

引用格式: 林敏, 吕函函, 刘子潇, 等. Pd/MoS₂ 花状超结构的制备及其光热催化铃木偶联反应性能研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(7): 637-643.

LIN M, LV H H, LIU Z X, *et al.* Preparation of Pd/MoS₂ Flower-Like Superstructures for Photothermal Catalysis of Suzuki Coupling Reaction[J]. Materials China, 2024, 43(7): 637-643.

Pd/MoS₂ 花状超结构的制备 及其光热催化铃木偶联反应性能研究

林 敏, 吕函函, 刘子潇, 王海风, 姜 琴, 陈志钢

(东华大学材料科学与工程学院 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

摘 要: Pd 作为高活性的贵金属催化剂广泛用于铃木偶联反应等有机反应。为提高 Pd 催化剂对铃木偶联反应的催化性能, 采用具有光热效应的 MoS₂ 作为载体, 设计并制备 Pd/MoS₂ 复合纳米催化剂。首先通过水热法合成 MoS₂ 花状超结构, 该结构由纳米片(片径为 200~300 nm, 厚度约为 7 nm)组装而成。利用还原法在 MoS₂ 花状超结构的表面负载 Pd 纳米颗粒, 其直径约为 11 nm。随后, 以 Pd/MoS₂ 花状超结构为催化剂研究了激光加热和油浴加热两种条件下的铃木偶联反应效率。随着波长 808 nm 的激光的强度从 1 增加到 4 W/cm², 激光加热使溶液平衡温度从 29.4 升高到 60.8 °C, 相应的光热催化产率从 30.5% 提高到 86.3%, 明显高于油浴加热同等温度下的热催化产率(24.3%~60.4%)。当反应温度为 40 °C 时, 光热催化速率是热催化的 1.5 倍。综上, Pd/MoS₂ 花状超结构展现了较好的光热催化性能, 为设计高活性的铃木偶联反应催化剂提供了新思路。

关键词: 二硫化钼纳米片; 钯纳米颗粒; 铃木偶联反应; 光热催化

中图分类号: O643.36; TB383 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2024)07-0637-07

Preparation of Pd/MoS₂ Flower-Like Superstructures for Photothermal Catalysis of Suzuki Coupling Reaction

LIN Min, LV Hanhan, LIU Zixiao, WANG Haifeng, JIANG Qin, CHEN Zhigang

(State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Pd has been widely used as a highly active noble metal catalyst for organic reactions such as Suzuki coupling reaction. To improve its catalytic performance for Suzuki coupling reaction, Pd/MoS₂ flower-like superstructures were designed and prepared by using MoS₂ with photothermal effect as the carrier. Firstly, MoS₂ flower-like superstructures were synthesized by a simple hydrothermal method, and they were constructed from nanosheets with diameters of 200~300 nm and thicknesses of about 7 nm. Pd nanoparticles with diameters of about 11 nm were loaded on the surface of MoS₂ by a reduction route. Subsequently, by using Pd/MoS₂ flower-like superstructures as the catalyst, the conversion efficiency of Suzuki coupling reaction was investigated under both laser heating and oil bath heating conditions. When the intensity of 808 nm laser as heating sources went up from 1 to 4 W/cm², the equilibrium temperature of solution from laser heating increased from

29.4 to 60.8 °C. Accordingly, the photothermal catalysis yield enhanced from 30.5% to 86.3%, which was significantly higher than the thermocatalytic yield (from 24.3% to 60.4%) at the same temperature from oil bath heating. When the reaction temperature was 40 °C, the photothermal catalysis rate was 1.5 times as high as that of the thermal catalysis. Therefore, Pd/MoS₂ flower-like superstructures show good photothermal catalytic performance, which assists in the design of highly active catalysts for Suzuki coupling reaction.

Key words: MoS₂ nanosheets; Pd nanoparticles; Suzuki coupling reaction; photothermal catalysis

收稿日期: 2022-12-19 修回日期: 2023-01-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资助项目(2232024Y-01);
国家自然科学基金资助项目(52161145406)

