

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.164

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 再生纤维素纤维增强水泥砂浆的早期抗裂和自收缩行为

马国金<sup>a</sup>, 郑小秋<sup>b</sup>, 郭平<sup>b</sup>, 郭秀艳<sup>b</sup>

(井冈山大学 a. 建筑工程学院; b. 机电工程学院, 江西 吉安 343009)

**摘要:**早期收缩开裂是导致混凝土劣化的重要因素之一, 纤维的加入可以延缓甚至减少裂缝的延伸及扩展。使用具有吸水特性的再生纤维素纤维, 与 UF500 纤维素纤维和无吸水的聚丙烯短纤维对比, 研究再生纤维素纤维对水泥砂浆早期抗裂和自收缩行为的影响规律。将掺量为水泥质量 1% 或 2% 的各类纤维掺入水泥砂浆, 密封养护, 分析水泥砂浆强度、折压比及自收缩应变。研究结果表明: 水灰比 0.3 时, 添加再生纤维素纤维不能增强砂浆的抗裂性能和自收缩性能; 水灰比大于 0.35 时, 添加 1% 的再生纤维素纤维虽然降低了砂浆的抗折强度和抗压强度, 但提高了该样品的折压比, 增强了砂浆的抗裂性能和减缩效应。

**关键词:**再生纤维素纤维; 水泥砂浆; 折压比; 自收缩; 抗裂

中图分类号: TU528.31 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)03-0127-06

## Early-age cracking resistance and self-shrinkage behavior of recycled cellulose fibers-reinforced cement mortar

Ma Guojin<sup>a</sup>, Zheng Xiaoqiu<sup>b</sup>, Guo Ping<sup>b</sup>, Guo Xiuyan<sup>b</sup>

(a. School of Building Engineering; b. School of Mechanical & Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an 343009, Jiangxi, P. R. China)

**Abstract:** Early shrinkage cracking is one of the important factors leading to the deterioration of concrete, the elongation and extension of cracks can be slowed down or even reduced by adding fibers. The objective of this article was to study the influence rules of regenerated cellulose fibers (RCFs) on the early cracking and the self-shrinkage of cement mortar under the sealed curing. The recycled cellulose fiber, UF500 cellulose fiber and non-absorbent polypropylene staple fiber were compared. The strength, the ratio of flexural strength to compressive strength and the self-shrinkage strains of cement mortar with fibers mixed at 1% or 2% by mass were analyzed. The results showed that the crack-resistance and self-shrinkage could not be improved by adding RCFs when the cement mortar at 0.3 water-cement ratio. When water-cement ratio was higher than 0.35, the ratio of flexural strength to compressive strength of mortar increased by adding 1% RCFs although it decreased the flexural strength and the compressive strength. Then under the

收稿日期: 2019-08-20

基金项目: 井冈山大学博士科研启动项目(JZB17006); 江西省吉安市科技支撑项目(吉市科学[2015]10号12、[2015]10号18)

作者简介: 马国金(1979-), 主要从事建筑材料研究, E-mail: xueren2127@163.com

郭秀艳(通信作者), 博士, 副教授, E-mail: yezi1616@163.com.

Received: 2019-08-20

**Foundation items:** PhD Research Startup Foundation of Jinggangshan University (No. JZB17006); Science and Technology Support Project of Ji'an, Jiangxi province(No. [2015]10-12, [2015]10-18)

**Author brief:** Ma Guojin (1979-), main research interest: building materials, E-mail: xueren2127@163.com.

Guo Xiuyan (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: yezi1616@163.com.

quantity, the crack-resistance and shrinkage-reducing effect of cement mortar were enforced, too.

