

# 二氧化碳与环氧化物环加成反应研究进展

韩佳璇, 马陇君

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年5月15日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月29日

## 摘要

随着全球气候变化问题日益严峻, 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的资源化利用已成为绿色化学与可持续发展领域的研究热点。在众多转化路径中, CO<sub>2</sub>与环氧化物的环加成反应因具有100%原子经济性而备受关注, 其产物环状碳酸酯在锂离子电池电解质、绿色溶剂等领域应用广泛。本文系统总结了近年来, 二氧化碳与环氧化物通过环加成反应生产环碳酸酯方面取得的较大进展。

## 关键词

环加成反应, 二氧化碳固定, 催化

# Recent Advances in the Cycloaddition Reaction of Carbon Dioxide with Epoxides

Jiaxuan Han, Longjun Ma

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 15, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 29, 2026

## Abstract

As the issue of global climate change becomes increasingly pressing, the resource utilization of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) has emerged as a research hotspot in the fields of green chemistry and sustainable development. Among the numerous conversion pathways, the cycloaddition reaction between CO<sub>2</sub> and epoxides has attracted significant attention due to its 100% atom economy; the resulting cyclic carbonates find widespread applications in areas such as lithium-ion battery electrolytes and green solvents. This paper systematically summarizes the significant progress made in recent years in the production of cyclic carbonates via the cycloaddition reaction between carbon dioxide and epoxides.

## Keywords

Ring-Closing Reactions, Carbon Dioxide Fixation, Catalysis

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

由于 CO<sub>2</sub> 分子中的碳原子处于最高氧化态, 其热力学稳定性与动力学惰性均较高[1]。因此, 将 CO<sub>2</sub> 作为有机合成原料的替代方案颇具挑战性——不仅需要高能量输入, 还可能产生比反应本身消耗更多的 CO<sub>2</sub> 排放。为降低 CO<sub>2</sub> 转化所需的能量并克服较高的反应壁垒, 开发高性能催化剂是关键。尽管用于催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化合物反应的催化剂种类繁多。虽然用于催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化合物反应的催化剂种类繁多, 但这些催化剂都有共通之处, 而且催化机理异曲同工[2]。如图 1 所示, 主要涉及三个关键步骤: (1) 环氧化物开环, (2) CO<sub>2</sub> 插入, (3) 分子内环化。过去二十年来, 均相和多相 CO<sub>2</sub> 利用催化体系领域取得了显著进展, 已开发出有机催化剂[3][4]、离子液体催化剂[5][6]、金属配合物催化剂[7][8]等多种催化体系。

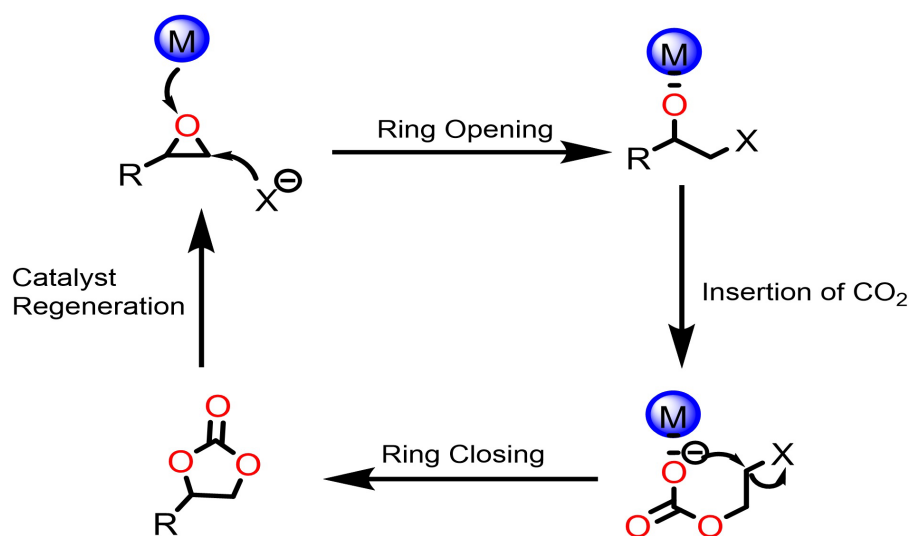


Figure 1. General mechanism of the cycloaddition reaction between CO<sub>2</sub> and epoxides

