

## 长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响

赵庆新<sup>1</sup>, 何小军<sup>1</sup>, 张津瑞<sup>2</sup>

- (1. 燕山大学, 河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 为分析长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响, 在 CO<sub>2</sub> 浓度(体积分数)为(20±3)%, 相对湿度为(70±5)%, 温度为(20±2) °C 环境中, 研究了水胶比为 0.37、0.45、0.53, 粉煤灰等质量替代水泥为 0、30%、60%, 40 mm×40 mm×160 mm 的混凝土试件经标准养护 28 d 后, 在相对湿度(60±5)%, 温度(20±2) °C 条件下, 放置 3 a 的空载试件、加载试件(压应力水平为 33%)以及加载 3 a 后卸载试件的快速碳化规律, 并结合超声波声速分析了长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能影响的机理。结果表明: 长期荷载作用可减缓粉煤灰混凝土的碳化进程, 压应力作用 3 a 后超声波声速平均值较 3 a 龄期空载试件增大 0.8%, 表明其内部结构更为致密, 各组粉煤灰混凝土的平均碳化深度增加值较 3 a 龄期空载试件降低 19.2%; 压应力作用 3 a 后卸载, 混凝土超声波声速平均值较空载试件降低 1.1%, 内部可能产生了微损伤, 加速了其碳化速率, 各组粉煤灰混凝土的平均碳化深度增加值较 3 a 龄期空载试件增大 14.5%。超声波声速测试结果佐证了长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响规律。

**关键词:** 粉煤灰混凝土; 长龄期; 荷载; 碳化

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2017)02-0254-06

网络出版时间: 网络出版地址:

## Effect of Long-term Loading on Carbonation Resistance of Fly Ash Concrete

ZHAO Qingxin<sup>1</sup>, HE Xiaojun<sup>1</sup>, ZHANG Jinrui<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Mechanical Reliability for Heavy Equipments and Large Structures of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to analyze the effect of long-term loading on the carbonation resistance of fly ash concrete, the carbonation regularity of concrete specimens with the size of 40 mm×40 mm×160 mm at a concentration (volume fraction) of CO<sub>2</sub> (20±3)%, a relative humidity of (70±5)% and a temperature of (20±2) °C was investigated. After 28-d curing, the concrete specimens were loaded for 3 years (*i.e.*, at compressive stress level of 33%), placed for 3 years without loading and uninstalled after loading for 3 years at the relative humidity of (60±5)% and the temperature of (20±2) °C, respectively. The water-binder ratio is 0.37, 0.45 and 0.53, and the content of fly ash substituting for the equal quality of cement by mass is 0, 30% and 60%, respectively. The mechanism of long-term loading effect on the carbonation resistance of fly ash concrete was analyzed by the sound velocity measurement. The result shows that the long-term loading can reduce the rate of concrete carbonation. The ultrasonic sound speed of specimens after loaded for 3 years is increased by an average of 0.8%, compared to the specimens unloaded, indicating that the internal structure is denser. The average increment value of carbonation depth of fly ash concrete in each group is decreased by 19.2%, compared to the specimens unloaded. The ultrasonic sound speed of specimens uninstalled after loading for 3 years is decreased by an average of 1.1%, compared to the specimens unloaded. The micro-damage in internal of concrete accelerates its carbonation rate. The average increment value of carbonation depth of fly ash concrete in each group is increased by 14.5%, compared to the specimens unloaded. The ultrasonic testing results can indicate the influence of long-term loading on the carbonation resistance of fly ash concrete.

**Keywords:** fly ash concrete; long-term; load; carbonation

收稿日期: 2016-06-28. 修订日期: 2016-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金(51578477); 河北省研究生创新资助项目(00302-6370018).

第一作者: 赵庆新(1973—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师.

Received date: 2016-06-28. Revised date: 2016-11-09.

