

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 ..... 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 ..... 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 ..... 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 ..... 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 ..... 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 ..... 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 ..... 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 ..... 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 ..... 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 ..... 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 ..... 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 ..... 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑姆卵黄蛋白原及p53的诱导效应 ..... 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 ..... 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 ..... 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 ..... 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 ..... 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 ..... 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 ..... 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 ..... 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 ..... 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 ..... 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 ..... 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 ..... 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 ..... 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 ..... 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 ..... 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中PM<sub>2.5</sub>的特征分析 ..... 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 ..... 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>低温催化还原NO性能研究 ..... 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的CO<sub>2</sub>吸收和再生特性 ..... 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 ..... 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 ..... 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 ..... 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 ..... 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 ..... 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 ..... 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 ..... 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施CO<sub>2</sub>对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 ..... 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 ..... 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 ..... 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 ..... 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 ..... 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 ..... 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell生物传感器在Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>冲击活性污泥系统分析中的应用 ..... 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 ..... 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 ..... 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 ..... 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 ..... 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 ..... 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 ..... 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 ..... 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

# 自然型氨基酸及其钾盐的 CO<sub>2</sub> 吸收和再生特性

晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

**摘要:** 在 CO<sub>2</sub> 吸收过程中, 选择具有不挥发和不发生氧化降解特性的氨基酸盐吸收剂有助于降低吸收剂损失和减轻环境污染风险, 故本研究以 CO<sub>2</sub> 吸收速率和再生速率为指标, 对 L-精氨酸和精氨酸钾 (PA) 吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收性能和常压下热再生性能进行了实验分析, 并研究了吸收剂质量分数、反应温度及吸收-再生循环次数对 CO<sub>2</sub> 吸收特性的影响, 同时还与乙醇胺 (MEA)、二乙醇胺 (DEA) 和三乙醇胺 (TEA) 进行了对比分析。结果表明, 在实验的质量分数范围内, PA 具有最高的 CO<sub>2</sub> 吸收速率和吸收能力, 分别为  $24.5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$  和  $1.99 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 比相同质量分数的 MEA 高 2.1% 和 290.2%。温度影响结果表明, 40℃ 时 PA 和 MEA 的 CO<sub>2</sub> 吸收速率均高于其他实验温度。相同再生条件下, PA 的贫液 CO<sub>2</sub> 负荷要略高于 MEA, 但 PA 的再生程度可达 72.8%, 比 MEA 高 19%。同时, 3 次“吸收-再生”循环之后, 10% PA 的 CO<sub>2</sub> 吸收能力仍可保持在  $1.03 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 比 10% MEA 高 255.2%。实验结果也表明, L-精氨酸具有较强的 CO<sub>2</sub> 吸收能力, 其 CO<sub>2</sub> 吸收速率与同质量分数的 DEA 可比。

**关键词:** 氨基酸盐; 吸收能力; 吸收速率; 再生速率; 解吸

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1971-08

## CO<sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt

YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, AI Ping, ZHANG Yan-lin

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to decrease the solvent loss due to amine volatilization and oxidative degradation and reduce the risk of environmental pollution resulting from amine volatilization, amino acid salts with negligible volatility and better resistance to oxidative degradation may be considered as the alternative during the course of CO<sub>2</sub> capture. So, experimental study on CO<sub>2</sub> absorption and regeneration characteristics of L-arginine and potassium arginate (PA) was put forward in this study based on the CO<sub>2</sub> absorption rate and heating regeneration rate at ambient pressure. And the influences of absorbent mass concentration, reaction temperature and absorption-regeneration cycles on CO<sub>2</sub> absorption performance of L-arginine and PA were also investigated, which were used to compare with the typical absorbents including monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA) and triethanolamine (TEA). Results showed that among all the five absorbents, PA had the highest CO<sub>2</sub> absorption rate of  $24.5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$  and CO<sub>2</sub> loading capacity of  $1.99 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , which were 2.1% and 290.2% higher than MEA with the same mass concentration, respectively. The results also showed that CO<sub>2</sub> absorption rate of PA and MEA at 40℃ was the highest compared to other temperatures. In addition, although CO<sub>2</sub> loading of lean PA solution was slightly higher than that of MEA under the same regeneration conditions, 72.8% CO<sub>2</sub> in the rich PA solution can be released, which is 19% higher than that of MEA. After three absorption-regeneration cycles, CO<sub>2</sub> absorption capacity of 10% PA was found to be approximate  $1.03 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , which is 255.2% higher than MEA. Furthermore, L-arginine was found to have the stronger CO<sub>2</sub> absorption capacity, and its CO<sub>2</sub> absorption rate may be comparable to DEA with the same mass concentration.

**Key words:** amino acid salt; absorption capacity; absorption rate; regeneration rate; desorption

由于技术成熟度、应用广泛性及对气体的适应性, CO<sub>2</sub> 化学吸收法技术被认为是近期内大幅降低燃煤电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 排放的最合适的技术<sup>[1,2]</sup>。在该技术中,常选择有机胺类吸收剂<sup>[3-6]</sup>或氨水吸收剂<sup>[7,8]</sup>为 CO<sub>2</sub> 吸收剂,但在长期运行过程中,有机胺类吸收剂存在易挥发和氧化降解等问题<sup>[9,10]</sup>,导致吸收剂损失大,补充成本高昂,如乙醇胺 (monoethanolamine, MEA) 吸收剂,每回收 1 t CO<sub>2</sub> 需要补充 MEA 约 1.5 kg<sup>[11]</sup>。同时,胺的挥发也会造成对人体健康和环境的危害<sup>[11]</sup>。氨水吸收剂也存在易

挥发的问题<sup>[12]</sup>。因此,运行中不产生氧化降解<sup>[13,14]</sup>、零蒸气分压<sup>[15]</sup>和具有与有机胺可比的 CO<sub>2</sub> 吸收速率和吸收负荷<sup>[13]</sup>的氨基酸盐吸收剂受到了众多研究者的广泛关注。但目前的研究大多集中于诸如氨基乙酸钾和氨基乙酸钠等一元氨基酸盐的 CO<sub>2</sub> 吸收反应动力学或 CO<sub>2</sub> 吸收性能<sup>[13-18]</sup>,对氨基酸盐吸收

