

双环脒锌复合离子液体催化二氧化碳合成环状碳酸酯的研究

陈鹏飞^{1,2},董佳奇¹,胡磊¹,刘定华^{1*},刘晓勤^{1,2}

(1.南京工业大学化工学院,江苏南京211800;2.南京华华化工有限公司,江苏南京210009)

摘要:以双环脒、溴化铵和溴化锌为原料,采用两步法成功合成了一种新型的双环脒锌复合离子液体催化剂 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 。通过红外光谱仪、X射线衍射仪、电感耦合等离子体发射光谱仪和热重分析仪对 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 进行表征与测试,并研究了复合离子液体 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 的催化性能。结果表明,当反应温度为100℃、反应压力为2.5 MPa、反应时间为1 h、催化剂质量分数为1%时,环氧丙烷的转化率可达99.8%,碳酸丙烯酯的选择性可达99.7%。同时,该催化剂适用于生产各种相应的环状碳酸酯,均能获得较高的收率和选择性,极具工业应用前景。

关键词:双环脒;离子液体;二氧化碳;催化;碳酸丙烯酯

中图分类号:TQ23

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)06-0207-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.06.035

Synthesis of cyclic carbonates from carbon dioxide catalyzed by bicyclic amidine zinc composite ionic liquid

CHEN Peng-fei^{1,2}, DONG Jia-qi¹, HU Lei¹, LIU Ding-hua^{1*}, LIU Xiao-qin^{1,2}

(1.College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;

2.Nanjing Huahua Chemical Technology Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract:A novel bicyclic amidine zinc composite ionic liquid catalyst, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$, is successfully synthesized via a two-step method by using bicyclic amidine, ammonium bromide, and zinc bromide as raw materials. Characterization tests are conducted on $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ by means of infrared spectroscopy, X-ray diffraction, inductively coupled plasma emission spectroscopy, and thermogravimetric analysis, and the catalytic performance of $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ is also studied. Results show that the conversion rate of propylene oxide reaches 99.8% and the selectivity of propylene carbonate reaches 99.7% when the reaction temperature is 100℃, the reaction pressure is 2.5 MPa, the reaction time is 1 h, and the dosage of $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ is 1 wt%. Meanwhile, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ catalyst is suitable for catalyzing to produce various corresponding cyclic carbonates with high yield and selectivity, showing great industrial application prospects.

Key words:bicyclic amidine; ionic liquid; carbon dioxide; catalysis; propylene carbonate

CO₂的过量排放导致温室效应不断增强,对全球气候产生不良影响,减少CO₂排放量被视为解决气候问题最主要的途径^[1-3]。CO₂既是主要的温室气体,又是储量丰富、廉价、无毒的C1资源,在“原子经济”、“可持续发展”和“双碳”等政策的大背景下,如何在相对温和的条件下实现CO₂的化学固定成为国际上竞相研究的热点课题之一^[4-6]。

以CO₂与环氧化物为原料合成环状碳酸酯是少数以CO₂为原料而得以实现工业化的路线之一,如图1所示。环状碳酸酯是性能优良的有机溶剂和有机合成中间体,具有高沸点、高极性、低毒性和低腐蚀性等优点^[7],广泛应用于有机合成^[8]、气

体分离^[9]、塑料^[10]、电池电介质^[11-12]以及纺织印染^[13]等领域。其中,碳酸丙烯酯更是一种性能优异的有机合成中间体,是化学法固定CO₂的主要溶剂^[14]。利用CO₂和环氧丙烷环加成制备碳酸丙烯酯,不仅解决了早期生产过程中环境污染和设备腐蚀的问题,还实现了CO₂的化学固定,是一条原子利用率达到100%的反应路径,符合当代工业绿色

