# 高效离子液体催化剂温和条件催化 $CO_2$ 与环氧丙烷的反应及动力学研究

张俊杰,沈卫华,方云进*
(华东理工大学化工学院,化学工程与低碳技术国家重点实验室,上海 200237)

**摘要**:利用自制的双核季铵盐催化剂催化 $CO_2$ 与环氧丙烷(PO)合成碳酸丙烯酯(PC),对催化剂用量、反应温度、反应压力及反应时间进行优化,根据亲核反应机理建立了动力学方程,研究了不同温度下PO转化率与PC生成速率随时间变化的规律。实验表明,在100℃、1.5 MPa、2 h、催化剂质量分数为1.5%的条件下,PO转化率为99.74%,PC选择性为99.64%,总反应速率与PO浓度呈线性关系。

**关键词**:离子液体;碳酸丙烯酯;二氧化碳;动力学方程
**中图分类号**:TQ225.52 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0189-05
**DOI**:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.031

## Efficient ionic liquid catalysts for catalyzing reaction of $CO_2$ with propylene oxide under mild conditions and kinetic studies

*ZHANG Jun-jie, SHEN Wei-hua, FANG Yun-jin**
(State Key Laboratory of Chemical Engineering and Low-Carbon Technology, School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract**: Using a self-made dinuclear quaternary ammonium salt catalyst to synthesize propylene carbonate (PC) from $CO_2$ and propylene oxide (PO), the catalyst dosage, reaction temperature, reaction pressure and reaction time were optimized. A kinetic equation was established based on the nucleophilic reaction mechanism, and the laws of PO conversion rate and PC production rate changing with time under different temperatures were studied. The experiments showed that at 100℃, 1.5 MPa and 2 h, with a catalyst dosage of 1.5%, the PO conversion rate was 99.74%, the PC selectivity was 99.64%, and the total reaction rate was linearly related to the PO concentration.

**Key words**: ionic liquid; propylene carbonate; carbon dioxide; kinetic equation

通过碳捕获和利用(CCU)将 $CO_2$ 转化为化工产品是减少 $CO_2$ 排放和有效利用可再生资源的手段之一。$CO_2$ 与环氧化物环加成制备环状碳酸酯具有100%的原子经济性。在众多产物中,碳酸丙烯酯(PC)具有十分广泛的用途。PC可用作锂离子电池的电解液[1]、有机合成的绿色非质子溶剂[2]、调节溶剂体系粘度的分散剂[3]以及有毒溶剂的替代品[4]。此外,它还可以用于制备碳酸二甲酯和聚碳酸酯。目前,已报道的PC合成方法主要有:光气法[5]、尿素醇解法[6]、酯交换法[7]、氯丙醇法[8]、$CO_2$-环氧丙烷(PO)环加成等[9]。其中,以 $CO_2$ 与PO为原料制备PC是目前最常见且成熟的合成路线。催化 $CO_2$ 与PO合成碳酸丙烯酯的催化剂种类很多,如金属配合物[10]、金属氧化物[11]、碱、离子液体[12-13]等。其中,季铵盐类离子液体催化剂得到了广泛的研究,例如四丁基溴化铵[14]和四乙基溴化铵[15]等。与单核季铵盐相比,双核季铵盐(GQAS)具有更高的表面活性。目前,GQAS主要应用于生物消毒、海洋防污和表面改性等[16],在催化 $CO_2$ 与PO合成PC方面尚未被深入研究。本课题组自制的双核季铵盐锌复合离子液体具有活性高、反应条件温和以及可重复利用等特点。$CO_2$-PO环加成制备PC的反应属于气液相反应过程,气液传质过程的存在会使宏观动力学的研究更为复杂[17]。

本工作制备了双核季铵盐离子液体二溴化-*N*,*N*-二(三乙基)乙二胺[$C_2(N_{222})_2Br_2$],在复合了不同的卤化锌后,用于催化 $CO_2$-PO环加成反应;确定了合适的卤化锌种类与比例,系统考察了催化剂用量、反应温度、反应压力以及反应时间对PC合成的影响,确定了最佳工艺条件;探究了反应机理,推

