

文章编号: 1000-582X(2012)10-069-07

乙醇胺/多胺的脱碳研究

杜云贵^{a,b}, 刘涛^{a,b}, 辜敏^{a,b}, 卢义玉^{a,b}, 鲜学福^{a,b}

(重庆大学 a. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室; b. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 工业应用于烟气脱 CO₂ 的吸收剂以乙醇胺(MEA)水溶液为主, 提高其性能是吸收法脱 CO₂ 的关键。对相同浓度的 MEA 及其与 4 种多胺, 包括 N-(2-羟乙基)乙二胺(AEEA)、哌嗪(PZ)、二乙烯三胺(DETA)和三乙烯四胺(TETA), 所组成的混胺水溶液(MEA/多胺)对 CO₂ 的吸收、再生性能和腐蚀性开展了实验研究。实验结果表明, 多胺含量较低的 MEA/多胺的吸收和再生性能都较 MEA 有所提高, 腐蚀速度较 MEA 降低。但是多胺含量增大, 再生率有所降低。因此, 适当含量多胺的 MEA/多胺是较 MEA 高效的吸收剂; 4 种混胺中, MEA/DETA 和 MEA/TETA 性能最优。

关键词: 脱碳; 吸收; 再生; 腐蚀; MEA; 多胺

中图分类号: X 511

文献标志码: A

Study on CO₂ removal by monoethanolamine/polyamine aqueous

DU Yungui^{a,b}, LIU Tao^{a,b}, GU Min^{a,b}, LU Yiyu^{a,b}, XIAN Xuefu^{a,b}

(a. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam;
b. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University,
Chongqing 400044, China)

Abstract: Aqueous monoethanolamine (MEA) is the mostly used absorbent for removing carbon dioxide (CO₂) from fuel gas in the industry. Improving the performances of aqueous MEA is the key for the effective CO₂ removal. The absorption, regeneration performances and corrosion properties of MEA and its four blends with polyamines (MEA/polyamines) at the same concentration are studied. The polyamines, including N-(2-hydroxyethyl) ethylenediamine (AEEA), piperazine (PZ), diethylenetriamine (DETA) and triethylenetetramine (TETA), are considered. The results show that the absorption and regeneration capacity of four kind blends of MEA/polyamine are much better than that of MEA when the content of polyamines are low. The corrosion rate of MEA/polyamine is low than that of MEA. However, with the increase of polyamines content in blends, the regeneration rates of the blends decrease. It is concluded that MEA/polyamine with suitable polyamine content is a high efficiency absorption solvent comparing with MEA. Among the four blends of MEA/polyamine, the performance of MEA/DETA and MEA/TETA are the best.

Key words: CO₂ removal; absorption; regeneration; corrosion; MEA; polyamines

收稿日期: 2012-03-29

基金项目: 重庆市科委科技计划项目院士专项资助项目(2010BC6006); 中央高校科研专项(CDJZR10248801); 重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介: 杜云贵(1964-), 男, 重庆大学副教授, 主要从事烟道气净化方面的研究和技术工作。

辜敏(联系人), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, (Tel) 023-65112614; (E-mail) gumin66@yahoo.com.cn.

