

文章编号:1007-9629(2025)02-0153-08

多种富钙材料的碳化性能及其关键影响因素

张琪^{1,2}, 冯攀^{1,2,*}, 沈叙言^{1,2}, 洪锦祥³

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏南京 211189; 2. 东南大学江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏南京 211189; 3. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 江苏南京 211103)

摘要:通过 X 射线衍射仪、傅里叶变换红外光谱仪和热重分析仪表征了钢渣、硅酸三钙(C₃S)和电石渣 3 种富钙材料的固碳能力;分析了其碳化体系的 pH 值变化;通过扫描电子显微镜和纳米压痕仪测试了 3 种材料碳化前后的微观形貌和力学性能。结果表明:富钙材料的固碳能力与其化学组成,尤其是其可溶解钙有直接的关系,可溶解钙含量最高的电石渣具有最高的固碳能力;而碳化后的力学性能则取决于碳化产物的微观力学性能以及原材料与碳化产物的堆积形态,微观形貌粗糙的钢渣和 C₃S 更易与碳化产物紧密堆积,碳化后微观力学性能增强;但碳化产物难以填充在片状的电石渣空隙中,碳化后电石渣的微观力学性能减弱。

关键词:富钙材料;固碳能力;物相分析;pH 值;微观形貌;微观力学性能

中图分类号:TU526

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.008

Carbonation Properties and Key Influencing Factors of Calcium-Rich Materials

ZHANG Qi^{1,2}, FENG Pan^{1,2,*}, SHEN Xuyan^{1,2}, HONG Jinxiang³

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: The carbon sequestration capacity of three calcium-rich materials, namely steel slag, tricalcium silicate (C₃S) and carbide slag, was characterized by X-ray diffractometer, Fourier transform infrared spectrometer and thermal gravimetric analyzer. The pH value of carbonation system was measured. The micro-morphology and mechanical properties of before and after carbonation were measured by scanning electron microscope SEM and nano-indentation. The results show that the carbon sequestration ability is directly related to the chemical composition of the materials, especially the soluble calcium content. The carbide slag with the highest soluble calcium content has the highest carbon sequestration ability. The mechanical properties after carbonation depend on the micro-mechanical properties of carbonation products and the accumulation form of raw materials and carbonation products. Steel slag and C₃S with rough micro-structure are more likely to be closely packed with carbonation products, and the micro-mechanical properties are enhanced after carbonation. However, the carbonation products are difficult to fill in the void of flake carbide slag particles, hence the micro-mechanical properties of carbide slag are weakened after carbonation.

Key words: calcium-rich material; carbon sequestration capacity; phase analysis; pH value; micro-morphology; micro-mechanical property

收稿日期:2024-02-03;修订日期:2024-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52122802,52078126);江苏省科技计划专项基金(前沿技术基础研究)重大项目(BK20222004);江苏省科学技术厅创新支撑计划(BZ2022036)

第一作者:张琪(1997—),女,辽宁大连人,东南大学博士生.E-mail:230228625@seu.edu.cn

通讯作者:冯攀(1988—),女,重庆人,东南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:pan.feng@seu.edu.cn

目前,中国水泥生产过程中的碳排放量占全国总碳排放量的8%~9%^[1],因此,推动水泥行业的“碳中和”对推进中国“双碳”战略的实现至关重要.早在20世纪70年代,国外研究者就提出了利用水泥捕获CO₂的概念^[2],即将水泥基材料置于CO₂氛围中,CO₂扩散至水泥基材料内部溶解为CO₃²⁻或HCO₃⁻,并与熟料或者水化产物析出的钙/镁离子反应生成碳酸盐,从而将CO₂长久封存在水泥基材料中^[3-4].中国的固体废弃物堆存量超过60亿吨^[5],亟需处置.很多固废中含有较多的钙/镁,有望与CO₂反应^[6-7],具有储存CO₂的巨大潜力.Li等^[8]以电石渣代替石灰制备了CO₂固化建筑材料,该材料能够吸收20%的CO₂且具有结构用途.据估算,如果将每年产生的固废全部用来吸收CO₂,那么几乎可以将当年生产水泥所排放的CO₂全部抵消^[9].

