

Experimental Study on the Uniaxial Strength of PVA-ECC and Its Conversion Relation

Yale Zhang

School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia
Email: 136722920@qq.com

Received: Apr. 23rd, 2020; accepted: May 15th, 2020; published: May 22nd, 2020

Abstract

The effects of sand-binder ratio, water-binder ratio and PVA fiber content on the strength of PVA-ECC at the 7 and 28-day curing age were studied. Experimental studies show that with the increase of the volume of PVA fiber, the tensile strength of splitting increases, but the compressive strength decreases to some extent; the compressive strength and splitting tensile strength decrease significantly with the increase of water-binder ratio at the 7 and 28-day age; with the increase of sand-to-gum ratio, the compressive strength of PVA-ECC increased at 7 d and 28 d, but the splitting tensile strength decreased at 7 d age and increased at 28 d. Based on that, the strength conversion relationship under different curing age and the tension-compression strength conversion relationship of PVA-ECC are established. The experimental values are in good agreement with the fitting values. The experimental results can provide reference for the follow-up research and practical engineering application of PVA-ECC.

Keywords

PVA-ECC, Mix Proportion, Strength Conversion

不同配合比下PVA-ECC强度及换算关系试验研究

张亚乐

内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特
Email: 136722920@qq.com

收稿日期: 2020年4月23日; 录用日期: 2020年5月15日; 发布日期: 2020年5月22日

摘要

本试验研究了PVA-ECC材料在7 d和28 d养护龄期下,砂胶比、水胶比及PVA纤维体积掺量对PVA-ECC材料强度的影响。试验研究表明:随PVA纤维体积掺量的增加,劈裂抗拉强度增加,但抗压强度有所降低;在7 d和28 d养护龄期下,随水胶比增大,抗压强度和劈裂抗拉强度显著降低。随砂胶比增大,PVA-ECC在7 d和28 d龄期的抗压强度均提高,但其劈裂抗拉强度在7 d龄期时减小,在28 d龄期时增大。在此基础上,建立了PVA-ECC在不同养护龄期下的强度换算关系、抗压强度换算关系,试验值与拟合值吻合度较高。本试验研究结果可为PVA-ECC的后续研究及实际工程应用提供参考。

关键词

PVA-ECC, 配合比, 强度换算

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

混凝土因具有抗压强度高、可模性好和易于就地取材等优点,被广泛应用于土木工程中,但同时由于混凝土存在自重大、抗拉强度低、抗裂性差等缺点,限制了其工程应用。

聚乙烯醇(PVA)纤维水泥基复合材料(简称PVA-ECC)由水泥砂浆与PVA纤维拌和而成,具有高韧性、高延性和多缝开裂等优点[1]。最早由Victor C. Li研发制成,被用于土木工程中,以弥补混凝土和水泥基材料的不足。自PVA-ECC问世以来,就得到工程界人士的重视,并对其展开大量研究。通过直接拉伸试验研究表明,加入PVA纤维后,PVA-ECC抗拉强度、峰值应变、极限拉应变较基材显著提高,极限拉应变能够达到3%,并且具有比较好的应变硬化性能[2] [3] [4] [5]。通过单轴受压试验研究表明,加入PVA纤维后,与基材相比,PVA-ECC抗压强度没有明显增加,甚至降低,峰值应变、极限压应变显著增加,延性和压缩韧性明显改善[6] [7] [8] [9]。目前,徐世焯、李艳等人对小尺寸试块立方体与棱柱体抗压强度之间的换算关系进行了研究[6] [8],但研究工况较单一,未进行不同纤维掺量、不同配合比、不同龄期等各工况下强度间关系的研究;同时,至今未见到关于立方体抗压强度与抗拉强度间关系的研究。为了在实际工程中方便质量检测、节约材料、减少施工工作量,需要找出不同龄期、不同配合比下PVA-ECC材料各强度间的换算关系。本文以PVA纤维体积掺量、砂胶比、水胶比作为影响因素,研究立方体抗压强度与棱柱体抗压强度及劈裂抗拉强度间的换算关系,并研究了养护龄期对各强度指标间换算关系的影响。研究结果可为PVA-ECC的工程应用奠定基础。

