

双氨基功能化UiO-66的构筑及其光催化CO₂环加成性能研究

林雅昕, 沈嘉灵, 林鑫萍, 吴绍煜, 金许雯, 吕雅静, 梁若雯*, 陈 峰*

宁德师范学院新能源与材料学院, 福建 宁德

收稿日期: 2026年1月4日; 录用日期: 2026年1月27日; 发布日期: 2026年2月9日

摘 要

本文设计并合成了一种双氨基功能化的UiO-66 (UiO-66-(NH₂)₂), 系统研究了氨基数目对光催化CO₂与环氧丙烷(PO)环加成反应性能的影响。通过XRD、FT-IR、SEM/TEM和DRS表征, 结果表明氨基功能化并未破坏UiO-66框架结构, 同时增强了可见光吸收能力。光催化实验结果显示, UiO-66-(NH₂)₂在可见光($\lambda \geq 420$ nm)条件下, 环氧丙烷的转化率、产率和选择性均优于UiO-66和UiO-66-NH₂, 转化率可达52.89%, 选择性高达98.53%。提升性能的主要原因在于: Zr⁴⁺金属中心提供Lewis酸位点, 氨基作为Lewis碱位点协同活化CO₂和PO分子, 并在光照下促进电子转移和反应中间体生成。该研究为设计高效MOFs基光催化剂及CO₂资源化提供了新的思路与方法。

关键词

UiO-66, 光催化, CO₂环加成, 双氨基功能化, 环状碳酸酯

Construction of Dual-Amino Functionalized UiO-66 and Its Photocatalytic Performance for CO₂ Cycloaddition

Yaxin Lin, Jialing Shen, Xinpeng Lin, Shaoyu Wu, Xuwen Jin, Yajing Lyu, Ruowen Liang*, Feng Chen*

School of New Energy and Materials, Ningde Normal University, Ningde Fujian

Received: January 4, 2026; accepted: January 27, 2026; published: February 9, 2026

Abstract

A dual-amino functionalized UiO-66 (UiO-66-(NH₂)₂) was designed and synthesized to systematically

*通讯作者。

文章引用: 林雅昕, 沈嘉灵, 林鑫萍, 吴绍煜, 金许雯, 吕雅静, 梁若雯, 陈峰. 双氨基功能化 UiO-66 的构筑及其光催化 CO₂ 环加成性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(2): 112-119. DOI: 10.12677/ms.2026.162029

investigate the effect of amino group number on the photocatalytic cycloaddition of CO₂ with propylene oxide (PO). The crystal structure, functional groups, morphology, and optical properties of the samples were characterized by XRD, FT-IR, SEM/TEM, and DRS. The results indicate that amino functionalization does not destroy the UiO-66 framework, while significantly enhancing visible-light absorption. Photocatalytic experiments show that UiO-66-(NH₂)₂ exhibits superior catalytic performance compared with UiO-66 and UiO-66-NH₂ under visible light ($\lambda \geq 420$ nm) with tetrabutylammonium bromide (TBAB) as co-catalyst, achieving a PO conversion of 52.89% and selectivity of 98.53%. The improved performance is attributed to the synergistic effect between Lewis acidic Zr⁴⁺ sites and Lewis basic amino groups, which cooperatively activate CO₂ and PO molecules, while photoexcitation promotes electron transfer and the formation of reactive intermediates. This study provides a novel strategy for the design of high-efficiency MOFs-based photocatalysts and contributes to CO₂ utilization and green chemical synthesis.

