

分类号：
学 号：20212007115

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



生物炭/金属复合物的光热-电热耦合蒸发体系在水处理的应用

学 位 申 请 人	谭天乐
指 导 教 师	邓 辉 教 授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	化学工程与技术
研 究 方 向	环境化工
所 在 学 院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2024年6月

分类号：
学 号：20212007115

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



生物炭/金属复合物的光热-电热耦合蒸发体系在水处理的应用

学 位 申 请 人	谭天乐
指 导 教 师	邓 辉 教 授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	化学工程与技术
研 究 方 向	环境化工
所 在 学 院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2024年6月

**Application of biochar/metal composite photo-thermal and
electro-thermal coupling evaporation system in water treatment**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Engineering

By

Tianle Tan

(Chemical Engineering and Technology)

Dissertation Supervisor: Prof. HuiDeng

June,2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：谭天东

时间：2024年5月18日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：谭天东

时间：2024年5月18日

导师签名：印松

时间：2024年5月18日

摘要

目前,世界可供应淡水正在减少,在满足水资源不断增长的需求方面面临巨大挑战。太阳能驱动的界面蒸发技术可用于海水淡化和废水处理,保证了水资源安全以及可再生能源的利用。然而,在蒸发过程中,挥发性有机物会随水蒸气富集在冷凝水中,对冷凝水的安全构成了重大威胁。因此,太阳能界面蒸发技术在实现冷凝水净化以及蒸发残液中高浓度污染物去除方面仍然存在挑战。基于此,本文利用自然界廉价且易得的生物质,通过与金属氧化物(CuO 、 Fe_2O_3)复合制备光热材料,构建了界面蒸发-类芬顿一体化的太阳能蒸发器,在实现高效蒸发的同时能够用于含酚含盐废水中脱盐以及挥发性有机污染物的原位去除。主要研究结果如下:

(1)以棉秆为前驱体,通过化学共沉淀法制备了负载金属氧化物的棉秆炭($\text{MO}_x@\text{CSC}$)。通过对 $\text{MO}_x@\text{CSC}$ 的蒸发性能以及去除污染物性能的考察,对材料制备条件进行优化,同时利用多目标决策方法评价了金属氧化物对棉秆炭光热蒸发以及去除污染物的综合性能。 $\text{CuO}@\text{CSC}$ 具有最佳的综合性能,在 $1\text{ KW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的太阳辐射强度(1 Sun)下的蒸发速率可达 $1.48\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,蒸发效率为73.66%。在去除污染物性能方面, $\text{CuO}@\text{CSC}$ 成功催化过氧化氢产生羟基自由基,并通过马兰戈尼效应在界面处引起的流体对流作用,在太阳能蒸发界面原位去除苯酚,对于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚,冷凝水与蒸发残液中苯酚去除率分别为96.30%、68.33%。

(2)以玉米芯为前驱体,通过化学共沉淀法负载双金属氧化物得到复合材料,并与海藻酸钠(SA)合成气凝胶($\text{CuO}@\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{CC}$)。通过对气凝胶的蒸发性能进行考察,对 $\text{CuO}@\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{CC}$ 制备条件进行优化。 Fe_2O_3 的加入减少了金属氧化物的总用量以及重金属铜的含量,并且增强蒸发器的光热响应能力, $\text{CuO}@\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{CC}$ 在1 Sun下的蒸发速率可达 $2.06\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,蒸发效率为89.96%。高效蒸发促进了马兰戈尼效应在界面的流体对流作用,同时由于铜-铁类芬顿的协同作用,对于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚,冷凝水去除率为98.40%,蒸发残液去除率为63.80%。同时,对盐离子的去除率可以达到99.70%以上。

