

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410225

叔丁氨基乙醇基强化解吸型贫水 吸收剂研究

叶 毅¹, 徐国玺², 计林坤², 刘龙杰¹, 范文琦¹, 宁晨君¹, 杨孝林³,
田建锋³, 张忠林³, 杨 斌³, 贾文邦³, 赵兴雷¹

(1.中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 昌平 102206;

2.北京化工大学化学工程学院, 北京 100029;

3.青海油田格尔木炼油厂, 青海 格尔木 816000)

[摘要]随着全球气候变化愈演愈烈,碳捕集、利用与封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS)成为实现“碳中和”目标的关键手段。针对传统吸收剂在CO₂捕集中存在的运行稳定性差和再生能耗高等问题,开发了一种新型贫水复配吸收剂,该吸收剂以叔丁氨基乙醇(TBAE)为主要成分,通过组合不同配比的胺和稳定剂优化配比,按总胺质量分数30%混合,以质量分数为30%的传统吸收剂乙醇胺(MEA)为参考标准,进行了CO₂吸收-解吸性能、腐蚀情况和小试放大实验的测试研究,旨在提高CO₂的吸收容量和解吸速率的同时降低再生能耗和提升溶剂在装置中稳定运行的能力。实验结果表明:当配方为20%(质量分数,下同)TBAE+10%3-甲胺基-1-丙醇+50%N-甲基吡咯烷酮时,其饱和CO₂吸收量为3.10 mol/L,循环吸收量为2.97 mol/L,腐蚀速率为0.016 2 mm/a,再生能耗为4.00 GJ/t;与质量分数30%MEA吸收剂相比,CO₂饱和吸收量提高了12.3%,循环量提升了22.7%,腐蚀速率降低了60.3%,再生能耗降低了36%。该新型贫水复配吸收剂性能良好,并在10 t/a碳捕集小试装置中长时间稳定,且较低能耗的运行行为该吸收剂将来投入工业使用积累了坚实基础。

[关键词]二氧化碳捕集;混合胺吸收剂;再生能耗;运行稳定性;小试放大实验

[引用本文格式]叶毅,徐国玺,计林坤,等.叔丁氨基乙醇基强化解吸型贫水吸收剂研究[J].热力发电,2025,54(6):97-104.
YE Yi, XU Guoxi, JI Linkun, et al. Study on basic performance enhancement for desorption type water-poor compound absorption agent by tert-butyl aminoethanol[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 97-104.

Study on basic performance enhancement for desorption type water-poor compound absorption agent by tert-butyl aminoethanol

YE Yi¹, XU Guoxi², JI Linkun², LIU Longjie¹, FAN Wenqi¹, NING Chenjun¹, YANG Xiaolin³,
TIAN Jianfeng³, ZHANG Zhonglin³, YANG Bin³, JIA Wenbang³, ZHAO Xinglei¹

(1.China National Petroleum Corporation Safety and Environmental Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102206, China;

2.College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3.Golmud Refinery, Qinghai Oilfield, Golmud 816000, China)

Abstract: As the global climate change intensifies, carbon capture, utilization and storage technology (CCUS) has become a crucial means to achieve the goal of carbon neutrality. Focusing on addressing the issues of poor operational stability and high regeneration energy consumption in conventional absorption agents, a new water-poor compound absorption agent was developed, which is mainly composed of tert-butyl aminoethanol (TBAE). The absorption agent was optimized by combining different ratios of amines and stabilizers and was

收稿日期: 2024-10-18 网络首发日期: 2025-04-17

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ0101)

Supported by: Major Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation (2023ZZ0101)

第一作者简介: 叶毅(1991),男,博士,高级工程师,主要研究方向为CO₂捕集, yeyi@cnpc.com.cn.

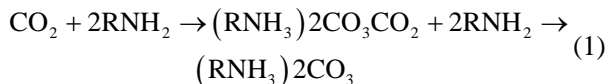
mixed at a total amine mass fraction of 30%. The CO₂ absorption-desorption performance, corrosion situation, and small-scale upscaling experiment were tested and investigated using 30% (mass fraction) conventional absorption agent ethanolamine (MEA) as a reference standard. The aim is to enhance the CO₂ absorption capacity and desorption rate while reducing regeneration energy consumption and improving the stability of the solvent in the device. The experimental results indicate that, when the formula is 20% TBAE + 10% 3-methyl-1-propanol + 50% N-methylpyrrolidone, the saturated CO₂ absorption capacity is 3.10 mol/L, the cyclic absorption capacity is 2.97 mol/L, the corrosion rate is 0.016 2 mm/a, and the regeneration energy consumption is 4.00 GJ/t. Compared with the 30% MEA absorption agent, the saturated CO₂ absorption capacity increases by 12.3%, the cyclic capacity rises by 22.7%, the corrosion rate reduces by 60.3%, and the regeneration energy consumption decreases by 36%. The excellent basic performance of the new water-poor compound absorption agent and its long-term stable and low-energy operation in a 10 t/a carbon capture small-scale pilot plant have laid a solid foundation for its future industrial application.

