

2 种离子液体对水泥窑窑尾烟气 CO₂ 吸收特性试验研究

闫全英¹, 吕一帆¹, 潘利生², 魏小林², 李冰¹

(1. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院 力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 随着全球气候变暖趋势不断持续, 工业领域的碳减排迫在眉睫。水泥熟料生产工艺中, 水泥窑产生大量富含 CO₂ 的烟气, 浓度高达 30% 以上。因此, 水泥窑窑尾烟气的碳捕集将对工业领域的碳减排具有重要作用。以 2 种离子液体 [M₄Gu]Ac(四甲基胍醋酸盐)、[TMG][Lac](四甲基胍乳酸盐) 为研究对象, 分别考察了其在 30、50、70 °C 下对纯 CO₂ 和水泥窑窑尾模拟烟气中 CO₂ 的吸收特性。结果表明, 离子液体对纯 CO₂ 和水泥窑窑尾模拟烟气中 CO₂ 的最大吸收量皆随温度的升高而大幅降低, 70 °C 时 2 种离子液体对纯 CO₂ 的最大吸收量小于其在 30 °C 时最大吸收量的 50%; [M₄Gu]Ac、[TMG][Lac] 对水泥窑窑尾模拟烟气中 CO₂ 的吸收效果明显劣于对纯 CO₂ 的吸收效果, 最大吸收量仅为相同工况下 2 种离子液体对纯 CO₂ 最大吸收量的 22.3% 和 20.9%。70 °C 下对离子液体进行 5 次吸收和再生循环试验结果表明, 2 种离子液体的吸收性能基本稳定, 再生次数对其 CO₂ 吸收能力影响不大。

关键词: 离子液体; CO₂ 吸收; 水泥窑窑尾烟气; 碳捕集

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2020)05-0147-06

Experimental investigation on the absorption characteristics of two ionic liquids for CO₂ in cement kiln tail gas

YAN Quanying¹, LYU Yifan¹, PAN Lisheng², WEI Xiaolin², LI Bing¹

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: With the continuous global warming trend, reducing carbon emission from industry is imminent. In the production process of cement clinker, a large amount of tail gas in which consist over 30% CO₂ is emitted from the cement kiln. Therefore, it will contribute greatly to capture CO₂ from tail gas of cement kilns for carbon emission reduction of industrial field. Taking two ionic liquids, [M₄Gu]Ac (tetramethylguanidine acetate) and [TMG][Lac] (tetramethylguanidine lactate) as research objects, the absorption characteristics of pure CO₂ and CO₂ in simulated tail gas of cement kiln tail gas at 30 °C, 50 °C and 70 °C were investigated. The results show that the maximum absorption capacity for pure CO₂ and CO₂ in simulated flue gas from cement kiln tail by ionic liquids decreases greatly with the increase of working temperature. The maximum absorption capacity of the two ionic liquids at 70 °C is 50% less than the maximum absorption capacity of the two ionic liquids at 30 °C. The absorption effect of [M₄Gu]Ac and [TMG][Lac] on CO₂ in simulated tail gas of cement kiln is obviously worse than that of pure CO₂. The maximum absorption of CO₂ by the two ionic liquids is only 22.3% and 20.9% of that of pure CO₂ under the same conditions. The five times absorption and regeneration cycle experiments of two kinds of ionic liquids were carried out at 70 °C. The results show that the absorption properties of the two ionic liquids are basically stable in five experiments, and the regeneration times have little effect on the CO₂ absorption capacity of the two ionic liquids.

Key words: ionic liquid; CO₂ absorption; tail gas of cement kiln; carbon capture

收稿日期: 2020-08-06; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080612

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601504)

作者简介: 闫全英(1970—), 女, 河北宣化人, 副教授, 博士, 主要从事相变材料储能、地板辐射供暖、热泵余热利用等方面的研究。E-mail: yanquanying@bucea.edu.cn。通讯作者: 潘利生(1982—), 男, 副研究员, 主要从事低品位余热高效回收利用关键技术研究。E-mail: panlisheng@imech.ac.cn

引用格式: 闫全英, 吕一帆, 潘利生, 等. 2 种离子液体对水泥窑窑尾烟气 CO₂ 吸收特性试验研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(5): 147-152.

