

# 太阳能光热蒸发材料及其在海水淡化中的应用研究进展

范彧康 牟鹏 张政 朱照琪 李安\*

(兰州理工大学石油化工学院,兰州 730050)

**摘要** 利用太阳能进行海水淡化是当前解决人类缺乏饮用淡水的最有效的手段之一,具有绿色无污染、清洁和能源利用持续度高的特点。然而,传统的体积式太阳能海水淡化的方式存在设备投资高和能源利用效率低的问题,限制了其进一步发展。近年来,将光热转换材料置于水体表面的浮动式太阳能海水淡化的方式兴起,该方法使太阳能驱动的水蒸发只发生在水和空气的界面处,克服了传统体积式海水淡化对整个水体进行加热导致的能源转换效率不高的问题。基于此,新型浮动式太阳能光热蒸发材料的研究成为热点。重点介绍了浮动式太阳能光热转换材料的基本特征、制备方法,以及在太阳能海水淡化方面的应用性能。最后,对太阳能光热蒸发材料的发展方向进行了总结和展望。

**关键词** 太阳能,体积式,浮动式,光热蒸发材料

中图分类号 P747+.99

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2020)10-0245-04

DOI:10.19817/j.cnki.issn.1006-3536.2020.10.052

## Research progress of solar thermal evaporation material and their application in seawater desalination

Fan Yukang Mu Peng Zhang Zheng Zhu Zhaoqi Li An

(College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

**Abstract** Solar steam generation is one of the most effective means to solve the problem of lack of fresh water for drinking. It has the characteristics of green, pollution-free, clean and high energy utilization. However, the traditional volume solar steam generation has the problems of high equipment investment and low energy efficiency, which limits its further development. In recent years, the solar energy driven water evaporation only occurs at the interface between water and air by the floating solar steam generation in which the photothermal conversion material is placed on the surface of the seawater. The problem of low energy conversion efficiency caused by heating the whole water by traditional volume seawater desalination is overcome. Based on this, the research of new floating solar photothermal evaporation materials has gradually become a hot spot. The basic characteristics and preparation methods of floating solar photothermal conversion materials and their properties in solar steam generation were introduced. Finally, the development direction of solar steam materials was summarized and prospected.

**Key words** solar steam, bulk type, floating type, photothermal evaporation material

在所有可再生能源中,太阳能被认为是最丰富的能源。被地球拦截的太阳发出的能量约为  $1.8 \times 10^{14} \text{ kW}^{[1]}$ ,其中 60% 的总能量到达地球表面,其余的则被反射回太空。所以,每年有  $3.4 \times 10^{24} \text{ J}$  的太阳能抵达地球表面,这一部分能量比包括核燃料和化石燃料在内的所有估计的不可再生能源的总和一个数量级。虽然化石燃料仍是主要的能源,但石油和天然气的全球供求波动常常引起冲突<sup>[2]</sup>。此

外,化石燃料燃烧排放的碳、氮和气溶胶的氧化物造成了大气污染和全球变暖<sup>[3]</sup>。

随着人口的不断增加,世界范围内淡水资源匮乏日益受到广泛关注。淡水资源是人类生存不可或缺的物质之一,目前地球上淡水资源总量非常少,仅为全球水资源的 2.53%。这些水源大部分都存在于人类密度较小的南北两极地区,真正可被利用的水源只占全部淡水的 0.3%。根据世界卫生组织和

收稿日期:2019-06-17;修回日期:2020-06-25

基金项目:国家自然科学基金(51663012;51462021)

作者简介:范彧康(1997-),男,硕士研究生,主要从事共轭微孔材料和光热蒸发材料的研究。

通讯作者:李安(1973-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为微纳孔化工材料,E-mail:3274898377@qq.com。

