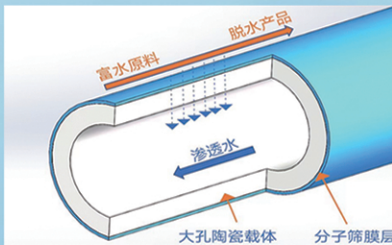
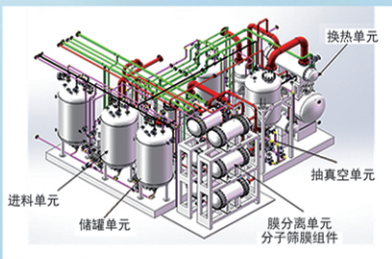




浙江汇甬新材料有限公司

微波合成第二代脱水膜



收率高、能耗低、连续脱水、无需再生

在如下领域的有机物脱水精制已有工业化应用

锂电池电解液溶剂及NMP生产、回收
BDO产业链、煤化工、石油化工精细化学品
制药行业、溶媒回收、燃料乙醇、超纯溶剂

广泛适用于醇类、醚类、酯类、酮类、苯系物、卤代烃的脱水精制



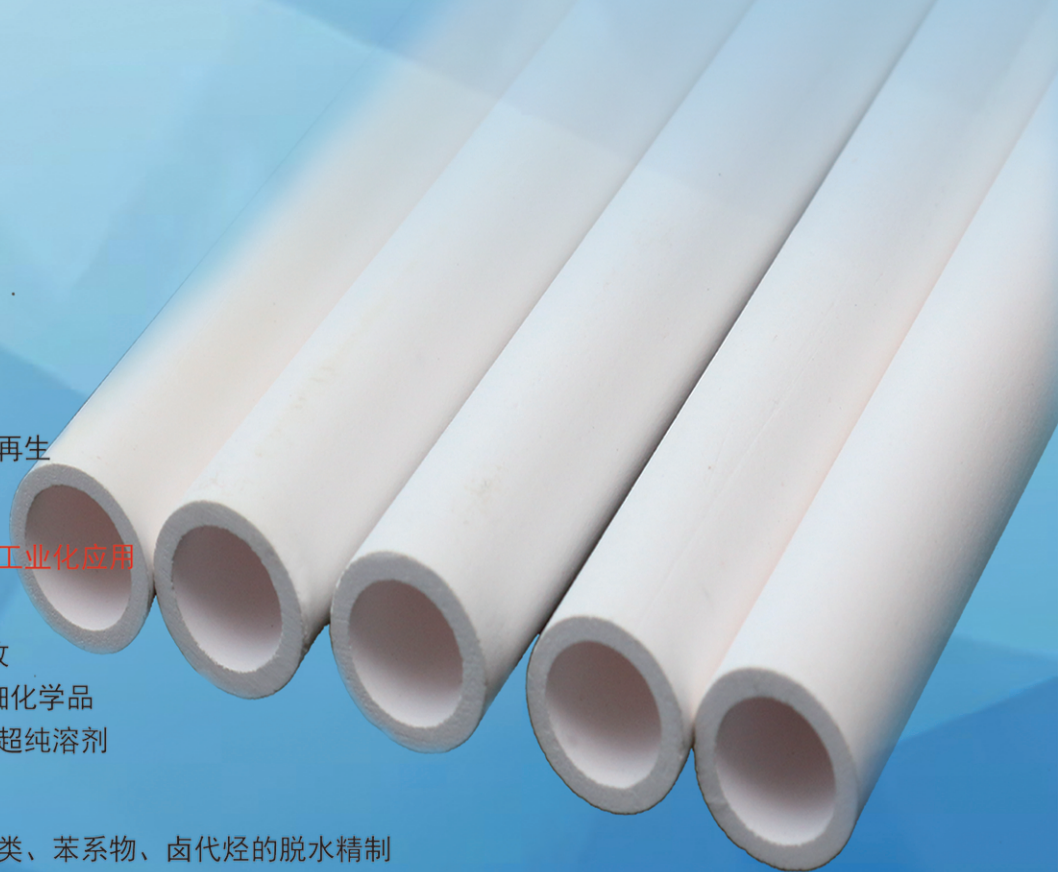
网址: www.hymater.com

固定电话: 0574-87648996

电话: 13396592011

地址: 浙江省宁波市江北高新园区庆丰路联东U谷国际港56号楼

国家自然科学基金二等奖 成果转化
IChemE全球 创新产品冠军
微波分子筛膜 脱水性能遥遥领先
共沸体系、热敏体系、含水有机物脱水精制换代技术



基于乙醇胺复配溶剂强化吸收 CO₂ 的研究进展

胡书康¹, 赵兵涛^{1*}, 范志彬¹, 苏亚欣²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: CO₂ 捕集、利用与封存技术是实现“碳中和”的一种有效解决方案, 发展高技术经济性的强化吸收方法是碳捕集的基础。由于单胺溶液的局限性, 基于耦合策略的多元复配溶剂强化吸收 CO₂, 尤其是能源利用过程中排放的 CO₂, 能够实现官能团的相互协同、增强吸收性能和降低再生能耗。该文论述了基于乙醇胺 (MEA) 的最新多元复配、无水、离子液体和相变吸收剂复配溶剂强化吸收 CO₂ 的性能特性和过程机理, 分析了 CO₂ 分压、温度、溶剂质量分数、气液流速对吸收性能的定量影响, 并对其技术经济性能进行了分析。最后, 对基于 MEA 的多元复配溶剂吸收 CO₂ 发展过程中尚需解决的问题进行了总结, 并对未来的发展方向进行了展望。

关键词: 二氧化碳捕集; 乙醇胺; 复配吸收剂; 吸收性能; 强化机制

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2025) 02-0279-09

Research progress on enhanced CO₂ absorption based on monoethanolamine complex solvents

HU Shukang¹, ZHAO Bingtao^{1*}, FAN Zhibin¹, SU Yaxin²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: CO₂ capture, utilization and sequestration technology is an effective solution to achieve "carbon neutralization", and the development of enhanced absorption method with high-tech and cost-efficacy is a prerequisite for carbon capture. Due to the limitation of monoamine solution, the multi-component solvents based on coupling strategy can enhance the absorption of CO₂, especially the CO₂ emitted during the energy utilization process, which can achieve the coordination of functional groups, enhance the absorption performance and reduce the energy consumption of regeneration. In this review, the performance characteristics and process mechanism of enhanced CO₂ absorption by the latest multicomponent complex solvents based on monoethanolamine (MEA), such as multicomponent complex, anhydrous, ionic liquid and phase change absorbents were discussed. The quantitative effects of important operating parameters such as CO₂ partial pressure, temperature, mass fraction of solvent and gas-liquid flow rate on the absorption performance were evaluated, and its technical and economic properties were analyzed. Finally, the problems to be addressed in the development of CO₂ absorption by multi-component mixed solvents based on MEA were summarized and the future development direction was prospected.

Key words: carbon dioxide capture; monoethanolamine; compound absorbents; absorption performances; strengthening mechanism

为实现能源利用过程中的“碳中和”目标, CO₂ 捕集、利用与封存技术是一种有效的解决方案。其中, CO₂ 捕集是利用与封存的前提, 主要在燃烧后、

燃烧前和富氧燃烧中进行, 尤其是燃烧后的捕集受到了广泛的关注^[1]。

燃烧后 CO₂ 的捕集技术主要包括物理吸收法、

收稿日期: 2024-01-25; 定用日期: 2024-03-12; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240089

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (17ZR1419300)

作者简介: 胡书康 (1996—), 男, 硕士生, E-mail: shukanghu@163.com. 联系人: 赵兵涛 (1976—), 男, 教授, E-mail: zhaobingtao@usst.edu.cn.