有研究^[10]表明,碳化产物尺寸较小,可以填充水泥基材料的孔隙使材料的结构密实;Mu等^[11]和Liu等^[12]分别研究了碳化硅酸二钙(γ -C₂S)和碳化钢渣的微观结构,观察到碳化产物包裹在未碳化颗粒外层,形成了“核-壳结构”,显著降低了材料的孔隙率.因此,碳化处理可以提升水泥基材料的力学与耐久性

能^[13].含固废的水泥基材料的碳化及其对水泥基材料性能的影响已经引起了广泛关注.然而,目前的研究通常针对某一种水泥基材料碳化处理.由于材料的固有属性(如化学成分、物相组成等)并不相同,不同水泥基材料的固碳能力和碳化改性效果有所不同^[9].

本文以钢渣、硅酸三钙(C₃S)和电石渣3种富钙材料为代表,在有/无液态水的情况下对3种材料进行碳化处理,探究3种材料碳化行为的差异,分析其固碳能力及碳化增强性能的影响因素与作用机理,有望为选择具有高固碳能力和优异碳化增强性能的富钙材料提供依据.

1 材料与方法

1.1 原材料

钢渣(SS)由山西省某钢铁厂提供;C₃S为参考文献[14]中的固相烧结法在实验室烧制而成的单矿;电石渣(CS)由广东省美仕博公司提供.为了尽可能避免比表面积和粒径分布对碳化反应的影响,将原材料研磨后筛分以获得比表面积和粒径分布相近的粉末,其主要化学组成(质量分数,文中涉及的组成、固液比等均为质量分数或质量比)如表1所示.

表1 钢渣、C₃S和电石渣的主要化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of steel slag, C₃S and carbide slag

Raw material	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	Other	IL
Steel slag	37.35	17.92	24.66	6.25	4.25	4.82	1.71	1.03	2.01
C ₃ S	66.51	18.63	3.34	2.25	4.28	0.15	0.13	3.96	0.75
Carbide slag	68.34	3.07	0.50	0.16	1.74	0.01		1.49	24.69

1.2 碳化制度

将约2g原材料分别放入直径4cm、高2cm的聚四氟乙烯盒中,设置液固比(m_L/m_S)分别为0、0.15,使用去离子水拌和并制备样品,随后将其放入CO₂质量分数为40%、相对湿度(RH)为60%、25℃的碳化箱中碳化处理1d;取出样品并放入真空干燥箱中干燥3d,之后研磨成粒径小于0.075mm的粉末,密封保存,用于后续测试.每组试验重复3次.具体的试验分组及样品编号如表2所示.

1.3 测试方法

利用Bruker D8 Discover型X射线衍射仪(XRD)、Nicolet iS10型傅里叶红外光谱仪(FTIR)和TA TGA 550型热分析仪(TG/DTG)测定碳化前后样品的物相组成.在XRD测试中,样品中掺入质量分数为20%的 α -Al₂O₃作为内标物质,与适量异丙醇湿磨并混合均匀后真空干燥2d再进行测试,并使用Tomas软件定量分析物相含量.

表2 试验分组及样品编号

Table 2 Experimental groups and sample number

Sample	Raw material	Carbonation time/d	m_L/m_S
SS	Steel slag	0	
SS-0	Steel slag	1	0
SS-0.15	Steel slag	1	0.15
C ₃ S	C ₃ S	0	
C ₃ S-0	C ₃ S	1	0
C ₃ S-0.15	C ₃ S	1	0.15
CS	Carbide slag	0	
CS-0	Carbide slag	1	0
CS-0.15	Carbide slag	1	0.15

参考标准ISO 10390:2005(E) *Soil Quality—Determination of pH*测定碳化前后样品粉末的pH值.取适量样品粉末浸入去离子水中,液固比为5:1,搅拌5min使粉末均匀分布,静置3h后取上清液测pH值.

