

固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.201805010 中图分类号 X756 文献标识码 A
南相莉, 李风华, 胡恩柱. 基于超声波机械搅拌耦合作用下赤泥对二氧化碳的固化封存 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2973-2979.
NAN Xiangli, LI Fenghua, HU Enzhu. CO₂ sequestration by red mud under coupling effect of ultrasonic wave and mechanical agitation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(10): 2973-2979.

基于超声波机械搅拌耦合作用下赤泥对二氧化碳的固化封存

南相莉, 李风华, 胡恩柱 *

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

第一作者: 南相莉 (1979—), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 工业固体废弃物综合利用。E-mail: nanxl@smm.neu.edu.cn
* 通信作者, E-mail: huez@smm.neu.edu.cn

摘 要 以拜耳法赤泥为二氧化碳 (CO₂) 固化剂, 提出了基于超声波机械搅拌耦合作用下赤泥吸收二氧化碳的新思路, 以期实现“以废治废”、行业气固两类废弃物得到高效综合利用的目标。以拜耳赤泥吸收低浓度二氧化硫的前期研究为基础, 自行设计了超声波与机械搅拌耦合作用的鼓泡反应器, 利用其“空化作用”与机械搅拌的耦合作用促进赤泥对低浓度二氧化碳的高效吸收。考察了在焙烧条件、温度、搅拌桨转速、液固比、气体流量、超声波功率对赤泥吸收二氧化碳的影响规律, 得到最优条件, 焙烧后可以大大提高赤泥对 CO₂ 的固定能力, 单独机械搅拌作用下, 赤泥吸收 CO₂ 适宜的条件为: 反应温度 25 ℃、气体流量 0.025 m³·h⁻¹、液固比为 6:1 和搅拌转速 150 r·min⁻¹, 此时最大固碳量为 71.72 g·kg⁻¹, 加入超声波后固碳效果进一步提高, 最佳超声波功率为 600 W。
关键词 赤泥; 二氧化碳; 超声波; 耦合作用

全球经济的持续发展以及能源消费的快速增长导致了二氧化碳 (CO₂) 排放量的急剧增加, 过多的 CO₂ 废气引起了气候变暖, 严重影响了地球环境^[1]。近年来, 全球气候变暖的趋势进一步加剧, 因此, 减少 CO₂ 的排放就显得非常重要, 已逐渐成为国际社会高度关注的热点之一^[2]。目前, 针对 CO₂ 减排问题, 主要有 3 种解决方案: 1) 提高利用效率和转换率; 2) 采用替代燃料, 大力发展可再生能源和新能源; 3) CO₂ 的回收和封存^[3]。CO₂ 的封存被认为是 CO₂ 的减排过程中最关键的环节。封存的方法包括地质封存、海洋储存、生物固碳、物理化学吸收、膜分离等, 目前可利用的方法包括物理化学湿法淋洗吸收、低温蒸馏、矿物碳酸化固定等^[4]。矿物碳酸化封存 CO₂ 是矿物中的 Ca、Mg 等成分与 CO₂ 发生反应形成稳定的金属碳酸盐, 具有风险小、成本低, 可实现 CO₂ 永久固化等优势^[5]。矿物种类包括土壤、钢渣、飞灰、赤泥等^[6-7]。

赤泥是制铝工业提取氧化铝时排出的污染性废渣, 是一种碱性污染源, 赤泥 pH=10.3~11.8, 加水后的赤泥浆 pH=12.1~13.0^[8]。其矿物组成及化学成分较为复杂, 主要成分为 SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、TiO₂ 和 K₂O 等。由于赤泥结合的化学碱含量高且较难脱除, 又含有氟、铝及其他多种杂质, 对于赤泥的无害化利用一直难以进行^[9]。近年来, 我国各地氧化铝产业急速发展, 每年产生的赤泥为 3 000 万 t 以上。我国累计赤泥堆积量已达几亿 t, 为世界之最。目前, 赤泥的利用率最高可达 15% 左右, 而我国利用率远低于这个水平^[10-11]。