化学吸收法、吸附法、膜分离法等^[2]。在所有这些技术中,化学吸收法是研究、实施和商业化最多的方法,具有较高的 CO₂ 吸收效率(80%~100%)、反应稳定、对低压条件的适应性及生产高纯度 CO₂ 的能力(高达 99%)^[3]。目前,研究较多的 CO₂ 化学吸收剂包括胺类溶液、氨碱类液体、离子液体和相变吸收剂等。

目前,工业上大规模应用的 CO₂ 捕集技术仍是有机胺溶液吸收法^[4]。氨基和羟基是有机胺溶液作为吸收剂捕集 CO₂ 的活性官能团,其中,氨基使有机胺具有较强的碱度,促使胺类溶液有较快的吸收速率、较高的吸收容量和对 CO₂ 的良好选择性,是有机胺法吸收 CO₂ 的关键驱动力^[5];羟基降低了胺吸收剂的饱和蒸汽压,增强了胺与水的亲和力,使化合物更易溶于水。同时,羟基也能增加 CO₂ 的吸收容量,但降低了吸收速率^[6-7]。理想的吸收剂需满足 2 mmol CO₂/g 吸收剂的吸收容量、1000 次的再循环能力、100 倍的 CO₂ 选择性、150 °C 的热稳定性、10 美元/kg 吸收剂的成本及 1 mmol/(g·min) 的反应动力学等特点,CO₂ 吸收剂等容吸附热 (Q_{st}) 越大,结合越强,吸收容量就越大,但结合越强,吸收剂

再生所需的能量就越多^[8]。由于单胺溶液自身的局限性,提出了结合不同胺类优点的复合胺溶液。有机胺溶液吸收法中最常见的商业溶剂之一是质量分数 30% 的乙醇胺 (MEA) 溶液,其被认为是氨基 CO₂ 捕集工艺的基本溶剂,具有 CO₂ 吸收速率较快、选择性好且成本低的特点^[9]。但 MEA 存在 CO₂ 吸收容量相对较低、再生能耗高、腐蚀设备、溶剂损失等缺点^[10-11]。为改善上述缺点,近年来,将 MEA 与其他溶剂复配来改善其性能。如图 1 所示,其中,AMP 为 2-氨基-2-甲基-1-丙醇;PZ 为哌嗪;2EE 为 2-乙氧基乙醇;2ME 为 2-甲氧基乙醇;[Bmim][BF₄] 为 1-丁基-3-甲基-咪唑四氟硼酸盐离子液体。然而,对 MEA 复配溶剂强化吸收 CO₂ 的机理及关键操作参数影响的认识尚不充分,有必要理清其本质和关系。

本文总结了最新基于 MEA 的多元、无水、离子液体和相变复配溶剂强化吸收 CO₂ 的性能特性,进一步探究了其强化吸收的原理和机制,分析了重要操作参数,如 CO₂ 分压、温度、溶剂配比、气液流速等对定量吸收 CO₂ 的影响。为开发新型绿色复合 MEA 溶液吸收 CO₂ 提供参考。

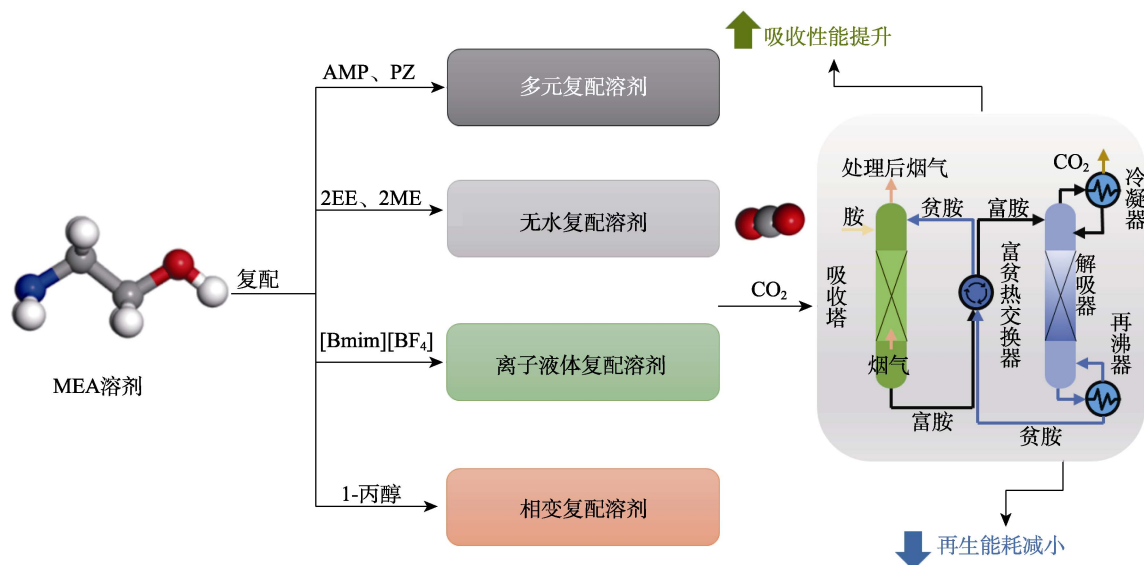


图 1 基于 MEA 溶剂的复配方式、过程及性能目标

Fig. 1 Compounding modes, processes and performance objectives based on MEA solvents

1 MEA 复配溶剂强化吸收 CO₂

目前,基于 MEA 复配溶剂吸收 CO₂ 的类型可分为多元复配、无水复配、离子液体和相变复配溶剂,其总体技术经济性能见表 1。由表 1 可知,将其他胺溶液或促进剂与 MEA 复配后,吸收性能提升明显。

1.1 多元复配溶剂

从表 1 可以看出,MEA+1DMA2P (1-二甲氨基

-2-丙醇)+PZ 体系可较好地兼顾吸收和再生性能。在有机胺化学吸收中,CO₂ 的捕获依赖于亲电碳原子上的亲核相互作用,如果化学吸附剂的官能团有助于提高亲核性,则可能会提高 CO₂ 的捕获^[12]。MIRZAEI 等^[13]研究了质量分数 10% MEA 与不同质量分数甘油混合的水溶液对烟气中 CO₂ 的捕集,由于甘油存在亲核基团羟基,CO₂ 吸收率从 62.24% 提高到 64.33%。天然褐藻类副产物海藻酸钠具有多个羟基,可能会促进 MEA 对 CO₂ 的吸收^[14]。此

外, 在多胺中只有 PZ 的掺入能够提高 CO₂ 吸收容量和吸收速率, 而不会增加溶剂的黏度^[15]。因此,

未来可将甘油、海藻酸钠、PZ 与 MEA 复配来吸收 CO₂。

表 1 不同 MEA 复配溶剂性能对比
Table 1 Performance comparison of different MEA compound solvents

