

基于二氧化碳吸收的离子液体的研究进展

李佳文, 沈 伟, 李兴明, 林乐娴, 杨 奕, 陈平萱, 金顶峰*, 郭晓琳

中国计量大学材料与化学学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年5月14日; 录用日期: 2025年6月26日; 发布日期: 2025年7月7日

摘 要

二氧化碳过量排放导致的全球气候变暖问题日益严峻, 碳捕集与封存(CCS)技术作为关键减排手段面临效率、成本及环境友好性等多重挑战。本文系统介绍了CCS技术的主要方法, 并聚焦离子液体作为新型CO₂吸收剂的创新应用。离子液体凭借其低挥发性、高稳定性及可设计性等优势展现出显著潜力。本文通过对比分析, 重点探讨了咪唑类、醇胺类及氨基酸离子液体的性能优势, 旨在为开发高效、低成本的碳捕集材料与技术提供理论参考, 助力碳中和目标的实现。

关键词

碳捕集, 离子液体, 吸收剂

Research Progress in Ionic Liquids Based Carbon Dioxide Capture

Jiawen Li, Wei Shen, Xingming Li, Lexian Lin, Yi Yang, Pingxuan Chen, Dingfeng Jin*, Xiaolin Guo

College of Materials and Chemistry, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang

Received: May 14th, 2025; accepted: Jun. 26th, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

The global warming problem caused by excessive CO₂ emissions is becoming increasingly serious. As a key emission reduction approach, CCS technology is facing multiple challenges such as efficiency, cost and environmental friendliness. This review systematically introduces the main methods of CCS technology and focuses on the innovative application of ionic liquids as novel CO₂ absorbents. Ionic liquids show remarkable potential due to their low volatility, high stability, and designability. Through comparative analysis, the performance advantages of imidazole, alkanolamine, and amino

*通讯作者。

文章引用: 李佳文, 沈伟, 李兴明, 林乐娴, 杨奕, 陈平萱, 金顶峰, 郭晓琳. 基于二氧化碳吸收的离子液体的研究进展[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(4): 197-204. DOI: 10.12677/hjct.2025.154018

acid ionic liquids are discussed in this review, aiming to provide theoretical references for the development of highly efficient and low-cost carbon capture materials and technologies, and to help achieve the carbon neutrality goal.

Keywords

CO₂ Capture, Ionic Liquids, Absorbent

Copyright © 2025 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/>



1. 引言

二氧化碳(CO₂)作为主要的温室气体,主要来源于能源消耗、工业生产、交通运输、动植物呼吸或腐烂和火山地震等地球活动等[1]。全球变暖导致极端气候事件,包括热浪、干旱、洪水和风暴的发生频率及强度均有所增加。这些变化不仅破坏自然生态平衡,还可能对人类健康、社会的繁荣与发展构成严重威胁[2] [3]。海平面上升、冰川融化和生物多样性下降与 CO₂ 排放增加直接相关[4]。2020 年 9 月 22 日,我国总书记宣布“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”,使得我国 CO₂ 减排任务尤为紧迫。

目前,控制减缓 CO₂ 排放、捕捉及资源化利用的途径主要包括:碳捕集与封存(CCS)和碳捕集与利用(CCU) [5] [6]。CCS 技术[7]是应对气候变化的关键技术之一,它通过捕集工业和能源产业中的 CO₂ 排放,通过将其运输和储存,可以有效减少大气中的温室气体含量。IPCC 报告[8]指出,若不采用 CCS 技术,全球升温控制在 1.5℃内的成本将显著增加,但 CCS 的开发和实施仍需克服技术复杂性和经济可行性的问题[9]。本篇文章主要介绍几种常用的二氧化碳的捕集方法,并对几种主要的基于二氧化碳吸收的离子液体(ILs)进行讨论。

2. CCS 技术

CCS 技术的主要过程是将二氧化碳从工业生产、能源利用或大气中有效分离出来,并通过安全的储存方式将其长期封存[10]。CO₂ 捕集是 CCS 技术中的首要环节,按照工艺的性质,碳捕集技术可分为膜分离、吸收、吸附以及低温捕集等多种方式[11],如表 1 所示。

Table 1. Principles, advantages and disadvantages of CCS technologies
表 1. 常见的 CCS 技术的原理与优劣势