First author: ZHAO Qingxin (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhaoqingxin@ysu.edu.cn

混凝土的抗碳化性能是关系到其耐久性的一个经典问题<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着混凝土技术的不断革新,粉煤灰已成为现代混凝土的主要组成部分<sup>[3]</sup>。粉煤灰掺量较大时,混凝土抗碳化性能显著下降,严重影响其耐久性,因此,粉煤灰混凝土的抗碳化性能成为制约其工程应用的关键因素。

工程中混凝土多是在承受各种荷载下工作的,不同的应力状态会对混凝土的抗碳化性能产生不同的影响<sup>[4-7]</sup>。疲劳荷载作用下会使混凝土产生损伤,降低混凝土裂纹间隙因子,导致混凝土 CO<sub>2</sub> 扩散系数随疲劳损伤程度的增加而增大,进而降低其抗碳化性能<sup>[8-11]</sup>。压应力作用则会对混凝土的抗碳化性能产生有益的作用,王艳等<sup>[12]</sup>、陈伟等<sup>[13]</sup>、涂永明等<sup>[14]</sup>、田浩等<sup>[15]</sup>研究了粉煤灰混凝土经标准养护 28 d 后在不同应力状态下的抗碳化性能,得到了较为一致的结论,即压应力作用可减缓粉煤灰混凝土的碳化速率。现有关于荷载作用对于粉煤灰混凝土抗碳化性能的研究基本都是基于短期荷载作用下的<sup>[16-17]</sup>,对于长期荷载作用下粉煤灰混凝土的抗碳化性能还鲜有研究。而实际工程中混凝土在整个服役期间多是长期受荷的,这些荷载往往会引起混凝土中微裂缝以及孔结构的改变,从而影响混凝土的抗碳化性能,且文献<sup>[18-20]</sup>研究表明粉煤灰的二次水化主要发生在 28 d 至 90 d 之间,在混凝土快

速碳化期间会伴随着粉煤灰的水化反应,对碳化产生一定的不确定性影响,因此,研究长期压应力作用下粉煤灰混凝土的抗碳化性能相对更接近于工程实际。

基于以上分析,在 CO<sub>2</sub> 浓度(体积分数)为(20±3)%,相对湿度为(70±5)%,温度为(20±2)℃环境中,研究了水胶比为 0.37、0.45、0.53,粉煤灰等质量替代水泥为 0、30%、60%,40 mm×40 mm×160 mm 混凝土试件标准养护 28 d 后,在相对湿度(60±5)%,温度(20±2)℃条件下放置 3 a 的空载试件、加载试件(压应力水平为 33%)以及加载 3 a 后卸载试件的快速碳化规律,并结合 3 种条件下的超声波声速测试结果分析了 3 a 压应力作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能影响的机理。

## 1 实验

### 1.1 原材料

胶凝材料采用浅野 P·II 42.5 硅酸盐水泥和绥中热电厂 I 级粉煤灰,其主要化学组成、烧失量和比表面积如表 1 所示。细骨料采用细度模数为 2.8 的 II 区中砂。粗骨料采用粒径为 5~16 mm 的连续级配破碎石灰石(其中 5~10 mm 与 10~16 mm 的碎石质量比为 7:3)。减水剂采用减水率为 30% 的 HP400 聚羧酸系高效减水剂。拌合用水为自来水。

表 1 水泥和粉煤灰的化学组成、烧失量和比表面积

Table 1 Chemical composition, loss on ignition and specific surface area of cement and fly ash

Material	Mass fraction w/%												Specific surface area/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) (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	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI*	
Cement	63.70	20.30	4.83	3.25	3.28	0.03	1.28	0.12	0.33	0.12	2.67	3.26	350
Fly ash	7.50	49.10	32.50	4.78	0.80	0.51	1.88	0.08	1.49	0.23	0.58	1.60	390

\*LOI—Loss on ignition.

