

# CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>光催化产氢 综合实验设计

周训富

岭南师范学院化学化工学院, 广东 湛江

收稿日期: 2023年7月18日; 录用日期: 2023年7月29日; 发布日期: 2023年8月11日

## 摘要

基于产出导向教育理念, 落实以学生为中心的教学策略, 以提升人才培养质量为目的, 设计并实施了一个科研创新综合训练实验——CdS量子点(CdS QDs)/有序中孔g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)复合光催化剂的制备及其产氢性能研究。实验结果表明: CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的光催化产氢速率ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的1.8倍, 这是因为CdS QDs负载在ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的表面形成了异质结, 具有增强的光吸收能力和电荷分离效率。本实验课程的实施, 不仅能够训练学生的实验操作技术、数据处理能力, 还将学生引入光催化制氢的前沿研究领域, 开阔其视野, 提升其科研创新的能力, 达成课程育人的目标。

## 关键词

硫化镉, 氮化碳, 异质结, 光催化产氢

# Comprehensive Experimental Design of Photocatalytic Hydrogen Production Performance of CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Xunfu Zhou

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: Jul. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 29<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 11<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on the concept of output-oriented education, the implementation of student-centered teaching strategy, and the purpose of improving the quality of talent training, a comprehensive

training experiment for scientific research and innovation—the preparation of CdS quantum dots (CdS QDs)/ordered mesoporous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) composite photocatalyst and its hydrogen production performance was designed and implemented. The experimental results show that the photocatalytic hydrogen production rate of CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is 1.8 times higher than that of ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, because the CdS QDs loading forms a heterojunction on the surface of ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, it has enhanced light absorption capacity and charge separation efficiency. The implementation of this experimental course can not only train students' experimental operation technology and data processing ability, but also introduce students to the frontier research field of photocatalytic hydrogen production, broaden their vision, improve their ability of scientific research and innovation, and achieve the goal of educating students.

## Keywords

Cadmium Sulfide, Carbon Nitride, Heterojunction, Photocatalytic Hydrogen Production

Copyright © 2023 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

传统的灌输式实验教学模式一直占据主导地位，其形式单一，学生学习主动性差，知识掌握不够深刻。另外，课程设计上学科交叉少，对实验数据的处理和分析比较简单浅显，对大型测试仪器的使用和了解非常有限。综合实验是一种以“探究性”为导向的教学模式。老师作为科研工作者，将创新成果融入到教学中，启发和引导学生探索科学前沿，将理论与实践结合，提升实验教学的实用性和趣味性。学生作为探索者，从传统的课堂实验到科研实验，更容易被激发学习兴趣，提高的自学能力、实验技能、科研思维能力、创新意识。

利用清洁的太阳能光催化甲酸制氢的研究引起了广泛的关注[1]。利用太阳光催化分解甲酸产氢的优点不仅是太阳能储量丰富和清洁无污染，而且在光催化产氢过程中的条件相对温和，无污染。光催化现象的首次发现者是 Fujishima。他在 20 世纪 70 年代发现了二氧化钛可以在短波长光的激发下分解水产氢的现象[2]。此后，越来越多的光催化材料被开发出来，如 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SrTiO<sub>3</sub>、ZnO、ZnS、CdS 等[3] [4] [5] [6] [7]。其中，g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 是一种具有独特优势的光催化半导体材料。与传统无机半导体光催化相比，g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 具有不含金属、无毒、成本低、稳定性高、具有二维层状结构、组成与结构易于调节的优点[8] [9]。以上优点使得 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 成为了一种非常具有应用潜力的光催化材料。为了开发 C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 作为光催化材料的应用潜力，需要解决 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光生电子与空穴的复合率高、表面氧化还原动力学缓慢，吸光范围小的问题[10]。为了提高 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光催化效率，已经有许多策略被用于改进 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光催化性能，例如构建独特的纳米结构、元素掺杂和负载助催化剂等[11] [12] [13] [14]。

CdS 是一种可以吸收可见光，具有较高的光响应性能，非常适合用于光催化产氢的光催化半导体。但是，CdS 中的 S<sup>2-</sup>离子容易被自身产生的光生空穴氧化，产生光腐蚀现象，因此 CdS 的光催化稳定性差，难以实际用于进行光催化反应。减少 CdS 光腐蚀现象发生的关键，在于加速光生空穴向催化剂外迁移，减少 CdS 内部空穴的积累。常用抑制 CdS 光腐蚀现象的方法有：构建异质结、构建核壳结构、负载助催化剂。Yan 等通过将 CdS 与石墨烯结合的方式，提高了 CdS 中光生电荷的迁移，有效减少了 CdS 的光腐

