

# 混合醇胺法吸收电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 的性能研究

盛荟霖, 胡大鹏\*, 魏 炜

(大连理工大学化工学院, 精细化工国家重点实验室, 智能材料化工前沿科学中心, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**为改善一乙醇胺(MEA)溶液体系的吸收解吸性能,搭建了实验平台,针对以MEA为主吸收剂的混合醇胺溶液体系进行了吸收解吸实验。结果表明,在同样浓度的11种混合溶液体系中,*N*-(2-氨基乙基)哌嗪(AEP)与*N*-(2-羟乙基)乙二胺(AEEA)的加入对于提升捕集性能最为有利,可以兼顾较高的吸收容量与解吸率;针对不同浓度比例的AEP+MEA与AEEA+MEA溶液体系进行研究发现,AEP浓度为1.5 mol/L时,吸收容量较单一MEA体系提升30.57%,解吸率提高6.72%,循环容量提高了45.86%。

**关键词:**乙醇胺;氨基乙基哌嗪;羟乙基乙二胺;混合醇胺;CO<sub>2</sub>捕集

中图分类号:TQ028.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0177-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.033

## Study on performance of mixed alcohol amine method to absorb CO<sub>2</sub> in flue gas of power plant

SHENG Hui-lin, HU Da-peng\*, WEI Wei

(Frontier Science Center for Smart Materials Chemical, State Key Laboratory of Fine Chemicals, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:**In order to improve the absorption and desorption performance of mono ethanolamine (MEA) solution system, an experimental platform is established to perform absorption and desorption experiments for the mixed alcohol-amine solution system with MEA as the main absorbent. Results show that the addition of 1-(2-aminoethyl) piperazine (AEP) or 2-(2-aminoethylamino) ethanol (AEEA) is the most beneficial to improve the capturing performance of 11 mixed solution systems with the same concentration, which can take into account both higher absorption capacity and desorption rate. It is found through studying the addition of AEP and AEEA in different concentration ratios that the absorption capacity of the AEP+MEA solution system with a AEP concentration of 1.5 mol·L<sup>-1</sup> is 30.57% higher than that of the MEA-alone system, the desorption rate is 6.72% higher, and the circulating capacity is 45.86% higher.

**Key words:** ethanolamine; 1-(2-aminoethyl) piperazine; 2-(2-aminoethylamino) ethanol; mixed alcohol-amine; CO<sub>2</sub> capture

工业的快速发展伴随着严峻的环境问题,大量化石能源的燃烧消耗产生了过量的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放,而CO<sub>2</sub>是温室气体的主要成分之一,这就造成了全球变暖的后果<sup>[1-5]</sup>。冰山融化,海平面上升,极地动物数量锐减,并在本世纪之内有极大的概率会因为生存环境的恶化而灭绝,因此,降低CO<sub>2</sub>的排放是目前亟需解决的问题<sup>[6-7]</sup>。

根据研究指出,目前碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是解决碳排放的重要途径<sup>[8-11]</sup>,而CO<sub>2</sub>的捕获又是其中最重要的环节<sup>[12]</sup>。对于CO<sub>2</sub>捕集,最主要的方法是燃烧后捕集,其中又以化学吸收法应用最为广泛<sup>[13-15]</sup>。本文中处于热点的混合醇

胺吸收体系为主要研究对象,针对CO<sub>2</sub>分压较低的电厂烟气进行实验,找到性能更好的吸收体系,为实际生产提供部分依据。

## 1 实验方法

### 1.1 实验试剂与材料

CO<sub>2</sub>,大连浚枫气体化学品有限公司,纯度为99%;普通氮气(N<sub>2</sub>),大连浚枫气体化学品有限公司;MEA,上海麦克林生化科技有限公司,分析纯;二乙醇胺(DEA),上海麦克林生化科技有限公司,分析纯;*N*-(2-羟乙基)乙二胺(AEEA),上海麦克林生化科技有限公司,分析纯;*N*-甲基-1,3-丙二胺

收稿日期:2024-04-01;修回日期:2024-08-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(DUT22LAB604)

作者简介:盛荟霖(1998-),女,硕士生;胡大鹏(1963-),男,博士,教授,研究方向为气波引射,通讯联系人, hudp@dlut.edu.cn。

(MAPA), 上海麦克林生化科技有限公司, 分析纯; 三乙醇胺 (TEA), 上海麦克林生化科技有限公司, 分析纯; *N*-甲基二乙醇胺 (MDEA), 上海麦克林生化科技有限公司, 分析纯; 五甲基二乙烯三胺 (PMDETA), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 分析纯; *N,N*-二乙基乙醇胺 (DEEA), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 分析纯; 2-氨基-2-甲基-丙醇 (AMP), 上海麦克林生化科技有限公司, 分析纯; *N*-(2-氨基) 哌嗪 (AEP), 上海麦克林生化科技有限公司, 分析纯; 无水哌嗪 (PZ), 上海玻尔化学试剂有限公司, 分析纯; 二乙烯三胺 (DETA), 上海麦克林生化科技有限公司, 分析纯; 浓硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 浓度为 98%; 实验用水均为去离子水。

## 1.2 溶液配制

全部实验试剂配制均于实验室配备的通风橱中进行以保证安全性。实验采用的试剂浓度计量方式为摩尔浓度, mol/L, 每次实验配制 120 mL 溶液, 其中 100 mL 在实验开始前置入三口烧瓶并进行实验, 剩余 20 mL 用于每次取样后的溶液补充及备用。配制时, 根据所设定溶液配方及浓度对每种试剂所需质量进行计算, 并对其在室温下的密度进行查询, 计算出质量所对应的体积, 再根据总体积计算出室温下水的体积及质量, 通过实验室配备的分析天平进行称量与配制。

