

混杂纤维混凝土断裂性能试验研究

Experimental Study on Fracture Performance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete

唐优秀, 王中荔

(广西工业职业技术学院, 南宁 530001)

摘要: 为了研究不同掺量、长度、形状、类型的混杂纤维混凝土的断裂性能, 制备掺入聚丙烯纤维、钢纤维混凝土试件, 采用三点弯曲试验研究不同掺量、长度、形状、类型等纤维混凝土的断裂性能。结果表明: 与基准试件相比, 0.9 kg/m^3 掺量的聚丙烯纤维的抗断裂性能最佳; 掺入 12 mm 长度的聚丙烯纤维的混凝土抗断裂性能最佳; 聚丙烯纤维乱向分散, 黏结力较强, 0.3% 体积掺量的钢纤维的断裂性能最佳; 掺入 3 cm 钢纤维混凝土的裂纹扩展范围最小; 弓字型钢纤维增强混凝土结构的裂缝扩展复杂程度最高。研究成果可为混凝土力学性能优化提供借鉴与参考。

关键词: 纤维改良; 自密实混凝土; 配合比; 性能; 试验

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0033-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.007

TANG Youxiu, WANG Zhongli

(Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China)

Abstract: In order to study the fracture properties of mixed fiber reinforced concrete with different dosages, lengths, shapes, and types, specimens of polypropylene fiber and steel fiber reinforced concrete were prepared, and three-point bending tests were conducted to investigate the fracture properties of fiber-reinforced concrete with different dosages, lengths, shapes, and types. The results showed that compared with the reference specimen, the polypropylene fiber with a dosage of 0.9 kg/m^3 had the best fracture resistance; the concrete with a length of 12mm polypropylene fibers has the best fracture resistance; Polypropylene fibers are randomly dispersed and have strong adhesion. Steel fibers with a volume fraction of 0.3% have the best fracture performance; the crack propagation range of concrete with 3cm steel fiber added is the smallest; The crack propagation complexity of bow shaped steel fiber reinforced concrete structures is the highest. The research results can provide reference and guidance for optimizing the mechanical properties of concrete.

Key words: improvement of fibers; self compacting concrete; mix proportion; performance; experiment

0 引言

现代工程结构(如大跨桥梁、海上平台、抗震结构、军事防护工程)对混凝土材料的性能要求日益严苛,为了提高混凝土的弯拉强度和韧性,现代工程结构研究领域进行了大量的混凝土及其增强材料的制备与应用,例如胶凝材料、金尾矿砂等^[1-2]。同样,纤维的掺入可以显著改善混凝土的力学性能,抑制混凝土在受力过程中裂缝的萌生和扩展,提高混凝土的抗

作者简介: 唐优秀 (1985—), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 土木工程。

通信作者: 王中荔 (1983—), 女, 研究生, 讲师, 研究方向: 建筑工程技术。

收稿日期: 2025-01-14

材料科学

拉强度、抗弯强度和韧性。但是单一纤维（如仅加钢纤维或仅加聚丙烯纤维）往往只在某个特定尺度上发挥作用，存在局限性。需要进一步将不同长度、形状、类型的纤维复合使用，目的是在混凝土制备的不同阶段实现混杂材料的高质量协同效应。

