

# 改性聚酯纤维在混凝土中的分散性及对耐久性的影响

陈建强<sup>1,2)✉</sup>, 纪洪广<sup>1)</sup>, 刘娟红<sup>1)</sup>, 杨芳<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266033

✉ 通信作者, E-mail: hunter7750@sina.com

**摘要** 制备了不同纤维掺量的改性聚酯纤维混凝土。通过纤维分散的图像处理方法研究五种不同搅拌方式对改性聚酯纤维在混凝土中分散性能的影响, 并通过耐久性试验研究改性聚酯纤维混凝土的抗碳化、抗氯盐侵蚀和抗冻性能。结果表明, 图像处理方法能够较好地评价改性聚酯纤维混凝土中的纤维分散性, 认为“砂石胶材 60 s + 水 60 s + 纤维 60 s”的搅拌方式得到的纤维分散性最好, 与肉眼观察的效果一致。掺加改性聚酯纤维能够提高混凝土的抗压强度, 掺量为  $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时提高强度 14% 左右, 继续增大纤维掺量不能持续提升强度。改性聚酯纤维在混凝土中的密集分布能够削弱  $\text{CO}_2$  的扩散, 降低混凝土的碳化速率 12.6% ~ 18.9%, 纤维掺量越多, 抗碳化能力越好。掺加改性聚酯纤维能够降低混凝土的氯离子扩散系数, 提高其抗氯离子侵蚀能力。改性聚酯纤维还能有效减少冻融循环过程中表层材料的剥落, 大大改善混凝土的抗冻性。

**关键词** 纤维混凝土; 聚酯纤维; 分散性; 耐久性

**分类号** TU528

## Dispersivity of modified polyester fibers in concrete and its influence on the durability of concrete

CHEN Jian-qiang<sup>1,2)✉</sup>, JI Hong-guang<sup>1)</sup>, LIU Juan-hong<sup>1)</sup>, YANG Fang<sup>1)</sup>

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

✉ Corresponding author, E-mail: hunter7750@sina.com

**ABSTRACT** Modified polyester fiber reinforced concrete with different additions was prepared. The dispersivity of modified polyester fibers in concrete by five different mixing methods was studied by an image processing method. With a series of durability tests, the carbonation resistance, chloride penetration resistance and frost resistance of the fiber reinforced concrete were also investigated. The results indicate that the image processing method can evaluate the dispersivity of the fiber reinforced concrete well. The mixing method of “aggregate and binding materials for 60 s + water for 60 s + fiber for 60 s” makes the best dispersivity of modified polyester fibers. It is in accord with direct observations by naked eyes. The compressive strength is increased by the addition of modified polyester fibers. After adding  $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  modified polyester fibers, the compressive strength of concrete increases by 14%; but with more modified polyester fibers, the compressive strength no longer increases. The existence of modified polyester fibers in concrete can slow down the diffusion of  $\text{CO}_2$ , the carbonation rate of concrete decreases by 12.6% to 18.9%, and with more modified polyester fibers, the carbonation resistance became better. After the addition of modified polyester fibers, the chloride diffusion coefficient of concrete also decreases. The modified polyester fibers can reduce the surface spalling of concrete during freeze-thaw cycles, which improves the frost resistance of concrete significantly.

**KEY WORDS** fiber reinforced concrete; polyester fibers; dispersivity; durability

自波特兰水泥发明以来, 混凝土在工程建设领域发挥着其他材料无法替代的作用, 成为现代工程中应用最广泛的材料。但是, 混凝土材料自身也存在一些缺陷, 如易开裂、抗拉和抗冲击韧性差<sup>[1]</sup>。纤维混凝土就是以传统素混凝土为基体的新型复合材料。纤维混凝土是在普通混凝土基体中掺入均匀分散的纤维, 通过纤维的物理力学作用改善混凝土基体的内部结构, 并不改变混凝土中各材料自身的原有化学性能, 从而抑制混凝土的早期开裂, 提升混凝土的综合性能。在受力过程中混凝土发挥其抗压强度高的优势, 而短纤维发挥其抗拉强度高的优势, 从而提高纤维混凝土的各项技术性能, 使其抗弯、抗疲劳、抗拉、抗冲击等性能得以提高, 同时增加耐磨性和韧性。目前, 关于聚丙烯纤维、钢纤维、聚乙烯醇纤维、改性纤维等在水泥混凝土中的研究和应用已较多<sup>[2~8]</sup>, 成为特殊工况下对普通混凝土材料的有力补充。