蚀现象[15]。

基于以上思路,我们提出了能在可见光下快速催化分解水制氢的 CdS 量子点(CdS QDs)/秩序中孔 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)复合光催化剂。通过将 CdSQDs 分散在 ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 片上的方法制备出了异质结构型的 CdSQDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光催化体系。在该体系中,光生电子与空穴在内建电场的作用下得到有效的分离,可以有效提高光生电荷的利用率,使复合体系的光催化效率高于单一催化剂的效率。

基于成果导向与学生中心的教学理念,笔者将前沿科研成果“CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合光催化剂的制备及其产氢性能研究”应用于应用化学专业的综合化学实验课程教学。在教学过程中,引导学生进行文献调研与归纳总结,训练学生的实验技能与数据处理能力,推进学生掌握材料的各种表征方法与技术,开阔学生的视野,激发学生探究学习的兴趣,提高学生的科研创新能力,达成课程育人目标。

## 2. 实验部分

### 2.1. 实验目的

(1) 培养学生文献检索及信息提取、实验方案设计与实施、数据整理及汇总分析、实验报告撰写等方面的综合能力。

(2) 学习 CdSQDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等复合纳米材料的制备方法。

(3) 了解光催化的基本原理和过程,培养创新意识和绿色环保意识。

(4) 熟悉常用的纳米材料表征手段及相关大型仪器的原理性质。

### 2.2. 实验原理

光催化剂 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光生电子与空穴的复合率高, CdS 的光催化稳定性差。通过将 CdSQDs 分散在 ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 片上的方法制备出了异质结构型的 CdSQDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光催化体系。在该体系中,光生电子与空穴在内建电场的作用下得到有效的分离,可以有效提高光生电荷的利用率,使复合体系的光催化效率高于单一催化剂的效率,且具有较好的稳定性。

### 2.3. 仪器与试剂

试剂: 聚环氧乙烷-聚环氧丙烷-聚环氧乙烷三嵌段共聚物(P123, AR, Aldrich), 盐酸(HCl, 37%, 阿拉丁), 硅酸四乙酯(C<sub>8</sub>H<sub>20</sub>O<sub>4</sub>Si, 99%, 阿拉丁), 氨基胍(CH<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, 95%, 阿拉丁), 氟化氢铵(NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>, AR, 阿拉丁), 硝酸镉(Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, 99.95%, 阿拉丁), 二甲基亚砷(DMSO, AR, 广试), 硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, AR, 国药集团化学试剂有限公司), 亚硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, AR, 广试), 硫化钠 Nafion 117 溶液(Na<sub>2</sub>S, 95%, 广试), 无水乙醇(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, AR, 广试), 蒸馏水(H<sub>2</sub>O, CP, 自制)。

仪器: 高速离心机, TG16-WS, 长沙湘智离心机; 电子天平, EL104, 梅特勒-托利多仪器有限公司; 磁力搅拌器, DF-101B, 巩义市英峪予华仪器厂; 真空干燥箱, DZF-6050, 上海博迅实业有限公司; 超声波清洗器, KQ-250E, 昆山市超声仪器有限公司; 电热恒温鼓风干燥箱, DHG-9070, 上海精宏实验设备有限公司; 紫外可见分光光度计(UV-3600, 日本岛津); X-射线粉末衍射仪(XRD, 美国 Thermo VGScientific); 荧光光谱仪(PL, RF-5301PC, 日本岛津); 透射电子显微镜, Tecnai12-TEM, 荷兰 FEI 公司; 氙灯稳流电源, PLS-SXE300UV, 北京泊菲莱科技有限公司。

### 2.4. 实验步骤

#### 2.4.1. CdSQDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的制备

将 6.67 g P123 溶于 1.6 M 250 mL HCl 中, 逐滴加入 14.23 g 正硅酸乙酯, 35℃ 搅拌 24 h, 得到的白

色悬浮液转移到 34 mL 反应釜, 烘箱 100°C 恒温反应 24 h。过滤得到的白色沉淀, 80°C 干燥过夜。将其用瓷舟装好转移至管式炉中, 在空气中 105°C 煅烧 5 h, 180°C 煅烧 4 h, 550°C 煅烧 6 h, 升温速率都为 1°C/min, 即得 SBA-15 模板。

