能蒸汽光热材料。结合自制的新型模拟树蒸汽系统 (Mimetic Tree System, MTS), 碳化木片作为光热转换材料, 在 1 kW/m² 光照强度下的蒸汽产生速率为 1.45 kg·m⁻²·h⁻¹, 蒸汽产生效率为 91.2%。此外, 为了实现太阳能蒸汽在水净化方面的实际应用, 课题组还以亲水价廉的滤纸为基底, 商业墨水为着色剂, 采用超声浸渍法制备了纸基墨水复合 ISP-Black 材料。慢速滤纸墨水复合材料作为 MTS 光热转化层时, 在 1 kW/m² 光照强度下蒸汽产生速率为 1.25 kg·m⁻²·h⁻¹, 蒸汽产生效率为 85.8%。在夏季室外环境下, 冷凝水产率为 1.24 kg·m⁻²·d⁻¹。此外, 该复合材料在海水淡化及重金属离子污水处理方面也表现出优异性能。

在常见的四种类型光热转化材料中, 碳材料具有太阳光谱吸收范围广、稳定性好、成本低、容易从自然界中获取和无毒性等优点, 使得它们在科学研究、生产制备及太阳能水蒸发等应用领域具有重要价值。

4. 光热转化材料制备方法

根据材料的维度, 新型太阳能水蒸发系统所用光热材料可以分为分散型纳米颗粒、薄膜/片状材料或者气凝胶/块体复合材料等。光热转化材料所呈现的维度不同, 决定了所适用的系统类型不同, 从而影响整体的蒸汽产生效率。一般而言, 分散型纳米颗粒用于分散型太阳能水蒸发系统, 而其他两种维度的光热材料则用在漂浮型太阳能水蒸发系统。下面将对光热转化材料的制备方法进行简单介绍。

4.1 纳米颗粒材料

纳米材料指的是材料系统至少有一个维度小于 100 nm。随着纳米材料体积减小, 更多的原子暴露在材料表面, 使得纳米材料比表面积增大, 这在物理性能上有巨大的变化, 同时也增加了纳米材料的反应活性。根据物理化学理论, 为了避免纳米颗粒之间因比表面能过大而导致相互聚集, 一般会在其表面通过物理或者化学方法吸附一层有机分子, 以引入空间位阻或者库伦斥力。所以, 纳米颗粒的制备方法有“由上至下”法和“由下至上”法^[70]。前者一般涉及“刻蚀”技术, 如光刻、电子束光刻及聚焦离子束等, 而后者则一般为湿化学法, 包括化学生长法和自组装法。

金属纳米颗粒制备所使用的方法主要是还原法。在表面活性剂存在的前提下, 利用还原剂 (如乙二醇、硼氢化钠等) 将金属离子还原为零价的金属纳米颗粒。使用的还原剂不同, 得到的纳米颗粒形状也有所不同。

对于氧化物纳米颗粒 (如 TiO₂), 由于其自身具有较宽的能带带隙, 仅可以吸收紫外光部分波段的能量, 因此一般需要引入氧空位缺陷来实现它们在可见光范围内的光学吸收, 从而用于太阳能光热转化。Huang 等人^[61]采用 AlCl₃-NaCl 熔盐体系, 利用 Al 单质将商用 TiO₂ 在不同反应温度下进行水热法还原得到纳米笼型 TiO₂。所得产物随后以聚偏二氟乙烯作为联合剂, 负载在玻璃板上。实验

结果表明, 在 $\text{AlCl}_3\text{-NaCl}$ 体系中, 当反应温度为 210°C 时, 所得到的 TiO_2 薄膜样品光学性能最好。同时, 该样品在漂浮型太阳能水蒸发实验中的蒸发速率最大为 $1.13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 且太阳能蒸汽产生效率为 70.95% , 性能优于用传统法氢气还原的 TiO_2 。

