

# Effect of Polyvinyl Alcohol Fiber on Mechanical Properties of Fly Ash Cement System

Hao Wu, Zhijia Li, Weikang Peng, Miaojiang Shen, Chuan Tang, Yanmin Jia\*

College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang  
Email: 1146738363@qq.com, \*yanminjia2008@126.com

Received: May 13<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This paper mainly studies the effects of changing the content of PVA fiber and fly ash on the compressive strength and flexural strength of the fly ash cement binary cementing system. The results show that the effect of polyvinyl alcohol fiber on the flexural strength of fly ash cement binary cementing system is more significant than that of compressive strength. The addition of fly ash will reduce the compressive strength of the cube and the flexural strength of the trabecular beam. When the fiber content is 0, the 28d flexural strength of pure cement slurry is 3.17 times that of the slurry test specimen with 60% fly ash content.

## Keywords

Polyvinyl Alcohol Fiber, Fly Ash, Cement, Mechanical Properties, Microstructure

---

# 聚乙烯醇纤维对粉煤灰水泥体系的力学性能影响

吴昊, 李志家, 彭伟康, 申淼江, 汤川, 贾艳敏\*

东北林业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨  
Email: 1146738363@qq.com, \*yanminjia2008@126.com

收稿日期: 2020年5月13日; 录用日期: 2020年6月8日; 发布日期: 2020年6月15日

---

\*通讯作者。

文章引用: 吴昊, 李志家, 彭伟康, 申淼江, 汤川, 贾艳敏. 聚乙烯醇纤维对粉煤灰水泥体系的力学性能影响[J]. 土木工程, 2020, 9(6): 579-586. DOI: 10.12677/hjce.2020.96062

## 摘要

主要研究了粉煤灰水泥二元胶凝体系在聚乙烯醇纤维和粉煤灰含量变化后抗压强度以及抗折强度的影响。结果表明：聚乙烯醇纤维对于粉煤灰水泥二元胶凝体系抗折强度的影响明显优于对抗压强度的影响。粉煤灰的掺入会降低立方体的抗压强度以及小梁的抗折强度，纤维含量均为0时，纯水泥浆体的28d抗折强度为粉煤灰含量为60%的浆体试块的3.17倍。

## 关键词

聚乙烯醇纤维，粉煤灰，水泥，力学性能，微观结构

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前我国城镇化建设较快，房屋拆建所生成的工业废料不断增多，其中粉煤灰含量颇多，因此许多的学者开始使用粉煤灰去替代一部分水泥来降低成本，从而使这些工业废料能更好的得以运用[1]。中国是粉煤灰资源大国，那么其大量的堆积必然会占用大量的自然资源，所以加大粉煤灰的利用是当前的研究趋势。粉煤灰活性低，即使水泥水化产物中有大量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  其火山灰反应仍很慢，因此用粉煤灰替代水泥，会使得粉煤灰水泥体系前期强度降低[2]。随着纤维的发展及其特殊特性(例如出色的机械性能和耐用性)，纤维已被用作混凝土的常见添加剂之一[3] [4]。另外，聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol fiber, PVA)纤维具有抗拉强度高，弹性模量高，耐腐蚀，拉伸率低，聚乙烯醇纤维对改善砂浆的力学性能有较为显著的影响[5]。

## 2. 试验材料及试件制备

### 2.1. 试验材料

胶凝材料主要包括哈尔滨市小岭水泥厂生产的 P·O42.5 水泥以及 I 级粉煤灰。纤维选取的是不同长度的聚乙烯醇纤维(PVA)，纤维参数见表 1。水泥的凝结时间等性能测试结果见表 2，水泥与粉煤灰的主要化学成分见表 3。外加剂使用的是聚羧酸系高性能减水剂，还有实验室自来水。