众多学者定量研究了如何在不同配合比下显著提高混合纤维混凝土的性能。如，张利等^[3]对钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维改良混凝土开展了坍落度、干密度、立方体抗压强度以及劈裂抗拉试验；刘远祥等^[4]在水泥中掺入适量低碳复合辅助性胶凝材料，改善胶凝材料体系的工作性，提高了胶砂 7、28 d 抗压强度；张淑云等^[5]通过扫描电子显微镜 (SEM) 对比研究了自密实轻骨料混凝土和机制砂自密实轻骨料混凝土碳化前后的微观结构；王冲等^[6]基于不同的矿物掺合料种类和配合比，研究其对混凝土各项性能参数的影响；罗佳乐等^[7]结合国内外研究现状，分别介绍再生混凝土在冻融和硫酸盐冻融循环条件下的力学性能破坏机理和影响因素；Liu 等^[8]通过理论分析和试验研究，从膏体、砂浆、混凝土三个层面研究了填充层混凝土的稳定性；Shobana 等^[9]在混凝土中添加芽孢杆菌，探索生物矿化沉淀碳酸钙改性混凝土；胡世冲^[10]开展了混凝土的配合比设计与性能分析，明确了流动性、水胶比、浆骨比、砂率等因素对混凝土性能的影响；易敏等^[11]说明了应用自密实机制砂混凝土进行工程建设时，对于耐久性能跟力学性能的配比需求和应用需求；秦大强等^[12]采用再生粗骨料和矿物掺合料制备了再生混凝土，结果表明矿物掺合料的火山灰反应可改善再生混凝土力学性能；郑传磊等^[13]采用快速冻融法研究了再生粗骨料替代率对聚丙烯纤维增强混凝土抗冻性能的影响；黄艳冬等^[14]探讨了聚丙烯纤维不同掺量及长度条件下混凝土的力学性能和工作性能差异。

现有研究多聚焦于纤维对混凝土力学性能的影响，对纤维长度、形状、类型对纤维分散性调控、混凝土抗裂性能和断裂性能研究较少，为此，提出混杂纤维混凝土断裂性能试验研究。采用断裂韧性

试验与 SEM 微观形貌分析，从宏观和微观视角，揭示纤维空间分布对抗压强度与裂缝扩展的调控规律，为混杂纤维混凝土的断裂性能研究提供了更为全面和深入的理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥采用 P·II 42.5 硅酸盐水泥，其物理力学性能见表 1；掺合料选用 I 级粉煤灰，密度与表面积适中，水泥与粉煤灰化学组成见表 2；粗骨料为花岗岩级配石子，表观密度为 2 640 kg/m³；细骨料选取机制砂，含泥量为 2.0%，表观密度高于粗骨料，骨料粒径分布如图 1 所示；减水剂选用聚羧酸系高性能减水剂；纤维材料包括聚丙烯纤维和钢纤维，其中聚丙烯纤维为束状单丝，抗拉强度超过 385 MPa，弹性模量较高，纤维长度为 18~48 μm，拉伸极限超过 15%，纤维长度为 6、9、12 mm，公定回潮率为 0.03%，干断裂强度为 3.5 GPa，具有极高的抗酸碱性和大于 1 650 ℃ 的熔点；钢纤维分为波纹型、哑铃型和弓字型三种类型，波纹型和哑铃型钢纤维长 32 mm，弓型钢纤维长 50 mm，三种纤维抗拉强度均为 600~700 MPa，直径均为 0.8~1.0 mm。

1.2 试件制备

基准组试件按水泥:粉煤灰:砂:石为 1:0.3:1.5:1.8，水胶比 0.32。混杂纤维组试件在基准试件配合比的基础上，采用“等体积替代”原则，掺入混杂纤维，代替相应体积的砂率。先投入砂、石、纤维进行干拌，后加入水泥、粉煤灰等胶凝材料继续搅拌，最后加入水和聚羧酸系高性能减水剂，搅拌指定时间后出料、成型。应用与基准组试件相同尺寸的试模进行浇筑和振捣。所有试件标准养护至指定龄期测试。

表 1 P·II 42.5 硅酸盐水泥性能
Table 1 Main technical indexes of P·II-42.5 Portland cement

比表面积 /(m ² /kg)	标准稠度 用水量/L	凝结时间 /min		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
352	26.1	110	150	7.1	9.8	30.5	50.4

表 2 P·II 42.5 硅酸盐水泥和粉煤灰化学组成
Table 2 Chemical composition of P·II-42.5 Portland cement and fly ash