Keywords

UiO-66, Photocatalysis, CO₂ Cycloaddition, Dual-Amino Functionalization, Cyclic Carbonate

Copyright © 2026 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

随着化石能源的持续消耗和温室气体排放问题的日益突出,二氧化碳(CO₂)的资源化转化受到了广泛关注[1]。将 CO₂ 转化为高附加值化学品,不仅有助于缓解环境压力,同时也为可持续化学过程提供了重要途径[2]。其中, CO₂ 与环氧化物反应生成环状碳酸酯[3]。因其原子经济性高、反应条件相对温和而被认为是一种极具潜力的 CO₂ 利用途径。所得环状碳酸酯在电解液溶剂、聚合物单体、精细化学品及医药中间体等领域具有广泛应用前景[4]。

近年来,光催化技术因能够利用可再生光能驱动化学反应,在 CO₂ 转化领域展现出独特优势。相比传统热催化过程,光催化反应通常可在较温和条件下进行,有效降低能耗,并有助于调控反应路径[5]。然而, CO₂ 分子本身具有高度热力学稳定性和化学惰性,使其在光催化体系中的高效吸附与活化仍面临巨大挑战[6]。因此,开发具有高效 CO₂ 吸附与活化能力的光催化材料[7],仍是当前研究的关键问题。金属有机框架材料(metal-organic frameworks, MOFs)因其比表面积高、孔结构可调以及活性位点可设计等优点,被认为是光催化 CO₂ 转化的理想候选材料。其中,锆基金属有机框架 UiO-66 [8]具有优异的结构稳定性和易于功能化特性,在光催化 CO₂ 环加成反应中展现出良好应用前景。然而,原始 UiO-66 中活性位点类型相对单一,且光生载流子易发生复合,其光催化性能仍有待进一步提升。配体功能化[9]被认为是调控 UiO-66 性能的有效策略,其中引入氨基基团可作为 Lewis 碱性位点,有助于增强 CO₂ 的吸附与活化能力,同时改善材料的光响应特性。课题组前期研究表明,氨基功能化的 UiO-66 (UiO-66-NH₂)的光催化 CO₂ 环加成性能要远优于 UiO-66。然而,现有相关研究大多集中于单氨基修饰体系,对于多氨基协同作用对 CO₂ 吸附行为、电子结构及光催化性能的影响仍缺乏系统认识。

因此,本文设计合成了一种双氨基功能化 UiO-66 (UiO-66-(NH₂)₂),通过调控配体中氨基的数目,构建具有增强 Lewis 碱性微环境的光催化体系。通过系统比较 UiO-66、UiO-66-NH₂ 及 UiO-66-(NH₂)₂ 在结构、光吸收性能、CO₂ 吸附行为及光催化 CO₂ 与环氧化物环加成性能方面的差异,重点探讨锆金属中心(Lewis 酸性位点)与氨基(Lewis 碱性位点)之间的协同作用机制,阐明氨基数目调控对 UiO-66 光催化性能

的影响规律。该研究不仅为 CO₂ 资源化利用提供新的材料设计思路, 也为开发高效 MOFs 基光催化剂和推动绿色化学合成具有重要的理论意义和应用价值。

2. 实验部分

1) UiO-66 的制备

称取 530 mg 四氯化锆(ZrCl₄, 2.27 mmol)溶解于 40 mL N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中, 超声处理 10 min 以获得澄清溶液。随后加入对苯二甲酸(H₂BDC, 2.05 mmol), 继续超声分散 20 分钟, 形成均一的反应前驱体溶液。将所得混合溶液转移至密闭聚四氟乙烯衬里的高压反应釜中, 在 120℃下溶剂热反应 24 h。反应结束后, 反应釜自然冷却至室温, 所得固体产物经甲醇洗涤-离心三次以去除残余溶剂和未反应物。最终将样品在 70℃下干燥过夜, 并在真空条件下活化 12 h, 得到白色粉末状 UiO-66。