第一作者: 林 敏, 女, 1999 年生, 硕士研究生

通讯作者: 姜 琴, 女, 1988 年生, 讲师,

Email: qinjiang@dhu.edu.cn

陈志钢, 男, 1979 年生, 教授, 博士生导师,

Email: zgchen@dhu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202212023

1 前言

铃木偶联反应是合成聚烯烃、苯乙烯和联苯衍生物等有机化合物的重要途径之一,在精细化工等领域得到广泛应用^[1, 2]。影响铃木偶联反应的两个重要因素是温度和催化剂。传统催化反应多采用 Pd, Au, Cu 和 Pt 等过渡金属配合物作为均相催化剂^[3],在外部加热条件下驱动反应进行。然而,传统的均相催化剂存在毒性大、重复利用率低^[4]以及分离回收成本高^[5]的问题,且需要使用化石能源供能,对能源和环境都是巨大的挑战。近年来,新兴的光热催化剂能将太阳能直接转化成热能,具有高效环保的优点,被广泛应用于气相和液相催化反应^[6-8]。目前已报道的光热材料主要包括 4 类,分别是贵金属纳米颗粒(如金、银^[9]等)、金属半导体纳米颗粒(如纳米硫化铜^[10]、纳米硫化钼^[11]等)、碳基纳米材料(如石墨烯^[12]、碳纳米管^[13]等)以及聚合物(如聚多巴胺^[14]、聚苯胺^[15]等)。

在光热材料中,金属基多相催化剂具有较好的催化活性,在现代催化工业中得到了广泛应用^[16, 17]。其中, Pd 纳米颗粒具有表面等离子体共振效应和较多的表面活性位点,是催化铃木偶联反应最常用的催化剂。然而, Pd 纳米颗粒表面能高,导致它容易团聚,限制了其催化活性^[18]。因此,开发合适的、具有光热效应的载体是非常有必要的,这样的载体既能有效稳定 Pd 纳米颗粒,又能提高催化剂的局部温度,进而增强催化活性^[19]。

MoS₂ 是一种典型的二维光热材料,具有较大的比表面积、较快的载流子迁移速率和较高的光响应能力,被广泛应用于催化领域^[11, 20, 21]。例如, Zhou 课题组^[22]开发了 Ag/Bi₂S₃/MoS₂ 三元异质结催化剂,在可见光照射下, 210 min 内催化剂可降解 99.2% 的 2,4-二氯酚。其中, MoS₂ 的光热效应可以加快光生载流子的迁移速率,这有利于提高三元异质结的光催化活性。此外,自组装后的 MoS₂ 纳米花具有更大的光催化比表面积,表现出增强的光捕获能力。Shin 等^[23]开发了微片和纳米片 Pd-MoS₂,在可见光下 Pd-MoS₂ 纳米片对铃木偶联反应显示出更高的催化效率。然而,在现有研究中, Pd/MoS₂ 的光热催化性能与单一的热催化性能的差异有待进一步明确。此外,近红外光驱动的催化反应具有巨大的潜力,可以克服紫外或可见光驱动的限制性,在铃木偶联反应中的应用有待进一步研究。

基于此,本研究利用水热法合成了具有光热效应的 MoS₂,将它作为载体负载了 Pd 纳米颗粒,制备了光热催化剂 Pd/MoS₂,通过 SEM、TEM 和 XRD 对催化剂的形貌和结构进行表征,并进一步测试了催化剂的光学和光热

性能。以铃木偶联反应为模型,探究了 Pd/MoS₂ 在油浴加热和激光加热条件下的热催化和光热催化性能。

2 实验

2.1 实验原料

钼酸铵、硫脲、硼氢化钠(NaBH₄)、氯化钯(PdCl₂)、苯硼酸、碘苯、无水碳酸钾、三氯甲烷和无水硫酸镁,以上试剂均购于国药集团化学试剂有限公司。

2.2 光热催化剂的制备

Pd/MoS₂ 采用还原法合成(图 1)。首先,在 70 mL 去离子水中依次加入 2.744 g(0.007 mol)钼酸铵和 2.284 g(0.030 mol)硫脲,磁力搅拌 30 min。随后,将混合溶液装入 100 mL 聚四氟乙烯不锈钢水热釜中,于 200 °C 恒温烘箱中保持 24 h。反应完成后,自然冷却至室温,然后通过离心分离出固体,分别用乙醇和去离子水洗涤 3 次。将离心所得沉淀冷冻干燥 8 h,所得黑色粉末即为 MoS₂。取 15 mg MoS₂ 粉末于烧杯中,加入 15 mL 去离子水,超声 30 min 使固体粉末均匀分散。随后加入 1 mL PdCl₂ 溶液(0.01 mol/L),室温搅拌 2 h。缓慢加入 2 mL NaBH₄ 水溶液(0.1 mol/L),继续室温搅拌 2 h。最后,离心分离出固体并用去离子水清洗 3 次,经冷冻干燥得到黑色固体粉末 Pd/MoS₂。