类型	吸收剂类型	组分	性能	参考文献
多元复配	MEA+甘油	w(MEA)=10%、w(甘油)=10%	与 w(MEA)=10% 溶液相比, CO ₂ 的吸收率提高 2.09%	[13]
	MEA+DETA	w(MEA)=20%、w(DETA)=10%	吸收容量 0.556 kg CO ₂ /kg 胺, CO ₂ 吸收率比 w(MEA)=30% 溶液提高 31% 以上	[16]
	MEA+DETA+PZ	w(MEA)=20%、w(DETA)=5%、w(PZ)=5%	吸收速率和吸收容量比 w(MEA)=30% 溶液分别提高 7% 和 15%, 能耗降低 6%	[17]
	MEA+1DMA2P	n(MEA):n(1DMA2P)=5:1	平衡溶解度 0.5548 mol CO ₂ /mol 胺, 循环容量增加 42.33%	[18]
	MEA+1DMA2P+PZ	n(MEA):n(1DMA2P):n(PZ)=3.0:1.5:1.5、3.0:2.0:1.0、3.0:2.5:0.5	吸收容量提高 25%~37%, 平均解吸率提高 60%~140%, 循环容量提高 40%~120%, 能耗降低 29.4%~55.4%	[19]
	MEA+AMP	w(MEA)=18%、w(AMP)=12%	与 w(MEA)=30% 溶液相比, 吸收容量提升 51.2%	[20]
	MEA+AMP+PZ	n(MEA):n(AMP):n(PZ)=3:2:1	吸收容量提高约 30%, 再生热负荷降低约 50%	[21]
无水复配	MEA+乙二醇	w(MEA)=30%、w(乙二醇)=70%	吸收速率(3.98~4.58)×10 ⁻⁶ kmol/(m ² ·s), 再生能耗可降低 23.8%~31.3%	[22]
	MEA+2EE	w(MEA)=30%、w(2EE)=70%	与 w(MEA)=30% 溶液相比, CO ₂ 循环容量提高 51.8%, CO ₂ 吸收热降低 35.4%	[23]
	MEA+DEGMEE MEA+NMF	w(MEA)=20%、w(DEGMEE)=80%、 w(MEA)=30%、w(NMF)=70%	与 w(MEA)=30% 溶液相比, MEA+DEGMEE 体系可能降低 78%; MEA+NMF 体系在前 14 min 吸收效率比 MEA 水溶液提高 17%, 但不利于解吸	[24]
	MEA+2ME	5 mol (MEA+2ME)	吸收容量相当, 解析效率更高, 循环容量提高约 72.6%, 再生能耗降低约 55%	[25]
离子液体	MEA+NMP+[Bmim][TF ₂ N]	w(MEA)=0.1039%、w(NMP)=0.7966% w(ILs)=0.0995%	降低胺的蒸发速率, 且无离子液体损失, 但黏度也增加	[26]
	MEA+[Bmim][BF ₄]	w(ILs)=40%、w(MEA)=30%	再生能耗降低 37.2%, MEA 损失减小 2.39 kg/t CO ₂ , 黏度较低, 为 3.54 mPa·s	[27]
	MEA+[Bmim][BF ₄]	w(ILs)=50%、w(MEA)=50%	CO ₂ 吸收容量 0.519 mol CO ₂ /mol 胺, 5 次循环后吸收能力略微下降	[28]
	MEA+[bpy][BF ₄]	w(ILs)=30%、w(MEA)=30%	再沸器负荷能耗和 CO ₂ 去除成本分别降低约 15% 和 7.44%	[29]
	MEA+[C ₂ OHmim][Gly]	c(ILs)=0.3 mol/L、c(MEA)=0.7 mol/L	V(O ₂)=8% 条件下吸收容量提高 24.2%; V(O ₂)=3% 下吸收容量提高 16.3%, 4 次循环后再生效率为 90.2%	[30]
MEA+[Emim][Br]	w(ILs)=20%、w(MEA)=5%	吸收效率 93.9%, 饱和吸收容量提升 7.2%, 解吸率提高	[31]	
复配相变	MEA+叔丁醇	w(叔丁醇)=50%、w(MEA)=30%	最高循环负载量提高 40%, 进入解吸塔的吸收剂体积降低 65%	[32]
	MEA+1-丙醇	w(1-丙醇)=55%、w(MEA)=30%	最佳循环容量提高 62%, 且送往汽提塔的总体积减少 67%	[33]
	MEA+1-丙醇	w(1-丙醇)=40%、w(MEA)=30%	循环容量提升 148.5%, 显热和汽化热分别下降 80% 和 75%, 总再生能下降 39.85%	[34]
	MEA+环丁砜	c(环丁砜)=4 mol/L、c(MEA)=5 mol/L	相分离后上液相的 CO ₂ 负荷几乎为 0, 解吸体积减少约 50%	[35]
	MEA+AMP+DMSO +PMDETA	c(MEA)=1.7 mol/L、c(AMP)=0.3 mol/L、 n(DMSO):n(PMDETA)=7:3	吸收容量 0.88 mol CO ₂ /mol 胺, 显热和汽化热分别降低 63.1% 和 94.8%	[36]
MEA+环丁砜	n(环丁砜):n(MEA)=4:5	再生热减少 31%, 为 2.67 GJ/t CO ₂ , 显热和汽化热分别降低 62.4% 和 47.9%	[37]	

注: DETA—二乙烯三胺; DEGMEE—二甘醇单乙醚; NMF—N-甲基甲酰胺; NMP—N-甲基吡咯烷酮; [Bmim][TF₂N]—1-丁基-3-甲基咪唑双(三氟甲磺酰基)亚胺; [bpy][BF₄]⁻—1-丁基吡啶; [C₂OHmim][Gly]⁻—亲水性氨基酸功能性离子液体; [Emim][Br]⁻—1-乙基-3-甲基咪唑溴; DMSO—二甲基亚砜; PMDETA—五甲基二乙烯三胺。

1.2 无水复配溶剂

胺溶剂再生的成本高,其成本约占整个胺洗涤工艺运行成本的 50%^[38]。通常,CO₂捕集过程中再生溶剂所需的热量可以近似为 3 项的总和:从溶液中解吸 CO₂所需的反应热、将溶剂从吸收器提高到解吸器温度所需的显热和在再沸器中产生汽提蒸汽所需的蒸发热^[39]。胺吸收剂的显热远大于反应热和蒸发热,且水对显热贡献最大^[40]。因此,加水引起的高热容量、高汽化热和蒸汽压会增加再生过程中的能量^[41];此外,还有诱导胺降解和工艺设备腐蚀的风险^[5]。使用有机溶剂代替传统胺类吸收剂中的水,可大大降低 CO₂回收和溶剂再生的能量,减少腐蚀^[42]。由表 1 可知,MEA 无水吸收剂的再生能耗可大幅降低,MEA+2ME 体系的循环容量和再生性能较好。

1.3 离子液体复配溶剂

近年来,结构可调、比热容低的离子液体(ILs)作为一种非挥发性和可回收的溶剂,广泛用于 CO₂捕获^[43-44]。然而,传统咪唑类、吡啶类、吡咯类等离子液体具有黏度大、成本过高等缺点,因此,可以根据离子液体自身结构可调性和 CO₂气体具有酸性的特点,设计合成具有特定目标和某种特殊性质的功能化离子液体^[45]。其中,氨基的引入可降低离子液体的黏度^[46]、提高离子液体的吸收能力^[47]。将胺与离子液体混合,可降低其挥发性、溶剂损失和能量消耗^[48],在 MEA 溶液中加入[Bmim][BF₄],可减少工艺设备腐蚀^[49]。从表 1 可以看出,离子液体复配溶剂再生能耗低、再生效率高,其中 MEA+[Bmim][BF₄]体系性能较好。

1.4 复配相变溶剂

为进一步提高循环能力,降低解吸过程的能耗,吸收剂和吸收产物出现相分离的相变吸收剂在最近几年受到广泛关注。由表 1 可以看出,MEA 相变吸收剂循环容量高、再生能耗小,MEA+1-丙醇体系性能较好。两相的物种分布对于相变吸收剂至关重要,根据 ZHANG 等^[33]对 MEA+1-丙醇体系的研究,随着 1-丙醇初始质量分数的增大,下相(富 CO₂相)体积减小、1-丙醇质量分数减小、CO₂负荷增大、黏度增大,富含 MEA 盐、H₂O 和 CO₂,上相(贫 CO₂相)CO₂负荷保持不变,主要由 1-丙醇组成。总体积传质系数(KGaV)对吸收性能有重要的影响,根据 YIN 等^[35]对 MEA+环丁砜体系的研究,KGaV 随着液体流量的增大而增大,随着贫 CO₂负荷和 CO₂分压的增大而减小,而惰气流量和温度对 KGaV 的影响较小。