4.2 薄膜/片状材料

目前, 将光热转化材料漂浮在气-液界面有三种方式: (1) 利用纳米颗粒自身的表面疏水性; (2) 将纳米材料做成薄膜状; (3) 利用无尘纸^[71,72]和聚偏二氟乙烯 (PVDF) 薄膜等作为基底, 将光热材料通过水热法^[73,74]、抽滤法^[75-77]、浸渍法^[78-81]和滴涂法^[71, 72, 82]等负载到基底上。

直接水热法是将光热转化材料的前驱体配成溶液后, 向其中放入基底材料, 然后放进反应釜, 在一定温度下, 使得前驱体在转变为相应光热转化材料的同时附着在基底材料表面。实验过程参数如水的压力、温度、前驱体-产物体系及反应时间等均会对所得到的光热转化材料形貌及大小产生重要影响, 从而影响太阳能水蒸汽产生的性能。直接水热法因操作简单且设备要求不高而备受青睐。

滴涂法是先先将光热转化材料均匀地分散在液体介质中, 用滴管将上述流体滴加至基底上。可以通过控制每次滴加液体介质的数量以及滴加液体介质的次数来调整上层光热材料的厚度。然而, 该方法由于是手动操作, 有可能会产生人为误差, 因此所得到的光热材料具有厚度不均匀的缺点。

抽滤法是先先将具有光热转化能力的材料均匀地分散在液体介质中, 然后利用真空将上述材料沉积在滤膜表面的过程, 具有实验设备及操作简单、快速等优点。但是, 抽滤法仅适用于光热材料尺寸比基底孔径尺寸大的情况。

Liu 等人^[80]按照不同比例将氧化石墨烯和多壁碳纳米管进行混合, 利用抽滤法将均匀的分散液沉积在亲水的 PVDF 薄膜上, 从而制得氧化石墨烯/多壁碳纳米管复合薄膜材料。然后, 再将该薄膜在一定温度下用碘化氢气体还原为还原氧化石墨烯/多壁碳纳米管薄膜。当多壁碳纳米管含量为 88% 时, 还原氧化石墨烯/多壁碳纳米管薄膜的粗糙度与孔隙率最高, 可以减少薄膜的漫反射。在 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 光照强度下, 88% 还原氧化石墨烯/多壁碳纳米管薄膜的太阳能水蒸发量最大, 达到 $1.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 同时蒸汽产生能量效率为 80.4% 。

浸渍法也是需要先配制含有一定量光热转化材料的均匀分散液, 然后将薄膜基底材料放置于分散液内部, 通过超声、真空或者重力等外部条件, 使光热转化材料通过化学吸附或者物理吸附等吸附机理均匀地分散在基底表面。与抽滤法不同之处在于, 浸渍法可以同时使得光热材料附着在基底材料两侧甚至材料内部。但抽滤法每次仅可以使光热材料附着在基底材料某一侧。

Huang 团队^[83]利用木头作为基底材料, 通过浸渍法制备了一种负载了碳纳米管的柔性太阳蒸发器。由于木头材料本征低热导率、优异的孔道结构和碳纳米管对太阳光谱的强吸收, 使其在 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 和 $10 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的光照强度下, 蒸汽产生速率分别为 65% 与 81% 。

4.3 块体材料

薄膜/片状材料属于二维材料, 而目前文献报道中也有部分如气凝胶、海绵及木头等三维块体材料用于漂浮型太阳能水蒸发系统。三维块体材料的制备方法主要有表面碳化法、浸渍法、物理气相沉积法和化学气相沉积法等。

冷冻干燥法适用于制备合成气凝胶^[84-86]。以氧化石墨烯类气凝胶为例, 其制备步骤首先是获得一定量的氧化石墨烯分散液, 将得到的氧化石墨烯分散液进行水热处理或者倒进模具中在低温下进行凝固, 得到的固体随后进行冷冻干燥, 最终获得质量很轻的氧化石墨烯气凝胶。该实验方法简单、温和安全, 是大部分气凝胶样品的基本合成途径。