由 CO₂ 引起的温室效应已成为人类迄今面临的最大的全球气候环境问题之一。燃煤电厂是 CO₂ 的主要排放源,全世界约 40%、我国约 50% 的 CO₂ 排放来自燃煤电厂。现有的燃煤电厂 CO₂ 捕集方法中,燃烧后捕碳技术虽成本较高,但适应于现有几乎所有燃煤电厂,是未来具有最大减排市场潜力的技术^[1]。燃烧后捕碳技术中利用气液接触来去除 CO₂ 最为常见,这类技术最大障碍是烟气的低压力,显然采用依靠 CO₂ 气体压力提高其在吸收液中的溶解度的物理吸收方法不适用,而 CO₂ 化学吸收是以酸碱化学反应为主要的分离基础,克服了物理吸收的缺点,因为吸收效果好、技术成熟等特点成为捕集燃烧后低浓度气源中 CO₂ 的最有效最实用的方法^[2]。CO₂ 化学吸收法的关键技术在于吸收剂,几十年来,各种胺、氨类水溶液都尝试作为 CO₂ 的吸收剂,其中醇胺水溶液是众多化学吸收剂中最有效、最广泛的^[2-5],不过腐蚀一直困扰碱性水溶液的使用。一乙醇胺(MEA)是最早开发并且是应用于 CO₂ 捕集最为频繁的溶剂,其分子量小,吸收酸性气体能力强,同时是最为廉价,是吸收 CO₂ 最具优势^[3]的技术;但是 MEA 会产生最大的反应热,再生能耗大,其腐蚀性也较强,因此随后大力发展了再生能耗低,弱腐蚀性的叔胺类,以甲基二乙醇胺(MDEA)水溶液为主的吸收剂,但是 MDEA 的吸收速率很低,并价格远高于 MEA 使其应用受到很大限制。近年来抗腐蚀剂的发展,使 MEA 水溶液法又恢复成为最主要的工业 CO₂ 吸收剂,如何进一步提高 MEA 吸收液的性能使其成为高效吸收剂成为研究热点,将各种其它组分尝试添加于 MEA 中,即 MEA 混合(复合)胺为一个发展趋势。高效吸收剂的性能应该主要具备高吸收性能(包括吸收速率、吸收量)、高再生性(包括再生速度、再生量)、低能耗(即高再生率)和低的腐蚀性,另外还应具备价格低廉等特点,某一个性能方面的较大欠缺都会影响吸收液的应用。

多胺因为有多个与 CO₂ 反应的活性基团,其吸收性能高于仅有一个活性基团的 MEA,可以做为 MEA 的活化剂。以多胺单独使用做为 CO₂ 吸收剂,常用的有哌嗪(PZ)^[6-7]、N-(2-羟乙基)乙二胺(AEEA)^[8-9]、二乙烯三胺^[10-11](DETA)和三乙烯四胺(TETA)^[12-13]。直至今日,以 MEA 为主体掺杂有多胺的混胺研究非常少^[5,14,15],而且性能研究不全面。本文将多胺与 MEA 做一个大的体系进行研究,选择常用的这 4 种多胺与 MEA 构成混胺,全面

研究其性能,结果可应用其它 MEA/多胺混胺;并对其性能进行对比,从中筛选出性能优异的混胺吸收液。

1 试验方法

1.1 实验试剂及仪器

MEA(≥99.0),重庆川东化工试剂厂;PZ(≥98.0)、DETA(≥99.0)、TETA(≥98.0),成都科龙试剂厂;AEEA(≥98.0),国药集团化学试剂有限公司;CO₂ 气体,重庆武益气体有限公司。

吸收液的配制:以纯胺和三次水配制总浓度为 2 mol·L⁻¹ 的 MEA 与多胺的混胺水溶液,实验所用的 2 种混胺中 MEA 与多胺的摩尔数比分别为 4:1(1.6 mol·L⁻¹MEA-0.4 mol·L⁻¹多胺)和 3:2(1.2 mol·L⁻¹MEA-0.8 mol·L⁻¹多胺)。

恒温油浴磁力搅拌器,CO₂ 钢瓶,D-600CD 气体质量流量计,德国 TESTO 温度计。温度和流量数据均由计算机采集数据。

1.2 实验方法

1.2.1 吸收性能测试

吸收液对 CO₂ 的吸收速率在如图 1 所示的实验装置测定。将装有 100 ml 吸收液的吸收瓶放入带磁力搅拌器的恒温油浴中,搅拌速度设定为 180 r·min⁻¹。当吸收液温度达到 40 °C 时,将纯 CO₂ 气体通入吸收瓶中。进口气体流量由气体质量流量计设定控制,本实验为 400 ml·min⁻¹,出口处 CO₂ 流量由流量计记录,当其进口流量接近时,停止实验,此时是吸收 CO₂ 的饱和和吸收点。温度和流量数据各每 2 s 采集一次。

