

# 高钛型高炉渣混凝土碳化深度试验研究

汪 杰<sup>1</sup>, 李 根<sup>2</sup>, 梁月华<sup>1\*</sup>, 干 斌<sup>3</sup>, 赵 翼<sup>2</sup>

(1. 攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 中国十九冶集团有限公司, 四川 攀枝花 617000; 3. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 宜宾 643002)

**摘 要:** 混凝土碳化造成钢筋锈蚀是混凝土结构耐久性失效的主要原因。为研究攀枝花高钛型高炉渣混凝土抗碳化性能, 对不同强度高钛型高炉渣混凝土进行不同碳化时间的室内加速碳化试验, 结果表明: 高钛型高炉渣混凝土强度越低, 越容易被二氧化碳侵蚀; 碳化时间越长, 碳化现象越明显。基于 Fick 第一定律, 根据高钛型高炉渣混凝土强度、碳化时间, 建立了高钛型高炉渣混凝土碳化深度预测模型。经与试验结果对比, 吻合度高, 验证了预测模型准确度。

**关键词:** 高钛型高炉渣; 混凝土; 碳化深度; 预测模型

中图分类号: X757, TU37

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0101-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
聊科研  
与作者互动

## Experimental study on the prediction model of carbonization depth in high Ti-bearing blast furnace slag concrete

Wang Jie<sup>1</sup>, Li Gen<sup>2</sup>, Liang Yuehua<sup>1\*</sup>, Gan Bin<sup>3</sup>, Zhao Yi<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. China 19th Metallurgical Group Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Sichuan Provincial Key Lab. of Process Equipment and Control, Yibin 643002, Sichuan, China)

**Abstract:** Reinforcement corrosion caused by concrete carbonation is the main reason of durability failure of concrete structures. In order to study the carbonation resistance of Panzhihua high-titanium blast furnace slag concrete, we herein carried out the indoor accelerated carbonation test of high-titanium blast furnace slag concrete with different strength at different carbonation time. The results show that the lower the strength of high-titanium blast furnace slag concrete, the easier it is to be corroded by carbon dioxide. The longer the carbonation time, the more obvious the carbonation phenomenon. Based on Fick's first law, a model for predicting the carbonation depth of high-titanium blast furnace slag concrete is established according to the strength and carbonation time of high-titanium blast furnace slag concrete. By comparing with the experimental results, the accuracy of the prediction model is verified.

**Key words:** high-titanium blast furnace slag, concrete, carbonation depth, prediction model

收稿日期: 2021-07-18

基金项目: 四川省科技计划项目(编号: 2020JDRC0137); 桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室开放基金(编号: 2018QYY01); 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金(编号: GK201918)。

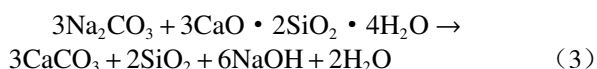
作者简介: 汪杰(1988—), 男, 四川乐山人, 硕导, 博士在读, 讲师, 工程师, 攀枝花市学术技术带头人后备人选, 长期从事大宗固体废弃物土木工程综合利用研究; \*通讯作者: 梁月华(1989—), 女, 四川攀枝花人, 讲师, 工程师, 长期从事高钛型高炉渣大宗工业固废土木工程综合利用研究, E-mail: wangjie542925605@126.com。

## 0 引言

自工业革命以来,地球大气中的CO<sub>2</sub>浓度不断增加,到2019年更是达到了历史最高水平(0.041 526%)。空气中CO<sub>2</sub>浓度不断增加,将加速混凝土碳化,从而使钢筋混凝土结构中的钢筋受到侵蚀,造成结构耐久性失效<sup>[1]</sup>。

攀枝花地区由于攀钢持续产出高钛型高炉渣这一工业固废,并大宗存积。经过不断深入研究<sup>[2-7]</sup>,其已作为混凝土粗细骨料广泛应用于攀枝花工程建设领域,针对这一地区特有的混凝土材料,对其开展耐久性研究在本地区工程建设安全上显得尤为重要和迫在眉睫。

二氧化碳与混凝土中氢氧化钙发生化学反应,混凝土碱性降低的过程叫做混凝土碳化。主要反应如式(1)~(3)<sup>[8]</sup>所示:



现有对普通混凝土碳化深度的影响的研究较为深入<sup>[9-10]</sup>,但针对高钛型高炉渣混凝土碳化的研究还很少。李久存等<sup>[11]</sup>采用快速碳化及劈裂抗拉强度试验研究水胶比、钢纤维及碳化龄期等参数对钢纤维混凝土抗碳化性能和劈裂性能的影响规律。张扬等<sup>[12]</sup>对不同水胶比、粉煤灰掺量、水泥掺量对混凝土碳化速率的影响进行了研究,得出水胶比和粉煤灰量越大,混凝土越容易碳化,水泥掺量越大,混凝土越难碳化。张令茂<sup>[13]</sup>对普通水泥混凝土和掺粉煤灰水泥混凝土开展了自然环境碳化10年的碳化试验研究,并从微观形貌上对其进行了分析。宋华等<sup>[14]</sup>对不同水胶比、掺合料类型、掺量混凝土进行了碳化深度规律试验研究,得到合理设计的复合掺合料,能提高混凝土的抗碳化能力。黄钟晖等<sup>[15]</sup>对高性能铁尾矿掺量对再生混凝土碳化后力学性能的影响进行了研究。张文俊等<sup>[16]</sup>对不同水灰比、油菜秸秆纤维长度、油菜秸秆纤维体积掺量混凝土抗碳化能力进行了试验研究,研究表明合理的掺量和长度能有效改善混凝土的抗碳化性能。李林泽等<sup>[17]</sup>通过对攀枝花现有的不同年代高钛型高炉渣混凝土的碳化深度进行实测,研究了碳化深度与碳化时间之间的关系,该研究选择的高钛型高炉渣混凝土工

况是在自然环境中随着时间的推移,混凝土发生碳化,未考虑温度、湿度、二氧化碳浓度等相关自然环境指标并进行统计量化,也就是说该研究的碳化环境是不明确的、且碳化数据离散型大,规律性不强。高钛型高炉渣混凝土碳化机理与普通混凝土一致,都是二氧化碳在混凝土中的扩散和侵蚀。二氧化碳在混凝土中扩散符合Fick第一定律,二氧化碳在混凝土中的扩散能力受二氧化碳浓度、温度、湿度、混凝土强度等因素影响。笔者在Fick第一定律基础上,通过对不同强度等级高钛型高炉渣混凝土在GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定环境下加速碳化不同时间的样本进行碳化深度和强度测定,分析了不同强度和碳化时间下高钛型高炉渣混凝土的碳化规律,建立了方便工程应用的以混凝土立方体抗压强度为主要参数,综合考虑环境温度、湿度和CO<sub>2</sub>浓度等气候条件的混凝土碳化速度预测模型。

## 1 试验研究

### 1.1 方案设计

为研究不同强度等级高钛型高炉渣混凝土在标准环境下加速碳化不同时间对碳化深度的影响。方案设计环境条件为定量,取混凝土强度等级和加速碳化时间为变量,混凝土加速碳化环境为GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定环境,即,温度:20℃±2℃,湿度:70%±3%RH,二氧化碳浓度:20%±2%。混凝土设计强度分别为C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50,加速碳化时间选择3、7、14、28d。

### 1.2 试验实施

为贴近生产,选用攀枝花市某商品混凝土公司的全高钛型高炉渣集料(粗细集料均为高钛型高炉渣)混凝土(泵送)配合比(如表1所示)制备强度等级为C20~C50,尺寸为150mm×150mm×150mm的标准混凝土试块。拆模后在饱水条件下养护14d,自然条件下养护14d,然后按GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中碳化试验要求进行加速碳化,用浓度为1%的酚酞酒精溶液测定高钛型高炉渣混凝土加速碳化3、7、14、28d样本的碳化深度,并按GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》测定强度。混凝土加速碳化试验如图1所示、碳化后的混凝土如图2所示。

表 1 全高钛型高炉渣集料混凝土(泵送)配合比  
Table 1 Blend ratio of full high-titanium furnace slag aggregate concrete (pumping)

强度等级	42.5水泥	粉煤灰	高钛型高炉渣砂	高钛型高炉渣碎石	用水量	胶结料
C20泵送	239(32.5 R)	117	1 139	760	255	356
C25泵送	264	108	1 098	795	250	372
C30泵送	285	105	1 030	890	220	390
C35泵送	341	92	1 000	852	240	433
C40泵送	373	88	920	930	230	461
C45泵送	416	77	898	899	230	493
C50泵送	453	72	830	950	230	525



