

DOI:10.13205/j.hjgc.202505021

赵子宇,刘鑫宇,姜媛媛,等. 常温下气-液-固三相反应中钢渣对CO₂的捕集研究[J]. 环境工程,2025,43(5):192-198.

ZHAO Z Y, LIU X Y, JIANG Y Y, et al. Study on CO₂ capture by steel slag in gas-liquid-solid three-phase reaction at room temperature [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(5): 192-198.

常温下气-液-固三相反应中钢渣对CO₂的捕集研究

赵子宇^{1*} 刘鑫宇¹ 姜媛媛² 吴美璇³ 杨杰⁴ 刘盛余¹ 孙玉馨⁵

(1. 成都信息工程大学 资源环境学院, 成都 610225; 2. 华测认证有限公司, 北京 100020; 3. 成都信息工程大学 大气科学学院, 成都 610225; 4. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650500; 5. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044)

摘要: 为了改善钢渣吸附CO₂工艺高温高耗能的缺点,在钢渣中加入H₂O于常温下进行三相反应,探究三相体系中气体流速、钢渣粒径、固液比对CO₂吸附效率的影响。然后利用XRD、热力学、动力学分析及SEM进行分析,探究其吸附产物生产量。结果表明:液相的加入显著影响了CO₂在常温下的吸附效率,CaCO₃的衍射峰相比两相反应体系明显增强,生成的CaCO₃晶体含量更多,晶型相对较好,碳化度更高。当反应固液比为25 g/L时,随着钢渣比表面积与气体流速的增大,CO₂的吸附效率明显增大。在常温下,当气体流速为250 mL/min、钢渣粒径为200目时,测得其吸附效率达到0.97%,而传统二相反应钢渣捕集CO₂,其温度需达到400~500℃才可达到相同效率。该研究可为钢渣的资源化利用及低能耗捕集CO₂提供新的思路。

关键词: 三相反应; 钢渣; 碳捕集; 常温; 资源化利用

Study on CO₂ capture by steel slag in gas-liquid-solid three-phase reaction at room temperature

ZHAO Ziyu^{1*}, LIU Xinyu¹, JIANG Yuanyuan², WU Meixuan³, YANG Jie⁴, LIU Shengyu¹, SUN Yuxin⁵

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. CTI Certification Co., Ltd., Beijing 100020, China; 3. School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 5. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the context of carbon peaking and carbon neutrality, the development of economical and efficient carbon capture materials has become a critical research field. Steel slag, as a solid waste, has presented considerable potential for carbon capture; however, its application is limited by relatively high external energy consumption. In order to address the shortcomings of high-temperature and high-energy-consumption of CO₂ adsorption by steel slag, water was added into steel slag for a three-phase reaction at room temperature. The effects of gas flow rate, steel slag particle size, and solid-liquid ratio on CO₂ adsorption efficiency in three-phase systems were studied. Then, XRD, thermodynamic, kinetic analysis, and SEM were used to analyze the adsorption product production. The results showed that the addition of a liquid phase significantly affected the adsorption efficiency of CO₂ at room temperature. The diffraction peak of CaCO₃ was significantly enhanced compared to that in the two-phase reaction system, indicating a higher content of generated CaCO₃ crystals, better crystal

收稿日期:2024-01-14; 修改日期:2024-03-12; 接收日期:2024-04-03

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42307525);成都信息工程大学引进人才项目(KYTZ202137);大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室开放课题(KFKT-YB-202203)

*第一作者、通信作者:赵子宇(1992-),男,讲师,主要研究方向为新污染物防控、减污降碳技术开发。zhaozy@cuit.edu.cn

form, and a higher carbonation degree. When the solid-liquid ratio was 25 g/L, the adsorption efficiency of CO₂ increased obviously with the increase of the specific surface area of steel slag and the gas flow rate. At room temperature, when the gas flow rate was 250 mL/min and the steel slag particle size was 200 mesh, the adsorption efficiency was measured to be 0.97%. However, in the traditional two-phase reaction, to achieve the same efficiency, the temperature needed to be as high as 400 to 500 °C. This study provides new ideas for the resource utilization of steel slag and low-energy-consumption CO₂ capture.

