

纤维混凝土性能改善的机理剖析

徐 奥, 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12日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月14日

摘 要

为系统改善传统混凝土抗拉强度低、脆性大及耐久性不足等问题, 纤维增强技术已成为关键途径。本文聚焦于合成纤维与天然纤维两大类增强材料, 通过文献计量与性能对比分析, 系统综述了二者对混凝土力学性能与耐久性能的作用机理及影响规律。分析表明: 合成纤维(如聚丙烯、碳纤维)在提升抗拉强度与抗环境老化方面优势显著, 但其分散性及界面粘结问题制约了性能发挥; 天然纤维(如玄武岩、黄麻)虽在抗压强度贡献上有限, 且易受湿度与微生物降解, 但其在抗裂韧性提升与可持续发展方面潜力突出。本文进一步揭示了纤维-混凝土界面适配性、长期性能退化机制等共性问题, 以期为高性能纤维混凝土的研发与工程应用提供理论依据。

关键词

纤维增强混凝土, 合成纤维, 天然纤维, 界面粘结, 耐久性, 可持续发展, 性能对比

Analysis of the Mechanisms for Improving the Performance of Fiber Reinforced Concrete

Ao Xu, Xiaodong Zhang, Xiaoxi Zhang

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

Received: January 12, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 14, 2026

Abstract

To systematically address the traditional problems of concrete such as low tensile strength, high brittleness, and insufficient durability, fiber reinforcement technology has become a key approach. This paper focuses on two major types of reinforcement materials: synthetic fibers and natural fibers. Through bibliometric and performance comparison analyses, it provides a systematic review

of their mechanisms of action and influence patterns on the mechanical and durability properties of concrete. The analysis indicates that synthetic fibers (such as polypropylene and carbon fiber) have significant advantages in improving tensile strength and resistance to environmental aging, but their performance is limited by issues of dispersion and interfacial bonding. Although natural fibers (such as basalt and jute) contribute little to compressive strength and are susceptible to humidity and microbial degradation, they show remarkable potential in enhancing crack resistance and promoting sustainability. Furthermore, this paper reveals common issues such as fiber-concrete interface compatibility and long-term performance degradation mechanisms, aiming to provide a theoretical basis for the development and engineering application of high-performance fiber-reinforced concrete.

Keywords

Fiber-Reinforced Concrete, Synthetic Fibers, Natural Fibers, Interface Bonding, Durability, Sustainable Development, Performance Comparison

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

本文的研究背景源于混凝土材料固有的“强抗压、弱抗拉”、脆性大及耐久性不足等瓶颈问题。纤维增强技术是解决这些问题的有效途径,其中合成纤维(如聚丙烯、碳纤维)与天然纤维(如玄武岩、黄麻、剑麻、亚麻纤维)因其性能与来源的显著差异,成为研究的焦点。系统对比两者对于推动该技术的发展具有重要意义[1]。

现有研究表明:合成纤维(如聚丙烯、聚乙烯醇)与钢纤维混掺的对混凝土抗压强度的影响复杂,并非总是正向。有研究指出,在低掺量下(0.06%),合成纤维与钢纤维混掺可提升抗压强度(如提升10.67%~13.53%),但在中、高掺量下(0.12%, 0.18%)可能导致强度下降甚至低于基准水平[1]。其核心优势主要体现在通过有效的应力重分布和提高断裂韧性来增强抗弯曲性与抗裂性[2]。天然纤维(如剑麻、亚麻)的掺入对混凝土抗压强度通常有轻微削弱作用(例如掺量增至3.0%时,强度降低4.23%~7.51%),但其对劈裂抗拉强度和抗折强度的提升效果显著,呈现“先升高后降低”的趋势。在最佳掺量下(如剑麻纤维0.5%, 亚麻纤维2.0%),这两项强度指标可提升约20%和28% [3]。

本文旨在系统梳理合成纤维与天然纤维增强混凝土力学性能与耐久性能,对比剖析合成纤维与天然纤维混凝土性能改善机理,构建合成纤维与天然纤维混凝土性能改善的理论框架体系及新的试验研究方向,高性能纤维混凝土的研发与工程应用提供理论依据。