Key words: carbon dioxide capture; blended amine absorbents; regeneration energy consumption; operational stability; pilot scale-up experiments

根据联合国最新的《全球气候状况》数据, 2023 年的气候变化指标已经达到了“爆表”水平, 温室气体水平、地表温度、海洋热量和酸化、海平面上升等纪录再次被打破^[1]。中国作为世界上最大的二氧化碳排放国, 排放量占全球近 30%, 且煤炭占全球消费总量的 50% 以上^[2]。中国已宣布了 2030 年前实现“碳达峰”和 2060 年前实现“碳中和”的目标。为实现这些目标, 中国迫切需要在碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 技术上取得突破, 特别是在开发新型复配吸收剂方面^[3-6]。

化学吸收法作为 CO₂ 捕集的主流技术之一^[7], 其核心在于高效且低能耗吸收剂的开发^[8-11]。传统吸收剂如乙醇胺 (MEA), 虽然捕集效率高, 但在解吸过程中能耗较高, 且存在腐蚀设备的风险, 这些问题限制了其在工业规模上的应用。因此, 开发新型高效、再生能力强且具有良好耐腐蚀性能的吸收剂成为了研究的重点^[12-13]。

在化学吸收过程中, CO₂ 与胺基 (-NH₂) 发生反应生成碳酸盐或碳酸氢盐^[14]。这个过程可以通过以下反应式表示:



式中: R 代表有机胺分子的烷基链。这个反应可逆, 意味着在适当的条件下, 吸收剂可以释放 CO₂ 并恢复其原始形态, 以便再次使用^[15]。

有机胺化学吸收法的核心在于吸收剂的选择, 其中醇胺溶液是化学吸收法的核心, 包括伯胺、仲胺、叔胺以及空间位阻胺等, 每种类型的胺基对 CO₂ 的吸收能力和反应速率都有所不同^[16-17]。这些吸收剂具有较高的 CO₂ 吸收能力和选择性, 但也存在一

些局限性。为此, 研究者们开发了多种新型吸收剂, 如空间位阻胺, 这类吸收剂具有更高的理论 CO₂ 吸收量和较低的再生能耗, 但价格昂贵且挥发损耗问题明显^[18]。Sun 等人^[19]的实验结果表明, 混合胺吸收剂通过结合不同特性的吸收剂, 可以提高吸收剂对 CO₂ 的吸收量和速率^[20-23], 同时降低吸收剂的再生能耗^[24-25], 提高工业应用的经济性。

尽管复配技术提供了改善吸收剂性能的潜力, 但也存在一些挑战, 比如需要不断地优化复配比例, 找到最佳胺基比例以实现最佳性能, 还需要确保不同胺基的有机胺在混合后不会发生不良反应, 并且要确保复配吸收剂的生产成本和操作成本在工业应用中可行。

在众多潜在的吸收剂中, 叔丁氨基乙醇 (TBAE) 因其独特的分子结构和化学性质被选作本研究的主吸收剂。首先, TBAE 分子中的空间位阻效应有利于减少胺分子间的相互作用, 从而增加与 CO₂ 的反应机会; 其次, TBAE 作为仲胺可以拥有和 MEA 相似的脱碳能力, 在解吸过程中表现出较低的再生能耗, 这对于降低整体 CO₂ 捕集成本至关重要^[26-27]。本文结合不同配比的有机胺和稳定剂, 按不同质量分数复配成混合胺吸收剂, 同时将传统单组分吸收剂质量分数 30% MEA 作为参考标准, 对复配有机胺吸收剂的吸收-解吸能力、腐蚀情况和解吸能耗进行系统的研究。

1 实验方法

1.1 实验试剂及仪器

实验所用试剂见表 1。吸收-解吸实验装置如图 1 所示, 腐蚀实验装置如图 2 所示, 10 t/a 碳捕集小试装置如图 3 所示。

表1 实验所用试剂
Tab.1 Reagents used in the experiment

实验试剂	纯度	CAS 编号	供应商
MEA	≥99%	141-43-5	国药试剂
3-甲胺基-1-丙醇 (3-MAP)	CP	42055-15-2	麦克林
叔丁氨基乙醇 (TBAE)	CP	4620-70-6	沪试
乙二醇	CP	107-21-1	沪试
1,2 丙二醇	CP	57-55-6	沪试
环丁酮	≥99%	126-33-0	沃凯
N-甲基吡咯烷酮	≥99%	872-50-4	沃凯
CO ₂ 标准气	13%	124-38-9	
CO ₂	≥99%	124-38-9	
N ₂	≥99%	7727-37-9	
O ₂	≥99%	7782-44-7	



图1 吸收-解吸实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the absorption and desorption experimental setup



