

植物纤维与人造纤维混合增强混凝土性能研究进展

战小宝*, 张晓东#

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年3月9日; 发布日期: 2025年3月20日

摘要

随着国家对于碳排放领域的重视以及混杂纤维混凝土在建筑领域中的广泛应用, 植物纤维与人造纤维混合增强混凝土性能的研究成为重要课题。混杂纤维的加入有效地改善了混凝土易开裂, 抗拉强度低, 脆性破坏等缺点, 同时还提高了混凝土的耐久性。本文结合国内外学者的研究, 综述了植物纤维与人造纤维混杂对于混凝土静态力学性能, 动态力学性能的改善以及增强机理, 分析了混杂纤维对于混凝土吸水性、渗透性、耐酸腐蚀性的影响以及混杂纤维混凝土在高温环境下的抗剥落机理, 残余力学性能。最后提出目前关于植物纤维与人造纤维混合增强混凝土所存在的一些问题, 为今后进一步研究混杂纤维增强混凝土提出参考建议。

关键词

混杂纤维混凝土, 植物纤维, 力学性能, 耐久性, 耐高温性能

Research Progress on the Properties of Reinforced Concrete Mixed with Plant Fiber and Artificial Fiber

Xiaobao Zhan*, Xiaodong Zhang#

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

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Mar. 9th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

Abstract

With the attention of the country to the field of carbon emission and the wide application of hybrid

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 战小宝, 张晓东. 植物纤维与人造纤维混合增强混凝土性能研究进展[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 370-381.
DOI: 10.12677/hjce.2025.143043

fiber concrete in the construction field, the research on the performance of reinforced concrete mixed with plant fiber and man-made fiber has become an important topic. The addition of hybrid fiber can effectively improve the shortcomings of concrete such as easy cracking, low tensile strength, brittle damage, and improve the durability of concrete. Based on the research of domestic and foreign scholars, this paper summarizes the improvement and enhancement mechanism of the hybrid of plant fiber and man-made fiber on the static and dynamic mechanical properties of concrete, and analyzes the influence of hybrid fiber on the water absorption, permeability and acid corrosion resistance of concrete, as well as the anti-spalling mechanism and residual mechanical properties of hybrid fiber concrete under high temperature environment. Finally, some problems existing in the hybrid reinforced concrete of plant fiber and man-made fiber are put forward, and some suggestions are put forward for further study of hybrid fiber reinforced concrete.

Keywords

Hybrid Fiber Concrete, Plant Fiber, Mechanical Properties, Durability, High Temperature Resistance

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

近年来, 减少碳排放以应对气候变化逐渐成为全球共识[1]。自改革开放以来, 我国城镇化水平快速提升, 建筑业规模不断扩大[2]。相关数据显示, 2020 年我国建筑领域碳排放总量为 52.38 亿吨, 占全国碳排放总量的 52.94%, 已超过全国碳排放的一半[3]。建筑领域已经成为碳减排的重点研究领域[4]。混凝土作为建筑领域中应用最广泛的材料存在着抗拉强度低、韧性差、易开裂等缺点, 很大程度上影响了混凝土的应用。针对这些问题, 学者们通过添加纤维来改善混凝土的性能, 并且目前趋势表明, 学者们越来越倾向于向混凝土中混合加入不同种纤维类型。通过利用两种或两种以上不同类型的纤维在混凝土中结合时产生的协同效应, 从而增强混凝土的性能[5]。常见的纤维包钢纤维、碳纤维、玻璃纤维和合成纤维等。然而, 这些纤维不仅生产成本较高, 增加了工程造价, 并且生产过程中产生的能源消耗与废气排放也不利于环境保护与可持续发展[6]。

天然纤维通常是一种没有得到充分利用的资源[7], 具有价格低廉、来源广泛、轻质环保、比强度高等优点[8]。更值得让人注意的是, 由于植物纤维在生长周期中的固碳作用, 使得水泥基材料在生产和硬化过程中通过化学反应排放的大量二氧化碳可以被吸收, 从而达到减少碳排放的目的[9]。因此被研究者广泛关注。

为了推进国家“双碳”目标的进程, 同时也为了最大限度地发挥不同纤维类型之间的协同作用, 进一步改善混凝土的性能, 关于混杂纤维混凝土的性能的研究也越来越多。本文针对不同的植物纤维与人造纤维的组合, 探讨了其对于混凝土的力学性能, 耐久性, 耐高温性能的影响。

2. 力学性能

2.1. 静态力学性能

2.1.1. 压缩与弯曲性能

纤维增强混凝土的抗压强度与纤维的用量、纤维的尺寸和纤维的形状等几个参数有着密切的关系。

平均而言，纤维增强混凝土的抗压强度会低于普通混凝土的抗压强度[10]。然而植物纤维与人造纤维的组合对于混凝土的抗压强度却有所提升。在混杂纤维混凝土中，纤维在混凝土平面基质中也起到横向钢筋的作用，导致压应力的分布和传递，延缓了微裂缝的融合向宏观裂缝的转变[11]。此外植物纤维在混凝土内部起到固化作用，可以有效地降低混凝土的自收缩，从而减少早期裂纹数量，提高抗压强度[12]。

在抗折强度方面，加入纤维后，纤维在混凝土试样的拉伸区裂纹内的相互作用，显著限制裂纹的扩展，一旦微裂纹穿过纤维，纤维就会凭借纤维与基体的界面粘结性能来承担荷载，起到桥梁的作用，减少附近的应力集中[13] [14]。此外，碱处理后的植物纤维表面更加粗糙。粗糙的表面使植物纤维与水泥基体的结合和联锁增强[15]，从而在复合破坏过程中提供更大的纤维破坏表面积和可观的能量耗散。