名称	原理	优势	劣势
吸收法	气液传质过程中化学键的形成和断裂	分离效率高、技术成熟、适用范围广、自动化程度高	能耗高、腐蚀性强、溶剂易挥发和退化、易造成二次污染
吸附法	通过吸附剂活性位点与 CO ₂ 间作用力实现选择性分离	设备腐蚀性小、可修饰性和选择性高、吸附剂可再生	自动化程度低、吸附剂价格昂贵、吸附容量限制
膜分离法	CO ₂ 与其他气体在膜中的渗透率差异	选择性高、可修饰性强、能耗低、设备简单	分离效率低、工艺复杂、膜材料成本较高、耐受能力低
低温分离法	基于温度控制的物理过程	高纯度、技术相对简单、适用于低浓度	能耗高、设备成本高、运行复杂性

2.1. 吸收法

吸收法作为碳捕集技术的主流技术路径,根据作用机制可分为物理吸收与化学吸收两大体系。

物理吸收法主要依赖分子间范德华力及静电相互作用实现 CO_2 的液相溶解,其溶解度与系统温度、压力及吸收剂的物理特性相关[12]。工业上,主要应用于天然气净化工艺中的酸性气体脱除。其技术优势体现在较低的再生能耗,但分离效率较低,不能完全将 CO_2 分离[13]。

化学吸收法则通过碱性吸收介质(如热碱溶液、氨水及醇胺类化合物)与 CO_2 发生可逆化学反应,捕集 CO_2 。相较于物理吸收,该技术工艺简单、反应速率快、选择性高,但吸收剂再生环节的能耗过高,仍需探索解决[14]。

2.2. 吸附法

吸附法通过固体吸附剂表面活性位点与 CO_2 分子间的范德华力或化学键合作用实现选择性吸附,其后采用压力或温度场调控实现 CO_2 脱附再生,主要技术路径包括变压吸附(PSA)与变温吸附(TSA)两类典型工艺[15]。

PSA 一般在常温下进行,通过改变系统压力,利用吸附剂对不同气体分子的吸附能力变化,实现气体的分离。TSA 则是通过低温吸附、高温解吸达到分离 CO_2 的目的[12]。吸附法具有腐蚀性低、二次污染可控、能耗低和自动化程度高等优点,但也存在吸附容量限制、吸附剂成本高等不足之处[16]。

2.3. 膜分离法

膜分离法基于气体分子在膜材料中的溶解与扩散系数的差异性,将膜两侧的压力差作为分离动力实现组分选择性渗透。其分离机理表现为:高渗透性气体组分优先穿过膜层,低渗透性组分则被截留在原料侧,从而实现气态混合物的高效分离[17]。膜材料作为该技术的核心要素,主要涵盖聚合物膜、无机膜及混合基质膜三大类[18]。尽管膜分离技术具有能耗低、环境友好性强、工艺操作简便等技术优势,但分离效率不足仍是限制其规模化应用的技术瓶颈。

2.4. 低温分离法

低温分离法是一种通过物理手段,在低温条件下将 CO_2 从烟气或其他混合气体中有效分离的技术,该方法主要应用于天然气净化等领域。其优势在于分离过程无需依赖化学试剂,避免了设备腐蚀的风险,并且能够将 CO_2 以液体形式回收,为后续的运输工作提供了便利[19]。相较于其他气体分离技术,低温分离法能够获得更高纯度的 CO_2 。然而,该技术也存在一些局限性,如较高的能耗、较大的设备投资成本以及复杂的操作流程等。

3. 离子液体

离子液体又称室温熔融盐,是一种由有机阳离子与无机/有机阴离子组成的液态盐,室温下呈液态(熔点 $\leq 100^\circ\text{C}$)。由于其独特的特性,包括极低挥发性、高热稳定性、宽液态范围以及可设计性成为新型的绿色环保吸收剂。

离子液体在 CO_2 捕集方面展现显著优势:

- (1) 离子液体蒸气压极低,可避免传统胺类吸收剂的溶剂挥发损失,减少环境污染和操作风险。
- (2) 高热稳定性和化学稳定性使其在高温条件下不分解,对 CO_2 吸收-解吸循环中的化学降解具有较强抵抗力,延长使用寿命。
- (3) 可设计性强,结构调控灵活,可以通过调节阴阳离子结构(如引入氨基、羟基等官能团),大幅提

