

# 太阳能界面水蒸发淡化原理

杨晨曦<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

Email: 1098002212@qq.com

收稿日期: 2021年3月2日; 录用日期: 2021年3月30日; 发布日期: 2021年4月9日

---

## 摘 要

太阳能水蒸发在海水淡化中具有重要作用。利用具有太阳能吸收能力的光热材料, 与蒸发器相结合可实现高效的光-蒸汽转换, 其中, 局部加热和限制加热的界面水蒸发策略作为有效的途径可持续产生水蒸汽。本文综述了太阳能吸收材料的光热转换机理及提高水蒸发率的设计概念, 阐述提高太阳吸收率和/或最小化热损失, 最终导致高光热蒸发率的太阳能蒸发器原理。

## 关键词

热转换, 蒸发, 太阳能

---

# Principle of Solar Energy Interface Water Evaporation Desalination

Chenxi Yang<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Land and Resources, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Email: 1098002212@qq.com

Received: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Mar. 30<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 9<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Solar water evaporation plays an important role in seawater desalination. The combination of solar energy absorbing materials and evaporators can achieve high efficiency of light vapor conversion. Local heating and limited heating of interfacial water evaporation strategy are effective ways to generate water vapor continuously. In this paper, the principle of solar energy evaporators which can improve the solar absorptivity and/or minimize the heat loss and ultimately lead to high solar thermal evaporation rate is summarized.

## Keywords

Heat Conversion, Evaporation, Solar Energy

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

淡水具有重要的战略意义,对人类的生存和经济发展至关重要,目前,由于人口增长、气候变化等,淡水资源在过去几十年变得极度短缺[1]。尽管如此,水是地球上最丰富的化合物之一,71%的地表被水覆盖,但大部分是海水,因此,高效的海水淡化技术具有重要的现实意义[2]。传统的海水淡化由于高能耗、基础设施昂贵等问题而限制了其应用,基于此,利用太阳光作为能源产生太阳蒸汽正成为一种有效的解决方案[3][4][5]。但是,由于自然光转化为热并产生水蒸汽的效率太低,无法实现规模化淡水供应。因此利用广谱太阳光光热转换,抑制热损失与调整蒸发通道是提高太阳蒸汽产生效率的重要途径。本文综述了太阳能吸收材料的光热转换机理及提高水蒸发率的设计概念,阐述提高太阳吸收率和/或最小化热损失,最终导致高光热蒸发率的太阳能蒸发器原理。

## 2. 界面太阳能蒸汽发生器

通常,在太阳能驱动的蒸发系统中,太阳能由太阳能吸收器(光热材料)吸收,并转化成热能,利用来加热液体水产生蒸汽[6][7]。太阳能蒸汽放置系统可分为两类,第一类是光热材料分散在水中,这种系统依赖于昂贵光学浓缩系统来实现液体加热,但是在水中容易造成热损失,导致效率较低。第二种是具有光热效应的界面太阳能蒸汽发生器(ISSG),在ISSG系统中,太阳能的收集和蒸汽产生都是局限于水-空气界面,转换的热能受到限制只会加热表层水,通过这种方式抑制了界面体系中的热损失,从而减少了吸收器表面的辐射和对流热损失,并消除使用转换的热能来加热水不参与蒸汽生成。

## 3. 光热转换机理

纳米结构光热材料是一种新兴的水蒸发方法。纳米结构材料产生的光热效应可以使纳米材料的尺寸减小,并将热限制在纳米级的定义区域。此外,纳米材料具有独特的光电性质,导致局域表面等离子体共振,量子限制效应以及其他现象。根据电磁辐射与物质相互作用的不同,提出了金属等离子体局域化加热、半导体无辐射弛豫和分子热振动三种光热转换机制。