YAN Quanying, LYU Yifan, PAN Lisheng, et al. Experimental investigation on the absorption characteristics of two ionic liquids for CO₂ in cement kiln tail gas[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 147-152.



移动阅读

0 引言

2019年我国能源消耗总量达486 000万t标准煤,比2018年增长4.7%^[1]。工业领域能源消耗巨大,2017年占全国能源消耗总量的66%^[2]。工业生产同步排放大量CO₂,水泥行业的熟料生产工艺排放的CO₂占全年人为CO₂排放总量的11.7%^[3]。水泥窑窑尾烟气中,CO₂最高占比可达33%左右^[4]。因此,水泥窑窑尾烟气的CO₂捕集是工业领域碳减排的重要组成部分。

目前,CCS(Carbon capture and storage)技术在大规模减少CO₂排放方面具有较大潜力,CO₂捕集是关键环节之一^[5]。CO₂捕集可分为3种:燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧技术^[6-7]。燃烧前捕集主要针对天然气联合循环(NGCC)和综合气化联合循环(IGCC)电站,将燃料转化成H₂和CO₂再进行分离^[8];燃烧后捕集适用于水泥厂、火电厂等,对已建电站无需大范围改动,可在短期内有效降低CO₂排放^[9];富氧燃烧技术通过使用高浓度氧气参与燃烧获得高浓度CO₂,但对已建电厂改造困难^[10]。水泥窑窑尾烟气适合使用燃烧后捕集方式。常用的燃烧后捕集CO₂方法主要有膜分离法、吸附分离法、低温分离法和吸收分离法^[11]。本文研究的水泥窑窑尾烟气具有CO₂浓度较高、分压较低的特点。对于吸收分离方法,常用的化学吸收法包括氨水吸收法、有机胺溶液吸收法、离子液体吸收法等,其中胺基吸收法被认为最具商业应用价值^[12]。但烷醇胺吸收CO₂后会产生较强的腐蚀性,影响设备的安全运行,降低系统的使用寿命^[13]。氨水吸收法虽不存在腐蚀设备问题,但氨逃逸问题较严重^[14]。由有机阳离子和阴离子组成的离子液体具有低熔点、高稳定性、溶解性能可调节、不易挥发、可再生等优点^[15-17],在众多领域中具有应用潜力。Hospital-Benito等^[18]通过分析6种离子液体的CO₂吸收性能验证了离子液体捕集CO₂的可行性。Lyu等^[19]研究了氨基功能化离子液体双相溶剂[TETAH][Lys]乙醇水溶液的CO₂捕集性能,研究表明该离子液体双相溶剂吸收CO₂性能高效,且需要的能量较低。Liu等^[20]为降低再生能耗和黏度,提出了一种新型功能化离子液体[TEPAH][2-MI],与有机溶剂混合来捕集CO₂,通过试验得出其CO₂吸收性能较好,且经过5次再生循环效率稳定。

