第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200200

碳化养护对大掺量钢渣砂浆的力学性能及显微结构的影响

曾海马[1,2]，刘志超[1,2]，王发洲[1,2]

(1. 硅酸盐建筑材料国家重点实验室，武汉 430070；2. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070)

摘 要：提出一种基于最紧密堆积材料体系设计理论的可浇筑成型的高性能可碳化混凝土(HPCC)。以钢渣粉为主要胶凝组分，利用少量普通硅酸盐水泥的高水化活性提供脱模强度，掺入适量硅灰提高材料体系的密实度，研究了快速碳化养护对 HPCC 的力学性能与显微结构的影响规律。结果表明：1 d 密封养护后 HPCC 的抗压强度为 5.2 MPa，经干燥预处理与 24 h 碳化养护后 HPCC 的抗压强度接近 90 MPa；适当的干燥预处理有利于碳化反应的进行，且最佳失水率为 74.4%；碳化反应形成的碳酸钙晶体以方解石为主，含微量文石，在最紧密堆积体系内填充并进一步密实基体结构是 HPCC 高强的主要作用机理；碳化养护后 HPCC 的安定性良好。

关键词：钢渣；碳化；高性能可碳化混凝土；抗压强度；显微结构
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1801–07
网络出版时间：2020–09–18

Effect of Accelerated Carbonation Curing on Mechanical Property and Microstructure of High Volume Steel Slag Mortar

ZENG Haima[1,2], *LIU Zhichao*[1,2], *WANG Fazhou*[1,2]
(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan 430070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A castable high-performance carbonatable concrete (HPCC) was designed based on the optimized packing design of the material system. In HPCC, a steel slag powder was the main binder, a small amount of hydraulic ordinary Portland cement was used to provide the mould-stripping strength and silica fume was added to improve the compactness of the system. Effect of carbonation curing on the mechanical properties and microstructure of HPCC was investigated. The results show that the compressive strength of HPCC after 1-d seal curing is 5.2 MPa, and the compressive strength of HPCC after pre-drying and 24-h carbonation curing reaches almost 90 MPa. A proper pre-drying is beneficial to the carbonation reaction, and the optimal moisture loss rate is 74.4%. Calcium carbonate crystals formed due to carbonation reaction are mainly calcite with a trace amount of aragonite. This leads to a further densification of the matrix, which accounts for the high strength of HPCC. In addition, the soundness of HPCC is also improved after carbonation.

Keywords: steel slag; carbonation; high-performance carbonatable concrete; compressive strength; microstructure

随着钢铁行业的快速发展，中国已成为全球最大的钢铁消费国，其粗钢生产量占全球产量的 50%[1]。钢渣作为钢铁工业炼钢过程中产生的一种废渣，其转化率约为每吨钢材的 10%~15%[2–3]。2019 年中国粗钢产量为 9.963 亿 t，钢渣产量近 1.5 亿 t[4]。但是我国钢渣综合利用率只有 20 %，远低于许多发达国家，大量钢渣随意搁置及填埋，造成了严重的环境和社会危害[5–8]。

钢渣的低利用率与其组成复杂多变密不可分。钢渣的主要矿相与水泥类似，包括硅酸三钙(C_3S)、

收稿日期：2020–03–23。　修订日期：2020–04–18。
基金项目：国家重点研发项目-政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0106300)；国家自然科学基金(51672200，51702242，51925205)；湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA004)。
第一作者：曾海马(1996—)，男，硕士研究生。
通信作者：刘志超(1983—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–03–23.　**Revised date:** 2020–04–18.
First author: ZENG Haima (1996–), male, Master candidate.
E-mail: 15172414027@whut.edu.cn
Correspondent author: LIU Zhichao (1983–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: liuzc9@whut.edu.cn

硅酸二钙(C_2S)、铁铝酸钙(C_4AF)等，同时含少量 C_2F 以及镁铁锰等氧化物形成的固溶体 RO 相等无胶凝性能的矿相[8–9]。钢渣的低 C_3S 含量以及大量的 RO 相使得其胶凝性能低，并且钢渣含有较多的 f-CaO 和 f-MgO，导致实际应用中易出现安定性不良的现象[9–12]。利用钢渣中含大量高碳化活性成分这一特征，采用加速碳化养护的方式制备钢渣制品已成为提高钢渣资源化利用率的有效途径[13–17]。