将 1.5 g SBA-15 模版分散于其中含有 8 g 氨基氰的 22.5 g 水溶液中, 35°C 下搅拌 1 h。高速离心, 除去澄清液, 在烘箱中干燥至凝胶状, 氮气保护下 550°C 煅烧 4 h, 升温速率为 1°C/min, 得到黄色粉末。用 4 M  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  溶液浸泡 48 h, 过滤, 用去离子水和乙醇清洗数次, 80°C 真空干燥, 即得 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$ 。

将 0.12 g  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和 40 mg ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  超声分散于 32 mL DMSO 中, 十分钟后转移至 40 mL 反应釜, 放入烘箱 180°C 恒温反应 12 h。抽滤得草绿色沉淀, 用乙醇洗涤数次, 70°C 干燥即得负载 CdS 量子点的 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  (CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$ )。

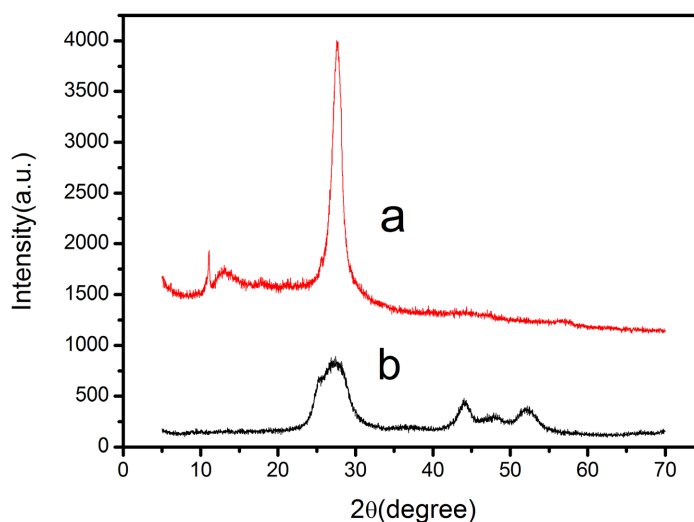
### 2.4.2. 光催化产氢性能测试

采用北京中教金源的 CEL-PAEM-D8 光催化活性评价系统对样品的性能进行评价。称取 0.01 g 样品加入到顶照式反应器中, 然后加入 100 mL 的溶液(0.25M  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , 0.35M  $\text{Na}_2\text{S}$ ), 超声处理 5 min, 然后加入适量的氯铂酸, 将反应器与 CEL-PAEM-D8 光催化评价系统连接, 采用磁力搅拌使混合溶液保持悬浮状态, 再将整个系统密封并抽真空, 直到真空度为 2.0 kPa。采用循环冷凝水将反应器的温度保持在 10°C。使用带有 420 nm 截止滤光片的氙灯作为可见光来驱动光催化产氢反应。采用气相色谱仪(GC9790II)在线检测产生的气体, 并使用外标法计算气体产量。

## 3. 实验结果与讨论

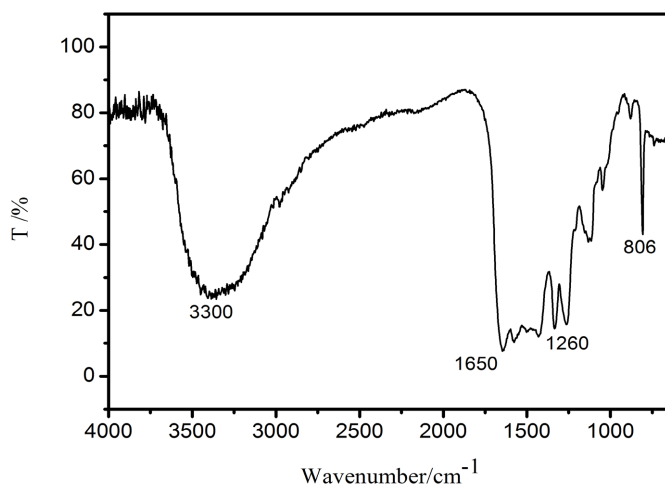
### 3.1. 物相结构分析

如图 1 所示, (a)为 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  的 XRD 图, 可以看到其在 27.2°处出现最强峰, 是 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  环间堆积的(002)面的特征峰, 其对应的层间距为  $d = 0.327$  nm。另一个在 13.2°的峰对应 3-s-三嗪结构形成的平面内氮孔间距为  $d = 0.670$  nm。CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  的 XRD 图谱显示, 其衍射峰与六方纤锌矿(JCPDS: 41-1049)对应得较好, 表明 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  中含有 CdS, 其为六方纤锌矿结构。根据 Scherrer 公式计算 CdS QDs 大小约为 3.0~5.0 nm, TEM 图片也可以证明这一点。



