

## 钢渣萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的影响因素及产品性能

李彦军<sup>1</sup>, 刘陈新<sup>2</sup>, 曹朝真<sup>2</sup>, 张雨晨<sup>3</sup>, 曹明汇<sup>3</sup>, 焦克新<sup>3</sup>, 徐润生<sup>3</sup>

(1. 河钢股份有限公司承德分公司, 河北承德 050000; 2. 必和必拓公司, 北京 100081;

3. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100081)

**摘要:** 钢铁冶金渣湿法碳酸化封存 CO<sub>2</sub> 作为新兴的碳捕集与封存技术 (CCUS), 因其原料资源化利用与碳封存的双重效益展现出显著的经济价值。本文探讨时间、温度及 CO<sub>2</sub> 气流流量对 Ca<sup>2+</sup> 萃取液碳酸化效率的影响规律, 结合反应动力学模型解析其限制性环节; 通过 SEM 与 X 射线衍射 (XRD) 表征产物的形貌特征。试验结果表明: 随着温度和时间的增加, 碳酸化程度呈现出先增大后减少的趋势; 而随着气流量的增大, 碳酸化程度先减小后增大。在 CO<sub>2</sub> 气流流量为 0.1 L/min、温度为 60 °C 的最佳条件下反应 22.5 min, 此时碳酸化率为 68.03%。结合阿伦尼乌斯方程, 计算表观活化能为 24.45 kJ/mol, 说明该反应体系受表面化学反应与气液边界层扩散双重控制。产物表征显示合成碳酸钙的纯度达 99.37%, 并且其晶形结构主要为稳定的方解石与球霏石, 碳酸钙产品 <0.075 mm 粒级占比为 93.6%, 符合工业沉淀碳酸钙 (PCC) 质量标准, 可广泛应用于造纸、塑料及建筑材料领域。本研究可为冶金固废协同碳封存技术提供关键工艺参数与理论支撑。

**关键词:** 封存 CO<sub>2</sub>; 钢渣; 氯化铵; 碳酸钙

中图分类号: TF09

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0141-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.051

## Influencing factors of CO<sub>2</sub> absorption and product performance of steel slag extract

LI Yanjun<sup>1</sup>, LIU Chenxin<sup>2</sup>, CAO Chaozhen<sup>2</sup>, ZHANG Yuchen<sup>3</sup>, CAO Minghui<sup>3</sup>,

JIAO Kexin<sup>3</sup>, XU Runsheng<sup>3</sup>

(1. Chengde Branch of HBIS Group Co., Ltd., Chengde 050000, Hebei, China; 2. BHP Billiton Ltd., Beijing 100081,

China; 3. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing,

Beijing 100083, China)

**Abstract:** As an emerging carbon capture and storage (CCUS) technology, wet carbonation and storage of CO<sub>2</sub> from ferrous metallurgical slag has shown significant economic value due to its dual benefits of raw material resource utilization and carbon storage. This paper discusses the influence of time, temperature and CO<sub>2</sub> airflow flow on the carbonation efficiency of Ca<sup>2+</sup> extract and analyzes its restrictive links in combination with the reaction kinetic model; the morphological characteristics of the product are characterized by SEM and X-ray diffraction (XRD). The experimental data show that with the increase of temperature and time, the degree of carbonation first increases and then decreases. With the increase of gas flow, the degree of carbonation decreases first and then increases. The optimal reaction conditions are 22.5 min at a CO<sub>2</sub> gas flow rate of 0.1 L/min and a temperature of 60 °C, and the carbonation rate is 68.03%. Combined with the Arrhenius

收稿日期: 2024-12-08; 修回日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274316&U24A20102); 国家重点研发计划资助项目 (2024YFE0208900&2022YFE0208100); 新疆维吾尔自治区重大科技专项 (2022A01003); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目 (202201050201011); 安徽省重点研究与开发计划资助项目 (202210700037)

作者简介: 李彦军 (1981—) 男, 工程师, 从事钢渣固碳方面的研究工作。

通信作者: 徐润生 (1988—) 男, 教授, 从事高炉炼铁、低碳冶金方面的研究。

equation, the apparent activation energy is calculated as 24.45 kJ/mol, which indicates that the reaction system is controlled by both surface chemical reaction and gas-liquid boundary layer diffusion. The product characterization shows that the purity of the synthetic calcium carbonate is 99.37%, and its crystal structure is mainly stable calcite and aragonite and the proportion of calcium carbonate products < 0.075 mm fraction is 93.6%, which meets the quality standards of industrial precipitated calcium carbonate (PCC) and could be widely used in papermaking, plastics and building materials. This study can provide key process parameters and theoretical support for synergistic carbon storage technology of metallurgical solid waste.