**Keywords:** regenerated cellulose fibres; cement mortar; the ratio of flexural and compressive strength; self-shrinkage; cracking resistance

高性能混凝土因具有低渗透性、高耐久性和高工作性,被认为是大型桥梁工程、高层建筑和海港建筑等的理想建筑材料<sup>[1]</sup>。但低水胶比和各种矿物掺合料的加入导致了早期收缩开裂<sup>[2]</sup>,纤维的加入使这种缺陷有了很大的改善<sup>[3-4]</sup>,而多孔吸水纤维的出现更是促使了内养护技术及其理论的诞生<sup>[5]</sup>。近年来,学者们对混凝土内养护做了大量的研究。孔祥明等<sup>[6]</sup>研究高吸水性树脂对高强混凝土浆体孔结构的影响,提出有效水灰比的概念,并发现掺加预吸水树脂的硬化水泥浆的毛细孔径明显小于自由拌合水的硬化水泥浆,同样,这种超吸水树脂也能有效减少混凝土内部湿度的下降和自收缩行为<sup>[7]</sup>。Jongvisuttisun等<sup>[8]</sup>研究表明,在水化进行25 h内,天然纤维按木浆从自身结构中释放出自由水,25 h后,小细胞壁孔隙中的自由水和细胞壁中的结合水减缓由水泥水化导致的内部自干燥。由此可见,分散在混凝土内部的天然吸水纤维不仅可以起到通用纤维的搭桥作用,更多的是提高混凝土内养护功能<sup>[9-11]</sup>。以上研究所用纤维大多为天然的一次纤维,很少有研究再生植物纤维(二次纤维),尤其是废纸二次纤维在混凝土中的应用。

笔者主要探索再生纤维素纤维对砂浆性能的影响,所用再生纤维来源于实验室自制的废纸纤维,其主要成分为纤维素,具备天然植物纤维的吸水及无定型的典型结构,理论上可替代天然植物纤维用于混凝土中。为更好地理解再生纤维对砂浆性能的影响,对比来源于木浆的UF500纤维素纤维和无吸水的聚丙烯短纤维,从抗裂和自收缩两个方面探讨再生纤维素纤维对水泥砂浆早期性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 原材料

水泥:P·O42.5级普通硅酸盐水泥(上海宝山南方水泥有限公司);砂:中粗黄沙,细度模数2.6;水:自来水;减水剂:SD-600P-01聚羧酸高效减水剂(上海三瑞化学有限公司),控制各试验组流动度在 $140\text{ mm}\pm 6\text{ mm}$ ;UF500纤维素纤维和聚丙烯短纤维(上海翔湖实业有限公司)。

再生纤维素纤维<sup>[12]</sup>:实验室自制,取中国废旧新闻纸为原料,要求废纸不含胶,杂质不超过1%,无用物不超过0.25%。将废纸撕成碎片,浸泡在水中12 h后加入PL2-00高浓水力碎浆机中疏解,其中,浆浓12%,碎浆机转速300 r/min,碎浆时间30 min。将疏解后的纸浆纤维于80目网筛过滤,去除微小组分,真空抽滤后,置于60℃电热鼓风干燥箱中干燥24 h至恒重。用2%的NaOH溶液润胀处理绝干浆2 h后,用乙酸缓慢中和至pH值为中性,烘干后配成2%左右的浓浆60 mL,使用纤维分散器打散成悬浮液,并将其置于JY92-IIDN型超声波发生器中10 min,进行活化处理,改性后的样品经真空过滤并干燥,得到再生纤维素纤维材料,如图1所示。

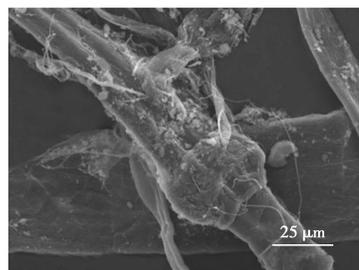


图1 再生纤维素纤维 SEM 形貌

Fig. 1 SEM micrograph of RCFs from waste newsprint fibers

### 1.2 实验方案及测试方法

1.2.1 实验方案 取再生纤维素纤维(RCFs)、UF500纤维素纤维(UF500)、聚丙烯短纤维(PP)3种纤维,按水泥质量的1%或2%称取,控制水灰比0.3、0.35和0.4,灰砂比1:1,将量好的纤维以湿混的方式与水泥、砂混合成型,即首先将纤维浸泡在定额的水中至少30 min,用搅拌器搅拌直至其充分分散后再与水泥、砂搅拌成型。具体方案如表1所示。