收稿日期: 2011-08-10; 修订日期: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51006044); 中央高校基本科研业务费专项 (2011PY007)

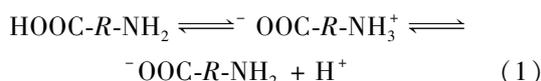
作者简介: 晏水平 (1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 CO<sub>2</sub> 分离及沼气提纯净化, E-mail: yanshp@mail.hzau.edu.cn

剂的再生特性研究较少.同时,很少有研究者关注具有多个氨基基团的多元氨基酸盐吸收剂的  $\text{CO}_2$  吸收和再生特性<sup>[19]</sup>,而拥有多个氨基基团意味着吸收剂将会具有更优的  $\text{CO}_2$  吸收特性<sup>[20]</sup>.另外,碱性氨基酸的  $\text{CO}_2$  吸收和再生特性也值得关注,因为其相对于氨基酸盐吸收剂而言,不需要消耗诸如氢氧化钾 (KOH) 之类的碱性物质,吸收剂价格将会更低.

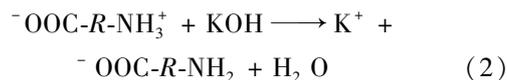
因此,本研究以拥有多个氨基基团的新型氨基酸 L-精氨酸 (L-arginine) 及其钾盐 L-精氨酸钾 (potassium arginate, PA) 为对象,通过实验分析了其  $\text{CO}_2$  吸收和再生特性,并与传统 MEA、二乙醇胺 (diethanolamine, DEA) 和三乙醇胺 (triethanolamine, TEA) 进行了对比分析,以期对新型氨基酸盐吸收剂的选择提供一定的参考.

### 1 氨基酸盐与 $\text{CO}_2$ 的反应机制

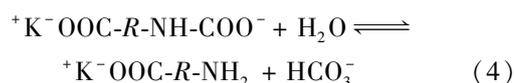
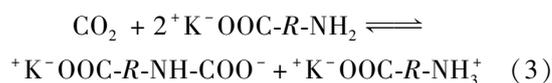
用  $\text{HOOC-R-NH}_2$  来表示氨基酸,其中  $R$  表示为链烷基或拥有氨基 ( $-\text{NH}_2$ ) 链烷基.当氨基酸在水中溶解时,将会在水溶液中建立如下的平衡<sup>[21]</sup>:



在水溶液中,羧酸根基团会失去一个质子,而氨基将会得到这个质子形成两性离子  ${}^{-}\text{OOC-R-NH}_3^{+}$ .因此,为保证氨基能顺利与  $\text{CO}_2$  发生化学反应,  ${}^{-}\text{OOC-R-NH}_3^{+}$  必须先脱去一个质子,其一般可通过在氨基酸溶液中添加 KOH 等来完成,从而形成氨基酸盐溶液:



氨基酸盐吸收剂拥有与传统胺吸收剂一样的氨基基团,可以与  $\text{CO}_2$  发生化学反应,从而吸收  $\text{CO}_2$ .其化学反应过程与传统胺反应过程类似,主要生成氨基甲酸盐,同时反应中也会伴随着氨基甲酸盐的水解反应过程<sup>[21]</sup>,分别如式(3)和式(4)所示:



值得注意的是,对于拥有多个  $-\text{NH}_2$  的碱性氨基酸而言,在式(1)的平衡中,虽然一个  $-\text{NH}_2$  得到了羧酸根基团而失去的质子,从而失去与  $\text{CO}_2$  反应活性,但其他的  $-\text{NH}_2$  基团还可以参与  $\text{CO}_2$  的吸收反应,其反应过程与式(3)和式(4)类似.这表明,对于拥有多个  $-\text{NH}_2$  的碱性氨基酸而言,其也可以直接吸收  $\text{CO}_2$ ,只是对  $\text{CO}_2$  最大吸收能力和吸收速率将低于其所对应的氨基酸盐,同时得到质子后形成的  ${}^{+}\text{K}^{-}\text{OOC-R-NH}_3^{+}$  也将对  $\text{CO}_2$  的吸收造成影响.

### 2 材料与方法

#### 2.1 实验吸收剂

本研究中,选择了传统的 MEA、DEA、TEA 和新型的 L-精氨酸及 L-精氨酸钾 (PA) 这 5 种吸收剂,其分子式和分子结构如表 1 所示.其中 MEA 和 TEA 均购置于天津博迪化工股份有限公司,纯度分别为

表 1 吸收剂的分子结构

Table 1 Molecular structures of absorbents used in this study

吸收剂	分子式	分子结构
MEA	$\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$	
DEA	$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}_2$	
TEA	$\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$	
L-精氨酸	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$	
L-精氨酸钾	$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{N}_4\text{O}_2\text{K}$	

>99% 和 >82%, DEA 由国药集团化学试剂有限公司提供, 纯度超过 99.8%, L-精氨酸由湖北赛博化工有限公司供应, 纯度超过 98%. 精氨酸钾 PA 由等摩尔的精氨酸和 KOH (国药集团化学试剂有限公司, 纯度 >82%) 反应而成. 实验中, 吸收剂溶液由蒸馏水与纯吸收剂配制而成.

## 2.2 实验装置

吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收和再生系统如图 1 所示. 吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收性能, 可采用纯 CO<sub>2</sub> 来进行实验而获得. 在 CO<sub>2</sub> 吸收实验中, 直接采用纯 CO<sub>2</sub> 进行常温、微正压吸收, CO<sub>2</sub> 流量控制在 120 mL·min<sup>-1</sup>. 来自于钢瓶的纯 CO<sub>2</sub> 经过稳压和流量控制后, 通过尖嘴玻璃管进入装有 500 g 吸收液的 CO<sub>2</sub> 吸收反应瓶

中进行鼓泡, 同时开动磁力搅拌器, 以 100 r·min<sup>-1</sup> 的转速搅拌吸收液, 促进 CO<sub>2</sub> 的分散和吸收. 吸收过程中, 每隔 10 min 对溶液进行取样 (图中未显示取样口), 分析其 CO<sub>2</sub> 负荷. 取样后马上通过取样口补充相同体积的吸收液, 以维持吸收液总质量的恒定.

