

# SO<sub>2</sub>对碳捕集过程影响的实验研究

高巨宝, 王淑娟, 周姗, 赵博, 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, 北京市 海淀区 100084)

## Experimental Study on the Influence of SO<sub>2</sub> on the CO<sub>2</sub> Capture Process

GAO Jubao, WANG Shujuan, ZHOU Shan, ZHAO Bo, CHEN Changhe, XU Xuchang

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of the Ministry of Education, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** A lab CO<sub>2</sub> capture pilot plant was operated continuously for hundreds of hours using new blended aqueous amine solution. The effect of SO<sub>2</sub> on the CO<sub>2</sub> capture process was investigated experimentally in the pilot plant. The experimental results show that the CO<sub>2</sub> removal efficiency decreases with an increase of absorbent reaction time, which is induced by amine oxidative degradation, thermal degradation and SO<sub>2</sub>. Among them, SO<sub>2</sub> is the most important factor. At the presence of O<sub>2</sub>, the higher the concentration of SO<sub>2</sub> is, the more quickly the reduction of CO<sub>2</sub> removal efficiency is. With SO<sub>2</sub> was absorbed continuously by amine solvent, the formation rate of heat stable salts was accelerated, at the same time the pH value of solution was decreased gradually. What's more, the decline rate of CO<sub>2</sub> removal efficiency was accelerated also. Meanwhile, more and more SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ion combined with amine, which was competed with CO<sub>2</sub> capture, brought about the CO<sub>2</sub> loading decreased progressively, and then caused to the unstability of the absorption-desorption process. Therefore, it is beneficial to the CO<sub>2</sub> capture process to remove SO<sub>2</sub> induced heat stable salts using appropriate methods.

**KEY WORDS:** CO<sub>2</sub>; SO<sub>2</sub>; amine absorbent; CO<sub>2</sub> capture; pilot plant; coal-fired power plant

**摘要:** 采用新型混合有机胺 CO<sub>2</sub> 吸收剂, 在捕集 CO<sub>2</sub> 中试实验台上进行长期稳定运行实验, 研究 SO<sub>2</sub> 对碳捕集过程的影响。实验结果表明, SO<sub>2</sub>、胺吸收剂的氧化和热降解导致 CO<sub>2</sub> 脱除效率随着循环反应时间的增加而逐步降低, 其中 SO<sub>2</sub> 是主要影响因素。在 O<sub>2</sub> 存在的条件下, SO<sub>2</sub> 浓度越高, CO<sub>2</sub> 脱除效率下降越快。随着 SO<sub>2</sub> 不断地被胺吸收剂吸收, 一方面促进了热稳定性盐的生成, 另一方面使吸收剂溶液的 pH 值逐步降低, 最终使得 CO<sub>2</sub> 脱除效率越来越低。与此同

时, 越来越多的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 占据了胺吸收剂的反应位, 使其与 CO<sub>2</sub> 的吸收反应形成竞争关系, 致使 CO<sub>2</sub> 负载量逐步降低, 以至于影响到吸收解吸过程的稳定性。采用有效的方法适时的清除 SO<sub>2</sub> 导致的热稳定性盐, 有利于碳捕集系统吸收解吸性能的提高。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; SO<sub>2</sub>; 胺吸收剂; 碳捕集; 中试装置; 燃煤电厂

## 0 引言

温室气体的排放是导致全球变暖的原因之一, 由于 CO<sub>2</sub> 数量庞大且寿命持久而成为所有温室气体中“贡献”最大的<sup>[1]</sup>, 因此关于 CO<sub>2</sub> 的捕获和埋存越来越受到国际社会的广泛关注。燃煤电站, 水泥厂和钢厂是 CO<sub>2</sub> 的集中排放源, 其中电站的排放量占整个排放量的 30%以上, 因而受到更多的关注。世界各国的研究者们正在积极寻找经济高效的 CO<sub>2</sub> 捕集技术, 正在研究的捕集技术包括富氧燃烧技术<sup>[2]</sup>, CaO 碳酸化-煅烧循环的 CO<sub>2</sub> 分离技术 (calcination/carbonation reactions, CCR)<sup>[3]</sup>, 化学链燃烧技术 (chemical looping combustion, CLC)<sup>[4-5]</sup>, 水合物法<sup>[6]</sup>, 矿物碳酸化隔离法<sup>[7]</sup> 以及胺基化学吸收法<sup>[8]</sup>。