图 1. CO<sub>2</sub> 与环氧化合物环加成反应的一般机理

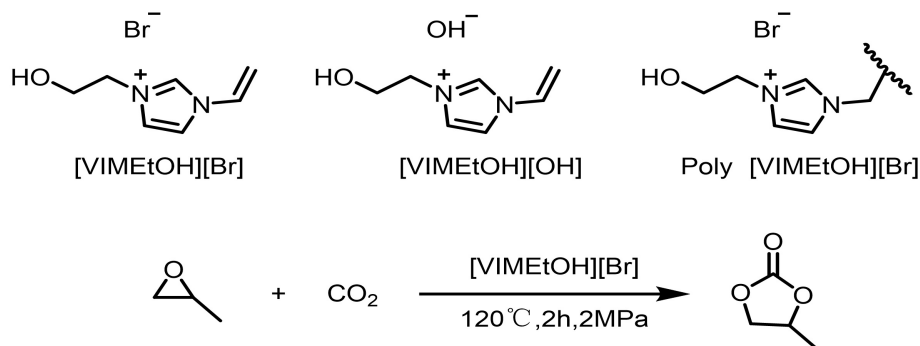
## 2. 二氧化碳与环氧化合物环加成反应研究进展

### 2.1. 均相催化剂

#### 2.1.1. 离子液体催化剂

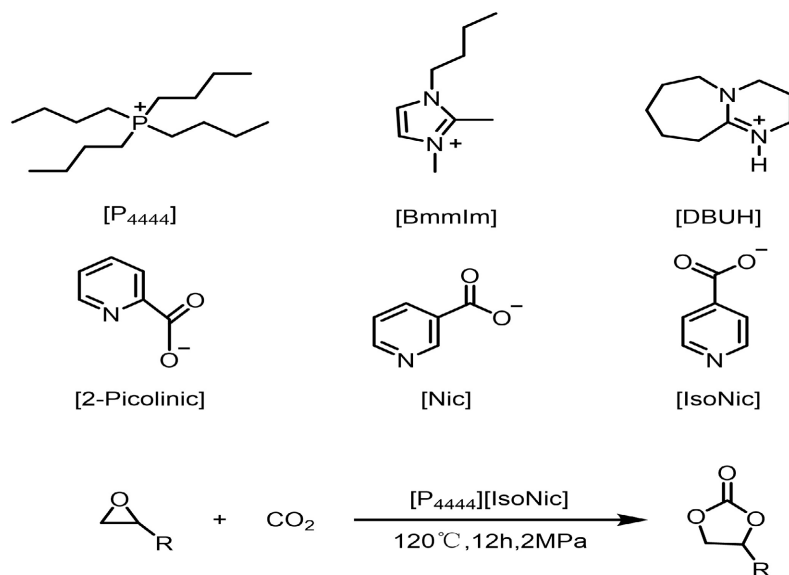
有关 CO<sub>2</sub> 吸收与利用的文献表明[9], 离子液体作为液相介质具有显著的 CO<sub>2</sub> 溶解度, 过去十年间, 以季铵盐和吡啶鎓离子液体为催化剂、利用 CO<sub>2</sub> 制备环状碳酸酯的技术已发展成熟, 且研究证实阳离子与阴离子对催化活性均有显著影响。目前多种类型的离子液体被应用于该反应的催化, 包括咪唑鎓盐、季铵盐、磷盐及吡啶鎓盐等离子液体。

2022年, Rajendra 小组合成了一系列咪唑鎓离子液体[10], 如图2所示, 其中[VIMEtOH][Br]展现出了最优异的催化活性, 在温度 120°C、压力 2 MPa CO<sub>2</sub>、催化剂负载量 1.3 mol%的条件下, 环氧丙烷在 2 小时内, 以 99.6%的转化率转化为碳酸丙烯酯。



**Figure 2.** Imidazolium ionic liquid catalyst  
**图 2.** 咪唑鎓离子液体催化剂

2023年, Liu 等人成功合成了六种具有不同阳离子和阴离子空间结构的羧酸离子液体[11], 如图3所示, 并将其用于催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化物的环加成反应。优化后的[P<sub>4444</sub>][IsoNic]在 120°C、压力 2 MPa CO<sub>2</sub>、催化剂负载量 2 mol%的条件下, 环氧化物在 12 小时内, 以 40.2%~94.9%的转化率转化为相应的环碳酸酯。