改性聚酯纤维是国家“863”科技项目研发的一种纤维, 解决了聚酯纤维由于耐碱性差而只能用于沥青混凝土和无碱混凝土的难题<sup>[9~10]</sup>。改性聚酯纤维具有高性能、低成本的特点和优势, 满足了国家重点工程和国防建设的需要。在工程建设中有着广阔的发展前景。然而, 改性聚酯纤维作为一种新的组分加入到混凝土中, 纤维分散会影响混凝土的匀质性, 当前研究主要针

对硬化后纤维混凝土的纤维分散, 尚无成熟的方法来评定新拌混凝土中的纤维分散性能; 同时, 目前大多数研究主要集中在改性聚酯纤维对混凝土力学性能、早期抗裂性能等方面的研究, 关于其抗碳化性、抗冻性等耐久性能方面的研究尚不多见<sup>[11~15]</sup>。

因此, 本文针对上述问题, 制备了不同纤维掺量的改性聚酯纤维混凝土试件, 建立并通过一种图像处理方法, 编制相应的分析程序对不同方式搅拌后的混凝土中纤维分散特性做定性和定量的分析研究, 并通过耐久性试验研究得到多种搅拌方式的改性聚酯纤维对混凝土强度、抗氯盐侵蚀、抗碳化和抗冻融等耐久性方面的影响程度和改善效果。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

原材料主要有: II 级粉煤灰; 北京金隅产 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥; 45 μm 筛余量为 16%, 烧失量为 2.53%; 首钢嘉华公司生产 S 95 型磨细矿粉; 水泥和两种矿物掺和料的化学成分如表 1 所示; 两种级配的碎石 5~16 mm 和 16~31.5 mm, 比例为 1:1; 蔚系减水剂; 细度模数为 2.4 的河砂; 自来水; 杜强华微(北京)新材料科技有限公司的改性聚酯纤维, 其主要技术指标如表 2 所示。

表 1 水泥、矿粉和粉煤灰的化学成分及其含量(质量分数)

Table 1 Chemical composition of cement and mineral admixtures used in this project

%

原料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl <sup>-</sup>
水泥	53.03	19.80	7.18	3.63	3.28	9.22	0.96	0.48	1.48	0.44	0.10	0.03
S95 矿粉	37.32	26.12	14.86	0.53	2.26	8.27	0.46	0.58	8.69	0.73	0.10	0.08
粉煤灰	1.54	37.61	23.28	2.81	0.82	37.60	0.28	0.07	0.57	0.67	0.27	0.02

表 2 改性聚酯纤维的主要技术指标

Table 2 Main properties of modified polyester fibers used in this project

外观	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	纤度 D	长度/mm	熔点/℃	燃点/℃	抗拉强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/MPa	耐酸碱
束状单丝无卷曲	0.9~1.31	9~13	20	167~260	≥550	300~500	30	7000~12000	断裂保持率≥95%

### 1.2 试件制备

试验制备了 C30 基准混凝土(R), 详细配合比如表 3 所示。在基准混凝土的基础上, 在混凝土搅拌过

程中掺加 1.1 kg·m<sup>-3</sup> 和 1.3 kg·m<sup>-3</sup> 的改性聚酯纤维, 制备了两种不同纤维掺量的改性聚酯纤维增强混凝土, 分别编号 F1.1 和 F1.3。

表 3 基准混凝土配合比

Table 3 Mix proportion of the reference concrete

编号	等级强度	混凝土原材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							
		水泥	粉煤灰	矿粉	砂	石子 1 (16~31.5 mm)	石子 2 (5~16 mm)	水	减水剂
R	C30	210	84	126	680	470	470	176	6.72

纤维水泥复合材料已经成为一种重要的工程材料, 纤维可以抑制或减少砂浆和混凝土的早期塑性开裂, 改善水泥基材的韧性, 提高耐久性。要使纤维的效果得到充分发挥, 必须以纤维的良好分散为前提, 因此提高纤维的分散性成为一项重要工作, 选择合适的加料顺序和搅拌工艺十分重要。为了研究不同搅拌方式对混凝土中改性聚酯纤维的分散性能的影响, 试验采用文献中常用的五种不同的搅拌方式和投料顺序<sup>[16-19]</sup>, 具体搅拌方式如下:

- (1) 先将改性聚酯纤维和粗、细骨料投入搅拌机干拌 60 s, 然后再加水泥、矿物掺和料、水和减水剂搅拌 120 s;
- (2) 将改性聚酯纤维、砂和石搅拌均匀 60 s 后, 将胶凝材料和减水剂一起搅拌均匀 60 s, 最后加水搅拌 60 s 成形;
- (3) 先将砂石和胶凝材料搅拌均匀 60 s 后, 再加水一起搅拌均匀 60 s, 最后加入改性聚酯纤维搅拌 60 s 成形;
- (4) 将改性聚酯纤维与砂搅拌 60 s 后, 加入约 1/3 水搅拌 30 s, 再加入胶凝材料和减水剂搅拌 30 s, 然后加入石子搅拌均匀, 最后加入剩余的水搅拌 60 s;
- (5) 先把纤维、减水剂和水混合浸泡 2 h 后, 与胶凝材料、粗细集料混合搅拌 180 s。

成型试件包括边长为 100 mm 的立方体, 尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体, 及直径 100 mm 高度 50 mm 的圆柱体。试件成型 24 h 后拆模, 随后将所有试件放入温度为 (20 ± 3) °C、湿度为 95% 以上的标准养护室中养护至 28 d 龄期。

### 1.3 纤维分散的图像处理法

纤维在混凝土中均匀分散使混凝土的性能表现出

各向同性, 才能达到纤维掺入混凝土的预期效果, 因此纤维的分散度研究对混凝土性能的改善尤为重要。本文采用纤维分散的图像处理方法对新拌混凝土的纤维分散度进行测定和分析, 流程如图 1 所示。

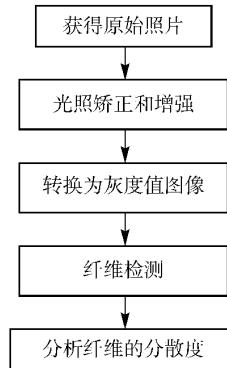


图 1 纤维分散度测定与分析流程

Fig. 1 Measurement and analysis process of fiber dispersion degree

具体步骤如下:

- (1) 应用自行组装的 INNO 系列数字相机的光学显微镜对新拌混凝土连续拍照, 获得原始照片。
- (2) 基于二次函数的 RGB 三通道值缩放的图像增强算法对原始图像进行光照矫正和增强, 获得亮度分布较为均匀的图像并将其转换为灰度值图像; 初始图像的识别及其光照矫正和增强后的图像对比如图 2 所示。
- (3) 利用改进的渗流生长算法对处理后的图像进行纤维检测, 获取纤维占图像总面积的比例, 通过集中和离散趋势来分析纤维的分散度。

### 1.4 改性聚酯纤维混凝土的耐久性试验

本文对改性聚酯纤维混凝土的耐久性也进行试验

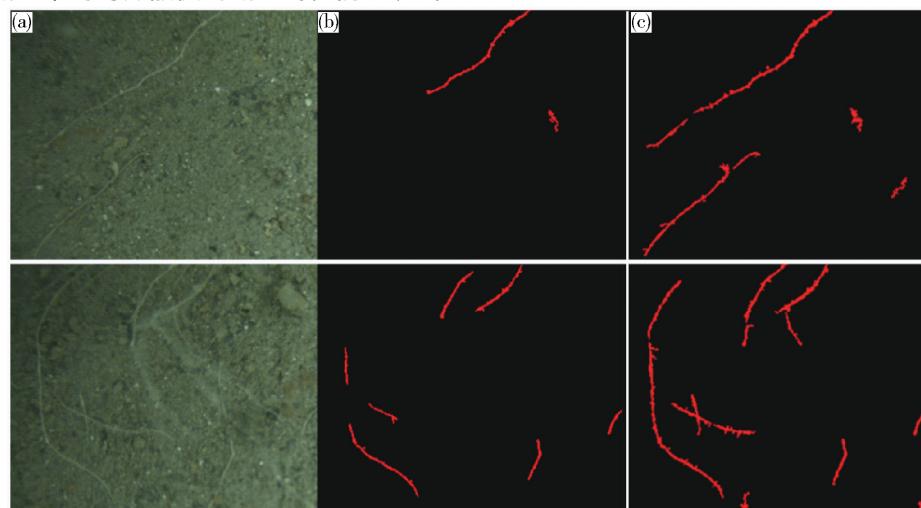


图 2 纤维混凝土图像中纤维识别的初始与识别后处理图像对比。(a) 原始图像; (b) 未处理的识别结果; (c) 光照矫正和增强处理后的识别结果

Fig. 2 Contrast of initial images and treated images to recognize fibers in the fiber reinforced concrete: (a) original image; (b) untreated recognition results; (c) recognition results after illumination correction and enhancement processing