图2 腐蚀实验装置

Fig.2 Schematic diagram of the corrosion test setup



图3 10 t/a 碳捕集小试装置

Fig.3 Schematic diagram of the 10 t/a carbon capture pilot device

1.2 实验流程

1.2.1 吸收-解吸实验

吸收-解吸实验配方见表2, 共5组150 mL溶液。取150 mL配置好的吸收剂加入反应釜, 设定搅拌速度和吸收温度为40 °C。用氮气吹扫体系以清除杂气, 标定二氧化碳分析仪。设定N₂和CO₂流量, 保持进气口处CO₂质量分数约为13%。吸收剂达到设定温度后, 开始吸收过程, 气体分析仪记录CO₂含量, 吸收至饱和后关闭CO₂进气阀, 用N₂吹扫管路中残留的CO₂, 同时关闭油浴循环。吸收温度降至40 °C后, 开始解吸过程, 设定解吸温度为110 °C, 氮气流量为2 L/min。解吸2.5 h后停止加热, 记录解吸出的CO₂量。每个样品重复5次实验, 取平均值。

表2 第1组实验配方

Tab.2 The first set of experimental formulations

编号	复配吸收剂配比
I	30%MEA
II	20%TBAE+10%3-MAP
III	15%TBAE+15%3-MAP
IV	10%TBAE+20%3-MAP
V	30%3-MAP

在II—V这4组吸收剂配方中, 综合CO₂负载量、循环量、吸收和解吸速度等选出最优的配方II, 再分别添加50%的1,2丙二醇、N-甲基吡咯烷酮、乙二醇、环丁酮, 共配置4组150 mL的复配溶液(表3), 再重复上述吸收-解吸实验过程, 每个样品测试5次, 取平均值作为最终结果。

表3 第2组实验配方

Tab.3 The second set of experimental formulations

编号	复配吸收剂配比
II	
①	50% 1,2 丙二醇
②	20%TBAE+10%3-MAP 50% N-甲基吡咯烷酮
③	50%乙二醇
④	50%环丁酮

1.2.2 腐蚀实验

失重法是评价溶液对设备腐蚀性最直接的方法, 可以很好地模拟吸收剂解吸的过程^[28]。实验步骤如下: 实验开始前先用不同粒度砂纸对碳钢表面进行逐级打磨, 以去除表面倒刺以及腐蚀产物, 依次用去离子水、乙醇清洗, 干燥后用分析天平称其质量。将抛光后的碳钢样品称重后放入高温高压反应釜

的聚四氟乙烯 (PTFE) 内衬中, 并完全浸没在 20 mL CO_2 饱和溶液中, 以确保内衬充满, 无空气滞留。然后, 根据取样时间对反应器进行编号, 并用夹杆拧紧, 以确保密封性。将反应器置于油浴振荡器中并加热至 150 °C 的实验温度, 4 周后将相应的反应器从油浴恒温器中取出。实验结束后, 将试片取出, 用去离子水和乙醇冲洗掉表面残留胺液和腐蚀产物, 干燥后用分析天平记录其质量。

根据腐蚀前后的质量对比, 计算不同吸收剂对 20 号碳钢的腐蚀速率, 所有样品均重复进行 2 次实验, 以保证实验数据的准确性^[29]。碳钢腐蚀速率计算公式为:

$$v_{\text{CR}} = \frac{\lambda(w_1 - w_2)}{A \cdot T \cdot D} \quad (2)$$

式中: v_{CR} 为碳钢腐蚀速率, mm/a; λ 为常数, 87 600; w_1 、 w_2 为碳钢腐蚀前后质量, g; A 为碳钢表面积, 本实验 A 为 31.6 cm^2 ; T 为腐蚀时间, h; D 为碳钢密度, 本实验 D 为 7.85 g/cm^3 。

2 实验结果讨论

吸收剂在实际使用过程中要综合考虑完整吸收-解吸过程的饱和和负载量、循环量、解吸率、腐蚀性以及再生效率和再生能耗等^[30-33]。

2.1 吸收性能比较

本研究选取了质量分数为 30% 的 MEA 作为对照组, 在 40 °C 下, 对比了不同配方吸收剂对 CO_2 的吸收效能, 包括其吸收量和速率。不同溶剂 CO_2 吸收过程吸收速率随时间的变化情况如图 4 所示。

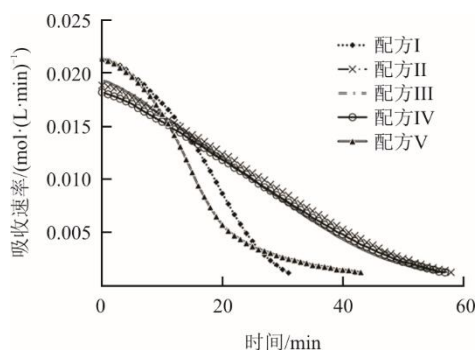


图 4 不同溶剂 CO_2 吸收过程吸收速率随时间变化情况
Fig.4 Variations of absorption rate over time during the absorption process in different solvents

