

文章编号:1007-9629(2022)07-0715-07

高温与碳化对铝酸盐水泥水化产物 氯离子结合稳定性的影响

陈钰婷¹, 王中平^{1,2}, 彭 相¹, 朱哲誉¹, 徐玲琳^{1,2,*}

(1. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804;

2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过对比 4 种铝酸盐水泥(CAC)常见水化产物 CAH_{10} 、 C_2AH_8 、 C_3AH_6 、 $\text{NO}_3\text{-AFm}$ 与氯离子充分结合所得 Fs 样品在高温和碳化前后的氯离子结合量、浸泡液 pH 值、物相组成及微观形貌等, 研究了温度和碳化作用对 CAC 水化产物与氯离子结合稳定性的影响。结果表明: 高温仅影响 CAC 水化产物物理吸附氯离子的稳定性, 对化学结合稳定性基本无影响; 碳化作用导致 Friedel's 盐溶解, 生成以方解石为主的 CaCO_3 , 使浆体中的自由氯离子浓度增加; 相比之下, CAH_{10} 、 C_2AH_8 与氯离子结合后的 Fs 样品抗碳化能力较好。

关键词: 铝酸盐水泥; 氯离子结合稳定性; 高温; 碳化

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.07.009

Effect of High Temperature and Carbonization on Chloride Binding Stability in Calcium Aluminate Cement

CHEN Yuting¹, WANG Zhongping^{1,2}, PENG Xiang¹, ZHU Zheyu¹, XU Linglin^{1,2,*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effect of temperature and carbonization on the chloride binding stability of calcium aluminate cement (CAC) was investigated by comparing the amount of binding chloride, pH value of soaking solution, composition and morphology of Fs samples, which were obtained by four common chloride-bound hydration products (CAH_{10} , C_2AH_8 , C_3AH_6 and $\text{NO}_3\text{-AFm}$) of CAC, before and after high temperature and carbonization. The results show that high temperature has great impact on the physical binding chloride instead of chemical binding one. Carbonization causes Friedel's salt to dissolve, forming calcium carbonate products dominated by calcite, thus increasing the content of free chloride in the pore solution. Chloride-bound Fs (CAH_{10}) and Fs (C_2AH_8) exhibit relatively better resistance to carbonization.

Key words: calcium aluminate cement(CAC); chloride binding stability; high temperature; carbonation

氯盐腐蚀是导致海洋环境中钢筋混凝土结构耐久性降低的重要原因^[1-2]。氯离子进入水泥基材料后, 或与某些水泥相反应形成 Friedel's 盐 ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), 抑或被吸附于水化产物或者孔壁上, 前者称

为氯离子化学结合, 后者称为氯离子物理吸附^[3]。研究表明, 水泥浆体对氯离子的结合利于改善结构的抗氯离子腐蚀性^[3-4]。但硬化水泥石中易结合氯离子的主要矿物相具有不稳定性, 在高温或碳化作用下, 非稳定

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51772212, 51402216)

第一作者: 陈钰婷(1997—), 女, 上海人, 同济大学硕士生. E-mail: chen15901737773@126.com

通讯作者: 徐玲琳(1986—), 女, 江苏建湖人, 同济大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: xulinglin@126.com

结合的氯离子或被释放,造成再次腐蚀风险,这在硅酸盐水泥体系中已得到验证.例如,升温使硅酸盐水泥石的氯离子结合量逐渐增加^[5-6],而过高温度又致使其降低^[7];低氯盐浓度条件下,升温导致氯离子结合量降低,而高氯盐浓度条件下相反^[8];碳化不但使水化产物丧失氯离子结合能力,而且导致 Friedel's 盐溶解^[9-13],对水泥石的氯离子结合起负面作用.

铝酸盐水泥(calcium aluminate cement,CAC)的水化产物具有优异的化学结合氯离子能力^[4,14],有望用于海洋工程.然而,CAC水化过程受温度影响显著,其水化产物CAH₁₀和C₂AH₈在高温下易转变为稳定的C₃AH₆^[15-16],降低了CAC的氯离子结合稳定性.近年来,围绕CAC水化产物的物相稳定性提升开展了系统研究.如Falzone等^[17]和姚燕等^[18]发现,硝酸钙改性CAC浆体中会生成吉布斯自由能更低的NO₃-AFm(C₃A·Ca(NO₃)₂·10H₂O),可避免界稳相水化产物转变,有效抑制CAC强度倒缩;但高温及碳化可能导致物相转变.由此可见,关于CAC的氯离子结合稳定性仍缺乏研究.