材料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	其他	损失
水泥	21.86	4.45	2.35	63.51	1.67	0.55	0.26	2.91	0.11	0.44	1.89
粉煤灰	45.43	24.36	9.70	5.23	1.46	0.23	0.36	1.03	—	0.32	11.88

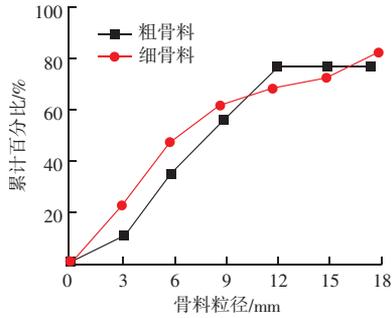


图1 骨料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of aggregate

1.3 试验方法

断裂性能指标测试：依据 GB/T 50082—2024《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》作为标准，利用三点弯曲试验法获得曲线；依据 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》，采用万能试验机对混杂纤维混凝土的断裂性能进行测试；

微观形貌指标测试：使用精密切割进行断裂切口取样，通过触控显示屏确定电机荷载状况，判别宏观裂缝周围的微裂缝，按照平行/水平两个方向进行切割，测试试件抑制微裂缝扩展的性能。利用扫描电镜获取微裂缝图像，经灰度 IPP 图像处理后统计微裂缝的微观形貌特征。

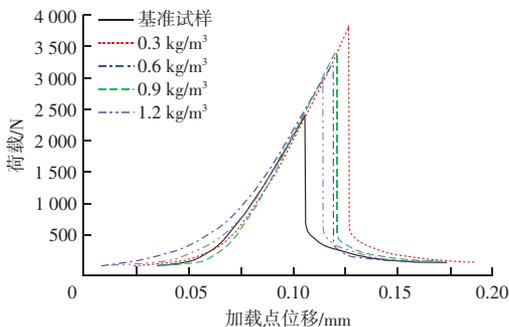
2 结果与分析

2.1 聚丙烯纤维性能

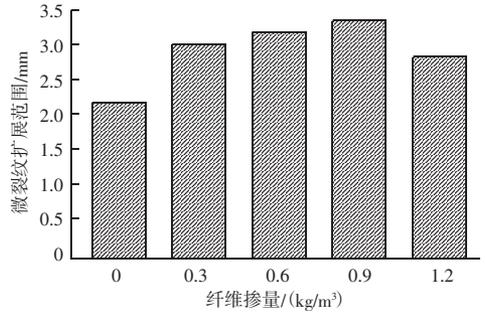
2.2.1 断裂性能

混杂纤维组中，分别掺入 0.3、0.6、0.9、1.2 kg/m³ 的聚丙烯纤维，对照基准组试件。不同掺量聚丙烯纤维断裂性能测试结果如图 2 所示。

由图 2 可知，不同掺量聚丙烯纤维均会增加试件的极限荷载，与基准试件相比，掺加聚丙烯纤维的砂浆荷载-位移曲线面积有所增加，但随着掺量增



(a) 荷载-位移曲线



(b) 微裂纹扩展结果

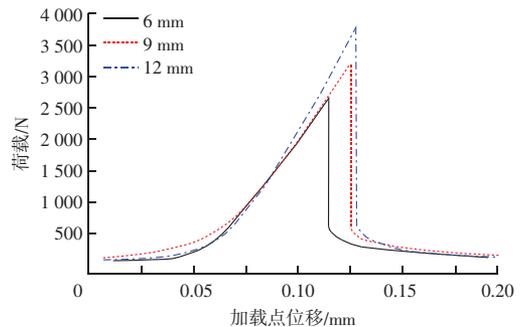
图2 不同掺量聚丙烯纤维断裂性能测试结果

Fig. 2 Test results of fracture properties of polypropylene fibers with different dosages

