

二硫化钼复合钯团簇实现全光谱吸收和 高效太阳能界面蒸发

李庚禧, 王清淼*, 王天辰, 尹合健, 叶青
(武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要:通过 Pd 团簇的局域表面等离子体共振(LSPR)效应与 MoS₂ 复合, 增强 MoS₂ 在近红外区域的光吸收能力, 实现了全光谱吸收能力的突破, 探索 Pd 含量对其在光热蒸发中的性能影响, 并使用密度泛函理论(DFT)模拟计算对材料的性能进行理论验证, 为低成本、高效太阳能界面蒸发技术提供了新策略。

关键词: MoS₂; Pd 团簇; DFT; 光热转换; LSPR; 太阳能驱动界面蒸发

中图分类号: P747; TQ138.2; TQ136 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4320(2025)11-0119-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.11.022

Modulating MoS₂ nanosheets with Pd clusters for full-spectrum solar adsorption and efficient solar-driven interfacial evaporation

LI Geng-xi, WANG Qing-miao*, WANG Tian-chen, YIN He-jian, YE Qing

(School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology,
Wuhan 430081, China)

Abstract: This study pioneers the composition of palladium clusters with MoS₂ through localized surface plasmon resonance (LSPR) effect, significantly enhancing the light absorption ability of molybdenum disulfide in near-infrared, and achieving a breakthrough in full-spectrum absorption ability. The impact of Pd content on the performance of the composite material in photothermal evaporation is systematically explored, and the performance is theoretically validated by means of density functional theory (DFT) simulation. This work establishes a novel strategy for low-cost, high-efficiency solar-driven interfacial evaporation technology.

Key words: MoS₂; Pd cluster; DFT; photothermal conversion; LSPR; solar-driven interfacial evaporation

太阳能驱动界面蒸发(SDIE)是一种以可再生能源为动力的可持续清洁水生产过程。这种方法利用阳光蒸发水分并将其冷凝为高纯度的水,在工业废水净化和海水淡化方面都显示出其潜力^[1-11]。它还具有降低二氧化碳排放和减少能源消耗的优点^[12]。更高效实用的光热转换材料已成为SDIE的关键^[13-16]。

半导体基材料以其光热转换效率高、化学稳定性好、天然丰度广、适用性广而著称。以二维辉钼矿(MoS₂)为代表的光热转换材料,近年来,在太阳能脱盐^[17]、光热发电^[18]、光热检测^[19]、癌症治疗^[20]等方面得到了广泛的研究。然而,由于MoS₂带隙特性,其在近红外区域吸收光的能力受到严重限制。

根据光吸收阈值波长(λ)与带隙宽度(E_g)的关系 $\lambda = 1240/E_g$, MoS₂的光谱吸收阈值波长约为692 nm,使其能够有效吸收波长在200~700 nm之间的光子。为了克服这一限制,一种普遍的方法是将MoS₂与能够广泛吸收近红外光的有机物结合起来。然而,其表面缺乏官能团,这给MoS₂与有机材料的有效结合带来了挑战,从而限制了其应用。相反,贵金属在表现出良好的近红外光吸收和光热转换性能的同时,也能够有效地与MoS₂结合并改变其能带结构。因此,在本工作中,利用局域表面等离子体共振(LSPR)效应,将MoS₂与Pd团簇进行复合,以期提高材料的光吸收和光热转换性能,并使用密度泛函理论(DFT)模拟计算对材料的性能进

收稿日期:2025-02-25;修回日期:2025-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(52204281)

作者简介:李庚禧(1999-),男,硕士生,406983084@qq.com;王清淼(1991-),男,副教授,硕士生导师,研究方向为高盐废水处理、盐湖/矿产战略资源绿色提取与高值利用、新型环境与能源功能材料等,通讯联系人,qingmiaowang@wust.edu.cn。

行理论验证。

1 实验

1.1 实验材料

辉钼矿、无纺布、聚苯乙烯(PS)泡沫、乙醇、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、异丙醇、NaCl、HCl、PdCl₂、聚四氟乙烯、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、*N*-甲基吡咯烷酮(NMP)、NaOH。

1.2 制备过程

MoS₂的制备:将辉钼矿片剪裁成尺寸为1 cm×1 cm、厚度为1 mm的平面薄片。将这块薄片作为阴极在0.5 mol/L NaOH溶液中进行电解膨胀处理,施加6 V电压并保持12 h。电解后的物质与NMP混合后研磨至均匀。随后,将研磨后的混合物转移到烧杯中,用细胞破碎仪粉化成细小颗粒。超声处理5 min后,上清液经真空过滤并冷冻干燥,制备得MoS₂干燥粉末。