研究,包括加速碳化、氯离子渗透和快速冻融循环试验。试验方法分别简述如下。

(1) 加速碳化试验。依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中加速碳化试验的规定<sup>[16]</sup>,试件养护至规定龄期后,开始碳化试验。加速碳化箱内中 CO<sub>2</sub> 体积分数为 20%,控制温度为(20±2)℃,相对湿度为 70%。待试件碳化至 7、14 和 28 d 时,取出相应试件,按照标准规定的方法测定混凝土的碳化深度。首先用压力试验机将试件劈开,每次劈开厚度应为试件宽度的一半,将试件剩余部分的切段面封好后继续放入碳化箱至下一试验期。然后,对劈除部分的表面进行清理,去除残存的粉末,并立即喷上 1% 酚酞乙醇浓液,约 30 s 后,按每 10 mm 一个测量点测出断面各点的碳化深度。当测点处的碳化分界线上刚好嵌有粗骨料颗粒时,可取该颗粒两侧处碳化深度的平均值作为该点的碳化深度,最后取所有测点的平均值作为该试件的碳化深度。

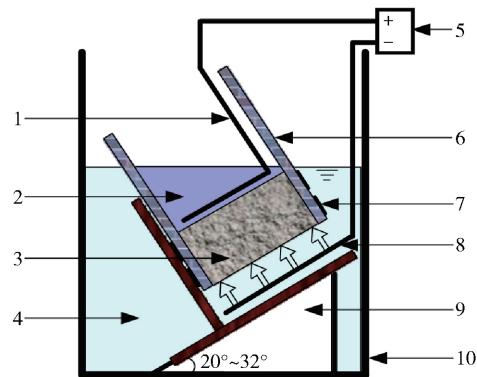
(2) 氯离子渗透试验。依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中混凝土氯离子扩散系数快速测法(rapid chloride migration, RCM)对混凝土的氯离子渗透性能进行试验测定和评价。首先将圆柱体试件表面刷洗洁净,将试件在饱和面干状态下置于真空容器中进行真空饱水处理,然后将试件安装至 RCM 试验装置中,如图 3 所示,确保试件的圆柱曲面密封性良好。试件安装完成后,在橡胶套中注入约 300 mL 浓度为 0.3 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液;在阴极试验槽内注入 12 L 质量分数为 10% 的 NaCl 溶液,并使其液面与 NaOH 溶液的液面齐平。最后,将电源的阳极用导线连至橡胶筒中的阳极板,将阴极连至试验槽中的阴极板。试验结束后,测定氯离子的渗透深度,然后计算得到混凝土的非稳态氯离子扩散系数。

(3) 冻融循环试验。依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,试件成型后放入标准养护室养护,到达试验龄期前 4 d 将试件取出放入(20±3)℃的水中浸泡。试验前将试件从水中取出,擦去表面水后测量自振频率,并称取质量,作为评定抗冻性的起始值。试验采用快速冻融法,每次冻融循环约为 2.5 h,试件中心的温度要严格控制在(-17±2)℃和(8±2)℃之间。在每 50 次冻融循环后,测定试件的质量变化和相对动弹性模量的变化,进而评价其抗冻性能。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 搅拌方式对纤维分散度的影响

根据图像处理得出的直接数据,对纤维比例(纤维面积与整张图片面积的比值)按间距为 0.01 进行统



1—阳极板;2—阳极溶液;3—试件;4—阴极溶液;5—直流稳压电源;6—有机硅橡胶套;7—环箍;8—阴极板;9—支架;10—阴极试验槽

图 3 RCM 氯离子扩散系数试验测试装置示意图

Fig. 3 RCM test equipment to measure the chloride diffusion coefficient

计,以纤维频数与相同间距为依据作图,得到五种不同搅拌方式下纤维的分散情况,结果如图 4 所示。图中纤维比例分组的序号 1~10 各组代表的纤维比例依次为 0~0.01、0.01~0.02、0.02~0.03、0.03~0.04、0.05~0.06、0.06~0.07、0.07~0.08、0.08~0.09、0.09~0.1 及 0.1 以上。

