

# 弯曲荷载作用下钢纤维混凝土碳化性能

王 艳<sup>1</sup>, 牛荻涛<sup>2</sup>, 苗元耀<sup>2</sup>, 关 琥<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学材料与矿资学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 实际情况中荷载会对混凝土的耐久性退化规律产生影响, 通过开展弯曲荷载作用下钢纤维混凝土的快速碳化试验, 研究钢纤维掺量以及应力状态、应力水平对钢纤维混凝土碳化深度的影响规律。结果显示: 弯曲荷载对钢纤维混凝土的碳化深度产生了影响, 钢纤维混凝土的碳化深度在弯曲拉应力作用下增大, 并且随着拉应力水平的提高持续增大; 一定水平的弯曲压应力对于钢纤维混凝土的碳化起到抑制作用。适量的钢纤维能够降低弯曲荷载对基体混凝土碳化深度的影响, 但当纤维掺量较大时, 这种降低效果不再明显。本次试验中, 体积掺量为 1.5% 的钢纤维混凝土在各种应力状态下的碳化深度均为最小, 并且受荷载水平的影响也最小。

**关键词:** 钢纤维混凝土, 弯曲荷载, 碳化, 碳化弯曲应力影响系数

**中图分类号:** TU398

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)01-0051-05

## Carbonation of steel fiber reinforced concrete under flexural loading

WANG Yan<sup>1</sup>, NIU Ditao<sup>2</sup>, MIAO Yuanyao<sup>2</sup>, GUAN Xiao<sup>2</sup>

(1 School of Material & Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China

2 School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Loading can affect the degradation rule of concrete durability. Based on the accelerated carbonization test of steel fiber reinforced concrete under flexural loading, effects of steel fiber content, stress state on steel fiber reinforced concrete carbonation depth were studied. Test results indicated that the flexural tensile stress accelerate the concrete carbonation speed, while the flexural compressive stress under a certain level retard the concrete carbonation speed. Right amount of steel fiber helps reduce the influence of flexural loading on matrix concrete carbonation depth, but the reducing effect was not obvious. According to the varied mixing proportions in the test, steel fiber reinforced concrete of 1.5% volume content produced the best effect, and minimum carbonation depth in varied stress flexural loading.

**Key words:** steel fiber reinforced concrete; flexural loading; carbonization; flexural loading influence coefficient on carbonization.

目前混凝土耐久性研究通常只在“纯”材料条件下进行, 即只考虑材料自身与外部环境条件两种因素, 而忽视荷载的影响。但在实际服役过程中, 混凝土结构上会承受各种不同类型的荷载, 这些荷载往往会引起混凝土中微裂缝以及孔结构的改变, 从而影响混凝土的耐久性能, 未考虑荷载的耐久性研究都不能准确地反映实际情况。一些学者已经开展了相关研究, 探讨了弯曲荷载对混凝土抗冻性能的影响<sup>[1-2]</sup>; 弯曲荷载作用下混凝土在盐湖环境中抗冻性能<sup>[3-6]</sup>; 弯曲荷载、硫酸镁腐蚀以及碳化对混凝土抗冻性的影响<sup>[7]</sup>; 弯曲荷载对氯离子在混凝土中渗透规律的影响<sup>[8]</sup>; 以及弯曲荷载作用下粉煤灰混凝土碳化性能与碳化模型<sup>[9-10]</sup>。通过这些研究可以看出, 弯曲荷载对混凝土耐久性劣化起到加速作用, 影响程度随着荷载水平的加大而增加, 对混凝土的碳化深度影响显著<sup>[9]</sup>。

