

# 基于混凝土碳化性能的不同养护条件下粉煤灰临界掺量

吕志军

(中铁十六局集团 第五工程有限公司, 河北 唐山 064000)

**摘要:**为得到不同养护方式下可确保混凝土碳化耐久性的粉煤灰临界掺量,在  $\text{CO}_2$  体积分数( $20 \pm 3$ )%、温度( $20 \pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ 、相对湿度( $70 \pm 5$ )%环境中研究了标准养护 28、56、90 d、干养护 3 a(分别记为 A、B、C、D 养护条件),水胶比 0.37、0.45、0.53,粉煤灰掺量等质量替代水泥 0、30%、45%、60%以及水胶比 0.61 的纯水泥混凝土的碳化深度,建立了不同养护条件下确保混凝土碳化耐久性的粉煤灰掺量与水胶比关系的数学模型。结果表明,当水胶比为 0.37 和 0.45 时,水胶比对混凝土抗碳化性能的影响较小;对于大掺量粉煤灰混凝土,较低的水胶比和适当延长的早期养护时间(一般不超过 56 d)可使得其抗碳化性能得以保证;得到不同养护方式下水胶比与临界粉煤灰掺量的数学关系。在实际施工时,可根据养护条件确定粉煤灰的临界掺量,进而指导拌合站的配合比设计,对混凝土的抗碳化性能进行事前控制。

**关键词:**粉煤灰混凝土;养护龄期;碳化;粉煤灰临界掺量

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)02-0053-07

随着混凝土掺合料技术的不断革新,越来越多的掺合料被用于混凝土生产中,但在实际工程中,由于养护龄期及条件得不到保证,过量的矿物掺合料掺入会降低混凝土的抗碳化性能,进而影响其使用功能<sup>[1-2]</sup>。当混凝土发生碳化后,会使其内部钢筋发生锈蚀,造成混凝土锈胀开裂,严重影响其使用性能。故而研究混凝土在不同养护条件下的粉煤灰临界掺量对于延长混凝土的使用寿命有良好的促进作用。

混凝土的养护条件及龄期会对其抗碳化性能产生较大影响,Sulapha et al<sup>[3]</sup>、阿茹罕等<sup>[4]</sup>、何小军<sup>[5]</sup>研究了混凝土在标准养护 3、7、14、28 d 后的抗碳化性能,结果表明,混凝土在早期养护时间越长,其抗碳化性能相应增强,但对于不同掺量粉煤灰的混凝土,标准养护 28 d 后其抗碳化性能并没有明显的差异;Zhao et al<sup>[6]</sup>研究了湿养护 90 d 粉煤灰混凝土的抗碳化性能,结果表明,对于大掺量粉煤灰混凝土,当水胶比较大时,即使延长早期湿养护时间,其抗碳化性能提高亦不明显;王立川等<sup>[7]</sup>、王艺霖等<sup>[8]</sup>、涂永明等<sup>[9]</sup>对比了自然养护和标准养护条件下隧道衬砌混凝土的抗碳化性能,结果表明,标准养护条件下混凝土的抗碳化性能显著高于自然养护下的混凝土;赵庆新等<sup>[10]</sup>建立了 20 mm 碳化深度下粉煤灰临界掺量与水胶比的数学关系,但考虑养护条件太少,不能充分适应工程实际。在混凝土碳化的研究过程当中,着重于研究标准养护 3、7、14、28 d 的混凝土<sup>[11-12]</sup>,但当混凝土中掺入粉煤灰后,粉煤灰在混凝土养护 28~90 d 期间会发生二次水化反应,降低混凝土的碱度,对其抗碳化性能产生一定的影响<sup>[13-14]</sup>。

基于以上分析,在  $\text{CO}_2$  体积分数( $20 \pm 3$ )%、温度( $20 \pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ 、相对湿度( $70 \pm 5$ )%环境中研究了标准养护 28、56、90 d、干养护 3 a(分别记为 A、B、C、D 养护条件),水胶比 0.37、0.45、0.53,粉煤灰掺量等质量替代水泥 0、30%、45%、60%以及水胶比 0.61 的纯水泥混凝土的碳化深度,标准养护 56 d 和 90 d 不仅达

收稿日期:2022-03-18 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220056

基金项目:河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2020427);中铁十六局集团科技研发课题(FJJDQJSYF2020001)

作者简介:吕志军(1980—),男,高级工程师,研究方向为交通土木施工技术管理。E-mail:569813948@qq.com

吕志军.基于混凝土碳化性能的不同养护条件下粉煤灰临界掺量[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):53-59.