2) UiO-66-NH₂ 的制备

称取 0.5137 g ZrCl₄ (2.2 mmol)溶解于适量去离子水中, 在磁力搅拌下形成均一溶液。随后依次加入 2-氨基对苯二甲酸(H₂ATA, 2 mmol)和 40 mL DMF。将混合液在 600 rpm 下搅拌 15 分钟, 形成均一的前驱体溶液。接着向体系中加入 6 mL 冰乙酸作为晶体调节剂, 并超声处理 15 min 以确保反应物在分子尺度上充分分散。将混合溶液转移至高压反应釜内衬中, 于 120℃下溶剂热反应 24 h。反应完成后, 自然冷却至室温, 所得产物经甲醇洗涤-离心三次, 随后在 70℃下干燥并在真空条件下活化 12 h, 最终制得浅黄色粉末状的目标产物 UiO-66-NH₂。

3) UiO-66-(NH₂)₂ 的制备

双氨基功能化 UiO-66-(NH₂)₂ 采用溶剂热法合成。称取 0.233 g 四氯化锆(1.00 mmol)与 0.196 g 2,5-二氨基对苯二甲酸(1.00 mmol)加入反应容器中, 加入 30 mL DMF 作为溶剂, 并加入 7 mL 冰乙酸作为晶体调节剂。在磁力搅拌和超声辅助下使反应物充分分散, 形成均一混合体系。将反应体系转移至密闭高压反应釜中, 在 150℃下溶剂热反应 48 h。反应结束后, 自然冷却至室温, 产物经离心收集, 并使用甲醇反复洗涤以去除杂质及未反应物。最终将所得固体在 70℃下干燥过夜, 并在真空条件下活化 12 h, 得到棕黄色粉末状 UiO-66-(NH₂)₂。

4) 催化性能测试

在 100 mL 石英反应釜中加入催化剂(100 mg)、四丁基溴化铵(TBAB, 0.1 mmol)以及环氧丙烷(PO, 80 mmol)。经超声处理使体系充分混合后, 取 1000 μL 混合液作为反应前样品备用。随后将反应釜密封并安装至高压不锈钢反应装置中, 通过三次抽真空-充入 CO₂ 的方式以彻底排除釜内空气。完成置换后, 向反应釜中充入 1.6 MPa 的 CO₂, 并在 25℃条件下, 于波长大于 420 nm 的可见光照射下反应 18 h。反应体系中环氧丙烷与碳酸丙烯酯(PC)的含量采用气相色谱(GC)进行定量分析。碳酸丙烯酯的转化率、产率及选择性按照以下公式计算:

$$\text{产率}(\%) = \frac{C_{PC}}{C_0} \times 100\%$$

$$\text{转化率}(\%) = \frac{C_0 - C_{PO}}{C_0} \times 100\%$$

$$\text{选择性}(\%) = \frac{C_{PC}}{C_0 - C_{PO}} \times 100\%$$

其中, C_{PO} 表示催化 18 h 后环氧丙烷的浓度, C_{PC} 表示催化 18 h 后碳酸丙烯酯的浓度。

3. 结果与讨论

采用 X 射线粉末衍射(XRD)对所制备样品的晶体结构进行表征, 其衍射谱图如图 1(a)所示。三种样

品在 $2\theta = 7.4^\circ$ 和 8.5° 处均出现明显的特征衍射峰, 分别对应 UiO-66 立方晶体结构中的(111)和(002)晶面, 这与文献报道的标准 UiO-66 衍射特征高度一致[10]。进一步对比可以发现, 氨基功能化后的 UiO-66-NH₂ 和 UiO-66-(NH₂)₂ 样品的衍射峰位置与 UiO-66 基体基本保持一致, 未出现新的杂峰或明显峰位偏移, 表明在引入单氨基或双氨基配体后, UiO-66 的骨架结构得以良好保持, 氨基功能化并未破坏其原有的晶体框架结构。采用傅里叶红外光谱仪(FI-IR)对催化剂的功能基团进行分析, 如图 1(b)所示。对于 UiO-66-(NH₂)₂ 而言, 在 3400 和 3500 cm⁻¹ 的-NH₂ 特征谱带附近发现伯氨基对称和不对称 N-H 伸缩振动峰。并且对比三个样品, 可以发现, 随着氨基的减少, N-H 伸缩振动双峰逐渐减弱直至消失。此外, UiO-66-(NH₂)₂ 样品在 1660 cm⁻¹ 位置观察到的峰归属于-NH₂ 基团的不对称拉伸振动; 1445 cm⁻¹ 处归属于 N-H 伸缩振动峰, 1580 cm⁻¹ 处的峰表明-COOH 与 Zr⁴⁺之间发生了配位作用, 在 1438 cm⁻¹ 位置处的峰则可以归属于苯环骨架中的 C-C 键振动, 表明样品中存在苯环结构。此外, Zr-O 键的振动峰位于 600~800 cm⁻¹ 为 UiO-66-(NH₂)₂ 次级结构单元中锆氧簇的特征振动峰。上述表征进一步证明 UiO-66、UiO-66-NH₂、UiO-66-(NH₂)₂ 的成功制备。

