



# 氨法碳捕集过程中脱碳模拟吸收液解吸再生的实验研究

马双忱\*, 王梦璇, 韩亭亭, 陈伟忠, 逯东丽, 陈公达

华北电力大学环境学院, 保定 071003

\*E-mail: msc1225@163.com

收稿日期: 2012-02-09; 接受日期: 2012-05-23

国家自然科学基金(批准号: 21176064)资助项目

**摘要** 对氨法碳捕集过程中脱碳吸收液解吸  $\text{CO}_2$  开展实验研究, 以了解吸收液再生特性. 简要介绍了脱碳吸收液解吸原理. 在常压、 $\text{N}_2$  做载气条件下, 研究解吸温度、溶液浓度、pH 和  $\text{CO}_2$  担载程度等因素对脱碳吸收液解吸  $\text{CO}_2$  的影响. 结果表明, 在实验条件下, 溶液解吸比例随加热温度、溶液浓度和  $\text{CO}_2$  担载程度的增加而提高, 但随 pH 的增加先提高后降低.

**关键词**  
氨法  
碳酸氢铵溶液  
 $\text{CO}_2$  解吸  
实验研究

## 1 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)报道, 目前引起全球气候变暖的气体主要包含  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , 氢氟烃 4 类, 其中由  $\text{CO}_2$  产生的温室效应增强占到 60%<sup>[1-3]</sup>. 燃煤电厂  $\text{CO}_2$  排放是我国温室气体的最主要排放源<sup>[4, 5]</sup>. 鉴于我国能源储量特点, 以煤为主的能源结构在近期内无法发生根本性改变, 因此, 从排放源头入手, 实现火电厂  $\text{CO}_2$  减排是温室气体减排工作的关键<sup>[6-8]</sup>. 目前燃煤电厂  $\text{CO}_2$  捕集主要采用燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧 3 种技术, 对现有机组情况、烟气后处理装置性能和投资方面的比较, 基于氨法的燃烧后捕集法是目前最适合的工艺路线之一.

目前世界上商业化应用的主要碳捕集方法是以乙醇胺(MEA)为基础的化学吸收法. MEA 吸收酸性气体能力强, 对捕集烟气中低浓度的  $\text{CO}_2$  最具优势, 通常可以达到 90% 的脱碳率<sup>[9-11]</sup>. 但是该技术依然存

在再生能耗高, 吸收剂易被烟道气中  $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$  等成分降解, 设备与管路腐蚀严重, 溶剂成本高等缺点, 广泛推广该技术受到技术和经济的限制<sup>[12, 13]</sup>.

与传统 MEA 方法相比, 氨水作为脱碳吸收剂在脱除率、吸收容量、副产物资源化等方面均优于 MEA 溶液, 因此氨法吸收已成为了碳捕集研究的一个重要方向, 并具有良好的应用前景<sup>[14, 15]</sup>.

在我国合成氨生产工艺中, 多利用氨水进行合成气脱碳并副产碳酸氢铵化肥, 技术相对成熟且具有一定的研究基础. 但结合实际情况, 考虑到电厂巨大的烟气量, 在常压、常温下进行的脱碳吸收过程较为适合, 而限于我国相对固定的、且略有缩小趋势的碳酸氢铵市场, 大量合成化肥在市场上供过于求, 造成资源浪费<sup>[16, 17]</sup>. 而  $\text{CO}_2$  与氨溶液反应形成的产物受热可分解, 所以可采用加热吸收液的方式使其将吸收的  $\text{CO}_2$  释放, 实现吸收剂的再生, 使吸收剂得到循环利用是相对更好的选择.

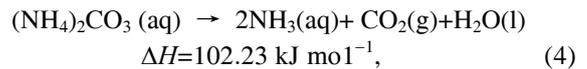
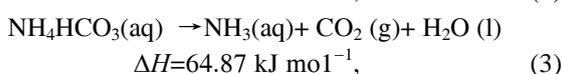
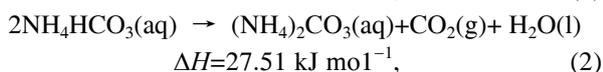
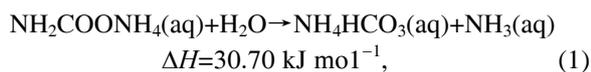
在氨法碳捕集过程中脱碳吸收液解吸再生方面,