前人研究常用纯CO₂测试离子液体对CO₂的吸收性能,但实际工程应用时需处理的气体为混合烟

气,其中的N₂、H₂S、CH₄等都可能对离子液体的CO₂吸收性能产生影响。Wu等^[21]指出,烟气中的SO₂会明显降低离子液体对CO₂的吸收性能,因为SO₂更易与离子液体的活性中心发生反应。因此,在考察离子液体对CO₂的捕集性能时,还需重点分析混合烟气中其他组分对CO₂吸收性能的影响规律。Akhmetshina等^[22]测定了离子液体二元混合物在不同分压和温度下对H₂S和CO₂的溶解度,研究表明基于2-羟乙基铵阳离子的离子液体对H₂S吸收性能较高。Shaahmadi等^[23]测定了在[Bmim][Ac]、[Bmim][BF₄]及其二元混合物中CO₂和CH₄混合物的溶解度和选择性,结果表明,在CO₂/CH₄=25/75(摩尔比)时,离子液体可达到最高S_{CO₂/CH₄}值。Handy等^[24]研究了H₂S在离子液体[BMIM][Br]中的溶解度和选择性吸收,证明[BMIM][Br]具有可脱除CO₂/H₂S混合物中H₂S的潜在能力。Jalili等^[25]测定了CO₂、H₂S和两者组成的混合气体在离子液体[C_nmim][Tf₂N]中的溶解度,结果表明在离子液体中H₂S的溶解度是CO₂的2倍左右,且H₂S在[C_nmim][Tf₂N]中的溶解度随碳原子数n的增加而增大。本文以[M₄Gu]Ac(四甲基胍醋酸盐)和[TMG][Lac](四甲基胍乳酸盐)为研究对象,分别考察其在30、50、70℃下对纯CO₂和水泥窑窑尾模拟烟气中CO₂的吸收特性,并对2种离子液体进行多次吸收和再生循环,研究离子液体重复使用次数对CO₂吸收性能的影响。

1 试验

1.1 试验系统

试验系统由真空干燥箱、滑片式真空泵、油浴锅、试管、CO₂气瓶、O₂气瓶、N₂气瓶、气体质量流量控制器和分析天平构成,如图1所示。试验中使用的离子液体为纯度≥98%的[M₄Gu]Ac(四甲基胍醋酸盐)和纯度≥98%的[TMG][Lac](四甲基胍乳酸盐)。试验仪器的具体规格参数和用途见表1。

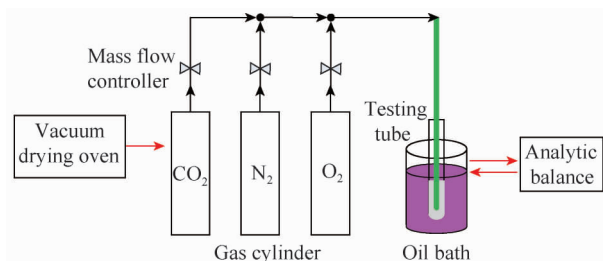


图1 离子液体吸收CO₂试验系统

Fig.1 Experimental system for CO₂ absorption by ionic liquids

表 1 仪器参数和用途
Table 1 Instrument parameters and usage

仪器	参数	用途
真空干燥箱	型号: DZF-6050 控温范围: (室温+10) ~ 250 °C 温度分辨率: 0.1 °C 温度波动率: ±1 °C 真空度: <133 Pa 工作环境温度: 5~40 °C	试验前去除离子液体中的 CO ₂ 和水
滑片式真空泵	型号: TWX 最大流量: 60 L/min 极限真空度: 2 Pa	对真空干燥箱抽真空
油浴锅	最高温度: 300 °C 精度: ±1.0 °C	控制离子液体吸收和解吸 CO ₂ 的工作温度
气瓶	纯度为 99.99% 的 CO ₂ 、O ₂ 和 N ₂	为试验研究提供纯度为 99.99% 的 CO ₂ 、O ₂ 和 N ₂
气体质量流量控制器	型号: CS200A 精度: ±0.35% F.S. 工作温度范围: 5~45 °C 耐压: 3 MPa	调节和控制模拟烟气中 CO ₂ 、O ₂ 和 N ₂ 的组成比例
分析天平	型号: FR224CN 最大称量: 220 g 分度值: 0.000 1 g 典型稳定时间: 4 s	测量离子液体质量

1.2 试验方法

采用真空干燥箱对离子液体进行真空干燥, 去除离子液体中可能含有的 CO₂ 和水分。在常压条件下(101.3 kPa), 将盛有 1.0 g 离子液体的试管置于 30 °C 油浴锅中, 纯 CO₂ 以匀速通过离子液体, 经一段时间后取出试管, 停止纯 CO₂ 通入, 待试管中离子液体平稳后, 用分析天平测量离子液体质量后, 将试管放回油浴锅内, 继续通入纯 CO₂ 进行试验, 重复多次, 记录离子液体的质量变化规律。调节油浴锅温度 50、70 °C, 同样方法测量离子液体对 CO₂ 的吸收特性。