利用Nova Nano SEM450型扫描电子显微镜

(SEM)表征样品碳化前后的微观形貌。

利用纳米力学性能测试系统测试碳化前后样品的硬度和弹性模量,其过程为:取适量样品粉末压制直径8 mm的圆片并放入直径25 mm的硅胶模具中,在真空环境下浇筑环氧树脂以消除气泡;环氧树脂固化后,依次使用粒度为38.0、13.0、6.5 μm的SiC砂纸研磨样品的底部,再依次使用粒度为9、3、1 μm的金刚石抛光至表面光滑;随后测试样品的硬度和弹性模量,选择16(平面布局为4×4)个点作为压痕测试点,压痕间隔4 μm,加载

速率为0.2 mN/s,加载至2 mN并持荷60 s,卸载时间为10 s。

2 结果与讨论

2.1 碳化前后的物相分析

钢渣、C₃S和电石渣碳化前后的XRD图谱如图1所示。由图1可见:3种材料在碳化处理后含钙物相的峰强降低,说明含钙物相发生碳化反应而被消耗;3种材料碳化后均生成了CaCO₃,其晶型为最稳定且具有优异力学性能的方解石。

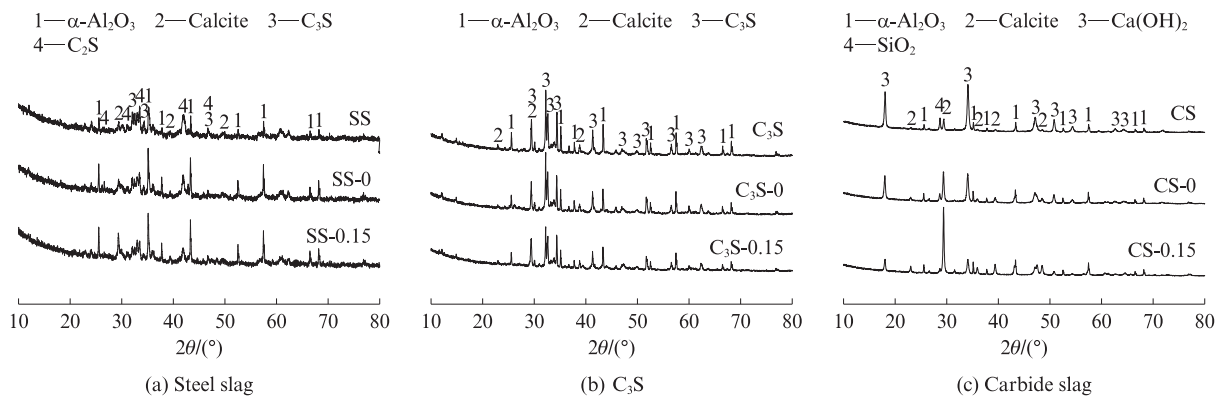


图1 钢渣、C₃S和电石渣碳化前后的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of steel slag, C₃S and carbide slag before and after carbonation

对碳化前钢渣、C₃S和电石渣的XRD图谱中含钙矿物相进行定量相分析,结果见表3。并对碳化后样品中CaCO₃进行XRD定量分析,结果如表4所示。由表3、4可知,相较于 $m_l/m_s=0$ 时,当 $m_l/m_s=0.15$ 时钢渣、C₃S和电石渣均生成了更多的CaCO₃,

其含量分别增加了56.07%、155.36%和31.40%。这表明液态水具有促进碳化反应的作用,其原因是在气-液-固三相碳化反应中,液态水可以促进CO₂溶解和扩散,同时促进材料中钙镁离子的溶解析出^[15]。

表3 碳化前钢渣、C₃S和电石渣含钙矿物相的XRD定量分析结果

Table 3 XRD quantitative phase analysis results (by mass) of calcium-bearing mineral phases in steel slag, C₃S and carbide slag before carbonation

Raw material	C ₃ S	C ₂ S	Calcite	Ca(OH) ₂	Amorphous
Steel slag	22.54±0.89	44.98±2.35	4.81±0.46		24.82±2.11
C ₃ S	88.97±3.41		1.11±0.28		9.92±1.06
Carbide slag			19.39±1.32	78.97±4.21	0.33±0.09

Unit: %

表4 碳化后钢渣、C₃S和电石渣中CaCO₃的XRD定量相分析结果
Table 4 XRD quantitative phase analysis results (by mass) of steel slag, C₃S and carbide slag after carbonation

Raw material	$m_l/m_s=0$	$m_l/m_s=0.15$
Steel slag	8.15±0.81	12.72±0.94
C ₃ S	8.02±0.53	20.48±1.36
Carbide slag	55.44±2.79	72.85±3.98

