

钢 - 聚丙烯混杂纤维增强水泥基材料研究进展

王军伟

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年10月6日; 发布日期: 2025年10月23日

摘要

随着现代土木工程对材料性能要求的不断提高, 水泥基材料作为最常用的建筑材料之一, 其性能优化显得尤为重要。钢 - 聚丙烯混杂纤维作为一种新型增强材料, 被广泛应用于水泥基材料中, 旨在提升其抗拉强度、抗裂性等关键性能。钢 - 聚丙烯混杂纤维在水泥基材料中展现出明显的混杂效应, 这种混杂效应不仅增强了材料的抗拉性能, 还改善了其抗冲击性能。钢 - 聚丙烯混杂纤维的加入能够显著提升水泥基材料的力学性能、耐久性和应用范围, 同时符合环保和可持续发展的要求, 是一种极具前景的新型增强材料。

关键词

钢 - 聚丙烯混杂纤维, 水泥基材料, 力学性能

Research Progress on Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Cement-Based Material

Junwei Wang

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 16, 2025; accepted: October 6, 2025; published: October 23, 2025

Abstract

With the continuous improvement of material performance requirements in modern civil engineering, cement-based materials as one of the most commonly used building materials, its performance optimization is particularly important. As a new type of reinforcement material, steel-polypropylene hybrid fiber is widely used in cement-based materials to improve its key properties such as

tensile strength and crack resistance. Steel-polypropylene hybrid fibers exhibit obvious hybrid effect in cement-based materials. This hybrid effect not only enhances the tensile properties of the material, but also improves its impact resistance. The addition of steel-polypropylene hybrid fiber can significantly improve the mechanical properties, durability and application range of cement-based materials, and meet the requirements of environmental protection and sustainable development, which is a promising new reinforcement material.

Keywords

Steel-Polypropylene Hybrid Fiber, Cement-Based Materials, Mechanical Property

Copyright © 2025 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

随着现代建筑技术的蓬勃发展，混凝土作为一种重要的建筑材料，其性能的优化与提升一直是研究的热点。近年来，混杂纤维作为一种新型的混凝土增强材料，其独特的增强效果和对混凝土性能的影响引起了广泛关注。董振平等[1]研究表明：单掺钢纤维并不能明显提高混凝土的抗压强度，因此为了得到需要的纤维混凝土的抗裂性能和韧性要求，在混凝土中混掺使用两种或两种以上的纤维，称为混杂纤维增强高性能混凝土。李盾兴等[2]对不同种类的纤维进行混杂并对混杂纤维混凝土进行抗压、抗拉、抗弯、抗折和抗冲击等一系列试验，得到了混杂纤维的合理掺杂比，使之达到“正混杂效应”。

曹鑫铖等[3]通过正交试验研究了粉煤灰掺量、再生细骨料替代率、钢纤维掺量、聚丙烯纤维掺量对再生砂浆的抗压、抗折强度及抗冻性的影响。结果表明，随着钢纤维掺量的增加，抗压、抗折强度明显增大，对砂浆的抗冻性影响不大；聚丙烯纤维对砂浆的强度及抗冻性无显著影响，但可以改变砂浆的脆性。

Afroughsabet 等[4]将不同体积掺量的钢纤维和聚丙烯纤维混杂纤维混凝土进行力学试验发现：掺入1%的钢纤维能显著提高混凝土的劈裂抗拉强度和抗弯强度，并且体积掺量为0.85%的钢纤维和0.15%聚丙烯纤维的混凝土达到了最佳的增强效果。

通过混杂纤维混凝土的研究现状可以看出，混杂纤维混凝土在合适的纤维掺量下，此时的混杂纤维呈“正混杂效应”，混凝土的抗压、抗拉、抗弯、抗裂等能力相对于普通混凝土以及单掺纤维混凝土都有一定提高，而其中抗拉和抗弯能力提高显著。而对于抗渗、抗碳化、抗冻等耐久性能上，混杂纤维混凝土相对于单掺纤维混凝土仍然有较好的抵抗效果。

2. 钢 - 聚丙烯混杂纤维对水泥基材料的研究

2.1. 钢 - 聚丙烯混杂纤维的组成

钢纤维是采用冷轧、切断细钢丝或快速冷凝而制作成的纤维，其长径比一般为40~80 mm。人们对钢纤维的研究比较早，在土木工程实际应用中最为广泛。由于钢纤维具有较高的弹性模量，对水泥基材料的力学性能的改善有显著的作用，同时在抑制混凝土开裂、提高混凝土耐久性等方面表现得很出色，其次，由于钢纤维的阻裂作用较好，所以对于水泥基材料的抗冻性能也有良好的改善。钢纤维表现出较好的抗拉和断裂性能，有效改善了水泥基材料的抗疲劳能力，在建筑结构的节点部位发挥了较大的作用。

