

DMBA-DEEA-水三元吸收剂的 CO₂ 吸收解吸特性

沈超^{1,2}, 李瑶瑶^{1,2}, 刘颖颖², 刘长军¹, 鲁厚芳^{1,2*}, 梁斌^{1,2}
(1. 四川大学化工学院, 四川 成都 610065;
2. 四川大学新能源与低碳技术研究院, 四川 成都 610065)

摘要: 高吸收效率与低解吸能耗的化学吸收剂是降低 CO₂ 捕集成本的有效途径。从吸收剂的吸收速率、解吸速率、循环负载量、循环吸收量和循环效率等对不同组成的 *N,N*-二甲基丁胺 (DMBA) 与 *N,N*-二乙醇胺 (DEEA) 水溶液的 CO₂ 吸收解吸特性进行了研究。结果表明, 此吸收剂体系 CO₂ 吸收容量大, 可达 1.603 3 mol/kg, 吸收 CO₂ 后溶液会分成 CO₂ 浓度相差较大的两相, 其中富集相 CO₂ 的浓度可达 2.688 1 mol/kg, 贫相 CO₂ 的浓度为 0.511 9 mol/kg。适宜的吸收剂组成为 2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA, 其循环负载量为 0.193 6, 循环吸收量为 1.283 2 mol/kg, 循环效率为 96.95%。

关键词: CO₂ 捕集; *N,N*-二甲基丁胺; *N,N*-二乙醇胺; 循环效率

中图分类号: TQ028.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)06-0141-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.06.033

Absorption and desorption performances of DMBA-DEEA-water against CO₂

SHEN Chao^{1,2}, LI Yao-yao^{1,2}, LIU Ying-ying², LIU Chang-jun¹, LU Hou-fang^{1,2*}, LIANG Bin^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Institute of New Energy and Low-carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Using chemical absorbents with high absorption efficiency and low desorption energy requirement is an effective access to reduce the cost of CO₂ capture. In this paper, from the aspects such as absorption rate, desorption rate, cyclic loading amount, cyclic absorption capacity, and cyclic efficiency of absorbents, the absorption and desorption performance of various content aqueous solution of *N,N*-dimethylbutylamine (DMBA) and *N,N*-diethylethanolamine (DEEA) against CO₂ is studied. The results show that the CO₂ absorption capacity for this absorbent system is as large as 1.603 3 mol/kg. Once after absorbing CO₂, the solution will form two phases with different concentrations of CO₂. Of which the concentration of CO₂ reaches 2.688 1 mol/kg in the enriched phase and is 0.511 9 mol/kg in the lean phase. The optimal composition of absorbent system is 2 mol/L of DMBA plus 4 mol/L of DEEA, which shows cyclic loading amount of 0.193 6, cyclic absorption capacity of 1.283 2 mol/kg and cyclic efficiency of 96.95%.

Key words: CO₂ capture; *N,N*-dimethylbutylamine; *N,N*-diethylethanolamine; cyclic efficiency

全球气候变暖日益成为一个严峻的问题, CO₂ 的减排受到愈来愈多的关注。CO₂ 捕集、封存和利用是最快速有效实现二氧化碳减排目标的技术路线。CO₂ 捕集的方法主要有吸收法和吸附法等^[1]。吸收法包括物理吸收法和化学吸收法, 与物理吸收法相比, 化学吸收法具有吸收容量大, 吸收速率快的特点, 是目前工业上捕集 CO₂ 的首选方法。由于 CO₂ 气体呈酸性, 碱性溶剂被广泛地用于 CO₂ 捕集研究。目前研究、应用较多的体系有: 乙醇胺 (MEA)、甲基二乙醇胺 (MDEA)、二乙醇胺 (DEA)、*N,N*-二乙醇胺 (DEEA)+哌嗪 (PZ) 等^[2-6]。溶剂吸收法大规模工业应用面临的主要障碍是解吸能耗较高, 操作费用高, CO₂ 净减排效率仍需提升^[7]。

