

刘芳, 王淑娟, 张曦, 等. 2009 碳酸氢铵溶液解吸二氧化碳研究 [J]. 环境科学学报, 29(9): 1886-1890

Liu F, Wang S J, Zhang X, et al. 2009 Study on ammonium bicarbonate decomposition after CO<sub>2</sub> sequestration by ammonia method [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(9): 1886-1890

# 碳酸氢铵溶液解吸二氧化碳研究

刘芳, 王淑娟\*, 张曦, 孙新玉, 陈昌和, 徐旭常

清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084

收稿日期: 2009-02-04 修回日期: 2009-04-08 录用日期: 2009-07-13

**摘要:** 对氨法脱碳主要吸收产物碳酸氢铵溶液受热解吸 CO<sub>2</sub> 的过程开展实验研究, 借以了解吸收剂再生特点. 同时, 考虑到常温下碳酸氢铵溶解度和不相称溶解的限制, 选择对 2 mol L<sup>-1</sup> 以下浓度溶液进行 60~90°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. 结果表明, 在实验条件下, 碳酸氢铵溶液解吸 CO<sub>2</sub> 的选择性强, 解吸比例随加热温度的升高和溶液浓度的增大而上升, 但低于 50%. 反应动力学分析结果表明, 碳酸氢铵溶液热分解过程为二级不可逆反应, 反应速率常数  $k = 4.4 \times 10^3 \exp(-13541/T)$ .

**关键词:** 再生氨法; 碳酸氢铵溶液; CO<sub>2</sub> 解吸; 热分解

文章编号: 0253-2468(2009)09-1886-05 中图分类号: X131 文献标识码: A

## Study on ammonium bicarbonate decomposition after CO<sub>2</sub> sequestration by ammonia method

LIU Fang, WANG Shujuan\*, ZHANG Xi, SUN Xinyu, CHEN Changhe, XU Xuchang

Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084

Received 4 February 2009; received in revised form 8 April 2009; accepted 13 July 2009

**Abstract** We studied the decomposition of ammonium bicarbonate, one of the major products of CO<sub>2</sub> absorption by aqueous ammonia. Due to the solubility limit of ammonium bicarbonate and incongruent compounds in saturated solution, the concentration of ammonium bicarbonate in solution was set below 2 mol L<sup>-1</sup> in this study. The solution was heated to 60~90°C to release CO<sub>2</sub>. A high selectivity of ammonium bicarbonate solutions releasing CO<sub>2</sub> was observed. The CO<sub>2</sub> desorption ratio increased with temperature and solution concentration. The CO<sub>2</sub> desorption ratios in all cases, however, were below 50%. Kinetic analysis of the reaction suggested that the decomposition of ammonium bicarbonate solution was a 2<sup>nd</sup>-order irreversible reaction, with a reaction rate constant of  $k = 4.4 \times 10^3 \exp(-13541/T)$ .

**Keywords** regenerated ammonia; ammonium bicarbonate solution; CO<sub>2</sub> desorption; thermal decomposition

### 1 引言 (Introduction)

2007年, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 公布了第 4 次评估报告, 指出近百年来地球气候正经历着以全球变暖为特征的显著变化, 其 90% 的可能性归因于人类活动所排放的温室气体 (IPCC, 2007). 在所有的温室气体中, 尽管 CO<sub>2</sub> 的致暖能力低于其它气体, 但由于其寿命年限长、排放总量大, 所以, 对地球温升的总体作用最大 (闫志勇等, 1999). 作为 CO<sub>2</sub> 排放大户, 电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 的减排控制一直受到广泛关注. 其方法大体分为燃烧前脱

碳、燃烧后脱碳和富氧燃烧技术 3 种方式. 比较而言, 对燃烧后烟气中 CO<sub>2</sub> 进行捕获的化学吸收法具有技术成熟、不改变电厂结构和设备、前期投资及脱碳成本相对低廉等优点, 是较为合适的方法之一. 与传统的一乙醇胺 (MEA) 为吸收剂的化学吸收法相比, 以氨水为吸收剂的方法 (氨法) 具有吸收能力强、腐蚀性小、再生能耗低、补充成本低, 不易被烟气中其它组分降解, 可同时脱除多种酸性气体污染物等特点 (Yeh et al., 1999; Resnik et al., 2006; 王阳等, 2008), 正在逐渐成为研究热点.