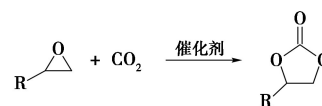


图1 环氧化物与CO₂的环加成反应

收稿日期:2024-08-29;修回日期:2025-04-07

基金项目:中国石化股份有限公司资助项目223009(36850000-23-ZC0607-0020);山东德普新材料科技有限公司资助项目(2023年泰安市科技创新“双十工程”项目,23JSGG06)

作者简介:陈鹏飞(1994-),男,硕士,工程师,研究方向为催化与吸附分离,cpf-jsnt@163.com;刘定华(1965-),男,博士,研究员,研究方向为工业催化与绿色化工,通讯联系人,ncldh@njtech.edu.cn。

发展的理念,是目前工业生产碳酸丙烯酯最主要的合成工艺^[15-16]。

在过去的几十年里,许多的非均相催化剂用于该反应,如金属氧化物、沸石和氧化铝、过渡金属配合物和活性物质负载的聚合物等^[17]。但大部分非均相催化剂存在催化活性偏低、质量传质受限、反应时间偏长等问题,目前工业化应用中多数使用均相催化的方法,离子液体因其出色的性能得到了科研工作者的广泛关注^[18]。离子液体是指完全由离子组成的液体,因其出色的溶解性、优越的化学和热稳定性、低污染性、易分离性以及非易燃性等优点,广泛应用于各种化学反应中,特别是在 CO₂ 的化学固定中显得尤为突出。这些特性使得离子液体成为理想的反应介质,能够有效地吸附和固定 CO₂ 分子^[19-21]。通过功能化或特定设计的离子液体,可以同时发挥溶剂和催化剂(或助催化剂)的双重作用,这为 CO₂ 的化学固定提供了更多的可能性。然而,尽管离子液体在这一领域中表现出色,但其在低温或较为温和条件下的反应效率仍然面临一定的挑战^[22-24]。

笔者提出了在较低温度条件下利用双环脒锌复合离子液体([HDBU]₂[ZnBr₄])作为化学固定 CO₂ 生成环状碳酸盐的方法,其中催化剂既是反应介质又是催化剂,具有十分良好的工业应用前景。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

主要试剂:环氧丙烷(99.5%)、1,2-环氧丁烯(99.5%)、环氧苯乙烯(99.5%)、环氧环己烯(99.5%),上海凌峰化学试剂有限公司生产;1,8-二氮杂双环[5.4.0]十一碳-7-烯(99%)、溴化铵(99%),上海阿达玛斯试剂有限公司生产;溴化锌(99.9%),阿拉丁试剂有限公司生产;乙酸乙酯(99%)、碳酸丙烯酯(99.5%),麦克林试剂有限公司生产;二氧化碳(99.99%),南京特种气体厂有限公司生产。

主要仪器:傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet IS10),赛默飞世尔科技公司生产;X 射线衍射仪(D8 Advance),德国 BRUKER-AXS 有限公司生产;TG-DSC 同步热分析仪(STA-499 F3),德国耐驰公司生产;电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),赛默飞世尔科技公司生产;气相色谱仪(GC-1690),合肥捷岛科学仪器有限公司生产;高压反应釜(100 mL),上海岩征实验仪器有限公司生产。

1.2 双环脒锌复合离子液体的制备

按摩尔比 1:1 的比例称取双环脒(1,8-二氮杂双环[5.4.0]十一碳-7-烯)和溴化铵,将其分别溶于特定的溶液中,待完全溶解后,将双环脒溶液和溴化铵溶液在三口烧瓶内进行混合,在 40℃ 条件下回流搅拌 4~6 h。反应结束后,取下层产物进行减压蒸馏,溶剂蒸发,即得双环脒离子液体([HDBU]Br)。

按一定摩尔比的比例称取双环脒离子液体([HDBU]Br)和溴化锌(ZnBr₂),将其置于 100 mL 的三口烧瓶中,并加入一定量的乙酸乙酯,在 60℃ 条件下回流搅拌 4 h,减压蒸馏除去乙酸乙酯,洗涤除去杂质,在真空状态下干燥 12 h,即得双环脒锌复合离子液体([HDBU]₂[ZnBr₄])。