通过图 4 的数据可知: 在实验初期, 由于胺类溶剂与 CO_2 的化学反应占主导地位, 且吸收剂较为充足, 因此反应速度较快, 导致 CO_2 负荷量迅速增加; 随着反应的持续, 溶液中的有机胺逐渐减少,

反应速度放缓, 负荷量增长速度也逐步减缓; 最终, 当溶液中的有机胺与 CO_2 完全反应后, 吸收速度逐渐稳定, 此时以物理吸收为主, 速度较为缓慢。配方 I 和 V 在吸收初期就展现出较高的吸收速率, 但这种高速率无法持续, 随着时间的推移, 吸收速率在中期阶段急剧下降至较低水平。这表明, 单一胺类吸收剂在吸收过程中的稳定性和持久性有限。相比之下, 复配吸收剂在吸收初期维持了较高的解吸速率, 并随着时间的推移缓慢下降, 显示出更佳吸收稳定性和持久性。

图 5 展示了实验中不同溶剂配方在吸收过程中达到的 CO_2 饱和和负载量。饱和和负载量是指在一定条件下, 吸收剂吸收 CO_2 的最大量, 是衡量吸收剂性能的关键指标之一。从图 5 中可以明显看出, 配方 II 的吸收剂在所有测试配方中表现最佳, 其 CO_2 负载量最高。由于配方 II 中 TBAE 的存在提供了空间位阻效应, 这有助于减少胺分子之间的相互作用, 从而使得更多的胺分子能够接触到 CO_2 , 增加了与 CO_2 的反应机会。同时, 3-MAP 的加入提供了额外的反应位点, 其分子结构中的仲胺基团对 CO_2 具有较高的反应活性, 这两者的协同效应导致了高负载量^[34]。单一的 3-MAP 虽然活性高, 解吸效果好, 但没有 TBAE 的空间位阻效应来增加反应界面, 其 CO_2 饱和和负载量也很低。与其他配方相比, 配方 II 的 CO_2 负载量显著更高, 这表明通过合理选择和配比不同的胺类化合物, 可以显著提高吸收剂的性能。

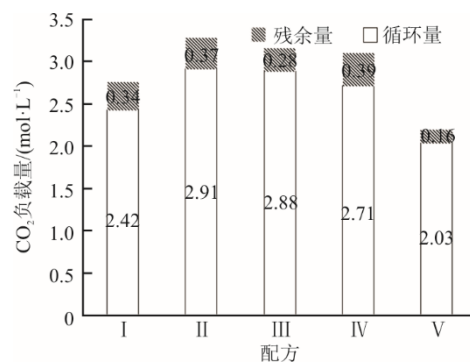


图 5 不同溶剂 CO_2 负载量情况
Fig.5 The CO_2 loading of different solvents

2.2 解吸性能比较

在评估工业应用中的吸收剂效率时, 除了吸收性能外, 解吸性能也是一个关键指标。解吸过程是将吸收剂中的 CO_2 释放出来, 是吸收剂从富液向贫液转换的过程, 使吸收剂得以再生并重复利用, 继续参与下一轮的 CO_2 捕获^[35]。图 6 为不同溶剂解吸速率随时间的变化情况。由图 6 可以看出, 所有配

方的解吸速率都呈现先上升后下降,然后再逐渐稳定这一趋势。但其中配方 I 和 V 最后稳定的解吸速率均低于复配溶剂,这表明单一胺类吸收剂在解吸过程中的稳定性和持久性有限。相比之下,复配吸收剂显示出更佳的解吸持久性。在 CO₂ 捕集过程中,3-MAP 由于其分子结构中包含 1 个仲胺基团和 1 个羟基基团,通常显示出比 MEA 更高的反应活性,这意味着在相同的再生条件下,3-MAP 能够更快地释放 CO₂。此外,当 TBAE 作为复配溶剂的一部分时,随着 TBAE 比例的增加,解吸时间减少。在解吸过程中,氨基甲酸酯在加热或通入惰性气体的条件下,与质子化的 TBAE (TBAEH⁺) 反应,分解释放出 CO₂。这一步骤主要受到 TBAE 空间位阻效应的影响,使得解吸过程更加容易进行,从而降低了再生能耗^[36],有助于缩短再生时间和提高有机胺的循环量。配方 V 有最高的解吸速率 17.4 mmol/(L·min),其次是配方 II 的 16.8 mmol/(L·min)。此外,配方 II 较其他配方而言,其解吸速率始终保持在较高水平。