相变吸收剂捕集 CO₂ 为降低解吸能耗提供了一种新的思路^[8-9]。与传统的化学吸收法相比, 脱除相同量的 CO₂ 相变吸收剂工艺送入解吸塔的液量减少, 因而能耗较低。Raynal 等提出的适用于 DMX 试剂的 DMXTM 工艺流程, 可以将解吸能耗从 MEA 的 3.7 GJ/(t CO₂) 降低到 2.3 GJ/(t CO₂)^[8-9]。

目前公开报道的可用于酸性气体吸收的相变吸收剂主要为二元有机胺体系^[10]。徐志成等^[11]通过实验发现, 3 mol/L 三乙胺 (TEA) 和 5 mol/L 二烯丙基胺 (DAA) 在吸收 CO₂ 后可分为两相。他们还系统研究了 1,4-丁二胺 (BDA) 和 DEEA 组成的两相吸收剂, 并确定最佳的吸收浓度为 2 mol/L BDA+4 mol/L DEEA, 但是 BDA 和 DEEA 的水溶液吸收

收稿日期: 2016-12-07

作者简介: 沈超 (1992-), 男, 硕士生, 主要从事相变吸附剂脱除 CO₂ 工作, 13163211675@163.com; 鲁厚芳 (1970-), 女, 博士, 教授, 主要从事化工过程研究及新工艺开发等研究, 通讯联系人, 028-85999978, luhouf@163.com。

CO₂ 后,整个体系的黏度增大,流动性降低,对分相造成困难^[12-13]; Bruder 等发现 2 mol/L DEEA + 5 mol/L 3-氨基丙胺 (MAPA) 吸收 CO₂ 后会发生相变,且吸收剂的循环负荷比 5 mol/L MEA 高^[14]。DEEA 与水 and 有机胺都互溶,可作为有机溶剂捕集 CO₂ 的基础试剂; *N,N*-二甲基丁胺 (DMBA) 吸收 CO₂ 后具有较大的 CO₂ 解吸速率^[15]。目前未见用 DMBA-DEEA-H₂O 体系来捕集 CO₂ 的文献报道。

笔者对 DMBA-DEEA-H₂O 吸收剂吸收解吸 CO₂ 的性能进行了研究,并比较了此吸收剂与 5 mol/L MEA 吸收 CO₂ 的效果。结果表明,其吸收 CO₂ 的容量高,解吸速率快,循环吸收量和循环效率较高。

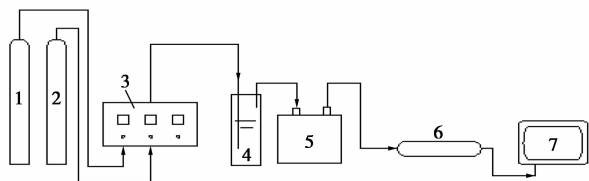
1 实验部分

1.1 试剂

乙醇胺 (MEA, 质量分数 ≥ 99.0%) 和 *N,N*-二乙基乙醇胺 (DEEA, 质量分数 ≥ 99.0%) 均购自成都市科龙试剂化工厂; *N,N*-二甲基丁胺 (DMBA, 质量分数为 98%) 购自上海阿拉丁试剂有限公司; CO₂ (体积分数 ≥ 99%) 和 N₂ (体积分数 ≥ 99.999%) 均购自成都东风气体有限公司。

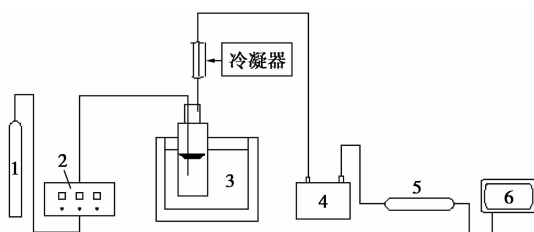
1.2 实验装置

吸收实验装置如图 1 所示,吸收温度为 20℃。N₂ 和 CO₂ 组成的气体由质量流量计控制,混合气体的总体积流量为 200 mL/min,其中 CO₂ 的体积分数为 10.6%。在 100 mL 的圆底烧瓶吸收器中,CO₂ 与 25 mL 吸收剂进行反应,未参与反应的气体依次经过冷凝管、酸洗瓶和干燥管,然后进入 CO₂ 红外气体分析仪,当 CO₂ 分析仪的示数与预先配制的 CO₂ 体积分数一致时,停止反应(反应时间大约为 1 h)。在解吸时(如图 2 所示),向解吸容器中加入 10 mL 富集 CO₂ 的吸收液,用流量为 80 mL/min 的 N₂ 吹扫,携带解吸的 CO₂ 进入 CO₂ 红外分析仪,当仪器



