

吸收 CO₂ 新型混合化学吸收剂的研究

王金莲, 方梦祥*, 晏水平, 骆仲泐, 岑可法

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 以吸收剂吸收速率和再生程度为指标, 在小型实验装置台上研究了 3 种混合吸收剂不同配比的吸收和再生特性, 以确定其吸收剂主体和添加剂的合适配比. 结果表明, 在甲基二乙醇胺(MDEA)中添加哌嗪(PZ), 当混合吸收液 CO₂ 负荷为 0.2 mol·mol⁻¹ 时, MDEA:PZ = 1:0.4 (*m:m*) 混合液 CO₂ 吸收速率比 MDEA:PZ = 1:0.2 (*m:m*) 混合液提高了约 70%. 再生 40 min, PZ 相对浓度为 0 的吸收液再生程度为 91.04%, PZ 相对浓度为 0.2、0.4 和 0.8 时, 混合吸收液的再生程度分别降低为 83.06%、77.77% 和 76.67%. 综合比较, MDEA:PZ = 1:0.4 (*m:m*) 是该混合吸收液合适的配比, 吸收速率和再生特性都有较好改善. 在 10% 一级胺中添加 2% 三级胺既能保持高吸收效率, 又能略微降低再生能耗. 在 10% 二乙醇胺(DEA)中加入 2% 2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP), 混合液表现出 DEA/AMP 混合吸收剂中较好的吸收和再生特性. 3 种配方中, 在一级胺中添加少量三级胺吸收速率最高, 二级胺和少量空间位阻胺混合吸收剂的再生性能最好. 而综合吸收和再生 2 个指标, 三级胺和中量活化剂的混合液有优势.

关键词: 混合吸收剂; 化学吸收法; CO₂; 新型

中图分类号: X701.7 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2630-07

Study of New Blended Chemical Absorbents to Absorb CO₂

WANG Jin-lian, FANG Meng-xiang, YAN Shui-ping, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Three kinds of blended absorbents were investigated on bench-scale experimental bench according to absorption rate and regeneration grade to select a reasonable additive concentration. The results show that, among methyldiethanolamine(MDEA) and piperazine(PZ) mixtures, comparing MDEA:PZ = 1:0.4 (*m:m*) with MDEA:PZ = 1:0.2 (*m:m*), the absorption rate is increased by about 70% at 0.2 mol·mol⁻¹. When regeneration lasting for 40 min, regeneration grade of blended absorbents with PZ concentration of 0.2, 0.4, and 0.8 is decreased to 83.06%, 77.77% and 76.67% respectively while 91.04% for PZ concentration of 0. MDEA:PZ = 1:0.4 (*m:m*) is a suitable ratio for MDEA/PZ mixtures as absorption and regeneration properties of the blended absorbents are all improved. The aqueous blends with 10% primary amines and 2% tertiary amines could keep high CO₂ absorption rate, and lower regeneration energy consumption. Adding 2% 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) to 10% diethanolamine (DEA), the blended amine solvents have an advantage in absorption and regeneration properties over other DEA/AMP mixtures. Blended solvents, which consist of a mixture of primary amines with a small amount of tertiary amines, have the highest absorption rate among the three. And mixed absorbents of secondary amines and a small amount of sterically hindered amines have the best regeneration property. To combine absorption and regeneration properties, blends with medium activator addition to tertiary amines are competitive.

Key words: blended absorbent; chemical absorption method; carbon dioxide; new

CO₂ 对温室效应的贡献占 60% 以上^[1]. 世界 CO₂ 排放量近年来以较快速度增长, 其中中国 CO₂ 总排放量仅次于美国, 列世界第 2 位, 并呈现较快增长趋势^[2]. 因此, 必须控制 CO₂ 排放.

现有研究表明, 化学吸收法是脱除 CO₂ 最有前途的方法之一^[3]. 尽管化学吸收法在煤气化、合成气制备、燃油重整和制氢、氮肥生产及燃煤电厂烟气脱 CO₂ 等领域都有应用, 但都存在能耗过高的问题^[4,5]. 对此, 很多研究者从新吸收剂开发、吸收装置改进、能耗综合利用等方面进行了研究^[6]. 对于吸收剂开发研究而言, 目前的研究重点是采用“高效低耗”的混合吸收剂来取代常规的单一吸收剂^[1]. 目前

国内外已取得一系列成果^[7~11], 且研究结果表明混合吸收剂中添加剂的浓度影响着混合吸收剂吸收 CO₂ 的性能^[12~14].