### 1.2 方法

1.2.1 试件制备及快速碳化 采用如表 2 所示配合比成型 40 mm×40 mm×160 mm 的混凝土试件用于快速碳化试验和轴心抗压强度测试,成型时通过调整减水剂用量控制混凝土坍落度在(100±10)mm。每组配合比各成型 15 个试件,其中 3 个用于轴心抗压强度测试,12 个用于快速碳化试验。所有试件经标准养护 28 d,然后将试件用加热的石蜡密封,其中粉煤灰掺量为 60% 的试件留一个侧面,其余面密封,粉煤灰掺量为 0% 和 30% 的试件留两个侧面,其余面用石蜡密封,密封完成后每组中取 3 个试件在相对湿度(60±5)%,温度(20±2)℃条件下养护至 3 a

龄期,9 个在相同条件下以其轴心抗压强度的 33% 为荷载控制水平加载 3 a,达到预定龄期后停止养护,并将加载 3 a 的试件其中 3 个进行卸载。将空载、加载以及卸载 3 种条件下的混凝土试件参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》中快速碳化试验方法进行快速碳化试验。试验开始前先测量 3 种条件下混凝土的初始碳化深度。将 3 a 龄期空载、3 a 龄期加载后卸载以及带有加载装置的 3 a 龄期加载试件置于 CO<sub>2</sub> 浓度为(20±3)%,相对湿度为(70±5)%,温度为(20±2)℃的碳化箱内。达到预定碳化时间(未加载以及卸载试件为 3、7、14、28 d;加载试件为 7、28 d)后取出

试件，加载试件要进行卸载，然后从预定位置劈裂，并将浓度(质量分数)为 1%的酚酞指示剂滴于劈裂面，待混凝土未碳化区颜色稳定后，从测试面边缘至未碳化区边界沿边长每隔 10 mm 测量一次碳化深度值，并以其平均值作为该混凝土试件的碳化深度，3 a 龄期加载试件每个测试龄期测 3 个试件。测试完成后将空载及卸载试件劈裂面密封后放回碳化箱内继续碳化，直到下一个测试时间，加载试件则不再放回。

1.2.2 试件加载 试件成型后经标准养护 28 d，然后每个配合比各取 3 块试件测定其轴心抗压强度  $f_c$ (见表 2，计算其他试件加载时的荷载控制指标)。

按照国家标准 GB/T50082—2009，采用四杆式弹簧压缩加载实验装置对试件进行加载，加载过程中，对试件连续、均匀加载，荷载控制水平为其轴心抗压强度的 33%。加载完成后将试件放入相对湿度 (60±5)%，温度(20±2) °C 的室内养护至 3 a 龄期。

1.2.3 混凝土超声波声速测试 在快速碳化实验前，采用非金属超声检测分析仪对 3 a 龄期加载试件、空载试件以及 3 a 龄期加载后卸载的混凝土试件进行声速测量，测量间距为 40 mm，沿试件侧面每 40 mm 作为 1 个测点，共 3 个，每个点采样 3 次，以其算数平均值作为该混凝土试件的超声波声速。

表 2 混凝土配合比与轴心抗压强度  
Table 2 Mix proportions and axial compressive strength of concrete

Sample No.	Water-binder ratio	$w_{FA}/\%$	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )					$f_c/\text{MPa}$
			Fly ash	Cement	Water	River sand	Coarse aggregate	
A1	0.37	0	0	460	170	684	1 114	56.3
B1	0.37	30	138	322	170	684	1 114	54.4
C1	0.37	60	276	184	170	684	1 114	37.5
A2	0.45	0	0	390	175	695	1 135	51.9
B2	0.45	30	117	273	175	695	1 135	50.0
C2	0.45	60	234	156	175	695	1 135	35.6
A3	0.53	0	0	340	180	715	1 165	50.0
B3	0.53	30	102	238	180	715	1 165	42.5
C3	0.53	60	204	136	180	715	1 165	22.5

\* In the absence of special expository writing all percentage for quality percentage in the article; w is mass fraction.