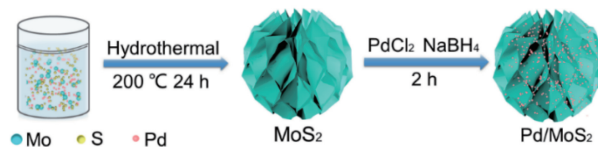


图 1 Pd/MoS₂ 的制备流程图

Fig. 1 Flow chart of Pd/MoS₂ preparation

2.3 催化剂表征

利用德国 Bruker 公司 D8 Advance 型 X 射线粉末衍射仪测试了催化剂的物相组成和晶体结构,射线源为 Cu K α 射线($\lambda = 1.5418$ nm)。通过 S-4800 型扫描电子显微镜(日本日立公司)和 Talos F200S 型场发射透射电子显微镜(美国 Thermo Fisher 公司)研究了催化剂的表面形态和结构。催化剂的光学性能通过日本岛津公司的 UV-1900 型紫外可见近红外光谱仪测试。催化剂的光热性能测试过程如下:先配置催化剂的水分散液,然后用波长 808 nm 的激光(激光强度 2 W/cm²)照射 Pd/MoS₂ 溶液(0.06 g/L, 1 mL),同时用 FLIR A300 型红外成像仪(测温范围: 20 °C ~ 120 °C,测温精度: ± 2 °C)实时监测温度变化。

2.4 催化性能测试

以铃木偶联反应作为催化反应模型(图 2a),投料量和步骤如下:将 0.1463 g(1.2 mmol)苯硼酸加入 10 mL 乙

醇中, 配成 0.12 mol/L 苯硼酸溶液备用; 再将 0.2764 g (2 mmol) 碳酸钾加入 8 mL 去离子水中, 配成 0.25 mol/L 碳酸钾溶液备用。取 0.5 mL 苯硼酸溶液和 0.4 mL 碳酸钾溶液加入带螺口拧盖的比色皿中, 之后加入 0.1 mL (1.7 g/L) 的 Pd/MoS₂ 水分散液和磁力搅拌子 (长度 5 mm, 宽度 3 mm), 经过 15 min 预热后, 加入 5.6 μ L (0.05 mmol) 的碘苯, 开始计时。反应结束后, 通过萃取分离出有机相, 并用无水硫酸镁去除多余水分, 采用气相色谱质谱联用仪 (GCMS-QP2010Ultra, 日本) 分析产物。

光热催化反应 (图 2b) 过程如下: 在室温下, 采用波长 808 nm 的激光照射含催化剂的反应体系, 通过催化剂的光热效应使反应溶液升温, 使用红外成像仪观察升温过程并且记录升温曲线。待溶液温度达到平衡后, 加入碘苯以后开始反应。反应过程中, 使用水银温度计在一定时间间隔内测定温度取平均值, 同时通过红外成像仪实时监测温度变化。

热催化反应 (图 2c) 过程如下: 将含有催化剂的反应溶液放到油浴锅中, 通过外部热量输入使溶液逐渐升温。用水银温度计监测溶液温度, 使反应体系的平衡温度与激光加热一致, 加入碘苯后开始计时。

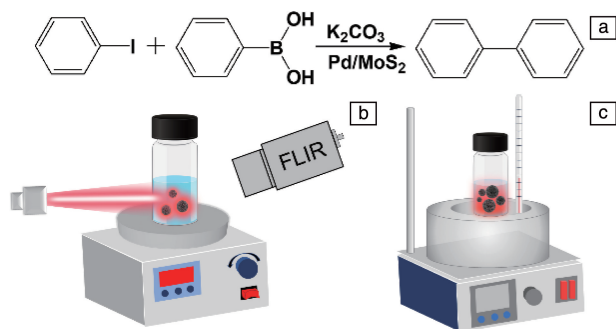


图2 铃木偶联反应(a), 光热催化反应(b)和热催化反应(c)装置图

Fig. 2 Suzuki coupling reaction (a), device diagrams of photothermal catalytic reaction (b) and thermal catalytic reaction (c)

3 结果与讨论

3.1 催化剂的结构表征

采用 XRD 对催化剂的晶体结构和物相组成进行分析, 结果如图 3。MoS₂ 在 2θ 为 14°、33°、36°、43° 和 58° 处有明显的特征衍射峰, 分别对应于六方 MoS₂ 的 (002)、(100)、(101)、(103) 和 (110) 晶面 (JCPDS#37-1492)。同时 MoS₂ 在 14° 处的特征峰较强, 表明在 (002) 晶面方向上形成较好的层状结构^[24]。负载 Pd 后, Pd/MoS₂ 存在明显的 MoS₂ 特征峰, 表明 MoS₂ 的晶型结构没有改变, 而 Pd 的特征峰不明显, 这可能是由于 Pd 的负载量较少, 仪器无法有效检测。