木头是一种具有低热导率的三维块体生物碳材料, 可以通过合适的热处理方法使其碳化, 用于

太阳能水蒸发系统。Hu 等人^[87]用约 500°C 的酒精灯火焰对木头片表面进行碳化处理。碳化层的厚度随着加热时间的增加而增加。当加热时间为 30 s 时,可以得到 3 cm 厚的黑色碳化层。碳化层的存在使得木头片表面对太阳光的吸收率可以高达 99%。由于木头自身的强吸水能力、低热导率以及对太阳光有强吸收表面的碳化层,使得该太阳能水蒸发系统在 10 kW/m² 的光照强度下,蒸汽产生效率达到 87%。同时,实验结果表明其可以很好地实现海水淡化应用。

物理气相沉积法是将待沉积的物质在一定温度下进行蒸发,所得到的气相在一定条件下(温度、压力及基底等)凝结^[88]。产物的形貌及相组成不仅与实验过程参数有关,还与所使用的原材料组成有密切关系。不同材料在同一温度下会有不同的行为差异。在一定温度下,若待蒸发物质发生了反应,则在气相中会生成不同化学计量比的物种。

南京大学朱嘉团队^[89]利用物理气相沉积法将金纳米颗粒沉积至阳极氧化铝基底上,制备出具有宽光谱吸收的三维金属等离子体材料。金纳米颗粒在阳极氧化铝基底孔道中紧密地随机自组装,产生高密度的光学吸收形式,同时基底的纳米孔道有助于增强三维材料的多重散射性能。因此,当纳米孔道直径为 200 nm 时,材料对太阳光谱吸收率高达 96%。太阳能水蒸发实验结果显示,孔道直径为 200 nm 的三维金属颗粒材料在 1 kW/m² 的光照强度下,光热转化效率为 48%。

虽然用于制备太阳能光热转化材料的方法很多,但是大部分制备方法制备成本高、操作复杂,不利于新型太阳能水蒸发系统商业化应用。

5 展 望

目前,在太阳能蒸汽领域已经得到广泛的探究,具有光明的前景,但是光热材料的物理机制探究仍然面临着挑战,需要进一步研究。

在装置搭建方面,为了能够实现太阳能蒸汽大面积的生产从而能够在实际生活中应用,研究出一种价格低廉、制备工艺简易、高光热蒸汽效率的太阳能蒸汽光热材料是至关重要的。其次,未来应该探究太阳能蒸汽材料的工作机制,解决关键因素从而提高太阳能光热蒸汽效率。除此之外,新颖的概念和结构设计,都是值得去探索的。

在太阳能蒸汽应用方面,已经应用于海水淡化,高温消毒、有机废水处理等领域。未来应与不同方向进行交叉,实现多元化应用。例如,Gao 等人^[90]通过合成具有核壳 SiO₂/Ag@TiO₂ 纳米流体,实现了在光强情况下产生蒸汽的同时也可以分解水制氢;Yang 等人^[91]报道了利用海水蒸发后形成溶液的浓度梯度而产生电势,使得光热和电能相结合,为太阳能蒸汽的利用提供了新的思路。

参考文献

- [1] ZENG Y, YAO J, HORRI BA, et al. Solar evaporation enhancement using floating light-absorbing magnetic particles [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4 (10): 4074–4078.
- [2] Green Rhino Energy [EB/OL]. <http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/>.
- [3] 王亚吉. 太阳辐射光谱的测量与应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2011.
- [4] KABIR E, KUMAR P, KUMAR S, et al. Solar energy: potential and future prospects [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 894–900.
- [5] AL-ROUSAN N, ISA NAM, DESA MKM. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2548–2569.
- [6] GREEN MA. Photovoltaic principles [J]. *Physica E*, 2002, 14: 11–17.
- [7] YOSHIKAWA K, KAWASAKI H, YOSHIDA W, et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% [J]. *Nature Energy*, 2017, 2 (5):