大量的赤泥不能充分有效的利用,只能依靠大面积的堆场堆放,占用了大量土地、耗费堆场建设和维护费用,同时,堆存赤泥不仅会造成地下水和土壤污染,而且由于其粒度极细,会随风飞扬,造成空气污染等,也对环境造成了严重污染^[12]。最大限度地限制赤泥污染、多渠道地利用赤泥,已迫在眉睫^[13]。本研究以工业排放的碱性矿渣——拜耳法赤泥为原料,利用超声波技术的空化作用以及其空化伴随着机械效应、热效应、化学效应等与机械搅拌耦合作用^[14],分析赤泥对 CO₂ 的固化封存能力,探索了赤泥焙烧条件、反应温度、液固比、搅拌转速、CO₂ 气流量、超声波功率对赤泥矿浆吸收二氧化碳吸收率的影响。利用赤泥固化 CO₂,既解决了赤泥碱性污染的问题,又对 CO₂ 进行了封存,减缓了温室效应,超声波的介入强化了反应体系的气-液-固吸收过程,可获得更好的反应及高效节能效果,达到“以废治废”废弃物综合利用的目的。

1 实验部分

1.1 实验原料和试剂

赤泥取自河南郑州铝厂,在堆场中随机取样,均匀混合后于 105 ℃ 烘干至恒重,使用陶瓷研钵磨细,过 200 目筛至 74 μm 以下备用。其物相成分如图 1 所示。实验中所用的 CO₂ 为钢瓶气体,纯度大于 99.6%,实验用水为蒸馏水。所用的实验设备如图 2 所示。

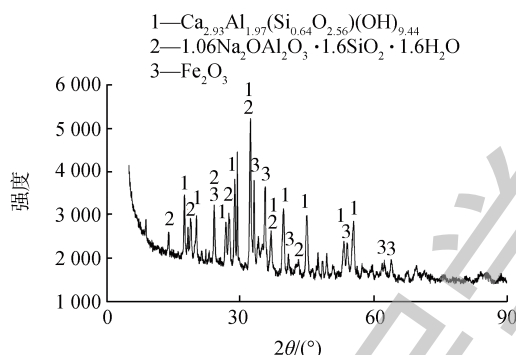


图 1 中铝河南铝业有限公司拜耳法赤泥的物相组成

Fig. 1 Phase composition of Bayer red mud from Chinalco Henan Aluminum Fabrication Co. Ltd.

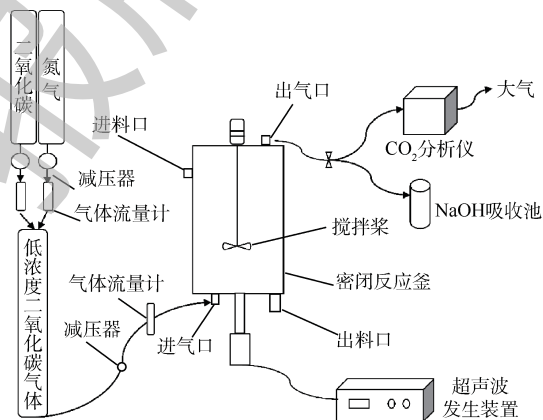


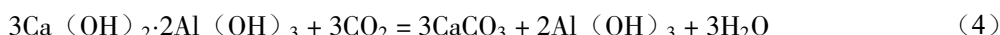
图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equipment devices

1.2 实验原理和方法

1.2.1 实验原理

CO₂ 属于酸性气体,溶于赤泥浆液,与赤泥中的碱性组分、钙离子等发生反应形成碳酸盐矿物(式(1)~式(4)),起到固化封存 CO₂ 的作用。同时 CO₂ 溶于浆液可降低赤泥的 pH,形成中性赤泥,减少赤泥堆存过程对环境的危害^[15-16]。



1.2.2 实验方法

本工作基于以往实验研究^[17-19],赤泥固化 CO₂ 的反应在自制密闭的空心式鼓泡反应器中进行。密闭反应釜所用材质为不锈钢 316L (壁厚 8 mm),反应釜体积 V 为 5 L,反应釜的筒体高度 H 为