本试验研究了 3 种混合吸收剂配方, 用混合吸收剂的 CO₂ 吸收速率和再生程度 2 个指标来确定较为合适的吸收剂混合配比. 所得结果可以指导吸收 CO₂ 的新型混合化学吸收剂配制. 3 种混合吸收剂分别为: 一是在三级胺甲基二乙醇胺

收稿日期: 2006-12-06; 修订日期: 2007-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50676083)

作者简介: 王金莲(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为烟气 CO₂ 回收与控制, E-mail: wangjinlian_cv@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mxfang@zju.edu.cn

(methyldiethanolamine, MDEA)中添加活化剂哌嗪(piperazine, PZ)构成的混合吸收剂;二是在一级胺一乙醇胺(monoethanolamine, MEA)和氨基乙酸钾(aminoacetic acid potassium, AAAP)中分别添加MDEA构成的混合吸收剂;三是在二级胺二乙醇胺(diethanolamine, DEA)中添加空间位阻胺 2-氨基-2-甲基-1-丙醇(2-amino-2-methyl-1-propanol, AMP)构成的混合吸收剂。

1 材料与方法

1.1 实验装置

采用自制的吸收和再生装置,对混合吸收剂的吸收和再生特性进行了研究,如图 1、2 所示。吸收装置采用特制的尖嘴玻璃管进行鼓泡,并控制气体流量及气流中二氧化碳含量。为了便于对比,直接采用纯二氧化碳气体进行吸收,气流量恒定在 100 mL·min⁻¹。鼓泡的同时开动磁力搅拌器,以恒定的搅拌速率进行搅拌,以促进 CO₂ 的分散和吸收。

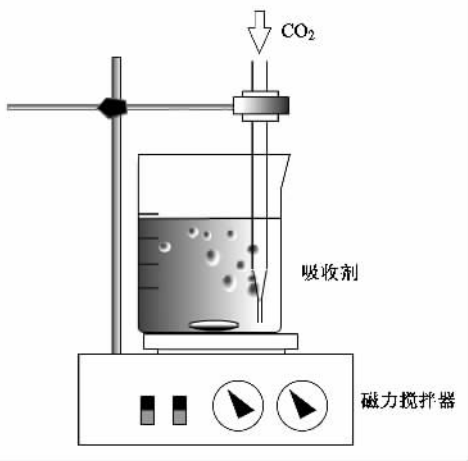


图 1 直接接触吸收装置

Fig.1 Direct contact absorption apparatus

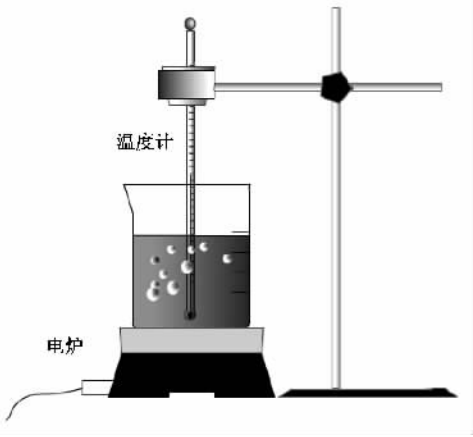


图 2 再生实验装置

Fig.2 Regeneration apparatus

再生装置采用控温电炉(1 000 W)作为加热源进行加热再生,再生过程中蒸发的水经冷凝收集后返回吸收液中。

1.2 实验吸收剂

本实验吸收剂选用了 MEA[H₂N(CH₂)₂OH],分析纯,含量 99.0% ~ 100.3%; DEA [HN(CH₂CH₂OH)₂],化学纯,含量 98% ~ 102%; MDEA [CH₃N(CH₂CH₂OH)₂],工业级,含量不少于 80%; PZ [NH(CH₂)₂NH(CH₂)₂],化学纯,含量不少于 98%; AMP[H₂NCH₃CCH₃CH₂OH],化学纯,含量不少于 97%; AAAP [H₂NCH₂COOK] 由氨基乙酸[H₂NCH₂COOH,含量不少于 99.0%]与同摩尔数的 KOH 反应得到。