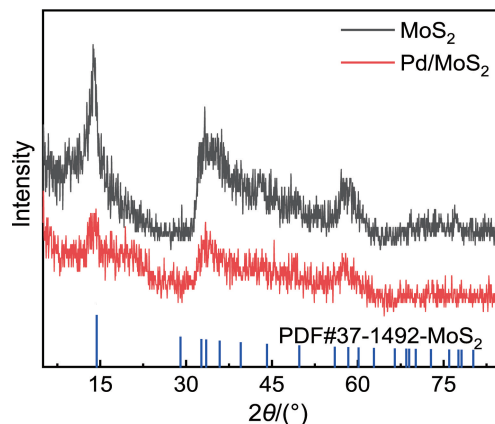


图3 MoS₂ 和 Pd/MoS₂ 的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of MoS₂ and Pd/MoS₂

3.2 催化剂的形貌表征

通过 SEM 对 MoS₂ 和 Pd/MoS₂ 进行形貌表征, 结果如图 4。MoS₂ 为花状超结构材料, 超结构由层状堆叠的纳米片组装而成, 纳米片的大小约为 200~300 nm, 厚度约为 7 nm (图 4a 和 4b)。负载 Pd 后, Pd/MoS₂ 样品保持了花状超结构形貌, 但纳米片表面附着了一些纳米颗粒 (图 4c 和 4d)。由 EDS 面扫描结果 (图 4e) 可知, Mo 和 S 这两种元素呈现鲜明的映射图像, 且近乎均等分布, 推断为 MoS₂ 的元素组成。此外, 还存在 Pd 元素, 结合 SEM 的分析结果可得, Pd 纳米颗粒成功生长在花状 MoS₂ 的表面。

采用 TEM 进一步对催化剂的形貌进行分析, 见图 5。MoS₂ 呈现花状超结构, 边缘有单层或少层片状 (图 5a~5c)。Pd/MoS₂ 样品中 MoS₂ 的花状形貌没有发生改变, 其表面负载了平均粒径约为 11 nm 的纳米颗粒, 颗粒分散均匀且没有明显的团聚 (图 5d 和 5e)。高分辨 TEM 照片表明纳米颗粒的晶格间距为 0.23 nm, 对应于 Pd (JCPDS#89-4897) 的 (111) 晶面 (图 5f)。

3.3 催化剂的光学性能

通过紫外-可见光谱仪测试了不同浓度 MoS₂ 水分散液的光学性质 (图 6)。MoS₂ 在 200~1000 nm 波长范围内表现出明显的光吸收, 且具有较好的近红外光吸收能力。随着 MoS₂ 水分散液浓度由 0.01 增加到 0.1 g/L, MoS₂ 在近红外光区的光吸收随之增强, 显示出 MoS₂ 浓度依赖的光吸收能力。

3.4 催化剂的光热性能

由于催化剂的光热效应会产生热能, 提升铃木偶联反应速率, 因此催化剂的光热性能是一项重要指标。根据文献报道的方法^[25], 测试了 Pd/MoS₂ 的光热转换效率 (η_T)。首先, 采用波长 808 nm 的激光照射 0.06 g/L、1 mL 的 Pd/MoS₂ 分散液, 630 s 后溶液温度达到平衡, 然后关闭激光器, 通过红外成像仪记录样品的升降温曲

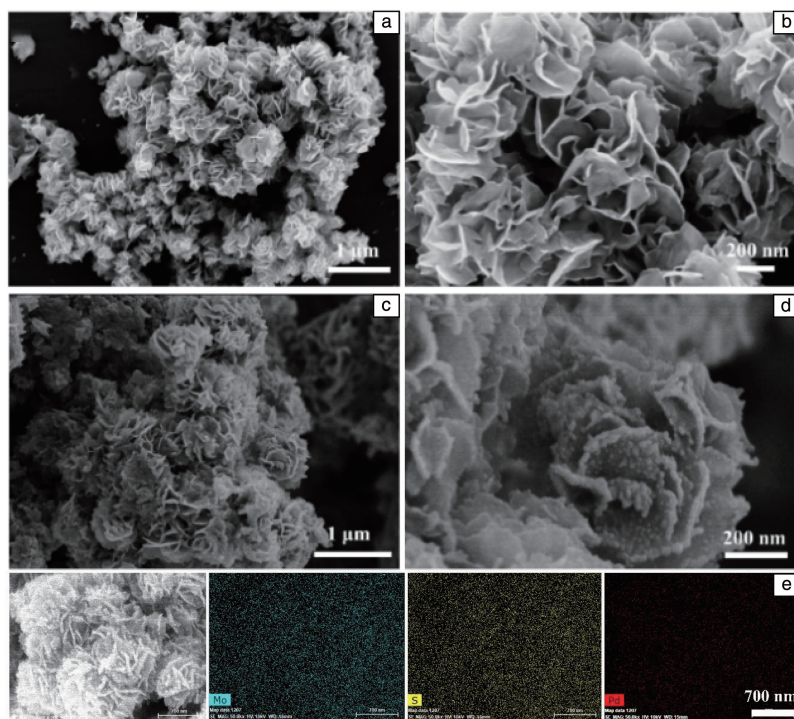


图 4 MoS₂(a, b)和Pd/MoS₂(c, d)的SEM照片, Pd/MoS₂的EDS元素面扫描结果(e)