MoS₂-Pd的制备:制备不同浓度的Pd(II)溶液,将PdCl₂、HCl和PVP按摩尔比1:2:1配制,使用铝箔包裹小瓶。将溶液置于室温下搅拌24 h,使其充分溶解。此外,采用文献[21-22]的DMF还原方法合成Pd簇。取150 mL DMF置于250 mL圆底烧瓶中,再加入150 mg MoS₂,将混合物在400 r/min油浴下加热至140℃并持续搅拌。待反应完成后,将制备的Pd(II)溶液1.5 mL加入DMF,继续反应6 h。反应结束后,冷却至室温,进行真空过滤和冷冻干燥,获得材料MoS₂-Pd,备用。

改变Pd(II)溶液中PdCl₂的质量浓度0.5、1、10、40 mg/mL,并根据产物MoS₂-Pd中Pd的质量分数分别命名为MPP-0.3、MPP-0.6、MPP-6、MPP-21。

1.3 测试与分析

透射电子显微镜(TEM, JEM-F200)用于表征材料的微观结构,能谱仪(EDS, JEM-F200)用于分析MoS₂-Pd的成分。光谱吸收特性使用紫外-可见近红外分光光度计(UV-Vis-NIR, Shimadzu UV-3600i Plus)在200~2 500 nm波长范围内的进行表征。采用红外热像仪(IR, FLIR E4)和热电偶温度计(UT325F, UNI-T)对材料的热响应特性进行检测。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, NexION 300X)测定实验前后水中的离子浓度。此外,通过X射线衍射(XRD, SmartLab SE)分析MoS₂-Pd的相组成和结晶度;MoS₂-Pd中组成元素的价态通过X射线光电子能谱(XPS, K-Alpha)仪分析。

太阳能蒸发测试:将无纺布剪成2 cm×6 cm的长方形,在5 mL烧杯中加入20 mg材料、1 mL乙醇和少量聚四氟乙烯;将混合物用超声波清洗机超声处理20 min;将混合物涂在无纺布上后,将其干燥以获得太阳能驱动的界面蒸汽发生器(SIVG);将PS泡沫剪成半径2 cm、厚度1 cm的圆形,中间打一个2 cm×2 cm的孔作为隔热层;基于MoS₂-Pd的SIVG装置位于玻璃烧杯内的纯水或盐水溶液(用于脱盐测试)的表面;该装置暴露在带有标准AM1.5G滤光片的氙灯(PLS-SXE300, 泊菲莱科技有限公司)的模拟阳光下。在蒸发过程中,使用精度为1×10⁻⁴ g(BCE224I-1CCN)的分析天平测量水质量的变化。在光照前,在黑暗条件下测量1 h的蒸发速率。直接测量不同条件下的蒸发速率,并计算MoS₂-Pd的蒸发效率 η ,由公式定义。

$$\eta = v(C_p \times \Delta T + \Delta_{\text{vap}} H_m) / (C_{\text{opt}} I)$$

其中: v 为水的蒸发速率,kg/(m²·h); C_p 为水的比热容,kJ/(kg·℃); ΔT 为蒸汽温度与环境温度之差,℃; I 为标称太阳直接照度,1 kW/m²; C_{opt} 为光浓度,取值为1; $\Delta_{\text{vap}} H_m$ 为水在相应温度下的潜在蒸发焓,计算中大多采用100℃沸腾温度下的数值,即2 257 kJ/kg。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

2.1.1 TEM分析

图1(a)显示MoS₂呈现典型层状结构,其中以少数层结构为主。图1(b)显示Pd团簇被成功制备并在MoS₂表面实现高度均匀且随机的分布。

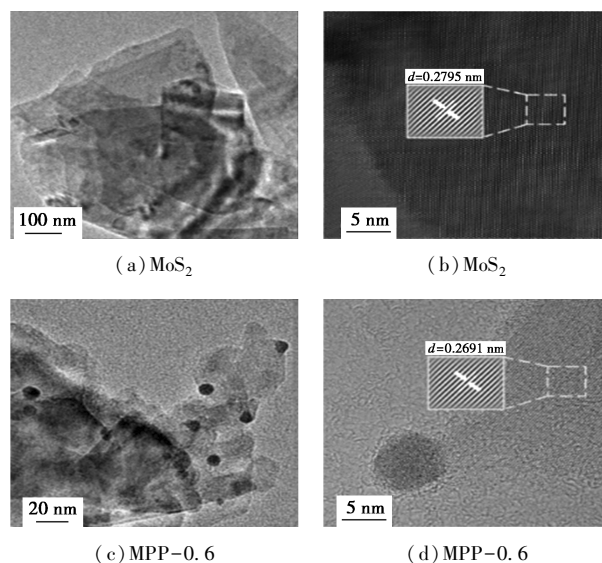


图1 样品的TEM与HRTEM图

基于 HRTEM 图像的傅里叶变换与逆变换分析,测定结果显示 MPP-0.6 和 MoS_2 的晶格间距分别为 0.269 1、0.279 5 nm。根据六方晶系面间距计算公式,MPP-0.6 中 MoS_2 基底晶格间距的显著收缩 ($\Delta d=0.0104$ nm) 表明其晶格常数发生系统性减小,这可能是由于 Pd 团簇与基底间的界面相互作用所致[图 1(c)]。由六边形晶体体系中特定平面的面间距 d_{hkl} 计算公式可以推断,MPP-0.6 中 MoS_2 衬底晶格间距的减小表明其晶格常数的减小[图 1(d)]。

