

甲基二乙醇胺-二元胺混合体系烟气CO₂ 吸收再生性能研究

孙宇航¹, 李超¹, 王争荣², 孙路长², 王凯亮², 胡昔鸣³, 方梦祥^{1*}, 张锋⁴

(1. 能源高效清洁利用全国重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027;

2. 中国华电科工集团有限公司, 北京市 丰台区 100160; 3. 浙江大学青山湖能源研究基地, 浙江省 杭州市 311300; 4. 国网浙江省电力有限公司建设分公司, 浙江省 杭州市 310008)

Study on CO₂ Absorption and Regeneration Property of Flue Gas From Methyldiethanolamine-Amine Mixture System

SUN Yuhang¹, LI Chao¹, WANG Zhengrong², SUN Luchang², WANG Kailiang², HU Ximing³,
FANG Mengxiang^{1*}, ZHANG Feng⁴

(1. National Key Laboratory of Energy Efficiency and Clean Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 2. China Huadian Engineering Co., Ltd., Fengtai District, Beijing 100160, China; 3. Qingshan Lake Energy Research Base, Zhejiang University, Hangzhou 311300, Zhejiang Province, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Construction Branch, Hangzhou 310008, Zhejiang Province, China)

摘要:【目的】研究甲基二乙醇胺(MDEA)与不同二元胺混合后配方的吸收再生性能。【方法】在体积分数12%的CO₂和88%的N₂模拟烟气环境下,以MDEA为主剂,分别添加乙二胺(EDA)、1,3-丙二胺(DAP)、3-甲基氨基丙胺(MAPA)、羟乙基乙二胺(AEEA)、N,N-二甲基乙二胺(DMEDA)和N,N-二甲基-1,3-丙二胺(DMPDA)作为活化剂。在总胺质量分数为40%的条件下,以主剂与活化剂的质量比1:1、2:1、3:1配置化学吸收剂。通过比较鼓泡吸收和油浴再生实验,得到不同吸收剂的吸收速率、再生速率和循环容量,筛选出性能优良的吸收剂配方。【结果】MDEA-EDA体系在MDEA与EDA的质量比1:1时吸收性能最佳;MDEA-DMEDA体系在MDEA与DMEDA的质量比2:1时再生性能最佳,循环容量达到1.7 mol/kg;MDEA-AEEA体系在MDEA与AEEA的质量比1:1时整体性能达到最优,循环容量可以达到1.49 mol/kg。【结论】研究结果可为工业上混合胺液的配方优选提供理论依据。

关键词: 碳捕集、利用与封存(CCUS); 吸收性能; 再生

基金项目: 浙江省尖兵计划项目(2022C03040); 中国华电集团公司“揭榜挂帅”项目(CHDKJ21-01-109); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZFJH004)。

Project Supported by Zhejiang Province Spearhead Plan Project (2022C03040); China Huadian Group Co., Ltd. "Reveal The List" System Project (CHDKJ21-01-109); Special Funds for Basic Scientific Research Operations of Central Universities (2022ZFJH004).

性能; 甲基二乙醇胺(MDEA); 二元胺

ABSTRACT: [Objectives] The absorption and regeneration properties of different formulations of methyldiethanolamine (MDEA) mixed with different diamines were studied. [Methods] In the simulated flue gas environment with 12% CO₂ and 88% N₂, MDEA was used as the main agent, ethylenediamine (EDA), 1, 3-diaminopropane (DAP), N-methyl-1, 3-propanediamine (MAPA), aminoethylethanolamine (AEEA), N, N-dimethylethylenediamine (DMEDA) and 3-dimethylaminopropylamine (DMPDA) were added as activators, respectively. Under the condition of total amine concentration of 40%, the chemical absorbent was configured with mass ratio of main agent to activator 1:1, 2:1 and 3:1, respectively. The absorption rate, regeneration rate and circulation capacity of different absorbers were obtained by comparing bubble absorption and oil bath regeneration experiments. [Results] MDEA-EDA system has the best absorption property when the mass ratio of MDEA to EDA is 1:1, MDEA-DMEDA system has the best regeneration property when the mass ratio of MDEA to DMEDA is 2:1, and the circulation capacity reaches 1.7 mol/kg. The overall property of MDEA-AEEA system is optimized when the mass ratio of MDEA to AEEA is 1:1, and the cycle capacity can reach 1.49 mol/kg. [Conclusions] The research results can provide a theoretical basis for the formulation optimization of mixed amine solution in industry.

KEY WORDS: carbon capture, utilization and storage (CCUS); absorption property; regeneration property; methyldiethanolamine (MDEA); diamine

0 引言

碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术是目前控制碳排放的有效途径之一,按分离和集成方式不同,可分为燃烧前捕集、燃烧中捕集和燃烧后捕集^[1-2]。燃烧前捕集主要有燃气-蒸汽联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)技术^[3]。文献[4]通过 Aspen Plus 模拟分析了 IGCC 技术对电力成本的影响。燃烧中捕集主要有富氧燃烧技术^[5-6]和化学链燃烧技术^[7],目前该技术仍处在实验室研究阶段,预计 2050 年后将成为主要的碳捕集技术^[8]。燃烧后捕集是当前研究最多、应用最广的碳捕集技术,主要包括膜法、吸附法和吸收法^[9-11],其中:膜法包括膜分离法和膜吸收法;吸附法包括变压吸附和变温吸附;吸收法包括物理吸收和化学吸收。当前,对于电厂尾部烟气的碳捕集,采用的主要方法是化学吸收法,其具有工艺成熟、运行稳定等特点。对于化学吸收法,吸收剂是关键技术之一,因此对低能耗新型吸收剂的开发至关重要^[12-13]。在化学吸收剂中,醇胺类吸收剂是当前的研究热点之一,而混合胺吸收剂是目前醇胺类吸收剂中工艺最为成熟的一类吸收剂,是由多种有机胺与水混合而成。有机胺根据氨基结构上氢原子数目可分为一级胺、二级胺和三级胺;根据分子结构上的氨基数量可分为一元胺和多元胺^[14]。N-甲基二乙醇胺(MDEA)是一种典型的三级胺,具有再生能耗低、吸收容量大、再生能力强等特点,但其吸收速率较低,工业上一般与其他吸收速率高的胺混合使用。多元胺有多个氨基结构,能够快速吸收 CO₂,具有较强的吸收活性,因此向 MDEA 溶液加入多元胺能够有效提高整体吸收性能。对此,许多学者展开了研究。徐莉等^[15]开展了 MDEA+三乙烯四胺(TETA)混合溶液的 CO₂解吸动力学研究,基于双膜理论,建立解吸速率关联式。陈杰等^[16]研究了 MDEA 与不同活化剂混合后的性能,结果发现,当二乙烯三胺