当吸收 130 min 后, 取 450 g 吸收剂富 CO<sub>2</sub> 溶液进行加热再生, 再生装置如图 1(b) 所示. 热再生过程中, 采用电炉在常压下将富液加热到沸腾状态 (100~105℃). 从再生开始, 每隔 5 min 进行取样, 用于溶液 CO<sub>2</sub> 负荷的分析, 且每次取样后, 从取样口马上补充相同体积的初始富液, 保证溶液质量的基本恒定. 实验中, 吸收剂富液共再生 60 min.

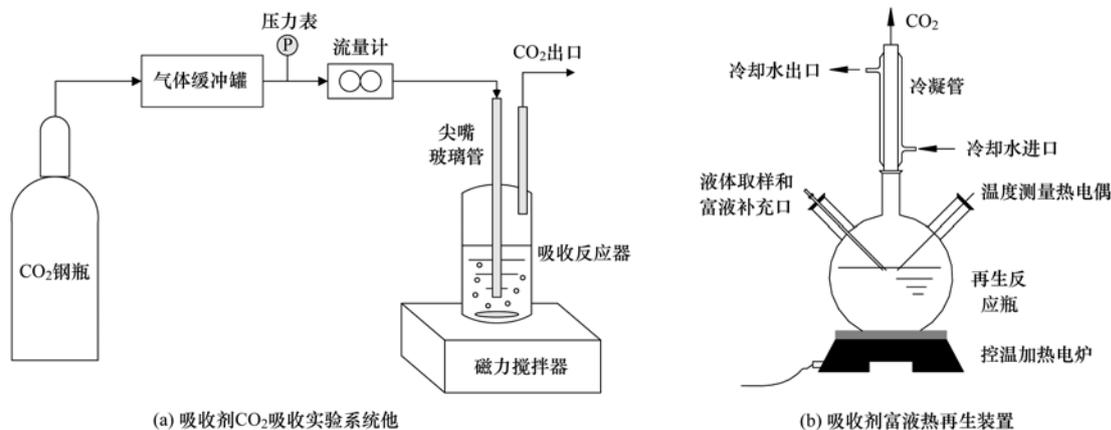


图 1 吸收剂 CO<sub>2</sub> 吸收和再生实验装置

Fig. 1 Experimental setup using for CO<sub>2</sub> absorption and regeneration of absorbents

## 2.3 分析测试方法

实验中, 主要采用吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率  $\eta$  和再生速率  $\gamma$  这 2 个指标来反映吸收剂在不同 CO<sub>2</sub> 负荷下的 CO<sub>2</sub> 吸收和再生性能. 吸收速率  $\eta$  和再生速率  $\gamma$  可分别采用式 (5) 和 (6) 来估算:

$$\eta = \frac{\alpha(t + \Delta t) - \alpha(t)}{\Delta t} = \frac{d\alpha(t)}{dt} \quad (5)$$

$$\gamma = -\frac{\beta(t + \Delta t) - \beta(t)}{\Delta t} = -\frac{d\beta(t)}{dt} \quad (6)$$

式中,  $\eta$  和  $\gamma$  分别表示吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率和再生速率, mol·(L·min)<sup>-1</sup>;  $\alpha(t + \Delta t)$  和  $\alpha(t)$  分别表示吸收中  $t + \Delta t$  和  $t$  时刻时溶液的 CO<sub>2</sub> 负荷, mol·L<sup>-1</sup>. 在计算中, 可以根据不同时间取样获得的 CO<sub>2</sub> 负荷值进行拟合, 获得吸收或再生过程中的 CO<sub>2</sub> 负荷函数  $\alpha(t)$ , 对其进行求导, 即可计算出不同 CO<sub>2</sub> 负荷下的吸收速率<sup>[3]</sup>;  $\beta(t + \Delta t)$  和  $\beta(t)$  表示再生过程中  $t + \Delta t$  和  $t$  时刻时溶液的 CO<sub>2</sub> 负荷, mol·L<sup>-1</sup>;  $t$  为吸收或再生时间, min.

其中, 吸收剂溶液在吸收或再生过程中的 CO<sub>2</sub> 负荷可采用标准的酸碱滴定方法进行测试. 测试中, 对吸收液精确取样, 然后往吸收液内添加过量的质量分数约为 25% 的硫酸溶液, 采用硫酸完全置换出吸收液内被吸收的 CO<sub>2</sub>, 置换出的 CO<sub>2</sub> 采用量气管 (50 mL, 精度 0.1 mL) 测量其体积, 即可计算出溶液的 CO<sub>2</sub> 负荷<sup>[22]</sup>:

$$\alpha \text{ 或 } \beta = \frac{V_{\text{CO}_2}}{22.4V_Lc} \times \frac{273}{T} \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  表示待测吸收液和再生液体样品的 CO<sub>2</sub> 负荷, mol·mol<sup>-1</sup>;  $V_{\text{CO}_2}$  为测试中释放的 CO<sub>2</sub> 体积, mL;  $V_L$  为待测液体样品的体积, mL;  $c$  为液体样品的物质的量浓度, mol·L<sup>-1</sup>;  $T$  为测试时的环境温度, K.