1.2.2 测试方法 强度:参考《水泥胶砂强度检验方法(ISO)》(GB/T 17671—1999),成型水泥砂浆样品,养护1 d后,用高密度聚丙烯薄膜和环氧树脂密封,放置于温度为 $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度60%的干燥室内密封养护。使用强度测试机对密封养护后的样品进行强度检测,并计算其折压比( $\sigma_c/\sigma_F$ ),分析再生纤维素纤维对砂浆抗裂性能的影响。

自收缩:参考《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),成型水泥砂浆样品,同样密封养护,测量不同养护龄期下样品的长度,并根据参考文献[13]计算砂浆的线收缩应变,分析再生纤维素纤维对砂浆减缩效应的影响。

表1 水泥砂浆配合比

Table 1 Mix proportion of mortar

编号	W/C	水/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水泥/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	河沙/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	纤维(水泥质量比)/%		
					RCFs	UF500	PP
A0	0.3	240	800	800			
A1	0.3	240	800	800	1		
A2	0.3	240	800	800	2		
B0	0.35	280	800	800			
B1	0.35	280	800	800	1		
B2	0.35	280	800	800	2		
B3	0.35	280	800	800		1	
B4	0.35	280	800	800			1
C0	0.4	320	800	800			
C1	0.4	320	800	800	1		
C2	0.4	320	800	800	2		

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 砂浆强度

水泥砂浆的抗折强度和抗压强度如图2所示。养护龄期相同时,无论何种配比、添加何种纤维,均降低了砂浆的抗折强度和抗压强度,且纤维掺量越多,下降幅度越大。其中,水灰比为0.35,纤维掺量为2%的B2样品,养护28d的抗折强度和抗压强度分别下降了23.7%和15.0%;同种配比情况下,养护至28d,各样品抗折强度大幅度提高,养护28d后,则有不同程度的下降。水灰比均为0.35,掺量均为水泥质量1%的3种纤维,其中,聚丙烯纤维明显降低了砂浆的抗折强度和抗压强度,养护28d,其抗折强度和抗压强度分别下降了38.8%和48.9%,而RCFs和UF500纤维对砂浆强度的影响类似,下降幅度偏缓。纤维本身强度较低,这是造成砂浆强度下降的根本原因,但RCFs和UF500纤维具有吸水特性,在无外部水养护的密封环境下,能够增强水泥砂浆的内部养护作用,使砂浆强度的下降幅度降低。

### 2.2 砂浆的收缩率

不同水灰比、不同纤维种类及掺量下水泥砂浆的收缩率如图3所示。其中,图3(a)~图3(c)为RCFs对砂浆收缩率的影响,图3(d)为同条件下3种纤维对砂浆收缩率的影响。