2. 合成纤维增强混凝土的性能研究

2.1. 典型合成纤维的力学性能增强效果

合成纤维对混凝土力学性能的改善主要体现在抗拉、抗折及韧性方面,对抗压强度的提升有限,甚至在高掺量时产生负面影响。各类合成纤维的增强效果如表1所示。

2.2. 耐久性能表现

合成纤维在改善混凝土耐久性方面作用显著,其在耐久性维度的表现分析如表2所示。

Table 1. Comparison of enhancement effects of synthetic fibers on mechanical properties of concrete
表 1. 合成纤维对混凝土力学性能增强效果对比

| 纤维类型 (长度) | 最佳掺量范围 (体积分数) | 对抗压强度影响 (与基准对比) | 对抗拉强度影响 (与基准对比) | 性能变化规律与关键特 征 | 关键 文献 |
|-----------------------|------------------|---|--|--|----------|
| 聚丙烯纤维 (12 mm) | 0.25%~0.75% | 从 33.33 MPa 升至 39.11 MPa, 增幅从 1.37%扩大至 18.95%, 试验内无回落。 | 从 3.11 MPa 升至 3.82 MPa, 增幅从 6.14%扩大至 30.36%, 增长趋势未放缓。 | “掺量与强度同步稳定提升”。增韧阻裂效果显著, 性价比高, 分散性较好。 | [4] |
| 超高分子量聚乙烯纤维 (30 mm) | 约 0.3% (峰值) | 仅 0.1%掺量时提升 (78.5 MPa, 增幅 8.73%), >0.1%后持续降低, 0.8%时降至 70.0 MPa。 | 0.3%掺量时达峰值 6.68 MPa (幅 26.04%), >0.3%后强度与增幅均回落。 | “低掺量最优, 超量添加力学性能指标下降”。高强高韧, 但掺量窗口窄, 过量易团聚导致性能下降。 | [5] |
| 碳纤维 (10 mm) | 0.5%~2.0% | 从 42.3 MPa 升至 44.8 MPa, 增幅从 4.44%扩大至 10.62%, 增幅稳定。 | 从 3.5 MPa 升至 4.6 MPa, 增幅从 25%扩大至 64.29%, 但增幅随掺量增加逐步收窄, 呈现饱和趋势。 | “强度持续提升, 增幅趋缓”。高模量, 显著提升抗拉强度与刚度, 适用于高端结构。 | [6] |
| 玻璃纤维 (10 mm) | 0.5%~3.0% | 从 54.1 MPa 升至 58.1 MPa, 增幅从 0.93%扩大至 8.40%, 强度绝对值高但提升效率较低。 | 从 3.9 MPa 升至 4.8 MPa, 增幅呈现“先降后升”的波动 (21.63%→10.53%→26.32%)。 | “强度平缓提升, 增幅波动”。成本较低, 但性能增强规律性不及其他纤维, 可能与界面有关。 | [7] |

Table 2. Analysis of the effects of synthetic fibers on the durability of concrete
表 2. 合成纤维对混凝土耐久性能的影响分析

| 耐久性维度 | 作用效果与机理 | 表现评述与典型纤维 | 注意事项 |
|--------|---|--------------------------------|-----------------------------|
| 抗冻融性 | 钢纤维可发挥拉结与桥接作用, 抑制表面剥落与裂缝发展, 显著降低质量损失和动弹性模量损失 [8] [9]。 | 钢纤维最优, 其他合成纤维 (如 PP) 也有一定改善作用。 | 纤维本身不改变孔隙结构, 但对冻融损伤的抑制作用明显。 |
| 耐高温性 | 钢纤维等具有高熔点与高温稳定性, 有助于高温下保持结构性能 [10]。 | 钢纤维、碳纤维表现较好。 | 多数聚合物纤维 (如 PP) 高温下会熔化或分解。 |
| 耐紫外线老化 | 部分高分子纤维较好; 玻璃纤维长期照射下强度可能下降 [11]。 | PVA 纤维通常较好。 | 需关注纤维的长期光老化性能 [12]。 |
| 耐化学腐蚀性 | 聚丙烯、聚乙烯醇、碳纤维在酸碱环境中化学稳定性好, 能有效阻隔腐蚀介质 [13] [14]。 | PP、PVA、碳纤维为优。 | 部分合成纤维在强酸环境中可能水解失效。 |