Fig. 4 SEM images of MoS₂(a, b) and Pd/MoS₂(c, d), EDS elemental mappings of Pd/MoS₂(e)

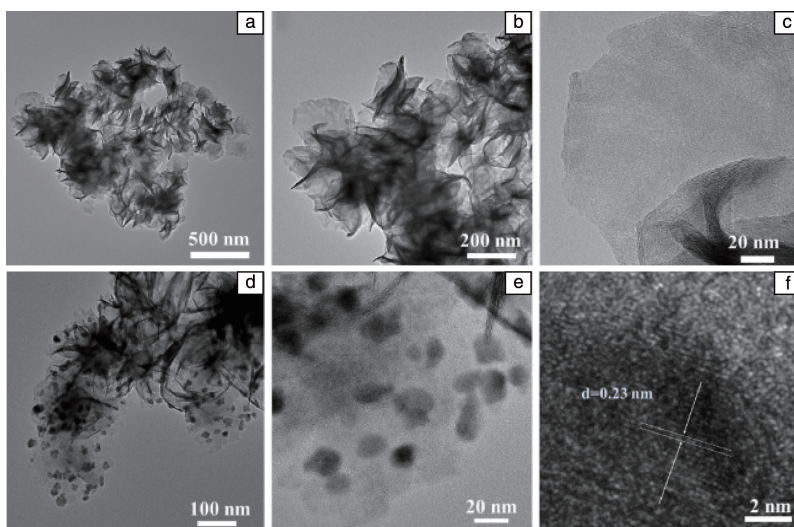


图 5 MoS₂(a~c)和Pd/MoS₂(d~f)的TEM照片

Fig. 5 TEM images of MoS₂(a~c) and Pd/MoS₂(d~f)

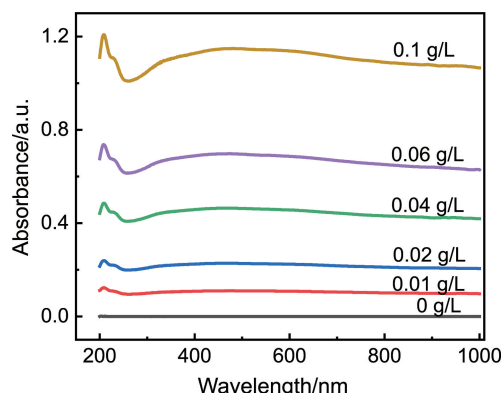
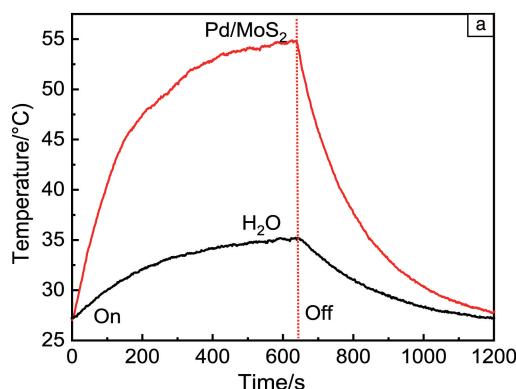
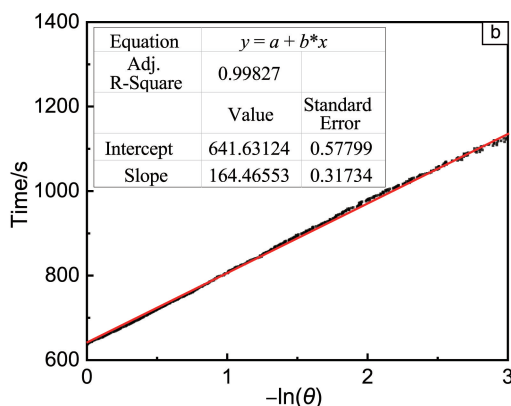
线(图 7a)。温度从在 0 s 时的 27.8 °C 上升到 630 s 时的 55.0 °C, 在 1200 s 时下降到 28.0 °C。用去离子水作为对比, 温度从在 0 s 时的 27.5 °C 上升到 630 s 时的 35.3 °C, 在 1200 s 时下降到 27.5 °C。

通过式(1)计算光热转换效率(η_T):

$$\eta_T = \frac{hA(\Delta T_{\text{sample}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}})}{I(1 - 10^{-A_{808}})} \quad (1)$$