国内外诸多学者在钢渣制品的制备工艺、碳化机理以及影响因素方面开展了大量研究。房延凤等[18]研究了钢渣碳化的强度发展机理，发现当碳化产物中具有较高稳定性的方解石与 C-S-H 凝胶时制品强度较高，含有硅凝胶和文石、球霰石等产物强度增长较低。莫立武等[19–20]研究了 MgO 对钢渣混凝土性能的影响，利用 99.9%浓度 CO_2 在 0.1 MPa 下进行碳化养护，发现 MgO 能够促进碳化反应的进行，形成大量碳酸钙镁，提高了混凝土的强度，碳化 14 d 后强度可达 65.3 MPa。Polettini 等[21]和 Ukwattage 等[22]研究发现钢渣制品的碳化反应与水固比、温度、CO_2 浓度、碳化压力、碳化时间等因素密切相关。在钢渣制品的制备工艺方面，压制成型体系的水胶比可以控制在很低范围(0.08~0.20)[14]，通过调节成型压力提升基体密实性，有助于获得高强度的钢渣制品，但同时存在制品尺寸单一、制备工艺要求高等缺点。浇筑成型体系通过模板控制易于得到不同尺寸与形状的制品，制备工艺简单，但需要在较高的水胶比下成型，导致制品强度较低[20–23]。

基于超高性能混凝土(UHPC)的最紧密堆积体系，提出利用大掺量钢渣粉取代原有普通硅酸盐水泥，通过少量普通硅酸盐水泥的高水化活性提供脱模强度，再采用干燥预处理与快速碳化养护在短时间内达到较高强度，以此制备得到高性能可碳化混凝土(HPCC)。研究了碳化养护对 HPCC 力学性能与微观结构的影响规律。

1 实验

1.1 原材料

水泥采用标号为 P·O 52.5 的普通硅酸盐水泥，硅灰为成都东蓝星科技发展有限公司生产的未经压缩的硅灰，钢渣粉为中国宝武钢铁集团有限公司生产的转炉钢渣粉。图 1 为钢渣的 X 射线衍射(XRD)谱，钢渣中主要的矿物成分包括 C_2S，C_3S，C_2F 以及镁铁锰等氧化物形成的固溶体 RO 相，还含有少量的 $Ca(OH)_2$，f-CaO 及 SiO_2。图 2 位原材料的粒径分布。水泥、矿渣及硅灰的化学成分见表 1。所用骨料为 2 种粒径的人工石英砂，采用筛分法测得其细度模数分别为 1.32 和 2.36，粗细等级分别为特细砂和中砂。所用减水剂为华新股份有限公司提供的聚羧酸高效减水剂，其固含量为 40%。

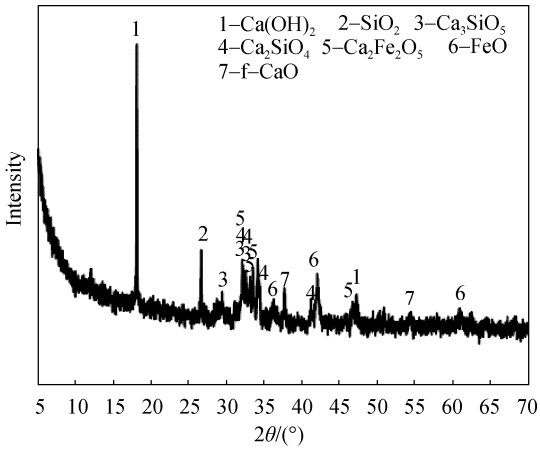


图 1 钢渣的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of steel slag

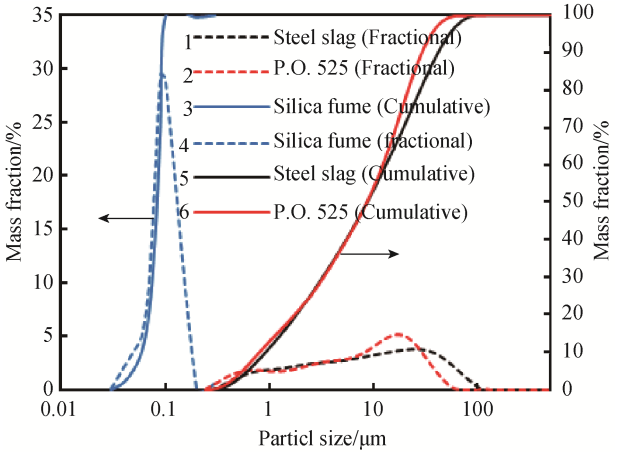


图 2 原材料的颗粒粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of raw materials

表 1 原材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of raw materials *w*/%

Material	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	MgO	SO_3	K_2O	MnO	Fe_2O_3	LOI
Cement	65.21	21.276	4.579	0.083	1.62	2.482	0.766	0.153	3.251	0.0
Silica fume	0.397	94.579	0.518	0.341	0.654	0.26	1.056	0.654	0.234	1.702
Steel slag	42.05	19.229	5.535	0.059	3.29	0.553	0.230	1.578	20.307	4.324

w is mass fraction.