1.3 实验方法

实验中,吸收液的主体质量浓度控制在 10%,添加剂质量浓度分别为 2%、4% 和 8%,两者构成 1:0.2(主体:添加剂)、1:0.4 和 1:0.8(质量比)。分别表示添加剂的添加量为少量、中等量和较大量。混合吸收剂吸收和再生过程均保持相同的操作条件。采用吸收液相对吸收速率与吸收液 CO₂ 负荷的关系曲线反映吸收液的吸收特性,采用再生程度与再生时间的关系曲线反映再生情况。吸收液的吸收过程 CO₂ 负荷 α_i (mol·mol⁻¹)和再生过程 CO₂ 负荷 β_j 由化学滴定法确定^[12]。吸收速率 γ_i [mol·(L·s)⁻¹]及再生程度 η_j 分别由式(1)和(2)计算得到。

$$\gamma_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\Delta t} \cdot m \tag{1}$$

$$\eta_j = \frac{\beta_0 - \beta_j}{\beta_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中, i, j 分别为吸收、再生实验中取样的次数; Δt 为 2 次取样时间间隔, s; m 为吸收液中吸收剂初始摩尔浓度, mol·L⁻¹; β_0 为再生初始溶液的 CO₂ 负荷, mol·mol⁻¹。

2 结果与分析

2.1 三级胺为主体,添加活化剂的混合吸收剂吸收/再生效果对比

MDEA 作为常用的三级胺,再生能耗低,CO₂ 吸收速率也较低,而 PZ 相对于常规吸收剂有最高的吸收速率^[1]。因此在 MDEA 中添加 PZ,理论上有助于综合两者的优势。图 3、4 分别反映了 PZ 相对浓度变化对 MDEA/PZ 混合液吸收和再生效果的影响。

图 3 表明混合吸收液的 CO₂ 吸收速率随 PZ 浓

度增加而有很大的提高.如混合液 CO_2 吸收负荷为 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时, PZ 相对浓度为 0.4 时的 CO_2 吸收速率比相对浓度为 0.2 时提高了约 70%. 相似的规律也由 Xu 等^[15] 观察到. 原因在于 PZ 作为一种高 CO_2 吸收速率的活化剂, 改变了 MDEA 与 CO_2 的反应历程, 使得 MDEA 与 CO_2 的反应不再受限制于 CO_2 的水化反应, 加快了反应速率. Lu 等^[16] 对 MDEA/PZ 混合液的反应机理有较为详细的描述. 同时由图 3 可看出, 在相同的吸收时间内, 添加 PZ 后, 整个混合吸收液的吸收能力得以提高.

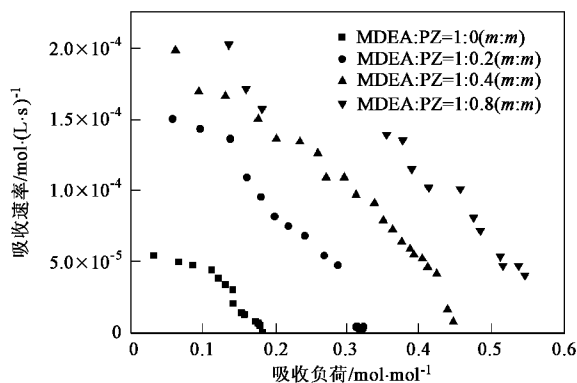


图 3 PZ 浓度对吸收速率的影响

Fig.3 Effect of PZ concentration on absorption rate

由图 4 可知, PZ 相对浓度越高, 相同再生时间内, 混合吸收液的再生程度越低. 如再生 40 min, PZ 相对浓度为 0 时再生程度为 91.04%, 而 PZ 相对浓度分别为 0.2、0.4 和 0.8 时, 混合吸收剂的再生程度则分别降低为 83.06%、77.77% 和 76.67%, 分别降低了 8.76%、14.58% 和 15.78%. 这是因为 PZ 需要较大的再生能耗, MDEA 吸收液中加入 PZ 后使 MDEA 良好的再生性能变差. 正如 Cullinane 等^[17] 在 K_2CO_3 溶液中添加 PZ 后发现混合吸收液再生能耗逐步升高现象一样. 当添加的 PZ 相对浓度达到 0.4、0.8 时, 混合吸收液的再生程度不再降低, 这说明当添加的 PZ 量至一定值后, 混合液的再生特性基本不再受 PZ 相对浓度的影响.

由上述分析可知, 在三级胺中添加活化剂, 混合吸收液的吸收速率和吸收能力有较大幅度的提高, 优化了吸收性能, 但其再生能耗有所增加, 添加中量活化剂是较为合适的. 在实际应用中还应根据实际情况, 确定合理的添加浓度, 以实现最佳效益.

