

玄武岩纤维混掺聚乙烯醇纤维水泥基 复合材料性能研究*

Study on the Properties of Basalt Fiber Hybridizing with Polyvinyl Alcohol Fiber Cement-based Composite Materials

花 蕾^{1,2}

- (1. 同济大学浙江学院 嘉兴市土木与环境高性能功能材料重点实验室, 浙江 嘉兴 314051;
2. 同济大学浙江学院, 浙江 嘉兴 314051)

摘 要: 采用 3、6、9 mm 长的玄武岩纤维 (Basalt Fiber, BF) 按照 1:1 的比例与 6、9 mm 长的聚乙烯醇 (Polyvinyl Alcohol, PVA) 纤维混掺入水泥基体中制备了 BF/PVA 水泥基复合材料, 研究不同长度 BF、PVA 纤维混掺体系对水泥基材料力学性能的影响。结果表明: 纤维总掺量为 0.2% 时, BF/PVA 水泥基复合材料在 7、14 d 抗折、抗压均表现出良好的性能, 混掺 6 mm BF 与 6 mm PVA 纤维的试件 7、14 d 抗折强度分别达到 7.6、8.4 MPa, 与单掺 0.2% 的 6 mm PVA 纤维的试件相比增幅达到 26.67%、29.23%; 9 mm PVA 纤维与 3、6、9 mm BF 混掺体系中, 7、14 d 抗折强度均表现出明显的增强, 且抗折强度最优值出现在 9 mm PVA 纤维与 6 mm BF 混掺的试件, 其值分别达到了 7.9、8.9 MPa, 混掺效果最佳。

关键词: 聚乙烯醇纤维; 玄武岩纤维; 混掺; 水泥基复合材料; 力学性能

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0014-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.003

HUA Lei^{1,2}

- (1. Jiaxing Key Laboratory of High-performance and Functional Materials in Civil and
Environmental Engineering, Tongji Zhejiang College, Jiaxing 314051, China;
2. Tongji Zhejiang College, Jiaxing 314051, China)

Abstract: The hybridizing systems containing 3、6、9 mm Basalt Fiber (BF) and 6、9 mm Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber at the weight ratio of 1:1 were incorporated into the cement matrix to prepare BF/PVA cement-based composites. The influence of the different lengths of BF and PVA fiber hybridizing systems on the mechanical properties of BF/PVA cement-based composites was studied thoroughly. The results indicate that the BF/PVA cement-based composites curing for 7、14 days respectively containing 9 mm PVA fiber and 3、6、9 mm BF exhibit the good flexural and compressive properties by controlling the weight fraction of the total fibers within 0.2%. The flexural strength of the specimen containing with 6 mm BF and PVA fiber achieves 7.6、8.4 MPa curing for 7、14 days, respectively. Compared with the specimen with addition of 0.2% PVA fiber, the increase of the flexural strength of the 6P/6B achieves 26.67%、29.23% increase, respectively. In the hybridizing system of

* 基金项目: “创新嘉兴·优才支持计划”教育拔尖人才项目 (211205JYBJ002)。

作者简介: 花 蕾 (1978—), 女, 博士研究生, 教授, 研究方向: 建筑功能材料、复合材料。

收稿日期: 2023-09-29

9 mm PVA fibers and 3、6、9 mm BF, the significant enhancement could be observed in the flexural strength especially for the 6 mm BF hybriding with 9 mm PVA specimen. The flexural strength of 9P/6B could reach 7.9、8.9 MPa curing for 7、14 days, which shows the best hybriding performance of BF and PVA fibers.

Keywords: polyvinyl alcohol fiber; basalt fiber; hybrid; cement-based composite; mechanical property