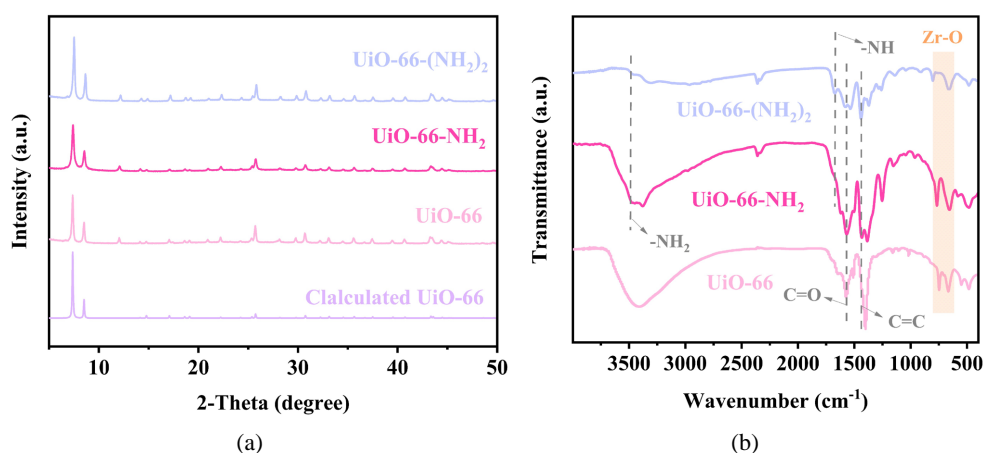


Figure 1. (a) XRD patterns and (b) FT-IR spectra of the samples

图 1. 样品的(a) XRD, (b) 红外光谱图

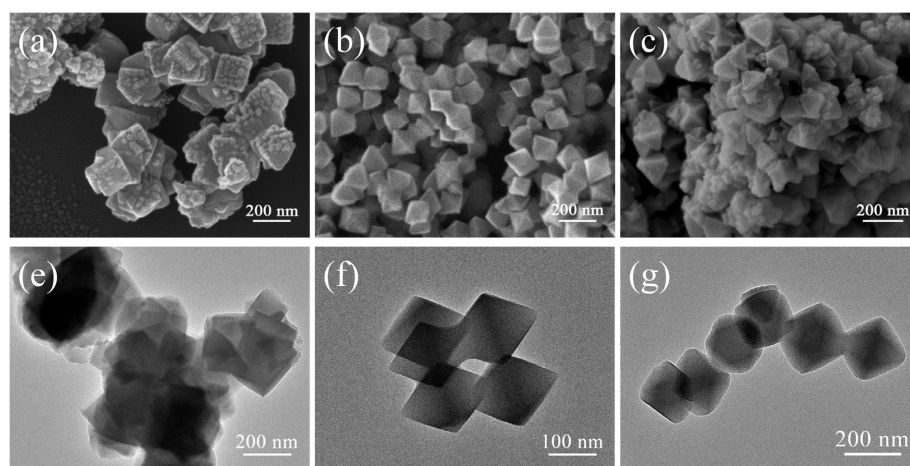


Figure 2. SEM images of (a) UiO-66, (b) UiO-66-NH₂ and (c) UiO-66-(NH₂)₂; TEM images of (e) UiO-66, (f) UiO-66-NH₂ and (g) UiO-66-(NH₂)₂