2.2 一级胺为主体, 添加三级胺的混合吸收剂吸收/再生效果对比

MEA 作为目前最常用的一级胺吸收剂, CO_2 吸收速率高, 但再生能耗高. 氨基乙酸钾溶液(AAAP)的吸收特性和 MEA 相似, 可看成一级胺, 并且有较高的表面张力^[18,19]. 而 MDEA 具有再生能耗低的特性. 因此, 在 MEA、AAAP 吸收剂中分别添加 MDEA, 理论上可以在保持 MEA、AAAP 高 CO_2 吸收速率的基础上, 改善系统的再生情况. 图 5、6 分别反映了 MEA/MDEA 和 AAAP/MDEA 混合吸收剂中 MDEA 浓度对吸收速率和再生程度的影响.

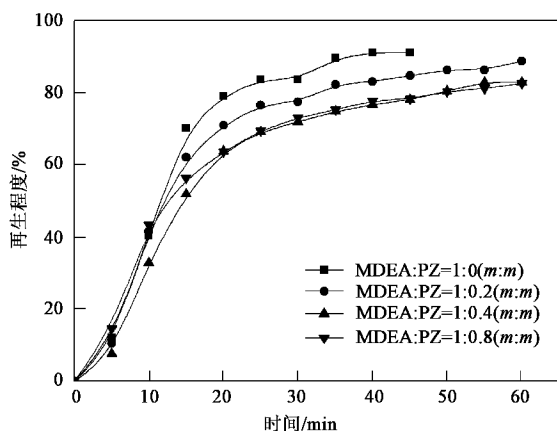


图 4 PZ 浓度对再生程度的影响

Fig.4 Effect of PZ concentration on regeneration grade

由图 5 可知, 在 MEA/MDEA 和 AAAP/MDEA 混合吸收剂中吸收速率随 MDEA 浓度的变化趋势大致是一样的. 以图 5(a) MEA/MDEA 混合液为例, 10% MEA 吸收剂主体中, MDEA 相对浓度由 0 变化到 0.8, 在相同吸收液 CO_2 负荷下, 吸收液 CO_2 吸收速率基本呈下降趋势. 但 MEA:MDEA = 1:0.2 表现特殊, 其吸收速率比 MEA 反而略有提高. 但从再生情况来看, MDEA 相对浓度越高, 相同再生时间内, 混合吸收液的再生效果越好, 如图 6 所示. 以图 6(b) AAAP/MDEA 混合吸收液为例, 再生 30 min, MDEA 相对浓度为 0 时的再生程度为 62.88%, 而相对浓度分别为 0.2、0.4 和 0.8 时, 再生程度分别为 68.78%、69.23% 和 80%, 分别提高了 9.38%、10.1% 和 27.23%. 这说明, 在一级胺中添加 MDEA 后, 有助于吸收液的再生^[5,8], 且 MDEA 相对浓度越高, 再生效果越好.

出现上述现象的原因可由混合液吸收 CO_2 机理说明. 对于一、二级胺吸收 CO_2 的反应机理, 很多研究者均作了详细的分析^[20~23]. 而当在一级胺 RNH_2 中添加少量三级胺 R_3N 时, 其反应将有所