**Figure 1.** XRD patterns of ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  (a) and CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  (b)

**图 1.** (a) ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  和(b) CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  的 XRD 图

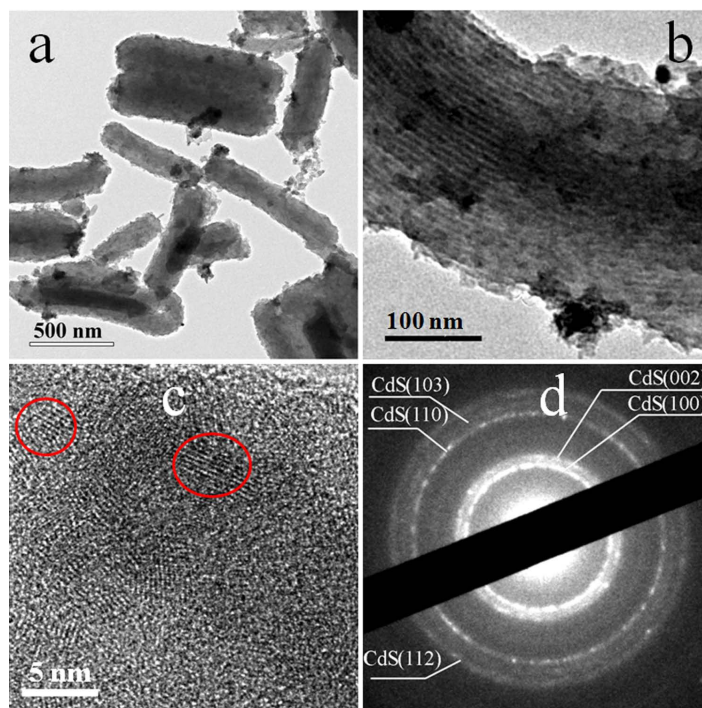


**Figure 2.** Infrared spectrogram of CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

**图 2.** CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的红外光谱图

图 2 为 CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的红外光谱图, 从图中可以看出, 在 1200~1650 cm<sup>-1</sup> 区域存在几个较强的吸收峰, 归属于 CN 杂环化合物典型的伸缩振动。806 cm<sup>-1</sup> 处有一个尖锐的峰, 归属于 3-s-三嗪结构的伸缩振动。值得一提的是, 在 3000 cm<sup>-1</sup> 左右的宽峰是 N-H 的伸缩振动, 表明样品中存在氨基。因为得到的产物缩聚不完全, 层状结构的边缘存在未缩聚的氨基。红外谱图结果显示样品具有类石墨相结构。

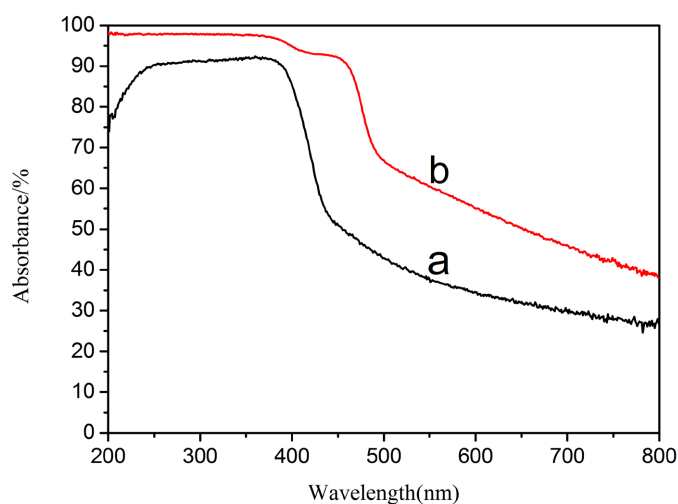
### 3.2. 形貌表征



**Figure 3.** TEM image of CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sample: (a) Low magnification image; (b) local magnification image; (c) High magnification image; (d) Selective electron diffraction image of CdS quantum dots