Keywords: three-phase reaction; steel slag; carbon capture; room temperature; resource utilization

0 引言

自工业革命开始以来,全球温室气体排放量不断增加,温室效应日益严重。气候变化已成为人类面临的严峻挑战。据统计,CO₂是造成温室效应的主要气体,占全球温室气体总温室气体效应的70%以上,其余为甲烷、N₂O和多种含氟气体。近年来,CO₂排放量的增加加剧了温室效应,导致海平面上升、冰川融化、海洋酸化等一系列问题,引起了人类对生态环境变化的关注。如何有效解决CO₂排放问题成为研究热点^[1-3]。

Zhang等^[4]研究发现,矿物中的钙硅相与CO₂发生反应,矿物碳酸化可以捕集CO₂。工业废弃物钢渣

因具有很强的活性可与CO₂进行碳酸化反应,因此可以作为良好的载体来捕集固化CO₂。

钢渣主要由CaO、SiO₂、Al₂O₃、FeO、Fe₂O₃、MgO、MnO、P₂O₅和游离CaO(f-CaO)、游离MgO(f-MgO)等组成,其中传统钢渣中游离氧化物含量为1%~7%(f-CaO含量一般为1.7%~2.2%)。表1为常见钢渣的主要成分。利用钢渣的主要成分CaO捕集CO₂属于Ca-基捕集CO₂的一种技术。田思聪^[5]研究利用钢渣进行闭环CO₂封存,采用循环冷却水(CRW)循环策略,CO₂封存效率提高了近1倍,同时降低了129%~183%的能源消耗和35.6%的成本,这说明利用Ca-基捕集CO₂经济可行,具有极大的工业应用前景。

表1 钢渣主要成分^[4]

Table 1 Main components of steel slag^[4]

项目	CaO	MgO	SiO ₂	FeO/Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	%
转炉渣	45~55	10	20	20	5	<5	1	
电弧炉氧化渣	30~40	5	20	38	5	<5	1	
电弧炉还原渣	55~60	5	20	<20	>5	<5	1	
美国渣协会统计值	42.9	8.5	~ 15	~ 25	~ 5	~ 5	1	

近年来,Ca-基捕集CO₂技术已取得了突破性进展。针对钢渣中可用于碳酸化固定CO₂的活性钙比例较低这一限制因素,开发出了低醋酸/钢渣投加比例酸浸取技术,实现了钢渣中Ca和Fe的高效分离,并分别以高纯生石灰和富铁矿物的形式回收^[6]。由于高温烧结作用,钙基吸收剂的反应活性随循环次数增加急剧衰减,如何抑制吸收剂的烧结,从而提高吸收剂捕集CO₂反应活性及循环稳定性意义重大。而钙基吸收剂中惰性负载MgO能有效提高吸收剂循环捕集CO₂性能^[7]。传统的CO₂捕集要求在低温下进行操作,降低烟气温度则会增加额外的能耗。部分学者着重研究了高温钙基吸附剂的CO₂吸附过程,发现钙基吸附剂在800 °C下煅烧、650 °C下吸附的效果最好,吸附量为387.9 mg/g。过高的煅烧温度会使吸附剂发生烧结,进而影响吸附CO₂的能力^[8]。

虽然钙基吸附技术已有一定突破,但仍然具有显著缺点。氧化钙吸附剂理论吸附量很大,但从目

前的报道看,其初始吸附量很难达到理论吸附量^[9]。且Ca-基CO₂捕集技术一般需要在600~700 °C的高温下进行反应,能耗较高^[10]。

钢渣碳酸化是利用矿物碳酸化吸收固定CO₂的一种方式,碳酸化后的钢渣结构稳定,可以更好地作为建筑材料或路基材料,从而实现钢渣的可持续利用^[11]。此外,碳酸化是放热反应,钢渣碳酸化消耗的能量很低^[12]。目前主要的研究方向为气-固碳酸化^[13]。在300~500 °C下用粉煤灰直接与CO₂反应1 h,碳酸化度最终达到17%^[14];在常温常压条件下用波兰特水泥制成水泥块直接与CO₂反应长达8个月,最终碳酸化度达到12%^[15];在200~500 °C下用粉煤灰直接与CO₂反应6 h,最终碳酸化度达到13%^[16];在室温和10 atm(1 atm=101325 Pa,下同)的条件下直接用飞灰与CO₂反应1 h,最终碳酸化度为2%^[17];在300~700 °C和2~7 atm的条件下反应90 min,碳酸化度达到8%;在常温常压下用高炉渣直接与CO₂反应24 h,

