

文章编号:1007-9629(2024)10-0955-07

# 钢渣高效碳化及无定形二氧化硅制备

徐明超, 郑克仁\*, 张禛庆, 陈 楼, 元 强

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**针对钢渣利用率低、处理方法效果差等问题,提出了一种以 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液为介质的钢渣高效碳化方式.研究了最佳反应参数,并对碳化产物及制备的二氧化硅进行了表征.结果表明:通过调控 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度、反应温度、液固比、反应时间等参数,钢渣可以达到最大碳化程度78.60%;钢渣中硅酸盐相中的钙可以充分碳化,但存在于RO相-硅酸盐相固溶体中的钙碳化受限;可实现55.46%的二氧化硅提取率,提取制备得到的无定形二氧化硅纯度高达98.79%.研究结果为钢渣的固碳高值化利用提供了方向.

**关键词:**钢渣;碳化; $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液;二氧化硅

中图分类号:TU521.4

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.011

## High-Efficiency Carbonation of Steel Slag and Preparation of Amorphous Silica

XU Mingchao, ZHENG Keren\*, ZHANG Zhenqing, CHEN Lou, YUAN Qiang

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low utilization rate and poor treatment effect of steel slag, an efficient carbonation method of steel slag using  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution as the medium was proposed. The optimal reaction parameters were investigated, the carbonation products and the silica prepared were characterized. The results indicate that by adjusting parameters such as  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution concentration, reaction temperature, liquid-solid ratio and reaction time, the maximum carbonation degree of steel slag can reach 78.60%. Silicate phases in the steel slag can be completely carbonized, but the carbonation of calcium present in the RO phase (continuous solid solution mainly composed of FeO and MgO)-silicate phase solid solution in steel slag is limited. The extraction rate of 55.46% for silica can be achieved, with a purity of extracted amorphous silica gel as high as 98.79%. The research result provides a direction for the high-value utilization of steel slag.

**Key words:** steel slag; carbonation;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution; silica

钢铁产业在中国经济中起支柱作用.2022年,全球粗钢产量为18.85亿t,其中中国粗钢产量占比54.0%,成为全球第一钢铁生产国.在中国,每生产1t钢便有0.15~0.25t钢渣产生.目前,中国钢渣的累计堆存量已超过11亿t,但因钢渣中f-CaO和f-MgO含量较高,使其在使用时存在显著的安定性不良问题<sup>[1]</sup>,导致其利用率不足30%<sup>[2]</sup>.大量积压的

钢渣不仅浪费土地资源,而且会对环境构成威胁<sup>[3]</sup>,因此急需寻求一种新的钢渣处理方法.

作为大宗碱性固体废弃物,钢渣中高含量的碱性氧化物(CaO、MgO等)使其具有良好的 $\text{CO}_2$ 捕集和封存能力<sup>[4]</sup>.现有的钢渣直接碳化方法主要包括干法、半干法和湿法碳化.干法/半干法碳化方法虽然操作简单,但是碳化过程中会形成硅质钝化层从而

收稿日期:2024-03-08; 修订日期:2024-05-20

基金项目:中国建材集团关键核心技术攻关“揭榜挂帅”项目(2021HX0506)

第一作者:徐明超(2000—),男,河南光山人,中南大学硕士生.E-mail:214811033@csu.edu.cn

通讯作者:郑克仁(1970—),男,湖南隆回人,中南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhengkeren@csu.edu.cn

限制钢渣的反应速率,导致碳化程度较低<sup>[5-6]</sup>.传统湿法碳化虽然能提高钢渣的反应速率及碳化程度,但是碳化后的钢渣用于建筑材料领域时的性能仍不理想.钢渣中的硅酸盐相矿物( $\beta$ - $C_2S$ 、 $C_3S$ )在碳化作用下会形成碳酸钙、硅胶等产物<sup>[7]</sup>.碳化产物硅胶可以溶于碱性溶液中<sup>[8]</sup>,因此可以利用碱性溶液对硅胶进行有效分离.所提取的硅胶也可进一步作为硅基材料实现高值化利用.

鉴于此,本文提出了一种新的矿物碳化方法,以 $Na_2CO_3$ 溶液为介质,通过湿法碳化对钢渣进行碳化处理,系统研究了不同反应参数对钢渣碳化性能的

影响,对碳化产物进行了分析表征,并成功提取了高纯度的无定形二氧化硅.这一研究不仅为钢渣的低碳处理提供了新的途径,还实现了钢渣中硅相的高值化利用,扩大了钢渣的应用领域.