事实上, 胺法捕集 CO<sub>2</sub> 的技术已在化工天然气行业应用了几十年, 因而是所有技术中最接近规模化捕集燃煤烟气中 CO<sub>2</sub> 的技术。然而由于燃煤烟气具有大流量和低 CO<sub>2</sub> 分压的特点, 同时伴有 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 以及飞灰等杂质, 因此使得该技术不能简单的等同于天然气分离捕集 CO<sub>2</sub> 技术, 还需要针对燃煤烟气的特点进行深入研究。尽管胺法捕集技术面临着能耗高和腐蚀设备的问题, 依然被认为是所有技术中最适宜的燃煤烟气 CO<sub>2</sub> 捕集技术<sup>[8]</sup>。

燃煤电站尾部烟气即使通过了脱硫装置, 仍然会有少量的 SO<sub>2</sub>。同时对于某些地方的燃低硫煤电

基金项目: 国家自然科学基金项目(50876051, 50906044)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50876051,50906044)。

站, 并没有装设脱硫装置<sup>[9]</sup>。SO<sub>2</sub> 的存在会促进大部分有机胺吸收剂降解<sup>[10]</sup>, 生成热稳定性盐。因而研究 SO<sub>2</sub> 对碳捕集过程的影响显得尤为重要。

## 1 实验系统

### 1.1 实验装置

为了有效地减缓温室气体排放, 世界上许多国家都着手建立了 CO<sub>2</sub> 捕集工业示范装置<sup>[11-13]</sup>, 重点研究新型吸收剂和新工艺, 考察新型吸收剂的长期运行特性, 并依此优化运行参数, 同时获得大量的工业运行数据和运行经验。我国的西安热工研究院在华能北京热电厂建立了国内首套燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 捕集示范装置<sup>[14]</sup>, 并成功示范运行。清华大学在多年理论研究的基础上搭建了实验室 CO<sub>2</sub> 捕集中试装置, 实验室 CO<sub>2</sub> 捕集系统流程图如图 1 所示。整个试验系统分为 4 个循环, 分别是模拟烟气循环、吸收剂循环、冷却水循环和导热油循环。模拟烟气采用纯 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 配制, 配制好的模拟烟气通过混配罐由吸收塔底进入, 与吸收液逆向接触反应后, CO<sub>2</sub> 被吸收, 剩余气体通过风泵与再生塔再生 CO<sub>2</sub> 气体混合, 返回吸收塔底, 完成模拟烟气的循环。SO<sub>2</sub> 由质量流量控制器控制连续送入吸收塔模拟烟气入口。吸收剂在吸收塔吸收 CO<sub>2</sub> 后, 通过贫富液换热器, 进入再生塔再生, 再生后的吸收剂经过换热器冷却后, 进入吸收塔循环吸收。冷却水循环系统主要用于控制进入吸收塔吸收剂的最佳吸收温度, 冷凝吸收塔和再生塔塔顶气体中的水蒸气。导热油循环系统用于给再生塔塔底的再沸器提供热量, 并最终达到解吸 CO<sub>2</sub> 的目的, 导热油携带的热量通过 60 kW 电加热器产生。

整个系统的管道、设备全部采用 316L 不锈钢材质制作, 吸收塔和解吸塔内径为 0.207 m, 吸收塔高为 4.96 m, 解吸塔高为 4.8 m, 两塔均采用为

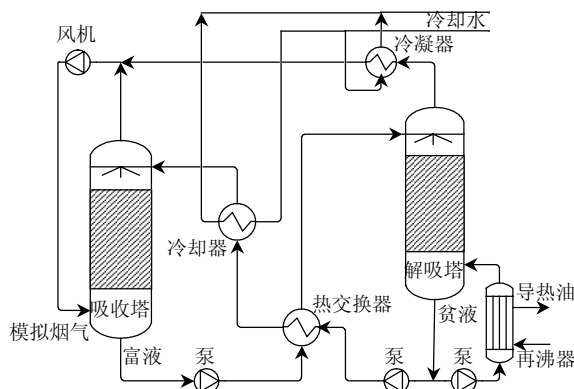


图 1 实验台系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of experimental system