碳酸化度最终达到4%^[18],详见表2。由此看来,气-固碳酸化的大部分实验得到的碳酸化度为2%~20%,但在湿润的环境下,如液固比约为0.2 L/kg时,在常温常压下反应120 min,碳酸化度就可达到30%^[19],因此其气-固碳酸化碳酸化效率较差,且反应时间更长,且温度更高,能源消耗更大。这主要是因为CO₂很难深入钢渣与CaO反应,且反应后在钢渣表面生成的致密的CaCO₃进一步阻碍了碳酸化,而当有水存在时,钢渣中的钙容易浸出,并与CO₂发生碳酸化反应,从而提升碳酸化效率。另外,气固碳酸化需要在较高温度下进行,在耗费大量能量的同时也会产生大量CO₂。由此,本研究在直接气-固碳酸化的基础上,研究利用气-液-固三相反应的常温钢渣捕集CO₂技术。

表2 矿物材料与CO₂反应的碳酸化度

Table 2 Carbonation degree of mineral materials reacting with CO₂

材料	反应条件	反应时间	碳酸化度
粉煤灰 ^[14]	300~500 °C	1 h	17%
粉煤灰 ^[16]	200~500 °C	6 h	13%
波兰特水泥 ^[15]	常温常压	240 d	12%
飞灰 ^[17]	室温和10 atm	1 h	2%
飞灰 ^[17]	300~700 °C和2~7 atm	90 min	8%
高炉渣 ^[18]	常温常压	24 h	4%

本研究利用工业废弃物钢渣在常温条件下吸收CO₂,分别探究了干燥环境与湿润环境下钢渣对CO₂的吸收效率,并对反应前后钢渣的理化性质进行表征,剖析了2种环境下钢渣吸收CO₂效率提升的可能机制,为钢渣的资源化利用和低成本的CO₂捕集提供参考。

1 实验部分

1.1 实验原料

主要原料为钢渣(工业生产中废弃的钢渣),其主要成分为CaO和MgO。CO₂(成都和平气体贸易中心,40 L,混合气,20% CO₂+80% N₂)、蒸馏水。

1.2 实验设备

所有实验仪器包括磨碎机、精密天平、烘干机、高温红外灯、目筛、研钵、气速质量流量计、XRD分析仪(厂家Rigaku Compan, Japan, 型号D/max-3BPEX-P96)、SEM分析仪(Thermo Scientific, Quanta FEG 250)、二氧化碳检测仪(ERUN, PG71S6-C2)。

1.3 实验装置

CO₂捕集反应装置如图1所示,主要由气体速度流量计和反应瓶组成。主要过程是CO₂从高压气瓶出口,经由气体质量流量计进入反应系统,出口由二氧化碳检测仪检测,观察其反应限度。在实验过程中,将适量的钢渣与蒸馏水充分混合形成特定固液比,然后密封,先通入N₂排尽空气,后设定气速质量流量计的气体流速参数,再通入实验气体CO₂,进行捕集效果分析实验。

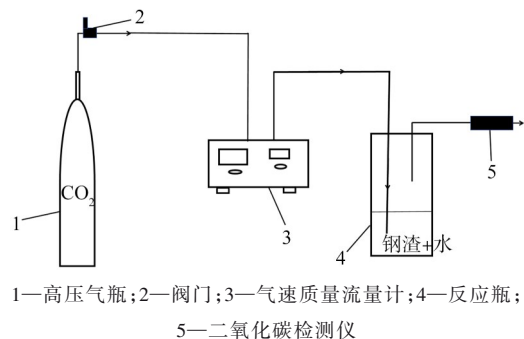


图1 CO₂捕集反应装置工艺

Figure 1 Process flow of the CO₂ capture reaction device

1.4 实验方法

将钢渣进行碾磨,分别过目数为80、100、120、160、200的筛网进行筛取,得到不同粒径的钢渣粉末,再与蒸馏水进行混合,形成固液比为25,30,35,40,45,50 g/L的混合物,所有过程在高温红外灯下进行,规避空气中的水分可能对实验结果造成影响。而后设置好气体流速(150,200,250 mL/min)并于常温常压条件下通入CO₂,用二氧化碳检测仪观察实验的反应限度。通过称量反应装置前后整体的质量,得出钢渣对二氧化碳的捕集效率。钢渣捕集二氧化碳的捕集效率用X(%)表示,其计算公式如式(1)所示:

$$X = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为反应前装置整体质量,g; m_1 为反应后装置整体质量,g。

实验中反应前后对照组中装置的质量差值主要为CO₂,H₂O的质量作为背景值进行扣除,H₂O的存在更多充当了类似活化剂的角色,生成的Ca(OH)₂并不稳定,新的CO₂进入后会继续生成CaCO₃。另外,反应时间较长,导致质量变化的主导因子是CO₂。为了进一步确保实验数据的准确性,通过计算游离氧化物的最大吸附量进行类比分析。

2 结果与分析

为了研究钢渣在常温下捕集CO₂的影响因素,通过控制反应气体流速、钢渣粒径、反应固液比,得到相对最佳的反应条件。

2.1 反应过程分析

2.1.1 反应气体速度对CO₂捕集效率的影响

化学反应最佳反应点往往在反应达到平衡时,但钢渣捕集CO₂时间过长,且后续阶段捕集效率增加缓慢,这一现象主要是由于矿化反应生成的碳酸矿物层附着在钢渣表面,限制了CO₂和钙镁离子的扩散,当碳酸矿物层达到一定厚度时,若不加以干预,则矿化进行缓慢^[20]。因此实验通过控制反应时间、钢渣粒径和反应固液比,探讨其在不同气体流速时的效率变化。

常温下粒径为100目,固液比为25 g/L,气体流速分别为150,200,250 mL/min时的CO₂捕集效率如图2所示。可知:随着气体流速增加,钢渣与CO₂的反应更加剧烈。从捕集效率来看,在气体流速为150,200 mL/min时,捕集效率由0.16%缓慢升至0.19%,而当气体流速升至250 mL/min时,捕集效率由0.19%升至0.30%。其原因可能是在气速比较小时,钢渣与CO₂的接触面积比较小,导致外部的钢渣与CO₂反应生成的CaCO₃覆盖在钢渣表面,导致内部大量钢渣无法继续反应,所以相同时间内,反应速率更慢,捕集效率也更低;且随着CO₂气速的增加,钢渣与CO₂的接触面积逐渐增大,捕集效率相应地得到了提高。

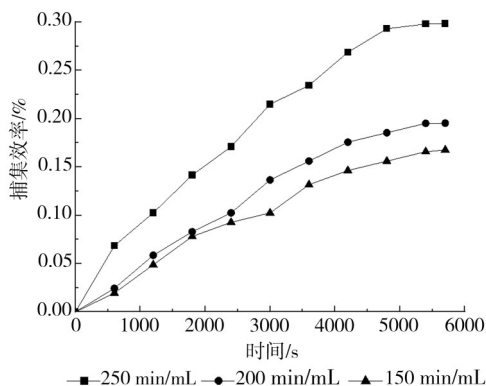


图2 不同气体流速对CO₂捕集效率的影响

Figure 2 Effects of different gas flow rates on CO₂ capture efficiency

2.1.2 反应固液比对CO₂捕集效率的影响

为了研究固液比对CO₂捕集效率的影响,控制气体流速为250 mL/min,钢渣粒径为200目,通过改变

固液比,考察钢渣对CO₂的最佳吸附效率,结果如图3所示。可知:在固液比为25,30,35 g/L时,钢渣对CO₂的捕集效率由原来的0.97%下降至0.25%,而到40 g/L时捕集效率又上升至0.56%,在45 g/L和50 g/L时缓慢降至0.23%。因此,40 g/L是比较好的捕集固液比,但不是最佳固液比。综上,在固液比为25 g/L时,CO₂捕集效率最高。