国内外均有相应研究. 刘芳等人<sup>[18]</sup>对 2 mol L<sup>-1</sup> 以下溶液进行 60°C~90°C 常压加热, 考察加热温度及溶液浓度对 CO<sub>2</sub> 解吸过程的影响, 解吸 CO<sub>2</sub> 实验装置中采用酸洗瓶对解吸气体进行脱水干燥. 由于加热过程中大量水蒸汽随解吸 CO<sub>2</sub> 溢出, 当连续长时间反应时, 酸洗瓶需及时更换. 张永昭等人<sup>[19]</sup>采用滴定法对氨法脱碳的主要产物碳酸氢铵的分解过程的解吸比例进行了实验研究. 滴定法只能对反应前和反应后溶液进行取样分析, 不能实时记录反应过程中具体数值的变化. NETL<sup>[20, 21]</sup>在半连续实验台开展了氨法吸收液解吸 CO<sub>2</sub> 的实验研究. 在 48.9°C~87.8°C 条件下对质量百分比为 20% 的碳酸氢铵、碳酸铵及其混合溶液进行加热解吸 CO<sub>2</sub> 实验. Yeh 等人<sup>[22]</sup>对氨法吸收过程的主要产物在不同温度下解吸 CO<sub>2</sub> 的比例进行考察, 以 87.8°C 加热 20% 碳酸氢铵溶液时, CO<sub>2</sub> 解吸比例为 60%. 其溶液参数设计质量百分比为定值, 而事实上对于固定氨浓度吸收剂, 为定值的是吸收反应形成的各种产物中氨摩尔数的加和. 这种实验参数的设计与真实情况的差异导致对碳化氨溶液解吸 CO<sub>2</sub> 的研究不能准确而全面的体现氨水吸收 CO<sub>2</sub> 过程中不同阶段产物受热解吸 CO<sub>2</sub> 的特性.

依据对目前解吸再生实验研究在参数设置、吸收液选取、实验装置等方面的优化和改进, 本实验在常压、N<sub>2</sub> 做载气条件下, 研究解吸温度、溶液浓度、溶液 pH 和 CO<sub>2</sub> 担载程度对氨法碳捕集过程中脱碳吸收液解吸再生的影响. 探索适用于燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 脱碳后溶液解吸再生的最佳工艺条件, 明确提出基于氨化学循环的 CO<sub>2</sub> 捕集模式. 上述研究将为当前我国氨法碳捕集提供参考.

## 2 解吸 CO<sub>2</sub> 机理

碳化氨溶液再生的过程是化学吸收的逆反应, 是吸收过程中生成的各种产物, 如碳酸氢铵、碳酸铵和氨基甲酸盐受热分解的过程. 其中的主要反应如下<sup>[23, 24]</sup>:



式中,  $\Delta H$  为反应热. 其中, (1) 式是氨基甲酸盐的吸热水解过程, 随着溶液温度的升高, 反应式向右进行. (2)~(4) 式则是碳化氨溶液中碳酸盐和碳酸氢盐受热分解过程, 同时由于液相中的分压对气相的影响, 溶液中的部分 NH<sub>3</sub> 及 H<sub>2</sub>O 也会随着再生气流离开溶液.

## 3 实验

### 3.1 实验装置和材料

实验采用河南予华仪器有限公司 DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器, 无级调速范围 0~2600 r/min, 数显恒温范围室温~100°C. 红外 CO<sub>2</sub> 烟气分析仪采用深圳昂为公司 CopanelTP07 触屏 WO-CO<sub>2</sub> 分析仪, CO<sub>2</sub> 体积比测量范围 0~100%, 测试精度 ±3%. 碳酸氢铵分析纯(AR)、碳酸铵分析纯(AR)由天津市科密欧化学试剂有限公司生产, 氨水分析纯(AR)由天津(香港)新通精细化工有限公司生产. 实验装置图如图 1 所示.

### 3.2 实验方法

实验使用的碳化氨溶液配制方法如下: 以去离子水将分析纯级氨水、碳酸氢铵或碳酸铵等试剂溶解, 定容到指定氨浓度, 使之溶液达到电离平衡状态后作为待测液. 玻璃反应器内径为 50 mm, 每次实验待测液体积约为 100 mL. 碳化氨溶液加热由电热恒温水槽完成, 反应器内温度计进行实时监测. 实验中, 为保证反应器内溶液受热均匀, 利用搅拌器以 200 r/min 加以搅拌.

解吸具体实验过程如下: 接通电热恒温水槽, 当反应器内温度计温度达到实验所需温度并稳定时, 开通 N<sub>2</sub>, 吹扫整个系统, N<sub>2</sub> 一般控制在 0.08 m<sup>3</sup>/h. 待红外 CO<sub>2</sub> 分析仪显示出口气体中 CO<sub>2</sub> 浓度降为 0.3% (测量正常大气时, 仪器本底值) 左右时停止吹气. 启动实时温度、气体浓度记录, 向反应器内注入一定体积的待测液. 打开循环水泵和搅拌器, 实验开始. 反应器内温度计对反应器内温度进行实时监测, 保持实验所需温度, 避免与电热恒温水槽的温度差. 随反应进行, 解吸气中 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐增加, 而后缓慢下降, 实时采集. 待红外烟气分析仪检测到的 CO<sub>2</sub> 浓度