有研究提出将电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 作为化肥碳酸氢

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50876051)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50876051)

作者简介: 刘芳 (1982-), 女, 博士研究生, E-mail: liu-f00@mails.tsinghua.edu.cn; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: wangshuj@tsinghua.edu.cn

**Biography:** LIU Fang (1982-), female Ph.D. candidate; E-mail: liu-f00@mails.tsinghua.edu.cn; \* **Corresponding author** E-mail: wangshuj@tsinghua.edu.cn

铵生产的碳源(张昀等, 2002; Lee *et al.*, 2003; 杨林军等, 2006), 但 Liu 等 (2008) 曾对我国燃煤 CO<sub>2</sub> 年排放量和碳酸氢铵年产量进行过比较, 即使碳酸氢铵年产量中所需的 CO<sub>2</sub> 全部来自燃煤排放, 仍低于其年排放量的 1%。而电力用煤约为煤炭消耗总量的 50%, 由此可见, 化肥市场容量和电厂脱碳需求并不匹配, 不能完全采用生产副产品的技术路线脱碳。

由于氨溶液吸收 CO<sub>2</sub> 反应是可逆的, 因此, 对富 CO<sub>2</sub> 吸收剂 (解吸反应开始前, CO<sub>2</sub> 负载程度较高的溶液, 以下简称富液) 进行 CO<sub>2</sub> 解吸, 使其吸收 CO<sub>2</sub> 的能力得到再生并循环利用的方式更加可行。而捕获的 CO<sub>2</sub> 可根据电厂地理条件和市场需求, 作为化工生产原材料, 或经过进一步压缩、运输, 用来提高煤层气或石油产量, 亦可进行地质封存, 从而实现减少 CO<sub>2</sub> 向大气排放的目标。初步实验结果表明, 氨法脱除烟气中 CO<sub>2</sub> 的主要产物是碳酸氢铵和碳酸铵 (Resnik *et al.*, 2006; Bai *et al.*, 1997)。在实际应用中, 吸收剂浓度的增加将引起吸收过程中氨损失比例的上升 (Resnik *et al.*, 2006; 张君等, 2006), 且形成的产物易结晶析出, 影响系统运行 (Yeh *et al.*, 2005; Darde *et al.*, 2008)。已有实验证实, 氨浓度低于 2 mol L<sup>-1</sup> 的吸收剂即可实现近 90% 的脱碳效率 (Diao *et al.*, 2003; Corti *et al.*, 2004), 故采用低浓度氨吸收剂脱碳, 形成 CO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub> 物质的量比为 1 的产物即碳酸氢铵溶液, 实现氨的充分利用, 在理论上是可行的。为使吸收剂可循环利用, 根据技术成熟度和稳定性, 多数研究者推荐加热富液解吸 CO<sub>2</sub>, 使吸收剂吸收能力得到再生并富集 CO<sub>2</sub> (Bai *et al.*, 1997; Corti *et al.*, 2004)。Resnik 等 (2006) 曾建议控制再生温度使吸收剂在碳酸铵与碳酸氢铵间转化, 再以新鲜氨水作补充液, 以优化吸收剂在吸收过程中的氨损失和循环过程中的吸收能力。不过, 目前针对溶液再生方面的实验报道还相对较少 (Yeh *et al.*, 2003)。

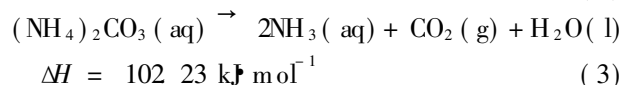
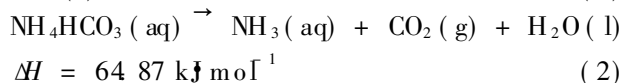
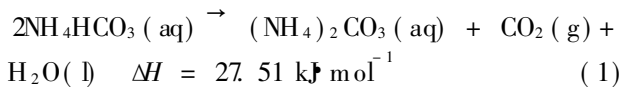
鉴于此, 本文在 60~90℃ 范围内, 对 2 mol L<sup>-1</sup> 以下碳酸氢铵溶液解吸 CO<sub>2</sub> 过程进行实验研究, 考察加热温度及溶液浓度对 CO<sub>2</sub> 解吸速率和比例的影响, 并对碳酸氢铵溶液热分解过程进行动力学分析, 借以了解再生氨法中低浓度吸收剂 (富液) 解吸 CO<sub>2</sub> 过程的部分特性。其中, 碳酸氢铵浓度范围的选择依据为常温下溶解度与不相称溶解特性。由于饱和碳酸氢铵溶液在 15℃ 以上时液相组成与固相不