**Key words:** CO<sub>2</sub> storage; steel slag; ammonium chloride; calcium carbonate

世界能源需求的快速增长将导致温室气体排放量增加。据估计,到2100年,CO<sub>2</sub>排放量将比2000年增加约四倍<sup>[1]</sup>。而CO<sub>2</sub>的捕获和封存被认为是解决大气中CO<sub>2</sub>浓度增加问题的一种重要方式<sup>[2]</sup>。其中,CO<sub>2</sub>的地质封存是唯一已得到充分证明的封存选择,但将CO<sub>2</sub>作为碳酸盐矿物封存具有更大的潜力,且不需要使用昂贵的监测设备来防止CO<sub>2</sub>逃逸<sup>[3-4]</sup>。钢铁制造业是CO<sub>2</sub>排放的最大工业来源之一,其一般通过冶炼副产品、钢铁冶金渣等来封存CO<sub>2</sub><sup>[5-7]</sup>。转炉渣、高炉渣等钢铁冶金渣的含钙量高,是适宜的碳酸化原料,既能化解钢渣带来的危害,又能实现资源再利用,经济效益显著。此外,钢渣作为碱性固废,与天然矿物相比具有较高的反应活性和碱度,更适合用于CO<sub>2</sub>碳酸化处理<sup>[8-9]</sup>。

大量研究表明,钢铁冶金渣可通过直接矿化和间接矿化实现CO<sub>2</sub>封存<sup>[10]</sup>。直接矿化有热力学上的优势,反应能够自发进行,但其动力学反应速率较慢,难以被大规模应用。间接矿化包含两个步骤:在酸性环境提取矿物中的Ca或Mg,然后在碱性条件下进行碳酸化。因温和的操作条件、高效的碳酸化效率及纯净的产物,间接矿化备受关注。间接矿化可以大规模工业化应用的关键在于萃取剂的选择。较低的pH值有助于碱土元素的萃取,而较高的pH值有利于CO<sub>2</sub>的固定。为此,PARK等<sup>[11]</sup>研究发现,CO<sub>2</sub>矿化过程中的pH摆动反应兼顾了矿物提取与碳酸化需求。通过在酸性

条件(氯化铵, NH<sub>4</sub>Cl)下从钢渣中提取钙离子,随后将CO<sub>2</sub>与萃取液接触生成碳酸钙。碱性萃取液可以促进CO<sub>2</sub>的吸收。NH<sub>4</sub>Cl溶液在CaCO<sub>3</sub>沉淀过程中再生,而CO<sub>2</sub>以固体形式回收。

本文采用钢渣和氯化铵溶液制备钢渣萃取液,从热力学角度探究反应时间、温度、气流流量对萃取液制备碳酸钙的影响,从动力学角度研究其限制性因素,通过分析碳酸钙产品的组分与物相组成来评估其工业前景,为碳酸化封存CO<sub>2</sub>的工业化应用提供理论依据。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 原料性能

本文在前期研究的基础上,采用钢渣和氯化铵溶液在最佳萃取条件下制备钢渣萃取液<sup>[12]</sup>。钢渣为承德某钢铁公司提供的脱钒钢渣。使用X射线荧光(XRF)分析脱钒钢渣的化学成分、物相组成,结果分别如表1、2所示。由表1可见,该脱钒钢渣的CaO质量分数高达60.37%。因此,选用此钢渣来制备萃取液。由表2可见,脱钒钢渣主要含钙物相为Ca(OH)<sub>2</sub>,此外,还含有一部分的Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>、Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>与CaCO<sub>3</sub>。

表1 脱钒钢渣的主要化学成分(质量分数)

steel slag							%
CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
60.37	19.72	6.074	4.406	2.453	1.949	1.397	1.189

表2 脱钒钢渣的主要物相组成(质量分数)

Main phase composition of de-vanadiumized steel slag							%
Ca(OH) <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Ca <sub>0.15</sub> Fe <sub>2.85</sub> O <sub>4</sub>	MgO	FeV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
47.57	18.90	11.32	10.63	7.13	1.88	1.43	0.85

注:钢渣中还含有少量的其他铁化合物,故物相组成分析结果略微低于化学成分分析结果。

采用 IRIS Intripedlls-92 型等离子发射光谱仪 (inductively coupled plasma emission spectroscopy, ICP-AES) 对萃取液进行元素分析。萃取液中的金属离子主要为 Ca<sup>2+</sup>, 质量浓度为 3 430 mg/L; 此外, 萃取液中还含有微量的 Mg<sup>2+</sup>, 占到 Ca<sup>2+</sup> 质量浓度的 2.08%。

## 1.2 试验方法

(1) 萃取剂的制备。将 10.7 g 氯化铵溶于 200 mL 蒸馏水中, 制备出 1 mol/L 的氯化铵溶液, 将配置好的溶液倒入烧杯中, 并固定在恒温水浴锅内; 当溶液温度达到设定目标温度时, 称取一定量的钢渣缓缓加入反应容器中。浸出结束后, 使用滤纸分离钢渣和萃取剂。