### 3.1. 金属等离子体局部化加热

在一些金属纳米材料中,出现了局域表面等离子体共振(LSPR)效应,当光子频率与金属表面电子频率匹配时发生的共振光子诱导电荷相干振荡[8]。LSPR 效应诱导了三个连续现象,包括近场增强、热电子产生和光热转换。当金属纳米粒子以共振波长照射时,会产生等离子体辅助光热效应,从而引起电子气的振荡。电子从占据态激发到未占据态,形成热电子。这些热电子的衰变不是通过辐射发射,而是通过电子-电子散射重新分配热电子能量,这可以迅速提高金属粒子的局部表面温度。这种局部温度转移到粒子晶格,通过电子-声子相互作用在 2~5 ps 的时间尺度上,然后是声子-声子与周围介质的相互作用,时间尺度为 100~380 ps。LSPR 效应与粒子的形状、尺寸、介质涂层或介质以及粒子的组装状态密切相关。一般来说,空心结构或形状不对称会使光谱 LSPR 谱带变宽,而颗粒尺寸或周围介质的变化会导致 LSPR 带移,并可能使吸收带变宽。目前,金和银是最常见的用于光热蒸发的等离子金属[9]。金显示出优异的可见近红外光(NIR)等离子体共振和化学稳定性,而银显示出高等离子体共振响应和低等离子体损失的光学频率范围。此外,其他金属也被开发出广泛的等离子应用,如铝、铜、钴、镍和铂。

### 3.2. 半导体的无辐射弛豫

当半导体材料在光照下受到类似于带隙的能量激发时,就会产生电子-空穴对。当激发的电子最终回到低能级状态时,能量通过光子形式的辐射弛豫或声子形式的非辐射弛豫转移到杂质/缺陷或材料的表面悬挂键上而释放出来[10]。当能量通过声子释放时,它会引起晶格的局部加热,根据光吸收和体/表面复合特性建立温度分布。因此,光热效应通过光激发的扩散和复合载流子在材料中表现出来。金属氧化物和硫系化合物由于其吸收光谱具有良好的可调性而显示出广阔的前景近红外区消光系数大。到目前为止,  $\text{Cu}_7\text{S}_4$ ,  $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ,  $\text{HCuPO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3$ , 磁性粒子( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )等都被证实为具有光热蒸发的材料。

### 3.3. 分子热振动

在许多有机材料中,在吸收光能过程中通过晶格振动产生热量[11]。然而,大多数碳单键(包括 C-C、C-H 和 C-O)的  $\sigma$  和  $\sigma^*$  之间的能隙太大,对应于 350 nm 以下的波长,无法实现太阳辐射下的  $\sigma$ - $\sigma^*$  跃迁。共轭  $\pi$  键可以引起吸收光谱的红移。在类石墨烯同素异形体中,大量的共轭  $\pi$  键可以通过太阳光谱的实现  $\pi$ - $\pi^*$  跃迁,激发的电子通过电子-声子耦合而放松,因此能量从激发电子转移到整个原子晶格的振动模式,导致材料的宏观温度升高。其他碳基光热材料,如碳纳米管(CNT)、石墨烯、氧化石墨烯(GO)、还原石墨烯氧化物(rGO)、炭黑、碳纤维、碳珠和炭化天然产物都是界面水蒸发的优良光吸收剂。

## 4. 提高蒸发产生率升级

ISSG 的传热过程包括太阳能输入、蒸汽输出和与环境的热交换。因此,提高 ISSG 效率的关键因素是太阳能吸收和转换,以及从材料到水面的水传输以及蒸汽生成界面两侧的热损失,为了实现高效的太阳能蒸发,合成出各种先进的光热材料。

### 4.1. 光学增强

太阳吸收率是光热转换的一个关键参数,它决定了初始能量的输入量。光热太阳蒸发要求光吸收材料在整个太阳光谱范围内(从 250 到 2500 nm),具有高效和宽带的光学吸收,并且具有最小的透射率和反射率。除了太阳能吸收材料的固有特性外,合理的宏观和微观结构设计可使材料获得高太阳吸收率。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。例如,由于平面反