0.45 m, 搅拌反应釜的标准直径 D_i 为 0.14 m。搅拌桨采用六斜叶 45° 开启涡轮式桨。搅拌桨直径 d 为 0.055 7 m, 叶片宽度 b 为 0.011 1 m, 桨径与槽径比约为 3:1。超声波发生器探头置于釜底中心, 频率为 20 kHz, 功率在 0~1 000 W 可调。

将赤泥和蒸馏水按一定液固比加入反应釜中, 在温控器上调节所需温度, 通入 CO_2 气体, 搅拌恒定, 进行 CO_2 的固化反应, 直至反应体系 pH 趋于中性并稳定后取出试样, 静置于容器内沉淀至上清液澄清, 分离上清液并抽滤固化后赤泥, 转至 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重。赤泥的固碳量采用式 (5) 计算。

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{M_2 M_{\text{渣}} - M_1 M_{\text{原}}}{M_{\text{渣}}}$$

(5)

式中: M_{CO_2} 为每千克赤泥的固碳量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; $M_{\text{渣}}$ 为固化后赤泥重量, kg; $M_{\text{原}}$ 为固化前赤泥质量, kg; M_2 为固化后赤泥及上清液中含碳量, %; M_1 为固化前原料赤泥的含碳量, %。

考察赤泥焙烧条件、温度 (25、35、45、55、65 $^\circ\text{C}$)、 CO_2 气体流量 (0.025、0.050、0.075、0.100、0.150 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)、液固比 (3:1、5:1、6:1、8:1、10:1、12:1)、搅拌转速 (100、150、200、250 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 及超声波功率 (300、400、500、600、700 W) 等因素对赤泥固化 CO_2 效率的影响。

实验过程中赤泥浆液 pH 采用酸度计 (E-201-C 型) 测定。采用 ARL Optima'X 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF, 瑞士 SID-Elementa 生产) 测量赤泥化学成分的含量; 采用 XD-3 型 X 射线衍射仪 (XRD, 日本 Shimadzu 生产) 测定赤泥固 CO_2 前后矿物相的变化; 采用傅里叶变换红外光谱仪 (IR Prestige-21, 日本岛津) 测定反应过程形成的碳酸盐。

2 结果与讨论

2.1 焙烧对赤泥固碳效果的影响

将拜耳法赤泥粉碎研磨至 $74\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 温度焙烧 5 h 后, 研究其对 CO_2 的吸收效果^[20-21]。原矿赤泥与焙烧后赤泥吸收 CO_2 的效果 (以固碳量计, 固碳量为单位质量赤泥固定 CO_2 的质量, 单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 如表 1 所示。相对于原矿赤泥, 焙烧赤泥对 CO_2 的固定能力大大提高。因此, 以下实验均采用焙烧赤泥进行研究。

表 1 原矿赤泥与焙烧赤泥吸收 CO_2 的对比

Table 1 Comparison of CO_2 absorption between original red mud and roasted red mud

赤泥类型	反应条件	通气时间/min	总反应时间/min	固碳量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
原矿赤泥	液固比 (5:1)	80	180	19.78
	气体流量 ($0.025\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	80	180	19.78
	搅拌转速 ($200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)	80	180	19.78
	温度 ($25\text{ }^\circ\text{C}$)	80	180	19.78
焙烧赤泥	液固比 (5:1)	80	18	64.09
	气体流量 ($0.025\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	80	18	64.09
	搅拌转速 ($200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)	80	18	64.09
	温度 ($25\text{ }^\circ\text{C}$)	80	18	64.09

2.2 温度对赤泥固碳效果的影响

在液固比 6:1 (300 g 赤泥, 1.8 L 水)、气体流量 $0.025\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 、搅拌转速 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下, 依次考察 25、35、45、55、65 $^\circ\text{C}$ 时, 赤泥的固碳量, 确定最优反应温度。