- No.17032.
- [8] WANG Y, XIZ Z, LIU L, et al. The light-induced field-effect solar cell concept-perovskite nanoparticle coating introduces polarization enhancing silicon cell efficiency [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (18): No. 1606370.
- [9] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131 (17): 6050–6051.
- [10] YANG WS, PARK BW, JUNG EH, et al. Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells [J]. *Science*, 2017, 356 (6345): 1376–1379.
- [11] CHEN H, YE F, TANG W, et al. A solvent- and vacuum-free route to large-area perovskite films for efficient solar modules [J]. *Nature*, 2017, 550 (7674): 92–95.
- [12] MALI SS, KIM H, KIM HH, et al. Nanoporous p-type NiO_x electrode for p-i-n inverted perovskite solar cell toward air stability [J]. *Materials Today*, 2018, 21 (5): 483–500.
- [13] ELSHEIKH AH, SHARSHIR SW, MOSTAFA ME, et al. Applications of nanofluids in solar energy: a review of recent advances [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3483–3502.
- [14] XIAO X, MIAO L, XU G, et al. A facile process to prepare copper oxide thin films as solar selective absorbers [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257 (24): 10729–10736.
- [15] SANSANIWAL SK, SHARMA V, MATHUR J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: a comprehensive review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 82 (1): 1576–1601.
- [16] LEWIS NS. Research opportunities to advance solar energy utilization [J]. *Science*, 2016, 351 (6271): No.aad1920.
- [17] International Energy Agency. Technology roadmap: concentrating solar power [R]. SourceOCDEEnergie, 2010, 2010: 1–49.
- [18] 陈雅倩, 吴梁鹏, 李娟, 等. 光化学合成太阳能燃料的研究进展[J]. *新能源进展*, 2016, 4 (6): 462–467.
- [19] WANG X, WANG F, SANG Y, et al. Full-spectrum solar-light-activated photocatalysts for light-chemical energy conversion [J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7 (23): No. 1700473.
- [20] SAKIMOTO KK, WONG AB, YANG P. Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for solar-to-chemical production [J]. *Science*, 2016, 351 (6268): 74–77.
- [21] PUGSLEY A, ZACHAROPOULOS A, MONDOL JD, et al. Global applicability of solar desalination [J]. *Renewable Energy*, 2016, 88: 200–219.
- [22] KALOGIROU SA. Seawater desalination using renewable energy sources [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2005, 31 (3): 242–281.
- [23] TIWARI GN, SINGH HN, TRIPATHI R. Present status of solar distillation [J]. *Solar Energy*, 2003, 75 (5): 367–373.
- [24] 曹国建. 太阳池集热的太阳能海水淡化系统性能研究[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2012.
- [25] SHARON H, REDDY KS. A review of solar energy driven desalination technologies [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1080–1118.
- [26] 刘业凤, 胡海涛. 太阳能海水淡化新技术综述[J]. *水处理技术*, 2011, 37 (8): 7–10.
- [27] FATH HES. Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment [J]. *Desalination*, 1998, 116 (1): 45–56.
- [28] ALI MT, FATH HES, ARMSTRONG PR. A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15 (8): 4187–4199.
- [29] FU F, WANG Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92 (3): 407–418.
- [30] BARAKAT MA. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2011, 4 (4): 361–377.
- [31] BURAKOV AE, GALUNIN EV, BURAKOVA IV, et al. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: a review [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2017, 148: 702–712.