本实验中单组分吸收剂为 5 mol/L MEA 水溶液。

为探究其他种类醇胺与 MEA 复配混合溶液性能, 配制了 11 种混合溶液, 溶液体系浓度均为 4 mol/L MEA+1 mol/L 其他组分的水溶液。

为探究 AEEA 与 AEP 比例对混合溶液体系吸收性能的影响, 配制了总浓度为 5 mol/L 的混合溶液, 其中 MEA 浓度为 2~4.5 mol/L, AEEA 或 AEP 浓度为 0.5~3 mol/L。

## 1.3 实验装置与流程

### 1.3.1 $\text{CO}_2$ 吸收解吸实验

实验装置如图 1 所示。实验装置主要由  $\text{CO}_2$  与氮气 ( $\text{N}_2$ ) 气瓶、2 种气体适配的质量流量控制器、气体缓冲瓶、反应装置、冷凝管、集热式磁力搅拌器 (数显恒温油浴锅) 及尾气吸收装置构成。

实验所需气体由气瓶提供, 通过减压阀控制在 0.3~0.4 MPa, 再通过质量流量控制器控制进气流量, 并通入缓冲瓶进行缓冲混合, 而后进入作为反应容器的三口烧瓶与溶液进行反应。反应后的气体通

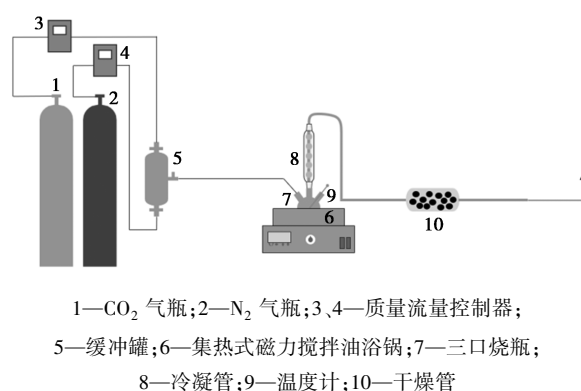


图 1  $\text{CO}_2$  吸收解吸实验装置示意图

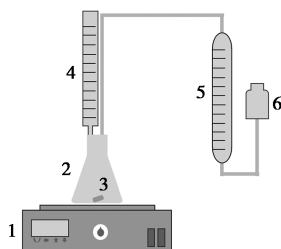
过冷凝管及尾气吸收装置排入大气。经实验测定, 纯 MEA 溶液在吸收过程中经过 4 h 吸收后吸收速率基本降为零, 溶液基本饱和, 因此吸收实验时间均控制在 4 h。

吸收实验前, 量取 100 mL 溶液放入三口烧瓶, 将三口烧瓶放入油浴锅中, 保证导热油浸没烧瓶中溶液部分且烧瓶保持不触底, 加热温度为  $40^\circ\text{C}$ 。同时开启气瓶, 调整质量流量控制器, 控制  $\text{CO}_2$  体积分数 15%,  $\text{N}_2$  体积分数 85%, 总流量 1 000 mL/min。待气体与溶液稳定后, 将气体通入三口烧瓶内, 与吸收剂进行反应。实验开始后, 每隔一定时间进行取样, 液量 1 mL, 并在每次取样后加入等量实验前配制的备用原液, 以保证实验过程中溶液体积不变。待吸收完毕, 停止通入  $\text{CO}_2$ , 同时通过控制器更改  $\text{N}_2$  流量为 150 mL/min, 调整油浴锅温度为  $120^\circ\text{C}$ , 进行解吸实验, 解吸过程中取样操作与吸收过程一致, 整个实验流程环境均为常压。实验过程中的气体流量由质量流量控制器 (ADmass 型, 北京弗罗斯科技有限公司) 控制, 温度由集热式磁力搅拌油浴锅 (DF-101S 型, 上海力辰仪器科技有限公司) 控制<sup>[16]</sup>。

### 1.3.2 $\text{CO}_2$ 负荷测定实验

实验通过测定每次取样的溶液中  $\text{CO}_2$  负荷来确定吸收及解吸量, 测定装置示意图如图 2 所示。该装置由普通磁力搅拌器、锥形瓶、酸式滴定管、量气管与水准瓶组成。测定时, 将待测液体置于锥形瓶中, 为保证容量准确性, 滴定时从 1 mL 样品中取 0.5 mL 样品进行滴定, 盖好瓶塞, 确保气密性良好后, 调节水准瓶与量气管液面高度在同一水平线上并进行读数, 记录此时滴定管内液体量为  $V_1$ , 量气管内液体量为  $V_2$ 。而后由酸式滴定管缓慢滴加 3 mL 稀硫酸 (1 mol/L), 同时启动磁力搅拌器, 使待测液与稀硫酸混合, 充分反应, 使待测液中  $\text{CO}_2$  全

部排出。待量气管中液面保持在一定高度不再下降后,再次调节水准瓶,使其与量气管液面高度在同一水平线上并进行读数,记录此时滴定管液面高度为 $V_3$ ,量气管液面高度为 $V_4$ ,以及实验环境温度为 $T$ 。