钢纤维混凝土即向基体混凝土中掺加一定量

的钢纤维, 在服役过程中混凝土中的钢纤维能够分担部分拉应力, 提高混凝土的抗拉性能与抗裂性能, 并明显改善基体混凝土的韧性。目前钢纤维混凝土在工程中已逐渐推广使用, 它的耐久性能也渐渐引起人们的关注。通过试验研究发现, 掺入适量钢纤维能够提高混凝土的抗碳化性<sup>[11-12]</sup>, 抗冻性<sup>[13]</sup>, 抗氯离子侵蚀性<sup>[14]</sup>, 明显改善弯曲荷载、化学腐蚀作用下混凝土的抗冻性<sup>[5]</sup>。掺入钢纤维是否能够影响荷载作用下混凝土的碳化性能, 如何影响有待研究。本文开展弯曲荷载作用下钢纤维混凝土的快速碳化试验, 研究钢纤维掺量对荷载作用下混凝土碳化深度的影响规律, 以及应力状态、应力水平对钢纤维混凝土碳化深度的影响规律。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

水泥: P·O 42.5R, 秦岭牌普通硅酸盐水泥, 基

收稿日期: 2014-05-10

修改稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51308445); 陕西省自然科学基金青年人才项目 (2013JQ7033); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (2013JK0972)

作者简介: 王艳 (1982-), 女, 博士, 讲师, 主要从事纤维混凝土耐久性方向的研究。E-mail: wangyanwjx@126.com

本性能见表1。钢纤维：剪切波浪型，生产厂家重庆宜筑公司，长径比为60(长30 mm，直径0.5 mm)，抗拉强度>380 MPa。砂：中砂(细度模数2.7)，西安灞河，含泥量约1.1%。碎石：粒径5~20 mm，陕西泾阳县，压碎指标6%，无针片状颗粒，含泥量0.3%。减水剂：高效减水剂，陕西瑞德建材科技有限责任公司。

1.2 配合比

表 1 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥  
Tab.1 P·O 42.5R Portland cement property

抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		烧失量/%	氧化镁/%	三氧化硫/%	凝结时间/min		细度/m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	安定性
3 d	28 d	3 d	28 d				初凝	终凝		
4.3	8.1	26.1	48.5	2.7	2.3	2.4	136	213	358	合格

表 2 钢纤维混凝土配合比与 28 d 强度  
Tab.2 Mixing proportion and mechanical property of steel fiber reinforced concrete

分组	水泥/kg·m <sup>-3</sup>	砂子/kg·m <sup>-3</sup>	碎石/kg·m <sup>-3</sup>	钢纤维体积 掺量 /%	钢纤维 /kg·m <sup>-3</sup>	坍落度/mm	28 d 强度/MPa		
							抗压强度	劈裂抗拉强度	抗折强度
PC	367	765	1146	0	0	110	37.9	6.1	5.0
SFRC-0.5	367	735	1102	0.5	39	112	38.3	8.1	5.3
SFRC-1.0	367	733	1100	1	78	87	39.5	9.2	6.5
SFRC-1.5	367	718	1066	1.5	117	47	40.7	11.2	7.2
SFRC-2.0	367	702	1053	2	156	15	35.2	7.2	9.8

1.3 加载装置

本次试验选取的是拉杆加载系统对构件施加弯曲荷载。加载装置如图 1 所示，利用应力扳手施加荷载。该加载装置考虑了荷载精度和试验过程的方便，优点是加载方式简单并能准确加载到需要的荷载，体积小、重量轻在试验过程中搬运方便。但是在搬运的过程中会造成应力松弛，因此在每次搬运后需用应力扳手矫正施加的荷载以保证达到设计值。

