

改性合成纤维混凝土性能研究综述

肖广涛, 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1月26日; 录用日期: 2026年2月17日; 发布日期: 2026年2月27日

摘要

传统混凝土材料因抗拉强度低、脆性大、易开裂等固有缺陷, 在高性能与长寿命工程结构中的应用受限。合成纤维增强是提升混凝土韧性与耐久性的有效途径, 而通过对纤维进行多尺度界面改性, 可从根本上优化纤维-水泥基体的协同作用机制。本文系统梳理了改性合成纤维混凝土的研究脉络, 从材料固有缺陷与工程需求切入, 综述了单掺与混杂纤维混凝土的性能特点与瓶颈; 重点阐明了化学接枝、物理刻蚀及复合涂层等主流改性策略的作用机理; 归纳了宏观力学测试、微观结构表征与跨尺度数值模拟相结合的系统研究方法; 在此基础上, 精准剖析了当前领域在纤维分散工艺、长期性能数据与标准化设计方面存在的 key 问题; 最终, 前瞻性地提出了发展智能-绿色协同改性技术、构建极端环境下寿命预测模型、推动标准化与工程数字化应用等未来研究方向。

关键词

改性合成纤维, 纤维混凝土, 界面过渡区(ITZ), 混杂增强, 耐久性, 多尺度模拟

A Review of Performance Studies on Modified Synthetic Fiber Concrete

Guangtao Xiao, Xiaodong Zhang, Xiaoxi Zhang

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: January 26, 2026; accepted: February 17, 2026; published: February 27, 2026

Abstract

Traditional concrete materials are limited in their application to high-performance and long-life engineering structures due to inherent defects such as low tensile strength, high brittleness, and susceptibility to cracking. Synthetic fiber reinforcement is an effective approach to enhance the

toughness and durability of concrete. By applying multi-scale interfacial modifications to the fibers, the synergistic interaction mechanism between the fibers and the cement matrix can be fundamentally optimized. This paper systematically reviews the research framework of modified synthetic fiber concrete. Starting from the material's inherent defects and engineering requirements, it summarizes the performance characteristics and limitations of concrete incorporating single and hybrid fibers. The mechanisms underlying mainstream modification strategies, such as chemical grafting, physical etching, and composite coating, are elucidated in detail. A systematic research methodology combining macroscopic mechanical testing, microstructural characterization, and cross-scale numerical simulation is outlined. Based on this, key existing challenges in the field are precisely analyzed, including fiber dispersion techniques, long-term performance data, and standardized design. Finally, future research directions are prospectively proposed, such as developing intelligent-green synergistic modification technologies, constructing service life prediction models under extreme environments, and promoting standardization and digital engineering applications.

Keywords

Modified Synthetic Fibers, Fiber-Reinforced Concrete, Interfacial Transition Zone (ITZ), Hybrid Reinforcement, Durability, Multi-Scale Simulation

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

混凝土作为消耗量最大的人造建筑材料，其经典的水泥-骨料二元体系在赋予优异抗压性能的同时，也固化了脆性断裂与低抗拉强度的材料基因[1]。在复杂应力、严酷环境及长期服役的耦合作用下，微裂纹的萌生与不可控扩展是导致结构性能退化乃至灾难性失效的根源[2]。例如，在寒区工程中，冻融循环引发的内部孔隙水相变应力可导致混凝土表面剥落、内部结构疏松；在海洋氯盐环境中，裂纹为侵蚀介质提供了快速通道，加速钢筋锈蚀与基体软化[3]。传统通过增加钢筋用量或提高强度等级的方法，不仅经济性差，且难以从根本上改善材料的脆性本质与抗裂能力。

纤维增强是弥补水泥基体脆性的有效途径。其中，合成纤维(以 PP、PVA、聚酯(PET)及聚丙烯腈(PAN)等为代表)因其原料来源丰富、成本可控、力学性能可设计以及耐腐蚀等优势，得到了广泛应用[4]。它们主要以“桥接”机制工作：在基体出现微裂纹时，跨越裂纹的纤维通过界面粘结力将应力传递回未开裂部分，延缓裂纹扩展，并消耗大量断裂能，从而显著提升材料的韧性(或延性)与抗裂性能[5]。