式中, ΔT_{sample} 和 $\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别是样品与去离子水的最大升温幅度, 经计算 $\Delta T_{\text{sample}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 19.2 °C。 h 、 A 和 I 分别为传热系数、容器表面积和激光功率(2 W)。 A_{808} 是材料在 808 nm 处的吸光度, 应与测试溶液的照射深度相匹配, 测定为 0.44。 hA 可由式(2)计算:

$$\tau = \frac{mC}{hA} \quad (2)$$

图6 不同浓度 MoS₂ 分散液的紫外吸收光谱Fig. 6 UV-vis diffuse reflectance spectra of MoS₂ dispersions with different concentrations图7 在 808 nm 激光下, Pd/MoS₂ 的升降温曲线(a)和降温过程中时间与 $-\ln \theta$ 的线性拟合曲线(b)Fig. 7 Temperature change curves under 808 nm laser of Pd/MoS₂ dispersion (a) and linear fitting of time to $-\ln \theta$ in cooling process(b)

3.5 催化剂对铃木偶联反应的影响

为了比较不同加热方式下的催化性能,将 0.1 mL (1.7 g/L) 的 Pd/MoS₂ 水分散液加入铃木偶联反应体系中,分别通过激光和油浴来加热反应溶液,进行光热催化和热催化实验。首先,采用 808 nm 的激光器照射反应溶液,并通过红外成像仪记录温度(图 8a)。在激光强度为 1, 2, 3 和 4 W/cm² 的激光下照射 750 s,体系平衡温度分别为 28.4, 39.4, 50.5 和 59.7 °C,显示出激光强度依赖的平衡温度。随后,利用水银温度计校准了溶液温度,得到校准后的溶液温度分别为 29.4, 40.3, 51.6 和 60.8 °C。反应 0.5 h 后,利用气相色谱质谱联用仪测试产物联苯的产率。为了对比,在无激光仅油浴加热条件下,也测试了同样溶液温度下的联苯产率,如表 1 和图 8b 所示。

可以看出,在两种加热方式下,联苯的产率都随着温度升高而逐渐增加。随着溶液温度从 29.4 °C 分别升高到 40.3, 51.6 和 60.8 °C 时,相应的光热催化产率从 30.5% 提高到 48.2%, 76.7% 和 86.3%,明显高于同等温度下的热催化产率(24.3%, 38.2%, 52.3% 和 60.4%)。

其中, m 和 C 分别表示去离子水的质量(1 g)和热容(4.2 J/g),系统时间常数 τ 是降温时间与 $-\ln \theta$ 的线性斜率, θ 为无量纲的热力驱动温度,可由式(3)计算:

$$\theta = \frac{T - T_{\text{sur}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{sur}}} \quad (3)$$

式中, T_{max} 为最高升温温度, T_{sur} 为测试环境温度, T 为不同时间所对应的实时温度。 τ 值为 164.5 s (图 7b), 可以计算出 hA 为 0.026。最后, Pd/MoS₂ 的光热转换效率计算为 39.2%, 高于以往文献中的 CuS-Au 异质结构(36.5%)^[26]。上述结果证明, Pd/MoS₂ 纳米片具有较好的光热转换性能,有利于铃木偶联反应在光热条件下进行。

表 1 不同温度下的联苯产率

Table 1 Biphenyl yield at different temperatures

Reaction temperature/°C	Biphenyl yield/%	
	Oil-bath heating	Laser heating
29.4	24.3	30.5
40.3	38.2	48.2
51.6	52.3	76.7
60.8	60.4	86.3

以上结果说明光热催化不仅可以为反应提供热能,还可能存在光热协同效应来加速催化反应,且在较高的温度下光热催化对铃木偶联反应的促进效果更加明显。

为了进一步研究反应过程中催化性能的差异,保持反应温度为 40 °C,对比了不同反应时间下两种加热方式的催化产率,如表 2 以及图 9a 和 9b 所示。随着反应时间从 0.5 延长至 2 h,光热催化产率从 30.5% 提高到 81.9%,高于同样条件下的热催化产率(24.3% 和 70.5%),且光热催化速率是热催化的 1.5 倍,说明光热催化在长时间的