## 2 结果与讨论

### 2.1 长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响

不同粉煤灰掺量和水胶比条件下混凝土空载、加载以及卸载试件快速碳化至 28 d 各龄期碳化深度测试结果，如图 1 所示。由图 1 可知：混凝土 28 d 碳化深度随粉煤灰掺量和水胶比的增大呈上升趋势；3 a 龄期加载后卸载试件碳化进程发展最快；不同粉煤灰掺量与水胶比条件下，3 a 龄期加载、空载以及加载后卸载试件初始碳化深度均存在差异。采用混凝土碳化深度增加值分析 3 a 龄期压应力作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响，虽然不同配合比混凝土间前期的自然碳化层厚度差别较大，但对同一配合比而言，前期自然碳化层厚度差别不大，并不影响分析长期荷载作用对混凝土抗碳化性能的影响。

图 2 为 3 a 龄期加载、空载以及 3 a 龄期加载后卸载混凝土 28 d 碳化深度增加值，由图 2 可知：不

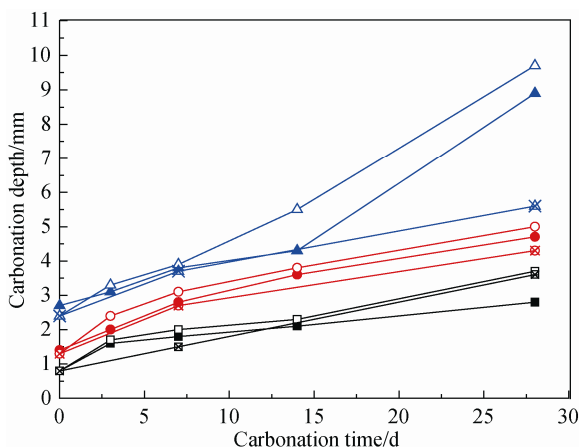
同水胶比条件下，随着粉煤灰掺量的增加，混凝土碳化深度增加值不断增大，且碳化速率随粉煤灰掺量增加而增大；对于粉煤灰掺量为 0、水胶比为 0.37 的混凝土，3 a 压应力的作用使其碳化深度增大了 0.8 mm，这可能是由于其本身很致密，压应力作用对其内部结构造成了轻微的损伤，亦或实验误差所致。除水胶比为 0.37，未掺粉煤灰的混凝土外，其他 3 a 龄期加载、空载以及 3 a 龄期加载后卸载混凝土 28 d 碳化深度增加值依次增大，说明 3 a 龄期压应力作用减缓了粉煤灰混凝土的碳化进程，但 3 a 龄期加载后卸载，会加快粉煤灰混凝土的碳化速率，劣化其抗碳化能力。

为分析 3 a 龄期压应力作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响程度，定义系数  $K$ (以下称为  $K$  值)对其进行定量表征，如式(1)所示。 $K$  值越大，3 a 龄期压应力作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响程度越明显。