2 结果和讨论

2.1 双环脒锌复合离子液体的表征

2.1.1 红外光谱表征

利用傅里叶红外光谱仪对双环脒锌复合离子液体的结构进行分析,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,在 3 242 cm⁻¹处是双环脒上 N—H 伸缩振动峰,2 928 cm⁻¹是饱和 C—H 伸缩振动峰,1 645 cm⁻¹是 1 个 C=C 伸缩振动峰,代表双环脒基团上碳、氮分子间的双键伸缩振动。由于双环脒锌复合离子液体是 [HDBU]Br 和 ZnBr₂ 的结合, [HDBU]₂[ZnBr₄] 在 590 cm⁻¹处多了 1 个 Zn—Br 伸缩振动峰,证明双环脒锌复合离子液体的成功合成。

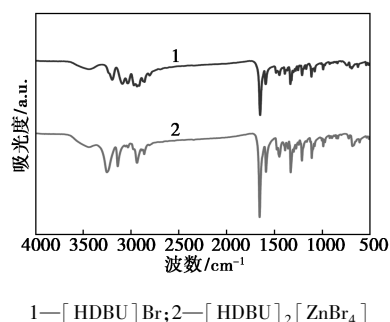
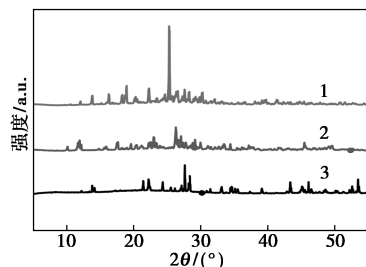


图 2 双环脒锌复合离子液体的红外图

2.1.2 XRD 表征

利用 X 射线衍射仪对双环脒锌复合离子液体的结构进行分析,结果如图 3 所示。离子液体作为室温(小于 100℃)状态下的液态熔融盐,其在某些低温条件下也可能发生结晶。从图 3 中可以看出,将双环脒锌复合离子液体的特征衍射峰与 [HDBU]Br 和 ZnBr₂ 进行对比发现,其特征衍射峰略有变化,在 11.84、17.67、45.76° 附近出现了明显的特征

衍射峰。而[HDBU]Br原本在25.37°处较强的特征峰,在复合离子液体中强度明显减弱。此外,2种原料的部分衍射峰在复合离子液体中消失了,表明所制备的离子液体是一种新的物质,有别于2种原料,从而侧面证明双环脒锌复合离子液体成功合成。

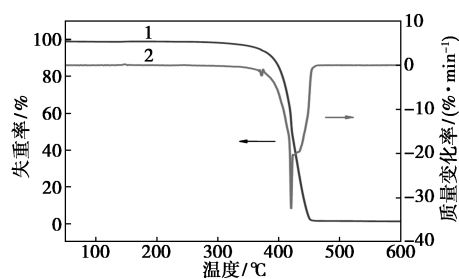


1—[HDBU]Br;2—[HDBU]₂[ZnBr₄];3—ZnBr₂

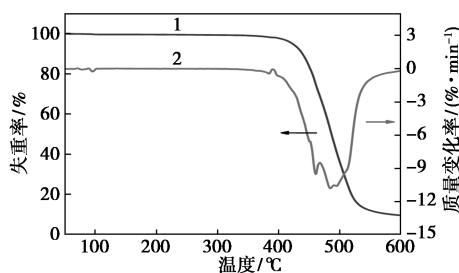
图3 双环脒锌复合离子液体的XRD图

2.1.3 热重分析表征

利用热重分析仪研究了双环脒锌复合离子液体的热稳定性,结果如图4所示。从图4中可以看出,[HDBU]Br离子液体的初始热分解温度约为374℃,热重损失最大温度约为460℃。与之相比,[HDBU]₂[ZnBr₄]复合离子液体表现出更好的热稳定性,其初始热分解温度约为398℃,热重损失最大温度约为560℃。相较于咪唑类离子液体,双环脒类离子液体不仅不易吸潮,而且其热稳定性有了显著提升,或成为工业上理想的催化剂之一。这种性质为双环脒锌复合离子液体开拓了更加广阔的应用前景。