然而，未经改性的合成纤维与亲水性的水泥水化产物之间常存在物理化学性质不匹配的问题，导致二者界面过渡区(ITZ)成为复合材料中的“薄弱环节”[6]。具体表现为：物理不匹配：如疏水性 PP 纤维与水泥浆体浸润性差，界面存在孔隙；化学惰性：多数合成纤维表面缺乏与水泥水化产物形成强化学键的活性位点；模量失配：部分低模量纤维与高模量基体间应力传递效率低。这些界面缺陷不仅限制了纤维增强潜力的充分发挥，还可能成为新的应力集中源与侵蚀路径起点。

因此，对合成纤维进行表面与界面改性，旨在构筑一个强韧、致密、稳定的 ITZ，是实现混凝土性能跨越式提升的核心科学问题与技术关键[7]。系统研究改性合成纤维混凝土，不仅涉及高分子材料表面科学、胶凝材料化学与固体力学的多学科交叉，更直接关系到重大基础设施的长寿命安全、建筑业的绿色低碳转型与国家“双碳”战略目标的实现，具有重大的理论价值与紧迫的工程意义。

2. 合成纤维混凝土的性能谱系、协同效应与现存瓶颈

2.1. 单掺合成纤维的性能贡献与局限性

不同种类的合成纤维通过独特的微观作用机制，在混凝土性能改善的“图谱”中扮演着不同角色：

聚丙烯(PP)纤维：作为一种典型的聚烯烃纤维，其密度低(约 0.91 g/cm^3)、化学惰性强、耐酸碱性好。其主要功能在于抑制塑性收缩裂缝。在混凝土凝结硬化前的塑性阶段，PP 纤维能有效阻隔泌水通道，降低表面水分蒸发速率，并承受部分收缩应力，从而大幅减少早期龟裂。此外，其高延性(断裂伸长率 $> 15\%$)能显著提升混凝土的抗冲击与抗爆炸韧性[8]。然而，其弹性模量(约 $3\sim 5 \text{ GPa}$)远低于硬化水泥浆体(约 $20\sim 30 \text{ GPa}$)，导致其对硬化后混凝土的强度(尤其是抗压强度)提升有限，且界面主要以机械锚固为主，粘结强度有待提高。

聚乙烯醇(PVA)纤维：PVA 分子链富含羟基(-OH)，使其具有良好的亲水性与极性。这一特性使其能与水泥水化产物中的 Ca^{2+} 、Si-O 键及水分子形成较强的氢键网络与离子-偶极相互作用，从而获得优于大多数合成纤维的界面粘结性能[9]。因此，PVA 纤维在抑制早期塑性裂缝的同时，更能有效控制硬化混凝土中裂缝的宽度与发展，提升弯曲韧性。但其主要缺陷是耐热性差，玻璃化转变温度(T_g)约 85°C ，长期使用温度上限通常不超过 120°C ，遇火灾易熔融失效[10]。

芳纶(AF)与玄武岩(BF)纤维作为高性能补充：芳纶纤维具有极高的比强度与耐热性，但价格昂贵且与水泥碱性环境相容性需通过涂层改善。玄武岩纤维作为无机纤维，具有高模量、高强度、优异的耐温与耐碱性能，但其脆性较大，单掺时增韧效果有限，且高掺量下分散困难[11]。

2.2. 混杂纤维体系的“正混杂效应”与多级阻裂机理

将两种或多种性能互补的纤维复合使用，是实现性能协同优化的有效策略。其核心在于利用不同纤维在裂缝发展不同阶段的“各司其职”，产生“正混杂效应”[12]。典型的如“高弹模(玄武岩/钢纤维)+高延性(PP/PVA)”体系：

微裂纹阶段(裂纹宽度 $< 0.05 \text{ mm}$):高延性、低模量的纤维(如 PP)率先被激活，通过较大的变形吸收能量，抑制大量微裂纹的萌生与汇合。

宏观裂纹扩展阶段(裂纹宽度 $> 0.05 \text{ mm}$):高弹模、高强度的纤维(如玄武岩)开始充分发挥桥接作用，提供更高的裂纹闭合应力，有效阻止裂纹的进一步张开与贯通。