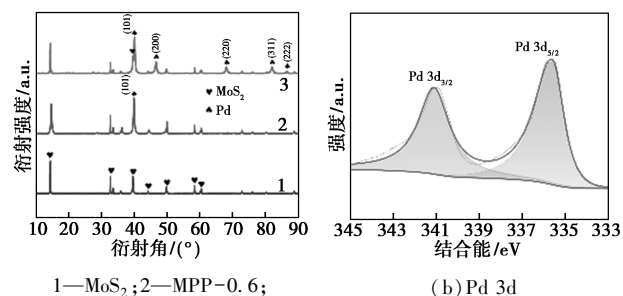
2.1.2 XRD 分析

图 2(a)为不同样品的 XRD 图。根据 MoS_2 的标准衍射数据卡片(JCPDS#37-1492),剥离的 MoS_2 样品的 XRD 图谱显示,其衍射峰位置与标准卡片中的数据完全吻合。在 14.39° 、 3.80° 、 39.65° 、 44.14° 、 49.87° 、 58.56° 、 60.64° 的衍射峰分别对应 MoS_2 的 (002)、(101)、(103)、(006)、(105)、(008)、(112) 晶面。剥离的 MoS_2 衍射图谱中几乎没有其他杂峰,表明该样品纯度高,未受其他杂质的干扰。

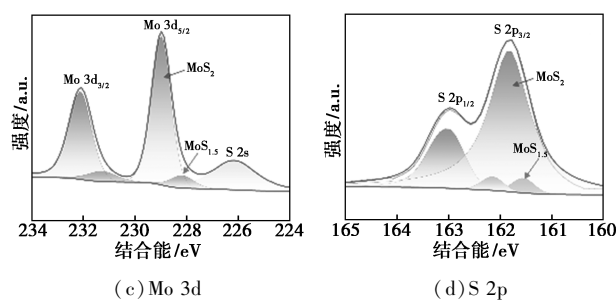
对于 MPP-0.6 样品,其 XRD 图谱中的衍射峰与纯 MoS_2 的衍射峰有微小差异,尤其是在 MoS_2 (101) 晶面的衍射峰上。MPP-0.6 样品中所有 MoS_2 的衍射峰相比剥离 MoS_2 的衍射峰出现了向高角度约 0.4° 的偏移。

2.1.3 XPS 分析

XPS 谱显示,Pd 的三维电子轨道只有两个峰,Pd $3d_{3/2}$ 和 Pd $3d_{5/2}$,分别位于 341.08、335.68 eV,分裂为 5.32 eV。这进一步证实了样品中 Pd 的金属态[图 2(b)]。 Mo 3d 和 S 2p 双峰的最强结合能分别为 229.0 eV (Mo $3d_{5/2}$) 和 161.8 eV (S $2p_{3/2}$)。此外, Mo 3d 和 S 2p 双峰的结合能较低,分别为 228.1 eV (Mo $3d_{5/2}$) 和 161.6 eV (S $2p_{3/2}$),表明它们处于中间氧化态,可能存在非化学计量的 $\text{MoS}_{1.8}$ [图 2(c)、(d)]。



1— MoS_2 ; 2—MPP-0.6;
3—MPP-21
(a) XRD 图

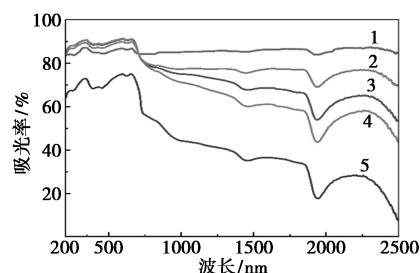


(c) Mo 3d (d) S 2p
图 2 样品的 XRD 图和 MPP-0.6 的 XPS 图

2.2 光热性能分析

2.2.1 吸光性能分析

图 3 显示了不同 Pd 浓度下 MoS_2 在各波长处的吸光度变化。随着 Pd 团簇比例从 0.3% 增至 21%,整体吸光率呈现明显上升趋势,尤其在近红外区域吸光率具有显著的提升,提升幅度为 30%~60%,并且这与 MoS_2 自身的吸光率变化规律相符。这一结果说明,Pd 团簇的加入显著提升了 MoS_2 的光吸收性能。