(3)为解决盐析以及低温弱光下蒸发速率低的问题,以PDMS为疏水剂,通过改变 $\text{CuO}@\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{CC}$ (CFCC)气凝胶的结构得到Janus型的蒸发器(c-CFCC/PDMS)。拥有垂直孔道结构的c-CFCC/PDMS在 $1\text{ KW}\cdot\text{m}^{-2}$ 下的蒸发速率可达 $2.68\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,蒸发效率为94.20%。独特的Janus结构将蒸发引起的盐结晶限制在疏水/亲水界面,提高蒸发器的耐盐性能。光热-电热系统的构建大大提高了蒸发器的蒸发速率($3.61\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。在去除污染物性能方面,对于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚,冷凝水与蒸发残液中苯酚去除率分别为99.84%以及80.00%。对于 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚,蒸发残液中苯酚去除率可达46.75%。对于存在无机阴离子的体系,一定浓度的 Cl^- 、 NO_3^- 表现出对苯酚去除的促进作用, HCO_3^- 、 Br^- 则表现出不同程度的抑制作用。经c-CFCC/PDMS蒸发处理后残液以及冷凝水中的COD去除率

能够达到 83.36%以及 99.75%。

关键词：生物质；CuO；Fe₂O₃；太阳能界面蒸发；类芬顿

Abstract

The supply of freshwater is dwindling, and there is a huge challenge in meeting the growing demand for clean water. Solar-powered interfacial evaporation technology can be used for desalination and wastewater treatment, ensuring freshwater security and using renewable energy. However, during the evaporation process, hazardous substances such as volatile organic compounds (VOCs) are enriched in condensate, posing a significant threat to the safety of condensate. Therefore, solar interfacial evaporation technology still has challenges in realizing integrated condensate purification and removing high concentrations of pollutants from raw water. Based on this, this thesis utilizes cheap and readily available biomass from nature to prepare photothermal materials by compounding with metal oxides (CuO, Fe₂O₃). An interfacial evaporation-Fenton-like integrated solar evaporator was constructed, which can be used for desalination in phenol-containing salt-containing wastewater and in-situ removal of volatile organic pollutants while realizing efficient water evaporation. The main research results are as follows:

(1) Cotton stalk carbon loaded with metal oxides (MO_x@CSC) was prepared by chemical co-precipitation using cotton stalk as the precursor. The material preparation conditions were optimized by examining the evaporation performance as well as the pollutant removal performance of MO_x@CSC. The combined performance of metal oxides on photothermal evaporation and pollutant removal of cotton stalk carbon was also evaluated using a multi-objective decision-making method. CuO@CSC has the best comprehensive performance and the evaporation rate at a solar radiation intensity of 1 KW·m⁻² (1 Sun) up to 1.48 kg·m⁻²·h⁻¹ with an evaporation efficiency of 73.66%. In terms of pollutant removal performance, CuO@CSC successfully catalyzed the generation of hydroxyl radicals from hydrogen peroxide and in-situ removed phenol at the solar evaporation interface through the fluid convection induced by the Marangoni effect at the interface. The removal rates of phenol in condensate and raw water were 96.30% and 68.33% for 10 mg·L⁻¹ phenol, respectively.

(2) Corn cob was used as the precursor, and the composite was obtained by loading bimetallic oxides through the chemical co-precipitation method and synthesizing aerogel (CuO@Fe₂O₃@CC) with sodium alginate (SA). The conditions for the preparation of CuO@Fe₂O₃@CC were optimized by examining the evaporation properties of the aerogel. The addition of Fe₂O₃ reduces the total amount of metal oxides and the content of heavy metal copper and enhances the photothermal responsiveness of the material, the evaporation rate of CuO@Fe₂O₃@CC could reach 2.06 kg·m⁻²·h⁻¹ at 1 Sun with an evaporation efficiency of 89.96%. The efficient evaporation promoted the Marangoni effect of fluid convection at the interface. At the same time, the removal of condensate was 98.40% for 10 mg·L⁻¹ phenol and 63.80% for raw water due to the synergistic

effect of Cu-Fe bimetals for Fenton-like catalysis. Meanwhile, the removal rate of salt ions can reach more than 99.70%.