(DETA)或 TETA 作为活化剂时,能够极大程度地提高吸收速率,且相比乙醇胺(MEA)、二乙醇胺(DEA)等一元胺作为活化剂时吸收速率更大。高涵等^[17]考察了 DETA、TETA、四乙烯五胺(TEPA) 3 种多元胺对 MDEA 的活化作用,结果发现,相比 DETA 与 TETA, TEPA 作为活化剂能够更好地提高混合体系的吸收性能。Tang 等^[18]通过分析 MDEA-DETA/TETA 混合胺体系发现,DETA 含量较高时,吸收性能好;TETA 含量较高时,能有效缩短解吸时间。Hafizi 等^[19]研究发现,向 MDEA 中加入具有多个氨基基团的乙二胺(EDA)、DETA 等多元胺,能有效提高吸收速率和吸收容量。Jin 等^[20]在 MDEA-PZ(哌嗪)体系中加入多种多元胺,结果发现,加入 TETA 后对吸收效果提升最大。以上研究表明, MDEA 与多元胺混合后能较大程度地提升吸收能力。依据溶剂效应,在水溶液中,氮原子所连接的氢越多,则越有机会与水形成氢键,从而使得铵离子更加稳定,溶液碱性更强,促使吸收能力增强^[21]。相对应地,在再生过程中为了将这些氢键断开,则需要更多的能量,会导致再生变得困难。多元胺中有多个氨基、亚氨基或次氨基,若这些基团过多,溶液的再生能力会有所下降,再生能耗会大幅增加。

因此,本文选用 EDA、1,3-丙二胺(DAP)、3-甲氨基丙胺(MAPA)、羟乙基乙二胺(AEEA)、N,N-二甲基乙二胺(DMEDA)和 N,N-二甲基-1,3-丙二胺(DMPDA) 6 种二元胺作为 MDEA 的活化剂,通过吸收实验和再生实验,考察 MDEA 与不同二元胺混合后配方的吸收再生性能,为工业上混合胺液的配方优选提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 实验试剂

本文以 MDEA 为主剂,向其中添加不同二元胺,构成吸收剂配方,所有实验涉及的化学试剂如表 1 所示。

1.2 实验方法及流程

实验分为吸收实验和再生实验。吸收实验采用鼓泡吸收装置,如图 1 所示。在吸收实验中,控制总气体流量为 1 L/min,其中 N₂与 CO₂的体积

表1 实验涉及的化学试剂

Tab. 1 Chemical reagents involved in the experiment

化学试剂	英文名称	分子结构
甲基二乙醇胺	MDEA	
乙二胺	EDA	
1,3-丙二胺	DAP	
3-氨基丙胺	MAPA	
羟乙基乙二胺	AEEA	
N,N-二甲基乙二胺	DMEDA	
N,N-二甲基-1,3-丙二胺	DMPDA	

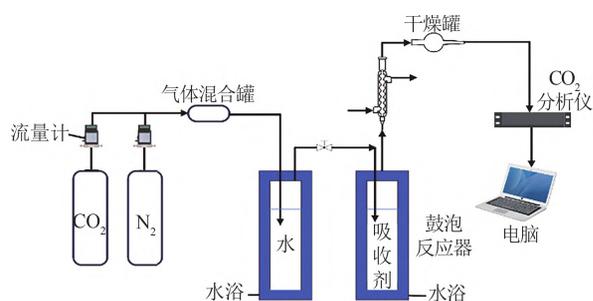


图1 吸收实验装置图

Fig. 1 Absorption experimental device diagram

分数分别为88%和12%。将气体混合后通入水中,以饱和状态进入反应器中。将按一定配比配制好的混合胺吸收剂配方置于反应器内,并利用恒温水浴使其保持40℃恒温。气体通入反应器后,CO₂与吸收剂反应,之后,剩余的气体、水蒸气以及部分胺蒸汽从上方逸出,进入冷凝管,冷凝回流部分水和胺蒸汽,气体经冷却后再经干燥管脱水进入分析仪,分析仪与电脑相连接,利用软件对出口CO₂浓度进行在线监测,间隔5s记录一次数据。当出口CO₂浓度基本保持不变时,认为吸收剂已吸收完全,实验结束。

通过吸收实验可得到不同配方的吸收速率。吸收速率定义为某一时刻单位质量吸收剂在单位时间吸收的CO₂的量,计算公式如下:

$$r_{\text{abs}}(t) = \frac{(C_0 - C_i) \times 10^6}{m_0 \times 22.4 \times 60 \times 100} \times \frac{273.15}{273.15 + t_0} \quad (1)$$