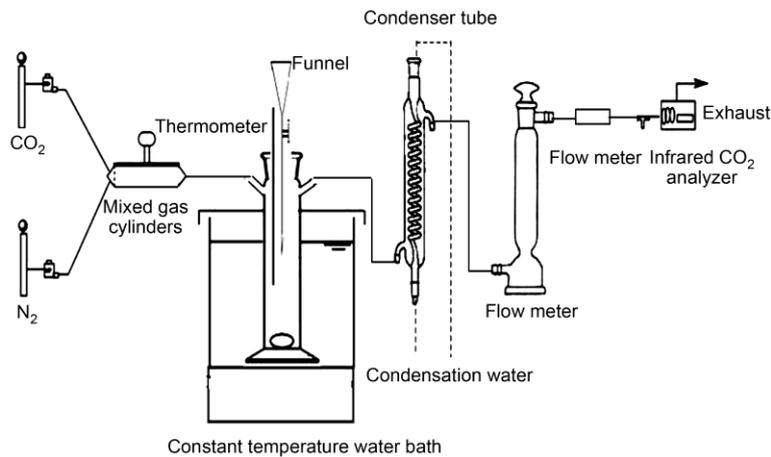


图 1 实验装置图

降为 0.6% 左右时, 实验结束. 实验时, 控制水浴锅温度, 使得反应恒温进行, 在反应器中注入 100 mL 碳化氨溶液. 反应结束后, 待烧瓶进行自动降温到室温后取样分析. 由于加热溶液而蒸发出的液体, 经冷凝管冷却后大部分回流, 又因此反应为液相反应, 故认为反应前后反应溶液的体积不变. 反应结束后, 根据 CO<sub>2</sub> 分析仪记录数据和溶液产物进行进一步分析.

本实验采用的计算方法如下.

(I) CO<sub>2</sub> 解吸比例  $\eta_{\text{CO}_2, \text{D}}$

CO<sub>2</sub> 解吸比例反映碳化氨溶液解吸 CO<sub>2</sub> 的程度. 定义如下:

$$\eta_{\text{CO}_2, \text{D}} = \frac{1000 \times M_{\text{CO}_2}}{[C]_0 \times V_{A0}}$$

其中,  $M_{\text{CO}_2}$  为解吸 CO<sub>2</sub> 总量, 单位 mol;  $[C]_0$  为初始碳化氨溶液中的碳浓度, 单位 mol/L;  $V_{A0}$  为初始溶液体积, 单位 mL.

(II) CO<sub>2</sub> 加载程度

溶液中的氨浓度和 CO<sub>2</sub> 加载程度作为吸收剂或吸收液的特征参数. CO<sub>2</sub> 加载程度为溶液中的碳浓度与氨浓度之比, CO<sub>2</sub> 加载程度越低, 可用来吸收 CO<sub>2</sub> 的能力越大. 定义如下:

$$\frac{[C]}{[A]} = \frac{C_{\text{CO}_2}}{C_{\text{NH}_3}}$$

其中,  $[C]/[A]$  单位是 mol CO<sub>2</sub>/mol NH<sub>3</sub>. 以对于新鲜氨水溶液, CO<sub>2</sub> 加载程度为 0 mol CO<sub>2</sub>/mol NH<sub>3</sub>, 而 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 溶液的 CO<sub>2</sub> 加载程度为 1 mol CO<sub>2</sub>/mol NH<sub>3</sub>.

红外 CO<sub>2</sub> 烟气分析仪可测定碳化氨溶液解吸出 CO<sub>2</sub> 的实时体积浓度, 根据 CO<sub>2</sub> 浓度与 N<sub>2</sub> 体积流率, 可计算 CO<sub>2</sub> 实时体积流率. 再通过对 CO<sub>2</sub> 体积流率随反应时间的变化曲线进行积分, 除去本底值后可得到 CO<sub>2</sub> 解吸总量. 通过计算得到 CO<sub>2</sub> 解吸比例和解吸速率等参数值.

## 4 解吸再生实验

### 4.1 实验重复性

为了验证实验系统的准确性和可靠性, 在同一实验条件下进行多组重复实验. 解吸重复性实验条件如下: 在 100 mL 1 mol/L NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 溶液, N<sub>2</sub> 流量 0.08 m<sup>3</sup>/h, 加热恒温 80°C, 磁力搅拌转速 200 r/min, 30 s 记一次数据. 结果如图 2 所示. 因开始计时的时间略有不同, 导致两组解吸实验数据曲线随反应时间轴略有平移. CO<sub>2</sub> 体积浓度随反应时间变化曲线基本可以重叠, 说明解吸实验可重复, 结果可靠. 根据图 2 中第 1 组数据绘制 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 溶液热分解典型曲线, 结果如图 3 所示. 由图 3 可知: 随着反应时间的进行, 从溶液中解吸的 CO<sub>2</sub> 体积浓度即时值先上升后下降, 在 5 min 左右达到最大值; 解吸量累积增加, 解吸比例逐渐提高, 但增加幅度逐渐减小, 最后逐渐趋于稳定; 解吸速率逐渐下降.