1.5 再生能耗对比

以 MEA 再生能耗值 100 为基准,对上述复配

吸收剂再生能耗取平均值进行对比,如图 2 所示。

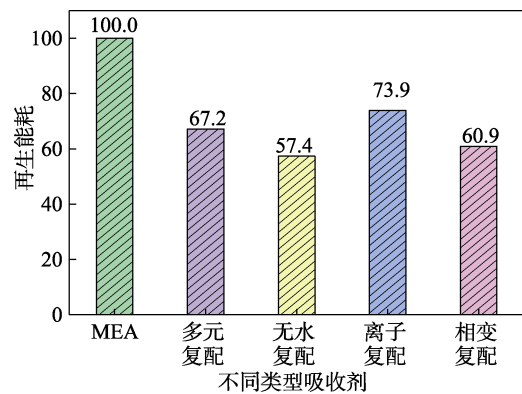


图 2 不同类型吸收剂的再生能耗对比

Fig. 2 Comparison of regeneration energy consumption for different types of absorbents

由于复配溶剂间官能团的相互协同、水的减少、离子液体的低挥发性及相分离等原因,不同类型 MEA 复配溶剂的再生能耗与其单相溶液相比明显降低,所以复配是解决其吸收 CO₂时再生能耗高的有效方法。

2 强化吸收 CO₂的原理与机制

从吸收的过程机制来看,MEA 多元复配溶剂性能的提升体现在吸收和再生性能的改善。一方面,MEA 溶液与 AMP 或者 1DMA2P 混合后吸附容量显著提升,是因为叔胺和空间位阻胺与 CO₂反应时理论吸收容量为 1.0 mol CO₂/mol 胺,高于伯胺的 CO₂理论吸收容量(0.5 mol CO₂/mol 胺)^[50]。不同胺类之间的相互作用会增强 MEA 的吸收能力,如图 3 所示,CHEN 等^[51]研究发现,在非水体系中,叔胺增强了伯胺对 CO₂的吸收能力,因为在非水体系,叔胺与 CO₂之间不发生反应。叔胺作为碱性物质参与了 MEA 与 CO₂的 3 分子反应,并且叔胺的引入使质子化的 MEA 释放质子,重新转化为 MEA,进一步提高反应速率。

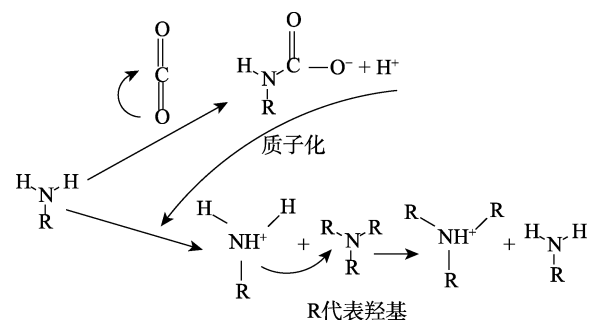


图 3 MEA 复配溶剂强化吸收 CO₂的过程示意图^[51]

Fig. 3 Schematic diagram of enhanced absorption of CO₂ by MEA compound solvent^[51]

此外, 胺再生过程中的 2 个重要反应为氨基甲酸酯中 C—N 键分解和质子化胺的去质子化。一方面, 叔胺与 CO₂ 的反应产物 HCO₃⁻ 中的 C—O 键比 MEA 与 CO₂ 的产物氨基甲酸酯中的 C—N 键更容易断裂; 另外, 空间位阻胺中位阻效应的存在使得胺上活性氢原子与 CO₂ 的反应受到阻碍, 导致反应生成的氨基甲酸酯相当不稳定, 容易水解为碳酸氢盐和游离胺, 所以叔胺和空间位阻胺的加入可以降低 MEA 溶液的再生能耗^[52-53]。质子化胺的去质子化是胺再生过程中的另一个重要反应, 是一个强吸热过程, 加之质子转移的困难, 因此, 需要较高的再生能量^[54]。增加质子转移方式可以降低 MEA 的再生能耗, HU 等^[19]研究 MEA+1DMA2P+PZ 的共混体系发现, 由于碱性介质 1DMA2P 和 PZ 的存在, 1DMA2P 和 PZ 比中性水更容易接受 MEAH⁺ 中的质子, 生成更多的质子化胺 (PZH⁺、PZH₂²⁺ 和 1DMA2PH⁺), 通过多种质子转移方式来加速溶剂再生过程, 从而减少再生能耗。HCO₃⁻ 在溶剂再生过程中可以促进质子从质子化的胺转移到水, 因此, 叔胺类与 CO₂ 反应产物为 HCO₃⁻ 的溶剂与 MEA 复配, 再生时能耗更小^[38]。胺的质子化行为取决于氮原子的电子密度, 与氮原子分子结构密切相关, 所以可考虑选择氮的电子密度更高的 1DMA2P 和 MAE (N-甲基氨基乙醇) 等溶剂同 MEA 复配吸收 CO₂^[55-56]。

MEA 多元无水复配吸收剂的吸收原理与多元复配溶剂基本相同, 再生能耗大幅降低除了减少水的显热外, 从吸收的过程机制来看, 由于无水, MEA 与 CO₂ 反应可能形成不稳定的氨基甲酸或氨基甲酸酯或其混合物, 利于再生^[57]; 在解吸条件下, 溶剂与 CO₂ 的分压比较低, 也有可能降低溶剂的蒸发热以及整个再沸器的热负荷^[58]。相分离行为和 CO₂ 溶解度对于选择合适的 MEA 无水吸收剂溶剂至关重要, 由溶剂极性参数 [ET(30)] > 209.2 kJ/mol 的溶剂组成的非水吸附剂在吸收 CO₂ 后保持单相, 非水吸收剂的 CO₂ 溶解度与溶剂介电常数呈良好的正相关关系^[23]。另外, 由于有机溶剂型无水吸收剂的净吸收交换率高, 通常会造成 CO₂ 吸收率显著较低, 因此, 需要开发具有高热、高化学稳定性和低蒸汽压的新型吸收剂来克服这一缺点^[59]。具有高沸点、低黏度、低比热、低蒸汽压、ET(30) > 209.2 kJ/mol 的 2EE、2ME 是有吸引力的无水吸收剂可选择溶剂^[23,25]。

MEA 离子液体混合吸收剂体系中, ILs 的物理吸收与胺的化学吸收并存, 化学吸收占主导地位, MEA 反应产物为质子化胺和氨基甲酸酯^[27]。图 4 为胺功能化离子液体的吸收机制。

MEA 离子液体吸收剂的主要优势之一是再生能耗低, 在相同温度范围内, ILs 的比热容通常约为 MEA 的 50%、水的 33%, 且 ILs 基吸收剂不含水或

贫水, 再生时显热大幅降低; 同时由于极低的蒸汽压和高的热稳定性, 在整个 CO₂ 捕获过程中, ILs 的溶剂损失可以忽略不计^[60-61]。此外, 由于 ILs 的结构可调性, 可以通过在阴离子和阳离子上引入官能团来调节 ILs 与 CO₂ 的反应焓, 从而降低解吸热^[62]。

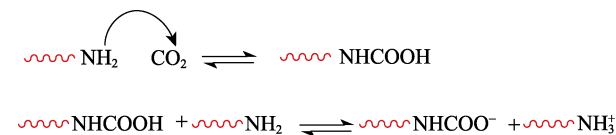


图 4 胺功能化离子液体的 CO₂ 吸收机制^[3]