儿童基金会联合监测的报告,全世界有 21 亿人在家中得不到安全和随时可用的水<sup>[4]</sup>。我国水资源总量约 28000 亿  $\text{m}^3$ , 占世界水资源总量的 6% 左右, 由于人口众多, 人均水占有量仅为世界人均占有量的 1/4。为了解决全球淡水资源缺乏的问题, 海水淡化是最直接和有效的方法之一。传统的海水淡化技术有多效蒸馏 (ME)、多级闪蒸 (MSF)、压汽蒸馏 (VC)、反渗透膜法、电渗析法和冷冻法等<sup>[5]</sup>。但是, 这些技术普遍存在能耗高、设备容易堵塞、设备投资高等缺点<sup>[6]</sup>。近年, 科学家们提出了两种新型海水淡化方式: 体积式和浮动式太阳能海水淡化<sup>[7-9]</sup>。

## 1 体积式太阳能海水淡化

随着纳米技术的发展, 形成了体积式太阳能海水淡化技术, 将纳米材料分散在水体中制备成纳米流体, 利用纳米材料优异的光吸收能力, 将太阳能转换为热能对水体进行加热产生水蒸汽以达到海水淡化的目的。其中涉及到的纳米粒子包括金属纳米颗粒<sup>[10-11]</sup>、核壳纳米粒子<sup>[12]</sup>和纳米碳材料<sup>[13-14]</sup>等。但是, 对于体积式太阳能海水淡化方式而言, 由于涉及对整个水体进行加热, 热量损失严重, 所以普遍存在太阳能光热转换效率低的问题。同时, 纳米粒子易团聚, 容易发生二次聚沉, 因此存在循环稳定性差的问题。因此, 如何最大程度地提高体积式太阳能光热转换效率, 仍是海水淡化领域中的一个瓶颈问题。

## 2 浮动式太阳能海水淡化

浮动式太阳能海水淡化是将具有较强光吸收能力的光热转换材料浮于水体表面而进行蒸发的一种海水淡化方式。这类材料的设计主要是基于局部加热驱动蒸发的概念, 即太阳能加热水产生水蒸汽这一过程发生在光热材料表面的薄层空气-水界面处<sup>[15]</sup>, 这大大提高了太阳能光热转换效率。对于浮动式太阳能海水淡化装置而言, 作为核心部件的光热材料的性能直接决定了其光热转换效率的高低。科学家们通过大量地研究, 对于高性能光热转换材料的设计提出了以下要求: ① 优异的光吸收性能; ② 良好的水传输性能; ③ 良好的隔热性能; ④ 较高的能源转换效率<sup>[16]</sup>。基于上述设计要求, 目前浮动式的太阳能光热转换材料主要有以下几种: 金属等离子体材料<sup>[17-18]</sup>、炭基材料<sup>[19]</sup>、有机无机纳米复合材料<sup>[20]</sup>和生物复合材料<sup>[21]</sup>等。

### 2.1 金属等离子体材料

金属等离子体能够增强太阳光吸收, 进行局部加

热, 从而显著提高了太阳能光热转换效率。2016 年, Zhou 等<sup>[18]</sup>通过将铝纳米粒子 (NPs) 自组装到三维多孔膜中, 制备了一种宽频带、高效率的铝基等离子体材料。该离子体结构由三部分组成, 即纳米孔阳极氧化铝膜 (AAM)、紧密堆积的铝纳米粒子 (沿着纳米孔的侧壁) 和一层铝膜 (在 AAM 的顶部表面)。所形成的多孔铝基等离子体材料能够自漂浮在水面上, 在 200~2500nm 的波长范围内表现出很强的光吸收能力 ( $\approx 96\%$ ), 并将吸收的能量集中在水面上, 在  $4\text{kW}/\text{m}^2$  的光照下达到约 90% 的太阳能转换效率。2017 年, Zhu 等<sup>[22]</sup>设计了一种新型的等离子体材料, 将细小的金属纳米粒子均匀地沉积在天然木材的三维介孔基体中。由于金属纳米粒子的等离子体效应和木材基体中微孔通道的波导效应, 光吸收能力接近 99%。含有众多低弯曲度的微通道和纳米通道的三维介孔木材可以有效地利用毛细效应将水从材料底部向上输送。实验结果表明, 在  $10\text{kW}/\text{m}^2$  的光照下, 这种三维定向多孔结构的太阳能转换效率可以达到 85%。