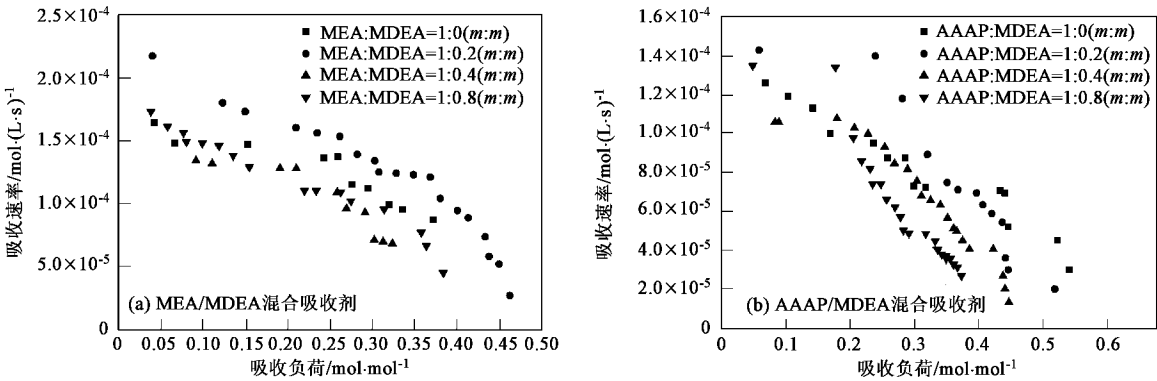


图 5 MDEA 浓度对吸收速率的影响

Fig.5 Effect of MDEA concentration on absorption rate

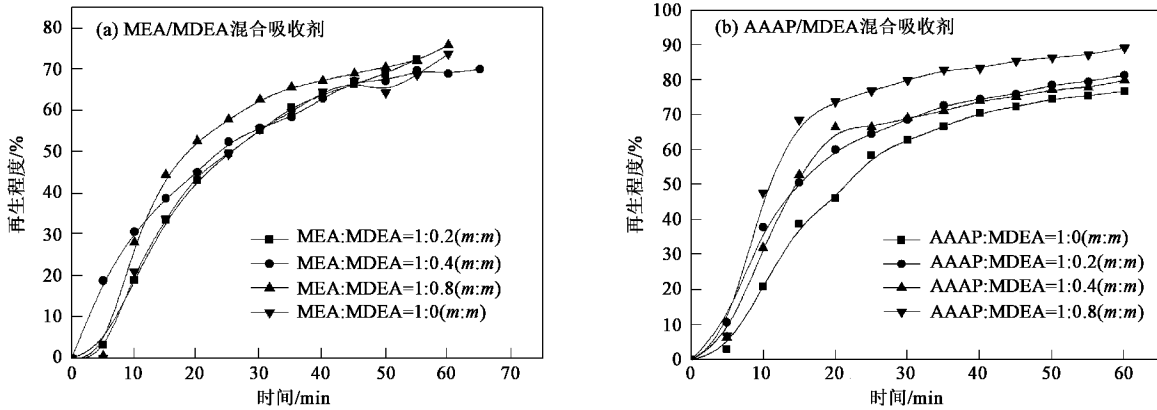
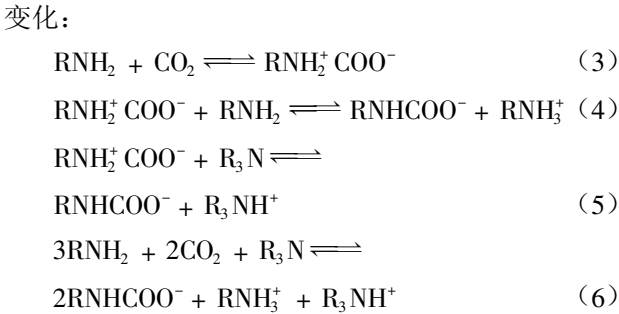


图 6 MDEA 浓度对再生程度的影响

Fig.6 Effect of MDEA concentration on regeneration grade



显然,当加入的三级胺量较少时,反应(5)的存在会加速反应(3)中两性离子的分解,使得反应(3)向右进行,提高了 CO₂ 的吸收速率,这就说明了为何在一级胺中添加少量 MDEA 时,其反应速率会略高于一级胺本身.热再生时,总反应(6)中存在的 R₃NH⁺ 热分解的速率要高于 RNH₃⁺ (这可从三级胺的再生能耗低于一级胺看出),因此 R₃N 的存在将会有利于再生时总反应(6)的逆向进行.而当添加量

增大时,除了上述的反应外,反应(7)将逐渐占主导地位:



众所周知,反应(7)的速率并不高, R₃N 的大量存在将会影响系统对 CO₂ 的吸收速率.与此同时,系统的粘度也越来越大,更不利于 CO₂ 的吸收.但是,由于反应(7)逐渐占据主导地位,系统的再生程度将会逐渐好转,偏向于三级胺的情况.

从上述分析可知,一级胺中添加三级胺后吸收液的吸收和再生特性都发生变化.综合吸收和再生 2 个特性,认为在一级胺中添加少量三级胺是一种效果较好的吸收液混合配比,这样既能保持原一级胺的高吸收速率特性,又能略微降低再生能耗.

2.3 二级胺为主体,添加空间位阻胺的混合吸收剂吸收/再生效果对比

相对于 MEA 而言,DEA 具有较小的再生能耗和 CO₂ 吸收速率.而 AMP 作为空间位阻胺,其最大的

CO_2 负荷为 $1 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 有更高的吸收速率^[24], 且腐蚀性较低^[5]. 因此, DEA/AMP 混合吸收液将会融合两者优点, 具有研究价值.