3.15 m 高的 CY700 型不锈钢丝网规整填料。

整个系统在实验过程中全密封运行, 并在实验前进行 12 h 打压试验。由于吸收塔和解吸塔出口气体有一定含湿率, 因此长时间实验会使吸收剂水含量逐渐减少, 吸收剂浓度升高, 在本实验台设计中, 该部分水通过蠕动泵返回塔内, 改善了水损失导致的吸收剂浓度逐步升高的问题。

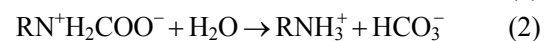
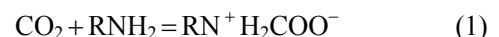
### 1.2 测试设备

实验中吸收塔进出口 CO<sub>2</sub> 浓度采用量程范围分别为 0%~20%和 0%~5%的在线红外气体分析仪测量, 气体通过冷凝除水后进行测量。SO<sub>2</sub> 浓度同样采用 Thermo 公司的红外气体分析仪测量。O<sub>2</sub> 浓度采用顺磁氧量表测量。系统中所有温度测点使用热电偶, 压力测点使用压力传感器。气体流量采用涡街、涡轮流量计测量, 吸收剂流量采用涡轮流量计测量。所有测量数据通过 DCS 系统自动记录, 记录频率为 1 次/min。

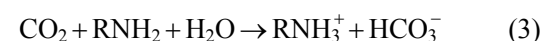
新鲜溶液中胺浓度采用瑞士万通(Metrohm) 809 Titrando 滴定仪进行分析, 该仪器配有可分辨 0.001 pH 的电极。经过反应后的溶液阴阳离子采用美国戴安 ICS-1000 型离子色谱分析仪分析。有机胺溶液的 CO<sub>2</sub> 担载量使用岛津(SHIMADZU) TOC-5000 总有机碳分析仪进行分析。

## 2 理论分析

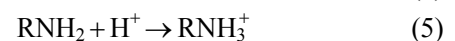
有机胺溶液与 CO<sub>2</sub> 反应的两性离子反应机制最初由 Caplow<sup>[15]</sup>提出, 之后被许多文献提及<sup>[16-17]</sup>, 并作为一般的醇胺溶液与 CO<sub>2</sub> 反应的机制, 其主要化学反应式如下:



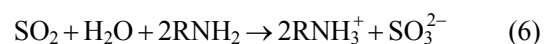
因此总反应式为



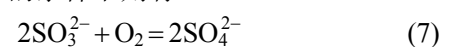
SO<sub>2</sub> 与碱性有机胺溶液可能存在如下反应<sup>[18]</sup>:



总反应式为



有 O<sub>2</sub> 存在的条件下则有



## 3 实验结果与讨论

### 3.1 实验概况

David 研究了 SO<sub>2</sub> 对碳酸钾溶液吸收 CO<sub>2</sub> 的影

响<sup>[9]</sup>, Teeradet 和 Ito 则研究了 SO<sub>2</sub> 导致的 MEA 溶液降解特性<sup>[10,19]</sup>, 以上研究仅针对 CO<sub>2</sub> 吸收过程在小型反应器上进行了短期实验。本文的研究则综合考虑了 CO<sub>2</sub> 吸收解吸过程, 采用新型混合有机胺溶液, 在全封闭大型中试实验台上进行了长期稳定实验研究。