### 2.2 炭基材料

金属等离子体材料用于海水淡化的成本过高, 而炭基光热转换材料由于廉价易得和较优异的光吸收性能, 在太阳能光热吸收领域有着潜在的应用前景。例如, Ghasemi 等<sup>[15]</sup>将石墨颗粒负载在泡沫碳上制备成了一种具有双层结构 (DLS) 的光热转换材料, 其比表面积约为  $320\text{m}^2/\text{g}$ 。在  $10\text{kW}/\text{m}^2$  的光照下, 太阳能转换效率为 85%。这种材料的热局部化是通过利用石墨颗粒的宽带光吸收特性和泡沫碳的隔热性来实现的。因此, 流体通过绝缘泡沫的亲水孔道结构到达材料表面。然而, 即使在较低的光功率下, 通过减小碳泡沫中的水流速、热的局部化和优化孔隙率以及各层的厚度, 也可以提高太阳转换效率。石墨烯因具有低摩尔比热、高德拜温度、宽光吸收带和化学掺杂可调的热导率<sup>[23]</sup>, 而被认为是最佳的候选材料之一。然而, 石墨烯的二维平面特征和疏水性不利于水传输<sup>[24]</sup>。Ito 等<sup>[23]</sup>通过氮掺杂改变了石墨烯泡沫的润湿性能。氮掺杂石墨烯泡沫具有整体开孔结构, 有效地实现了热局部化, 其太阳能转换效率为 80%。2017 年, Li 等<sup>[25]</sup>首次采用三维打印技术, 构造了一种凹面结构的三合一蒸发器, 该太阳能光热蒸发材料具有较高的孔隙率 (97.3%) 和高效的宽带太阳光吸收能力 ( $>97\%$ )。导热系数低的 3D 打印多孔蒸发器可以实现热量局部化, 并有效地缓解了散热问题。结果表明, 在  $1\text{kW}/\text{m}^2$  光照

下,3D 打印光热蒸发材料太阳能转换效率高达 85.6%。2017 年,Yang 等<sup>[26]</sup>利用亲水基团如羟基(-OH)和羧基(-COOH)对石墨烯进行功能化改性。实验发现,随着亲水官能团的增加,太阳能转换效率从 38%提高到了 48%。

### 2.3 有机-无机纳米复合材料

合成有机-无机纳米复合材料可以降低海水淡化材料的生产成本。聚氨酯海绵是一种极具吸引力的材料,由于其具有微孔隙、优异的隔热性能和易于扩展的合成等优点,在工业上应用广泛<sup>[27]</sup>。2017 年,Wang 等<sup>[27]</sup>通过二异氰酸酯、聚醚和聚乙二醇直接在氧化石墨烯的二甲基甲酰胺分散体系中反应,合成了还原的氧化石墨烯-聚氨酯纳米复合材料,然后进行高温发泡和化学还原。改性氧化石墨烯片材的羟基和羧基与异氰酸酯基团反应形成稳定的化学键,有助于制备稳定的有机-无机纳米复合材料。这种纳米复合泡沫在  $1\text{kW}/\text{m}^2$  和  $10\text{kW}/\text{m}^2$  太阳辐照时,其太阳能转换效率分别为 64%和 81%。后来,他们还通过引入聚乙烯亚胺作为交联剂,制成了氧化石墨烯-纤维素酯膜。在  $1\text{kW}/\text{m}^2$  的太阳辐照度下,石墨烯氧化物-纤维素酯双层体系的太阳转换效率为 52%<sup>[28]</sup>,这种材料具有机械性能好、成本低、制备简单、可重复使用等优点。