(a) [HDBU]Br



(b) [HDBU]₂[ZnBr₄]

1—失重率;2—质量变化率

图4 [HDBU]Br、[HDBU]₂[ZnBr₄]的热重分析

2.1.4 元素分析

利用电感耦合等离子发射光谱仪对双环脒锌复合离子液体进行元素分析与测试,结果如表1所示。

表1 双环脒锌复合离子液体中各元素质量分数

样品	测试元素	理论质量分数/%	测量质量分数/%
[HDBU]Br	Br	34.27	34.93
[HDBU] ₂ [ZnBr ₄]	Zn	9.46	10.02
	Br	46.22	47.13

从表1中可以看出,所合成的复合离子液体各元素质量分数与理论质量分数基本一致,说明双环脒锌复合离子液合成成功。

2.2 双环脒锌复合离子液体的催化性能测试

2.2.1 不同种类催化剂催化效果的对比

通过实验发现,双环脒离子液体和卤代锌盐的配位能力与其催化能力之间也并非呈正比关系。双环脒阳离子上的N—H通过形成新的氢键与卤代锌盐进行结合。过量使用双环脒离子液体或配位能力过强会影响中心锌离子周围的活性配位。若稳定性过高,则不易产生活性位,不利于中间体溴烷氧基阴离子的生成,从而影响催化剂的催化活性。在反应温度为100℃、反应压力为2.5 MPa、催化剂质量分数为1%条件下反应1 h,探究不同种类催化剂对催化合成碳酸丙烯酯性能的影响,结果如表2所示。

表2 不同双环脒催化剂对合成碳酸丙烯酯的影响

序号	双环脒离子液体	卤代锌盐	催化剂摩尔比	转化率/%	选择性/%
1	DBU	—	—	0.8	>99
2	—	ZnBr ₂	—	—	—
3	[HDBU]Br	—	—	20.7	>99
4	[HDBU]Br	ZnBr ₂	1:1	85.6	>99
5	[HDBU]Br	ZnBr ₂	2:1	99.8	>99
6	[HDBU]Br	ZnBr ₂	4:1	97.8	>99

由于双环脒离子液体与卤代锌盐易发生协同作用,二者相结合所制备的双环脒锌离子液体对合成碳酸丙烯酯反应具有较强的催化活性。从表2中可以看出,仅使用双环脒或双环脒离子液体均不能促进反应高效进行,只有引入卤代锌盐才能激活环氧化物中的氧,使其发生开环。对比发现,以[HDBU]Br和ZnBr₂为原料且摩尔比为2:1时制备的[HDBU]₂[ZnBr₄]复合离子液体催化效果最佳,环

环氧丙烷转化率可达 99.8%, 相较于传统的咪唑类离子液体, 其催化效果也有了较为明显地提升。

2.2.2 不同条件对 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 复合离子液体催化效果的影响

在不同条件下评价了 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 复合离子液体催化合成碳酸丙烯酯的性能, 催化剂质量分数、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。

从表 3 中可以看出, 环氧丙烷的转化率随着催化剂质量分数的升高, 呈现先增加后趋于稳定的趋势, 当催化剂质量分数高于 1% 时, 环氧丙烷转化率接近 99.8%, 反应基本完成。当催化剂质量分数达到 2.5% 时, 碳酸丙烯酯的选择性出现了较为明显的下降, 这是因为过多的催化剂改变了体系内的反应动力学和热力学条件, 导致竞争反应的发生, 如聚碳酸酯等副产物的生成增加, 降低了主产物碳酸丙烯酯的选择性。