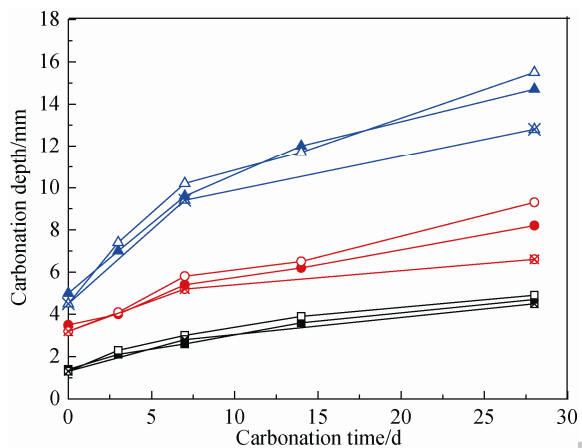
$$K = (M_1 - M_2) / M_1 \tag{1}$$

式中： $M_1$  为 3 a 龄期空载混凝土 28 d 碳化深度增加

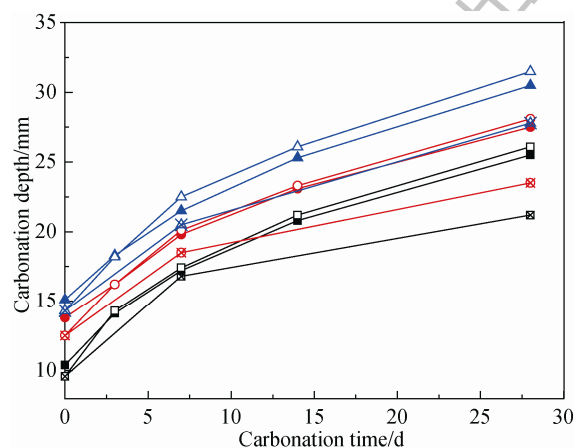
值, mm;  $M_2$  为 3 a 龄期压应力作用下混凝土 28 d 碳化深度增加值, mm。



(a) Without FA



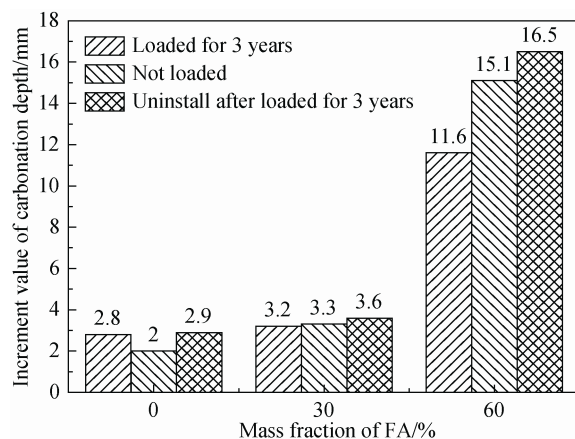
(b) 30% FA



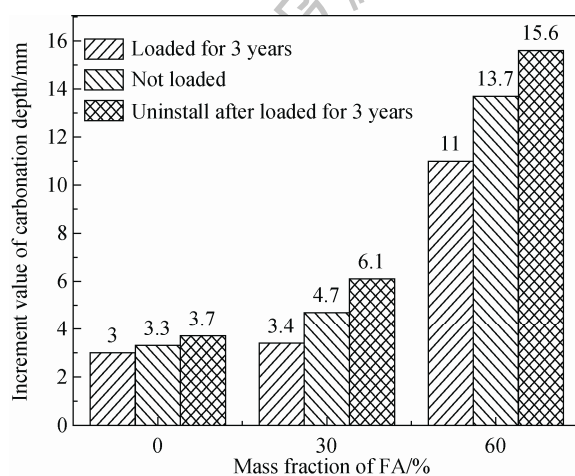
(c) 60% FA

—□—/—○—/—△— is water binder ratio as 0.37, 0.45, 0.53, respectively, uninstal after loaded; —■—/—●—/—▲— is water-binder ratio as 0.37, 0.45, 0.53, not loaded; —▣—/—◊—/—✱— is water-binder ratio as 0.37, 0.45, 0.53, loaded

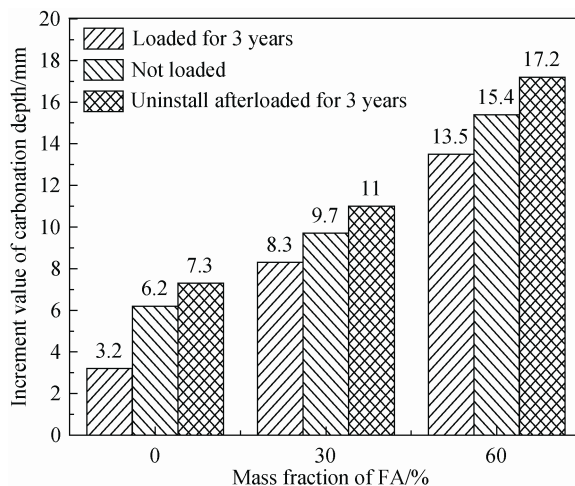
图 1 三种条件下不同粉煤灰掺量混凝土各龄期的碳化深度  
Fig. 1 Different content of fly ash of concrete carbonation depth under three kinds of conditions



