

钢 - 聚丙烯纤维混凝土协同增强混凝土力学性能

李昌鑫, 张晓东, 张晓翕

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

土木工程技术持续升级这一背景里, 传统混凝土抗拉强度偏低, 韧性不够, 容易产生裂缝的固有缺陷, 已经很难达到桥梁, 隧道这种复杂工程对材料综合性能的严苛要求, 金属纤维里面, 钢纤维凭借其高强度与高弹性模量的优势, 能把混凝土的承载能力与抗冲击性能给提上去, 而聚丙烯纤维这类化学纤维质地轻便, 耐腐蚀, 在阻止混凝土早期微裂缝这一块表现突出, 两种纤维借助微观 - 宏观协同作用形成正向混杂效应, 聚丙烯纤维在微观尺度阻断裂缝萌生与扩展, 钢纤维则在宏观尺度实现裂缝桥接, 二者协同优化混凝土内部孔隙结构与界面粘结性能, 明显改善其整体力学性能。

关键词

钢纤维, 聚丙烯纤维, 力学性能, 协同增强机制

Synergistic Enhancement of Concrete Mechanical Properties by Steel-Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

Changxin Li, Xiaodong Zhang, Xiaoxi Zhang

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: February 2, 2026; accepted: February 23, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

Against the background of the continuous upgrading of civil engineering technology, the tensile

strength of traditional concrete is low, the toughness is insufficient, and it is easy to produce cracks. It is difficult to meet the strict requirements of bridges and tunnels such as complex engineering for the comprehensive performance of materials. In metal fibers, steel fiber relies on its advantages of high strength and high elastic modulus, it can improve the bearing capacity and impact resistance of concrete, while chemical fibers such as polypropylene fiber are light in texture and corrosion-resistant, which is outstanding in preventing early microcracks of concrete. The two fibers form a positive mixing effect with the help of micro-macroscopic synergy, and polypropylene fiber blocks fractures at the micro scale. Sprouting and expansion, steel fiber realizes crack bridging on a macroscopic scale. The two work together to optimize the internal pore structure and interface bonding performance of concrete, and significantly improve its overall mechanical properties.

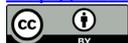
Keywords

Steel Fiber (SF), Polypropylene Fiber (PPF), Mechanical Properties, Synergistic Enhancement Mechanism

Copyright © 2026 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

混凝土在土木工程领域里扮演着必不可少的基础角色，它的性能提升始终是行业研究中的重点，纤维增强混凝土是在普通混凝土基体里，带进金属、无机或有机纤维这类增强材料做成的高性能复合材料，跟传统混凝土比，性能有了看得见的进步，但单一纤维增强混凝土的改良效果带着局限，钢纤维即便强度与弹性模量出色，却带着重量大、花费偏高、容易生锈并且分散性不太好的问题，聚丙烯纤维耐腐蚀、价格便宜，可它对混凝土力学性能的增加作用比较有限。

为打破单一纤维的应用瓶颈，钢-聚丙烯混杂纤维混凝土(SPFRC)就出现了，这种复合材料依靠两种纤维在尺度、功能以及作用时间上的互补特点，建立起“微裂缝抑制-宏观裂缝桥接-界面性能优化”的多尺度加强体系，真正做到了“1+1>2”的协同[1]增强成效，给复杂工程用混凝土材料的性能升级开辟了新路子。

2. 纤维协同作用机制

2.1. 协同作用的核心理论基础

2.1.1. 多尺度裂缝分级控制理论

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的协同本质，在于针对不一样尺度裂缝的分级抑制与能量耗散，两种纤维在混凝土受力以及水化过程的不同阶段各居主导、彼此配合，构成一套完整的裂缝控制体系。

在微观-细观尺度(0.1~100 μm)，聚丙烯纤维发挥主导作用，因为其体积掺量小、数量充足且分散性好，能均匀分布在水泥石基体以及骨料与水泥石的界面过渡区，在混凝土水化早期，聚丙烯纤维可借助弹性约束作用，抑制水泥石的自收缩与干燥收缩，减少原生微裂缝的萌生，当基体因受力或收缩出现微裂缝时，聚丙烯纤维依靠界面黏结与桥接效应传递应力，延缓裂缝扩展速度，降低裂缝密度及贯通风险，相关研究数据表明，聚丙烯纤维能让混凝土早期微裂缝密度下降 30%~50%，为混凝土后期性能稳定打下基础。