近年来研究人员对混杂纤维混凝土的压缩与弯曲性能进行了许多研究，如表 1 所示。加入纤维后显著改善了混凝土的极限荷载与峰后的压缩与弯曲性能。

Table 1. Results of bending and compression experiments of hybrid fiber concrete in literature

表 1. 文献中混杂纤维混凝土的弯曲与压缩实验结果

植物纤维	人造纤维	最优掺量	实验结果	参考文献
竹纤维	玄武岩纤维	1%竹纤维 + 0.75%玄武纤维	抗压强度↑6.5%；抗折强度↑21.5%	[16]
		1.5%竹纤维 + 0.75%玄武纤维	抗压强度↑14.36%；抗折强度↑46.9%	[17]
		0.5%竹纤维 + 0.1%玄武纤维	抗压强度↑51.79%	[18]
	钢纤维	0.25%竹纤维 + 0.75%钢纤维	抗压强度↑17.06%	[19]
剑麻纤维	钢纤维	0.6%剑麻纤维 + 2%钢纤维	抗压强度↑15.8%；抗折强度↑21.9%	[20]
		1.5%剑麻纤维 + 1%钢纤维	抗压强度↓8.2%；抗折强度↑18.6%	[12]
		1.5%剑麻纤维 + 0.6%钢纤维	抗折强度↑17.38%	[21]
	聚丙烯纤维	0.3%剑麻纤维 + 0.5%微钢纤维 + 0.2%聚丙烯纤维	抗压强度↑3%	[22]
		玄武岩纤维	0.2%剑麻纤维 + 0.1%玄武岩纤维	抗压强度↑18.04%；抗折强度↑52.44%
	尼龙 6 纤维	总掺量为 0.3%	抗折强度↑	[24]
		总掺量为 0.1%	抗压强度↑	[24]
	尼龙纤维	0.5%剑麻纤维 + 0.25%香蕉纤维 + 0.25%尼龙纤维	抗压强度↑12%	[25]
焦麻纤维	钢纤维	1.5%焦麻纤维 + 0.6%钢纤维	抗折强度↑32.05%	[21]
洋麻纤维	聚丙烯纤维	总掺量为 1.5%	抗压强度↑100%；抗折强度↑100%	[26]
油棕纤维	聚丙烯纤维	0.6%油棕纤维 + 0.6%聚丙烯纤维	抗压强度↑18%；抗折强度↑4%	[5]
香蕉纤维	钢纤维	0.2%香蕉纤维 + 2%钢纤维	抗压强度↑	[27]
	聚丙烯纤维	0.6%香蕉纤维 + 0.6%聚丙烯纤维	抗压强度↓24%抗折强度↓24%	[5]
槟榔纤维	钢纤维	0.5%槟榔纤维 + 2%钢纤维	抗压强度↑20%；抗折强度↑40%	[28]

续表

椰子纤维	钢纤维	1%椰子纤维 + 1%钢纤维	抗压强度↑6.03%；抗折强度↑24.87%	[29]
		0.2%椰子纤维 + 0.5%钢纤维	抗压强度↑17.9%	[30]
		0.3%椰子纤维 + 1%钢纤维	抗折强度↑100%	[30]
	聚丙烯纤维	总纤维掺量 0.3%	抗折强度↑34%	[31]
黄麻纤维	尼龙纤维	0.5%黄麻纤维 + 0.5%尼龙纤维	抗压强度↑11.71%；抗折强度↑11.04%	[32]
大麦秸秆纤维	钢纤维	15 kg/m ³ 大麦秸秆纤维 + 2%钢纤维	抗折强度↑13.66%	[33]
		15 kg/m ³ 大麦秸秆纤维 + 1%钢纤维	抗压强度↑12.96%	[33]

2.1.2. 拉伸性能

纤维混凝土拉伸性能的评估试验包括劈裂拉伸试验，单轴拉伸试验，平轴拉伸试验等[9]。根据目前的文献调研大多数应用的是劈裂拉伸试验对混杂混凝土的拉伸性能进行评估，其实验结果如表 2 所示。纤维对于拉伸性能的影响取决于纤维本身的性质以及纤维与基体的界面粘结性能[34]。对于混杂纤维混凝土来说，纤维混凝土劈裂后，裂缝区纤维的桥接效应倾向于将应力从混凝土基体转移到纤维上，从而增加混凝土基体的拉伸应变能力，进而提高混凝土的抗拉强度[26]。植物纤维的加入使水化产物的积累更加密集，在一定程度上降低了孔隙度，更有效地传递应力[15]。并且，经过处理后的植物纤维表面变得更加粗糙，如图 1 所示。粗糙的纤维表面增大了纤维与基体之间的界面结合能力，显著改善了其劈裂抗拉强度。此外，混杂纤维的协同效应对于混凝土的劈裂抗拉强度也有积极的影响。