由结果可以发现:第一种搅拌方式纤维分布主要集中在 0.01~0.02 和 0.02~0.03 之间,这两个间距之间的纤维比例占纤维总数的 30% 和 32%。0.01 以下占 12%,而 0.04 以上则整体比例更小;第二种搅拌方式的纤维分散比例主要集中在 0.02~0.03 之间,占纤维总量的 31%。0.01~0.02 和 0.03~0.04 则分别占 17% 和 22%,而两端的纤维分散比较少;第三种搅拌方式的纤维分散主要集中在 0.02~0.03 和 0.03~0.04 之间,占总量的 26% 和 25%,其次为 0.01~0.02 和 0.04~0.05 之间,0.01 以下和 0.06 以上的纤维分散较少。此种搅拌方式下纤维分散更为均匀,检测到的纤维更多;第四种搅拌方式的纤维分散主要集中在 0.02~0.03 和 0.03~0.04 之间,占纤维总量的 29% 和 25%。0.01 以下的纤维所占比例较大,而 0.05 以上纤维比例较少。此种搅拌方式纤维分散比较离散,各组均未占很大的比例;第五种搅拌方式的纤维分散与第三种搅拌方式类似,主要集中在 0.02~0.03 和 0.03~0.04 之间,占纤维总量的 25% 和 20.7%,纤维分布集中在 0.01~0.06 之间,0.01 以下和 0.06 以上的基本可以忽略。此种搅拌方式纤维分散比较好,两端的极值情况都很少。

搅拌方式对纤维分散有一定的影响,纤维分散基本符合统计分布中正态分布的类型。除第一种搅拌方式得到的均值偏小外,其余基本一致,五种搅拌方式下低含量的纤维分布差别小,高含量的分布差别较大,第

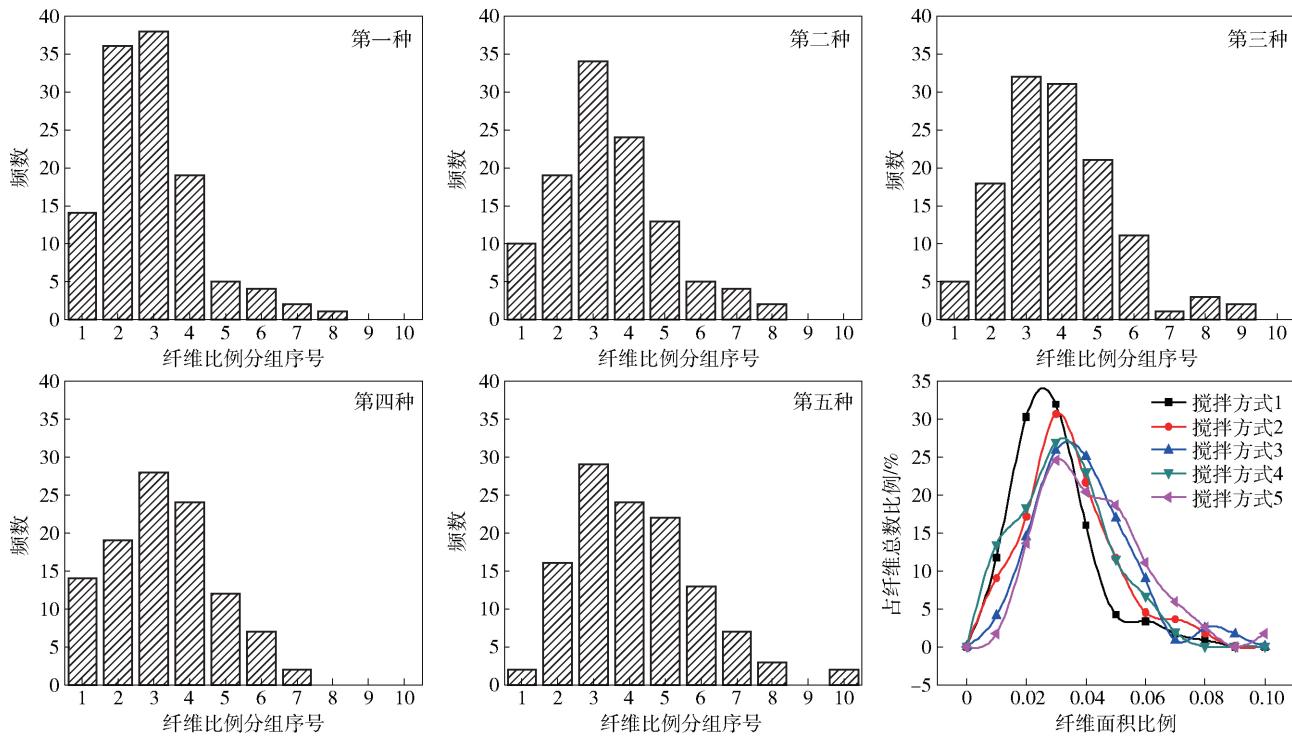


图4 五种不同搅拌方式下改性聚酯纤维的分散情况

Fig. 4 Dispersivity of modified polyester fibers by five different mixing processes

二种和第三种搅拌方式对纤维的分散相对较好。结合实际制备过程中肉眼直接观察的实际效果,认为第三种搅拌方式即“砂石胶材 60 s + 水 60 s + 纤维 60 s”得到的纤维分散性最好。