由于混合气体组分对离子液体的 CO₂ 吸收性能具有较大影响, 为提高测试精度, 在模拟烟气中 CO₂ 吸收特性试验中, 采用 4.0 g 离子液体, 并使模拟烟气以 100 mL/min 的平均速度通过离子液体。模拟烟气由 3 个气瓶提供的高纯度气体混合而成, 并通过气体质量流量控制器对 3 种气体比例进行调节和控制。模拟烟气中 CO₂/O₂/N₂ = 0.337/0.045/0.618。

在离子液体多次吸收和再生循环试验中, 离子液体吸收 CO₂ 达到饱和时, 将纯 N₂ 通入离子液体, 降低离子液体中 CO₂ 分压, 使 CO₂ 从离子液体中排出, 此时离子液体发生 CO₂ 解吸反应。离子液体中的 CO₂ 被全部排出后, 离子液体完成再生, 再次进行 CO₂ 吸收试验。

根据试验中测得的离子液体质量, 离子液体对 CO₂ 的吸收量由式(1) 计算。

$$q_{\text{abs-des}} = \frac{m(\text{CO}_2)/M(\text{CO}_2)}{m_{\text{IL}}/M_{\text{IL}}}, \quad (1)$$

式中 $q_{\text{abs-des}}$ 为离子液体对 CO₂ 的吸收量或解吸收量, mol/mol (CO₂/IL); $m(\text{CO}_2)$ 为吸收或解吸收 CO₂ 的质量, g; $M(\text{CO}_2)$ 为 CO₂ 摩尔质量, g/mol; m_{IL} 为离子液体质量, g; M_{IL} 为离子液体摩尔质量, g/mol。

2 结果和讨论

2.1 工作温度的影响

工作温度对离子液体吸收 CO₂ 特性具有重要影响, 在常压条件下, 考察了离子液体 [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 在 30、50 和 70 °C 对纯 CO₂ 的捕集效果, 如图 2 所示。在相同工作温度下, 2 种离子液体对 CO₂ 的吸收量随时间的延长呈增加趋势, 且增加速率逐步减小, 吸收量最终稳定在极大值, 即为离子液体在该工作温度下的 CO₂ 最大吸收量。工作温度为 30 °C 时, 离子液体 [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 在 160 min 后基本达到饱和, 最大吸收量分别为 0.148 和 0.134 mol/mol (CO₂/IL); 50 °C 时, [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 需 18 min 左右达到饱和状态, 最大吸收量分别为 0.120 和 0.109 mol/mol (CO₂/IL); 70 °C

时, $[M_4Gu]Ac$ 和 $[TMG][Lac]$ 仅用 6 min 左右即达到饱和状态, 最大吸收量分别为 0.073 和 0.056 mol/mol(CO_2/IL)。可以看出, 在相同工况下, $[M_4Gu]Ac$ 对 CO_2 的最大吸收量始终大于 $[TMG][Lac]$, 表明 $[M_4Gu]Ac$ 对纯 CO_2 的吸收能力强于 $[TMG][Lac]$ 。

工作温度对 $[M_4Gu]Ac$ 和 $[TMG][Lac]$ 的 CO_2 吸收能力具有较大影响, 比较图 2 可以得出 2 种离子液体对 CO_2 的最大吸收量随工作温度的升高呈下

降趋势, 70 °C 时 $[M_4Gu]Ac$ 和 $[TMG][Lac]$ 的最大吸收量最小, 仅为 2 种离子液体在 30 °C 时最大吸收量的 49.3% 和 41.7%、50 °C 时最大吸收量的 60.8% 和 51.4%。因为随着温度升高, 离子液体的黏度和表面张力等逐渐减小, 增加了离子液体的活化能, 导致其分子间作用力减少, 从而降低了离子液体对 CO_2 的吸收量。同时, 随着温度升高, CO_2 的最大吸收量减少, 吸收能力降低, 离子液体更易达到饱和状态, 所以达到饱和需要的时间变短。