升 CO₂ 吸收容量和选择性。

- (4) 高选择性地优先吸附 CO₂，特别适用于低浓度 CO₂ 捕集。
- (5) 部分离子液体可通过调节温度或压力实现 CO₂ 快速释放，实现循环使用。
- (6) 减少设备损耗，多数离子液体对金属腐蚀性较低，降低维护成本。

3.1. 咪唑类离子液体

咪唑类离子液体以咪唑环为阳离子，具有良好的溶解能力和选择性，种类丰富，是目前应用广泛的离子液体。1999 年，Blanchard 团队[20]合成了高压下对二氧化碳有很高的溶解度的[BMIM][PF₆]，该溶液较先前的离子液体，在水或氧气存在的环境下仍然能够保持稳定。为了优化咪唑类离子液体在不同应用场景下的碳捕集性能，研究人员对其进行了系统性的研究与性能调控。

研究发现，阴离子对离子液体中 CO₂ 溶解度的影响很大。Kodirov 等[21]研究了 CO₂ 在[EMIM][SCN]和[EMIM][DCA]中的吸收机制，并且通过密度分布分析，[EMIM][DCA]中的 CO₂ 密度更高。Chauhan 等[22]运用高通量电化学测量方法测量了 15 种咪唑类离子液体中 CO₂ 的溶解度，指出了离子液体中阴离子和空隙率对 CO₂ 溶解度的主导作用，其中，含氟阴离子的作用最为显著。

El-Nagar 等[23]基于咪唑类离子液体，制备了三种氨基功能化离子液体(IL-Br、IL-BF₄和 IL-PF₆)。结果表明，每克 IL-PF₆、IL-BF₄和 IL-Br 分别可以吸收 2.02、1.23 和 1.18 mmol 的 CO₂，且材料在循环使用三次后无明显性能下降，有望降低天然气净化能耗和成本。Yang 等[24]将金属盐(MX)与功能化咪唑类离子液体([Apmim][BF₄])结合，金属阳离子与离子液体阴离子形成较强的配位，从而降低了离子液体分子内阴离子与阳离子的相互作用，促进了离子液体阳离子对 CO₂ 的吸收。

另外，将咪唑类离子溶液与共价有机骨架(COFs)、活性炭等多孔材料结合，可以在一定程度上增强材料的选择性、稳定性和吸附能力。Chaouiki 等[25]通过密度泛函理论计算，研究了三种咪唑类离子液体与 ZIF-8 框架的相互作用及其对 CO₂ 吸附性能的影响，结果显示离子液体的掺入显著增强了 ZIF-8 的 CO₂ 吸附能力。

Yin 等[26]研究了一种基于羟基和氨基共修饰的咪唑基离子液体功能化的 TS-1 分子筛([AHOPMIm]Cl/TS-1)。其中，氨基(-NH₂)与 CO₂ 形成可逆化学键，羟基(-OH)则通过氢键固定 CO₂，两种官能团协同提升了材料的吸附容量和选择性；TS-1 载体的高比表面积和微孔结构提供均匀分散位点，增强了离子液体稳定性。在 80℃时，[AHOPMIm]Cl/TS-1 吸附量达最优，相较纯 TS-1 提高了 73%。

咪唑类离子液体性能优良，具有高 CO₂ 捕获能力、低挥发性和高热稳定性，结构设计灵活，但合成较为复杂，成本较高，吸收过程易受影响，部分咪唑类离子液体解吸困难，限制了其在大规模工业应用中的可行性。

3.2. 醇胺类离子液体

目前，基于醇胺溶剂的 CO₂ 捕集技术虽已广泛应用于燃煤电厂等大规模碳捕集场景[18]，但其弊端在于胺与 CO₂ 的强放热反应特性直接提高了整体成本。研究者[27]已探索了伯胺、仲胺、叔胺以及空间位阻胺等传统醇胺溶剂，但其存在 CO₂ 负载量有限、设备易腐蚀、氧化、热降解及溶剂挥发损失等固有缺陷[28]。

由于胺法的许多缺点，以醇胺为功能基团的离子液体，作为一类结合醇胺化学吸收与离子液体物化特性的新型 CO₂ 捕集材料开始被探索。相较于常规醇胺溶剂，这类材料能显著降低再生能耗，同时规避溶剂挥发损失和氧化降解问题。