3. 天然纤维增强混凝土的性能研究与应用潜力

3.1. 典型天然纤维的力学性能增强效果

天然纤维的增强效果因其种类、处理方式和掺量差异显著, 其力学性能表现总结如表 3 所示。

Table 3. Comparison of enhancement effects of natural fibers on mechanical properties of concrete
表 3. 天然纤维对混凝土力学性能增强效果对比

| 纤维类型 (长度) | 最佳掺量/ 特点 | 对抗压强度影响 | 对抗拉/抗折强度 影响 | 性能变化规律 | 关键文献 |
|-------------------|--------------------------------|---|---|------------------------------------|------|
| 玄武岩纤维 (11 mm) | 0.3 kg/m ³ | 中低掺量最优, 0.3 kg/m ³ 时达 53.46 MPa (增幅 11.79%), 超量后小幅回落但仍高于基准。 | 提升突出, 0.3 kg/m ³ 时抗拉强度达 3.86 MPa (增幅 17.47%)。 | “中低掺量优势明显”。性能最接近合成纤维, 稳定性在天然纤维中最优。 | [15] |
| 剑麻纤维 | 0.5% (体积) | 掺量由 0 增至 3.0%, 抗压强度从 42.6 MPa 降低至 39.4 MPa。 | 0.5%掺量时, 劈裂抗拉强度与抗折强度分别提升 20.24% 和 18.26%。 | “提升抗拉, 降低抗压”。能明显改善混凝土的抗拉和抗折性能。 | [3] |
| 亚麻纤维 | 2.0% (体积) | 掺量由 0 增至 3.0%, 抗压强度从 42.6 MPa 降低至 40.8 MPa。 | 2.0%掺量时, 劈裂抗拉强度与抗折强度分别提升 21.45% 和 28.13%。 | “显著提升抗拉抗折”。对韧性改善效果优于剑麻纤维。 | [3] |
| 水稻秸秆纤维 (40 mm) | 0.1 kg/m ³ (对抗拉) | 0.2kg/m ³ 时抗压强度达峰值(48.27 MPa, 增幅 16.65%), 0.4 kg/m ³ 时转降。 | 0.1 kg/m ³ 时显著提升(3.54 MPa, 增幅 28.26%), 超量后迅速下降至基准以下。 | “有效窗口极窄”。需极其精准地控制掺量。 | [16] |
| 黄麻纤维 (10 mm) | 极低掺量 (0.25%) | 0.25%时微弱提升 (35.5 MPa, 增幅 9.23%), >0.5%后显著下降。 | 改善作用微弱且不稳定, 增幅最高仅 10%, 与基准值差异小。 | “对抗压敏感, 对抗拉无效”。有效掺量区间极窄, 优化效果不显著。 | [17] |

3.2. 耐久性局限性与改性研究进展

天然纤维在耐久性方面面临严峻挑战: 1) 高吸水性(10%~30%)影响工作性, 并在冻融循环中引发更大膨胀压力, 加速破坏[18]; 2) 耐候性差, 在紫外线、湿热和微生物作用下易发生降解、脆化, 强度衰减快(户外暴露 3~5 年后可下降 40%~60%) [19] [20]; 3) 耐化学腐蚀性弱, 在酸碱环境中易被腐蚀[21]。当前改性研究主要集中于物理化学处理、矿物涂层及与合成纤维混杂, 以弥补其耐久性短板。

3.3. 可持续性优势与适用场景分析

尽管存在性能短板, 天然纤维的全生命周期低碳属性无可替代。其应用应扬长避短, 目前更适合用于: 非承重或次承重结构(如内墙板); 对韧性要求高、对绝对强度要求不高的场合(如边坡生态防护、低等级乡村道路); 以及具有特定文化或环保意义的建筑。推动本地化取材和简易改性处理, 是降低其成本、提升其在农村和区域性应用中竞争力的关键路径[22] [23]。