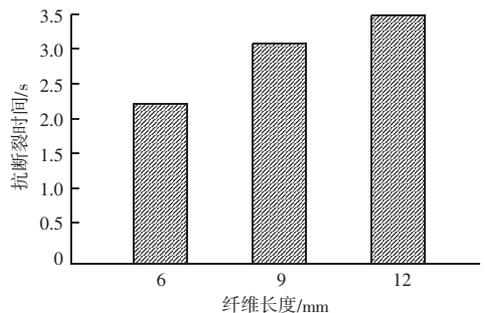
加，0.9 kg/m³ 掺量的聚丙烯纤维的抗断裂性能最佳，较基准试件提升了 12.5%，因此掺入 0.9 kg/m³ 的聚丙烯纤维的混凝土抗断裂性能最佳。

在 0.9 kg/m³ 的聚丙烯纤维掺量下，分别单掺 6、9、12 mm 不同长度的聚丙烯纤维，得到不同长度聚丙烯纤维混凝土断裂性能测试结果，如图 3 所示。

随着聚丙烯纤维长度的增加，砂浆断裂的时间增长，荷载-位移曲线面积扩大，说明掺入长度与掺量均对混凝土断裂性能有一定影响，且掺入 12 mm 长度的聚丙烯纤维的混凝土抗断裂性能最佳。



(a) 荷载-位移曲线



(b) 抗断裂时间

图3 掺入不同长度聚丙烯纤维混凝土断裂性能测试结果
Fig. 3 Test results of fracture performance of concrete mixed with polypropylene fibers of different lengths

材料科学

2.1.2 微观形貌

掺入 0.9 kg/m^3 掺量和 12 mm 长度的聚丙烯纤维后, 聚丙烯纤维混凝土截面过渡区形貌如图 4 所示。

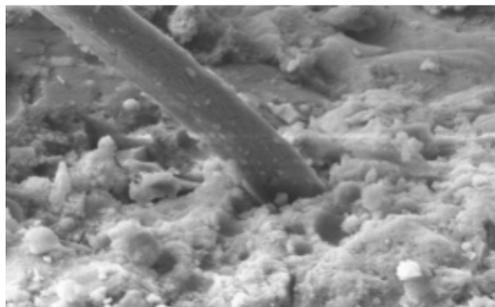


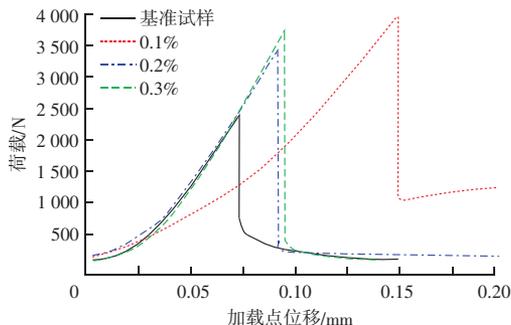
图 4 聚丙烯纤维混凝土截面过渡区形貌
Fig. 4 Appearance of transition zone of polypropylene fiber concrete section