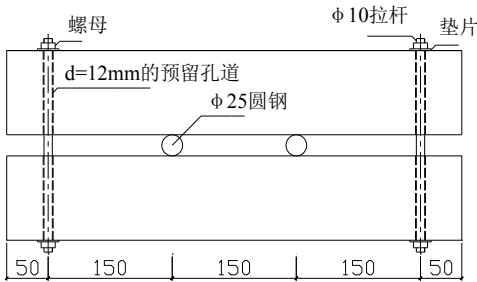


图 1 弯曲荷载加载装置图示  
Fig.1 Flexural loading device

1.4 试验方法

(1) 试件尺寸：100 mm×100 mm×550 mm 棱柱体，试件制作过程中在图 1 所示的拉杆位置采用预埋 PVC 管的方式预留加载孔。

(2) 已有的研究表明钢纤维混凝土有较好的抗裂性能，本次试验选取 0、0.3、0.5、0.8 倍 4 种弯曲应力水平。由于加载装置是两个一组，因此每

试验采用五种配合比，水胶比均为 0.45，其中“PC”表示普通混凝土，“SFRC”表示钢纤维混凝土，“-”后面的数字表示钢纤维体积掺量，例如“SFRC-0.5”表示体积掺量为 0.5%的钢纤维混凝土，五种混凝土的钢纤维体积掺量分别取 0、0.5%、1%、1.5%、2%，各种混凝土具体配合比与 28 d 强度见表 2。

种应力水平在每个碳化龄期考虑制作 4 个试件。碳化考虑 3 d、7 d、14 d、28 d、56 d 共 5 个龄期。

(3) 参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082-2009) 中第十一章进行碳化试验。碳化到龄期 (3d、7d、14d、28d、56d) 后取出试件，在纯弯段位置内将试件沿横向切开，分别测量拉区和压区混凝土的碳化深度，试件在不同弯曲应力水平下的碳化深度最终取 4 个试件的平均值。

2 弯曲荷载水平对钢纤维混凝土碳化深度影响规律

不同水平的弯曲拉应力与弯曲压应力对 SFRC-1.0 的碳化深度影响曲线如图 2、图 3 所示。从图中可以看出弯曲荷载对钢纤维混凝土的碳化深度产生了影响：弯曲拉应力对钢纤维混凝土碳化起到加速作用，一定水平以下的弯曲压应力对钢纤维混凝土碳化起到抑制作用。随着拉应力水平的增加，钢纤维混凝土的碳化深度增加，如图 2 中 SFRC-1.0 碳化 28d 时，相比无应力情况下，0.3 倍拉应力水平的条件下碳化深度增大了 37%，0.5 倍拉应力水平条件下碳化深度增大了 47%，0.8 倍拉应力水平条件下碳化深度增大了 97%。当荷载水平为 0.3 倍压应力水平时，相比无应力情况下碳化深度有明显减小，继续增大碳化深度变化不显著，如图 3 中 SFRC-1.0 碳化 28 d 时，当压应力水平为 0.3 时碳化深度比无应

力情况下减小了26%,当压应力水平增加至0.5时碳化深度基本未发生改变.

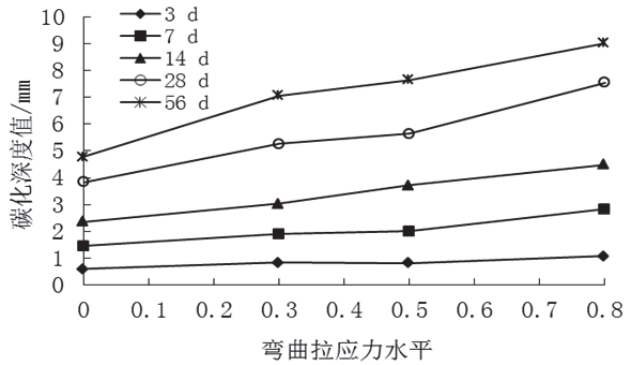


图2 弯曲拉应力对 SFRC-1.0 碳化深度影响曲线  
Fig.2 Influence curve of flexural tensile stress on SFRC-1.0 carbonation depth

假设承载混凝土的碳化过程仍然服从 Fick 第一定律,引入碳化弯曲应力影响系数  $K_{\sigma}$ ,可得到

$$K_{\sigma} = x_{\sigma} / x \tag{1}$$

式中:  $K_{\sigma}$  是应力水平为  $\sigma$  时钢纤维混凝土碳化应力影响系数;  $x_{\sigma}$  是应力水平为  $\sigma$  时钢纤维混凝土的碳化深度;  $x$  是无应力作用下钢纤维混凝土的碳化深度.

