

文章编号:1007-9629(2022)09-0968-08

## 硅酸盐白水泥石面层加速碳化程度与微观结构

韩亚倩, 朱洪波\*, 张祎璐, 杨正宏

(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:**为研究加速碳化对白色硅酸盐水泥石强度、碳化程度和微观结构的影响,采用热重分析(TG)定量表征水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH)及 $\text{CaCO}_3$ 含量,通过扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)和压汞仪(MIP)测试水泥石的微观结构.结果表明:与同龄期的自然养护试样相比,碳化养护3、14、28 d时水泥石抗压强度分别提高10.7%、7.3%和5.8%,抗折强度分别提高17.9%、16.1%和14.3%;碳化14 d时的试样继续干湿循环养护7 d仍可明显提高CH含量,碳化28 d后的碳化程度趋于稳定;碳化试样的孔隙率略高且平均孔径更低,其50~200 nm的较大孔数量明显减少,而小于20 nm的微孔数量相对更多;常压下加速碳化反应直接发生在水泥水化产物CH晶体的表面,在CH晶体棱角处的碳化程度最高,碳化产物与之共生.

**关键词:**白色硅酸盐水泥石;干湿循环;碳化程度;微观结构

**中图分类号:** TU525.2

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.012

## Accelerating Carbonation Degree and Microstructure of Surface Layer of Hardened White Portland Cement

HAN Yaqian, ZHU Hongbo\*, ZHANG Yilu, YANG Zhenghong

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of accelerated carbonation on the mechanical properties, carbonation degree and microstructure of hardened white Portland cement, the contents of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (CH) and  $\text{CaCO}_3$  were quantitatively characterized by thermogravimetric analysis (TG), the microstructure was analyzed by electron scanning electron microscope energy spectrum (SEM-EDS) and the mercury intrusion porosimetry (MIP). Compared with natural curing samples of the same age, the results show that carbonation curing can significantly enhance the compressive strength of cement paste at all ages. Carbonation for 3, 14, 28 d can increase the compressive strength by 10.7%, 7.3% and 5.8% respectively, and the flexural strength by 17.9%, 16.1% and 14.3% respectively. The content of CH can still be significantly increased for the sample carbonized for 14 d after continuous dry wet cyclic curing for 7 d, and the carbonization degree tended to be stable after 28 d of carbonization. The porosity of carbonized samples is slightly higher than that of natural curing samples, and the average pore diameter is lower. The number of larger pores of 50–200 nm is greatly reduced, while the number of micro pores less than 20 nm is relatively more; the accelerated carbonation reaction under atmospheric pressure occurs directly on the surface of CH crystal produced in cement hydration. The carbonation degree is the highest at the edges and corners of the CH crystal, and the carbonation product coexists with it.

**Key words:** hardened white Portland cement; dry-wet cycle; carbonization degree; microstructure

收稿日期:2021-07-29; 修订日期:2021-12-10

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1101002)

第一作者:韩亚倩(1994—),女,河北保定人,同济大学硕士生.E-mail: 953399671@qq.com

通讯作者:朱洪波(1965—),男,河南驻马店人,同济大学副教授,博士生导师,博士.E-mail: 08013@tongji.edu.cn

碳化养护可提高水泥石的表面硬度<sup>[1]</sup>并增加其致密性<sup>[2]</sup>、抗氯离子能力<sup>[3]</sup>、抗硫酸盐侵蚀<sup>[4]</sup>及气体渗透性<sup>[5]</sup>。为加速水泥石碳化,学者们开发出采用碳化剂<sup>[6]</sup>、或分步碳化<sup>[7-8]</sup>、预碳化<sup>[9]</sup>、利用工业余热进行高温+蒸压碳化<sup>[10]</sup>等工艺。如Duan等<sup>[11]</sup>认为高压+湿热的碳化增强作用最强;Lppiatt等<sup>[12]</sup>和Dos等<sup>[13]</sup>采用过饱和CO<sub>2</sub>拌和水或预碳化再生粉料和骨料<sup>[14-15]</sup>来加速碳化。碳化产物CaCO<sub>3</sub>来自水泥的水化产物Ca(OH)<sub>2</sub>(CH)和水化硅酸钙(C-S-H)<sup>[16-17]</sup>。Kobayashi等<sup>[18]</sup>认为高碱水泥的碳化速率更高;Li等<sup>[19]</sup>研究表明碳化反应因环境不同会形成单碳酸盐或半碳酸盐;Liu等<sup>[20]</sup>提出水泥碳化先生成无定形CaCO<sub>3</sub>,而后生成晶体型文石;Ashraf等<sup>[21]</sup>发现在低钙水泥石碳化产物中存在方解石、文石和球霏石等3种多晶CaCO<sub>3</sub>及改性硅胶;Justnes等<sup>[22]</sup>认为粉煤灰水泥石更容易碳化,其低钙硅比导致C-S-H凝胶碳化后产生收缩,有利于CO<sub>2</sub>进入水泥石内部,但也有长期工程调查<sup>[23]</sup>显示相反结论。关于水泥石的快速碳化进程问题,Liu等<sup>[20]</sup>认为72 h内即可全部完成;Fang等<sup>[24]</sup>称碳化2 h可吸收质量分数为19.8%的CO<sub>2</sub>;Zhang等<sup>[25]</sup>认为28 d后仍可继续发生碳化;Malheiro等<sup>[26]</sup>研究显示含氯水泥的碳化速度较慢;郭寅川等<sup>[27]</sup>研究表明以树脂SAP颗粒做内养护材料可抑制CO<sub>2</sub>的扩散。以上研究多针对普通硅酸盐水泥,而对白色硅酸盐水泥的碳化研究还不多见。鉴于此,本文针对装饰用白色硅酸盐水泥石,研究了加速碳化对其强度、碳化程度和微观结构的影响。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥(C)为白色硅酸盐P·W 52.5水泥,产自阿尔博波特兰(安庆)有限公司;减水剂(WJ)为聚羧酸系减水剂,产自武汉华轩高新技术有限公司;碳化养护用CO<sub>2</sub>,纯度≥99.5%(质量分数,文中的纯度、水灰比等均为质量分数或质量比),产自上海智光化工有限公司;拌和水(W)为自来水。水泥的化学组成见表1。