## 1 试验

### 1.1 原材料

钢渣(SS)为江西省某炼钢企业的碱性氧气转炉(BOF)钢渣,通过破碎、粉磨、筛分得到粒径小于200  $\mu m$ 的粉末.钢渣的粒径分布及物相组成如图1所示,由X射线荧光分析(XRF)测定的化学组成<sup>1)</sup>见表1.

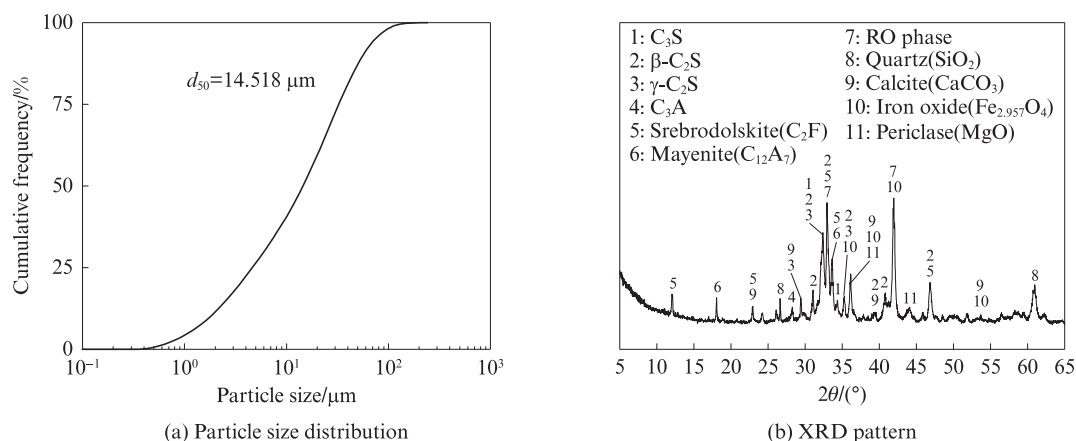


图1 钢渣的粒径分布及物相组成  
Fig. 1 Particle size distribution and phase composition of SS

表1 钢渣的化学组成  
Table 1 Chemical composition (by mass) of SS

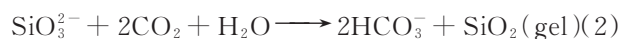
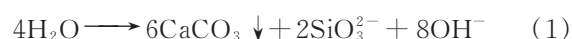
Unit: %											
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	IL
39.89	18.77	4.15	0.92	17.17	5.00	0.17	1.43	5.32	2.50	0.14	3.36
											1.18

$Na_2CO_3$ 试剂为分析纯,纯度大于99.8%. $HNO_3$ 溶液,分析纯,含量为65.0%~68.0%,使用时稀释至1 mol/L.试验用水为去离子水,在25  $^{\circ}C$ 下电阻率约为18.2  $M\Omega \cdot cm$ .

### 1.2 湿法碳化流程及反应参数设计

本文采用 $Na_2CO_3$ 溶液对钢渣进行湿法碳化,其流程如图2所示.首先,在玻璃瓶中配置不同浓度的 $Na_2CO_3$ 溶液,将装有100 mL  $Na_2CO_3$ 溶液的玻璃瓶置于恒温磁力搅拌器中,加入不同质量的钢渣(以配置不同的液固比)进行搅拌,反应至规定时间后过滤得到碳化产物及溶液1,化学反应见式(1).然后,用去离子水多次洗涤碳化产物并过滤,得到碳化钢渣(carbonated steel slag, CSS);同时,在溶液1中不断通入 $CO_2$ 气体,直至溶液pH值降至10左右并稳定,化学

反应见式(2),通过离心、酸洗/水洗获得含硅凝胶及溶液2,含硅凝胶经异丙醇洗涤、干燥后获得二氧化硅.