表 3 中例举了 SFRC-1.0 的碳化应力影响系数. 以 SFRC-1.0 的试验结果为例分析荷载水平对钢纤维混凝土碳化的影响规律. 从表 3 中可以看出在弯曲拉应力作用下, SFRC-1.0 的碳化应力影响系

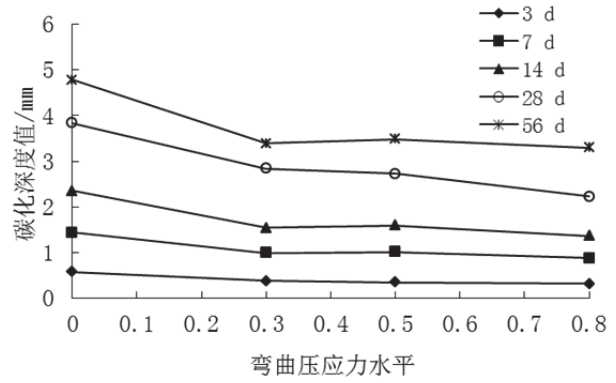


图3 弯曲压应力对 SFRC-1.0 碳化深度影响曲线  
Fig.3 Influence curve of flexural compressive stress on SFRC-1.0 carbonation depth

数均大于1,并且  $K_{\sigma}$  随着拉应力水平的增加而增大,表明弯曲拉应力对钢纤维混凝土碳化起到加速作用,且随着拉应力水平的增大,加速作用越显著;而在弯曲压应力作用下, SFRC-1.0 的碳化应力影响系数均小于 1,表明弯曲压应力对钢纤维混凝土碳化起到抑制作用. 混凝土内部的微裂缝在拉应力作用下会逐渐增多与扩展,这些逐渐增多与扩展的微裂缝为  $\text{CO}_2$  在混凝土中的扩散提供了更多的通道,碳化速度变快,碳化深度也随之增大. 而混凝土在一定范围的弯曲压应力作用下,内部的微裂缝会闭合,阻碍了  $\text{CO}_2$  在混凝土中的扩散,碳化深度变小.

表 3 SFRC-1.0 碳化应力影响系数  
Tab. 3 SFRC-1.0 Flexural loading influence coefficient on carbonation

混凝土	碳化时间	无应力	弯曲拉应力水平			弯曲压应力水平		
			0.3	0.5	0.8	0.3	0.5	0.8
SFRC-1.0	3 d	1.00	1.43	1.40	1.83	0.65	0.60	0.55
	7 d	1.00	1.32	1.38	1.96	0.69	0.71	0.61
	14 d	1.00	1.29	1.58	1.91	0.66	0.68	0.59
	28 d	1.00	1.37	1.47	1.97	0.74	0.71	0.58
	56 d	1.00	1.48	1.60	1.89	0.71	0.70	0.69

对表 3 中 SFRC-1.0 的碳化弯曲应力影响系数与应力水平进行回归分析,可得到如下关系式:

弯曲受拉状态

$$K_{\sigma} = 0.16\sigma_t^2 + 0.9764\sigma_t + 1.0141 \tag{2}$$

( $R^2=0.974, 0 \leq \sigma_t \leq 1$ )

弯曲受压状态

$$K_{\sigma} = 0.76\sigma_c^2 - 1.075\sigma_c + 0.9888 \tag{3}$$

( $R^2=0.949, 0 \leq \sigma_c \leq 1$ )