4. 纤维增强混凝土的作用机理与性能关联分析

4.1. 纤维的增韧与阻裂机理

纤维在混凝土中的主要作用体现在裂缝发展的三个阶段: 在微裂缝萌生阶段, 纤维起到“微筋材”作用, 分担应力; 在裂缝扩展阶段, 纤维跨越裂缝, 通过“桥接效应”传递荷载, 限制裂缝宽度; 在宏观破坏阶段, 纤维被拔出或拉断, 消耗大量能量, 从而显著提高材料的韧性及破坏时的延性。合成纤维通

常具有较高的弹性模量和抗拉强度，桥接效应显著[24]；而天然纤维虽模量较低，但其良好的变形能力亦能通过塑性耗能提升韧性。

4.2. 纤维 - 基体界面行为及其对性能的影响

界面过渡区是纤维增强混凝土的薄弱环节和性能调控的关键。界面粘结强度取决于纤维表面性质、水泥水化产物以及物理化学粘结力。合成纤维表面光滑且化学惰性强，主要依赖机械锚固，界面粘结强度普遍偏低(约 0.5~1.5 MPa)。天然纤维表面粗糙、多羟基结构，能与水泥水化产物形成一定的化学键合，但其高吸水性易导致界面区水灰比升高，形成多孔结构，反而削弱了粘结强度[25]。优化界面是提升纤维增强效率的核心。

4.3. 纤维参数对性能的调控规律

纤维的长度、直径、长径比、掺量及分布均匀性共同决定了增强效果。一般而言，存在一个“临界纤维长度”和“最佳掺量范围”。过短或过少的纤维无法有效桥接裂缝；而过长或过量的纤维则易团聚，造成施工困难并在基体中引入缺陷，导致强度下降。例如，聚丙烯纤维在适量掺量下(如 0.75%)，抗拉强度可提升 30%以上；而超高分子量聚乙烯纤维超过 0.3%掺量后，增强效率即开始下降[26] [27]。

5. 合成纤维与天然纤维的综合对比与关键问题剖析

5.1. 力学与耐久性能量化对比

为直观对比两类纤维的综合性能，本文汇总关键指标如表 4 所示。

Table 4. Comparison of comprehensive properties of synthetic fiber-reinforced concrete and natural fiber-reinforced concrete
表 4. 合成纤维与天然纤维增强混凝土综合性能对比

| 性能指标 | 典型合成纤维(如聚丙烯) | 典型天然纤维(如玄武岩) | 对比结论与机理分析 |
|-----------|---------------------|-------------------|---|
| 抗压强度提升 | 通常<15%，过量(>1.5%)易下降 | 通常<10%，对掺量极为敏感 | 合成纤维总体更优。过量纤维引入缺陷是共因；天然纤维高吸水性加剧界面弱化。 |
| 抗拉/抗折强度提升 | 显著，可达 30%-60% | 中等至显著，玄武岩纤维可达 25% | 两类纤维均能有效提升抗拉性能。合成纤维依赖高模量桥接[23]。 |
| 韧性与抗裂性 | 优，阻裂、增韧效果明显 | 良，植物纤维增韧但阻裂稍逊 | 合成纤维在控制裂缝宽度方面更优；部分天然纤维因高延性而具有良好能量吸收能力[4]。 |
| 耐冻融性 | 良至优(钢纤维最优) | 差至中 | 天然纤维高吸水性导致内部结冰压力增大，加速破坏[18]。 |
| 耐高温性 | 中至优(取决于熔点) | 差 | 天然纤维有机物在高温下分解、炭化[19]。 |
| 耐化学腐蚀性 | 优(如聚丙烯耐酸碱) [28] | 差 | 天然纤维成分易受酸碱侵蚀和水解[21]。 |
| 长期抗老化性 | 良(紫外线可能导致降解) [20] | 差 | 天然纤维易受紫外线、湿热和微生物降解。 |
| 经济性 | 原料成本较高，施工工艺复杂 | 原料成本低，但改性处理增加成本 | 天然纤维在原材料获取上具有成本优势。 |
| 环境效益 | 高能耗、高碳足迹 | 优，可再生、可降解、低碳[29] | 天然纤维在可持续发展方面具有不可比拟的优势[25]。 |