**图 3.** CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 样品的 TEM 图: (a) 低倍放大图; (b) 局部放大图; (c) 高倍放大图; (d) CdS 量子点的选区电子衍射图

为了进一步确定样品的内部是否为有秩序的中孔结构,采用高分辨透射电镜进行表征。如图3所示, a 图为 CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 样品的低倍放大图, 可以看到 ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 为棒状结构, 上面不均匀地负载了一些颗粒。b 图为单根 ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的局部放大图, 从图中可以清晰的看到条纹状孔道结构, 与 SBA-15 形貌基本相同。c 图为载有 CdS 量子点区域的高倍放大图, 从图中可以很清楚的看到 CdS 的条纹结构。图 d 是 CdS 量子点的选区电子衍射图, 从图中可以看到 CdS 的(100)、(002)、(110)、(103)和(112)晶面衍射环, 进一步证明 ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载的 CdS 量子点为六方铅锌矿结构。

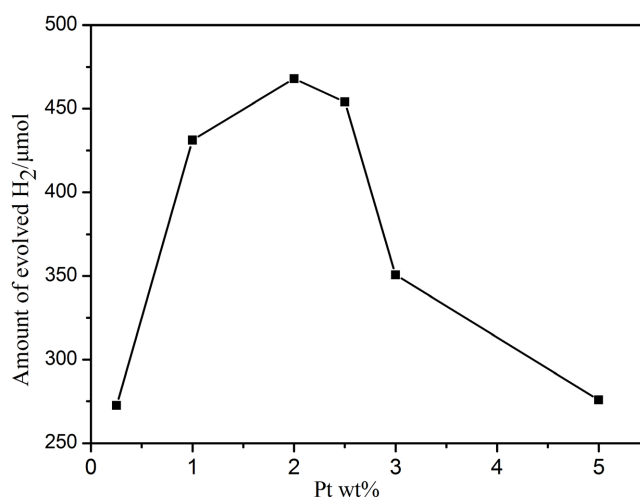


**Figure 4.** Ultraviolet-visible absorption spectra: (a) ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (b) CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

**图 4.** 紫外 - 可见吸收光谱图: (a) ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (b) CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

图4为样品的紫外-可见吸收图,从图中可以看出负载了CdS QDs的ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的样品对可见光区域的吸收加强,尤其是在400~460 nm区域吸收达到了92%,这表明随着CdS QDs组分的加入,提高了ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>对光的利用率。

### 3.3. CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的光催化性能研究

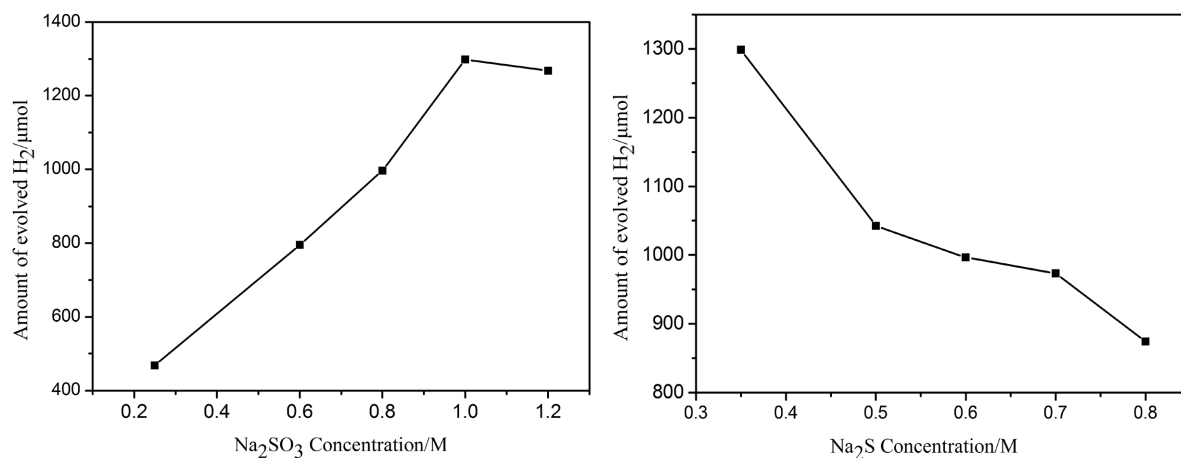


**Figure 5.** Comparison of hydrogen production results of CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> with different Pt load