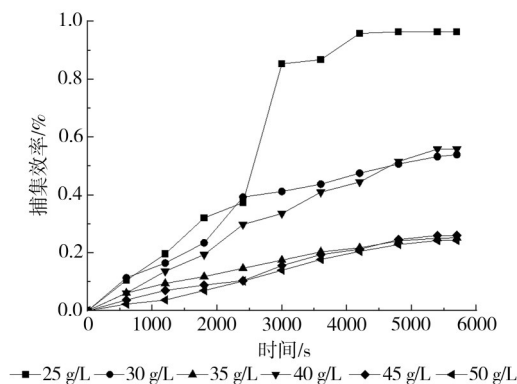


图3 不同固液比对CO₂捕集效率的影响

Figure 3 Effects of different solid-liquid ratios on CO₂ capture efficiency

2.1.3 钢渣粒径对CO₂捕集效率的影响

为进一步了解常温下钢渣粒径对CO₂捕集吸附的影响,控制固液比25 g/L,气体流速250 mL/min,改变钢渣粒径,结果如图4所示。

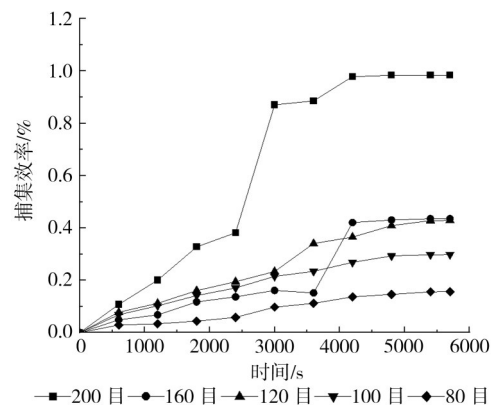


图4 钢渣粒径对CO₂捕集效率的影响

Figure 4 Effects of steel slag particle size on CO₂ capture efficiency

由图4可知:随着钢渣粒径的增大,CO₂的吸附效率逐渐降低,在粒径最小为200目时的吸附效率最佳,为0.97%。原因是当粒径越小时,吸附面积相对增大,从而增加钢渣与CO₂的接触面积,提高吸附效率。此外,较小的粒径也意味着更高的孔隙度和孔隙体积,有利于CO₂在钢渣内部的扩散。因此,更小

粒径的钢渣对 CO_2 有更高的捕集效率。但是过小的粒径钢渣可能会带来更高的工艺成本和容易造成堵塞的问题。综上,钢渣粒径为200目时, CO_2 的吸附性能最佳。

2.2 反应动力学分析

钢渣捕集 CO_2 的可行性和实验数据的精确度,可以通过研究其动力学即反应时间与捕集效率的关系来明晰、验证。当气速为250 mL/min,钢渣与 CO_2 的固液比分别为25,30,35,40,45,50 g/L时,反应时间 t 与 CO_2 的吸附量 q_t 的关系如图5所示。为了研究钢渣和 CO_2 的动力学特性,建立了捕集过程的最佳动力学模型,利用一级和二级动力学方程对图5进行拟合分析,并根据线性相关系数 R^2 的值来判断这2种模型的适用性。

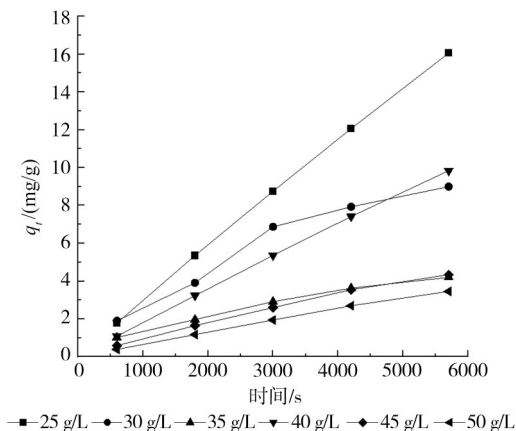


图5 不同固液比时 q_t - t 曲线

Figure 5 q_t - t curves at different solid-liquid ratios

一级动力学方程如式(2)所示:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

式中: q_e 、 q_t 分别为反应平衡时和 t 时刻钢渣对 CO_2 的捕集量,mg/g; k_1 为一级吸附速率常数, min^{-1} 。

采用一级动力学方程对图5中数据进行线性拟合,拟合参数见表3。

二级动力学方程如式3所示:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

式中: k_2 为伪二级吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ 。

由表3和表4中相关系数 R^2 可以看出:二级动力学方程更符合钢渣捕集 CO_2 的过程, R^2 达到0.9以上。采用二级反应平衡常数更能准确地描述该动力学过程。