到了常规研究混凝土抗碳化性能中标养 28 d 的要求,还使粉煤灰的二次水化作用更为充分,降低其对混凝土抗碳化性能产生的不确定性影响。根据混凝土保护层厚度不得小于 20 mm 的要求,建立了不同养护条件下确保混凝土碳化耐久性的粉煤灰掺量与水胶比关系的数学模型。

## 1 实验

### 1.1 原材料

实验用胶凝材料采用上思华润 P·O42.5 硅酸盐水泥,粉煤灰产地为北海铁山港电厂,指标为 II 级,其主要化学组成和比表面积见表 1;粗骨料粒径为 5~31.5 mm,含泥量<0.2%;细骨料取 II 区中砂,级配良好;减水剂为聚羧酸系,减水率为 30%;拌合用水为自来水。

表 1 试验用胶凝材料化学成分和比表面积

材料	化学成分(质量分数)/%									比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI	
水泥	54.25	18.30	5.03	2.78	2.95	0.25	0.67	3.12	3.07	340
粉煤灰	8.75	48.50	26.78	3.89	0.98	1.05	1.10	1.72	1.63	385

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 配合比

水胶比分别为 0.37、0.45、0.53,粉煤灰等质量取代水泥分别为 0%、30%、45%和 60%。同时,在实验进行的过程中,将其中一组水胶比增加 0.61 的基准混凝土组。具体配合比如表 2 所示。

表 2 混凝土配合比

试件编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )				
			粉煤灰	水泥	水	河砂	碎石
A1	0.37	0	0	460	170	684	1 114
B1		30	138	322	170	684	1 114
C1		45	207	253	170	684	1 114
D1		60	276	184	170	684	1 114
A2	0.45	0	0	390	175	695	1 135
B2		30	117	273	175	695	1 135
C2		45	175	215	175	695	1 135
D2		60	234	156	175	695	1 135
A3	0.53	0	0	340	180	715	1 165
B3		30	102	238	180	715	1 165
C3		45	153	187	180	715	1 165
D3		60	204	136	180	715	1 165
E	0.61	0	0	300	183	722	1 178

#### 1.2.2 试件制备与养护

依据表 2 所示配合比成型 100 mm×100 mm×400 mm 的试件,成型后标准养护 24 h 后拆模,再把各个组的混凝土根据龄期分成湿养护 28、56、90 d 以及干养护 3 a 这 4 个组(记作 A、B、C、D 组养护),从而展开不同条件下混凝土抗碳化性能的研究。

#### 1.2.3 试件制备与养护

将 4 种养护龄期条件下的混凝土试件参照 GB/T 50082—2019 中描述的试件碳化处理方法进行试验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同养护方式下粉煤灰掺量及水胶比对碳化的影响