**图 5.** 不同载 Pt 量的 CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的产氢结果对比图

贵金属 Pt 沉积在半导体光催化剂表面, 光激发产生的  $e^-$  能够立即转移到贵金属上, 从而减少了半导体表面电子的浓度。并且贵金属能够促进产氢反应的进行。如图 5 所示, 当牺牲剂浓度为 0.25 M  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , 0.35 M  $\text{Na}_2\text{S}$  时, 随着载 Pt 量的增加, 产氢量迅速增加, 由 273  $\mu\text{mol}$  增加到 454  $\mu\text{mol}$ , 然而由于 Pt 的屏蔽效应, 产氢量增加到 468  $\mu\text{mol}$  后开始减小。当载 Pt 量为 5.0 wt % 时, 产氢量降到了 276  $\mu\text{mol}$ 。当 Pt 浓度较低时, Pt 为捕获电子的陷阱, 起到分离电子空穴对的作用。但是随着 Pt 浓度的增加, Pt 却成为了电子空穴对的复合中心, 加速电子空穴的复合, 缩短了电子空穴的寿命。由图可知, 最佳载 Pt 量为 2.0 wt %。

一般来说, 高浓度的牺牲剂能够促进反应物扩散到催化剂表面。另一方面, 随着 pH 的增加, CdS 的导带电位和  $\text{H}^+/\text{H}_2$  的氧化还原电位都会发生负移。尽管如此, CdS 的导带电位与  $\text{H}^+/\text{H}_2$  的氧化还原电位的差值还是减小了。因此, 当水溶液含有较高浓度的  $\text{SO}_3^{2-}$ 、甲酸、甲醛和甲醇等牺牲剂时, 光催化剂反应活性会降低。值得注意的是, CdS 导带电位也受  $\text{S}^{2-}$  浓度的影响。当  $\text{S}^{2-}$  浓度增加, 其电位负移, 但是  $\text{S}^{2-}$  离子氧化形成的  $\text{S}_2^{2-}$  离子具有一个比光子更低的还原电位, 导致产氢效率的下降。此外, 在强碱性介质中, 从热力学方面看, 反应也是难以进行的。



**Figure 6.** Comparison of hydrogen production results of sacrificial agent  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{S}$  at different concentrations

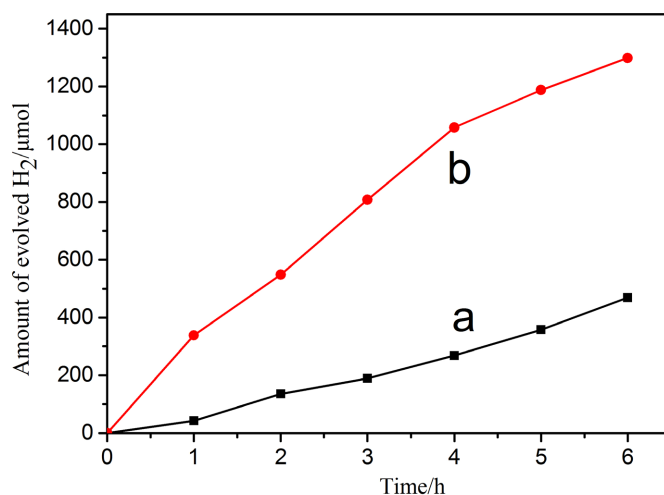
**图 6.** 牺牲剂  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{S}$  不同浓度产氢结果对比图

本次实验所选择的牺牲剂为  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{S}$ 。随着反应的进行,  $\text{SO}_3^{2-}$  和  $\text{S}^{2-}$  离子发生水解, 溶液的 pH 值逐步增加。如图 6 所示: 当载 Pt 量为 2.0 wt%,  $\text{Na}_2\text{S}$  浓度为 0.35 M 时, 改变  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的浓度来寻找其最佳反应浓度。从图中可知, 当  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  浓度为 1.0 M 时候, 产氢量最大。确定了  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的最佳反应浓度, 改变  $\text{Na}_2\text{S}$  的浓度, 易得在  $\text{Na}_2\text{S}$  浓度为 0.35 M 时, 体系产氢量最大。综上所述, 可知最佳反应条件为 2.0 wt% Pt, 牺牲剂浓度分别为 1.0 M  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和 0.35 M  $\text{Na}_2\text{S}$ 。