在宏观尺度(100 μm ~10 mm), 钢纤维的优势得以充分展现, 钢纤维弹性模量高、抗拉强度大且锚固性能优良, 核心作用是实现宏观裂缝的稳定控制与能量耗散, 当混凝土承受荷载产生宏观裂缝后, 钢纤维借助拔出、脱粘、断裂等多种方式消耗能量, 阻碍裂缝进一步扩展与贯通, 大幅提升混凝土的峰值承载力、延性与韧性, 同时, 钢纤维还能改变裂缝拓展路径, 使原本的单一主裂缝转变为多分支微裂缝, 进一步强化混凝土的耗能能力。

在跨尺度协同这个层面, 也就是界面过渡区, 尺寸在 10 到 100 微米之间, 两种纤维的配合能够明显优化混凝土内部界面结构, 聚丙烯纤维的存在可以有效缓解钢纤维的团聚现象, 提升其分布均匀程度, 增加纤维与基体的接触面积, 两种纤维与水泥石之间的黏结作用, 能够促进界面过渡区水化产物的生成与密实化, 提升界面黏结强度, 减少界面缺陷, 实现微观、细观、宏观层面裂缝控制的无缝衔接。

2.1.2. 应力分担与时空协同理论

应力分担协同来自两种纤维力学性能的差别, 让它们可以在混凝土内部去承担不一样类型, 不同大小的应力, 当混凝土受到外力作用, 钢纤维靠着高弹性模量这一个特点, 主要去承担比较大的拉应力跟冲击应力, 聚丙烯纤维就借助自身拉伸变形去消耗能量, 拖慢裂缝发展进程, 同时两种纤维在混凝土内部形成三维网状结构, 让应力可以均匀分布, 避免局部应力集中导致的早期破坏。

时空协同效应表现在两种纤维在混凝土不同龄期的功能分工上, 水化早期, 混凝土容易因为收缩产生裂缝, 聚丙烯纤维这个时候可以有效抑制收缩裂缝, 为钢纤维提供一个稳定的工作环境, 中期, 混凝土强度慢慢提升, 钢纤维跟聚丙烯纤维一起承担荷载, 协同提高混凝土的强度与韧性, 后期, 混凝土强度趋于稳定, 钢纤维主导宏观裂缝控制, 聚丙烯纤维能辅助抑制次生裂缝的产生, 明显延长混凝土的长期使用寿命与耐久性。

2.1.3. 界面优化与微观结构调控理论

钢-聚丙烯混杂纤维对混凝土的协同增强, 还体现在对微观结构与界面性能的精准调控上, 在孔隙结构优化这一方面, 混杂纤维可以带进混凝土里边的孔隙, 把整体孔隙率给降下来, 孔级配也能有所改善, 研究提到, 跟素混凝土摆在一块看, 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的总孔隙率少了 15%到 20%, 有害孔(孔径大于 200 nm)所占比例更是掉下去 30%到 40%, 内部结构显得更加密实。

在界面过渡区强化这一块, 纤维同水泥石之间的黏结作用能够推动界面过渡区的水化进程, 产生更多水化硅酸钙(C-S-H)凝胶, 氢氧化钙(CH)晶体的定向排列也会减少, 让界面过渡区变得更为致密、强度更高, 这样就从根子上改善了混凝土“弱界面”的问题。

更为要紧的是, 混杂纤维能够改变混凝土的破坏模式——将传统素混凝土那种脆性劈裂破坏, 转成延性拔出破坏, 混凝土的延性与耗能能力得到大幅提升, 结构因突发破坏造成严重损失的情况也就可以避免。

3. 钢-聚丙烯纤维混杂体系的性能研究

3.1. 力学性能研究

钢纤维跟聚丙烯纤维在力学特性上各自有不同侧重, 互补性比较强, 借助合理配比组合, 能够明显改善混凝土整体力学性能。

3.1.1. 抗压强度

宋双借助配比设计带进钢-聚丙烯混杂纤维混凝土[2], 开展受压破坏试验, 对比破坏后试块形态注意到, 掺入聚丙烯纤维的试块外观完整性明显好过单掺钢纤维试块, 这一现象直接印证了钢纤维跟聚丙烯纤维的协同作用, 可以进一步优化混凝土的抗压性能。