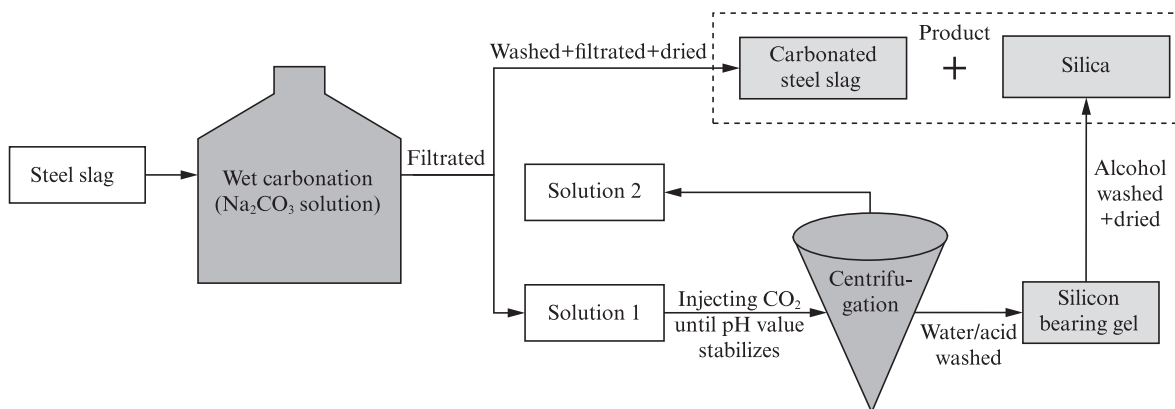


为探究 $Na_2CO_3$ 溶液湿法碳化钢渣的最佳反应参数,设计了不同的 $Na_2CO_3$ 溶液浓度 $c$ (0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 mol/L)、反应温度 $\theta$ (20、40、60  $^{\circ}C$ )、液固比 $L/S$ (2~24 mL/g)和反应时间 $t$ (10~1 440 min),分析钢渣在各反应参数下的碳化程度及性能演变规律.碳化时采用集热式恒温磁力搅拌器持续搅拌,搅拌速率为700 r/min.

### 1.3 测试方法

采用Mettler-Toledo TGA2热分析仪进行热重

1)文中涉及的组成、含量等除特别说明外均为质量分数.

图2  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液湿法碳化流程Fig. 2 Wet carbonation process with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution

分析,温度测试范围为35~950℃.碳化钢渣样品中 $\text{CO}_2$ 含量 $w(\text{CO}_2)$ 、 $\text{CO}_2$ 吸附量 $w_a$ 及钢渣碳化程度 $\mu$ 的计算方法分别如式(3)~(5)所示.

$$w(\text{CO}_2) = \frac{\Delta m}{m_{105}} \times 100\% \quad (3)$$

$$w_a = \frac{w_2 - w_1}{1 - w_2} \times 100\% \quad (4)$$

$$\mu = \frac{w_a}{w_1 \times M(\text{CO}_2)/M(\text{CaO})} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\Delta m$ 为碳化钢渣样品在520~800℃下由于碳酸钙分解导致的质量损失<sup>[9]</sup>;  $m_{105}$ 为样品在105℃时的质量;  $w_2$ 、 $w_1$ 分别为CSS、SS中 $\text{CO}_2$ 的含量;  $w_1$ 为SS中CaO的总含量,39.89%;  $M(\text{CaO})$ 为CaO的摩尔质量,56 g/mol;  $M(\text{CO}_2)$ 为 $\text{CO}_2$ 的摩尔质量,44 g/mol.

采用pH计监测反应溶液中pH值变化.二氧化硅提取率 $\eta$ 的计算式如式(6)所示.

$$\eta = \frac{(c_1 - c_2) \times M(\text{SiO}_2) \times L/S}{1000 \times w_1(\text{SiO}_2)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $w_1(\text{SiO}_2)$ 为SS中 $\text{SiO}_2$ 的总含量,18.77%;  $c_1$ 、 $c_2$ 分别为溶液1、2中的Si元素浓度, mol/L;  $M(\text{SiO}_2)$ 为 $\text{SiO}_2$ 的摩尔质量,60 g/mol.

采用等离子耦合原子发射光谱技术(ICP-OES)测定溶液中Si元素的含量.采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试二氧化硅的结构,透射扫描波数范围为4000~400  $\text{cm}^{-1}$ .使用X射线衍射仪(XRD)测试碳化产物及所提取二氧化硅的物相组成,采用扫描电镜-背散射电子成像(SEM-BSE)分析碳化后钢渣微观形貌的变化.

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应参数对钢渣碳化的影响

#### 2.1.1 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度

为探究 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液湿法碳化钢渣的最佳反应

制度,本文研究了 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度、反应温度、液固比和反应时间对钢渣碳化性能的影响.根据测得的热重分析数据,由式(3)~(5)计算得出钢渣碳化程度,将其作为确定最佳碳化反应参数的依据,结果见图3.