(2) 萃取剂固定 CO<sub>2</sub>。将以最佳条件制备的萃取液倒入烧杯, 固定在恒温水浴锅。当溶液温度达到设定温度时, 用保鲜膜封口, 开始通入 CO<sub>2</sub> 气体, 一定时间后停止通气, 冷却后分离碳酸化后的碳酸钙和滤液。测定滤液中金属离子的质量浓度。碳酸化率的计算方法如下。

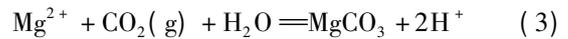
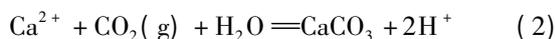
$$x_p = \frac{C_{ex} - C_{fil}}{C_{ex}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $x_p$  为碳酸化率 %;  $C_{ex}$  为萃取液中 Ca 离子质量浓度, mg/L;  $C_{fil}$  为滤液中 Ca 离子质量浓度, mg/L。

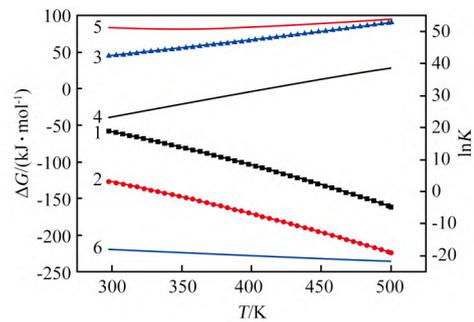
## 2 结果与讨论

### 2.1 萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的热力学分析

当脱钒钢渣在氯化铵溶液内萃取一段时间后, 萃取体系中除了有 Ca 离子外, 还有微量的 Mg 离子。在通入一定流量的 CO<sub>2</sub> 气体后, 根据水溶性气体在水中的溶解理论可知, CO<sub>2</sub> 气泡上升过程会引起体积变化, 这主要是两种作用的综合结果。一是溶解作用, 即气体在水中上升时溶解于水, 气泡变小; 二是减压效应, 随着气泡上浮, 外界压强减小引起体积增大。但由于碳酸化试验装置中溶液的深度较小, 上升距离有限, 减压效应相较于溶解作用并不明显, 可忽略不计。因此, 认为溶液中的氯化钙首先与溶解的 CO<sub>2</sub> 气泡发生反应。溶解反应如式(2)~(3)所示。



通过热力学分析, 得到反应(2)~(3)的标准吉布斯自由能( $\Delta G$ )、平衡常数的对数( $\ln K$ )与碳酸化温度( $T$ )之间的函数关系, 如图1所示。由图1可见, 随着碳酸化温度的增大, 含钙相与 CO<sub>2</sub> 反应的  $\ln K$  逐渐增大, 这表明提高碳酸化温度, 利于反应正向进行, 即利于萃取液吸收 CO<sub>2</sub>。



$\Delta G$ : 1—CaCO<sub>3</sub>; 2—MgCO<sub>3</sub>; 3—Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>。  
 $\ln K$ : 4—CaCO<sub>3</sub>; 5—MgCO<sub>3</sub>; 6—Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>。

图1 热力学参数与温度的关系

Fig. 1 Relationship between thermodynamic parameters and temperature

### 2.2 反应时间对萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的影响

为了探讨反应时间对萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的效果, 在温度为 60 °C、CO<sub>2</sub> 流量为 0.1 L/min 条件下, 分别考察反应时间为 7.5、15.0、22.5 min 及 30 min 时的碳酸化率, 如图2所示。由图2可知, 随着反应时间的增加, 碳酸化率呈现先增长后减小的趋势, 22.5 min 时的浸出率最高为 68.03%。分析原因认为, 当反应进行到一段时间后, 过量的 CO<sub>2</sub> 会与已生成的碳酸盐继续反应形成碳酸氢盐, 使得溶液中碱金属元素质量浓度增加。

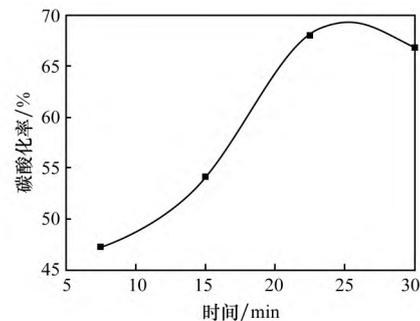


图2 反应时间与碳酸化率之间的关系

Fig. 2 Relationship between reaction time and carbonation rate

### 2.3 反应温度对萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的影响

为了探讨碳酸化温度对萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的效果,在反应时间为 30 min、CO<sub>2</sub> 流量为 0.1 L/min 条件下,试验分别考查碳酸化温度为 25、40、60 °C 及 80 °C 时碳酸化率的变化,结果如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度的升高,碳酸化率呈现出一种先上升后下降的趋势,当温度达到 60 °C 时,碳酸化率最高为 66.76%。随着 CO<sub>2</sub> 的喷入,溶解的 CO<sub>2</sub> 分子与水反应生成碳酸,碳酸进一步分解为 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,与萃取溶液中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 反应,生成 CaCO<sub>3</sub> 和 MgCO<sub>3</sub>,溶液中的碱金属离子质量浓度相应降低,但是当 CO<sub>2</sub> 过量时,形成的碳酸盐继续反应生成碳酸氢盐,使得溶液中的碱金属元素质量浓度又相应增加。