聚丙烯纤维乱向分散于混凝土中, 与截面存在较强的黏结力, 说明 0.9 kg/m^3 掺量和 12 mm 长度的聚丙烯纤维能有效抑制混凝土的微裂缝扩展。

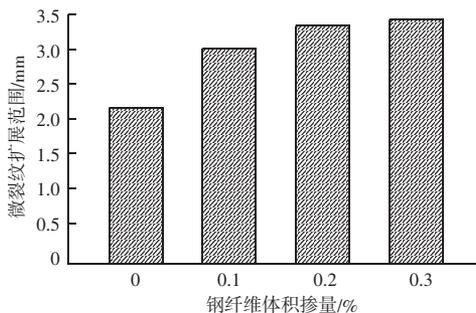
2.2 钢纤维

2.2.1 断裂性能

混杂纤维组中, 分别掺入 0.1% 、 0.2% 、 0.3% 体积的钢纤维, 与基准试件相比, 不同掺量钢纤维混凝土断裂性能测试结果, 如图 5 所示。



(a) 砂浆荷载-位移曲线



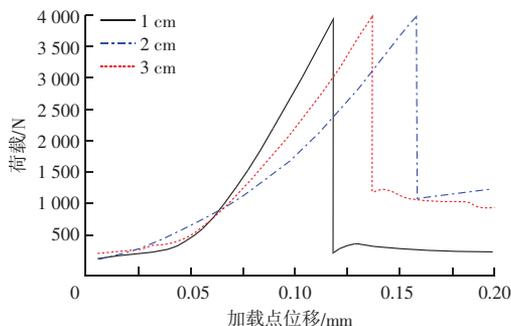
(b) 砂浆的微裂纹扩展结果

图 5 不同掺量钢纤维混凝土断裂性能测试结果

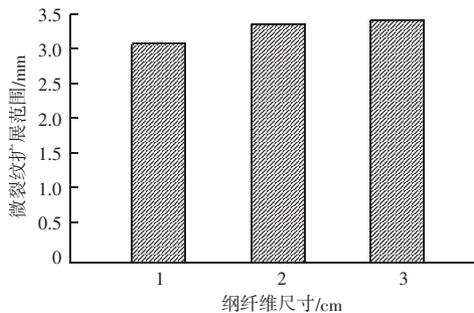
Fig. 5 Test results of fracture performance of steel fiber reinforced concrete with different dosages

当钢纤维体积掺量增加时, 微裂纹扩展范围随之增加, 抗断裂性能增强, 这表明掺入钢纤维不仅提高了混凝土的延性, 使混凝土在破坏过程中能够承受更大的变形, 而且有效地抑制了裂纹的扩展, 增强了混凝土的抗断裂能力。而在加载点位移达到 0.2 mm 时, 0.3% 体积掺量的混凝土仍能承受约 1500 N 的荷载, 而基准试件此时几乎丧失了承载能力, 提升了约 65% 的承载性能。说明 0.3% 体积掺量的钢纤维混凝土断裂性能最佳。

在 0.3% 体积掺量下, 单掺 1 、 2 、 3 cm 不同长度的钢纤维, 掺入不同长度钢纤维混凝土断裂性能测试结果如图 6 所示。



(a) 荷载-位移曲线



(b) 微裂纹扩展结果

图 6 掺入不同长度钢纤维混凝土断裂性能测试结果

Fig. 6 Test results of fracture performance of steel fiber reinforced concrete with different lengths added

随着加载点位移的增加, 3 cm 钢纤维混凝土对应的曲线上升斜率相对较大, 说明在相同位移增量下, 3 cm 钢纤维增强的砂浆能更快地承担更多荷载, 混凝土刚度表现较好。而在极限荷载之后, 3 cm 钢纤维混凝土对应的曲线下降相对较缓, 这意味着该混凝土在达到极限荷载后, 仍能在一定位移变化范围内保持相对较高的承载能力。而掺入 3 cm 钢纤维混凝土的裂纹扩展范围最小, 较 1 cm 和 2 cm 长度的钢纤维, 断裂性能提升了 10.7% 和 16.7% , 能更好

地在砂浆基体中形成有效的三维阻裂网络，延缓裂纹扩展。说明在钢纤维体积掺量为 0.3% 时，3 cm 长度的钢纤维能使混凝土获得相对更优的断裂性能。

2.2.2 微观形貌

掺入 0.3% 体积掺量，长度为 32 mm 波纹型和哑铃型钢纤维和长度为 50 mm 弓字型钢纤维后，钢纤维混凝土截面过渡区形貌如图 7 所示。



图 7 钢纤维混凝土截面过渡区形貌

Fig. 7 Morphology of transition zone in steel fiber reinforced concrete section

钢纤维混凝土截面过渡区内仍存在相连的钢纤维结构，裂缝扩展复杂程度由波纹型、哑铃型向弓字型逐渐增加，而波纹型纤维通过塑性变形耗能，哑铃型纤维通过端部脱粘与拔出过程吸收能量，弓字型纤维则通过大变形与空间网架作用实现多重耗能机制。这一过程显示在微裂缝阶段，钢纤维即参与受力，有效延缓主裂缝形成，使从脆性断裂向准韧性断裂转变，抗断裂性能得到改善。