图3(a)为钢渣在不同 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度下的碳化程度.其中 $\theta=40^\circ\text{C}$ ,  $L/S=4 \text{ mL/g}$ ,  $t=2 \text{ h}$ .由图3(a)可知,随着 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度的增加,钢渣的碳化程度增大.当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度从0.5 mol/L增加至2.5 mol/L时,钢渣的碳化程度呈线性增加,从10.20%增长至27.66%.其原因在于溶液浓度的增加增强了反应物分子间的碰撞频率,加快了 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{CO}_3^{2-}$ 的结合速率,促进了碳化反应的进行<sup>[10]</sup>.然而,当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液浓度从2.5 mol/L增加至3.0 mol/L时,碳酸钙分解峰值无明显增加,钢渣碳化程度的增长速度趋缓.这可能是由于溶液浓度较高时,反应物分子间的空间障碍和相互排斥作用限制了反应速率的增长<sup>[10-11]</sup>.因此,取2.5 mol/L为 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液的最佳浓度,在此浓度下,钢渣的碳化程度为27.66%, $\text{CO}_2$ 吸附量为8.67%.

#### 2.1.2 反应温度

在确定2.5 mol/L为 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液的最佳浓度后,保持 $L/S=4 \text{ mL/g}$ ,  $t=2 \text{ h}$ ,研究了不同温度(20、40、60℃)对钢渣碳化程度的影响,结果如图3(b)所示.由图3(b)可知,钢渣的碳化程度随着反应温度的增加呈现先增长后减小的趋势.温度的升高会加快钢渣中 $\text{Ca}^{2+}$ 的溶出速率;同时,碳酸盐的溶解度随温度升高而降低,从而加快了碳酸钙的沉淀<sup>[12]</sup>,促进了碳化反应的进行.当反应温度为40℃时,钢渣中钙的浸出率最高,钢渣的碳化程度最大,为27.66%.然而,当温度继续升高时, $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的水溶性会降低,并且 $\text{CO}_3^{2-}$ 会转化为

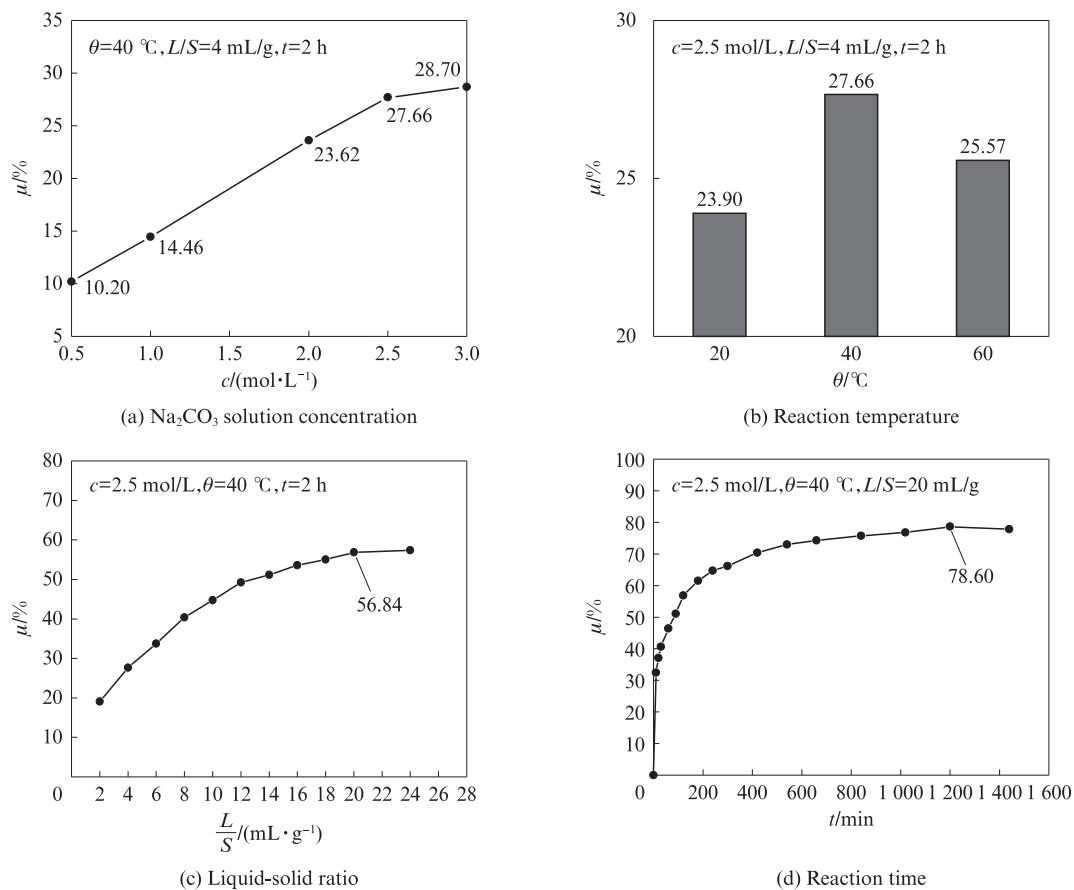


图3 反应参数对钢渣碳化程度的影响

Fig. 3 Effect of reaction parameters on carbonation degree of SS

$\text{HCO}_3^-$ ,从而降低了反应速率.因此,钢渣的最佳反应温度为40℃.