鉴于此,本文结合CAC的水化特性,利用pH计、X射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)探究了高温和碳化作用对CAH₁₀、C₂AH₈、C₃AH₆和NO₃-AFm这4种典型CAC水化产物与氯离子结合稳定性的影响,综合评估了CAC的氯离子结合性能,以期为CAC在氯盐腐蚀环境中的安全高效利用提供理论基础和数据支撑.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用益瑞石公司产CAC(商品名Ternal White),其化学组成(文中涉及的组成、水胶比等均为质量分数或质量比)和物理性能分别见表1、2;试验用水均为去离子水;化学试剂为国药集团产四水硝酸钙(Ca(NO₃)₂·4H₂O)和氯化钠(NaCl),分析纯.

表1 铝酸盐水泥的化学组成
Table 1 Chemical composition of CAC

w/%						
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
0.65	29.44	68.76	0.18	0.15	0.09	0.08

表2 铝酸盐水泥的物理性能
Table 2 Physical property of CAC

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Setting time/min		28 d strength/MPa	
	Initial	Final	Compressive	Flexural
410	60	180	81.60	12.60

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

按水胶比2:1称取4份去离子水和CAC.其中3份去离子水与CAC搅拌均匀后分别置于5、20、60℃下养护30 d,依次得到CAH₁₀、C₂AH₈和C₃AH₆样品;另1份去离子水中先溶入20%的Ca(NO₃)₂·4H₂O(以CAC质量为基准),再与CAC充分搅拌后在45℃下密封养护30 d,得到NO₃-AFm样品.4种样品均放入真空干燥箱干燥48 h,然后研磨成粒径小于48 μm的粉末备用,其物相组成见图1.

高温试验:先取3份上述4种粉末样品各5 g,置于1.0 mol/L NaCl溶液中浸泡120 d,使粉末样品与氯离子充分结合生成Friedel's盐——Fs(CAH₁₀)、Fs(C₂AH₈)、Fs(C₃AH₆)和Fs(NO₃-AFm);再将这4种Fs样品分别于(20±1)、(60±1)℃下继续浸泡28 d,洗涤、干燥后备用.

碳化试验:将(20±1)℃下经NaCl溶液浸泡120 d的Fs(CAH₁₀)、Fs(C₂AH₈)、Fs(C₃AH₆)和Fs(NO₃-AFm)洗涤、干燥后置于碳化试验箱((20±1)℃、相对湿度为(65±5)%及质量分数为3.0%的CO₂)内养护至规定龄期.

1.2.2 测试方法

CAC水化产物与氯离子的结合量通过样品浸泡液中的氯离子浓度计算得到,计算表达式^[19]为:

$$C_b = \frac{35.45V_0(C_0 - C_1)}{m} \quad (1)$$

式中:C_b为单位质量样品的氯离子结合量,mg/g;V₀为样品浸泡液的体积,mL;C₀为浸泡液的初始氯离子浓度,mol/L,本文为1.0 mol/L;C₁为样品浸泡液的氯离子浓度,mol/L;m为样品的质量,g.

采用雷磁ZDJ-4A型自动电位滴定仪测定样品浸泡液的氯离子浓度C₁,每份浸泡液滴定3次,取其平均值作为试验值.采用METTLER TOLEDO数显pH计测量样品浸泡液的pH值,每次测量前,先用pH值为4.00、6.86和9.18的缓冲液进行校准,每个样品重复测试3次,试验值取其算术平均值.采用日本Rigaku D/max 2550 X射线粉末衍射仪(XRD在5°~45°进行连续扫描,扫描速率为2(°)/min.利用美国FEI公司产QUANTA 200FEG-ESEM型场发射环境扫描电子显微镜(SEM)进行微观形貌分析,加速电压为20 kV,采用低真空模式.