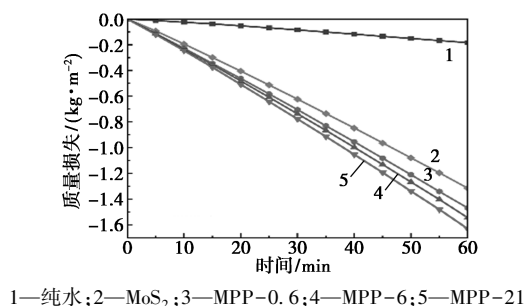
1—MPP-21; 2—MPP-6; 3—MPP-0.6; 4—MPP-0.3; 5— MoS_2

图 3 不同样品的吸光率

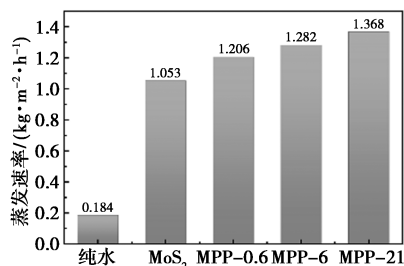
然而,随着 Pd 含量增加,吸光度的提升幅度较之低浓度时有所减弱,主要原因可能包括:LSPR 效应趋于饱和及颗粒间耦合作用,随着纳米颗粒间距缩小,颗粒间发生耦合,导致 LSPR 效应减弱或达到饱和;Pd 团簇尺寸增大,比表面积减小,有效比表面积的降低减少了 Pd 与光的相互作用区域,从而削弱了光吸收能力,同时,LSPR 效应受纳米颗粒尺寸影响,尺寸增大会减弱 LSPR 效应;表面散射效应增强,随着 Pd 浓度上升, MoS_2 表面逐渐粗糙,失去光滑界面,这导致光散射效应显著增强(具体表现为:表面散射,光在粗糙表面发生反射和散射,部分光无法进入材料内部被吸收,降低了有效吸收率;多次散射,在高浓度 Pd 颗粒分布中,光经历多次散射,使传播路径复杂化,降低了光吸收效率);Pd 与 MoS_2 界面相互作用减弱,颗粒堆积效应减少了 MoS_2 与 Pd 的有效接触面积,削弱了界面电子转移效应。

2.2.2 水蒸发性能分析

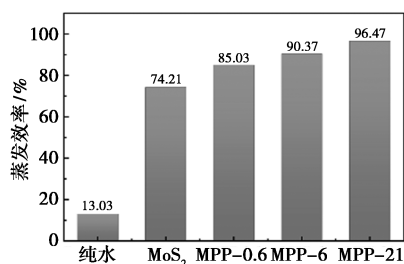
对 MoS_2 、MPP-0.6、MPP-6 和 MPP-21 的光热转换性能进行了系统研究。在模拟太阳光照射下,通过监测纯水蒸发过程中的质量变化来评估其性能。如图 4 所示,未使用蒸发器时,60 min 内的质量损失仅为 -0.184 kg/m^2 。然而,引入蒸发器后,质量损失显著增加,达到未使用蒸发器时的 7.15~8.40 倍,同时蒸发效率也提升了 5.69~6.94 倍。在暗环境下,蒸发器的蒸发速率为 0.263 kg/m^2 ,这一数据为计算不同条件下的蒸发速率和效率提供了基准。



(a) 质量损失曲线



(b) 水蒸发速率



(c) 光热转换效率

图 4 不同 MoS_2 -Pd 样品水蒸发性能

具体来看, MoS_2 的水蒸发速率为 $1.053 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,蒸发效率为 74.21%。MPP-0.6 的表现更为优异,其蒸发速率达到 $1.206 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,效率提升至 85.03%。MPP-6 的蒸发速率进一步增加至 $1.282 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,效率高达 90.37%。而 MPP-21 的性能最为突出,水蒸发速率达到 $1.368 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,效率更是达到了 96.47%

这种蒸发速率的显著提升主要归因于 LSPR 效

应。LSPR 效应能够加速光热转换过程,通过增强材料的晶格振动和电子迁移能力,将辐射能高效转化为热能^[23-26]。研究还表明,随着材料中 Pd 团簇浓度的增加,LSPR 效应更加显著,从而进一步提高了光热转换效率。

2.2.3 循环稳定性

为了评估蒸发装置的长期稳定性,在 1 个太阳光强度 (1 kW/m^2) 和质量分数 3.5% 盐水条件下进行了 10 次循环实验,每次实验持续 1 h,结果见图 5。所有太阳能蒸发器在 10 次循环后均表现出高度稳定的蒸发速率,未出现明显的性能衰减。其中, MoS_2 蒸发器的稳定性尤为突出,这主要得益于其独特的物理和化学特性。