李军做的材料配合比试验也得出差不多结论,他安排三组试件,借助压力机加载到破坏并测量抗压强度,结果显示,当钢纤维掺量从0增加到1.5%时,钢-聚丙烯混杂纤维混凝土试块的抗压强度提高约8% [3],这暗示钢纤维掺量是左右混杂纤维混凝土抗压强度的核心要素,跟聚丙烯纤维掺量及钢纤维类型比较,其作用更为突出——钢纤维掺量从0升到1.5%时,混凝土抗压强度平均增加7.8%,所以实际工程中,适当提高钢纤维掺量能够有效加强混凝土抗压能力。

崔凯他们[4]设计24个试件(18个用于疲劳试验,6个用于静载试验),采用单轴循环受压疲劳试验探索两种纤维对混凝土抗压性能的协同效果[5],试验发现,疲劳加载开始阶段,聚丙烯纤维对基体微裂缝的桥接作用非常明显,随着荷载慢慢加大,聚丙烯纤维因为刚度与强度有限,很难继续承担荷载,这时候钢纤维发挥关键承载作用,有效推迟试块破坏(如图1所示)。

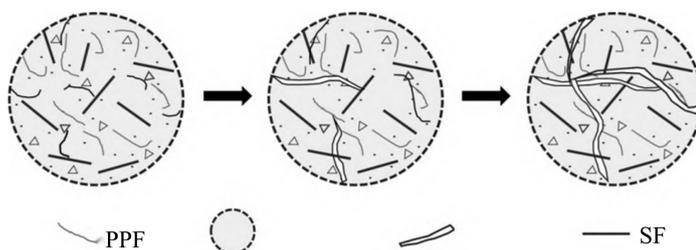


Figure 1. Stress variation curve of steel-polypropylene hybrid fiber concrete under fatigue loading
图 1. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土疲劳加载下应力变化曲线

郭金鹏他们先借助立方体抗压强度试验[6]确定钢纤维最佳掺量,安排6组不同钢纤维体积掺量(0%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%)的试件,观察其破坏形态与抗压强度变化,结果显示,钢纤维混凝土抗压强度随掺量增加呈现先升后降走势,掺量0.4%、0.6%时,强度提升效果不突出,掺量1.0%时,抗压强度达到最高点,增强效果最好。

在确定钢纤维最佳掺量后,郭金鹏他们进一步将其与波浪型聚丙烯纤维混杂,开展抗压强度试验,结果表明,聚丙烯纤维掺量在0.08%~0.14%范围内时,混杂纤维混凝土抗压强度持续上升,其中掺量从0.08%增加到0.11%时,强度增长幅度最为明显,0.11%掺量组与0.08%掺量组的强度比达到1.07,当聚丙烯纤维掺量为0.14%时,混凝土抗压性能最优,实测抗压强度达58.78 MPa,此后随着掺量继续增加,抗压强度逐渐下降,掺量0.17%时强度为55.82 MPa,与素混凝土强度比为1.08,略低于0.11%掺量组的1.11,整体来看,波浪型聚丙烯纤维体积掺量控制在0.14%附近时,可以获得综合抗压性能最优的钢-聚丙烯混杂纤维混凝土。

3.1.2. 抗拉与抗折强度

在抗拉和抗折性能改善这一块,钢-聚丙烯混杂纤维带来的协同作用更为明显,张晓磊[7]等人在他们做的工作中提到,往混凝土里带进聚丙烯粗纤维,不光可以让混凝土抗弯强度上去,还能明显让它的抗弯韧性变得更好,当聚丙烯纤维体积掺量处在0.1%这个水平,混凝土抗拉强度会跟着钢纤维掺量加大而一直增长,不过一旦聚丙烯纤维掺量加到0.15%、0.2%,混杂纤维混凝土的抗拉强度伴随钢纤维掺量增加,会先往上走然后往下掉。

如表1所示根据钢-聚丙烯混杂纤维抗拉强度平均值的变化规律显示出,把混杂纤维里钢纤维的比重提上去,能够明显拉高混凝土的抗弯和抗拉强度,而聚丙烯纤维比例增加对于抗弯强度带来的改变比较有限,掺量太高反而会令混凝土拉伸强度降下来,根本原因是高应力状态下,聚丙烯纤维会先被拔出来或者断掉,不能再继续承受荷载,这时候钢纤维就成了抵抗拉力的主要部分,一直发挥着承担荷载的功能。

Table 1. The average tensile strength of steel-polypropylene hybrid fibers
表 1. 钢 - 聚丙烯混杂纤维抗拉强度平均值