5.2. 经济性与环境效益分析

从全生命周期视角评估, 合成纤维(尤其是碳纤维)的生产过程能耗高、碳排放量大。然而, 其卓越的耐久性和对结构寿命的延长, 可能在使用阶段抵消部分环境影响。天然纤维生产能耗极低, 且具备碳封存潜力, 但其较短的服役寿命和可能增加的维护需求, 需在 LCA 评估中予以权衡。

5.3. 共性与个性关键问题总结

共性瓶颈: 1) 界面粘结薄弱; 2) 纤维分散不均; 3) 长期性能退化机制不明。

个性挑战: 1) 合成纤维: 成本高、环境压力大、高掺量下强度损失; 2) 天然纤维: 耐久性差、性能变异性大、有效掺量区间窄。

6. 结论

本研究系统梳理并对比了合成纤维与天然纤维在混凝土增强中的应用机理、性能表现及关键挑战, 得出以下核心结论:

(1)性能优势对比: 合成纤维在显著提升混凝土抗拉强度、韧性与长期耐久性方面表现出稳定且突出的优势, 尤其适用于对力学性能和耐久性要求严苛的高端工程领域。对于海工、高等级路面、抗震及高温环境等对力学性能与长期耐久性要求严苛的工程, 应优先选用合成纤维(如聚丙烯、钢纤维、碳纤维)。其高模量、强阻裂及优异的化学稳定性是保障结构安全与耐久的关键, 必要时可采用混杂纤维或表面改性以进一步优化性能。天然纤维则在改善韧性、抗裂性及可持续发展方面展现出独特潜力, 但其固有缺陷(如高吸水性、耐久性差)限制了其在承重结构中的广泛应用, 在非承重结构、临时工程、生态护坡及对低碳有明确要求的场景, 推荐使用经简易改性(如碱处理、涂层)的天然纤维(如剑麻、秸秆)。此举能充分发挥其成本低、可再生、韧性好的优势, 是实现土木工程材料绿色发展的重要路径。

(2)共性关键技术瓶颈: 两类纤维混凝土均面临纤维-基体界面粘结薄弱与纤维分散均匀性差的核心共性问题, 这是制约其性能充分发挥的关键。此外, 长期性能退化机制尚不明确, 需进一步深入研究。

(3)经济与环境效益权衡: 合成纤维(尤其是碳纤维、高性能聚合物纤维)生产成本与碳排放较高, 但其优异的耐久性可能延长结构寿命, 部分抵消全生命周期环境影响。天然纤维原材料成本低、可再生、碳足迹小, 但较短的服役寿命与潜在的维护需求需在全生命周期评价中综合考量。

参考文献

- [1] 姚瑶. 多种钢混合成纤维混凝土性能试验研究及经济价值分析[J]. 中国水泥, 2025(5): 35-38.
- [2] Arvizu-Montes, A., Guerrero-Bustamante, O., Polo-Mendoza, R. and Martinez-Echevarria, M.J. (2025) Mechanical Performance of Fiber-Reinforced Cement Mortars: A Comparative Study on the Effect of Synthetic and Natural Fibers. *Buildings*, **15**, Article 2352. <https://doi.org/10.3390/buildings15132352>
- [3] 宋丹, 李晓英, 何依蔓. 不同类型天然纤维对混凝土力学性能的影响研究[J]. 混凝土, 2024(9): 101-104.
- [4] 李明, 赵峰, 杨璞. 聚丙烯纤维增强混凝土的力学性能研究[J]. 交通世界, 2024(20): 48-50.
- [5] 晏麓晖, 张玉武, 朱林. 超高分子量聚乙烯纤维混凝土的基本力学性能[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 43-47.
- [6] 杨杰. 碳纤维增强混凝土的力学性能提升及在高层建筑中的应用[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(8): 36-38.
- [7] 葛辉, 张启志. 玻璃纤维对混凝土力学性能的影响[J]. 化学与粘合, 2021, 43(2): 121-123+128.
- [8] Shen, R., Wu, K., Mo, F., Luo, K., Yu, H., Fang, S., *et al.* (2025) Effect of Temperature Cycles on Calcined-Bauxite-Aggregate High-Strength-Steel-Fibre-Hybrid-Reinforced Rapid-Hardening Concrete: Quasi-Static and Dynamic Compressive Performance. *Construction and Building Materials*, **504**, Article 144578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144578>
- [9] 菅士良, 侯莉娜, 黄炜, 等. 纤维混凝土抗冻性能研究现状及展望[J]. 应用化工, 2023, 52(11): 3153-3157+3162.