图 1 混凝土标准环境加速碳化试验

Fig. 1 Accelerated carbonation test of concrete in standard environment



图 2 混凝土碳化状况

Fig. 2 Carbonation of concrete

1.3 试验结果与分析

C20 ~ C50 高钛型高炉渣混凝土在标准环境下加速碳化不同时间的碳化深度(X)和混凝土抗压强度标准值( $f_{cu,k}$ )如表 2 所示,碳化深度与混凝土抗压强度之间关系曲线如图 3 所示,碳化深度与碳化时间之间的关系曲线如图 4 所示。

根据试验数据可知:当高钛型高炉渣混凝土强度较低时,如 C20( $f_{cu,k}=25.96$  MPa)混凝土加速碳化

3、7、14、28 d, 碳化深度分别为 14、16、22.5、25 mm, 低强度混凝土较易碳化, 在加速碳化环境下碳化明显, 且随着碳化时间的增加, 碳化深度增加明显。

表 2 混凝土碳化深度及强度值  
Table 2 Carbonation depth and strength of concrete

强度等级	碳化深度(标准碳化)X/mm				$f_{cu,k}$ /MPa
	3 d	7 d	14 d	28 d	
C20	14	16	22.5	25	25.96
C25	7	9	13	14	35.66
C30	6	8	8	8	42.29
C35	4	6	6.5	7.5	48.90
C40	2	2.5	4	4	53.12
C45	0	0	0.5	1.5	62.01
C50	0	0	0	0	64.85

当高钛型高炉渣混凝土强度低于 C40( $f_{cu,k} \leq 53.12$  MPa)时, 高钛型高炉渣混凝土碳化规律与普通碎石混凝土类似, 在标准碳化环境下, 相同强度等级的混凝土随着加速碳化时间的增长, 碳化深度加大; 碳化时间相同的情况下, 随着混凝土强度的增加, 混凝土碳化深度成递减趋势。

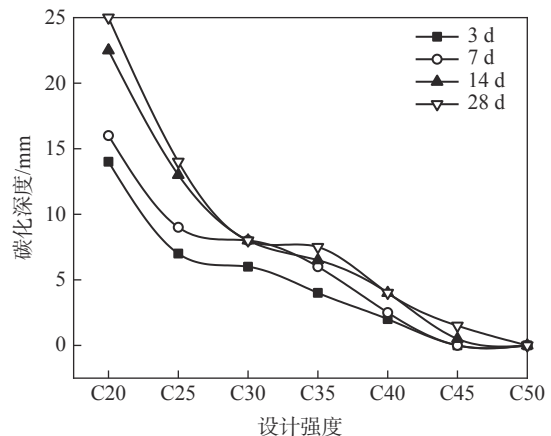


图 3 混凝土碳化深度与混凝土强度关系曲线  
Fig. 3 Relationship between concrete carbonation depth and concrete strength

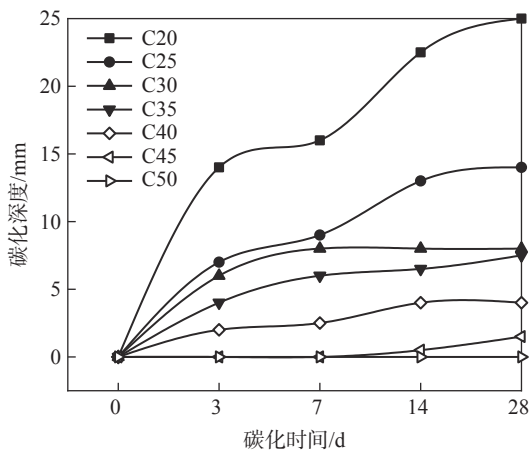


图4 混凝土碳化深度与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between concrete carbonation depth and time

当强度为 C45 ( $f_{\text{cuk}}=62.01 \text{ MPa}$ ) 时, 高钛型高炉渣混凝土较难碳化, 在标准碳化环境下, 高钛型高炉渣混凝土随碳化时间的增长, 加速碳化作用不明显, 加速碳化到 14 d 时碳化深度为 0.5 mm, 28 d 时碳化深度为 1.5 mm, 此时强度范围碳化回归方程:  $X_{(\text{C45})} = 0.001 2t^2 + 0.024 7t - 0.136 4$ ,  $R^2 = 0.990 2$ ;  $t$  为加速碳化时间, d;  $R^2$  为拟合程度指标。

当高钛型高炉渣混凝土强度为 C50 ( $f_{\text{cuk}} = 64.85 \text{ MPa}$ ) 时, 在标准碳化环境下, 高钛型高炉渣混凝土很难被  $\text{CO}_2$  侵蚀, 加速碳化 28 d 碳化深度依然为 0 mm。