**收稿日期**:2026-01-21;**修回日期**:2026-08-09
**基金项目**:陕煤联合基金项目(2019JLM-20)
**作者简介**:张俊杰(2000-),男,硕士生,研究方向为离子液体催化,jjzhang@mail.ecust.edu.cn;方云进(1968-),男,博士,教授,研究方向为绿色化工,通讯联系人,yjfang@ecust.edu.cn。

导了动力学方程并拟合求解关键参数,为工业化反应器设计、工艺优化及反应过程强化提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

1,2-二溴乙烷(99%),上海迈瑞尔生化科技有限公司;三乙胺(99%),上海沃化化工有限公司;环氧丙烷(≥99.9%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;碘化锌(分析纯),上海笛柏化学品技术有限公司;溴化锌(98%),上海泰坦科技股份有限公司;氯化锌(分析纯),上海泰坦科技股份有限公司;碳酸丙烯酯(99.5%),麦克林试剂有限公司生产;二氧化碳(99.99%),上海申中气体有限公司;气相色谱仪(GC-603),上海锐敏仪器有限公司;微型反应釜(YZPR-250M),上海岩征实验仪器有限公司。

### 1.2 双核季铵盐锌复合离子液体的制备

称取 15.20 g(0.15 mol)1,2-二溴乙烷和 11.30 g(0.06 mol)三乙胺置于 250 mL 圆底烧瓶中,加入适量乙腈作为溶剂,80℃下搅拌回流。然后,使用旋转蒸发仪除去溶剂和未反应原料,得到固体产物。使用乙酸乙酯洗涤固体 3 次,并将所得产物置于真空干燥箱中,60℃下干燥 24 h,得到双核季铵盐二溴化-*N*,*N*-二(三乙基)乙二胺[$C_2(N_{222})_2Br_2$]。

称取一定比例的二溴化-*N*,*N*-二(三乙基)乙二胺和卤化锌置于 250 mL 圆底烧瓶中,加入一定量的碳酸丙烯酯作为溶剂,80℃下搅拌 2 h,最终得到 $C_2(N_{222})_2Br_2/ZnBr_2$ 复合离子液体。

### 1.3 催化剂性能测试

在反应釜中进行 $CO_2$ 与 PO 的环加成反应。首先,将称量好的离子液体催化剂放入釜中并对反应釜进行气密性检查,然后向釜中通入 $CO_2$,再将气体排空,如此重复 3 次,最后通过微型柱塞泵将 PO 泵入反应釜内,升温至设定温度后向釜内充入 $CO_2$ 至设定压力并开始计时。反应结束后,向盘管通入冷却水将反应产物迅速冷却至室温,取出产品并称量,采用气相色谱仪对样品进行分析,并计算 PO 的转化率和 PC 的产率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同卤化锌复合的催化效果

在催化剂量为 1.5%、100℃、1.5 MPa、1 h 的条件下研究了不同种类卤化锌离子液体催化 $CO_2$ 与 PO 合成 PC 的效果,结果如表 1 所示。

**表 1 不同种类卤化锌对催化效果的影响**

| 双核季铵盐 | 卤化锌 | 摩尔比 | 转化率/% | 选择性/% |
|---|---|---|---|---|
| $C_2(N_{222})_2Br_2$ | 不复合 | — | — | — |
| | $ZnBr_2$ | 4∶1 | 98.56 | 99.64 |
| | $ZnBr_2$ | 5∶1 | 98.64 | 99.68 |
| | $ZnBr_2$ | 6∶1 | 97.63 | 99.56 |
| | $ZnCl_2$ | 5∶1 | 95.47 | 99.22 |
| | $ZnI_2$ | 5∶1 | 94.15 | 99.15 |

注:“—”代表未检测出目标产物。

从表中可以看出,双核季铵盐与卤化锌具有协同作用,对催化合成 PC 具有较强的活性。单独使用双核季铵盐难以促使反应发生,卤化锌对激活环氧化物的氧、促进 PO 的开环有重要作用。当双核季铵盐与 $ZnBr_2$ 的摩尔比为 5∶1时,复合离子液体的催化效果最佳。卤化锌中的卤素离子作为亲核试剂参与 PO 的开环。通常情况下,催化活性应与亲核性一致($I^->Br^->Cl^-$),但结果表明催化活性顺序为 $Br^->Cl^->I^-$,这可能是空间位阻的原因,$I^-$的半径较大,在进攻被活化后的 PO 时受阻,导致反应速率下降。