2 结果与讨论

2.1 高温对CAC氯离子结合稳定性的影响

2.1.1 浸泡液的氯离子浓度

图2显示了相比20℃浸泡,不同Fs样品在60℃下

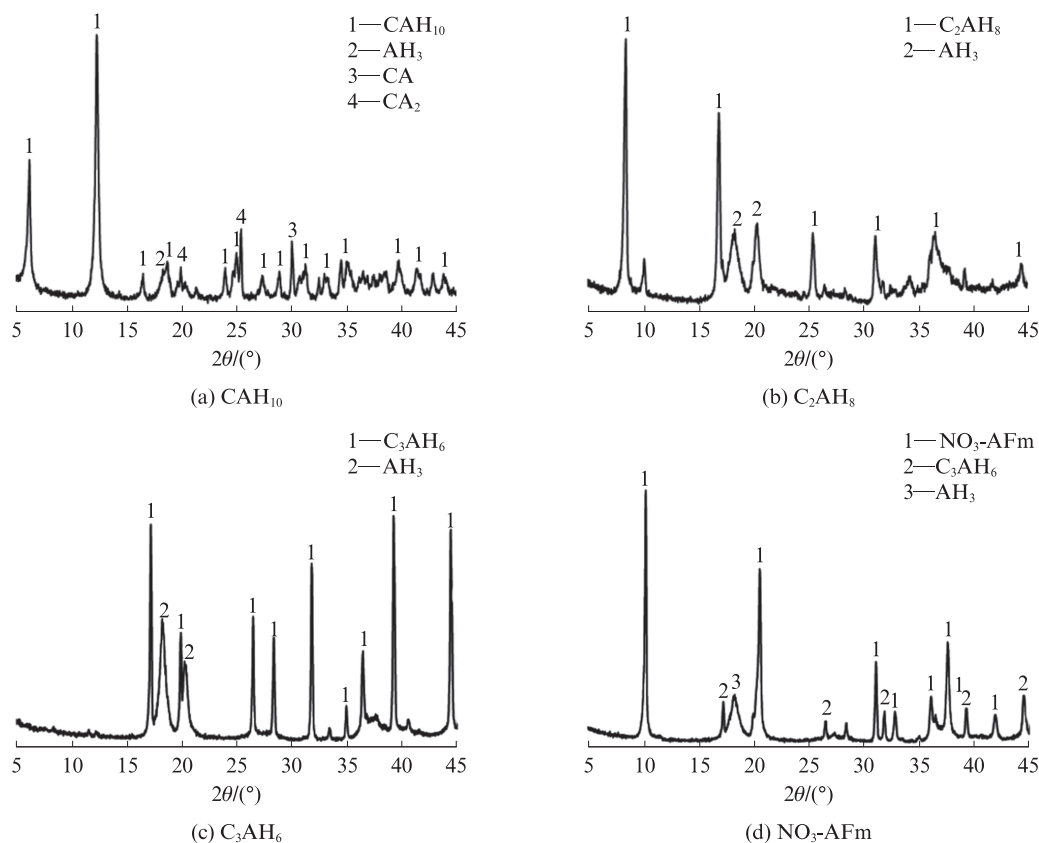


图1 4种样品的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of four kinds of sample

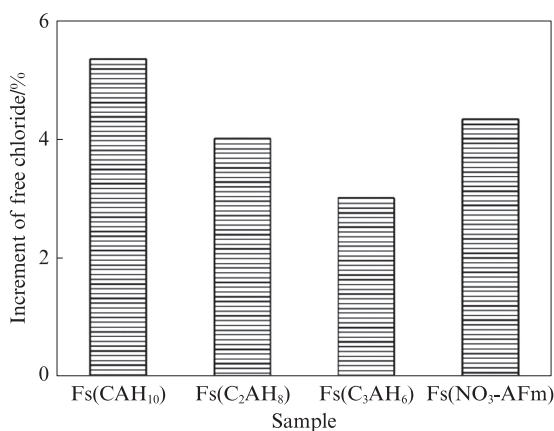


图2 不同Fs样品在60 °C下浸泡28 d后氯离子浓度较20 °C时的增加量

Fig. 2 Increment of free chloride concentration in soaking solution of chloride-bound samples at 60 °C for 28 d comparing to 20 °C

浸泡于NaCl溶液中28 d后氯离子浓度的增加量.由图2可以看出,60 °C下所有样品浸泡液中的氯离子浓度均显著高于20 °C时,其中Fs(CAH₁₀)样品尤为明显,增长了5.34%,而Fs(C₃AH₆)样品增长最少.这表明高温导致CAC水化产物中已结合的氯离子再次释放,成为自由氯离子,使得浸泡液中的氯离子浓度增加,从而对CAC水化产物的氯离子结合稳定性产生负面影响.