Fig. 4 CO₂ absorption mechanism of amine functionalized ionic liquids^[3]

MEA 相变吸收剂一般由胺、醇和水 3 种溶剂所构成。分相原理与吸收剂亲脂性胺分子中氨基和烷基的水溶性与温度有关, 如图 5 所示^[33]。低温时 MEA 与 CO₂ 反应生成溶于水的 MEA 盐、氨基甲酸酯和质子化的 MEA, 氨基与水分子形成氢键。当温度升高到临界点, 氨基与水之间的氢键断裂, 由于烷基的疏水性, 水团在 MEA 盐周围演化时, 胺分子发生自聚, 与水分离后形成醇团。当水团簇和醇团簇大小达到宏观尺度时, 形成贫 CO₂ 液和富 CO₂ 液两相^[33,63]。

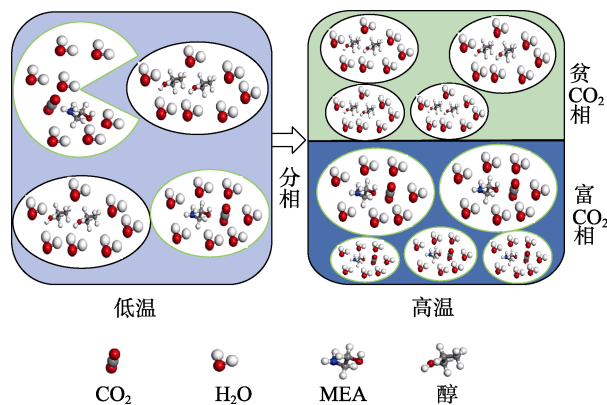


图 5 相变过程作用示意图^[33]

Fig. 5 Schematic diagram of phase transition process^[33]

相变吸收剂的主要优势是循环容量高、再生能耗小, 由于吸收剂在吸收 CO₂ 后变成两相, 不再生的贫 CO₂ 相回吸收器, 只有富 CO₂ 相进入汽提塔进行热再生, 降低了再生能耗^[64]。但只有富相进行解吸时黏度较高, 高黏度将对物理扩散速率、热传递和泵送能量产生负面影响, 需进一步研究使用膜分散工艺等新技术, 用于这种高黏性系统的解吸^[65]。此外, 根据 LIU 等^[66]对 MEA+AMP+DEGDME (二甘醇二甲醚) 共混的相变吸收剂的研究, 富 CO₂ 相黏度的显著增加可能会使交叉交换器的传热恶化, 显热随着黏度的增加而增加。

3 关键操作参数对理化性能的影响

3.1 温度及分压的影响

温度、CO₂分压、溶剂配比、气液流速等操作参数对 MEA 复配溶剂吸收 CO₂ 有重要影响 (图 6~9)。

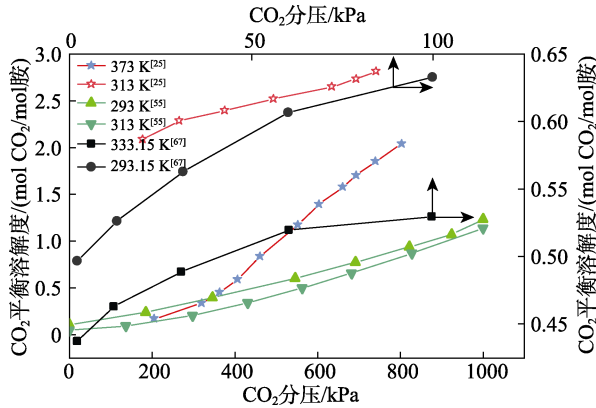


图 6 CO₂分压及温度对 CO₂平衡溶解度的影响^[25,55,67]
Fig. 6 Effects of CO₂ partial pressure and temperature on equilibrium solubility of CO₂^[25,55,67]

如图 6 所示,平衡溶解度随着 CO₂分压的升高而升高,当 CO₂分压升高时,气相的传质驱动力增加,CO₂的平衡溶解度升高。平衡溶解度随着温度的升高而降低是由于升高温度,加速了分子的热运动,导致 CO₂分子不易与溶剂结合;且 CO₂与有机胺反应是放热反应,温度的升高抑制了 CO₂吸收反应的发生,并降低了 CO₂在有机胺溶剂中的物理溶解度,所以温度升高,CO₂平衡溶解度下降^[55,68]。

KANG 等^[22]对 MEA+H₂O+乙二醇复配溶剂的研究发现,随着温度的升高,溶液吸收 CO₂的速率加快。由于温度的升高降低了溶液的密度和黏度,加快了液膜传质速率,从而导致胺与 CO₂的反应速率加快^[68]。温度对黏度的影响如图 7 所示,从图 7 可以发现,随着温度的升高,胺混合溶液的黏度会逐渐降低^[69-71]。

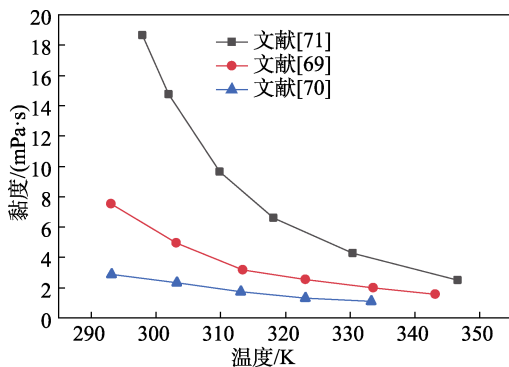
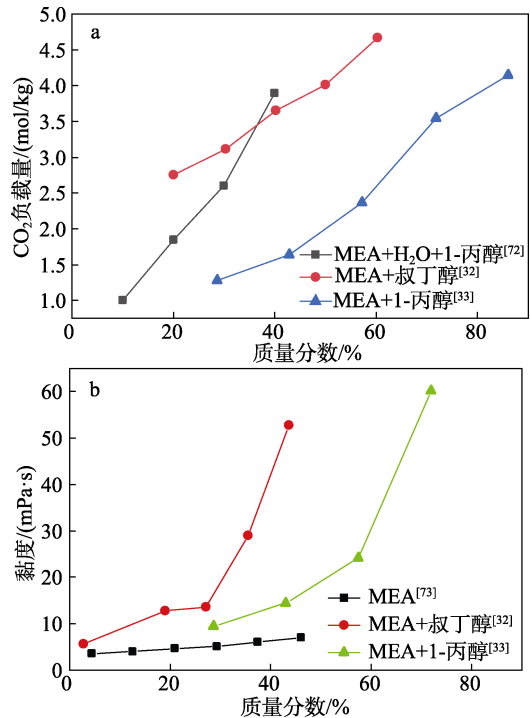


图 7 温度对黏度的影响^[69-71]
Fig. 7 Effect of temperature on viscosity^[69-71]