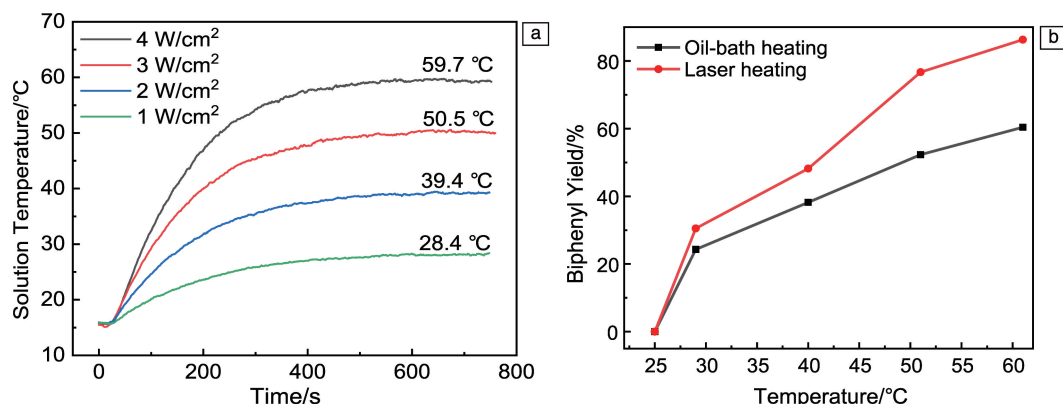


图 8 在不同激光强度下的升温曲线(a), 在不同温度下的联苯产率(b)

Fig. 8 Heating curves at different laser intensity(a), biphenyl yield at different temperatures(b)

表 2 不同反应时间下的联苯产率

Table 2 Biphenyl yield for different reaction time

Reaction time/h	Biphenyl yield/%	
	Oil-bath heating	Laser heating
0.5	24.3	30.5
1.0	38.6	47.5
1.5	55.3	69.2
2.0	70.5	81.9

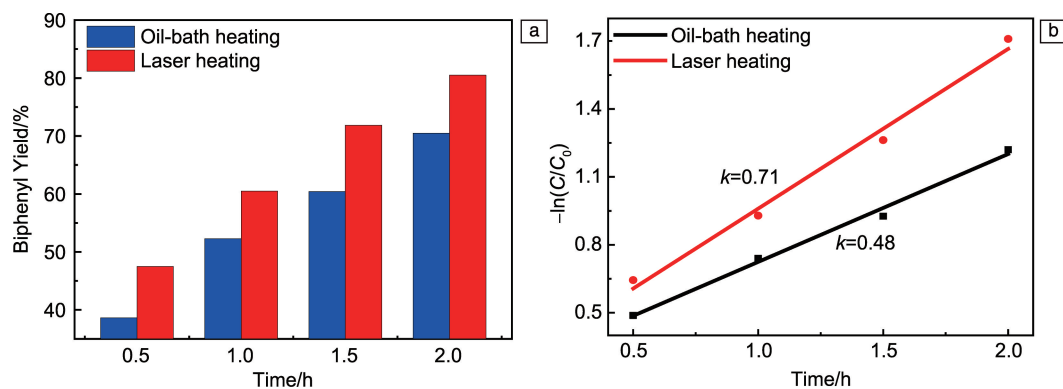


图 9 在不同反应时间下的联苯产率(a), $-\ln(C/C_0)$ 和 t 之间关系的线性拟合(b)

Fig. 9 Biphenyl yield for different reaction time (a), linear fitting of $-\ln(C/C_0)$ vs. t (b)

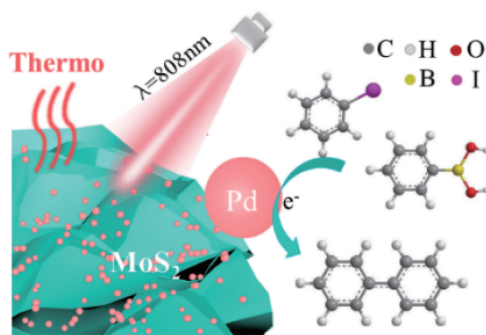


图 10 Pd/MoS₂ 光热催化铃木偶联反应的示意图

Fig. 10 Schematic diagram of Pd/MoS₂ photothermal catalytic Suzuki coupling reaction

有机反应中能够发挥优异的性能。此外, 进一步验证了 MoS₂ 的光热催化作用, 在 2 W/cm² 激光下反应 2 h, 没有产物生成, 说明 MoS₂ 不具备光热催化铃木偶联反应的作用, 结果与文献报道吻合^[23]。

3.6 催化机理研究

基于以上实验结果, 结合相关文献分析, 提出了光热催化的机理(图 10)。在 Pd/MoS₂ 催化铃木偶联反应中, MoS₂ 作为光响应组分, Pd 作为催化活性组分, 两者

协同作用可以带来较好的催化性能。一方面, 在近红外光激发下, MoS₂ 产生光热效应使纳米催化剂局部温度升高, 热能在活性位点附近被有效利用。这种光热效应可能导致催化剂表面的局部温度高于分散液的宏观平均温度^[20]。由于温度对铃木偶联反应有积极作用, 在相同的反应温度下, 光热加热比油浴加热显示出更高的催化活性。另一方面, MoS₂ 产生的热电子注入到 Pd 纳米粒子内, 诱导 Pd 纳米粒子催化铃木偶联反应。因此, 铃木偶联反应光热催化活性的提高可归因于 Pd/MoS₂ 纳米片的局部加热和热电子效应。