## 3 结果与分析

### 3.1 L-精氨酸及 PA 的 CO<sub>2</sub> 吸收特性

### 3.1.1 吸收剂质量分数的影响

40℃、不同质量分数和 CO<sub>2</sub> 负荷下, MEA、L-精氨酸(Arginine) 和精氨酸钾(PA) 对 CO<sub>2</sub> 的吸收速率如图 2 所示. 在图 2(a) 中, 对于 mol·mol<sup>-1</sup> 的负荷情形, 相同的 CO<sub>2</sub> 负荷条件下, PA 比 MEA 具有更高的 CO<sub>2</sub> 吸收率, 如质量分数为 30% 的 PA 溶液在 0.02 mol·mol<sup>-1</sup> 下的 CO<sub>2</sub> 吸收速率约为 24.5 × 10<sup>-3</sup> mol·(L·min)<sup>-1</sup>, 略高于新鲜 MEA 的 24 × 10<sup>-3</sup> mol·(L·min)<sup>-1</sup>. 但值得注意的是, 随着溶液 CO<sub>2</sub> 负荷的增加, MEA 和 PA 的 CO<sub>2</sub> 吸收速率下降, 但 PA 的下降幅度要低于同浓度的 MEA 溶液, 这主要是因为 PA 具有比 MEA 更高的反应速率常数<sup>[19]</sup>. 同时, 图 2(a) 也反映出, 相同的吸收时间内, PA 吸收剂能获得更高的 CO<sub>2</sub> 负荷, 如 10% PA 的 CO<sub>2</sub> 吸收负荷可达到 1.99 mol·mol<sup>-1</sup>, 而 10% MEA 只能达到约 0.511 mol·mol<sup>-1</sup>. PA 的 CO<sub>2</sub> 吸收负荷更高的原因主要在于 PA 分子结构中含有更多的氨基基团, 具有更多的 CO<sub>2</sub> 反应点, 因而具有更高的 CO<sub>2</sub> 吸收能力. 另外, 图 2(a) 还显示, L-精氨酸也具有较好的 CO<sub>2</sub> 吸收特性, 尤其是当其质量分数达到 15% 时, 其对 CO<sub>2</sub> 的吸收速率要高于 10% 质量分数的 MEA. 值得注意的是, 由于 L-精氨酸在水中的溶解度较低, 为防止在实验中出现不溶或结晶现象, 因而其最大质量分数只选择了 15%. 同样, 与 MEA 相比, L-精氨酸也具有更高的 CO<sub>2</sub> 吸收负荷, 这也与其分子结构中具有更多的氨基基团相关. 图 2(a) 还反映出, 随着吸收剂质量分数的升高, 相同的吸收时间内, 单位吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收负荷呈现下降趋势, 如 PA 的质量分数由 10% 变化到 20% 和 30% 时, 其 CO<sub>2</sub> 负荷将会由 1.99 mol·mol<sup>-1</sup> 分别下降到 1.45 mol·mol<sup>-1</sup> 和 1.01 mol·mol<sup>-1</sup>. 其原因可能在于, 虽然质量分数的提高增加了溶液中参与 CO<sub>2</sub> 吸收反

应的活性成分的量, 能吸收更多的 CO<sub>2</sub> [图 2(b)], 但也带来了 2 个负面影响: ①相同温度下, 溶液的粘度随着浓度的增加而增加<sup>[23]</sup>, 会阻碍 CO<sub>2</sub> 分子在溶液中的扩散, 会影响 CO<sub>2</sub> 在溶液中的传质<sup>[13, 15, 24]</sup>; ②相同 CO<sub>2</sub> 负荷下, 质量分数高, 吸收液表面的 CO<sub>2</sub> 平衡分压  $p_{\text{CO}_2}^*$  越高<sup>[25]</sup>, 在相同气相压力  $p_{\text{CO}_2}$  条件下, CO<sub>2</sub> 吸收过程中的传质推动力  $(p_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2}^*)$  越低, 也会对 CO<sub>2</sub> 的传质造成影响. 因此, 溶液质量分数的增加对 CO<sub>2</sub> 传质的负面影响导致了 CO<sub>2</sub> 吸收量的增幅要低于溶液质量分数的增幅, 从而形成单位吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收负荷下降的现象.

但在吸收剂的工业应用中, 除了关注单位吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收能力外, 更关心单位吸收剂溶液对 CO<sub>2</sub> 的吸收能力<sup>[26]</sup>. 吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率与溶液 CO<sub>2</sub> 负荷之间的关系如图 2(b) 所示. 图 2(b) 所反映的不同质量分数吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率变化规律与图 2(a) 具有明显的差异, 30% 质量分数的 PA 溶液具有最高的吸收负荷, 其最大负荷能达到约 1.56 mol·L<sup>-1</sup>, 略高于 30% MEA 的 1.5 mol·L<sup>-1</sup>. 同时, 在相同的溶液负荷下, 不同质量分数吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率之间的关系为: 30% PA > 30% MEA > 20% PA ≈ 20% MEA > 10% PA > 10% MEA > 15% 精氨酸 > 10% 精氨酸 > 5% 精氨酸. 这一现象说明, 在实际应用过程中, 应该选择较高质量分数的吸收剂, 因为其不仅可以获得更高的 CO<sub>2</sub> 吸收反应速率和 CO<sub>2</sub> 吸收总量, 同时质量分数越高, 溶液含水量越低, 再生过程中的能耗将会更低. 另外, 从 CO<sub>2</sub> 吸收速率角度来看, PA 的 CO<sub>2</sub> 吸收性能要优于 MEA. 图 2(b) 中, 在相同的溶液 CO<sub>2</sub> 负荷下, 精氨酸的 CO<sub>2</sub> 吸收速率低于 MEA 和 PA, 这说明, 精氨酸水溶液中分子结构中一个氨基获得羧酸根基团失去的质子而生成的两性离子<sup>-</sup> OOC-R-NH<sub>3</sub><sup>+</sup> 在反应过程中将会