## 2.2 改性聚酯纤维对混凝土强度的性能研究

通过测定基准混凝土、不同样本的改性聚酯纤维混凝土不同龄期的抗压强度,得出结果见表4。由结果可以发现,与基准混凝土的抗压强度相比,改性聚酯纤维混凝土的强度有所提高,纤维掺量  $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  对强度的提升效果无明显差别,28 d 时强度的提高幅度均为 14% 左右,纤维掺量高于  $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  后对强度的贡献不再增加。

表4 基准混凝土与改性聚酯纤维混凝土的抗压强度

Table 4 Compressive strength of the reference concrete and the modified polyester fiber reinforced concrete

混凝土	抗压强度/MPa			
	3 d	7 d	14 d	28 d
R	10.7	23.0	27.1	33.7
F1.1	11.3	26.9	29.8	38.3
F1.3	12.0	26.6	30.7	38.7

## 2.3 改性聚酯纤维混凝土的碳化性能

基准混凝土和不同样本的改性聚酯纤维混凝土经过不同时间的碳化试验后,测定各混凝土内部的碳化深度,结果如图5所示。由碳化结果可以明显看出:碳

化时间较短时(7 d),掺加改性聚酯纤维的混凝土与基准混凝土的碳化深度相差不大;但随着碳化时间的增长,改性聚酯纤维混凝土的碳化深度有所降低,且纤维掺量越大,下降幅度越大,碳化 14 d 时纤维掺量  $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的混凝土碳化深度分别降低 13.0% 和 18.2%,碳化 28 d 时两种掺量下混凝土的碳化深度也分别降低 11.3% 和 17.5%。这说明改性聚酯纤维混凝土具有一定的抗碳化能力,可以认为是新加入的纤维在水泥砂浆中广泛分布相互交叉形成网络结构,骨料下沉得到抑制,混凝土拌和物离析受阻,混凝土中孔隙通道得以减少,混凝土的泌水也得以降低。同时,在浆体中广泛分布的纤维使混凝土拌和物的毛

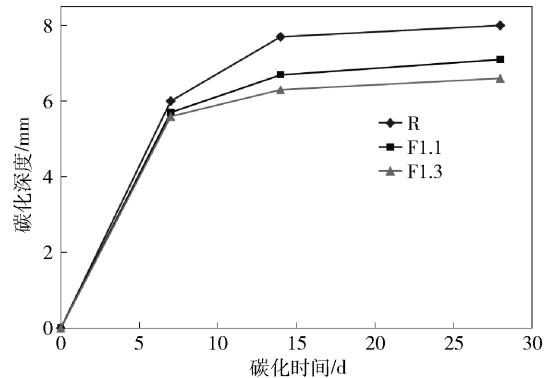


图5 基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土经过不同碳化时间后的碳化深度

Fig. 5 Carbonation depth of the reference concrete and the modified polyester fiber reinforced concrete after different carbonation times

细孔变小、毛细管细化甚至堵塞。因此,由于改性聚酯纤维在混凝土的广泛分布削弱或抑制了  $\text{CO}_2$  的扩散途径,使得在混凝土的抗碳化能力方面,改性聚酯纤维混凝土普遍高于基准混凝土。

根据混凝土材料的传统碳化理论,对混凝土的碳化时间的平方根和碳化深度进行线性拟合,得到混凝土的碳化速率系数,结果如表 5 所示。由结果可以发现,掺加纤维后混凝土抗碳化能力提高,能够延缓混凝土的碳化速率 12.6% ~ 18.9%。

表 5 基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土的碳化速率系数

Table 5 Carbonation rate coefficient of reference concrete and fiber reinforced concrete

混凝土	碳化速率系数/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-0.5}$ )	降幅
R	1.59	—
F1.1	1.39	12.6%
F1.3	1.29	18.9%

## 2.4 改性聚酯纤维混凝土的抗氯盐侵蚀能力

采用混凝土氯离子扩散系数快速测定方法对基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土的氯离子渗透性能进行研究,试验结果如表 6 所示。两种掺加改性聚酯纤维的混凝土的氯离子扩散系数均降低 10% 左右,说明在混凝土中添加改性聚酯纤维有利于降低氯离子扩散系数,提高混凝土的抗渗透能力。原因是纤维的无规则网状分布,把混凝土分割成无数小块,混凝土的抗渗能力得以增强。随着纤维掺量逐步增加,抗氯盐侵蚀能力不再变化,说明达到一定程度后增大纤维掺量对抗氯盐侵蚀意义不大。

表 6 基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土的氯离子扩散系数(RCM 方法)

