

文章编号:1007-9629(2022)12-1269-08

## 碳化养护蒸压加气混凝土改性水泥的 抗硫酸盐侵蚀性能

秦 玲<sup>1,2</sup>, 毛星泰<sup>1,2</sup>, 高小建<sup>3,\*</sup>, 张 鹏<sup>1,2</sup>, 孙建伟<sup>1,2</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266525; 2. 海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心;  
山东 青岛 266520; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**研究了碳化养护对硅酸盐水泥(PC)-蒸压加气混凝土(WAAC)抗硫酸盐侵蚀性能的影响,测试了PC-WAAC在不同硫酸盐浸泡时间后的抗压强度、体积和质量变化,并对硫酸盐侵蚀后PC-WAAC的微观结构及劣化机理进行了分析.结果表明:碳化养护后,WAAC掺量为0%、10%、20%的PC-WAAC硫酸盐侵蚀180 d后的抗压强度比其对应的未碳化养护侵蚀前的水泥净浆抗压强度分别高6.55%、15.12%、22.54%;硫酸盐侵蚀180 d后,碳化养护PC-WAAC净浆的抗压强度降低值明显低于未碳化养护水泥净浆,碳化养护提高了PC-WAAC的抗硫酸盐侵蚀性能,缓解了硫酸盐侵蚀造成的抗压强度损失.

**关键词:**蒸压加气混凝土;硅酸盐水泥;碳化养护;硫酸盐侵蚀;抗压强度;微观结构

中图分类号:TQ172.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.12.008

## Sulfate Resistance of Carbonation Curing Autoclaved Aerated Concrete Modified Cement Paste

QIN Ling<sup>1,2</sup>, MAO Xingtai<sup>1,2</sup>, GAO Xiaojian<sup>3,\*</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, SUN Jianwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Engineering  
Research Center of Concrete Technology under Environment, Ministry of Education, Qingdao 266520, China;  
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The effect of carbonation curing on the sulfate resistance of Portland cement(PC)- autoclaved aerated concrete (WAAC) was studied. The changes of compressive strength, volume deformation and mass of PC-WAAC were tested after different sulfate attack ages, and the microstructure and deterioration mechanism of PC-WAAC after sulfate attack were analyzed. The results show that after carbonation curing, the compressive strength of PC-WAAC with 0%, 10% and 20% WAAC content after 180 days of sulfate exposure is 6.55%, 15.12% and 22.54% higher than those of the corresponding cement paste before sulfate attack and carbonation curing, respectively. After 180 days sulfate erosion, the compressive strength reduction value of the carbonation curing PC-WAAC is significantly lower than those of cement paste without carbonation curing. Carbonation curing improves the sulfate resistance of PC-WAAC, and alleviates the compressive strength loss caused by sulfate attack.

**Key words:** autoclaved aerated concrete; Portland cement; carbonation curing; sulfate attack; compressive strength; microstructure

收稿日期:2021-09-07; 修订日期:2021-10-22

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2021E110);国家自然科学基金资助项目(51922052)

第一作者:秦 玲(1993—),女,山东临沂人,青岛理工大学副教授,博士.E-mail: qinling@qut.edu.cn

通讯作者:高小建(1976—),男,陕西白水人,哈尔滨工业大学教授,博士生导师,博士.E-mail: gaoxj@hit.edu.cn

随着城镇化的快速发展,产生了大量建筑垃圾,破坏了生态环境<sup>[1]</sup>.因此,如何在对环境影响较小的情况下处理建筑垃圾,已成为亟待解决的问题<sup>[2]</sup>.蒸压加气混凝土(WAAC)是一种钙硅酸盐蒸压多孔材料,已被广泛用于建筑的屋面保温、地板、沟槽填筑等<sup>[3]</sup>.在拆迁、重建等建筑活动中,产生了大量 WAAC 废砌块,但作为主要的建筑垃圾,目前有关其回收利用的研究较少,主要是因为 WAAC 较低的火山灰活性阻碍了其在水泥基材料中的回收利用<sup>[4]</sup>.为了在不降低强度的情况下,利用硅酸盐水泥(PC)回收 WAAC,并降低硅酸盐水泥的碳足迹,Qin 等<sup>[5]</sup>提出在水泥净浆碳化养护的同时回收 WAAC.碳化养护是指在水泥成型初期,CO<sub>2</sub>与水泥熟料或部分水化产物发生反应,形成碳酸钙和硅胶.碳化养护在提高混凝土强度的同时,对混凝土孔溶液的 pH 值影响较小,不会引起水泥水化产物的分解<sup>[6-7]</sup>.

水泥基材料暴露在硫酸盐环境下,会发生硫酸盐侵蚀<sup>[8-9]</sup>,对其性能产生不利影响<sup>[10]</sup>.碳化养护 PC-WAAC 主要应用于硫酸盐环境,了解硫酸盐侵蚀对其性能的影响是非常重要的.然而,碳化养护对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性能影响的研究报道很少.本文研究了碳化养护 PC-WAAC 的抗硫酸盐侵蚀性能,并对硫酸盐侵蚀后 PC-WAAC 的微观结构及劣化机理进行了分析.

## 1 试验

### 1.1 原材料

PC 为大连水泥集团生产的强度等级为 42.5 的硅酸盐水泥;WAAC 取自中国黑龙江省达连河市. PC 和 WAAC 的化学组成(质量分数,本文涉及的掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表 1,其粒径分布见图 1.由图 1 可见,WAAC 的粒径略大于 PC 的粒径.根据 ASTM C1012《暴露在硫酸盐溶液中的水泥砂浆长度变化的标准试验方法》,配制 5% MgSO<sub>4</sub> 溶液作为硫酸盐侵蚀介质.