(3) In response to the problems of salt precipitation and low evaporation rate under low temperature and low light in the previous chapter, a Janus-type evaporator (c-CFCC/PDMS) was obtained by modifying the structure of CuO@Fe₂O₃@CC (CFCC) aerogel with PDMS as a hydrophobic agent. The evaporation rate of c-CFCC/PDMS with vertical pore structure could reach 2.68 kg·m⁻²·h⁻¹ at 1 Sun, and the evaporation efficiency was 94.2%. The unique Janus structure limits the salt crystallization caused by evaporation to the hydrophobic/hydrophilic interface, improving the salt resistance of the evaporator. The construction of the photothermal-electrical heating system greatly improves the evaporation rate of the material (3.61 kg·m⁻²·h⁻¹). In terms of pollutant removal performance, for 10 mg·L⁻¹ phenol, the phenol removal rate in condensate and raw water was 99.84% and 80.00%, respectively. For 100 mg·L⁻¹ phenol, 46.75% phenol removal was achieved in the raw water. For the system with inorganic anions, certain concentrations of Cl⁻ and NO₃⁻ showed the promotion of phenol removal, while HCO₃⁻ and Br⁻ showed different degrees of inhibition. The COD removal in raw coal washing wastewater and condensate after c-CFCC/PDMS evaporation treatment could reach 83.36% and 99.75%.

Key words: Biomass; CuO; Fe₂O₃; solar interface water evaporation; Fenton-like

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 太阳能驱动蒸发技术.....	1
1.2.1 底部加热的蒸发器.....	2
1.2.2 体积加热的蒸发器.....	2
1.2.3 界面加热的蒸发器.....	3
1.3 太阳能界面蒸发技术.....	3
1.3.1 光热材料及转换机制.....	3
1.3.2 蒸发性能调控策略.....	7
1.3.3 太阳能界面蒸发技术的应用.....	9
1.4 太阳能界面蒸发技术与高级氧化技术的耦合.....	10
1.4.1 光热-光催化体系.....	10
1.4.2 光热-过硫酸盐氧化体系.....	10
1.4.3 光热-Fenton 氧化体系.....	11
1.5 本论文研究内容.....	11
1.5.1 本论文实验内容.....	11
1.5.2 技术路线.....	13
第 2 章 材料与方法.....	14
2.1 实验材料.....	14
2.2 实验药品及仪器.....	14
2.3 实验方法.....	16
2.3.1 蒸发性能测试.....	16
2.3.2 苯酚去除实验（体相）.....	16
2.3.3 苯酚去除实验（界面蒸发）.....	16
2.3.4 蒸发效率.....	17
2.3.5 去除率（R）.....	17
2.3.6 水中污染物浓度的测定.....	17
2.3.7 表征测试.....	17

第3章 棉秆炭与金属复合材料的制备及蒸发系统的研究.....	19
3.1 引言.....	19
3.2 实验部分.....	20
3.3 结果与讨论.....	21
3.3.1 制备条件对材料性能的影响.....	21
3.3.2 表征结果分析与讨论.....	31
3.3.3 蒸发性能分析与讨论.....	36
3.3.4 污染物去除性能分析与讨论.....	38
3.3.5 体相与界面式蒸发性能分析与讨论.....	40
3.3.6 室外蒸发性能分析与讨论.....	42
3.4 本章小结.....	42
第4章 CuO@Fe ₂ O ₃ @CC 炭气凝胶的制备及界面蒸发系统的研究.....	44
4.1 引言.....	44
4.2 实验部分.....	44
4.3 结果与讨论.....	45
4.3.1 制备条件对蒸发性能的影响.....	45
4.3.2 表征结果分析与讨论.....	50
4.3.3 蒸发性能分析与讨论.....	53
4.3.4 污染物去除性能分析与讨论.....	56
4.3.5 室外蒸发性能分析与讨论.....	58
4.4 本章小结.....	59
第5章 Janus 结构气凝胶光热-电热耦合蒸发系统的研究.....	60
5.1 引言.....	60
5.2 实验部分.....	60
5.3 结果与讨论.....	61
5.3.1 气凝胶组成对蒸发性能以及污染物去除的影响.....	61
5.3.2 表征结果分析与讨论.....	66
5.3.3 蒸发稳定性与耐盐性结果与分析.....	68
5.3.4 污染物去除性能分析与讨论.....	69
5.3.5 光热-电热蒸发性能分析与讨论.....	73
5.4 本章小结.....	75
第6章 结论与展望.....	76
6.1 结论.....	76