Xiao [29]等人采用重量法，分析了 MEA (单乙醇胺)和 MDEA (N-甲基二乙醇胺)分别与[Bmim][BF₄]、

[Beim][BF₄]、[Bpim][BF₄]和[Bbim][BF₄]四种离子液体混合在非水溶剂中的 CO₂ 吸收性能。研究发现, 胺的加入显著增强了离子液体对 CO₂ 的捕集能力。

Ebrahiminejad 等[30]研究了 CO₂ 在 MEA 与 H₂O、NMP 及离子液体混合溶剂中的溶解度(温度范围为 298.15~313.15 K, 压力范围为 0.093~2.322 MPa)。报告指出, NMP 替代水作为溶剂在高压下提高了 CO₂ 溶解度, 离子液体的加入在低压下有利于溶剂再生, 减少了溶剂的挥发性和 MEA 的损失, 提高了溶剂的稳定性。但离子液体的加入增加了溶液粘度, 易对工业操作产生负面影响。

Alcantara 等[31]将七种基于乙醇胺的离子溶液与聚乙烯醇(PVA)复合, 制备了新型分离膜。离子溶液的引入使复合膜的 CO₂ 渗透性能得到显著提升, 最高可达 209 bar, 同时 CO₂/CH₄ 选择性最高达到 241。与传统的聚酰亚胺、聚砜等聚合物膜相比, 复合膜展现出更优异的 CO₂/CH₄ 分离选择性。

Zhao 等[32]制备了一种新型的双氨基功能化多孔离子液体(MEA@ZIF-8-Amim-PIL)。通过引入 MEA 和[Amin][NTf₂]₂中的氨基, 增加了 CO₂ 的化学吸附位点; ZIF-8 的孔隙则提供了物理吸附通道。物理吸附与化学吸附的协同作用, 使得 MEA@ZIF-8-Amim-PIL 在 278 K, 1 bar 下, CO₂ 吸附量高达 94.3 mg/g, 显著高于 ZIF-8 的 27.36 mg/g。并且其再生能耗低, 有一定的应用潜力。

醇胺类离子液体通过在传统离子液体结构中引入乙醇胺、二乙醇胺等醇胺官能团, 兼具化学吸收法的高选择性和离子液体的低挥发性、高热稳定性优势, 发挥出巨大的研究潜力。

3.3. 氨基酸离子液体

氨基酸离子液体(AAILs)是功能型离子液体之一, 通常由有机阳离子基团与天然氨基酸阴离子基团构成[33]。根据氨基酸阴离子所处的电子环境, AAILs 对 CO₂ 的吸附原理主要是氨基甲酸酯机理或氨基甲酸机理。氨基酸离子液体除了有蒸气压极低、高热稳定性、无腐蚀、再生温度低等离子液体常规特性外[34], 还具有可为分子提供稳定的手性中心和强固的氢键网络结构体系[35]、生物相容性、生物降解性高等氨基酸离子基团的独特优势。此外, AAILs 以来源丰富, 成本低, 挥发性极弱, 以及易于大量获得相对较高的纯度的特点[34], 在多个领域展现出应用潜力。

2005 年, Fukumoto 等[36]利用氨基酸离子液体与有机溶剂互溶后可以溶解天然氨基酸的特性, 通过氨基酸中性化方法制备了氨基酸基离子液体。Bode 等[37]通过模拟计算阐明了离子液体中一些氨基酸阴离子吸收 2 个 CO₂ 分子的可能路径, 并证明赖氨酸盐和二氨基丙酸盐都具有良好性能, 可以有效地吸收 CO₂。

Wen 等[38]使用廉价的内酰胺作为原料, 通过一步水解反应制备新型氨基酸离子液体, 简化了传统 AAILs 的多步合成过程。在 313.2 K 和 1.0 bar 条件下测得这些 AAILs 具有高 CO₂ 吸收容量(0.15 至 0.18 g·g⁻¹)。此外, 这些离子液体还具有低粘度和良好的可逆性等优点。