一致, 故配制的溶液浓度均低于其在 15℃ 时的饱和浓度。

## 2 实验方法 (Experimental method)

### 2.1 反应机理

在再生氨法脱碳技术中, 加热富液使 CO<sub>2</sub> 解吸, 并再生吸收剂的过程主要发生反应 (1)、(2) 和 (3) (Nowak *et al.*, 1989; Dean, 2003; Yeh *et al.*, 2005)。其中, 溶液中碳酸氢铵分解生成碳酸铵所需的反应热最少, 而碳酸铵进一步分解释放 CO<sub>2</sub> 消耗的反应热最大。此外, 液相中少量 NH<sub>3</sub> 与 H<sub>2</sub>O 因气液相平衡分压的存在进入气相, 随生成的 CO<sub>2</sub> 气体离开溶液。



### 2.2 实验系统

碳酸氢铵溶液解吸 CO<sub>2</sub> 实验系统如图 1 所示。溶液由分析纯样品以去离子水稀释后定容来配制完成。实验开始前用氮气吹扫整个系统, 待烟气分析仪显示 O<sub>2</sub> 及 CO<sub>2</sub> 体积分数降为 0 时, 将氮气切换至旁路, 作为实验中解吸气的稀释气源, 以满足烟气分析仪测量 CO<sub>2</sub> 体积分数的量程; 向反应器注入溶液, 打开恒温水浴循环泵和磁力搅拌器, 开始实验; 实验中由反应器逸出的解吸气经过冷凝、酸洗、稀释并干燥后进入烟气分析仪, 实时记录反应器出

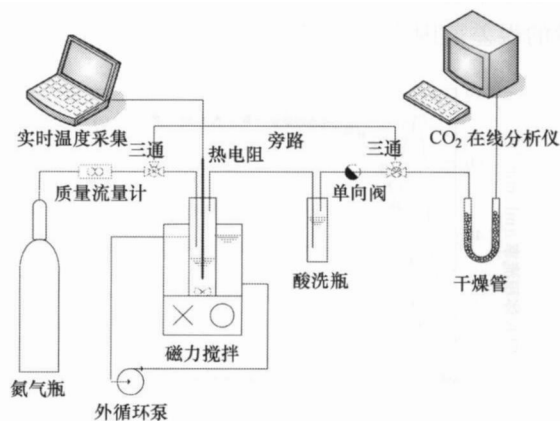


图 1 碳酸氢铵溶液解吸 CO<sub>2</sub> 实验系统示意图

Fig. 1 Diagram of the apparatus to measure CO<sub>2</sub> desorption from ammonium bicarbonate solution

□ CO<sub>2</sub>体积分数; 反应器内配有热电阻, 实时监测溶液温度变化; 待 CO<sub>2</sub>体积分数降为 0 时, 结束实验. 在实验前后分别测量溶液 pH 值、EC (电导率) 值, 并利用离子色谱测量溶液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 浓度, 以便确定溶液性质及氨量的变化等. 从溶液中解吸的 CO<sub>2</sub>量可利用 CO<sub>2</sub>实时浓度曲线及稀释气体积流率计算出 CO<sub>2</sub>体积流率随反应时间的变化, 再通过对该曲线进行积分获得.

### 2.3 测量仪器

本实验中所采用的测量仪器分别为 Photon 便携式红外烟气分析仪 (马杜公司, 奥地利)、DX120 离子色谱仪 (戴安公司, 美国)、PHS-3B 型 pH 计 (上海雷磁)、H 198188 电导率仪 (哈纳公司, 意大利).