表1 水泥的化学组成  
Table 1 Chemical composition of cement

w/%										
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CdO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	IL	
72.172	15.956	3.909	3.835	1.844	0.804	0.481	0.267	0.267	0.458	

由表1可见:相比一般硅酸盐水泥,试验用水泥中的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量均极低;而相比一般白色硅酸盐水泥,其CaO、SO<sub>3</sub>含量和烧失量偏高,SiO<sub>2</sub>含量

偏低,可能是水泥生产中为增加白度而外掺了石灰石和雪花石膏所致。

### 1.2 试验方法

(1)试样制备与养护 先按照水灰比0.4制备水泥净浆,然后振动成型φ90×30 mm的碳化圆饼试样和40 mm×40 mm×160 mm的抗压/抗折强度试样。上述试样先在自然条件((20±5)℃、相对湿度(50±5)%)下养护1 d,脱模后再分别进行碳化养护(CO<sub>2</sub>质量分数(20±2)%)、(20±5)℃、相对湿度(50±5)%)、压力0.5 MPa)、自然养护((20±5)℃、相对湿度(50±5)%)和干湿循环养护(DYC)至不同龄期。

干湿循环采用自制装置——在放于水槽中的玻璃罩内放置1个转轮,罩内2个上角各设置1个红外电暖器,保持罩内温度为35~38℃;试样固定在轮周上,鼓风机沿切向吹风使其转动,对试样进行风干;由定时器控制的微型水泵从槽中定时抽水并淋湿试样,设置每天12个干湿循环,每个循环进行120 min(淋湿15 min+干燥105 min)。

(2)测试方法 碳化圆饼试样养护至规定龄期后,先在30℃烘箱中烘干,再置于台钻上使用φ16钻头对其半部采用九点法取样,取样深度2 mm,用于热重分析,取样示意图见图1。将每组试样分为2小组,分别进行7 d自然养护和干湿循环养护,养护至规定龄期后对另外一半试样取样,用于CH和CaCO<sub>3</sub>含量分析,并根据JC/T1024—2007《墙体饰面砂浆》测试吸水率;按照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,分别在自然养护和碳化养护环境下养护到相应龄期,最后使用抗压抗折试验机进行抗压/抗折强度测试。

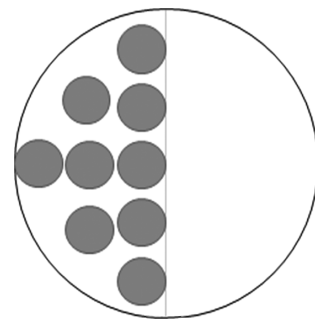


图1 TG-DTG取样示意图  
Fig. 1 TG-DTG sampling diagram

场发射电子扫描电镜(SEM)采用美国FEI公司产Quanta 200;热重分析采用美国TA公司产STA 650型联合热分析仪,保护气氛为N<sub>2</sub>,升温速率为20℃/min;日本产压汞测孔仪型号为Autopore IV 9500。上述试样均用切割机在圆饼试样中截取距离