为了使赤泥中碱性物质能够充分地与 CO_2 气体反应, 本研究采用间歇式通气方式, 即先搅拌 10 min, 然后通气 20 min, 停 30 min, 持续进行。每隔 10 min 测量 1 次体系的 pH, 当体系 pH 接近中性并趋于稳定时视为反应结束, 结果如图 3 (a) 所示。可知, 随着温度的升高, 赤泥固碳量先增加, 后

降低。因为随着反应温度升高，赤泥吸收 CO_2 的反应加快。同时随着反应温度的升高， CO_2 在溶液中的溶解度显著下降。尤其是反应温度过高时， CO_2 溶解度下降越加显著，造成赤泥固碳量显著下降。可见，其最优反应温度为 $45\text{ }^\circ\text{C}$ ，但考虑到温度升高能耗加大，故本实验选择 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 为最优条件。

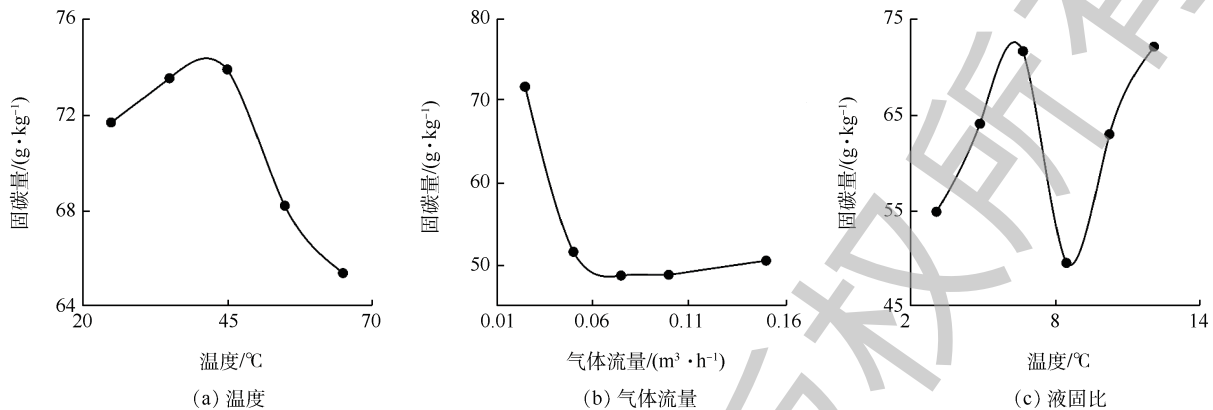


图 3 不同温度、二氧化碳气流量和液固比对赤泥固碳量的影响

Fig. 3 Effect of temperature, gas flow rate and liquid-solid ratio on carbon sequestration by red mud

2.3 气体流量对赤泥固碳效果的影响

在液固比 6:1，搅拌转速 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下，依次考察 CO_2 气体流量为 0.025 、 0.050 、 0.075 、 0.100 和 $0.150\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时赤泥的固碳量，确定最优气体流量，结果如图 3 (b) 所示。结果表明，随着气体流量的增大，单位赤泥固定 CO_2 量逐渐减小，最后在较低的固碳量范围波动。这是因为，气体流量增大可能造成气泡直径增加，减少了气液的接触面积，即降低了 CO_2 气含率，从而降低了气体利用率；同时，气流量增大，单位时间内气泡在反应溶液中停留时间减小，进一步降低了气体利用率。

当通气速度大于溶解速度时，气液界面的气相一侧就会有多余还未溶解的 CO_2 。此时，随着未溶解的 CO_2 的增加，气膜一侧的推动力，即 CO_2 分压增大，减少了气液界面处液膜侧 CO_2 扩散阻力，使更多的 CO_2 更容易进入反应体系中进行碳化反应。但是如果通入量过大，会导致部分 CO_2 气体未进入反应体系就逸出，反而造成了原料的浪费。