图 7 为 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  和 CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  产氢量对比图, 很显然, 负载了 CdS QDs 的 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  的产氢性能优于 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$ , 最高产氢速率达到了 259  $\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$  且是后者产氢量的 2.8 倍。这里要说明的是, ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  的反应体系为含有 10 ml 三乙醇胺的水溶液, 而 CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  的反应体系为含有 1.0 M  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和 0.35 M  $\text{Na}_2\text{S}$  的水溶液, 其他测试条件都是等同的。

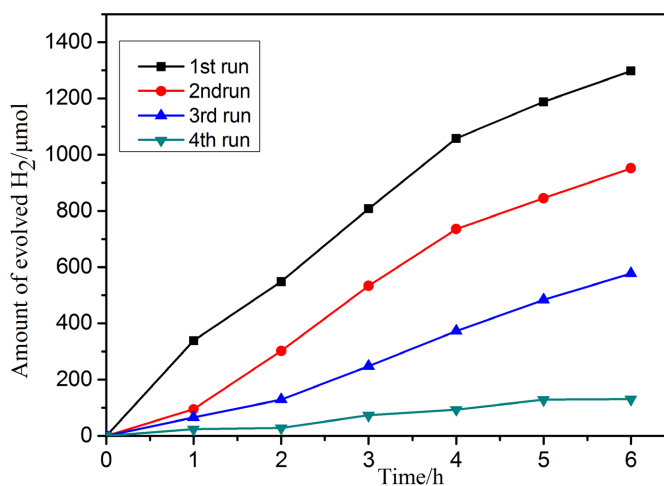
作为转换太阳能的光催化剂必须具备良好的稳定性, 因此对催化剂进行连续光照实验来评价其稳定性。循环测试总共进行了四轮反应, 每轮实验完后, 回收催化剂, 更换新的牺牲剂溶液, 进行下一轮反应。第一轮反应过后, 催化剂颜色由绿色变为土黄色。图 8 展示了 CdS QDs/ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  催化剂的循环测

试结果：可以看到产氢能力逐渐衰减，当四轮反应结束后产氢量仅为 130.4  $\mu\text{mol}$ ，催化剂基本失效。由此可知催化剂对光不稳定，也是含硫催化剂共有的缺点：易被光腐蚀。



**Figure 7.** Comparison diagram of hydrogen production: (a) ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; (b) CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

**图 7.** 产氢量对比图：(a) ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>；(b) CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



**Figure 8.** Cycle performance diagram of CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

**图 8.** CdS QDs/ompg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 循环性能图

### 3.4. 教学探讨

在创新驱动国家战略下，高素质创新型人才是第一资源。产业结构转型升级更是带来对高素质技能型劳动力和创新性人才的迫切需求。当前的高等教育人才培养模式不能实现科研与教学有机整合，难以共同支撑高素质人才培养。科研和教学均是高校的基本构成元素，应当在保持各自特殊性的同时，共同服务于立德树人的目标，即科教融合。但目前一个明显的事实是普遍“重科研、轻教学”。本实验将太阳能光催化制氢研究领域的科研成果引入实验教学，通过“寓教于研、寓研于学”，可以引导学生从传统课堂单一的记忆、模仿的浅层学习进入分析、运用、综合、评价、探索、实践等深层学习层面，从而有利于提升学生认知经历的多样性，从而提高学生的科研创新能力。



## 4. 结论

通过一步水热法在秩序中孔氮化碳上成功负载硫化镉量子点,并用于光解水制氢取得了较好的效果。根据 XRD 和 TEM 表征结果可知 CdS QDs 的直径为 10 nm 左右且为六方纤锌矿结构。紫外可见漫反射图谱结果显示,负载了 CdS QDs 的复合催化剂在可见光区域吸收加强,尤其在 400~460 nm 区域吸收达到了 92%,通过确定最佳载 Pt 量和牺牲剂浓度,可见光照反应 6 小时,反应体系产氢总量达到了 1298  $\mu\text{mol}$ ,比同等条件下 ompg- $\text{C}_3\text{N}_4$  体系的产氢量(469  $\mu\text{mol}$ )提高了 1.8 倍。通过该科研探索实验,学生将学习到文献调研与分析、复合材料设计构建、材料物化性能测试、光催化产氢性能测试、数据收集处理、光催化机理研究等科研过程,夯实学生的知识综合利用能力,提高学生的科学素养,拓宽和优化学生的知识体系,增强学生的实践能力、创新能力以及适应变化的能力,达到创新性人才培养的目标。