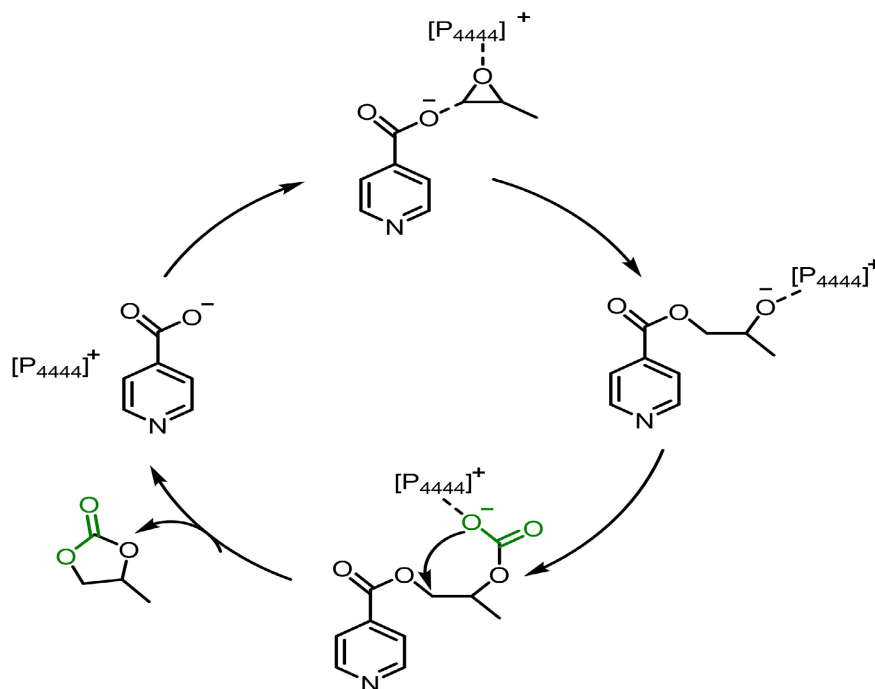


**Figure 3.** Carboxylic acid ammonium ionic liquid catalyst  
**图 3.** 羧酸鎓离子液体催化剂

基于上述实验, 他们提出了[P<sub>4444</sub>][IsoNic]催化环加成反应的可能机理, 如图4所示。首先, [P<sub>4444</sub>]与氧原子相互作用, 使环氧化物的 C-O 键极化。同时, [IsoNic]直接攻击环氧化物中位阻较小的碳原子, 生成开环中间体。随后, 中间体自发地与 CO<sub>2</sub> 分子相互作用以实现 CO<sub>2</sub> 插入。在分子内环化步骤之后, 产生产物并再生催化剂。

离子液体催化剂虽具备催化效果优异、热稳定性高等优点, 但在反应结束后难以从反应体系中分离

并循环使用。这不仅增加了催化剂的使用成本, 还可能因催化剂残留影响产物纯度, 从而限制了其在工业规模化生产中的实际应用。



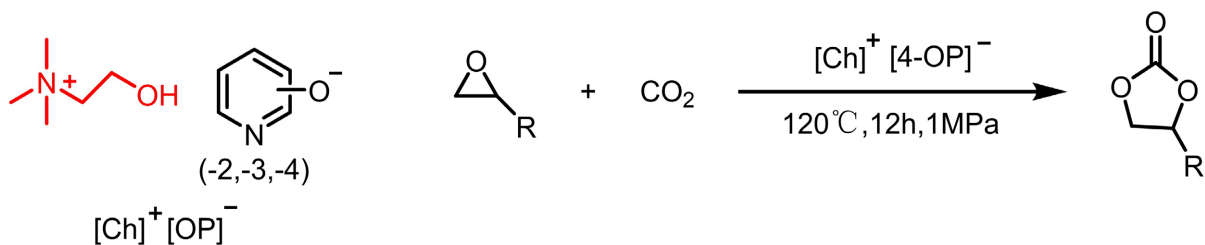
**Figure 4.** [P<sub>4444</sub>][IsoNic] mechanism of catalytic cycloaddition reaction  
**图 4.** [P<sub>4444</sub>][IsoNic]催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化物环加成反应的机理

### 2.1.2. 有机催化剂

有机催化剂被广泛认为是一类稳定、无毒且价格低廉的化合物。通常而言, 它们在湿气与空气环境中暴露时具有良好的稳定性。凭借这些特性, 有机催化剂在将 CO<sub>2</sub> 转化为高附加值产品的过程中展现出巨大潜力。

2024 年, Zhu 等人提出了一种无卤离子对有机催化剂用于 CO<sub>2</sub> 环加成环氧化物反应<sup>[12]</sup>。如图 5 所示, 设计了具有三个不同取代位置的吡啶胆碱离子对。在温度 120℃、压力 1 MPa CO<sub>2</sub>、催化剂负载量 5 mol% 的条件下, 采用最佳催化剂 4-吡啶醇胆碱([Ch]<sup>+</sup>[4-OP]<sup>-</sup>)。一系列末端环氧化物在 12 小时内转化为环状碳酸酯, 收率在 80% 至 99% 之间。

但是大多数有机催化剂在严苛条件下才能进行反应, 反应所需要较高的催化剂负载量, 这不仅增加了反应成本, 也为后续产物分离和催化剂回收带来了挑战。

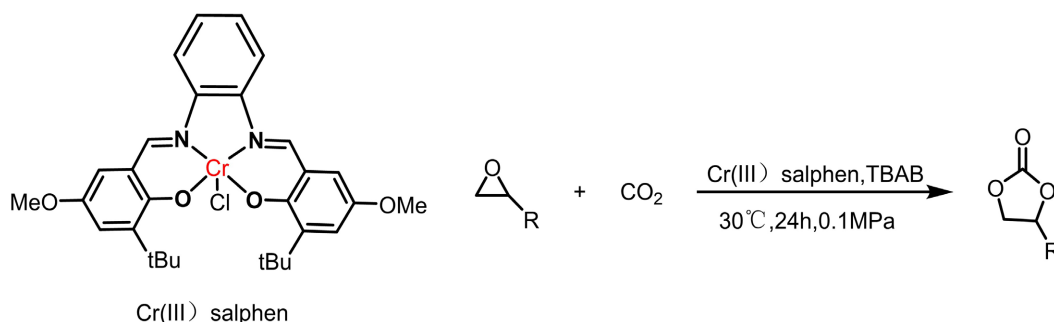


**Figure 5.** [Ch]<sup>+</sup>[OP]<sup>-</sup> catalyzed cycloaddition reaction of CO<sub>2</sub> with epoxides  
**图 5.** [Ch]<sup>+</sup>[OP]<sup>-</sup>催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化物的环加成反应