- [32] FENG L, ASTRUC D. Nanomaterials for removal of toxic elements from water [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2018, 356: 147–164.
- [33] MATAFONOVA G, BATOEV V. Recent advances in application of UV light-emitting diodes for degrading organic pollutants in water through advanced oxidation processes: a review [J]. *Water Research*, 2018, 132: 3483–3502.
- [34] 吴东雷, 沈燕红, 杨治中, 等. 太阳能技术在水处理中的应用和研究进展[J]. *工业水处理*, 2013, 33 (4): 5–9.
- [35] NEUMANN O, URBAN AS, DAY J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles [J]. *ACS Nano*, 2013, 7 (1): 42–49.
- [36] DENG Z, ZHOU J, MIAO L, et al. The emergence of solar thermal utilization: solar-driven steam generation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5 (17): 7691–7709.
- [37] NI G, LI G, BORISKINA SV, et al., Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration [J]. *Nature Energy*, 2016. 1 (9): No. 16126.
- [38] CHOI SUS, EASTMAN JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nano-particles [R]. ANL/MSD/CP–84938. USA, Argonne: Argonne National Laboratory, 1995.
- [39] OTANICAR TP, PHELAN PE, PRASHER RS, et al. Nanofluid-based direct absorption solar collector [J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2010, 2 (3): No. 033102.
- [40] NI G, MILJKOVIC N, GHASEMI H, et al. Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation [J]. *Nano Energy*, 2015, 17: 290–301.
- [41] ZEINY A, JIN H, LIN G, et al. Solar evaporation via nanofluids: a comparative study [J]. *Renewable Energy*, 2018, 122: 443–454.
- [42] HOGAN NJ, URBAN AS, AYALA-OROZCO C, et al. Nanoparticles heat through light localization [J]. *Nano Letters*, 2014, 14 (8): 4640–4645.
- [43] WANG Z, LIU Y, TAO P, et al. Evaporation: bio-inspired evaporation through plasmonic film of nanoparticles at the air-water interface [J]. *Small*, 2014, 10 (16): 3234–3239.
- [44] LIU Y, YU S, FENG R, et al. A bioinspired, reusable, paper-based system for high-performance large-scale evaporation [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27 (17): 2768–2774.
- [45] GHASEMI H, NI G, MARCONNET AM, et al. Solar steam generation by heat localization [J]. *Nature Communications*, 2014, 5 (5): No. 4449.
- [46] LI X, XU W, TANG M, et al. Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American*, 2016, 113 (49): 13953–13958.
- [47] NI G, LI G, Boriskina S V, et al. Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration[J]. 2016, 1:16126.
- [48] LI X, LIN R, NI G, et al. Three-dimensional artificial transpiration for efficient solar waste-water treatment [J]. *National Science Review*, 2018, 5 (1): 70–77.
- [49] NAIK G, KIM J, KINSEY N, et al. Alternative Plasmonic Materials [M] // RICHARDSON NV, HOLLOWAY S. *Handbook of Surface Science*. Vol. 4. Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 2014: 189–221.
- [50] STEPHAN L, EL-SAYED M. Shape and size dependence of radiative, non-radiative and photothermal properties of gold nanocrystals [J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 2000, 19 (3): 409–453.
- [51] XIA Y. Shape-controlled synthesis and surface plasmonic properties of metallic nanostructures [J]. *MRS Bulletin*, 2005, 30 (5): 338–348.
- [52] STEPHAN L, EL-SAYED M. Size and temperature dependence of the plasmon absorption of colloidal gold nanoparticles [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 1999, 103 (21): 4212–4217.
- [53] CORTIE MB, MCDONAGH AM. Synthesis and optical properties of hybrid and alloy plasmonic nanoparticles [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111 (6): 3713–3735.
- [54] BROWN KR, AND DGW, NATAN MJ. Seeding of colloidal Au nanoparticle solutions: 2, improved control of particle size and shape [J]. *Chemistry of Materials*, 2000, 12 (2): 306–313.