6.2 展望.....	77
参考文献.....	78
致 谢.....	88
作 者 简 介.....	89

第1章 绪论

1.1 引言

由于全球快速的城市化、工业化、人口增长以及变化的全球气候，世界可供应淡水正在减少，在满足对水资源不断增长的需求方面面临巨大挑战^[1-3]。各种成熟的技术，包括蒸馏^[4]、离子交换^[5]、电渗析^[6]、反渗透^[7]、纳滤膜^[8]以及其他重要方法，已经发展为净化海水以及工业废水的技术。然而，这些技术的实际应用受到大量设备成本、高昂费用和显著能耗（5-8 kW/m³）的限制^[9]。太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的绿色可再生能源，为地球提供了大量的辐照能量。以它驱动的太阳能界面蒸发可用于海水淡化和废水处理，保证了淡水安全，同时降低了对传统能源的利用^[10-14]。在过去，太阳能驱动的蒸发技术在体积加热上深入研究，涉及将光热材料悬浮或分散在水中，这些方法极大地削弱了光热材料的光捕捉能力以及太阳能的利用率。与体积加热相比，界面加热在水-空气界面上能够更好的利用热能，并将热量损失降低，蒸发速率增强，蒸汽转化效率提高^[14]。

然而，随着太阳能界面蒸发装置研究的逐渐深入，单一的太阳能蒸发器已经难以满足实际需求。通常，工业废水含有盐、重金属、有机物，甚至挥发性有机化合物(VOCs)，如苯酚等。在快速蒸发过程中，温度的升高不可避免地产生了一个新问题，即挥发性有机物会随水蒸气富集在冷凝水中。所以，太阳能界面蒸发装置在实现综合冷凝水净化以及蒸发残液中高浓度污染物去除方面仍然存在挑战。此外，蒸发速率低下、盐析以及低温弱光等缺陷仍然限制了太阳能界面蒸发技术的应用。因此，开发具有多功能的光热材料成为太阳能界面蒸发发展的重要环节。

1.2 太阳能驱动蒸发技术

太阳能驱动蒸发技术是利用光热转换材料为介质，通过获取太阳能并转化为热能，在低于沸点的温度下产生水蒸汽，从而生产清洁的水^[15]。根据光热材料在太阳能蒸发器中的位置，可以分为三种模式：底部加热的蒸发器、体相加热的蒸发器以及界面加热的蒸发器^[14]，如图 1-1 所示。