1—N₂ 瓶; 2—CO₂ 瓶; 3—质量流量计; 4—吸收装置;
5—酸洗瓶; 6—干燥管; 7—CO₂ 分析仪

图 1 CO₂ 吸收过程示意图



1—N₂ 瓶; 2—质量流量计; 3—磁力搅拌水浴; 4—酸洗瓶;
5—干燥管; 6—CO₂ 分析仪

图 2 CO₂ 解吸过程示意图

的示数小于 0.1% 时,停止解吸实验,解吸温度控制在 90℃。

1.3 分析方法

实验结束后,采用滴定法确定溶液中游离胺和 CO₂ 的浓度^[16]。在滴定胺浓度时,取约 0.5 g 样品于锥形瓶中,用 20 mL 去离子水溶解,以酚酞为指示剂,用 0.2 mol/L 的稀盐酸滴定,当溶液由红色变为浅粉色时,停止滴定,胺的浓度计算式为:

$$C_{\text{胺}} = (C_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}}) / m_{\text{样品}} \quad (1)$$

滴定 CO₂ 的浓度时,将约 0.5 g 样品与 25 mL 0.5 mol/L BaCl₂ 溶液和 25 mL 0.2 mol/L NaOH 混合,加热沸腾使 CO₂ 转化为 BaCO₃ 沉淀,然后将溶液调至中性,随后用过量盐酸溶解 BaCO₃,将溶液煮沸,用 NaOH 反滴过量的盐酸。CO₂ 浓度 (mol/kg) 的计算式为:

$$C_{\text{CO}_2} = (V_{\text{HCl}} \cdot C_{\text{HCl}} - V_{\text{NaOH}} \cdot C_{\text{NaOH}}) / (2m_{\text{样品}}) - C_{\text{CO}_2, \text{blank}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{CO}_2, \text{blank}}$ 为不加样品采用上述方法滴定后计算得到的 CO₂ 浓度, mol/kg, 旨在消除所用溶液中含有的 CO₂ 对结果的影响。

1.4 实验中参数的定义及计算方法

吸收时, N₂ 的流量在反应前后不变。反应后尾气中 CO₂ 的流量计算式为:

$$L_{\text{CO}_2, \text{吸收后}} = L_{\text{N}_2} / (1 - y_{\text{CO}_2, \text{吸收后}}) - L_{\text{N}_2} \quad (3)$$

式中: L_{N_2} 和 $L_{\text{CO}_2, \text{吸收后}}$ 为反应器出口 N₂ 和 CO₂ 的体积流量, mL/min; $y_{\text{CO}_2, \text{吸收后}}$ 为吸收后气体中 CO₂ 的体积分数。

利用状态方程将气体的体积流量换算为摩尔流量,所以吸收剂的瞬时吸收速率和 0~*t* 时间内的吸收量分别为:

$$r_{\text{abs}} = [Q_{\text{CO}_2, \text{吸收前}}(t) - Q_{\text{CO}_2, \text{吸收后}}(t)] / m_{\text{吸收剂}} \quad (4)$$

$$R_{\text{abs}}(t) = \int_0^t r_{\text{abs}} dt \quad (5)$$

式中: r_{abs} 是吸收剂的瞬时吸收速率, mol/(kg·s); $R_{\text{abs}}(t)$ 是吸收剂 0~*t* 时间内的总吸收量, mol/kg;

$Q_{\text{CO}_2, \text{吸收前}}$ 和 $Q_{\text{CO}_2, \text{吸收后}}$ 为CO₂的摩尔流率, mol/s; 吸收实验结束时的 $R_{\text{abs}}(t)$ 即为CO₂的吸收容量 R_{abs} , mol/kg。