钢纤维具有以上优点使得它在轨道交通、道路桥梁等实际工程中都得到了应用。钢纤维的形貌如图 1 所示。



Figure 1. Steel fiber

图 1. 钢纤维[5]

聚丙烯纤维是以聚丙烯为原材料，经过多道工序制成的合成纤维分为单丝、工程、网状三种。聚丙烯纤维具有较强的酸碱性，不受碱性水化物的腐蚀，且只与少部分酸性物质发生反应，具有良好的力学性能和化学稳定性；具有良好的分散性，在与水泥基材料搅拌过程中不易团结和成束，确保了纤维在水泥基材料中的均匀分布；具有较高的韧性和耐热性，但导热和导电以及纤维与基料之间的粘结力较小[6]。聚丙烯纤维是一种新型的混凝土增强纤维，具有加工工艺简单、成本较低以及较高的性能等特点，正成为科学研究以及实际工程应用当中的新热点。聚丙烯纤维的形貌如图 2 所示。



Figure 2. Polypropylene fiber

图 2. 聚丙烯纤维[7]

混杂纤维水泥基材料是指往普通水泥基材料中同时加入两种或两种以上的纤维拌和而成的材料。混杂纤维(钢纤维和聚丙烯纤维)混凝土具有一些优于普通混凝土的性能，如：抗拉、抗折、抗剪、抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗冻融和抗爆等性能，因此受到了广泛关注。

2.2. 力学性能的研究

王凯等学者[8]研究了钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土的抗压、抗弯拉以及其抗冲击等基本力学性能，得出结论：纤维对混凝土的抗压强度无明显提高，但能使受压破坏从脆性变成延性破坏，同时能明显提高混凝土的抗弯性能和抗冲击性能。

焦楚杰等人[9]进行了钢 - 聚丙烯混杂纤维高性能混凝土弯曲性能试验，得出结论：随着钢纤维和聚丙烯纤维的掺入，混凝土的初始缺陷得到极大改善，混凝土结构的抗弯拉强度同时得到增强，在裂缝发

生扩展变大时, 纤维的掺入起到了抑制裂纹继续发展的作用, 混凝土的韧性也有较大程度地增加。

夏冬桃等[10]通过纤维总体积掺量不超过 1%的钢纤维、钢-聚丙烯、钢-塑钢混杂纤维混凝土带切口梁三点弯曲试验, 测试出了混杂纤维增强混凝土的荷载-挠度曲线和荷载-裂缝口张开位移(CMOD)曲线, 计算出对应的断裂能与等效抗弯强度并进行对比分析。结果表明: 纤维体积掺量为 1.0%混杂纤维增强高性能混凝土的荷载-挠度曲线和荷载-CMOD 曲线形状和走势相似且包围面积大于素混凝土, 具有良好的韧性性能; 混杂纤维的掺入能大幅提高混凝土的断裂能, 最大提高了 6.98 倍, 其中钢纤维起主要作用。

J. Vikram [11]等通过掺钢-聚丙烯纤维, 对混凝土的力学性能进行评估, 研究了不同纤维组合在混凝土中的抗压、抗弯和韧性等性能特征。试验结果表明, 混掺两种纤维的试件相较于单掺一种纤维的试件的弯曲强度更高, 且长纤维组合的混杂纤维对混凝土峰前和峰后荷载-挠度特性的影响明显改善。

N. Banthia [12]等将钢纤维、聚丙烯纤维混掺到混凝土, 通过水泥基材料的力学性能试验, 研究纤维对水泥基材料的影响规律。试验结果表明混杂纤维对水泥基材料性能的提高要明显优于单掺纤维, 其中波纹型钢纤维比扁平形钢纤维增强效果更好。

Farhad Aslani 等人[13]对自密实混凝土中单掺钢纤维、单掺聚丙烯纤维和钢-聚丙烯混杂纤维的试件做了很多力学试验。试验结果表明: 相比同龄期的普通素混凝土、钢纤维以及聚丙烯自密实混凝土, 龄期达到 91 天的钢-聚丙烯混杂纤维自密实混凝土的抗压强度值分别提高了: 11%、1%和 8%, 弹性模量分别升高了 2%、4%和 3%。