### 1.2 试件的制备

试件水胶比为 0.4;以胶凝材料的质量计, WAAC 的掺量  $w_{\text{WAAC}}$  为 0%、10%、20%、30%、50%.抗压强度、体积变形测试分别采用 20 mm×20 mm×20 mm 的立方体试件和 25 mm×25 mm×280 mm 的棱柱体试件.

预养护处理时,将未覆盖保鲜膜的成型试件在 (20±3) °C 下静置 24 h 后拆模<sup>[11]</sup>.对于碳化组试件,将脱模样品置于 CO<sub>2</sub> 质量分数为 20%、温度为 (20±3) °C、相对湿度 RH=(60±5)% 的碳化箱中碳化养

表 1 PC 和 WAAC 的化学组成  
Table 1 Chemical compositions of PC and WAAC

| Material | CaO   | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | K <sub>2</sub> O | IL   |
|----------|-------|------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|
| PC       | 62.80 | 21.78            | 2.82            | 3.99                           | 3.57                           | 2.72 | 0.75             | 1.57 |
| WAAC     | 33.40 | 48.96            | 4.20            | 1.81                           | 5.57                           | 2.35 | 1.41             | 2.26 |

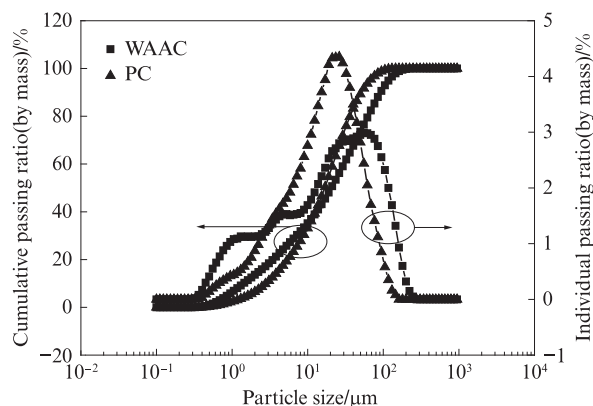


图 1 PC 和 WAAC 的粒径分布  
Fig. 1 Particle size distribution of the used PC and WAAC

护 4 h,再根据 GB/T17671—2020《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》,将碳化养护试件置于温度 (20±1) °C、RH>90% 的标准养护条件下养护.对于未碳化养护组(对照组)试件,脱模后立即将其置于标准养护条件下养护.试件的命名制度为:未碳化养护组试件记为 U-PC-WAAC,U-PC-WAAC10 为  $w_{\text{WAAC}}=10\%$  的 U-PC-WAAC,其他类推;碳化养护组试件记为 C-PC-WAAC,C-PC-WAAC10 为  $w_{\text{WAAC}}=10\%$  的 C-PC-WAAC,其他类推.

### 1.3 试验方法

将 U-PC-WAAC 和 C-PC-WAAC 标准养护 28 d 后,置入 5% MgSO<sub>4</sub> 溶液中,在 (22±3) °C 下,每月更新 1 次溶液,且保持其 pH 值不高于 8.5.试件达到饱和面干状态时进行相关测试,再利用无水乙醇终止水化处理后,对其进行相组成和微观结构测试.

根据标准 GB/T17671—2020,对在硫酸盐溶液浸泡时间  $t=0,30,90,120,180$  d 的试件进行抗压强度测试,每组 6 个试件,结果取平均值.体积变形试验是以标准养护 28 d 后的试件长度作为初始长度,测定硫酸盐溶液浸泡时间  $t$  为 15、30、45、60、90、120、180 d 后试件的长度变化,每组 3 个试件,结果取平均值.质量变化试验采用 0.001 g 精密电子秤监测硫酸盐溶液浸泡时间  $t$  为 15、30、45、60、90、120、180 d 后试件质量的变化,每组 6 个试件,结果取平均值.将拆模 1 d 后的试件分别碳化 2、4 h 后,再将其标准养护至 28 d,对标准养护前后的碳化试件及未碳化试件的截面进行碳化深度观测,在其界面滴加酚酞溶液,已

发生碳化的部分呈无色,未发生碳化的部分呈紫红色,可根据无色部分的截面大小确定试件的碳化深度.相组成测试采用 X'pert PRO X 射线衍射仪(XRD),利用 Cu-K $\alpha$  辐射(波长  $\lambda=0.15419\text{ nm}$ ),扫描范围为  $5^\circ\sim 65^\circ$ ,速率为  $0.02^\circ/\text{s}$ .采用 Rietveld 细化对相组成进行定量分析,测试过程中加入  $10\%$  的  $\text{TiO}_2$  作为内标,使用 GSAS 软件进行 Rietveld 细化,分析得到试件中各相的组成.热重-差热分析(TG-DTA)采用 TG 449F3 型热分析仪采集,温度测试范围为  $20\sim 1000^\circ\text{C}$ ,升温速率为  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .采用 IV 9510 压汞仪(MIP)测试试件的孔结构,压力测试范围为  $0\sim 414\text{ MPa}$ .采用 JEOL SX-4 型扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)观察试件的微观结构.