表面2 mm深的块体中得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 力学性能

图2为各龄期碳化养护(C)与自然养护(S)试样的抗压强度和抗折强度。

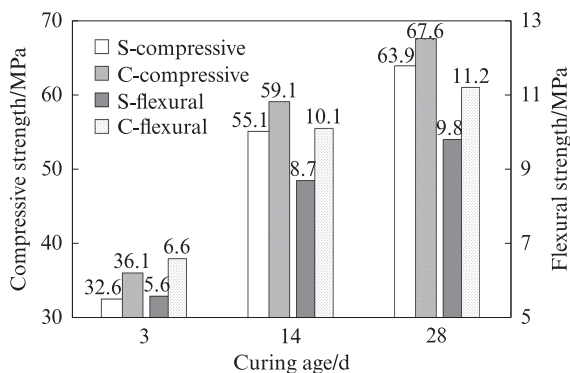


图2 水泥石的抗压强度和抗折强度

Fig. 2 Compressive and flexural strength of hardened cement

由图2可见:与自然养护(S)的同龄期试样相比,碳化养护(C)3、14、28 d试样的抗压强度分别提高10.7%、7.3%和5.8%,抗折强度分别提高17.9%、16.1%和14.3%,说明碳化养护对水泥石强度,尤其是早期强度有显著增强作用.研究<sup>[28]</sup>表明,早期碳化可加快水泥矿物硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)的反应速率,同时,碳化产物CaCO<sub>3</sub>填充了水泥石的孔隙及微裂缝,使水泥石结构更加密实<sup>[20]</sup>,但早期碳化产物阻断了CO<sub>2</sub>进入水泥石的通道,使得内部的后期碳化反应受阻<sup>[29]</sup>,因此水泥后期的抗压强度和抗折强度增长幅度有所降低。

### 2.2 碳化程度

图3为各试样的TG-DTG曲线.图3显示:(1)TG曲线上400~450℃和600~800℃的质量损失分别为CH中脱去水分和CaCO<sub>3</sub>分解所致.根据CH脱水和CaCO<sub>3</sub>分解反应式及相对分子质量换算得到各试样中CH和CaCO<sub>3</sub>的质量分数,同时,扣除100℃失重率中的结合水(假定100℃失重率中的1/3为水分蒸发所致),归一化计算出各试样中的CH和CaCO<sub>3</sub>含量,结果见图4.(2)DTG曲线在100、450、740℃附近共有3个明显的吸热峰,分别由水分蒸发及水泥水化产物C-S-H凝胶和钙矾石(Aft)的分解、水泥水化产物CH的分解及CaCO<sub>3</sub>的分解等所致<sup>[9]</sup>.由于CaCO<sub>3</sub>来自CH的碳化,且样品取自试样表面,所以即便是自然养护试样,其CaCO<sub>3</sub>衍射峰也十分明显.计算各试样因碳化所消耗的CH含量(CH-C,包括C-S-H分解产生的CH),并与其实测的CH含量(CH-R)进行加和,得到各试样

的CH总含量(CH-A),结果也绘入图4。

对比图4中自然养护与碳化养护试样中的CaCO<sub>3</sub>含量变化后发现:(1)2种养护试样中的CaCO<sub>3</sub>含量随着养护龄期的延长而增加,所不同的是,自然养护28 d(S28d)再继续自然养护7 d(S28d+S7d)或再干湿循环养护7 d(S28d+DYC7d)的试样中CaCO<sub>3</sub>含量仍显著增加约10%;而碳化养护28 d(C28d)后再继续自然养护7 d(C28d+S7d)或再干湿循环养护7 d(C28d+DYC7d)的试样中CaCO<sub>3</sub>含量均增加极少;(2)两者的CaCO<sub>3</sub>含量差值随着养护龄期的延长逐渐缩小,到35 d(28 d+7 d)时已经非常接近.即早期碳化养护可使CaCO<sub>3</sub>含量更快地稳定,而后期各养护方式下试样中的CaCO<sub>3</sub>含量均趋于相同。

对比图4中各试样的CH含量后发现:(1)CH含量的实测值(CH-R)处于3.48%~5.81%之间,变化范围不大,因其大部分被自然或加速碳化所消耗,这些残留的CH应该是C-S-H分解、补充或被碳化产物包裹而无法完全碳化的部分.(2)自然养护试样在28 d前的CH含量实测值随着龄期的延长而增加,与文献<sup>[29]</sup>试验结果一致,反映了水泥水化程度的一般发展规律;继续自然养护7 d后(S28d+S7d),CH含量反而比自然养护28 d试样(S28d)的略低,这应该是自然碳化所致;继续干湿循环养护7 d试样(S28d+DYC7d)相比S28d更低,这是因为干湿循环条件影响了水泥石的内部结构和水化发展规律,使得试样面层可稳定存在的CH含量减少.(3)碳化养护试样的实测值总体上均略高于同龄期自然养护试样,并且碳化养护龄期越长,CH含量越高,到28 d后不再显著变化;与碳化养护14 d的试样(C14d)相比,增加7 d自然养护(C14d+S7d)对CH含量影响不大,但再继续7 d干湿循环养护(C14d+DYC7d)后影响较为明显.文献<sup>[18,30]</sup>指出,影响碳化进程的主导因素是水泥品种.普通硅酸盐水泥因碳化产物堵塞微孔而阻止了进一步碳化,而复合水泥因碳化产生收缩裂隙而增加了碳化进程,由上述结果看出,干湿循环条件会显著改变碳化养护试样的水化过程.(4)通过CaCO<sub>3</sub>含量计算得到的CH消耗值(CH-C)反映的是CaCO<sub>3</sub>含量的变化规律,因其数值远高于CH实测值(CH-R),所以两者加和后得到的CH总含量(CH-A)基本与CaCO<sub>3</sub>含量的变化规律一致。