1—集热式磁力搅拌器;2—锥形瓶;3—转子;4—酸式滴定管;  
5—量气管;6—水准瓶

图2 CO<sub>2</sub> 负荷测定装置示意图

### 1.3.3 数据处理

(1)吸收剂溶液中CO<sub>2</sub> 负荷:

$$R = \frac{273.15(V_4 - V_3 - V_2 + V_1)}{(273.15 + T)V_m V_{sol}} \quad (1)$$

式中: $R$  为CO<sub>2</sub> 负荷, mol/L;  $V_1$  为滴定前滴定管内液体量, mL;  $V_2$  为滴定前量气管内液体量, mL;  $V_3$  为滴定后滴定管内液体量, mL;  $V_4$  为滴定后水准瓶与量气管中液面高度在同一水平线上时量气管内液体量, mL;  $T$  为滴定时环境温度, °C;  $V_m$  为气体摩尔体积, 22.4 L/mol;  $V_{sol}$  为待测液体积, mL。

(2)富液负荷 $R_{rich}$ : CO<sub>2</sub> 吸收结束时, 吸收剂中CO<sub>2</sub> 负荷即为富液负荷, mol/L。

(3)贫液负荷 $R_{lean}$ : 富液解吸结束时, 吸收剂中CO<sub>2</sub> 负荷即为贫液负荷, mol/L。

(4)吸收剂循环容量 $R_c$ :

$$R_c = R_{rich} - R_{lean} \quad (2)$$

式中: $R_c$  指的是1次吸收解吸实验, 即1次循环中, 解吸出的CO<sub>2</sub> 量, mol/L。

(5)吸收剂解吸率 $DR$ :

$$DR = [(R_{rich} - R_{lean})/R_{rich}] \times 100\% \quad (3)$$

## 2 MEA 复配混合溶液CO<sub>2</sub> 吸收性能分析

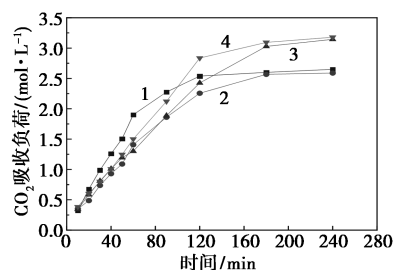
实验中用到的醇胺混合溶液种类较多, 且不同胺类吸收CO<sub>2</sub> 反应机理不同, 为保证直观性, 将不同种类醇胺分类进行讨论。

### 2.1 仲胺与MEA 混合溶液性能分析

伯胺和仲胺与CO<sub>2</sub> 反应机理相同, 伯胺和仲胺与CO<sub>2</sub> 反应生成稳定的氨基甲酸盐, 而在解吸过程中, 氨基甲酸盐又会受热分解, 释放CO<sub>2</sub> 以达到吸收剂再生的目的。其与CO<sub>2</sub> 反应速率快, 但容量较

小, 且由于氨基甲酸盐较为稳定, 再生较为困难, 所需再生能耗较大。

本实验针对DEA、AEEA、MAPA 3种仲胺与MEA 混合溶液的捕集性能进行了探究, 图3为不同溶液吸收过程中CO<sub>2</sub> 负荷随时间变化。

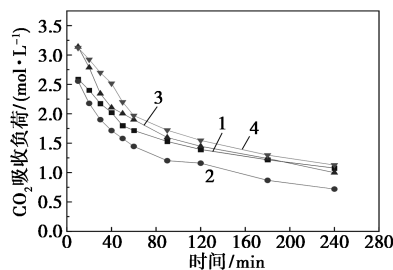


1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L DEA;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEEA;  
4—4 mol/L MEA+1 mol/L MAPA

图3 MEA+仲胺溶液体系吸收过程CO<sub>2</sub> 负荷

在吸收过程中, 纯MEA 溶液吸收速率最快, 在吸收2 h后即接近饱和, 4 h后其富液CO<sub>2</sub> 负荷为2.65 mol/L。其余混合溶液吸收速率相近, 且均略慢于单一MEA 溶液。AEEA 与MEA 混合溶液的饱和容量明显高于单一MEA 溶液, 富液负荷为3.14 mol/L, 吸收容量较MEA 溶液提升18%。

几种溶液的解吸过程中CO<sub>2</sub> 负荷如图4所示。可以看出, 几种溶液的解吸速率较为相近。AEEA 与MEA 混合溶液表现出了良好的解吸性能, 4 h后贫液负荷为1 mol/L, 低于纯MEA 溶液。



1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L DEA;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEEA;  
4—4 mol/L MEA+1 mol/L MAPA

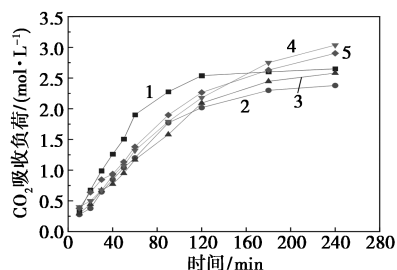
图4 MEA+仲胺溶液体系解吸过程CO<sub>2</sub> 负荷

### 2.2 叔胺与MEA 混合溶液性能分析

叔胺结构与伯胺、仲胺不同, 其上的氮原子与氢原子不直接相连, 因此与CO<sub>2</sub> 反应不生成两性离子, 需要水的参与叔胺才能够与CO<sub>2</sub> 反应。实验结果表明, 叔胺中碳酸氢盐的形成速率快于在相同pH的水中形成的速率, 通常认为叔胺在反应过程中起到了类似催化剂的作用, 即游离胺与水之间形成的

氢键增强了水与  $\text{CO}_2$  反应的活性,从而促进了  $\text{CO}_2$  的水化。

本实验针对 TEA、MDEA、PMDETA、DEEA 4 种叔胺与 MEA 混合溶液的捕集性能进行了探究。图 5 为不同溶液吸收过程中  $\text{CO}_2$  负荷随时间变化。