0 引言

随着工程建设的发展，普通混凝土因其抗拉强度低、脆性大、易开裂等问题无法满足土木工程高性能材料的应用需求^[1-2]。前期大量研究表明，纤维的掺入可以明显抑制混凝土内部开裂和裂纹扩展，提高混凝土抗拉、抗压、韧性等物理性能^[3-4]。PVA 纤维具有良好的柔韧性以及亲水性，其应用研究主要集中在高延性、高韧性水泥基材料领域^[5]。研究表明，PVA 纤维长度过长时，其在水泥基体中分散性较差，易于缠绕、团聚，从而导致水泥基复合材料性能的下降^[6]；当 PVA 纤维长度较短时，其易于从水泥基中拔出，也会导致水泥基复合材料力学性能的下降^[7]。单掺一种纤维所提高的效果比较有限，而混掺纤维增强水泥基复合材料能够弥补单一纤维存在的缺点^[8]。当两种及以上混掺纤维掺量在合理范围内时，可表现出良好的协同效应，达到取长补短、相互补充的作用，从而改善水泥基复合材料的综合性能^[9-10]。BF 抗拉强度高达 4 150~4 840 MPa，同时耐酸耐碱，并且与水泥基有着相似的化学成分：SiO₂ 和 Al₂O₃，因此 BF 与水泥基具有良好的相容性和分散性，能提高水泥基材料的强度，延长使用寿命^[11-12]。理论上将 PVA 纤维与 BF 混掺（PVA/BF）后掺入水泥基体中能取长补短，达到复合增强的效果。近几年已有关于 PVA 与 BF 混掺协同提高水泥基复合材料性能的研究报道。陈晨^[13]研究发现混掺 BF 与 PVA 纤维的高性能混凝土强度表现出正混掺效应；于海洋^[14]研究发现在合适的水胶比和纤维混掺比例下，PVA/BF 水泥基复合材料表现出良好的协同效应；Zhang 等^[15]研究发现当水泥基中的 PVA 与 BF 混掺纤维掺量低于 0.4% 时，两种纤维可以表现出良好协同效应。但是前人并没有对不同长度 BF 与 PVA 混掺水泥基复合材料体系进行系统地研究。基于此，提出在混掺纤维总掺量不变的情况下，长度 3、6、9 mm 的 BF 与长度为 6、9 mm PVA 纤维混掺体系对

PVA/BF 水泥基复合材料抗压、抗折性能的影响，从而为 PVA、BF 纤维在土木工程领域的应用提供参考依据。

1 试验

1.1 试验材料

水泥选用 P·C 32.5 型复合硅酸盐水泥；砂选用标准砂；PVA 纤维的长度为 6、9 mm，物理性能见表 1；BF 的长度为 3、6、9 mm，其物理性能见表 2；减水剂为 CQJ-JSS 型聚羧酸减水剂，白色粉末状，减水率约为 16%~22%；拌合水为自来水。

表 1 PVA 纤维物理性能 Table 1 Physical properties of PVA fiber			
断裂强度 / (cN/dtex)	断裂伸长率 /%	弹性模量 /GPa	纤维长度 /mm
11	6.0~8.0	29.0	6、9

表 2 BF 物理性能 Table 2 Physical properties of BF			
纤维长度 /mm	密度/ (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	拉伸强度 /MPa
3、6、9	2.63~2.65	91~110	3 000~4 800

1.2 配合比设计以及试件制备

试件配合比为：水泥：砂：水：减水剂为 1:1.5:0.35:0.007。纤维掺量为水泥 + 标准砂 + 水的质量百分含量。根据配合比称取一定量的水泥加入搅拌锅后，在低速下干拌 5 min，将称量好的纤维缓慢撒入搅拌锅内与水泥一起低速干拌 5 min，再加入减水剂和水，低速搅拌 30 s，最后加入一定量的标准砂，高速搅拌 1 min 后停止搅拌。将水泥浆体倒入 40 mm×40 mm×160 mm 三联模具中，并将其固定在振实台上振实 1 min 再静置 24 h 后拆模，试件编号后放入养护室（温度：（20±1）℃，湿度：90%），养护 7、14 d 后取出后测试。纤维掺量见表 3。

1.3 流动性测试

根据 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》，对水泥胶砂的流动度进行测试。用卡尺测量胶砂底面互相垂直的两个方向直径，计算平均值。该平均值即为该组水泥基复合材料的流动度。

材料科学

表3 纤维掺量
Table 3 Fiber content

试件 编号	PVA /mm	BF /mm	PVA 掺量 /%	BF 掺量 /%	BF/PVA 总掺量 /%
空白					
6P-0.2	6		0.2		0.2
6P-0.4	6		0.4		0.4
6P-0.6	6		0.6		0.6
6P-0.8	6		0.8		0.8
9P-0.2	9		0.2		0.2
9P-0.4	9		0.4		0.4
9P-0.6	9		0.6		0.6
9P-0.8	9		0.8		0.8
3B-0.2		3		0.2	0.2
6B-0.2		6		0.2	0.2
9B-0.2		9		0.2	0.2
6P/3B	6	3	0.1	0.1	0.2
6P/6B	6	6	0.1	0.1	0.2
6P/9B	6	9	0.1	0.1	0.2
9P/3B	9	3	0.1	0.1	0.2
9P/6B	9	6	0.1	0.1	0.2
9P/9B	9	9	0.1	0.1	0.2