各养护条件下混凝土经快速碳化 3、7、14、28 d 后,各龄期碳化深度如图 1 所示。

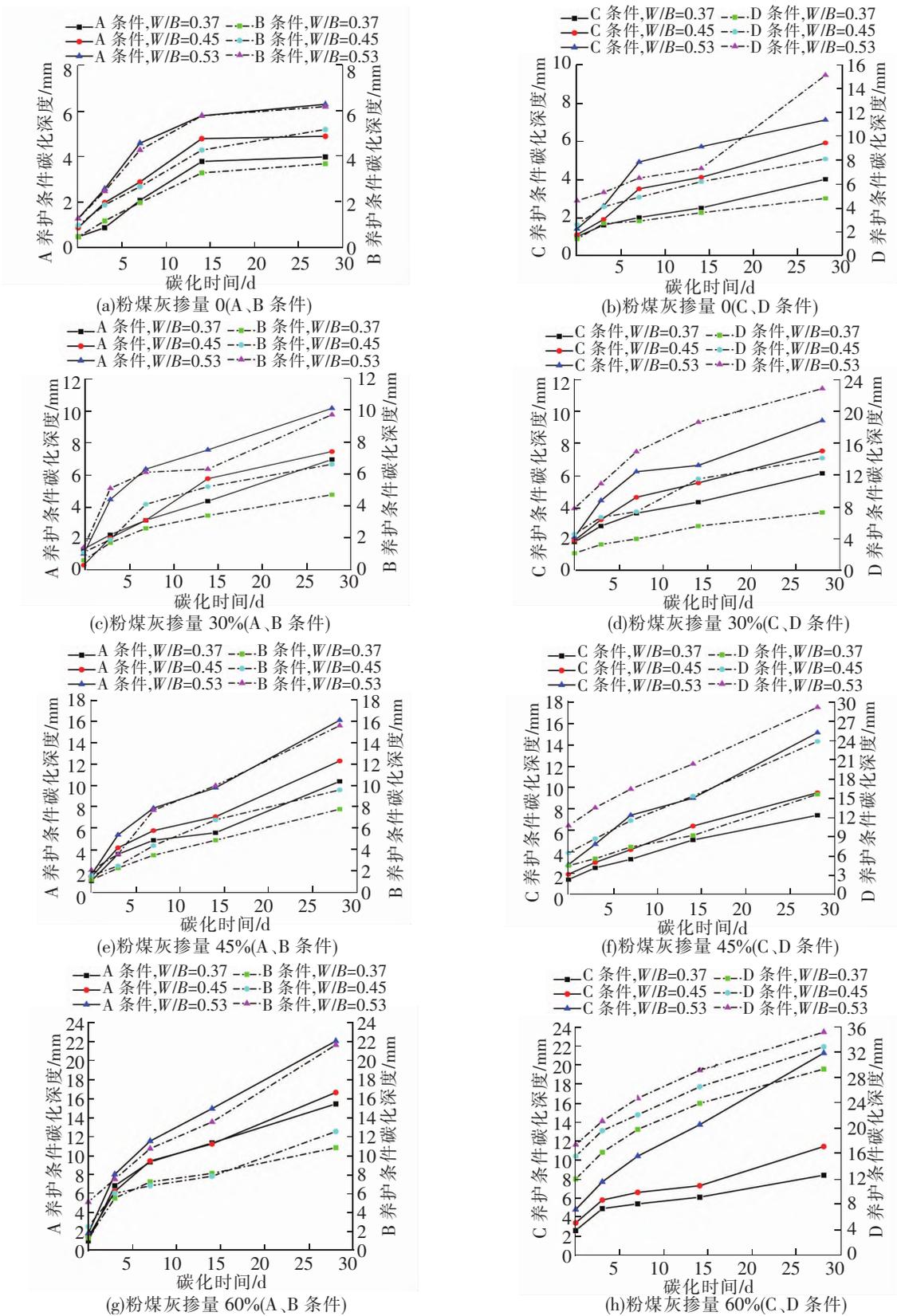


图 1 不同养护方式下混凝土各龄期碳化深度

由图 1 中数据分析可以看出,相同粉煤灰掺量条件下,混凝土碳化深度均会随着水胶比的增大而增大,当水胶比为 0.37 和 0.45 时,水胶比对混凝土的碳化影响较小,但当水胶比为 0.53 时,各组混凝土碳

化速率加快,这主要是由于低水胶比可使混凝土的结构紧密度提高,而高水胶比则会令混凝土的孔隙率扩大,加快了  $\text{CO}_2$  的扩散速率,使混凝土加速碳化。