### 3 实验结果 (Experimental results)

典型的碳酸氢铵溶液解吸 CO<sub>2</sub> 历程如图 2 所示. 100 mL 1 mol L<sup>-1</sup> 的碳酸氢铵溶液在 200 r min<sup>-1</sup> 磁力搅拌下, 加热到 80°C. 从图 2 可以看出, 从溶液中解吸的 CO<sub>2</sub> 体积流率先逐渐增大, 而后逐渐减小. 同时, CO<sub>2</sub> 解吸比例不断上升, 而后趋于定值. 随着 CO<sub>2</sub> 的解吸, 溶液的 pH 值上升、EC 值下降. 其中, pH 值代表溶液的酸碱度, 随反应进程不断上升, 说明 CO<sub>2</sub> 解吸使溶液碱性增强, 即吸收 CO<sub>2</sub> 的能力逐渐得到恢复; EC 值代表溶液的导电能力, 在溶液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 浓度不变的条件下, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 向 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的转化引起导电离子种类及浓度的改变, 使溶液导电能力下降, 由 EC 值随反应进行而下降可判断碳酸氢铵溶液分解, 使 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 向 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 转变. 由于加热后溶液体积基本不变, 且氨浓度变化小于 5%, 在离子色谱测量的误差范围内, 可忽略不计, 说明溶液解吸 CO<sub>2</sub> 的

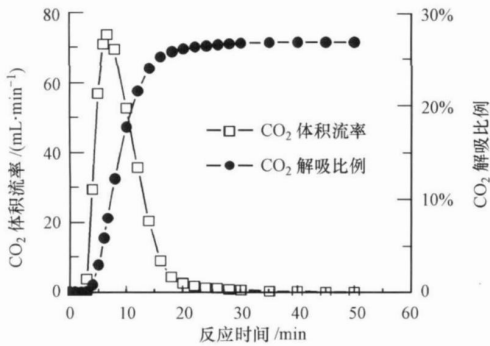


图 2 碳酸氢铵溶液热分解典型曲线

Fig. 2 Typical curve of thermal decomposition of ammonium bicarbonate solution

选择性强.

### 3.1 温度影响

碳酸氢铵溶液热稳定性较差, 在室温下即可分解 (Yeh *et al.*, 2005). 不同温度下 CO<sub>2</sub> 解吸与反应时间的关系如图 3 所示. 由图 3 可知, 100 mL 1 mol L<sup>-1</sup> 碳酸氢铵溶液 (室温下 pH = 7.80) 在 200 r min<sup>-1</sup> 磁力搅拌下, 随着加热温度的升高, 从溶液中解吸的 CO<sub>2</sub> 体积流率达到极大值的时间缩短, CO<sub>2</sub> 最大解吸体积流率增大. 解吸程度与加热温度的关系如图 4 所示. 由图 4 可知, CO<sub>2</sub> 解吸比例随温度上升而提高, 解吸后溶液 pH 值增大, 说明升温有利于提高再生贫液 (相对于富液而言, 指解吸过 CO<sub>2</sub>, 可用于与 CO<sub>2</sub> 反应的溶液) 吸收能力. 对吸热分解反应来说, 温度升高有利于反应正向进行; 而对物理解吸过程而言, 温度升高使液相中组分的气相平衡分压增大, 逸出能力增强, 进入气相的分子数目增多. 因此, 引起 CO<sub>2</sub> 解吸速率加快, 解吸比例增大.

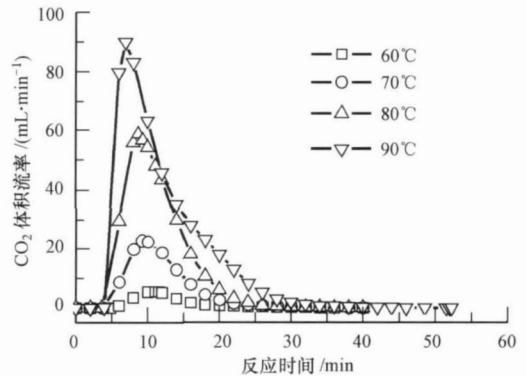


图 3 不同温度下 CO<sub>2</sub> 解吸与反应时间的关系

Fig. 3 CO<sub>2</sub> desorption as a function of reaction time at different temperatures