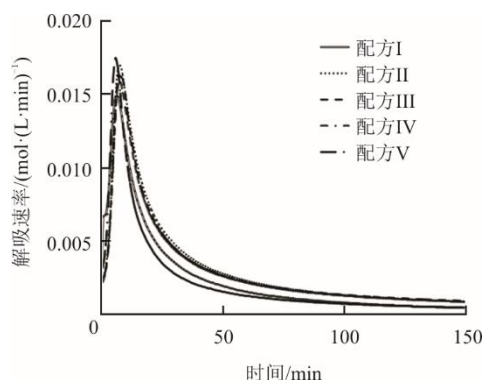


图 6 不同溶剂解吸速率随时间的变化情况

Fig.6 Variations of desorption rates of different solvents over time

2.3 贫水吸收剂性能

为了进一步提升吸收剂的性能,综合吸收、解吸情况选择在配方 II 的基础上分别添加质量分数 50% 的 1,2 丙二醇、N-甲基吡咯烷酮、乙二醇、环丁砜^[37-38] (分别记作配方①、配方②、配方③、配方④),共配置 4 组 150 mL 的复配溶液,重复上述吸收-解吸实验过程,得到的 CO₂ 负载量情况如图 7 所示。其中,1,2 丙二醇和乙二醇这些多元醇类稳定剂通过与 CO₂ 和胺反应生成较稳定的碳酸酯或碳酸氢盐,从而有助于提高吸收容量;N-甲基吡咯烷酮可增加吸收剂的物理吸收能力,提高 CO₂ 的吸收速率,同时促进解吸过程,降低解吸能耗;环丁砜作为一种高沸点、低极性的溶剂,可以提高 CO₂ 在

吸收剂中的溶解度,改善传热性能,降低解吸温度,从而减少能耗。从图 7 可以得出,配方②具有最高的循环吸收量和较好的 CO₂ 负载量其饱和 CO₂ 吸收量达到 3.10 mol/L,循环吸收量达到 2.97 mol/L,在添加 50%N-甲基吡咯烷酮后,溶剂的残余量下降了 65%,溶剂的循环吸收量提升了 2%。

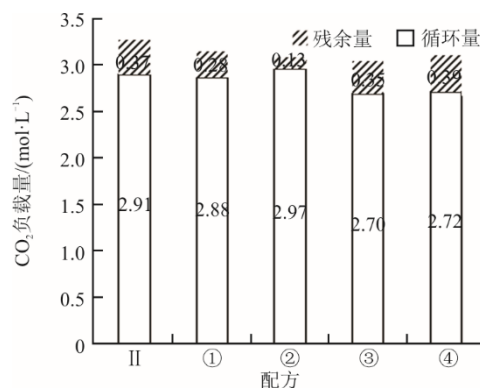


图 7 不同再生吸收剂 CO₂ 负载量情况

Fig.7 The CO₂ loadings of different regenerative absorbents

2.4 腐蚀情况比较

在考虑吸收剂性能的同时,其对设备的腐蚀性也同样重要。醇胺溶液与 CO₂ 反应过程中生成的氨基甲酸盐产物,以及吸收剂降解产生的降解产物,会对设备造成严重腐蚀,缩短了可循环时间,增大了设备成本^[39]。因此,在保证吸收量、解吸量和循环量的同时,找到一种腐蚀速率小的吸收剂也非常关键^[40-41]。为了探究不同吸收剂的腐蚀速率,本文进行了吸收剂腐蚀实验。温度越高,吸收剂的腐蚀速率越大,所以该实验选择常用的解吸温度 100 °C。将吸收剂通 CO₂ 至饱和加入反应釜中,在摇床中振荡 4 周,观察其腐蚀效果。不同吸收剂配方的腐蚀速率如图 8 所示。

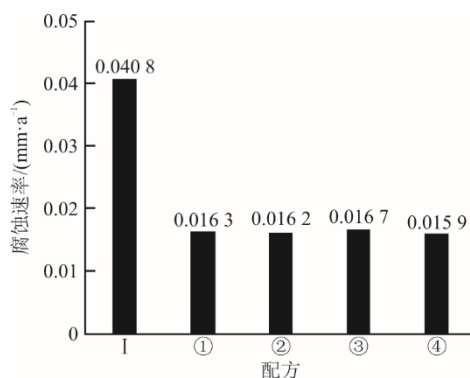


图 8 不同吸收剂配方的腐蚀速率

Fig.8 Corrosion rates of different absorbent formulations

由图 8 可知,在添加稳定剂后,复配吸收剂的腐蚀速率都大幅降低配方②的腐蚀速率为 0.0162 mm/a。

这是由于稳定剂可以中和胺溶液中因吸收 CO₂ 而产生的酸性物质, 从而减少酸性环境对金属设备的腐蚀。另一方面, 其会改变溶液的物理性质, 如黏度和密度, 从而减少了胺的挥发, 改善了传热效率, 减少局部过热现象, 降低溶液反应温度和腐蚀风险。还可能会在金属表面形成一层保护膜, 这层膜可以隔离金属与腐蚀性溶液的直接接触, 减缓腐蚀速率。