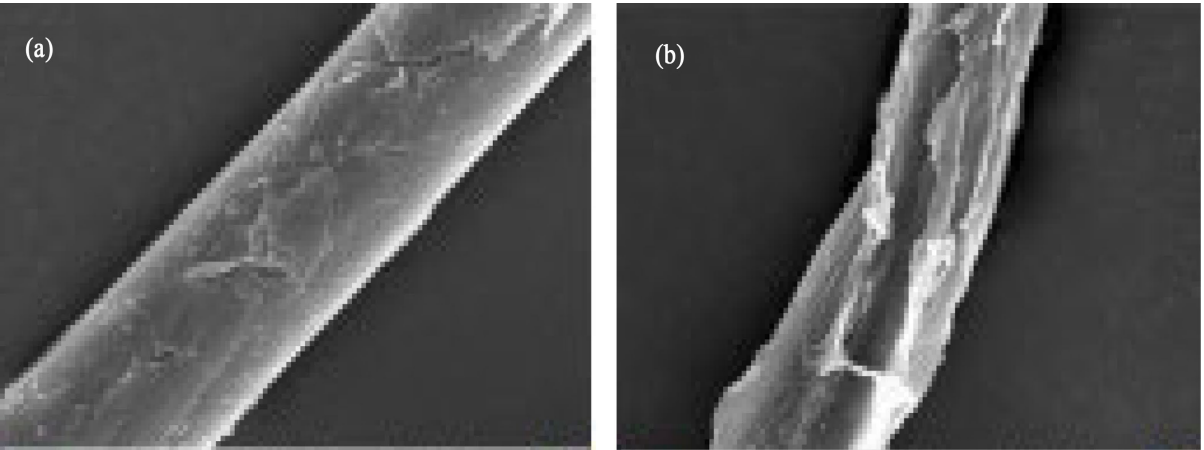


Figure 1. SEM photos of bamboo fiber; (a) untreated bamboo fibre; (b) 10% alkali treated bamboo fiber [15]
图 1. 竹纤维的 SEM 照片；(a) 未经处理的竹纤维；(b) 10%碱处理竹纤维[15]

混杂纤维能够有效地改善混凝土的力学性能，但其掺量存在一个阈值，超过这个阈值，由于纤维的团聚，不仅不会增强其力学性能，反而会使其力学性能下降[35]。

2.2. 动态力学性能

除了静态力学性能的研究外，还有一些研究者将植物纤维与人造纤维混合加入到混凝土中研究其动

Table 2. Tensile test results of hybrid fiber concrete in literature
表 2. 文献中混杂纤维混凝土的拉伸实验结果

植物纤维	人造纤维	最优掺量	实验结果	参考文献
竹纤维	玄武岩纤维	1%竹纤维 + 0.75%玄武纤维	抗拉强度↑10.6%	[16]
		1.5%竹纤维 + 0.75%玄武岩纤维	抗拉强度↑8.68%	[17]
剑麻纤维	钢纤维	0.25%竹纤维+ 0.75%钢纤维	抗拉强度↑26.46%	[19]
	钢纤维	1.5%剑麻纤维 + 0.6%钢纤维	抗拉强度↑27.8%	[21]
		0.3%剑麻纤维 + 0.5%微钢纤维 + 0.2%聚丙烯纤维	抗拉强度↑7%	[22]
	尼龙 6	总掺量为 0.3%	抗拉强度↑	[24]
	尼龙	0.33%剑麻纤维 + 0.33%香蕉纤维 + 0.33%尼龙纤维	抗拉强度↑58%	[25]
洋麻	聚丙烯	总掺量为 1.5%	抗拉强度↑174%	[26]
蕉麻纤维	钢纤维	1.5%蕉麻纤维 + 0.6%钢纤维	抗拉强度↑33.24%	[21]
油棕纤维	聚丙烯纤维	0.6%聚丙烯纤维 + 0.6%油棕纤维	抗拉强度↑5%	[5]
香蕉纤维	钢纤维	0.2%香蕉纤维 + 2%钢纤维	抗拉强度↑	[27]
	聚丙烯	0.6%香蕉纤维 + 0.6%聚丙烯纤维	抗拉强度↓13%	[5]
椰子纤维	钢纤维	0.5%槟榔纤维 + 2%钢纤维	抗拉强度↑51.16%	[28]
		1%椰子纤维 + 1%钢纤维	抗拉强度↑18.36%	[29]
		0.2%椰子纤维 + 0.5%钢纤维	抗拉强度↑	[30]
	聚丙烯纤维	总纤维掺量 0.3%	抗拉强度↑19%	[31]
		黄麻纤维 0.5% + 尼龙纤维 0.5%	抗拉强度↑14.1%	[32]

态力学性能。Zhou 等[36]通过分离式霍普金森压杆试验以及数字图像相关技术，扫描电镜等设备研究了玄武岩纤维与剑麻纤维混合作用下混凝土的动态压缩性能及其开裂机理。研究表明纤维的加入显著改善了混凝土的动态压缩性能，同时也提高了混凝土的吸能能力与韧性。

Zhang 等[37]研究发现，随着应变速率的增加，剑麻纤维对于超高性能混凝土的动态拉伸性能改善更加显著。在高应变速率下，含有 1%长剑麻纤维(12 mm)和 1%短剑麻纤维(6 mm)掺量的超高性能混凝土的动态拉伸性能最佳。动态抗拉强度和动态增加因子分别比普通超高性能混凝土试件提高 26.4%和 15.2%，并提出了一种改进的动态增加因子预测模型，为预测不同应变速率下超高性能混凝土试件的动态增加因子提供参考。

Naraganti 等[38]按照 ACI 委员会 544 的规定，采用落锤试验评价了纤维混凝土在动态荷载作用下的抗冲击性能，对比了钢纤维，剑麻纤维，聚丙烯纤维单掺以及钢 - 聚丙烯纤维，钢 - 剑麻纤维混掺对混凝土抗冲击性能的影响。研究结果指出在单掺纤维情况下，钢纤维对于混凝土的抗冲击性能改善最好；剑麻纤维由于其自身缺陷，对混凝土的抗冲击性能的改善最差；聚丙烯纤维对混凝土的抗冲击性能的改善较弱但要优于剑麻纤维。随着纤维掺量的增加，混凝土的抗冲击性能也会有所提高；在混掺情况下，钢 - 聚丙烯纤维混凝土的抗冲击性能优于钢 - 剑麻纤维混凝土。由于不同类型之间的纤维产生的协同效应，混掺情况下混凝土的抗冲击性能要优于纤维单掺情况的。Vivek 等[39]研究也得出了类似的结论，聚丙烯纤维与蕉麻纤维的协同效应以及纤维的桥接作用使混凝土的抗冲击性能得到了较好的改善。