为了研究 SO<sub>2</sub> 对碳捕集过程的影响, 在本文所述实验台上进行了 3 次长期稳定实验, 3 次实验工况如表 1 所示。3 个工况氧气含量控制在 18% 左右, 主要为了使 SO<sub>2</sub> 完全氧化, 被吸收剂稳定吸收。由于实验中氧气在不断消耗, 因而对于工况 1 和 2, 采取间歇性补充氧气方式。对于工况 3, 为了更好地维持系统稳定, 则采用连续补氧方式。实验中模拟烟气总流量约为 86 m<sup>3</sup>/h, 吸收剂流量在 0.2~1.2 m<sup>3</sup>/h 连续可调, 吸收塔底和解吸塔底平均温度分别为 46 和 116 °C。吸收剂分析样品每隔 100 h 分别由吸收塔底和解吸塔底采集, 每次采集前需保证系统稳定运行 30 min 以上。工况 1、2、3 连续稳定运行时间分别为 500, 430 和 345 h, 工况 2 和 3 运行时间短是由于吸收塔出口 CO<sub>2</sub> 浓度超出了仪器的测量范围或者 CO<sub>2</sub> 脱除率低于 60%, 因而结束实验。本文首先展示了 3 个工况下 CO<sub>2</sub> 脱除率随时间的变化关系, 然后分析了与之相关的热稳定性盐、pH 值和 CO<sub>2</sub> 负载量, 从多个方面确保了实验结果的可靠性。另外, 虽然工况 2 和 3 在 SO<sub>2</sub> 浓度上稍有差别, 但从实验结果的总体趋势上可以体现出较好的重复性。

表 1 实验工况  
Tab. 1 Experimental conditions

工况	CO <sub>2</sub> 体积分数/%	O <sub>2</sub> 体积分数/%	SO <sub>2</sub> 体积分数/10 <sup>-6</sup>	胺吸收剂/ (mol/L)
1	11.89	18.2	0	4.64
2	11.86	17.8	214	4.57
3	12.26	18.1	317	4.44

### 3.2 SO<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 脱除率的影响

图 2 显示了 3 个工况 CO<sub>2</sub> 脱除率随吸收剂循环反应时间的变化关系。图中所示数据为相邻两测点之间时间间隔内的平均脱除率, 其中吸收塔进出口 CO<sub>2</sub> 体积分数的测量误差在 ±2% 以内。CO<sub>2</sub> 脱除率由式(8)计算:

$$\eta_{\text{CO}_2} = \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}(1 - C_{\text{out}})} \quad (8)$$

式中:  $C_{\text{in}}$  和  $C_{\text{out}}$  分别为吸收塔入口 CO<sub>2</sub> 体积分数和吸收塔出口 CO<sub>2</sub> 体积分数。

由图 2 可以看出, 随着吸收剂循环吸收解吸时

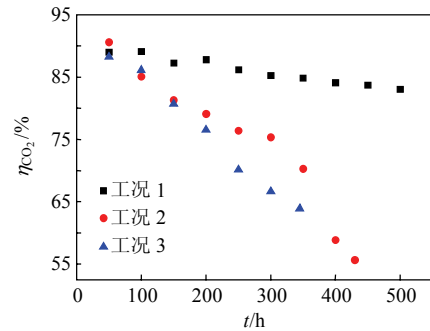


图 2 SO<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 脱除率的影响

Fig. 2 Effect of SO<sub>2</sub> on CO<sub>2</sub> removal efficiency

间的增加, 3 个工况的 CO<sub>2</sub> 脱除率均有不同程度的降低。对于未添加 SO<sub>2</sub> 的工况 1 而言, 即使吸收剂循环了 500 h, CO<sub>2</sub> 脱除率依然可以达到 83% 以上, 与反应初始的 89% 相比, 仅仅降低了 6%。工况 1 脱除率的降低主要是由于吸收剂的氧化和热降解, 而吸收剂的这一特性也是较为重要的, 它的变化可以直接影响系统运行稳定性, 运行操作费用和碳捕集能耗, 因而有文献[20-21]详细地研究了这一特性。