### 2.3 孔分布

图5为各试样表层的孔径分布结果,相应数据见表2.需要说明的是,当养护龄期为3 d时,因试样内部含水率较高,影响测试精度,所以本文进行孔分布研究时只分析养护龄期为14、28 d时的数据。

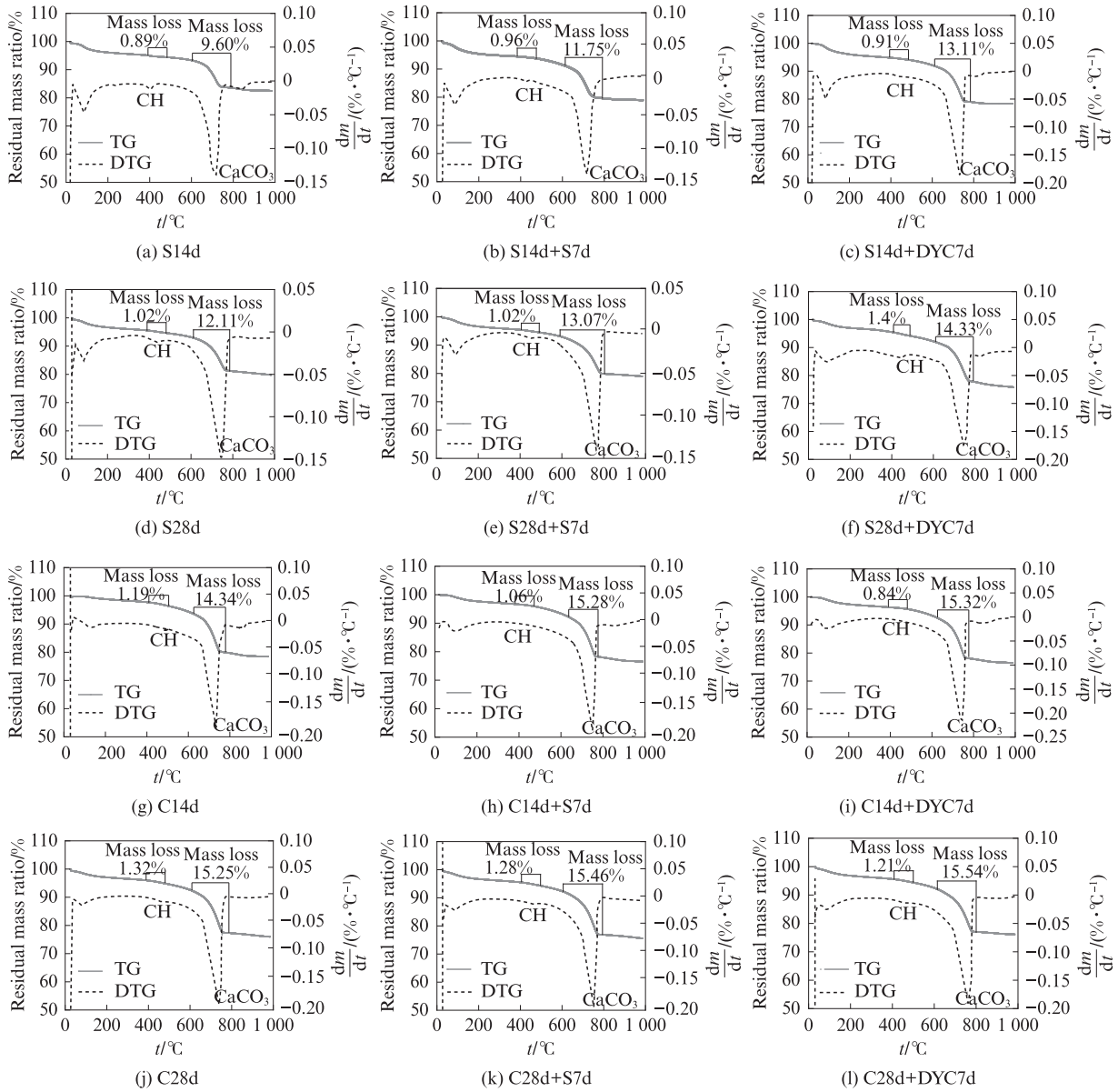


图3 各试样的TG-DTG曲线  
Fig. 3 TG-DTG curves of each sample

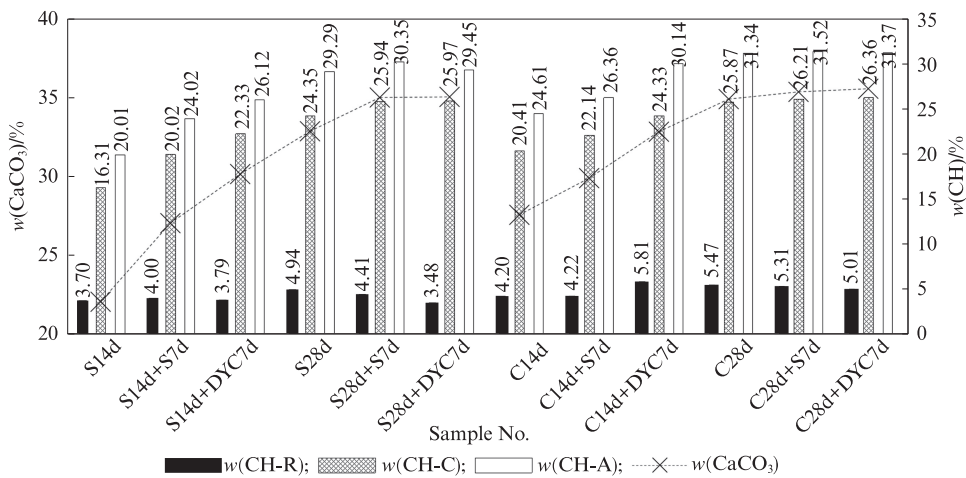


图4 各试样的 $\text{CaCO}_3$ 及CH含量  
Fig. 4 Contents of  $\text{CaCO}_3$  and CH of each sample

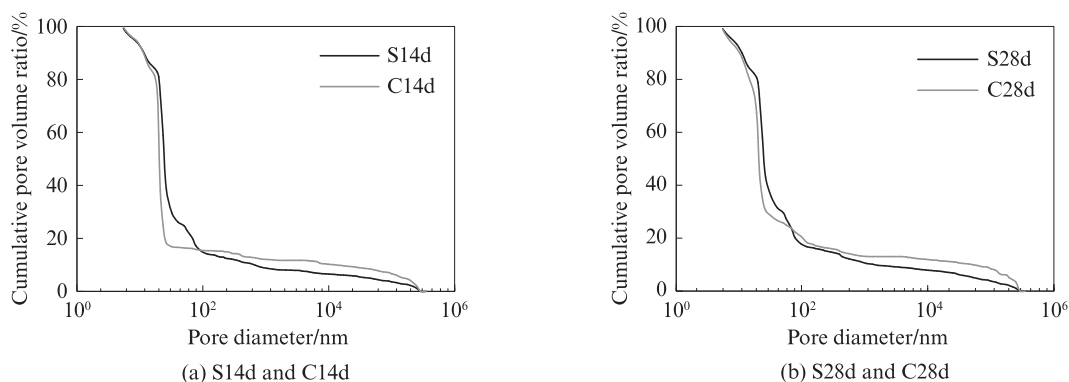


图5 各试样的孔径分布结果

Fig. 5 Pore diameter distribution test results of each sample

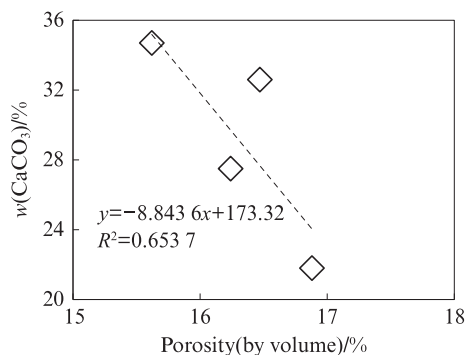
表2 各试样的孔参数统计

Table 2 Pore parameter statistics of samples

Sample No.	Porosity (by volume)/%	Average pore diameter /nm	Pore diameter distribution/%				
			$d \leq 20$ nm	$d = 20-50$ nm	$d = 50-200$ nm	$d = 500-1\ 000$ nm	$d \geq 1\ 000$ nm
S14d	16.88	27.00	19.10	54.75	13.22	3.77	9.16