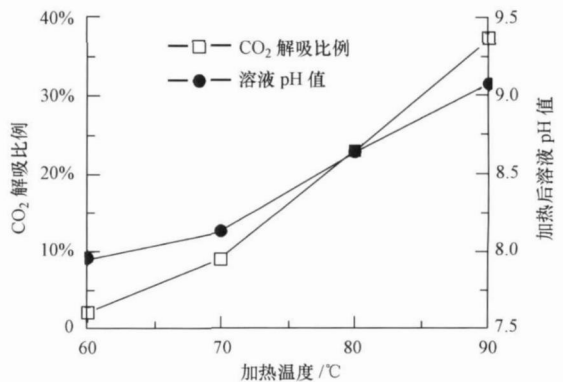


图 4 解吸程度与加热温度的关系

Fig. 4 Desorption ratio as a function of temperature

### 3.2 浓度影响

受碳酸氢铵溶解度(表 1)和不相称溶解的限制,无结晶的低浓度再生氨法脱碳技术应选择  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下氨吸收剂. 不同浓度碳酸氢铵溶液解吸  $\text{CO}_2$ 的过程如图 5所示. 由化学反应动力学可知,增加反应物浓度可提高反应正向进行的推动力,分解反应速率加快;同时,有利于气相  $\text{CO}_2$ 平衡分压的上升,使物理解吸增强,因此,  $\text{CO}_2$ 解吸速率增大. 另外,随着溶液浓度的提高,  $\text{CO}_2$ 解吸比例增加,但上升的速率逐渐降低,说明越接近饱和溶液,其解吸  $\text{CO}_2$ 的能力越相近(图 6).

表 1 碳酸氢铵溶解度及饱和浓度

Table 1 The solubility and saturation concentration of ammonium bicarbonate solution

温度 / $^{\circ}\text{C}$	溶解度 <sup>1)</sup> / ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	饱和浓度 <sup>2)</sup> / ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )
15	0.187	2.17
20	0.217	2.43
25	0.248	2.69
30	0.284	3.00
35	0.311	3.33
40	0.366	3.66
45	0.395	4.02

注: 1)部分溶解度数值由参考文献(刘光启等, 2002)中数据折算所得,为每克水中溶解碳酸氢铵的质量; 2)饱和浓度均由参考文献(刘光启等, 2002)中数据折算所得.

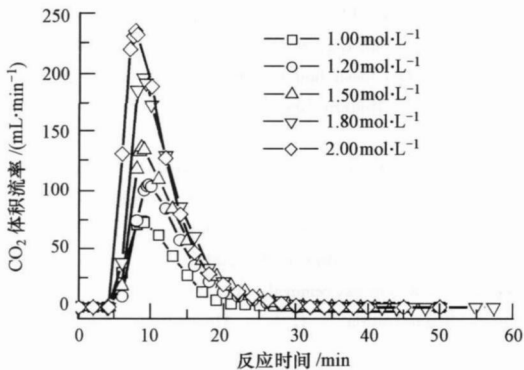


图 5 不同浓度溶液  $\text{CO}_2$ 解吸与反应时间的关系

Fig 5  $\text{CO}_2$  desorption as a function of reaction time at different concentrations

### 3.3 反应动力学分析

在实验条件下,从碳酸氢铵溶液中解吸的  $\text{CO}_2$ 比例低于 50%,因此,可推测碳酸氢铵分解反应的总方程式为式(1). 利用不同初始浓度溶液解吸  $\text{CO}_2$ 曲线,通过反应开始阶段溶液浓度随时间的变化率和溶液初始浓度的关系即微分法(韩德刚等, 1987)可求出其反应级数,约为 2 这与 Nowak 等

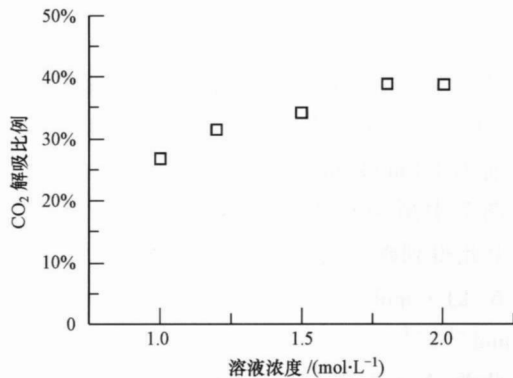


图 6 解吸程度与溶液浓度的关系

Fig 6 Desorption ratio as a function of concentration

(1989)研究结果一致.

首先,利用  $\text{CO}_2$ 解吸量折算反应开始阶段溶液中碳酸氢铵浓度(公式(4)),通过其与时间的关系可求出相应的变化率,并利用式(5)计算反应级数  $n$ .

$$C = C_0 - M_{\text{CO}_2} / V_{\text{ABC}} \quad (4)$$

$$n = \frac{\lg\left(-\frac{dC_{01}}{dt}\right) - \lg\left(-\frac{dC_{02}}{dt}\right)}{\lg C_{01} - \lg C_{02}} \quad (5)$$

式中,  $C$ 为反应时溶液中碳酸氢铵浓度( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $C_0$ 为碳酸氢铵溶液初始浓度( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $C_{01}$ ,  $C_{02}$ 分别表示不同初始浓度的碳酸铵溶液( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $M_{\text{CO}_2}$ 为  $\text{CO}_2$ 解吸量( $\text{mol}$ );  $V_{\text{ABC}}$ 为溶液体积( $\text{L}$ ),其在反应过程中的变化可忽略.

