

混掺纤维混凝土的力学特性与耐久性研究综述

夏嘉峰, 王学志

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月27日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

自19世纪末以来,随着工业化进程的加速、计算理论的完善、材料技术的革新以及城市建设的广泛推进,混凝土的用量急剧增长。传统混凝土主要由硅酸盐水泥、粗细骨料与水拌合而成,是一种广泛应用的无机胶凝材料。进入21世纪,建筑材料的发展理念已从单纯追求强度转向高性能与绿色环保并重。然而,传统混凝土在广泛应用中暴露出抗拉强度低、韧性差、易于开裂等固有缺陷。复合材料已成为当前混凝土技术创新发展的主流方向。玄武岩纤维作为一种新型无机环保材料,不仅具有优异的耐高温、耐腐蚀性能,还具备卓越的力学性能;而秸秆纤维作为农业副产物,具有良好的资源化利用潜力。将二者复合掺入混凝土,不仅可实现性能互补与协同增强,还能有效控制材料成本。尤其在极寒地区,如我国东北寒旱区及高纬度冻土区,冬季极端低温可达 -30°C ~ -10°C ,年冻融循环次数超过100次,且常伴随盐冻耦合侵蚀作用,导致混凝土结构出现冻胀开裂、强度衰减和耐久性失效等突出问题。在此类恶劣环境下,传统混凝土的服役寿命仅为常规地区的1/3至1/2,严重制约工程质量的保障。因此,开展玄武岩-秸秆混杂纤维混凝土的研究具有重要理论与工程应用价值。

关键词

玄武岩纤维, 秸秆纤维, 耐久性

A Review of the Mechanical Properties and Durability of Hybrid Fiber Reinforced Concrete

Jiafeng Xia, Xuezhi Wang

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

Received: April 7, 2026; accepted: April 27, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

Since the late 19th century, with the advancement of industrialization, the refinement of computational theories, innovations in material technology, and the large-scale expansion of urban construction, the consumption of concrete has increased dramatically. Traditional concrete, primarily composed of Portland cement, aggregates, and water, has long served as a fundamental inorganic cementitious material. In the 21st century, however, the paradigm of material development has shifted from merely enhancing strength to pursuing high performance and environmental sustainability. Despite its widespread use, conventional concrete exhibits inherent limitations such as low tensile strength, poor toughness, and a tendency to crack. Against this backdrop, composite materials have emerged as a mainstream direction in concrete innovation. Basalt fiber, a novel inorganic eco-friendly material, not only offers outstanding resistance to high temperatures and corrosion but also possesses excellent mechanical properties. Meanwhile, straw fiber, as an agricultural by-product, holds great potential for resource utilization. The combined incorporation of these two fibers into concrete not only enables complementary performance and synergistic enhancement but also helps to control material costs. In extremely cold regions—such as the cold and arid zones of Northeast China and high-latitude permafrost areas—where winter temperatures range from -30°C to -10°C and freeze-thaw cycles exceed 100 times annually, coupled with salt-freeze erosion, concrete structures often suffer from frost heave cracking, strength deterioration, and durability failure. Under such harsh conditions, the service life of traditional concrete is merely one-third to one-half of that in temperate regions, posing significant challenges to engineering quality. Therefore, research on basalt-straw fiber hybrid reinforced concrete is of great theoretical and practical significance.

Keywords

Basalt Fiber, Straw Fiber, Durability

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

传统混凝土虽能满足一般工程需求,但其固有的低抗拉强度、高脆性和易开裂等缺陷始终难以根本克服。在干缩、温度应力等多重因素作用下,水泥基材料表层易萌生微裂纹,进而加速钢筋锈蚀。在酸雨、硫酸盐侵蚀等恶劣环境中,混凝土的实际使用寿命常由设计基准期 50 年降至 20~30 年。为此,各类新型纤维增强混凝土应运而生。尤其在极端寒冷地区,如冬季最低气温 $\leq -30^{\circ}\text{C}$ 、年冻融循环次数 ≥ 100 次的环境下,素混凝土结构普遍面临“冻胀开裂-力学衰减-耐久失效”的三重挑战。低温引发内部自由水冻结膨胀,反复冻融使微裂缝持续扩展,最终导致表层剥落、承载力下降,服役寿命较常温地区缩短 30%~50%。玄武岩纤维与秸秆纤维的混杂体系,凭借其协同增强效应,为破解极寒地区混凝土耐久性难题提供了可行路径。