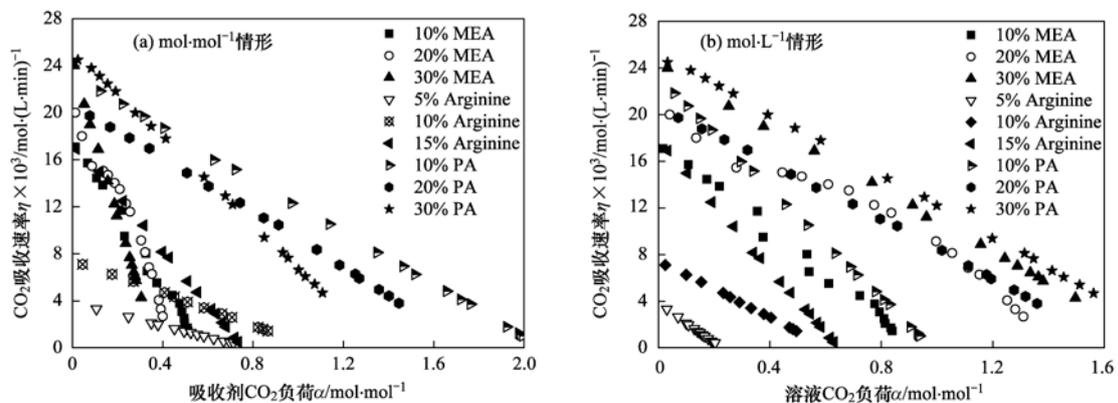


图 2 不同质量分数、不同 CO<sub>2</sub> 负荷下吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率曲线 (40℃)

Fig. 2 CO<sub>2</sub> absorption rate curves as a function of CO<sub>2</sub> loading at different mass fractions (40℃)

阻碍式(3)的正向反应的进行,从而影响 L-精氨酸对 CO<sub>2</sub> 的吸收.同时,反应过程中  $^-OOC-R-NH_3^+$  也会离解而失去一个质子,导致溶液 pH 值的下降,从而影响 CO<sub>2</sub> 的吸收反应,造成其 CO<sub>2</sub> 吸收性能低于同浓度的 MEA 和 PA.

实验中也将在 L-精氨酸的 CO<sub>2</sub> 吸收能力与 DEA 和 TEA 进行了对比,如图 3 所示.在图 3(a)中,与 DEA 和 TEA 相比,相同条件下,15% 质量分数的 L-精氨酸能获得最高的 CO<sub>2</sub> 负荷,且 10% L-精氨酸的

CO<sub>2</sub> 吸收速率要略高于 10% DEA, 15% L-精氨酸的 CO<sub>2</sub> 吸收速率与 20% DEA 和 30% TEA 可比.同样,从图 3(b)中可观察到,15% 的新鲜 L-精氨酸溶液具有可与 20% DEA 和 30% TEA 相当的 CO<sub>2</sub> 吸收速率,且在实验的溶液 CO<sub>2</sub> 负荷范围内,10% L-精氨酸与 10% DEA 的吸收速率可比.这说明 L-精氨酸在 CO<sub>2</sub> 吸收过程中,其反应速率可能与同质量分数的 DEA 相当.

### 3.1.2 吸收温度的影响

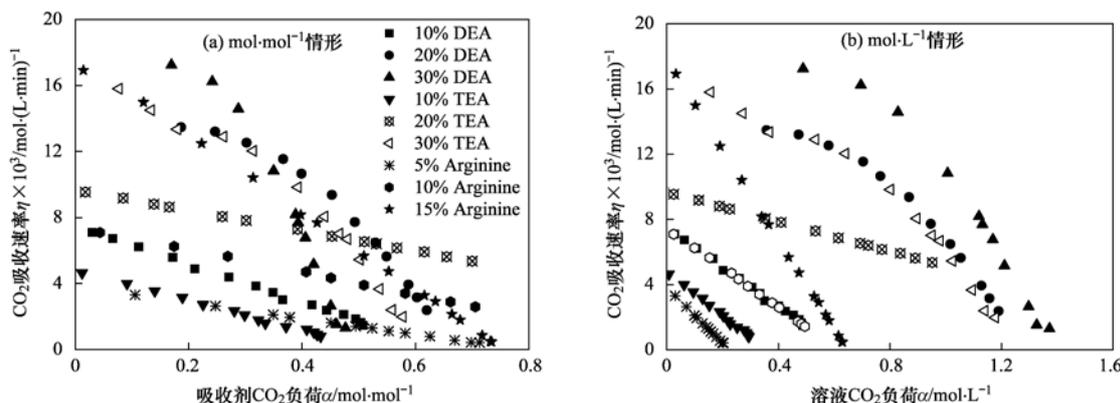


图 3 L-精氨酸与 DEA 和 TEA 的 CO<sub>2</sub> 吸收速率对比

Fig. 3 Comparison of CO<sub>2</sub> absorption rate among L-arginine, DEA and TEA

不同吸收温度下,10% 质量分数的 MEA、L-精氨酸和 PA 在不同的溶液 CO<sub>2</sub> 负荷下的吸收速率曲线如图 4 所示.对于 PA 和 MEA,从图 4 可知,随着吸收温度的升高,相同 CO<sub>2</sub> 负荷下,吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率出现先上升后下降的趋势,且 40℃ 时 CO<sub>2</sub> 吸收速率最高.这主要是因为随着温度的升高,吸收剂溶液的粘度下降<sup>[23]</sup>,从而促进 CO<sub>2</sub> 在溶液内的扩散,有益于 CO<sub>2</sub> 的吸收过程.但是,温度升高也会造成式(3)中逆向反应速率的增加<sup>[13]</sup>,抑制 CO<sub>2</sub> 吸收反应的正向进行.显然,吸收反应温度对 CO<sub>2</sub> 吸收

速率的影响是上述影响之间复合的结果.因此,当反应温度低于 40℃ 时,温度对分子扩散系数的促进作用将占主导地位,从而使 CO<sub>2</sub> 反应速率增加.但当温度超过 40℃ 时,温度对正向反应的负面影响将占主导地位,从而导致反应速率的降低.但对于 L-精氨酸而言,其受温度的影响与 MEA 和 TEA 略有差别.当吸收剂负荷在低于 0.45 mol·mol<sup>-1</sup> (0.26 mol·L<sup>-1</sup>) 内变化时,CO<sub>2</sub> 吸收速率随着温度的升高而增加.但当吸收液初始 CO<sub>2</sub> 负荷高于 0.45 mol·mol<sup>-1</sup> (0.26 mol·L<sup>-1</sup>) 时,吸收速率随温度升高