然后,由二次不可逆反应速率常数  $k$ 与溶液浓度变化的关系式(6),可得到不同温度( $T$ )下的反应速率常数  $k$ ,并获得  $\ln k$ 与  $1/T$ 的关系(图 7). 由图 7 可见,在实验涉及的温度区间内, Arrhenius 公式(7) 适合.

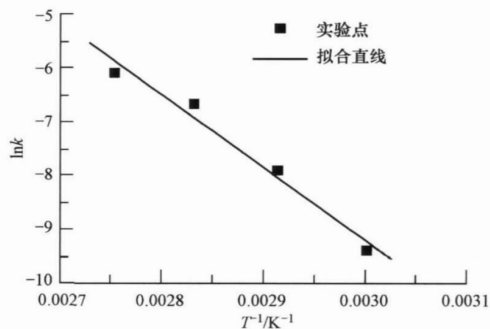


图 7 碳酸氢铵溶液分解反应速率常数与温度的关系

Fig 7 Desorption reaction rate constant as a function of temperature

$$kt = 1/C - 1/C_0 \quad (6)$$

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (7)$$

式中,  $t$ 为反应时间 (s),  $R$ 为普适气体常数, 取值为  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $E_a$ 为反应活化能 ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $A$ 为指前因子 ( $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

图7中拟合直线斜率为  $-E_a \times 10^3/R$ , 截距为  $\ln A$ . 由此得到碳酸氢铵溶液热分解反应活化能  $E_a = 112.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 指前因子  $A = 4.4 \times 10^{13} \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

此前, Nowak等(1989)报道了大气压下碳酸氢铵溶液在  $20 \sim 50^\circ\text{C}$ 间二次不可逆反应分解速率(公式(8)), 但其它温度段的热分解动力学数据尚未见报道.

$$r = 3.5 \times 10^6 \exp(-7700/T) C^2 \quad (8)$$

式中,  $r$ 为分解速率 ( $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $C$ 为溶液浓度 ( $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

## 4 结论 (Conclusions)

1) 碳酸氢铵溶液受热时,  $\text{CO}_2$ 解吸速率和比例随加热温度、溶液浓度提高而上升; 在实验条件下, 为强选择性解吸过程. 2) 溶液中碳酸氢铵受热分解为二次不可逆过程, 反应速率常数  $k = 4.4 \times 10^{13} \exp(-13541/T)$ , 活化能为  $112.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . 3) 在  $90^\circ\text{C}$ 以下对近饱和的碳酸氢铵溶液热再生可实现脱碳吸收剂在碳酸氢铵与碳酸铵间的循环利用, 且再生过程中  $\text{CO}_2$ 纯度高、氨损失少.

责任作者简介: 王淑娟 (1972—), 博士, 副教授. 主要从事二氧化碳捕获和埋存、可再生能源等方面的研究.

## 参考文献 (References)

- Bai H L, Yeh A C. 1997. Removal of  $\text{CO}_2$  greenhouse gas by ammonia scrubbing [J]. *Ind Eng Chem Res*, 36: 2490—2493
- Corti A, Lombardi L. 2004. Reduction of carbon dioxide emissions from a SCGT/CC by ammonia solution absorption—preliminary results [J]. *Int J Thermodynamics*, 7: 173—181
- Darde V, Thansen K, Willy J M, et al. 2008. Chilled ammonia process for  $\text{CO}_2$  capture [A]. 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies [C]. Washington D C, 1—8
- Diao Y F, Zheng X Y, He B S, et al. 2004. Experimental study on capturing  $\text{CO}_2$  greenhouse gas by ammonia scrubbing [J]. *Energy Conversion and Management*, 45: 2283—2296
- 韩德刚, 高盘良. 1987. 化学动力学基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 88—89
- Han D G, Gao P L. 1987. Chemical Kinetics [M]. Beijing: Peking University Press, 88—89 (in Chinese)
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. Synthesis report [R]. DDR10633 Geneva: IPCC, 36—38
- Lee J W, Li R F. 2003. Integration of fossil energy systems with  $\text{CO}_2$