## 2 结果与分析

### 2.1 抗压强度

硫酸盐浸泡不同时间后 PC-WAAC 的抗压强度见图 2.由图 2 可见:浸泡前( $t=0\text{ d}$ ),碳化养护提高了 PC-WAAC 的抗压强度;硫酸盐溶液浸泡后,不论有无碳化养护处理,PC-WAAC 的抗压强度均呈先上升后下降的趋势;与未浸泡试件相比,浸泡 30 d 后所有试件的抗压强度提高了  $6.03\%\sim 15.12\%$ ,浸泡 180 d 后降低了  $6.70\%\sim 56.34\%$ ;当  $t\leq 90\text{ d}$  时,  $w_{\text{WAAC}}=0\%\sim 30\%$  的 U-PC-WAAC 抗压强度高于其浸泡前,  $t>90\text{ d}$  后,其抗压强度低于浸泡前;浸泡 180 d 后,  $w_{\text{WAAC}}=0\%\sim 30\%$  的 C-PC-WAAC 抗压强度仍比其在浸泡前对应的 U-PC-WAAC 抗压强度分别提高了  $6.55\%$ 、 $15.12\%$ 、 $22.54\%$ ;浸泡 180 d 后,所有 C-PC-WAAC 的抗压强度比未浸泡试件降低了  $6.70\%\sim 40.83\%$ ,远低于 U-PC-WAAC 抗压强度的

降低值( $12.93\%\sim 56.34\%$ ).

### 2.2 碳化深度和外观形貌

PC-WAAC 的碳化截面见图 3(由左到右依次为  $w_{\text{WAAC}}=0\%$ 、 $10\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$ 、 $50\%$  的试件).由图 3 可见:WAAC 掺量越高的碳化养护试件,其未碳化区域(红色区域)越小,这是因为  $\text{CO}_2$  气体的扩散性能随着 WAAC 掺量的增加而提高,WAAC 的存在可以促进碳化反应,进而可以提高试件的强度;随着碳化养护时间的延长,试件的碳化深度增大;PC-WAAC 的碳化深度在 28 d 时显著降低甚至消失,这是由于新产生了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .由此可见,早期碳化并不妨碍 PC-WAAC 的后续水化,虽然碳化养护在早期会导致 pH 值降低,但在后续养护过程中 pH 值会部分恢复,并不会使 PC-WAAC 后期的 pH 值显著降低<sup>[11]</sup>.碳化养护混凝土 pH 值的降低发生在混凝土深度小于 10 mm 的区域,而钢筋保护层的深度一般大于 40 mm,因此碳化养护并不会影响钢筋性能<sup>[12]</sup>.

硫酸盐浸泡 180 d 后,PC-WAAC 的外观形貌见图 4.由图 4 可见:未碳化养护的纯水泥试件 U-PC-WACC0 损伤最重,边缘开裂严重,出现蘑菇型剥落,这种损伤是由硫酸盐产物的形成和水化硅酸钙凝胶的分解造成的;U-PC-WAAC50 的表面出现较多裂纹,这是由于石膏和钙矾石(Aft)的形成导致的;碳化养护试件并未出现明显的剥落损伤和可见裂纹,这与碳化养护使其微观结构改善和抗渗性提高有关.此外,在外源  $\text{SO}_4^{2-}$  充足的情况下,Aft 的生成主要受控于试件内部  $\text{Al}^{3+}$  的溶出速率,碳化养护生成的  $\text{CaCO}_3$  会与试件中铝酸三钙反应生成碳铝酸钙,降低了 Aft 生成所需的  $\text{Al}^{3+}$  浓度,进而抑制 Aft 的生成,从而提高了试件的抗硫酸盐侵蚀能力.

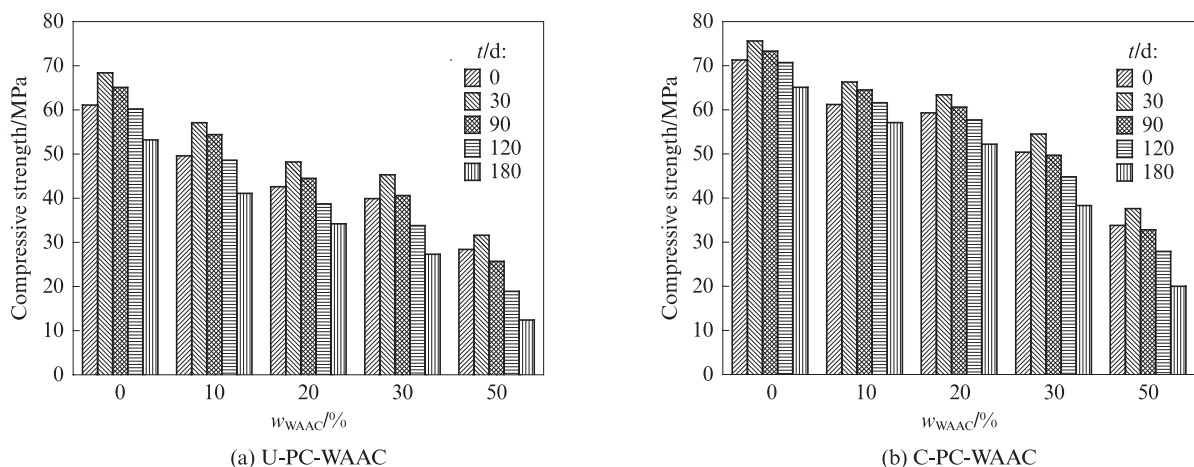


图2 硫酸盐浸泡不同时间后 PC-WAAC 的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of PC-WAAC after soaking in sulfate for different time