2. 研究背景及意义

2.1. 单掺纤维混凝土与性能短板与应用界限

混凝土的发展衍生如表 1。

Table 1. Development and derivation of concrete
表 1. 混凝土的发展衍生

衍生类型	衍生背景	改进措施	性能优势
纤维增强混凝土 FRC	传统混凝土抗裂抗冲击性能差	单掺或混掺纤维	抗裂性提升 50%~80% 抗冲击提升 30%~100%
高性能混凝土 HPC	传统混凝土强度低, 耐久性差	低水胶比 ≤ 0.38 + 优质矿物掺合料(硅灰, 粉煤灰)	强度 $\geq C60$, 抗渗 $\geq P12$, 抗冻 $\geq F300$
超高性能混凝土 UHPC	HPC 无法满足极端荷载/环境需求	水胶比 ≤ 0.25 + 高活性掺合料	强度 $\geq C100$, 抗渗 $\geq P20$

随着传统混凝土的短板缺陷日益突出, 研究重点集中于单掺纤维混凝土(Single Fiber Reinforced Concrete)上, 其在抗裂、抗渗等方面初显成效。然而, 随着工程应用深入, 单掺纤维的局限性逐渐显现。例如, 玄武岩纤维(BF)弹性模量高达 80~110 GPa, 刚性较强, 但在混凝土浇筑后 1~7 天的早期收缩阶段, 难以有效分散收缩应力, 仅能在 28 天后发挥作用, 对早期微裂缝抑制效果有限。此外, BF 市场价格约为 15~25 元/kg, 是植物纤维(4~6 元/kg)的 3~5 倍, 聚丙烯纤维(8~10 元/kg)的 1.5~3 倍, 经济性欠佳。植物纤维(PF)虽具优良的早期抗裂性和环保优势, 但其抗拉强度(300~800 MPa)远低于 BF (3000~4800 MPa), 弹性模量低(10~30 GPa), 对混凝土抗压、抗折强度提升作用微弱。合成纤维如聚丙烯纤维(PPF)虽成本低、易分散、耐腐蚀, 但其熔点仅 160°C~170°C, 高温下性能急剧下降。300°C 加热 1 小时后, PPF 混凝土抗压强度损失达 60%~80%, 而素混凝土仅损失 20%~30%, 火灾后表面剥落层达 2~5 mm, 丧失承载能力。上述单一纤维在特定应用中不仅未能发挥优势, 反而暴露出明显短板, 引发广泛关注。直至混杂纤维混凝土(Hybrid Fiber Reinforced Concrete, HFRC)工艺逐渐成熟, 才为多纤维协同增强提供了可能, 有望实现结构性能全面提升, 突破“木桶效应”的制约。

2.2. 混掺纤维国内外研究进展

单掺纤维虽可在某一性能上实现改善, 但难以兼顾多维度要求。例如 BF 可提升强度, 植物纤维可改善早期抗裂性。但植物纤维普遍存在孔隙率高、吸水率大、与水泥基基体的界面相容性差等问题, 界面过渡区疏松多孔。若不进行改性处理, 单掺植物纤维将难以抵消上述缺陷, 反而引起负面效应。Ammari [1]将青稞秸秆经 80°C 热水浸泡 2 小时去蜡处理, 与钢纤维(1.0%)按 3:1 混掺, 可使砂混凝土 28 d 抗压强度提高 28%, 抗折强度提升 45%, 相比单掺钢纤维分别提高了 12%和 18%。该方案创新性地实现了“绿色修饰 + 低成本组合”, 能耗仅为传统碱法的 1/5, 可消纳 8 kg/m³ 的麦秸, 契合欧盟“循环经济”发展战略。吴杨[2]在国内研究中发现, 混掺纤维可显著降低混凝土的质量与强度损失, 提高相对动弹性模量, 且混凝土抗盐冻性能优于单掺纤维, 其中 0.3%碳纤维 + 0.3%玻璃纤维的组合抗盐冻性能最佳。验证了混掺纤维在抗冻性能上的突破。

3. 玄武岩纤维与天然秸秆纤维的特性分析

玄武岩纤维(BF)是以天然玄武岩矿石为原料, 经高温熔融拉丝而成, 其抗拉强度达 3000~4800 MPa, 是普通钢筋的 3~4 倍, 弹性模量为 90~110 GPa, 密度 2.6~2.8 g/cm³ 显著高于玻璃纤维 70~85 GPa。极限延伸率为 3.1%, 优于碳纤维 1.7%, 在抗震加固中可通过形变吸收更多能量。