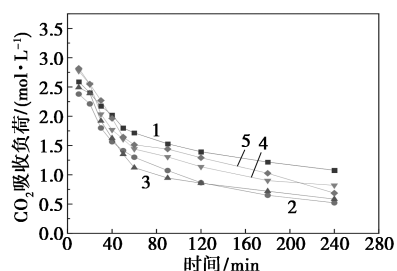


1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L TEA;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L MDEA; 4—4 mol/L MEA+  
1 mol/L PMDETA; 5—4 mol/L MEA+1 mol/L DEEA

图 5 MEA+叔胺溶液体系吸收过程  $\text{CO}_2$  负荷

可以看出,4 种混合溶液前期吸收速率明显慢于单一 MEA 溶液。本实验吸收气体中  $\text{CO}_2$  含量较低,为 15%,因此 TEA+MEA 和 MDEA+MEA 的混合溶液吸收效果均不够理想,在吸收结束时,2 种混合溶液的富液负荷分别为 2.38、2.58 mol/L。而 PMDETA+MEA、DEEA+MEA 与  $\text{CO}_2$  混合溶液吸收速率较高,因此在吸收结束后富液负荷分别为 3.04、2.90 mol/L,均高于纯 MEA 溶液。

几种溶液的解吸过程中  $\text{CO}_2$  负荷如图 6 所示。几种叔胺混合溶液的贫液负荷较 MEA 溶液都有了明显的下降,其中吸收量最低的 TEA+MEA 溶液的贫液负荷也相应最低,仅为 0.52 mol/L。



1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L TEA;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L MDEA; 4—4 mol/L MEA+  
1 mol/L PMDETA; 5—4 mol/L MEA+1 mol/L DEEA

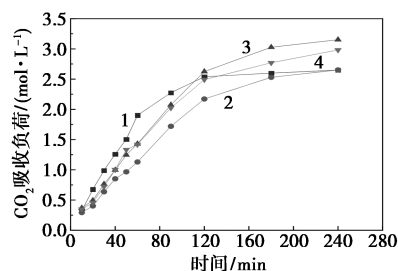
图 6 MEA+叔胺溶液体系解吸过程  $\text{CO}_2$  负荷

### 2.3 空间位阻胺与 MEA 混合溶液性能分析

此类有机胺中至少有 1 个氨基基团与 1 个仲碳或者叔碳原子连接,因而产生了非常明显的空间位阻效应。但较强的空间位阻效应导致有机胺与  $\text{CO}_2$  反应时生成的氨基甲酸盐不稳定,生成的氨基甲酸

盐将与  $\text{H}_2\text{O}$  反应变成胺与  $\text{HCO}_3^-$ ,因此,空间位阻胺与  $\text{CO}_2$  反应的生成物容易解吸,理论上空间位阻胺的最大摩尔吸收比例为 1:1<sup>[17]</sup>。

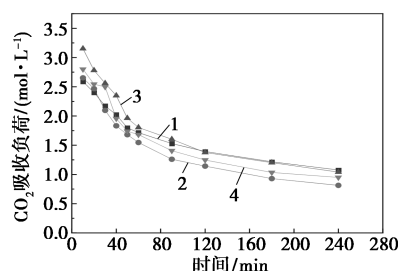
本实验针对 AMP、PZ、AEP 3 种位阻胺与 MEA 混合溶液的捕集性能进行了探究。图 7 为不同溶液吸收过程中  $\text{CO}_2$  负荷随时间变化。AMP+MEA 溶液在吸收结束时的富液负荷与 MEA 相同,均为 2.65 mol/L,而 AEP、PZ 和 MEA 混合溶液在吸收容量上较纯 MEA 溶液均有较大的提升,分别为 3.15、2.98 mol/L。



1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L AMP;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEP; 4—4 mol/L MEA+1 mol/L PZ

图 7 MEA+位阻胺溶液体系吸收过程  $\text{CO}_2$  负荷

混合溶液在解吸过程中  $\text{CO}_2$  负荷曲线如图 8 所示,几种混合溶液的解吸速率较为接近,贫液负荷均低于纯 MEA 溶液,解吸性能均有所提升。可以看出,空间位阻胺的加入对于解吸起到了促进作用,解吸过程所需能量较低,这也就促使其在解吸过程中较快地达到更低的  $\text{CO}_2$  负荷从而降低再生能耗。



1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L AMP;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEP; 4—4 mol/L MEA+1 mol/L PZ

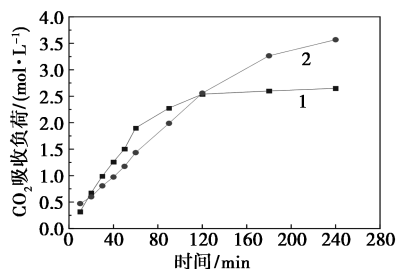
图 8 MEA+位阻胺溶液体系解吸过程  $\text{CO}_2$  负荷

### 2.4 烯胺与 MEA 混合溶液性能分析

烯胺主要的特点是具有多氨基结构,实验针对较为常用的二乙烯三胺 DETA 进行了探究。DETA 结构中含有 2 个  $-\text{NH}_2$  基团和 1 个  $-\text{NH}$  基团,因此有着与伯胺和仲胺相同的反应机理与相似的吸收规律,即吸收过程中与  $\text{CO}_2$  反应生成较为稳定的氨基甲酸盐,且吸收速率较快,解吸能耗较高,但其多