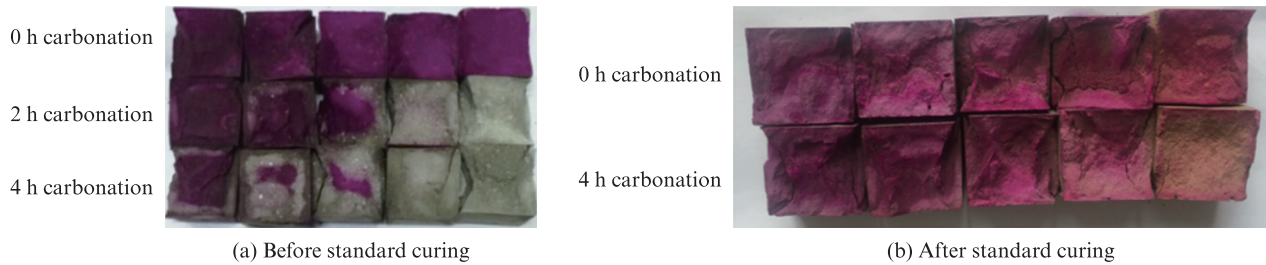


图3 PC-WAAC的碳化截面  
Fig. 3 Carbonization cross section of PC-WAAC

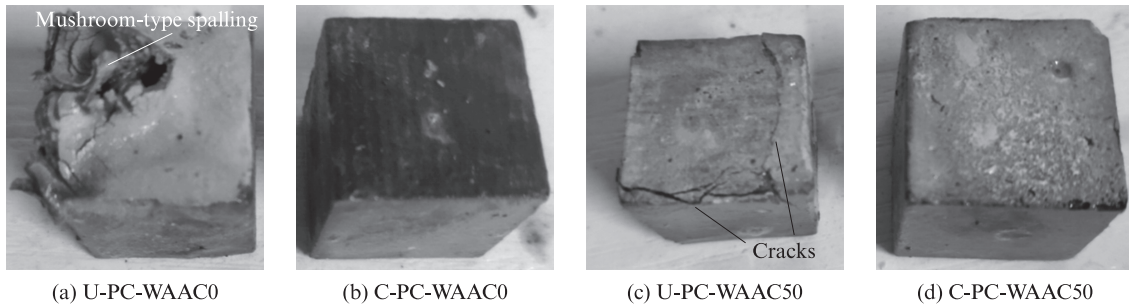


图4 硫酸盐浸泡180 d后PC-WAAC的外观形貌  
Fig. 4 Appearance of PC-WAAC after soaking in sulfate for 180 d

### 2.3 体积变形

硫酸盐浸泡不同时间后PC-WAAC的膨胀率见图5。由图5可见:硫酸盐浸泡后,所有试件的膨胀率均增大,这是由于石膏和AFt的形成,导致其在硫酸盐浸泡后膨胀<sup>[10]</sup>;随着WAAC掺量的增加,试件孔隙率增加,更多的腐蚀剂进入试件,形成更多的石膏和AFt,从而导致试样的膨胀率增大;碳化养护使试件的膨胀率降低,当 $t=180$  d后,C-PC-WAAC的膨胀率为2.18%~6.11%,U-PC-WAAC的为2.86%~8.86%,碳化养护降低了WAAC引起的PC-WAAC膨胀,这为碳化养护可以提高水泥石抗硫酸盐侵蚀能力提供了佐证。

### 2.4 质量变化

硫酸盐浸泡不同时间后PC-WAAC的质量变化见图6。由图6可见:与硫酸盐浸泡前相比,几乎所有试件均呈现出质量增加的趋势,这是由于试件对硫酸盐的吸附导致的;U-PC-WAAC的浸泡时间从120 d增加到180 d时,试件质量明显下降,这与图4所示的剥落损伤外观结果一致;碳化养护降低了试件的质量增量,如浸泡120 d后,C-PC-WAAC、U-PC-WAAC的增重分别为2.31%~3.26%、2.67%~3.48%,这主要是由于碳化养护降低了试件的渗透性,提高了其对硫酸盐侵蚀的抵抗能力。综上,试件质量对早期硫酸盐侵蚀并不敏感,硫酸盐侵蚀下混凝土的长期性能有待进一步研究。

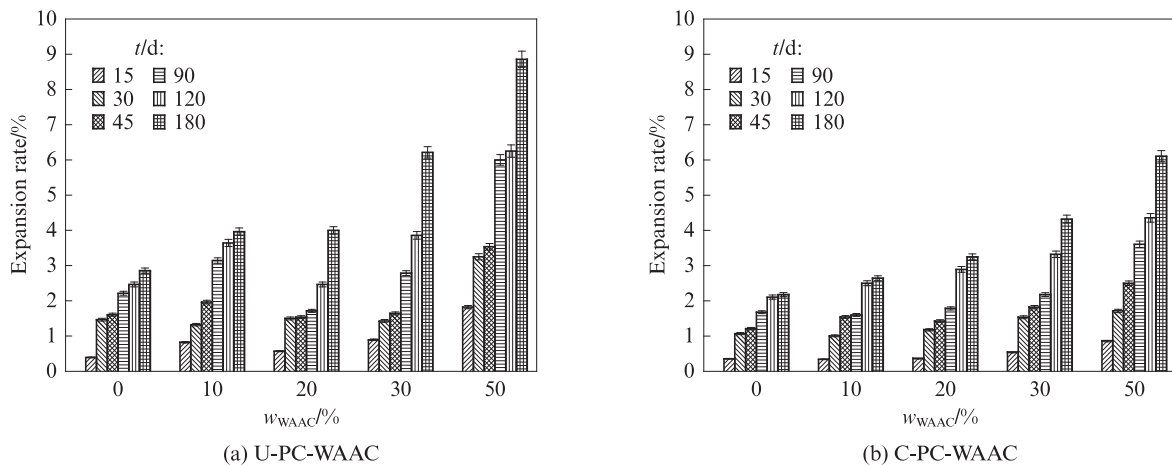


图5 硫酸盐浸泡不同时间后PC-WAAC的膨胀率  
Fig. 5 Expansion rate of PC-WAAC after soaking in sulfate for different time