表3 一级吸附动力学曲线的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of first-order adsorption kinetic curves

浓度/(mg/L)	q_e	R^2	k_1
25	4.6923	0.7742	0.0564
30	3.7657	0.6423	0.0357
35	2.8402	0.6363	0.0574
40	3.9729	0.6022	0.0413
45	6.9524	0.5431	0.0524
50	3.1424	0.6167	0.0265

表4 二级吸附动力学曲线的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of second-order adsorption kinetic curves

浓度/(mg/L)	q_e	R^2	K_2
25	5.5175	0.9689	0.0172
30	5.0491	0.9536	0.0257
35	9.5803	0.9579	0.0034
40	9.1116	0.9442	0.0081
45	16.4425	0.9858	0.0593
50	24.8562	0.8781	0.0006

2.3 钢渣吸收 CO_2 机制

2.3.1 XRD 表征分析

图6为钢渣样品用CuK α 辐射进行了XRD表征,在此过程中,扫描区范围为 $-5^\circ \sim 85^\circ$ 。可知:钢渣实验前样品的XRD表征图中衍射峰主要包括CaO、MgO、 CaCO_3 ,主要成分为CaO。实验后, CaCO_3 的衍射峰远高于实验前,且实验后CaO的高峰值基本无显示,说明钢渣中的CaO经过水和 CO_2 的三相反应生成了大量的 CaCO_3 ,进一步反映出加入水的钢渣在室温下具有良好的捕集 CO_2 的能力。

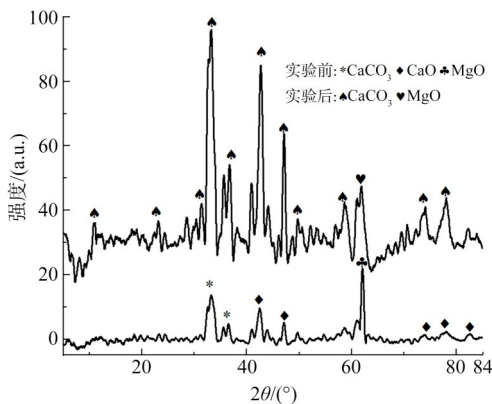


图6 反应前后钢渣的XRD分析

Figure 6 XRD analysis of steel slag before and after reaction

2.3.2 SEM扫描电镜表征分析

扫描电镜图像可用于分析材料的形貌。钢渣和CO₂捕获产物的SEM图像如图7所示。其中,图7a为未加H₂O的钢渣和捕集产物CaCO₃放大10000倍、5000倍的扫描电镜图。图7a是加H₂O的钢渣和捕集产物碳酸钙放大10000倍、5000倍的扫描电镜图。结

果表明:未加H₂O的钢渣进行捕集CO₂,即固-气二相反应后,发现少部分碳酸钙晶体结构,而加入H₂O的钢渣进行捕集CO₂,即固-液-气三相反应后,发现了大量的CaCO₃晶体结构。说明在常温时三相反应对钢渣捕集CO₂的效果更好。