2.1.2 浸泡液的pH值

图3为20、60 °C下不同Fs样品在NaCl溶液中浸泡28 d时的pH值.由图3可见:(1)与初始溶液相比,20 °C下4种Fs样品浸泡液的pH值均有不同程度增加,增幅由大到小依次为Fs(C₃AH₆)>Fs(C₂AH₈)>Fs(CAH₁₀)>Fs(NO₃-AFm),其中增幅最小的Fs(NO₃-AFm)样品的pH值基本没有变化.(2)当温度升至60 °C时,除Fs(CAH₁₀)样品浸泡液的pH值继续略微增加外,Fs(C₂AH₈)和Fs(C₃AH₆)样品浸泡液的pH值均略微降低,Fs(NO₃-AFm)样品浸泡液的pH值仍无明显变化.上述结果与图2所示不同Fs样品浸泡液中氯离子浓度的变化规律基本一致,浸泡液的pH值增幅随着自由氯离子浓度的提升而增大.这是由于自由氯离子置换出水化铝酸钙内层的OH⁻,致使孔溶液pH值增加^[20-21],但可能由于高温影响氯离子的物理吸附,温度过高时浸泡液的pH值变化幅度仍然较小;高温下Fs(CAH₁₀)样品的pH值略有升高,可能是由于物理脱附出的自由氯离子数量有所增加,进一步促进其置换出OH⁻;此外,Fs(NO₃-AFm)样品浸泡液的pH值始终保持稳定,源自其对氯离子的化学结合是其结构中的NO₃⁻直接置换了氯离子,并未涉及游离OH⁻的释放^[22].

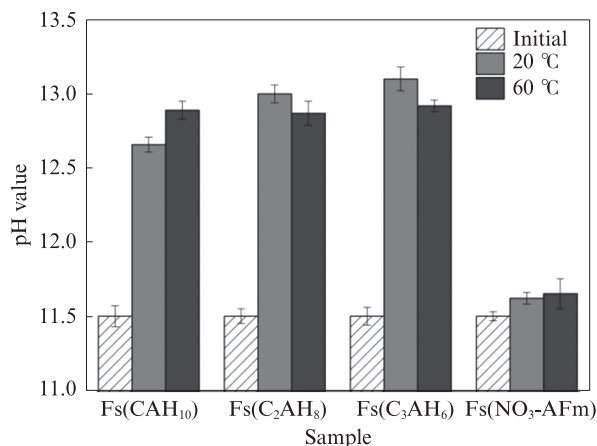


图3 不同Fs样品在20、60 °C下浸泡28 d时溶液的pH值
Fig. 3 pH values of soaking solution of chloride-bound samples immersed at 20, 60 °C for 28 d

2.1.3 水化产物组成

图4为20、60 °C下不同Fs样品在NaCl溶液中浸泡28 d时的XRD图谱.由图4可知:4种Fs样品在2种温度下的水化产物组成基本没有差异,均以Friedel's盐为主;与20 °C时相比,60 °C下Fs样品中Friedel's盐的衍射峰强度并未减弱,说明高温下浸泡液中氯离子浓度的增加并非源自Friedel's盐溶解,而

是物理结合的氯离子解吸附所致,也进一步证实了Fs样品浸泡液中自由氯离子与pH值变化的结果.

2.2 碳化对CAC氯离子结合稳定性的影响

2.2.1 氯离子结合量

图5为碳化1、3、7 d时不同Fs样品中自由氯离子浓度的变化.由图5可见:碳化1 d后,Fs(CAH₁₀)和Fs(C₂AH₈)样品中的自由氯离子浓度均较低,而Fs(C₃AH₆)和Fs(NO₃-AFm)样品中的自由氯离子浓度较高,最高可达 68.50×10^{-3} mol/L;碳化3 d后,Fs(CAH₁₀)、Fs(C₂AH₈)和Fs(C₃AH₆)样品中的自由氯离子浓度均大幅增加,而Fs(NO₃-AFm)样品仅略有增加;继续碳化至7 d时,Fs(CAH₁₀)和Fs(C₂AH₈)的自由氯离子含量增加仍较为明显,但增幅较3 d时有所放缓,而Fs(C₃AH₆)和Fs(NO₃-AFm)样品中的自由氯离子浓度较3 d时基本无变化.由此可见,碳化导致CAC水化产物结合氯离子所形成的Friedel's盐溶解生成CaCO₃和铝胶等物质,造成已结合的氯离子再次被释放出来,进入Fs样品孔溶液中,增加了自由氯离子的浓度^[23],且碳化时间越长,结合态氯离子转变为自由氯离子的程度越明显,与文献[21,24]结果相符.