图 7、8 反映了 DEA/AMP 混合吸收液中 AMP 相对浓度对吸收速率和再生程度的影响, 并与工程上应用较多的 MEA 进行对比, 以更清楚显示其混合特性.

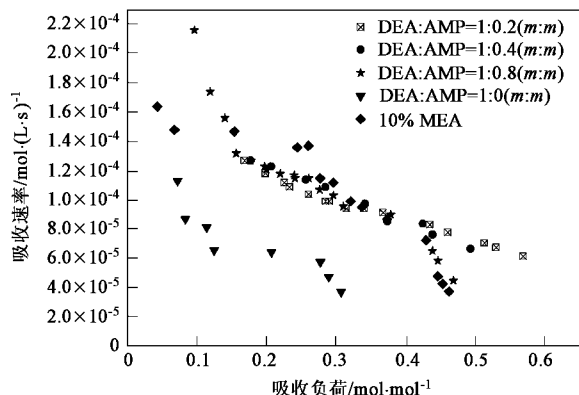


图 7 AMP 浓度对吸收速率的影响

Fig. 7 Effect of AMP concentration on absorption rate

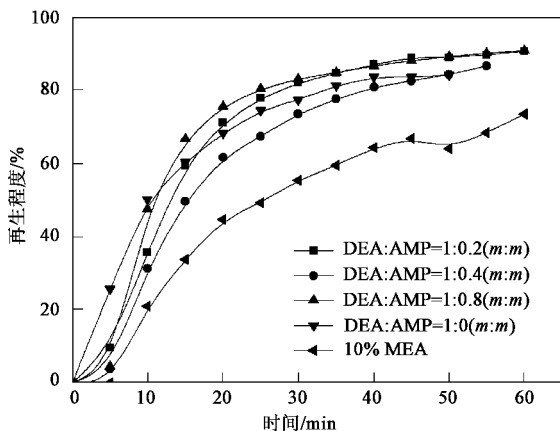


图 8 AMP 浓度对再生程度的影响

Fig. 8 Effect of AMP concentration on regeneration grade

由图 7 可知, 吸收液的 CO_2 吸收速率随吸收负荷的增大而递减. 相同吸收负荷下, DEA/AMP 混合液的 CO_2 吸收速率远高于 10% DEA 吸收剂. 原因可能是, DEA 吸收 CO_2 的反应遵从两性离子机制^[25]. AMP 的加入加速了两性离子的分解^[26], 从而提高吸收液 CO_2 吸收速率. 吸收负荷 $0.12 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 之前, DEA:AMP = 1:0.8 混合液的吸收速率最大. 而吸收负荷大于 $0.43 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 后, DEA:AMP = 1:0.2 混合液的吸收速率最大. DEA/AMP 混合液 CO_2 吸收速率

曲线与 10% MEA 大致重合. 因此从吸收速率而言, DEA/AMP 混合液与 MEA 不相上下.

图 8 表明相同的再生时间, MEA 的再生程度远低于 DEA 及 DEA/AMP 混合吸收液. 再生 12 min 后, DEA:AMP = 1:0.8 混合液的再生程度最高, 但 35 min 后 DEA:AMP = 1:0.2 混合液的再生程度与其几乎一致, 同为最高. 如解吸 45 min, 10% MEA 的再生程度为 67.18%, AMP 相对浓度为 0 的 DEA 吸收剂的再生程度为 84%, 相对浓度分别为 0.2、0.4 和 0.8 的混合吸收剂的再生程度分别为 89.4%、82.99% 和 88.51%. AMP 相对浓度为 0.2 的混合吸收液的再生程度比相对浓度为 0.8 的高出 1%, 而比 10% MEA 提高了 33.08%.

由上述分析, 在 DEA 中加入少量和较大量 AMP 吸收液的吸收和再生特性有较好改善. AMP 相对浓度为 0.2 和 0.8 的混合吸收液的吸收速率及再生程度都一度达到相对最高, 且与主体质量浓度相同的 MEA 吸收剂 CO_2 吸收速率不相上下, 而两者再生特性却远优于 MEA. 但考虑到试剂成本问题, 这里推荐 DEA 和少量 AMP 组成的混合吸收液.