- [10] 葛晨, 杨鼎宜, 张军. 高温后纤维混凝土微结构与力学性能研究[J]. 混凝土, 2022(7): 53-58+66.
- [11] Vadivel, M., Selinaruby, G., Padmapriya, R. and Perumal, B. (2025) Experimental Research on Mechanical and Microstructural Characteristics of Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC). *Scientific Reports*, **15**, Article No. 43189. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23963-3>
- [12] 虞洋, 何羽茜, 张娟, 等. 混杂纤维增强超高性能混凝土高温后性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 68-72.
- [13] Priyaanka, L.S., Ranjan, P.K., Hari, R., Zhuge, Y. and Mini, K.M. (2026) Hermite Interpolation Technique-Based Performance Assessment of Coir-Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **38**. <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-20185>
- [14] Smarzewski, P. (2026) Shear Behaviour and Failure Mechanisms of High-Performance Concrete Beams without Stirrups Reinforced with Hybrid Steel, Polypropylene and Glass Fibres. *Composite Structures*, **377**, Article 119866. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119866>
- [15] 沈亚金, 倪金花, 陈宇轩, 等. 玄武岩纤维混凝土力学性能及断裂特性研究[J]. 福建建材, 2025(4): 9-12.
- [16] 秦超. 水稻秸秆纤维增强混凝土在水利工程中的应用研究[J]. 合成纤维, 2021, 50(7): 45-49.
- [17] 孙海龙. 黄麻纤维对混凝土塑化性能和物理力学性能的影响[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(8): 130-133+139.
- [18] 杜红伟. 纤维复合材料加固混凝土构件耐久性设计[J]. 南阳理工学院学报, 2012, 4(4): 80-84.
- [19] 潘志伟. 天然纤维增强环氧树脂基混凝土的环境老化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [20] 卢安琪, 祝烨然, 李克亮, 等. 聚丙烯纤维混凝土耐气候老化性能试验研究[J]. 混凝土, 2002(1): 61-63.
- [21] 陆建南, 辜凯, 张浩. 不同纤维材料对混凝土力学及耐久性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2024(1): 22-27.
- [22] 徐文远, 刘秀, 纪泳丞. 绿色建材与低碳混凝土课程思政改革: 理论与实践探讨[J]. 高教学刊, 2025, 11(21): 19-23+31.
- [23] 孙希鹏, 张沛伦. “双碳”背景下再生混凝土在工程中的应用现状与发展趋势研究[J]. 中国建材科技, 2025, 34(2): 8-11.
- [24] 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 114762. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114762>
- [25] Ntsie, O.D., Phiri, R., Boonyasopon, P., Rangappa, S.M. and Siengchin, S. (2025) Advancing Sustainable Infrastructure: Natural Fiber-Reinforced Composites in Engineering. *Discover Applied Sciences*, **7**, Article No. 884. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07266-w>
- [26] 周明耀, 杨鼎宜, 汪洋. 合成纤维混凝土材料的发展与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2003, 1(4): 1-4.
- [27] Jaafar Mosa, Z. and Ali Mohammed, H. (2025) Enhancing Flexural and Splitting Strength of Concrete with Two Hybrid Fiber Types. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1545**, Article 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1545/1/012059>
- [28] 夏冬桃, Itry Samira, 吴晨, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土耐硫酸盐侵蚀性能研究[J]. 湖北工业大学学报, 2025, 40(5): 86-89.
- [29] Saleem, S., Shah, O.H., Jirawattanasomkul, T., Dawei, Z., Pimanmas, A., Kunawisarut, A., *et al.* (2025) Evaluating Natural and Synthetic Fibers in Strengthening Concrete Column Specimens with Varying Corner Radii and Aspect Ratios. *Journal of Building Engineering*, **103**, Article 112095. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112095>