## 参考文献

- [1] Zhou, P., Zhang, Q., Xu, Z., Shang, Q., Wang, L., Chao, Y., *et al.* (2020) Atomically Dispersed Co-P<sub>3</sub> on CdS Nanorods with Electron-Rich Feature Boosts Photocatalysis. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 1904249. <https://doi.org/10.1002/adma.201904249>
- [2] Fujishima, A. and Honda, K. (1972) Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, **238**, 37-38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>
- [3] Liu, H., Liu, X., Yang, W., Shen, M., Geng, S., Yu, C., Shen, B. and Yu, Y. (2019) Photocatalytic Dehydrogenation of Formic Acid Promoted by a Superior PdAg@g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Mott-Schottky Heterojunction. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 72022-72026. <https://doi.org/10.1039/C8TA11172C>
- [4] Guo, M., Liu, Q., Wu, M., Lv, T. and Jia, L. (2018) Novel Reduced Graphene Oxide Wrapped-SrTiO<sub>3</sub> Flower-Like Nanostructure with Ti-C Bond for Free Noble Metal Decomposition of Formic Acid to Hydrogen. *Chemical Engineering Journal*, **334**, 1886-1896. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.120>
- [5] Bulushev, D.A., Zacharska, M., Beloshapkin, S., Guo, Y. and Yuranov, I. (2018) Catalytic Properties of PdZn/ZnO in Formic Acid Decomposition for Hydrogen Production. *Applied Catalysis A: General*, **561**, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2018.05.025>
- [6] Villa, K., Domènech, X., Malato, S., Maldonado, M.I. and Peral, J. (2013) Heterogeneous Photocatalytic Hydrogen Generation in a Solar Pilot Plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 12718-12724. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.046>
- [7] Wang, T., Yang, L., Jiang, D., Cao, H., Minja, A.C. and Du, P. (2021) CdS Nanorods Anchored with Crystalline FeP Nanoparticles for Efficient Photocatalytic Formic Acid Dehydrogenation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 23751-23759. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04178>
- [8] Fu, J.W., Yu, J.G., Jiang, C.J. and Cheng, B. (2018) g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Heterostructured Photocatalysts. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article ID: 1701503.
- [9] Wen, J., Xie, J., Yang, Z., Shen, R., Li, H., Luo, X., Chen, X. and Li, X. (2017) Fabricating the Robust g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nano-sheets/Carbons/NiS Multiple Heterojunctions for Enhanced Photocatalytic H<sub>2</sub> Generation: An Insight into the Trifunctional Roles of Nanocarbons. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 2224-2236. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02490>
- [10] Mishra, A., Mehta, A., Basu, S., Shetti, N.P., Reddy, K.R. and Aminabhavi, T.M. (2019) Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)-Based Metal-Free Photocatalysts for Water Splitting: A Review. *Carbon*, **149**, 693-721. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.104>
- [11] Tian, N., Zhang, Y., Li, X., Xiao, K., Du, X., Dong, F., *et al.* (2017) Precursor-Reforming Protocol to 3D Mesoporous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Established by Ultrathin Self-Doped Nanosheets for Superior Hydrogen Evolution. *Nano Energy*, **38**, 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.05.038>
- [12] Chen, X., Shi, R., Chen, Q., Zhang, Z., Jiang, W., Zhu, Y. and Zhang, T. (2019) Three-Dimensional Porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for Highly Efficient Photocatalytic Overall Water Splitting. *Nano Energy*, **59**, 644-650. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.010>
- [13] Patnaik, S., Sahoo, D.P. and Parida, K. (2021) Recent Advances in Anion Doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Photocatalysts: A Review. *Carbon*, **172**, 682-711. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.10.073>
- [14] Ong, W.-J., Tan, L.-L., Ng, Y.H., Yong, S.-T. and Chai, S.-P. (2016) Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer to Achieving Sustaina-

- 
- bility? *Chemical Reviews*, **116**, 7159-7329. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00075>
- [15] Yan, J., Wang, K., Xu, H., Qian, J., Liu, W., Yang, X. and Li, H. (2013) Visible-Light Photocatalytic Efficiencies and Anti-Photocorrosion Behavior of CdS/Graphene Nanocomposites: Evaluation Using Methylene Blue Degradation. *Chinese Journal of Catalysis*, **34**, 1876-1882. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(12\)60677-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(12)60677-9)