C14d	16.47	22.50	41.31	42.07	1.47	2.91	12.24
S28d	16.24	27.41	21.22	47.28	15.80	4.51	11.19
C28d	15.62	23.04	42.04	31.28	9.95	3.40	13.33

对比图5和表2中自然养护试样和碳化养护试样的数据可知:2种试样在养护14、28 d时的孔隙率总体相差不大;有研究<sup>[31]</sup>结果显示,加速碳化28 d会略降低普通硅酸盐水泥的总孔隙率,但会增加复合水泥的总孔隙率.随着龄期的延长,自然养护试样(S14d和S28d)的平均孔径略增,而碳化养护试样(C14d和C28d)的平均孔径略减,但前者均明显高于后者约10%.分别对比两者的14 d和28 d数据可知,碳化养护试样中小于20 nm的微孔数量均高出自然养护试样近1倍,而20~50 nm的亚微孔、尤其是50~200 nm的较大孔数量均显著低于自然养护试样,即碳化导致试样中的小孔增多而中等孔减少;文献<sup>[32-33]</sup>研究表明,在硬化钢渣水泥砂浆和粉煤灰水泥石的碳化过程中有类似结论.这是因为碳化产物会填充孔隙,孔越大,内部发生碳化的条件就越充分,导致中等孔数量减少幅度也越大.对水泥耐久性来说,一般认为20 nm以下的孔为无害孔,其数量增加甚至不会降低抗压强度;而20~50 nm和50~200 nm的孔分别属于少害孔和有害孔,其中的毛细水可以直接以液体形式迁移,从而增加水泥石与外界环境中的离子交换几率<sup>[21]</sup>.所以,加速碳化可提高水泥石抵御服役环境中有害离子侵蚀的能力.各试样中500 nm以上的孔径分布差别不大,这些大孔主要是浆体拌制过程中引入的气泡所致.尽管试样通过振动成型,但仍有少量气泡残留,其含量较低,数值变化处在正常的波动范围内.