表 3 不同催化剂质量分数下 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化合成碳酸丙烯酯的性能

催化剂浓度/%	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
转化率/%	95.6	99.8	99.8	99.7	99.8
选择性/%	99.6	99.7	99.5	99.7	99.0

注: PO 物质的量为 10 mmol, CO_2 的压力为 2.5 MPa, 反应温度为 100℃, 反应时间为 1 h。

从表 4 中可以看出, 当温度从 80℃ 上升到 100℃ 时, 环氧丙烷的转化率迅速提高。这是由于随着温度的升高, 反应体系内热能快速增加, 活化了更多的反应物分子, 从而加速了反应的进行; 而当温度从 100℃ 上升到 160℃ 时, 环氧丙烷转化率的增速放缓, 并趋于不变。表明在此温度下环氧丙烷或已基本完成转化。当反应温度超过 140℃ 时, 选择性大幅度下降, 这是因为过高的温度加剧了副反应的产生, 从而影响了碳酸丙烯酯的选择性。

表 4 不同反应温度下 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化合成碳酸丙烯酯的性能

温度/℃	80	100	120	140	160
转化率/%	92.1	99.8	99.7	99.9	99.8
选择性/%	99.6	99.7	99.5	99.4	99.1

注: PO 物质的量为 10 mmol, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 的质量分数为 1%, CO_2 的压力为 2.5 MPa, 反应时间为 1 h。

从表 5 中可以看出, 当反应压力低于 2.5 MPa 时, 环氧丙烷的转化率相对较低, 这是因为在低压条

件下, 碳酸丙烯酯中 CO_2 的溶解量有限, 导致反应体系内反应物的浓度不足, 限制了反应的进行。随着反应压力的升高, 环氧丙烷的转化率也随之增加, 当反应压力超过 2.5 MPa 时, 环氧丙烷的转化率达到了 99.8%, 且增速逐步放缓, 表明反应已接近结束。

表 5 不同反应压力下 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化合成碳酸丙烯酯的性能

压力/MPa	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
转化率/%	65.6	93.7	99.8	99.7	99.8
选择性/%	99.5	99.7	99.7	99.6	99.7

注: PO 物质的量为 10 mmol, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 的质量分数为 1%, 反应温度为 100℃, 反应时间为 1 h。

从表 6 中可以看出, 随着时间的推移, 环氧丙烷的转化率逐渐升高, 特别是当反应时间从 0.5 h 增加到 1 h 时, 环氧丙烷的转化率急剧上升, 反应初期反应速率较快, 这是由于反应物浓度较高, 反应条件充沛, 有利于反应的进行。而当反应时间从 1 h 增加到 2.5 h 时, 环氧丙烷的转化率的增速减缓, 这是因为反应接近饱和状态, 反应物浓度过低。在使用双环脒锌复合离子液体催化剂催化合成碳酸丙烯酯的过程中, 当反应时间控制在 2.5 h 以内时, 碳酸丙烯酯的选择性并不会随着时间的变化而发生明显的改变, 可以稳定地维持在 99.7% 的水平。

表 6 不同反应时间下 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化合成碳酸丙烯酯的性能





时间/h	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
转化率/%	70.9	99.8	99.8	99.9	99.8
选择性/%	99.6	99.7	99.7	99.7	99.6

注: PO 物质的量为 10 mmol, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 的质量分数为 1%, CO_2 的压力为 2.5 MPa, 反应温度为 100℃。

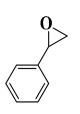
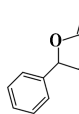
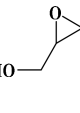
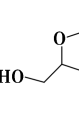
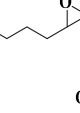
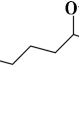
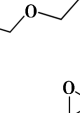
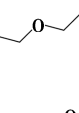
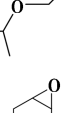
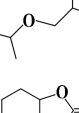
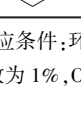
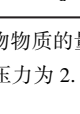
2.2.3 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 复合离子液体催化不同环氧化合物的性能