### 4.2 温度对解吸的影响

采用 100 mL 1 mol/L NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 溶液, N<sub>2</sub> 流量 0.08 m<sup>3</sup>/h, 磁力搅拌速度 200 r/min, 加热恒温为

60°C, 70°C, 80°C, 90°C条件下, 溶液中CO<sub>2</sub>的解吸比例与温度变化的关系如图4所示. 可知: 随着反应温度的升高CO<sub>2</sub>体积浓度先增大后减小, 前15 min反应较剧烈, 最后逐渐趋于平稳. CO<sub>2</sub>体积浓度在5 min左右达到极值, 且到达极值所需的时间随温度的升高而逐渐减少. 由图5不同温度下CO<sub>2</sub>解吸比例可知, 随解吸温度的升高, CO<sub>2</sub>解吸比例逐渐提高. 在60°C CO<sub>2</sub>解吸比例较低为32.82%, 80°C和90°C时, 解吸比例分别提高到59.04%和67.94%. NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>溶液解吸反应属于吸热反应, 温度的升高有利于反应向正向移动. 从反应的物理状态分析, 液相中组分的气相平衡分压随温度的升高而增大, 逸出能力增强, 液相进入气相的分子数目增多, 从而引起CO<sub>2</sub>解吸速率加快, 解吸比例提高. 但是在提高解吸温度的同时, 需要考虑解吸过程中氨的挥发也会随着温度的上升而增加.

### 4.3 浓度对解吸的影响

由于NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>常温下易分解, 考虑其饱和和溶解度(15°C时饱和和溶解度2.17 mol/L)影响, 分别取1.0,

1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 mol/L 碳化氨溶液各100 mL, 在水浴恒温80°C, N<sub>2</sub>流量0.08 m<sup>3</sup>/h, 磁力搅拌200 r/min条件下进行浓度对解吸过程的影响实验研究, 实验结果见图6和7. 由图可知, 随着溶液浓度的增加, CO<sub>2</sub>体积浓度先升高后降低. CO<sub>2</sub>的解吸比例逐渐提高, 但增速逐渐下降, 升高的幅度在不断减缓, 逐渐趋于定值, 解吸比例为72.07%(原溶液浓度为1.8 mol/L)和72.76%(原溶液浓度为2.0 mol/L). 由化学反