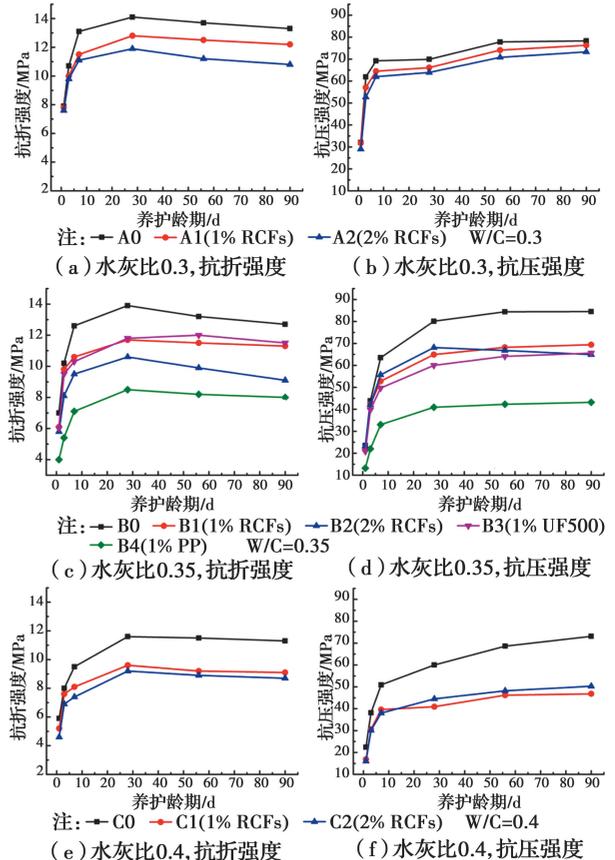


图2 密封环境下不同水灰比砂浆的抗折强度和抗压强度

Fig. 2 Flexural strength and compressive strength of mortar at a different water cement ratio for sealed curing

由图3可知,水灰比0.3、掺加RCFs的砂浆样品收缩率略高于标样,这主要是由于成型前,RCFs浸泡吸收了部分水分,使成型时的实际水灰比下降,过小的水灰比极易造成砂浆和易性变差,而且,实际水灰比越低,自收缩程度也越大。随着水灰比的增大,添加RCFs可降低砂浆的自收缩应变,且掺量为1%时,砂浆的线收缩应变最小。水灰比为0.35、纤维掺量均为1%时,掺加植物纤维的砂浆收缩率类似,而掺加PP的砂浆收缩率最低。但从图2中可知,掺加PP严重降低了砂浆的抗折强度和抗压强度,很容易造成晚期因强度不足而导致微裂缝的扩展。因此,考虑到强度方面因素,植物纤维具有一定优势。

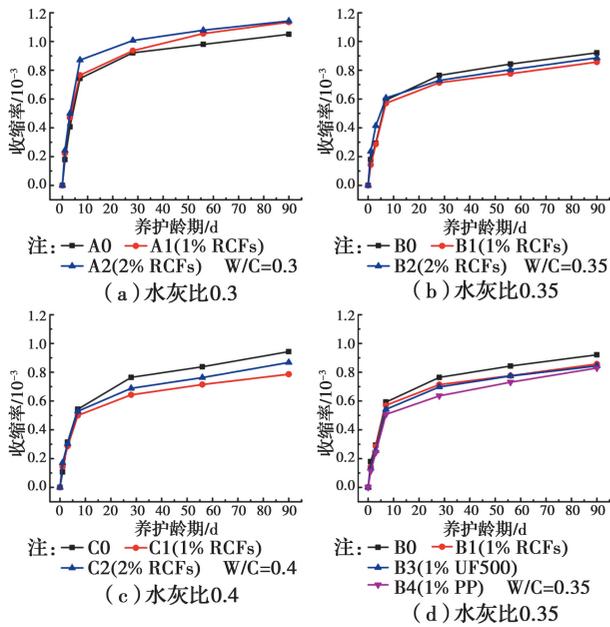


图3 不同水灰比、不同纤维种类及掺量下砂浆的收缩率

Fig. 3 Shrinkage of mortar with different fiber content and types at different water cement ratios

### 2.3 砂浆抗裂性能

材料的收缩裂纹与强度密切相关,折压比是衡量水泥基材料抗裂性能的重要指标之一<sup>[14]</sup>,折压比( $\sigma_F/\sigma_c$ )越高,水泥基材料的柔性越好,抗裂性能越佳<sup>[15]</sup>,张伟等<sup>[16]</sup>的研究也同样证明了纤维增强水泥基材料的初始弯曲韧性比随折压比的增加而提高,两者之间具有很好的线性相关性。不同水灰比、不同纤维种类及掺量下水泥砂浆的折压比如图4所示。其中,图4(a)~图4(c)为不同水灰比下RCFs对砂浆折压比的影响,图4(d)为水灰比0.35时3种纤维对砂浆折压比的影响。