选取上述试样中养护龄期为14、28 d的孔隙率数据与CaCO<sub>3</sub>含量数据进行对比,见图6.由图6可见,试样孔隙率与CaCO<sub>3</sub>含量的关联性不是十分紧密,可能是取样位置不同造成的,但也能看出其变化趋势, $R^2$ 达到0.65以上.水泥的碳化反应直接吸收环境中的CO<sub>2</sub>,导致其质量和固相体积均明显增加.定量分析结果<sup>[10]</sup>显示,其质量增幅可达1.95%,甚至有研究报告<sup>[34]</sup>称,掺有煤矸石的水泥可捕获其自身质量10%的CO<sub>2</sub>.还有研究<sup>[9]</sup>指出,碳化会增加水泥石中的AFt含量,这些直接或间接原因均会导致水泥石的孔隙率降低,使其与碳化程度相关联.

图6 孔隙率与CaCO<sub>3</sub>含量的数据对比Fig. 6 Comparison of porosity and CaCO<sub>3</sub> content

## 2.4 微观形貌

图7为自然养护(S)和碳化养护(C)3、14、28 d时

试样的SEM照片,图中的A、B、C为EDS分析点,分析结果见表3.由图7可见:自然养护试样随着龄期的增加,其典型的CH晶体形貌变得清晰和棱角分明,3 d时的CH晶体似被凝胶状的过渡水化产物覆盖,14 d时则已经形成层片状CH晶体,到28 d时能看到发育完整的块体状CH晶体;而C3d试样的CH晶体特征明显强于S3d试样,碳化结构也更加致密;C14d试样的片状CH晶体之间似乎有所松动,显然是受到更高程度的碳化影响;C28d试样的CH晶体表面明显出

现了一些散碎的碳化产物CaCO<sub>3</sub>晶体.结合图7与表3数据可知:在明显为CH晶体的测试点上均能检测到C元素,其质量分数的变化规律基本与上述碳化程度的变化规律接近;从同一个试样的不同测点数据看,各元素的数值波动均较大.这也是SEM-EDS分析中常见的情况,因为水泥石在微观尺度上的组成分布是不均质的.但从总体趋势可以看出,位于CH晶体棱角处的C元素含量更高,说明这些区域的碳化程度更高.