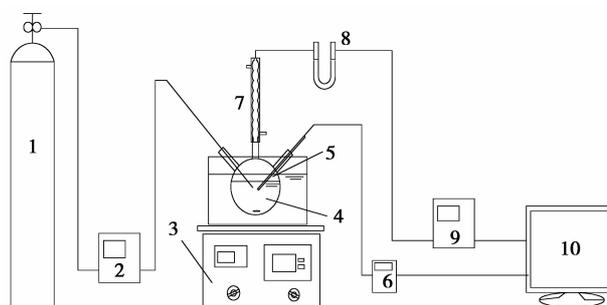


图 1 吸收与再生实验装置图

1. CO₂ 钢瓶, 2. 气体质量流量计,
3. 磁力搅拌器, 4. 三口烧瓶, 5. 温度记录探头,
6. 温度记录仪, 7. 冷凝管, 8. CaCl₂ 干燥管, 10. 计算机

衡量吸收性能的 2 个参数吸收速率和吸收量计算如下

某时刻 CO_2 的吸收速度

$$v_i(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}): v_i = p(L_{\text{in}} - L_{\text{out}})/RT. \quad (1)$$

式(1)中 L_{in} 进口气体流量, L_{out} 为时刻 t 出口流量; p 为 CO_2 压力(1atm); R 为气体常数($0.082\ 06\ \text{L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), T 为气体出口温度。

t 时刻 CO_2 的吸收量 Q_{A} 计算

$$Q_{\text{A}}(\text{mol}) = \sum_{i=0}^{i=t} v_i \cdot \Delta t, \quad (2)$$

Δt 为数据收集间隔时间, s 。

1.2.2 再生性能测试

再生实验仍在图 1 所示装置上进行。向吸收瓶中倾入饱和富液, 将油浴温度升至 $110\ ^\circ\text{C}$, 进行再生实验。当出口流速低于 $10\ \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 停止实验。衡量再生性能的 3 个参数计算方法如下

某时刻 t 的再生速率

$$V_i(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}) = pL_{\text{out}}/RT, \quad (3)$$

某时刻 t 的再生量

$$Q_{\text{R}}(\text{mol}) = \sum_{i=0}^{i=t} V_i \cdot \Delta t, \quad (4)$$

再生率(%) = (最终再生量 / 饱和吸收量) $\times 100\%$ 。

(5)

1.2.3 腐蚀性能测试

采用电化学方法测试吸收液的腐蚀性能。由于无酸性气体存在的醇胺溶液中碳钢的腐蚀速率比其

在水中时更低, 但吸收了 CO_2 的各种胺的腐蚀性大大增加^[16]。因此以饱和 CO_2 的胺水溶液为电解液。工作电极为自制的 Q235-B 碳钢电极, 暴露面积为 $1.3\ \text{cm}^2$; 辅助电极采用大面积铂片, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE), 提到的电位均相对于 SCE。使用前将工作电极依次用 400# ~ 1 500# 金相砂纸打磨成镜面, 再用无水乙醇擦洗和蒸馏水超声清洗, 扫描范围为 $-1.0 \sim 0.5\ \text{V}$, 扫描速率为 $1\ \text{mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验在 CHI660B 电化学工作站于室温下进行。

2 结果与讨论

2.1 吸收性能

4:1 和 3:2 的 MEA/多胺吸收液在吸收过程的吸收速度、吸收量和温度变化分别如图 2 和 3 所示。结果表明在 MEA 中添加多胺, CO_2 的吸收速率(见图 2(a)、图 3(a))和吸收量(见图 2(b), 图 3(b))较 MEA 有所提高; 多胺含量从 20%(4:1 吸收液)增大到 40%(3:2 吸收), 混胺的吸收速率和吸收量进一步提高。混胺吸收效果顺序是 MEA/TETA > MEA/DETA > MEA/AEEA ~ MEA/PZ > MEA。