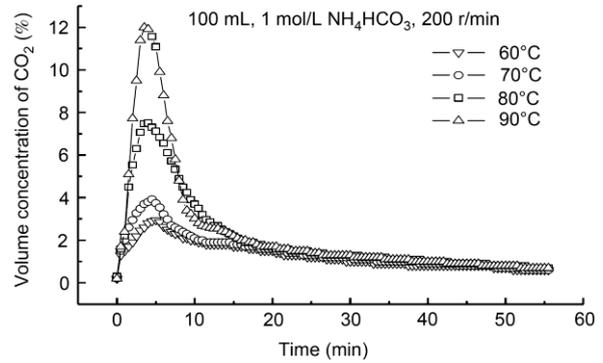


图4 不同温度下CO<sub>2</sub>解吸随时间变化关系

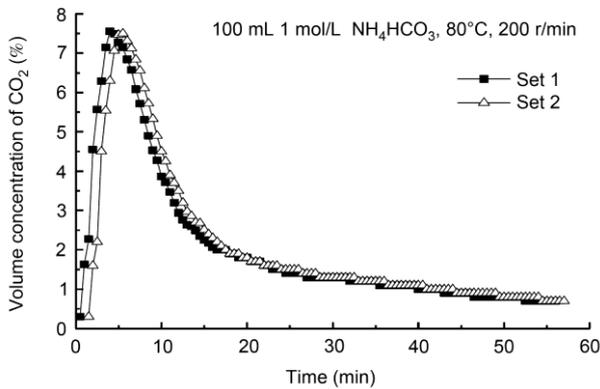


图2 解吸实验系统重复性验证

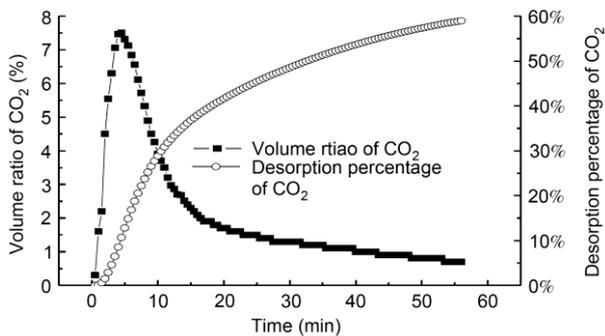


图3 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>溶液热分解典型曲线

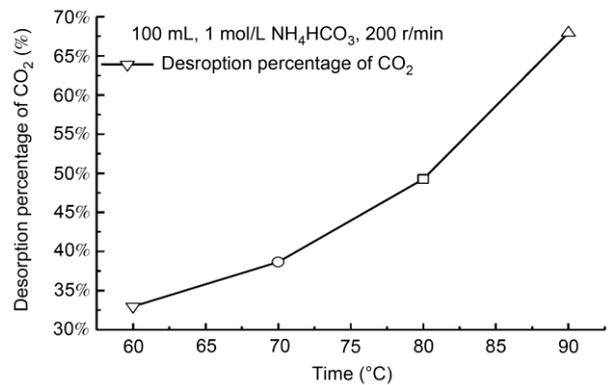


图5 不同浓度下CO<sub>2</sub>解吸比例

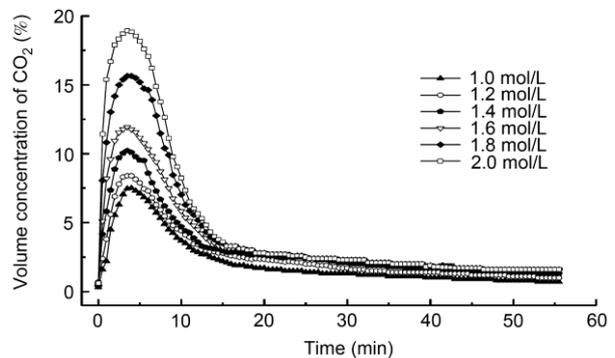


图6 不同浓度下CO<sub>2</sub>解吸随时间变化关系

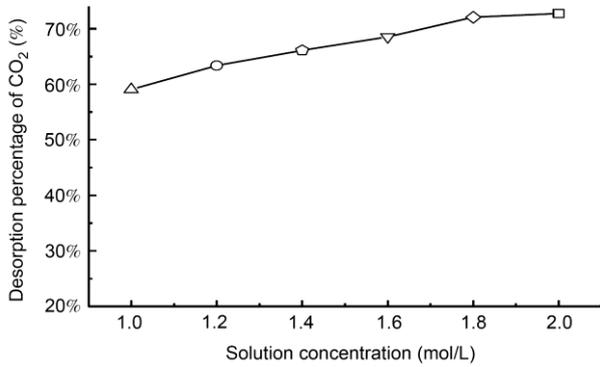


图7 不同浓度下 CO<sub>2</sub> 解吸比例

应动力学可知, 增加反应物浓度可提高反应正向进行的推动力, 其浓度越接近饱和浓度时, CO<sub>2</sub> 的解吸能力越高, 但这种能力增高的趋势在变缓.

#### 4.4 pH 值对解吸的影响

溶液中 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的含量受 pH 的影响, 随 pH 的改变而变化, 见图 8 和表 1<sup>[25]</sup>. 分别取 pH 为 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 的碳化氨溶液各 100 mL, 在水浴恒温 80°C, N<sub>2</sub> 流量 0.08 m<sup>3</sup>/h, 磁力搅拌 200 r/min 条件下进行 pH 对解吸过程的影响实验研究, 实验结果见图 9 和 10.

由图 9 可知, 反应过程中, CO<sub>2</sub> 体积浓度先增大后减小, 最后趋于稳定. 随着溶液 pH 的增加, CO<sub>2</sub> 体积浓度最大值逐渐减小, 且达到最大值的时间增长, 曲线的波动程度逐渐变缓. 由图 10 可知, 碳化氨溶液反应后 pH 随反应前 pH 的增大而增大, 除反应前 pH=10.0 溶液反应后 pH 略有减小变为 9.6 之外, 其他 5 组溶液反应后 pH 值均高于反应前溶液 pH 值, 且增幅逐渐减小. 随 pH 的增加, CO<sub>2</sub> 解吸比例先增大后减

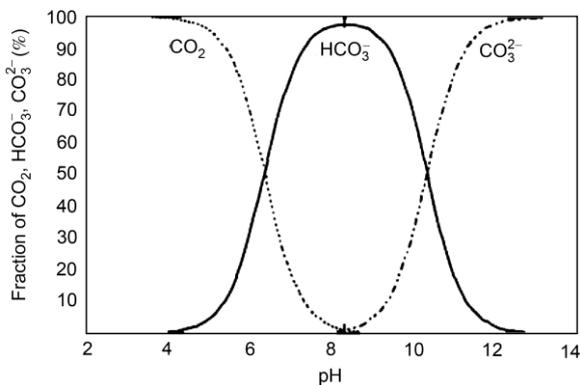


图8 含碳物种浓度分布与 pH 的关系

表 1 含碳物种浓度分布与 pH 的关系<sup>[25]</sup>

pH	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
2.0	1.0000	—	—
3.0	0.9997	0.0003	—
4.0	0.9957	0.0043	—
5.0	0.9576	0.0424	—
6.0	0.7022	0.3078	0.0000
7.0	0.1865	0.8132	0.0003
8.0	0.0245	0.9708	0.0047
9.0	0.0017	0.9535	0.0448
10.0	0.0001	0.6803	0.3196
11.0	—	0.1755	0.8245
12.0	—	0.0207	0.9793
13.0	—	0.0020	0.9980