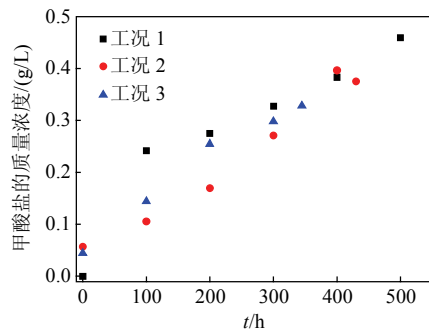
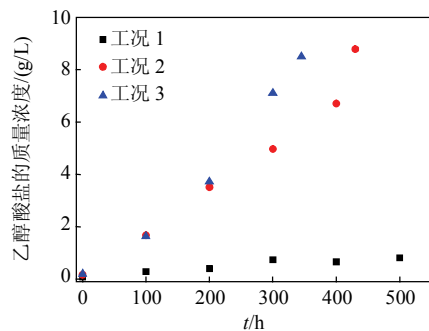
当系统中加入 SO<sub>2</sub> 后, 随着 SO<sub>2</sub> 在吸收剂中的累积, CO<sub>2</sub> 脱除率的下降趋势更加明显, 且随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的增加, 脱除率降低。工况 2 在反应 430 h 后, 脱除率由最初的 90% 降至 55%。工况 3 则在 345 h 后由 88% 降至 63%。由此可见, SO<sub>2</sub> 的添加会加快 CO<sub>2</sub> 脱除率的下降, 且这种影响要强于吸收剂本身的氧化和热降解所带来的 CO<sub>2</sub> 脱除率的下降。

### 3.3 SO<sub>2</sub> 对热稳定性盐生成量的影响

由 3.2 节分析可知, 吸收剂的降解是导致 CO<sub>2</sub> 脱除率下降的原因之一, 而降解的主要产物便是热稳定性盐。为了进一步研究 SO<sub>2</sub> 在 CO<sub>2</sub> 脱除率降低过程中的作用, 分析了 3 种工况下采样样品中的阴离子, 且这些阴离子的测量误差在 ±3% 以内, 其中主要的热稳定性盐包括甲酸盐, 乙酸盐, 乙醇酸盐和草酸盐。在本文实验条件下, 由于乙酸盐和草酸盐的生成量比甲酸盐和乙醇酸盐少得多, 且仅在个别样品中出现, 因此本文主要分析了甲酸盐和乙醇酸盐的生成特性。

图 3 显示了不同工况下的甲酸盐生成特性。由图中可以看出, 随着吸收剂循环吸收解吸时间的增加, 3 个工况中甲酸盐逐步在吸收剂中累积增加。由 100, 200 和 300 h 的测量结果可以看到, SO<sub>2</sub> 对甲酸盐生成量的影响逐步减小, 并最终趋于一致。

图 4 则是乙醇酸盐随反应时间的变化关系图, 总体上来看, 随着循环反应时间的增加, 乙醇酸盐在吸收剂中也是逐步累积增加的。SO<sub>2</sub> 的添加使得

图 3 SO<sub>2</sub> 对甲酸盐生成量的影响Fig. 3 Influence of SO<sub>2</sub> on the formate formation图 4 SO<sub>2</sub> 对乙醇酸盐生成量的影响Fig. 4 Influence of SO<sub>2</sub> on the glycolate formation

乙醇酸盐的生成量明显增加,且随着 SO<sub>2</sub> 浓度的升高,乙醇酸盐的生成量在 200 h 以后逐步升高。结合图 3、4 总体来看,SO<sub>2</sub> 促进了热稳定性盐的生成,也就是说 SO<sub>2</sub> 会加速胺吸收剂的降解。Itoro 在半连续性高温高压反应釜上研究了 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 对 MEA 吸收剂降解的影响。研究表明在 O<sub>2</sub> 存在的条件下,SO<sub>2</sub> 会加速 MEA 的降解速度,且 SO<sub>2</sub> 体积分数越高,作用越大<sup>[21]</sup>。这与本文采用新型有机胺混合吸收剂所得到的结论相同。进一步研究表明,工况 1 中,随着胺吸收剂的降解,溶液 pH 值由 11.815 降至 10.995。工况 2 溶液的 pH 值则由 11.84 减为 9.327。pH 值的降低一方面来源于胺吸收剂的降解,另一方面则是 SO<sub>2</sub> 在吸收剂中的积聚导致的。由于有机胺的碳捕集属于酸碱反应,因而 SO<sub>2</sub> 导致胺水溶液 pH 值的下降,也是 CO<sub>2</sub> 脱除效率下降的原因之一。

