

基于声发射特征的混杂聚乙烯醇纤维混凝土拌合工艺试验研究

邹 经

(南昌航空大学科技学院, 江西南昌 330034)

摘要: 纤维的混杂是改善复合材料性能的有效方法, 通过混杂能获得比单掺一种材料更优的性能。但是不同纤维的混杂在增加纤维掺量的同时, 容易相互缠绕成团, 降低纤维的分散性能, 制约混杂纤维混凝土的发展。本文在对混杂纤维混凝土拌和工艺的研究基础上, 通过四组坍落度试验、纤维分散性试验、抗折试验等传统评价方式, 结合声发射试验监控构件的开裂过程, 综合对比了混杂聚乙烯醇纤维混凝土先掺法、后掺法和新型混合掺工艺在新拌混凝土工作性能、纤维分散性能、混凝土力学性能和材料阻裂性能的影响, 试验表明采用混合掺工艺对混杂纤维混凝土各项性能均有所改善, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 混杂; PVA 纤维; 混凝土; 拌和工艺

纤维的掺入会降低混凝土拌合物的流动性, 增加拌合物的搅拌难度, 致使纤维分散效果差降低混凝土性能, 良好的分散性对保证纤维混凝土使用性能至关重要。在不改变原材料的情况下, 纤维的分散性能主要取决于拌和工艺的不同, 拌和工艺的优劣直接决定了纤维混凝土的使用性能。

为了优化混凝土性能, 研究人员通常设计将不同性质的纤维混杂在一起, 复合不同纤维的特点, 提升混凝土性能。然而多种纤维的混杂, 意味着纤维掺量增加, 混凝土和易性降低, 同时不同性质的纤维容易缠绕结团, 进一步制约纤维在混凝土中的应用效果。目前关于纤维混凝土的分散拌和工艺主要以单一纤维为主, 对于多种纤维混杂的拌和工艺研究还不足, 相关研究者基于传统的纤维混凝土拌和工艺, 设计了适用混掺纤维的混合掺法, 本文设计将两种不同长度的 PVA 纤维混杂, 比较该混合掺法和传统纤维混凝土拌和工艺对新拌混凝土工作性能、纤维分散性、抗折强度, 抗裂性能的影响差异, 并对该混合掺法进行效能评价。

一、试验方案

为了评价不同施工工艺对混掺纤维混凝土各方面性能的影响, 设计在混凝土中掺入两种不同长度的 PVA 纤维, 比较先掺、后掺和混合掺法对混凝土工作性能、纤维分散性能、力学性能以及阻裂性能的影响。良好的混凝土工作性能是保证混凝土发挥其使用性能的前提, 对于混杂纤维的拌合性能评价, 目前常见通过纤维分散性能试验或者测试采用不同工艺试件的力学性能试验进行比较分析, 为了综合评价不同拌合工艺的性能差异, 本文采用坍落度来评价不同拌合工艺的混杂 PVA 纤维新拌混凝土工作性能, 采用水洗法测试采用不同施工工艺纤维的分散性能和效果, 通过抗折试验测试不同拌合工艺混杂 PVA 纤维混凝土的常规力学性能, 通过声发射仪监测抗弯试件破坏过程, 比较不同拌合工艺混杂 PVA 纤维混凝土断裂过程中的阻裂性能。

实验基准混凝土设计强度为 C30, 水胶比 0.48, 砂为中砂, 粗骨料为 5 ~ 20mm 碎石, 基准混凝土设计坍落度为 180mm, 减水剂采用聚羧酸减水剂, 掺量为胶凝材料的 2%, 粉煤灰掺量采用等量取代法, 取代量为 0.17, 水泥强度等级为 42.5, 具体配比见表 1.1, 采用的纤维性能参数如表 1.2:

表 1.1 混凝土配合比

水泥	粉煤灰	水	砂	石子	减水剂
285.0	60.0	167.0	940.0	955.0	7.0

表 1.2 PVA 纤维参数

种类	长度 (mm)	直径 (μm)	长径比	弹模 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	密度 (g/cm^3)
PVA1	6	14	429	38.22	1592.5	1.29
PVA2	12	40	450	42	1600	1.29

PVA1	6	14	429	38.22	1592.5	1.29
PVA2	12	40	450	42	1600	1.29

先掺法先将纤维、砂、石搅拌均匀后, 再将胶凝材料、减水剂一起搅拌均匀, 最后加入水搅拌均匀; 后掺法先将砂石和胶凝材料搅拌均匀后, 再加入水一起搅拌均匀, 最后加入短切纤维搅拌均匀; 混合掺法先将砂和短纤维一起干拌均匀, 然后加入部分水和外加剂搅拌, 再加入水泥搅拌均匀, 然后加入碎石和长纤维干拌后的混合物一起搅拌, 最后加入剩余水搅拌均匀, 如图 1.1 所示。总共四组试验, 一组不掺纤维的对照组试验, 另外三组试验分别为采用三种不同施工工艺的混杂纤维混凝土。其中每组工艺一个坍落度实验、一个水洗法实验, 一个抗折实验, 一个声发射试验。