### 2.1.3. 金属配合物催化剂

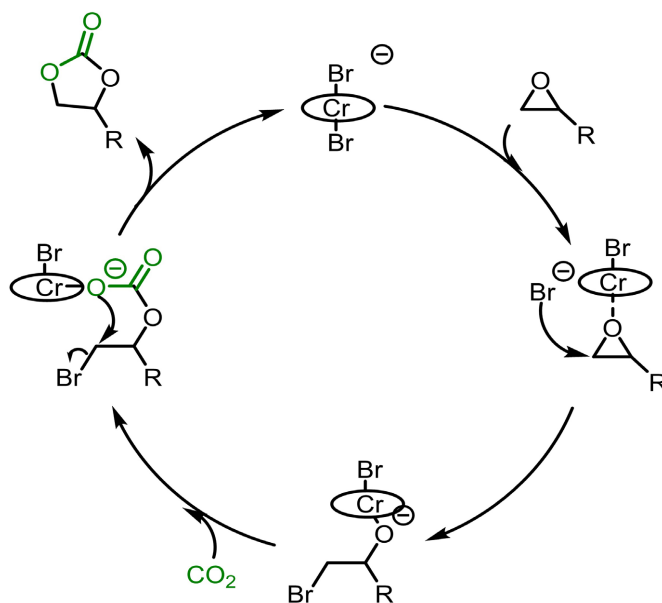
金属配合物是环氧化物与  $\text{CO}_2$  偶联反应中应用最广泛、催化效果最优异的催化剂之一, 其种类十分丰富, 涵盖不同配体与不同金属的组合。其中过渡金属配合物催化就凭借其高催化活性一直都是研究热点, 金属和配体协同催化使得催化活性进一步提高。

North 等人于 2016 年尝试利用基于 Salen 的活性催化系统[13], 在环境条件下生产环状碳酸酯。如图 6 所示, 他们探索了 Cr (III) salen 络合物, salen 是一类具有芳香桥或芳香胺主链的 salen 络合物, 加入共催化剂 TBAB 后, 在温度  $30^\circ\text{C}$ 、压力 0.1 MPa  $\text{CO}_2$ 、催化剂负载量 10 mol% 的条件下, 在 24 h 后环氧化物以 57%~92% 的产率转化为环碳酸酯。



**Figure 6.** Cycloaddition reaction of  $\text{CO}_2$  with epoxides catalyzed by Cr (III) salen  
**图 6.** Cr (III) salen 催化  $\text{CO}_2$  与环氧化物的环加成反应

基于上述实验, 如图 7 所示他们提出了该反应的可能机理: 向 Cr (salen) 溴化物络合物中加入  $\text{Bu}_4\text{NBr}$ , 形成六配位双溴化物络合物  $[\text{Cr}(\text{salen})\text{Br}_2]^-$ ; 随后将环氧化物引入催化体系, 非配位溴离子会攻击环氧化物中空间位阻较小的碳原子; 紧接着二氧化碳插入铬-氧键形成金属碳酸酯中间体; 最终通过分子内闭环反应生成目标产物环状碳酸酯。



**Figure 7.** Mechanism of the cycloaddition reaction catalyzed by Cr (III) salen  
**图 7.** Cr (III) salen 催化环加成反应的可能机理

上述金属配合物催化剂虽然在室温条件且不需要较高的压力就可以催化环氧化物和 CO<sub>2</sub> 的环加成反应, 但是部分体系仍需添加助催化剂导致反应体系较为复杂, 也可能在一定程度上影响产物的纯度。

## 2.2. 多相催化剂

### 2.2.1. 金属有机框架(MOF)催化剂

MOF 凭借其超高比表面积、可调孔道结构、可设计的金属节点和有机配体以及丰富的 Lewis 酸-碱双功能位点, 在 CO<sub>2</sub> 环加成反应中展现出优异的催化潜力, 已成为近年来该领域发展最为迅猛的多相催化体系之一。

2025 年, Li 等人将 Co<sup>2+</sup> 固载于 MOF-253 (Al) 上制得 MOF-253-0.5Co 催化剂<sup>[14]</sup>, 如图 8 所示, 在 100 °C 和 1 MPa CO<sub>2</sub> 条件下实现了高达 4,200 h<sup>-1</sup> 的 TOF 值, 经五轮循环后累计 TON 达 19,880, 且即使在模拟烟气(CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> = 15/85)条件下仍能保持优异的催化活性。该研究还通过系统的动力学研究和对照实验对反应机理进行了阐明, 为 MOF 催化剂的工业化应用提供了有力支撑。从性能角度看, MOF-253-0.5Co 的 TON 已经接近于某些工业催化剂的水平。然而需要指出的是, 该工作仍需添加 TBAB 作为共催化剂, 这意味着反应体系并不完全集成了 Lewis 酸碱位点于 MOF 框架之内, 仍需进一步发展“单组分”多相 MOF 催化剂以真正实现催化剂的简洁化设计。