Unit: %

无论是否存在液态水,电石渣生成的CaCO₃都最多,其次是C₃S和钢渣,说明电石渣更容易发生碳化反应。根据表1可知:钢渣的含钙量最少;C₃S与电

石渣的含钙量非常接近,约为钢渣含钙量的2倍。C₃S和电石渣理论上可以吸收的CO₂量相近,而钢渣的CO₂吸收量最低^[16]。

由表3可知,钢渣中的钙主要以C₃S和C₂S的形式存在;电石渣中的钙主要以Ca(OH)₂的形式存在,且含量高达78.97%。相比于C₃S和C₂S,Ca(OH)₂更容易溶解并与CO₂反应^[1]。因此,综合考虑化学组成和矿物组成,3种材料中电石渣的固碳潜力最高,C₃S次之,钢渣最低。

钢渣、C₃S和电石渣碳化前后的FTIR光谱如图

2所示.由图2可见:(1)对于钢渣和C₃S,波数713 cm⁻¹处为无定形碳酸钙(ACC)的特征吸收峰^[17],其峰强在碳化后轻微增加;853~873 cm⁻¹和1412~1490 cm⁻¹处为C—O振动峰^[17],碳化后峰强明显增加;923~1030 cm⁻¹处的Si—O振动峰^[18]在碳化后向波数高的方向偏移.结合XRD的定

量分析结果,说明钢渣和C₃S碳化后的主要含钙碳化产物为方解石,以及少量ACC.(2)对于电石渣,同样观察到碳化后ACC的特征吸收峰轻微增加,C—O振动峰明显增强;此外,3643 cm⁻¹处为Ca(OH)₂中的O—H键^[19],峰强显著减弱,说明电石渣碳化后消耗了大量Ca(OH)₂,生成了较多方解石和少量ACC.

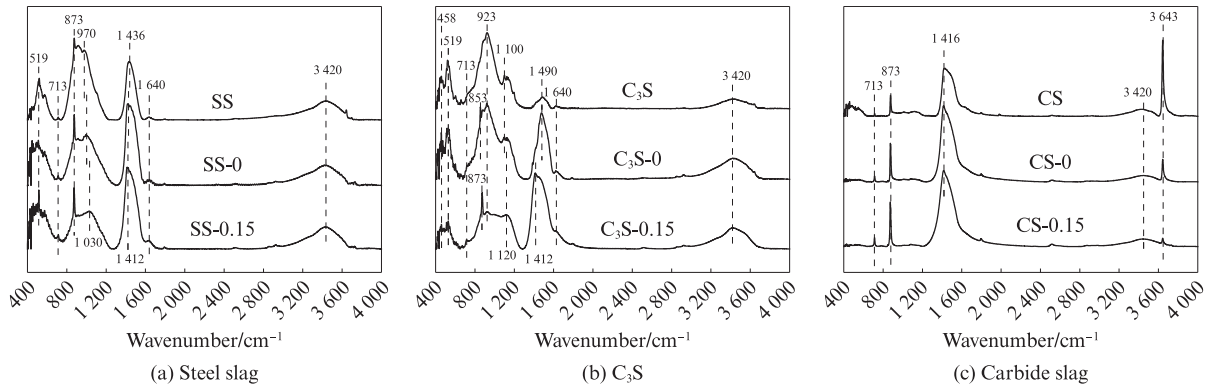


图2 钢渣、C₃S和电石渣碳化前后的FTIR光谱

Fig. 2 FTIR spectra of steel slag, C₃S and carbide slag before and after carbonation

钢渣、C₃S和电石渣碳化前后的TG/DTG曲线如图3所示.由图3可见:3种材料的DTG曲线均在650℃附近^[20]出现了明显的CaCO₃分解峰,表明其主要碳化产物均包含CaCO₃;另外,电石渣的DTG曲线在450℃附近还出现了Ca(OH)₂的分解峰,并且碳

化后Ca(OH)₂的分解峰减弱;而无论m₁/m_s是0还是0.15,Ca(OH)₂的分解峰都没有完全消失,表明在本试验的碳化条件下,电石渣并没有完全碳化,这与CO₂扩散缓慢、溶解有限、钙镁离子溶出困难以及生成的碳化产物阻碍CO₂的进一步扩散有关^[21].根据