由表 1 胺的分子结构式可知, MEA 和多胺是伯胺或者仲胺。

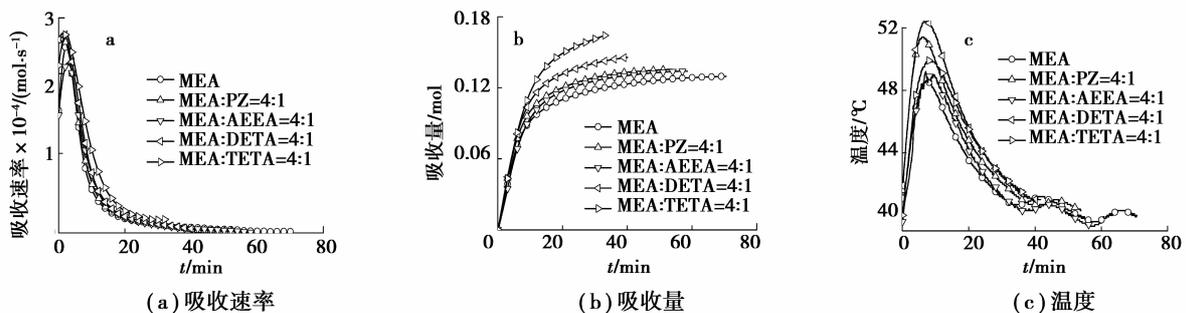


图 2 4:1 MEA/多胺吸收 CO_2 过程

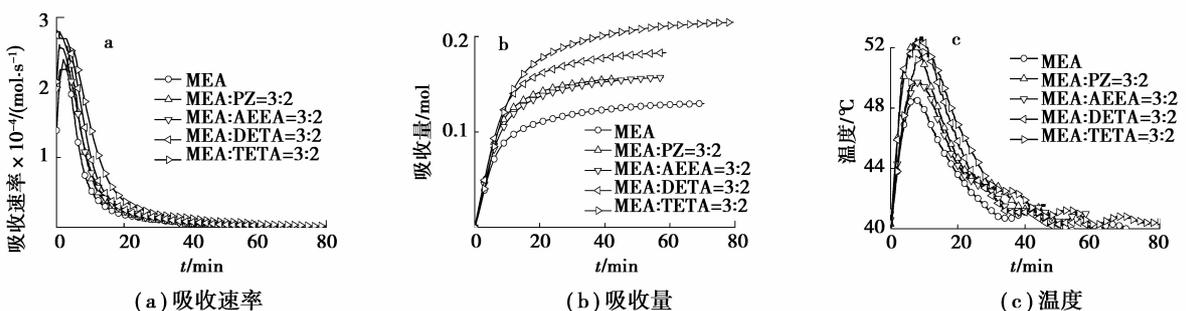
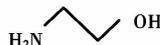
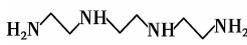


图 3 3:2 MEA/多胺吸收 CO_2 过程

表 1 MEA 和多胺的分子结构式和价格

胺	MEA	AEEA	DETA	TETA	PZ
分子结构式					
1mol L ⁻¹ 吸收液的价格/元	0.216	6.07	0.827	1.2	2.0

伯胺和仲胺的 CO₂ 吸收机理公认的是 Caplow 提出的两性离子机理,其总反应是生成氨基甲酸盐^[17]

$$\text{CO}_2 + 2\text{R}_1\text{R}_2\text{NH} \rightleftharpoons \text{R}_1\text{R}_2\text{NH}_2^+ + \text{R}_1\text{R}_2\text{NCOO}^- \quad (6)$$

式中仲胺的 R₁ = H 时代表伯胺。

由反应(6),伯胺和仲胺吸收 CO₂ 的活性基团分别是 -NH₂ 和 -NH-,含这两种基团的数目越多,吸收能力越强。从 MEA、PZ、AEEA、DETA 和 TETA 的结构式可知,他们对应的活性基团数目分别是 1,2,2,3 和 4 个。因此,相同吸收时间下,多胺对 CO₂ 的吸收速率和吸收量都大于单胺 MEA,多胺含的活性基团数目越多,吸收速率和吸收量也越高,我们以单一 MEA、多胺配制其相同浓度水溶液的吸收液实验结果与该理论分析一致。AEEA 和 PZ 含活性基团相同为 2 个,其吸收性能接近,不过 AEEA 稍大于 PZ,这是因为 PZ 的结构是环状的, AEEA 是直链的而且碳原子少,空间位阻使 PZ 与 CO₂ 的反应速度稍低于 AEEA。

因为多胺的吸收性能高于 MEA,将其加入 MEA,在保持总浓度不变的情况下,就可以提高 MEA 的吸收性能,而且多胺含量增大,吸收增大,图 2 和 3 实验结果正是如此。由表 2 可知,4:1 和 3:2 的 MEA/TETA 的混胺饱和吸收量各是 0.164,