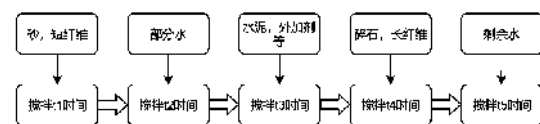


图 1.1 混杂纤维混凝土拌合工艺

抗折实验依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB-T 50081-2002 进行, 试验加载装置为浙江辰鑫机械设备有限公司生产的 30t 数显压力试验机 (YES-300), 声发射试验的抗弯加载装置为 30t 液压万能试验机 (WE-30), 控制恒定位移加载, 加载速度为 0.05mm/min。

声发射采集仪器为北京声华兴业科技有限公司生产的 SAEU2S 5 通道声发射检测仪, 传感器为 5 个谐振频率为 150kHz 的压电换能器, 用凡士林与梁相应部位耦合在一起, 五个传感器分别布置在距切口 100mm 位置的三个侧面上, 如图 1.2。单个通道最大采样率 10M 点/秒。信号经前置放大器增益 40dB, 参数门限设置为 40dB。

抗弯试件尺寸为 515 × 100 × 100mm, 试件在养护 26d 后, 在中间位置切一个 50mm 深的切口, 传感器布置如图 1.2 所示:

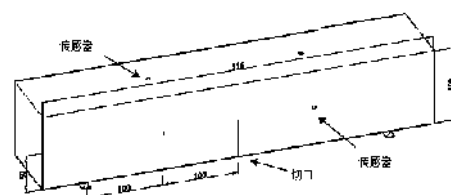


图 1.2 抗弯试件尺寸及传感器布置 (mm)

2. 试验结果分析

混杂纤维新拌混凝土工作性能试验、纤维分散性能试验以及抗折试验结果如表 2.1, 可见, 由于纤维的掺加, 对混凝土工作性能影响较明显, 大幅降低混凝土坍落度, 降低新拌混凝土和易性,

而采用不同拌和工艺对混凝土工作性能的影响差异不大，相比而言，采用混合掺法对混凝土工作性能降低的幅度略小。

表 2.1 部分试验结果汇总

序号	拌和方法	坍落度 mm	纤维分散效率	抗折强度 MPa
1	对照组	170	--	5.44
2	先掺	12	0.53	5.82
3	后掺	10	0.71	6.13
4	混合掺法	20	0.83	6.22

纤维分散效率采用水洗法测得，三种拌和方法测试得到结果差异较大，以混合掺法得到的纤维分散效率最高，优于后掺法，后掺法分散效率最差，说明后掺和采用混合掺法对纤维分散效果较好。由抗折试验可见，掺加纤维对抗折强度均有一定提升，采用混合掺法拌和方法提升效果最优，提升率达 14%，后掺提升近 13%，两者差异不大，后掺法只比基准混凝土强度提升了 7%。从图 2.1 可见，纤维分散效率和抗折强度呈近似线性关系，说明纤维分散性能对抗折强度的影响较大。

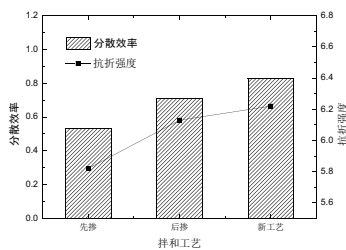


图 2.1 不同拌和工艺纤维分散效率与抗折强度

采用声发射仪器采集抗弯试件断裂全过程产生的声信号，根据声信号持续时间等特征筛选出不同种类破坏信号，分析得到纤维混凝土内不同破坏机制对应的声发射信号特征如表 2.2 所示。

表 2.2 PVA 纤维混凝土声发射特性

破坏机制序号	破坏方式	持续时间 $\mu.s$	振幅峰值 dB	振铃比
1	初始缺陷的开裂与聚合	0-35	40	1
2	微裂纹扩展	35-60	44	4
3	细集料与水泥基体界面开裂	60-130	46	8
4	粗集料与水泥基体界面开裂	130-220	49	16
5	细观裂纹扩展	220-355	54	28
6	宏观裂纹扩展	355-555	58	38
7	粗集料破坏	555-800	62	54
8	PVA 纤维拔出	800-3000	66	60
9	PVA 纤维断裂	3000-7000	70	80