秸秆纤维为天然的植物纤维, 主要来源于玉米、水稻等农作物秸秆, 其中纤维素占 40%~60%, 半纤维素 20%~30%, 木质素 10%~20%, 及少量的蜡质和果胶组成。以“来源广、价格低、可降解”等优点, 其在纤维混凝土、隔热材料、环境吸附材料等领域具有广阔应用前景, 契合“双碳”战略对绿色建筑

材的需求。未改性的秸秆纤维存在着耐碱性差, 吸水性高, 分散性差三大缺陷, 须经改性处理方可满足混掺工艺要求。

4. 矿物纤维与天然植物纤维混掺混凝土的物理与化学改性研究

4.1. 化学改性机制

玄武岩纤维成分 SiO_2 与 Al_2O_3 与水泥水化产物 C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 化学相容, 纤维表面活性位点与 C-S-H 凝胶形成化学键合(见图 1)。碱溶液处理秸秆纤维的原理基于碱与秸秆成分之间的化学反应(见图 2)。秸秆纤维表面覆盖一层由高级脂肪醇和高级脂肪酸组成质密蜡质层。与 NaOH 溶液接触后, NaOH 溶液中的氢氧根离子破坏秸秆表面的蜡质层, 使纤维束分解为细小的纤维单元。同时与木质素发生反应, 降低其对水泥水化的缓凝作用, 改性后纤维表面粗糙化, 有利于水泥浆体渗透形成“胶钉”结构, 增加机械咬合力。

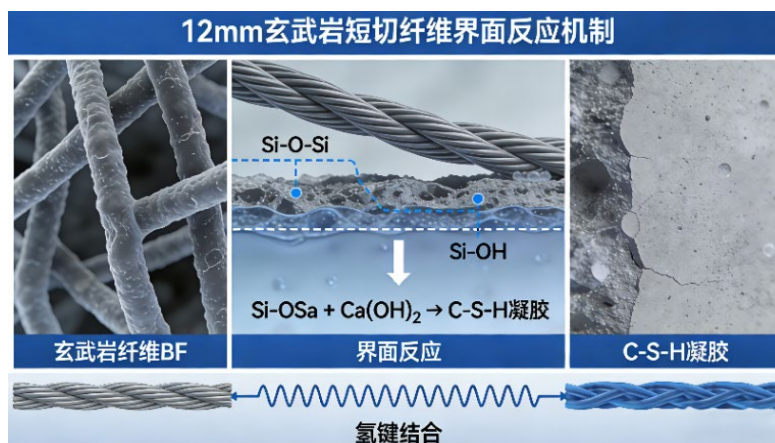


Figure 1. Schematic diagram of chemical bonding mechanism of short-cut basalt
图 1. 短切玄武岩化学键合机制示意图

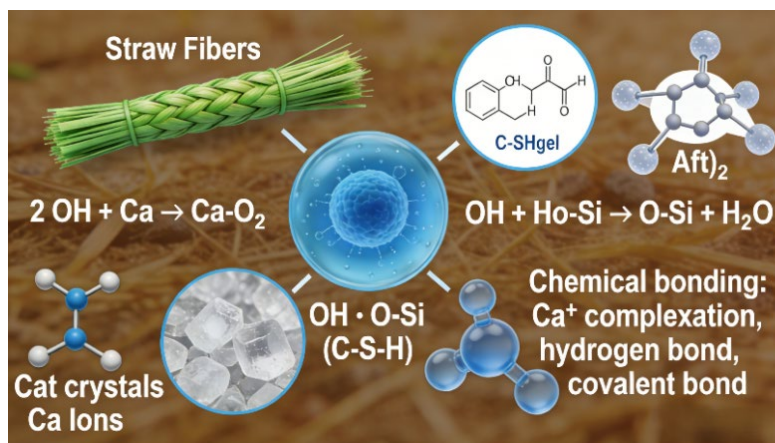


Figure 2. Schematic diagram of the chemical bonding mechanism of straw fibers
图 2. 秸秆纤维化学键合机制示意图

4.2. 碱处理工艺

碱处理是最常用化学改性方法, 通过强碱溶液(如 NaOH)溶解纤维表面半纤维素、木质素与果胶, 暴

露纤维素分子链, 同时腐蚀表面形成粗糙结构, 提升耐碱性与界面粘结性。

孙传武[3]将秸秆纤维置于 5%~8% NaOH 溶液中浸泡 1~2 h, 水洗至中性后烘干, 结果显示改性后秸秆纤维在水泥强碱环境(pH = 12~13)中 90 天强度保留率从 35%提升至 68%。