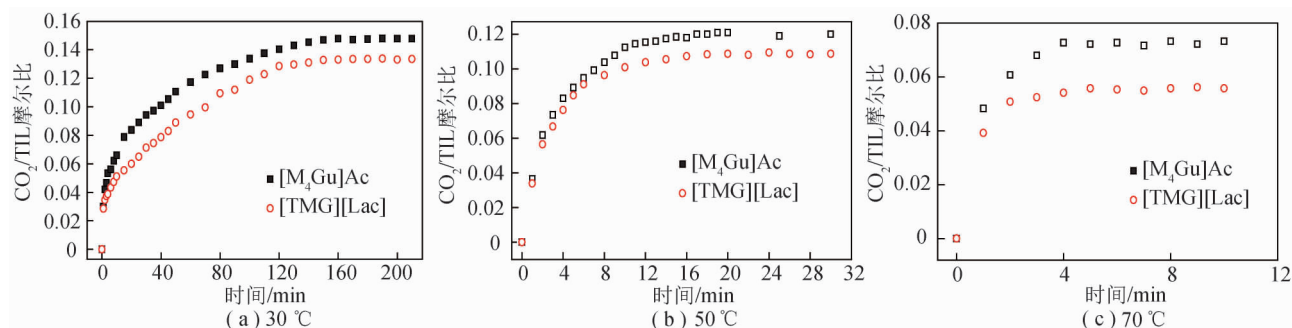


图2 常压条件下 $[M_4Gu]Ac$ 和 $[TMG][Lac]$ 对 CO_2 吸收特性

Fig.2 CO_2 absorption characteristics of $[M_4Gu]Ac$ and $[TMG][Lac]$ under normal pressure

2.2 再生次数的影响

离子液体吸收 CO_2 达到饱和时, 将纯 N_2 通入离子液体, 降低离子液体中 CO_2 分压, 使 CO_2 逐渐逸出。若将纯 N_2 持续通入, 离子液体中 CO_2 含量会持续降至 0, 此时离子液体完成再生, 再次用于 CO_2 吸收。通过离子液体 $[M_4Gu]Ac$ 和 $[TMG][Lac]$ 在常压、70 °C 条件下重复吸收和解吸试验, 考察再生次数对离子液体最大吸收量的影响, 如图 3 所示。2 种离子液体 $[M_4Gu]Ac$ 、 $[TMG][Lac]$ 在 5 次的吸收和解吸过程中, CO_2 在离子液体中的溶解量随时间的变化趋势完全相同, $[M_4Gu]Ac$ 的 5 次吸收极大值分别为 0.072 7、0.071 6、0.072 7、0.072 7 和 0.072 8 mol/mol(CO_2/IL), $[TMG][Lac]$ 的 5 次吸收极大值分别为 0.055 7、0.058 3、0.057 8、0.057 4 和 0.057 4 mol/mol(CO_2/IL), 可见最大吸收量基本保持不变, 表明离子液体重复使用对吸收速率、最大吸收量、解吸速率等几乎无影响。

2.3 水泥窑窑尾模拟烟气的影响

混合气体中的其他成分会降低混合气体和离子液体内的 CO_2 分压, 从而制造更有利于 CO_2 解吸的环境。在常压条件下, 采用转炉模拟烟气, 分别考察 2 种离子液体 $[M_4Gu]Ac$ 和 $[TMG][Lac]$ 在 30、50、70 °C 对模拟烟气中 CO_2 的吸收性能(图 4), 间接反映了混合气体组分对 CO_2 吸收性能的影响。