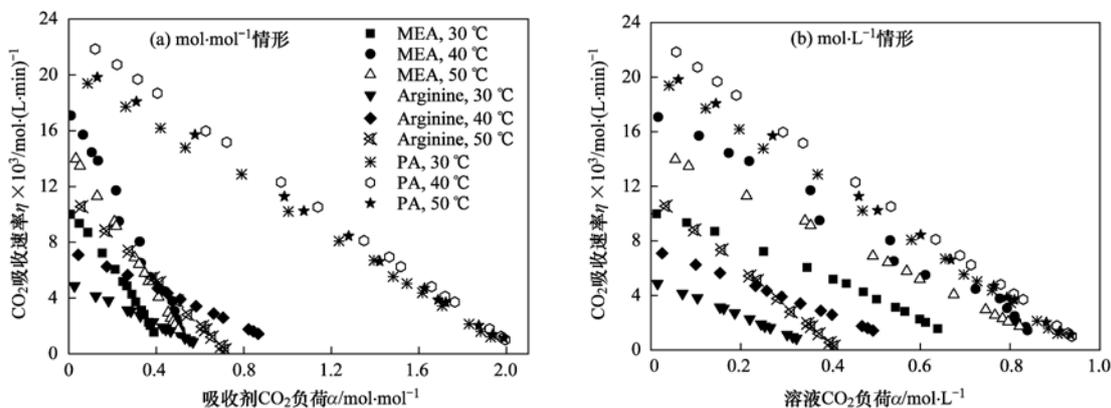


图 4 不同温度下 10% 质量分数吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率曲线

Fig. 4 CO<sub>2</sub> absorption rate curves as a function of liquid temperature at 10% mass fraction

而出现先上升后下降的趋势,且 40℃ 时  $\text{CO}_2$  吸收速率最高. 同样,从图 4 中还可看出,PA 依然具有比同质量分数的 MEA 更高的吸收能力,说明 PA 吸收剂对  $\text{CO}_2$  的吸收性能要优于 MEA.

### 3.2 吸收剂富液的再生特性对比

10% 质量分数的吸收剂富液常压、沸腾状态下的再生速率与  $\text{CO}_2$  负荷之间的关系如图 5 所示. 与  $\text{CO}_2$  吸收情形相反,富液  $\text{CO}_2$  负荷越高,再生速率越大,这主要是因为  $\text{CO}_2$  负荷越高,吸收剂富液表面的  $\text{CO}_2$  平衡分压越大,再生过程中传质推动力越大,再生速率越大<sup>[25]</sup>. 图 5(a) 显示,在相同的再生条件下,TEA 能获得最低的  $\text{CO}_2$  负荷 (0.02  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),表明三级胺 TEA 具有最好的再生性能,这是因为 TEA 与  $\text{CO}_2$  的反应产物主要是碳酸氢盐,更易再生<sup>[14]</sup>. 对于 PA,其可由 1.03  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  再生到 0.28  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,再生程度为 72.8%,而 MEA 只能从 0.49  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  被再生到 0.19  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,再生程度为 61.2%. 这一现象表明,PA 既能在吸收过程中获得更高的  $\text{CO}_2$  吸收负荷,又能在再生过程中获得相对较低的贫液负荷,因而具有比 MEA 更高的  $\text{CO}_2$  循环负荷(富液负荷与贫液负荷之差),说明相同的  $\text{CO}_2$  吸收量要求下,PA 情形的吸收液循环量要大大低于 MEA 情形,因而再生过

程中 PA 溶液升温的显热需求更低,可能会带来系统总体能耗的降低. 另外,如果仅从再生后的贫液  $\text{CO}_2$  负荷这一角度来考虑,吸收剂的贫液负荷大小关系为: TEA (0.02  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) < DEA (0.10  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) < MEA (0.19  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) < L-精氨酸 (0.24  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) < PA (0.28  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). 贫液负荷的排序规律主要跟吸收剂与  $\text{CO}_2$  反应后的生成产物的稳定性有关系,如前所述,TEA 吸收  $\text{CO}_2$  后的主要产物是碳酸氢盐,易再生,而 DEA、MEA、L-精氨酸和 PA 吸收  $\text{CO}_2$  后的主要产物是氨基甲酸盐,但其所生成的氨基甲酸盐的稳定性并不相同. 氨基中只有一个活性 H 原子的 DEA 所形成的氨基甲酸盐稳定性要低于拥有 2 个活性 H 原子的 MEA,因而 DEA 与  $\text{CO}_2$  的吸收反应中,其氨基甲酸盐更易水解而生成碳酸氢盐<sup>[27, 28]</sup>,比 MEA 更易再生. 对于含有羧酸根基团的 L-精氨酸和 PA 而言,羧酸盐生成的氨基甲酸盐的要比醇胺所形成的氨基甲酸盐更稳定,再生过程中更不容易分解<sup>[14]</sup>. 因此,L-精氨酸和 PA 再生后的贫液负荷最高.

如果从溶液负荷角度来考虑,由图 5(b) 可知,吸收剂的贫液负荷之间的关系则变化为: TEA < DEA < L-精氨酸 < PA < MEA,说明在相同的富液  $\text{CO}_2$  负荷条件下,PA 和 L-精氨酸的再生能力要优于 MEA.