这种“先柔后刚”的多级防御体系，使得混杂纤维混凝土不仅拥有更高的峰值荷载(强度)，更具备更长的荷载下降段(韧性)和更高的残余强度。研究表明，优化配比的玄武岩-PP 混杂纤维可使混凝土的断裂能提升 50% 以上，并在冻融循环后保持更高的动弹性模量[13]。

2.3. 当前性能提升面临的关键瓶颈

尽管纤维增强技术已取得显著成效，但要满足未来超高层、深地深海、极端气候区等重大工程对材料性能的极限要求，仍需克服以下瓶颈：

1) 界面性能瓶颈：现有纤维与水泥基体的界面粘结强度仍远低于纤维本体强度，导致纤维拔出而非拉断成为主要失效模式，纤维强度利用率低。

2) 性能均衡与定制化瓶颈：如何在提升韧性与抗裂性的同时，不过度牺牲抗压强度与流动性？如何针对特定工程环境(如高盐碱、高温差)定制纤维改性方案？

3) 工艺与长期可靠性瓶颈：包括纤维在混凝土中的三维均匀分散技术、大规模施工的稳定性，以及改性界面在数十年服役期内抗老化、抗疲劳性能的验证数据缺乏。

3. 合成纤维的改性途径

改性技术的核心目标是将“薄弱界面”转化为“强韧界面层”。根据作用尺度与原理，可分为以下几类(不同改性方法性能对比汇总于表 1)。

Table 1. Performance comparison of different modification methods

表 1. 不同改性方法性能对比

改性方法	改性剂/处理工艺	界面剪切强度提升率	抗压强度变化率	抗折强度/韧性变化	主要优点	局限性
改性方法	硅烷偶联剂(如 KH-550)处理	30%~50%	基本持平或略有提升	显著提升	增强化学键合, 提升耐久性	处理条件敏感, 成本较高
改性方法	表面接枝共聚(如丙烯酸接枝 PP)	显著提升	基本持平	提升明显	精准调控表面化学, 改善润湿性	工艺复杂, 规模化难度大
物理改性	等离子体处理(O ₂ 、NH ₃ 等)	提升 20%~40%	略有提升	韧性提升明显	清洁、活化、刻蚀一体化, 环保	设备投资大, 处理深度有限
物理改性	聚合物涂层(如丁苯胶乳、环氧树脂)	提升 15%~35%	可能略有下降	韧性大幅提升	可作为应力缓冲层, 多功能化潜力大	可能影响流动性, 涂层均匀性控制难
复合改性	等离子体 + 硅烷复合处理	提升 40%~70%	提升 5%~15%	显著提升	协同增强, 界面性能飞跃	工艺步骤多, 成本较高
复合改性	纤维 + 纳米材料(如 CNT、石墨烯)复合	提升 50%~100%	提升 10%~20%	韧性与强度同步提升	纳米增强效应显著, ITZ 密实度大幅提高	纳米材料分散难, 成本极高

3.1. 化学改性：在分子尺度构建共价键桥梁

通过化学反应在纤维表面引入或嫁接能与水泥水化产物发生化学键合的活性官能团。

硅烷偶联剂(SCA)法：这是应用最广泛的化学改性方法。以氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550)为例，其乙氧基水解生成硅醇(-SiOH)，后者可缩合在含-OH 的纤维(如 PVA)表面或与无机纤维表面的硅羟基反应，形成-Si-O-共价键(见图 1)。硅烷另一端的氨基(-NH₂)则能与水泥水化产物中的 C-S-H 凝胶或水化铝酸钙等发生相互作用，形成牢固的化学桥联[14]。研究证实，经 KH-550 处理的 PVA 纤维，其与水泥浆体的界面粘结强度可提高 30%~50%，并显著改善混凝土的抗渗与抗硫酸盐侵蚀能力。