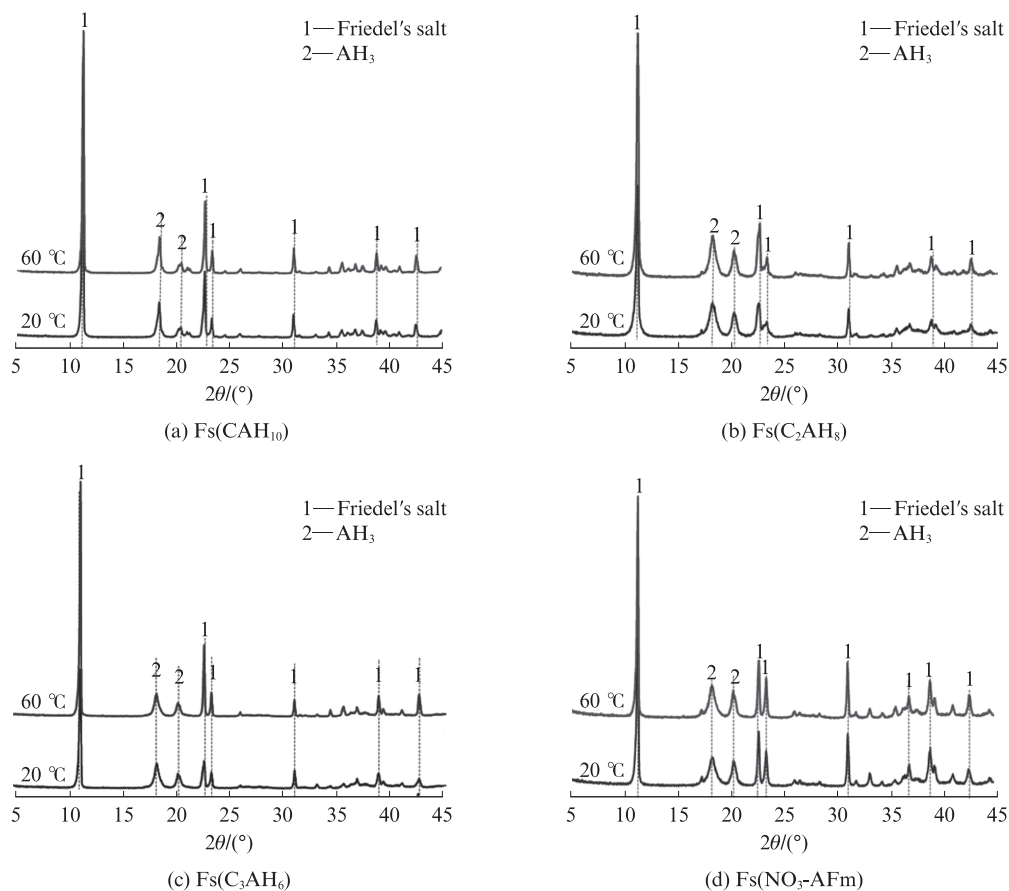


图4 不同Fs样品在20、60 °C下NaCl溶液中浸泡28 d时的XRD图谱
Fig. 4 XRD patterns of chloride-bound samples soaked in NaCl solutions for 28 d at 20, 60 °C

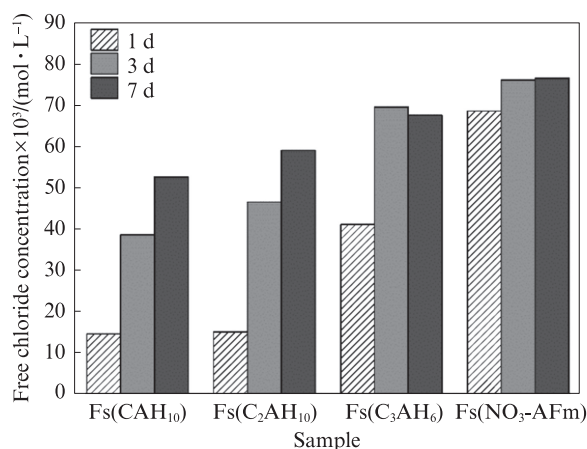


图5 不同Fs样品碳化1、3、7 d时的自由氯离子浓度变化

Fig. 5 Free chloride concentration of chloride-bound samples carbonized for 1, 3, 7 d

2.2.2 水化产物组成

图6为不同Fs样品碳化1、3、7 d时的XRD图谱。由图6(a)、(b)可见,碳化1 d时,在Fs(CAH₁₀)和Fs(C₂AH₈)样品中只检测到极弱的CaCO₃(方解石、