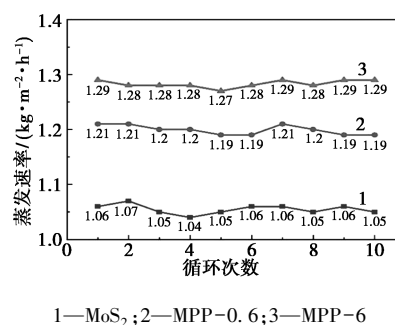


图 5 循环稳定性

MoS_2 的疏水性在稳定蒸发过程中起到了关键作用。其表面特性能够有效调控水分子向蒸发表面的传输,同时排斥盐分,从而避免了盐结晶的积累,确保了蒸汽的持续高效生成。此外, MoS_2 作为一种半导体材料,具有优异的化学稳定性,能够耐受腐蚀性环境和其他可能影响材料性能的化学反应。这种化学稳定性使其在长时间运行中仍能保持高效的光热转换性能。

更重要的是, MoS_2 蒸发器能够支持高海水通量,并实现 NaCl 的自清洁功能。其疏水表面和化学稳定性共同作用,有效防止了盐分在蒸发器表面的沉积,从而避免了因盐结晶导致的性能下降。这些特性不仅确保了蒸发器在物理和化学上的稳定性,还使其具备良好的可重复使用性,为长期应用于海水淡化等领域提供了可靠的技术支持。

2.2.4 水净化性能

为了更全面地评估蒸发器在实际太阳能脱盐环境中的水净化性能,采用中国渤海的真实海水样品进行了实验,并通过电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 对蒸馏水中的离子成分进行了精确分析,实验结果如图 6 所示。经过 MPP-0.6 蒸发器处理后,海

水中的 4 种主要离子 (Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ca^{2+}) 质量浓度显著下降,降幅均超过 3 个数量级。处理后的离子质量浓度不仅远低于传统膜海水淡化技术的水平^[27-28],还完全满足世界卫生组织 (WHO) 的饮用水标准^[29]。 Na^+ 质量浓度降至 0.314 0 mg/L、 Mg^{2+} 质量浓度降至 0.009 mg/L、 K^+ 质量浓度降至 0.096 mg/L、 Ca^{2+} 质量浓度降至 0.024 mg/L。这些数据表明,MPP-0.6 蒸发器在高效脱盐和水质净化方面表现出色,具备在实际应用中提供安全饮用水的潜力。

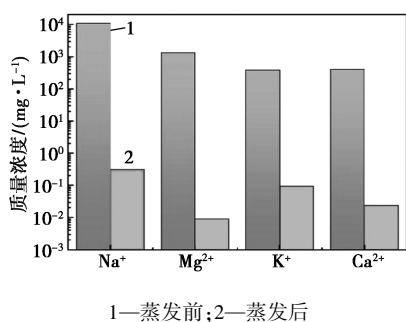


图 6 蒸发前后水中离子质量浓度

2.2.5 热管理

如图 7 所示,通过红外热成像仪对不同太阳辐照水平下 MPP-0.6 的表面温度进行监测,结果显示蒸发器表面温度分布均匀且中心区域热量集中。这得益于 PS 泡沫作为高效隔热材料的使用,显著减少了热量向水体和周围环境的热传导损失,从而大幅提升了热能的利用效率。这一现象表明,太阳能界面蒸汽发生器在热管理方面表现出色,能够有效集中和利用热能。

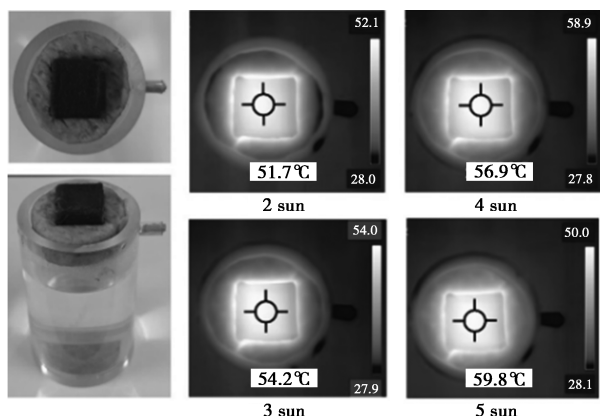


图 7 不同光强下 MPP-0.6 温度分布图

如图 8 所示,通过热电偶实时监测 MPP-0.6 在 1 个太阳光强照射下的温度随时间的变化。实验结果显示,MPP-0.6 的表面温度在短短 4 min 内从初始的 20.8℃ 迅速上升至 42.6℃,随后趋于稳定。这

一快速升温过程表明,MPP-0.6 材料在光热转换中具有优异的响应速度,能够高效地将太阳能转化为热能,并在短时间内达到稳定工作状态。这种快速响应特性进一步证明了 MPP-0.6 在实际应用中的高效性和可靠性。