(a) 0.37



(b) 0.45



(c) 0.53

图 2 三种条件下不同水胶比混凝土 28 d 碳化深度增加值  
Fig. 2 Increment value of 28 concrete with different water-binder ratio carbonation depth under three kinds of conditions

通过对混凝土碳化数据的处理分析, 得到不同粉煤灰掺量和水胶比条件下混凝土碳化深度的  $K$  值, 如表 3 所示。

表3 不同粉煤灰掺量和水胶比混凝土的  $K$  值  
Table 3  $K$  values with different content of fly ash and water-binder ratio

Mass fraction of FA/%	$K$ value		
	0.37	0.45	0.53
0	-0.40	0.09	0.48
30	0.18	0.28	0.14
60	0.23	0.20	0.12

Water-binder ratio are 0.37, 0.45, 0.53, respectively

由表3可见：粉煤灰掺量为0时，不同水胶比混凝土的  $K$  值波动较大，水胶比为0.37时的  $K$  值小于0，但碳化深度的增加值相差仅0.8 mm，水胶比为0.53时， $K$  值明显高于其他组，这可能是由于

高水胶比和缺乏粉煤灰二次水化对界面的改善作用，使得混凝土内部微观结构相对不密实，在压应力作用下密实度提高较为明显所致。对于粉煤灰混凝土，各组的  $K$  值相差不大，各组混凝土平均碳化深度增加值较3 a龄期空载试件降低19.2%。

3 a龄期压应力作用后卸载，粉煤灰混凝土的碳化速率较空载试件均有一定程度的增加。此时，各组粉煤灰混凝土的平均碳化深度增加值较3 a龄期空载试件增大14.5%。

2.2 机理分析

表4为3 a龄期空载、加载以及3 a龄期加载后卸载的混凝土试件的声速测量结果。

表4 三种条件下的混凝土声速及声速差值  
Table 4 Sound velocity and difference of sound velocity of concrete under three kinds of conditions

Sample No.	Sound velocity / (km·s <sup>-1</sup> )			Difference of sound velocity/ (km·s <sup>-1</sup> )	
	Before unloading	After unloading	Not loaded	Between before unloading and not loaded	Between after unloading and not loaded
A1	4.497	4.472	4.561	-0.064	0.089
A2	4.111	4.041	4.097	0.014	0.056
A3	4.102	3.911	3.973	0.129	0.062
B1	4.254	4.214	4.231	0.023	0.017
B2	4.058	3.931	4.000	0.058	0.069
B3	4.005	3.925	3.985	0.020	0.060
C1	4.073	4.010	4.021	0.052	0.011
C2	4.020	3.930	3.990	0.030	0.060
C3	3.968	3.898	3.951	0.017	0.053

通过对表3的  $K$  值和表4中与3 a龄期加载与空载试件超声波声速差值(以下称为声速差值)综合分析，得出了  $K$  值和声速差值的关系，如图3所示。

由图3可知：A1组试件声速差值与  $K$  值均小于0，其他组试件声速差值与  $K$  值均大于0，且  $K$  值与超声波声速差值的变化规律一致，表明超声波声速佐证了试件密实度变化对混凝土碳化深度的影响。

由表4中混凝土超声波声速测试结果分析可知：除A1组外，其他组试件卸载前及空载时声速依次减小，说明3 a压应力作用促进了混凝土内部结构的改善，使其更加致密，进而降低了其碳化速率，与文献[5]结论一致。对于不掺粉煤灰混凝土，当水胶比为0.37时， $K$  值小于0，空载试件的声速大于3 a龄期加载试件，这可能是由于其本身很致密，压应力作用对其内部结构造成了轻微的损伤，亦或实验误差所致；当水胶比为0.53时， $K$  值最大，3 a龄期加载及空载试件声速变化最为明显，这可能是由于高水胶比和缺乏粉煤灰二次水化对界面的改