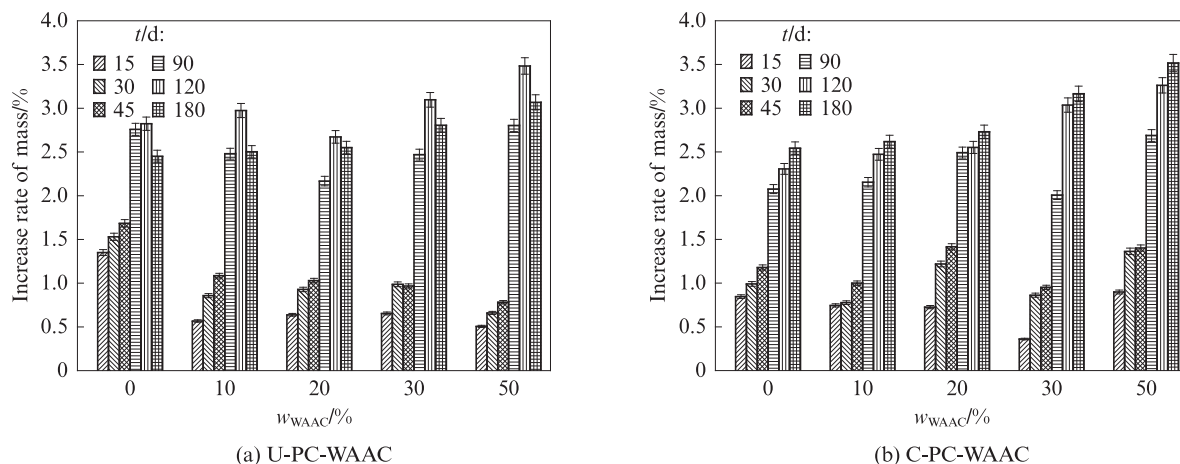


图6 硫酸盐浸泡不同时间后PC-WAAC的质量变化

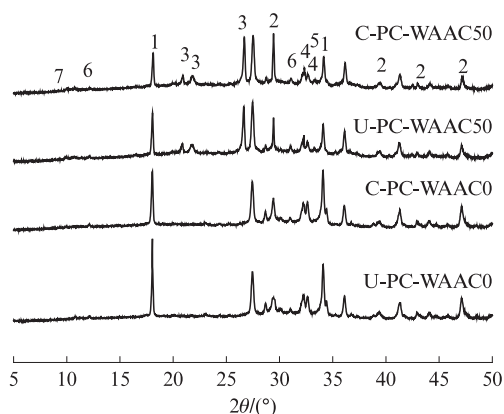
Fig. 6 Mass changes of PC-WAAC after soaking in sulfate for different time

## 2.5 相组成分析

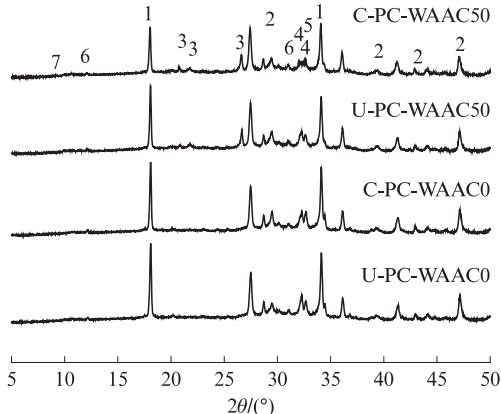
硫酸盐浸泡不同时间后PC-WAAC的XRD图

谱见图7.由图7可见:U-PC-WAAC中可以明显观测到阿利特( $C_3S$ )、贝利特( $C_2S$ )、 $Ca(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ 、

1— $Ca(OH)_2$  2— $CaCO_3$ (Calcite) 3— $SiO_2$  4— $C_3S$   
5— $C_2S$  6— $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  7—AFt

(a)  $t=0$  d

1— $Ca(OH)_2$  2— $CaCO_3$ (Calcite) 3— $SiO_2$  4— $C_3S$   
5— $C_2S$  6— $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  7—AFt

(b)  $t=30$  d

1— $Ca(OH)_2$  2— $CaCO_3$ (Calcite) 3— $SiO_2$  4— $C_3S$   
5— $C_2S$  6— $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  7—AFt

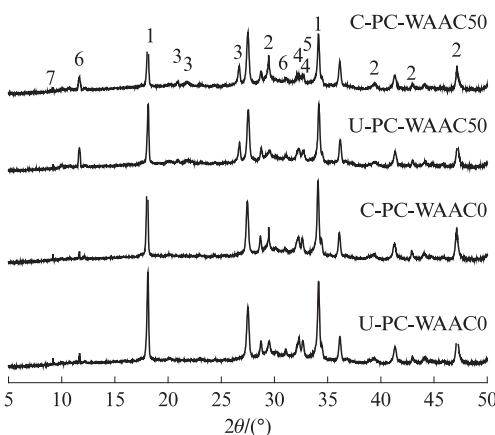
(c)  $t=180$  d

图7 硫酸盐浸泡不同时间后PC-WAAC的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of PC-WAAC after soaking in sulfate for different time