吸收过程中CO₂负载量的计算式为:

$$\alpha_{\text{abs}}(t) = R_{\text{abs}}(t)/C_{\text{胺}} \quad (6)$$

式中: $C_{\text{胺}}$ 为溶液中游离胺的浓度, mol/kg。吸收结束时CO₂的负载量即为溶液的富液负载量 α_{rich} 。

对下层溶液进行解吸时, N_2 的流率不变, 吸收剂解吸CO₂的瞬时解吸速率和0~ t 时间段内解吸出来CO₂的量的计算式分别为:

$$r_{\text{des}} = [Q_{N_2, \text{解吸}}/(1 - y_{\text{CO}_2, \text{解吸}}) - Q_{N_2, \text{解吸}}]/m_{\text{解吸}} \quad (7)$$

$$R_{\text{des}}(t) = \int_0^t r_{\text{des}} dt \quad (8)$$

式中: $Q_{N_2, \text{解吸}}$ 为N₂的摩尔流率, mol/s; $y_{\text{CO}_2, \text{解吸}}$ 为解吸时尾气中CO₂的体积分数; r_{des} 为瞬时解吸速率, mol/(kg·s); $R_{\text{des}}(t)$ 为0~ t 时间内的解吸量, mol/kg;解吸结束时的解吸量为溶液的循环吸收量 R_{des} 。

解吸实验中溶液中的CO₂负载量计算式为:

$$\alpha_{\text{des}} = \alpha_{\text{abs}} - R_{\text{des}}/C_{\text{胺}} \quad (9)$$

解吸实验结束时的CO₂负载量即为贫液负载量 α_{lean} 。

根据以上计算的贫富液的负载量, 得循环效率计算式为:

$$\theta = \Delta\alpha/\alpha_{\text{rich}} \quad (10)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为贫富液的CO₂负载量之差, 即 $\Delta\alpha = \alpha_{\text{rich}} - \alpha_{\text{lean}}$ [16]。

CO₂的脱除率计算式为:

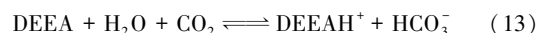
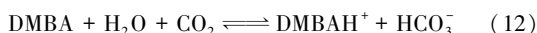
$$\text{CO}_2 \text{ 的脱除率} =$$

$$[(R_{\text{des}} \cdot m_{\text{下相}})/(Q_{\text{CO}_2, \text{吸收前}} \cdot t_{\text{反应}})] \times 100\% \quad (11)$$

式中: $m_{\text{下相}}$ 为吸收剂吸收CO₂后下相的质量; $t_{\text{反应}}$ 为吸收时间。

2 结果与讨论

MEA的氮原子上有活泼的氢原子, 所以MEA与CO₂反应先生成两性离子, 两性离子再与MEA反应生成氨基甲酸根[17]; DMBA、DEEA氮原子上没有H原子, 不会形成氨基甲酸根, 被吸收的CO₂形成碳酸氢根离子, 总反应式如下:



CO₂在三级胺的作用下与H₂O反应生成碳酸氢根与RR'R''NH⁺(R、R'、R''为烷基或烷氧基), 碳酸氢盐与RR'R''NH⁺易溶于水, 而难溶于有机溶液, 所以, 胺与CO₂反应后生成物溶于水, 从而与有机

溶液分离, 可形成水相和有机相两相[12-13, 18]。

2.1 吸收剂组成对CO₂的吸收容量和相变的影响

根据所给出的DMBA和DEEA的摩尔比配制水溶液作吸收剂, 吸收剂的体积为10 mL, 实验结果如表1所示。

表1 不同摩尔比DMBA和DEEA吸收CO₂情况

实验序号	DMBA和DEEA的摩尔比	吸收前	吸收后	吸收剂增重比例/(mg·g ⁻¹)	分相时间/min	上下层体积比
1	0:4	一相	一相	19.60	—	—
2	1:4	一相	一相	15.34	—	—
3	1:3	一相	一相(加热分相)	17.50	—	—
4	2:4	一相	两相	35.87	5.0	3:1
5	2:3	一相	两相	39.75	5.3	3:1
6	2:2	一相	两相	22.31	20.0	1:1
7	3:3	一相	两相	34.78	5.2	3:1
8	2:1	两相	两相	7.12	—	—