式中: C_0 为CO₂初始质量分数,%; C_i 为某一时刻

烟气出口CO₂质量分数,%; m_0 为吸收剂质量,g; t_0 为水浴温度,℃。

吸收实验结束后,取出饱和富液称重,记录质量。开启油浴锅加热,待温度达到指定温度后进行再生实验。

再生实验采用油浴再生装置,如图2所示。将饱和液倒入放有搅拌子的三颈烧瓶中,设置油浴温度为120℃,待温度稳定后将三颈烧瓶置于油浴锅中。开启搅拌,保持反应器内部液体温度均匀,并通过热电偶测量溶液温度。饱和富液受热析出CO₂,同时携带水蒸气以及少量胺蒸汽,进入冷凝管后,冷凝回流其中的水蒸气和少量胺蒸汽,冷凝后的气体由皂膜流量计记录其流量,每隔一定时间测量一次,当流量低于10 mL/min时,实验结束。

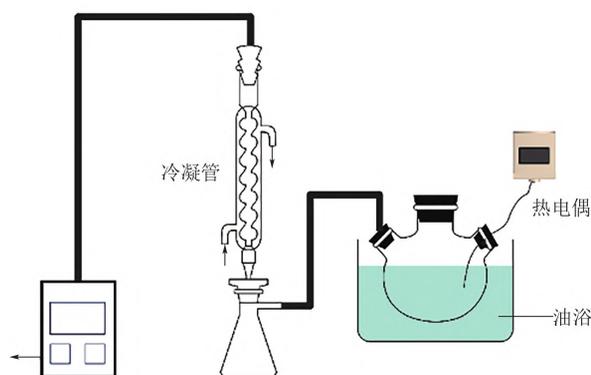


图2 再生实验装置图

Fig. 2 Regeneration experimental device diagram

通过再生实验可得到不同配方的再生速率和循环容量。再生速率是指某一时刻单位质量吸收液析出CO₂的瞬时流量,计算公式如下:

$$v = \frac{1}{m_1} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

式中: V 为再生速率, mL/(g·min); m_1 为饱和富液质量,g; $\frac{\partial V}{\partial t}$ 为皂膜流量计读数,表示气体流量, mL/min。

循环容量指单位质量饱和富液在整个再生过程中解吸产生CO₂的物质的量。定义饱和富液解吸产生CO₂的物质的量为 n_0' ,则再生过程 t 时刻富液解吸产生CO₂的物质的量表示为

$$n_t = n_{t-1} + \frac{\Delta t \times (q_t - q_{t-1})}{60 \times 22.4 \times 1000 \times 2} \times \frac{273.15}{T} \quad (3)$$

式中： n_{t-1} 为 $t-1$ 时刻富液解吸产生 CO_2 的物质的量，mol； Δt 为 t 、 $t-1$ 时刻的时间间隔，s； q_t 、 q_{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻测量的 CO_2 流量，mL/min； T 为实验中富液温度，K。

实验结束时刻的 n_t 即为 n_0' ，循环容量即为 n_0' 与饱和富液质量 m_1 的比值。

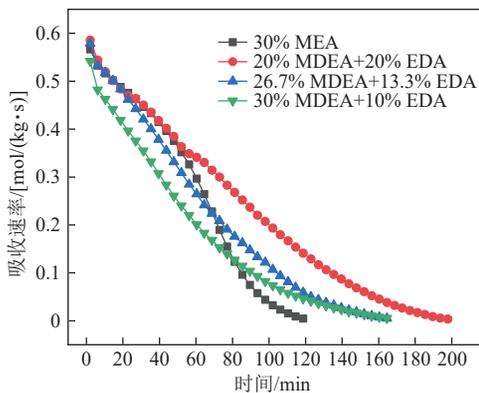
2 结果与讨论

本文对混合体系MDEA-EDA、MDEA-DAP、MDEA-MAPA、MDEA-AEEA、MDEA-DMEDA和MDEA-DMPDA进行研究。在每种混合体系中，总胺质量分数均为40%，按照MDEA与活化剂的质量比1:1、2:1、3:1分别配备溶液。6种混合体系的对照组均为标准吸收剂(MEA质量分数为30%)。

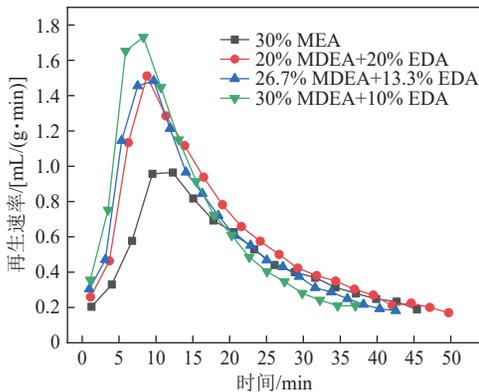
2.1 MDEA-EDA体系

MDEA-EDA体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图3所示。

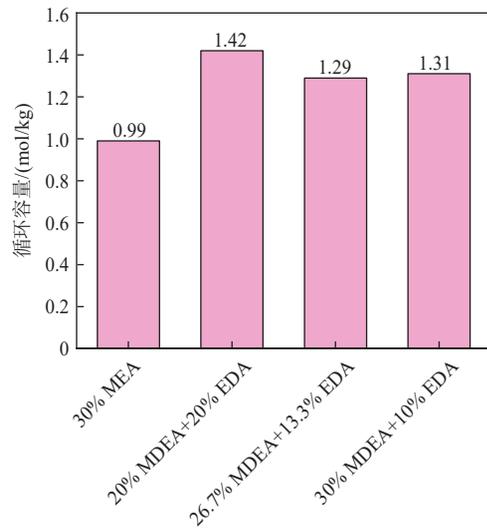
由图3(a)可见，吸收速率随时间增加逐渐减小，这是因为在反应初始阶段，吸收剂中能够与