1.2 制备

超高性能混凝土(UHPC)、高性能可碳化混凝土(HPCC)的配合比如表 2 所示。表 2 中 UHPC 配合比经过了前期优化设计达到最紧密堆积，水胶比为 0.18，胶凝材料总量为 900 kg/m^3，新拌浆体的流动性良好，自由扩展度达 164 mm，28 d 抗压强度为 171.5 MPa[7]。HPCC 采用大掺量钢渣取代 UHPC 配比中的普通硅酸盐水泥，由于二者粒径相近(图 2)，因此钢渣取代对体系的堆积密实度影响不大，新拌浆体的自由扩展度为 177 mm。为了与 HPCC 进行性能对比，采用相同的胶凝组分比例制备水胶比为 0.40 的普通可碳化混凝土(NCC)，配比见表 2。

按照配合比制备混凝土，成型 40 mm×40 mm×40 mm 立方体试件，将试模密封后放入 20 ℃恒温室养护至 1 d。脱模后将试块置于温度为 40 ℃的鼓风干燥箱内预干燥一定时间(4、8、12、16、20、24、28、48 h)，通过试块干燥前后的重量变化计算失水率，见式(1)。试块预干燥后放入碳化釜进行碳化养护，先将碳化釜抽真空，然后注入浓度为 99.9%的 CO_2 气体至压强为 0.3 MPa，分别碳化处理 4，12，24 h 后取出试件进行测试。

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_1 \times \omega_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中：ω 为预干燥失水率，%；m_1 为干燥前的质量，g；m_2 为干燥一定时间后的质量，g；ω_1 为新拌混凝土的初始含水率，%。HPCC 的含水率为 6.87%，NCC 的含水率为 17.11%。

表 2　混凝土配合比

Table 2　Mix proportions of concrete

Material	Mix proportion/(kg·m^{-3})		
	UHPC	HPCC	NCC
Steel slag	0	628	628
Cement	785	157	157
Silica fume	114	114	114
Silica sand I	258	2562	169
Silica sand II	1 032	1 025	675
Water	140	140	360
Superplasticizer	36	36	0

UHPC is ultra-high performance concrete; HPCC is high performance carbonatable concrete .NCC is normal carbonatable concrete.

1.3 表征

1.3.1　水化放热测试　　采用 TAM Air 热导式等温量热仪测试胶凝体系的水化放热速率及放热量。每组测试使用样品总质量为 10 g，测试温度为 20 ℃。

1.3.2　抗压强度　　利用万能试验机对立方体试件进行抗压强度测试，加载速率 2.4 kN/s，每组测试 3 个试块后取平均值。

1.3.3　碳化产物　　利用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪进行矿物物相分析，测试参数为扫描角度 5°~70°，步长 0.02°，扫描速率为 5 (°)/min。采用型号为 STA449F3 同步热分析仪进行测试，测试温度范围从室温到 1 000 ℃，升温速率为 10 ℃/min，氮气气氛保护。

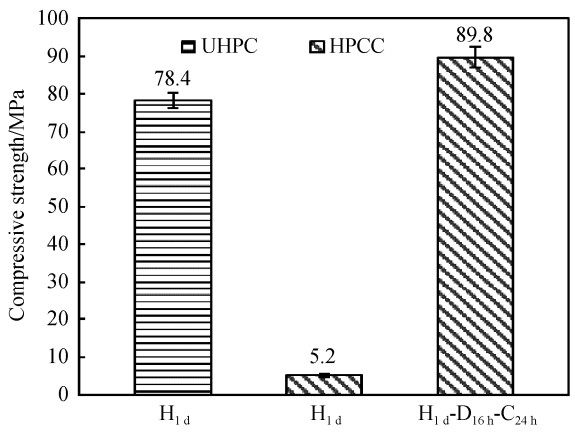
1.3.4　微观结构　　采用 QUANTA FEG450 型场发射环境扫描电镜对碳化前后样品进行形貌观察及元素分布分析，加速电压为 10 kV。

1.3.5　安定性　　根据 GB/T 1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》中的雷氏夹安定性测试，检测不同养护条件试件煮沸 3 h 后的安定性合格性。

2　结果与讨论

2.1 力学性能

2.1.1　不同养护方式下钢渣掺入后对强度的影响　图 3 为 UHPC 及 HPCC 试件水化及碳化养护的抗压强度。UHPC 试件水化养护 1 d 后的抗压强度为 78.4 MPa，当掺入 80%钢渣后 HPCC 试件水化养护 1 d 后的抗压强度仅有 5.2 MPa，这是由于钢渣的水化活性远低于水泥[24]。可以从图 4 中的水化放热曲线看到掺入 80 %钢渣后，HPCC 水化诱导期明显延长，相较于 UHPC 体系其水化放热峰推迟了近 34 h，且其水化放热速率峰值和放热量均大幅降低。HPCC 试块经干燥预处理与碳化养护后(40 ℃预干燥 16 h，失水率为 65%，碳化养护 24 h)抗压强度明显提高，达到 89.8 MPa。干燥预处理过程移除了 HPCC 基体内部分水分，有利于外部 CO_2 的扩散进入，CO_2 气体溶解于剩余水分，并与硅酸钙矿物水解释放的 Ca^{2+} 反应生产碳酸钙晶体，沉积于原始颗粒外部，逐渐向外生长并填充基体剩余空间。同时，HPCC 的固相组分为最紧密堆积状态，且在极低水胶比下固相颗粒间距很小。因此，碳化反应产生的“填充效应”能迅速提升 HPCC 基体的致密性与力学性能。相较而言，NCC 基体中的固相组分虽然同为最紧密堆积状态，但在高水胶比条件下碳化反应产生的碳化产物不足以填充固相颗粒间的剩余空间，使得基体仍处于较松散的状态。由图 5 可知，在失水率相近的条件下，NCC 碳化养护 12 h 的抗压强度仅有 12.6 MPa，HPCC 则达到 69.8 MPa。



H is hydration curing, D is drying pretreatment, and C is carbonation curing.