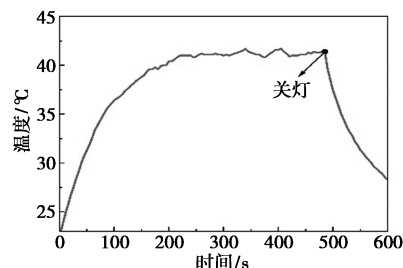


图 8 MPP-0.6 在 1 个光照强度下的升温曲线

2.3 DFT 计算

为了更好地阐明 MoS_2 和 $\text{MoS}_2\text{-Pd}$ 的光热性质,采用 DFT 模拟分析其电子结构和电荷密度分布。

本研究使用 CASTEP 软件包进行所有计算。构建一个由 36 个 S 原子和 18 个 Mo 原子组成的 $3 \times 3 \times 2$ MoS_2 超胞,晶格常数为 $12.664 \text{ \AA} \times 12.664 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$)。随后,按照 Pd 与 Mo 原子的比例 1:9 和 4:9 加入 Pd 原子[图 9(a)],根据 Pd 元素的比重分别记录为 $\text{MoS}_2\text{-Pd} (\approx 6\%)$ 和 $\text{MoS}_2\text{-Pd} (\approx 21\%)$ 。真空厚度设置为 $15\ 000 \text{ \AA}$,以防止相邻层之间的相互作用。利用广义梯度近似 (GGA) 和 Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) 交换相关泛函,结合 DFT-D 方法,研究了电子相互作用和相关能。由于 2H-MoS_2 属于六边形晶格,因此选择的布里渊区路径为 $\Gamma\text{-M-K-}\Gamma\text{-A-L-H-A|L-M|K-H}$ 。布里渊区 k 点采样选择为 $5 \times 5 \times 1$ 。为了保证仿真精度,对所有结构进行了优化,建立的参数为能量收敛精度为 10^{-5} Ha ,最大力为 0.002 Ha/\AA ,最大位移为 0.005 \AA 。

在图 9(b) 中,比较了 MoS_2 、 $\text{MoS}_2\text{-Pd} (\approx 6\%)$ 和 $\text{MoS}_2\text{-Pd} (\approx 21\%)$ 的总态密度 (TDOS)。 $\text{MoS}_2\text{-Pd} (\approx 6\%)$ 和 $\text{MoS}_2\text{-Pd} (\approx 21\%)$ 的 TDOS 相对于 MoS_2 向左移动,表明电子向导带的转移增强。更具体地说,掺杂 Pd 引入了费米能级附近的新能级,从而促进了电子从价带向导带的运动。

基于图 9(c) UV-Vis-NIR 漫反射数据,Tac Plot 法计算得到的 MoS_2 带隙为 1.63 eV ,与 DFT 分析得到的 1.65 eV 带隙[图 9(d)]非常吻合。这证实了 DFT 计算与 UV-Vis-NIR 表征结果的一致性。在 MoS_2 中引入 Pd 原子带来了额外的电子和新的能级,改变了材料的电子结构和电荷分布,使带结构更加复杂,带隙变小。图 9(e) 与图 9(f) 为 $\text{MoS}_2\text{-Pd}$