### 2.2. 配合比设计及试件制作

本试验设置对照组由纯水泥拌制而成，另设两组试验分别用含量为 45% 和 60% 的粉煤灰替代水泥，在每组试验中另设五组试验，分别掺入含量为 0%，0.5%，1%，1.5%，2% 的聚乙烯醇纤维，并且每组试验里面 6 mm 和 12 mm 的聚乙烯醇纤维含量均为 50%。每组配合比制作成型试件 12 个，其中 6 个边长为 70.7 mm 的立方体，6 个 40 mm × 40 mm × 160 mm 的小梁试件。所有试件在室温下养护 24 h 后脱模，然后放入水中养护 28 d 和 90 d，再进行强度试验。试验按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70-2009)进行。配合比设计见表 4，纤维以及减水剂配合比见表 5。

**Table 1.** Main parameters of PVA fiber**表 1.** 聚乙烯醇纤维主要参数

| 纤维长度  | 直径                  | 断裂伸长率 | 抗拉强度      | 初始模量    | 密度                          |
|-------|---------------------|-------|-----------|---------|-----------------------------|
| 6 mm  | 15.09 $\mu\text{m}$ | 6.9%  | >1500 Mpa | >35 Gpa | 1.29 $\text{g}/\text{cm}^3$ |
| 12 mm | 15.09 $\mu\text{m}$ | 6.9%  | >1500 Mpa | >35 Gpa | 1.29 $\text{g}/\text{cm}^3$ |

**Table 2.** Cement performance index measured data**表 2.** 水泥性能指标实测数据

| 检测项目 | 单位   | 检测结果 | 指标要求       |             |
|------|------|------|------------|-------------|
| 抗折强度 | 3 d  | Mpa  | 5.2        | $\geq 3.5$  |
| 抗折强度 | 28 d | Mpa  | 20.6       | $\geq 17.0$ |
| 抗压强度 | 3 d  | Mpa  | 26.3       | $\geq 6.5$  |
| 抗压强度 | 28 d | Mpa  | 50.6       | $\geq 42.5$ |
| 初凝时间 | min  | 155  | $\geq 4$   |             |
| 终凝时间 | min  | 240  | $\leq 600$ |             |
| 安定性  | mm   | 1.0  | $\leq 5.0$ |             |

**Table 3.** Chemical composition of cement and fly ash**表 3.** 水泥及粉煤灰化学组成

| 化学成分(%)                 | 粉煤灰   | 水泥    |
|-------------------------|-------|-------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 18.97 | 5.86  |
| CaO                     | 3.05  | 59.81 |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 4.39  | 2.85  |
| $\text{SiO}_2$          | 66.67 | 21.5  |
| $\text{SO}_3$           | 0.3   | 2.06  |
| MgO                     | 1.24  | 2.23  |
| 其它                      | 5.38  | 5.69  |

**Table 4.** Mix design**表 4.** 配合比设计

| 组别 | 水灰比  | 水泥(g) | 粉煤灰(g) | 水(g) |
|----|------|-------|--------|------|
| A  | 0.27 | 1000  | 0      | 270  |
| B  | 0.27 | 550   | 450    | 270  |
| C  | 0.27 | 400   | 600    | 270  |

**Table 5.** Mixing ratio of fiber and water reducer**表 5.** 纤维以及减水剂配合比

| 组别 | 纤维含量 | 6 mm 纤维(g) | 12 mm 纤维(g) | 减水剂(g) |
|----|------|------------|-------------|--------|
| A0 | 0%   | 0          | 0           | 1.1    |
| A1 | 0.5% | 1.5        | 1.5         | 1.15   |
| A2 | 1%   | 3.1        | 3.1         | 1.26   |
| A3 | 1.5% | 4.6        | 4.6         | 1.32   |
| A4 | 2%   | 6.2        | 6.2         | 1.39   |
| B0 | 0%   | 0          | 0           | 1.25   |
| B1 | 0.5% | 1.7        | 1.7         | 1.36   |
| B2 | 1%   | 3.4        | 3.4         | 1.42   |
| B3 | 1.5% | 5.1        | 5.1         | 1.5    |
| B4 | 2%   | 6.8        | 6.8         | 1.58   |
| C0 | 0%   | 0          | 0           | 1.29   |
| C1 | 0.5% | 1.8        | 1.8         | 1.35   |
| C2 | 1%   | 3.6        | 3.6         | 1.44   |
| C3 | 1.5% | 5.4        | 5.4         | 1.51   |
| C4 | 2%   | 7.2        | 7.2         | 1.57   |