### 2.2 搅拌速率对传质的影响

为消除传质对反应的影响,在催化剂量为 1.5%、100℃、1.5 MPa、1 h 条件下研究了搅拌速率对反应的影响,结果如表 2 所示。

**表 2 搅拌速率对反应的影响**

| 搅拌速率/(r·min$^{-1}$) | 200 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|---|---|---|---|---|---|
| 转化率/% | 91.87 | 96.86 | 98.64 | 98.52 | 98.61 |
| 选择性/% | 98.98 | 99.48 | 99.68 | 99.75 | 99.67 |

从表中可以看出,PO 的转化率随着搅拌速率的增大而增加,当搅拌速率低于 500 r/min 时,反应过程受传质影响较大,导致反应速率下降。当搅拌速率由 500 r/min 增加至 700 r/min 时,PO 转化率无明显变化,因此当搅拌速率为 500 r/min 时,可以认为 $CO_2$ 的溶解速率远大于 $CO_2$ 的反应速率,气液传质过程对实验的影响可以忽略。因此,最佳搅拌速率为 500 r/min。

### 2.3 反应条件对催化效果的影响

在不同条件下评价了双核季铵盐锌复合离子液体催化 $CO_2$ 与 PO 合成 PC 的性能,催化剂用量、反应温度、反应压力和反应时间对催化效果的影响分别如表 3~6 所示。

由表 3 可知,随着催化剂用量的变化,PC 的选择性始终保持在 99%以上,当催化剂用量由 1.0%增加至 1.5%时,PO 的转化率均呈现增加的趋势,

继续增加时,PO 的转化率并无明显变化,表明继续增加催化剂的用量 PO 的转化率并无较大的作用。因此,适宜的催化剂用量为 1.5%。

**表 3　催化剂用量的影响**

| 催化剂用量/% | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 2.0 |
|---|---|---|---|---|---|
| 转化率/% | 99.01 | 99.51 | 99.74 | 99.73 | 99.72 |
| 选择性/% | 99.27 | 99.64 | 99.64 | 99.69 | 99.65 |

注:其他反应条件为 100℃、1.5 MPa、2 h。

由表 4 可知,当温度由 80℃升高至 90℃时,PO 的转化率明显提高,说明温度的升高可以更好地活化反应物分子,进而促进环加成反应的发生。而当温度由 100℃升高至 120℃时,PO 的转化率趋于稳定,这说明该温度下 PO 已经基本完全转化。因此,100℃为合适的反应温度。

**表 4　反应温度的影响**

| 温度/℃ | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
|---|---|---|---|---|---|
| 转化率/% | 84.12 | 99.39 | 99.74 | 99.71 | 99.73 |
| 选择性/% | 98.38 | 99.57 | 99.64 | 99.67 | 99.68 |

注:其他反应条件为 1.5 MPa、2 h、1.5%的催化剂量。

由表 5 可知,当压力低于 1.5 MPa 时,PO 的转化率相对较低,这是因为当压力较低时,$CO_2$ 在反应体系的溶解度偏低,从而降低了 $CO_2$ 的反应浓度,限制了环加成反应的进行。PO 的转化率随着反应压力的升高而增加,而当反应压力达到 2.5 MPa 时,PO 的转化率略微下降,这可能是由于过量的 $CO_2$ 溶解在反应体系中阻碍了催化剂与 PO 的接触。在压力变化的过程中,PC 的选择性没有明显变化,这说明反应压力对 PC 的选择性影响较小。因此,适宜的反应压力为 1.5 MPa。

**表 5　反应压力的影响**

| 压力/MPa | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 转化率/% | 96.44 | 99.49 | 99.74 | 99.71 | 99.57 |
| 选择性/% | 97.50 | 99.66 | 99.64 | 99.60 | 99.62 |