2. 试验概况

2.1. 试验材料

试验采用:呼和浩特冀东牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥;鄂尔多斯达拉特旗华宇公司生产的I级粉煤灰;包头名商公司生产的石英砂,粒径范围75~109 μm ;增稠剂主要成分为羟丙甲基纤维素;广州市中万新材料有限公司生产的水泥砂浆用消泡剂;减水剂采用改性聚羧酸高效减水剂Sika Visco Crete 3301E;

采用日本 Kuraray 公司生产的聚乙烯醇(PVA)纤维, 纤维特性见表 1。

Table 1. PVA fiber parameters

表 1. PVA 纤维参数

纤度/dtex	长度/mm	直径/mm	抗拉强度/Mpa	伸长率/%	拉伸模量/Gpa	密度(g/cm ³)
15	12	0.04	1600	6	40	1.3

2.2. 试验配合比

该试验 PVA 纤维体积掺量: 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%; 水胶比三种即 0.55、0.50 和 0.45; 砂胶比为 0.8 和 1.1; 减水剂 1%, 消泡剂 0.5%, 增稠剂 0.05%。具体试验配合比如表 2。

Table 2. PVA-ECC mix proportion

表 2. PVA-ECC 配合比

试件编号	纤维体积率/vol%	水泥	粉煤灰	硅灰	水胶比	砂(石英粉)胶比
F-0	0	0.75	0.20	0.05	0.55	0.8
F-0.5	0.5	0.75	0.20	0.05	0.55	0.8
F-1.0	1.0	0.75	0.20	0.05	0.55	0.8
F-1.5	1.5	0.75	0.20	0.05	0.55	0.8
F-2.0	2.0	0.75	0.20	0.05	0.55	0.8
W-0.50/S-0.8	1.5	0.75	0.20	0.05	0.50	0.8
W-0.45/S-0.8	1.5	0.75	0.20	0.05	0.45	0.8
W-0.55/S-1.1	1.5	0.75	0.20	0.05	0.55	1.1
W-0.50/S-1.1	1.5	0.75	0.20	0.05	0.50	1.1
W-0.45/S-1.1	1.5	0.75	0.20	0.05	0.45	1.1

注: 以上表中数字纤维按体积比例计算, 其余按质量比例计算。F-1.5 表示 PVA 纤维体积掺量 1.5%; W-0.50 表示水胶比 0.5; S-0.8 表示砂胶比 0.8。水胶比 W/C = 水/(水泥+粉煤灰+硅灰), 砂胶比 S/C = 石英粉/(水泥+粉煤灰+硅灰)。

2.3. 试验方法

1) 试件制备。依次将称量好的石英粉、粉煤灰、硅灰和水泥加入搅拌机内搅拌 2 min, 接着加入 PVA 纤维继续搅拌 3 min, 最后把外加剂加入水中后一起加入搅拌机内高速搅拌 5 min 至均匀, 分两次浇筑、振捣, 48 h 后脱模, 放入标准养护室, 分别养护到 7 d、28 d 龄期。

2) 抗压、劈裂抗拉强度试验。该试验加载设备使用山东路达公司生产的 3000 KN 电液伺服万能试验机, 采用力控制加载, 加载速率为 1.0 KN/s, 根据规范《JGJ/T70-2009 建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行试验, 立方体抗压、劈裂抗拉试块尺寸均为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm, 棱柱体抗压试块尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 220 mm。