### 3. 力学性能

#### 3.1. 抗折强度

表 6 为粉煤灰水泥二元胶凝体系 28d 抗折强度，图 1 为各组配合比中纤维含量的不同对抗折强度的影响。由表 6 和图 1，抗折强度随着聚乙烯醇纤维含量的增加呈现出增长的状态，除了 A3 的抗折强度略微降低。图 2 为 PVA 纤维含量为 0% 和 2% 的抗折强度对比图，在 A，B，C 三组试验中，抗折强度最高的都出现在聚乙烯醇纤维含量为 2% 时，其中 A4 的抗折强度为 A0 的 1.28 倍，B4 的抗折强度为 B0 的 3.28 倍，C4 的抗折强度为 C0 的 3.69 倍。

综上可得，粉煤灰水泥二元胶凝体系抗折强度受聚乙烯醇纤维的影响比正常水泥砂浆受纤维的影响要显著，并且随着粉煤灰含量的增多，其影响效果越明显。因为聚乙烯醇纤维含量较多时，小梁的抗折强度主要由纤维的性能决定，当出现裂缝时，裂缝周围的 PVA 纤维分子中有较多的羟基，它与水泥基材料有着较强的化学胶结作用，所以在纤维未达到抗拉极限强度时，它会阻止裂缝的开展与延伸，从而提高试件抗折强度，由此可见，聚乙烯醇纤维对于小梁的抗折强度有明显的提升作用[6]。

随着粉煤灰替换的比率增大，小梁的抗折强度均有所下降，当聚乙烯醇纤维含量小于 1% 时，抗折强度大幅度下降，其中 A0 为 C0 的 2.95 倍，A1 为 C1 的 1.96 倍，A2 为 C2 的 1.45 倍，但是当聚乙烯醇纤维含量增加到 1.5% 及以上时，A，B，C，三组的抗折强度都较为接近。再对比粉煤灰含量为 45% 和粉煤灰含量为 60% 的两组试验，我们可以发现两组试验的抗折强度区别很小，且 C2 略高于 B2 的抗折强度。

由于粉煤灰的微集料效应和火山灰效应，粉煤灰被激发后生成的水化产物可以改善水泥水化产物与骨料之间界面结构，从而提高砂浆强度，并且这种作用对抗折强度的影响要比对抗压强度的影响大，因此抗折强度随粉煤灰含量的增加下降缓慢，甚至还出现了好于基准水泥的情况[7]。

Table 6. 28d Flexural strength of fly ash cement binary cementing system

表 6. 粉煤灰水泥二元胶凝体系 28d 抗折强度

| 编号 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 |
|----|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| A  | 4.22   | 0    | 4.55   | 0.5% | 5.16   | 1%   | 4.72   | 1.5% | 5.41   | 2%   |
| B  | 1.70   | 0    | 2.32   | 0.5% | 3.44   | 1%   | 4.64   | 1.5% | 5.58   | 2%   |
| C  | 1.43   | 0    | 2.32   | 0.5% | 3.55   | 1%   | 4.10   | 1.5% | 5.26   | 2%   |