注:其他反应条件为 100℃、2 h、1.5%的催化剂量。

由表 6 可知,反应时间由 1.0 h 延长至 1.5 h 时,PO 的转化率有明显的增加;由 1.5 h 延长至 2.0 h 时,PO 转化率的增速减缓,这是由于大部分的 PO 已经完成反应,反应体系中 PO 的浓度过低,反应速率减缓。继续延长反应时间,PO 的转化率并无明显变化,这表明反应基本达到平衡状态。反应时间的变化对 PC 选择性影响很小。因此,适宜的反应时间为 2.0 h。

**表 6　反应时间的影响**

| 时间/h | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 |
|---|---|---|---|---|---|
| 转化率/% | 98.02 | 99.46 | 99.74 | 99.73 | 99.75 |
| 选择性/% | 99.36 | 99.55 | 99.64 | 99.65 | 99.62 |

注:其他反应条件为 100℃、1.5 MPa、1.5%的催化剂量。

综上所述,最优的反应条件为:催化剂用量 1.5%、温度 100℃、压力 1.5 MPa、时间 2 h。相较于传统咪唑类离子液体[18]的催化条件(140℃、4.0 MPa),反应条件更加温和,与单核季铵盐相比[15],在更低温度和压力条件下,PO 转化率更高。

## 3　反应动力学模型

### 3.1　机理假设

由以上研究结果,提出 $C_2(N_{222})_2Br_2/ZnBr_2$ 复合离子液体催化 $CO_2$ 与环氧丙烷反应生成碳酸丙烯酯可能的反应机理,如图 1 所示。

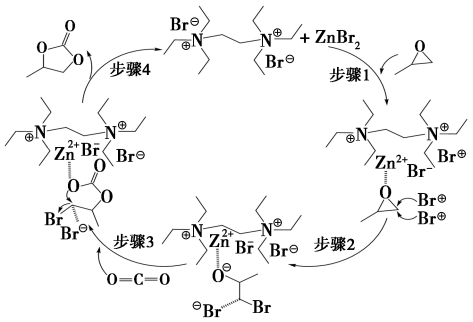



图 1　$C_2(N_{222})_2Br_2/ZnBr_2$ 催化 $CO_2$ 与 PO 合成 PC 反应机理

首先,$Zn^{2+}$ 与环氧丙烷的氧原子配位,导致 C—O 键极化,同时卤素阴离子作为亲核试剂对环氧丙烷中空间位阻较小的 $\beta$-碳原子进行亲核攻击(步骤 1),导致环氧化物的环被打开,生成氧阴离子中间体(步骤 2)。随后,氧阴离子中间体对被活化的 $CO_2$ 进行亲核攻击,生成新的中间体(步骤 3)。最后,通过中间体的分子内环闭合,形成碳酸丙烯酯,再生出催化剂 $C_2(N_{222})_2Br_2/ZnBr_2$(步骤 4),如此循环往复。

### 3.2　动力学方程推导

根据亲核加成反应机理,本反应主要分为 3 个步骤,如式(1)~(3)所示。

$$PO + IL \underset{k_{-1}}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} M_1 \tag{1}$$

$$M_1 + CO_2 \underset{k_{-2}}{\overset{k_2}{\rightleftharpoons}} M_2 \tag{2}$$

$$M_2 \underset{k_{-3}}{\overset{k_3}{\rightleftharpoons}} PC + IL \tag{3}$$

式(1)表示在催化剂 IL 的作用下,PO 开环生成氧

负离子中间体 $M_1$，式(2)表示中间体 $M_1$ 与被活化的 $CO_2$ 结合生成中间体 $M_2$，式(3)表示中间体 $M_2$ 闭环生成 PC 以及催化剂 IL 再生，其中 IL、$M_1$ 和 $M_2$ 分别表示催化剂、氧负离子中间体与 $CO_2$ 插入中间体，$k_1$、$k_{-1}$、$k_2$、$k_{-2}$、$k_3$、$k_{-3}$分别为第 1 步、第 2 步和第 3 步的正、逆反应速率常数。