水灰比为0.3时,无论掺加何种掺量的RCFs,均没有提高砂浆的 $\sigma_F/\sigma_c$ ,这主要是由于浸泡RCFs时吸收了部分水分,导致有效水灰比下降,在过低的水分配比下,纤维在砂浆内不能得到很好的分散,砂浆的和易性也变差。因此可以认为,此条件下不适合配置含有吸水纤维的砂浆浆体。水灰比0.4(图4(c))掺加任何掺量的RCFs均提高了砂浆的 $\sigma_F/\sigma_c$ ,说明在此条件下,虽然浸泡RCFs时吸收了部分水分,但余存下来的水分仍可满足砂浆的配置,纤维能够在砂浆内均匀分布,且处于饱水状态。图4(b)的变化趋势介于上述两种情形之间,掺加1%的RCFs可以提高砂浆的 $\sigma_F/\sigma_c$ ,但掺量达到水泥质量的2%时,砂浆 $\sigma_F/\sigma_c$ 下降。可见,无论何种情况下,并不是

纤维掺量越多越好。密封养护环境下,水灰比 $>0.35$ 时,掺加1%RCFs,饱水的纤维能够均匀分散在砂浆基体内部,随着水化进行到一定程度,纤维释放自身所含水分,补偿砂浆内部的自干燥,从而改善砂浆的抗裂性能。但纤维掺量过多会导致砂浆有效水灰比的降低,不利于纤维的分散和砂浆的成型。水灰比0.35时,掺加同掺量的3种纤维,聚丙烯短纤维表现最佳,但从砂浆强度方面考虑,也很不利。因UF500纤维是一次纤维,本身的性能好于二次纤维,故在改善砂浆抗裂性能方面优于RCFs。

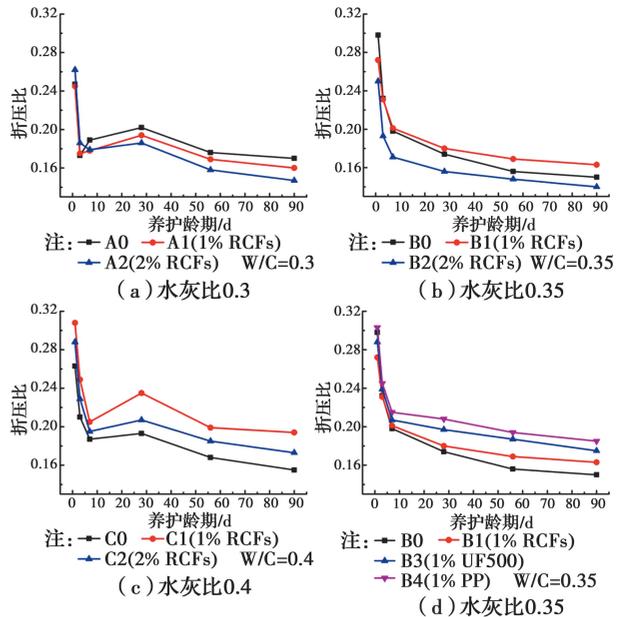


图4 不同水灰比、不同纤维种类及掺量下砂浆的折压比

Fig. 4 The  $\sigma_F/\sigma_c$  of mortar with different fiber content and types at different water cement ratios

### 2.4 砂浆的减缩效应

通过以上分析,水灰比 $>0.35$ ,湿混添加RCFs能够增强水泥砂浆的减缩效应,假设以未掺加RCFs的水泥砂浆为基准,其线收缩应变为 $\varepsilon_0$ ,掺加RCFs后,其收缩应变为 $\varepsilon_f$ 。拟定 $\eta(\%)$ 为RCFs增强水泥基材料的减缩效应,其数学表达式为

$$\eta = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_f}{\varepsilon_0} \times 100\%$$

只有当 $\eta > 0$ 时,RCFs才能够起到减缩效应,如图5所示。

从图5可知,水灰比0.3,掺加任何掺量的RCFs都没有对砂浆起到减缩效果,水灰比大于0.35时,养护1d,砂浆减缩效应下降明显,且纤维掺量越大,下降幅度也越大。纤维掺量为2%时,水灰