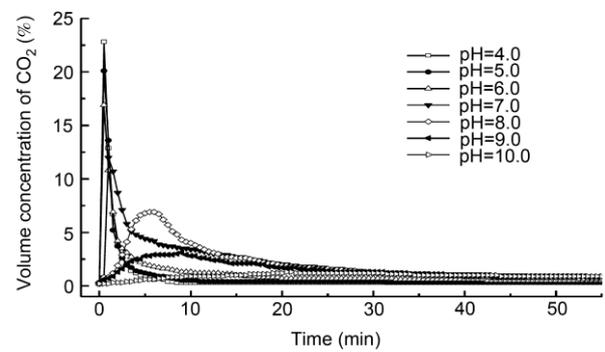


图9 不同 pH 下 CO<sub>2</sub> 解吸随时间变化关系

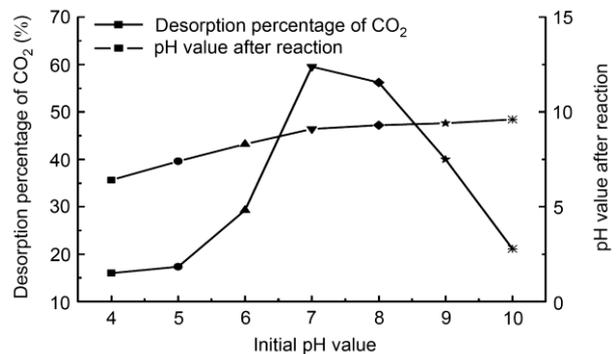


图10 不同 pH 下解吸后 pH 和解吸比例的变化

小, pH=7 时解吸比例最高约为 60%.

加热有利于反应正向进行, 由全碳浓度分布与 pH 的关系和反应方程式(1)~(4)可知, pH 值越低溶液中 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 比例越高, 所需反应热越小, 相同温度条件下越易释放出 CO<sub>2</sub>, 所以原 pH=4 溶液 CO<sub>2</sub> 体积浓度即时最大值最高. 按照此结论 pH 越小, 整体解吸出的 CO<sub>2</sub> 解吸比例应越高, 由图 9 可知实际情况是 pH 为 4 时 CO<sub>2</sub> 解吸比例数值仅有 16%, 这主要是因为 pH 低于 7 以下时, CO<sub>2</sub> 解吸释放速度极快难以控制,

CO<sub>2</sub> 红外分析仪还未进行测量, CO<sub>2</sub> 就已释放损失. 在实际工况条件下, 虽然 pH 偏低可以促进 CO<sub>2</sub> 解吸, 但难以控制解吸进程且 CO<sub>2</sub> 可迅速外溢扩散造成损失, 所以应严格操作或改进实验投药方法. pH 值越高溶液中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 比例越高, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 比例越低, 反应越不易放出 CO<sub>2</sub>, 所以原 pH=10.0 溶液 CO<sub>2</sub> 体积浓度即时最大值最低. 随着反应的进行, 溶液 pH 值随反应进程不断上升, 说明 CO<sub>2</sub> 解吸出来后, 使溶液碱性增强, 即吸收 CO<sub>2</sub> 的能力逐渐得到恢复. 因此, 为了获取较高 CO<sub>2</sub> 解吸比例且考虑操作的可行性, 在适当范围内调节溶液 pH 值为 7~8, 有利于提高 CO<sub>2</sub> 解吸比例.

#### 4.5 CO<sub>2</sub> 加载程度对解吸的影响

在水浴恒温 80°C, N<sub>2</sub> 流量 0.08 m<sup>3</sup>/h, 磁力搅拌 200 r/min 条件下, 用碳酸氢铵、碳酸铵和氨水配制 CO<sub>2</sub> 加载程度为 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 的碳化氨溶液各 100 mL, 进行 CO<sub>2</sub> 加载程度对解吸过程影响的实验研究, 实验结果见图 11 和 12. 由图 11 可知, 随着溶液中 CO<sub>2</sub> 加载程度的增加, CO<sub>2</sub> 体积浓度先升高后降低, 最后逐渐趋于平稳, 曲线波动逐渐明显. 随着 CO<sub>2</sub> 加载程度增加, CO<sub>2</sub> 体积浓度最大值增大, 达到 CO<sub>2</sub> 体积浓度最大值的时间增长. 由图 12 可知, 随着溶液 CO<sub>2</sub> 加载程度增加, CO<sub>2</sub> 解吸比例升高, 但升高速率逐渐降低, CO<sub>2</sub> 加载程度为 1.0 时解吸比例为 61.64%. 溶液反应后 pH 值不随 CO<sub>2</sub> 加载程度增加而变化, 反应后溶液 pH 均为 10.1.