则 PO 与 $CO_2$ 反应生成 PC 的速率方程如式(4)所示。

$$r = dC_{PC}/dt = k_3C_{M_2} - k_{-3}C_{PC}C_{IL} \quad (4)$$

对中间体 $M_1$ 和 $M_2$ 应用稳态近似[式(5)、(6)]。

$$dC_{M_1}/dt = k_1C_{PO}C_{IL} + k_{-2}C_{M_2} - k_{-1}C_{M_1} - k_2C_{M_1}C_{CO_2} = 0 \quad (5)$$

$$dC_{M_2}/dt = k_2C_{M_1}C_{CO_2} + k_{-3}C_{PC}C_{IL} - k_{-2}C_{M_2} - k_3C_{M_2} = 0 \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(4)得：

$$dC_{PC}/dt = (k_1k_2k_3C_{PO}C_{CO_2}C_{IL} - k_{-1}k_{-2}k_{-3}C_{PC}C_{IL})/(k_{-1}k_{-2} + k_{-1}k_3 + k_2k_3C_{CO_2}) \quad (7)$$

由于 PO 与 $CO_2$ 合成 PC 是可逆反应，且正反应是放热反应，提高反应温度时，反应向逆方向进行，但同时反应速率也会增大。当控制反应温度为 120℃、压力为 1.5 MPa、催化剂用量为 1.5%、时间为 2 h 时，PO 的转化率大于 99%。因此当温度低于 120℃时，正反应速率远大于逆反应速率，逆反应的影响可以忽略，则式(7)可被简化为：

$$dC_{PC}/dt = k_1k_2k_3C_{PO}C_{CO_2}C_{IL}/(k_{-1}k_{-2} + k_{-1}k_3 + k_2k_3C_{CO_2}) \quad (8)$$

催化剂以游离态和结合态的形式存在，由于 2 种中间体的浓度极低，因此可以忽略处于游离态催化剂的影响，且在恒温恒压下，整个反应过程中液相体积变化不大，可视为等容过程，因此当固定催化剂用量时，催化剂浓度可认为稳定不变。此外，PO 和 $CO_2$ 的反应在液相中进行，在一定温度和压力下，$CO_2$ 在 PO 和 PC 中的溶解度非常大，在 $CO_2$ 过量的情况下，可认为溶解在液相中的 $CO_2$ 稳定不变。因此可将体系中的催化剂浓度与 $CO_2$ 浓度视为常数，式(8)可简化为：

$$dC_{PC}/dt = -dC_{PO}/dt = kC_{PO} \quad (9)$$

其中，$k$ 为伪一级反应速率常数，$min^{-1}$。

对式(9)积分可得：

$$\ln C_{PO_0}/C_{PO} = kt \quad (10)$$

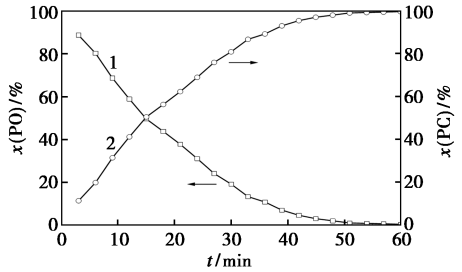
由于 $C_{PO} = C_{PO_0}(1-x)$，式(10)可转化为：

$$\ln 1/(1-x) = kt \quad (11)$$

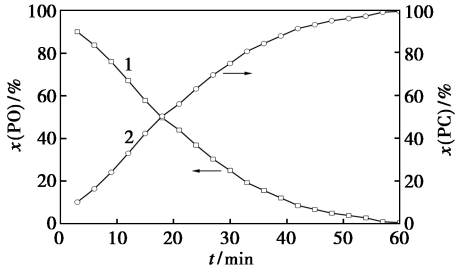
其中，$x$ 为 PO 的转化率，%。

### 3.3 动力学方程拟合

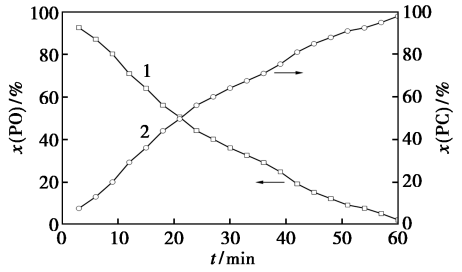
在催化剂用量为 1.5%、压力为 1.5 MPa、转速为 700 r/min 条件下，分别考察反应温度为 110、105、100、90℃时 PO 和 PC 摩尔分数随时间的变化，每 3 min 取样一次，如图 2 所示，可以看出，PO 转化速率与 PC 生成速率变化规律一致，均随着反应温度的升高而增大，PC 的选择性可达 98%以上。