Bijo 等[31]研究结果指出, 当椰子纤维与聚丙烯纤维的总掺量为 0.3%时, 混杂纤维混凝土的抗冲击性能的提高最为显著, 约为普通混凝土的三倍。这归因于不同类型纤维之间的协同效应以及纤维的桥接作用。

3. 耐久性

3.1. 吸水性

吸水性是衡量混凝土耐久性的重要指标之一, 并且由于植物纤维具有较高的吸水率, 这可能导致混凝土内部的孔隙率增加, 从而影响到混凝土的吸水性进而影响到混凝土的耐久性[40]。Ali 等[16]研究发现, 竹与玄武岩纤维混掺下的混凝土有着较高的吸水率, 这是因为混杂纤维混凝土中纤维的总掺量较多, 需要更长的振动时间来使他们均匀分布, 导致了试件表面出现了更多的表面孔隙和泌水现象, 从而增加了吸水率。Har 等[24]也得出了同样的结论, 随着纤维掺量的增加, 吸水率逐渐增加。

Wang 等[23]研究发现, 随着混杂纤维当中植物纤维的掺量越多混凝土的吸水率越大。Vivek 等[39]也指出, 由于植物纤维的亲水性, 会吸收更多的水分, 导致吸水率增加。然而当植物纤维与疏水的聚丙烯纤维混合应用后, 吸水率有所降低, 且随着聚丙烯纤维掺量的增多而降低。这表明在控制好植物纤维掺量的情况下, 混合纤维的使用可以改善混凝土的耐久性, 降低其吸水性。

Arooq 等[30]研究发现椰子纤维与钢纤维的加入对于高性能混凝土的吸水性的影响是轻微的。当椰子纤维掺量为 0.1%, 钢纤维掺量为 0.5%时其吸水率最低。在高性能混凝土中, 椰子纤维在基体内部提供固化与冷却的作用, 降低了水化热和自收缩对微裂纹发展的负面影响。钢纤维的存在同样抑制了高性能混凝土早期的收缩与开裂。但过多的纤维会产生团聚效应, 导致基体出现更多的孔隙使其吸水率上升。

3.2. 耐酸腐蚀

混凝土暴露在酸性环境当中, 加速了混凝土主要的水化产物和某些骨料(即钙基)的分解和溶解, 导致孔隙溶液中的碱度和碱度损失, 孔隙率增加, 降低了混凝土的力学性能与耐久性[41]-[43]。

Ali 等[16]研究了竹-玄武岩纤维混凝土的耐酸腐蚀性, 其中混杂纤维混凝土的质量损失比对照试样少 3.9%, 抗压强度比对照试样高 21.8%。

Mini 等[24]研究了剑麻纤维与尼龙 6 纤维混掺下对自密实混凝土耐酸腐蚀性能的影响。在盐酸环境下, 盐酸溶液引起的混凝土表面腐蚀对其抗压, 抗折强度与弹性模量会有很大的损伤, 且破坏程度随着盐酸的浓度的增加而增加, 且暴露期结束后, 水泥浆体会与盐酸发生反应, 使其表面变得更加粗糙。由于尼龙 6 纤维在酸介质中可能表现出两性离子行为或表面活性特性, 减少了表面张力并增强了酸对孔隙的侵蚀, 尼龙 6 含量较高的混凝土在盐酸溶液中质量与强度损失较大。剑麻纤维经过碱处理后, 其表面性质得到改善, 使其在酸腐蚀环境中更为稳定。这表明, 适当的表面处理可以提高植物纤维在混凝土中的耐久性。Ammari [44]同样发现, 经过处理后的大麦秸秆纤维在酸腐蚀后基本保持了初始的形状, 只有微小的形态变化, 然而钢纤维表面在酸性环境下出现了明显的腐蚀, 形成了铁氧化物层, 导致纤维直径略有减小。

3.3. 渗透性

渗透性对于混凝土的耐久性有重要的影响, 许多宏观性能都与渗透性有着密切的关系[45]。随着时代的不断发展, 现代混凝土对于渗透性的要求不仅要求抗水, 还被要求具有抵抗外界环境侵蚀的能力, 所有这些侵蚀都是以水作为传输介质侵入混凝土内部的[46]。Ali 等[16]研究发现玄武岩纤维与竹纤维混杂纤维混凝土具有较好的渗透性。这是因为混杂纤维的表面积更大, 使得水以更弯曲的路径通过混凝土。

所以混杂纤维混凝土具有更好的渗透性与优异的耐久性。

Sarangi 等[25]研究了剑麻纤维, 香蕉纤维与尼龙纤维混掺下混凝土的氯离子渗透试验, 研究结果表明钢纤维 0.5%, 香蕉纤维 0.2%, 尼龙纤维 0.3%混杂时抵抗氯离子渗透性能最好。

4. 耐高温性能

4.1. 抗剥落性能及机理

超高性能混凝土(UHPC)具有优异的力学性能, 在建筑当中被广泛引用。但是由于 UHPC 致密的微观结构与低孔隙率, 使其在高温环境下更容易发生剥落[47][48]。剥落现象会严重影响其强度, 使其承载力下降。随着对于建筑材料可持续性关注, 发现植物纤维与人造纤维的混杂在抑制混凝土剥落现象上具有很大的潜力, 能够有效地抑制混凝土的剥落现象[49][50]。