3. 试验结果及分析

3.1. 破坏过程及破坏形态

3.1.1. 抗压试验破坏形态

图 1 和图 2 为 PVA-ECC 立方体试块和棱柱体试块单轴受压破坏形态图。由图可见, 未加纤维的立

立方体试块和棱柱体试块在受压加载过程中首先在试块中部出现多条竖向裂缝，裂缝逐渐向角部延伸，形成相接的八字形裂缝，继续加载，中部基材逐渐膨胀并脱落。最终破坏时，立方体试块最终形成对顶的四角锥体，棱柱体试块中部基材大部分剥落崩出，所剩无几，破坏时均表现出明显的脆性。而掺入纤维的试块自加载至破坏过程中，未出现基材大量剥落的现象，在试件破坏时，试件表面无特别清晰的、深度较大的贯通裂缝，只是表层出现少量酥皮，酥皮上有肉眼可见的较浅的裂缝，并伴随少量掉渣，试块整体性好，体现出“坏而不散”的特性。这是因为试块发生竖向压缩时，会产生横向膨胀，掺入 PVA 纤维之后，由于纤维的桥联作用，有效减缓了试块内部因微裂缝尖端应力集中而产生的扩展趋势，限制与阻碍了微裂缝的充分扩展，且有效地约束了试件的横向变形。

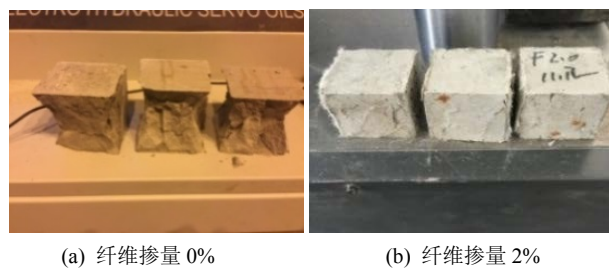


Figure 1. Compression failure mode of cube
图 1. 立方体试块受压破坏形态

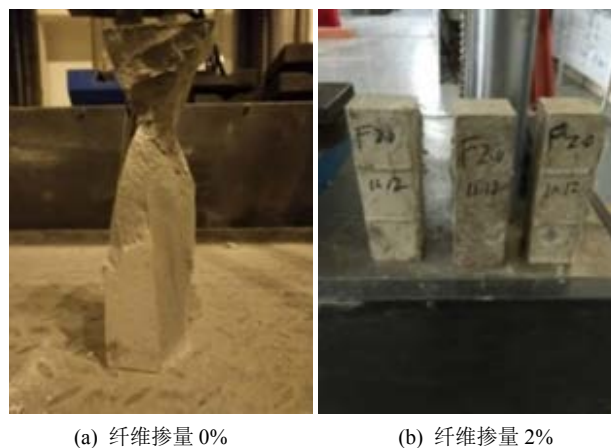


Figure 2. Compression failure mode of prism test block
图 2. 棱柱体试块受压破坏形态

3.1.2. 劈裂抗拉试验破坏形态

未加纤维的试块在进行劈裂抗拉试验时，开裂荷载较低，且裂缝一出现，荷载随即降低，试件发生破坏，破坏前无明显预兆，脆性较大，且裂缝较宽。而掺入纤维后的试块变形能力较未加纤维的试块有显著提高，脆性得到明显改善，且峰值荷载、峰值应变也均有较大提高，当荷载超过峰值后，能清晰地听到纤维被拔出时内部裂缝开展的声音，试件破坏时裂缝宽度较小；试块破坏后观察破坏界面，发现纤维从基材中发生了拔出和滑移。如图 3 所示。