### 2.1.3 液固比

图3(c)为钢渣碳化程度随液固比的变化,其中 $c=2.5 \text{ mol/L}$ , $\theta=40^\circ\text{C}$ , $t=2 \text{ h}$ .由图3(c)可以看出,钢渣的碳化程度随着液固比的增加而增加,但增长速率逐渐减小.在湿法碳化中,液固比主要影响钢渣中钙的溶出.液固比的增加会促进钙离子的溶出,从而促进碳化反应的进行<sup>[13]</sup>.因此,当液固比从2 mL/g增加至20 mL/g时,碳化程度从19.07%增加至56.84%.而当液固比进一步增加时,钢渣碳化程度并无明显增长.这表明液固比为20 mL/g时,单位质量的钢渣所需的溶液已达到饱和.

### 2.1.4 反应时间

在最佳碳化反应条件( $c=2.5 \text{ mol/L}$ , $\theta=40^\circ\text{C}$ , $L/S=20 \text{ mL/g}$ )下,研究了碳化时间对钢渣碳化程度的影响,结果如图3(d)所示.由图3(d)可以看出,钢渣碳化程度随着碳化时间的增加持续增长.在碳化初期,由于钢渣中钙镁离子的大量解离,碳化反应迅速进行,碳化程度增长幅度较大.随着碳化时间的增加,钢渣中纯硅酸盐相( $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ )逐渐碳化完全,

由于钢渣中的RO相(主要由FeO与MgO形成的连续固溶体)与大粒径硅酸盐相所形成的固溶体难以碳化<sup>[14]</sup>,导致钢渣碳化效率随时间增加而逐渐降低,碳化程度增加缓慢.在20 h时钢渣达到最大碳化程度78.60%,此后再延长反应时间则钢渣的碳化程度基本不再增加.

综上所述,可以确定 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液湿法碳化钢渣的最佳反应参数为: $c=2.5 \text{ mol/L}$ , $\theta=40^\circ\text{C}$ , $L/S=20 \text{ mL/g}$ , $t=20 \text{ h}$ .在此参数下钢渣可以达到最大碳化程度78.60%, $\text{CO}_2$ 吸附量为24.63%.

## 2.2 碳化钢渣的矿物组成与微观形貌

通过改变液固比与反应时间,得到了2种碳化程度的钢渣(见表2).其中CSS-1、CSS-2分别表示碳化程度为27.66%、70.42%的碳化钢渣.

表2 钢渣及2种碳化程度下碳化钢渣的反应制度  
Table 2 Carbonation conditions for SS and CSS under different carbonation degrees

Code	Carbonation parameter	$\mu/\%$
SS		0.50
CSS-1	$c=2.5 \text{ mol/L}$ , $\theta=40^\circ\text{C}$ , $L/S=4 \text{ mL/g}$ , $t=2 \text{ h}$	27.66
CSS-2	$c=2.5 \text{ mol/L}$ , $\theta=40^\circ\text{C}$ , $L/S=20 \text{ mL/g}$ , $t=7 \text{ h}$	70.42