图 3 早龄期不同水化/碳化时间的强度对比

Fig. 3 Compressive strength at different hydration/carbonation times at early age

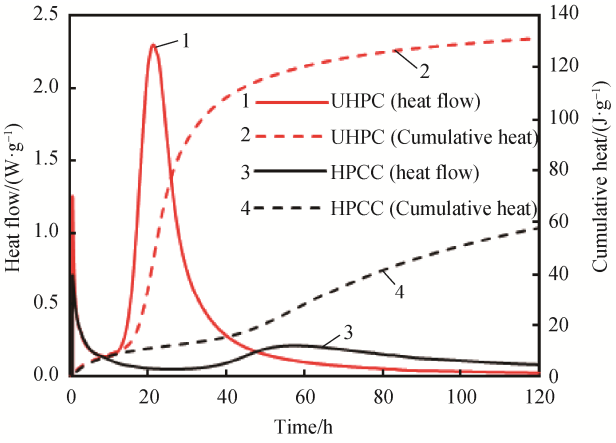
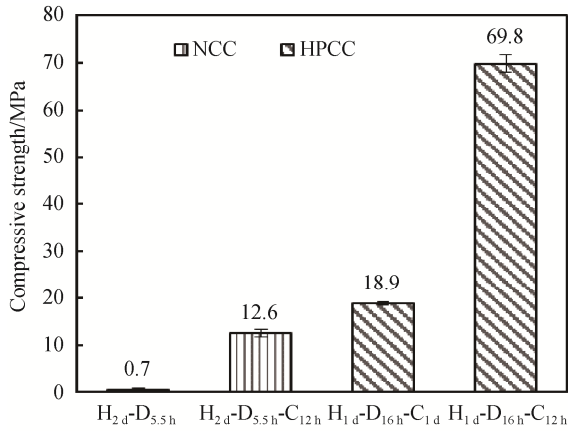


图 4 不同钢渣掺量下胶凝体系的水化速率及水化放热量

Fig. 4 Heat flow and cumulative heat of cementitious system with different contents of steel slag



The moisture loss rate from pre-drying treatment was maintained at 65%.

图 5 早龄期不同水胶比的试件抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of specimens with different water-binder ratios at early age

2.1.2 碳化时间对强度的影响 由图 6 可见，随碳化时间的延长，混凝土试件抗压强度不断增长，碳化 4、12 h 和 24 h 后抗压强度分别为 40.1、68.9、89.8 MPa，且其增长速率逐步趋于放缓。由于碳化反应是 CO_2 气体由外向里的扩散过程， 随着早期碳化反应生成的碳化产物不断填充孔隙，导致试件表层更加致密化，CO_2 进入试件内部变得缓慢，因此后期的碳化强度增长变缓。

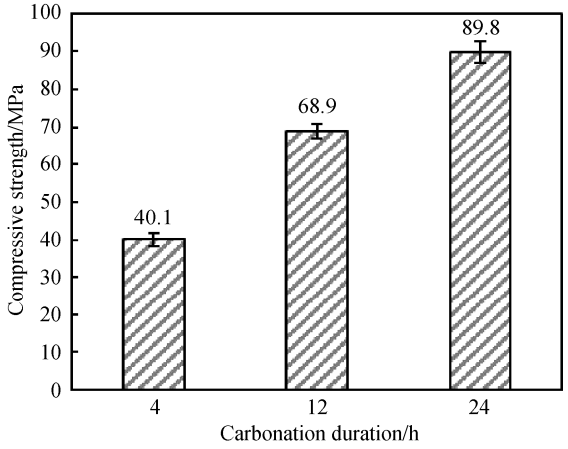


图 6 不同碳化时间下抗压强度

Fig. 6 Compressive strength at different carbonation duration

2.2 干燥预处理对碳化养护的影响

在碳化养护过程中，水分对碳化反应的速率有重要影响。水分含量过低，限制了 CO_2 的溶解与 Ca^{2+}、Mg^{2+}从颗粒内部的溶出，降低了碳化程度；水分含量过高，则会使得大量孔隙处于饱和状态，CO_2 向内的迁移受阻[25]。因此，需要对钢渣制品进行适当的干燥预处理，使水分含量处于利于碳化反应的最佳值。图 7 为不同干燥预处理时间(4、8、12、16、20、24、28、48 h)对应的失水率下混凝土试件碳化前后抗压强度。可以看出，碳化前试件的强度随着失水率的提高不断上升。然而碳化后的抗压强度随着失水率的变化出现了明显的拐点，当失水率低于 74.4%，强度随失水率增加呈现线性增长的趋势；当失水率达到 80%时，相较于失水率为 74.4%碳化后的强度降低了近 20 MPa。表明 HPCC 试件的干燥预处理的最佳失水率为 74.4%，对应的干燥时间及剩余水胶比分别为 28 h 和 0.046。