2.3. 粘结性能研究

纤维混凝土与既有混凝土的粘结性能, 除了新老混凝土之间的机械咬合力和范德华力, 新混凝土中加入纤维后, 纤维与混凝土基体间的粘结性能也是不可忽略的一部分。混杂纤维混凝土粘结试件在复杂的应力作用下, 粘结界面会先发生破坏, 这就会导致粘结面的提早破坏, 导致纤维的增强作用并没有充分发挥, 因此研究纤维-混凝土基体间的粘结性能就显得十分重要。

田稳苓等[14]设计了异形钢纤维与混凝土粘结性能试验, 发现影响界面粘结强度的主要因素是混凝土基体强度、钢纤维的形状和钢纤维的埋置角度。其中界面强度随着混凝土基体强度的提高而增大, 拉拔所需能耗随着钢纤维的埋置角度的增大而降低。

Soulioti 等[15]用磷酸锌溶液改性处理后的钢纤维进行基体拉拔试验, 发现由化学反应析出的 ZnPh 晶体附着在钢纤维表面, 形成凹凸不平的粗糙面, 增加了纤维与基体的粘结面积从而增大了纤维-基体的粘结强度。

Abdallah 等[16]在不同高温条件下进行纤维-基体粘结拉拔试验, 发现试验温度 0℃~400℃区间内, 界面粘结性能变化差距不大, 当试验温度大于 600℃后, 纤维拉拔荷载下降显著。

武汉大学徐礼华[17]教授团队对此做了一系列相关研究, 以不同钢-聚丙烯混杂纤维的体积掺量, 异形钢纤维埋置深度以及不同混凝土基体强度进行纤维拉拔试验, 试验结果表明: 异形钢纤维体积掺量为 1.5%, 聚丙烯纤维体积掺量为 0.05%时, 此时纤维拉拔功和峰值拉拔力最大, 综合来看该纤维掺量对混凝土界面增强效果最好, 界面粘结性能最优, 纤维埋置深度在不超过 8 mm 时, 界面粘结强度与埋置深度呈正相关态势, 埋置深度超过 8 mm 时呈负相关态势, 由此说明聚丙烯纤维对于钢纤维-混凝土基体间粘结性能具有不可忽视的影响。

2.4. 抗冻性能研究

马晓华[18]研究了钢-聚丙烯混杂纤维混凝土在冻融作用下的力学性能变化规律。发现随着冻融过

程的进行, 混杂纤维混凝土劈拉强度和抗压强度均有所降低, 但降低速率小于素混凝土, 与劈拉强度相比, 抗压强度反映较为敏感。冻融作用对混杂纤维混凝土的损害小于素混凝土, 冻融后前素混凝土和混杂纤维混凝土抗压强度比为 0.67 和 0.73 以上。

杨成蛟[19]通过钢-聚丙烯混杂纤维混凝土快速冻融试验发现, 冻融作用后, 纤维对混凝土仍有较好的约束作用, 能够提高混凝土抗压强度, 但不同纤维及其混掺方式对混凝土冻后力学性能影响很大, 综合分析, 钢纤维-细聚丙烯纤维 0.7%与 0.1%的混掺方式, 对混凝土质量损失率的控制和强度的提高作用最为显著。

乔宏霞[20]为研究冻融循环条件下纤维混凝土抗冻性能, 采取快速冻融试验对不同掺加方式下钢纤维、聚丙烯纤维混凝土性能进行研究。并通过 SEM 分析了其微观结构。试验结果表明, 在纤维掺量固定时, 不同纤维掺加方式的混凝土性能有显著不同。随冻融循环次数的增加, 其质量损失、动弹性模量、抗压、抗折强度都有显著不同变化, 混杂纤维混凝土性能较单一纤维混凝土好, 层布式纤维混凝土性能较整体式纤维混凝土好。

A. Sivakumar 和 Manu Santhanam[21]提出钢纤维和聚丙烯纤维混杂掺入混凝土中较单掺纤维的混凝土可有效降低塑性收缩裂缝, 其降低幅度最高可达 99%。

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土与普通自密实混凝土和单掺纤维自密实混凝土相比, 抗压强度和弹性模量有所提高, 但抗拉强度和折断模量较单掺钢纤维自密实混凝土略有不及。

钢-聚丙烯混杂纤维相比于单掺纤维, 能更好地增强混凝土的力学性能, 带来良好的经济效益。随着研究不断深入, 很多问题尚待解决, 目前尚没有详细规范来指导纤维混凝土试验设计以及关于纤维分散技术研究相对较少, 纤维的分散受哪些因素的影响以及纤维分散效果对混凝土力学性能和耐久性能影响多大还尚待研究。