2.5 再生能耗情况

为了将复配吸收剂投入工业应用, 本研究在实验室对复配吸收剂进行基本性能测试后, 通过放大小试实验, 进一步测定了复配吸收剂的再生能耗情况和长时间运行情况。实验在烟气处理量为 10 t/a 的碳捕集小试装置中进行, 以表 4 中的目标运行参数测试 30%MEA 和配方②各 7 天。

表 4 目标运行参数
Tab.4 The target operational parameters

序号	项目	数值
1	混合气体积分数/%	13
2	气体流量/(m ³ ·h ⁻¹)	3
3	捕集率/%	>96
4	吸收塔温度/℃	40
5	吸收塔压力/kPa	15

其中 30%MEA 的最优运行参数为: 解吸压力 40 kPa, 再沸器功率 1.24 kW, 液体流量 12 L/h。配方②的最优运行参数为: 解吸压力 30 kPa, 再沸器功率 0.78 kW, 液体流量 10 L/h。

根据 10 t/a 碳捕集小试装置的实验数据, 可以得出配方②和 30%MEA 的再生能耗在相同捕集率范围下随运行时间变化的趋势, 结果如图 9、图 10 所示。其中, 捕集率、再生能耗计算式为^[42]:

$$C = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \quad (3)$$

$$E = \frac{Q}{m} \quad (4)$$

式中: C 为捕集率, %; c_1 为入口 CO₂ 浓度, mol/L; c_2 为出口 CO₂ 浓度, mol/L; E 为再生能耗, GJ/t; Q 为再生过程中消耗的能量, kW; m 为捕集的 CO₂ 质量, t。

图 9 所示的捕集率随运行时间的变化, 揭示了吸收剂性能随时间的衰退现象。这种趋势可能是由于吸收剂在经历多次吸收-解吸循环过程中, 遭受氧化降解和热降解的影响, 导致有效胺含量下降。

这些降解反应消耗了吸收剂中的活性胺基团, 减少了参与 CO₂ 反应的胺分子数量, 从而降低了吸收剂的捕集效率。此外, 降解产物可能还会在吸收剂中形成副产物, 这些副产物可能占据反应位点或改变吸收剂的物理化学性质, 进一步影响其性能。

在 CO₂ 捕集率大于 96% 的情况下, 复配吸收剂小试装置再生能耗随时间变化曲线如图 10 所示。由图 10 中的数据可知, 30%MEA 的再生能耗约为 6.29 GJ/t, 配方②的再生能耗约为 4.00 GJ/t, 新配方可以显著降低再生能耗。与 30% MEA 相比, 优化后的贫水型吸收剂配方②再生能耗减少了约 36%。这一结果表明, 稳定剂的加入可以有效减缓吸收剂的降解速率, 保持其性能, 从而在减少能耗的同时, 提高了 CO₂ 捕集过程的经济性和操作稳定性。

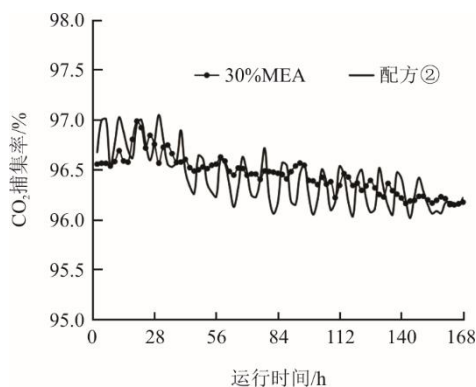


图 9 复配吸收剂小试装置捕集率随时间变化曲线
Fig.9 Change curve of capture rate of compound absorbent in small-scale test device with time

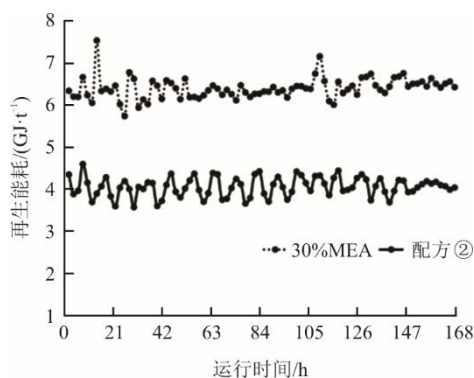


图 10 复配吸收剂小试装置再生能耗随时间变化曲线
Fig.10 Changes of regeneration energy consumption of the compound absorbent in small-scale test device with time

3 结 论

1) 在对 9 种吸收剂配方进行实验评估后, 确定了配方②, 即 20%TBAE+10%3-MAP+50%N-甲基吡咯烷酮性能最优, 其饱和 CO₂ 吸收量达到

3.10 mol/L, 循环吸收量达到 2.97 mol/L, 腐蚀速率为 0.016 2 mm/a。而 30%的 MEA 吸收剂, 其饱和 CO₂ 吸收量达到 2.76 mol/L, 循环吸收量达到 2.42 mol/L, 腐蚀速率为 0.040 8 mm/a。相较而言, 新配方的饱和吸收量提高了 12.3%, 循环量提升了 22.7%, 腐蚀速率降低了 60.3%。