通入CO₂后, $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA})$ 为2:4、2:3和3:3的吸收剂在通气5 min左右出现油状液滴, 开始出现两相, 停止试验后, 10 min能完全分离为上下两相, 上下相的体积比大约为3:1; $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA}) = 2:2$ 的吸收剂在通气20 min后出现油状液滴, 反应完成后, 30 min后上下层能分离开, 上下层的体积比大约为1:1; $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA})$ 为0:4、1:4和1:3的吸收剂吸收CO₂后吸收剂仍然是澄清透明的一相。以吸收剂的增重比例大, 吸收剂吸收CO₂后有油状液滴出现, 上下层完全分离的时间短, 上下层的体积比大为依据, 取 $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA})$ 为2:3、2:4和3:3的混合吸收剂作为接下来吸收解吸CO₂的吸收剂。

2.2 DMBA和DEEA混合溶液及5 mol/L MEA吸收CO₂后的组成

根据2.1中所述的实验结果, 选取 $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA})$ 为2:3、2:4和3:3的吸收剂进行研究, 其分相后各相中游离胺及CO₂浓度如表2所示。

由表2中可以看出, $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA}) = 3:3$ 吸收CO₂后, 其下层CO₂的浓度(2.688 1 mol/kg)是上层CO₂浓度的5.25倍, 而上层游离胺的浓度(7.812 4 mol/kg)是下层游离胺浓度的4.78倍, 这是相变吸收剂的主要特征。CO₂主要集中在下层, 而游离胺主要集中在上层, 这是由于CO₂和胺反应

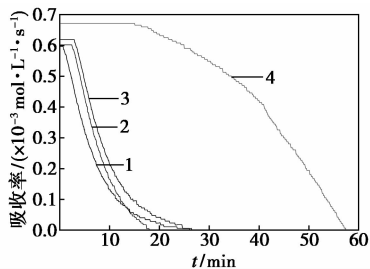
后生成碳酸氢根,消耗了溶液中的游离胺,生成物主要集中在下层,导致下层游离胺的浓度低于上层的数倍;而解吸过程是吸收的逆过程,在解吸过程中,CO₂ 被释放出来,同时胺也再生,所以解吸后下层游离胺的浓度会增加,且解吸后吸收剂没有分相。相变吸收剂吸收 CO₂ 后的下层 CO₂ 的浓度要高于 MEA 吸收 CO₂ 后的浓度 (2.357 8 mol/kg);解吸后 $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA}) = 2 : 4$ 吸收剂的 CO₂ 浓度为 0.431 8 mol/kg,MEA 解吸后溶液中 CO₂ 的浓度为 1.532 9 mol/kg。这主要是由于 MEA 是一级胺,与 CO₂ 反应快,形成的化合物稳定,所以在 90℃ 条件下解吸困难,解吸的时候不容易释放出 CO₂,而 DMBA 和 DEEA 都是三级胺,在解吸时容易释放出 CO₂^[17]。因此,此吸收剂体系可实现在较低温度条件下解吸。

表 2 吸收剂吸收 CO₂ 后溶液中 CO₂ 和胺的分布

试剂	胺浓度/ (mol·kg ⁻¹)	CO ₂ 浓度/ (mol·kg ⁻¹)
DMBA:DEEA=2:3上层	3.9235	0.8760
DMBA:DEEA=2:4上层	5.3208	0.9542
DMBA:DEEA=3:3上层	7.8124	0.5119
DMBA:DEEA=2:3下层	2.9300	1.4238
DMBA:DEEA=2:4下层	1.3570	2.6502
DMBA:DEEA=3:3下层	1.6348	2.6881
DMBA:DEEA=2:3下层解吸后	3.0829	1.1048
DMBA:DEEA=2:4下层解吸后	4.1590	0.4318
DMBA:DEEA=3:3下层解吸后	3.4268	1.1914
5M MEA	2.7209	2.3578
5M MEA 解吸后	4.8209	1.5329