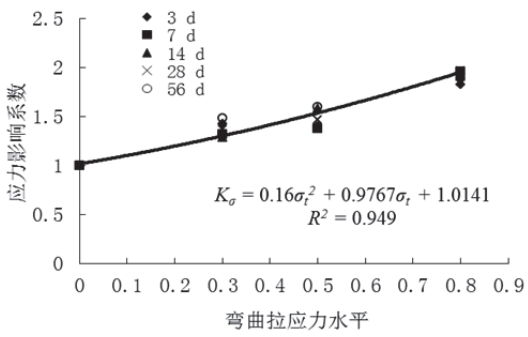


图4 SFRC-1.0 碳化应力影响系数与弯曲拉应力水平关系曲线  
Fig.4 Relationship curve of flexural loading influence coefficient and flexural tensile stress (SFRC-1.0)

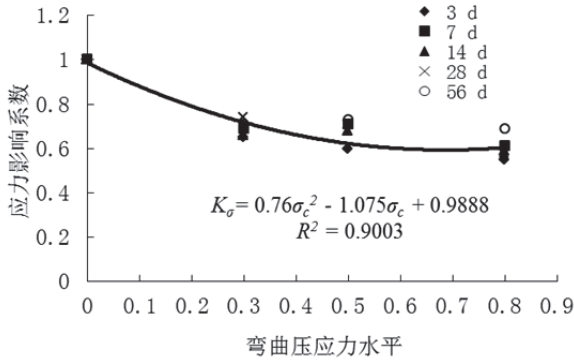


图 5 SFRC-1.0 碳化应力影响系数与弯曲压应力水平关系曲线  
Fig.5 Relationship curve of flexural loading influence coefficient and flexural compressive stress (SFRC-1.0)

### 3 钢纤维掺量对弯曲荷载作用下混凝土碳化深度影响规律

试验用 5 种混凝土在不同应力水平下碳化 28 天的碳化深度如图 6、图 7 所示. 从图 6 与图 7 中可以看出不管是在弯曲拉应力作用下还是在弯曲压应力作用下, 掺入适量钢纤维能降低基体混凝土的碳化速度. 当钢纤维掺量为 0~1.5% 时, 随钢纤维掺量的增加基体混凝土碳化深度逐渐减小, 本次试验中当纤维掺量为 1.5% 时, 弯曲荷载作用下混凝土的碳化深度最小; 但钢纤维掺量继续增大到 2.0% 时, 基体混凝土碳化深度显著增大.

为分析钢纤维掺量对弯曲荷载作用下混凝土碳化深度的影响程度, 根据式 (1) 计算 5 种混凝土快速碳化 28 d 的弯曲应力影响系数, 结果见表 4.

表 4 钢纤维混凝土碳化应力影响系数 (快速碳化 28 d)  
Tab. 4 Flexural loading influence coefficient on steel fiber concrete carbonization (carbonation for 28 d)

应力水平	弯曲拉应力					弯曲压应力				
	PC	SFRC-0.5	SFRC-1.0	SFRC-1.5	SFRC-2.0	PC	SFRC-0.5	SFRC-1.0	SFRC-1.5	SFRC-2.0
0.3	1.83	1.43	1.37	1.29	1.78	0.9	0.78	0.74	0.67	0.85
0.5	2.36	1.68	1.47	1.36	1.92	0.83	0.73	0.71	0.62	0.67
0.8	2.71	2.15	1.97	1.90	2.65	0.58	0.51	0.58	0.56	0.53

如表 4 所示, 钢纤维混凝土碳化应力影响系数在弯曲拉应力作用下均大于 1, 在弯曲压应力水平下均小于 1, 这说明弯曲拉应力对于不同掺量钢纤维混凝土的碳化都起到加速作用, 而弯曲压应力对于不同掺量钢纤维混凝土的碳化都起到抑制作用. 但是纤维掺量不同, 加速和抑制的程度不同. 在各种应力水平下混凝土碳化应力影响系数的大小顺序为: SFRC-1.5 < SFRC-1.0 < SFRC-0.5 < SFRC-2.0 < PC, 说明钢纤维能够降低弯曲荷载对基体混凝土碳化深度的影响, 在本次试验所选用的几种掺量中, 当钢纤维掺量为 1.5% 时, 这种降低效果最明显, 荷载对混凝土碳化影响最小. 分析原因是