2) 本文在实验室研究的基础上, 开展了小试装置放大实验。在 CO₂ 捕集率大于 96%的情况下, 配方②的再生能耗为 4.00 GJ/t, 30%MEA 的再生能耗为 6.29 GJ/t, 新配方的再生能耗降低了 36%。

3) 该新型贫水复配吸收剂可以长时间稳定运行, 为进一步的放大实验和优化运行参数提供了重要的参考数据。该吸收剂具备良好的吸收性能, 较低的再生能耗和稳定运行的能力, 具备一定的工业应用价值和工业化前景。

[参 考 文 献]

- [1] ZHU L, ZHU D, STEVEN J D, et al. Global carbon emissions in 2023[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5: 253-254.
- [2] JEFFRY L, ONG M Y, NOMANBHAY S, et al. Greenhouse gases utilization: a review[J]. *Fuel*, 2021, 301: 121017.
- [3] GUAN Y, XIAO Y, RONG B, et al. Heterogeneity and typology of the city-level synergy between CO₂ emission, PM_{2.5}, and ozone pollution in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 136871.
- [4] LI Q, CHEN Z A, ZHANG J T, et al. Positioning and revision of CCUS technology development in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 46: 282-293.
- [5] 康宇龙, 白艳伟, 江绍静. 延长石油碳捕集, 利用与封存全流程技术特色与工程实践[J]. *应用化工*, 2020, 49(7): 1.
KANG Yulong, BAI Yanwei, JIANG Shaojing. Technical characteristics and engineering practice of the whole process of carbon capture, utilization and storage of petroleum[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(7): 1.
- [6] SINGH P, HAINES M. A review of existing carbon capture and storage cluster projects and future opportunities[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 7247-7260.
- [7] REINER D M. Learning through a portfolio of carbon capture and storage demonstration projects[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(1): 1-7.
- [8] 张嘉伟, 顾文波, 张富龙. 基于化学吸收法的二氧化碳捕集技术研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(4): 96-106.
ZHANG Jiawei, GU Wenbo, ZHANG Fulong. Research progress of carbon dioxide capture technology based on chemical absorption method[J]. *Low Carbonization Science and Chemical Industry*, 2023, 48(4): 96-106.
- [9] BARKER R, HUA Y, NEVILLE A. Internal corrosion of carbon steel pipelines for dense-phase CO₂ transport in carbon capture and storage (CCS): a review[J]. *International Materials Reviews*, 2017, 62(1): 1-31.
- [10] 张卫风, 周武, 王秋华. 相变吸收捕集烟气中 CO₂ 技术的发展现状[J]. *化工进展*, 2021, 41(4): 2090.
ZHANG Weifeng, ZHOU Wu, WANG Qiuhua, et al. Development status of phase change absorption and capture technology of CO₂ from flue gas[J]. *Progress in Chemical Industry*, 2021, 41(4): 2090.
- [11] YOON B, HWANG G S. Facile carbamic acid intermediate formation in aqueous monoethanolamine and its vital role in CO₂ capture processes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(12): 4475-4479.
- [12] ODUNTAN A, CHUANG S S C. Weakly adsorbed CO₂ and H₂O species on monoethanolamine films in a room-temperature CO₂ and direct air capture cycle: an in situ infrared study[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(7): 3245-3255.
- [13] YOON B, CHEN S, VOTH G A. On the key influence of amino acid ionic liquid anions on CO₂ capture[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(2): 1612-1618.
- [14] SUN X, SHEN X, WANG H, et al. Atom-level interaction design between amines and support for achieving efficient and stable CO₂ capture[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5068.
- [15] ZHANG G, LIU J, QIAN J, et al. Review of research progress and stability studies of amine-based biphasic absorbents for CO₂ capture[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2024, 134: 28-50.
- [16] 刘延鑫, 董立户, 密建国, 等. 醇胺分子结构及其 CO₂ 捕集能力[J]. *中国科学: 化学*, 2012, 42(3): 291-296.
LIU Yanxin, DONG Lihu, MI Jianguo, et al. Study on molecular structure of alkanolamines and their CO₂ capture ability[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2012, 42(3): 291-296.
- [17] DUAN L, ZHAO M, YANG Y. Integration and optimization study on the coal-fired power plant with CO₂ capture using MEA[J]. *Energy*, 2012, 45(1): 107-116.
- [18] BORHANI T N, WANG M. Role of solvents in CO₂ capture processes: the review of selection and design methods[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109299.
- [19] SUN L, LIAN S, WANG K. Research on aqueous TETA/AMP solution for CO₂ capture[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26: 58-63.
- [20] JIANG W, LIN Y, SUN C, et al. Comparative review for enhancing CO₂ capture efficiency with mixed amine systems and catalysts[J]. *Molecules*, 2024, 29(19): 4618.
- [21] 王凯旋, 李涛, 李玉. 超强碱离子液体-有机胺-水复配溶剂高效 CO₂ 捕集[J]. *过程工程学报*, 2023, 23(5): 781-789.
WANG Kaixuan, LI Tao, LI Yu, et al. High efficiency CO₂ capture in superalkali ionic liquid-organic amine-water complex solvent[J]. *Journal of Process Engineering*, 2023, 23(5): 781-789.
- [22] GALINDO P, SCHAFFER A, BRECHTEL K, et al. Experimental research on the performance of CO₂-loaded solutions of MEA and DEA at regeneration conditions[J]. *Fuel*, 2012, 101: 2-8.
- [23] ZHAO Y, ZHANG Y, LIU Q, et al. Energy-efficient carbon dioxide capture using piperazine (PZ) activated EMEA+DEEA water lean solvent: performance and mechanism[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 316: 123761.