2.3 碳化产物

图 8 为 HPCC 在碳化养护前后的 XRD 谱。密封水化养护 1 d 及干燥预处理后试件均存在大量的 $Ca(OH)_2$，C_2S，C_3S 以及未水化的游离氧化钙的衍射峰，同时有微弱的 $CaCO_3$ 的衍射峰，可能是烘干过程中受空气中的 CO_2 碳化所致[26]。碳化养护 12 h

后，以上矿物的衍射峰均明显减弱，同时出现了大量方解石和少量文石的衍射峰，并且碳化产物中存在碳酸钙镁($Ca_xMg_{1-x}CO_3$)，与方解石 $CaCO_3$ 的衍射峰相重叠[20]，该产物是由 Mg^{2+}进入 $CaCO_3$ 所形成的。此外，HPCC 试件碳化前后 C_2F 及 RO 相均未发生反应，其衍射峰强度无变化。

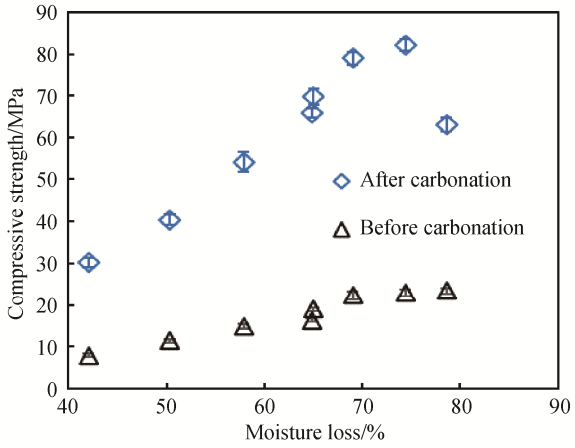


图 7　不同失水率下试件碳化前后抗压强度(碳化时间 12 h)

Fig. 7　Compressive strength of specimens before and after carbonation under different moisture loss rates

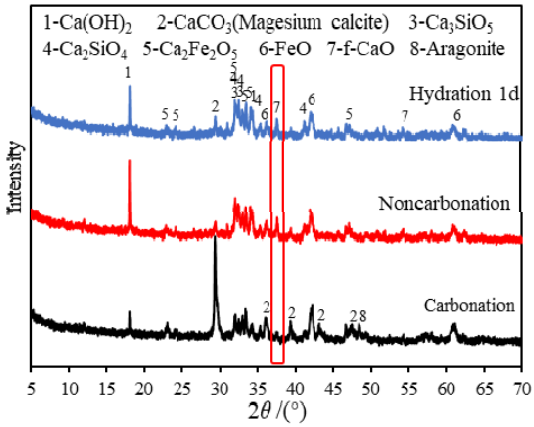


图 8　不同养护条件下试件的 XRD 谱

Fig. 8　XRD patterns of specimens under different curing conditions

图 9 为碳化前后试件的 TG-DTG 曲线。从 DTG 曲线可以看出，碳化前后样品的质量变化主要集中在 3 个范围，其中，50~200 ℃的质量损失是由凝胶水脱水造成的，390~460 ℃范围内的质量损失是 $Ca(OH)_2$ 分解导致，500~720 ℃温度范围内的质量损失是由于 $CaCO_3$ 及 $Ca_xMg_{1-x}CO_3$ 分解引起的。碳化前样品中存在少量 $CaCO_3$ 并且碳化后的样品仍有部分 $Ca(OH)_2$ 未反应，这与 XRD 的分析结果一致。

碳化前样品中由 $Ca(OH)_2$ 和 $CaCO_3$ 分解造成的质量损失分别为 1.22%和 1.59%，而碳化后样品中由 $Ca(OH)_2$ 和 $CaCO_3$ 分解造成的质量损失分别为 0.56%和 10.18%。由此可知，碳化后由 $CaCO_3$ 分解的质量损失明显增大，表明 HPCC 试件能够吸收大量的 CO_2，具有较高的碳化活性及固碳能力。