2.4 3 种配方比较

图 9、10 为 3 种不同混合吸收剂中较优配比的吸收和再生特性比较. 由图 9 可知, 吸收液 CO_2 负荷 $0.42 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 前, MEA:MDEA = 1:0.2 混合液吸收速率最大, AAAP:MDEA = 1:0.2 混合液次之, 因此一级胺中添加少量三级胺组成的混合吸收液在吸收性能上相对占优势. 吸收液 CO_2 负荷大于 $0.42 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 后 DEA:AMP = 1:0.2 混合液吸收速率最大, 但其在负荷 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 前相对最小. MDEA:PZ = 1:0.4 混合液的吸收速率在 4 种混合液中居于中等. 图 10 表明相同再生时间下, 二级胺和少量空

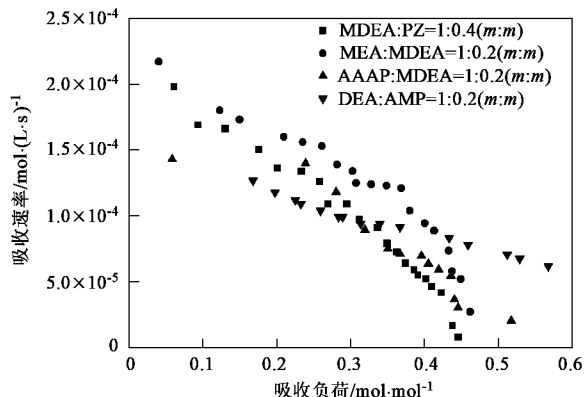


图 9 吸收速率比较

Fig. 9 Compare of absorption rate

间位阻胺组成的混合液再生程度最高,其次是三级胺和中量活化剂的混合液,再生程度最小的是一级胺和少量三级胺的混合液.如解吸 30 min, DEA:AMP = 1:0.2 混合液再生程度为 82.45%, MDEA:PZ = 1:0.4、AAAP:MDEA = 1:0.2 及 MEA:MDEA = 1:0.2 混合液再生程度分别为 71.9%、68.77% 和 55.33%,分别减少 12.8%、16.59% 和 32.89%. 由以上分析可知,综合吸收和再生特性, MDEA:PZ = 1:0.4 混合液具有较高的吸收速率和较低的再生能耗,是较为理想的吸收剂.当然在实际应用中还应考虑工程实际选择合理的吸收剂.

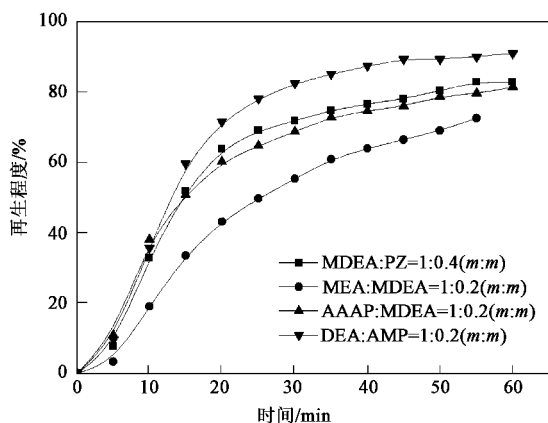


图 10 再生程度比较

Fig. 10 Compare of regeneration grade

3 结论

(1)三级胺 MDEA 为主体,添加活化剂 PZ,混合吸收剂的吸收速率和吸收能力得到较大幅度的提高,但再生能耗随之增加.其中, MDEA:PZ = 1:0.4 混合吸收剂具有较好的吸收和再生性能.

(2)一级胺单乙醇胺 MEA 和氨基乙酸钾 AAAP 为主体,添加少量三级胺 MDEA 吸收剂,既能保持原一级胺的高 CO₂ 吸收速率特性,同时还能略微降低再生能耗.

(3)在二乙醇胺 DEA 中加入少量空间位阻胺 AMP,混合吸收剂的吸收速率和再生特性在原有基础上有较好改善.同时,与 10% MEA 吸收液相比, DEA:AMP = 1:0.2 混合吸收剂的 CO₂ 吸收速率相当,但再生效果更好.

(4)3 种配方中,在一级胺中添加少量三级胺吸收速率最高,二级胺和少量空间位阻胺混合吸收剂的再生性能最好.而综合吸收和再生 2 个指标,三级胺和中量活化剂的混合液效果较好.