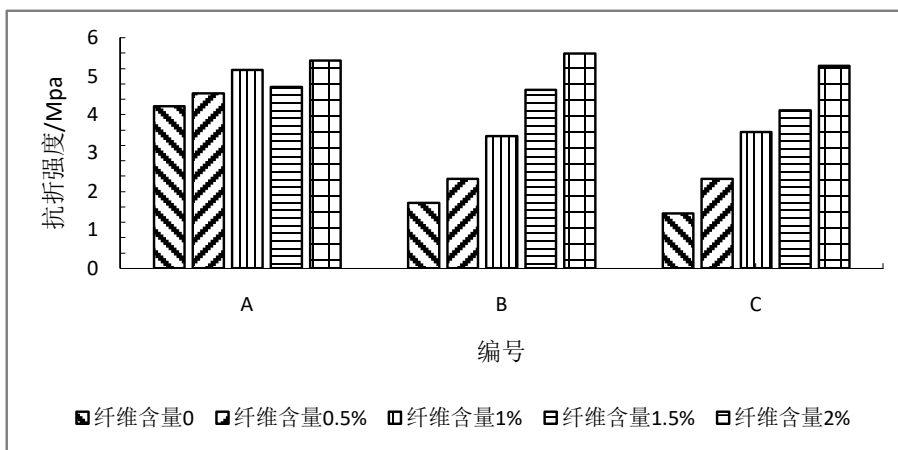


Figure 1. Effect of different fiber content in the blending ratio of each group on flexural strength

图 1. 各组配合比中纤维含量的不同对抗折强度的影响

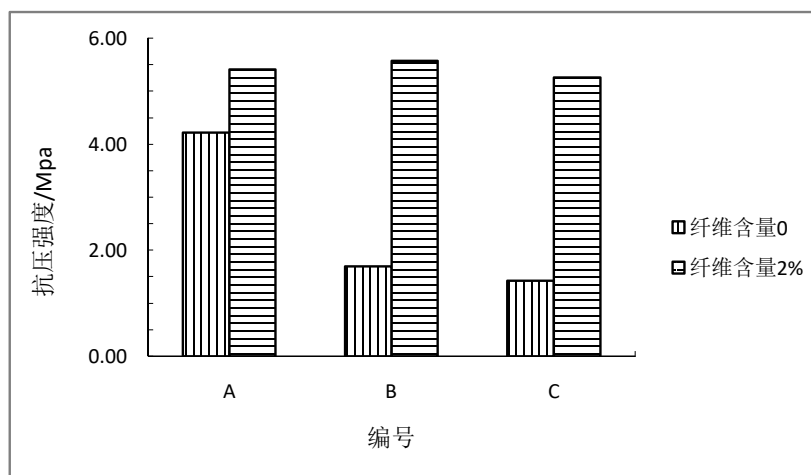


Figure 2. Comparison of flexural strength of PVA fiber content of 0% and 2%  
图 2. PVA 纤维含量为 0% 和 2% 的抗折强度对比

### 3.2. 抗压强度

表 7 为 B 组和 C 组粉煤灰水泥二元胶凝体系 28d 抗压强度, 表 8 为 B 组和 C 组粉煤灰水泥二元胶凝体系 90d 抗压强度。图 3 为纤维含量的不同对抗压强度的影响, 由图 3 可知, 聚乙烯醇纤维的掺入显著增加了胶凝体系试块的 28d 立方体抗压强度。其中 B 组 28d 立方体抗压强度在 B3 时效果最佳, 其 28d 立方体抗压强度为不掺纤维的对照组强度的 1.75 倍; C 组 28d 立方体抗压强度随聚乙烯醇纤维含量的增加有一定的提升, 其中 C3 的 28d 立方体抗压强度为对应的对照组抗压强度的 1.13 倍。

B 组试验中, 聚乙烯醇纤维的掺入提高了试块的立方体抗压强度, 纤维掺入量为 0.5% 时, 抗压强度增加效果不明显, 当纤维含量增加至 1% 时试块抗压强度有显著提高, 但是随着纤维掺量的继续增加, 强度不再一直上升, 当纤维含量达到 2% 时, 抗压强度略微下降。

图 4 为 C 组试块在 28d 和 90d 抗压强度的折线图, 图 5 为 B 组试块在 28d 和 90d 抗压强度的折线图。可知在 B 组和 C 组的配合比中, 粉煤灰水泥二元胶凝体系的立方体抗压强度随着龄期的增加而不断上升, 从而得出粉煤灰与水泥的反应在 28d 龄期时并未结束。因为粉煤灰的外部有一层致密的玻璃质外壳, 这便使得粉煤灰参与二次水化反应时间增长, 同时水泥熟料的含量的减少又使得试块前期抗压强度有所降低, 因此在胶凝体系中掺入粉煤灰能让立方体的抗压强度在 28d 之后继续上升[8]。