AFt、石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )的衍射峰, $\text{CaCO}_3$ 的出现归因于试件表面的大气碳酸化, $\text{SiO}_2$ 源自于WAAC,硫酸盐侵蚀产物 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 由于含量低而未被检测到<sup>[10]</sup>;C-PC-WAAC的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度降低,方解石(Calcite)的衍射峰明显增强,这为碳化养护过程中的碳化反应和碳吸收提供了证据;浸泡30 d后,所有试件 $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$ 衍射峰强度降低,这是由于试件在浸泡初期继续水化造成的,是造成2.1浸泡30 d试件抗压强度提高的主要原因;随着浸泡时间的延长,试件中石膏和AFt的衍射峰强度增加,形成了更多的石膏和AFt.在硫酸盐浸泡早期,形成的少量石膏和AFt可以填充水泥试件的孔隙,提高其强度<sup>[13]</sup>,但随着浸泡时间的延长,石膏和AFt的含量增多,试件发生膨胀开裂,抗压强度降低.浸泡180 d后,C-PC-WAAC中石膏和AFt衍射峰的强度均低于U-PC-WAAC,这表明碳化养护可以抑制试件中硫酸盐产物的生成,进而提高其抗硫酸盐侵蚀能力.

## 2.6 孔结构及微观形貌分析

水泥混凝土中的孔是相互连接、随机分布的,需要有孔连接整个孔隙系统使其成为一个整体,将较

大的孔隙连通起来的各孔最大孔径称为临界孔径( $R_c$ )<sup>[14]</sup>.孔径 $d$ 大于临界孔径的孔为未连通孔,而孔径等于或小于临界孔径的孔为连通孔.临界孔径对水泥石的抗渗性和耐久性有直接的影响,它可以用来反应水泥混凝土的渗透性.临界孔径越小,水泥净浆的抗渗性和耐久性越好.

硫酸盐浸泡前后PC-WAAC的孔结构分布见图8,其孔结构参数见表2.由图8、表2可见:硫酸盐浸泡前,WAAC的掺入使PC-WAAC临界孔径增大,孔隙率增大;而碳化养护后由于碳化产物 $\text{CaCO}_3$ 的充填作用,使C-PC-WAAC孔隙结构细化,孔隙率降低<sup>[4]</sup>,临界孔径减小.由此可见,WAAC的掺入增大了PC-WAAC的渗透性,而碳化养护降低了其渗透性.硫酸盐浸泡180 d后,PC-WAAC的孔径变大,产生了更多 $d > 1000 \text{ nm}$ 的孔,孔隙率提高了21.76%~38.51%.这是因为随着硫酸盐侵蚀的加剧,石膏和AFt的含量增高,PC-WAAC体积膨胀或开裂<sup>[10]</sup>.浸泡180 d的C-PC-WAAC孔隙率比其对应的U-PC-WAAC降低了6.30%~9.09%,这说明碳化养护试件受到硫酸盐侵蚀的程度较小.