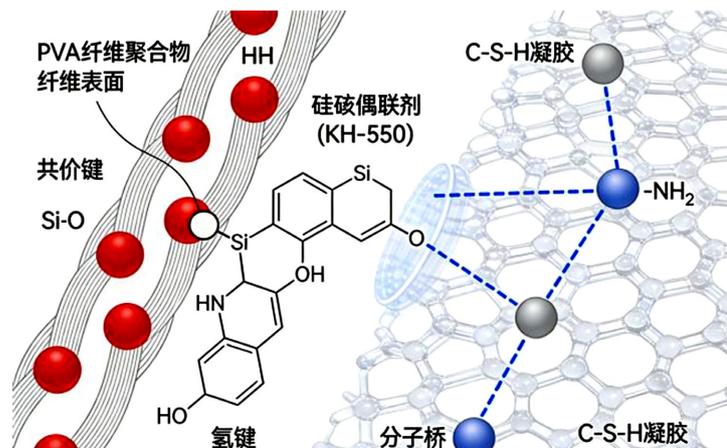


Figure 1. Schematic diagram of chemical bonding mechanism

图 1. 化学键合机制示意图

表面接枝共聚：通过 γ 射线辐照、等离子体引发等技术，在纤维表面产生自由基，进而引发具有羧基(-COOH)、环氧基、酰胺基等官能团的单体(如丙烯酸、甲基丙烯酸缩水甘油酯)进行接枝聚合。该方法可精准调控纤维表面的化学组成与润湿性。例如，在 PP 纤维表面接枝丙烯酸后，其与水的接触角可从 90° 以上降至 50° 以下，界面剪切强度显著提升[15]。

3.2. 物理改性：优化微观形貌与引入中间层

通过物理手段改变纤维表面形貌或附加功能涂层，以增强机械互锁与应力缓冲。

等离子体处理：利用低温等离子体(如 Ar、O₂、NH₃)对纤维表面进行轰击。该过程具有三重效应：清洗作用：去除表面弱边界层和污染物；活化作用：在表面引入极性含氧或含氮基团，提高表面能；刻蚀作用：形成纳米级的粗糙结构，增加比表面积[16]。O₂ 等离子处理后的 PP 纤维，表面粗糙度显著增加，与水泥的机械咬合力增强(见图 2)。

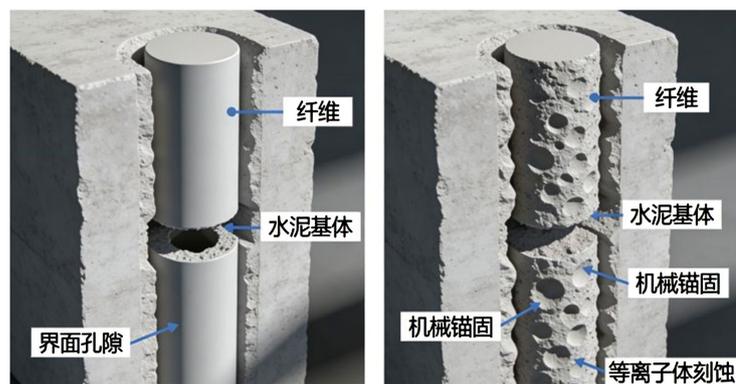


Figure 2. Schematic diagram of physical anchoring effect
图 2. 物理锚固效应示意图

聚合物涂层改性：在纤维表面涂覆一层功能性聚合物薄膜。常用涂层包括：

柔性涂层：如丁苯胶乳(SBL)、丙烯酸酯乳液。其低模量特性可作为应力缓冲层，钝化裂纹尖端应力场，延缓微裂纹向纤维-基体界面扩展[17]。

反应性涂层：如环氧树脂、聚氨酯预聚体。涂层本身含有可与水泥或偶联剂反应的基团，形成更复杂的界面化学结构。

多功能涂层：涂层中可掺杂纳米颗粒(如纳米 SiO₂、碳纳米管)、阻燃剂或缓蚀剂，赋予纤维额外的增强、阻燃或防腐功能。

3.3. 复合与混杂改性：追求协同与集成效应

“化学 + 物理”复合改性：例如，先对纤维进行等离子体处理以活化和粗糙化表面，再浸渍硅烷偶联剂溶液。物理处理为化学偶联提供了更多、更稳定的锚定点，二者协同使界面性能产生飞跃。

“纤维 + 纳米材料”复合改性：将碳纳米管、石墨烯或纳米纤维素等纳米材料通过分散液浸渍或化学键合的方式负载于微米级纤维表面。这些纳米材料既能进一步提高纤维本身的力学性能，又能在纤维-基体界面区域形成纳米增强网络，大幅提升 ITZ 的密实度与力学性能[18]。