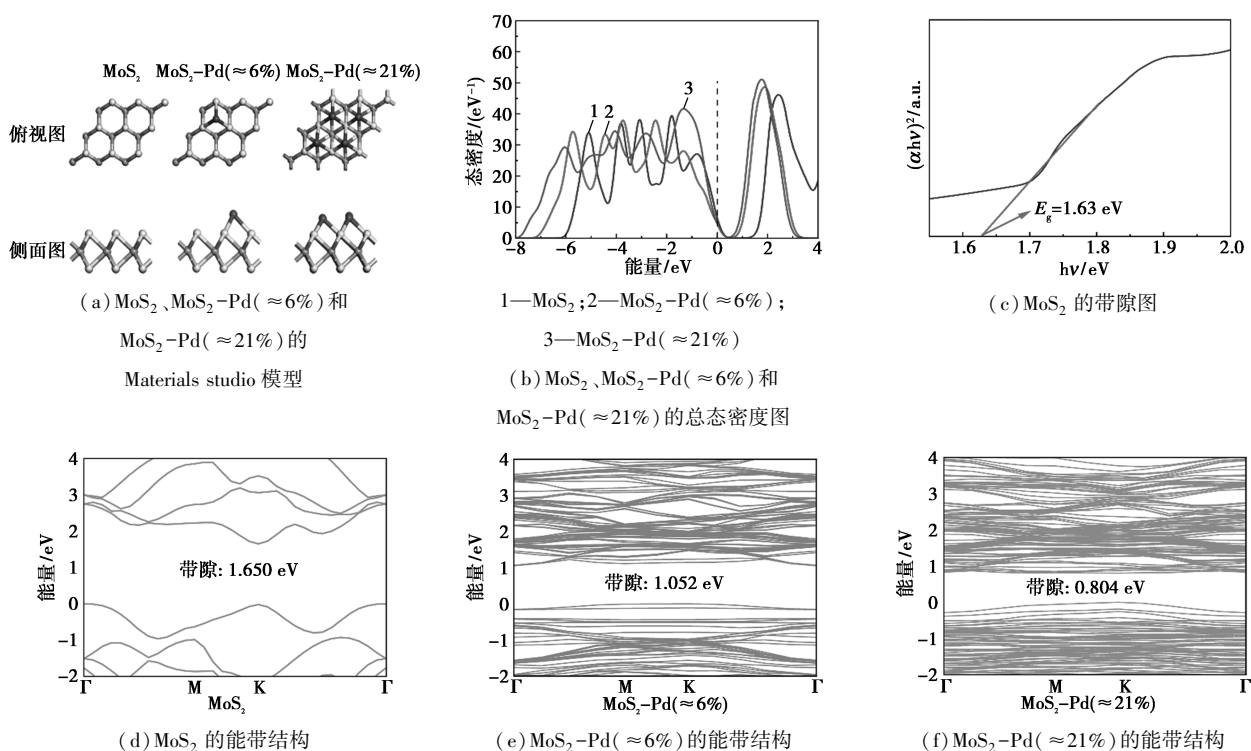


图 9 DFT 模拟分析

($\approx 6\%$) 与 $\text{MoS}_2\text{-Pd}(\approx 21\%)$ 的带隙结构图, $\text{MoS}_2\text{-Pd}(\approx 6\%)$ 的带隙为 1.052 eV, $\text{MoS}_2\text{-Pd}(\approx 21\%)$ 的带隙为 0.804 eV。Pd 原子的加入显著降低了 MoS_2 的禁带宽度, 使材料能够吸收更宽光谱范围的光子, 从而进一步提升光热转换效率和光热转换效率。

3 结论

本研究以辉钼矿为原料, 通过剥离制备 MoS_2 , 通过将 Pd 团簇与 MoS_2 复合, 成功制备了具有优异光热转换性能的 $\text{MoS}_2\text{-Pd}$ 材料, 并系统研究了其光吸收能力、光热转换效率和界面蒸发实际应用能力, 具体结论如下。

(1) 实验结果表明, 随着 Pd 团簇浓度的增加, $\text{MoS}_2\text{-Pd}$ 材料的光吸收能力显著提升, 尤其是在近红外区域, 吸光率提升了 30%~60%。光热转换效率方面, MPP-0.6、MPP-6 和 MPP-21 的蒸发效率分别达到了 85.03%、90.37% 和 96.47%, 显著高于纯 MoS_2 的 74.21%。这一提升主要归因于 LSPR 效应, Pd 团簇的引入增强了材料的光热转换能力, 加速了光能向热能的转化。

(2) 在经济效益和性能的平衡方面, MPP-0.6 表现出色。虽然 MPP-21 的光热转换效率最高, 但其 Pd 含量较高, 制备成本相对较高。相比之下,

MPP-0.6 在较低的 Pd 浓度下实现了较高的光热转换效率 (85.03%), 且在循环稳定性和水净化性能方面表现优异, 能够有效去除海水中的离子, 满足世界卫生组织的饮用水标准。因此, MPP-0.6 具备在实际界面蒸发中大规模推广的潜力。

参考文献

- [1] Alsbaiee A, Smith B J, Xiao L, *et al.* Rapid removal of organic micropollutants from water by a porous β -cyclodextrin polymer [J]. *Nature*, 2016, 529 (7585): 190-194.
- [2] 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.
- [3] Zhang P, Li J, Lv L, *et al.* Vertically aligned graphene sheets membrane for highly efficient solar thermal generation of clean water [J]. *ACS Nano*, 2017, 11 (5): 5087-5093.
- [4] Tao P, Ni G, Song C, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation [J]. *Nature Energy*, 2018, 3 (12): 1031-1041.
- [5] Chen K, Ma L, Shi J, *et al.* Fumed nano-silica modified PVA-chitosan composite hydrogel with Janus structure for solar-driven interfacial evaporation [J]. *Solar Energy*, 2024, 281: 120987.
- [6] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, 313 (5790): 1068-1072.
- [7] Qiblawey H M, Banat F. Solar thermal desalination technologies [J]. *Desalination*, 2008, 220 (1/2/3): 633-644.
- [8] Wang P. Emerging investigator series: The rise of nano-enabled photothermal materials for water evaporation and clean water production