同等粉煤灰掺量条件下,D组养护条件下混凝土各龄期碳化深度均高于 A、B、C 3组;当不掺粉煤灰,水胶比为 0.37 和 0.45 时,4种养护条件下混凝土碳化深度差异不明显,当水胶比增大至 0.53 时,D组养护条件下混凝土劣化较为明显;当粉煤灰掺量为 30%时,随着养护时间的延长,水胶比为 0.53 组的混凝土抗碳化性能增强较为明显,其他组混凝土的抗碳化性能变化仍不明显;当粉煤灰掺量增加至 45%和 60%,水胶比为 0.53 时,各养护条件下混凝土抗碳化性能差别不大,水胶比为 0.37 和 0.45 时,延长养护时间可显著提高其抗碳化性能,但此时 B、C 条件下混凝土抗碳化性能差别不大,这表明对于大掺量粉煤灰混凝土,较低的水胶比和适当延长的养护时间(一般不超过 56 d)是其抗碳化性能得以保障的有效措施。

## 2.2 不同养护方式及水胶比条件下粉煤灰临界掺量

对各水胶比条件下混凝土碳化深度随粉煤灰掺量变化规律曲线进行拟合分析

$$X = a + m(W_{FA})^n \quad (1)$$

不同养护方式及水胶比条件下,碳化深度随粉煤灰掺量变化规律的拟合系数如表 3 所示。

表 3 不同养护方式对碳化深度变化影响的曲线拟合系数

养护方式	水胶比	拟合系数及相关系数			
		$a$	$m$	$n$	$R^2$
A	0.37	4.049	0.005	1.881	0.999
	0.45	4.807	0.007	1.826	0.995
	0.53	6.223	0.010	1.790	0.998
B	0.37	3.635	0.001	2.108	0.997
	0.45	5.163	0.003	1.900	0.998
	0.53	6.121	0.007	1.863	0.998
C	0.37	3.99	0.064	1.036	0.998
	0.45	5.871	0.006	1.664	0.997
	0.53	6.908	0.002	2.231	0.994
D	0.37	4.224	0.001	2.455	0.987
	0.45	7.881	0.014	1.832	0.995
	0.53	15.064	0.084	1.340	0.999

从表 3 可以看出,拟合曲线具有较好的拟合度,可以比较客观真实地反映混凝土的碳化深度变化规律。

为能够使数据范围扩大,从而进一步推断粉煤灰的掺量是 0%的时候,其临界的水胶比情况,在展开全方位实验的同时,对每组养护方式增加一组水胶比为 0.61 的基准混凝土组,不同水胶比下混凝土 28 d 碳化深度如图 2 所示。

由图 2 可以看出:D 养护条件下混凝土出现了较为严重的碳化。水胶比为 0.61 时,其 28 d 碳化深度是 23.7 mm,为水胶比 0.37 时的 4.9 倍。对实验数据展开拟合分析,同时对拟合的结果进行筛选,通过系数较高的指数函数来完成拟合。拟合曲线如图 3 所示。