氨基结构大大提升了吸收容量。

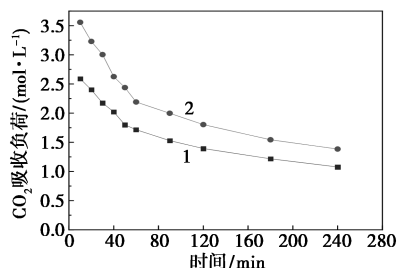
本实验针对 DETA 与 MEA 混合溶液的捕集性能进行了探究。图 9 为不同溶液吸收过程中 CO<sub>2</sub> 负荷随时间变化。在 2 h 时,混合溶液 CO<sub>2</sub> 负荷超过单一 MEA 溶液,并在 2 h 后依旧保持着很高的吸收速率,富液负荷达到 3.57 mol/L,较纯 MEA 溶液提升了 34.7%,为 11 种混合溶液中最高的一组。



1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L DETA

图 9 MEA+烯胺溶液体系吸收过程 CO<sub>2</sub> 负荷

解吸过程中 CO<sub>2</sub> 负荷曲线如图 10 所示,混合溶液有着较高的解吸速率,但由于有着很高的吸收容量,因此在解吸结束时,贫液负荷依旧高于 MEA 溶液,为 1.38 mol/L。可以看出,由于烯胺混合溶液吸收容量大,在相同的解吸时间内,解吸率表现较差。



1—5 mol/L MEA; 2—4 mol/L MEA+1 mol/L DETA

图 10 MEA+烯胺溶液体系解吸过程 CO<sub>2</sub> 负荷

## 2.5 混合溶液吸收解吸性能分析

表 1 为纯 MEA 溶液与 11 种混合溶液的富液 CO<sub>2</sub> 负荷、贫液 CO<sub>2</sub> 负荷与解吸率。通过表格可以看出,吸收容量高的吸收剂,贫液负荷普遍也较高,解吸率相对较低,如 DETA+MEA 混合溶液具有最高的吸收容量,同时解吸率是所有混合溶液当中最低的,仅为 61.2%。

在评估吸收剂性能时,需要综合考虑吸收与解吸性能,若只考虑吸收容量,DETA 与 MEA 混合溶液远优于其余溶液,但其 4 h 解吸率却较低,尽管在 4 h 时仍然保持较高的解吸速率,但解吸时间越久,能耗就会越高,对于成本控制与环保性能均不

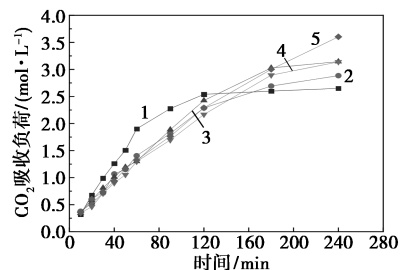
表 1 混合溶液体系富液负荷、贫液负荷、解吸率

溶液种类	富液负荷/ (mol·L <sup>-1</sup> )	贫液负荷/ (mol·L <sup>-1</sup> )	解吸率/ %
5 mol/L MEA	2.65	1.08	59.37
4 mol/L MEA+1 mol/L DEA	2.59	0.72	72.23
4 mol/L MEA+1 mol/L AEEA	3.15	1.00	68.25
4 mol/L MEA+1 mol/L MAPA	3.18	1.13	64.53
4 mol/L MEA+1 mol/L TEA	2.38	0.52	78.09
4 mol/L MEA+1 mol/L MDEA	2.59	0.58	77.35
4 mol/L MEA+1 mol/L PMDETA	3.04	0.82	73.01
4 mol/L MEA+1 mol/L DEEA	2.90	0.69	76.36
4 mol/L MEA+1 mol/L AMP	2.65	0.81	69.31
4 mol/L MEA+1 mol/L AEP	3.15	1.04	66.98
4 mol/L MEA+1 mol/L PZ	2.98	0.95	68.15
4 mol/L MEA+1 mol/L DETA	3.57	1.38	61.20

利<sup>[18]</sup>。TEA 与 MEA 的混合溶液有着最高的解吸率,但对于低浓度的 CO<sub>2</sub> 吸收,吸收速率更快的吸收剂更加有利,因此该混合溶液的吸收效果并不优秀。综合吸收解吸性能来看,AEEA+MEA 和 AEP+MEA 2 种混合溶液较为优秀,兼顾了 2 种性能。AEEA+MEA 溶液的富液负荷为 3.15 mol/L,解吸率 68.25%,AEP+MEA 混合溶液的富液负荷为 3.15 mol/L,解吸率 66.98%。二者吸收容量较单一 MEA 溶液提升了 19%,因此后续针对此 2 种混合溶液继续进行溶液比例对捕集性能的影响探究。

## 2.6 AEEA 比例对体系吸收解吸及循环性能的影响

(1) 不同比例的 AEEA+MEA 溶液在 1 h 内吸收速率均略慢于纯 MEA 溶液,如图 11 所示。1 h 后,4 mol/L MEA+1 mol/L AEEA 保持着最高的吸

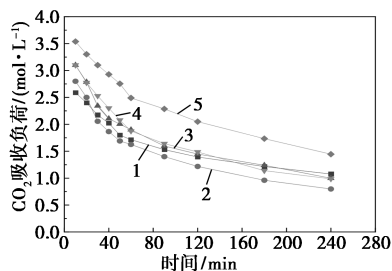


1—5 mol/L MEA; 2—4.5 mol/L MEA+0.5 mol/L AEEA;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEEA; 4—3.5 mol/L MEA+  
1.5 mol/L AEEA; 5—2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA

图 11 不同比例 MEA+AEEA 溶液体系吸收过程 CO<sub>2</sub> 负荷

收速率和 CO<sub>2</sub> 负荷, 2 h 后, 3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEEA 和 2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA 2 种比例的混合溶液更高, 而 2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA 溶液体系在 3 h 后仍然保持着很高的吸收速率, 在吸收结束时达到最高的富液负荷 3.60 mol/L。几种混合溶液体系在吸收实验结束时, 富液负荷均高于单一 MEA 溶液, 可以看出, AEEA 的加入对于吸收容量的提升起到了较好的效果, 且随着 AEEA 比例的提高, 混合溶液体系的吸收容量逐渐增大。

(2) 4 种比例的混合溶液解吸速率均较快, 且在 1 h 后依旧保持高于单一 MEA 溶液的解吸速率, 如图 12。解吸结束后, 4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEEA、4 mol/L MEA + 1 mol/L AEEA、3.5 mol/L MEA+1.5 mol/L AEEA 3 种比例溶液体系的贫液负荷均低于纯 MEA 溶液, 体现出较好的解吸性能, 而富液负荷最高的 2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA 溶液体系贫液负荷最高, 为 1.45 mol/L, 这对于降低解吸能耗不利<sup>[19-20]</sup>。由图 13 可以看出, 随着 AEEA 添加量提高, 解吸率呈下降趋势, 吸收容量最低的 4.5 mol/L MEA+0.5 mol/L AEEA 体系有着最高的解吸率, 为 72.3%, 由于 AEEA 黏度较大, 过高的 AEEA 比例也会导致混合溶液黏度更高, 对于解吸起到了不利的影响。



1—5 mol/L MEA; 2—4.5 mol/L MEA+0.5 mol/L AEEA;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEEA; 4—3.5 mol/L MEA+  
1.5 mol/L AEEA; 5—2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA

图 12 不同比例 MEA+AEEA 溶液体系解吸过程 CO<sub>2</sub> 负荷

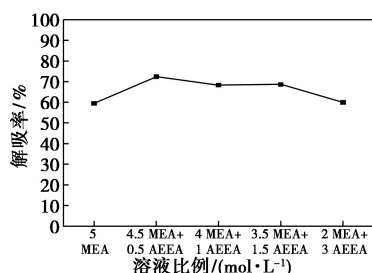


图 13 不同比例 MEA+AEEA 溶液体系解吸率

(3) 4 种混合溶液体系的循环容量如图 14 所示, 随着 AEEA 比例提高, 溶液的富液负荷增大, 同时循环容量提高。2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA 体系解吸率最低, 但由于其有着很高的吸收容量, 因此循环容量最高, 为 2.16 mol/L, 而 3.5 mol/L MEA+1.5 mol/L AEEA 比例体系在拥有着较高解吸率的同时循环容量也很高, 为 2.15 mol/L, 达到了 2 mol/L MEA+3 mol/L AEEA 体系的 99.5%, 因此综合来看循环性能最为优异。

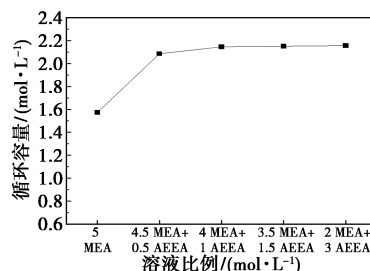
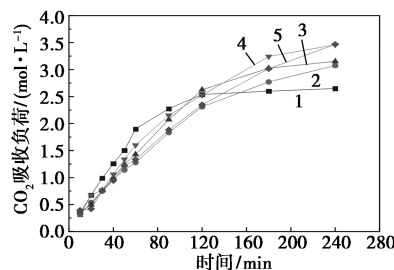


图 14 不同比例 MEA+AEEA 溶液体系循环容量

### 2.7 AEP 比例对体系吸收解吸及循环性能的影响

(1) 4 种不同比例的 AEP+MEA 混合溶液吸收过程 CO<sub>2</sub> 负荷如图 15 所示。可以看出, AEP 的加入对于吸收性能起到了较好的作用, 增大了吸收容量, 4 种溶液中富液负荷最低的 4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEP 相较于纯 MEA 溶液也提升了 16% 的吸收容量。在前 1 h 内, 4 种混合溶液的吸收速率均慢于纯 MEA 溶液, 其中 3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEP 吸收速率最快, 在 1 h 时吸收负荷达到 1.6 mol/L, 且在 1 h 后仍保持着较高的吸收速率。而 2 mol/L MEA+3 mol/L AEP 溶液体系中 AEP 比例最高, 因此有着最高的富液负荷, 为 3.47 mol/L, 然而吸收速率较慢。

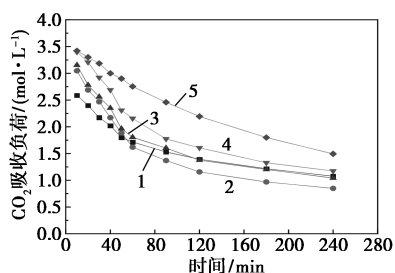


1—5 mol/L MEA; 2—4.5 mol/L MEA+0.5 mol/L AEP;  
3—4 mol/L MEA+1 mol/L AEP; 4—3.5 mol/L MEA+  
1.5 mol/L AEP; 5—2 mol/L MEA+3 mol/L AEP

图 15 不同比例 MEA+AEP 溶液体系吸收过程 CO<sub>2</sub> 负荷

(2) 4 种混合溶液解吸过程中 CO<sub>2</sub> 负荷如图 16

所示,4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEP、4 mol/L MEA + 1 mol/L AEP 和 3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEP 3 种比例的混合溶液解吸速率均比单一 MEA 溶液快,解吸结束时,4 mol/L MEA + 1 mol/L AEP 与 4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEP 贫液负荷均低于纯 MEA 溶液,分别为 1.04、0.85 mol/L,而 3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEP 由于富液负荷更高,贫液负荷略高于单一 MEA 溶液,为 1.17 mol/L。2 mol/L MEA + 3 mol/L AEP 溶液在解吸性能方面表现则较差,解吸速率为 5 种溶液中最低的。混合溶液的解吸率随着 AEP 添加量的提高呈下降趋势,如图 17 所示,当 AEP 含量过多时对于解吸效果起负作用,而适量的 AEP 添加均有利于解吸率的提升,4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEP 混合溶液解吸率达到 72.4%。