- [55] KELLY KL, CORONADO E, LIN LZ, et al. The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment [J]. *Cheminform*, 2003, 34 (16): 668–677.
- [56] YE X, JIN L, CAGLAYAN H, et al. Improved size-tunable synthesis of monodisperse gold nanorods through the use of aromatic additives [J]. *ACS Nano*, 2012, 6 (3): 2804–2817.
- [57] OLDENBURG SJ, AVERITT RD, WESTCOTT SL, et al. Nanoengineering of optical resonances [J]. *Chemical Physics Letters*, 1998, 288 (2–4): 243–247.
- [58] JAIN PK, HUANG X, ELSAYED IH, et al. Noble metals on the nanoscale: optical and photothermal properties and some applications in imaging, sensing, biology, and medicine [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2009, 40 (14): 1578–1586.
- [59] TIAN Q, TANG M, SUN Y, et al. Hydrophilic flower-like CuS superstructures as an efficient 980 nm laser-driven photothermal agent for ablation of cancer cells [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23 (31): 3542–3547.
- [60] LIN H, WANG X, YU L, et al. Two-dimensional ultrathin MXene ceramic nanosheets for photothermal conversion [J]. *Nano Letters*, 2016, 17 (1): 384–391.
- [61] ISHII S, SUGAVANESHWAR RP, NAGAO T. Titanium nitride nanoparticles as plasmonic solar heat transducers [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120 (4): 2343–2348.
- [62] YE M, JIA J, WU Z, et al. Synthesis of black TiO_x nanoparticles by Mg reduction of TiO₂ nanocrystals and their application for solar water evaporation [J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7: No. 1601811.
- [63] FORTES AD, SUARD E, KNIGHT KS. Negative linear compressibility and massive anisotropic thermal expansion in methanol monohydrate [J]. *Science*, 2011, 331 (6018): 742–746.
- [64] HUANG X, YU YH, LLERGO OLD, et al. Facile polypyrrole thin film coating on polypropylene membrane for efficient solar-driven interfacial water evaporation [J]. *RSC Advances*, 2017, 7 (16): 9495–9499.
- [65] WANG J, LI Y, DENG L, et al. High-performance photothermal conversion of narrow-bandgap Ti₂O₃ nanoparticles [J]. *Advanced Materials*, 2016, 29 (3): 201603730.
- [66] LIU G, XU J, WANG K. Solar water evaporation by black photothermal sheets [J]. *Nano Energy*, 2017, 41: 269–284.
- [67] WANG X, HE Y, CHENG G, et al. Direct vapor generation through localized solar heating via carbon-nanotube nanofluid [J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 130: 176–183.
- [68] XUE G, LIU K, CHEN Q, et al. Robust and low-cost flame-treated wood for high-performance solar steam generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9 (17): 15052–15057.
- [69] NING X, HU X, XU W, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (28): No. 201606762.
- [70] PELTON M, BRYANT G. *Introduction to metal-nanoparticle plasmonics* [M]. USA: Wiley, 2013.
- [71] DENG Z, LIU PF, ZHOU J, et al. A novel ink-stained paper for solar heavy metal treatment and desalination [J]. *Solar RRL*, 2018, 2: No. 1800073.
- [72] LOU J, YANG L, WANG Z, et al. Bioinspired multifunctional paper-based rGO composites for solar-driven clean water generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8 (23): 14628–14636.
- [73] WANG Z, YE Q, LIANG X, et al. Paper-based membranes on silicone floaters for efficient and fast solar-driven interfacial evaporation under one sun [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5 (31): 16359–16368.
- [74] CHEN R, WU Z, ZHANG T, et al. Magnetically recyclable self-assembled thin films for highly efficient water evaporation by interfacial solar heating [J]. *RSC Advances*, 2017, 7 (32): 19849–19855.
- [75] CHEN R, ZHU K, GAN Q, et al. Interfacial solar heating by self-assembled Fe₃O₄@C film for steam generation [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2017, (12): 2620–2626.
- [76] LI H, HE Y, LIU Z, et al. A flexible thin-film membrane with broadband Ag@TiO₂ nanoparticle for high-efficiency solar evaporation enhancement [J]. *Energy*, 2017, 139: 210–219.
- [77] GUO A, MING X, FU Y, et al. Fiber-based, double-sided, reduced graphene oxide films for efficient solar vapor generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9 (35): 29958–29964.