参考文献:

- [1] Ma'mun S, Svendsen H F, Hoff K A, *et al.* Selection of new absorbents for carbon dioxide capture[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, **48**: 251 ~ 258.
- [2] Energy Information Administration (EIA). International energy outlook 2005[R]. U S, 2005. 77 ~ 85.
- [3] Riemer P W, Ormerod W G. International perspectives and the results of carbon dioxide capture disposal and utilization studies[J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, **36**(629): 813 ~ 819.
- [4] 毛松柏. MEA 法脱碳新技术[J]. *气体净化*, 2004, **4**(1): 10 ~ 12.
- [5] Jared P C, Philip D P, Tomas T. An economic scoping study for CO₂ capture using aqueous ammonia[R]. DOE/NETL Report, 2005. 1 ~ 12.
- [6] 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与发展[J]. *化工进展*, 2006, **25**(9): 1018 ~ 1024.
- [7] Feron P H M, Jansen A E. The production of carbon dioxide from flue gas by membrane gas absorption [J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, **38**: S93 ~ S98.
- [8] Kumar P S, Hogendoorn J A, Feron P H M, *et al.* New absorption liquids for the removal of CO₂ from dilute gas streams using membrane contactors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57**: 1639 ~ 1651.
- [9] Mimura T, Matsumoto K, Iijima M, *et al.* Development and application of flue gas carbon dioxide recovery technology [A]. In: *Proceedings of the fifth international conference on greenhouse gas control technologies*[C]. Australia, 2001. 138 ~ 142.
- [10] 朱宝库, 陈炜, 王建黎, 等. 膜接触器分离混合气中二氧化碳的研究[J]. *环境科学*, 2003, **24**(5): 34 ~ 38.
- [11] Singh P, Niederer J P M, Versteeg G F. Structure and activity relationships for amine based CO₂ absorbents-I[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, **1**(1): 5 ~ 10.
- [12] Tan C S, Chen J E. Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixtures in a rotating packed bed[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, **49**: 174 ~ 180.
- [13] Sakwattanapong R, Aroonwilas A, Veawab A V. Behavior of reboiler heat duty for CO₂ capture plants using regenerable single and blended alkanolamines[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, **44**: 4465 ~ 4473.
- [14] 张卫风, 方梦祥, 骆仲浚, 等. 中空纤维膜接触器分离烟气中 CO₂[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(5): 773 ~ 778.
- [15] Xu G W, Zhang C F. Kinetics study on absorption of carbon dioxide into solutions of activated methyl diethanolamine [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1992, **31**: 921 ~ 927.
- [16] Lu J G, Wang L J, Sun X Y, *et al.* Absorption of CO₂ into aqueous solution of methyl diethanolamine and activated methyl diethanolamine from a gas mixture in a hollow fiber contactor [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, **44**: 9230 ~ 9238.
- [17] Cullinane J T, Rochelle G T. Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**: 3619 ~ 3630.

[18] 张卫风,方梦祥,王树源,等.中空纤维膜接触器分离烟气中CO₂ 试验研究[J].高技术通讯, 2004, **5**:40 ~ 43.

[19] 杨明芬,方梦祥,张卫风,等.膜吸收法脱除电厂模拟烟气中的CO₂[J].环境科学,2005, **26**(4): 24 ~ 29.

[20] 国立清华大学(台湾).以吸收法回收二氧化碳之技术手册[R].台湾:经济部工业局,2002.1 ~ 17.

[21] 张卫风.中空纤维膜接触器分离燃煤烟气中二氧化碳的试验研究[D].杭州:浙江大学,2006.37 ~ 38.

[22] Akanksha, Pant K K, Srivastava V K. Mass transport correlation for CO₂ absorption in aqueous monoethanolamine in a continuous film contactor [J]. Chemical Engineering and Processing,2007, **133**(1): 229 ~ 237.

[23] Mandal B P, Bandyopadhyay S S. Simultaneous absorption of carbon dioxide and hydrogen sulfide into aqueous of 2-amine-2-methyl-1-propanol and diethanolamine [J]. Chemical Engineering Science, 2005, **60**: 6438 ~ 6451.

[24] Saha A K, Bandyopadhyay S S, Biswas A K. Kinetics of absorption of CO₂ into aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol [J]. Chemical Engineering Science, 1995, **50**:3587 ~ 3598.

[25] Jamal A, Meisen A, Lim C J. Kinetics of carbon dioxide absorption and desorption in aqueous alkanolamine solutions using a novel hemispherical contactor- I. Experimental apparatus and mathematical modeling [J]. Chemical Engineering Science, 2006, **61**: 6571 ~ 6589.

[26] Mandal B P, Biswas A K, Bandyopadhyay S S. Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and diethanolamine [J]. Chemical Engineering Science, 2003, **58**: 4137 ~ 4144.