图 2. (a) UiO-66、(b) UiO-66-NH₂、(c) UiO-66-(NH₂)₂ 的 SEM 图; (e) UiO-66、(f) UiO-66-NH₂、(g) UiO-66-(NH₂)₂ 的 TEM 图

图 2(a)~(c)分别展示了 UiO-66、UiO-66-NH₂ 和 UiO-66-(NH₂)₂ 样品的扫描电子显微镜(SEM)图像。可以看出,引入氨基官能团并未对 UiO-66 的整体晶体形貌产生显著影响,三种样品均呈现规则且完整的八面体形态,表明氨基功能化过程未破坏 UiO-66 的形貌。从颗粒尺寸来看,UiO-66 的平均粒径约为 200 nm,而 UiO-66-NH₂ 和 UiO-66-(NH₂)₂ 的颗粒尺寸相对较小,约为 100 nm,二者之间差异不大。这种尺寸减小可能与氨基配体的引入改变晶体成核与生长过程有关。此外,UiO-66 表面呈现一定程度的凹凸颗粒状结构,而氨基功能化后的 UiO-66-NH₂ 与 UiO-66-(NH₂)₂ 样品则表现出边缘更加清晰、表面相对光滑的形貌特征。图 2(e)~(g)为对应样品的透射电子显微镜(TEM)图像。可以观察到,UiO-66-NH₂ 和 UiO-66-(NH₂)₂ 均保持清晰可辨的八面体晶体轮廓,进一步验证了氨基官能化并未破坏 UiO-66 框架结构的完整性,与 XRD 表征结果相一致。

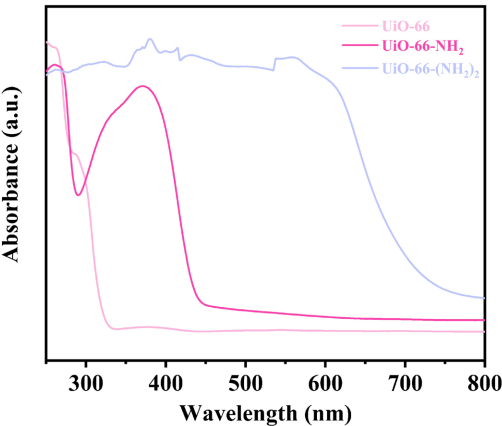


Figure 3. DRS spectra of UiO-66, UiO-66-NH₂ and UiO-66-(NH₂)₂
图 3. UiO-66、UiO-66-NH₂ 和 UiO-66-(NH₂)₂ 的 DRS 谱图

采用紫外-可见漫反射光谱(DRS)对合成的样品光学特性进行了表征。DRS 光谱如图 3 所示。UiO-66 系列材料的光学带隙主要由有机连接体的 π - π 电子跃迁决定,表明该材料为宽带隙半导体。约在 270 nm 处出现的吸收峰来自锆氧簇中氧配体向锆金属中心的电荷转移。原始 UiO-66 的吸收边在约 320 nm,仅吸收紫外光而不吸收可见光,因此呈白色。引入电子给体-NH₂ 基团后,可降低 π - π 跃迁所需能量,导致吸收边红移。UiO-66-NH₂ 的吸收边约为 440 nm,主要吸收紫外光及部分紫光 and 蓝光,因此呈浅黄色。随着-NH₂ 基团数量增加,UiO-66-(NH₂)₂ 的吸收边进一步红移至约 480 nm,吸收范围扩展至部分蓝紫光,使材料呈棕黄色粉末。从 350~450 nm 范围内,UiO-66、UiO-66-NH₂ 及 UiO-66-(NH₂)₂ 的吸收峰逐步增强,说明-NH₂ 基团的引入可显著增强材料的可见光吸收性能。