根据试验数据分析可推测, 当高钛型高炉渣混凝土强度大于 C50 ( $f_{\text{cuk}} > 64.85 \text{ MPa}$ ) 时, 混凝土极难碳化, 在标准碳化环境下加速碳化 28 d 的碳化深度为 0 mm。

## 2 混凝土碳化模型

通过对混凝土碳化机理分析, 学术界比较认可的是基于 Fick 第一定律的扩散理论<sup>[18-27]</sup>, 基于 Fick 第一定律可得混凝土碳化基本模型<sup>[13, 27-29]</sup> 如式(4)所示:

$$X_{(t)} = k \sqrt{t} \quad (4)$$

式中,  $X$  为碳化深度,  $t$  为碳化时间,  $k$  为考虑混凝土综合质量、二氧化碳浓度的影响系数。混凝土的碳化根本上是  $\text{CO}_2$  在混凝土中扩散、侵蚀, 碳化深度与碳化时间的平方根成正比。

高钛型高炉渣混凝土的碳化同普通混凝土一样, 主要受内在因素和外部因素的影响, 内在因素主要为: 组成混凝土的砂、石、水泥等材料特性和配合比,

反映混凝土的综合质量, 可用混凝土强度表征; 外部因素主要是指混凝土所处的碳化环境, 即温度、湿度、 $\text{CO}_2$  浓度等。基于混凝土强度、碳化时间建立模型, 如公式(5)所示。

$$X = k_{\text{co}_2} \cdot k_c \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

其中

$$k_{\text{co}_2} = \sqrt{C_1} \quad (6)$$

$k_{\text{co}_2}$  为  $\text{CO}_2$  浓度影响系数;  $C_1$  为环境中  $\text{CO}_2$  浓度;  $k_c$  为混凝土强度影响系数。

通过对上述数据进行分析, C20 ~ C40 ( $25.96 \text{ MPa} \leq f_{\text{cuk}} \leq 53.12 \text{ MPa}$ ) 强度等级范围内, 高钛型高炉渣混凝土碳化深度与公式(5)所示理论模型符合性更高, 对其抗压强度值与碳化时间、碳化深度等相关数据进行分析、拟合, 可得公式(7)所示的碳化模型中混凝土强度影响系数  $k_c$  与混凝土抗压强度值  $f_{\text{cuk}}$  之间的关系, 拟合关系曲线如图 5 所示, 随着强度  $f_{\text{cuk}}$  的增大, 混凝土强度影响系数  $k_c$  越小, 即混凝土强度越高, 碳化越不明显。

$$K_c = \frac{49.811 9}{f_{\text{cuk}}} - 0.706 34 \quad (R^2 = 0.991 15) \quad (7)$$

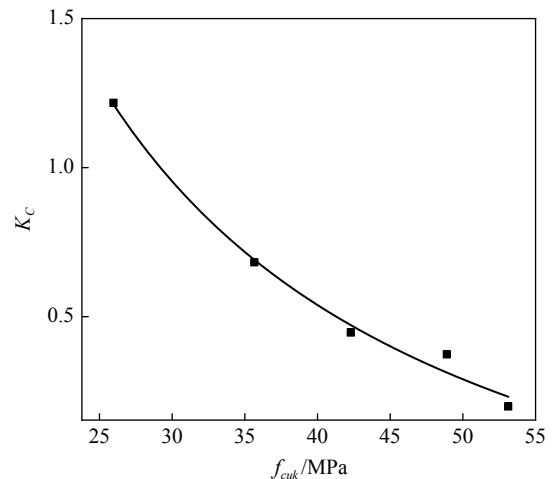


图5 混凝土抗压强度值与碳化强度影响系数关系曲线

Fig. 5 Influence coefficient curve of concrete compressive strength and carbonization strength

## 3 结论

通过深入分析混凝土碳化理论, 结合高钛型高炉渣混凝土标准环境下加速碳化试验, 得到如下结论:

$f_{\text{cuk}} \geq 64.85 \text{ MPa}$  时, 高钛型高炉渣混凝土很难被  $\text{CO}_2$  侵蚀而碳化。

$53.12 \text{ MPa} \leq f_{\text{cuk}} \leq 64.85 \text{ MPa}$  时, 高钛型高炉渣

混凝土碳化现象较弱。

25.96 MPa $\leq f_{\text{cuk}} \leq 53.12$  MPa 时, 高钛型高炉渣混凝土碳化规律明显; 混凝土强度一定时, 碳化深度随碳化时间的增长而加深; 碳化时间一定时, 混凝土

碳化深度随强度的增加而减少。

基于 Fick 第一定律的混凝土强度碳化深度模型预测与实际吻合。

## 参考文献

- [ 1 ] Li Bei, Li Xinyan, Jin Nanguo, *et al.* Discussion on evaluation of concrete carbonation depth by nondestructive testing technology[J]. *Concrete*, 2021, (4): 140–145.  
(李蓓, 李鑫焱, 金南国, 等. 无损检测技术评估混凝土碳化深度的探讨[J]. *混凝土*, 2021, (4): 140–145.)
- [ 2 ] Huang Shuanghua, Chen Wei, Sun Jinkun, *et al.* The application of high titanium slag in concrete materials[J]. *New Building Materials*, 2006, (11): 71–73.  
(黄双华, 陈伟, 孙金坤, 等. 高钛高炉渣在混凝土材料中的应用[J]. *新型建筑材料*, 2006, (11): 71–73.)
- [ 3 ] Wang Jie, Zhao Bijian, Zhang Guiyu. Development and application of high-titanium slag series building materials[J]. *New Building Materials*, 2002, (2): 35–36.  
(王杰, 赵碧建, 张桂玉. 高钛渣系列建材产品的开发及应用[J]. *新型建筑材料*, 2002, (2): 35–36.)
- [ 4 ] Wang Jie, Xu Xiaoqian, Huang Shuanghua. Experiment research on normal section flexural performance of flexural member by high titanium blast furnace slag[J]. *Construction Technology*, 2015, (s1): 513–515.  
(汪杰, 徐晓倩, 黄双华. 高钛型高炉渣受弯构件正截面抗弯性能研究[J]. *施工技术*, 2015, (s1): 513–515.)
- [ 5 ] Wang Jie. Experimental analysis on recycled concrete with high titanium heavy slag and bond properties of steel bars[J]. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 2017, 32(10): 204–210.
- [ 6 ] Zhou Wenbo, Ke Changming, Zhang Qin, *et al.* Application of Pangang blast-furnace slag in construction industry[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2007, (3): 35–37.  
(周文波, 柯昌明, 张芹, 等. 攀钢高炉渣在建筑行业中的应用[J]. *矿产综合利用*, 2007, (3): 35–37.)
- [ 7 ] Li Xinghua, Pu Jiangtao. The latest developments of integrated utilization on Panzhihua high titanium-bearing BF slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(2): 10–14.  
(李兴华, 蒲江涛. 攀枝花高钛型高炉渣综合利用研究最新进展[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(2): 10–14.)
- [ 8 ] Du Yingji, Liang Zhengping. Study on prediction of concrete carbonation depth of Weishui inverted siphon project[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(3): 48–50.  
(杜应吉, 梁正平. 韦水倒虹工程混凝土碳化深度预测研究[J]. *水利水电科技进展*, 2005, 25(3): 48–50.)
- [ 9 ] Nikolai Alexeyev . Corrosion and protection of reinforcement in reinforced concrete structure[M]. Huang Kexin. Beijing: China Construction Industry Press, 1983.  
(阿列克谢耶夫. 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护[M]. 黄可信译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.)
- [ 10 ] Wu Junxi, Wang Yan. Research status of concrete carbonation[J]. *Sichuan Building Science Research*, 2011, 37(6): 202–204.  
(武俊曦, 王艳. 混凝土碳化研究现状[J]. *四川建筑科学研究*, 2011, 37(6): 202–204.)
- [ 11 ] Li Jiucun, Tong Peizhou. Experimental study on carbonation resistance of steel fiber reinforced concrete[J]. *New Building Materials*, 2021, (3): 63–66.  
(李久存, 仝培周. 钢纤维混凝土抗碳化性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2021, (3): 63–66.)
- [ 12 ] Zhang Yang, Niu Ditao, Li Shengbin. Research on carbonation of fly ash concrete[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(27): 275–278.  
(张 扬, 牛荻涛, 李盛斌. 粉煤灰混凝土碳化试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(27): 275–278.)
- [ 13 ] Zhang Lingmao, Jiang Wenhui. Natural carbonization of concrete and its correlation with artificial accelerated carbonization[J]. *Journal of Xi 'an University of Building Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1990, (3): 207–214.  
(张令茂, 江文辉. 混凝土自然碳化及其与人工加速碳化的相关性研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 1990, (3): 207–214.)
- [ 14 ] Song Hua, Niu Ditao, Li Chunhui. Experimental study on carbonation performance of concrete with mineral admixtures[J].

- Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(12): 2066–2070.  
(宋华, 牛荻涛, 李春晖. 矿物掺合料混凝土碳化性能试验研究[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(12): 2066–2070.)
- [ 15 ] Huang Zhonghui, Zhang Shirong, Wang Binghua, *et al.* Experimental study on carbonation mechanical properties of high performance recyclable concrete with fine aggregates from iron tailings[J]. *Journal of Hydraulic and Civil Engineering*, 2021, (1): 28–33.  
(黄钟晖, 张世荣, 王炳华, 等. 高性能铁尾矿细骨料再生混凝土碳化力学性能试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, (1): 28–33.)
- [ 16 ] Zhang Wenjun, Liu Baohua, Zhou Wen, *et al.* Experimental study on carbonation resistance of rapeseed straw fiber concrete[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 47(1): 96–100.  
(张文俊, 刘保华, 周文, 等. 油菜秸秆纤维混凝土抗碳化性能的试验研究[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(1): 96–100.)
- [ 17 ] Deng Xiao, Li Linze, Zhao Huan, *et al.* Analysis of carbonization depth and influencing factors of high-titanium type blast furnace slag concrete on site[J]. *Sichuan Architecture*, 2015, (5): 183–184.  
(邓晓, 李林泽, 赵欢, 等. 现场检测高钛型高炉渣混凝土碳化深度及影响因素分析[J]. *四川建筑*, 2015, (5): 183–184.)
- [ 18 ] Papadakis V G , Vayenas C G , Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. *Aci Material Journal*, 1991, 88(4): 363–373.
- [ 19 ] Papadakis V G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress[J]. *Cement&Concrete Research*, 2000, 30(2): 291–299.
- [ 20 ] Van-Loe Ta, Stéphanie Bonnet, Tristan Senga Kiesse, *et al.* A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures[J]. *Construction and Building Materials, Elsevier*, 2016, 129: 172–181.
- [ 21 ] Cui Hongzhi, Tang Waiching, Liu Wei, *et al.* Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 522–527.
- [ 22 ] Xiao Jia, Gou Chengfu. Overview of the research for concrete carbonation[J]. *Concrete*, 2010, (1): 40–44.  
(肖佳, 勾成福. 混凝土碳化研究综述[J]. *混凝土*, 2010, (1): 40–44.)
- [ 23 ] Niu Ditao. Durability and life prediction of concrete structures [M]. Beijing: Science Press, 2003.  
(牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.)
- [ 24 ] Zhang Yu, Jiang Lixue. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism[J]. *Industrial Construction*, 1998, 28(1): 16–19,47.  
(张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. *工业建筑*, 1998, 28(1): 16–19,47.)
- [ 25 ] Ji Y, Wu M, Ding B, *et al.* The experimental investigation of width of semi-carbonation zone in carbonated concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 65: 67–75.
- [ 26 ] Chen Zheng, Hu Yichan, Zhao Yufei, *et al.* Multi-factor computation model of concrete carbonation depth based on material parameters in standard carbonization environment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, (6): 1681–1687,1693.  
(陈正, 胡以婵, 赵宇飞, 等. 标准碳化环境下基于材料参数的混凝土碳化深度多因素计算模型[J]. *硅酸盐通报*, 2019, (6): 1681–1687,1693.)
- [ 27 ] Li Guo, Yuan Yingshu, Geng Ou. Influence of climatic conditions on the carbonation rate of concrete[J]. *Concrete*, 2004, (11): 49–51,53.  
(李果, 袁迎曙, 耿欧. 气候条件对混凝土碳化速度的影响[J]. *混凝土*, 2004, (11): 49–51,53.)
- [ 28 ] Gopinath R, Alexander M, Beushausen H. Predicting depth of carbonation of concrete for varying climatic conditions[C]// 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures (EAC2). 2014: 515-519.
- [ 29 ] Di Xiaotan, Zhou Yan. Research on concrete carbonization law[J]. *China Building Science Research*, 1995, (4): 31–35.  
(邸小坛, 周燕. 混凝土碳化规律研究[J]. *中国建筑科学研究*, 1995, (4): 31–35.)