Elsayed 等[51]设计了八种超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)混合物, 其中包括钢纤维(SF)、聚丙烯纤维(PP)、聚乙烯醇纤维(PVA)和黄麻纤维(JF), 来研究混杂纤维对高温下 UHPFRC 的影响, 结果表明, 混合纤维在高温下有效克服了 UHPC 的剥落现象。这是因为 SF 的加入减轻了混凝土中微裂缝的形成, 从而减少了剥落的发生。同时在加热过程中, 由于 JF 和 PP、PVA 等低熔点纤维会产生蒸汽逸出的通道, 因此水蒸气会不断地排放到外界, 从而抑制了混凝土的剥落。Krishna 等[22]和 Ozawa 等[52]也得出了同样的结论, 低熔点的聚丙烯纤维与剑麻纤维、黄麻纤维等植物纤维在高温下会产生蒸汽逸出的通道从而有效地抑制了超高性能混凝土在高温下的剥落。

Ren 等[20]研究了剑麻纤维与钢纤维混合增强超高性能混凝土的耐高温性能, 研究结果表明普通 UHPC 在高温下的高温下剥落的非常严重, 加入纤维后对 UHPC 的剥落有很好的抑制作用。

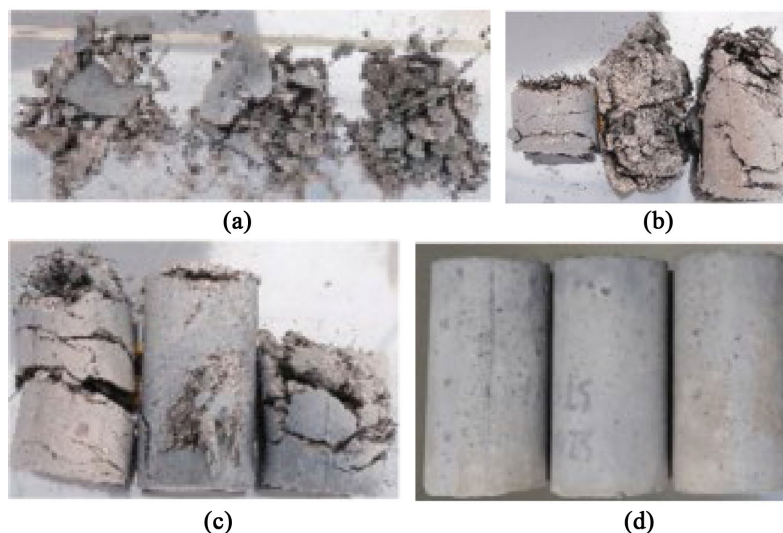


Figure 2. The appearance of different fiber content UHPC under high temperature environment; (a) control group; (b) Steel fibre content of 1.5 per cent; (c) Steel fibre content of 2%; (d) Steel fiber content 1.5% sisal fiber content 0.6% [20]

图 2. 高温环境下不同纤维掺量 UHPC 的外观; (a) 对照组; (b) 钢纤维掺量 1.5%; (c) 钢纤维掺量 2%; (d) 钢纤维掺量 1.5%剑麻纤维掺量 0.6% [20]

高温环境下不同纤维掺量 UHPC 的外观如图 2 所示。对于仅加钢纤维的试样, 随着纤维掺量的增加, 剥落程度逐渐降低, 这是因为纤维的桥接作用使得剥落的碎片没有完全分离。然而桥接效应也是有限的, 再高的纤维掺量也会产生剥落, 这与 Zhang 等[53]研究所得出的结论一致。剑麻纤维与钢纤维的组合有效

地抑制了 UHPC 在高温环境下的剥落。在高温环境下的混杂纤维混凝土中, 剑麻纤维的收缩和碳化作用在纤维内部形成许多空隙和通道, 这些空隙和通道与钢纤维引起的微裂纹相连, 形成了有效的蒸汽释放通道, 防止了 UHPC 的剥落。Ridha [54]也发现了类似的结论, 由于钢纤维膨胀在基体中形成的微裂纹可以与黄麻纤维由于碳化引起的切向间隙连接, 提高高温下积累蒸汽逸出路线的连通性, 有效地抑制了超高性能混凝土的剥落。

尽管 UHPC 在很多方面都表现得非常出色, 但是其在高温下的剥落现象仍是一个不容忽视且急需解决的问题。

4.2. 高温环境下的力学性能

在高温环境下, 混凝土的力学性能丧失严重。Abid 等[47]认为随着温度的升高, 超高性能混凝土的抗压强度劣化可分为三个阶段: 1) 在从室温开始到 350℃至 400℃之间的初始稳定和恢复阶段, 2) 在 350℃至 400℃到 800℃之间的强度损失阶段, 3) 在 800℃之后强度完全丧失。随着研究的深入以及国家大力提倡可持续发展经济, 研究者们开始将注意力转向植物纤维与人造纤维混合使用上。探索这种组合在提高混凝土高温性能方面的潜力。

Table 3. Effects of mixture of plant fiber and artificial fiber on mechanical properties of concrete under high temperature environment