Wu 等[39]将位阻基团(如异丙基、叔丁基)引入氨基酸离子液体的氨基附近, 合成了一系列新型位阻氨基酸离子液体 SHAAILs。实验表明, 在 313.2 K 和 1.0 bar 下, 3.0 M 的[N₁₁₁₁][β-iPrNH-Ala]水溶液 CO₂ 吸收容量高达 0.92 mol/mol, 吸收速率显著优于传统位阻胺 AMP。研究发现 SHAAILs 通过位阻效应促进氨基甲酸酯中间体快速水解为碳酸氢盐的机理, 提升了 CO₂ 捕获能力, 且在八次循环后吸收容量仅下降不足 5%。

Khosromanesh 等[40]利用减压法, 研究调查了间歇反应器中的氨基酸功能化和[MEA][Gly]水溶液中的 CO₂ 反应动力学, 结果表示增加 IL 浓度和温度, 反应速率将显著增加。氨基酸官能化的单乙醇胺甘氨酸盐 IL 已被建议作为常规胺的替代物。

氨基酸离子液体作为一种潜在绿色溶剂, 在二氧化碳捕获方面优势显著。其对 CO₂ 的高亲和力优于传统咪唑类和醇胺类离子液体, 且具有精准结构调控能力、高热稳定性和低挥发性, 有望解决传统醇胺

法易挥发性、腐蚀性和高能耗再生问题。

4. 总结

在全球气候治理背景下, CCS 技术对缓解 CO₂ 排放压力具有不可替代的作用。本文介绍了 CCS 技术的四种方法: 吸收法、吸附法、膜分离法以及低温分离法。值得注意的是, 氨基酸离子液体因其优异的环境友好性、低生态毒性和可循环利用特性, 已成为绿色 CCS 技术研发的重点方向。

尽管当前离子液体在合成成本与规模化应用方面仍存挑战, 但其在吸收效率与能耗优化上的潜力已得到充分验证。未来研究需聚焦低成本制备工艺、复合体系开发及工业化验证, 同时结合政策支持与跨领域协作, 加速 CCS 技术的实际落地, 为全球碳中和目标的实现提供技术支撑。

参考文献

- [1] Song, C. (2002) CO₂ Conversion and Utilization: An Overview. *ACS Symposium Series*, **809**, 2-30. <https://doi.org/10.1021/bk-2002-0809.ch001>
- [2] Ochedi, F.O., Yu, J., Yu, H., Liu, Y. and Hussain, A. (2020) Carbon Dioxide Capture Using Liquid Absorption Methods: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **19**, 77-109. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01093-8>
- [3] Heede, R. and Oreskes, N. (2016) Potential Emissions of CO₂ and Methane from Proved Reserves of Fossil Fuels: An Alternative Analysis. *Global Environmental Change*, **36**, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.10.005>
- [4] Kikkawa, S., Amamoto, K., Fujiki, Y., Hirayama, J., Kato, G., Miura, H., *et al.* (2022) Direct Air Capture of CO₂ Using a Liquid Amine-Solid Carbamic Acid Phase-Separation System Using Diamines Bearing an Aminocyclohexyl Group. *ACS Environmental Au*, **2**, 354-362. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00065>
- [5] Haszeldine, R.S. (2009) Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be? *Science*, **325**, 1647-1652. <https://doi.org/10.1126/science.1172246>
- [6] Herzog, H.J. (2001) Peer Reviewed: What Future for Carbon Capture and Sequestration? *Environmental Science & Technology*, **35**, 148A-153A. <https://doi.org/10.1021/es012307j>
- [7] Svendsen, H.F., Hessen, E.T. and Mejdell, T. (2011) Carbon Dioxide Capture by Absorption, Challenges and Possibilities. *Chemical Engineering Journal*, **171**, 718-724. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2011.01.014>
- [8] Mukherji, A. (2023) Climate Change 2023 Synthesis Report. IPCC, 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [9] Liu, F., Huang, K., Wu, Q. and Dai, S. (2017) Solvent-Free Self-Assembly to the Synthesis of Nitrogen-Doped Ordered Mesoporous Polymers for Highly Selective Capture and Conversion of CO₂. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1700445. <https://doi.org/10.1002/adma.201700445>
- [10] 张一楠, 熊小鹤, 周寅聪, 等. CO₂ 捕集、利用及封存技术研究进展[J]. 煤炭学报, 1-21.
- [11] 方宏萍, 王洪飞, 宋彩霞, 等. 二氧化碳捕集技术应用研究进展[J]. 山东化工, 2024, 53(10): 128-130, 134.
- [12] 孙烨, 王兴旺, 楚海强, 等. 二氧化碳脱除技术研究综述[J]. 辽宁化工, 2023, 52(6): 884-887.
- [13] Xie, Y., Liu, G., Nie, H., Yu, F., Xing, X. and Cui, H. (2019) Energy Analysis of Physical Absorption and Chemical Absorption of CO₂ in Ionic Liquids. *Energy Technology*, **8**, Article ID: 1900529. <https://doi.org/10.1002/ente.201900529>
- [14] Song, C., Liu, Q., Ji, N., Deng, S., Zhao, J., Li, Y., *et al.* (2018) Alternative Pathways for Efficient CO₂ Capture by Hybrid Processes—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 215-231. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.040>
- [15] Wilberforce, T., Olabi, A.G., Sayed, E.T., Elsaid, K. and Abdelkareem, M.A. (2021) Progress in Carbon Capture Technologies. *Science of the Total Environment*, **761**, Article ID: 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>
- [16] 高宁博, 王明晨, 杨天华, 等. 有机燃料燃烧烟气的二氧化碳捕集技术研究[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 562-572.
- [17] Zhang, N., Pan, Z., Zhang, Z., Zhang, W., Zhang, L., Baena-Moreno, F.M., *et al.* (2019) CO₂ Capture from Coalbed Methane Using Membranes: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **18**, 79-96. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00919-4>
- [18] Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R.B., Bland, A.E., *et al.* (2008) Progress in Carbon Dioxide Separation and Capture: A Review. *Journal of Environmental Sciences*, **20**, 14-27. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)60002-9](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)60002-9)
- [19] 温嵩, 韩伟, 车春霞, 等. 燃烧后二氧化碳捕集技术与应用进展[J]. 精细化工, 2022, 39(8): 1584-1595, 1632.