为了探究 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化剂的实用性和通用性。研究了 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化 CO_2 对各种环氧化合物的环加成反应性能, 结果如表 7 所示。

表 7 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化 CO_2 对各种环氧化合物环加成反应的性能

序号	反应物	产物	转化率/%	选择性/%
1			99.8	>99
2			99.5	>99

续表

序号	反应物	产物	转化率/%	选择性/%
3			83.7	>99
4			97.2	>99
5			91.4	>99
6			99.2	98
7			93.5	99
8			46.3	98

注:反应条件:环氧化物物质的量为 10 mmol, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 的质量分数为 1%, CO_2 的压力为 2.5 MPa, 反应温度为 100℃, 反应时间为 1 h。

通过实验发现, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化剂对大部分 CO_2 环加成反应都具有良好的催化性能, 环氧化物的转化率均能高于 90%, 相应地环状碳酸酯的选择性也在 98% 以上。但随着环氧化物侧链取代基位阻的增加, 催化活性受到阻碍, 因此需要更高的温度或更长的反应时间才能获得优异的催化效果。尤其对于环氧己烷这类两端连接在六元环上的环氧化物, 稳定的结构往往阻碍了催化剂的亲核攻击, 导致开环率的降低, 从而影响了最后的转化率和选择性。但从整体来看, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化剂对各类环氧化物都具有一定的催化效果和普遍适用性, 反映了其优异的效率 and 潜在价值。

2.3 催化机理分析

基于上述研究结果, 提出 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 在 CO_2 和环氧丙烷环加成制备碳酸丙烯酯中的反应机理, 如图 5 所示。

$[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 是 Br^- 与双环脒阳离子上的 N—H 通过形成新的氢键进行结合。首先, 将 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 和环氧丙烷进行混合, 环氧丙烷与锌的路易斯酸位点发生协同作用, 导致新的 Zn—O 键的生成, 产生了加合物。随后, Br^- 对配位环氧丙烷上受阻较小的碳原子进行亲核攻击, 然后发生

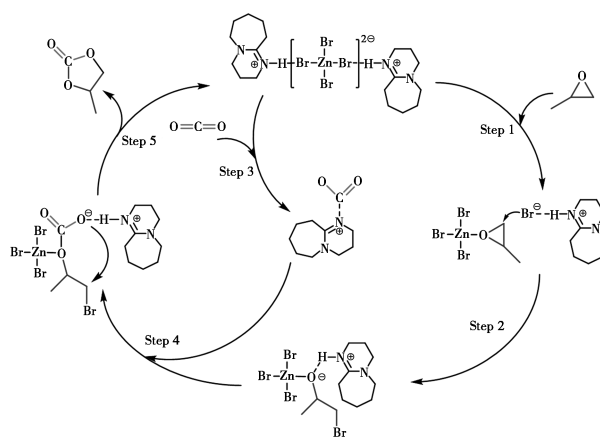


图 5 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 催化合成碳酸丙烯酯反应机理

开环反应, 形成溴烷氧基阴离子。与此同时, $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 中吸附的 CO_2 会插入溴烷氧基, 生成碳酸盐中间体。最后, 通过分子内循环产生碳酸丙烯酯, 再生了催化剂 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$, 至此循环往复。

3 结论

以双环脒 (1,8-二氮杂双环[5.4.0]十一碳-7-烯) 和溴化铵为原料, 成功合成了一种双环脒离子液体 $[\text{HDBU}]\text{Br}$ 。随后, 将双环脒离子液体和溴化锌进行结合, 制备了一种新型的双环脒锌复合离子液体催化剂 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 。通过实验得出下列结论。