比0.35,养护1 d的水泥砂浆减缩效应下降超过30%,而在0.4水灰比下,下降幅度近60%。养护7 d,RCFs对砂浆的减缩效应随着水灰比的增加有所加大,且纤维掺量为水泥质量的1%时,减缩效果较好。水灰比0.4,养护28 d,掺加1%的RCFs可使砂浆的减缩能力提高16%。

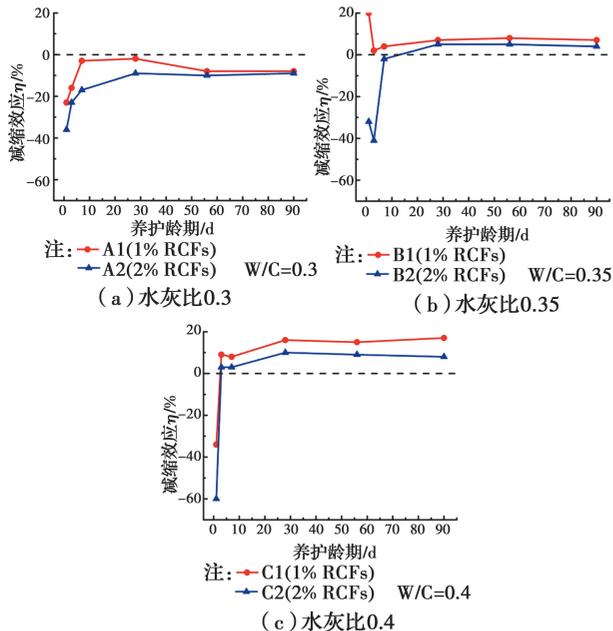


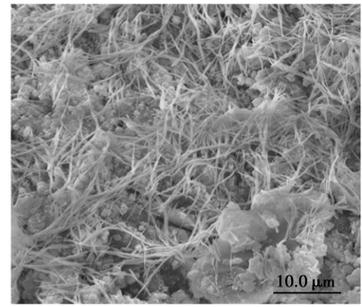
图5 不同水灰比下RCFs增强砂浆的减缩效应

Fig. 5 Shrinkage efficiency  $\eta$  of mortar with RCFs at different water cement ratios

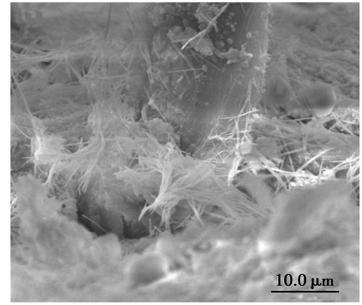
试验所用RCFs本身具有较好的吸水性,在低水灰比下,湿法掺加RCFs进一步降低了体系的有效水灰比,从而增大了砂浆的线收缩应变。而且,纤维易团聚,介质水分不足导致其无法均匀地分布于基体内部,从而导致其没有起到正面效应。但随着额定水灰比的增大,RCFs的分散能力增强,可以起到内养护的作用。RCFs具有吸水 and 释水的能力,同时,在体系内部起到搭桥的作用,见图6,在密封养护后期,纤维释放自身内部所含水分,对砂浆实施内养护,促进水泥水化进程,使基体组织更致密,纤维与基体接触面积增大,界面粘结强度较好,从而提高了砂浆的抗裂性能和抗收缩性能。