由图 4 可知, 2 种离子液体对模拟烟气中 CO_2

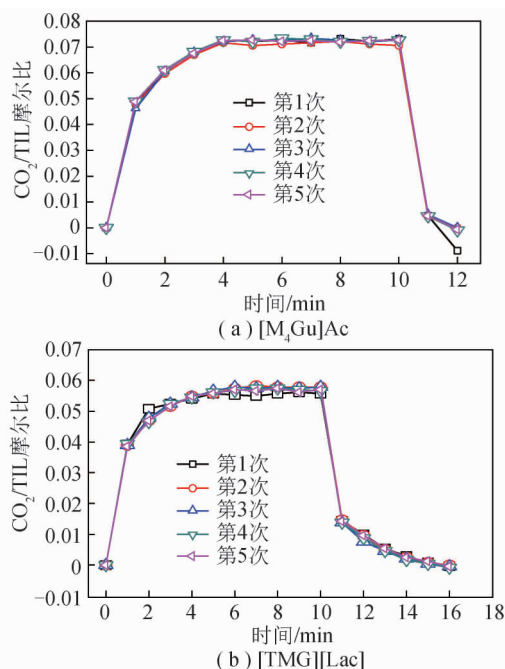


图3 离子液体在 70 °C 下重复吸收/解吸收 CO_2 特性

Fig.3 Repeated CO_2 absorption/desorption characteristics of ionic liquids at 70 °C

的吸收性能远低于其对纯 CO_2 的吸收性能。工作温度为 30 °C 时, $[M_4Gu]Ac$ 、 $[TMG][Lac]$ 对模拟烟气中 CO_2 的最大吸收量仅为 0.033、0.028 mol/mol(CO_2/IL) 相当于其对纯 CO_2 最大吸收量的 22.3% 和 20.9%; 50 °C 时, $[M_4Gu]Ac$ 、 $[TMG][Lac]$ 对模拟烟气中 CO_2 的最大吸收量为 0.008、0.014 mol/mol

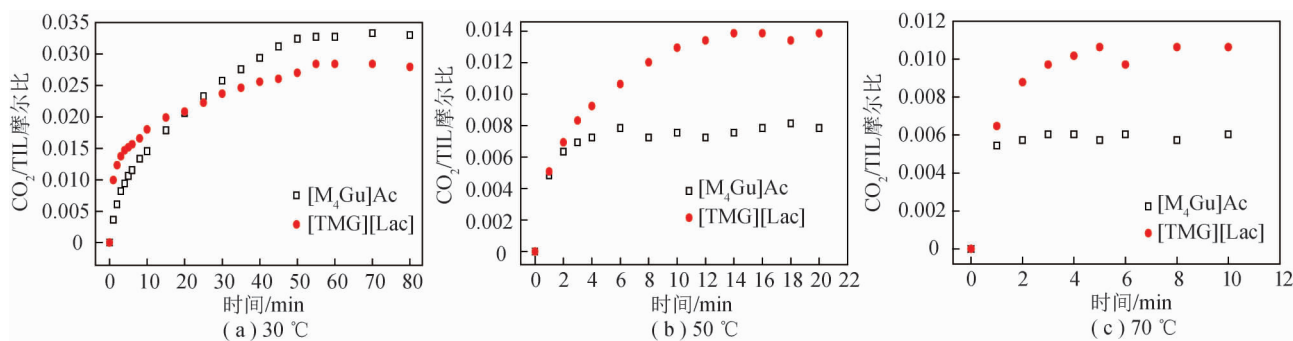


图 4 常压条件下 [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 对水泥窑窑尾烟气中 CO₂ 吸收特性

Fig.4 Absorption characteristics of [M₄Gu]Ac and [TMG][Lac] for CO₂ in tail gas of cement rotary kiln under normal pressure

(CO₂/IL) ,约为其对纯 CO₂ 最大吸收量的 6.7% 和 12.8%; 70 °C 时, [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 对模拟烟气中 CO₂ 的最大吸收量为 0.006 和 0.011 mol/mol (CO₂/IL) ,约为其对纯 CO₂ 最大吸收量的 8.2% 和 19.6%。图 4(a) 中, 2 种离子液体的 CO₂ 吸收量曲线相交, 说明该工况下, 开始阶段 [TMG][Lac] 对模拟烟气中 CO₂ 的吸收速率较大, 但后期 [M₄Gu]Ac 对模拟烟气中 CO₂ 的吸收速率较大, 达到饱和时, [M₄Gu]Ac 的 CO₂ 最大吸收量高于 [TMG][Lac]。在 50、70 °C 下, 2 种离子液体对模拟烟气中 CO₂ 的吸收量曲线没有明显交叉点, 说明 [TMG][Lac] 对模拟烟气中 CO₂ 的吸收速率始终大于 [M₄Gu]Ac, 达到饱和时, [TMG][Lac] 的 CO₂ 最大吸收量高于 [M₄Gu]Ac 的最大吸收量, 与 30 °C 时的结论相反。