图 6 为 PVA 纤维对 28dB 组抗折强度与抗压强度的增长幅度影响, 可以看出聚乙烯醇纤维含量的增加使抗压强度和抗折强度均不断增大, 且 PVA 纤维对于抗折强度的影响优于对抗压强度的影响。

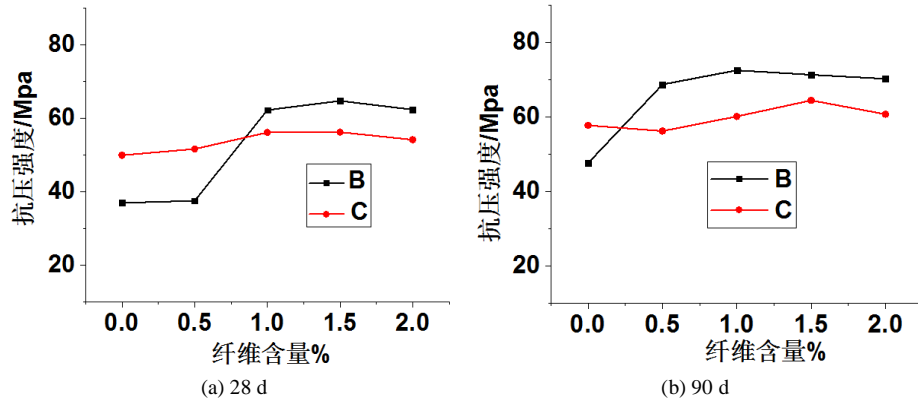
一般认为, 砂浆的抗压强度是集料骨架之间的嵌挤作用以及水泥浆的粘结作用形成的, 而抗折强度主要取决于水泥浆与集料界面的粘结强度[9]。聚乙烯醇纤维的掺入使得水泥浆与集料界面的结合强度大大提高, 并且横跨裂缝的 PVA 纤维会限制裂缝的进一步延伸, 所以 PVA 纤维对抗折强度的影响要优于对抗压强度的影响。

Table 7. 28d Compressive strength of fly ash cement binary cementing system  
表 7. 粉煤灰水泥二元胶凝体系 28d 抗压强度

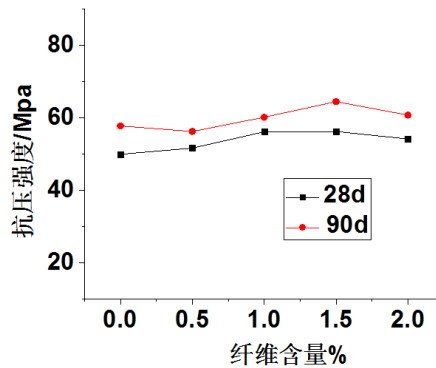
| 编号 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 |
|----|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| B  | 37.0   | 0    | 37.6   | 0.5% | 62.3   | 1%   | 64.8   | 1.5% | 62.4   | 2%   |
| C  | 50.0   | 0    | 51.7   | 0.5% | 56.2   | 1%   | 56.3   | 1.5% | 54.2   | 2%   |

**Table 8.** 90d Compressive strength of fly ash cement binary cementing system  
**表 8.** 粉煤灰水泥二元胶凝体系 90d 抗压强度

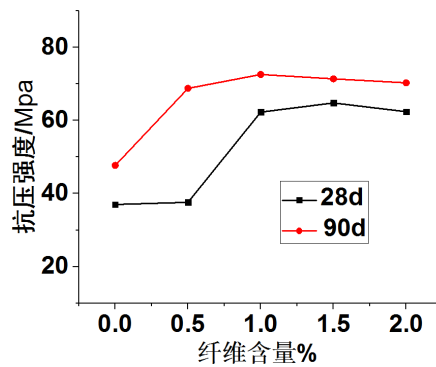
| 编号 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 | 强度/MPa | 纤维含量 |
|----|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| B  | 47.7   | 0    | 68.8   | 0.5% | 72.6   | 1%   | 71.4   | 1.5% | 70.3   | 2%   |
| C  | 57.8   | 0    | 56.3   | 0.5% | 60.2   | 1%   | 64.5   | 1.5% | 60.8   | 2%   |