Table 1. Conversion, yield, and selectivity of the photocatalytic cycloaddition of CO₂ with PO under different conditions
表 1. 不同条件下光催化 CO₂ 与 PO 环加成反应的产率、转化率和选择性

| 组数 | 调控条件 | 转化率(%) | 产率(%) | 选择性(%) |
|----|---|--------|-------|--------|
| 1 | No catalyst/TBAB/light | 11.36 | 10.21 | 89.88 |
| | | 10.58 | 10.03 | 94.80 |
| | | 11.73 | 10.59 | 90.28 |
| 2 | UiO-66-(NH ₂) ₂ /light | 8.11 | 7.92 | 97.66 |
| | | 7.89 | 7.27 | 92.14 |
| | | 8.36 | 7.76 | 92.82 |

续表

| | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| 3 | UiO-66/TBAB/light | 39.57 | 39.11 | 98.84 |
| | | 39.26 | 38.48 | 98.01 |
| | | 40.07 | 38.79 | 96.81 |
| 4 | UiO-66-NH ₂ /TBAB/light | 46.31 | 45.89 | 99.09 |
| | | 46.57 | 46.13 | 99.06 |
| | | 45.97 | 45.67 | 99.35 |
| 5 | UiO-66-(NH ₂) ₂ /TBAB/dark | 14.67 | 14.4 | 98.16 |
| | | 14.21 | 13.94 | 98.10 |
| | | 14.99 | 14.51 | 96.80 |
| 6 | UiO-66-(NH ₂) ₂ /TBAB/light | 52.89 | 52.11 | 98.53 |
| | | 52.77 | 51.94 | 98.43 |
| | | 53.21 | 52.74 | 99.12 |

以光催化 CO₂ 环加成制备碳酸丙烯酯为探针反应, 考察样品的催化性能。在实验中投入 80 mmol (5.595 ml)环氧丙烷、0.1 mmol TBAB、100 mg 光催化剂, 在 1.6 MPa、可见光($\lambda \geq 420$ nm)或者黑暗的条件下反应 18 h, 使用 CFCI₃ 为内标校正转化率, 通过 GC-FID 检测催化剂催化的活性。通过对比表 1 中的数据和图 4 可以得出, 在没有催化剂且有 TBAB 和光源的情况下, CO₂ 环加成反应的产率、转化率、选择性及反应速率都较低。催化体系在 UiO-66-(NH₂)₂ 且有光, 没有助催化剂的情况下, 产率反而下降 2%, 转化率也降低, 说明助催化剂在可以一定程度上促进 CO₂ 环加成反应。通过第 3、4、6 组对比, 可以得到以 UiO-66-(NH₂)₂ 为主催化剂的产率和转化率明显高于 UiO-66-NH₂, 而 UiO-66-NH₂ 高于 UiO-66, 说明-NH₂ 的碱性 N 的增加更有利于 PO 吸附, 使得反应的活性得到提高。观察表格中最后两组对照实验, 可以看出在光照条件下的产率和转化率比无光时的产率大大增加, 说明光照对于 CO₂ 环加成反应是一项重要的条件。通过实验发现, 可以得出实验初步结论: (1) 光照条件下可促进 CO₂ 环加成反应的进行。(2) CO₂ 环加成反应在无催化剂情况下难以进行。(3) TBAB 主要影响产率和转化率, 对选择性影响不大。

通过表 1 第 3、4、6 组在保持高选择性的前提下, 催化剂的活性随着氨基(-NH₂)官能团数量的增加而显著提高。转化率从 39.57% 提升到 46.31% 再到 52.89%。三者的选择性都非常高且接近, 说明氨基的引入主要影响反应的动力学, 并没有改变反应路径或引发明显的副反应作用。