碱处理 NaOH 浓度过高(>10%)会导致纤维素降解, 纤维强度下降 10%~15%; 浓度过低(<5%)则杂质去除不彻底, 改性效果有限。工程中推荐采用 5% NaOH 溶液室温浸泡 1.5 h, 该工艺下秸秆纤维混凝土 28 d 抗压强度提升 22%, 抗渗等级从 P6 提升至 P10。

4.3. 纳米技术改性

纳米 SiO₂、TiO₂ 等颗粒可修饰纤维表面, 构建高强度界面, 提高纤维与混凝土之间的结合能力和纤维本身的耐候性能。

邵伟华[4]将其置于 0.5%~1%的 SiO₂ 水溶液中, 超声波处理 30 分钟后干燥, 实现了纳米 SiO₂ 在纤维上的分散。改性后纤维与水泥基的界面结合强度提高了 55%, 这是因为纳米 SiO₂ 可以通过化学键作用与水泥水化产物(C-S-H)结合, 并填补界面过渡区域(ITZ)的孔隙。且 28 d 的抗折强度达到 5.8 MPa (提高 40%), 冻融循环(F300)损伤速率仅为 12%。此外, 纳米颗粒对纤维的抗老化性能也有改善作用, 经紫外辐照 6 个月后, 其强度保持在 75%以上, 而未改性的稻草纤维仅为 45%。

4.4. 聚合物改性

李圣彬[5]用高分子材料对秸秆纤维进行改性, 可使其具有良好的抗水抗碱性能, 并提高其柔性。有研究在对秸秆纤维进行改性时, 将丙烯酸酯乳液(10%~15%)浸渍于秸秆纤维上, 得到一层连续的憎水性膜, 其饱和吸水性由 38%降低到 15%。虽然该研究以沥青砂浆为对象, 但高分子材料的改性原则也可应用到混凝土中。

王晓勇[6]对纤维混凝土的耐久性进行了评价, 认为应选用与水泥具有良好相容性的高分子材料, 例如聚羧酸系高分子, 它既可以减少纤维的吸水率, 又可以与水泥粒子产生吸附, 从而提高工作性能。结果表明, 掺有 12%聚羧酸系聚合物的秸秆纤维混凝土, 其坍落度提高 30 mm, 抗渗性能提高 40%, 在硫酸盐腐蚀条件下 180 d 强度保持率达到 80%, 而未改性的秸秆纤维混凝土仅为 55%。

4.5. 物理改性分析

物理改性通过机械、热或物理作用改变纤维表面形态与分散状态, 不改变纤维化学组成, 具有环保、工艺简单的优势, 是纤维预处理的基础手段, 尤其适用于规模化工程应用。

孙天书[7]在对麦草纤维的研究中, 利用锤式粉碎机对麦草进行粉碎, 使其达到 5~10 mm 的长度, 然后通过梳理机进行分散, 使得秸秆的团聚率由 18%下降到 8%研究发现, 将稻草纤维加入混凝土中, 可减少混凝土的坍落度损失率 20%, 提高早期抗裂能力, 这是因为纤维能够在混凝土中形成立体网状结构, 阻止微裂纹萌生。

王林彬[8]对纤维混凝土的探讨提出, 机械预处理需要配合混凝土的搅拌过程, 例如将秸秆纤维与粗集料进行 2 分钟的干法混合, 可以进一步降低其团聚现象。

5. 混杂纤维在混凝土的力学效应

混杂纤维混凝土(Hybrid Fiber Reinforced Concrete, HFRC)通过将两种或以上特性互补的纤维复合掺入混凝土, 利用“优势互补、缺陷互抑”的协同作用, 突破单掺纤维混凝土木桶效应的性能悖论, 其力学效应是当前建筑领域的研究核心。

5.1. 单掺及混掺抗压强度分析

抗压强度是混凝土结构承载能力的核心评价标准。矿物纤维、植物纤维及其复合系统通过“微结构优化 - 界面应力转移 - 宏观承载”的协同效应,是提高混凝土抗压强度的重要途径。通过对单纤维和混合纤维增强混凝土抗压强度的研究,可揭示其增强机制,并提出优化设计思路。