注：表格中振铃比指若干个声发射信号的振铃数之和与事件数的比值。

为了更直观的了解混凝土内不同尺度结构破坏随加载进程的变化趋势，根据各破坏类型尺度的不同，将混凝土中的各种破坏机制按照尺度的不同，分为微观破坏、细观破坏和宏观破坏三类：微观破坏主要包括混凝土内初始缺陷和孔隙的开裂、聚合以及由此引发的微观裂纹扩展破坏，尺寸多为纳米层次；细观破坏包括细集料与基体界面的开裂以及细观裂缝扩展破坏，为微米层次；宏观破坏为细观裂缝进一步发展汇聚的结果，主要为宏观裂缝的扩展破坏以及粗集料和纤维的破坏，此层次破坏已经肉眼可见，为毫米层次的破坏。

混凝土中不同尺度裂缝的开裂与不同尺度结构的破坏两者性质是不同的，裂缝的开裂和发展是一个发展过程，而混凝土内部结构的破坏是脆性的，相比裂缝的发展而言是瞬时的。但二者也

是存在联系的，不同尺度裂缝的发展依赖混凝土不同尺度结构的不断破坏而发展，声发射仪器记录的为混凝土内部不同尺度结构破坏的信号，由此可以通过分析混凝土内各尺度结构的破坏与裂缝发展的关系由此分析混凝土内不同尺度裂缝的发展形式。

表 2.3 各破坏类型声发射事件数量统计

拌和工艺	微观破坏		细观破坏		宏观破坏		发生总数
	发生数	占比	发生数	占比	发生数	占比	
对照组	2033	0.75	515	0.19	162	0.06	2710
先掺法	7707	0.74	2083	0.20	625	0.06	10415
后掺法	8780	0.55	5427	0.34	1756	0.11	15963
混合掺法	7628	0.40	8391	0.44	3242	0.17	19071

由表 2.3 可知，不同拌和方法对各类型破坏发生的数量和比例影响较明显。纤维的掺加增加声发射事件的发生总数，说明由于纤维的限制，混凝土抗裂能力提高，抗裂面积增大，增大断裂耗能。在不掺加纤维的对照组中，随着破坏结构尺寸越大，其发生数量和占比都变小；掺加纤维后，微观破坏占比降低，细观和宏观破坏的占比都得到不同程度的提高，说明纤维主要提高细观和宏观结构的阻裂能力。

其中，先掺法由于纤维的掺入，大幅增加混凝土断裂过程各类型破坏发生数量，但对三者的比例影响不大；采用后掺和混合掺法不仅大幅增加各类型破坏发生数量的同时，对细观和宏观破坏发生的增加幅度更大，细观和宏观破坏发生占比增大，其中又以混合掺法对细观和宏观破坏发生占比增加幅度更大。由此可见，相比先掺法，混合掺法充分发挥了 PVA 纤维的阻裂作用，提高细观和宏观结构的阻裂能力，而先掺法和素混凝土各类型破坏占比相似，变化不大，说明采用先掺法的纤维没有充分分散，发挥其阻裂作用，而混合掺法无论是声发射事件总数还是对细观和宏观破坏占比的提升来说都要优于先掺和后掺法。由此可见三种拌和方法中，采用混合掺法对纤维的分散效果最佳，能充分发挥纤维在混凝土结构中的阻裂作用，后掺法其次，先掺法效果最差。

三、结论

本文比较了三种混杂 PVA 纤维混凝土拌和工艺对新拌混凝土工作性能、纤维分散效率、抗折强度以及断裂过程的阻裂性能，得到以下结论：

采用后掺法和混合掺法组对新拌混凝土工作性能降低效果略低于先掺实验组；混合掺法和后掺试验组测得纤维分散效率较好，先掺分散效率较差，三种不同拌和工艺对抗折强度的影响和纤维分散性能相关，混合掺和后掺相比素混凝土分别提升 14% 和 13%。

通过声发射试验测试了抗弯试件断裂过程中产生的各个尺度的破坏发生数量，表明掺加纤维能增加混凝土细观破坏和宏观破坏发生占比，提高混凝土细观和宏观结构的阻裂能力，其中采用混合掺法对细观和宏观破坏发生数量的提升最明显，充分发挥了纤维的阻裂作用，对混凝土抗裂性能改善效果最好。

综上，新型拌和方法优于传统的先掺法和后掺法，能有效提升纤维的分散性能，抗折强度以及阻裂性能，可以应用于不同长度的聚乙烯纤维混杂的纤维混凝土工程实践中。

参考文献：

[1] 刘宾. 钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土力学性能及耐久性试验研究 [D]. 辽宁工业大学, 2019.
 [2] 赵雅明, 张明飞, 张振, 等. 混杂纤维增强高强混凝土性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (07): 2299-2307.
 [3] 朱从香, 徐俊. 基于声学特性的混杂纤维混凝土高温损伤行为试验 [J]. 水电能源科学, 2023, 41 (07): 184-187+192.