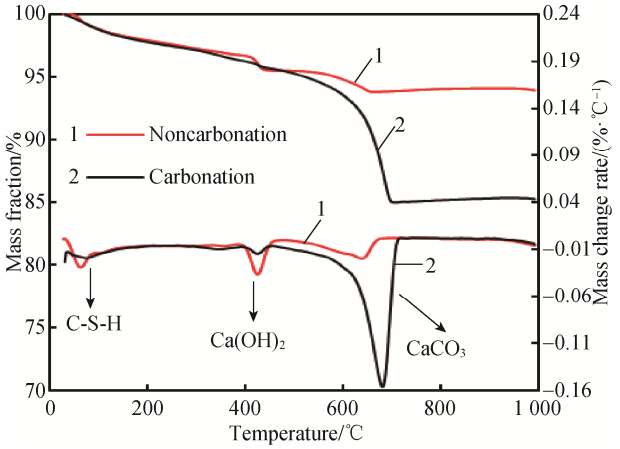


图 9　碳化前后试件的 TG-DTG 曲线

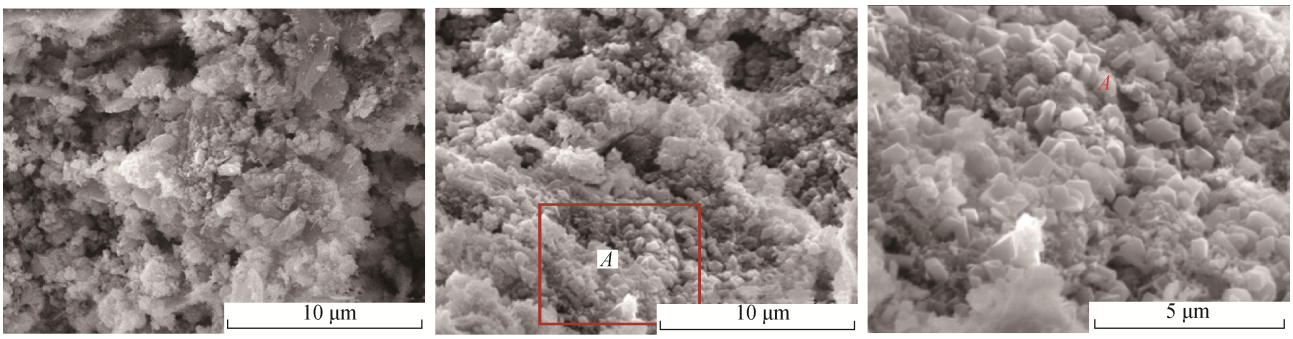
Fig. 9　TG-DTG curves of specimens before and after carbonation

2.4　微观结构

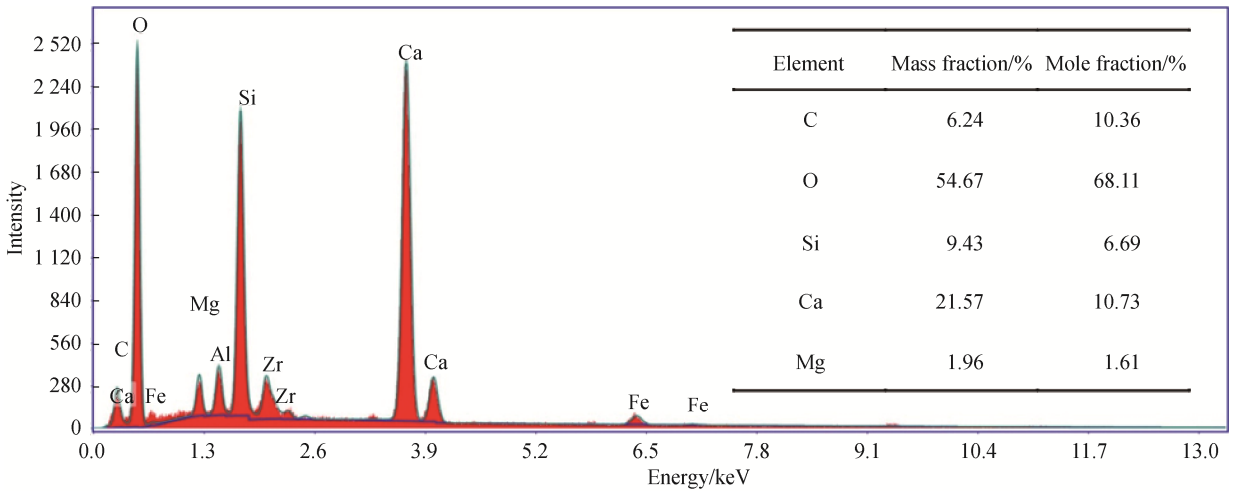
图 10 为碳化前后试样的 SEM 微观结构及 EDS 能谱分析。由图 10a 可以看出，碳化前试样结构疏松不致密，具有较多大孔以及连通孔，这也是导致其强度较低的原因。碳化 12 h 后(见图 10b)，试样内部生成了较多尺寸约为 1 μm 的规则立方体形貌的方解石晶体，填充于试样孔隙中，使其结构致密化，强度因此也得到大幅提升。图 10c 为图 10b 中点 *A* 的 EDS 谱分析，由此可进一步验证这些晶型物质为 $CaCO_3$，并且在实际打点过程中的光斑可能会覆盖除 *A* 处晶体以外的少部分区域，因此可能检测到少量硅凝胶或 C-S-H 凝胶。同时，可以看出其中微量 Mg 元素会进入到 $CaCO_3$ 中形成碳酸钙镁 $Ca_xMg_{1-x}CO_3$，这也与 XRD 分析结果相对应。