0.215 mol,分别是 MEA (0.129 mol) 的 1.27 和 1.67 倍。虽然有报道 MEA 分别与 DETA^[14] 和 TETA^[15] 之间的含量比为 7:3 时,吸收性能越好最佳,实际上 7:3 也是他们配制的吸收液中多胺含量最高的。因此,仅从吸收性能而言,混胺中多胺比例越高,其性能越好。

图 2b 和图 3b 还表明,各种混胺达到饱和点的时间是不同的。图 2c 和 3c 表明混胺吸收 CO₂ 过程中的温度变化与吸收效果一致,这是因为反应越剧烈(放热越大温度越高),反应彻底,即吸收速率越高,吸收效果越好。但是一方面温度高会加强腐蚀作用。另外,配制相同浓度的胺吸收水溶液,混胺的价格高于 MEA,参见表 1,混胺的价格顺序为 MEA < MEA/DETA < MEA/TETA < MEA/PZ < MEA/AEEA,这也决定改善 MEA 的吸收,多胺在混胺中的比例不能够太大。

2.2 再生性能

2.2.1 再生速率和再生量

在高温状态时,吸收反应(6)逆向进行,释放出纯净的 CO₂ 气体,一是使吸收剂的再生以重复使用,二是得到捕集 CO₂ 产品。4:1 和 3:2 的混胺与 MEA 吸收液的再生结果分别如图 4 和图 5 所示,其饱和吸收量、最终再生量和再生率对比见表 2。

表 2 2.0 mol L⁻¹MEA 及 MEA/多胺的饱和吸收量,最终再生量和再生率

吸收液	饱和吸收量/mol	最终再生量/mol	再生率/%	吸收液	饱和吸收量/mol	最终再生量/mol	再生率/%
MEA	0.129	0.089	68.38	MEA	0.129	0.089	68.38
MEA:PZ=4:1	0.135	0.098	72.69	MEA:PZ=3:2	0.155	0.111	71.61
MEA:AEEA=4:1	0.134	0.103	76.74	MEA:AEEA=3:2	0.157	0.111	70.64
MEA:DETA=4:1	0.146	0.110	75.49	MEA:DETA=3:2	0.183	0.128	69.90
MEA:TETA=4:1	0.164	0.120	73.03	MEA:TETA=3:2	0.215	0.145	68.22

混胺与 MEA 的再生速率见图 4a 和 5a,在初始迅速增大,随着分解反应的进行,溶液中氨基甲酸盐的不断减少导致了再生速率不断减小。混胺的再生

速率在多胺含量低时,较接近;多胺含量增大,速率大小表现为 MEA/TETA > MEA/DETA > MEA/AEEA ~ MEA/PZ > MEA,虽然图 4(a)和 5(a)不