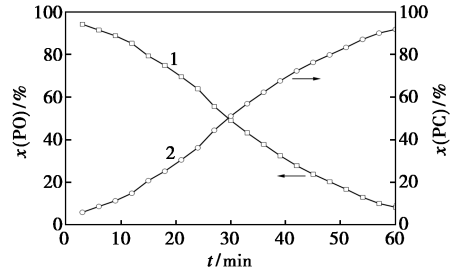

(a) 110℃




(b) 105℃




(c) 100℃



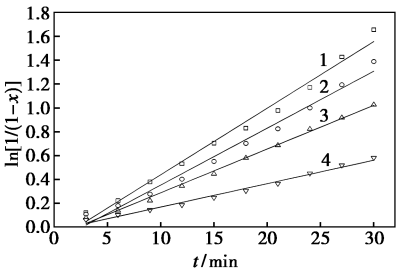

(d) 90℃

1—PO 摩尔分数；2—PC 摩尔分数

图 2 不同温度下 PO 和 PC 摩尔分数随时间的变化

根据反应过程中 PO 与 PC 浓度随时间的变化计算得到不同反应温度下 PO 转化率与反应时间的关系。同时，对 PO 转化率的 $\ln[1/(1-x)]-t$ 曲线

进行拟合,结果见图 3,各反应温度下的动力学方程与反应速率常数如表 7 所示。




1—110℃;2—105℃;3—100℃;4—90℃

图 3　不同温度下 ln[1/(1−x)]随时间的变化

**表 7　不同温度下动力学方程及反应速率常数**

| 温度/℃ | $T^{-1}$/K$^{-1}$ | 动力学方程 | $R^2$ | $k$/min$^{-1}$ | ln$k$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 110 | 0.002610 | $y=0.0558x-0.1210$ | 0.9878 | 0.0558 | −2.88598 |
| 105 | 0.002644 | $y=0.0477x-0.1260$ | 0.9856 | 0.0477 | −3.04282 |
| 100 | 0.002680 | $y=0.0366x-0.0795$ | 0.9956 | 0.0366 | −3.30771 |
| 90 | 0.002754 | $y=0.0196x-0.0289$ | 0.9877 | 0.0196 | −3.93223 |

### 3.4　阿伦尼乌斯方程参数求解

对阿伦尼乌斯方程等式两边同时取对数得到 $\ln k=\ln A-E_a/RT$,根据表中数据得到 ln$k$ 与 1/$T$ 的关系曲线如图 4 所示。

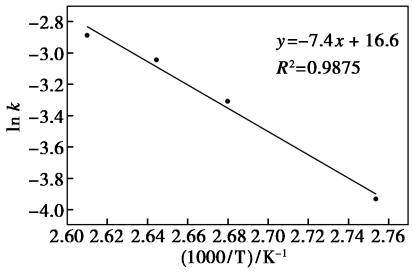



图 4　阿伦尼乌斯方程线性拟合

由图 4 可知,拟合曲线的相关系数 $R^2=0.9875$,ln$k$ 与 1/$T$ 基本呈线性关系,与阿伦尼乌斯方程基本符合。因此,双核季铵盐锌复合离子液体催化 $CO_2$ 与 PO 合成 PC 的反应活化能 $E_a$ 为 61.52 kJ/mol,指前因子为 $1.62\times10^7$ min$^{-1}$,反应动力学方程如式(12)所示。

$$r=-\mathrm{d}C_{PO}/\mathrm{d}t=1.62\times10^7e^{-61\,520/RT}C_{PO} \quad (12)$$