(1) 双环脒离子液体与卤代锌盐易发生协同作用, 二者相结合所制备的双环脒锌离子液体对合成碳酸丙烯酯反应具有较强的催化活性。当 $[\text{HDBU}]\text{Br}$ 和 ZnBr_2 摩尔比为 2:1 时, 环氧丙烷转化率可达 99.8%, 碳酸丙烯酯选择性达 99% 以上。

(2) 通过对釜式反应器内 $[\text{HDBU}]_2[\text{ZnBr}_4]$ 离子液体催化剂催化合成碳酸丙烯酯性能的研究, 并进行了一系列单因素实验优化。当反应温度为 100℃、反应压力为 2.5 MPa、反应时间为 1 h、 $[\text{HDBU}]\text{Br}$ 和 ZnBr_2 原料摩尔比为 2:1、催化剂质量分数为 1% 时, 环氧丙烷的转化率可达 99.8%, 碳酸丙烯酯的选择性可达 99.7%。

参考文献

- [1] Asongu S A, Agboola M O, Alola A A, *et al.* The criticality of growth, urbanization, electricity and fossil fuel consumption to environment sustainability in Africa [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712:136376.

- [2] Fu L P, Ren Z K, Si W Z, *et al.* Research progress on CO₂ capture and utilization technology[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 66: 102260.
- [3] McLaughlin H, Littlefield A A, Menefee M, *et al.* Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2023, 177: 113215.
- [4] 罗荣昌, 周贤太, 杨智, 等. 均相体系中酸碱协同催化二氧化碳与环氧化物的环加成反应[J]. *化工学报*, 2016, 67(1): 258-276.
- [5] Wu Z, Huang X J, Chen R S, *et al.* The United States and China on the paths and policies to carbon neutrality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320: 115785.
- [6] Zou C N, Xiong B, Xue H Q, *et al.* The role of new energy in carbon neutral[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 480-491.
- [7] 周喜, 杨先贵, 陈彤, 等. 以二氧化碳和邻氯丙醇为原料合成碳酸丙烯酯[J]. *催化学报*, 2009, 30(1): 7-8.
- [8] 魏文胜. CO₂ 高效转化为碳酸丙烯酯研究进展[J]. *广东化工*, 2023, 50(1): 92-93.
- [9] Nie H, Jiang H, Chong D W, *et al.* Comparison of water scrubbing and propylene carbonate absorption for biogas upgrading process[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(6): 3239-3245.
- [10] Sirviö J A, Visanko M, Ukkola J, *et al.* Effect of plasticizers on the mechanical and thermomechanical properties of cellulose-based biocomposite films[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 122: 513-521.
- [11] 柏冬, 张学兰, 吴井, 等. 锌盐催化尿素和 1,2-丙二醇合成碳酸丙烯酯[J]. *化学工程*, 2015, 43(2): 63-67.
- [12] Qin M S, Zeng Z Q, Liu X W, *et al.* Revealing surfactant effect of trifluoromethylbenzene in medium-concentrated pc electrolyte for advanced lithium-ion batteries[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(12): 2206648.
- [13] Tyunina E Y, Chekunova M D. LiAsF₆ solutions in the propylene carbonate-dimethylsulfoxide mixed solvent: The conductivity and electrochemical stability[J]. *Russian Journal of Electrochemistry (Translation of Elektrokimiya)*, 2023, 59(12): 1107-1117.
- [14] 顾传海, 董超凡, 林强, 等. 离子液体辅助催化 CO₂ 与环氧丙烷合成环碳酸酯[J]. *应用化工*, 2019, 48(7): 1635-1638.
- [15] Liu X, Cao C S, Li Y F, *et al.* Cycloaddition of CO₂ to epoxides catalyzed by n-heterocyclic carbene (NHC)-ZnBr₂ system under mild conditions[J]. *Synlett*, 2012, (9): 1343-1348.
- [16] Shaikh R R, Pompraprom S, D'Elia V. Catalytic strategies for the cycloaddition of pure, diluted, and waste CO₂ to epoxides under ambient conditions[J]. *ACS Catalysis*, 2018, 8(1): 419-450.
- [17] 吴嘉伟, 沈卫华, 方云进. 离子液体催化 CO₂ 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.