射, 密集堆积的石墨烯薄膜表现出微弱的光吸收[12]。因此, 粗糙表面/纹理和三维(3D)结构的太阳能吸收器被设计和使用, 通过回收/回收多次反射光来提高太阳能吸收率。

#### 4.2. 对齐结构: 垂直和水平对齐

垂直排列的天然木材微通道结构可用于多重内部光反射, 从而以增强光吸收。此外, 垂直排列的微通道在通过毛细作用将水输送到蒸发表面, 从而保持良好隔热和水传输。

当太阳能灯关闭时, 排列在排列好的微通道中的累积盐也会逐渐溶解回盐水中并扩散到水中。研究发现带有水平微通道的木材的导热系数低于垂直微通道的木材[13]。各向异性热传导使吸收的热量沿面内方向重新定向, 同时阻碍了水的传导热损失。同时, 均匀的纳米级凹坑和螺旋结构促进了木材微通道横向的高效流体输送沿大木腔水平存在。采用石墨涂层实现木材水平排列通道, 在普通太阳光照条件下和 10 个光照条件下的光合效率分别为 80% 和 89%。

#### 4.3. 外部水道受限和绝缘

在 ISSG 中, 由于太阳能吸收器与水体的接触, 受热界面与水体之间具有热损失。为了抑制热传导损失, 将太阳能吸收器与水体分离的结构可以提高能量转换效率。受自然启发, Miao 的小组开发了用于直接高效太阳能蒸汽发生器的模拟蒸腾系统(MTS), 该系统在绝缘体之间引入了空间隔离还有水, 水通过毛细力进行运移, 类似树根。发泡聚苯乙烯(EPS)泡沫被用作隔热材料, 从而成功制备了高性能无毒油墨染色纸和黑色炭化木材光热转换器[14], 所制成的 MTS 发生器在太阳光下的转换效率分别达到 85.8% 和 91.3%。

Wang 等人[15]通过盐浸技术合成了碳纳米颗粒(CNPs)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)的复合泡沫, 用于太阳能蒸发的界面接收器, 其中 CNP 增加泡沫的日光吸收率, 约为 97%, 同时对聚乙烯醇(PVA)进行改性, 使泡沫具有亲水性, 从而能够将水连续输送到空气-水界面。在较低的  $850 \text{ W/m}^2$  的太阳能输入下, 将水蒸发速率提高了  $1.26 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。

Yang 等人[16]合成了防污铜锌锡硒化物(CZTSe)纳米材料, 并将其沉积在亲水性滤膜上, 作为全太阳光谱吸收剂和纳米多孔蒸汽发生器, 从而实现高效、稳定的太阳能驱动界面水蒸发。基于 CZTSe 的装膜具有出色的光热转换、丰富的纳米通道、良好的防污性能, 基于此, 实现了  $1.528 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$  的太阳能蒸发率, 并且在太阳光照射下, 蒸汽转化效率高达 86.4%, 并且在 30 天之内能稳定进行海水淡化, 这种组装的膜显示出优异的脱盐能力, 并且可以稳定和安全地净化海水和废水。

### 5. 结论

近年来, 太阳能蒸发技术在清洁水生产中的应用受到人们的关注。为了了解各种太阳能蒸发器的原理, 本文综述了太阳能吸收材料的光热转换机理及提高太阳能蒸发器水蒸发率的设计概念, 阐述提高太阳吸收率和/或最小化热损失, 导致高光热蒸发率的太阳能蒸发器原理。

尽管最近在实验室条件下实现了高转换效率(>90%, 甚至超出了理论极限), 然而, 光热机理、太阳能转换机理、水传输和热传递机理还需要深入研究, 从而更好地制备高性能材料。目前海水淡化技术与实际应用之间的差距仍然较大, 这是由于室外自然光通量的效率仍需要提高, 此外, 在规模化利用前, 热稳定性、机械性能、可降解性、可重复利用性等还需要进一步的系统研究, 同时水冷凝和收集策略以及水冷凝余热的利用对于清洁水生产具有重要意义, 因此利用太阳能实现水净化还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] 胡绵好, 袁菊红, 陈拉. 多维视角下区域淡水资源可持续利用研究——以中部四省为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 7-14.