MOF 催化剂仍面临若干挑战: 金属节点与有机配体之间的配位键相对较弱, 在反应过程中可能导致结构坍塌, 循环稳定性受限。

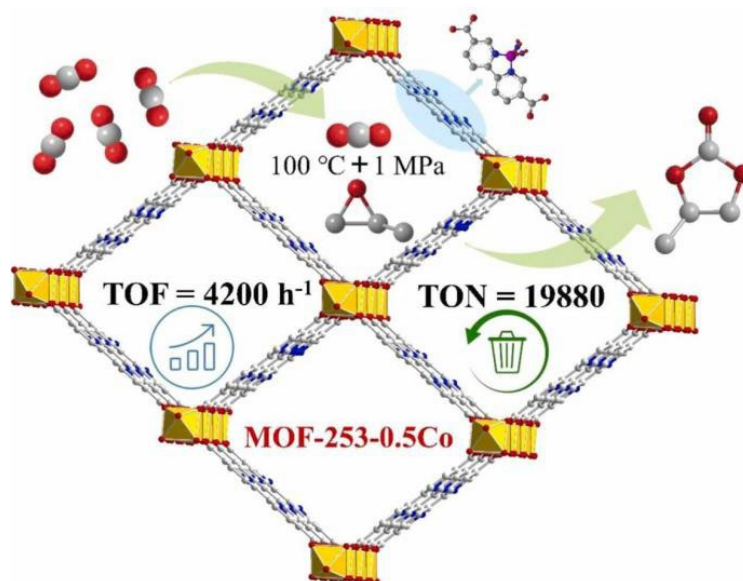


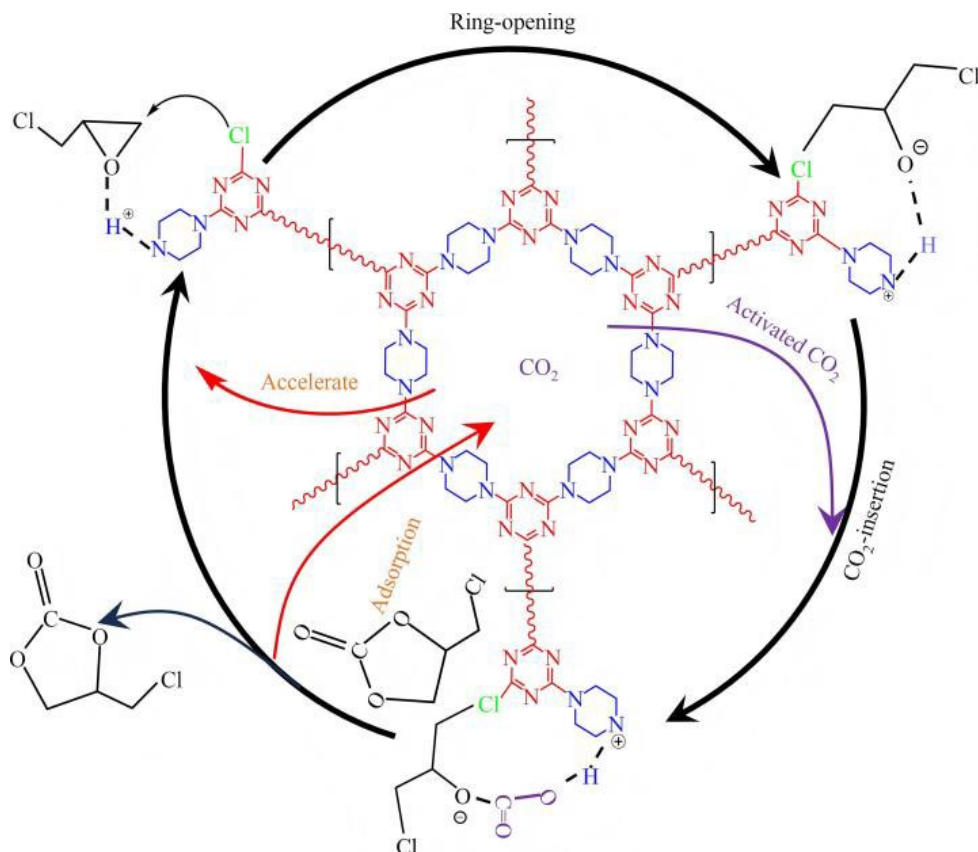
Figure 8. MOF-253-0.5Co catalyst  
图 8. MOF-253-0.5Co 催化剂

### 2.2.2. 共价有机框架(COF)催化剂

COFs 材料是一类具有周期性有机单元, 由 C、H、O、N 和 B 等轻元素组成的新型多孔有机骨架。作为一类新兴的多孔有机材料, COFs 材料其特殊性在于用于构筑 COFs 单体的共价聚合更具定向性, 因此能够通过选择合适的有机单体, 结合计算模拟来预测和调控其拓扑结构。

2025 年, Yang 等人研究通过溶热工艺合成了一系列基于三嗪的共价有机框架(PC-COF)材料, 并用 CO<sub>2</sub> 环加成反应, 无需任何溶剂或共催化剂。PC-COF 催化剂表现出最佳表现, ECH 转化率为 98.7%, 选