我们推测 UiO-66-(NH₂)₂ 具有更加优越的光催化性能的主要原因是: (1) 暴露的 Zr⁴⁺金属中心作为 Lewis 酸位点, 有机配体上的-NH₂ 官能团作为 Lewis 碱位点的电子供体, 共同吸附活化反应底物; (2) 在光照下催化剂受激发, 产生高能光生电子-空穴对, 电子转移至 Lewis 酸位点(暴露的 Zr⁴⁺金属中心), 随后被转移到吸附的 CO₂ 分子的反键 π^* 轨道上, 还原为 CO₂⁻ 阴离子; (3) 溴离子作为亲核试剂, 攻击在碱性位点上吸附活化的 PO 分子的 β -C 使其断裂完成开环; (4) CO₂⁻ 形成碳酸脂类中间体经过分子内环化; (5) 闭环, 溴离子脱除, 参与后续的循环反应; (6) 最后, 生成的碳酸丙烯酯分子从 Lewis 酸位点上脱附。

尽管 UiO-66、UiO-66-NH₂、UiO-66-(NH₂)₂ 三者都具有数量相近的活性高位点, 但 UiO-66-(NH₂)₂ 结构中含有更多的氨基数量, 氨基作为 Lewis 碱位点可有效活化 PO 的 C-O 键, 其 PO 得到高效的活化, 因此 UiO-66-(NH₂)₂ 表现出更高的催化活性。

图 4 中有催化剂无 TBAB 的活性都低于无催化剂有 TBAB 的活性, 我们推测可能是 TBAB 作为相转移催化剂, 能打破反应体系的相界面壁垒, 促进反应底物在两相之间的传质与接触, 同时可提供溴离子作为亲核试剂或助催化剂, 直接加速反应进程。即使无固体催化剂(如 UiO-66-(NH₂)₂), TBAB 自身的相

转移催化效应也能让反应获得基础的转化与产率。且单一固体催化剂缺乏相转移协同无法高效发挥作用, UiO-66-(NH₂)₂ 等催化剂的活性位点需与反应底物充分接触才能发挥催化作用, 而无 TBAB 时, 反应体系的相分离会导致底物难以扩散至催化剂活性位点, 催化剂的催化效能被大幅限制, 最终表现出比“无催化剂 + TBAB”更低的反应活性。简单来说, TBAB 的相转移作用对该反应的速率提升贡献远大于单一固体催化剂在无相转移条件下的催化贡献。

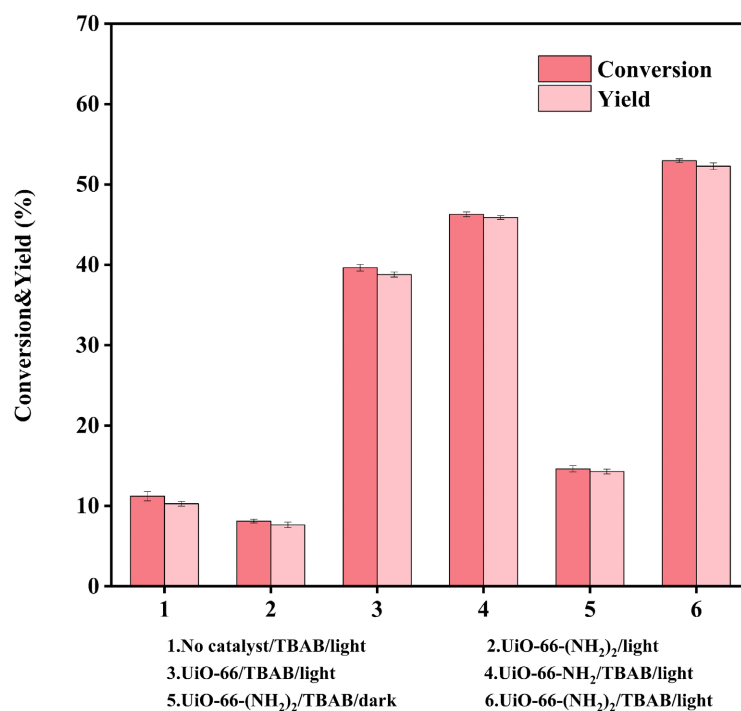


Figure 4. Photocatalytic performance of PO and CO₂ cycloaddition under different reaction conditions