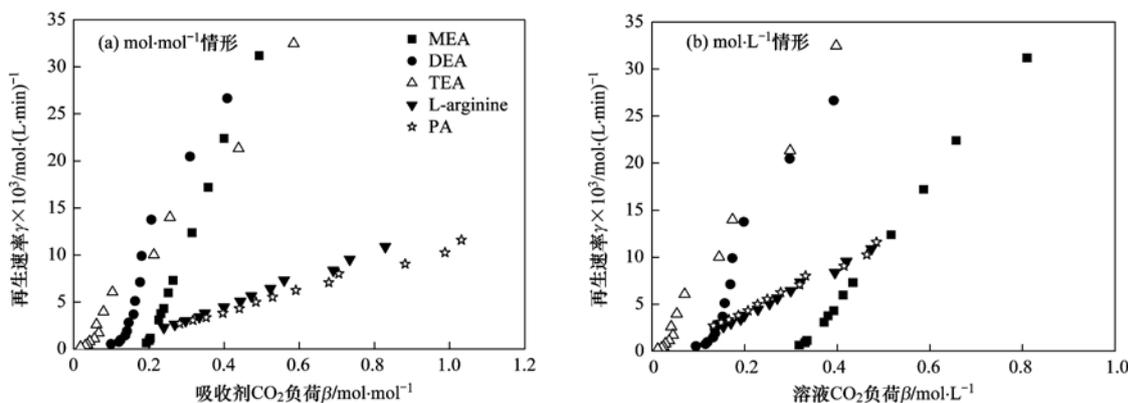


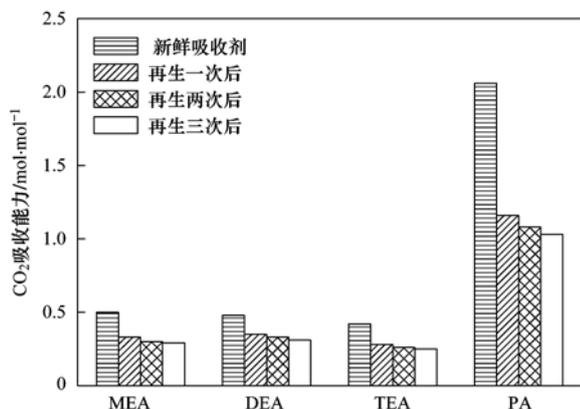
图 5 10% 质量分数的吸收剂富液的再生速率曲线

Fig. 5  $\text{CO}_2$  regeneration rate curves of rich solvents at 10% mass fraction

### 3.3 再生次数对吸收剂 $\text{CO}_2$ 吸收能力的影响

图 6 反映了 10% 质量分数的吸收剂在不同再生次数后的  $\text{CO}_2$  吸收能力变化情况,其中  $\text{CO}_2$  吸收能力为 130 min 吸收后富液  $\text{CO}_2$  负荷与初始贫液  $\text{CO}_2$  负荷之差. 新鲜吸收剂的  $\text{CO}_2$  吸收能力最大,且随着再生次数的增加,吸收剂的  $\text{CO}_2$  吸收能力逐渐下降,首次再生后  $\text{CO}_2$  吸收能力降幅最大,但 2 次再生之后吸收能力基本达到稳定. 如 MEA 第一次

和第三次再生后, $\text{CO}_2$  吸收能力比新鲜吸收剂分别降低 34% 和 42%,PA 则下降 43.7% 和 50%. MEA 和 PA 的  $\text{CO}_2$  吸收性能大幅下降的主要原因在于吸收过程中生成的氨基甲酸盐在再生过程中并不能得到完全再生<sup>[27, 29]</sup>,氨基甲酸盐越稳定,再生后贫液中的氨基甲酸盐浓度将越高,贫液  $\text{CO}_2$  负荷越高, $\text{CO}_2$  吸收性能越差. 虽然再生后 PA 的  $\text{CO}_2$  吸收能力损失最大,但其仍然拥有最高的  $\text{CO}_2$  吸收能力,



10% 质量分数、40℃ 吸收和沸腾再生  
图 6 不同再生次数后吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收能力

Fig. 6 CO<sub>2</sub> absorption capacity of solvents at different regeneration cycles

约为 1.03 mol·mol<sup>-1</sup>, 比 MEA 约高 255.2%.

#### 4 结论

(1) 相同的吸收条件下, PA 具有最优的 CO<sub>2</sub> 吸收性能, 其最高 CO<sub>2</sub> 负荷能达到 1.99 mol·mol<sup>-1</sup>, 明显优于 MEA、DEA、L-精氨酸和 TEA. L-精氨酸也具有较强的 CO<sub>2</sub> 吸收能力, 其 CO<sub>2</sub> 吸收速率可能与相同质量分数的 DEA 相当.

(2) 随着吸收剂质量分数的升高, 在相同的溶液负荷下, 5 种吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收速率均大幅上升. 同时, 随着吸收反应温度的升高, PA 和 DEA 的 CO<sub>2</sub> 吸收速率先上升后下降, 且 40℃ 时 CO<sub>2</sub> 吸收速率最高. 而对于 L-精氨酸, 当 CO<sub>2</sub> 负荷在 0.45 mol·mol<sup>-1</sup> (0.26 mol·L<sup>-1</sup>) 以内变化时, 温度升高对提高 CO<sub>2</sub> 吸收速率有利, 但当其 CO<sub>2</sub> 负荷超过此值时, 40℃ 时 CO<sub>2</sub> 吸收速率最高.

(3) 再生结果显示, 虽然 PA 具有比 MEA 稍高的贫液 CO<sub>2</sub> 负荷, 但其再生程度更高, 表明再生过程中每摩尔 PA 能释放出更多的 CO<sub>2</sub>.

(4) 随着吸收-再生循环次数的增加, 吸收剂的 CO<sub>2</sub> 吸收能力大幅下降, 但在再生 2 次后呈现稳定趋势. 虽然 PA 的吸收能力下降最大, 但其多次再生后依然能维持 1.03 mol·mol<sup>-1</sup> 的 CO<sub>2</sub> 吸收能力, 比同质量分数的 MEA 约高 255.2%.