纤维类型及配比	抗拉强度 MPa	抗拉峰值应变 $\mu\epsilon$
SF 1.0/PPF 0.1%	2.21	131.5
SF 1.0/PPF 0.15%	2.30	129.1
SF 1.0/PPF 0.2%	2.10	145.1
SF 1.5/PPF 0.1%	2.51	151.4
SF 1.5/PPF 0.15%	3.05	143.1
SF 1.5/PPF 0.2%	2.66	152.3
SF 2.0/PPF 0.1%	2.71	154.0
SF 2.0/PPF 0.15%	2.43	153.2
SF 2.0/PPF 0.2%	2.31	144.5

3.1.3. 韧性与抗冲击性能

钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土在韧性和抗冲击性能上的优势特别突出, 牛吉祥[8]他们借助落锤试验发现, 随着纤维体积分数往上走, 纤维增强混凝土的韧性一点点变好, 初裂纹出现的时间往后推了, 极限冲击破坏次数明显增加, 里面 SF1.0/PPF0.2%配比的试件, 耐冲击表现最棒, 极限冲击破坏次数跟素混凝土放在一块比, 提高了 173%。

这种性能变好来自两种纤维能量吸收机制的配合效果, 聚丙烯纤维靠着自身塑性变形把能量带进去, 从最开始挡住裂纹产生, 钢纤维就借助裂缝桥接作用跟拔出功消耗能量, 拦住裂纹发展, 它们俩各管一摊, 让混凝土的断裂能和抗冲击性能大幅上升, 这样它可以更合适地用进桥梁、隧道这些受冲击荷载影响比较大的工程场合里。

3.1.4. 力学性能综合对比

为了更明显的体现出钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土在力学性能中的协同作用, 本文进行钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土研究成果综合对比如表 2 所示。

Table 2. Comprehensive comparison of research results on steel-polypropylene hybrid fiber concrete
表 2. 钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土研究成果综合对比

钢纤维 (SF)参数	聚丙烯纤维 (PPF)参数	试验类型/加载速率	增强效果 (归一化相对值)	关键结论	关键文献
类型: 钩状 80、直状 65 体积掺量: 0%~1.5%	类型: 单丝纤维 体积掺量: 0%~1.8%	压力机静态受压破坏试验加载速率 0.05 MPa/s	抗压强度 1.08 (SF 掺量 1.5%)时	1) 钢纤维掺量是力学性能核心影响因素 2) 最优配比: 钩状 SF 1.5% + PPF 0.9%	[1]
类型: 剪切波浪形 体积掺量: 0%~1.0%	类型: 短切纤维 体积掺量: 0%~0.3%	静态受压破坏试验	试块外观完整性相对值: >1	1) 钢纤维对总功效影响大于聚丙烯纤维 2) 最优配比: 剪切波浪形 SF 0.7% + PPF 0.3%	[2]
类型: 直型 60 体积掺量: 1.5%	类型: 单丝纤维 167 体积掺量: 0.15%	静态受压破坏试验加载速率 0.005 mm/s	疲劳破坏延迟时间相对值: >1	1) 疲劳加载初期 PPF 主导微裂缝桥接, 后期 SF 承担主要荷载, 推迟破坏 2) 最优配比: 1.065 (SF 掺量 0.7%)	[7]

续表

类型： 直剪切型 19 体积掺量： 0.4%~1.2%	类型：波浪型、 压花型、单丝型 体积掺量： 0.6%~0.14%	立方体静态抗压 强度试验加载 速率 0.5 MPa/s	抗压强度相对值： 1.11 (SF 1.0% + PPF 0.11%); 1.16 (SF 1.0% + PPF 0.14%，强度 58.78 MPa)	波浪型 PPF 掺量 0.14%、 SF 掺量 1.0%时， 混凝土综合抗压性能最优	[5]
类型： 钢板剪切波纹型 体积掺量： 0%~2.0%	类型： 束状单丝 396 体积掺量： 0.1%~0.2%	静态抗拉、 抗弯性能试验	抗拉强度相对值： 1.16~1.53 (SF 1.5% + PPF 0.15%时达最大值 3.05 MPa)	PPF 低掺量辅助提升 抗拉强度，高掺量会降低 强度；SF 是提高抗拉、 抗弯性能的主导纤维	[6]
类型： 镀铜钢纤维 65 体积掺量： 0%~1.5%	类型： 白色集束状纤维 体积掺量： 0%~0.5%	落锤冲击试验	击破坏次数：2.73 (SF 1.0% + PPF 0.2%)	1) 最优配比： SF 1.5% + PPF 0.25%， 动态力学性能最优 2) 混掺纤维使试块呈 “裂而不散”破坏模式， 显著提升抗冲击 性能与耗能能力	[3]