- sequestration through  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  production [J]. *Energy Conversion and Management*, 44: 1535—1546
- Liu F, Wang S J, Chen C H, et al. 2008. Experimental study on regenerated ammonia method to capture  $\text{CO}_2$  [A]. The Proceedings of the 33rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems [C]. Cleanwater Florida Coal Technology Association, 1103—1114
- 刘光启, 马连湘, 刘杰. 2002. 化学化工物性数据手册 (无机卷) [M]. 北京: 化学工业出版社工业装备与信息工程出版中心, 326—329
- Liu G Q, Ma L X, Liu J. 2002. Handbook of Data on Properties of Chemistry and Chemical Industry (inorganic volume) [M]. Beijing: Industry Equipment and Information Engineering Publishing Center of Chemical Engineering Press, 326—329 (in Chinese)
- Nowak P, Skrzypek J. 1989. The kinetics of chemical decomposition of ammonium bicarbonate and carbonate in aqueous solutions [J]. *Chemical Engineering Science*, 44(10): 2375—2377
- Resnik K P, Garber W, Hreh D C, et al. 2006. A parametric scan for regenerative ammonia-based scrubbing for the capture of  $\text{CO}_2$  [A]. Proceedings of 23rd Annual International Pittsburgh Coal Conference [C]. Pittsburgh University of Pittsburgh
- 王阳, 贾莹光, 李振中, 等. 2008. 燃煤烟气氨法  $\text{CO}_2$ 减排技术的研究 [J]. *电力设备*, 9(5): 17—20
- Wang Y, Jia Y G, Li Z Z, et al. 2008. Study on absorption of  $\text{CO}_2$  in coal-fired flue gas by hydrous ammonia [J]. *Electrical Equipment*, 9(5): 17—20 (in Chinese)
- 闫志勇, 张虹, 陈昌和, 等. 1999.  $\text{CO}_2$ 排放导致的地球升温问题及基本技术对策 [J]. *环境科学进展*, 7(6): 175—181
- Yan Z Y, Zhang H, Chen C H, et al. 1999. Global warming as a result of  $\text{CO}_2$  emission and basic technical countermeasures [J]. *Advances in Environmental Science*, 7(6): 175—181 (in Chinese)
- 杨林军, 张霞, 孙露娟, 等. 2006. 以长效胺液为载体固定电厂烟气中二氧化碳的技术进展 [J]. *现代化工*, 26(9): 12—15
- Yang L J, Zhang X, Sun L J, et al. 2006. Advances in sequestration of  $\text{CO}_2$  in gases from fossil fuel power plants with modified  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  production [J]. *Modern Chemical Industry*, 26(9): 12—15 (in Chinese)
- Yeh A C, Bai H L. 1999. Comparison of ammonia and monoethanolamine solvents to reduce  $\text{CO}_2$  greenhouse gas emissions [J]. *The Science of the Total Environment*, 228: 121—133
- Yeh J T, Resnik K P, Pennline H W. 2003. Aqueous ammonia process for greenhouse and acid gas removal [A]. Second Annual Conference on Carbon Sequestration [C]. Alexandria: National Energy Technology Laboratory
- Yeh J T, Resnik K P, Pytle K, et al. 2005. Semi-batch absorption and regeneration studies for  $\text{CO}_2$  capture by aqueous ammonia [J]. *Fuel Processing Technology*, 86: 1533—1546
- 张君, 公茂利, 黄江霞, 等. 2006. 超重力场强化氨水吸收烟道气中  $\text{CO}_2$ 的研究 [J]. *安徽理工大学学报 (自然科学版)*, 26(1): 48—51
- Zhang J, Gong M L, Jia J X, et al. 2006. Study on removal of low concentration  $\text{CO}_2$  from flue gas by aqueous ammonia under HIGEE at normal atmosphere [J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 26(1): 48—51 (in Chinese)
- 张昀, 李振中, 李成之, 等. 2002. 电站烟气中  $\text{CO}_2$ 减排新技术双重效益的研究 [J]. *现代电力*, 19(3): 1—7
- Zhang Y, Li Z Z, Li C Z, et al. 2002. Dual benefits of a new  $\text{CO}_2$  sequestration technology from fossil fuel power plants [J]. *Modern Electric Power*, 19(3): 1—7 (in Chinese)