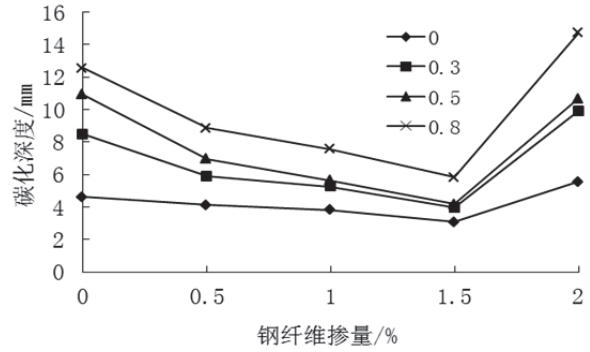


图 6 不同弯曲拉应力水平下钢纤维掺量对混凝土碳化深度影响曲线 (碳化 28 d)  
Fig.6 Influence curve of steel fiber content on carbonation depth under different flexural tensile stress levels (carbonation for 28 d)

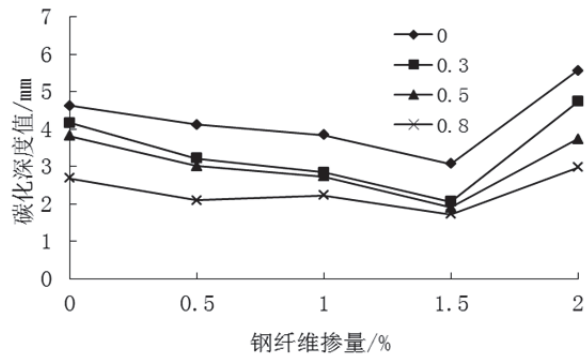


图 7 不同弯曲压应力水平下钢纤维掺量对混凝土碳化深度关系曲线 (碳化 28 d)  
Fig.7 Influence curve of steel fiber content on carbonation depth under different flexural compressive stress levels (carbonation for 28 d)

因为加入适量的钢纤维, 由于钢纤维的阻裂作用, 一方面减少了基体混凝土在凝结硬化过程中由于收缩等原因造成的微裂缝, 使混凝土的微观结构得到改善, 向更加密实的方向发展, 减少了 CO<sub>2</sub> 在混凝土中的扩散通道; 尤为重要的是当荷载作用于混凝土, 其内部的钢纤维能分担应力, 阻止混凝土的开裂, 降低碳化速度. 但当钢纤维掺量增大到一定值后, 由于较多纤维的掺入, 混凝土在拌制过程中流动性变差、振捣困难, 而且会出现结团现象, 基体混凝土密实性显著降低; 并且较多钢纤维掺入, 混凝土内部会形成更多的薄弱黏结界面, 在荷载的作用下更容易产生裂缝, 碳化速度反而增大,

SFRC-2.0 的碳化应力影响系数大于 SFRC-1.5 的碳化应力影响系数。

## 4 结论

(1) 弯曲荷载对钢纤维混凝土的碳化深度产生了影响,但是弯曲拉应力与弯曲压应力对碳化深度的影响不同。钢纤维混凝土的碳化深度在弯曲拉应力作用下增大,并且随着拉应力水平的提高持续增大。本次试验所选用的弯曲压应力水平对于钢纤维混凝土的碳化均起到了抑制作用。

(2) 适量的钢纤维能够降低弯曲荷载对基体混凝土碳化深度的影响,但当纤维掺量较大时,混凝土在拌制过程中流动性变差、而且会结团,混凝土内部出现更多的薄弱界面,使得这种降低效果不再明显。在本次试验所选用的几种掺量中,在各种应力状态下SFRC-1.5的碳化深度均为最小,并且受荷载水平的影响也最小。