3.2 溶剂质量分数的影响

随着 MEA 复配溶剂质量分数的增加,CO₂负载

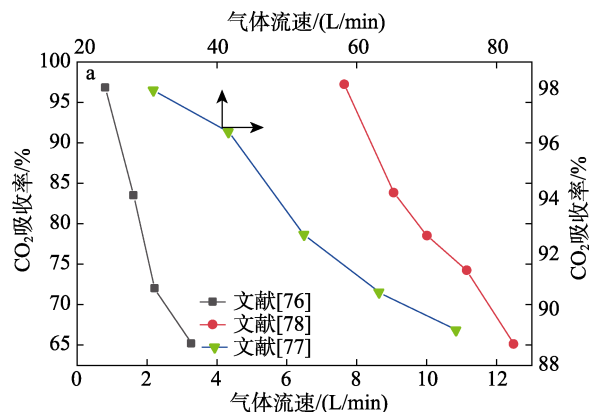
量增加,如图 8 所示。但溶剂质量分数对黏度也有重要的影响,随着复配溶剂质量分数的增加,黏度增大^[32-33,73]。而低黏度有利于 CO₂吸收的传质和初始吸收率^[74],黏度对建立性能模型、预测气液接触塔的流体力学和传质参数也有重要意义^[75]。因此,要综合评估技术性和经济性来选择合适的溶剂质量分数。



a—质量分数对 CO₂负载量的影响; b—质量分数对黏度的影响
图 8 复配溶剂质量分数对吸收性能的影响^[32-33,72-73]
Fig. 8 Effect of mixed solvent mass fraction on absorption properties^[32-33,72-73]

3.3 气液流速的影响

如图 9 所示,CO₂的吸收率随着气体流速的增加而减小^[76-78]。由于在高气体流速下,气体停留时间减少,胺分子与 CO₂之间的有效碰撞可能减少,导致 CO₂的吸收率显著降低^[79];而随着液体的流速增大,CO₂的吸收率增大^[76,78,80]。这是由于,随着液体流速的增加,液相中的传质阻力减小。此外,在较高的液体流速下,吸收后的 MEA 溶剂中 CO₂的负载量变化较小,MEA 的浓度较高,这也提高了 CO₂的吸收率^[80]。



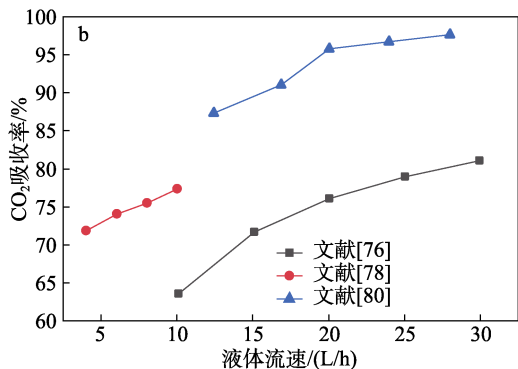


图 9 气体流速 (a) 和液体流速 (b) 对 CO₂ 吸收率的影响^[76-78,80]

Fig. 9 Effects of gas flow rate (a) and liquid flow rate (b) on CO₂ absorption rate^[76-78,80]

4 技术经济性能评价

对前述强化吸收 CO₂ 的典型 MEA 基多元复配溶剂进行了综合技术经济性能比较, 如图 10 所示。

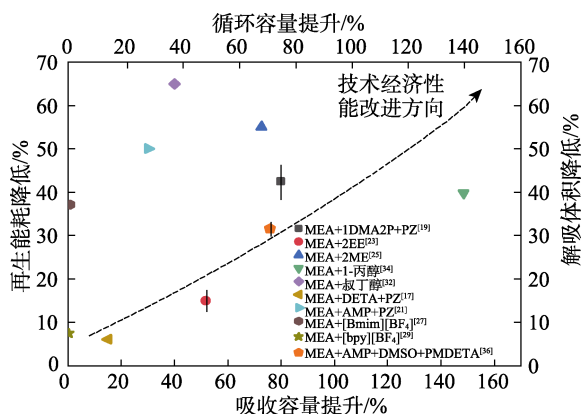


图 10 不同 MEA 复配溶剂性能分析^[17,19,21,23,25,27,29,32,34,36]

Fig. 10 Performance analysis of different MEA mixed solvents^[17,19,21,23,25,27,29,32,34,36]

从吸收性能上讲, MEA 多元复配溶剂的吸收性能提升明显。胺负载能力的总体趋势由小到大顺序是伯胺<受阻胺<仲胺<叔胺<二胺, 因此, 选择适当的溶剂与 MEA 复配, 可以提高其吸收性能^[81]。从再生性能上讲, MEA 无水、离子液体和相变吸收剂的再生能耗比 MEA 溶液有明显降低, 其主要原因是减少了水的显热, 对于 ILs 吸收剂, 还可通过在阴离子和阳离子上引入官能团来调节 ILs 与 CO₂ 的反应焓, 从而降低解吸热^[40,61-62]。总之, MEA 相变吸收剂的循环容量高、能耗低, 在吸收 CO₂ 后变成两相, 不再生的贫 CO₂ 相回吸收器, 只有富 CO₂ 相进入汽提塔进行热再生, 降低了再生能耗^[64]。在不再生的情况下将贫 CO₂ 相再循环至吸收器, 通过这种方式, 贫 CO₂ 相保持对 CO₂ 吸收的大驱动力以吸收更多的 CO₂^[82]。

5 结束语与展望

综上, MEA 与其他溶剂复配后吸收和再生性能提升明显, 是实现“碳中和”的有效解决方案。MEA+1DMA2P+PZ、MEA+2ME、MEA+[Bmim][BF₄] 和 MEA+1-丙醇体系的性能相对较好。MEA 与吸收容量更大的叔胺和空间位阻胺等复配后吸收性能会显著增强, 通过与其他溶剂复配来增加质子转移、替代溶液中的水降低显热、与非挥发比热容低的离子液体复配及分相后只有富 CO₂ 相进入解析塔再生等方式, 再生能耗明显降低。

随着 CO₂ 分压的升高, MEA 复配溶剂的 CO₂ 平衡溶解度升高; 温度升高, 平衡溶解度降低, 反应速率增加, 黏度降低; 溶剂质量分数增加, CO₂ 负载量增加, 黏度增大; 气体流速增加, CO₂ 吸收率降低; 液体流速增加, CO₂ 吸收率增加。但目前关键操作参数的评估主要集中于吸收性能, 未来需综合考虑操作参数对吸收和再生性能的影响。

未来, 可进一步研究以 MEA 溶液为基质, 甘油、海藻酸钠、PZ、1DMA2P 和 MAE 等新型绿色溶剂复配的吸收剂。同时, 由于多种溶剂的复配, MEA 复配溶剂通常需要较高的成本, 需探索经济性更低的溶剂与 MEA 复配以用于规模化工业应用。目前, 对 MEA 复配溶剂的稳定性、腐蚀性及溶剂降解的研究较少, 需全面评估复配溶剂的能源需求、环境影响和腐蚀效果。还需进一步在工业应用中全面评估其技术性、经济性和环境友好性, 以利于工业推广。

参考文献:

- [1] MORES P, SCENNA N, MUSSATI S. CO₂ capture using monoethanolamine (MEA) aqueous solution: Modeling and optimization of the solvent regeneration and CO₂ desorption process[J]. Energy, 2012, 45(1): 1042-1058.
- [2] ZHANG Y D (张引第), HU D D (胡多多), LIU C (刘畅), et al. Research progress of CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) technologies in petroleum and petrochemical industry[J]. Oil & Gas Storage and Transportation (油气储运), 2017, 36(6): 636-645.
- [3] CHAI S Y W, NGU L H, HOW B S. Review of carbon capture absorbents for CO₂ utilization[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2022, 12(3): 394-427.
- [4] ZHANG Z E, BORHANI T N, OLABI A G. Status and perspective of CO₂ absorption process[J]. Energy, 2020, 205: 118057.
- [5] MENG F Z, MENG Y, JU T Y, et al. Research progress of aqueous amine solution for CO₂ capture: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 168: 112902.
- [6] ZHANG J X (张金鑫). Research on CO₂ capture process by amine method and the technology of heat pump energy saving[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China) (中国石油大学: 华东), 2020.
- [7] SINGH P, NIEDERER J P M, VERSTEEG G F. Structure and activity relationships for amine-based CO₂ absorbents- II [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87(2A): 135-144.
- [8] PATEL H A, BYUN J, YAVUZ C T. Carbon dioxide capture