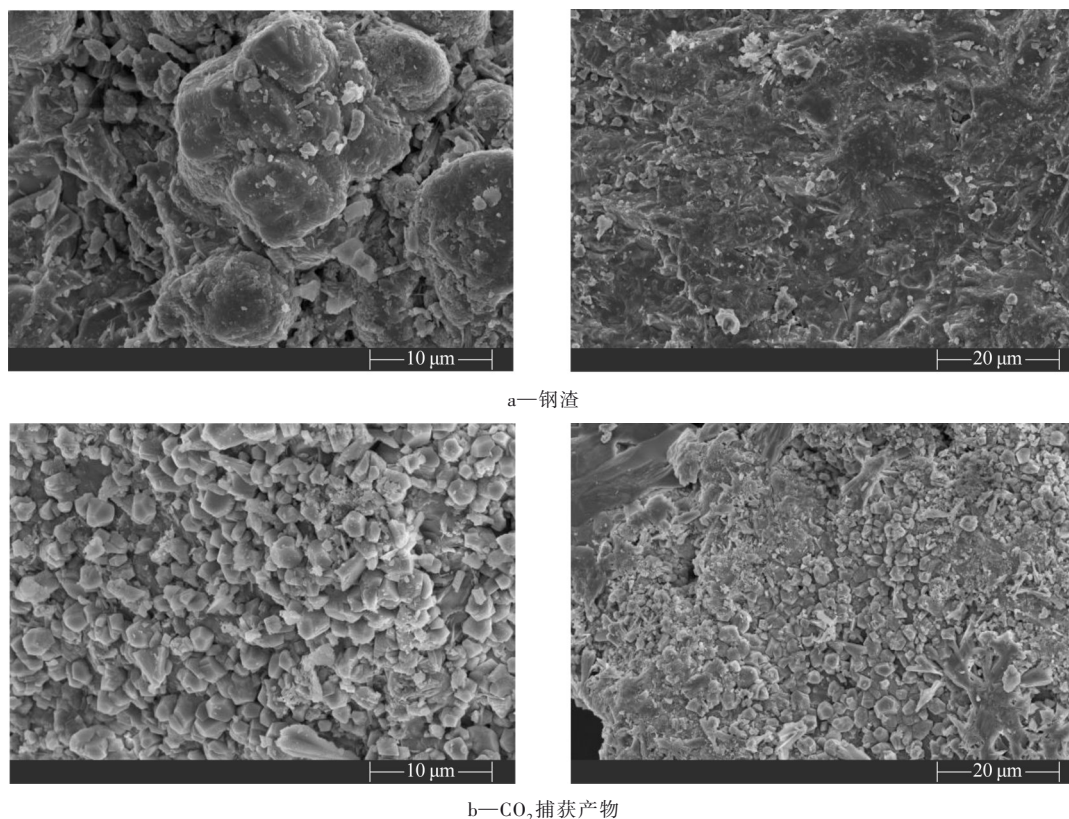


图7 钢渣和CO₂捕获产物的SEM图像

Figure 7 SEM characterization of steel slag and CO₂ capture products

3 结论

本文分析了H₂O对于钢渣吸附CO₂的影响,探究了不同气体流速、钢渣粒径、固液比条件下CO₂吸附效率,并研究了钢渣三相反应吸收CO₂的合理性,主要结论如下:

1)室温下,钢渣对CO₂的捕集效率随着气体流速的增大而增加。气体流速越大,单位时间接触的CO₂越多,可促进钢渣的吸附效率。

2)随着钢渣粒径减小,比表面积增大,钢渣的吸附能力增强,钢渣的碳化度也逐渐增加。

3)随着反应固液比的减小,液相占比越多,反应越充分,CO₂吸附效率也相应地增大,碳化作用得以促进,碳化产物CaCO₃越多。实验发现反应固液比为25 g/L、气体流速为250 mL/min、钢渣粒径为200目

时,可得到一个相对最佳的CO₂吸附效率0.97%。

4)对捕集产物CaCO₃表征分析发现,在常温下加入H₂O钢渣吸附CO₂形成三相反应捕集效率更高,相比传统钢渣捕集CO₂在高温下的两相反应更加节能。利用三相反应吸附CO₂后的钢渣存在大量CaCO₃晶体,晶型相对较好,且CaCO₃晶体衍射峰相比两相体系明显增强,碳化度更高。

参考文献

- [1] 张力婕,张英,黎晓璇. 二氧化碳捕集技术研究进展[J]. 中外能源, 2023: 73-81.
ZHANG L J, ZHANG Y, LI X X. Research progress of carbon dioxide capture technologies [J]. Sino-Global Energy, 2023: 73-81.
- [2] 宋坚民. 探讨钢渣吸附二氧化碳的可行性[J]. 环境工程, 2010, 28(增刊1): 214-217, 337.
SONG J M. Discussion on feasibility of adsorbing carbon dioxide