3. 总结与展望

采用钢-聚丙烯纤维混掺时, 对水泥基材料的力学性能影响在单一纤维的基础上有了进一步提升。钢纤维和聚丙烯纤维体积掺量分别采用 1.5%和 0.2%时, 力学性能提升效果较为明显。

钢纤维主要增强硬化后宏观裂缝阶段的粘结强度, 而聚丙烯纤维侧重于塑性阶段微观裂缝控制, 二者混杂能显著提升混凝土的粘结性能和整体韧性, 为设计更安全、更耐久的水泥基复合材料提供了重要途径。

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土在冻融过程中韧性降低, 但即使冻融循环次数达到 300 次, 混杂纤维混凝土在破坏过程中还是有一定的韧性特征。钢纤维掺量增加能够明显提高混杂纤维混凝土的韧性。

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土通过“刚柔并济”的混杂效应, 实现了混凝土材料性能的显著提升, 是高性能水泥基复合材料发展的重要方向。未来可以与工业固废利用相结合, 发展绿色高性能混凝土, 也可以优化纤维掺量, 探索再生纤维或生物基纤维部分替代的可能性。

参考文献

- [1] 董振平, 张成中, 孙广帅, 等. 掺合料混凝土早期强度的试验研究[J]. 混凝土, 2018(10): 83-86+92.
- [2] 李盾兴. 高强度偏高岭土地质聚合物的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [3] 曹鑫铖, 金宝宏, 孙呈凯, 等. 钢-聚丙烯纤维再生砂浆性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(2): 77-81.
- [4] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. (2015) Mechanical and Durability Properties of High-Strength Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers. *Construction and Building Materials*, **94**, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>
- [5] 陈慧敏. 钢-聚丙烯混杂纤维水泥基材料的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2021.

- [6] 禹凯, 钱晓倩, 张轶伦, 等. 聚丙烯纤维对混凝土早期收缩影响的试验研究[J]. 混凝土, 2006(5): 64-66.
- [7] 陈蕾. 钢-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土工作性能及弯曲韧性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [8] 王凯, 张义顺, 王信刚. 低掺量 S-P 混杂纤维增强增韧的作用研[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1209-1211.
- [9] 焦楚杰, 孙伟, 秦鸿根. 聚丙烯-钢纤维高强混凝土弯曲性能试验研究[J]. 建筑技术, 2004, 35(1): 48-50.
- [10] 夏冬桃, 吴昊, 熊思慧, 等. 混杂纤维增强高性能混凝土断裂性能研究[J]. 混凝土, 2020(6): 113-115+119.
- [11] Vikram, J. and Sivakumar, A. (2014) Matrix Strengthening and Toughness Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Composites. *Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal*, **5**, 89-109. <https://doi.org/10.1615/compmechcomputapplintj.v5.i2.10>
- [12] Banthia, N. and Nandakumar, N. (2003) Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites. *Cement and Concrete Composites*, **25**, 3-9. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00043-9)
- [13] Aslani, F. and Nejadi, S. (2013) Self-Compacting Concrete Incorporating Steel and Polypropylene Fibers: Compressive and Tensile Strengths, Moduli of Elasticity and Rupture, Compressive Stress-Strain Curve, and Energy Dissipated under Compression. *Composites Part B: Engineering*, **53**, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.044>
- [14] 田稳苓, 王晓伟, 李子祥. 异形钢纤维与混凝土粘结性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2007(3): 337-341.
- [15] Soulioti, D.V., Barkoula, N., Koutsianopoulos, F., Charalambakis, N. and Matikas, T.E. (2013) The Effect of Fibre Chemical Treatment on the Steel Fibre/Cementitious Matrix Interface. *Construction and Building Materials*, **40**, 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.111>
- [16] Abdallah, S., Fan, M. and Cashell, K.A. (2017) Pull-Out Behaviour of Straight and Hooked-End Steel Fibres under Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, **95**, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.010>
- [17] 王力, 徐礼华, 邓方茜, 等. 波纹型钢纤维-混杂纤维混凝土界面黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 865-874.
- [18] 马晓华. 混杂纤维高性能混凝土抗裂和抗冻融性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [19] 杨成蛟. 混杂纤维混凝土力学性能及耐久性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [20] 乔宏霞, 李江川, 朱飞飞, 等. 纤维混凝土抗冻性能研究[J]. 功能材料, 2019, 50(1): 1114-1119.
- [21] Sivakumar, A. and Santhanam, M. (2007) A Quantitative Study on the Plastic Shrinkage Cracking in High Strength Hybrid Fibre Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **29**, 575-581. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.005>