表 3. 植物纤维与人造纤维混掺对高温环境下混凝土力学性能的影响

植物纤维	人造纤维	温度	实验结果	参考文献
剑麻纤维	钢纤维	800℃	残余抗压强度: ↓76.1%抗弯强度: ↓76.6%	[20]
	微钢纤维、聚丙烯纤维	27℃, 200℃, 400℃, 800℃	较对照组抗压强度: ↑3% (27℃) ↑2% (200℃) ↑5% (400℃) ↓7% (800℃) 较对照组抗拉强度: ↑7% (27℃) ↑4% (200℃) ↑9% (400℃) ↓19% (800℃)	[22]
黄麻纤维	钢纤维, 聚丙烯纤维, 聚乙烯醇纤维	500℃	残余抗压强度: ↓92.5%	[51]
	钢纤维	200℃, 400℃, 600℃	残余抗压强度: ↓1.6% (200℃) ↓16.3% (400℃) ↓53.3% (600℃) 残余抗拉强度: ↑6.5% (200℃) ↑4.8% (400℃) ↓52.5% (600℃)	[54]
亚麻纤维	钢纤维	按照 ISO 834 加热曲线进行加热		[53]

关于植物纤维与人造纤维混合增强混凝土高温下力学性能的文献研究较少, 具体如表 3 所示。其中纤维类型主要集中在剑麻纤维, 亚麻纤维, 黄麻纤维等植物纤维, 聚丙烯纤维, 聚乙烯醇纤维等低熔点纤维以及玄武岩纤维与钢纤维等组合上。钢纤维与植物纤维或者合成纤维的组合可以有效地改善混凝土在高温条件下的力学性能。在高温条件下, 植物纤维的收缩与碳化以及聚丙烯纤维, 聚乙烯醇纤维等低熔点纤维为 UHPC 内部蒸汽的释放提供了通道, 减少了 UHPC 内部的蒸汽压力, 抑制了 UHPC 的剥落, 同时也改善了其力学性能[22] [53]。钢纤维通过桥接混凝土中的裂缝, 抑制 UHPC 内部裂纹的扩展[20] [51]。混杂纤维有效地改善了 UHPC 高温下的力学性能。

5. 结论与展望

在现代社会, 人口激增和工业化步伐加快, 使得对资源的需求不断上升, 进而引发资源匮乏。面对这一挑战, 我们迫切需要探索和利用可持续性资源, 以保障社会的进步和地球生态的平衡。作为一种可持续资源, 植物纤维受到了广泛关注。它们不仅在自然界中随处可见, 还具备快速生长与再生的能力, 使得它们成为传统不可再生资源的优选替代品。此外, 植物纤维的可再生特性也意味着它们在使用寿命结束后能够被自然分解, 有效减轻了垃圾处理和环境污染的压力。随着时代的发展, 社会对于混凝土性能的要求越来越高, 植物纤维与人造纤维的组合也更顺应了时代的发展。本文主要综述了植物纤维与人造纤维混合增强混凝土的性能, 主要结论与展望如下:

- 1) 剑麻, 亚麻, 洋麻, 黄麻, 以及竹等植物纤维被应用到混杂纤维混凝土的研究当中, 其中剑麻纤维由于具有较高强度与韧性, 因此关于剑麻纤维与人造纤维的混杂组合研究最为广泛。
- 2) 目前的研究大多集中于植物纤维与人造纤维混合增强混凝土的性能方面上, 对于其混杂效应的量化研究较少, 对混杂纤维混凝土的性能的纤维混杂效应定量研究, 建立数学模型, 为混杂纤维混凝土在实际工程的推广和应用提供理论基础和技术支撑, 是未来的研究重点。
- 3) 水泥基材料在荷载作用下会经历多尺度和多阶段的破坏, 包括从微裂纹的形成到宏观裂纹的扩展。然而目前的研究大多集中于植物纤维与宏观人造纤维的混合, 缺乏对于植物纤维与微, 纳米尺度的微纤维混杂, 难以真正契合水泥基材料的多尺度多阶段破坏特征, 需要对多尺度纤维混杂体系进行研究。

参考文献

- [1] 尹香琰, 何军, 苑东亮. “双碳经济”催生建筑领域绿色就业和人才新需求[J]. 房地产世界, 2024(14): 1-5.
- [2] 朱微, 程云鹤. 中国建筑业碳排放影响因素及碳达峰碳中和预测分析[J]. 河北环境工程学院学报, 2024, 34(1): 1-7.
- [3] 魏佳, 时炜. 建筑领域碳达峰碳中和的建议[J]. 建筑, 2024(7): 30-33.
- [4] 杨子艺, 胡姗, 徐天昊, 等. 面向碳中和的各国建筑运行能耗与碳排放对比研究方法及应用[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(6): 749-760.
- [5] Zainal, S.M.I., Abel, M., Durai, D., *et al.* (2024) Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Cement Mortar Containing Recycled Tire Crumbs Reinforced with Polypropylene, Oil Palm and Banana Fibers. *Journal of Building Engineering*, **92**, Article 109728. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109728>
- [6] 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.
- [7] Boghossian, E. and Wegner, L.D. (2008) Use of Flax Fibres to Reduce Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **30**, 929-937. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.003>
- [8] Li, M., Pu, Y., Thomas, V.M., Yoo, C.G., Ozcan, S., Deng, Y., *et al.* (2020) Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber-Reinforced Composites and Their Applications. *Composites Part B: Engineering*, **200**, Article 108254. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108254>
- [9] Wu, H., Shen, A., Cheng, Q., Cai, Y., Ren, G., Pan, H., *et al.* (2023) A Review of Recent Developments in Application of Plant Fibers as Reinforcements in Concrete. *Journal of Cleaner Production*, **419**, Article 138265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138265>
- [10] Ahmad, J. and Zhou, Z. (2022) Mechanical Properties of Natural as Well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **333**, Article 127353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>
- [11] Khan, M.Z.N., Hao, Y., Hao, H. and Shaikh, F.U.A. (2018) Mechanical Properties of Ambient Cured High Strength Hybrid Steel and Synthetic Fibers Reinforced Geopolymer Composites. *Cement and Concrete Composites*, **85**, 133-152. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.011>
- [12] Ren, G., Yao, B., Ren, M. and Gao, X. (2022) Utilization of Natural Sisal Fibers to Manufacture Eco-Friendly Ultra-High Performance Concrete with Low Autogenous Shrinkage. *Journal of Cleaner Production*, **332**, Article 130105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130105>
- [13] Long, A., Sun, X., Zhang, G., Yu, Z., Zhang, B., Huang, P., *et al.* (2023) Study on Fracture Performance and Failure Mechanism of Hydraulic Basalt Fiber Asphalt Concrete by Considering Temperature Effect. *Theoretical and Applied*