图 4. 不同条件下光催化 PO 与 CO₂ 光催化环加成活性性能实验结果

4. 结论

通过溶剂热法成功合成了 UiO-66、UiO-66-NH₂ 及双氨基功能化的 UiO-66-(NH₂)₂ 光催化剂。三种催化剂在温和条件下(室温、可见光)均可催化 CO₂ 与环氧丙烷(PO)环加成生成碳酸丙烯酯(PC)。通过 XRD、FT-IR、SEM、TEM 及 UV-Vis DRS 等表征手段, 结果显示催化剂成功合成且保持了 UiO-66 框架结构, 同时氨基的引入显著增强了可见光吸收能力。催化性能实验表明, UiO-66-(NH₂)₂ 表现出最佳的光催化环加成性能, 在可见光照射下 CO₂ 环加成生成 PC 的产率为 52.89%、转化率为 52.11%。其高活性可归因于: 增强的可见光吸收促进光生电子-空穴对生成和分离; 氨基作为 Lewis 碱性位点活化 PO 分子并降低反应能垒; 暴露的 Zr⁴⁺ 金属中心作为 Lewis 酸性位点活化 CO₂ 分子; 光生电子导向 Zr⁴⁺ 位点进一步活化 CO₂, 空穴保留在氨基位点上活化 PO, 实现酸碱协同作用, 从而显著提升光催化效率。综上, 双氨基功能化的 UiO-66-(NH₂)₂ 不仅保持了稳定的框架结构, 还通过酸碱协同作用显著提高了 CO₂ 环加成反应的催化性能, 为高效 MOFs 基光催化剂的设计提供了新的思路。

参考文献

- [1] 郑建明, 杨欣. 我国能源效率对二氧化碳排放的影响[J]. 合作经济与科技, 2025(5): 16-19.

-
- [2] 邵斌, 孙哲毅, 章云, 等. 二氧化碳转化为合成气及高附加值产品的研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1136-1151.
- [3] 徐利林. 环状碳酸酯的多相催化体系制备分析[J]. 聚酯工业, 2025, 38(5): 250-252.
- [4] 李妍红, 温贺麟. 以二氧化碳为原料制备聚醚多元醇的研究及工业化应用[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(五). 2025: 291-293.
- [5] 廖旭, 林金清. 光催化 CO_2 环加成反应制备环状碳酸酯的研究进展[J/OL]. 精细化工, 1-16. <https://10.13550/j.jxhg.20250654>, 2026-01-01.
- [6] 程若霖, 王悦, 杨菲, 等. 金属有机骨架(MOFs)在光催化 CO_2 环加成反应中的应用综述(英文) [J]. 无机化学学报, 2025, 41(12): 2429-2440.
- [7] 孟祥明, 徐涵. 金属有机框架材料在处理染料废水中的应用进展[J]. 精细石油化工进展, 2025, 26(6): 35-40.
- [8] 姚凯瀚. 金属有机框架 $\text{NH}_2\text{-UiO-66}$ 材料的尺寸调控及其光催化还原二氧化碳性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2025.
- [9] 徐纤云. 基于适配体功能化铁金属有机框架材料的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2025.
- [10] 史雨翰. Zr-MOFs 材料(UiO-66)异质结复合催化剂的制备及其光催化还原 CO_2 性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西科技大学, 2023.