2.5　安定性

利用雷氏夹安定性测试方法对 HPCC 试件碳化后的安定性进行检测。由图 11a 和图 11b 可见，水化养护 3 d 的试件经煮沸 3 h 后，雷氏夹指尖距离由原长 10 mm 分别增大为 62.2 mm 和 75.5 mm，而碳化 12 h 的试件经煮沸后其雷氏夹未发生任何形变。从试件表观形貌可以发现，水化试件由于仍存在大量游离氧化钙及氧化镁，煮沸过程中发生膨胀反应后出现明显的剥落、开裂；碳化养护 12 h 后将试件内的游离氧化钙与氧化镁几乎完全消解，试件煮沸后仍完好无损(图 11c、图 11d)，因此 HPCC 具有良好的体积安定性。



(a) Before carbonation (b) After 12 h carbonation (A: calcium carbonate)

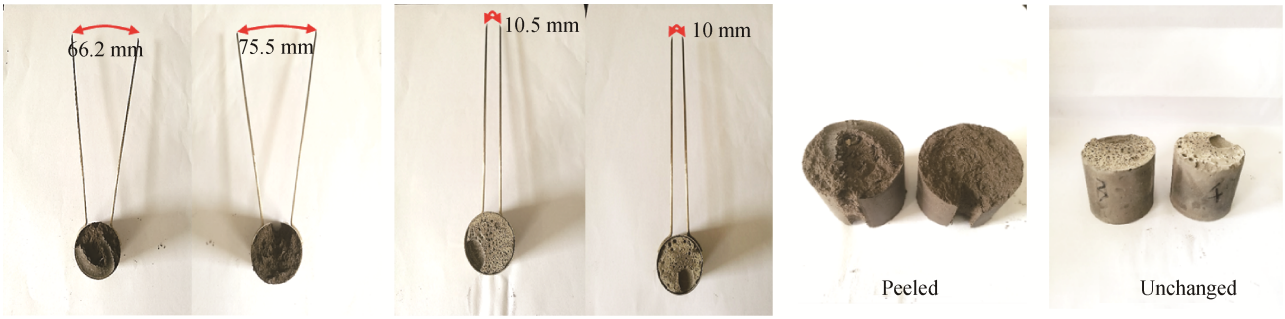


Element	Mass fraction/%	Mole fraction/%
C	6.24	10.36
O	54.67	68.11
Si	9.43	6.69
Ca	21.57	10.73
Mg	1.96	1.61

(c) EDS analysis of point *A* in Fig.10(b)

图 10 碳化前后试件的 SEM 照片和 EDS 能谱分析

Fig. 10 SEM images and EDS spectrum of samples before and after carbonation



(a) Redwood clamps after boiling of uncarbonated specimens

(b) Redwood clamps after boiling of carbonated specimens

(c) Uncarbonated specimen after boiling (H_{3d}-B_{3h})

(d) Carbonated specimen after boiling (H_{1d}-D_{24h}-C_{12h}-B_{3h})

图 11 碳化及未碳化试件煮沸安定性测试

Fig. 11 Boiling stability test of carbonated and uncarbonated specimens

3 结论

1) 以 UHPC 的最紧密堆积材料体系为设计准则，以钢渣粉为主要胶凝组分，利用少量普通硅酸盐水泥的水化活性提供脱模强度，通过搅拌成型工艺与快速碳化养护制备得到具有优异工作性、力学与体积稳定性的高性能可碳化混凝土(HPCC)。在 99.9% CO_2 在 0.3 MPa 压力下碳化 24 h 后，抗压强度达到 89.8 MPa。

2) HPCC 碳化养护后形成的主要碳化产物为大量立方体形貌的方解石及碳酸钙镁和少许文石。这些产物在经过最紧密堆积设计的基体结构内进一步填充孔隙，提升其致密性，这是 HPCC 高强的主要原因。

3) 延长碳化时间以及适当的预干燥处理均有利于 HPCC 碳化反应的进行，且最佳的干燥预处理时间和失水率分别为 28 h 和 74.4%。

4) HPCC 试件中的 f-CaO 和 f-MgO 在碳化过程发生被消解反应，明显改善其煮沸安定性。

参考文献:

[1] 李新创, 李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 224–231.
LI Xinchuang, LI Bing. Iron Steel (in Chinese), 2019, 54(8): 224–231.

[2] 程绪想, 杨全兵. 钢渣的综合利用[J]. 粉煤灰综合利用, 2010(5): 45–49.
CHENG Xuxiang, YANG Quanbing. Fly Ash Compreh Util (in Chinese), 2010(5): 45–49.