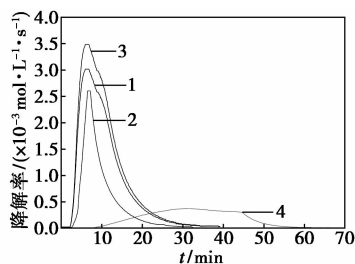
2.3 吸收剂吸收解吸 CO₂ 的速率

不同吸收剂体系吸收解吸 CO₂ 的速率分别如图 3 和图 4 所示。



1—2 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA;
2—2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA;
3—3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA;4—5 mol/L MEA

图 3 吸收剂吸收 CO₂ 速率



1—2 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA;
2—2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA;
3—3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA;4—5 mol/L MEA

图 4 吸收剂解吸 CO₂ 速率

从图 3 中可以看出,5 mol/L MEA 与 DMBA:DEEA:H₂O 吸收剂相比具有较大的吸收速率,其最大速率为 $6.718 \times 10^{-4} \text{ mol}/(\text{kg} \cdot \text{s})$,比相变吸收剂高。随着 CO₂ 的通入,MEA 吸收 CO₂ 的速率变化较慢,在 0~40 min 的时间段内维持在较高的吸收速率,在 $t = 40 \text{ min}$ 时,MEA 的吸收速率只下降了 37.36%,这是由于 MEA 是一级胺,一级胺的碱性强,其与 CO₂ 的反应速率快;DMBA:DEEA:H₂O 吸收剂在 0~10 min 内吸收速率下降较快,在 $t = 10 \text{ min}$ 时, $n(\text{DMBA}) : n(\text{DEEA}) = 2 : 3, 2 : 4, 3 : 3$ 的吸收速率分别由刚开始吸收时的最大吸收速率下降到了 0.130 9、0.165 1、0.216 4 mol/(kg·s);在解吸时,3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 吸收剂的解吸速率较快,最大解吸速率为 $3.484 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{kg} \cdot \text{s})$,是相同条件下 MEA 最大解吸速率的 9.26 倍;这是因为 CO₂ 与 MEA 产生的化合物较稳定,在 90℃ 的条件下解吸较困难,通常工业上是在 120℃ 左右解吸^[19];而 DMBA 和 DEEA 是三级胺,且 N 原子上连接了 2 个基团,这对 CO₂ 与三级胺形成化合物的稳定性有一定的影响,使他们的稳定性下降^[17],所以其解吸速率较快。

2.4 DMBA、DEEA 混合液与 5 mol/L MEA 的循环效率

吸收剂的循环负载量、循环吸收量、循环效率是评价和选择吸收剂的重要指标。5 mol/L MEA 溶液和 3 种相变吸收剂吸收 CO₂ 的性能如表 3 所示。

5 mol/L MEA 与相变吸收剂在相同的温度下吸收解吸 CO₂,循环负载量、循环吸收量、循环效率分别为 0.171 3、0.883 2 mol/kg 和 35.18%;在相同的条件下都要低于实验中的 3 种相变吸收剂。2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA 吸收剂的循环效率达到 96.95%,其 CO₂ 的脱除效率也较高 (83.25%)。2 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 吸收剂

表3 不同吸收剂吸收解吸CO₂的性能参数

试剂	α_{abs}	α_{des}	$\Delta\alpha$	$R_{\text{abs}}/(\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1})$	$R_{\text{des}}/(\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\theta/\%$	CO ₂ 脱除率/%
5 mol/L MEA	0.4870	0.3157	0.1713	2.5103	0.8832	35.18	94.52
2 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA	0.2758	0.0512	0.2246	1.5885	1.2937	84.69	51.59
2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA	0.2407	0.0470	0.1936	1.5950	1.2832	96.95	83.25
3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA	0.1988	0.0358	0.1630	1.6033	1.3143	94.48	85.95

的循环负载量要比 2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA 和 3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 吸收剂的循环负载量高,这是由于循环负载量是个相对值,2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA、3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 和 2 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 相比尽管胺的浓度增大,但是其吸收 CO₂ 的增加量小,所以导致 2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA 和 3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 吸收剂的循环负载量较低;从 CO₂ 的脱除效率来看,5 mol/L MEA 的 CO₂ 脱除效率最大,但是 MEA 在解吸时需要较高的温度,通常在 120℃ 左右^[19]。