- [20] Blanchard, L.A., Hancu, D., Beckman, E.J. and Brennecke, J.F. (1999) Green Processing Using Ionic Liquids and CO₂. *Nature*, **399**, 28-29. <https://doi.org/10.1038/19887>
- [21] Kodirov, A., Abduvokhidov, D., Mamatkulov, S., Shahzad, A. and Razzokov, J. (2024) The Absorption Mechanisms of CO₂, H₂S and CH₄ Molecules in [EMIM][SCN] and [EMIM][DCA] Ionic Liquids: A Computational Insight. *Fluid Phase Equilibria*, **581**, Article ID: 114080. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114080>
- [22] Chauhan, R., Sartape, R., Mishra, R., Shah, J.K. and Singh, M.R. (2024) High-Throughput Measurements of CO₂ Permeance and Solubility in Ionic Liquid Reveal a Synergistic Role of Ionic Interactions and Void Fractions. *Chemical Engineering Journal*, **496**, Article ID: 153697. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.153697>
- [23] El-Nagar, R.A., Elaraby, A., Nessim, M.I. and Ghanem, A. (2024) Designed Imidazolium-Based Ionic Liquids to Capture Carbon Dioxide from Natural Gas. *Journal of Molecular Liquids*, **401**, Article ID: 124708. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124708>
- [24] Yang, X., Zhu, C., Fu, T. and Ma, Y. (2024) A Novel Synergistic Intensification Method for CO₂ Absorption by Metal Salt and Task-Specific Ionic Liquids Hybrid Solvent in Microchannel Reactor. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **222**, Article ID: 125210. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125210>
- [25] Chaouiki, A., Chafiq, M. and Ko, Y.G. (2024) Unveiling the Mechanisms behind High CO₂ Adsorption by the Selection of Suitable Ionic Liquids Incorporated into a ZIF-8 Metal Organic Framework: A Computational Approach. *Environmental Research*, **246**, Article ID: 118112. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118112>
- [26] Yin, Y., Dong, X., Dai, L., Zhang, E. and Liu, Y. (2025) Hydroxyl and Amino Co-Modified Imidazole Based Ionic Liquid Functionalized TS-1 Molecular Sieve for Efficient CO₂ Capture. *Separation and Purification Technology*, **358**, Article ID: 130393. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130393>
- [27] Xu, F., Gao, H., Dong, H., Wang, Z., Zhang, X., Ren, B., *et al.* (2014) Solubility of CO₂ in Aqueous Mixtures of Monoethanolamine and Dicyanamide-Based Ionic Liquids. *Fluid Phase Equilibria*, **365**, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.12.020>
- [28] Blauwhoff, P.M.M., Versteeg, G.F. and Van Swaaij, W.P.M. (1983) A Study on the Reaction between CO₂ and Alkanolamines in Aqueous Solutions. *Chemical Engineering Science*, **38**, 1411-1429. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80077-3](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80077-3)
- [29] Xiao, M., Liu, H., Gao, H., Olson, W. and Liang, Z. (2019) CO₂ Capture with Hybrid Absorbents of Low Viscosity Imidazolium-Based Ionic Liquids and Amine. *Applied Energy*, **235**, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.103>