- Fracture Mechanics*, **125**, Article 103895. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103895>
- [14] Wang, Y., Hu, S. and He, Z. (2021) Mechanical and Fracture Properties of Geopolymer Concrete with Basalt Fiber Using Digital Image Correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **112**, Article 102909. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102909>
 - [15] Li, M., Zhou, S. and Guo, X. (2017) Effects of Alkali-Treated Bamboo Fibers on the Morphology and Mechanical Properties of Oil Well Cement. *Construction and Building Materials*, **150**, 619-625. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.215>
 - [16] Ali, D.M., Chin, S.C., Bao, C. and Gimbut, J. (2024) Enhancement of Reinforced Concrete Durability and Performance by Bamboo and Basalt Fibres. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **134**, Article 103572. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103572>
 - [17] Chin, S.C., Shaaban, I.G., Rizzuto, J.P., Khan, S.U., Mohamed, D., Roslan, N.I.M., et al. (2024) Predictive Models for Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Concrete Containing Bamboo and Basalt Fibres. *Structures*, **61**, Article 106093. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106093>
 - [18] Marsidi, N.N.S. and Chin, S.C. (2024) Effect of Elevated Temperature of Hybrid Fibres on the Mechanical Performance of Cement Mortar. *Materials Today: Proceedings*, **107**, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.116>
 - [19] Yogesh, P., Ravi, K., Karthik, R., Bhavana, M., Muthukumar, S. and Sathyan, D. (2023) Strength and Workability Characteristics of Hybrid Bamboo and Steel Fiber Reinforced Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **80**, 1135-1141. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.121>
 - [20] Ren, G., Gao, X. and Zhang, H. (2022) Utilization of Hybrid Sisal and Steel Fibers to Improve Elevated Temperature Resistance of Ultra-High Performance Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **130**, Article 104555. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104555>
 - [21] Kumar, P. and Roy, R. (2018) Study and Experimental Investigation of Flow and Flexural Properties of Natural Fiber Reinforced Self Compacting Concrete. *Procedia Computer Science*, **125**, 598-608. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.077>
 - [22] Krishna, A. and Kaliyaperumal, S.R.M. (2021) Effect of Elevated Temperature on Strength and Ductility of Axially Loaded Hybrid Fiber Reinforced Concrete Columns. *Structures*, **34**, 3548-3556. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.099>
 - [23] Wang, X., Jin, Y., Huang, W., Li, X. and Ma, Q. (2023) Effect of Hybrid Basalt and Sisal Fibers on Durability and Mechanical Properties of Lightweight Roadbed Foam Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02592. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02592>
 - [24] Hari, R. and Mini, K.M. (2019) Mechanical and Durability Properties of Sisal-Nylon 6 Hybrid Fibre Reinforced High Strength SCC. *Construction and Building Materials*, **204**, 479-491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.217>
 - [25] Sarangi, S. and Singh, B.K. (2021) Influence of Textile Fiber in the Mechanical Characteristic of Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Natural Fibers*, **19**, 10572-10587. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.2002754>
 - [26] Ja'e, I.A., Salih, A.R., Syamsir, A., Min, T.H., Itam, Z., Amaechi, C.V., et al. (2023) Experimental and Predictive Evaluation of Mechanical Properties of Kenaf-Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete Using Response Surface Methodology. *Developments in the Built Environment*, **16**, Article 100262. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100262>
 - [27] Poongodi, K., Khan, A., Mushraf, M., Prathap, V. and Harish, G. (2021) Strength Properties of Hybrid Fibre Reinforced Quaternary Blended High Performance Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **39**, 627-632. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.007>
 - [28] Anushree Naveenkumar, D.T. and Vijaya Kumara, Y.M. (2023) Effect of Areca Fibers on Early Strength of Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **80**, 1482-1487. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.282>
 - [29] Das, S., Habibur Rahman Sobuz, M., Tam, V.W.Y., Akid, A.S.M., Sutan, N.M. and Rahman, F.M.M. (2020) Effects of Incorporating Hybrid Fibres on Rheological and Mechanical Properties of Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, **262**, Article 120561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120561>
 - [30] Ahmad Farooq, M., Alomayri, T., Ali, B., Sultan, T. and Yosri, A.M. (2023) Influence of Hybrid Coir-Steel Fibres on the Mechanical Behaviour of High-Performance Concrete: Step Towards a Novel and Eco-Friendly Hybrid-Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, **389**, Article 131728. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131728>
 - [31] Bijo, M.D. and Unnikrishnan, S. (2022) Mechanical Strength and Impact Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Coconut and Polypropylene Fibers. *Materials Today: Proceedings*, **65**, 1873-1880. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.048>
 - [32] Bheel, N., Tafsirojjaman, T., Liu, Y., Awoyera, P., Kumar, A. and Keerio, M.A. (2021) Experimental Study on Engineering Properties of Cement Concrete Reinforced with Nylon and Jute Fibers. *Buildings*, **11**, Article 454. <https://doi.org/10.3390/buildings11100454>