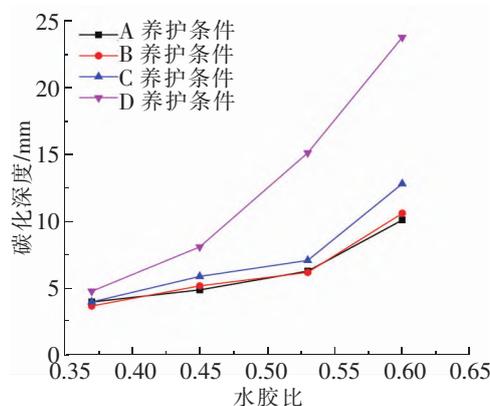


图 2 各类养护方式及水胶比之下的混凝土碳化深度折线图

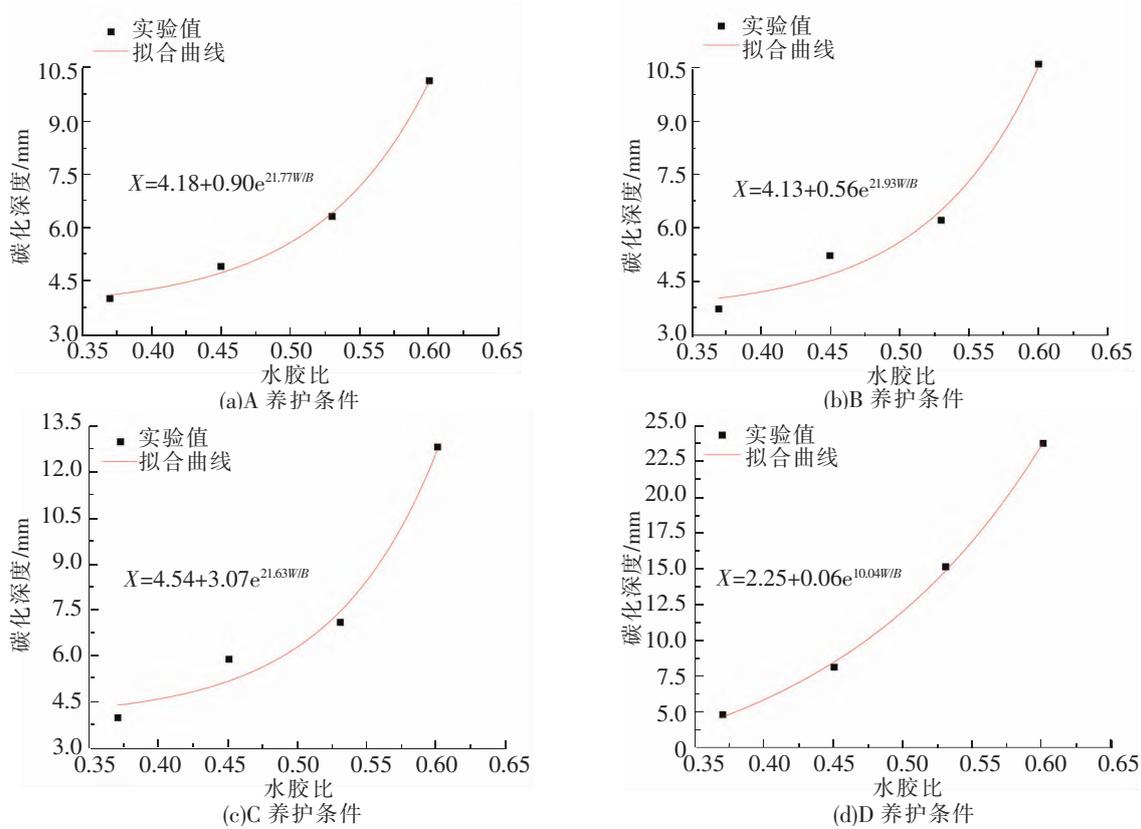


图 3 各组养护条件下不同水胶比混凝土碳化深度的拟合曲线

由图 3 可以看出,各拟合曲线相关系数较高,能够较好地反映水胶比对混凝土抗碳化性能的影响规律。在各拟合曲线中分别代入最大的碳化深度 20 mm,可以计算出各组养护方式下对应的水胶比分别为 0.68、0.67、0.65、0.57。不同的养护方法的混凝土都达到相应的水胶比率的时候,在不同组别下的混凝土最大粉煤灰的掺量数值是 0%。

### 2.3 各组养护方式中的粉煤灰掺量的数学模型

根据表 3 所有拟合数据值,为保证混凝土基本抗碳化性能,将混凝土最小保护层厚度 20 mm 代入式 (1)中,计算出不同养护方式各水胶比条件下混凝土中粉煤灰的临界掺量,结果如表 4 所示。

表 4 不同养护方式与水胶比对应的粉煤灰掺量极限值 %

养护方式	水胶比			
	0.37	0.45	0.53	0.68
A	72.90	67.18	56.72	0
B	99.77	87.97	58.87	0
C	—	—	51.34	0
D	49.37	40.12	20.90	0