- [30] Ebrahimejadhasanabadi, M., Nelson, W.M., Naidoo, P., Mohammadi, A.H. and Ramjugernath, D. (2021) Investigation of Mixed MEA-Based Solvents Featuring Ionic Liquids and NMP for CO₂ Capture: Experimental Measurement of CO₂ Solubility and Thermophysical Properties. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **66**, 899-914. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00618>
- [31] Alcantara, M.L., de Almeida Ribeiro Oliveira, G., Lião, L.M., Ortiz, A. and Mattedi, S. (2024) Highly Selective CO₂/CH₄ Membranes Based on Ethanolamine Ionic Liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **63**, 8306-8318. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c04533>
- [32] Zhao, P., Li, Z., Dong, B., Zhang, L., Su, X., Wang, Q., *et al.* (2025) An Enhancement and Mechanism of CO₂ Capture by a Dual-Amino Porous Ionic Liquid. *Separation and Purification Technology*, **360**, Article ID: 131064. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131064>
- [33] Zhang, F., Gao, K., Meng, Y., Qi, M., Geng, J., Wu, Y., *et al.* (2016) Intensification of Dimethylaminoethoxyethanol on CO₂ Absorption in Ionic Liquid of Amino Acid. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **51**, 415-422. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.05.013>
- [34] Cui, G., Wang, J. and Zhang, S. (2016) Active Chemisorption Sites in Functionalized Ionic Liquids for Carbon Capture. *Chemical Society Reviews*, **45**, 4307-4339. <https://doi.org/10.1039/c5cs00462d>
- [35] Chen, F., Huang, K., Fan, J. and Tao, D. (2017) Chemical Solvent in Chemical Solvent: A Class of Hybrid Materials for Effective Capture of CO₂. *AIChE Journal*, **64**, 632-639. <https://doi.org/10.1002/aic.15952>
- [36] Fukumoto, K., Yoshizawa, M. and Ohno, H. (2005) Room Temperature Ionic Liquids from 20 Natural Amino Acids. *Journal of the American Chemical Society*, **127**, 2398-2399. <https://doi.org/10.1021/ja043451i>
- [37] Onofri, S. and Bodo, E. (2021) CO₂ Capture in Biocompatible Amino Acid Ionic Liquids: Exploring the Reaction Mechanisms for Bimolecular Absorption Processes. *The Journal of Physical Chemistry B*, **125**, 5611-5619. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02945>
- [38] Wen, S., Wang, T., Zhang, X., Xu, W., Hu, X. and Wu, Y. (2023) Novel Amino Acid Ionic Liquids Prepared via One-step Lactam Hydrolysis for the Highly Efficient Capture of CO₂. *AIChE Journal*, **69**, e18206. <https://doi.org/10.1002/aic.18206>
- [39] Wu, H., Wen, S., Zhang, X., Zhang, S., Guo, X. and Wu, Y. (2024) Aqueous Solutions of Sterically Hindered Amino

Acid Ionic Liquids for Rapid and Efficient Capture of CO₂. *Chemical Engineering Journal*, **488**, Article ID: 150771.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150771>

- [40] Khosromanesh, M.R. and Rashidi, H. (2024) An Insight on Reaction Kinetics of Amino-Acid-Functionalized Ionic Liquid Monoethanolamine Glycinate for CO₂ Capture. *Separation Science and Technology*, **59**, 356-364.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2024.2315624>