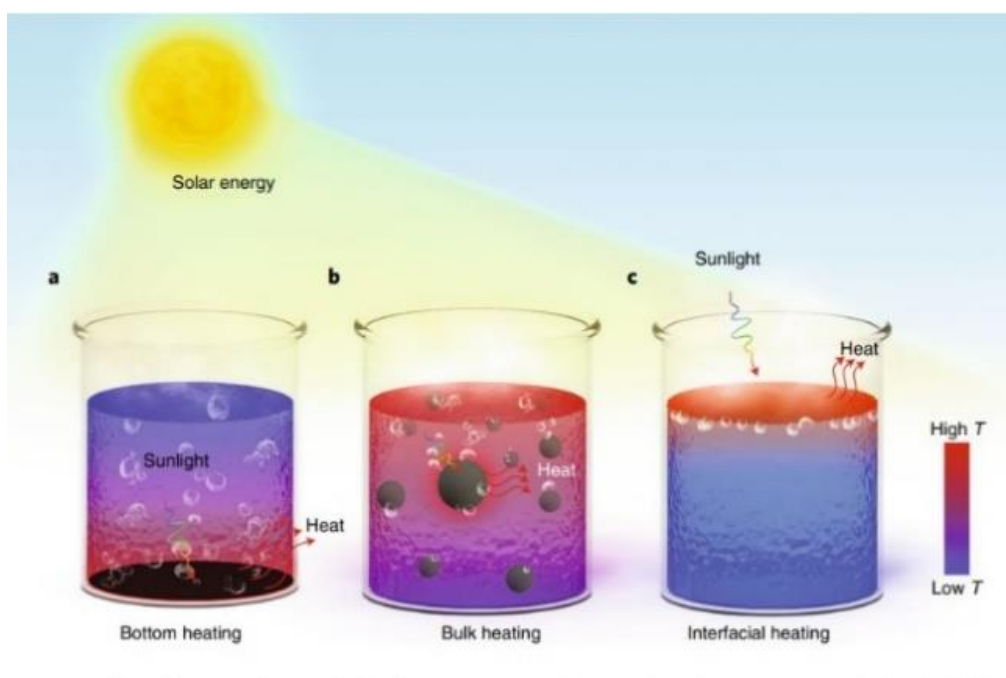


图 1-1 三种模式下的太阳能蒸发器^[14]。(a) 底部加热的蒸发器。(b) 体积加热的蒸发器。(c) 界面加热的蒸发器。

(T-温度)

Figure 1-1 Solar evaporators under three modes. (a) Bottom-heated evaporator. (b) Volume-heated evaporator. (c) Interface-heated evaporator (T-temperature)

1.2.1 底部加热的蒸发器

当光热材料位于蒸发器底部（图 1-1 (a)）时，太阳光需要穿过上层水体才能到达光热材料表面，从而被材料表面转化为热能，达到加热水体并蒸发的目的。基于该模式下的太阳能蒸发器，例如 Li 等人^[16]将氧化石墨烯（GO）负载在无纺布上，并使用结晶的聚乙烯醇（PVA）粘附在烧杯底部，得到了聚乙烯醇/氧化石墨烯（PVA-GO）复合膜，在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (1 Sun) 的光照强度下，蒸发速率达到 $0.98 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，光热转换效率为 47%。在这种模式下，光热转换发生在蒸发器底部，产生蒸汽则发生在蒸发器液体表面。因此，这种光热转换与蒸汽产生的位置差异使热量会散失在水和环境中，造成了较大的热损失，并导致了太阳能蒸发器相对较低的蒸发效率（约 30-55%）。

1.2.2 体积加热的蒸发器

纳米流体作为体积加热模式下蒸发器的光热材料，是将热量产生转移到流体内部从而实现蒸发（图 1-1 (b)）。分散在水中的纳米颗粒通过吸收太阳光，将其转化为丰富的热能，提高纳米颗粒温度并产生水蒸气^[17]。具体过程为：当纳米颗粒光热材料分散在整

个蒸发器液体中时, 由于其优异的光热转换效率, 这些光热材料表面的温度迅速升高到水的沸点, 甚至更高。之后, 水蒸气在材料-液体界面位置形成气体薄层。随着加热过程的不断进行, 包裹有水蒸气的光热材料会浮在液-气界面, 在释放出水蒸气后返回至水中。基于这种模式的研究用于生产清洁水的太阳能蒸发器, 例如 Rahmawati 等人^[18]在体积太阳能蒸发器中使用氮掺杂的碳点 (CD) 作为光热材料, 在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 下, 蒸发器的体积蒸发速率为 $1.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 蒸发效率能达到 70%, 优于直接散装水的加热。但在此过程中大量的热量从移动的纳米颗粒传递到水体中, 降低了光热转换效率。

1.2.3 界面加热的蒸发器

以界面加热模式的太阳能蒸发装置 (图 1-1 (c)) 改善了液体表面的热局域化^[19]。当光热材料的位置固定在蒸发器的界面时, 能够使太阳能转化为热能的过程发生在材料表面并将热量限制在蒸发界面处, 大大降低了热量的损失, 从而提高了水的蒸发效率。与其他加热模式相比, 界面式的蒸发装置阻止热量向水体的散失, 同时, 所获得的热量可直接加热界面蒸发材料所吸收的水, 大大增强了液-气界面处的相变。目前所研究的界面蒸发器对太阳能利用率大于 80% 以上, 远高于其他太阳能蒸发技术。同时, 这一装置还存在着很多不足, 如蒸发器成本高昂、蒸发效率低下、盐析等问题, 还需进一步探索。