由表 4 可知:C 养护条件下水胶比较小时,得出的粉煤灰掺量超出了界限值,故不予分析;当水胶比较大时,C 养护条件下的粉煤灰掺量反而较 A、B 养护条件下更小,这说明对于强度较低的大掺量粉煤灰混凝土,延长湿养护时间至 90 d 仍不能提高其抗碳化性能,相反还会对其抗碳化性能产生不利的影响。

现对粉煤灰掺量和水胶比之间数据进行拟合,如图 4 所示。

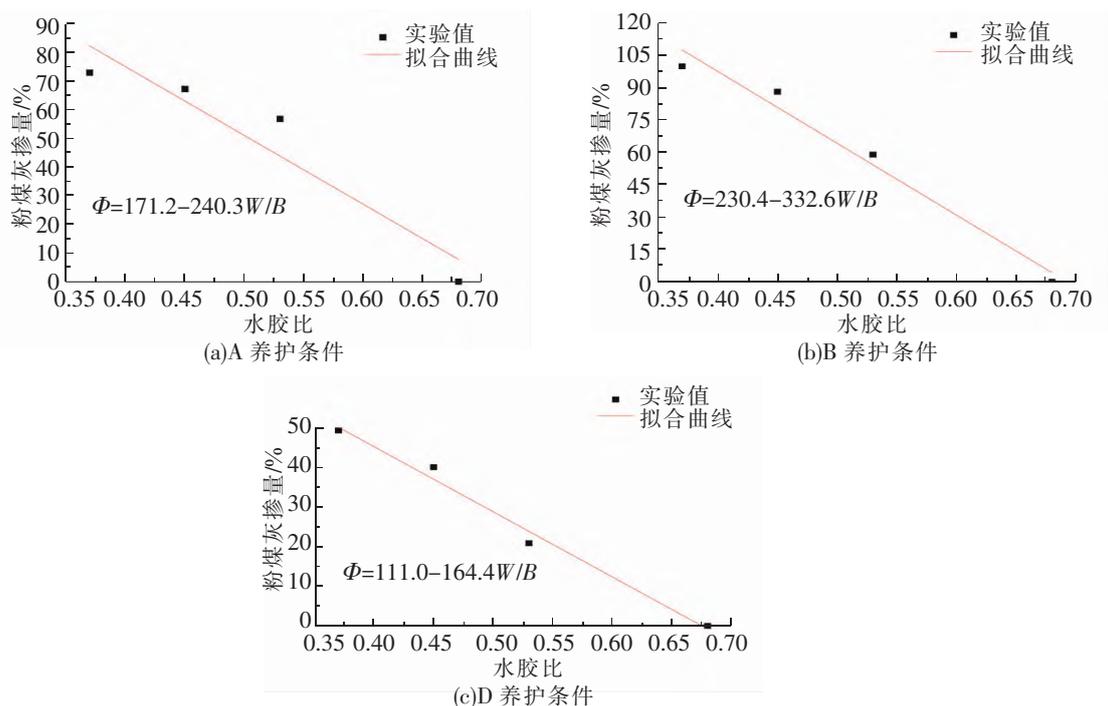


图 4 各养护条件下水胶比和粉煤灰掺量数学模型图

3 条拟合直线较好地反映出不同养护条件下水胶比和最大粉煤灰掺量之间的关系,在实际施工时,可根据养护条件确定粉煤灰的临界掺量,进而指导拌合站的配合比设计,对混凝土的抗碳化性能进行事前控制。

### 3 结论

在对比了各组混凝土碳化研究数据之后,得到下述结论:

(1) 在水胶比为 0.37 和 0.45 时,水胶比对混凝土抗碳化性能的影响较小;当水胶比为 0.53 时,各组混凝土碳化速率明显加快。

(2) 对于大掺量粉煤灰混凝土,较低的水胶比和适当延长的早期养护时间(一般不超过 56 d)可使其抗碳化性能得以保证。

(3) 对于强度较低的大掺量粉煤灰混凝土,延长湿养护时间至 90 d 仍不能提高其抗碳化性能,相反还会对其抗碳化性能产生不利的影响。

(4) 建立了在保证碳化深度 20 mm 条件下不同养护方式时的水胶比与临界粉煤灰掺量的数学关系  $\Phi = 171.2 - 240.3W/B$ 、 $\Phi = 230.4 - 332.6W/B$ 、 $\Phi = 111.0 - 164.4W/B$ ,在实际施工时,可根据养护条件确定粉煤灰的临界掺量,进而指导拌合站的配合比设计,对混凝土的抗碳化性能进行事前控制。