3.2. 材料强度

该试验研究了 PVA 纤维体积掺量、砂胶比、7 d 和 28 d 龄期、水胶比对抗压强度和劈裂抗拉强度的影响，试验结果如表 3 所示。

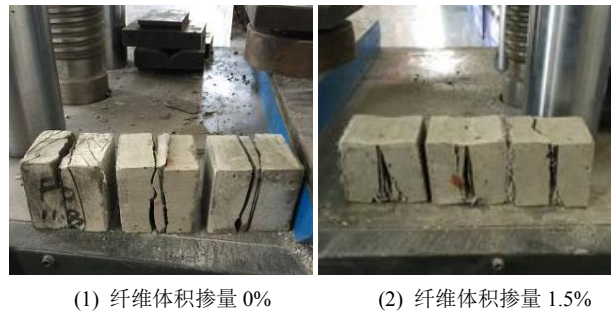


Figure 3. Tensile failure pattern
图 3. 受拉破坏形态图

Table 3. Compressive/tensile strength of test piece/MPa
表 3. 试件抗压/抗拉强度/MPa

试件编号	纤维体积率 /vol%	水胶比	砂胶比	7 d 龄期			28 d 龄期		
				f_{cu}	f_c	f_t	f_{cu}	f_c	f_t
F-0	0	0.55	0.8	17.3	15.5	0.35	32.0	28.5	0.41
F-0.5	0.5	0.55	0.8	16.8	14.3	2.06	30.5	27.3	2.61
F-1.0	1.0	0.55	0.8	14.7	13.8	2.38	27.6	25.7	3.32
F-1.5	1.5	0.55	0.8	14.5	13.3	2.72	27.5	25.5	3.46
F-2.0	2.0	0.55	0.8	13.3	12.4	2.82	27.0	24.1	4.77
W-0.50/S-0.8	1.5	0.50	0.8	16.3	13.9	2.84	31.3	28.9	3.85
W-0.45/S-0.8	1.5	0.45	0.8	21.7	19.2	3.12	36.1	31.6	4.14
W-0.55/S-1.1	1.5	0.55	1.1	16.1	13.3	2.51	30.6	28.6	4.23
W-0.50/S-1.1	1.5	0.50	1.1	17.6	17.2	2.66	38.6	34.3	4.40
W-0.45/S-1.1	1.5	0.45	1.1	22.5	19.8	2.95	46.7	43.7	4.83

由表 3 可知, 在 7 d 和 28 d 龄期下, 随 PVA 纤维体积掺量增加, PVA-ECC 立方体和棱柱体试块抗压强度均有所降低, 而劈裂抗拉强度显著提高。抗压强度降低的主要原因是加入纤维后, 纤维与基材的接触面数量增加, 同时复合材料的孔隙率也增大, 受压时首先在孔隙及接触面处形成微裂缝, 随着荷载的增加, 微裂缝逐渐发展, 纤维的桥连作用虽可限制后期裂缝的充分、快速发展, 提高试块的极限变形能力, 但由于孔隙与薄弱面的增加, 使得试块承受竖向荷载的能力下降, 故抗压强度有所降低。劈裂抗拉强度增加的主要原因是接近峰值荷载时, 纤维与基体之间不断地发生滑移, 这种滑移需要吸收大量的能量, 且随着纤维掺量的增加, 发生滑移所需的外部能量输入也随之增加, 故劈裂抗拉强度提高。随养护龄期的增长, PVA-ECC 的劈裂抗拉强度及抗压强度均提高, 且前 7 d 增长较快。随水胶比的增大, PVA-ECC 抗压强度和劈裂抗拉强度均降低。随砂胶比的增大, PVA-ECC 在 7 d 与 28 d 龄期的抗压强度均提高, 但其劈裂抗拉强度在 7 d 时减小, 在 28 d 时增大。

3.3. 强度换算关系

3.3.1. 不同龄期的强度换算

表 4 是 PVA-ECC 在 28 d 龄期与 7 d 龄期下 f_{cu} 的比值以及 f_c 的比值。

Table 4. Ratio of compressive strength at different ages
表 4. 不同龄期下的抗压强度比值

	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
龄期 28 d/7 d f_{cu}	1.85	1.82	1.88	1.90	2.03
	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	1.92	1.66	1.90	2.19	2.08
	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
龄期 28 d/7 d f_c	1.84	1.91	1.86	1.92	1.94
	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	2.08	1.65	2.15	1.99	2.21