1.3 太阳能界面蒸发技术

1.3.1 光热材料及转换机制

光热材料作为太阳能蒸发器的关键部件, 能够将太阳能转换为热能为蒸发提供能量。光吸收能力和光热转换效率是评价光热性能最重要的因素。其中, 光吸收能力作为光热材料在太阳能蒸发中的重要参数, 为保证较大的热量输出, 光热材料均较大的光谱吸收范围^[20-22]。根据化学组成, 可以将光热材料大致分为金属纳米材料、碳基材料、半导体材料和高分子材料^[23]。对于这些光热材料的光热转换机制可分为等离子体共振发热、电子-空穴对的非辐射弛豫以及分子的热振动^[22, 24], 图 1-2 显示的是不同类型光热材料的光热机理图。

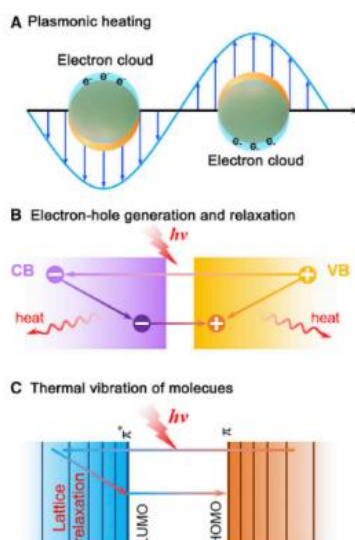


图 1-2 光热材料的转换机理 (a) 等离子体加热, (b) 电子空穴产生和弛豫, (c) 分子的热振动

Figure 1-2 Conversion mechanisms of photothermal materials. (a) Plasmonic heating. (b) Electron-hole generation. (c) Thermal vibration of molecules.

(1) 金属纳米材料

金属材料, 例如金^[25]、银^[26]、钯^[27]、镍^[28]、铜^[29]和钼^[30]等纳米粒子, 由于表现出局部表面等离子体共振效应, 而被应用于光热反应中。当金属材料吸收与表面电子固有频率相匹配的入射光时, 会对太阳光谱部分波段产生强烈的吸收效果, 通过对等离子体纳米颗粒尺寸和形状的调控就可以实现太阳能的宽谱吸收。Ag、Au 作为典型的等离子体共振材料。其中, 在光学频率范围内, Ag 具有高等离子体共振响应以及低等离子体共振损失; Au 则在 Vis-NIR 区域内具有等离子体共振和化学稳定性。图 1-3 (a) 为 Chen 等人^[31]以 Au@Ag-Pd 三金属纳米材料与聚苯乙烯 (PS) 微球分别作为太阳能光热材料和隔热材料设计了 Janus 结构的太阳能蒸发器。PS 微球将热量定位在微米级, 并增强了微球上支撑的 Au@Ag-Pd 纳米材料的等离子体激元吸收。同时, Janus 结构将供水层表面划分为多个区域, 降低了蒸发焓。由于这些结构的共同作用, 蒸发器在 1 Sun 的蒸发速率为 $3.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 蒸发效率高达 99.1%, 高效的太阳能驱动蒸发可持续 40 小时以上, 还具有除盐率接近 100% 的高性能海水淡化能力。Wang 等人^[30]制备的 MXene 纳米薄片/铜钼硒 (CIS) 纳米颗粒可用于高效的太阳能驱动界面蒸发, 如图 1-3 (b) 所示, CIS 纳米颗粒的引入通过增加 MXene 纳米薄片的层间距和润湿性从而增强光吸收能力并减少光热膜的反射。同时, 由于 MXene 和 CIS 之间形成了肖特基结, 材料的光热转换效率显著提高, 所构建蒸发器蒸发速率为 $1.434 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 蒸发效率达到 90.04%, 同时还具有优异的除杂能力, 盐离子去除率 >98%, 重金属离子去除率 >99.8%, 染料分子去除率接近 100%。总之, 等离子体金属在光热应用方面具有显著的潜力。然而, 它们