2.4 液固比对赤泥固碳效果的影响

在最优气体流量 ($0.025\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)、搅拌转速 ($200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 和反应温度 ($25\text{ }^\circ\text{C}$) 条件下，依次考察液固比为 3:1、5:1、6:1、8:1、10:1、12:1 时赤泥的固碳量，确定最优液固比。控制总反应时间 180 min，通气时间 80 min，结果如图 3 (c) 所示。结果表明，随液固比的增加，单位赤泥固定 CO_2 量先增大后降低，出现一个峰值。随着液固比继续增加，单位赤泥固定 CO_2 量又呈上升趋势。分析原因可知， CO_2 与赤泥中碱的反应，是扩散传质和化学反应综合作用的结果。当液固比较小时，矿浆体系的黏度较大，赤泥中碱的浸出和 CO_2 的传质过程受到限制；随着液固比增大，反应体系的黏度逐渐减小， CO_2 吸收反应阻力显著减小，因此固碳量明显增加。液固比进一步增加时，反应体系水分含量过高，过多的水分充盈于原材料的孔隙内，阻碍 CO_2 分子的扩散，使得反应速率减慢，因此，赤泥固碳量呈下降趋势。随着液固比继续增加，固碳量又呈上升趋势，分析其可能的原因是固体颗粒在大液固比体系中分散得更均匀，因此，与气体接触面积随之增加，同时也促使大量 HCO_3^- 生成，即反应已生成的 CO_3^{2-} 会转变成 HCO_3^- ，使反应体系对 CO_2 的吸收能力进一步增大。在实验数据中，当液固比为 6:1 时，反应后的固体赤泥碳的质量分数为 2.39%，含碳量为 7.57 g；而液固比为 12:1 时，反应后的固体赤泥碳的质量分数为 2.30%，含碳量仅为 7.14 g。综合考虑，本实验认为液固比为 6:1 时的固碳效果更好。

当液固比较小时, 由于固相溶质浓度较大, 占据液相反应主体的大部分空间, 导致气相反应物进入反应体系的难度加大, 影响了气液传质过程; 当液固比较大时, 虽然减小了气液界面液膜侧的阻力、增大了气体向液相的传质, 但由于单位反应体系体积中固相溶质浓度减少, 使得反应速率减慢, 同时较大的液固比也会导致水资源的浪费。

2.5 机械搅拌对赤泥固碳效果的影响

在最优气体流量 ($0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)、最优液固比 ($6:1$) 和温度 (25°C) 条件下, 依次考察搅拌转速为 100 、 150 、 200 、 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 赤泥的固碳量, 确定最优搅拌转速, 实验结果如图 4 (a) 所示。结果表明, 随着搅拌转速的增大, 单位赤泥固定 CO_2 量先增大后降低, 出现一个峰值。这是因为随着转速的增大, 赤泥颗粒在悬浮液中分布逐渐均匀, CO_2 气泡分散效果变好, 提高了气液相接触面积、气泡在液相中的停留时间以及气体传质效果, 从而加速反应进程; 但搅拌转速继续增大时, 会形成离心化漩涡, CO_2 气体在反应体系中的停留时间变短, 使得气体利用率降低。

因此, 在单机械搅拌作用下, 赤泥吸收 CO_2 适宜的条件为: 反应温度 25°C , 气体流量 $0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 液固比为 $6:1$, 搅拌转速 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 最大固碳量为 $71.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.6 超声波对赤泥固碳效果的影响

在最优气体流量 ($0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)、最优液固比 ($6:1$) 和最优搅拌转速 ($150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 条件下, 依次考察超声功率为 300 、 400 、 500 、 600 、 700 W 时, 赤泥的固碳量, 确定最优超声功率, 结果如图 4 (b) 所示。结果表明, 随着超声功率的增大, 单位赤泥固定 CO_2 量先增大后降低。由超声波强化过程传质机理可知, 超声波对反应体系的矿浆化有一定的促进作用, 在一定的黏度范围内, 良好的矿浆化有利于气体的吸收^[22]。此外, 一定功率下超声波产生的超声效应也有利于气体空化, 超声波这种空化作用大大提高非均相反应速率。因此, 在超声功率达到 600 W 时, 超声波对 CO_2 空化作用最大, 但随着超声功率进一步增加, 超声波的乳化作用明显高于低功率时的分散作用, 不利于体系固体颗粒的分散。同时, 由于超声功率过高会导致反应体系温度升高, 使得 CO_2 溶解度随温度升高而减小, 进一步阻碍了体系对 CO_2 吸收。由此可知, 施加超声波可强化赤泥吸收 CO_2 的反应效果, 且随着超声功率的增加, 效果越显著, 当功率达到 600 W 时效果最明显。随着超声功率的继续增大, 赤泥固碳量反而下降, 因此超声功率不能过大。