- [33] Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A. and Quéneudec, M. (2020) Contribution of Hybrid Fibers on the Improvement of Sand Concrete Properties: Barley Straws Treated with Hot Water and Steel Fibers. *Construction and Building Materials*, **233**, Article 117374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117374>
- [34] Liu, J., Yang, X., Dong, B., Liu, S., Zhang, Y., Zhao, G., *et al.* (2024) Microstructure Evolution and Enhanced Mechanical Properties of CF/Mg Composites with Optimized Fiber/matrix Interfacial Adhesion. *Composites Part B: Engineering*, **287**, Article 111852. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111852>
- [35] Sonar, K. and Sathe, S. (2024) Exploring Fiber Reinforcements in Concrete and Its Challenges: A Comprehensive Review. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, **7**, 3099-3131. <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00404-8>
- [36] Zhou, C., Dai, F., Liu, Y., Wei, M. and Gai, W. (2024) Experimental Assessment on the Dynamic Mechanical Characteristics and Cracking Mechanism of Hybrid Basalt-Sisal Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Building Engineering*, **88**, Article 109151. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109151>
- [37] Zhang, A., Liu, K., Li, J., Song, R. and Guo, T. (2024) Static and Dynamic Tensile Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Reinforced with Hybrid Sisal Fibers. *Construction and Building Materials*, **411**, Article 134492. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134492>
- [38] Naraganti, S.R., Pannem, R.M.R. and Putta, J. (2019) Impact Resistance of Hybrid Fibre Reinforced Concrete Containing Sisal Fibres. *Ain Shams Engineering Journal*, **10**, 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.12.004>
- [39] Vivek, S.S., Karthikeyan, B., Bahrami, A., Selvaraj, S.K., Rajasakthivel, R. and Azab, M. (2023) Impact and Durability Properties of Alccofine-Based Hybrid Fibre-Reinforced Self-Compacting Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02275. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02275>
- [40] Bittner, C.M. and Oettel, V. (2022) Fiber Reinforced Concrete with Natural Plant Fibers—Investigations on the Application of Bamboo Fibers in Ultra-High Performance Concrete. *Sustainability*, **14**, Article 12011. <https://doi.org/10.3390/su141912011>
- [41] Grayson, A.M. (2012) Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments: State-of-the-Art Report. Springer.
- [42] Beddoe, R.E. and Dörner, H.W. (2005) Modelling Acid Attack on Concrete: Part I. the Essential Mechanisms. *Cement and Concrete Research*, **35**, 2333-2339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.002>
- [43] Fan, Y. and Luan, H. (2013) Pore Structure in Concrete Exposed to Acid Deposit. *Construction and Building Materials*, **49**, 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.075>
- [44] Ammari, M.S., Bederina, M., Belhadj, B. and Merrah, A. (2020) Effect of Steel Fibers on the Durability Properties of Sand Concrete with Barley Straws. *Construction and Building Materials*, **264**, Article 120689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120689>
- [45] Hommel, J., Coltman, E. and Class, H. (2018) Porosity-Permeability Relations for Evolving Pore Space: A Review with a Focus on (Bio-)geochemically Altered Porous Media. *Transport in Porous Media*, **124**, 589-629. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1086-2>
- [46] 赵燕茹, 刘芳芳, 王磊, 等. 单面盐冻条件下基于孔结构的玄武岩纤维混凝土抗压强度模型[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12064-12069.
- [47] Abid, M., Hou, X., Zheng, W. and Hussain, R.R. (2017) High Temperature and Residual Properties of Reactive Powder Concrete—A Review. *Construction and Building Materials*, **147**, 339-351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.083>
- [48] Ju, Y., Jia, Y., Liu, H. and Chen, J. (2007) Mesomechanism of Steel Fiber Reinforcement and Toughening of Reactive Powder Concrete. *Science in China Series E: Technological Sciences*, **50**, 815-832. <https://doi.org/10.1007/s11431-007-0079-0>
- [49] Gong, F., Jiang, X., Gamil, Y., Ifthikhar, B. and Thomas, B.S. (2023) An Overview on Spalling Behavior, Mechanism, Residual Strength and Microstructure of Fiber Reinforced Concrete under High Temperatures. *Frontiers in Materials*, **10**, Article 1258195. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1258195>
- [50] Ozawa, M., Bo, Z., Kawaguchi, J. and Uchida, Y. (2013) Preventive Effect on Spalling of UFC Using Jute Fiber at High Temperature. *Matec Web of Conferences*, **6**, Article 2006. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20130602006>
- [51] Elsayed, M., Ali, M. and El-Azim, A.A. (2024) Residual Strength of Ultrahigh-Performance Hybrid Fibre-Reinforced Concrete Columns Subjected to High Temperatures. *Construction and Building Materials*, **411**, Article 134305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134305>
- [52] Ozawa, M., Subedi Parajuli, S., Uchida, Y. and Zhou, B. (2019) Preventive Effects of Polypropylene and Jute Fibers on Spalling of UHPC at High Temperatures in Combination with Waste Porous Ceramic Fine Aggregate as an Internal Curing Material. *Construction and Building Materials*, **206**, 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.056>

-
- [53] Zhang, D., Tan, G.Y. and Tan, K.H. (2021) Combined Effect of Flax Fibers and Steel Fibers on Spalling Resistance of Ultra-High Performance Concrete at High Temperature. *Cement and Concrete Composites*, **121**, Article 104067. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104067>
- [54] Ridha, M.M.S. (2024) Combined Effect of Natural Fibre and Steel Fibre on the Thermal-Mechanical Properties of UHPC Subjected to High Temperature. *Cement and Concrete Research*, **180**, Article 107510. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107510>