(a) 吸收速率



(b) 再生速率



(c) 循环容量

图3 MDEA-EDA体系反应动力学特性

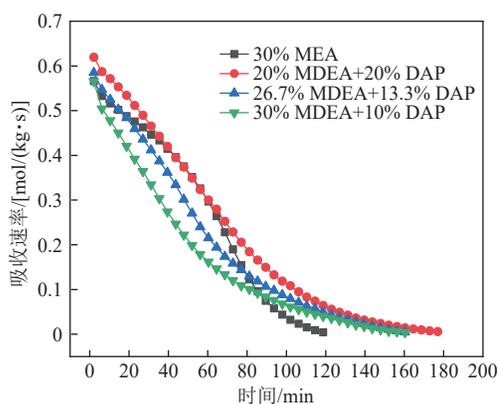
Fig. 3 Reaction kinetics characteristics of MDEA-EDA system

CO_2 反应的组分浓度较高，故反应速率较快，但随着时间的增加，吸收剂中能够与 CO_2 反应的组分浓度下降，使得反应速率降低。与对照组相比，该体系的吸收速率较大，在MDEA与EDA的质量比1:1时整体上高于对照组。由图3(b)可见，再生速率随时间增加先增大后减小，这是因为在再生初始阶段，温度是反应的主要驱动力，随着饱和富液温度升高，再生速率逐渐增大，但随着时间的增加，浓度成为反应的主要驱动力，溶液中氨基甲酸根和碳酸氢根浓度降低，而温度基本不变，故再生速率减小。与对照组相比，该体系的再生速率远优于对照组。由图3(c)可见，该体系的循环容量较对照组有明显提升，在MDEA与EDA的质量比1:1时最大，为1.42 mol/kg。由上述分析可知，该体系在MDEA与EDA的质量比1:1时性能最优。

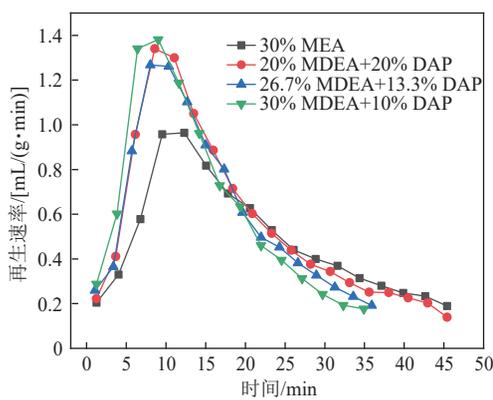
2.2 MDEA-DAP体系

MDEA-DAP体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图4所示。

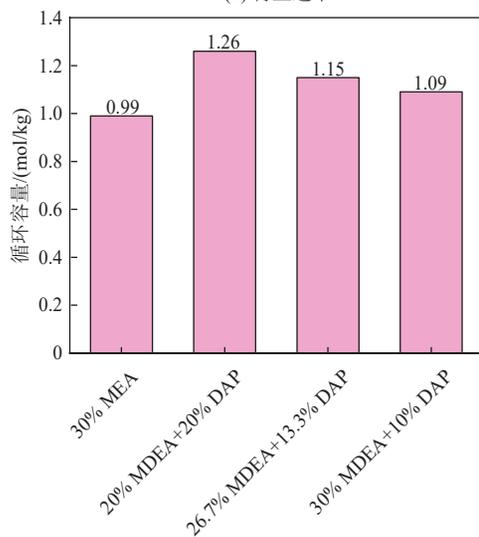
由图4(a)可见，该体系在MDEA与DAP的质量比1:1时吸收速率高于对照组。由图4(b)可见，该体系的再生速率略优于对照组。由图4(c)可见，该体系循环容量较对照组略有提升，在MDEA与DAP的质量比1:1时最大，为1.26 mol/kg。综合



(a) 吸收速率



(b) 再生速率



(c) 循环容量

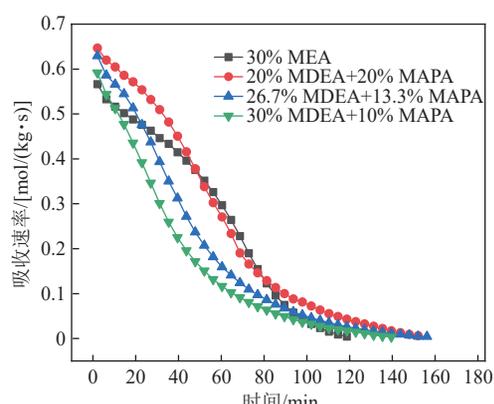
图4 MDEA-DAP体系反应动力学特性

Fig. 4 Reaction kinetics characteristics of MDEA-DAP system

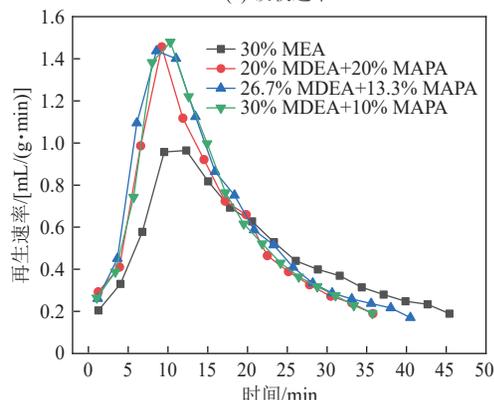
上述分析可知，该体系在MDEA与DAP的质量比1:1时性能最优。

2.3 MDEA-MAPA体系

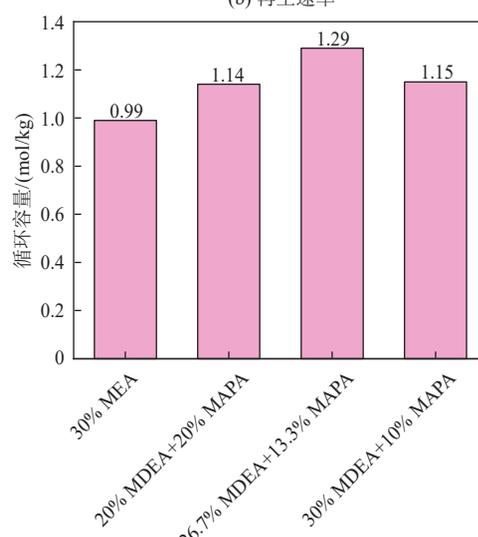
MDEA-MAPA体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图5所示。