- [24] 李红, 吉轲. 复配醇胺溶液对 CO₂ 的吸收解吸性能及其降解性能[J]. 化工进展, 2022, 41(2): 1025.
LI Hong, JI Ke. Properties of CO₂ absorption-desorption based on alcohol amines solutions and their degradation [J]. Advances in Chemical Industry, 2022, 41(2): 1025.
- [25] 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.
- [26] AO D, MA G, ZANG C, et al. A numerical study on removal of CO₂ by 2-(tert-Butylamino) ethanol in a hollow fiber membrane contactor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(10): 3685-3693.
- [27] CHOI Y S, IM J, JEONG J K, et al. CO₂ absorption and desorption in an aqueous solution of heavily hindered alkanolamine: structural elucidation of CO₂-containing species[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(7): 4163-4170.
- [28] GOUEDARD C, PICQ D, LAUNAY F, et al. Amine degradation in CO₂ capture. I. A review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 10: 244-270.
- [29] SAEED I M, ALABA P, MAZARI S A, et al. Opportunities and challenges in the development of monoethanolamine and its blends for post-combustion CO₂ capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 79: 212-233.
- [30] LI C, SHI X, SHEN S. Performance evaluation of newly developed absorbents for solvent-based carbon dioxide capture[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(9): 9032-9039.
- [31] MORES P, RODRIGUEZ N, SCENNA N, et al. CO₂ capture in power plants: minimization of the investment and operating cost of the post-combustion process using MEA aqueous solution[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 10: 148-163.
- [32] RAO A B, RUBIN E S, KEITH D W, et al. Evaluation of potential cost reductions from improved amine-based CO₂ capture systems[J]. Energy Policy, 2006, 34(18): 3765-3772.
- [33] SHARIF M, ZHANG T, WU X, et al. Evaluation of CO₂ absorption performance by molecular dynamic simulation for mixed secondary and tertiary amines[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 97: 103059.
- [34] LI G, SHEN X, JIAO X, et al. Novel tri-solvent amines absorption for flue gas CO₂ capture: efficient absorption and regeneration with low energy consumption[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152699.
- [35] 林冠屹, 朱春英, 付涛涛, 等. 微通道内 MEA/MDEA 混合溶液吸收 CO₂ 的传质特性[J]. 化工学报, 2018, 69(11): 4675-4682.
LIN Guanyi, ZHU Chunying, FU Taotao, et al. Mass transfer characteristics of CO₂ absorption by MEA/MDEA mixed solutions in microchannels[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 69(11): 4675-4682.
- [36] 乔琨, 吕泽宁, 杨立军, 等. 氨法捕碳技术再生过程无机添加剂效应研究进展[J]. 无机盐工业, 2022, 54(10): 79-86.
QIAO Kun, LYU Zening, YANG Lijun, et al. Research progress on the effect of inorganic additives in the regeneration process of ammonia carbon capture technology[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(10): 79-86.
- [37] ZHAO F, CUI C, DONG S, et al. An overview on the corrosion mechanisms and inhibition techniques for amine-based post-combustion carbon capture process[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 304: 122091.
- [38] ZHOU S, WANG S, ROCHELLE G T, et al. Experiment research on amine thermal degradation during CO₂ capture[J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology, 2012, 52(1): 81-86.
- [39] 张亚萍. 乙醇胺捕集燃煤烟气二氧化碳工艺模拟[J]. 无机盐工业, 2022, 54(8): 96.
ZHANG Yaping. Simulation of process for capturing carbon dioxide from coal flue gas with ethanolamine[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(8): 96.
- [40] KUSHIDA T, WADA S, FURUKAWA Y, et al. Thermochemical model for evaluating CO₂ regeneration energy for amine absorbents[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 268: 118388.
- [41] KITTEL J, GONZALEZ S. Corrosion in CO₂ post-combustion capture with alkanolamines: a review[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2014, 69(5): 915-929.
- [42] WU K, ZHOU X, WU X, et al. Understanding the corrosion behavior of carbon steel in amino-functionalized ionic liquids for CO₂ capture assisted by weight loss and electrochemical techniques[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 83: 216-227.

(责任编辑 杨嘉蕾)