多尺度、多维度混杂结构设计：超越简单的纤维种类混杂，向更精细的结构设计发展。例如，设计“芯-鞘”结构纤维(高强度纤维为芯，高粘性聚合物为鞘)、不同长度与直径纤维的级配混杂，或将短切纤维与连续纤维织物/网格结合使用，在混凝土中构筑从微观到宏观的多级增强网络。

4. 改性合成纤维混凝土的研究方法

现代研究已形成一套从现象观测到机理揭示、从经验总结到理论预测的完整方法体系。

4.1. 多层次性能表征与测试

全曲线力学行为分析：采用伺服控制试验机，获取混凝土在受压、受拉、弯曲及剪切下的完整应力-应变曲线或荷载-挠度曲线。通过分析曲线的形状、峰值、下降段斜率及包围面积(断裂能)，全面评价改性带来的强度与韧性变化。

耐久性多因素耦合试验：模拟真实服役环境，设计加速试验。如：冻融-除冰盐耦合试验、干湿循环-氯离子侵蚀耦合试验、碳化-荷载持续作用试验等。采用非破损检测技术(如超声波波速、电阻率、非线性超声)监测性能劣化过程。

长期性能监测与模型预测：建立户外暴露试验站，进行长达数年甚至数十年的自然暴露试验，获取一手长期数据。结合加速试验结果，运用时温等效原理或基于损伤力学的模型，预测材料在特定环境下的服役寿命。

4.2. 先进的微纳观结构与成分分析

高分辨率显微与光谱联用技术：

扫描电镜(SEM)与能谱仪(EDS)：观察 ITZ 的微观形貌、裂缝路径、纤维失效模式(拔出/拉断)，并进行微区元素分析。环境扫描电镜(ESEM)可观察含水或非导电样品，避免镀膜假象。搭配背散射电子(BSE)模式，可基于原子序数衬度清晰区分未水化水泥、水化产物、纤维及孔隙。能谱仪(EDS)面扫与线扫可定量绘制 ITZ 区域的元素(如 Ca、Si、Al 及改性引入的 Si、N 等)分布图，直观反映改性剂在界面的富集情况与化学梯度。

原子力显微镜(AFM)：定量测量 ITZ 的纳米级粗糙度、弹性模量分布及表面电势。除形貌外，AFM 的多种模式可提供 ITZ 纳米级的定量信息。峰值力定量纳米力学映射(PF-QNM)模式可同步、高分辨率地获取表面的弹性模量、粘附力、耗散能与形貌，直接揭示改性后 ITZ 力学性能的均匀性与增强幅度。开尔文探针力显微镜(KPFM)可测量表面电势，用于研究改性对界面电荷状态的影响，这与离子迁移和耐久性密切相关。

X 射线光电子能谱(XPS)：定性及半定量分析纤维表面改性前后元素种类、化学态及官能团的变化。XPS 可定性及半定量分析纤维表面改性前后元素化学态的变化(如 C-C/C-H, C-O, O-C=O 等基团的相对含量)，确认硅烷偶联剂是否成功接枝。ToF-SIMS 具有更高的表面灵敏度(~1 nm)和分子结构识别能力，可提供改性分子在纤维表面的二维甚至三维分布信息，是揭示表面化学改性均匀性与分子构型的强有力工具。

微观力学性能测试：

纳米压痕(Nanoindentation)：在抛光后的混凝土截面进行网格化压痕测试，绘制 ITZ 区域的弹性模量与硬度分布图，直观反映改性对 ITZ 力学性能的增强效果[19]。在精心抛光(避免产生表面损伤)的混凝土截面，进行高密度网格化纳米压痕测试(如 20 × 20 网格，间距数微米)。通过分析每个压痕点获得的弹性模量与硬度，可绘制出包含纤维、ITZ、水化产物及骨料的“力学性能图谱”。统计 ITZ 区域的模量与硬度值及其分布宽度，可从统计学上精确量化改性对 ITZ 力学性能的增强效果与影响范围。