- [78] WANG Y, WANG C, SONG X, et al. A facile nanocomposite strategy to fabricate a rGO-MWCNT photothermal layer for efficient water evaporation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 6 (3): 963–971.
- [79] DING D, HUANG W, SONG C, et al. Non-stoichiometric MoO_{3-x} quantum dots as a light-harvesting material for interfacial water evaporation [J]. *Chemical Communications*, 2017, 53 (50): 6744–6747.
- [80] LIU Y, CHEN J, GUO D, et al. Floatable, self-cleaning, and carbon-black-based superhydrophobic gauze for the solar evaporation enhancement at the air-water interface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7 (24): 13645–13652.
- [81] YAO J, ZHENG Z, YANG G. Layered tin monoselenide as advanced photothermal conversion materials for efficient solar energy-driven water evaporation [J]. *Nanoscale*, 2018, 10 (6): 2876–2886.
- [82] LIU Z, SONG H, JI D, et al. Solar vapor generation: extremely cost-effective and efficient solar vapor generation under nonconcentrated illumination using thermally isolated black paper [J]. *Global Challenges*, 2017, 1 (2): No. 1600003.
- [83] LIU Y, WANG X, WU H. High-performance wastewater treatment based on reusable functional photo-absorbers [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 787–794.
- [84] CHEN C, LI Y, SONG J, et al. Highly flexible and efficient solar steam generation device [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (30): No.1701756–n/a.
- [85] HU X, XU W, ZHOU L, et al. Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one sun [J]. *Advanced Materials*, 2016, 29 (5): No. 201604031.
- [86] FU Y, WANG G, MEI T, et al. Accessible graphene aerogel for efficiently harvesting solar energy [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5 (6): 4665–4671.
- [87] YANG Y, ZHAO R, ZHANG T, et al. Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification [J]. *ACS Nano*, 2018, 12: 829–835.
- [88] DAI ZR, PAN ZW, WANG ZL. Novel nanostructures of functional oxides synthesized by thermal evaporation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2003, 13 (1): 9–24.
- [89] ZHOU L, ZHUANG S, HE C, et al. Self-assembled spectrum selective plasmonic absorbers with tunable bandwidth for solar energy conversion [J]. *Nano Energy*, 2017, 32: 195–200.
- [90] GAO, M., CONNOR PKN, HO GW. Plasmonic photothermic directed broadband sunlight harnessing for seawater catalysis and desalination [J]. *Energy and Environmental Science*, 2016, 9 (10): 3151–3160.
- [91] YANG P, LIU K, CHEN Q, et al., Solar-driven simultaneous steam production and electricity generation from salinity [J]. *Energy and Environmental Science*, 2017, 9 (10): 1923–1927.

※ ※



苗蕾，教授，博导，日本国立大学工学博士，中科院“百人计划”引进国外杰出人才，广西“八桂学者”，桂林电子科技大学材料科学与工程学院热电转换材料与器件“八桂学者”团队学术带头人，兼任日本精细陶瓷研究中心材料技术研究所客座研究员，中国硅酸盐学会特陶分会和热电分会理事。获国外及中国发明专利 41 件（已授权 27 件）。SCI 收录论文 170 篇，他引 2254 次。受邀为英国皇家学会、日本太阳能系统和 JST 月报撰写综述性论文 3 篇，合作出版日语、英语著作 2 本。承担科技部、基金委以及地方科研项目 20 余项。先后获得全国三八红旗手、日本“开拓创新—先端技术”大奖、中日陶瓷学会科技交流奖、及省部级奖励 3 项。