(a) 吸收速率



(b) 再生速率



(c) 循环容量

图5 MDEA-MAPA体系反应动力学特性

Fig. 5 Reaction kinetics characteristics of MDEA-MAPA system

由图5(a)可见，该体系在MDEA与MAPA的质量比1:1时，反应初期吸收速率略高于对照组，但速率下降速度较快。由图5(b)可见，该体系的再生速率均略优于对照组。由图5(c)可见，该体系循环容量较对照组均略有提升，在MDEA与

MAPA的质量比2:1时最大,为1.29 mol/kg。综合上述分析可知,该体系在MDEA与MAPA的质量比2:1时性能最优。

2.4 MDEA-AEEA体系

MDEA-AEEA体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图6所示。

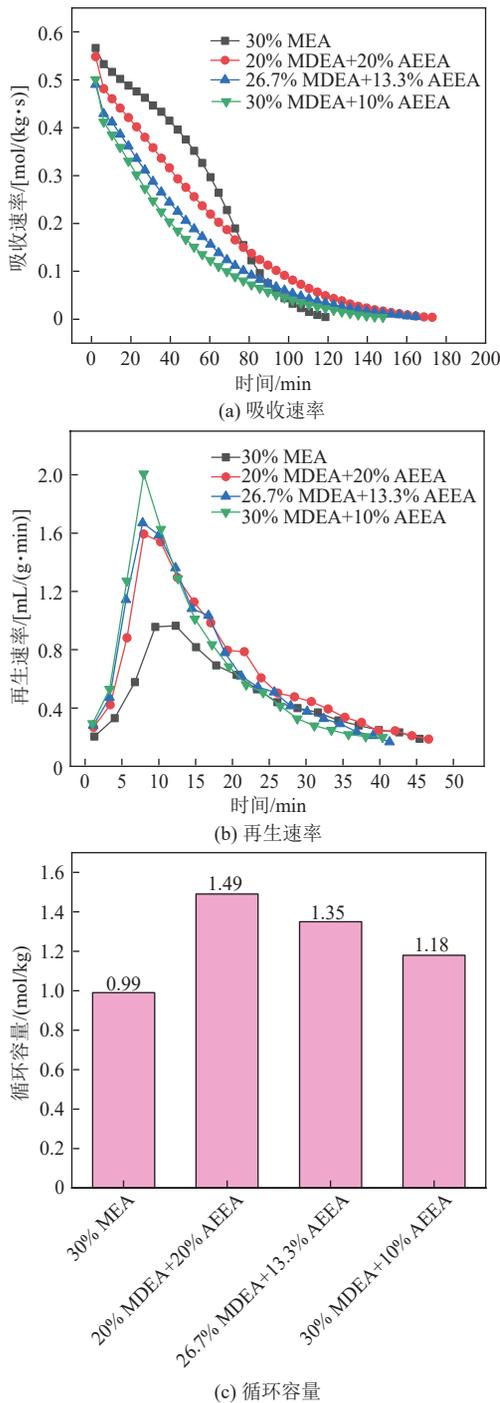


图6 MDEA-AEEA体系反应动力学特性

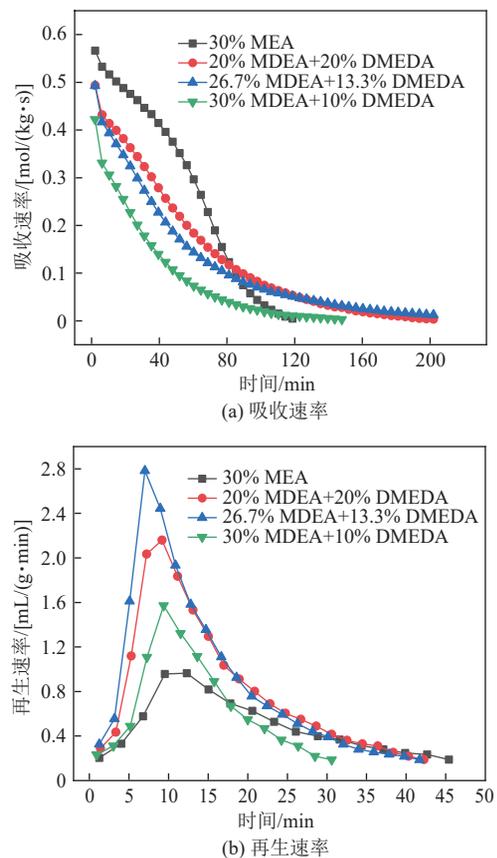
Fig. 6 Reaction kinetics characteristics of MDEA-AEEA system

从图6(a)可以看出,该体系在MDEA与AEEA的质量比1:1时吸收速率最大,但略低于对照组。从图6(b)可以看出,该体系的再生速率高于对照组。从图6(c)可以看出,该体系循环容量相较于对照组有明显提升,在MDEA与AEEA的质量比1:1时最大,达到1.49 mol/kg。由上述分析可知,该体系在MDEA与AEEA的质量比1:1时性能最优。