微米划痕测试(Micro-scratch)与纤维单丝拔出测试：评估纤维与基体界面的粘结强度与失效行为。微米划痕仪使用金刚石压头在抛光截面沿垂直于纤维的方向进行划擦，通过监测临界载荷、摩擦系数和声发射信号，可定量评估纤维-基体界面的粘结强度与失效机理(粘着失效、内聚失效)。纤维单丝拔出测试

则通过将单根纤维埋入水泥浆体微型试件中,直接测试其拉拔过程中的荷载-位移曲线,计算界面剪切强度与滑移硬化/软化行为,是评估改性效果最直接的界面力学手段之一。

4.3. 跨尺度计算模拟与数据驱动设计

多尺度计算力学模拟:

分子动力学(MD)模拟:在原子尺度研究改性剂分子(如硅烷)在纤维表面(如二氧化硅表面)的吸附构型、成键过程,以及改性界面与水化产物的相互作用能。在原子/分子尺度,MD模拟可研究改性剂分子(如硅烷偶联剂)在纤维模型表面(如二氧化硅晶体表面、石墨烯片层)的吸附动力学、最优构型、结合能以及界面水分子结构。

细观有限元/离散元(FEM/DEM)模拟:利用X-CT扫描重建或随机算法,建立包含粗/细骨料、水泥浆体(可区分不同水化相)、界面过渡区(ITZ)和大量随机分布纤维的三维真实细观几何模型。关键步骤在于为不同组分(特别是经纳米压痕或MD标定的改性后ITZ)赋予准确的本构关系与力学参数。通过此类模型,可以模拟混凝土在单轴、多轴载荷或环境作用下的复杂开裂过程、损伤局部化、声发射特性及最终的宏观应力-应变响应,定量揭示ITZ性能、纤维分布与取向对宏观力学行为与破坏模式的影响机制[20]。

人工智能与材料信息学:

构建包含纤维类型、改性参数、配合比、工艺条件和最终性能的数据库。

应用机器学习算法(如深度学习、随机森林、支持向量机)挖掘数据中隐藏的复杂关系,建立性能预测模型。

利用优化算法(如遗传算法)逆向设计,给定目标性能要求,推荐最优的纤维改性方案与混凝土配比,实现材料的“按需设计”。

5. 结论与展望

对合成纤维进行多尺度界面改性,是提升混凝土综合性能、解锁其更高应用潜力的关键途径。本文系统综述了改性合成纤维混凝土的研究进展,指出通过化学接枝、物理刻蚀及复合涂层等策略,能够从分子、微观到细观多个层面有效强化纤维-水泥基体界面过渡区,从而显著改善混凝土的韧性、抗裂性及耐久性。混杂纤维体系通过性能互补与多级阻裂设计,进一步实现了“1+1>2”的协同增强效果。目前,该领域已构建起涵盖宏观力学测试、微纳观结构表征与跨尺度数值模拟的较为完备的研究方法体系。

然而,本研究也揭示出该领域仍面临若干核心挑战,构成了当前研究的主要瓶颈与未来突破的方向。首要挑战在于界面长期性能的可靠性与机理不明,改性界面在湿热、腐蚀、疲劳等多因素耦合作用下的演化规律与失效机制尚需深入探究。其次,高性能改性技术的经济性与规模化矛盾突出,部分高效工艺成本与能耗较高,难以匹配建筑材料的大宗、低碳生产需求。再者,标准与设计理论体系滞后,缺乏从材料评价到工程设计的统一规范,制约了其优势的充分发挥。

面向未来,改性合成纤维混凝土的研究与应用需向智能化、绿色化与系统化深度演进。在技术前沿上,应着力发展具备损伤感知与自修复功能的智能纤维,并深化其在深海、极地等极端环境下的性能研究与寿命预测模型构建。在工程应用上,亟待推动涵盖材料、设计、施工与运维的全链条标准化与数字化,借助BIM与数字孪生技术实现全生命周期性能管控。在可持续发展层面,积极探索生物基或再生合成纤维的改性技术,推动混凝土行业向循环经济模式转型。

综上,未来的研究需进一步加强材料、化学、力学、信息等多学科的交叉融合,推动改性合成纤维混凝土从传统的“增强复合材料”向“可设计、自适应、长寿命”的先进工程材料系统跨越。这不仅是保障重大基础设施长效安全的核心需求,也是驱动建筑业实现绿色低碳与高质量发展的重要科技力量。