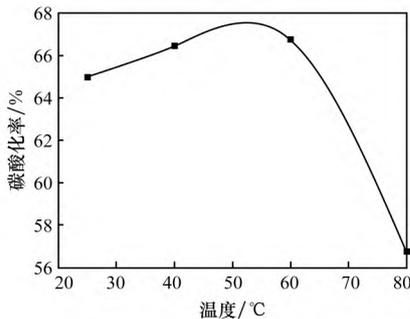


图 3 反应温度与碳酸化率之间的关系

Fig. 3 Relationship between reaction temperature and carbonation rate

CO<sub>2</sub> 在水中的溶解度与温度、气压之间的函数关系如图 4 所示<sup>[13]</sup>。其反应如式 (4) ~ (6) 所示。由图 4 可见,在相同压力的条件下,温度越高,CO<sub>2</sub> 在水中的溶解度越低。因此,随着温度的降低,溶解在萃取溶液体系中 CO<sub>2</sub> 的量越来越少。相应地,碳酸分子电离形成的氢离子也随着温度的增加而减少,萃取溶液体系中的 Ca、Mg 离子相应减少。图 5 为标准大气压条件下 CO<sub>2</sub> 溶解在水中的离子相优势区域图。由图 5 可知:当 CO<sub>2</sub> 溶解在水中时,当 pH 值 < 6 时,体系中能稳定存在碳酸分子,而碳酸氢根及碳酸根离子均不能稳定存在;当 6 < pH 值 < 10.3 时,溶液体系中碳酸氢根能稳定存在;当 pH 值 > 10.3 时,碳酸根离子能稳定存在。因此,对于萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 效率而言,碳酸化温度为 60 °C 时吸收效率最佳;此时,碳酸化过程的动力学条件较优,CO<sub>2</sub> 的溶

解度特性也较好。

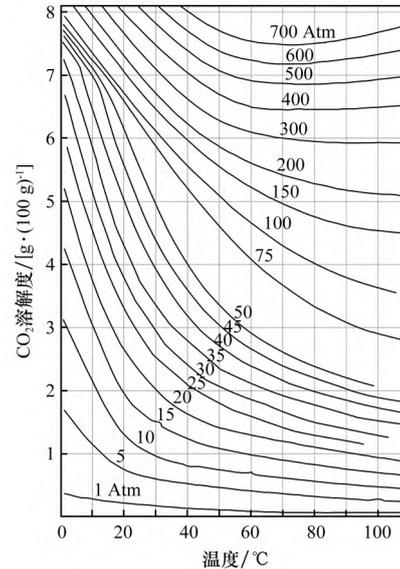
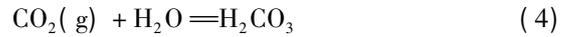


图 4 CO<sub>2</sub> 在水中的溶解度

Fig. 4 Solubility of CO<sub>2</sub> in water

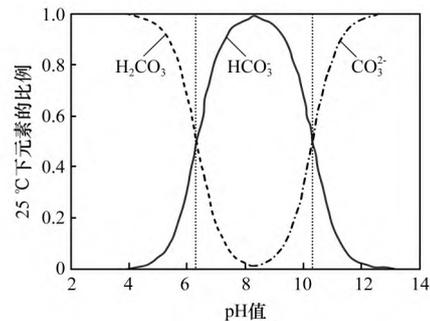


图 5 CO<sub>2</sub> 溶解在水中的优势图

Fig. 5 The advantage diagram of CO<sub>2</sub> dissolved in water

### 2.4 气流流量对萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的影响

为了分析 CO<sub>2</sub> 流量对碳酸化效果的影响,在温度为 60 °C、搅拌强度为 400 r/min 的条件下,试验分别考查 CO<sub>2</sub> 流量为 0.1、0.4、0.7 L/min 及 1.0 L/min 时的碳酸化效果,结果如图 6 所示。由图 6 可知,碳酸化率随着气流流量的增加呈现出先减少后增加的趋势,在气流流量为 0.1 L/min 时达到最高,为 66.76%。这是由于随着 CO<sub>2</sub> 的喷入,溶解的 CO<sub>2</sub> 分子与水反应产生 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 分解成 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,与萃取溶液中的 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 发生反应,形成 MgCO<sub>3</sub> 和 CaCO<sub>3</sub>,溶液中的