## 4　结论

采用自制的双核季铵盐锌复合型离子液体催化剂催化 $CO_2$ 与 PO 合成 PC,其最佳工艺条件为:催化剂用量 1.5%、温度 100℃、压力 1.5 MPa、反应时间 2.0 h。在此条件下,PO 转化率可达 99.74%,PC 选择性可达 99.64%。与单核季铵盐相比,可以在更低温度和压力条件下,取得更高的 PO 转化率。探究了该催化剂的反应机理,通过对实验结果进行线性回归,确定了其动力学方程。在一定温度和压力条件下,PC 的生成速率与 PO 浓度呈线性关系。该研究可为工业化反应器设计、工艺优化及反应过程强化提供依据。

## 参考文献

[1] Self J, Fong K D, Persson K A. Transport in superconcentrated $LiPF_6$ and $LiBF_4$/propylene carbonate electrolytes[J]. ACS Energy Letters, 2019, 4(12): 2843-2849.

[2] Czompa A, Pásztor B L, Sahar J A, *et al*. Scope and limitation of propylene carbonate as a sustainable solvent in the Suzuki-Miyaura reaction[J]. RSC Advances, 2019, 9(65): 37818-37824.

[3] Vraneš M, Zec N, Tot A, *et al*. Density, electrical conductivity, viscosity and excess properties of 1-butyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide+propylene carbonate binary mixtures [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2014, 68: 98-108.

[4] Rasool M A, Pescarmona P P, Vankelecom I F J. Applicability of organic carbonates as green solvents for membrane preparation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(16): 13774-13785.

[5] Schaffner B, Schaffner F, Verevkin S P, *et al*. Organic carbonates as solvents in synthesis and catalysis[J]. Chemical Reviews, 2010, 110(8): 4554-4581.

[6] Kotyrba Ł, Chrobok A, Siewniak A. Synthesis of propylene carbonate by urea alcoholysis—recent advances[J]. Catalysts, 2022, 12(3): 309.

[7] Zhu K J, Hendren R W, Jensen K, *et al*. Synthesis, properties, and biodegradation of poly (1, 3-trimethylene carbonate) [J]. Macromolecules, 1991, 24(8): 1736-1740.

[8] Khokarale S G, Mikkola J P. Metal free synthesis of ethylene and propylene carbonate from alkylene halohydrin and $CO_2$ at room temperature[J]. RSC Advances, 2019, 9(58): 34023-34031.

[9] Yoshida M, Ihara M. Novel methodologies for the synthesis of cyclic carbonates[J]. Chemistry-A European Journal, 2004, 10(12): 2886-2893.

[10] Comerford J W, Ingram I D V, North M, *et al*. Sustainable metal-based catalysts for the synthesis of cyclic carbonates containing five-membered rings[J]. Green Chemistry, 2015, 17(4): 1966-1987.

[11] North M, Pasquale R, Young C. Synthesis of cyclic carbonates from epoxides and $CO_2$[J]. Green Chemistry, 2010, 12(9): 1514-1539.

[12] Xu B H, Wang J Q, Sun J, *et al*. Fixation of $CO_2$ into cyclic carbonates catalyzed by ionic liquids: A multi-scale approach[J]. Green Chemistry, 2015, 17(1): 108-122.

[13] Sun J, Fujita S, Arai M. Development in the green synthesis of cyclic carbonate from carbon dioxide using ionic liquids[J]. Journal of Organometallic Chemistry, 2005, 690(15): 3490-3497.

[14] 张广宇,付然飞,孙冰,等.$CO_2$-环氧丙烷合成碳酸丙烯酯:氢键供体效应研究[J].化工学报,2024,75(6):2243-2251.

[15] Elman A R, Zharkov S A, Ovsyannikova L V. Unusual regularities of propylene carbonate obtained by propylene oxide carboxylation in the presence of $ZnBr_2/Et_4N^+Br^-$ system[J]. Chem Engineering, 2019, 3(2): 46.

[16] 郭乃妮,王小荣,古元梓,等.季铵盐型两性双子表面活性剂的合成及应用研究进展[J].石油化工,2021,50(6):608-615.

[17] 马其意.气液反应本征动力学研究策略及其在氧化反应中的应用[D].杭州:浙江大学,2017.

[18] 吴嘉伟,沈卫华,方云进.离子液体催化 $CO_2$ 与环氧丙烷合成碳酸丙烯酯反应动力学研究[J].石油化工,2024,53(3):323-329.■