综上, [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 对水泥窑窑尾模拟烟气(混合气体)中 CO₂ 的吸收性能远劣于其对纯 CO₂ 的吸收性能。

3 结 论

1) 在定压、定温条件下, 离子液体的 CO₂ 吸收量随着时间的延长逐步增大, 且增速不断降低, 最终达到 CO₂ 吸收量的极大值。在定压、变温条件下, 2 种离子液体的 CO₂ 最大吸收量随温度的升高大幅下降。70 °C 时, [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 的最大吸收量仅为 2 种离子液体在 30 °C 时最大吸收量的 49.3% 和 41.7%, 50 °C 时最大吸收量的 60.8% 和 51.4%。

2) 在 5 个吸收和再生循环试验中, 离子液体 [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 的 CO₂ 最大吸收量近似相等, 吸收性能基本维持稳定, 吸收和解吸次数对考察离子液体的 CO₂ 吸收性能影响不大。

3) [M₄Gu]Ac 和 [TMG][Lac] 对水泥窑窑尾模拟烟气(混合气体)中 CO₂ 的吸收性能远劣于其对纯 CO₂ 的吸收性能。对于纯 CO₂ 吸收, 离子液体 [M₄Gu]Ac 的吸收性能略优于 [TMG][Lac]; 对于

水泥窑窑尾模拟烟气中 CO₂ 的吸收, 30 °C 时, [M₄Gu]Ac 的吸收性能优于 [TMG][Lac], 50、70 °C 下, [M₄Gu]Ac 的吸收性能劣于 [TMG][Lac]。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [J]. 北京: 中国统计出版社, 2019. State Statistical Bureau. China statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 [J]. 北京: 中国统计出版社, 2017. State Statistical Bureau. China statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [3] 高长明. 水泥工业低碳转型刻不容缓 [J]. 新世纪水泥导报, 2019(6): 1-4. GAO Changming. No time to delay for low carbon transformation of cement industry to the world especially China [J]. Cement Guide for New Epoch, 2019(6): 1-4.
- [4] ALI M B, SAIDUR R, HOSSAIN M S. A review on emission analysis in cement industries [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2252-2261.
- [5] 步学朋. 二氧化碳捕集技术及应用分析 [J]. 洁净煤技术, 2014, 20(5): 9-13. BU Xupeng. CO₂ capture technologies and application [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 9-13.
- [6] 池渊. CO₂ 捕集与封存中气体吸附特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018. CHI Yuan. Study on gas adsorption characteristics in CO₂ capture and storage abstract [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [7] 余景文. 氨水溶液脱除燃煤电站烟气中二氧化碳能耗研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016. YU Jingwen. Study on energy requirement for CO₂ capture with aqueous ammonia solution [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [8] JANSSEN D, GAZZANI M, MANZOLINI G, et al. Pre-combustion CO₂ capture [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40: 167-187.
- [9] 杨楠. 改良氨法捕集烟气中 CO₂ 技术的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015. YANG Nan. Post-combustion capture of CO₂ using advanced aqueous ammonia. Beijing: China University of Mining & Technology, 2015.