4. 结论与未来展望

4.1. 主要结论

综合钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的协同增强机制与力学性能试验研究，可以带出下面这些关键发现，协同增强机制清楚且能够控制，钢纤维跟聚丙烯纤维在微观到宏观多个尺度层面做到功能互相补充和时间空间上的配合，聚丙烯纤维重点放在早期微裂缝的阻止上，钢纤维主要管后期宏观裂缝的搭桥和能量消耗，两个一起让混凝土界面结构和孔隙分布变得更好，形成稳定的正面混杂效果，达到一加一大于二的性能进步。

1) 综合力学性能得到明显改进，抗压强度这块，钢纤维掺量对性能影响最要紧，掺量放在百分之一一点零到一点五之间时，抗压强度能够提高百分之七到八，抗拉和抗折强度方面，钢纤维是提高的主要部分，聚丙烯纤维在低掺量下有帮忙增强的作用，高掺量就可能强度往下掉，韧性和抗冲击性方面，混杂纤维一起提高的效果很突出，SF 一点零和 PPF 零点二百分比配比试件的冲击破坏次数比素混凝土多了一百七十三百分比。

存在一个最佳纤维配比范围，试验显示，钢纤维体积掺量大约百分之一一点零，波浪型聚丙烯纤维体积掺量大约百分之零点一四时，混凝土综合力学性能最好，实际测得的抗压强度能达到五十八点七八兆帕，可以同时照顾到强度，韧性和经济性。

2) 实现破坏模式向好的方向转变，混杂纤维能够把混凝土从原来的脆性破坏转成延性破坏，让裂缝扩展路线从单一主裂缝变成多分支微裂缝，大幅提升材料韧性和长期耐用性，降低结构突然破坏的危险。

4.2. 未来展望

为了带动钢-聚丙烯混杂纤维混凝土在工程中的大范围使用与技术提升，结合眼下研究情况，未来能够从下面方向深入摸索。

1) 改进纤维分散与界面粘结技术，开发新式纤维表面处理工艺和分散手段，处理钢纤维结团、纤维跟基体界面粘结不够这些难题，做到纤维在混凝土里头的均匀分布，更进一步强化协同增强作用。

2) 建立多尺度数值建模与性能预测体系，基于微观、细观、宏观多尺度角度，构建精确的数值模型，做到对混杂纤维混凝土力学行为的定量预估，为纤维配比改进和工程设计给出理论依据。

3) 加深长期性能与复杂环境适应性研究, 系统摸索混杂纤维混凝土在冻融循环、氯离子侵蚀、长期疲劳荷载这些复杂环境里的性能变化规律, 搞清楚其耐久性下降机制, 拉长工程服役时间。

4) 健全标准化与工程应用规范, 制定统一的试验手段、性能评估标准跟设计指南, 规范混杂纤维混凝土的配比设计、施工流程与质量检查, 带动其在桥梁、隧道、高层建筑这些工程里的规模化、规范化使用。

5) 研发智能与绿色纤维材料, 探索带自感知、自修复功能的智能纤维, 以及可再生、低环境负荷的绿色纤维材料, 推动混凝土材料往智能化、可持续化方向走, 契合“双碳”目标跟绿色建筑理念。

伴随理论研究的不断深入与技术工艺的持续优化, 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土有望变成高性能土木工程材料的核心选择, 为构建更安全、耐久、高效、智能的基础设施给出坚实的材料保障。

参考文献

- [1] 霍曼琳, 杨国栋, 曹玉新, 等. 混杂纤维混凝土的力学性能及微观分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(4): 59-62.
- [2] 宋双. 钢-聚丙烯纤维混凝土力学性能的研究[J]. 四川建材, 2024, 50(8): 14-16.
- [3] 李军. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 陶瓷, 2024(11): 196-198.
- [4] 崔凯, 徐礼华, 池寅. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土等幅受压疲劳变形[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7): 755-761.
- [5] 崔凯, 徐礼华, 池寅, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土单轴受压疲劳寿命研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(9): 26-38.
- [6] 郭金鹏. 钢-聚丙烯纤维混凝土力学性能对比试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工程学院, 2023.
- [7] 张晓磊, 吴海林, 侯黎黎, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土受拉性能试验研究[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2023, 35(1): 37-41.
- [8] 牛吉祥. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土 SHPB 冲击性能研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2024.