#### 参考文献:

[1] Rao A B, Rubin E S. A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO<sub>2</sub> capture technology for power plant greenhouse gas control [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(20): 4467-4475.  
[2] Rochelle G T. Amine scrubbing for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Science*,

2009, **325**(5948): 1652-1654.  
[3] 王金莲, 方梦祥, 晏水平, 等. 吸收 CO<sub>2</sub> 新型混合化学吸收剂的研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2630-2636.  
[4] 顾光临, 邹海魁, 马乐, 等. 乙醇胺为主体的 CO<sub>2</sub> 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.  
[5] 李建强, 张新军, 陆诗建, 等. 碳酸钾-二乙烯三胺复合溶液吸收烟气中 CO<sub>2</sub> 实验研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(7): 1501-1508.  
[6] Puxty G, Rowland R, Allport A, et al. Carbon dioxide postcombustion capture: a novel screening study of the carbon dioxide absorption performance of 76 amines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(16): 6427-6433.  
[7] 曾庆, 郭印诚, 牛振祺, 等. 喷雾塔中氨水吸收 CO<sub>2</sub> 的速率 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 381-387.  
[8] 张佩芳, 莫建松, 刘越, 等. 负载量对氨水吸收 CO<sub>2</sub> 的影响规律及添加剂的作用研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(5): 1052-1055.  
[9] Nguyen T, Hilliard M, Rochelle G T. Amine volatility in CO<sub>2</sub> capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, **4**(5): 707-715.  
[10] Supap T, Idem R, Tontiwachwuthikul P, 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] Veltman K, Singh B, Hertwich E G. Human and environmental impact assessment of postcombustion CO<sub>2</sub> capture focusing on emissions from amine-based scrubbing solvents to air [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(4): 1496-1502.  
[12] You J K, Park H, Yang S H, et al. Influence of additives including amine and hydroxyl groups on aqueous ammonia absorbent for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2008, **112**(14): 4323-4328.  
[13] Kumar P S, Hogendoorn J A, Versteeg G F. Kinetics of the reaction of CO<sub>2</sub> with aqueous potassium salt of taurine and glycine [J]. *AIChE Journal*, 2003, **49**(1): 203-213.  
[14] Hook R J. An investigation of some sterically hindered amines as potential carbon dioxide scrubbing compounds [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, **36**(5): 1779-1790.  
[15] Kumar P S, Hogendoorn J A, Feron P H M, et al. New absorption liquids for the removal of CO<sub>2</sub> from dilute gas streams using membrane contactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57**(9): 1639-1651.  
[16] 赵伟, 施耀, 魏建文, 等. 甘氨酸钠溶液吸收 CO<sub>2</sub> 及再生实验研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2008, **22**(4): 690-696.  
[17] 陆建刚, 张慧, 嵇艳, 等. 一种氨基酸盐基复合溶液捕集 CO<sub>2</sub> 气体性能评价 [J]. *高校化学工程学报*, 2010, **24**(3): 410-415.  
[18] Yan S P, Fang M X, Zhang W F, et al. Experimental study on the separation of CO<sub>2</sub> from flue gas using hollow fiber membrane

- contactors without wetting [J]. *Fuel Processing Technology*, 2007, **88**(5): 501-511.
- [19] Van Holst J, Versteeg G F, Brillman D W F, *et al.* Kinetic study of CO<sub>2</sub> with various amino acid salts in aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, **64**(1): 59-68.
- [20] Bindwal A B, Vaidya P D, Kenig E Y. Kinetics of carbon dioxide removal by aqueous diamines [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **169**(1-3): 144-150.
- [21] Brouwer J P, Feron P H M, Ten Asbroek N A M. Amino-acid salts for CO<sub>2</sub> capture from flue gases [EB/OL]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/05/carbon-seq/Poster%20147.pdf>, 2005-05-05.
- [22] Yan S P, Fang M X, Luo Z Y, *et al.* Regeneration of CO<sub>2</sub> from CO<sub>2</sub>-rich alkanolamines solution by using reduced thickness and vacuum technology: regeneration feasibility and characteristic of thin-layer solvent [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, **48**(1): 515-523.
- [23] Van Holst J, Kersten S R A, Hogendoorn K J A. Physiochemical properties of several aqueous potassium amino acid salts [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2008, **53**(6): 1286-1291.
- [24] Kumar P S, Hogendoorn J A, Feron P H M, *et al.* Density, viscosity, solubility, and diffusivity of N<sub>2</sub>O in aqueous amino acid salt solutions [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2001, **46**(6): 1357-1361.
- [25] Portugal A F, Sousa J M, Magalhães F D, *et al.* Solubility of carbon dioxide in aqueous solutions of amino acid salts [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, **64**(9): 1993-2002.
- [26] Aronu U E, Hoff K A, Svendsen H F. CO<sub>2</sub> capture solvent selection by combined absorption-desorption analysis [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, **89**(8): 1197-1203.
- [27] Barzagli F, Mani F, Peruzzini M. A <sup>13</sup>C NMR study of the carbon dioxide absorption and desorption equilibria by aqueous 2-aminoethanol and *N*-methyl-substituted 2-aminoethanol [J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, **2**(3): 322-330.
- [28] Barzagli F, Mani F, Peruzzini M. Continuous cycles of CO<sub>2</sub> absorption and amine regeneration with aqueous alkanolamines: a comparison of the efficiency between pure and blended DEA, MDEA and AMP solutions by <sup>13</sup>C NMR spectroscopy [J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, **3**(6): 772-779.
- [29] Muñoz D M, Portugal A F, Lozano A E, *et al.* New liquid absorbents for the removal of CO<sub>2</sub> from gas mixtures [J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, **2**(8): 883-891.

## CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China .....	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China .....	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed .....	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline .....	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone .....	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River .....	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland .....	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China .....	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea .....	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current .....	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System .....	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu .....	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow ( <i>Gobiocypris rarus</i> ) .....	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish ( <i>Brachydanio rerio</i> ) .....	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter .....	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM .....	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions .....	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater .....	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process .....	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process .....	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor .....	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters .....	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment .....	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition .....	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability .....	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City .....	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in the Suburb of Shenzhen .....	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission .....	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO <sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt .....	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil .....	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows .....	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers .....	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production .....	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil .....	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain .....	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings .....	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake .....	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi .....	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO <sub>2</sub> Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant .....	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis .....	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR .....	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil .....	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City .....	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose .....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor .....	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples .....	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma .....	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis .....	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill .....	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate .....	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis .....	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis .....	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行