### 3.4 SO<sub>2</sub> 对吸收剂吸收解吸性能的影响

由上文分析可知,随着 SO<sub>2</sub> 不断的被胺吸收剂吸收,导致了 CO<sub>2</sub> 脱除效率迅速下降,而这将影响单位摩尔胺吸收剂吸收的 CO<sub>2</sub> 摩尔数,即胺吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负载量。本文实验条件下胺水溶液中 CO<sub>2</sub> 负载量的测量误差在 ±5% 以内。胺水溶液 CO<sub>2</sub> 负载量的变化可以直接反映吸收剂在吸收塔内的吸收

特性和解吸塔内的解吸性能。

图 5 显示了不同工况下吸收塔内胺吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负载量随循环反应时间的变化关系。从图中可以看到,当系统中加入 SO<sub>2</sub> 后,胺吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负载量整体上呈现下降趋势,且随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的升高,这种趋势更加明显。这意味着,SO<sub>2</sub> 的添加使得胺吸收剂吸收 CO<sub>2</sub> 的数量减少,吸收剂吸收性能下降,且这种趋势随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的升高而增强。由上文分析可知,SO<sub>2</sub> 的添加会加速胺吸收剂的降解,这将影响单位时间内吸收 CO<sub>2</sub> 的总量,然而假设系统吸收解吸稳定的情况下,胺吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负载量不受胺降解的影响。这样,图 5 中显示的 CO<sub>2</sub> 负载量的下降就只能是由于 SO<sub>2</sub> 在吸收剂中的积聚导致的。由第 2 节理论分析可知,SO<sub>2</sub> 被吸收剂吸收后主要以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的形式存在,其酸性要更强,更易于与碱性胺吸收剂反应,因而与 CO<sub>2</sub> 的吸收反应形成竞争,且 SO<sub>2</sub> 在吸收剂中的累积量越多,会有更多的反应位被 SO<sub>2</sub> 占据,竞争趋势更加明显。

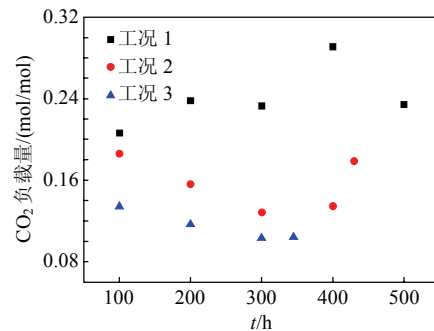
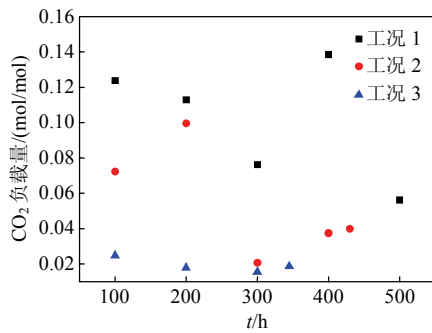
图 5 SO<sub>2</sub> 对吸收性能的影响Fig. 5 Effect of SO<sub>2</sub> on absorption

图 6 是不同工况下解吸塔内胺吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负载量随循环反应时间的变化关系图。由图 6 可以看出,与图 5 类似,从工况 1 到工况 3,随着加入系统中的 SO<sub>2</sub> 体积分数的升高,胺吸收剂的 CO<sub>2</sub> 负载量整体呈现下降趋势。结合图 5 不难发现,解吸塔内出现 CO<sub>2</sub> 负载量随 SO<sub>2</sub> 体积分数的升高而降低的现象,主要是由于吸收塔内 CO<sub>2</sub> 负载量的降低。在相同再沸器功率条件下,吸收的 CO<sub>2</sub> 量越少则解吸后的 CO<sub>2</sub> 负载量越小。同理可以由工况 1 看出,随着循环反应时间的增加,在吸收塔内 CO<sub>2</sub> 负载量整体呈现增长趋势,而在解吸塔内则表现出下降趋势。也就是说吸收剂解吸越彻底,则越容易再吸收。