碱金属离子质量浓度相应降低,但是当喷吹的CO<sub>2</sub>过量时,形成的碳酸盐继续反应形成碳酸氢盐,使得溶液中的碱金属元素质量浓度增加。当达到最低点继续增大CO<sub>2</sub>流量时,CO<sub>2</sub>大量溶解电离出碳酸根的质量浓度增大。碳酸根的质量浓度作为反应的驱动力,使得碳酸化反应的动力学条件进一步改善,超过了碳酸盐形成碳酸氢盐的速率,使得碳酸化率相应增加。

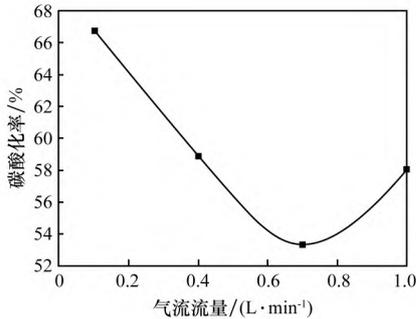
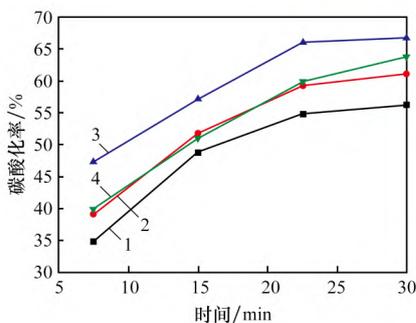


图6 气流流量与碳酸化率之间的关系

Fig. 6 Relationship between gas flow rate and carbonation rate

## 2.5 动力学分析

为了分析萃取液吸收CO<sub>2</sub>过程、碳酸化反应的反应速率以及过程的控速环节,以前述试验数据为依托,建立不同温度条件下,碳酸化程度与时间之间的函数关系,结果如图7所示。由图7可见,随着碳酸化温度达到60℃,碳酸化程度增大,这是因为萃取液吸收CO<sub>2</sub>的动力学条件逐渐改善。然而,当继续升高温度时,CO<sub>2</sub>的溶解度下降,且气泡在溶液中的停留时间减少,导致萃取液吸收CO<sub>2</sub>的效果越来越差。在碳酸化过程中,前期萃取液吸收CO<sub>2</sub>较快,后期则逐渐减慢,表



碳酸化温度/℃: 1—25; 2—40; 3—60; 4—80。

图7 碳酸化率与时间之间的关系

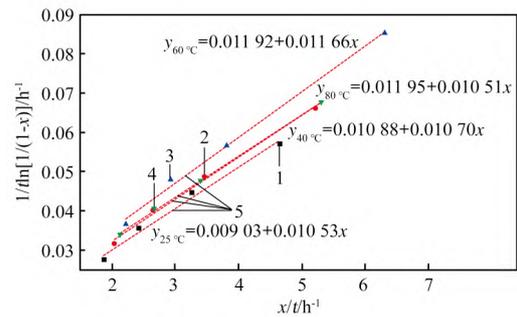
Fig. 7 Relationship between carbonation degree and time

现出自阻性。所以,采用含自阻系数的德罗兹多夫方程描述CO<sub>2</sub>的吸收过程,如式(7)所示。

$$\frac{1}{t} \ln \frac{1}{1-x} - \beta \frac{x}{t} = k_m \quad (7)$$

式中:  $t$  为萃取时间, h;  $x$  为碳酸钙的转化率, %;  $\beta$  为自阻系数;  $k_m$  为反应速率常数。

根据德罗兹多夫方程得出  $1/t \ln [1/(1-x)]$  与  $x/t$  的关系, 并通过试验数据绘制散点图并进行线性拟合, 如图8所示。图8中, 斜率代表自阻系数, 截距则为萃取液吸收CO<sub>2</sub>的速率常数。由图8可见, 随着温度的升高, 萃取液吸收CO<sub>2</sub>的反应速率常数和自阻系数增大。



碳酸化温度/℃: 1—25; 2—40; 3—60; 4—80。

5—拟合曲线。

图8 拟合的德罗兹多夫方程

Fig. 8 The fitted Rozdorff equation

根据前述得到的反应速率常数, 利用Arrhenius方程[式(8)]对  $\ln k_m$  和  $1/T$  进行线性拟合, 可求得萃取反应的表现活化能<sup>[14]</sup>。

$$\ln k_m = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

式中:  $A$  为频率因子;  $E_a$  为表现活化能, kJ/mol;  $R$  为气体常数, 8.314 kJ/mol;  $T$  为萃取温度, K。

萃取液吸收CO<sub>2</sub>的速率  $\ln k_m$  与  $1/T$  的关系如图9所示。由图9可见, 曲线的拟合度 ( $R^2$ ) 为 0.991 13, 拟合效果较好。计算结果显示, 表现活化能为 24.45 kJ/mol, 频率因子为 0.013。活化能反映化学反应速率, 活化能较大代表反应难进行、速率慢; 反之则反应速率快。因此, 活化能是判断多相反应控制步骤的重要指标。扩散控制的活化能小于 13 kJ/mol, 界面化学反应控制的活化能大于 40 kJ/mol, 而混合控制的活化能为 20 ~ 35 kJ/mol<sup>[15]</sup>。所以萃取液吸收CO<sub>2</sub>的反应速率由