由于 CO<sub>2</sub> 加载程度为溶液中的碳浓度与氨浓度之比, CO<sub>2</sub> 加载程度越低, 可用来吸收 CO<sub>2</sub> 的能力越大, 可用来解吸 CO<sub>2</sub> 的能力越小. 因此, 溶液 CO<sub>2</sub> 解吸比例随加载程度的增加而升高, 增加反应液的 CO<sub>2</sub> 加载程度有利于促进 CO<sub>2</sub> 解吸, 提高 CO<sub>2</sub> 解吸比例.

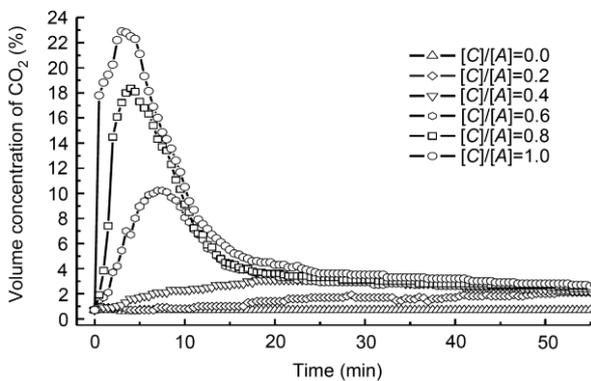


图 11 不同加载程度下 CO<sub>2</sub> 解吸随时间变化关系

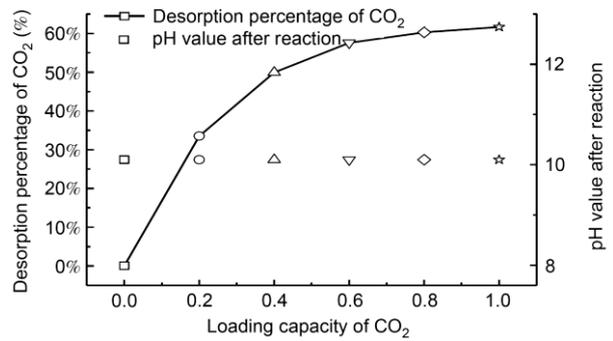


图 12 不同加载程度下解吸后 pH 和解吸比例变化

### 5 结论

(i) 碳化氨溶液加热解吸时, CO<sub>2</sub> 的体积浓度和解吸比例受温度控制, CO<sub>2</sub> 解吸比例随着温度的上升而上升. 在 60°C 时 CO<sub>2</sub> 解吸比例较低为 32.82%, 80°C 和 90°C 时, 解吸比例分别提高到 59.04% 和 67.94%. 但是在提高解吸温度的同时, 需要考虑解吸过程中氨的挥发也会随着温度的上升而增加.

(ii) 碳化氨溶液浓度升高, CO<sub>2</sub> 的解吸比例逐渐提高, 但增速逐渐下降, 升高的幅度在不断减缓, 逐渐趋于定值. 解吸比例由 59.04% (原溶液浓度为 1.80 mol/L) 提高到 72.07% (原溶液浓度为 1.8 mol/L) 和 72.76% (原溶液浓度为 2.0 mol/L). 其浓度越接近饱和和浓度时, CO<sub>2</sub> 的解吸能力越高, 但这种能力增高的趋势在变缓.

(iii) 碳化氨溶液随 pH 的增加, CO<sub>2</sub> 解吸比例先增大后减小, pH=7 时解吸比例最高约为 60%. 反应后 pH 随反应前 pH 的增大而增大, 增幅逐渐减小.

(iv) CO<sub>2</sub> 解吸比例随着溶液 CO<sub>2</sub> 加载程度增加而升高, 但升高速率逐渐降低, CO<sub>2</sub> 加载程度为 1.0 时解吸比例达到 61.64%. 溶液 CO<sub>2</sub> 加载程度越高, 解吸 CO<sub>2</sub> 的能力越大. 溶液反应后 pH 值不随 CO<sub>2</sub> 加载程度增加而变化, 反应后溶液 pH 均为 10.1.