Itoro 认为在 MEA 吸收剂中,CO<sub>2</sub> 负载量的增加可以减少 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 在吸收剂中的溶解,从而抑



图6 SO<sub>2</sub>对解吸性能的影响Fig. 6 Effect of SO<sub>2</sub> on desorption

制其对MEA吸收剂降解的影响<sup>[21]</sup>。然而,由图5和图6可以看到,在本文的实验条件下,当CO<sub>2</sub>负载量较高时,往往SO<sub>2</sub>体积分数较低。也就是说,要想持续在高CO<sub>2</sub>负载量下吸收SO<sub>2</sub>并非易事,因为随着循环反应时间的增加,SO<sub>2</sub>不断的在吸收剂中累积,加速了吸收剂pH值的降低,并逐渐导致CO<sub>2</sub>负载量降低。如果通过降低再沸器功率来增加CO<sub>2</sub>负载量,则会造成吸收塔CO<sub>2</sub>脱除效率降低,且会使系统运行不稳定。因此将SO<sub>2</sub>带来的热稳定性硫酸盐连同胺吸收剂降解所得热稳定性盐除去,并提高pH值,可以减缓SO<sub>2</sub>带来的影响,而具体的去除方法还需要做进一步研究。

## 4 结论

建立了CO<sub>2</sub>吸收解吸全封闭式实验台,采用新型有机胺混合吸收剂,在该实验台上进行了3次长期稳定实验,考察了实验台的连续稳定性,并研究了SO<sub>2</sub>对碳捕集过程的影响。主要结论如下:

1) 随着吸收剂循环吸收解吸时间的增加,添加和不添加SO<sub>2</sub>工况下,CO<sub>2</sub>脱除效率均有所降低。与胺吸收剂的氧化和热降解造成的CO<sub>2</sub>脱除效率降低相比,SO<sub>2</sub>带来的影响更加明显。

2) 随着SO<sub>2</sub>在胺吸收剂中的累积,促进了热稳定性盐的生成,并使得吸收剂的pH值逐步降低。SO<sub>2</sub>带来的上述影响加上胺吸收剂的氧化和热降解,导致了CO<sub>2</sub>脱除效率逐步降低。

3) SO<sub>2</sub>在胺吸收剂中不断累积,越来越多的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>占据了胺吸收剂的反应位,使其与CO<sub>2</sub>的吸收反应形成竞争关系,致使CO<sub>2</sub>负载量逐步降低,这样会进一步影响吸收解吸过程的稳定性。因此,适时的清除SO<sub>2</sub>以及胺降解带来的热稳定性盐,有利于系统的稳定和吸收剂吸收解吸性能的提高。