3 结论

研究了不同摩尔比的 DMBA 和 DEEA 水溶液吸收剂吸收、解吸 CO₂ 的性能。结果表明,DMBA 和 DEEA 的水溶液可作为适宜的 CO₂ 吸收剂,一定摩尔比的吸收体系吸收 CO₂ 后分为 CO₂ 浓度不同的两相,下相的浓度较高,2 mol/L DMBA+4 mol/L DEEA 的水溶液的循环吸收量为 1.283 2 mol/kg,循环效率可达 96.95%;3 mol/L DMBA+3 mol/L DEEA 有较高的循环吸收量(1.314 3 kg/mol)和较高的解吸速率,其 CO₂ 脱除率可达 85.95%。

参考文献

[1] Macdowell N, Florin N, Buchard A, *et al.* An overview of CO₂ capture technologies[J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, 3(11): 1645-1669.

[2] Rochelle G T. Amine scrubbing for CO₂ capture[J]. *Science*, 2009, 325: 1652-1654.

[3] Benamor A, Ali B S, Aroua M K. Kinetic of CO₂ absorption and carbamate formation in aqueous solutions of diethanolamine [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2008, 25(3): 451-460.

[4] Vaidya P D, Kenig E Y. Acceleration of CO₂ reaction with *N,N*-diethylethanolamine in aqueous solutions by piperazine [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(1): 34-38.

[5] Konduru P B, Vaidya P D, Kenig E Y. Kinetics of removal of carbon dioxide by aqueous solutions of *N,N*-diethylethanolamine and piperazine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(6):

2138-43.

[6] Zhao B, Liu F, Cui Z, *et al.* Enhancing the energetic efficiency of MDEA/PZ-based CO₂ capture technology for a 650 MW power plant: Process improvement [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 362-375.

[7] 张旭. 化学溶剂 DETA 吸收二氧化碳的解吸过程能耗研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

[8] Raynal L, Alix P, Bouillon P A, *et al.* The DMX (TM) process: An original solution for lowering the cost of post-combustion carbon capture [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 779-786.

[9] Raynal L, Bouillon P A, Gomez A, *et al.* From MEA to demixing solvents and future steps, a roadmap for lowering the cost of post-combustion carbon capture [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(3): 742-752.

[10] Hu L. Methods and systems for deacidizing gaseous mixtures; US, US 7718151 B1 [P]. 2010.5.18.

[11] Xu Z, Wang S, Liu J, *et al.* Solvents with Low Critical Solution Temperature for CO₂ Capture [J]. *Energy Procedia*, 2012, 23(2): 64-71.

[12] Xu Z, Wang S, Chen C. CO₂ absorption by biphasic solvents: Mixtures of 1,4-Butanediamine and 2-(Diethylamino)-ethanol [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 16(10): 107-115.

[13] Xu Z. CO₂ absorption by biphasic solvents; Comparison with lower phase alone [J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 2014, 69(5): 851-864.

[14] Bruder P, Svendsen H F. Solvent comparison for post-combustion CO₂ capture [C]. 1st Post Combustion Capture Conference. Abu Dhabi: Kingdom of Saudi Arabia, 2011.

[15] Xu Z, Wang S, Zhao B, *et al.* Study on potential biphasic solvents: Absorption capacity CO₂ loading and reaction rate [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 494-498.

[16] 徐志成, 王淑娟, 陈昌和. 液液两相吸收剂吸收 CO₂ 的实验研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(3): 336-341.

[17] Sartori G, Savage D W. Sterically hindered amines for carbon dioxide removal from gases [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1983, 22(2): 239-249.

[18] 徐志成, 王淑娟, 陈昌和. BDA/DEEA 两相吸收剂吸收 CO₂ 的研究 [J]. *工程物理论报*, 2013, 34(5): 993-997.

[19] 宋微. 有机胺二氧化碳吸收剂的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010. ■