择性为 97.6%。CO<sub>2</sub>与环氧化物的环加成反应的反应自身催化机制如图 9 所示。起初, PC-COF 界面的氢键供体(N-H)极化了环氧化物中的 C-O 键。随后, 环氧化物阻碍较小的 β-C 原子被催化剂中的 C-Cl 攻击, 形成中间体 A, 该中间体可被 PC-COF 界面的氢键供体(N-H)稳定(步骤 I)。而三嗪环中的氮原子以共轭形式存在, 为下一步 CO<sub>2</sub>的吸附和活化提供了丰富的路易斯碱位点。随后, CO<sub>2</sub>插入到活化的环氧化物中, 生成烷基碳酸盐阴离子中间体 B (步骤 II)。最后, 通过分子内环化发生闭环反应, 生成相应的环状碳酸酯。此外, 一些碳酸盐会进一步聚合为低聚物和聚合物, 这些低聚物和聚合物会吸附在催化剂上, 并导致局部富集。



**Figure 9.** Mechanism of PC-COF-catalyzed cycloaddition reaction between CO<sub>2</sub> and epoxides  
**图 9.** PC-COF 催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化物环加成反应的机理

尽管 COF 在上述工作中展现出了优于 MOF 的稳定性优势, 但值得注意的是, 当前 COF 催化剂在 CO<sub>2</sub> 环加成反应中的研究仍相对不足, 主要体现在: COF 的合成条件通常较为苛刻(高温、长时间)、可控性有待提高; 多数 COF 的 Lewis 碱位点主要依赖于骨架中的氮原子, 但其碱性强度有限; 将 Lewis 酸位点(如金属离子)引入 COF 时往往采用后修饰策略, 可能造成孔道堵塞或活性位点分布不均。

### 2.2.3. 金属多孔粒子聚合物

2020 年 Li 等人及其团队设计制备出 Co-Salen 基多孔离子聚合物[15], 如图 10 所示, 在室温常压下测试了 CPIPs 催化环氧化物和 CO<sub>2</sub> 环加成反应的催化性能, CPIP-A-4 表现出最好的性能。在温度 30℃、压力 0.1 MPa CO<sub>2</sub>、催化剂负载量 10 mol% 的条件下, 采用最佳催化剂 CPIP-A-4。环氧化物在 12~24 小时内以 84%~97% 的转化率转化为环碳酸酯。

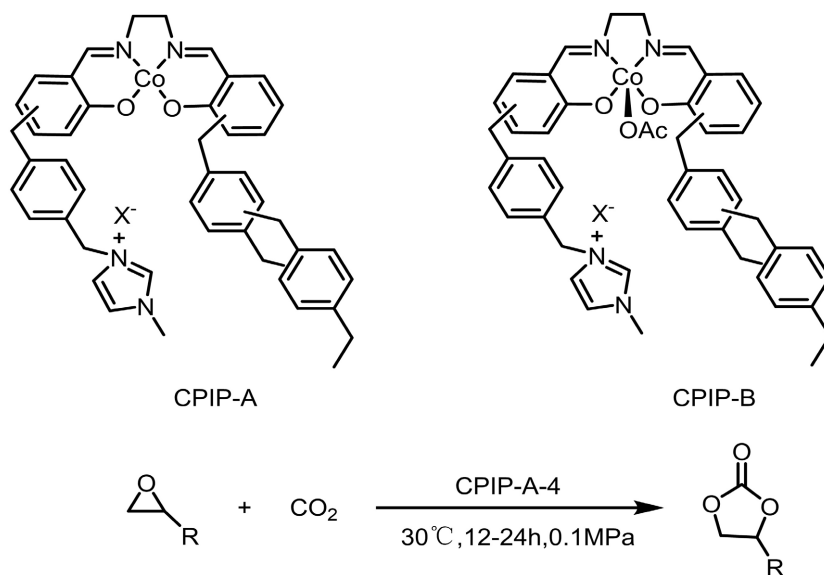


Figure 10. Cycloaddition reaction of CO<sub>2</sub> with epoxides catalyzed by CIPs

图 10. CIPs 催化 CO<sub>2</sub> 与环氧化物的环加成反应

#### 2.2.4. 负载型催化剂

将均相催化剂的活性组分负载于固体载体上, 是实现均相催化多相化、兼顾高催化活性与易分离回收特性的有效策略。

2023 年, Huang 等人设计合成了一种兼具 Lewis 酸与 Lewis 碱位点的多相催化剂<sup>[16]</sup>, 通过双位点协同效应显著提升催化活性。该催化剂采用湿浸渍法制备, 将锌前驱体负载于富氮碳载体上; 与助催化剂四丁基溴化铵(TBAB)协同作用时, 在无溶剂温和条件或传统加热条件下, 碳酸丙烯酯的产率分别可达 93%和 98.1%。此外, 该催化剂经多次循环使用后活性仍保持良好, 展现出优异的可循环性, 且对多种环氧化物底物均具有良好适用性。研究表明, 煅烧温度是影响催化性能的关键因素, 其可显著调控催化剂的结构与组分, 进而影响催化活性。具体而言, Zn 物种作为 Lewis 酸位点可促进环氧化物开环, 富氮碳载体提供的 Lewis 碱位点则用于活化 CO<sub>2</sub>, 而 TBAB 作为亲核试剂可进一步加速反应进程。