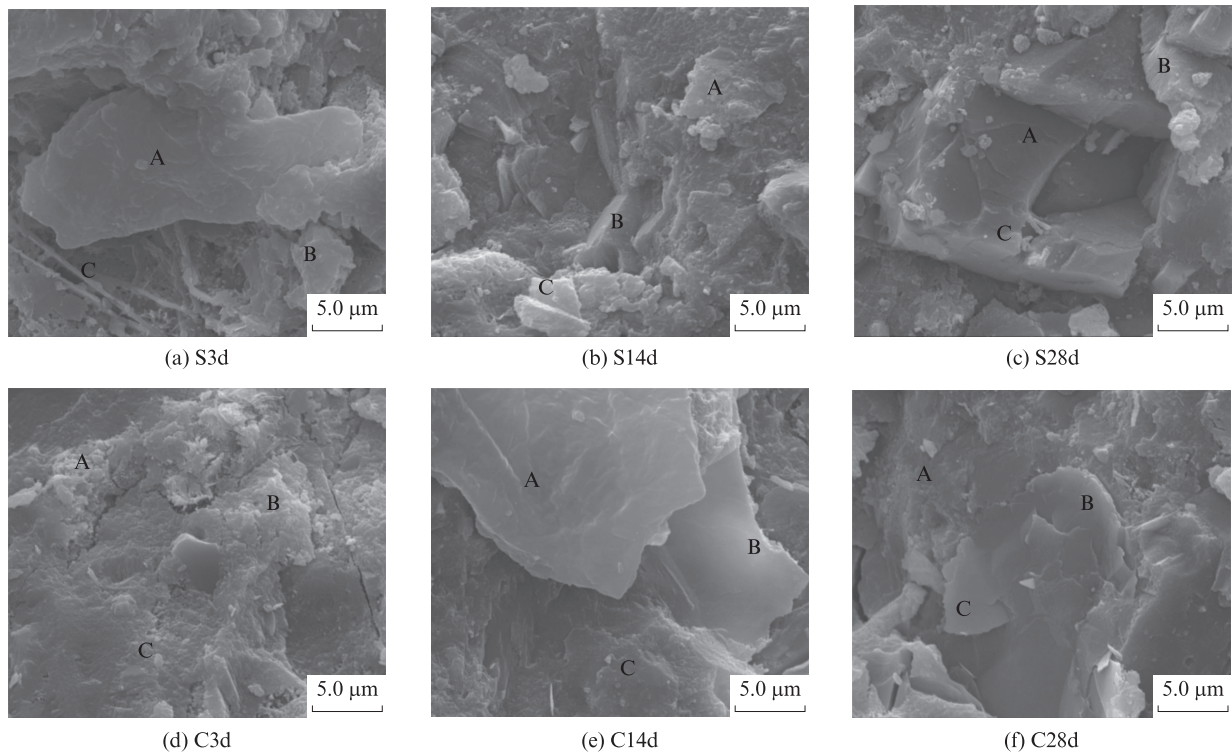


图7 各试样的SEM照片  
Fig. 7 SEM images of each sample

表3 各试样的EDS分析结果  
Table 3 EDS analysis results of each sample

Element	S3d			S14d			S28d			C3d			C14d			C28d		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
C	18.15	28.11	33.12	23.01	29.25	35.44	18.09	38.24	40.40	36.06	38.26	35.91	31.76	44.19	34.67	34.32	41.19	35.85
O	46.56	36.88	43.28	48.53	47.34	48.17	53.29	38.42	39.12	37.33	34.76	38.51	48.21	37.10	42.34	35.45	31.89	36.04
Mg	0.93	0.06	0.22	0.09	0.14	0.11	—	0.05	—	—	—	—	0.07	0.14	—	0.14	0.08	0.06
Si	10.05	8.84	9.43	5.62	7.21	8.07	6.96	9.73	7.49	3.54	5.64	5.69	3.37	6.14	5.51	4.21	3.64	4.05
Ca	28.78	25.32	22.41	22.38	15.27	9.88	22.03	15.48	12.17	23.38	31.80	20.45	17.81	12.25	17.25	26.04	23.12	24.51

Khoshnazr等<sup>[28]</sup>利用X射线光电子能谱(XPS)研究早期碳化水泥浆体的微观结构,发现了碳化产物从无定形逐步演化成为结晶体的证据.文献[34-35]采用SEM-EDS研究发现,近乎正六方体形状的碳化产物方解石很容易在高压或高温碳化环境下的碳

化水泥石中发现,但在常压碳化环境中其主要零散地分布于水泥的水化产物CH晶体或C-S-H凝胶之间.因此,尽管由表3数据能够明显看出碳化产物的存在,但在这些试样中并不容易发现典型的方解石晶体形貌.

### 3 结论

(1)碳化养护对各龄期的白色硅酸盐水泥石强度,尤其早期强度具有显著增强作用.碳化养护3、14、28 d时水泥石的抗压强度分别提高10.7%、7.3%和5.8%,抗折强度分别提高17.9%、16.1%和14.3%.

(2)与自然养护试样不同,加速碳化14 d的试样继续干湿循环养护7 d仍可明显提高其中的CH含量,并且碳化28 d后的碳化程度趋于稳定.

(3)与同龄期的自然养护试样相比,碳化养护14 d和28 d试样的孔隙率略低,平均孔径均降低约10%,且其50~200 nm的较大孔数量大幅减少,而小于20 nm的微孔数量相对更多.

(4)SEM-EDS显示,加速碳化反应直接发生在水泥水化产物CH晶体的表面,在CH晶体棱角处的碳化程度最高,碳化产物与之共生.