对比分析可知, 单机械搅拌作用下固碳量为 $71.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 如图 4 所示, 施加 600 W 超声波时赤泥固碳量为 $77.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 施加超声波后单位赤泥固碳量明显增加。

3 结论

1) 相对于原矿赤泥, 焙烧赤泥对 CO_2 的固定能力大大提高, 在单独机械搅拌作用下, 赤泥吸收 CO_2 适宜的条件为: 反应温度 25°C 、气体流量 $0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、液固比 $6:1$ 和搅拌转速 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 此时最大固碳量为 $71.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2) 在机械搅拌的同时, 超声波的介入可以大大改善扩散状况, 使物料在超声波与机械搅拌耦合的作用下, 强化气-液-固吸收过程, 可获得更好的反应及高效节能效果, 最大固碳量提高到 $77.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对应的超声功率为 600 W 。

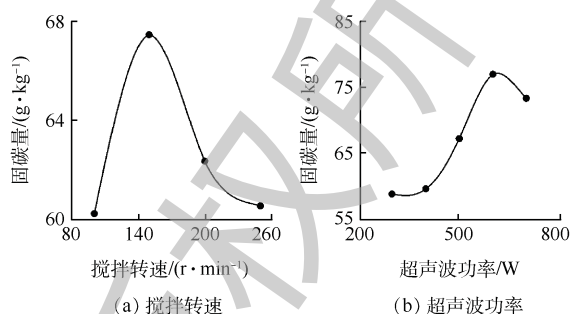


图 4 搅拌转速和超声波功率对赤泥固碳量的影响

Fig. 4 Effect of agitating speed and ultrasonic power on carbon fixation by red mud