#### 2.3. 代表性催化剂的性能对比

以环氧丙烷为参照底物, 对上述所提到的不同种类的催化剂性能进行对比, 结果如表 1 所示。

Table 1. Comparison of different catalytic systems

表 1. 不同催化体系对比

Cat.	Co-Cat	Reaction conditions	Cat loading (mol%)	Yield (%)	TOF (h <sup>-1</sup> )
[VIMEtOH] [Br]	—	CO <sub>2</sub> (1 MPa), 14 h, 120°C	1.3	99.6	38.4
[Ch] <sup>+</sup> [OP]	—	CO <sub>2</sub> (1 MPa), 12 h, 120°C	5	99	1.65
Cr (III) salophen	TBAB	CO <sub>2</sub> (0.1 MPa), 24 h, 30°C	10	92	125
Co <sup>2+</sup> 固载 MOF-253 (Al)	—	CO <sub>2</sub> (1 MPa), 2 h, 120°C	0.1	99	1000
CPIP-A-4	—	CO <sub>2</sub> (0.1 MPa), 12 h, 30°C	10	97	0.8
负载型催化剂	TBAB	CO <sub>2</sub> (4 MPa), 0.5 h, 140°C	0.03	53	3180
[P <sub>4444</sub> ] [IsoNic]	—	CO <sub>2</sub> (2 MPa), 2 h, 120°C	2	94.9	23.7

### 3. 总结与展望

当前 CO<sub>2</sub> 与环氧化物环加成反应领域已取得显著进展, 各类催化体系呈现出各自的优势和不足: 均相催化剂(离子液体、有机催化剂、金属配合物)通常具有优异的催化活性和明确的活性中心结构, 但分离回收困难、催化剂残留影响产物纯度, 限制了其工业化应用。多相催化剂(MOF、COF、多孔聚合物、负载型催化剂)具备易分离、可循环、结构可设计性强等优势, 是推动该反应走向工业应用的重要方向。然而, 当前多相催化剂仍面临稳定性不足、合成条件苛刻、活性位点密度与可及性之间的权衡以及部分多相催化剂仍需添加助催化剂等问题。无助剂/无卤素催化是满足绿色化学要求的理想方向, 但当前多数无助剂体系的催化活性仍有待提升; 无卤素体系(尤其是以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 替代 Br<sup>-</sup> 为亲核试剂)虽在实验室条件下获得了成功, 但在更广泛的底物范围和更苛刻条件下能否保持同等效率仍不确定。底物普适性仍是制约该领域发展的关键瓶颈。现有研究主要集中于活性较高的末端环氧化物, 而对空间位阻较大的内环氧化物(如环己烯氧化物、环氧环己烷等)的催化转化效率普遍偏低。虽然有报道了环己烯氧化物 72% 的转化率(在无助剂条件下), 但其反应时间较长、温度较高。

展望未来, CO<sub>2</sub> 与环氧化物环加成反应研究应在以下几个方向持续发力:

(1) 设计无助剂、无卤素的协同催化体系。在多相催化剂中有序整合 Lewis 酸-碱双功能位点是实现无助剂催化的关键。开发出真正的“三无”(无助剂、无卤素、无溶剂)高效催化剂。特别是氢键供体与 Lewis 酸中心协同作用的设计思路, 已通过 DFT 计算证实可以显著降低开环步的能垒, 应成为重点研究方向。

(2) 提升多相催化剂的稳定性和可规模化制备能力。未来的研究应进一步聚焦于: 发展低成本的规模化合成方法; 将 MOF/COF 的稳定性评估从实验室条件下的简单循环测试拓展至对真实工况(如杂质、湿度、温度波动)的耐受性; 探索基于可再生生物质载体的催化剂体系(如上述纤维素负载型催化剂)以实现全生命周期的绿色化学。

(3) 利用 DFT 计算和原位表征技术深化机理认识。后续研究应充分利用 DFT 计算结合原位红外光谱、XPS 等先进表征手段, 在分子水平上揭示不同活性位点之间的协同催化机制。此外, 应将 DFT 计算从单一的“能垒比较”拓展至全反应路径的自由能面构建和对不同金属节点的催化选择性预测, 真正实现理论驱动的催化剂理性设计。

(4) 拓展底物范围并探索连续流工艺。应将研究重心从高活性的末端环氧化物(如环氧丙烷、环氧氯丙烷等)逐步拓展至更具挑战性的内环氧化物(如环己烯氧化物)和功能性环氧化物(如烯丙基缩水甘油醚等), 系统研究底物位阻、电子效应对催化活性的影响规律, 建立底物适应性的催化剂设计准则。