- by sunlight [J]. *Environmental Science-Nano*, 2018, 5 (5) : 1078–1089.
- [9] Anis S F, Hashaikh R, Hilal N. Functional materials in desalination: A review [J]. *Desalination*, 2019, 468: 114077.
- [10] Feng H, Qiu Y, Li Y, *et al.* High-efficiency 3D solar evaporators with the PSAVF strategy for achieving excellent salt resistance [J]. *Solar Energy*, 2024, 278: 120765.
- [11] Chen C, Kuang Y, Hu L. Challenges and opportunities for solar evaporation [J]. *Joule*, 2019, 3 (3) : 683–718.
- [12] Zhang Y, Sivakumar M, Yang S, *et al.* Application of solar energy in water treatment processes: A review [J]. *Desalination*, 2018, 428: 116–145.
- [13] Zhang P, Liao Q, Yao H, *et al.* Direct solar steam generation system for clean water production [J]. *Energy Storage Materials*, 2019, 18: 429–446.
- [14] Chen C, Li Y, Song J, *et al.* Highly flexible and efficient solar steam generation device [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (30) : 1701756.
- [15] 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 America*, 2016, 113 (49) : 13953–13958.
- [16] Li R, Zhang L, Shi L, *et al.* MXene TiC₂: An effective 2D light-to-heat conversion material [J]. *ACS Nano*, 2017, 11 (4) : 3752–3759.
- [17] Wang Q, Guo Q, Jia F, *et al.* Facile preparation of three-dimensional MoS₂ aerogels for highly efficient solar desalination [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12 (29) : 32673–32680.
- [18] Guo Z, Wang J, Wang Y, *et al.* Achieving steam and electrical power from solar energy by MoS₂-based composites [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131008.
- [19] Lin Y, Huang X, Hu L, *et al.* Self-assembly MoS₂@ MnO₂ nanoflowers for the fluorescence/magnetic resonance dual-modal sensing of H₂O₂ and photothermal therapy [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6 (23) : 22265–22274.
- [20] Yang H, Zhao J, Wu C, *et al.* Facile synthesis of colloidal stable MoS₂ nanoparticles for combined tumor therapy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 351: 548–558.
- [21] Hyotanishi M, Isomura Y, Yamamoto H, *et al.* Surfactant-free synthesis of palladium nanoclusters for their use in catalytic cross-coupling reactions [J]. *Chemical Communications*, 2011, 47 (20) : 5750–5752.
- [22] Ishida J, Nakatsuji M, Nagata T, *et al.* Synthesis and characterization of *N,N*-dimethylformamide-protected palladium nanoparticles and their use in the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction [J]. *ACS Omega*, 2020, 5 (16) : 9598–9604.
- [23] Li B, Wang Q, Zou R, *et al.* Cu_{7.2}S₄ nanocrystals: A novel photothermal agent with a 56.7% photothermal conversion efficiency for photothermal therapy of cancer cells [J]. *Nanoscale*, 2014, 6 (6) : 3274–3282.
- [24] Bu X, Zhou D, Li J, *et al.* Copper sulfide self-assembly architectures with improved photothermal performance [J]. *Langmuir*, 2014, 30 (5) : 1416–1423.
- [25] Ayala-Orozco C, Urban C, Knight M W, *et al.* Au nanomatryoshkas as efficient near-infrared photothermal transducers for cancer treatment: Benchmarking against nanoshells [J]. *ACS Nano*, 2014, 8 (6) : 6372–6381.
- [26] Huang X H, El-Sayed I H, Qian W, *et al.* Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128 (6) : 2115–2120.
- [27] Guo H, Yan P, Sun X, *et al.* Ion-engineered solar desalination: Enhancing salt resistance and activated water yield [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149918.
- [28] Zhou L, Tan Y, Wang J, *et al.* 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10 (6) : 393–398.
- [29] Wu S, Xiong G, Yang H, *et al.* Multifunctional solar waterways: Plasma-enabled self-cleaning nanoarchitectures for energy-efficient desalination [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9 (30) : 1901286. ■

(上接第 118 页)

- [12] Ma C, Wang Y, Chen W, *et al.* Caspase-1 regulates the apoptosis and pyroptosis induced by phthalocyanine zinc-mediated photodynamic therapy in breast cancer MCF-7 cells [J]. *Molecules*, 2023, 28 (16) : 5934.
- [13] Kyuno D, Takasawa A, Kikuchi S, *et al.* Role of tight junctions in the epithelial-to-mesenchymal transition of cancer cells [J]. *Biochim Biophys Acta Biomembr*, 2021, 1863 (3) : 183503.
- [14] Sarkar R, Biswas S, Ghosh R, *et al.* Exosome-sheathed porous silica nanoparticle-mediated co-delivery of 3, 3'-diindolylmethane and doxorubicin attenuates cancer stem cell-driven EMT in triple negative breast cancer [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2024, 22 (1) : 285.
- [15] Dini I, Grumetto L. Recent advances in natural polyphenol research [J]. *Molecules*, 2022, 27 (24) : 8777.
- [16] Majumder A, Ray S, Banerji A. Epidermal growth factor receptor-mediated regulation of matrix metalloproteinase-2 and matrix metalloproteinase-9 in MCF-7 breast cancer cells [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2019, 452 (1/2) : 111–121.
- [17] Yan L, Song Z, Yi L, *et al.* TMEM176B inhibits ovarian cancer progression by regulating EMT via the Wnt/ β -catenin signaling pathway [J]. *Journal of Translational Medicine*, 2025, 23 (1) : 350. ■