### 参 考 文 献

- [1]胡野,张贺东.混凝土碳化的影响因素及对策[J].建筑技术开发,2020,47(13):143-144.
- [2]尤瑞林,范佳,谭振宇,等.收缩徐变效应对铁路预应力混凝土轨枕关键尺寸影响研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(4):24-29.
- [3]Sulapha P, Wong S F, Wee T H, et al. Carbonation of concrete containing mineral admixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15 (2): 134-143.
- [4]阿茹罕,阎培渝.不同粉煤灰掺量混凝土的碳化特性[J].硅酸盐学报,2011,39(1):7-12.
- [5]何小军.长期湿养护与荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响[D].秦皇岛:燕山大学,2017.
- [6]Zhao Qingxin, He Xiaojun, Zhang Jinrui, et al. Long-age wet curing effect on performance of carbonation resistance of fly ash concrete [J]. Construction and Building Materials,2016, 127:577-587.

- [7]王立川,傅蕾,王永林,等. 铁路隧道衬砌机制砂混凝土耐久性性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1857-1863.
- [8]王艺霖,王顺尧,刘巧玲. 活性掺合料对混凝土抗碳化性能影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(2): 439-446.
- [9]涂永明,刘东运,张雨. 提升粉煤灰混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 599-605.
- [10]赵庆新,齐立剑,潘慧敏. 基于混凝土碳化耐久性的粉煤灰临界掺量[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 118-122.
- [11]孙述彬. 粉煤灰高性能混凝土碳化规律的试验研究[J]. 山西建筑, 2014, 40(22): 115-116.
- [12]Anna V S, Renato V V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(4): 571-579.
- [13]李响,阿茹罕,阎培渝. 水泥粉煤灰复合胶凝材料水化程度的研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(5):584-588.
- [14]梁树锋. 喷射纤维混凝土在硫酸盐腐蚀环境下的劣化规律[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(1): 121-126.

## Critical Content of Fly Ash Under Different Curing Conditions Based on Carbonation Performance

Lyu Zhijun

(The 5th Engineering Co. Ltd. of 16th Bureau Group of China Railway, Tangshan 064000, China)

**Abstract:** In the environment that the concentration of  $\text{CO}_2$  was  $(20 \pm 3)\%$  (volume fraction), the relative humidity was  $(70 \pm 5)\%$  and the temperature was  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , the carbonation regularity of concrete was studied after curing 28 d, 56 d, 90 d and dry curing 3 a. The water-binder ratio was 0.37, 0.45, 0.53, 0.61, and the content of fly ash substituting for the equal quality of cement was 0%, 30%, 45% and 60%, respectively. The purpose of these were to obtain the critical amount of fly ash which could ensure the carbonation resistance of concrete under different curing conditions, and the critical amount of fly ash which could ensure the carbonation resistance of concrete under different curing conditions. The mathematical model of the relationship between fly ash content and water binder ratio was established to ensure the carbonation resistance of concrete under different curing conditions. The result showed that when the water binder ratio was 0.37 and 0.45, the water binder ratio had little effect on the carbonation resistance of concrete; For concrete with high fly ash content, low water binder ratio and appropriately extended early curing time (generally no more than 56 d) could ensure its carbonation resistance. The mathematical relationship between the water binder ratio and the maximum fly ash content under different curing methods. In the actual construction, the maximum amount of fly ash could be determined according to the curing conditions, so as to guide the mix proportion design of the mixing station and control the carbonation resistance of concrete in advance.

**Key words:** fly ash concrete; curing period; carbonation; critical content of fly ash