### 2.2.1 矿物组成

图4为不同碳化程度下钢渣的XRD图谱.从图4中可以看出,经过碳化处理后,钢渣中 $C_3S$ 及 $C_2S$ 等硅酸盐相的衍射峰强度明显降低,方解石的衍射峰

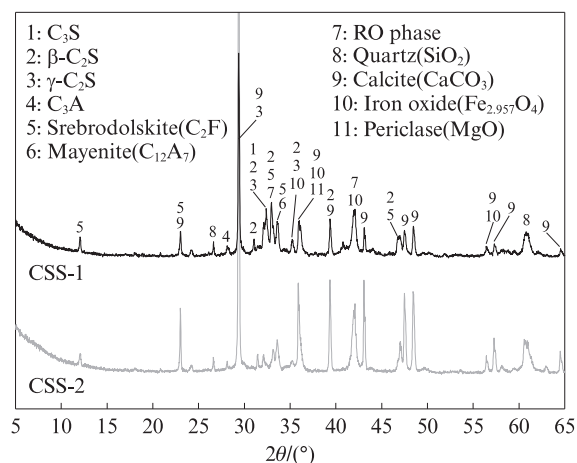


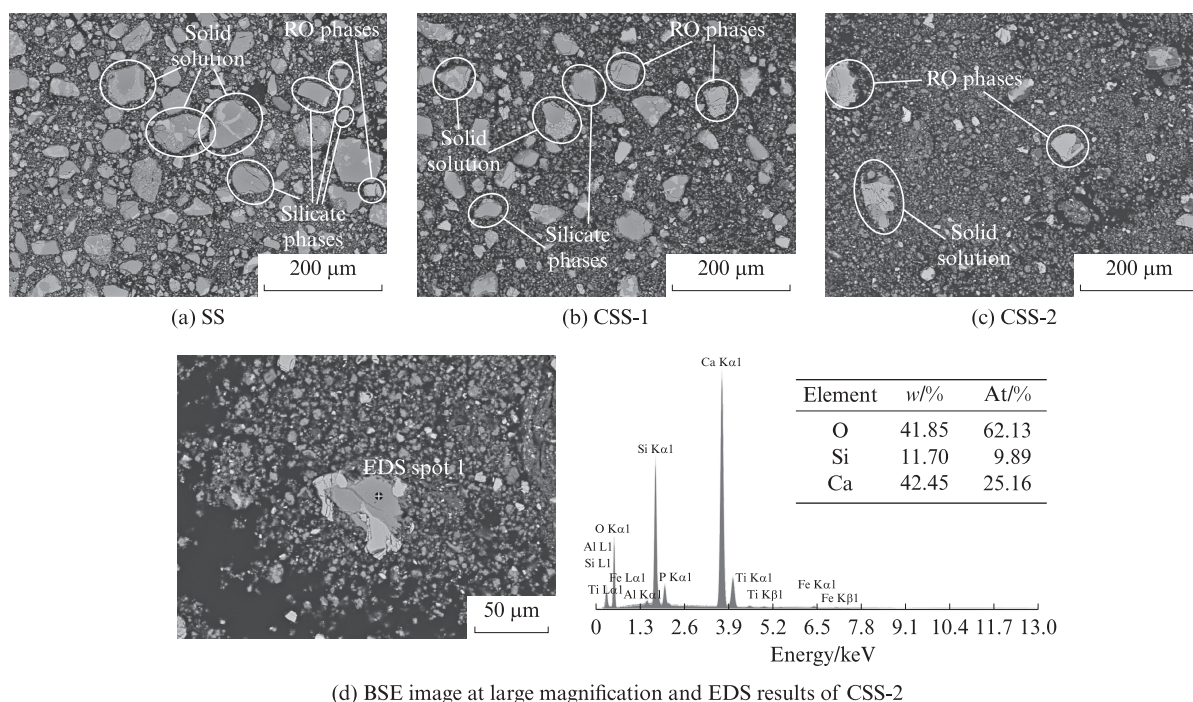
图4 CSS-1和CSS-2的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of CSS-1 and CSS-2

显著增强,且碳化程度越高,方解石的衍射峰强度越高.这与相关文献类似<sup>[15]</sup>,且XRD图谱中只观察到方解石的衍射峰,而无文石及球霏石.

### 2.2.2 微观形貌

图5为不同碳化程度下钢渣的SEM-BSE照片.由图5可知,未碳化钢渣颗粒边缘光滑完整,硅酸盐相所占比例较高.经过本文湿法碳化处理后,碳化钢渣CSS-1中大颗粒的硅酸盐相矿物转变为更小粒径的碳酸钙.碳化过程中的持续搅拌使钢渣表面生成的碳化产物可以及时剥离,钢渣颗粒表面几乎未形成碳化层,从而有效地提高了钢渣的碳化效率.当碳化程度增加到70.42%时,碳化钢渣CSS-2中大部分硅酸盐相已被完全碳化,仅残留纯RO相及碳化难度较大的RO相-硅酸盐相固溶体.图5(d)的结果证实,在碳化钢渣CSS-2颗粒中,存在硅酸盐相被RO相部分环绕的固溶体,表明RO相-硅酸盐相固溶体的存在,限制了钢渣碳化程度的提升.



(d) BSE image at large magnification and EDS results of CSS-2

图5 不同碳化程度下钢渣的SEM-BSE照片

Fig. 5 SEM-BSE images of SS under different carbonation degrees

### 2.3 基于钢渣碳化的二氧化硅制备

通过XRF对 $Na_2CO_3$ 溶液湿法碳化(图2)提取的二氧化硅进行表征.分析可知,水洗产物是铝硅质凝胶与钠盐的混合物,表明在湿法碳化过程中,钢渣中部分硅相和铝相溶解在溶液中.而酸洗产物中二氧化硅的纯度更高,这是因为酸洗将钢渣中的钠、铝和其他金属元素清洗掉了,所以二氧化硅纯度可达98.79%.