注：9P-0.6：“9”表示纤维长度为9 mm，“P”表示聚乙烯醇纤维，“0.6”表示水泥基中体纤维的质量掺量为0.6%；6P/9B：“6”表示聚乙烯醇纤维的长度为6 mm，“P”表示聚乙烯醇纤维，“9”表示玄武岩纤维的长度为9 mm，“B”表示玄武岩纤维；空白组为未掺纤维砂浆。

1.4 抗压、抗折强度测试

按照 GB 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》将试件分别养护至 7、14 d 后，测试抗折、抗压强度。每组测试 6 个试件的抗折强度和 12 个试件的抗压强度，测试结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 流动性分析

水泥砂浆流动性见表 4，分析对比如图 1 所示。未掺入纤维砂浆（空白组）在跳桌试验时，流动性较好，流动度为 263 mm。对于单掺 PVA 纤维水泥砂浆，掺入 0.2% 的 6 mm PVA 纤维后，6P-0.2 砂浆的流动度下降到 164 mm；当掺量为 0.8%，6P-0.8 流动度降到最低，为 109 mm。随着 9 mm PVA 纤维掺量的增加，水泥砂浆的流动度呈现显著地下降趋势，例如掺入 0.2% 的 9 mm PVA 纤维的 9P-0.2 砂浆流动度为 217 mm，而掺入 0.8% 的 9 mm PVA 纤维 9P-0.8 砂浆的流动度下降为 146 mm。其原因主要为 PVA 纤维的亲水性。PVA 纤维掺入水泥浆体后会在

表面吸附一定的水分，导致拌合水减少。同时，PVA 纤维在砂浆中容易团聚、缠结，降低了水泥浆体的流动度。6 mm PVA 纤维砂浆的流动度明显低于 9 mm PVA 纤维砂浆的流动度。同等掺量的前提下，6 mm PVA 纤维根数比 9 mm PVA 纤维根数量更多，大量的 PVA 纤维之间桥接形成网络状态后，阻拦作用更明显，导致了拌合后砂浆流动度的下降。

表4 水泥基复合材料的砂浆流动度
Table 4 The fluidity of the cement-based mortars

试件编号	流动度/mm
空白	263
6P-0.2	164
6P-0.4	150
6P-0.6	138
6P-0.8	109
9P-0.2	217
9P-0.4	203
9P-0.6	184
9P-0.8	146
3B-0.2	255
6B-0.2	250
9B-0.2	239
6P/3B	207
6P/6B	200
6P/9B	195
9P/3B	241
9P/6B	238
9P/9B	229

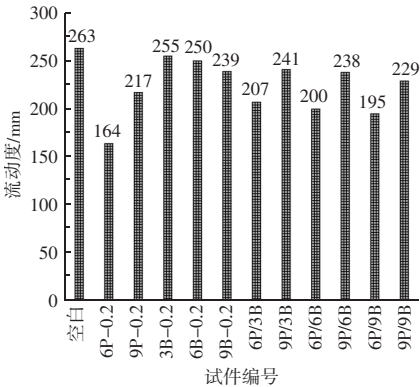


图1 水泥基复合材料砂浆流动度

Fig. 1 Fluidity of the cement-based mortars

PVA 与 BF 按照 1:1 混掺水泥砂浆的流动度介于两种不同长度、种类纤维水泥砂浆之间。例如 9P-0.2 砂浆的流动度为 217 mm，6B-0.2 砂浆的流动度为 250 mm，9P/6B 砂浆的流动度为 238 mm。掺入纤维后，砂浆流动性降低主要原因是大量的纤维在浆体经过搅拌分散后，互相交错分布，对砂浆起