2.5 MDEA-DMEDA体系

MDEA-DMEDA体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图7所示。

从图7(a)可以看出,该体系在MDEA与DMEDA的质量比1:1时吸收速率最大,但远小于对照组,整体吸收性能较差。从图7(b)可以看出,该体系再生速率远高于对照组,在MDEA与DMEDA的质量比2:1时再生速率最高且具有明显优势。从图7(c)可以看出,该体系循环容量在主剂与活化剂的质量比1:1和2:1时较对照组有明显提升,且在质量比2:1时最大,达到1.7 mol/kg。综合上述分析可知,该体系在MDEA与DMEDA



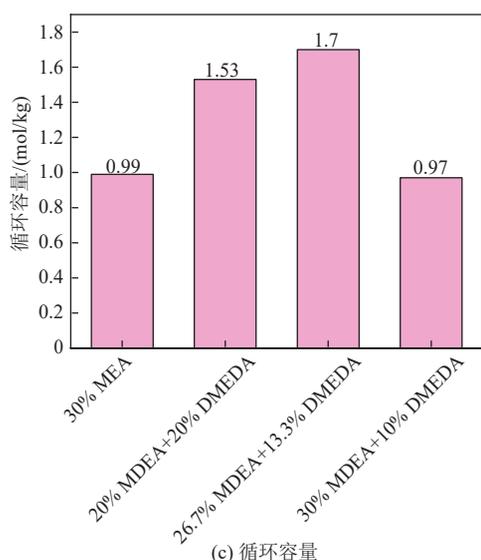


图7 MDEA-DMEDA体系反应动力学特性

Fig. 7 Reaction kinetics characteristics of MDEA-DMEDA system

的质量比2:1时性能最优。

2.6 MDEA-DMPDA体系

MDEA-DMPDA体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图8所示。

从图8(a)可以看出, 该体系在MDEA与

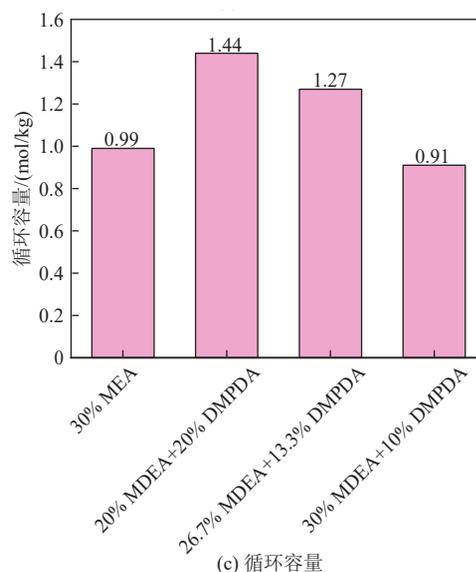


图8 MDEA-DMPDA体系反应动力学特性

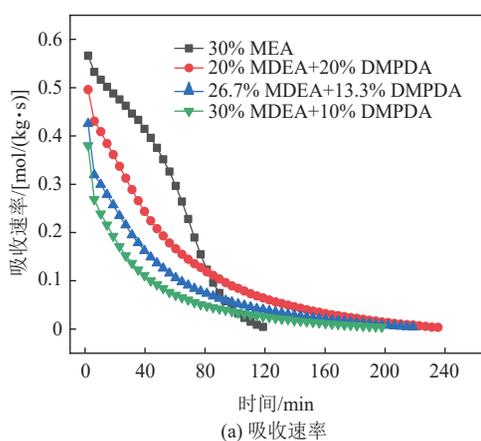
Fig. 8 Reaction kinetics characteristics of MDEA-DMPDA system

DMPDA的质量比1:1时吸收速率最大, 但远小于对照组, 整体吸收性能较差。从图8(b)可以看出, 该体系再生速率远高于对照组。从图8(c)可以看出, 该体系循环容量在主剂与活化剂质量比1:1时最大, 达到1.44 mol/kg。综合上述分析可知, 该体系在MDEA与DMPDA的质量比1:1时性能最优。

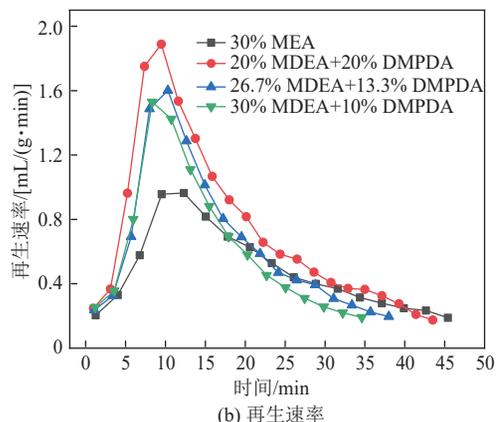
2.7 各体系配方性能对比

通过对比分析6种混合体系最优性能的配方, 发现MDEA-EDA、MDEA-DAP、MDEA-AEEA以及MDEA-DMPDA在各自体系下主剂与活化剂质量比1:1时性能最优, MDEA-MAPA和MDEA-DMEDA在各自体系下主剂与活化剂质量比2:1时性能最优。6种体系的吸收速率、再生速率、循环容量结果如图9所示。

从图9(a)可以看出, 在各自体系最优性能的配比下, MDEA-EDA、MDEA-DAP体系的吸收速率明显优于MDEA-MAPA、MDEA-AEEA、MDEA-DMEDA和MDEA-DMPDA体系, 这是因为从分子结构上看, EDA与DAP含有2个氨基, MAPA与AEEA含有1个氨基、1个亚氨基, DMEDA与DMPDA含有1个氨基、1个次氨基, 其中氨基与CO₂的反应速率最快, 亚氨基次之, 次氨基最慢。从图9(b)可以看出, MDEA-