明显,但这一顺序从再生量,见图 4b 和 5b 得到验证,因为再生量是从速率积分对时间得到,特别是 MEA/AEEA 的再生量很接近 MEA/PZ。另外,混

胺的再生时间都较 MEA 短,这从一个侧面表明混胺的再生性能较 MEA 好。

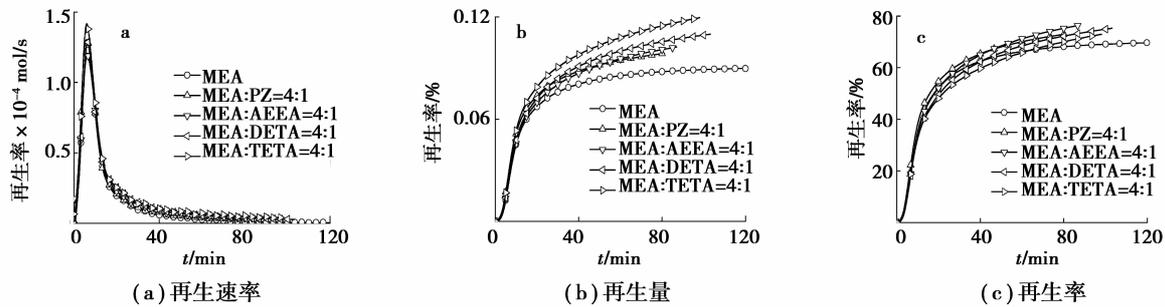


图 4 4:1 的 MEA/多胺吸收液的再生性能

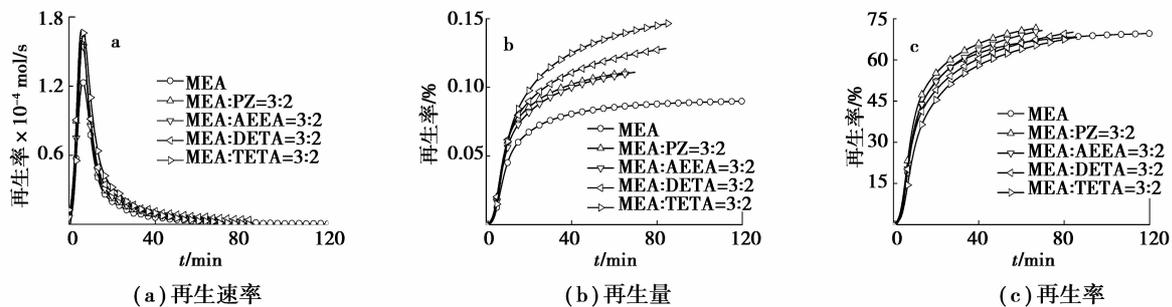


图 5 3:2 的 MEA/多胺吸收液的再生效果

2.2.2 再生能耗

再生率,也称再生程度,由公式(5)计算。由公式可知,再生率是反映吸收、再生效果的综合指标。吸收是放热反应,不需要能耗,再生相反。在相同的再生温度和时间下,不同吸收液再生的能耗是相同的,如果吸收相同的 CO_2 量,再生率越高,则一方面可得到更多的 CO_2 产品,另外一方面吸收剂的再生效果越好,更有利于下一循环的吸收更多的 CO_2 。因此,再生率越高,不仅体现了对 CO_2 的捕集能力高,而且体现了耗越低^[5]。本文以再生率讨论能耗。由表 2,4:1 混胺的再生率较为接近,在 72.69% 以上,都高于单组分 MEA 的再生率 68.38%,所以添加少量多胺,可以降低 MEA 再生的能耗。当多胺在混胺比例增加到 3:2,再生率稍微有所降低,MEA/DETA 和 MEA/TETA 甚至接近于 MEA。从再生性能的角度,多胺含量增大到一定值后,再生率会下降。多胺含量这个自由度的还需要进一步研究,以得到最高的再生率。

2.3 腐蚀性能

图 6 为室温条件下 CO_2 饱和溶液中的碳钢电极的 Tafel 极化曲线。在 Tafel 强极化区时,极化曲线满足 Tafel 式

$$\eta = a + b \lg i. \quad (7)$$

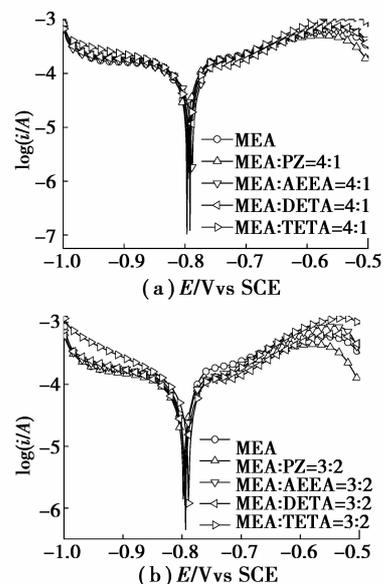


图 6 碳钢电极在 MEA 和 MEA/多胺 CO_2 饱和液中的 Tafel 极化曲线

其中, η 为过电位(V),是电位 E 与自腐蚀电位 (E_{corr}) 的差值; i 为电流密度。 E_{corr} 是 Tafel 曲线 $\lg i$ 的峰值对应的电位。 a 是 i 为 $1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的过电

位, b 为斜率。 i_{corr} 是采用阳极强极化区 ($E = 70 \sim 180 \text{ mV}$) 的 Tafel 线外推求得, 具体方法见文献 [18]。碳钢电极在 MEA 和混胺中的 E_{corr} 与 i_{corr} 如表 3 所示。 E_{corr} 值的大小反映了腐蚀的难易程度,

E_{corr} 值越正, 表明碳钢越难被腐蚀, 即表明吸收液的腐蚀性较弱, 性能好; 反之亦然。 i_{corr} 则反映腐蚀速度, 其值越大, 腐蚀速度越大, 腐蚀性差。