到承托作用，减缓了骨料因自身重力作用下沉引起了砂浆流动度下降。

2.2 抗折、抗压性能分析

2.2.1 单掺PVA纤维水泥基复合材料抗折、抗压性能

单掺6、9 mm PVA纤维分别在水泥基中掺量为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%时，水泥基复合材料在7、14 d抗折、抗压强度见表5。与空白试件相比，单掺6 mm的PVA纤维对水泥基复合材料的抗折、抗压强度增强效果不明显，但掺入一定量的9 mm PVA纤维，其对水泥基复合材料抗折、抗压强度有一定程度的增强效果。例如，9P-0.4试件7 d抗折强度为8.3 MPa，抗压强度为55.8 MPa，与空白试件相比分别提升了7.14%、5.18%；9P-0.2试件14 d抗折强度为8.5 MPa，抗压强度为61.8 MPa，与空白试件相比分别提升了1.19%、2.48%。6 mm PVA纤维对水泥基复合材料没有明显的增强效果，其原因为纤维尺寸较短，纤维埋入水泥基长度较少，在一定载荷下，易于从硬化水泥基体拔出，导致试件力学性能的下降。通过6、9 mm PVA纤维增强水泥基材料的对比试验发现，纤维掺量相同时，纤维长度对水泥基复合材料的抗折、抗压强度影响明显，纤维越长，水泥基复合材料的抗折、抗压性能越好。

表5 水泥基复合材料7、14 d抗折、抗压强度
Table 5 Flexural strength, compressive strength of the cement-based composites curing for 7, 14 days

试件编号	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	7 d	14 d	7 d	14 d
空白	7.0	8.4	50.1	60.3
6P-0.2	6.0	6.5	31.4	40.8
6P-0.4	6.1	6.3	37.2	40.1
6P-0.6	6.0	5.9	36.5	36.1
6P-0.8	5.8	5.7	35.9	33.7
9P-0.2	7.5	8.5	52.7	61.8
9P-0.4	8.3	8.1	55.8	59.2
9P-0.6	6.7	7.0	40.4	47.2
9P-0.8	6.3	6.7	38.9	42.5
6P/3B	7.4	8.0	43.8	52.1
6P/6B	7.6	8.4	50.6	61.4
6P/9B	6.9	7.4	40.0	52.0
9P/3B	7.6	8.7	54.7	65.6
9P/6B	7.9	8.9	59.9	65.5
9P/9B	7.7	8.6	54.8	65.8

2.2.2 BF/PVA混掺水泥基复合材料抗折、抗压性能

选择0.2%作为混掺纤维掺入总量，研究3、6、9 mm的BF按照1:1比例与6、9 mm PVA混掺入水

泥基材料后，BF/PVA水泥基复合材料抗折、抗压性能的变化趋势。图2为水泥基复合材料7、14 d抗折强度对比图。6 mm的PVA与3、6、9 mm BF混掺水泥基复合材料中，BF可以显著地提高水泥基复合材料的抗折性能。例如，6P-0.2试件7、14 d抗折强度分别为6.0、6.5 MPa，掺入了3 mm BF后的6P/3B试件抗折强度提升到7.4、8.0 MPa，增幅为23.33%、23.07%；掺入6 mm BF的6P/6B试件在7、14 d抗折强度达到7.6、8.4 MPa，与6P-0.2水泥基复合材料试件相比增幅达到26.67%、29.23%。9 mm PVA与3、6、9 mm BF混掺体系中，7、14 d抗折强度均表现出明显的增强效果，且抗折强度最优值出现在9P/6B，达到了7.9、8.9 MPa，混掺效果最佳。上述结果表明BF混掺PVA体系的水泥复合材料抗折性能增强效果显著。但9 mm BF掺入9 mm PVA水泥基复合材料试件（9P/9B）的抗折强度出现了下降趋势。

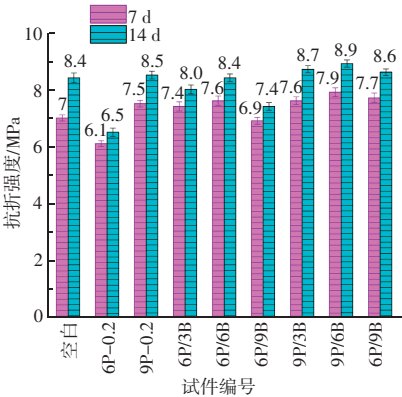


图2 水泥基复合材料7、14 d的抗折强度
Fig.2 Flexural strength of the cement-based composites curing for 7, 14 days

图3为水泥基复合材料7、14 d的抗压强度对比图。与单掺2%的6 mm PVA纤维水泥基复合材料6P-0.2抗压强度相比，6 mm的PVA纤维与3、6、9 mm BF混掺水泥基复合材料抗压强度增强比较显著，最优值出现在6P/6B试件，其在7、14 d抗压强度分别为50.6、61.4 MPa。9 mm PVA纤维与3、6、9 mm BF混掺体系中，BF纤维掺入也可以明显地提高9 mm PVA水泥基复合材料的抗压性能。与9P-0.2水泥基复合材料在7、14 d抗压强度相比，6 mm BF对9 mm PVA水泥基材料抗压增强效果最佳，即9P/6B水泥基复合材料在7、14 d抗压强度分别达到了