- adsorbents: Chemistry and methods[J]. *ChemSusChem*, 2017, 10(7): 1303-1317.
- [9] ZHANG R, YANG Q, LIANG Z W, *et al.* Toward efficient CO₂ capture solvent design by analyzing the effect of chain lengths and amino types to the absorption capacity, bicarbonate/carbamate, and cyclic capacity[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(10): 11099-11108.
- [10] HWANG J, KIM J, LEE H W, *et al.* An experimental based optimization of a novel water lean amine solvent for post combustion CO₂ capture process[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 174-184.
- [11] ALI SALEH BAIRQ Z, GAO H, HUANG Y, *et al.* Enhancing CO₂ desorption performance in rich MEA solution by addition of SO₄²⁻/ZrO₂/SiO₂ bifunctional catalyst[J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113440.
- [12] SAYARI A, BELMABKHOUT Y, DA'NA E. CO₂ deactivation of supported amines: Does the nature of amine matter?[J]. *Langmuir*, 2012, 28(9): 4241-4247.
- [13] MIRZAEI S, SHAMIRI A, AROUA M K. Simulation of aqueous blend of monoethanolamine and glycerol for carbon dioxide capture from flue gas[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(11): 9540-9553.
- [14] WANG B, WAN Y S, ZHENG Y L, *et al.* Alginate-based composites for environmental applications: A critical review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(4): 318-356.
- [15] YUAN Y, SHERMAN B, ROCHELLE G T. Effects of viscosity on CO₂ absorption in aqueous piperazine/2-methylpiperazine[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 2103-2120.
- [16] ZHU D C, FANG M X, LYU Z, *et al.* Selection of blended solvents for CO₂ absorption from coal-fired flue gas. Part 1: Monoethanolamine (MEA)-based solvents[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 26(1): 147-153.
- [17] LIU J (刘记). Experimental study on CO₂ absorption by amine-based multi-component absorbents[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (华中科技大学), 2019.
- [18] GAO H X, WU Z Y, LIU H L, *et al.* Experimental studies on the effect of tertiary amine promoters in aqueous monoethanolamine (MEA) solutions on the absorption/stripping performances in post-combustion CO₂ capture[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(12): 13883-13891.
- [19] HU X Y, HUANG J T, HE X W, *et al.* Analyzing the potential benefits of trio-amine systems for enhancing the CO₂ desorption processes[J]. *Fuel*, 2022, 316: 123216.
- [20] CHOI W J, SEO J B, JANG S Y, *et al.* Removal characteristics of CO₂ using aqueous MEA/AMP solutions in the absorption and regeneration process[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(7): 907-913.
- [21] NWAHOA C, SAIWAN C, TONTIWACHWUTHIKUL P, *et al.* Carbon dioxide (CO₂) capture: Absorption-desorption capabilities of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), piperazine (PZ) and monoethanolamine (MEA) tri-solvent blends[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 742-750.
- [22] KANG M K, JEON S B, CHO J H, *et al.* Characterization and comparison of the CO₂ absorption performance into aqueous, quasi-aqueous and non-aqueous MEA solutions[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 63: 281-288.
- [23] JIN X H, REN E Z, YANG Y. Effect of solvents on the phase separation behavior and CO₂ capture performance of MEA-based nonaqueous absorbents[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(13): 6965-6973.
- [24] BOUGIE F, POKRAS D, FAN X. Novel non-aqueous MEA solutions for CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 86: 34-42.
- [25] GUO H, LI C X, SHI X Q, *et al.* Nonaqueous amine-based absorbents for energy efficient CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 725-734.
- [26] EBRAHIMINEJADHASANABADI M, NELSON W M, NAIDOO P, *et al.* Investigation of mixed MEA-based solvents featuring ionic liquids and NMP for CO₂ capture: Experimental measurement of CO₂ solubility and thermophysical properties[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2021, 66(2): 899-914.
- [27] YANG J, YU X H, YAN J Y, *et al.* CO₂ capture using amine solution mixed with ionic liquid[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(7): 2790-2799.
- [28] YU G R, FAN S S, CHEN X C, *et al.* CO₂ absorption by binary mixture of ionic liquids-monoethanolamine at lower pressure[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 44: 52-58.
- [29] AKINOLA T E, OKO E, WANG M H. Study of CO₂ removal in natural gas process using mixture of ionic liquid and MEA through process simulation[J]. *Fuel*, 2019, 236: 135-146.
- [30] LYU B H, SHI Y, SUN C, *et al.* CO₂ capture by a highly-efficient aqueous blend of monoethanolamine and a hydrophilic amino acid ionic liquid [C₂OHmim][Gly][J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 270: 372-377.
- [31] HUANG Z L, DENG Z Y, MA J Y, *et al.* Comparison of mass transfer coefficients and desorption rates of CO₂ absorption into aqueous MEA+ionic liquids solution[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 117: 66-72.
- [32] TU W W (涂巍巍), FANG J W (方佳伟), LI Z S (李竹石), *et al.* Development of MEA phase change absorbent[J]. *Scientia Sinica Chimica (中国科学: 化学)*, 2018, 48(6): 641-647.
- [33] ZHANG W D, JIN X H, TU W W, *et al.* Development of MEA-based CO₂ phase change absorbent[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 316-323.
- [34] WANG R J, LIU S S, WANG L D, *et al.* Superior energy-saving splitter in monoethanolamine-based biphasic solvents for CO₂ capture from coal-fired flue gas[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 302-310.
- [35] YIN Y H, QIU A Q, GAO H X, *et al.* Experimental study of the mass transfer behavior of carbon dioxide absorption into ternary phase change solution in a packed tower[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 43: 135-142.
- [36] LI X L, ZHOU X B, WEI J W, *et al.* Reducing the energy penalty and corrosion of carbon dioxide capture using a novel nonaqueous monoethanolamine-based biphasic solvent[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 265: 118481.
- [37] WANG L D, ZHANG Y F, WANG R J, *et al.* Advanced monoethanolamine absorption using sulfolane as a phase splitter for CO₂ capture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(24): 14556-14563.
- [38] ZHANG X W, ZHANG R, LIU H L, *et al.* Evaluating CO₂ desorption performance in CO₂-loaded aqueous tri-solvent blend amines with and without solid acid catalysts[J]. *Applied Energy*, 2018, 218: 417-429.
- [39] CHOWDHURY F A, YAMADA H, HIGASHII T, *et al.* CO₂ capture by tertiary amine absorbents: A performance comparison study[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(24): 8323-8331.
- [40] KUSHIDA T, WADA S, FURUKAWA Y. Thermochemical model for evaluating CO₂ regeneration energy for amine absorbents[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 268: 118388.
- [41] LIN P H, WONG D S H. Carbon dioxide capture and regeneration with amine/alcohol/water blends[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 26: 69-75.
- [42] BARBAROSSA V, BARZAGLI F, MANI F, *et al.* Efficient CO₂ capture by non-aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and low temperature solvent regeneration[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(30): 12349-12355.
- [43] WEN H (温嵩), HAN W (韩伟), CHE C X (车春霞), *et al.* Progress of post-combustion carbon dioxide capture technology development and applications[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(8): 1584-1595, 1632.
- [44] HUANG K, CHEN F F, TAO D J, *et al.* Ionic liquid-formulated hybrid solvents for CO₂ capture[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2017, 5: 67-73.
- [45] ZHAO R L (赵然磊), MA W T (马文涛), XU X (徐晓), *et al.* Research progress of chemical absorbents for carbon dioxide capture[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2023, 40(1): 1-9.
- [46] XIA P W (夏裴文), DING B H (丁保宏), ZHANG P J (张鹏军), *et al.* Preparation of amino acid ionic liquids and its absorption of