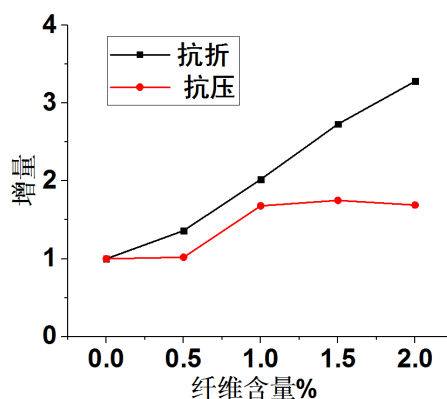
**Figure 3.** Influence of different fiber content on compressive strength  
**图 3.** 纤维含量的不同对抗压强度的影响



**Figure 4.** Effects of different ages of group C on compressive strength  
**图 4.** C 组龄期不同对抗压强度的影响



**Figure 5.** Effects of different ages of group B on compressive strength  
**图 5.** B 组龄期不同对抗压强度的影响



**Figure 6.** Effect of PVA fiber on the increase of flexural strength and compressive strength of 28dB group

**图 6.** PVA 纤维对 28dB 组抗折强度与抗压强度的增长幅度影响

#### 4. 结论

1) 聚乙烯醇纤维能提高粉煤灰水泥二元胶凝材料的抗折强度, 且相对于纯水泥砂浆而言, 影响效果更为显著。纤维含量为 2% 时, 从纯水泥到粉煤灰含量为 60% 的三组试验, 其抗折强度增长率依次为 28%, 228% 和 268%, 粉煤灰含量越多, 其增长率越高。这是因为 PVA 纤维分子含有羟基, 它与水泥基材料有着较强的化学胶结作用, 能一定程度限制裂缝的开展。

2) 粉煤灰活性较低, 外部有致密的玻璃纸外壳, 导致其水化反应时间增长, 因此粉煤灰水泥二元胶凝材料的抗压强度在 28d 以后持续上升。其中粉煤灰含量为 60%, 聚乙烯醇纤维含量为 1.5% 时, 90d 的立方体抗压强度为 28d 的 1.15 倍。

3) 未掺入聚乙烯醇纤维时, 粉煤灰的掺入会使得胶凝体系的抗折强度大幅度降低, 其中 A0 的 28d 抗折强度为 C0 的 3.17 倍, 这是因为水泥用量减少, 使得生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等物质减少, 抗折强度也随之降低。

#### 基金项目

国家级大学生创新训练计划项目(编号: 201910225132); 黑龙江省自然科学基金项目(E2017003)。

#### 参考文献

- [1] 杨一凡, 何智海. 原状稻壳灰及磨细灰对水泥胶砂强度和微观结构的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(10): 92-96.
- [2] 肖佳, 周士琼, 徐亦冬. 粉煤灰、硅灰对水泥胶砂性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2003(8): 28-30+36.
- [3] Liu, J.L., Jia, Y.M. and Wang, J. (2019) Experimental Study on Mechanical and Durability Properties of Glass and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *Fibers and Polymers*, **20**, 1900-1908. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1028-9>
- [4] Liu, J.L., Jia, Y.M. and Wang, J. (2019) Calculation of Chloride Ion Diffusion in Glass and Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, **215**, 875-885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.246>
- [5] 金晓勤, 蒋益鹏, 郑佳晓. 聚乙烯醇纤维砂浆的制备与基本力学性能试验[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2016, 15(5): 21-26.
- [6] 薛会青, 邓宗才, 李建辉. PVA 纤维水泥基复合材料的抗拉性能及韧性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009,

30(1): 92-95.

- [7] 吴纯超, 杨海龙, 孔祥明, 宋常友, 胡永腾. 复合激发剂对大掺量粉煤灰水泥砂浆早期力学性能的影响[J]. 混凝土, 2010(8): 110-112.
- [8] 宋亮. 粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 266-269.
- [9] 梁济丰, 吕磊, 余晓青. 聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(11): 48-51.