根据以上试验结果, 进行线性回归, 得到 PVA-ECC 试块 7 d 龄期与 28 d 龄期抗压强度间的关系, 如公式(2-1)所示:

$$f_{28} = 1.95f_7 \quad (2-1)$$

图 4 表示出 20 组试验值与拟合曲线的关系, 由图可见, 拟合度较好。

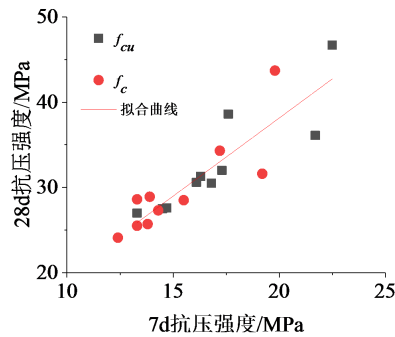


Figure 4. Relationship between compressive strength at 7 d and 28 d

图 4. 7 d 和 28 d 龄期下抗压强度间的关系

表 5 是 PVA-ECC 在 28 d 龄期与 7 d 龄期下劈裂抗拉强度的比值。

Table 5. Tensile strength relationship under different age
表 5. 不同龄期下的抗拉强度关系

	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
龄期 28 d/7 d	1.17	1.27	1.39	1.27	1.69
f_t	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	1.36	1.33	1.69	1.65	1.64

对试验数据进行回归, 得到 7 d 和 28 d 龄期下 PVA-ECC 试块劈裂抗拉强度间的关系式, 见公式(2-2):

$$f_{28} = 1.54f_7 \quad (2-2)$$

试验值和公式(2-2)表示的拟合曲线绘于图 5, 两者吻合度较高。

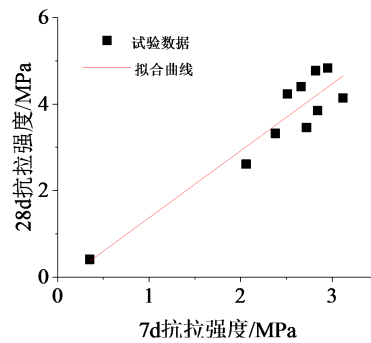


Figure 5. Relationship between tensile strength at different ages

图 5. 不同龄期下抗拉强度间的关系

3.3.2. 立方体抗压强度与轴心抗压及劈裂抗拉强度间的换算

由于受“环箍”效应影响程度不同，在其其它条件完全相同的情况下，相同材料的立方体抗压强度高于其棱柱体抗压强度。在本试验中，根据表 3 试验结果计算出 7 d 和 28 d 龄期下的 f_c 与 f_{cu} 的比值，如表 6 所示。

Table 6. Ratio relationship between f_c and f_{cu}

表 6. f_c 与 f_{cu} 比值关系

	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
7 d 龄期	0.90	0.85	0.94	0.92	0.93
$\frac{f_c}{f_{cu}}$	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	0.85	0.88	0.83	0.98	0.88
	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
28 d 龄期	0.89	0.90	0.93	0.93	0.89
$\frac{f_c}{f_{cu}}$	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	0.92	0.88	0.93	0.89	0.94

根据表 6 数据，利用线性回归得到立方体与棱柱体抗压强度间的关系如下：

$$f_c = 0.92f_{cu} \quad (2-3)$$

如图 6 所示，拟合曲线与试验结果吻合较好，且 28 d 龄期下棱柱体抗压强度与立方体抗压强度比值比 7 d 龄期时的上述比值吻合度更高。

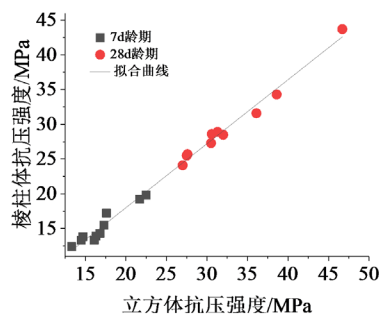


Figure 6. Relationship between prism and cube compressive strength

图 6. 棱柱体与立方体抗压强度间的关系

表 7 所示为 PVA-ECC 立方体抗压强度与劈裂抗拉强度间的比值。

Table 7. Ratio of f_t to $f_{cu}^{3/4}$

表 7. f_t 与 $f_{cu}^{3/4}$ 的比值

	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
7 d 龄期	0.04	0.25	0.32	0.37	0.40
$\frac{f_t}{f_{cu}^{3/4}}$	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	0.35	0.31	0.31	0.31	0.29
	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
28 d 龄期	0.03	0.20	0.28	0.29	0.40
$\frac{f_t}{f_{cu}^{3/4}}$	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	0.29	0.28	0.33	0.28	0.27