### 3 结论

1)水灰比是影响砂浆配置的关键因素之一,当低于0.3时,RCFs不能很好地分散于砂浆基体内,更不能改善砂浆的抗裂和抗收缩性能,反而降低了砂浆的强度。



(a) 标准砂浆



(b) 掺加1% RCFs的砂浆

图6 水灰比0.4,养护28 d的砂浆SEM形貌

Fig. 6 SEM micrograph of mortar with a water cement ratio of 0.4 for curing 28 d

2)水灰比大于0.35、RCFs掺量为水泥质量的1%时,能够很好地增强砂浆的抗裂和减缩性能。但随着纤维掺量的增加,势必会造成有效水灰比的下降,从而起到反作用。

3)RCFs在砂浆体系中表现出的性能虽略次于UF500纤维素纤维,但总体趋势相似,可以考虑替代使用。

### 参考文献:

- [1] JIANG Z W, GUO X Y, LI W T, et al. Self-shrinkage behaviors of waste paper fiber reinforced cement paste considering its self-curing effect at early-ages [J]. International Journal of Polymer Science, 2016, doi: 10.1155/2016/8690967.
- [2] 陈海明, 黄凌昱, 沈朋辉, 等. 水胶比对高强砂浆早期收缩特性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 1399-1403, 1429. CHEN H M, HUANG L X, SHEN P H, et al. Influence of water/binder ratio on initial shrinkage of high strength mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4): 1399-1403, 1429. (in Chinese)
- [3] AL-TULAIAN B S, AL-SHANNAG M J, AL-HOZAIMY A R. Recycled plastic waste fibers for

- reinforcing Portland cement mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127: 102-110.
- [4] WU L M, FARZADNIA N, SHI C J, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 149: 62-75.
- [5] 姜玉丹, 金祖权, 陈永丰, 等. 高吸水树脂对混凝土水化及强度的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(24): 40-44, 49.
- JIANG Y D, JIN Z Q, CHEN Y F, et al. Effect of super-absorbent polymer on hydration and compressive strength of concrete [J]. *Materials Review*, 2017, 31 (24): 40-44, 49. (in Chinese)
- [6] 孔祥明, 张珍林. 高吸水性树脂对高强混凝土浆体孔结构的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41 (11): 1474-1480.
- KONG X M, ZHANG Z L. Effect of super-absorbent polymer on pore structure of hardened cement paste in high-strength concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41 (11): 1474-1480. (in Chinese)
- [7] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 76: 82-90.
- [8] JONGVISUTTISUN P, LEISEN J, KURTIS K E. Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 206-220.
- [9] YOUSEFIEH N, JOSHAGHANI A, HAJIBANDEH E, et al. Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 833-845.
- [10] TIOUA T, KRIKER A, BARLUENGA G, et al. Influence of date palm fiber and shrinkage reducing admixture on self-compacting concrete performance at early age in hot-dry environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 721-733.
- [11] ONUAGULUCHI O, BANTHIA N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 68: 96-108.
- [12] GUO X Y, JIANG Z W, LI H X, et al. Production of recycled cellulose fibers from waste paper via ultrasonic wave processing [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(19):6211-6218
- [13] 蒋正武, 郭秀艳, 李文婷. 废纸纤维对砂浆早期收缩及孔结构的影响[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(5): 876-882.
- JIANG Z W, GUO X Y, LI W T. Effects of waste paper fibers on early-age shrinkage and pore structure of mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19 (5): 876-882. (in Chinese)
- [14] 张向冈, 邓大鹏, 张轩轩, 等. 砂轻页岩集料混凝土折压比试验研究 [J]. *混凝土*, 2019, 11(2): 57-60.
- ZHANG X G, DENG D P, ZHANG X X, et al. Experimental study on flexure and compression's ratio of sand light weight concrete with shale aggregate [J]. *Concrete*, 2019, 11(2): 57-60.
- [15] 王茹, 王培铭, 彭宇. 三种方法表征丁苯乳液水泥砂浆韧性的对比 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(3): 390-394.
- WANG R, WANG P M, PENG Y. Comparison of three characterization methods for flexibility of SBR latex-modified cement mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(3): 390-394. (in Chinese)
- [16] 张伟, 殷成龙, 李辉, 等. 绿色路用纤维增强水泥基复合材料制备及其韧性表征 [J]. *材料导报*, 2018, 32 (Sup2): 498-502.
- ZHANG W, YIN C L, LI H, et al. Preparation and toughness characterization of fiber reinforced cementitious composites (FRCC) for green roads [J]. *Materials Review*, 2018, 32 (Sup2): 498-502. (in Chinese)