(v) 在实验条件下 CO<sub>2</sub> 解吸比例最高只达到 60% 左右, 在实际工况下若想在后续将 CO<sub>2</sub> 封存需要继续提高 CO<sub>2</sub> 解吸比例. 由本实验可知 CO<sub>2</sub> 解吸比例是否提高主要受到溶液浓度、温度和 pH 的影响. 若需要获得更高的解吸比例, 需要继续提高反应液的浓度, 升高反应温度和降低溶液的 pH 值. 另外, 也可以寻找可以快速促进 CO<sub>2</sub> 解吸的辅助添加剂或催化剂, 这需要在后续实验中进一步研究.

## 参考文献

- 1 IPCC. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 2 Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 3 Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414: 169–172
- 4 Energy Information Administration. Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy. International Energy Outlook 2006. Washington D.C: DOE/EIA, 2006
- 5 刘练波, 黄斌, 都时旺, 等. 燃煤电站 3000~5000 t/a CO<sub>2</sub> 捕集示范装置工艺及关键设备. *电力设备*, 2008, 9(5): 21–24
- 6 Pehnt M, Henkel J. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *Inter J Greenhouse Gas Control*, 2009, (3): 49–66
- 7 曾亮, 罗四维, 李繁星, 等. 化学链技术及其在化石能源转化与二氧化碳捕集领域的应用. *中国科学: 化学*, 2012, 42(3): 260–281
- 8 Shen L H, Zheng M, Xiao J, et al. Chemical looping combustion of coal in interconnected fluidized beds. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2007, 50(2): 230–240
- 9 Wu Y, Wang Y F, Zeng Q H, et al. Experimental study on capturing CO<sub>2</sub> greenhouse gas by mixture of ammonia and soil. *Frontiers Chem Eng China*, 2009, 3(4): 1673–7369
- 10 Ciferno Jared P, Dipietro P, Tarka T. An economic Scoping Study for CO<sub>2</sub> Capture using Aqueous Ammonia. Washington D.C.: US Department of Energy (DOE), 2005. 468–473
- 11 Pazuki G R, Pahlevanzadeh H, Mohseni Ahoocci A. Solubility of CO<sub>2</sub> in aqueous ammonia solution at low temperature. *Comput Coupling Phase Diagrams Thermochem*, 2006, 30: 27–32
- 12 Reiner D, Liang X. Opportunities and hurdles in applying CCS technologies in China with a focus on industrial stakeholders. *Energy Procedia*, 2009, 1: 4827–4834
- 13 McLamon C, Dunean J L. Testing of ammonia based CO<sub>2</sub> capture with multi-pollutant control technology. In: 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Washington DC, 2009. 102–103
- 14 Qin F, Wang S J, Hartono A, et al. Kinetics of CO<sub>2</sub> absorption in aqueous ammonia solution. *Inter J Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(5): 729–738
- 15 Derks P W J, Versteeg G F. Kinetics of absorption of carbon dioxide in aqueous ammonia solutions. *Energy Procedia*, 2009, 1: 1139–1146
- 16 NPCC. Study on CO<sub>2</sub> Sequestration by Spray Concentrated Aqueous NH<sub>3</sub> and Production of Modified NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> Fertilizer—a Proposal for US-China Joint Research. State Engineering Technology Research Center of Combustion of Power Plants (NPCC), May 2000, China
- 17 刁永发, 郑显玉, 陈昌和. 氨水洗漆脱除 CO<sub>2</sub> 温室气体的机理研究. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 753–757
- 18 刘芳, 王淑娟, 张曦, 等. 碳酸氢铵溶液解吸二氧化碳研究. *环境科学学报*, 2009, 9(29): 1887–1890
- 19 张永昭, 艾宁, 计建炳. 碳酸氢铵水溶液热分解性能的研究. *广州化工*, 2011, 39(8): 56–58
- 20 Resnik Kevin P, Yeh James T, Pennline Henry W. Aqua ammonia process for simultaneous removal of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. *Env Tech Manag*, 2004, 4: 89–103
- 21 Resnik Kevin P, Garber W, Hreha Deborah C, et al. A parametric scan for regenerative ammonia-based scrubbing for the capture of CO<sub>2</sub>. In: Proceedings of 23rd Annual International Pittsburgh Coal Conference. Pittsburgh, 2006
- 22 Yeh James T, Resnik Kevin P, Rygle K, et al. Semi-batch absorption and regeneration studies for CO<sub>2</sub> capture by aqueous ammonia. *Fuel Process Tech*, 2005, 86: 1533–1546
- 23 Yeh James T, Pennline Henry W. Absorption and regeneration studies for CO<sub>2</sub> capture by aqueous ammonia. In: Third Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration. Alexandria, VA, 2004
- 24 马双忱, 孙云雪, 赵毅. 氨水捕集模拟烟气中二氧化碳的实验与理论研究. *化学学报*, 2011, 69(12): 1469–1474
- 25 刘少敏. 碳酸平衡在水质分析中碱度测定的应用. *淮南职业技术学院学报*, 2002, 2(2): 75–77