[3] WANG Qiang, YAN Peiyu, MI Guidong. Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement[J]. Constr Build Mater, 2012, 35: 8–14.

[4] 国家统计局, 2019 年国民经济运行总体平稳发展主要预期目标较好实现 [DB/OL]. [2020–03–02]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t202001171723383.html.
National Bureau of Statistics of China [DB/OL]. [2020–03–02]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t202001171723383.html.

[5] WANG X, NI W, LI J, et al. Carbonation of steel slag and gypsum for building materials and associated reaction mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2019, 125: 105893.

[6] GUO Jianlong, BAO Yanping, WANG Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste Manage, 2018, 78: 318–330.

[7] ZHANG Xiuzhen, LIU Zhichao, WANG Fazhou, et al. Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness[J]. Constr Build Mater, 2019, 214: 28–36.

[8] DAS B, PRAKASH S, REDDY P S R, et al, An overview of utilization of slag and sludge from steel industries[J]. Resour Conserv Recycl, 2007, 50(2): 40–57.

[9] PAN S Y, ADHIKARI R, CHEN Y H, et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO2 fixation via accelerated carbonation[J]. J Clean Prod, 2016, 137: 617–631.

[10] 房延凤, 王丹, 常钧, 等. 碳酸化钢渣及其在建筑材料中的应用现状[J]. 材料导报, 2020, 34(2): 3126–3132.
FANG Yanfeng, WANG Dan, CHANG Jun. Mater Reports (in Chinese), 2020, 34(2): 3126–3132.

[11] JIANG Yi, LING Tungchai, SHI Caijun, et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review[J]. Resour Conserv Recycl, 2018, 136: 187–197.

[12] 常钧, 吴昊泽. 钢渣碳化机理研究[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1185–1190.
CHANG Jun, WU Haoze. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(7): 1185–1190.

[13] 刘松辉, 管学茂, 邱满, 等. 通过加速碳化激发 γ-C2S 矿物的活性[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(5): 658–662.
LIU Songhui, GUAN Xuemao, QIU Man, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(5): 658–662.

[14] HUMBERT P S, CASTRO-GOMES J. CO2 activated steel slag-based materials: a review[J]. J Clean Prod, 2019, 208: 448–457.

[15] JANG J G, KIM G M, KIM H J, et al. Review on recent advances in CO2 utilization and sequestration technologies in cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2016, 127: 762–773.

[16] SAID A, MATTILA H P, JARVINEN M, et al. Production of precipitated calcium carbonate (PCC) from steelmaking slag for fixation of CO2[J]. Appl Energy, 2013, 112: 765–771.

[17] GHOULEH Z, GUTHRIE R I L, SHAO Yixin. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation[J]. Constr Build Mater, 2015, 99: 175–183.

[18] 房延凤. 钢渣中碱性矿物碳酸化及产物衍变规律研究[D]. 大连：大连理工大学, 2017.
FANG Yanfeng. Carbonation of Alkaline Minerals in Steel Slag and Products Evolution Process (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[19] 张丰, 莫立武, 邓敏, 等. 碳化对钢渣-水泥-CaO-MgO 砂浆强度和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 854–861.
ZHANG Feng, MO Liwu, DENG Min, et al. J Build Mater (in Chinese), 2017, 20(6): 854–861.

[20] Mo L, Zhang F, Deng M, et al. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates[J]. Cem Concr Compos, 2017, 83: 138–145.

[21] POLETTINI A, POMI R, STRAMAZZ0 A. CO_2 sequestration through aqueous accelerated carbonation of BOF slag: A factorial study of parameters effects[J]. J Environ Manage, 2016, 167: 185–195.

[22] UKWATTAGE N L, RANJITH P G, LI X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation[J]. Measurement, 2017, 97: 15–22.

[23] 顾红霞, 吴其胜, 吴阳, 等. 碳化水泥-钢渣复合胶凝材料的强度和微观结构[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(1): 35–39.
GU Hongxia, WU Qisheng, WU Yang, et al. J Mater Sci Eng (in Chinese), 2019, 37(1): 35–39.

[24] 王强, 阎培渝. 大掺量钢渣复合胶凝材料早期水化性能和浆体结构[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10): 1406–1410.
WANG Qiang, YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(10): 1406–1410.

[25] 王爱国, 何懋灿, 莫立武, 等. 碳化养护钢渣制备建筑材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 2939–2948.
WANG Aiguo, HE Maocan, MO Liwu, et al. Mater Reports (in Chinese), 2019, 33(9): 2939–2948.

[26] 陈晓星, 曹海琳, 翁履谦, 等. 碱激发水泥砂浆碳化行为研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 18–22.
CHEN Xiaoxing, CAO Hailin, WENG Luqian, et al. J Wuhan Univ Tech (in Chinese), 2014, 36(3): 18–22.