3 结论

混凝土断裂行为是一个受多因素耦合影响的复杂力学过程。为了研究纤维的类型、长度、体积掺量对断裂性能的影响，进行了混杂纤维混凝土断裂性能的三点弯曲试验，得到以下主要结论：

(1) 掺入 12mm 长度的 0.9 kg/m^3 的聚丙烯纤维的混凝土抗断裂性能最佳，能进一步优化微裂缝扩展抑制效果，减少材料中的微裂缝面积。

(2) 掺入 3 cm 长度的 0.3% 体积的钢纤维的混凝土抗断裂性能最佳，抗断裂性能提升了 10.7% 和 16.7%，有助于提升混凝土结构的耐久性和服役寿命。

(3) 纤维的掺入能显著改变混凝土的微观结构，

小长度纤维和弓字型纤维在抑制微裂缝扩展和增强界面粘结性能方面表现更佳。纤维空间分布对抗压强度与裂缝扩展的调控规律是由波纹型、哑铃型向弓字型逐渐增加。

参 考 文 献

- [1] 张磊. 不同胶凝材料用量下自密实混凝土力学性能与氯离子扩散系数研究 [J]. 江西建材, 2023 (11): 57-59.
- [2] 任劲滔, 胡冗冗, 黄炜, 等. 增强型砂加气混凝土材料性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (12): 4254-4261.
- [3] 张利, 雷波. 纤维增强自密实轻质混凝土墙板配合比设计及力学性能研究 [J]. 粘接, 2023, 50 (5): 95-98
- [4] 刘远祥, 杨婷丽, 张华献, 等. 低碳复合胶凝材料对水泥和混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (7): 89-93102
- [5] 张淑云, 陈猛, 杨旭龙, 等. 机制砂掺量对自密实骨料混凝土碳化性能的影响机理 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (1): 314-320
- [6] 王冲, 周晨, 袁兴, 等. 矿物掺合料对自密实混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2024 (6): 39-42.
- [7] 罗佳乐, 马兵, 李坤鹏, 等. 再生混凝土抗冻融耐久性改善措施研究现状分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (22): 1-9
- [8] LIU H, ZHANG J, YANG Y. Study on stability of self-compacting concrete applied for filling layer structure from paste, mortar and concrete [J]. Archives of civil engineering, 2022, 68 (3): 501-522.
- [9] SHOBANA K, THENMOZHI R. Experimental investigation of self-repairing bio concrete in self compacting concrete [J]. Materials Express, 2022, 12 (5): 705-712.
- [10] 胡世冲. 江下水库自密实混凝土配合比设计及性能分析 [J]. 海河水利, 2024 (11): 113-116, 120
- [11] 易敏, 郑应松. 自密实机制砂混凝土耐久性试验探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023 (1): 141-143.
- [12] 秦大强, 郭樟根, 宗震宇, 等. 大掺量矿物掺合料再生自密实混凝土力学性能及微观结构研究 [J]. 混凝土, 2024 (3): 42-48.
- [13] 郑传磊, 赵亚娣, 侯玉飞, 等. 冻融环境下再生粗骨料对聚丙烯纤维增强自密实混凝土轴心抗压力学性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41 (4): 672-680.
- [14] 黄艳冬, 田中伟, 孙丽平, 等. 聚丙烯纤维掺量及长度对自密实混凝土力学性能的影响 [J]. 江西建材, 2024 (4): 37-39.