表 3 碳钢电极在 MEA 和 MEA/多胺 CO_2 饱和液中的自腐蚀电位 E_{corr} 与自腐蚀电流密度 I_{corr}

吸收液	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$i_{\text{corr}} / \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$	吸收液	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$i_{\text{corr}} / \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
MEA	-0.795	8.143	MEA	-0.795	8.143
MEA:PZ=4:1	-0.797	7.864	MEA:PZ=3:2	-0.798	5.434
MEA:AEEA=4:1	-0.788	7.196	MEA:AEEA=3:2	-0.796	5.053
MEA:DETA=4:1	-0.789	5.739	MEA:DETA=3:2	-0.794	3.536
MEA:TETA=4:1	-0.786	6.656	MEA:TETA=3:2	-0.789	3.987

从表 3 可以看出, 碳钢在各种混胺吸收液中 E_{corr} 较 MEA 稍有正移, 但是很接近, 表明除了 MEA 之外, 其它混胺的腐蚀性较 MEA 稍低, 但很接近; 混胺的 I_{corr} 都明显小于 MEA, 这表明混胺对碳钢的腐蚀速度低于 MEA。多胺在混胺中的含量增大, E_{corr} 稍有负移, I_{corr} 减小, 即腐蚀性降低。腐蚀速率 $\text{MEA/DETA} < \text{MEA/TETA} < \text{MEA/AEEA} < \text{MEA/PZ} < \text{MEA}$, 3:2 的 MEA/DETA 腐蚀速度最低, 性能最优。

另外, 实验还测定了各种胺溶液吸收 CO_2 前后的 pH 值, 发现混胺的 pH 值与 MEA 接近, 因而将目前发展的 MEA 的抗腐蚀剂应用于混胺是可行的。

3 结 论

1) MEA/多胺吸收性能都较 MEA 明显提高; 随多胺在混胺中的含量增大, MEA/多胺混合溶液的吸收效果进一步提高。混胺吸收效果顺序是 $\text{MEA/TETA} > \text{MEA/DETA} > \text{MEA/AEEA} \sim \text{MEA/PZ} > \text{MEA}$ 。原因在于多胺含更多与 CO_2 反应的活性基团。

2) MEA/多胺吸再生速率较 MEA 提高, 再生量提高明显; 随多胺在混胺中的含量增大, MEA/多胺混合溶液的再生率和再生量都提高, 其顺序上面与吸收效果相同。

3) MEA/多胺的再生率在多胺含量较低 (4:1 吸收液) 时, 较 MEA 明显提高, 即其再生能耗较 MEA 低; 多胺含量增大, 再生率降低。

4) MEA/多胺的腐蚀难易程度与 MEA 接近, 但腐蚀速度明显降低。随多胺在混胺中的含量增

大, 腐蚀速率更为减低。

综合而言, 多胺加入 MEA, 使得吸收液的吸收性能和再生速率、再生量都提高, 腐蚀性减低, MEA/多胺是较 MEA 更好的吸收剂。但是价格和能耗限制多胺含量不能够太高, 混胺中多胺的含量较低时, 所有性能都较 MEA 好。4 种混胺中, MEA/TETA 和 MEA/DETA 的性能、能耗、腐蚀性和价格等各方面具有优势, 具有工业应用的前景。

参考文献:

- [1] 黄斌, 许世森, 郜时旺, 等. 华能北京热电厂 CO_2 捕集工业试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 14-20.
HUANG BIN, XU SHI-SEN, GAO SHI-WANG, et al. Industrial test of CO_2 capture in Huaneng Beijing coal-fired power station [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 14-20.
- [2] RINKER E B, ASHOUR S S, SANDALL O C. Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of diethanolamine and methyldiethanolamine [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 39: 4346-4356.
- [3] 刘芳, 王淑娟, 陈昌和, 等. 电厂烟气氨法脱碳技术研究进展[J]. 化工学报, 2009, 60(2): 269-278.
LIU FANG, WANG SHU-JUAN, CHEN CHANG-HE, et al. Research progress of CO_2 capture by using ammonia from flue gas of power plant [J]. CIESC Journal, 2009, 60(2): 269-278.
- [4] VAN LOO S, VAN ELK E P, VERSTEEG G F. The removal of carbon dioxide with activated solutions of methyl-diethanol-amine [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 55: 135-145.