Table 6 Chloride diffusion coefficient measured by RCM method for the reference concrete and the fiber reinforced concrete

编号	氯离子扩散系数/( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	降幅
R	3.08	—
F1.1	2.79	9.4%
F1.3	2.76	10.4%

## 2.5 改性聚酯纤维混凝土的抗冻性

对基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土进行冻融循环试验,混凝土在冻融循环过程中的质量损失和相对动弹性模量变化分别如图 6 和图 7 所示。改性聚酯纤维混凝土的质量损失率低于普通混凝土,分析原因是改性聚酯纤维和水泥基材料界面间存在着较强的黏结力和机械啮合力,从而能够有效阻止在冻融过程中混凝土表层材料的剥落。同时,在冻融循环过程中,改性聚酯纤维混凝土的相对动弹性模量损失也比普通混凝土小得多。在混凝土中,改性聚酯纤维缓解部分因温

度变化引起的内部温度应力,进而阻止温度裂缝的发展,从而改善混凝土的抗冻性能。

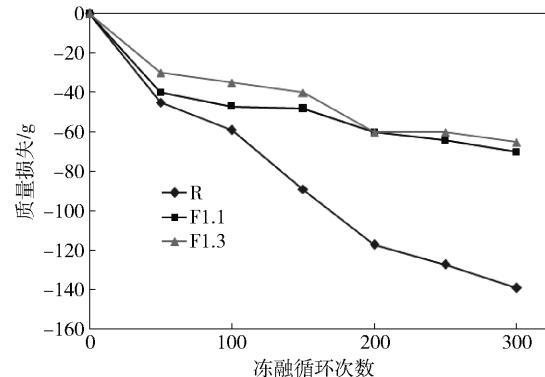


图 6 基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土在不同冻融循环次数时的质量损失

Fig. 6 Weight loss of the reference concrete and the fiber reinforced concrete after different freeze-thaw cycles

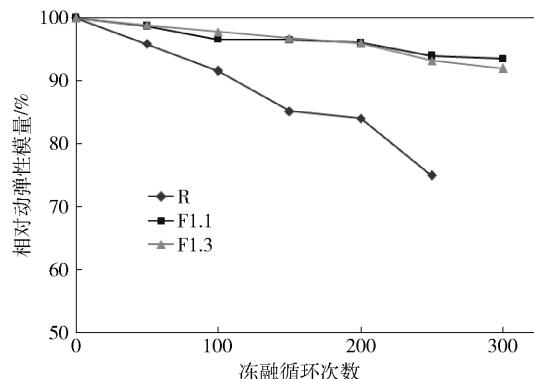


图 7 基准混凝土和改性聚酯纤维混凝土在不同冻融循环次数时的相对动弹性模量变化

Fig. 7 Changes in relative dynamic elastic moduli of the reference concrete and the fiber reinforced concrete after different freeze-thaw cycles

## 3 结论

(1) 建立并采用图像分析方法,研究五种搅拌方式对改性聚酯纤维混凝土内部纤维分散度的影响。不同搅拌工艺时,纤维分散的集中度在较大范围内基本相同,细分时有一定差距,综合分析后认为“砂石胶材 60 s + 水 60 s + 纤维 60 s”的搅拌方式得到的纤维分散性最好,与肉眼直接观察的效果一致。

(2) 掺加改性聚酯纤维后混凝土抗压强度提高,1.1  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  掺量时 28 d 强度提高约 14%,继续增加掺量时掺量大小对强度提高效果不敏感。

(3) 改性聚酯纤维混凝土中纤维的存在与分布能够削弱  $\text{CO}_2$  的扩散途径,减缓  $\text{CO}_2$  的渗透,从而提高混凝土的抗碳化能力,碳化速度减小 12.6% ~ 18.9%;纤维掺量越多,抗碳化能力越好。