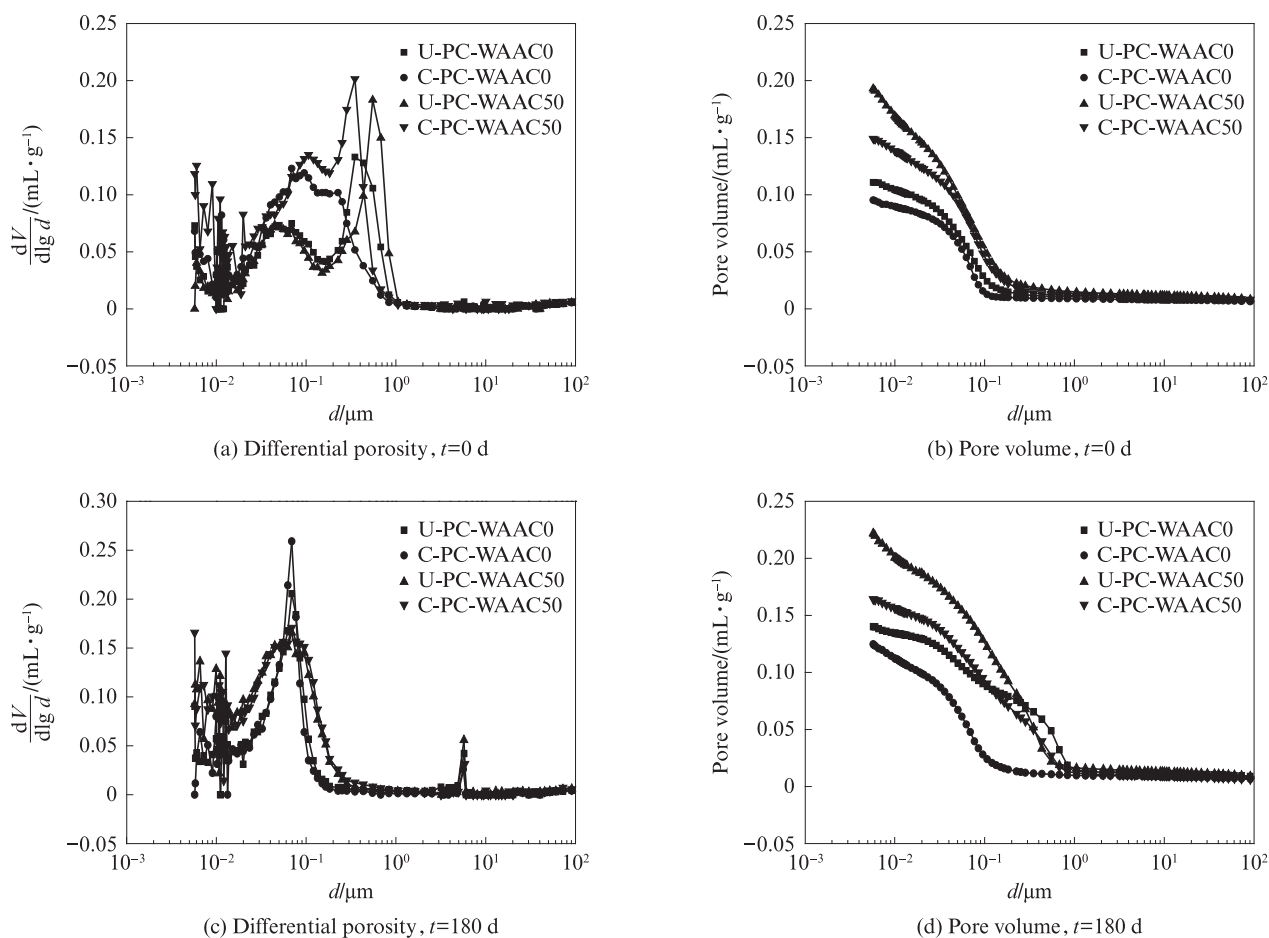


图8 硫酸盐浸泡前后PC-WAAC的孔结构分布

Fig. 8 Pore structure distribution of PC-WAAC before and after soaking in sulfate

表 2 硫酸盐浸泡前后 PC-WAAC 孔结构参数  
Table 2 Pore structure parameters of PC-WAAC before and after soaking in sulfate

| <i>t</i> /d | Specimen    | <i>R<sub>c</sub></i> /nm | Porosity (by volume)/% | Pore size distribution/% |                    |                     |                        |                    |
|-------------|-------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
|             |             |                          |                        | <i>d</i> <20 nm          | <i>d</i> =20–50 nm | <i>d</i> =50–100 nm | <i>d</i> =100–1 000 nm | <i>d</i> >1 000 nm |
| 0           | U-PC-WAAC0  | 1.79                     | 18.0                   | 18.6                     | 17.0               | 23.2                | 30.8                   | 10.4               |
|             | U-PC-WAAC50 | 2.18                     | 26.2                   | 17.5                     | 12.6               | 18.5                | 41.4                   | 10.0               |
|             | C-PC-WAAC0  | 1.48                     | 16.1                   | 27.2                     | 20.1               | 19.4                | 22.1                   | 11.2               |
|             | C-PC-WAAC50 | 1.75                     | 21.8                   | 16.7                     | 19.1               | 19.9                | 36.2                   | 8.1                |
| 180         | U-PC-WAAC0  |                          | 23.8                   | 17.7                     | 23.4               | 25.8                | 14.7                   | 18.4               |
|             | U-PC-WAAC50 |                          | 31.9                   | 17.3                     | 19.8               | 21.5                | 25.4                   | 16.0               |
|             | C-PC-WAAC0  |                          | 22.3                   | 23.9                     | 30.8               | 27.6                | 6.2                    | 11.5               |
|             | C-PC-WAAC50 |                          | 29.0                   | 19.9                     | 32.2               | 14.8                | 19.4                   | 13.7               |

PC-WAAC 的 SEM 照片见图 9(图中标记区域的成分由 EDS 分析确定).由图 9 可见:在硫酸盐浸泡前,PC-WACC 中形成了一些针棒状 AFt 和六方板状 Ca(OH)<sub>2</sub>;碳化养护后水化产物的形貌发生了明显变化,没有观察到典型的 Ca(OH)<sub>2</sub>,但试件中形成了一些不规则的 CaCO<sub>3</sub>颗粒,填充了一些孔隙,细化了试件的微观结构<sup>[15]</sup>.众所周知,水泥的水化产物,如 Ca(OH)<sub>2</sub>,在与流动的水接触时会溶解,从而导致其受到溶蚀侵蚀.但 PC-WAAC 在碳

化养护后形成了致密的钙改性壳层,其含有大量的 CaCO<sub>3</sub>,而 CaCO<sub>3</sub>比 Ca(OH)<sub>2</sub>的溶解度小,从而使其结构致密性和产物溶解度得到改善,溶蚀侵蚀得到了缓解.硫酸盐溶液浸泡 180 d 后,U-PC-WAAC 中形成了大量的 AFt,填充了试件的孔隙,使其体积膨胀,并形成了大量微裂纹,从而降低了试件的抗压强度.但 C-PC-WAAC 浸泡 180 d 后,由于其抗硫酸盐侵蚀能力的提高,其形貌并没有发生明显变化.