- (Beijing) 2015.
- [10] STADLER H ,CHRIST D ,HABERMEHL M ,et al. Experimental investigation of NO_x emissions in oxycoal combustion [J]. *Fuel* 2011 , 90: 1604–1611.
- [11] 周小斌. 新型两相胺吸收剂捕集二氧化碳研究 [D]. 厦门: 华侨大学 2019.
ZHOU Xiaobin. Study on carbon dioxide capture using a novel biphasic solvent [D]. Xiamen: Huaqiao University 2019.
- [12] WANG Y M ,CHEN Y S. Capture of CO_2 by highly concentrated alkanolamine solutions in a rotating packed bed [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2019 ,38(6) : 115–122.
- [13] 冯绪文 ,郭兴蓬. 烷醇胺水溶液的 CO_2 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 CO_2 absorption mechanisms and corrosion behavior of alkanolamine solutions [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection* 2003 23(2) : 79–83.
- [14] 吴彬 ,黄坤荣 ,刘子健. 化学吸收法捕集二氧化碳研究进展 [J]. *广州化工* ,2017 ,45(11) : 11–13.
WU Bin ,HUANG Kunrong ,LIU Zijian. Research progress on carbon dioxide capture by chemical absorption [J]. *Guangzhou Chemical Industry* 2017 ,45(11) : 11–13.
- [15] 袁晓亮 ,张延强 ,兰玲 ,等. 离子液体固定 CO_2 及其转化利用的研究进展 [J]. *过程工程学报* 2008 ,8(2) : 409–416.
YUAN Xiaoliang ,ZHANG Yanqiang ,LAN Ling ,et al. Research progress in fixation and transformation of CO_2 using ionic liquids [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering* ,2008 ,8(2) : 409–416.
- [16] 王斌 ,周瀚成 ,郭新风. 离子液体固定和转化 CO_2 研究 [J]. *化工设计通讯* 2018 ,44(12) : 151–152.
WANG Bin ,ZHOU Hancheng ,GUO Xinfeng. Study on ionic liquid fixation and conversion of CO_2 [J]. *Chemical Engineering Design Communications* 2018 ,44(12) : 151–152.
- [17] MAKINO T ,KANAKUBO M. CO_2 absorption property of ionic liquid and CO_2 permselectivity for ionic liquid membrane [J]. *Journal of the Japan Petroleum Institute* 2016 ,59(4) : 109–117.
- [18] HOSPITAL – BENITO D ,LEMUS J ,MOYA C ,et al. Process analysis overview of ionic liquids on CO_2 chemical capture [J]. *Chemical Engineering Journal* ,2020 ,390: 124509.
- [19] LYU B ,HUANG Q ,ZHOU Z ,et al. Novel biphasic amino-functionalized ionic liquid solvent for CO_2 capture: Kinetics and re-generation heat duty [J]. *Environmental Science and Pollution Research* 2020 ,27: 26965–26973.
- [20] LIU F ,SHEN Y ,SHEN L ,et al. A novel amino functionalized ionic liquid/ organic solvent with low viscosity for CO_2 capture [J]. *Environmental Science & Technology* ,2020 ,54 (6) : 3520–3529.
- [21] WU G ,LIU Y ,LIU G ,et al. The CO_2 absorption in flue gas using mixed ionic liquids [J]. *Molecules* 2020 25(5) : 1034.
- [22] AKHMETSHINA A I ,PETUKHOV A N ,VOROTYNTSEV A V , et al. Absorption behavior of acid gases in protic ionic liquid/ alkanolamine binary mixtures [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2017 ,5(4) : 3429–3437.
- [23] SHAAHMADI F ,SHAHRABI B H ,FARHADI A. The CO_2 / CH_4 gas mixture solubility in ionic liquids [Bmim] [Ac] , [Bmim] [BF₄] and their binary mixtures [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics* 2020 ,141: 105922.
- [24] HANDY H ,SANTOSO A ,WIDODO A ,et al. $\text{H}_2\text{S} - \text{CO}_2$ separation using room temperature ionic liquid [BMIM] [Br] [J]. *Separation Science and Technology* ,2014 ,49 (13) : 2079–2084.
- [25] JALILI A H ,SAFAVI M ,GHOTBI C ,et al. Solubility of CO_2 , H_2S and their mixture in the ionic liquid 1-Octyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethyl) sulfonylimide [J]. *Journal of Physical Chemistry B* 2012 ,116: 2758–2774.