(a) 吸收速率



(b) 再生速率

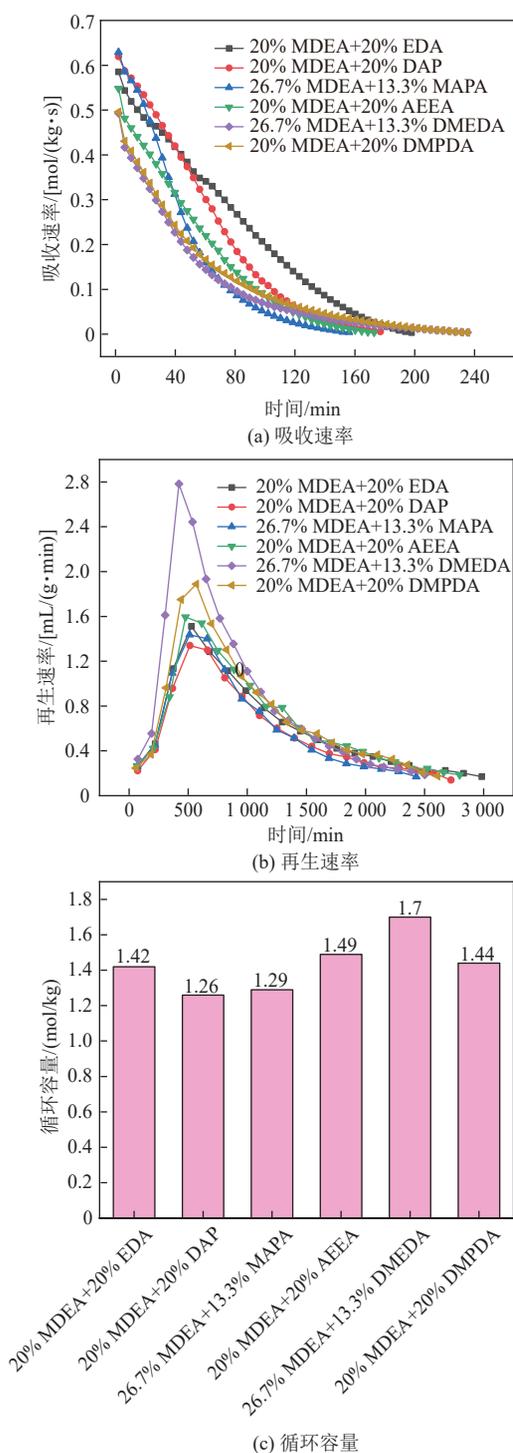


图9 各体系最优配方反应动力学特性

Fig. 9 Optimal formulation reaction kinetics characteristics of each system

DMEDA和MDEA-DMPDA体系的再生速率相较于其他配方具有明显优势,这是因为DMEDA与DMPDA分子中含有次氨基,其吸收反应原理与三级胺一致,生成碳酸氢盐^[22],具有高再生速率。从图9(c)可以看出,MDEA-EDA、MDEA-AEEA、

MDEA-DMEDA和MDEA-DMPDA体系的循环容量较高,明显优于其他2种配方。

综合上述分析可知,MDEA-EDA和MDEA-DAP体系在吸收性能方面具有明显优势,且MDEA-EDA体系吸收速率更优;MDEA-DMEDA和MDEA-DMPDA体系在再生性能方面具有明显优势,且MDEA-DMEDA体系再生速率和循环容量更优。通过对配方的吸收和再生性能进行综合评价,发现MDEA-EDA和MDEA-AEEA体系整体性能相对较优,考虑到EDA闪点较低(38℃),且挥发性较大、稳定性较低,因此MDEA-AEEA体系是更优的选择。

3 结论

1) MDEA和不同二元胺形成的复合配方中,MDEA-EDA体系在MDEA与EDA的质量比1:1时吸收性能最佳;MDEA-DMEDA体系在MDEA与DMEDA的质量比2:1时再生性能最佳,循环容量达到1.7 mol/kg。

2) MDEA和不同二元胺混合后配方的吸收再生性能与添加胺的化学结构关联密切,氨基结构对吸收性能提升明显,次氨基结构在再生性能上具有显著优势。

3) 综合评价各吸收剂配方的吸收再生性能,MDEA-AEEA体系在MDEA与AEEA质量比1:1时整体性能达到最优,具有较大的吸收速率、再生速率和循环容量。

参考文献

- [1] 陈兵,肖红亮,李景明,等.二氧化碳捕集、利用与封存研究进展[J].应用化工,2018,47(3):589-592. CHEN B, XIAO H L, LI J M, et al. Advances in research on carbon capture, utilization and storage[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(3): 589-592.
- [2] 董瑞,高林,何松,等. CCUS技术对我国电力行业低碳转型的意义与挑战[J].发电技术,2022,43(4):523-532. DONG R, GAO L, HE S, et al. Significance and challenges of CCUS technology for low-carbon transformation of China's power industry[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 523-532.