通过控制碳化反应条件制备了3种碳化程度(27.66%, 70.42%, 78.60%)的钢渣,其中78.60%为最大碳化程度,对应碳化钢渣记作Max.经式(6)计算得到不同碳化程度下二氧化硅的提取率,如表3所示.由表3可知,二氧化硅提取率与钢渣碳化程度成正比,碳化程度最大时,二氧化硅提取率为55.46%.

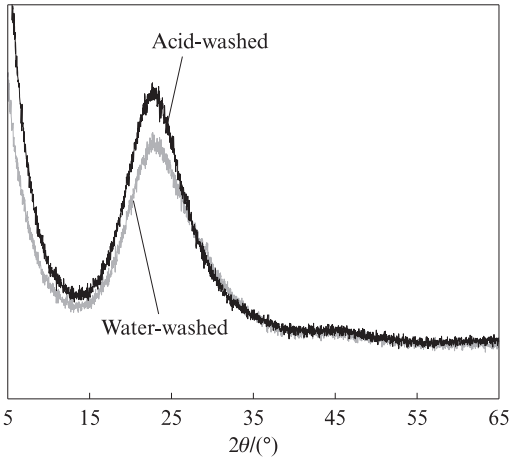
对酸洗和水洗提取的含硅凝胶进行了XRD及

表 3 不同碳化程度下钢渣中二氧化硅提取率  
Table 3 Extraction rate of silica gel in steel slag with different carbonation degrees

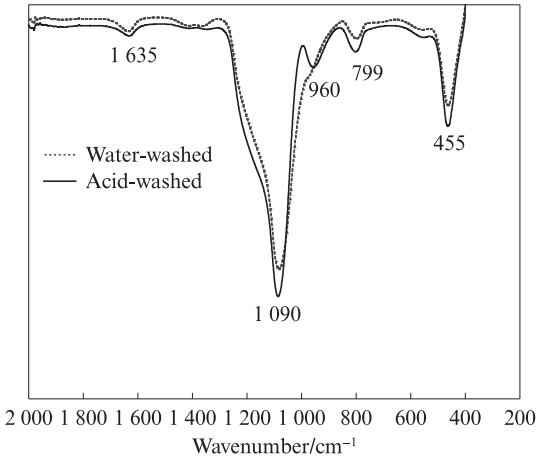
Code	$\mu/\%$	$\eta/\%$
CSS-1	27.66	22.49
CSS-2	70.42	51.71
Max	78.60	55.46

FTIR 测试,结果见图 6.由图 6(a)可见:(1)在 XRD 图谱中 23°处有典型的宽峰,这表明该含硅凝胶为无

定形结构.(2)FTIR 光谱中 1 635  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰代表二氧化硅中—OH 的伸缩振动,表明含硅凝胶中存在吸附的水分子<sup>[16]</sup>;而 1 090、799、455  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别对应了 Si—O—Si 键的反对称振动、对称振动和弯曲振动<sup>[8, 17-18]</sup>.(3)值得注意的是,酸洗产物在 960  $\text{cm}^{-1}$ 处出现了一 Si—OH 的吸收峰.(4)水洗和酸洗产物均展现出与纯二氧化硅相同的特征峰<sup>[19-21]</sup>,表明提取的硅胶均为高纯度的无定形二氧化硅凝胶,且酸洗后的硅胶纯度更高.



(a) XRD patterns



(b) FTIR spectra

图 6 含硅凝胶表征

Fig. 6 Silicon bearing gel characterization

3 结论

(1)采用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液湿法碳化钢渣时,在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液浓度为 2.5 mol/L、反应温度为 40  $^\circ\text{C}$ 、液固比为 20 mL/g、反应时间为 20 h 的条件下,钢渣的碳化程度最大,为 78.60%, $\text{CO}_2$  吸附量为 24.63%。  
(2)湿法碳化后,钢渣中硅酸盐相矿物转变为更小粒径的方解石型碳酸钙,钢渣周围无明显的碳化产物层.低碳化活性的 RO 相—硅酸盐相固溶体等依然残留在钢渣中,制约了钢渣碳化程度的提升。  
(3)通过本文方法提取出了纯度高达 98.79% 的无定形二氧化硅,经检测其具有与纯二氧化硅相同的结构,为钢渣的高值化利用提供了依据.