BF 凭借高抗拉强度(3500~4800 MPa)与高弹性模量(80~110 GPa),可有效承担压应力并填充混凝土内部孔隙,是提升抗压强度的主流矿物纤维。安红山[9]发现, BF 掺量与抗压强度表现出“先升后降”的关系:在 0.3% (体积)掺量下, 28 d 抗压强度达到 58 MPa,比普通混凝土(48 MPa)提高 20.8%;当掺量大于 0.4%时,由于纤维聚集而产生“内部空洞”,强度下降至 54.5 MPa(增幅 12.5%)。何孝龙[10]认为其核心机理为:低掺量纤维在基体中均匀分布,使有害孔隙率(>50 nm, 压汞测试结果)由 18%降低到 12%,并由“刚性骨架”分担 20%~25%的压缩应力。王彬对 BF 形貌参数进行了优化,结果显示 12 mm BF 具有最好的强化效果:当掺量 0.3%时, 12 mm BF 的 28 d 抗压强度比 6 mm BF(15%)和 18 mm BF(18%)分别提高 5.8%和 2.8%,因为 12 mm BF 的分散性最好(团聚率 < 8%),能够最大化地发挥孔填充作用。这一规律在国外研究中也得到印证:黎晓辉[11]在 C40 混凝土中掺入 0.3%体积比 12 mm BF,抗压强度提高 18%,动压缩强度提高 25%。以秸秆为代表的植物纤维虽然抗拉强度较小(100~300 MPa),但可以通过抑制初期收缩裂纹来减少压缩强度损失,但使用前需经过改性。邵伟华研究以 5% NaOH + 0.5% nano-SiO₂对秸秆纤维进行改性,在 0.6%掺量下, C40 混凝土的 28 d 抗压强度达到 45 MPa,比普通混凝土提高 12.5%;而同一掺量下,原草纤维因耐碱性能较差(90 d 强度保持率仅 35%)和吸水性高(造成水胶比变化),仅提高 2.5%。孙天书针对道路使用环境进行探索,发现秸秆纤维掺量为 0.8%时,抗压强度可提高 10%;掺量达 1.0%时,由于纤维团聚导致密实度降低,强度反而下降 5%。Ammari 对大麦秸秆进行 80℃热处理(绿色过程)后发现,当掺量大于 0.7%时,抗压强度开始下降,证明单一植物纤维的强化效果比矿物纤维差。孙传武采用“0.3% BF + 0.6%改性亚麻纤维”掺入 C50 混凝土, 28 d 抗压强度达到 62 MPa,比普通混凝土提高 29.2%,比单掺 BF(提高 20.8%)和单掺改性亚麻纤维(提升 8.3%)分别高出 8.4%和 20.9% [5]。扫描电镜观察表明,改性亚麻纤维-BF 网络可使初期微裂缝密度由 3 条/mm²降低到 1 条/mm²,有效防止受压过程中裂纹贯通;BF 则通过骨架作用承担主应力,两者构成了“防裂 - 应力分散”的协同系统。通过生物纤维(BF)混合实验证实, 0.25% BF + 0.3%纤维素纤维在冻融条件(F300)下,由于纤维素纤维吸收自由水分,降低了冻胀破坏,而 BF 保持了骨架强度,从而保证了长期抗压性能的稳定性。

5.2. 单掺及混掺抗拉强度分析

混凝土抗拉强度仅为抗压强度的 1/8~1/15,是诱发结构开裂的重要因素。BF 具有较高的拉伸强度(3000~4800 MPa),是提高混凝土抗拉性能的关键。

沈亚金直拉实验结果显示,掺加 0.3%BF 的 C50 混凝土 28 d 抗拉强度为 4.2 MPa,较素混凝土的 3.0 MPa 提高 40%,断裂能提高 88 N/m。其机理为:当裂纹扩展到 0.1 mm 时,由于“桥接效应”,裂纹产生反向拉应力,从而抑制裂纹扩大;同时,通过硅烷化处理使 BF 与混凝土之间具有良好的黏结(2.5 MPa 以上),保证了 BF 在混凝土中的高效传力。

在植物纤维中其抗拉强度较低,但可以通过分散微观裂纹来提高混凝土的抗拉强度。邵伟华发现,0.6%改性秸秆纤维掺量下,抗拉强度达到 3.6 MPa(提高 20%),虽然比 BF 的提高幅度小,但其断裂韧性提高了 40%,这是因为秸秆纤维的伸长率(6%~8%)可发生“拉伸变形”,从而避免材料的脆性破坏。

混掺纤维可通过“微观裂纹弥散 + 宏观裂纹桥接”达到“1 + 1 > 2”的力学性能。

5.3. 单掺及混掺抗折强度分析

BF 的高弹性模量使其在受弯场景中可有效承担弯曲应力。于志龙[12]四点弯曲试验表明,0.3%体积

率 BF 的 C50 混凝土 28 d 抗折强度为 5.5 MPa, 较素混凝土(3.5 MPa)提升 57.1%, 韧性指数提升 68%。

植物纤维在弯曲过程中的受力状态, 提高了混凝土的弯曲韧度。混掺纤维的力学性能主要表现为“梯度抗裂 - 均布应力转移”。有研究表明, Divyah N [13] 0.2% BF + 0.5% 改性椰壳纤维混合轻质混凝土, 抗折强度达到 5.2 MPa (提升 85.7%), 较单一掺 BF (4.0 MPa) 提高 30%, 密度仅 1800 kg/m³, 契合低碳建筑轻量化要求。