化学反应与气液扩散控制。

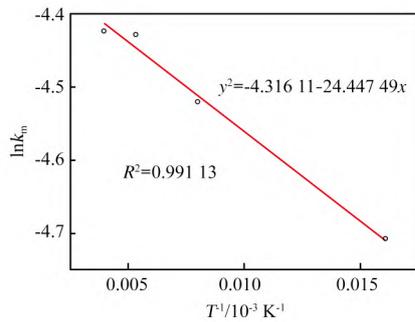


图 9  $\ln k_m$  与  $1/T$  的关系

Fig. 9 The relationship between  $\ln k_m$  and  $1/T$

## 2.6 产物性能分析

### 2.6.1 碳酸钙性能分析

使用 X 射线荧光光谱分析 (XRF) 对产物化学成分进行测量, 如表 3 所示。由表 3 可见, 碳酸钙产品中 CaO 质量分数达到 98.681%, 其次为少量的  $\text{SO}_3$ , 质量分数为 0.653%。工业用碳酸钙纯度一般要超过 98%, 因此该碳酸钙产品达到了一

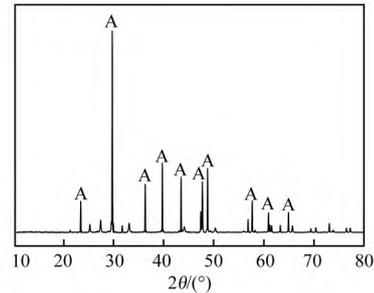
表 3 碳酸钙产品的主要化学成分 (质量分数)

Table 3 Main chemical composition of  $\text{CaCO}_3$  products %

CaO	$\text{SO}_3$	MnO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	MgO	Cl	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$
98.681	0.653	0.213	0.146	0.135	0.1	0.034	0.023	0.014

般工业的需求。

采用 SEM 和 XRD 表征  $\text{CaCO}_3$  颗粒性能, 结果如图 10 ~ 12 所示。由图 10 ~ 11 可见, 样品中  $\text{CaCO}_3$  为立方体颗粒并伴随少量的球形颗粒, 对应物相分别为方解石与球霏石, 而这两种矿物广泛运用于工业上。由图 12 的粒度分布分析结果可以得出, 碳酸钙产品  $< 0.075 \text{ mm}$  粒级占比为 93.6%, 满足各工业产品原材料的需求。

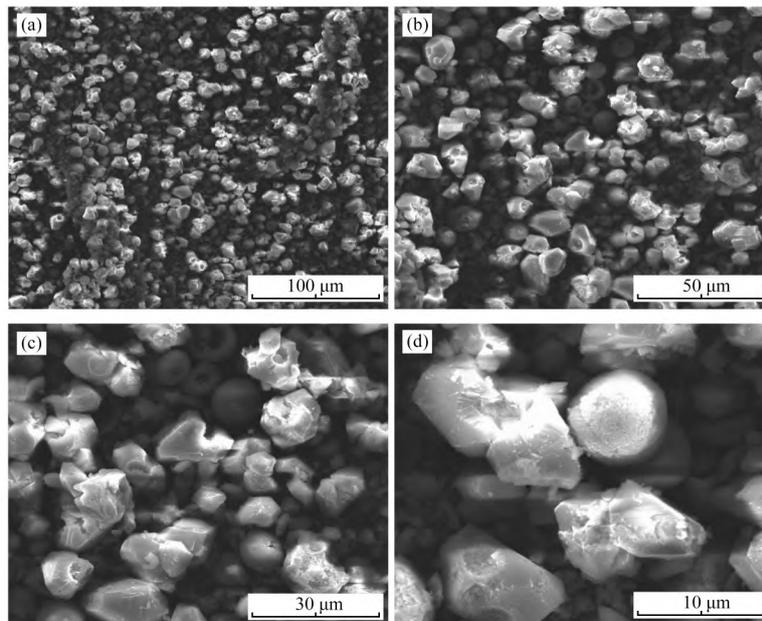


A— $\text{CaCO}_3$ 。

图 10 碳酸钙的 XRD 图谱

Fig. 10 XRD pattern of calcium carbonate

实验室制备的碳酸钙产品与一般工业用产品性能对比如表 4 所示。由表 4 可以看出, 实验室制备的碳酸钙产品皆达到一等品的要求, 甚至在个别指标达到了优等品的要求; 此外, 产品的黑点、 $w(\text{Pb})$ 、 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Hg})$ 、 $w(\text{Cd})$ 、 $w(\text{As})$  分