- [18] Nasirpour N, Mohammadpourfard M, Heris S Z. Ionic liquids: Promising compounds for sustainable chemical processes and applications[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, 160: 264-300.
- [19] 陈欣, 曾海浪, 胡强, 等. 离子液体接枝的有机介孔催化剂的制备及催化碳酸丙烯酯水解反应[J]. *应用化学*, 2014, 31(9): 1069-1075.
- [20] Shukla M K, Tiwari H, Verma R, *et al.* Role and recent advancements of ionic liquids in drug delivery systems[J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(2): 702-719.
- [21] Tang X, Lv S Y, Jiang K, *et al.* Recent development of ionic liquid-based electrolytes in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 542: 231792-231809.
- [22] Meng X L, Ju Z Y, Zhang S J, *et al.* Efficient transformation of CO₂ to cyclic carbonates using bifunctional protic ionic liquids under mild conditions[J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(12): 3456-3463.
- [23] Kansy D, Czaja K, Bosowska K, *et al.* Ionic liquids as homogeneous catalysts for glycerol oligomerization[J]. *Polymers*, 2022, 14(6): 1200-1213.
- [24] Li W, Cheng W G, Yang X, *et al.* Synthesis of cyclic carbonate catalyzed by dbu derived basic ionic liquids[J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2018, 36(4): 293-298. ■
- (上接第 206 页)
- [13] Muiambo H F, Focke W W, Atanasova M, *et al.* Thermal properties of sodium-exchanged palabora vermiculite[J]. *Appl Clay Sci*, 2010, 50(1): 51-57.
- [14] Teixeira A P C, Purceno A D, Barros A S, *et al.* Amphiphilic magnetic composites based on layered vermiculite and fibrous chrysotile with carbon nanostructures: Application in catalysis[J]. *Catal Today*, 2012, 190(1): 133-143.
- [15] Fang X L, Song J, Zheng Y B, *et al.* Preparation and performance of expanded vermiculite/phenolic flame retardant and insulation composites[J]. *Aeta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(11): 2426-2435.
- [16] Bergaya F, Jaber M, Lambert J F. *Clays and clay minerals*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] Marcos C, Rodriguez I. Exfoliation of vermiculites with chemical treatment using hydrogen peroxide and thermal treatment using microwaves[J]. *Appl Clay Sci*, 2014, 87: 219-227.
- [18] Hillier S, Marwa E M M, Rice C M. On the mechanism of exfoliation of 'Vermiculite'[J]. *Clay Minerals*, 2013, 48(4): 563-582.
- [19] Ye G, Gu Y, Zhou W, *et al.* Synthesis of defect-rich titanium terephthalate with the assistance of acetic acid for room-temperature oxidative desulfurization of fuel oil[J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10(3): 2384-2394.
- [20] 尤厚美, 蛭石超分子组装荧光薄膜制备和性能的研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [21] 田维亮, 葛振红, 穆金城, 等. 天然蛭石 PVC 热稳定剂的制备和性能研究[J]. *现代化工*, 2018, 38(9): 72-76.
- [22] KiStková M, Weiss Z, Filip P. Hydration properties of vermiculite in phenolic resin friction composites[J]. *Nat Chem*, 2014, 7(2): 166-170.
- [23] Liu Y, Eubank J F, Caims A J, *et al.* Assembly of metal-organic frameworks (MOFs) based on indium-trimer building blocks: A porous MOF with soc topology and high hydrogen storage[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007, 46(18): 3278-3283. ■