参考文献

- [1] 梅伟, 高强, 吴捷, 等. 混杂纤维对混凝土抗冻性能影响的试验研究[J]. 中国水泥, 2024(12): 78-81.
- [2] 理惊哲, 王福初, 杨佐斌, 等. 基于 PVA 纤维改性混凝土的高拱坝温控防裂技术研究[J]. 水力发电, 2025, 51(6): 78-84+99.
- [3] 邵明志. 高性能聚丙烯纤维混凝土抗冻-耐热性能试验研究[J/OL]. 铁道建筑技术, 2025(11): 34-37.
<https://link.cnki.net/urlid/11.3368.TU.20250930.2044.018>, 2025-10-19.
- [4] 王兴国, 柳志炫, 王永贵, 等. 混杂纤维-硅溶胶改性再生混凝土性能试验[J]. 铁道工程学报, 2025, 42(5): 98-103.
- [5] 龚建伍, 田富磊, 杨泰华. 玄武岩-聚丙烯混杂纤维再生混凝土力学性能试验研究[J]. 武汉科技大学学报, 2025, 48(2): 92-99.
- [6] 曹磊. 玄武岩-聚丙烯混杂纤维混凝土冻融循环试验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [7] 冯兢杰. 丁苯胶乳改性 PVA 纤维混凝土力学性能试验及多尺度仿真模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
- [8] 赵丽, 李书进, 宋杨, 等. 植物纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10): 1021-1026.
- [9] 刘胜兵, 梅浩华, 黄依莹, 等. 玄武岩-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土强度研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(12): 1725-1732.
- [10] 尹燕涛, 吴浩凯, 王帅邻, 等. 玄武岩-PVA 混杂纤维对混凝土早期力学性能试验研究[J]. 水泥工程, 2025, 38(2): 70-73+77.
- [11] 佟欢, 张一迪. 玄武岩-PVA 混杂纤维混凝土抗硫酸盐腐蚀性能研究[J]. 吉林水利, 2025(3): 18-21+26.
- [12] Vadivel, M., Selinaruby, G., Padmapriya, R. and Perumal, B. (2025) Experimental Research on Mechanical and Micro-structural Characteristics of Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC). *Scientific Reports*, **15**, Article No. 43189.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-23963-3>
- [13] 林亚党, 薛飞. 改性玄武岩纤维对粉煤灰混凝土路用性能影响研究[J/OL]. 公路, 2025(10): 330-334.
<https://link.cnki.net/urlid/11.1668.U.20251010.1200.090>, 2025-10-19.
- [14] 马立军, 张博超, 苟维光, 等. 硅灰/耐碱玻璃纤维-聚丙烯混杂纤维 ECC 力学特性研究[J]. 北方建筑, 2025, 10(1): 47-52.
- [15] 张义彬, 文玉雷, 朱敏, 等. 混杂纤维增强混凝土抗侵蚀性能研究进展[J/OL]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(11): 307-318. <https://link.cnki.net/urlid/50.1213.TJ.20250917.0939.004>, 2025-09-26.
- [16] Peng, R., Qiu, W. and Teng, F. (2020) Three-Dimensional Meso-Numerical Simulation of Heterogeneous Concrete under Freeze-Thaw. *Construction and Building Materials*, **250**, Article ID: 118573.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118573>
- [17] Yan, G., Zhao, Y., Wang, D., Jin, K., Zhang, H., Wang, P., et al. (2026) Mechanical Enhancement of Hybrid Steel Fiber-Reinforced Superabsorbent Polymer Concrete: Experimental and Multiscale Simulation Analysis. *Journal of Building Engineering*, **117**, Article ID: 114762. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114762>
- [18] Borhan, T.M. (2012) Properties of Glass Concrete Reinforced with Short Basalt Fibre. *Materials & Design*, **42**, 265-271.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.062>
- [19] High, C., Seliem, H.M., El-Safty, A. and Rizkalla, S.H. (2015) Use of Basalt Fibers for Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, **96**, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.138>
- [20] Dias, D.P. and Thaumaturgo, C. (2005) Fracture Toughness of Geopolymeric Concretes Reinforced with Basalt Fibers. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044>