### 参考文献

- [1] Jadhav, A.H., Thorat, G.M., Lee, K., Lim, A.C., Kang, H. and Seo, J.G. (2016) Effect of Anion Type of Imidazolium Based Polymer Supported Ionic Liquids on the Solvent Free Synthesis of Cycloaddition of CO<sub>2</sub> into Epoxide. *Catalysis Today*, **265**, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.09.048>
- [2] Mishra, V. and Peter, S.C. (2024) A Comprehensive Overview of the Catalytic Pathway for CO<sub>2</sub> Utilization with Epoxide to Cyclic Carbonate. *Chem Catalysis*, **4**, Article 100796. <https://doi.org/10.1016/j.cheecat.2023.100796>
- [3] Guan, X., Shen, Z., Chen, L., Zhang, C., Sun, C., Du, Y., et al. (2024) A Nitrogen-Rich Nanoporous Ionic Covalent Organic Framework as Iodine Adsorbent in Gaseous and Aqueous Environments. *ACS Applied Nano Materials*, **7**, 27318-27324. <https://doi.org/10.1021/acsnm.4c05307>
- [4] Yin, M., Wang, L.P. and Tang, S. (2023) Stable Dicationic Covalent Organic Frameworks Manifesting Notable Structure-Enhanced CO<sub>2</sub> Capture and Conversion. *ACS Catalysis*, **13**, 13021-13033. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c02796>
- [5] Wang, Y., Wang, Y., Zhao, Y., Fu, J. and Liu, Z. (2025) Ionic Liquids Promoted Transformation of Carbon Dioxide. *Chemical Reviews*, **125**, 6057-6129. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00696>

- [6] Zhou, J., Zhao, Y., Feng, Y., Zhang, X. and Liu, B. (2024) Ionic Porous Organic Polymer Loaded with Zn(II) Ions for Efficient Cycloaddition of CO<sub>2</sub> and Epoxides to Cyclic Carbonate. *Energy & Fuels*, **38**, 4417-4428. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c05156>
- [7] Luo, R., Chen, M., Zhou, F., Zhan, J., Deng, Q., Yu, Y., *et al.* (2021) Synthesis of Metalloporphyrin-Based Porous Organic Polymers and Their Functionalization for Conversion of CO<sub>2</sub> into Cyclic Carbonates: Recent Advances, Opportunities and Challenges. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 25731-25749. <https://doi.org/10.1039/d1ta08146b>
- [8] Sensharma, D., O'Hearn, D.J., Koochaki, A., Bezrukov, A.A., Kumar, N., Wilson, B.H., *et al.* (2022) The First Sulfate-Pillared Hybrid Ultramicroporous Material, SOFOUR-1-Zn, and Its Acetylene Capture Properties. *Angewandte Chemie*, **134**, Article 16145. <https://doi.org/10.1002/ange.202116145>
- [9] Xing, H., Yu, F., Li, X., Bao, Y., Ye, W., Li, C., *et al.* (2025) Application of Ionic Liquids in CO<sub>2</sub> Capture and Conversion: A Review. *Separation and Purification Technology*, **360**, Article 130981. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130981>
- [10] Mujmule, R.B. and Kim, H. (2022) Efficient Imidazolium Ionic Liquid as a Tri-Functional Robust Catalyst for Chemical Fixation of CO<sub>2</sub> into Cyclic Carbonates. *Journal of Environmental Management*, **314**, Article 115045. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115045>
- [11] Liu, S., Su, Q., Fu, M., Deng, L., Wang, Y., Dong, L., *et al.* (2023) Core-Shell Dispersed Polymeric Ionic Liquids as Efficient Heterogeneous Catalyst for CO<sub>2</sub> Conversion into Cyclic Carbonates. *Catalysis Letters*, **153**, 2429-2442. <https://doi.org/10.1007/s10562-022-04103-2>
- [12] Zhu, T., Xu, Y., Li, Z., He, J., Yuan, X., Qian, D., *et al.* (2024) Cholinium Pyridinolate Ionic Pair-Catalyzed Fixation of CO<sub>2</sub> into Cyclic Carbonates. *The Journal of Organic Chemistry*, **89**, 7408-7416. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.3c02609>
- [13] Castro-Osma, J.A., Lamb, K.J. and North, M. (2016) Cr (Salophen) Complex Catalyzed Cyclic Carbonate Synthesis at Ambient Temperature and Pressure. *ACS Catalysis*, **6**, 5012-5025. <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b01386>
- [14] Gao, C.Y., Li, Y., Ding, L., *et al.* (2025) Immobilization of Co<sup>2+</sup> on MOF-253 (Al) as a Highly Active Heterogeneous Catalyst for CO<sub>2</sub> and Epoxides Coupling Reactions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article 119378. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119378>
- [15] Li, J., Han, Y., Lin, H., Wu, N., Li, Q., Jiang, J., *et al.* (2019) Cobalt-Salen-Based Porous Ionic Polymer: The Role of Valence on Cooperative Conversion of CO<sub>2</sub> to Cyclic Carbonate. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 609-618. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16913>
- [16] Kuang, Q., Liu, S., Liao, C., Yang, L., Cao, H., Zhuo, C., *et al.* (2025) Swellable Supported Catalyst Enables Repeatable Coupling of CO<sub>2</sub> and Epoxides. *Science China Chemistry*, **68**, 6551-6563. <https://doi.org/10.1007/s11426-025-2901-6>