6. 混掺纤维在混凝土中的耐久性能

6.1. 对混凝土抗冻性能影响

混凝土在冻融循环过程中的损伤本质是孔隙水相变冻胀应力与渗透压力共同作用的结果。当环境温度降至冰点以下时, 混凝土内部毛细孔与凝胶孔中的自由水先发生冻结, 对孔壁产生向外的冻胀力; 未冻结的自由水在浓度差驱动下向冻结区迁移, 进一步加剧孔内冰体体积增长, 使孔壁应力超过混凝土基体抗拉强度, 引发初始微裂缝。在极寒地区反复冻融作用下, 基体薄弱区不断扩展贯通, 同时低温会降低混凝土基体的韧性与界面粘结性能, 加速裂缝延伸。对于单一纤维改性混凝土, 若纤维掺量或类型不匹配, 难以形成连续的裂缝桥接网络, 无法有效抑制冻融损伤的发展。而玄武岩 - 秸秆纤维的混掺体系, 可通过无机与有机纤维的优势互补, 构建多层次的损伤抑制体系。

杨彬[14]在-30℃低温环境下, 麦秸秆灰改性碳纤维混凝土的抗冻性能较常温冻融下降 12%~18%, 但混掺玄武岩纤维后可弥补这一损失, 其强度衰减速率降低 15%左右。

在低温环境下麦秸秆灰改性碳纤维混凝土的性能, 结果表明, 秸秆灰掺量 10% 时, 混凝土经 200 次冻融循环后相对动弹性模量保持率达 78%, 较基准组提升 25%。

段燕妮[15]减小了“水冻 - 胀裂”破坏途径。在此基础上, 本项目拟利用植物纤维吸收土体中的自由水分, 减少冻胀力, 并通过 BF 来保持混凝土的整体结构, 使其抗冻融能力达到 F300 以上。在外观和质量上来看“0.25% BF + 0.3% 改性纤维素纤维”混杂体系, F300 冻融后表面无明显剥落, 仅边缘轻微起砂, 质量损失率仅 2.1%, 较单掺 BF (3.5%) 降低 40%。经过微观结构上的优化, 压汞法(MIP)分析证实, 混杂纤维将混凝土 > 50 nm 有害孔隙率从 18.2% 降至 9.7%, 且孔隙分布更均匀。

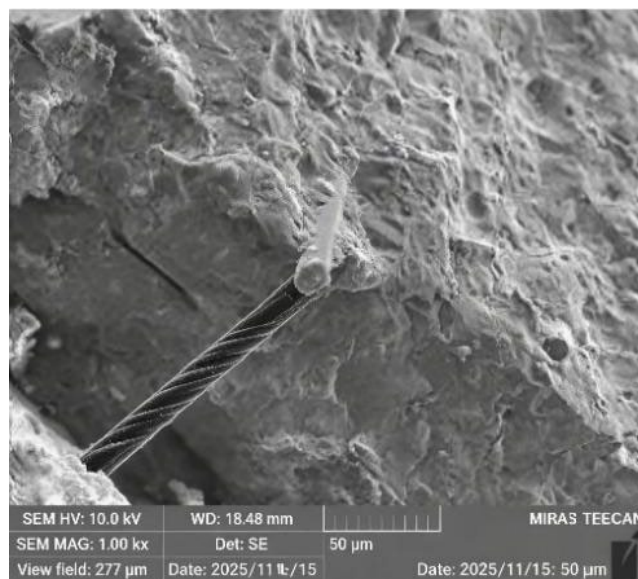


Figure 3. Schematic diagram of basalt fiber under SEM
图 3. 玄武岩纤维 SEM 下示意图

在经过冻融实验后扫描电镜 SEM 下可见玄武岩纤维(BF)呈典型的圆柱形光滑形态, 纵向延伸连续, 表面完整无明显缺陷(见图 3)。纤维表面局部区域附着有密集的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶颗粒, 呈絮状堆积, 部分区域可见少量针棒状钙矾石(Aft)晶体交错生长。玄武岩纤维与水泥水化产物之间界面结合紧密, 无明显剥离缝隙, 界面过渡区(ITZ)致密化程度高。这是由于玄武岩纤维表面含有活性硅氧基团, 可与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生微弱火山灰反应, 形成化学键合。