(a) 100  $\mu\text{m}$ ; (b) 50  $\mu\text{m}$ ; (c) 30  $\mu\text{m}$ ; (d) 10  $\mu\text{m}$

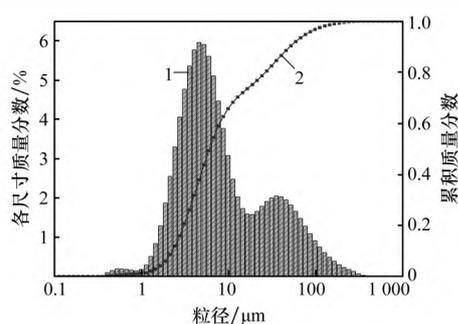
图 11 碳酸钙微观形貌

Fig. 11 Microstructure of calcium carbonate

表 4 产品指标对比

Table 4 Comparison of product indicators

项目	等级	$w(\text{CaCO}_3) / \%$	pH 值 (10% 悬浮物)	105 °C 挥发 物(质量 分数) / %	盐酸不溶 物(质量 分数) / %	沉降 体积/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	粒级占比 (质量分数) / %		白度/ %
							$\leq 125 \mu\text{m}$	$\leq 45 \mu\text{m}$	
橡胶和塑料 用原材料	优等品	$\geq 98.00$	9.0 ~ 10.0	$\leq 0.40$	$\leq 0.10$	$\geq 2.80$	100.0	80	$\geq 94.0$
	一等品	$\geq 97.00$	9.0 ~ 10.5	$\leq 0.50$	$\leq 0.20$	$\geq 2.40$	99.5	40	$\geq 92.0$
涂料用原材料	优等品	$\geq 98.00$	9.0 ~ 10.0	$\leq 0.40$	$\leq 0.10$	$\geq 2.80$	100.0	80	$\geq 95.0$
	一等品	$\geq 97.00$	9.0 ~ 10.5	$\leq 0.60$	$\leq 0.20$	$\geq 2.60$	99.5	40	$\geq 93.0$
造纸用原材料	优等品	$\geq 98.00$	9.0 ~ 10.0	$\leq 1.00$	$\leq 0.10$	$\geq 2.80$	100.0	80	$\geq 94.0$
	一等品	$\geq 97.00$	9.0 ~ 10.5	$\leq 1.00$	$\leq 0.20$	$\geq 2.60$	99.5	40	$\geq 92.0$
实验室产物	—	99.37	9.2	0.34	0.05	2.72	100.0	62	94.5



1—各尺寸质量分数; 2—累积质量分数。

图 12 碳酸钙产品粒度分布

Fig. 12 Particle size analysis of calcium carbonate products

别为 1 个/g 和 0.000 98%、0.000 24%、0、0、0，均优于 5 个/g 和 0.001 0%、0.000 5%、0.000 2%、0.000 2%、0.000 3% 的优等品要求。后续脱钙钢渣无论是回配烧结，还是用于制砖、用作人造鱼礁的原材料等均优于未经处理的钢渣。由此可知，本文所述工艺在捕获 CO<sub>2</sub> 的同时，还可以广泛适用于制备具有较高品质和附加值的材料，经济效益突出，具有广泛的应用前景。

### 3 结论

(1) 随着温度和时间的增加，碳酸化程度均呈现先增大后减少的趋势，而气流流量与之相反。当温度为 60 °C 时，碳酸化率达到最大值，为 66.76%；当反应时间为 22.5 min 时，碳酸化率达到最大值，为 68.03%；当气流流量为 0.7 L/min 时，碳酸化率最低为 53.35%，随后迅速提升。最佳的反应条件：时间为 22.5 min、温度为 60 °C、CO<sub>2</sub> 流量为 0.1 L/min。

(2) 碳酸化反应的表观活化能为 24.447 49 kJ/mol，频率因子为 0.013 3。萃取液吸收 CO<sub>2</sub> 的反应速率由化学反应与气液扩散控制。

(3) 碳酸钙产品的纯度达到 99.37%，含有少量的 SO<sub>3</sub> (0.653%)，<0.075 mm 粒级占比为 93.6%；碳酸钙的晶形结构主要为稳定的方解石与球霏石，满足各工业产品原材料的需求。

### 参考文献:

- [1] KODAMA S, NISHIMOTO T, YAMAMOTO N, et al. Development of a new pH-swing CO<sub>2</sub> mineralization process with a recyclable reaction solution [J]. Energy, 2008, 33(5): 776–784.
- [2] METZ B, DAVIDSON O, DE CONINCK H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 431.
- [3] TEIR S, TSUPARI E, KOLJONEN T, et al. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) [R]. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
- [4] PARK S. CO<sub>2</sub> reduction-conversion to precipitates and morphological control through the application of the mineral carbonation mechanism [J]. Energy, 2018, 153: 413–421.
- [5] LEE J S, CHOI E C. CO<sub>2</sub> leakage environmental damage cost: A CCS project in South Korea [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 753–758.
- [6] PANDEY S, SRIVASTAVA V C, KUMAR V. Comparative thermodynamic analysis of CO<sub>2</sub> based dimethyl carbonate synthesis routes [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2021, 99(2): 467–478.