文石和球霏石)衍射信号,可以认为样品几乎未被碳化,因而自由氯离子浓度较低;碳化3 d时,CaCO₃的衍射强度明显增强,尤其是方解石,表明样品已被碳化;碳化7 d后,CaCO₃的衍射峰强度继续增强,且Friedel's盐衍射峰强度减弱,说明部分Friedel's盐因碳化而被溶解,结合态氯离子被再次释放,因此样品中的自由氯离子浓度大幅增加,与图4结果相符。相比之下,Fs(C₃AH₆)和Fs(NO₃-AFm)样品(图6(c))水化产物组成的变化规律基本一致,碳化1 d时即生成了大量以方解石为主的CaCO₃,可见样品碳化程度较大,这也解释了图5中碳化1 d时Fs(C₃AH₆)样品和Fs(NO₃-AFm)样品中自由氯离子含量较Fs(CAH₁₀)和Fs(C₂AH₈)样品更高的原因。继续碳化至3 d时,样品中Friedel's盐完全消失,相应方解石的衍射峰强度继续增强。而碳化7 d时样品中的水化产物组成与3 d时基本相同,可见样品早在3 d时就被完全碳化,这也与图5中Fs(CAH₁₀)和Fs(C₂AH₈)样品碳化3、7 d时的自由氯离子浓度几乎没有变化的结果相符。

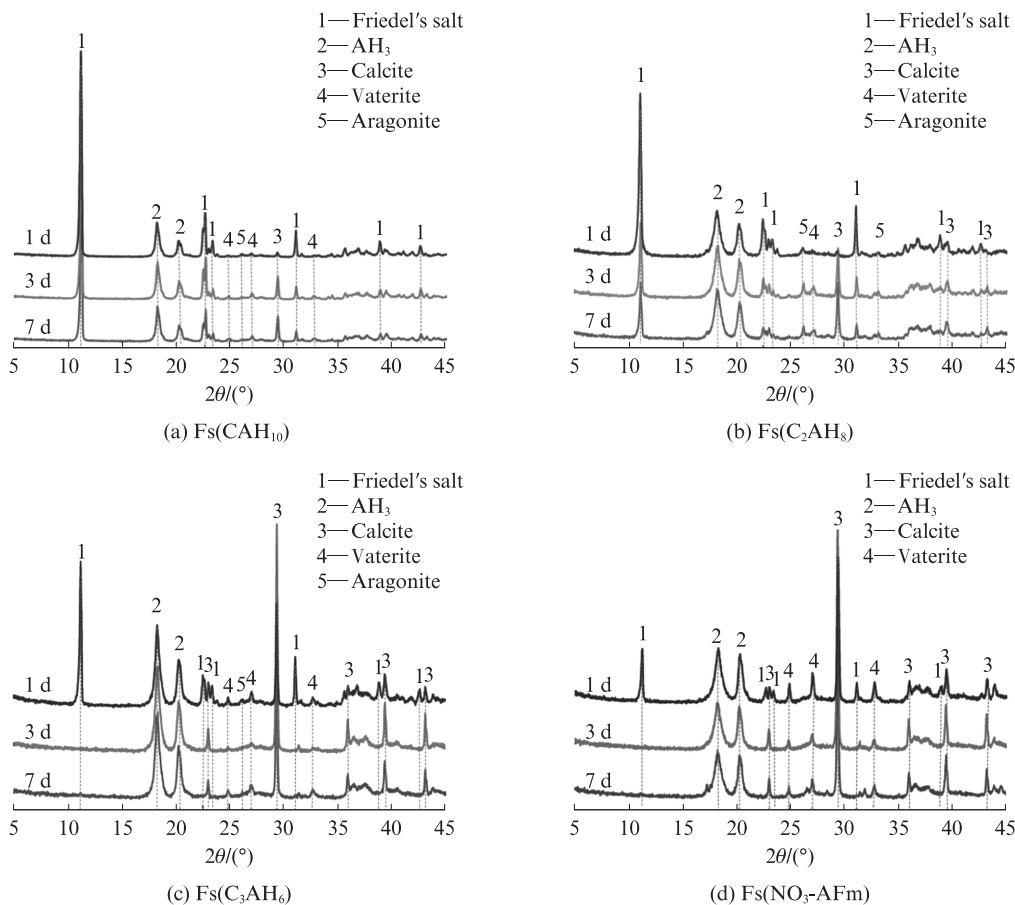


图6 不同Fs样品碳化1、3、7 d时的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of chloride-bound samples carbonized for 1, 3, 7 d

碳化对CAC水化产物的氯离子结合稳定性尤其是化学结合具有负面影响,主要有两方面原因^[24]:

一是使样品孔溶液的pH值降低,引发Friedel's盐溶解 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 +$

$2\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{CaCl}_2 + 10\text{H}_2\text{O}$,使得被结合的氯离子再次释放,导致孔溶液中的自由氯离子浓度升高;二是C-S-H和C-A-H等水化产物碳化后多形成 CaCO_3 和 AH_3 等水化产物,降低了氯离子结合位点,进而导致水泥基材料的氯离子结合能力大幅降低.结合图5、6可以看出, $\text{Fs}(\text{CAH}_{10})$ 和 $\text{Fs}(\text{C}_2\text{AH}_8)$ 样品具有较好的抗碳化性能,而 $\text{Fs}(\text{C}_3\text{AH}_6)$ 和 $\text{Fs}(\text{NO}_3\text{-AFm})$ 样品的抗碳化性能较差.