(4) 掺加改性聚酯纤维能够降低混凝土的氯离子

扩散系数,提高其抗氯离子侵蚀能力。同时,改性聚酯纤维与水泥基体界面间的机械啮合力和黏结力能有效阻止冻融循环过程中表层材料的剥落,大大改善混凝土的抗冻性。

## 参 考 文 献

- [1] Mehta P K , Monteiro P J M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill Education ,2006
- [2] Sargaphuti M , Shah S P , Vinson K D. Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete. *Mater J* ,1993 ,90( 4) : 309
- [3] Zhang P , Wittmann F H , Zhao T J , et al. Observation and quantification of water penetration into strain hardening cement-based composites ( SHCC) with multiple cracks by means of neutron radiography. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A* , 2010 , 620( 2-3) : 414
- [4] Gao D Y , Li H , Yang F. Performance of polypropylene-steel hybrid fiber reinforced concrete after being exposed to high temperature. *Acta Mater Compos Sin* , 2013 , 30( 1) : 187  
(高丹盈,李晗,杨帆.聚丙烯-钢纤维增强高强混凝土高温性能.复合材料学报,2013,30(1):187)
- [5] Yuan C F , Gao D Y. Research of the pore structure of polypropylene fiber concrete after high temperature. *J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci Ed* , 2014 , 42( 4) : 122  
(元成方,高丹盈.聚丙烯纤维混凝土高温后的孔隙结构特征研究.华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(4):122)
- [6] Wang Y , Niu D T , Miao Y Y , et al. Carbonation of steel fiber reinforced concrete under flexural loading. *J Xi'an Univ Archit Technol Nat Sci Ed* , 2015 , 47( 1) : 51  
(王艳,牛荻涛,苗元耀,等.弯曲荷载作用下钢纤维混凝土碳化性能.西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(1):51)
- [7] Balaguru P N , Shah S P. *Fiber reinforced cement composites*. New York: McGraw-Hill Editions , 1992
- [8] American Concrete Institute Committee. ACI 544.3R-08 *Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber Reinforced Concrete*. Farmington Hills , 2008
- [9] Zhang Y , Zhang Y , Liu J , et al. Global development trend of modified polyester fiber. *China Text Leader* , 2006( 1) : 50  
(张瑜,张彦,刘峻,等.改性聚酯纤维的国内外开发动态.纺织导报,2006(1):50)
- [10] Wu R R. Development of technology of PET fiber modification in China. *Polym Bull* , 2008( 8) : 101  
(武荣瑞.我国聚酯纤维改性的技术进展.高分子通报,2008(8):101)
- [11] Yang Z Q , Liu J P , Lü J. Review on the assessment methods of fibers dispersion in cement-based composites. *New Build Mater* , 2008( 13) : 85  
(阳知乾,刘加平,吕进.纤维在水泥基复合材料中的分散性评价方法综述.新型建筑材料,2008(13):85)
- [12] Weng X Z. Study on anti-aging property of modified polyester fiber reinforced concrete. *J Build Mater* , 2010 , 13( 6) : 749  
(翁兴中.道面改性聚酯纤维混凝土抗老化试验研究.建筑材料学报,2010,13(6):749)
- [13] Cai L , Xu R , Chen T L. Study on concrete impermeability properties of modified polyester fiber. *China Concr Cem Prod* , 2006 ( 6) : 46  
(蔡路,徐榕,陈太林.改性聚酯纤维混凝土抗渗性能研究.混凝土与水泥制品,2006(6):46)
- [14] Peng S C , Deng K K , Chen M L , et al. Experimental research for improved polyester fiber performance in concrete on crack control and freezing thaw resistance. *Earthquake Resistant Eng Retrofitting* , 2007 , 29( 1) : 47  
(彭书成,邓可库,陈美兰,等.改性聚酯纤维在混凝土中阻裂增强抗冻试验研究.工程抗震与加固改造,2007,29(1):47)
- [15] Zhao Y H , Zhao L D , Fan Y F , et al. High temperature stability and water stability of asphalt mixture modified by polyester fiber. *J Build Mater* , 2008 , 11( 5) : 550  
(赵颖华,赵立东,范颖芳,等.聚酯纤维改性沥青混合料的高温和水稳定性.建筑材料学报,2008,11(5):550)
- [16] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China , General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 50082—2009 *Standard for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete*. Beijing: China Architecture & Building Press , 2009  
(中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准.北京:中国建筑工业出版社,2009)
- [17] Wang C , Li K Z , Li H J , et al. CVI treatment of short carbon fibers and their dispersion in CFRC. *Acta Mater Compos Sin* , 2007 , 24( 1) : 135  
(王闯,李克智,李贺军,等.短切碳纤维的CVI处理及其在CFRC中的分散性.复合材料学报,2007,24(1):135)
- [18] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T221—2010 *Technical Specification for Application of Fiber Reinforced Concrete*. Beijing: China Architecture & Building Press , 2010  
(中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T221—2010 纤维混凝土结构应用技术规程.北京:中国建筑工业出版社,2010)
- [19] China Association for Engineering Construction Standardization. CECS13: 89 *Test Methods Used for Steel Fiber Reinforced Concrete*. Beijing: China Planning Press , 1991  
(中国工程建设标准化协会. CECS13: 89 钢纤维混凝土试验方法.北京:中国计划出版社,1991)