1—5 mol/L MEA; 2—4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEP;  
3—4 mol/L MEA + 1 mol/L AEP; 4—3.5 mol/L MEA +  
1.5 mol/L AEP; 5—2 mol/L MEA + 3 mol/L AEP

图 16 不同比例 MEA+AEP 溶液体系  
解吸过程 CO<sub>2</sub> 负荷

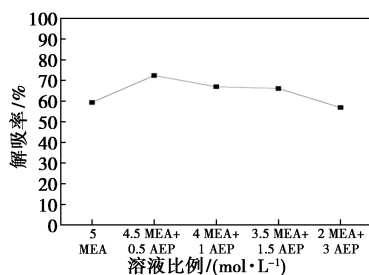


图 17 不同比例 MEA+AEP 溶液体系解吸率

(3) 不同比例 AEP 混合溶液的循环容量如图 18 所示,随着 AEP 添加量的提高,循环容量整体呈先上升后下降的趋势,其中 4.5 mol/L MEA + 0.5 mol/L AEP 与 3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEP 2 种比例的溶液体系较其他几种体系提升较为明显,循环性能更加优异。其中 3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEP 溶液体系有着最高的循环容量,较纯 MEA 溶液体系提高了 45.86%,可见适量的 AEP

添加有利于溶液循环性能的提升。

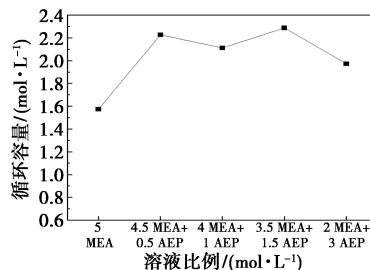


图 18 不同比例 MEA+AEP 溶液体系循环容量

### 3 结论

为探究不同以 MEA 为主吸收剂的混合醇胺吸收剂对电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 的吸收解吸性能,以及不同比例 AEEA 和 AEP 对混合体系吸收剂的性能影响,利用 CO<sub>2</sub> 吸收解吸实验平台及 CO<sub>2</sub> 负荷测定装置对各体系进行了实验探究,以 CO<sub>2</sub> 负荷为指标,得到以下结论。

(1) 相同比例的 11 种混合溶液体系中,DETA+MEA 体系有着最高的吸收容量,为 3.57 mol/L,DEA+MEA、TEA+MEA、MDEA+MEA 3 种混合溶液体系吸收容量均低于单一 MEA 溶液,即此 3 种醇胺的加入不利于较低浓度的 CO<sub>2</sub> 吸收。11 种混合溶液体系的解吸率均高于单一 MEA 体系,几种醇胺的加入有利于吸收剂的解吸性能。

(2) 对于不同比例 MEA+AEEA 溶液体系,吸收容量与解吸率均高于纯 MEA 溶液,AEEA 的加入提高了溶液的吸收解吸性能。3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEEA 的比例体系可以兼顾较高的吸收容量、解吸率以及循环容量,循环容量比纯 MEA 溶液提升了 36.94%。

(3) 对于不同比例 MEA+AEP 溶液体系,吸收容量均高于纯 MEA 溶液,除 2 mol/L MEA + 3 mol/L AEP 体系外,其余体系解吸率均高于 MEA 溶液,适当的 AEP 添加量有利于溶液吸收解吸性能的提升。3.5 mol/L MEA + 1.5 mol/L AEP 溶液在吸收容量、解吸率及循环容量方面都较为突出,循环容量比纯 MEA 溶液提升了 45.86%,有着较好的综合性能。

### 参考文献

- [1] 秦阿宁,吴晓燕,李娜娜,等.国际碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展策略与技术布局分析[J].科学观察,2022,17(4): 29-37.
- [2] 沈海燕,李芳芹,任建兴,等.化学吸收法捕集二氧化碳的研究进展[J].无机盐工业,2024,56(5):11-19,44.

(下转第 189 页)