2.2.3 微观形貌

图7为各Fs样品碳化7 d时的SEM照片.由图7可见:(1)碳化后 $\text{Fs}(\text{CAH}_{10})$ 中呈六方板状的Friedel's盐表面光滑,结构仍较为完整,而在2块板状

Friedel's盐之间可见边长为 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 的方块状方解石.(2)碳化后 $\text{Fs}(\text{C}_2\text{AH}_8)$ 中六方板状Friedel's盐的轮廓较为模糊,表面因碳化而附着大量方解石和部分球霏石.(3)碳化后 $\text{Fs}(\text{C}_3\text{AH}_6)$ 样品中除了絮凝状 AH_3 外,其产物基本只有方块状的方解石,Friedel's盐不复存在,可见其碳化严重.(4)碳化后 $\text{Fs}(\text{NO}_3\text{-AFm})$ 的产物形貌与 $\text{Fs}(\text{C}_3\text{AH}_6)$ 基本相同,也是大量方块状的方解石被 AH_3 包裹,未发现板状的Friedel's盐,这与图6中XRD结果一致.由此可见:碳化首先导致Friedel's盐的表面溶解,然后在其表面形成大量方解石;随着碳化程度的加重,Friedel's盐被逐渐溶解,结合的氯离子则被释放出来,导致孔溶液中自由氯离子浓度升高.

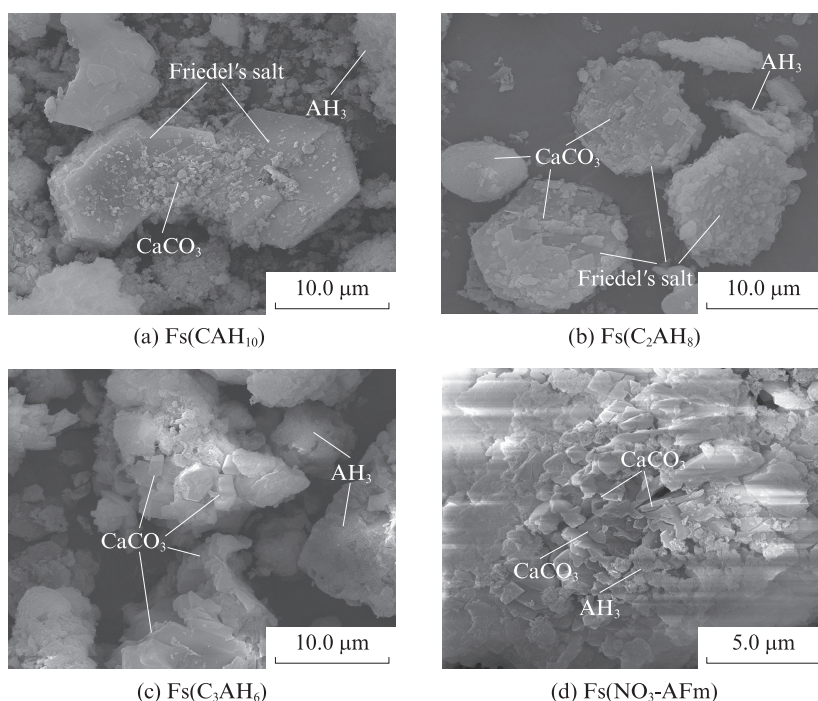


图7 不同Fs样品碳化7 d时的SEM照片

Fig. 7 SEM images of chloride-bound samples carbonized for 7 d

3 结论

(1)高温对CAC浆体的氯离子结合稳定性产生不利影响,导致已结合的氯离子释放,溶液中的自由氯离子浓度增加;但温度升高仅影响物理吸附氯离子的结合稳定性,对化学结合稳定性则基本无影响.高温对以氯离子化学结合为主的 $\text{Fs}(\text{NO}_3\text{-AFm})$ 样品无明显影响,但会导致 $\text{Fs}(\text{CAH}_{10})$ 、 $\text{Fs}(\text{C}_2\text{AH}_8)$ 和 $\text{Fs}(\text{C}_3\text{AH}_6)$ 样品中物理吸附的氯离子大幅解吸附.