善作用，使得混凝土内部微观结构相对不密实，在压应力作用下密实度提高较为明显所致。对于粉煤灰混凝土， $K$  值均大于0且相差不大，3 a压应力作用后超声波声速平均值较空载试件增大0.8%，反映其内部结构更为致密，进而碳化速率降低。

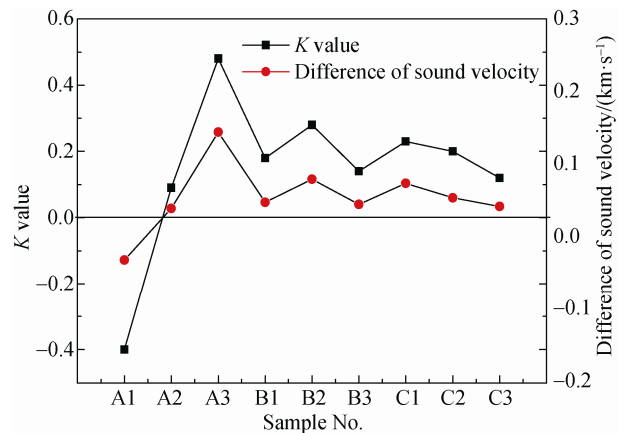


图3  $K$  值与超声波声速差值关系  
Fig. 3 Relationship between difference of sound velocity and  $K$  values

压应力作用 3 a 后卸载, 混凝土在卸载作用下产生了一个拉应力波, 这使得混凝土内部产生了微损伤<sup>[21]</sup>, 此时, 粉煤灰混凝土超声波声速平均值较空载试件降低 1.1%, 这表明微损伤的产生使其内部连通孔隙率变大, 加速了 CO<sub>2</sub> 的扩散速率, 最终加速了粉煤灰混凝土的碳化进程。

### 3 结论

1) 长期荷载作用可减缓粉煤灰混凝土的碳化进程, 压应力作用 3 a 后, 各组粉煤灰混凝土的平均碳化深度增加值较 3 a 龄期空载试件降低 19.2%; 压应力作用 3 a 后卸载, 对混凝土的抗碳化能力产生不利影响, 各组粉煤灰混凝土的平均碳化深度增加值较 3 a 龄期空载试件增大 14.5%。

2) 压应力作用 3 a 后, 粉煤灰混凝土超声波声速平均值较空载试件增大 0.8%, 反映其内部结构更为致密; 压应力作用 3 a 后卸载, 粉煤灰混凝土超声波声速平均值较空载试件降低 1.1%, 内部可能产生了微损伤; 超声波声速测试结果佐证了长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响规律。