更昂贵，材料附着力有限，缺乏耐用性。此外，金属离子表现出的高反应性，使它们容易受到腐蚀，不适合长时间暴露在阳光下。

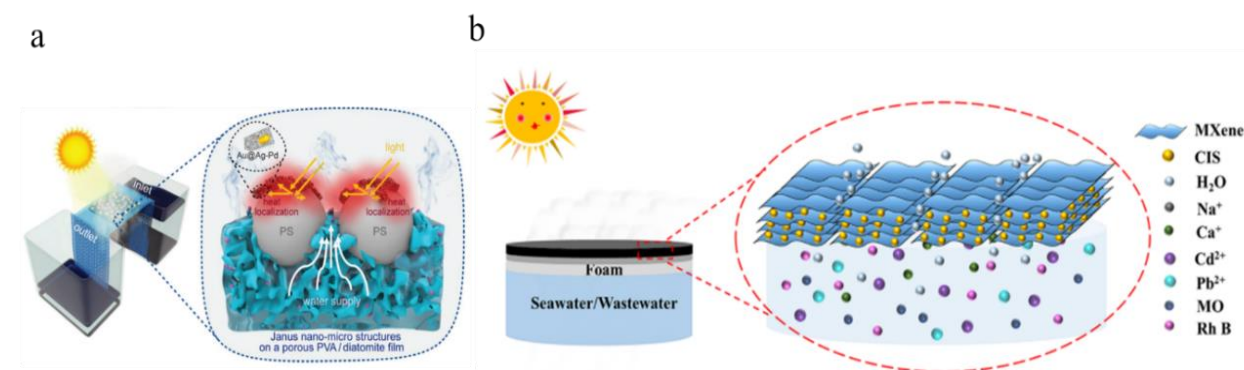


图 1-3 (a) 基于 Au@Ag-Pd/PS Janus 纳米微结构的界面太阳能蒸发器原理图^[31] (b) MXene/CIS 复合光热膜净化机理示意图^[30]

Figure 1-3 (a) Schematic of Au@Ag-Pd/PS Janus nano-micro structure-based interfacial solar evaporator, (b) Schematic illustration of the purification mechanism of the MXene/CIS composite photothermal membrane.

(2) 碳基材料

碳是宇宙中最丰富的元素之一，能够以不同的杂化状态相互结合，具有成本低、储量丰富、稳定性好的优点，在太阳能界面蒸发技术中得到了广泛的应用。各种碳基材料如图 1-4 (a) 所示，如石墨烯^[32]、碳纳米管^[33]、炭黑^[34]、碳量子点^[35]、生物炭^[36]等，已经被研究用于水蒸发以及废水处理。由于碳基材料可以有效地吸收光能，通过晶格振动转化为热量，实现太阳能的宽谱吸收。因此，碳基材料作为优异光热材料的关键不在于扩大吸收范围，而是增加吸收强度以及减少表面光反射。通过太阳能蒸发器表面从光滑到粗糙的系统过渡，可以实现光反射的减少和光吸收的增强。如图 1-4 (b) 所示，Jiang 等人^[37]使用还原氧化石墨烯 (rGO) 和多壁碳纳米管 (MWCNT) 构建了表面粗糙的光热膜，分别与纯 rGO 和碳纳米管相比，这一创新使蒸发速率提高了 79% 和 8.9%。由于石墨烯等碳材料制备方法复杂、成本较高，人们更加关注制备简单、来源广泛并具有全光谱太阳能吸收的生物炭。而开发生物炭太阳能界面蒸发器的关键是具有高的光热转换效率、良好的输水路径以及稳定机械性能。Li 等人^[38]以表面改性的椰子纤维 (SCF) 为光热材料，SCF 具有超亲水润湿性，其垂直多级开骨架结构有利于水的快速输送。在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 下，SCF 蒸发器的蒸发速率为 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，蒸发效率达到 90.2%。在盐水中 (20% NaCl)，蒸发速率与蒸发效率分别为 $1.37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、85.3%。