(2)碳化对CAC浆体的氯离子结合稳定性产生不利影响,导致Friedel's盐溶解,并生成以方解石为主的 CaCO_3 ,进而增加浆体中自由氯离子的浓度;且碳化越严重,相应的自由氯离子浓度越高. $\text{Fs}(\text{CAH}_{10})$ 与

$\text{Fs}(\text{C}_2\text{AH}_8)$ 的抗碳化能力较好,而 $\text{Fs}(\text{C}_3\text{AH}_6)$ 与 $\text{Fs}(\text{NO}_3\text{-AFm})$ 的抗碳化能力较差.

参考文献:

- [1] SONG H W, SHIM H B, PETCHERDCHOO A, et al. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31: 120-127.
- [2] GOWRIPALAN N, MOHAMED H M. Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(8): 1119-1131.
- [3] 耿健, 丁庆军, 孙家瑛, 等. 3种不同类型水泥固化氯离子的特点 [J]. 水泥, 2009(6): 20-23.

- GENG Jian, DING Qingjun, SUN Jiaying, et al. Binding chloride ion abilities of three different types of cement [J]. Cement, 2009(6): 20-23. (in Chinese)
- [4] MACIAS A, KINDNESS A, GLASSER F P. Corrosion behaviour of steel in high alumina cement mortar cured at 5, 25 and 55 °C: Chemical and physical factors[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(9): 2279-2289.
- [5] HUSSAIN S E, RASHEEDUZZAFAR, AL-MUSALLAM A, et al. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1543-1555.
- [6] ROBERTS M. Effect of calcium chloride on the durability of pre-tensioned wire in prestressed concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1962, 14: 143-154.
- [7] ARYA C, BUENFELD N R, NEWMAN J B. Factors influencing chloride-binding in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(2): 291-300.
- [8] FLOREA M V A, BROUWERS H J H. Chloride binding related to hydration products Part I: Ordinary Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2): 282-290.
- [9] YUAN Q, SHI C, DE S G, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment-A review[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 1-13.
- [10] SURYAVANSHI A K, NARAYAN S R. Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(5): 729-741.
- [11] SAILLIO M, BAROGHEL B V, BARBERON F. Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 82-91.
- [12] CHANG H. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 84: 1-9.
- [13] GENG J, EASTERBROOK D, LIU Q F, et al. Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68: 353-363.
- [14] JIN S H, YANG H J, HWANG J P, et al. Corrosion behaviour of steel in CAC-mixed concrete containing different concentrations of chloride[J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 227-234.
- [15] GUIRADO F, GAL S, CHINCHÓN J S. Thermal decomposition of hydrated alumina cement (CAH_{10}) [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(3): 381-390.
- [16] YANG Z, WEN J G, KUN L, et al. Experimental verification on conversion mechanism of calcium aluminate cement hydrates [J]. China's Refractories, 2019, 28(2): 27-30.
- [17] FALZONE G, BALONIS M, SANT G. X-AFM stabilization as a mechanism of bypassing conversion phenomena in calcium aluminate cements[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 72: 54-68.
- [18] 姚燕, 王宏霞, 刁桂芝, 等. 硝酸钙对铝酸盐水泥强度及水化性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 207-213.
- YAO Yan, WANG Hongxia, DIAO Guizhi, et al. Effect of calcium nitrate on strength and hydration of calcium aluminate cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(2): 207-213. (in Chinese)
- [19] 钱匡亮, 付传清, 屠一军, 等. 水泥基材料氯离子结合性能测定方法及其适用性分析[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(3): 51-55.
- QIAN Kuangliang, FU Chuanqing, TU Yijun, et al. Test methods and its applicability of chloride binding capacity in cementitious materials [J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(3): 51-55. (in Chinese)
- [20] LUPING T, NILSSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2): 247-253.
- [21] 王小刚. 氯离子结合及其对水泥基材料微观结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(2): 187-198.
- WANG Xiaogang. Chloride binding and its effects on microstructure of cement-based materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(2): 187-198. (in Chinese)
- [22] 姜文斌. 水泥矿物及其水化产物对氯离子的固化机理[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- JIANG Wenbin. The mechanism of cement minerals and their hydration products binding chlorides [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] YUAN Q, SHI C, DE SCHUTTER G, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment-A review[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 1-13.
- [24] CHANG H. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 84: 1-9.