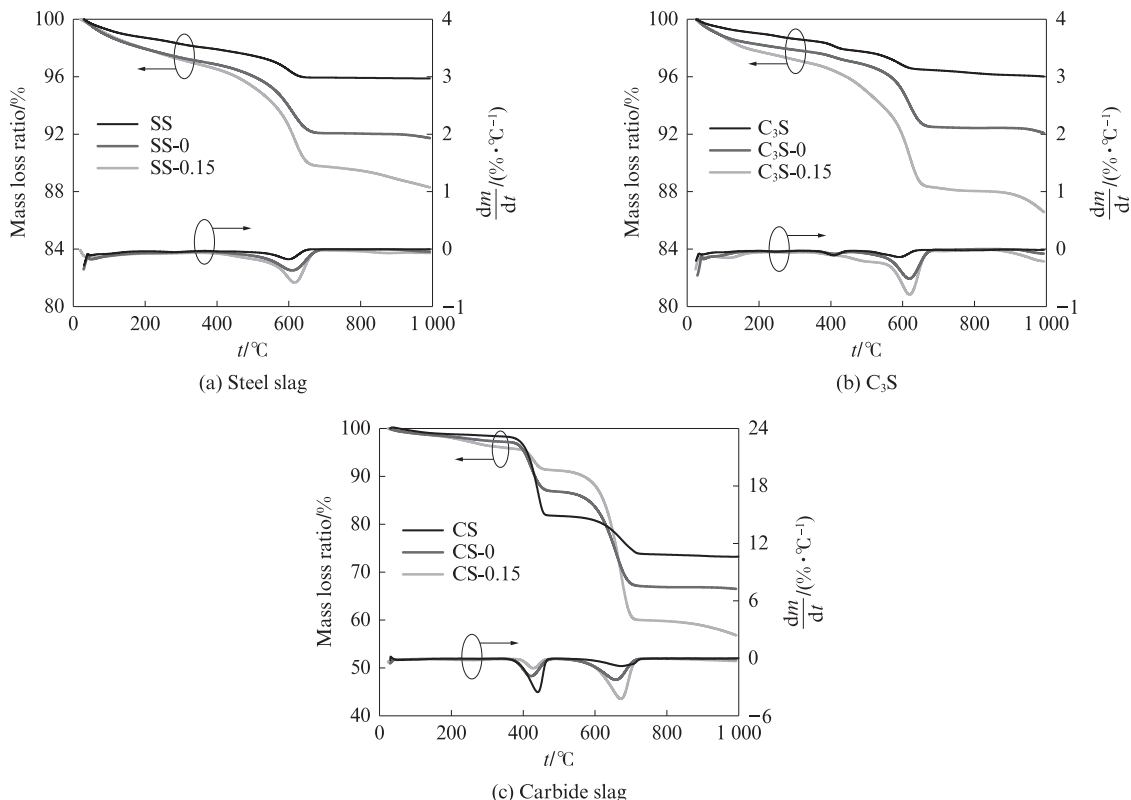


图3 钢渣、C₃S和电石渣碳化前后的TG/DTG曲线

Fig. 3 TG/DTG curves of steel slag, C₃S and carbide slag before and after carbonation

TG 曲线中 CaCO_3 分解的质量损失可知,相较于 $m_L/m_S=0$,在 $m_L/m_S=0.15$ 时 3 种材料生成了更多的 CaCO_3 ,其中,电石渣生成的 CaCO_3 最多,这与 XRD 和 FTIR 的分析结论一致。

2.2 碳化前后的 pH 值

图 4 给出了去离子水和钢渣、 C_3S 、电石渣碳化前

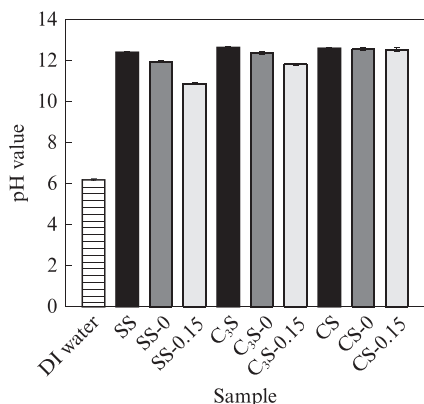


图 4 去离子水、钢渣、 C_3S 和电石渣碳化前后的 pH 值
Fig. 4 pH values of deionized water, steel slag, C_3S and carbide slag before and after carbonation