参考文献:

[ 1 ] 谢智超,汪保印,蒋正武. 钢渣骨料混凝土体积安定性及其抑制效果评价[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10):1077-1085.  
XIE Zhichao, WANG Baoyin, JIANG Zhengwu. Influence of steel slag aggregate on volume stability of concrete and its inhibitory effect[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10): 1077-1085. (in Chinese)

[ 2 ] GUO J L, BAO Y P, WANG M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste Management, 2018, 78: 318-330.  
[ 3 ] 杨刚,李辉,陈华. 钢渣微粉对重金属污染土壤的修复及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2):318-322.  
YANG Gang, LI Hui, CHEN Hua. Remediation of heavy metals contaminated soil by steel slag powder and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):318-322. (in Chinese)  
[ 4 ] WANG L, CHEN L, PROVIS J L, et al. Accelerated carbonation of reactive MgO and Portland cement blends under flowing  $\text{CO}_2$  gas[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106:103489.  
[ 5 ] BÉARAT H, MCKELVY M J, CHIZMESHYA A V, et al. Carbon sequestration via aqueous olivine mineral carbonation: Role of passivating layer formation[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(15):4802-4808.  
[ 6 ] LIU G, TANG Y J, WANG J Y. Effects of carbonation degree of semi-dry carbonated converter steel slag on the performance of blended cement mortar—Reactivity, hydration, and strength[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63:105529.  
[ 7 ] MAHOUTIAN M, GHOULEH Z, SHAO Y X. Carbon dioxide activated ladle slag binder[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66:214-221.  
[ 8 ] MA Z H, LIAO H Q, PAN Z H, et al. Insights into coproduction of silica gel via desulfurization of steel slag and silica gel adsorption

- performance[J]. ACS Omega, 2022, 7(24):21062-21074.
- [9] WANG D C, NOGUCHI T, NOZAKI T, et al. Investigation of the carbonation performance of cement-based materials under high temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272:121634.
- [10] WANG F, DREISINGER D, JARVIS M, et al. Kinetics and mechanism of mineral carbonation of olivine for CO<sub>2</sub> sequestration[J]. Minerals Engineering, 2019, 131:185-197.
- [11] WARD C A. Effect of concentration on the rate of chemical reactions[J]. Journal of Chemical Physics, 1983, 79(11):5605-5615.
- [12] 林伟青, 周方圆, 罗文君, 等. 养护温度对白云岩碱激发净浆断裂性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(7):672-676, 729. LIN Weiqing, ZHOU Fangyuan, LUO Wenjun, et al. Effect of curing temperature on fracture performance of dolomite-based alkali-activated paste[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):672-676, 729. (in Chinese)
- [13] 彭晖, 李一聪, 罗冬, 等. 碱激发偏高岭土/矿渣复合胶凝体系反应水平及影响因素分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1390-1397. PENG Hui, LI Yicong, LUO Dong, et al. Analysis of reaction level and factors of alkali activated metakaolin/GGBFS[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1390-1397. (in Chinese)
- [14] WANG Y, LIU J H, HU X, et al. Utilization of accelerated carbonation to enhance the application of steel slag: A review[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2023, 12(4):471-486.
- [15] MA M T, MEHDIZADEH H, GUO M Z, et al. Effect of direct carbonation routes of basic oxygen furnace slag (BOFS) on strength and hydration of blended cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304:124628.
- [16] MURALIDHARAN M N, RASMITHA C A, RATHEESH R. Photoluminescence and FTIR studies of pure and rare earth doped silica xerogels and aerogels[J]. Journal of Porous Materials, 2009, 16(6):635-640.
- [17] 刘松辉, 张海波, 管学茂, 等. 钠离子对硅酸二钙碳化产物的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):956-962. LIU Songhui, ZHANG Haibo, GUAN Xuemao, et al. Effect of sodium ions on carbonation products of dicalcium silicate[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):956-962. (in Chinese)
- [18] 张挺, 孙振平, 杨海静, 等. 利用废弃玻璃制备气凝胶及其改性膨胀珍珠岩在砂浆中的应用[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(12):1279-1285. ZHANG Ting, SUN Zhenping, YANG Haijing, et al. Preparation of aerogel from waste glass and its application of modified expanded perlite in mortar[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(12):1279-1285. (in Chinese)
- [19] GUZEL KAYA G, YILMAZ E, DEVECI H. Synthesis of sustainable silica xerogels/aerogels using inexpensive steel slag and bean pod ash: A comparison study[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(3):926-936.
- [20] CHEN Q W, LI X G, ZHANG Y H, et al. Ferroelectric properties of porous silicon[J]. Advanced Materials, 2002, 14(2):134-137.
- [21] SHAWKY S M, ABO-ALHASSAN A A, LILL H, et al. Efficient loading and encapsulation of anti-tuberculosis drugs using multifunctional mesoporous silicate nanoparticles[J]. Journal of Nanosciences: Current Research, 2016, 1(1):1000103.