- [5] 顾光临, 邹海魁, 马乐, 等. 乙醇胺为主体的 CO₂ 吸收剂的复配研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2010, 37(3): 20-25.
GU GUANG-LIN, ZOU HAI-KUI, MA LE, et al. Study of a mixed CO₂ compound absorbent for CO₂ with monoethanolamine as the main component[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(natural Science), 2010, 37(3): 20-25.
- [6] BISHNOI S, ROCHELLE G T. Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine; reaction kinetics, mass transfer and solubility [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55: 5531-5543.
- [7] DERKS P W J, KLEINGELD T, VAN AKEN C, et al. Kinetics of absorption of carbon dioxide in aqueous piperazine solutions[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 6837-6854.
- [8] KIM I, SVENDSEN H F. Heat of absorption of carbon dioxide (CO₂) in monoethanolamine (MEA) and 2-(aminoethyl) ethanolamine (AEEA) Solutions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46: 5803-5809.
- [9] 盖群英, 张永春, 周锦霞, 等. 有机醇胺溶液吸收二氧化碳的研究[J]. 现代化工, 2007, 27(2): 395-397.
GAI Qunying, ZHANG Yongchun, ZHOU Jinxia, et al. Study on absorption of carbon dioxide by amines [J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27(2): 395-397.
- [10] HARTONO A, DA SILVA E F, SVENDSEN H F. Kinetics of carbon dioxide absorption in aqueous solution of diethylenetriamine (DETA)[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64: 3205-3213.
- [11] 项菲, 施耀, 李伟. 混合有机胺吸收烟道气中 CO₂ 的实验研究[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(4): 206-208.
XIANG Fei, SHI Yao, LI Wei. Study on absorption of CO₂ into aqueous blends of DETA/TETA and MDEA [J]. Environmental Pollution & Control, 2003, 25(4): 206-208.
- [12] 景晓燕, 宿辉, 张密林. 三乙烯四胺吸收 CO₂ 的初探[J]. 化学与粘合, 2000, 2: 58-60.
JING Xiaoyan, XU Hui, ZHANG Milin. Study on the absorption of CO₂ by using TETA aqueous Solutions [J]. Chemistry and Adhesion, 2000, 2: 58-60.
- [13] 宿辉, 胡明星. 四原子氮有机胺三乙烯四胺吸收 CO₂ 的研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(4): 58-60.
XU Hui, HU Mingxing. Study on the absorption of CO₂ by using a quaternary nitrogen atom organic amine TETA[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(4): 58-60.
- [14] 陆诗建, 刘晓东, 李清方, 等. MEA-DETA 混合胺溶液吸收烟气中二氧化碳的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(9): 1-5.
LU Shijian, LIU Xiaodong, LI Qingfang, et al. Experimental research of absorbing carbon dioxide from flue gas by MEA-DETA mixed amine solutions[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 2010, 32(9): 1-5.
- [15] 刘晓东, 陆诗建, 袁琴. MEA-TETA 二元复配溶液吸收烟气中 CO₂ 的实验研究[J]. 化学与生物工程, 2010, 27(8): 28-32.
LIU Xiaodong, LU Shijian, YUAN Qin. Experimental research of absorbing carbon dioxide form flue gas by MEA-TETA mixed amine solutions [J]. Chemistry Bioengineering, 2010, 27(8): 28-32.
- [16] 冯绪文, 郭兴蓬. 烷醇胺水溶液的 CO₂ 吸收机理及其腐蚀行为的相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(2): 79-83.
FENG Xuwen, GUO Xingpeng. Study on the correlation between CO₂ absorption mechanisms and corrosion behavior of alkanolamine solutions [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(2): 79-83.
- [17] CAPLOW M. Kinetics of carbamate formation and breakdown [J]. Journal of the American Chemical Society, 1968, 90, 6795-6803.
- [18] 司云森, 杨显万. 电化学极化过程实验数据处理分析的研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2008, 25(6): 5-9.
SI Yunsen, YANG Xianwan. Analytical study on the experimental data in the electrochemical polarization process [J]. Journal of Kunming University Science of Technology (Science and Technology), 2008, 25(6): 5-9.

(编辑 张小强)