后的 pH 值.由图 4 可以看出:3 种原材料体系的初始 pH 值都在 12.5 左右,均属于强碱性材料,更有利于碳化反应的发生^[21];在碳化后,碱性的含钙物相生成中性的 CaCO_3 和硅胶,导致 3 种材料的 pH 值均有所降低;与 $m_L/m_S=0$ 时相比, $m_L/m_S=0.15$ 时钢渣和 C_3S 中有更多的碱性含钙物相被消耗,因此 pH 值的降低幅度更大;pH 值的降低幅度由大到小依次为钢渣、 C_3S 、电石渣,其中电石渣碳化前后的 pH 值变化不明显.这是由于气-液-固三相碳化反应包含“扩散-溶解-沉淀”的动态过程,电石渣中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 最容易溶解,因此碳化 1 d 的电石渣体系中仍然有未碳化的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (如 2.1 讨论,电石渣没有完全碳化,仍有含钙物相)在不断溶解,对 pH 的降低起到了缓冲作用,导致电石渣体系的 pH 值维持在较高水平^[21].

2.3 碳化前后的微观结构与力学性能

2.3.1 微观形貌与结构

钢渣、 C_3S 和电石渣碳化前后的 SEM 图像如表 5 所示.由表 5 可见:在碳化后,3 种材料表面都生成了尺寸不足 $1\ \mu\text{m}$ 的块状或棒状物质,结合 2.1 讨论可

表 5 钢渣、 C_3S 和电石渣碳化前后的 SEM 图像
Table 5 SEM images of steel slag, C_3S and carbide slag before and after carbonation

	Before carbonation	After carbonation $m_L/m_S=0$	After carbonation $m_L/m_S=0.15$
SS			
C_3S			
CS			

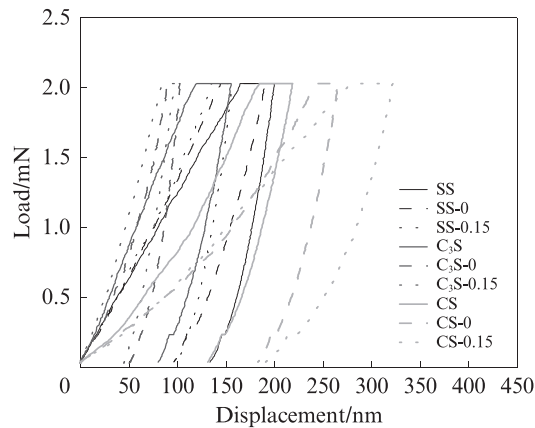
知,这些物质主要是方解石;其中,钢渣和 C_3S 原材料是表面粗糙的不规则块状物质,尺寸为几微米,生成的方解石填充原材料的孔隙,形成紧密堆积的密实结构;电石渣微观形貌呈现片状,碳化后生成的块状方解石不能很好地填充在片状 $Ca(OH)_2$ 的孔隙中,导致微观结构相对松散.

2.3.2 微观力学性能

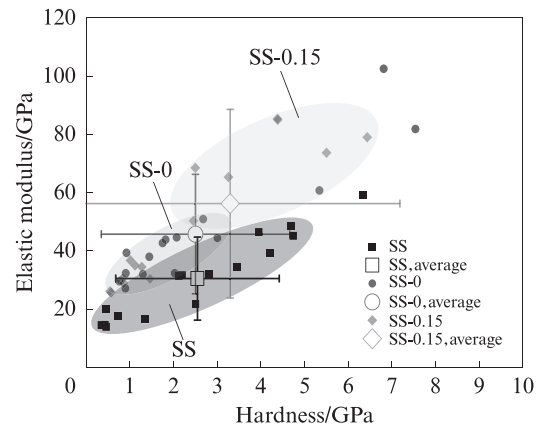
图5是3种材料碳化前后的纳米压痕测试结果.由图5可见:(1)总体上,钢渣和 C_3S 在碳化后微观力学性能增强,且 $m_L/m_S=0.15$ 时碳化增强效果更显著;但电石渣在碳化后微观力学性能减弱,尤其在 $m_L/m_S=0.15$ 时效果更明显.(2)载荷-位移曲线(图5(a))中,曲线越陡,说明在相同荷载下样品的压入深度越小;加载与卸载曲线围成的面积越小,说明样品的残余深度越浅^[22],微观力学性能越好.(3)结合弹性模量-硬度散点图的结果,钢渣(图5(b))在 $m_L/m_S=0.15$ 的条件下碳化后弹性模量(平均值)和硬度(平均值)最高,分别提高了84.48%和29.34%; C_3S (图5(c))在 $m_L/m_S=0.15$ 的条件下碳化后弹性模量(平均值)和硬度