- chin gallate for enhanced physical stability and controlled release [J]. *Pharmaceuticals*, 2017, 10(4): 88.
- [10] Mieszawska A J, Mulder W J, Fayad Z A, *et al.* Multifunctional gold nanoparticles for diagnosis and therapy of disease [J]. *Molecular Pharmaceutics*, 2013, 10(3): 831–847.
- [11] Gómez-mascaraque L G, Méndez J A, Fernández-gutiérrez M, *et al.* Oxidized dextrans as alternative crosslinking agents for polysaccharides: Application to hydrogels of agarose-chitosan [J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(2): 798–811.
- [12] Rashidinejad A, Birch E J, Sun-Waterhouse D, *et al.* Delivery of green tea catechin and epigallocatechin gallate in liposomes incorporated into low-fat hard cheese [J]. *Food Chem*, 2014, 156: 176–183.
- [13] Forester S C, Lambert J D. The catechol-*O*-methyltransferase inhibitor, tolcapone, increases the bioavailability of unmethylated (–)-epigallocatechin-3-gallate in mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 17: 183–188.
- [14] Wang M, Zhang X, Ying J Z, *et al.* Antiglication activity of lipophilized epigallocatechin gallate (EGCG) derivatives [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 1022–1026.
- [15] Zhang X, Wang J, Hu J M, *et al.* Synthesis and biological testing of novel glucosylated epigallocatechin gallate (EGCG) derivatives [J]. *Molecules*, 2016, 21(5): 620.
- [16] Bangham A D, Standish M M, Watkins J C. Diffusion of univalent ions across the lamellae of swollen phospholipids [J]. *Mol Biol*, 1965, 13(1): 238–252.
- [17] He H, Yi L, Qi J, *et al.* Adapting liposomes for oral drug delivery [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2018, 9(1): 36–48.
- [18] Chen W, Zou M, Ma X, *et al.* Co-encapsulation of EGCG and quercetin in liposomes for optimum antioxidant activity [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(1): 111–120.
- [19] Istenič K, Korošec R C, Ulrih N P. Encapsulation of (–)-epigallocatechin gallate into liposomes and into alginate or chitosan microparticles reinforced with liposomes [J]. *Journal of Science and Food Agriculture*, 2016, 96(13): 4623–4632.
- [20] 马宁, 濮少杰. 茶多酚脂质体的制备 [J]. *食品科学*, 2012, 33(20): 16–20.
- [21] Yang S, Liu W, Liu C, *et al.* Characterization and bioavailability of vitamin C nanoliposomes prepared by film evaporation–dynamic high pressure microfluidization [J]. *Dispers Sci Technol*, 2012, 33: 1608–1614.
- [22] Fan M, Xu S, Xia S, *et al.* Preparation of salidroside nano-liposomes by ethanol injection method and in vitro release study [J]. *Eur Food Res Technol*, 2008, 227: 167–174.
- [23] Lu Q, Li D C, Jiang J G. Preparation of a tea polyphenol nanoliposome system and its physicochemical properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(24): 13004–13011.
- [24] Manosroi A, Wongtrakul P, Manosroi J, *et al.* Characterization of vesicles prepared with various non-ionic surfactants mixed with cholesterol [J]. *Colloids And Surfaces B-Biointerfaces*, 2003, 30(1/2): 129–138.
- [25] Xia S Q, Xu S Y. Ferrous sulfate liposomes: Preparation, stability and application in fluid milk [J]. *Food Res Int*, 2005, 38: 289–296.
- [26] Imura T, Otake K, Hashimoto S, *et al.* Preparation and physicochemical properties of various soybean lecithin liposomes using supercritical reverse phase evaporation method [J]. *Coll and Surf B*, 2002, 27: 133–140.
- [27] Marianecchi C, Di Marzio L, Rinaldi F, *et al.* Niosomes from 80 s to present: The state of the art [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 205: 187–206. ■
- .....
- (上接第 183 页)
- [3] Zhang Z E, Wang T, Blunt M J, *et al.* Advances in carbon capture, utilization and storage [J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115627.
- [4] 程志远. 一种新型脱硝除碳烟气净化装置的试验探究 [J]. *能源与节能*, 2023, (3): 89–92, 198.
- [5] 吴江, 陈玉年, 张鑫, 等. 碳中和背景下燃煤烟气重金属污染物控制技术展望 [J]. *上海电力大学学报*, 2022, 38(5): 427–432.
- [6] Xu S Q, Dai S P. CCUS as a second-best choice for China's carbon neutrality: An institutional analysis [J]. *Climate Policy*, 2021, 21(7): 927–938.
- [7] 吴悦, 万祥龙, 钱艳峰, 等. 二氧化碳捕集与分离技术研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2023, 51(3): 247–251.
- [8] 杨晴, 孙云琪, 周荷雯, 等. 我国典型行业碳捕集利用与封存技术研究综述 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2023, 51(1): 101–110, 145.
- [9] Xin K, Hashish M, Roghair I, *et al.* Process simulation and economic Analysis of pre-combustion CO<sub>2</sub> capture with deep eutectic solvents [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 573267.
- [10] 熊波, 陈健, 李克兵, 等. 工业排放气二氧化碳捕集与利用技术进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(1): 9–18.
- [11] Hou S S, Chiang C Y, Lin T H. Oxy-fuel combustion characteristics of pulverized coal under O<sub>2</sub>/recirculated flue gas atmospheres [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1362.
- [12] 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.
- [13] Du Y B, Zhao N, Wang J X, *et al.* Effect of CO<sub>2</sub> on coal devolatilization in oxy-fuel combustion: Exploring the influence of temperature and inherent alkali/alkaline earth metal [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 96: 103004.
- [14] 王建行, 赵颖颖, 李佳慧, 等. 二氧化碳的捕集、固定与利用的研究进展 [J]. *无机盐工业*, 2020, 52(4): 12–17.
- [15] 康宇龙, 白艳伟, 江绍静, 等. 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): 1768–1771, 1775.
- [16] 魏炜, 曾令梓, 刘凤霞, 等. 混合醇胺捕集低浓度 CO<sub>2</sub> 性能研究 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(3): 116–122.
- [17] Nwaoha C, Saiwan C, Tontiwachwuthikul P, *et al.* Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture: Absorption-desorption capabilities of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), piperazine (PZ) and monoethanolamine (MEA) tri-solvent blends [J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2016, 33: 742–750.
- [18] 贺鹏, 郑伯红, 龚凯. 醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究 [J]. *现代化工*, 2016, 36(9): 171–174.
- [19] 赵东亚, 王家凤, 田群宏, 等. MEA 法碳捕集工艺再生塔能耗优化 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(2): 181–186.
- [20] 赵东亚, 揭超, 李兆敏. 醇胺法碳捕集工艺解吸塔能耗分析 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(6): 150–155. ■