- carbon dioxide[J]. *Speciality Petrochemicals (精细石油化工)*, 2019, 36(4): 74-78.
- [47] LYU B H, JING G H, QIAN Y H, *et al.* An efficient absorbent of amine-based amino acid-functionalized ionic liquids for CO₂ capture: High capacity and regeneration ability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 289: 212-218.
- [48] ZHANG X P, ZHANG X C, DONG H F, *et al.* Carbon capture with ionic liquids: Overview and progress[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(5): 6668-6681.
- [49] BERNARD F L, VECCHIA F D, ROJAS M F, *et al.* Anticorrosion protection by amine-ionic liquid mixtures: Experiments and simulations[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2016, 61(5): 1803-1810.
- [50] JI L, ZHENG X, ZHANG L, *et al.* Feasibility and mechanism of an amine-looping process for efficient CO₂ mineralization using alkaline ashes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430(4): 133118.
- [51] CHEN S P X, HAN X M, SUN X Y, *et al.* The comparative kinetics study of CO₂ absorption into non-aqueous DEEA/MEA and DMEA/MEA blended systems solution by using stopped-flow technique[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 386: 121295.
- [52] ZHANG R, LUO X, YANG Q, *et al.* Analysis for the speciation in CO₂ loaded aqueous MEDA and MAPA solution using ¹³CNMR technology[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 71: 1-8.
- [53] WANG M H, JOEL A S, RAMSHAW C, *et al.* Process intensification for post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A critical review[J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 275-291.
- [54] ZHANG X W, ZHU Z Q, SUN X Y, *et al.* Reducing energy penalty of CO₂ capture using Fe promoted SO₂/ZrO₂/MCM-41 catalyst[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(10): 6094-6102.
- [55] XIAO M, ZHENG W C, LIU H L, *et al.* Thermodynamic analysis of carbamate formation and carbon dioxide absorption in *N*-methylaminoethanol solution[J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 116021.
- [56] KADIWALA S, RAYER A V, HENNI A. Kinetics of carbon dioxide (CO₂) with ethylenediamine, 3-amino-1-propanol in methanol and ethanol, and with 1-dimethylamino-2-propanol and 3-dimethylamino-1-propanol in water using stopped-flow technique[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 179: 262-271.
- [57] KORTUNOV P V, SISKIN M, BAUGH L S, *et al.* *In situ* nuclear magnetic resonance mechanistic studies of carbon dioxide reactions with liquid amines in non-aqueous systems: Evidence for the formation of carbamic acids and zwitterionic species[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(9): 5940-5966.
- [58] OEXMANN J, KATHER A. Minimising the regeneration heat duty of post-combustion CO₂ capture by wet chemical absorption: The misguided focus on low heat of absorption solvents[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(1): 36-43.
- [59] HELDEBRANT D J, KOECH P K, RAINBOLT J E, *et al.* Performance of single-component CO₂-binding organic liquids (CO₂ BOLs) for post combustion CO₂ capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(3): 794-800.
- [60] CHIU L F, LIU H F, LI M H. Heat capacity of alkanolamines by differential scanning calorimetry[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1999, 44(3): 631-636.
- [61] PAULECHKA Y U. Heat capacity of room-temperature ionic liquids: A critical review[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2010, 39(3): 033108.
- [62] WANG C M, LUO X Y, ZHU X, *et al.* The strategies for improving carbon dioxide chemisorption by functionalized ionic liquids[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(36): 15518-15527.
- [63] XU L J (徐令君), QI Y, WANG S J (王淑娟). Absorption performance and stratification mechanism of biphasic CO₂ absorbent [Bmim][BF₄]/MEA aqueous mixtures[J]. *CIESC Journal (化工学报)*, 2018, 69(12): 5112-5119.
- [64] WANG X F, AKHMEDOV N G, HOPKINSON D, *et al.* Phase change amino acid salt separates into CO₂-rich and CO₂-lean phases upon interacting with CO₂[J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 41-47.
- [65] TAN J, XU J H, WANG K, *et al.* Rapid measurement of gas solubility in liquids using a membrane dispersion microcontactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(20): 10040-10045.
- [66] LIU F, FANG M X, YI N T, *et al.* Research on alkanolamine-based physical-chemical solutions as biphasic solvents for CO₂ capture[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(11): 11389-11398.
- [67] LING H, LIU S, GAO H X, *et al.* Solubility of N₂O, equilibrium solubility, mass transfer study and modeling of CO₂ absorption into aqueous monoethanolamine (MEA)/1-dimethylamino-2-propanol (DMA2P) solution for post-combustion CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 232: 115957.
- [68] SHI X Q, DONG Y, SHEN S F. Densities and viscosities of partially carbonated nonaqueous blends of 2-(methylamino)ethanol with 2-alkoxyethanols at temperatures of (293.15 to 353.15) K[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2022, 164: 106615.
- [69] KARUNARATHNE S S, EIMER D A, ØI L E. Density, viscosity and free energy of activation for viscous flow of CO₂ loaded 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), monoethanol amine (MEA) and H₂O mixtures[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 311: 113286.
- [70] XU L J, WANG S J. Density, viscosity, and N₂O solubility of aqueous solutions of MEA, BmimBF₄, and their mixtures from 293.15 to 333.15 K[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2018, 63(8): 2708-2717.
- [71] IDRIS Z, KUMMAMURU N B, EIMER D A. Viscosity measurement of unloaded and CO₂-loaded aqueous monoethanolamine at higher concentrations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 243: 638-645.
- [72] ZHANG W D, JIN X H, TU W W, *et al.* A novel CO₂ phase change absorbent: MEA/1-propanol/H₂O[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(4): 4273-4279.
- [73] AMUNDSEN T G, ØI L E, EIMER D A. Density and viscosity of monoethanolamine plus water plus carbon dioxide from (25 to 80) °C[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2009, 54(11): 3096-3100.
- [74] FU K, ZHANG P, WANG L M, *et al.* Viscosity of 2-ethylhexan-1-amine (EHA)-diglyme, EHA-triglyme and EHA-tetraglyme non-aqueous solutions and its effect on initial absorption rate[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 302: 112518.
- [75] SONG D, SEIBERT A F, ROCHELLE G T. Mass transfer parameters for packings: Effect of viscosity[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(2): 718-729.
- [76] BOZONC A C, CORMOS A M, DRAGAN S, *et al.* Dynamic modeling of CO₂ absorption process using hollow-fiber membrane contactor in MEA solution[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7241.
- [77] MA H J, CHEN Y S. Evaluation of effectiveness of highly concentrated alkanolamine solutions for capturing CO₂ in a rotating packed bed[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 55: 55-59.
- [78] ZHANG H, XUE K L, CHENG C, *et al.* Study on the performance of CO₂ capture from flue gas with ceramic membrane contactor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 265: 118521.
- [79] KORONAKI I P, PRENTZA L, PAPAETHIMIOU V D. Parametric analysis using AMP and MEA as aqueous solvents for CO₂ absorption[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 126-135.
- [80] WANG Z, FANG M X, YU H, *et al.* Experimental and modeling study of trace CO₂ removal in a hollow-fiber membrane contactor, using CO₂-loaded monoethanolamine[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(50): 18059-18070.
- [81] RAYER A V, SUMON K Z, SEMA T, *et al.* Part 5c: Solvent chemistry: Solubility of CO₂ in reactive solvents for post-combustion CO₂[J]. *Carbon Management*, 2012, 3(5): 467-484.
- [82] LIANG Z W, RONGWONG W, LIU H L, *et al.* Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 26-54.