- [2] 马珊珊, 韩铁, 刘淑静, 霍艳芳. 海水资源利用区适宜性评价方法研究——以海水淡化为例[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2014(6): 41-45.
- [3] Ye, M., Jia, J., Wu, Z., *et al.* (2017) Synthesis of Black TiO<sub>x</sub> Nanoparticles by Mg Reduction of TiO<sub>2</sub> Nanocrystals and their Application for Solar Water Evaporation. *Advanced Energy Materials*, **7**, 1601811. <https://doi.org/10.1002/aenm.201601811>
- [4] Liu, G., Xu, J. and Wang, K. (2017) Solar Water Evaporation by Black Photothermal Sheets. *Nano Energy*, **41**, 269-284. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.09.005>
- [5] Yu, F., Ming, X., Xu, Y., *et al.* (2019) Quasimetallic Molybdenum Carbide-Based Flexible Polyvinyl Alcohol Hydrogels for Enhancing Solar Water Evaporation. *Advanced Materials Interfaces*, **6**, 1901168. <https://doi.org/10.1002/admi.201901168>
- [6] 李秀强. 基于低维碳材料的高效光热蒸汽转化研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2018.
- [7] 郑智颖, 李凤臣, 李倩, 王璐, 蔡伟华, 李小斌, 张红娜. 海水淡化技术应用研究及发展现状[J]. 科学通报, 2016, 61(21): 2344-2370.
- [8] Seh, Z.W., Liu, S., Low, M., *et al.* (2012) Janus Au-TiO<sub>2</sub> Photocatalysts with Strong Localization of Plasmonic Near-Fields for Efficient Visible-Light Hydrogen Generation. *Advanced Materials*, **24**, 2310-2314. <https://doi.org/10.1002/adma.201104241>
- [9] 王颖. Au/Pt 纳米复合材料的可控制备及近红外催化杀菌行为的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [10] Hessel, C.M., Pattani, V.P., Rasch, M., *et al.* (2011) Copper Selenide Nanocrystals for Photothermal Therapy. *Nano Letters*, **11**, 2560-2566. <https://doi.org/10.1021/nl201400z>
- [11] Gao, M., Zhu, L., Peh, C.K., *et al.* (2019) Solar Absorber Material and System Designs for Photothermal Water Vaporization towards Clean Water and Energy Production. *Energy & Environmental Science*, **12**, 841-864. <https://doi.org/10.1039/C8EE01146J>
- [12] Wang, Y., Wang, C., Song, X., *et al.* (2017) A Facile Nanocomposite Strategy to Fabricate a rGO-MWCNT Photothermal Layer for Efficient Water Evaporation. *Journal of Materials Chemistry A*, **74**, 972-978.
- [13] Zhu, M., Li, Y., Chen, F., *et al.* (2018) Plasmonic Wood for High-Efficiency Solar Steam Generation. *Advanced Energy Materials*, **8**, 1701028. <https://doi.org/10.1002/aenm.201701028>
- [14] Deng, Z., Liu, P.F., Zhou, J., *et al.* (2018) A Novel Ink-Stained Paper for Solar Heavy Metal Treatment and Desalination. *Solar RRL*, **2**, 1800073. <https://doi.org/10.1002/solr.201800073>
- [15] Wang, S., Almenabawy, S.M., Kherani, N.P., *et al.* (2020) Solar-Driven Interfacial Water Evaporation Using Open-Porous PDMS Embedded with Carbon Nanoparticles. *ACS Applied Energy Materials*, **3**, 3378-3386. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b02399>
- [16] Yang, Y., Que, W., Zhao, J., *et al.* (2019) Membrane Assembled from Anti-Fouling Copper-Zinc-Tin-Selenide Nanocarambolas for Solar-Driven Interfacial Water Evaporation. *Chemical Engineering Journal*, **373**, 955-962. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.099>