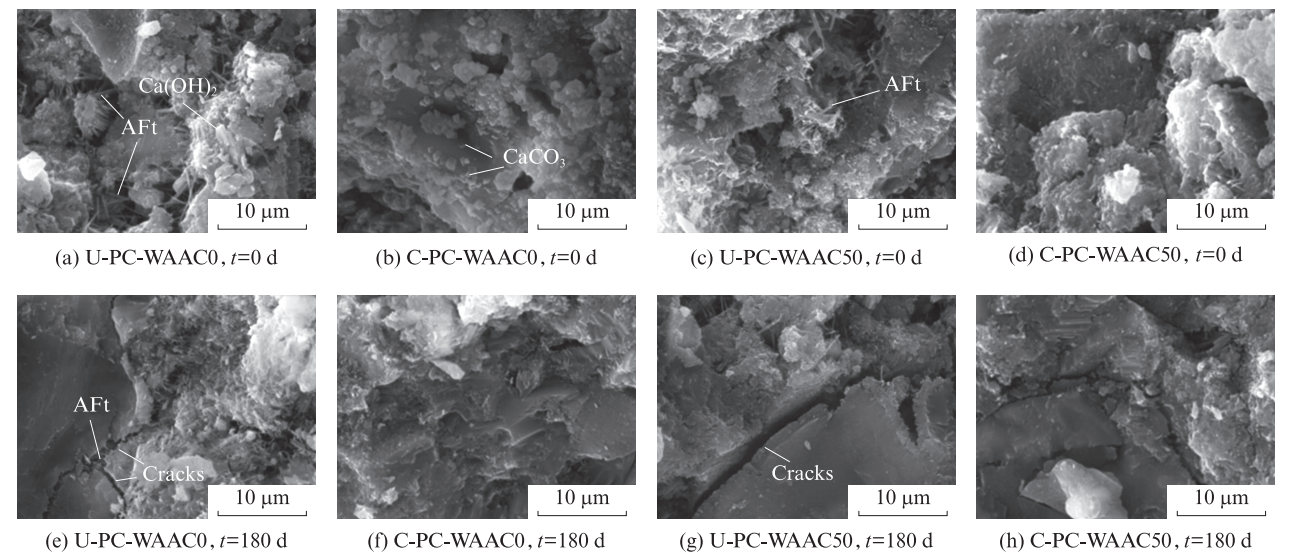


图 9 PC-WAAC 的 SEM 照片  
Fig. 9 SEM images of PC-WAAC pastes

3 结论

- (1) 硅酸盐水泥(PC)-蒸压加气混凝土(WAAC)在硫酸盐浸泡 30 d 后,试件的抗压强度增加了 6.03%~15.12%,而浸泡 180 d 后其抗压强度下降.
- (2) 碳化养护可以减缓 PC-WAAC 硫酸盐浸泡后强度的降低及结构的劣化.浸泡 180 d 后,WAAC 掺量为 0%、10%、20% 的碳化养护 PC-WAAC 强度

- 比其相同 WAAC 掺量的未碳化试件浸泡前强度分别提高了 6.55%、15.12%、22.54%.
- (3) PC-WAAC 在硫酸盐中浸泡时间越长,其体积膨胀越明显,而碳化养护可以抑制这种体积膨胀,膨胀率由未碳化养护试件的 2.86%~8.86% 降低为碳化养护试件的 2.18%~6.11%.在硫酸盐侵蚀早期,PC-WAAC 的质量变化不敏感.
- (4) 碳化养护使 PC-WAAC 的致密性增大,孔隙

结构细化.与未碳化养护试件相比,碳化养护使浸泡180 d后的PC-WAAC孔隙率降低了6.30%~9.09%,显著提高了其抗硫酸盐侵蚀能力.

#### 参考文献:

- [1] 冷发光,何更新,张仁瑜,等.国内外建筑垃圾资源化现状及发展趋势[J].环境卫生工程,2009(1):33-35.  
LENG Faguang, HE Gengxin, ZHANG Renyu, et al. Current situation and development trend of construction waste resource utilization at home and abroad [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2009 (1):33-35.(in chinese)
- [2] 魏英烁,姬国强,胡力群.建筑垃圾回收再利用研究综述[J].硅酸盐通报,2019,276(9):147-151.  
WEI Yingshuo, JI Guoqiang, HU Liqun. Review of construction waste recycling research [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 276(9):147-151.(in chinese)
- [3] LIU Y, BO S L, HU Z T, et al. Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 140-147.
- [4] CANTERO B, BRAVO M, BRITO J. Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275:122913.
- [5] QIN L, GAO X J. Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation[J]. Waste Management, 2019, 89:254-264.
- [6] 管学茂,魏红姗,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):50-55.  
GUAN Xuemao, WEI Hongshan, MA Xiaoe, et al. Accelerated carbonization and hardening of  $C_3S_2$  minerals [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):50-55.(in Chinese)
- [7] HAY R, CELIK K. Accelerated carbonation of reactive magnesium oxide cement (RMC)-based composite with supercritical carbon dioxide ( $scCO_2$ ) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248:119282.
- [8] 张国防,王顺祥,陆小培,等. HEMC 改性水泥砂浆在硫酸盐侵蚀作用下的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2):173-178.  
ZHANG Guofang, WANG Shunxiang, LU Xiaopei, et al. Mechanical properties of HEMC modified cement mortar subjected to sulfate attack [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):173-178.(in Chinese)
- [9] 黄谦,王冲,赵亮. 半浸泡下纳米  $SiO_2$  对水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀能力的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6):978-985.  
HUANG Qian, WANG Chong, ZHAO Liang. Effect of nano- $SiO_2$  on sulfate resistance of cement mortar under semi-immersion [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6):978-985.(in Chinese)
- [10] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 325-332.
- [11] ZHANG D, SHAO Y X. Early age carbonation curing for precast reinforced concretes [J]. Construction Building Materials, 2016, 113:134-143.
- [12] ZHANG D, LIU T L, SHAO Y X. Weathering carbonation behavior of concrete subject to early-age carbonation curing [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(4):04020038.
- [13] WANG Y, CAO Y S, CUI L, et al. Effect of external sulfate attack on the mechanical behavior of cemented paste backfill [J]. Construction and Building Materials, 2020, 263:120968.
- [14] 刘军,邢锋,董必钦. 混凝土孔结构和渗透性能关系研究[J]. 混凝土, 2007(12):35-37.  
LIU Jun, XING Feng, DONG Biqin. Study on the relationship between concrete pore structure and permeability [J]. Concrete, 2007(12):35-37.(in Chinese)
- [15] DENG M, MO L W, ZHANG F. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under  $CO_2$  curing [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 88:217-226.