根据该试验结果进行线性拟合分析得到 PVA-ECC 劈裂抗拉强度与立方体抗压强度间的关系, 如下式所示:

$$f_t = \frac{\beta}{\alpha} f_{cu}^{3/4} \quad (2-4a)$$

7 d 龄期时:

$$\alpha = 1.395 - 0.302V_f \quad (2-4b)$$

$$\beta = 0.404 - 0.005f_{cu} \quad (2-4c)$$

28 d 龄期时:

$$\alpha = 1.627 - 0.45V_f \quad (2-4d)$$

$$\beta = 0.354 - 0.002f_{cu} \quad (2-4e)$$

式中 α 为 PVA 纤维影响系数; β 为强度影响系数; V_f 为纤维体积掺量, $0.5 \leq V_f \leq 2$ 。根据公式(2-4)计算的结果与试验值的比较见表 8。

Table 8. Ratio of calculated value to test value

表 8. 计算值与试验值比值

	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
7 d 龄期	—	1.04	0.95	0.96	1.05
$\frac{\text{计算值}}{\text{试验值}}$	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	0.98	1.01	1.10	1.08	1.08
	F-0	F-0.5	F-1.0	F-1.5	F-2.0
28 d 龄期	—	1.04	0.92	1.09	1.02
$\frac{\text{计算值}}{\text{试验值}}$	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	1.05	1.05	0.95	1.02	1.01

通过对比发现, 养护龄期 7 d 和 28 d 下计算值与试验值的比值均值分别为 1.02 和 1.01, 方差均为 0.002, 说明公式(2-4)计算精度较高, 能够满足实际工程需要。

4. 结论

(1) 随 PVA 纤维体积掺量的增加, PVA-ECC 抗压强度依次降低, 但降低幅度不大, 而劈裂抗拉强度显著提高。

(2) 随养护龄期增长, PVA-ECC 抗压强度与劈裂抗拉强度显著增加, 且前期强度的增长速率大于后期的增长速率。

(3) 随水胶比增大, 抗压强度和劈裂抗拉强度显著降低。

(4) 随砂胶比增大, PVA-ECC 在 7 d 与 28 d 龄期的抗压强度均提高, 但其劈裂抗拉强度在 7 d 龄期时减小, 在 28 d 龄期时增大。

(5) 建立了 PVA-ECC 在不同养护龄期下的强度换算关系、立方体抗压强度与棱柱体抗压强度及劈裂抗拉强度间的换算关系, 试验值与拟合值吻合度较高。

参考文献

- [1] Li, V.C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531-536.
- [2] 徐世焯, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 32-41.
- [3] 李艳, 刘泽军, 梁兴文. 高性能 PVA 纤维增强水泥基复合材料单轴受拉特性[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 322-330.
- [4] 高淑玲, 徐世焯. PVA 纤维增强水泥基复合材料拉伸特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, 47(2): 233-239.
- [5] 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), 2019, 30(1): 92-95.
- [6] 徐世焯, 蔡向荣, 张英华. 超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力 - 应变全曲线试验测定与分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 79-84.
- [7] 胡春红, 高艳娥, 丁万聪. 超高韧性水泥基复合材料受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 128-132+154.
- [8] 李艳, 刘泽军. 高韧性 PVA-FRCC 单轴受压力学性能及本构关系[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 606-612.
- [9] 李悦, 朱金才, 吴玉生. 纤维对水泥基材料力学性能的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 57-61.