## 致谢

本文的研究工作得到了日本东芝公司的帮助,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] Umberto Ddsideri, Alberto Paolucci. Performance modelling of a carbon dioxide removal system for power plants[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(18): 1899-1915.
- [2] 樊越胜, 邹峥, 高巨宝, 等. 煤粉在富氧条件下燃烧特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 118-121.  
Fan Yuesheng, Zou Zheng, Gao Jubao, et al. Study of oxygen content on combustion characteristics of pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 118-121(in Chinese).
- [3] 房凡, 李振山, 蔡宁生. 钙基CO<sub>2</sub>吸收剂循环反应特性的试验与模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 30-35.  
Fang Fan, Li Zhenshan, Cai Ningsheng. Experimental research and modeling of multiple carbonation/calcination cycle of ca-based CO<sub>2</sub> sorbents[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 30-35(in Chinese).
- [4] 沈来宏, 肖军, 肖睿, 等. 基于CaSO<sub>4</sub>载氧体的煤CLC分离CO<sub>2</sub>研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 69-74.  
Shen Laihong, Xiao Jun, Xiao Rui, et al. Chemical looping combustion of coal in interconnected fluidized beds of CaSO<sub>4</sub> oxygen carrier[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 69-74(in Chinese).
- [5] 秦翠娟, 沈来宏, 郑敏, 等. 不同气化介质下CaSO<sub>4</sub>载氧体的煤化学链燃烧实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 48-55.  
Qin Cuijuan, Shen Laihong, Zheng Min, et al. Experimental study on the effect of gasification medium on chemical looping combustion of coal with CaSO<sub>4</sub> oxygen carrier[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 48-55(in Chinese).
- [6] 刘妮, 刘道平, 谢应明. 水合物法高效储存二氧化碳气体的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 36-40.  
Liu Ni, Liu Daoping, Xie Yingming. Experimental study on CO<sub>2</sub> storage by hydrate crystallization[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 36-40(in Chinese).
- [7] 晏恒, 张军营, 王志亮, 等. 模拟烟气中硅灰石矿物碳化隔离CO<sub>2</sub>的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 44-49.  
Yan Heng, Zhang Junying, Wang Zhiliang, et al. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation in simulated flue gas using wollastonite[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 44-49(in Chinese).
- [8] Rochelle G T. Amine scrubbing for CO<sub>2</sub> capture[J]. Science, 2009, 325(5948): 1652-1654.
- [9] Wappel David, Khan Ash, Shallcross David, et al. The effect of SO<sub>2</sub> on CO<sub>2</sub> absorption in an aqueous potassium carbonate solvent[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 125-131.
- [10] Supap Teeradet, Idem Raphael, Tontiwachwuthikul Paitoon, et al. Kinetics of sulfur dioxide-and oxygen-induced degradation of aqueous monoethanolamine solution during CO<sub>2</sub> absorption from power plant flue gas streams[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(2): 133-142.
- [11] Knudsen J N, Jensen J N, Vilhelmsen P J, et al. Experience with CO<sub>2</sub> capture from coal flue gas in pilot-scale: testing of different amine solvents[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 783-790.

- [12] Kittel J, Idem R, Gelowitz D, et al. Corrosion in MEA units for CO<sub>2</sub> capture: pilot plant studies[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 791-797.
- [13] Darde V, Thomsen K, van Well W J M, et al. Chilled ammonia process for CO<sub>2</sub> capture[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1035-1042.
- [14] 黄斌, 许世森, 郜时旺, 等. 华能北京热电厂 CO<sub>2</sub> 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 Shisen, Gao Shiwang, et al. Industrial test of CO<sub>2</sub> capture in Huaneng Beijing coal-fired power station[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(17): 14-20(in Chinese).
- [15] Caplow M. Kinetics of carbamate formation and breakdown[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1968, 90(24): 6795.
- [16] da Silva E F, Svendsen H F. Ab initio study of the reaction of carbamate formation from CO<sub>2</sub> and alkanolamine[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, 43(13): 3413.
- [17] Park S W, Park D W, Oh K J, et al. Simultaneous absorption of carbon dioxide and sulfur dioxide into aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol[J]. *Separation Science and Technology*, 2009, 44(3): 543-568.
- [18] Hikita H, Asai S, Tsufi T. Absorption of sulfur dioxide into aqueous solution sodium hydroxide and sodium sulfite solution[J]. *AICHE Journal*, 1977, 23(4): 538.
- [19] Uyanga I J, Idem R O. Studies of SO<sub>2</sub>-and O<sub>2</sub>-induced degradation of aqueous MEA during CO<sub>2</sub> capture from power plant flue gas streams[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(8): 2558-2566.
- [20] Goff G S, Rochelle G T. Monoethanolamine degradation: O<sub>2</sub> mass transfer effects under CO<sub>2</sub> capture conditions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, 43(20): 6400-6408.
- [21] Strazisar B R, Anderson R R, White C M. Degradation pathways for monoethanolamine in a CO<sub>2</sub> capture facility[J]. *Energy Fuels*, 2003, 17(4): 1034-1039.



高巨宝

收稿日期: 2010-09-07。

作者简介:

高巨宝(1979), 男, 博士研究生, 从事 CO<sub>2</sub> 捕集技术的研究, gaojb08@mails.tsinghua.edu.cn;王淑娟(1972), 女, 副研究员, 博士生导师, 从事 CO<sub>2</sub> 捕集和埋存、可再生能源、能源技术及系统分析评价的研究。

(责任编辑 张媛媛)