- by steel making slag[J]. *Environmental Engineering*, 2010, 28 (S1): 214-217, 337.
- [3] 魏超. 钢渣—冷轧废水捕集 CO₂ 动力学及碳酸化渣资源利用研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2021.
- WEI C. Study on the kinetics of CO₂ capture by steel slag with cold-rolling wastewater and carbonated slag resource utilization [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [4] ZHANG H N, ZUO Q Q, WEI C. Closed-circulating CO₂ sequestration process evaluation utilizing wastes in steelmaking plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2020: 738.
- [5] 田思聪. 钢渣制备高效钙基 CO₂ 吸附材料用于钢铁行业碳捕集研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
- TIAN S C. Synthesis of highly-efficient, Ca-based CO₂ sorbents from steel slag and application for carbon capture in the iron and steel industry[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [6] 张晓辉, 孙荣岳, 周勇, 等. 镁负载制备高活性钙基吸收剂循环捕集 CO₂ 研究进展[J]. *电站系统工程*, 2020, 36(6): 87-90.
- ZHANG X H, SUN R Y, ZHOU Y, et al. Research progress on synthesis of CaO/MgO sorbents and their CO₂ capture capacities [J]. *Power System Engineering*, 2020, 36(6): 87-90.
- [7] 刘怡. 双碳背景下基于二氧化碳捕集的钢渣处理技术发展现状[J]. *环境工程*, 2023, 41(增刊2): 1290-1292, 741.
- LIU Y. Development status of steel slag treatment technology based on carbon dioxide capture under double carbon [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S2): 1290-1292, 741.
- [8] 赵珂萍, 李晓玉, 李瑞红, 等. 固废源 CaO 基 CO₂ 捕集材料的制备与捕集性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(2): 520-530.
- ZHAO K P, LI X Y, LI R H, et al. Research progress on preparation and capture performance of CaO-based CO₂ capture materials from solid wastes[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(2): 520-530.
- [9] 何柳. 二氧化碳高温吸附剂的固定床研究[D]. 西安:西北大学, 2017.
- HE L. The study of carbon dioxide high temperature adsorption in fixed-bed[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [10] 王胜平, 沈辉, 范莎莎, 等. 固体二氧化碳吸附剂研究进展[J]. *化学工业与工程*, 2014, 31(1): 72-78.
- WANG S P, SHEN H, FAN S S, et al. Research progress of solid adsorbents for CO₂ capture [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2014, 31(1): 72-78.
- [11] 吴跃东, 彭桦, 吴龙, 等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J]. *环境工程*, 2021, 39(1): 161-165.
- WU Y D, PENG B, WU L, et al. Review on global development of treatment and utilization of steel slag [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 161-165.
- [12] HUIJGEN W J, WITKAMP G, COMANS R. Mechanisms of aqueous wollastonite carbonation as a possible CO₂ sequestration process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2006, 61 (13): 4242-4251.
- [13] SCHMIDT R, RMANOSKY B. Program overviews: CO₂ sequestration mineral [C]// MC Workshop (Ed.), Pittsburgh, USA, 2001.
- [14] TIAN S, JIANG J. Sequestration of flue gas CO₂ by direct gas-solid carbonation of air pollution control system residues [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46 (24): 13545-13551.
- [15] ABBASPOUR T, TANYU B. CO₂ Sequestration by carbonation processes of rubblized concrete at standard conditions and the related mineral stability diagrams[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8: 6647-6656.
- [16] RENATO B A P, RAFFAELLA P, VALENTINA P, et al. CO₂ sequestration by direct gas-solid carbonation of air pollution control (APC) residues[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20: 1933-1940.
- [17] TAMILSELVI D R R, KANDASAMY P, ANDIMUTHU R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 4173-4182.
- [18] ZHANG H, WEI C, DONG J. Inhibition kinetics of chromium leaching by calcite coating on the surface of stainless steel slag via the gas-solid accelerated carbonation process[J]. *Waste Biomass Valorization*, 2020, 12(1): 475-485.
- [19] BACIOCCHI R, COSTA G, POLETTINI A, et al. Effects of thin-film accelerated carbonation on steel slag leaching[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 369-378.
- [20] CHANG E E, PAN S Y, CHEN Y H, et al. Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 227: 97-106.