参考文献

- [1] ADNAN K, YAVUZ S D. CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: A panel data analysis[J]. *Economic Modelling*, 2015, 33: 97-103. DOI:10.1016/j.econmod.2014.10.022.
- [2] LIANG G J, CHEN W M, NGUY A V, et al. Red mud carbonation using carbon dioxide: Effects of carbonate and calcium ions on goethite surface properties and setting[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 517(3): 230-238. DOI:10.1016/j.jcis.2018.02.006.
- [3] 王海洋, 张建良, 王广伟, 等. 铁前系统的二氧化碳减排技术浅析[J]. *中国冶金*, 2018(1): 1-6.
- [4] WHIT C M, STRAZISAR B R, GRANITE E J, et al. Separation and capture of CO₂ from large stationary sources and sequestration in geological formation-coalbeds and deep saline aquifers[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, 53(6): 645-715. DOI:10.1080/10473289.2003.10466207.
- [5] ENICK R M, BECKMAN E J, SHI A C, et al. Remediation of metal-bearing aqueous waste streams via direct carbonation [J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15(2): 256-262. DOI:10.1021/ef000245x.
- [6] RAMESH C S, RAJ K P L, BANKIM C R. Neutralization of red mud using CO₂ sequestration cycle[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1): 28-34. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.02.052.
- [7] BONENFANT D, KHAROUNE L, SAUVE S, et al. CO₂ sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47: 7610-7616. DOI:10.1021/ie701721j.
- [8] 朱晓波, 李望, 管学茂, 等. 拜耳法赤泥脱碱研究现状[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(9): 2254-2257.
- [9] LI R B, ZHANG T A, LIU Y, et al. Characteristics of red mud slurry flow in carbonation reactor[J]. *Powder Technology*, 2017, 311: 66-76. DOI:10.1016/j.powtec.2016.11.028.
- [10] 南相莉, 张延安, 刘燕, 等. 我国赤泥的综合利用分析[J]. *过程工程学报*, 2010, 10(1): 264-270.
- [11] LIU Q, XIN R R, LI C C, et al. Application of red mud as a basic catalyst for biodiesel production[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(4): 823-829. DOI:10.1016/S1001-0742(12)60067-9.
- [12] 南相莉, 张延安, 刘燕, 等. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J]. *过程工程学报*, 2009, 9(1): 459-464.
- [13] KLAUBER C, GRAEFE M, POWER G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization[J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 108(1/2): 11-32. DOI:10.1016/j.hydromet.2011.02.007.
- [14] 冯若, 姚锦钟, 关立勋. 超声波手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996.
- [15] SUCHITA R, WASEWAR K L, MUKHOPADHYAY J, et al. Neutralization and utilization of red mud for its better waste management [J]. *Archives of Environmental Science*, 2012, 6: 13-33.
- [16] RIVERA R M, OUNOUGHENE G, BORRA C R, et al. Neutralisation of bauxite residue by carbon dioxide prior to acidic leaching for metal recovery[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 112: 92-102. DOI:10.1016/j.mineng.2017.07.011.
- [17] FOIS E, ANTONIO L A, MURA G. Sulfur dioxide absorption in a bubbling reactor with suspensions of Bayer red mud[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 46(21): 6770-6776. DOI:10.1021/ie0616904.
- [18] NAN X L, ZHANG T A. Study on absorption of low-concentration SO₂ with basic slag intensified by ultrasonic wave[J]. *TMS Light Metals*, 2012, 510(1): 219-223. DOI:10.1002/9781118359259.ch39.
- [19] BONENFANT D, KHAROUNE L, HAUSLER R, et al. CO₂ sequestration by aqueous red mud carbonation at ambient pressure and temperature[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(20): 7617-7622. DOI:10.1021/ie7017228.
- [20] 张彦娜, 潘志华. 不同温度下赤泥的物理化学特征分析[J]. *济南大学学报*, 2005, 19(4): 293-297.
- [21] 陈红霞, 孙恒虎, 李化建. 热处理温度对赤泥胶凝活性的影响[J]. *轻金属*, 2006(9): 22-25.
- [22] 曹沁波, 罗斌, 程金华, 等. 一种新型周边辐射超声波的浮选设备: CN205308587U[P]. 2016-06-15.
- (本文责任编辑: 郑晓梅)

CO₂ sequestration by red mud under coupling effect of ultrasonic wave and mechanical agitation

NAN Xiangli, LI Fenghua, HU Enzhu *

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

* Corresponding author, E-mail: huez@smm.neu.edu.cn

Abstract In this study, a new clue of CO₂ absorption by red mud based on the coupling effect of ultrasonic wave and mechanical agitation was proposed, aiming to “treat waste with waste” and efficiently utilize gas-solid industrial wastes. Based on the previous experiments of low concentration SO₂ absorption by Bayer red mud, a bubbling reactor with the coupling effect of ultrasonic wave (or cavitation) and mechanical agitation was designed, which accelerated the low-concentration CO₂ absorption by red mud. The effects of roasting conditions, temperature, rotating speed of stirring paddle, liquid-to-solid ratio, gas flow rate, and ultrasonic power on the CO₂ absorption by red mud were studied. The CO₂ sequestration by red mud could be largely improved at the obtained optimal roasting conditions. Under mechanical agitation alone, the optimal red-mud-based CO₂ absorption conditions were reaction temperature of 25 °C, gas flow rate of 0.025 m³·h⁻¹, liquid-to-solid ratio of 6 : 1, and agitation speed of 150 r·min⁻¹. The corresponding maximum carbon sequestration was 71.72 g·kg⁻¹. As ultrasonic waves was combined with mechanical agitation, the carbon sequestration was further improved, and the optimal ultrasonic power was 600 W.

Key words red mud; carbon dioxide; ultrasonic; coupling effect