4 结 论

本文通过水热法合成了 MoS₂ 花状超结构, 通过还原法负载 Pd 纳米颗粒, 得到了 Pd 纳米颗粒均匀分布的 Pd/MoS₂ 纳米复合材料, 主要研究结果如下。

(1) MoS₂ 在 200~1100 nm 波长范围内显示出较强的光吸收性能, 并且 Pd/MoS₂ 在 808 nm 激光照射下的光热转换效率达到 39.2%。

(2) 将 Pd/MoS₂ 用于催化铃木偶联反应, 发现温度升高和时间延长都能提高联苯产率。重要的是, 在 808 nm 激光照射下, Pd/MoS₂ 具有更高的光热催化产率, 始终高于同等温度下的热催化产率。

(3) 光热催化的增强效应可能源于 Pd/MoS₂ 纳米片的局部加热和热电子效应。

以上结果为开发新型高效光热催化剂提供了有效可行的思路, 并且有望在太阳能的合理利用、复杂有机反应的产率提升等方面得到更广泛的应用。

参考文献 References

- [1] WEI H, LI X, DENG B, *et al.* Chinese Journal of Catalysis[J], 2022, 43(3): 1058–1065.
- [2] BELETSKAYA I P, ALONSO F, TYURIN V. Coordination Chemistry Reviews[J], 2019, 385: 137–173.
- [3] ASHRAFA M, AHMAD M S, INOMATA Y, *et al.* Coordination Chemistry Reviews[J], 2023, 476: 214928.
- [4] SHENDE V S, SAPTAL V B, BHANAGE B M. The Chemical Record[J], 2019, 19(9): 2022–2043.
- [5] SCHNOOR J K, FUCHS M, BÖCKING A, *et al.* Chemical Engineering & Technology[J], 2019, 42(10): 2187–2194.
- [6] YAO P C, GONG H, WU Z Y, *et al.* Nature Sustainability[J], 2022, 5(4): 348–356.
- [7] SONG C, WANG Z, YIN Z, *et al.* Chem Catalysis[J], 2022, 2(1): 52–83.
- [8] BUNRIT A, BUTBUREE T, LIU M, *et al.* ACS Catalysis[J], 2022, 12(3): 1677–1685.
- [9] YANG X Q, LU Y, LIU Y, *et al.* Small Structures[J], 2021, 2(12): 2100101.
- [10] WANG Z, YU W, YU N, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2020, 400: 125877.
- [11] CHENG X, WANG L, XIE L, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2022, 439: 135757.
- [12] LU D, LIAO S, CHU Y, *et al.* Advanced Fiber Materials[J], 2022, 4(5): 1–12.
- [13] MA X, ZHANG C, GNANASEKAR P, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2021, 415: 128956.
- [14] HAN J, XING W, YAN J, *et al.* Advanced Fiber Materials[J], 2022, 4(5): 1233–1245.
- [15] CHAI Y, MA H, MA X, *et al.* Journal of Materials Chemistry A[J], 2020, 8(21): 10891–10897.
- [16] GANESH M, RAMAKRISHNA J. Asian Journal of Organic Chemistry[J], 2020, 9(10): 1341–1376.
- [17] FIHRI A, BOUHRARA M, NEKOUISHAHRARI B, *et al.* Chemical Society Reviews[J], 2011, 40(10): 5181–5203.
- [18] LIU L, CORMA A. Chemical Reviews[J], 2018, 118(10): 4981–5079.
- [19] RAZA F, YIM D, PARK J H, *et al.* Journal of the American Chemical Society[J], 2017, 139(41): 14767–14774.
- [20] PAN X, SARHAN R M, KOCHOVSKI Z, *et al.* Nanoscale[J], 2022, 14(18): 6888–6901.
- [21] GUO M, XING Z, ZHAO T, *et al.* Applied Catalysis B: Environmental[J], 2019, 257: 117913.
- [22] JIANG H, XING Z, ZHAO T, *et al.* Applied Catalysis B: Environmental[J], 2020, 274: 118947.
- [23] SHIN H H, KANG E, PARK H, *et al.* Journal of Materials Chemistry A[J], 2017, 5(47): 24965–24971.
- [24] SELAMNENI V, RAGHAVAN H, HAZRA A, *et al.* Advanced Materials Interfaces[J], 2021, 8(6): 2001988.
- [25] ROPER D K, AHN W, HOEPFNER M. The Journal of Physical Chemistry C[J], 2007, 111: 3636–3641.
- [26] WANG Z, YU N, LI X, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2020, 381: 122613.

(编辑 吴 锐)