#### 参考文献:

- [1] TANG Luping, UTGENANNT Peter, BOUBITSAS Dimitrios. 钢筋混凝土结构的耐久性和服役寿命预测[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1407-1419.  
TANG Luping, UTGENANNT Peter, BOUBITSAS Dimitrios. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(10): 1407-1419.
- [2] CASTRO P, MORENO E I, GENESCA J. Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(10): 1565-1571.
- [3] DAY R L. Strength, durability and creep of fly-ash concrete part II serviceability and durability of construction materials [A]. Proceedings of the First Materials Engineering Congress [C]. Denver, 1990: 864-873.
- [4] HOLT Erika, FERREIRA Miguel, KUOSA Hannele. 多重劣化机制作用下混凝土的性能和耐久性[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1419-1428.  
HOLT Erika, FERREIRA Miguel, KUOSA Hannele, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(10): 1419-1428.
- [5] 罗小勇, 邹洪波, 施清亮. 不同应力状态下混凝土碳化耐久性试验研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(22): 195-199.  
LUO Xiaoyong, ZHOU Hongbo, SHI Qingliang. J Nat Disasters (in Chinese), 2012, 21(22): 195-199.
- [6] 牛建刚, 牛荻涛, 刘万里. 弯曲荷载影响粉煤灰混凝土碳化规律的研究[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 140-146.  
NIU Jiangang, NIU Ditao, LIU Wanli. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2011, 30(1): 140-146.
- [7] 侯景鹏, 史巍, 袁勇. 钢筋混凝土早龄期约束收缩试验研究[J]. 硅酸盐学报, 2016, 35(1): 292-296.  
HOU Jingpeng, SHI Wei, YUAN Yong. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2016, 35(1): 292-296.
- [8] 蒋金洋, 孙伟, 金祖权, 等. 疲劳荷载与碳化耦合作用下结构混凝土寿命预测[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 304-309.  
JIANG Jinyang, SUN Wei, JIN Zuquan, et al. J Build Mater (in Chinese), 2010, 13(3): 304-309.
- [9] 赵庆新, 许宏景, 闫国亮. 应力损伤对混凝土抗碳化性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 503-507.  
ZHAO Qingxin, XU Hongjing, YAN Guoliang. J Build Mater (in Chinese), 2013, 16(3): 503-507.
- [10] 李士彬, 孙伟. 疲劳、碳化和氯盐作用下混凝土劣化的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(11): 1459-1464.  
LI Shibin, SUN Wei. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(11): 1459-1464.
- [11] 付传清, 屠一军, 金贤玉, 等. 荷载作用对混凝土中氯盐传输的影响研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(4): 400-410.  
FU Chuanqing, TU Yijun, JIN Xianyu, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(4): 400-410.
- [12] 王艳, 牛荻涛, 苗元耀, 等. 弯曲荷载作用下碳纤维混凝土碳化性能[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2015, 47(1): 51-55.  
WANG Yan, NIU Ditao, MIAO Yuanyao, et al. J Xi'an Univ Arch Tech: Nat Sci Ed (in Chinese), 2015, 47(1): 51-55.
- [13] 陈伟, 徐亦冬, 耿健. 碳化和应力作用对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 1199-1204.  
CHEN Wei, XU Yidong, GEN Jian. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015, 34(5): 1199-1204.
- [14] 涂永明, 吕志涛. 应力状态下混凝土的碳化试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(5): 573-576.  
TU Yongming, LV Zhitao. J Southeast Univ: Nat Sci Ed (in Chinese), 2003, 33(5): 573-576.
- [15] 田浩, 李国平, 刘杰, 等. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 200-205.  
TIAN Hao, LI Guoping, LIU Jie, et al. J Tongji Univ: Nat Sci (in Chinese), 2010, 38(2): 200-205.
- [16] 金南国, 徐亦斌, 付传清, 等. 荷载、碳化和氯盐侵蚀对混凝土劣化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1483-1491.  
JIN Nanguo, XU Yibin, FU Chuanqing, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(10): 1483-1491.
- [17] JIANG Chao, GU Xianglin, ZHANG Weiping, et al. Modeling of carbonation in tensile zone of plain concrete beams damaged by cyclic loading[J]. Construct Build Mater, 2015(77): 479-488.
- [18] 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.  
LI Xiang, A Ruhan, YAN Peiyu. J Build Mater (in Chinese), 2010, 13(5): 584-588.
- [19] 李响, 阎培渝, 阿茹罕. 基于 Ca(OH)<sub>2</sub> 含量的复合胶凝材料中水泥水化程度的评定方法[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(10): 1597-1601.  
LI Xiang, YAN Peiyu, A Ruhan. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(10): 1597-1601.
- [20] 阎培渝, 韩方晖. 基于图像分析和非蒸发水量的复合胶凝材料的水化程度的定量分析[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1331-1340.  
YAN Peiyu, HAN Fanghui. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(10): 1331-1340.
- [21] 郝圣旺, 孙菊. 非均质脆性材料灾变性破坏的一种敏感前兆[J]. 力学学报, 2008, 40(3): 339-344.  
HAO Shengwang, SUN Ju. Chin J Theor Appl Mech (in Chinese), 2008, 40(3): 339-344.