材料科学

59.9、65.5 MPa。

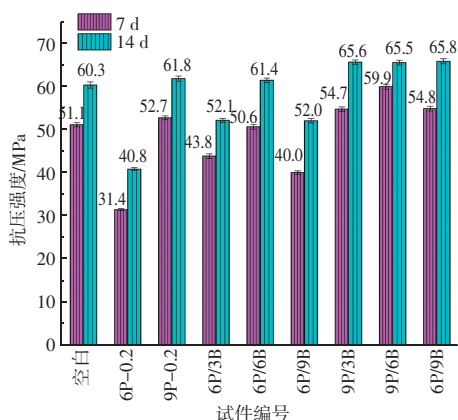


图3 水泥复合材料7、14 d的抗压强度

Fig.3 Compressive strength of the cement-based composites curing for 7、14 days

上述结果说明,通过混掺不同种类的纤维可以使得两种纤维进行“桥联”,实现他们在水泥基复合材料中的限裂和承载的功能,但并不是混掺的纤维越长,水泥基复合材料力学性能增强的效果越显著。

3 结论

(1) 通过6、9 mm PVA 纤维单掺增强水泥基材料的试验发现,纤维掺量相同时,纤维长度对水泥基复合材料的抗折、抗压强度影响明显。纤维越长,水泥基复合材料的抗折、抗压性能越好。

(2) 混掺纤维总掺量为0.2%时,3、6、9 mm BF 混掺9 mm PVA 纤维的水泥基复合材料在7、14 d 抗折、抗压均表现出良好的性能,特别是6 mm BF 混掺9 mm PVA 纤维水泥基复合材料的抗折、抗压性能增强效果最佳。

(3) BF 混掺进 PVA 水泥基体系后能明显改善水泥基复合材料的力学性能,特别是抗折性能。

参 考 文 献

[1] CHENG C W, PENG Z, JUAN W, et al. Influence of fibers on the mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete: A review [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 52: 104370.

[2] MONALDO E, NERILLI F, VAIRO G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering [J]. Composite Structures, 2019, 214: 246-263.

[3] PAUL S C, VANZIJL G P A G, AVIJA B. Effect of fibers on durability of concrete: A practical review [J]. Materials, 2020, 13 (20): 1-26.

[4] ZHENG Z H, FELDMAN D. Synthetic fibre-reinforced concrete [J]. Progress in Polymer Science, 1995, 20 (2): 185-210.

[5] 祝和意, 张少峰. PVA 纤维体积率对 PVA-EC 力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2018, 32 (18): 3266-3270.

[6] 丁聪, 任金明, 王永明, 等. 高延性水泥基复合材料用短切 PVA 纤维的长度优选研究 [J]. 材料导报, 2023, 37 (13): 21080025.

[7] 余保英, 周建伟, 孔亚宁, 等. PVA 纤维长度对超高韧性水泥基复合材料力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (11): 3425-3431.

[8] SAYYAD A S, SAYYAD R A. A review of research on fiber reinforced concrete [J]. Journal of Materials and Engineering Structures, 2023, 10 (4): 581-599.

[9] WANG D, JU Y, SHEN H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 464-473.

[10] 权长青, 焦楚杰, 杨云英, 等. 混掺纤维混凝土力学性能的正交试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (3): 363-370.

[11] XIE L, SUN X J, YU Z P, et al. Experimental study and theoretical analysis on dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105334.

[12] LI Y, ZHANG J P, HE Y Z, et al. A review on durability of basalt fiber reinforced concrete [J]. Composites Science and Technology, 2022, 225 (7): 109519.

[13] 陈晨. 玄武岩-聚乙烯醇纤维高性能混凝土高温力学性能试验研究 [D]. 沈阳: 辽宁工业大学, 2021.

[14] 于海洋. 聚乙烯醇-玄武岩纤维混掺增强水泥基复合材料力学性能研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.

[15] ZHANG Y, ZHENG Y X, DU C, et al. Hybrid effects of basalt and polyvinyl alcohol fibers on the mechanical properties and macromicroscopic analysis of low-heat portland cement concrete [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 608-632.