## 参考文献 References

- [1] SUN W, ZHANG Y M, YAN H D, et al. Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(9): 1519-1523.
- [2] ZHOU Y, COHEN M D, DOLCH W L. Effect of external loads on the frost-resistant properties of mortar with and without silica fume [J]. *ACI Mater J*, 1994, 91(6): 595-601.
- [3] SUN Wei, MU Ru, et al. Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32 (12): 1859-1864.
- [4] 余红发, 慕儒, 孙伟, 等. 弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用及复合对混凝土抗冻性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(4): 492-495.  
YU Hongfa, MU Ru, SUN Wei, et al. Effects of flexural loads, chemical attack, carbonation and their combination on Freezing-Thawing durability of concretes [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(4): 492-495.
- [5] 余红发, 孙伟, 李美丹. 荷载对混凝土在腐蚀—冻融作用下强度的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(2): 297-301.  
YU Hongfa, SUN Wei, LI Meidan. Effect of flexural stress on strength development of concrete subjected to combined actions of Freezing-Thawing and chemical attack [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(2): 297-301.
- [6] 孙伟, 余红发, 王晴, 等. 弯曲荷载对混凝土抗卤水冻蚀性的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2005, 27(7): 46-49.  
SUN Wei, YU Hongfa, WANG Qing, et al. Effect of flexural stress on bittern Freezing-Thawing durability of concrete exposed to salt lakes [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005, 27(7): 46-49.
- [7] 燕坤, 余红发, 麻海燕, 等. 硫酸镁腐蚀与弯曲荷载对碳化混凝土抗冻性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(7): 877-883.  
YAN Kun, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Effect of magnesium sulfate attack and flexural stress on Freezing-Thawing durability of carbonized concretes [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(7): 877-883.
- [8] 何世钦, 贡金鑫. 弯曲荷载作用对混凝土中氯离子扩散的影响[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(2): 134-138.  
HE Shiqin, GONG Jinxin. Influence of flexural loading on permeability of chloride ion in concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(2): 134-138.
- [9] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 荷载作用下混凝土的碳化深度[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(2): 179-183.  
JIN Zuquan, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Study on carbonation of concrete under loading [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(2): 179-183.
- [10] 张云升, 孙伟, 陈树东, 等. 弯拉应力作用下粉煤灰混凝土的 1D 和 2D 碳化[J]. *东南大学学报*, 2007, 37(1): 118-122.  
ZHANG Yunsheng, SUN Wei, CHEN Shudong, et al. 1D and 2D carbonation of fly ash concrete under flexural stress [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2007, 37(1): 118-122.
- [11] 郭艳华, 潘慧敏, 李志业. 钢纤维混凝土碳化性能的研究[J]. *混凝土*, 2007(2): 45-47.  
GUO Yanhua, PAN Huimin, LI Zhiye, Study on carbonation of steel-fiber reinforced concrete[J]. *Concrete*, 2007(2): 45-47.
- [12] 朱海堂, 高丹盈, 张启明, 等. 碳化环境下钢纤维混凝土基本性能试验研究[J]. *郑州大学学报*, 2005, 26(3): 5-8.  
ZHU Haitang, GAO Danying, ZHANG Qiming, et al. Test research on basic properties of steel fiber reinforced concrete under carbonization[J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2005, 26(3): 5-8.
- [13] 高丹盈, 朱海堂, 赵军, 等. 冻融后钢纤维混凝土力学性能的试验研究[J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2005, 26(1): 1-4.  
GAO Danying, ZHU Haitang, ZHAO Jun, et al. The experimental study on the basic mechanical property of steel fiber reinforced concrete after freeze-thaw [J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2005, 26(1): 1-4.
- [14] MANGAT P.S, GURUSAMY K. Long Term Properties under Marine Exposure of Steel Fibre Reinforced Concrete Containing PFA [J]. *Materials and Structures*, 1998, 21(5): 352-358.

(本文编辑 吴海西)