(平均值)分别提高了105.96%和104.92%.但对于电石渣(图5(d)),在 $m_L/m_S=0.15$ 的条件下碳化后样品的弹性模量(平均值)和硬度(平均值)反而是最低的.

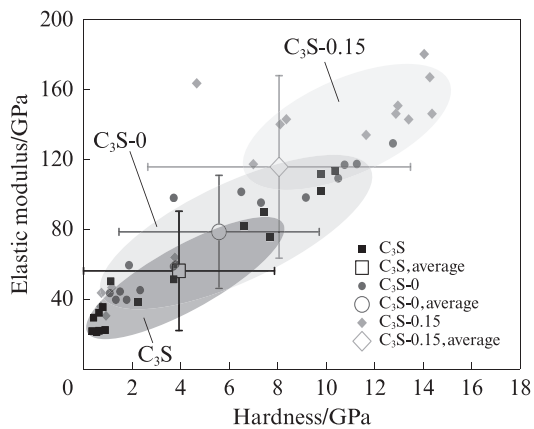
由2.1可知,3种材料的最主要碳化产物是方解石.据报道,方解石的弹性模量和硬度分别为35~60 GPa和2~4 GPa^[23],高于本文所用的钢渣、 C_3S 和电石渣.因此,钢渣和 C_3S 碳化后微观力学性能提高的原因可能是:(1)生成了弹性模量和硬度比自身更高的方解石;(2)钢渣和 C_3S 为表面粗糙的不规则块状物质,更易与碳化产物方解石紧密堆积,产物的填充作用使其变得致密(结合表5中SEM表征结果, C_3S 的微观形貌更加致密,这可能是 C_3S 碳化后在微观尺度上增强效果比钢渣更明显的原因)^[24].对于电石渣来说,虽然碳化后生成了力学性能更好的方解石,但是块状方解石在微观尺度上很难填充在片状 $Ca(OH)_2$ 的孔隙中,甚至可能打破原有的片状堆积结构,导致碳化后微观力学性能降低.



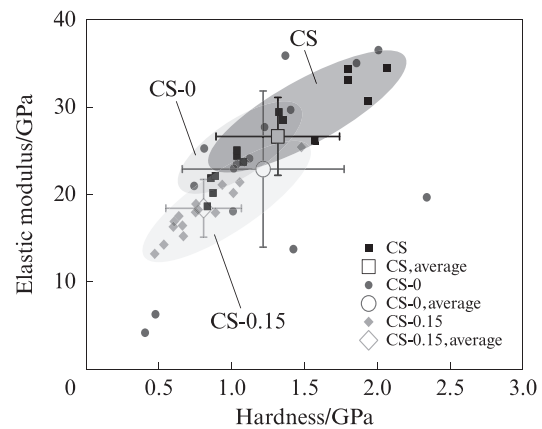
(a) Load-displacement curves during indentation



(b) Elastic modulus-hardness scatter plot of steel slag



(c) Elastic modulus-hardness scatter plot of C_3S



(d) Elastic modulus-hardness scatter plot of carbide slag

图5 碳化前后的纳米压痕测试结果

Fig. 5 Nanoindentation test results before and after carbonation

3 结论

(1)当液固比为0和0.15时,钢渣、 C_3S 和电石渣的主要碳化产物为方解石和少量无定形碳酸钙.3种材料中电石渣的固碳能力最高,因为其含钙物相($Ca(OH)_2$)的含量最多且易溶解和碳化.

(2)钢渣、 C_3S 和电石渣的初始pH值在12.5左右,均属于强碱性材料,有利于碳化反应;碳化后,3种材料的pH值均有所降低,但电石渣中尚未碳化的 $Ca(OH)_2$ 对pH的降低起到了缓冲作用.