### 2.4 生物复合材料

2016 年,Tian 等<sup>[29]</sup>提出了具有高比表面积三维开孔结构的三维材料作为新型海水淡化材料。他们把纳米等离子体结构加入到细菌纳米纤维素气凝胶中,制备出光吸收能力较强的泡沫材料。在不考虑反射损耗、表面辐射损耗和实验室损耗的情况下,在  $5\text{kW}/\text{m}^2$  的光照下,等离子体气凝胶的太阳转换效率为 76.3%。与石墨烯复合的细菌纳米纤维素气凝胶在  $10\text{kW}/\text{m}^2$  的光照下,太阳能转换效率为 83%<sup>[30]</sup>。最近提出的另一种方法是处理具有较强光吸收能力的天然植物得到的浮动式材料,在  $1\text{kW}/\text{m}^2$  光照下,天然蘑菇和炭化蘑菇的转换率分别为 62%和 78%。研究发现,蘑菇的太阳能蒸汽产生能力归因于其独特的自然结构,即伞形黑色菌毛、多孔性和小截面的纤维状菌柄<sup>[31]</sup>。受木质材料从根到叶表面的水分蒸发行为启发,火焰处理过的木材<sup>[32]</sup>、含有碳纳米管涂层的柔性木膜<sup>[33]</sup>和含有氧化石墨烯涂层的木材<sup>[34]</sup>等生物质光热蒸发材料受到关注。其中,含有氧化石墨烯涂层的木材在  $1$ 、 $10$  和  $12\text{kW}/\text{m}^2$  的太阳辐照度下,太阳能转换效率分别达到 72%、81%和 83%。

## 3 结语与展望

总之,浮动式海水淡化以其制备简单、高效和便捷的特点,在太阳能海水淡化方面有着潜在的应用价值。到目前为止,多种多样的光热转换材料被运用在太阳能海水淡化领域,但是这些材料在海水淡化方面各有优缺点,所以进一步探索、制备具有优异海水淡化性能的光热转换材料仍是这一领域的研究重点。另外,对于利用浮动式太阳接收器进行海水淡化在热力学和传热学方面的影响机制还有待更完善的理论去解释,以使理论跟实践能更好的匹配。最后,对于浮动式太阳能海水淡化方式,其在真实海水方面的耐盐性,以及在苛刻条件下的循环稳定性,还需要进一步探讨。

### 参考文献

- [1] Su X, Fu F, Yan Y, et al. Self-propagating high-temperature synthesis for compound thermoelectrics and new criterion for combustion processing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4908.
- [2] Sorrell S, Speirs J, Bentley R, et al. Shaping the global oil peak: a review of the evidence on field sizes, reserve growth, decline rates and depletion rates[J]. *Energy*, 2012, 37(1): 709-724.
- [3] Thirugnanasambandama M, Iniyar S, Goić R. A review of solar thermal technologies[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 312-322.
- [4] Van d B B, Vandecasteele C. Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 435-445.
- [5] Raza A, Ding B, Zainab G, et al. In situ cross-linked superwetting nanofibrous membranes for ultrafast oil-water separation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(26): 10137-10145.
- [6] 多效鼓泡蒸发式太阳能海水淡化技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [7] Raza A, Lu J Y, Alzaim S, et al. Novel receiver-enhanced solar vapor generation: review and perspectives[J]. *Energies*, 2018, 11(1): 253-282.
- [8] 李蛟, 刘俊成, 高从塔, 等. 太阳能在海水淡化产业中的应用与研究进展[J]. *水处理技术*, 2009, 35(10): 11-15.
- [9] 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.
- [10] Neumann O, Urban A S, Day J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles[J]. *ACS Nano*, 2012, 7(1): 42-49.
- [11] Chen M, He Y, Zhu J, et al. An experimental investigation on sunlight absorption characteristics of silver nanofluids[J]. *Solar Energy*, 2015, 115: 85-94.
- [12] Zielinski M S, Choi J W, La Grange T, et al. Hollow mesoporous plasmonic nanoshells for enhanced solar vapor generation[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2159-2167.