6.2. 对混凝土抗碳化性能影响

碳化侵蚀本质上是由于外部环境中的 CO_2 渗入到混凝土中, 并与集料中碱金属成分进行一系列的物理化学反应, 导致钢筋锈蚀、基质 pH 值发生变化, 从而对混凝土的强度及耐久性产生直接的影响。但在水泥中加入适当的纤维, 则可降低水泥基材料的空隙率, 改善其密实度, 从而达到延缓 CO_2 侵蚀与侵蚀的目的。程云虹[16]的研究结果显示, 经规范养护 28 天的钢筋混凝土, 其碳化侵蚀深度明显小于普通混凝土; 同时, 与钢纤维、抗碱玻璃纤维相比, 聚丙烯纤维改善了混凝土的抗碳化能力(降低了 33%)。王志杰等人[17]通过对掺入适量纤维的快速碳化实验, 发现掺入一定数量的纤维后, 其密实度、抗碳化能力均得到改善, 碳化速率减缓, 碳化深度减小; 同时, 钢-聚丙烯纤维比单一掺入的钢纤维具有更好的抗碳化性能。程米春[18]在实验中发现, 采用 1:1 混合比例的钢-聚丙烯纤维, 以及 2% 的比例, 可以获得最佳的抗碳化效果。

通过对上述实验研究成果的综合分析可知, 目前比较常见的是聚丙烯纤维、钢纤维以及两者混合使用对纤维混凝土的碳化。

6.3. 对混凝土抗盐腐蚀性能影响

纤维混凝土抗硫酸盐性能是指掺入纤维的混凝土在硫酸盐环境中抵抗化学侵蚀、物理结晶破坏及相关劣化作用, 维持自身结构完整性和力学性能的能力, 是混凝土耐久性的核心指标之一, 直接影响结构在盐渍土、海洋、地下工程等服役环境中的使用寿命。其化学侵蚀为硫酸盐离子(SO_4^{2-})与水泥水化产物(如 C_3A 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)发生反应最终使混凝土体积膨胀、内部开裂、强度下降。而物理侵蚀是指硫酸盐溶液渗入混凝土内部, 在干湿循环或温度变化下结晶。最终使混凝土产生结晶压力, 表面剥落, 孔隙率增加。辛明等[19]通过对单一掺玄武岩聚丙烯纤维混凝土的长期试验, 发现 7 天后, 玄武岩-聚丙烯纤维 1:1 混合比例(0.6%)的抗侵蚀性能最佳, 而仅添加 0.3% 的玄武岩纤维, 其抗侵蚀能力基本不受影响。14 天时, 玄武岩-聚丙烯纤维的用量分别为 0.3% 和 0.6%, 为 1:1 的混合比例时, 防腐效果最佳。28 天龄期, 玄武岩-聚丙烯纤维以 1:2 的比例掺入, 其总量为 0.3%; 玄武岩的单一掺入量为 0.9%, 其耐腐蚀性能最佳。而且, 从各方面来看, 混合纤维的综合性能要比单一纤维好得多。周兆环等[20]在相同的盐雾侵蚀龄期条件下, 玄武岩-聚丙烯混杂纤维的掺量越大, 混凝土经过盐雾侵蚀后的抗压强度均先逐渐增大再逐渐减小。当玄武岩-聚丙烯混杂纤维的掺量为 0.20% 时, 混凝土经过盐雾侵蚀不同时间后的抗压强度值均可达到最大值, 其中盐雾侵蚀 7、28、56 d 后的抗压强度值分别为 49.08、49.65、47.58 MPa, 而未掺入混杂纤维时的抗压强度分别为 34.68、35.12、34.19 MPa, 再继续增大混杂纤维的掺量, 混凝土在不同盐雾侵蚀龄期下的抗压强度均有所减小。为了最大限度地提高混凝土的抗盐雾侵蚀性能, 同样推荐玄武岩-聚丙烯混杂纤维的最佳掺量为 0.20%。冻融循环次数、水灰比、冻融模式等对混凝土抗盐冻性有显著影响; 聚丙烯纤维与普通混凝土在冻融循环条件下, 其表面剥落率及各项力学性能均有不同程度的降低, 但其降低幅度较大。在水冻中, 混凝土的耐冻性要大于盐冻, 而盐的冻融作用又会加重混凝土的冻结性能。在混凝土中掺入聚丙烯纤维可改善其抗冻性及耐盐冻性能。综合前面的研究成果, 可以发现硫酸盐对混凝土的侵蚀严重, 并且反应复杂, 需要引起人们的重视。