- [7] KIM Y ,WORRELL E. International comparison of CO<sub>2</sub> emission trends in the iron and steel industry [J]. Energy Policy 2002 30( 10) : 827 – 838.
- [8] 徐润生 张雨晨 张建 等. 钢铁冶金固废固化 CO<sub>2</sub> 研究现状及趋势 [J]. 钢铁研究学报 ,2023 ,35 ( 7) : 779 – 789.  
XU Runsheng ZHANG Yuchen ZHANG Jianliang et al. Status and trends of steel metallurgical solid waste solidification CO<sub>2</sub> research [J]. Journal of Iron and Steel Research 2023 35( 7) : 779 – 789.
- [9] PAN S Y ,CHEN Y H ,FAN L S et al. CO<sub>2</sub> mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction [J]. Nature Sustainability 2020 3( 5) : 399 – 405.
- [10] LIU W Z ,TENG L M ,ROHANI S ,et al. CO<sub>2</sub> mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments [J]. Chemical Engineering Journal , 2021 416: 129093.
- [11] PARK A A , FAN L S. CO<sub>2</sub> mineral sequestration: Physically activated dissolution of serpentine and pH swing process [J]. Chemical Engineering Science 2004 , 59( 22/23) : 5241 – 5247.
- [12] XU R S ,ZHANG Y C ,ZHANG J L ,et al. Research on the leaching of calcium ions from de-vanadiumized steel slag for indirect CO<sub>2</sub> mineral sequestration: Thermodynamics , kinetics , and parameter optimization [J]. Metallurgical and Materials Transactions B ,2024 , 55( 2) : 877 – 890.
- [13] DE WINDT L ,CHAURAND P ,ROSE J. Kinetics of steel slag leaching: Batch tests and modeling [J]. Waste Management 2011 31( 2) : 225 – 235.
- [14] 黄小葳. 阿伦尼乌斯活化能的统计分析 [J]. 首都师范大学学报( 自然科学版) ,1995 ,16( 1) : 62 – 66.  
HUANG Xiaowei. Statistical thermodynamic analysis of Arrhenius activation energy [J]. Journal of Capital Normal University ( Natural Science Edition) ,1995 , 16( 1) : 62 – 66.
- [15] 金会心 李军旗 吴复忠. 含稀土磷矿酸解动力学及稀土浸出机理 [J]. 北京科技大学学报 2011 33( 9) : 1071 – 1078.  
JIN Huixin ,LI Junqi ,WU Fuzhong. Acidolysis kinetics and RE leaching mechanisms of RE-bearing phosphorite ores [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2011 33( 9) : 1071 – 1078.
- [29] 王琼. 含铁尘泥还原脱锌过程的研究 [D]. 唐山: 河北联合大学 2014.  
WANG Qiong. Research on zinc removal from metallurgy dust containing iron [D]. Tangshan: Hebei United University 2014.
- [30] WANG W A ,QIU G X ,WANG J L ,et al. Effect of CaO on zinc migration mechanism and kinetics during zinc ferrite reduction [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2023 33( 9) : 2832 – 2842.

( 上接第 140 页)

## 武汉科技大学资源与环境工程学院介绍

武汉科技大学资源与环境工程学院涵盖矿业工程、安全科学与工程、环境科学与工程、地理学四个一级学科; 拥有矿业工程、安全科学与工程两个一级学科博士点, 矿冶环境工程二级学科博士点; 建有矿业工程、安全科学与工程两个博士后流动站。矿业工程学科入选湖北省“双一流”国内一流学科建设。学院拥有“国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室”、“冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室”等科研机构, 设有矿物加工工程、资源工程、安全科学与工程、环境科学与工程四个系和矿业工程实验中心、安全工程实验中心、环境工程教学示范中心。学院学科设置具有明显交叉优势, 在特色钒资源高效提取与深加工、矿物深加工及精细加工、深部地下金属矿山开采及灾害防控、矿山安全与灾害防治、矿冶过程工艺减排及资源再生利用、工业烟气污染控制、矿冶生态环境修复理论与技术、矿冶废水处理与资源化等方面的理论研究与工程应用具有鲜明特色。近年来, 获得国家科技进步二等奖 2 项、国家技术发明二等奖 1 项, 省部级技术发明、科技进步一等奖及其他科技成果奖 26 项, 获国家授权专利 160 余件, 承担国家“863”计划、国家科技支撑计划、国家重大研发计划项目、国家自然科学基金及其他国家级科研项目 56 项; 承担各类横向科研 600 余项; 在国内外期刊发表学术论文 1200 余篇, 其中 SCI、EI 收录近 460 篇; 出版学术专著 18 部。