#### 参考文献:

- [1] MEHDIZADEH H, JIA X X, MO K H, et al. Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the accelerated carbonation of cement pastes [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280:116914.
- [2] KIM J S, SOO K Y, LIM J H, et al. Effect of carbonation on cement paste microstructure characterized by micro-computed tomography [J]. *Contraction and Build Materials*, 2020, 263:120079.
- [3] ZHANG D, SHAO Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete [J]. *Contraction and Build Materials*, 2016, 123:516-526.
- [4] 秦玲,毛星泰,高小建,等.碳化养护水泥石的抗硫酸盐侵蚀性能研究[J/OL]. *建筑材料学报*, 2022, 25(12):1-13 [2021-11-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20211119.1040.006.html>.
- QIN Ling, MAO Xingtai, GAO Xiaojian, et al. Study on sulfate resistance of carbonation curing cement paste [J/OL]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(12):1-13 [2021-11-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20211119.1040.006.html>. (in Chinese)
- [5] BOUMAAZA M, TURCRY P, HUET B, et al. Influence of carbonation on the microstructure and the gas diffusivity of hardened cement pastes [J]. *Contraction and Build Materials*, 2020, 253:119227.
- [6] ZHANG Y H, WANG R X, LIU Z Y, et al. A novel carbonate binder from waste hydrated cement paste for utilization of CO<sub>2</sub> [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2019, 32:276-280.
- [7] CHEN T F, GAO X J. Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2019, 34:74-86.
- [8] FANG X L, XUAN D X, ZHAN B J. A novel up cycling technique of recycled cement paste powder by a two-step carbonation process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290:125192.
- [9] XIN Q, WANG J, YI F, et al. Carbon dioxide as an admixture for better performance of OPC-based concrete [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2018, 25:31-38.
- [10] WANG D C, NOGUCHI T, NOAKI T, et al. Investigation of the carbonation performance of cement-based materials under high temperatures [J]. *Contraction and Build Materials*, 2021, 272:121634.
- [11] DUAN S Y, LIAO H Q, CHENG F Q, et al. Effect of curing condition and carbonization enhancement on mechanical properties of fly ash -desulfurization gypsum - steel slag blocks [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2020, 38:282-290.
- [12] LPPIATT N, LING T C, EGGERMONT S, et al. Combining hydration and carbonation of cement using super-saturated aqueous CO<sub>2</sub> solution [J]. *Contraction and Build Materials*, 2019, 229:116825.
- [13] DOS SANTOS V, HENRIQUE G D T, MARMOL G, et al. Fiber-cement composites hydrated with carbonated water: Effect on physical-mechanical properties [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124:105812.
- [14] MACIEJ Z, JORGEN S, JAN, S, et al. Phase assemblage and microstructure of cement paste subjected to enforced, wet carbonation [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 130:105990.
- [15] OUYANG X W, WANG L Q, XU S D, et al. Surface characterization of carbonated recycled concrete fines and its effect on the rheology, hydration and strength development of cement paste [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114:103809.
- [16] DOW C, GLASSER F P. Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(1):147-154.
- [17] HE Z, JIA Y D, WANG S, et al. Maximizing CO<sub>2</sub> sequestration in cement-bonded fiberboards through carbonation curing [J]. *Contraction and Build Materials*, 2019, 213:51-60.
- [18] KOBAYASHI K, UNO Y. Influence of alkali on carbonation of concrete Part I - Preliminary tests with mortar specimens [J]. *Cement and Concrete Research*, 1989, 19(5):821-826.
- [19] LI L, CAO M, YIN H. Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104:103350.
- [20] LIU M, HONG S X, WANG Y H, et al. Compositions and microstructures of hardened cement paste with carbonation curing and further water curing [J]. *Contraction and Build Materials*, 2021, 267:121724.
- [21] ASHRAF W, OLEK J, SAHU S. Phase evolution and strength development during carbonation of low-lime calcium silicate cement (CSC) [J]. *Contraction and Build Materials*, 2019, 210:473-482.

- [22] JUSTNES H, SKOCEK J, STNOR T A, et al. Microstructural changes of hydrated cement blended with fly ash upon carbonation [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 137:106192.
- [23] LOLLINI F, REDAELLI E. Carbonation of blended cement concretes after 12 years of natural exposure [J]. *Contraction and Build Materials*, 2021, 276:122122.
- [24] FANG Y F, CHANG J. Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation [J]. *Contraction and Build Materials*, 2015, 76:360365.
- [25] ZHANG D, CAI X H, JAWORSKA B. Effect of pre-carbonation hydration on long-term hydration of carbonation-cured cement-based materials [J]. *Contraction and Build Materials*, 2020, 231:117122.
- [26] MALHEIRO R, CAMOES A, MEIRA G, et al. Influence of chloride contamination on carbonation of cement-based materials [J]. *Contraction and Build Materials*, 2021, 296:123756.
- [27] 郭寅川,黄忠财,王文真,等. 湿热环境下SAP内养生混凝土抗碳化性能及机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1):16-23. GUO Yinchuan, HUANG Zhongcai, WANG Wenzhen, et al. Investigation of carbonation resistance and mechanism of SAP internal curing concrete in humid and hot environment [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1):16-23. (in Chinese)
- [28] KHOSHNAZAR R, SHAO Y X. Characterization of carbonation-cured cement paste using X-ray photoelectron spectroscopy [J]. *Contraction and Build Materials*, 2018, 168:598-605.
- [29] LI B, JIANG Z L, JIN N G, et al. Carbonation process simulation for cement-based materials based on microstructure by a cement hydration model [J]. *Construcuter Build Materials*, 2020, 259:120429.
- [30] DUTZER V, DRIDI W, POYET S, et al. The link between gas diffusion and carbonation in hardened cement pastes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123:105795.
- [31] SHAH V, SCRIVENER K, BHATTACHARJEE B, et al. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 109:184-197.
- [32] 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. Effect of carbonation curing on mechanical strength and microstructure of mortars prepared with steel slag-cement-MgO-CaO blends [J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(6):854-861. (in Chinese)
- [33] 肖婷,方永浩,章凯,等. 碳化对粉煤灰水泥石比表面积和孔径的影响[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(4):452-455. XIAO Ting, FANG Yonghao, ZHANG Kai, et al. Effect of carbonation on the specific surface area and pore structure of fly ash cement paste [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(4):452-455. (in Chinese)
- [34] XIAN X P, SHAO Y X. Microstructure of cement paste subject to ambient pressure carbonation curing [J]. *Contraction and Build Materials*, 2021, 296:123652.
- [35] QIN L, GAO X J. Properties of coal gangue-Portland cement mixture with carbonation [J]. *Fuel*, 2019, 245:1-12.