- [3] 冯凌杰, 翟融融, 郭一村, 等. 耦合碳捕集系统的燃气蒸汽联合循环综合性能研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 584-592.
FENG L J, ZHAI R R, GUO Y C, et al. Study on the comprehensive performance of natural gas combined cycle plant integrated with carbon capture system[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 584-592.
- [4] 张斌, 倪维斗, 李政. 火电厂和IGCC及煤气化SOFC混合循环减排CO₂的分析[J]. 煤炭转化, 2005, 28(1): 1-7.
ZHANG B, NI W D, LI Z. Analysis of conventional power plant, IGCC and coal gasification SOFC hybrid with CO₂ mitigation[J]. Coal Conversion, 2005, 28(1): 1-7.
- [5] 刘朝蓬, 王海云, 王维庆, 等. 基于多运行场景与富氧燃烧捕集技术的低碳能源系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 115-129.
LIU Z P, WANG H Y, WANG W Q, et al. Capacity optimization of low carbon energy systems based on multiple operating scenarios and oxygen-enriched combustion capture technology[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 115-129.
- [6] 王灿, 李欣然, 赵积红, 等. 基于P2G与富氧燃烧联合运行的多能源低碳调度[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 139-148.
WANG C, LI X R, ZHAO J H, et al. Low carbon scheduling of multi-energy system based on power to gas combined with oxygen enriched combustion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 139-148.
- [7] 李振山, 陈虎, 李维成, 等. 化学链燃烧中试系统的研究进展与展望[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 544-561.
LI Z S, CHEN H, LI W C, et al. Research status and prospect of chemical looping combustion pilot systems [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 544-561.
- [8] 刘飞, 关键, 祁志福, 等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 1-13.
LIU F, GUAN J, QI Z F, et al. Technology route selection for carbon capture utilization and storage in coal-fired power plants[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 1-13.
- [9] KANG M S, MOON S H, PARK Y I, et al. Development of carbon dioxide separation process using continuous hollow-fiber membrane contactor and water-splitting electro dialysis[J]. Separation Science and Technology, 2002, 37(8): 1789-1806.
- [10] WANG J, HUANG L, YANG R, et al. Recent advances in solid sorbents for CO₂ capture and new development trends[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(11): 3478-3518.
- [11] 晏水平, 方梦祥, 张卫风, 等. 烟气中CO₂化学吸收法脱除技术分析进展[J]. 化工进展, 2006, 25(9): 1018-1024.
YAN S P, FANG M X, ZHANG W F, et al. Technique analyses and research progress of CO₂ separation from flue gas by chemical absorption[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(9): 1018-1024.
- [12] YU C H, HUANG C H, TAN C S. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12(5): 745-769.
- [13] 王旭, 杨昊, 王满仓, 等. 燃气电厂化学吸收二氧化碳捕获系统运行参数与能耗分析[J]. 分布式能源, 2023, 8(5): 69-76.
WANG X, YANG H, WANG M C, et al. Analysis of operating parameters and energy consumption of chemical absorption carbon dioxide capture system in natural gas power plants[J]. Distributed Energy, 2023, 8(5): 69-76.
- [14] 胡亚林, 李水娥, 忤恒, 等. CO₂混合胺吸收剂的研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41(24): 6-8.
HU Y L, LI S E, WU H, et al. Progress on CO₂ blended amine absorbents[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(24): 6-8.
- [15] 徐莉, 贾庆, 侯凯湖. MDEA-TETA溶液中CO₂的解吸动力学研究[J]. 石油与天然气化工, 2009, 38(4): 298-301.
XU L, JIA Q, HOU K H. Kinetic study on carbon dioxide desorption from the mixed MDEA-TETA aqueous solution[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2009, 38(4): 298-301.
- [16] 陈杰, 郭清, 花亦怀, 等. MDEA活化胺液在天然气预处理工艺中的吸收性能[J]. 化工进展, 2014, 33(1): 80-84.
CHEN J, GUO Q, HUA Y H, et al. Absorption performance of MDEA activated amines in natural gas pretreatment process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(1): 80-84.
- [17] 高涵, 郭亚平, 褚联峰, 等. 四乙烯胺活化N-甲基二乙醇胺溶液吸收CO₂[J]. 化学工程, 2011, 39(9): 30-33.

- GAO H, GUO Y P, CHU L F, et al. Absorption of CO₂ into solution of N-methyldiethanolamine activated by tetraethylenetetramine[J]. Chemical Engineering (China), 2011, 39(9): 30-33.
- [18] TANG J F, CHEN J, GUO Q, et al. The optimization of mixing amine solvents for CO₂ absorption based on aqueous MDEA/DETA and MDEA/TETA[J]. Petroleum Science and Technology, 2014, 32(24): 3002-3009.
- [19] HAFIZI A, MOKARI M H, KHALIFEH R, et al. Improving the CO₂ solubility in aqueous mixture of MDEA and different polyamine promoters: the effects of primary and secondary functional groups[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 297: 111803.
- [20] JIN M, ZHOU L Y, LU P, et al. Absorption of CO₂ from flue gas using mixed amine solution[J]. Advanced Materials Research, 2013, 781/782/783/784: 2201-2204.
- [21] 黄大荣. 溶剂效应对有机化合物酸碱性的影响[J]. 化学通报, 1986, 49(7): 55-61.
HUANG D R. Influence of solvent effect on acidity and alkalinity of organic compounds[J]. Chemistry, 1986, 49(7): 55-61.
- [22] VERSTEEG G F, VAN SWAAIJ W P M. On the kinetics between CO₂ and alkanolamines both in aqueous and non-aqueous solutions: primary and secondary amines[J]. Chemical Engineering Science,

1988, 43(3): 573-585.

收稿日期: 2023-11-07.

修回日期: 2023-12-15.

作者简介:



孙宇航

孙宇航(1998), 男, 硕士研究生, 主要从事碳捕集化学吸收剂配方研究, syh19981203@163.com;



王争荣

王争荣(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事燃煤电厂节能减排、碳捕集与利用技术等研究, wangzr@chec.com.cn;



方梦祥

方梦祥(1965), 男, 博士, 教授, 主要从事煤和生物质流化床热解、气化、燃烧, CO₂化学吸收技术等研究, 本文通信作者, mxfang@zju.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)