(3)钢渣、 C_3S 和电石渣碳化后均生成了尺寸不足 $1\mu m$ 的块状方解石;当液固比为0.15时,相较于未碳化样品,碳化后钢渣的弹性模量提高了84.48%,碳化后 C_3S 的弹性模量提高了105.96%,但电石渣碳化后弹性模量和显微硬度均有所降低.碳化后的微观力学性能与原材料和碳化产物的微观力学性能以及堆积状态有关.

参考文献:

- [1] CHEN T F, GAO X J. Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 34:74-86.
- [2] BERGER R L, YOUNG J F, LEUNG K. Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon dioxide treatment[J]. Nature Physical Science, 1972, 240:16-18.
- [3] SAILLIO M, BAROGHEL-BOUNY V, PRADELLE S, et al. Effect of supplementary cementitious materials on carbonation of cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 142: 106358.
- [4] 管学茂,魏红珊,马小娥,等. C_3S_2 矿物的加速碳化硬化过程[J].建筑材料学报,2018,21(6):900-905.
GUAN Xuemao, WEI Hongshan, MA Xiaoe, et al. Rapid hardening process of C_3S_2 minerals by accelerated carbonation[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):900-905. (in Chinese)
- [5] 倪佳琪.压实钢渣-膨润土-纤维覆盖材料防渗抗开裂试验研究[D].杭州:浙江大学,2022.
NI Jiaqi. Experiment study on permeability and crack resistance performance on compacted steel slag-bentonite-fibre mixtures as a cover material[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [6] HUMBERT P S, CASTRO-GOMES J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208:448-457.
- [7] LIU W Z, TENG L M, ROHANI S, et al. CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 416: 129093.
- [8] LI C, LI Y, ZHU W H, et al. Carbon dioxide cured building materials as an approach to decarbonizing the calcium carbide related industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 186:113688.
- [9] ZHANG Q, FENG P, SHEN X Y, et al. Utilization of solid wastes to sequester carbon dioxide in cement-based materials and methods to improve carbonation degree: A review[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2023, 72:102502.
- [10] MOON E, CHOI Y C. Carbon dioxide fixation via accelerated carbonation of cement-based materials: Potential for construction materials applications[J]. Construction and Building Materials, 2019, 199:676-687.
- [11] MU Y D, LIU Z C, WANG F Z, et al. Carbonation characteristics of γ -dicalcium silicate for low-carbon building material[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 322-331.
- [12] LIU P, ZHANG M, MO L W, et al. Probe into carbonation mechanism of steel slag via FIB-TEM: The roles of various mineral phases[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 162: 106991.
- [13] 秦玲,毛星泰,高小建,等.碳化养护蒸压加气混凝土改性水泥的抗硫酸盐侵蚀性能[J].建筑材料学报,2022,25(12): 1269-1276.
QIN Ling, MAO Xingtai, GAO Xiaojian, et al. Sulfate resistance of carbonation curing autoclaved aerated concrete modified cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1269-1276. (in Chinese)
- [14] WESSELSKY A, JENSEN O M. Synthesis of pure Portland cement phases[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39: 973-980.
- [15] XU Z H, ZHANG Z X, HUANG J S, et al. Effects of temperature, humidity and CO₂ concentration on carbonation of cement-based materials: A review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346:128399.
- [16] HUNTZINGER D N, GIERKE J S, KAWATRA S K, et al. Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43:1986-1992.
- [17] SHEN P L, JIANG Y, ZHANG Y Y, et al. Production of aragonite whiskers by carbonation of fine recycled concrete wastes: An alternative pathway for efficient CO₂ sequestration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 173:113079.
- [18] SHI X C, SHUI Z H. Effect of eggshell powder addition on the properties of cement pastes with early CO₂ curing and further water curing[J]. Construction and Building Materials, 2023, 404:133231.
- [19] ZHANG D, SHAO Y X. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123:516-526.
- [20] 莫媛媛,唐薇,占宝剑,等.碳化再生微粉水泥基材料的性能及其碳足迹评价[J].建筑材料学报,2023,26(11):1208-1213.
MO Yuanyuan, TANG Wei, ZHAN Baojian, et al. Performance and carbon footprint evaluation of cement-based materials incorporating carbonated recycled fine powder[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1208-1213. (in Chinese)