6.4. 对混凝土抗渗性能影响

混凝土的抗渗性能主要体现在其内部对有害气体及流体的渗透。由于这两种因素共同作用下, 混凝土的抗腐蚀性是研究混凝土耐久性的关键。

范燕飞[21]发现纤维素纤维的加入能有效提高混凝土的早龄期抗裂能力, 且随着纤维素纤维含量的提高, 其裂缝的平均裂缝面积和总裂缝面积都在减小。与普通混凝土相比, 纤维增强的混凝土的裂纹长度、最大裂纹宽度均有明显的降低, 并且加入纤维素纤维可以延迟初始裂纹的产生。程云虹等[22]采用渗水高度法测定纤维混凝土的抗渗性能, 实验结果表明, 在钢纤维、耐碱玻璃纤维和聚丙烯纤维中, 聚丙烯纤维对混凝土抗渗性增强效果最好, 耐碱玻璃纤维仅次。王彦硕[23]在混凝土中掺入玄武岩纤维后, 机制砂混凝土的渗透高度减小, 试件的抗渗性能提高。相比于未掺玄武岩纤维的试件, 玄武岩纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%试件的渗透高度分别减小 25.0%、37.5%、28.6%、23.2%和 17.9%。随着玄武岩纤维掺量的增大, 试件的渗透高度呈先减小后增大的趋势, 其最佳掺量 0.2%, 此时机制砂混凝土的渗透高度为 35 mm。这是由于玄武岩纤维与机制砂中石粉的相互作用, 在混凝土内部形成较致密的结构。同时, 玄武岩纤维的存在延缓了混凝土早期裂缝的形成, 从而提升了混凝土的抗渗性能。当玄武岩纤维掺量超过有益阈值时, 混凝土的结构整体性破坏, 纤维逐渐丧失对混凝土内部结构的改善作用, 导致混凝土的抗渗性能降低。余彦锋[24]纤维体积掺量为 0.1%时, 随着所掺入玄武岩纤维长度增大, 渗水高度先减小后增大, 玄武岩纤维长度为 6 mm、12 mm、18 mm、24 mm 时的渗水高度相较不参加纤维的基准组分别下降 17.88%、31.39%、21.17%、2.19%; 玄武岩纤维长度为 30 mm 时的渗水高度相较不参加纤维的基准组增加 9.12%。随着玄武岩纤维掺量的增加, 渗水高度先减小后增大, 当体积掺量为 0.1% 时渗水高度最小。

7. 总结

玄武岩纤维与秸秆纤维的混杂体系在力学性能与耐久性方面展现出显著协同效应。单一纤维虽可在某一方面改善性能, 但存在固有短板。混杂纤维通过“优势互补、缺陷互抑”的设计理念, 实现混凝土综合性能的跨越式提升, 为极端环境下的低成本、长寿命工程提供了可行路径, 亦推动土木工程向绿色、低碳、智能化发展。目前, 化学处理仍是秸秆纤维最经济高效的基础改性方法, 5% NaOH 溶液室温浸泡 1.5 h 为工程推荐工艺, 可使秸秆纤维在水泥强碱环境中 90 天强度保留率从 35%提升至 68%。纳米改性 (0.5%~1% SiO₂ 水溶液超声 30 min) 可使纤维与水泥基界面结合强度提高 55%。当前领域面临的科学问题与技术瓶颈, 以下所示目前仅通过 SEM 观察到玄武岩纤维与水泥基的化学键合、秸秆纤维的“胶钉结构”, 在极寒冻融盐蚀耦合环境下, 界面过渡区(ITZ)的动态损伤演化规律尚未明晰, 缺乏纳米级的微观结构表征与定量评价指标, 无法明确界面损伤与混凝土宏观性能衰减的关联机制且缺乏普适性的混杂纤维配比优化模型, 工程应用中仍依赖经验试配, 无法实现不同场景下的精准配混。最后缺乏考虑多因素耦合的损伤因子设定, 未构建出符合工程实际的耐久性衰减方程与寿命预测模型。针对以上科学瓶颈在未来应利用纳米压痕、X 射线 CT 扫描、原子力显微镜(AFM)等先进测试技术, 对冻融盐蚀耦合环境下玄武岩-秸秆混杂纤维与水泥基的界面过渡区进行多尺度表征, 定量分析界面孔隙率、水化产物分布、粘结强度等微观参数的演化规律; 结合压汞法、核磁共振(NMR)等孔隙结构测试手段, 建立界面微观损伤与混凝土宏观性能衰减的定量关联模型, 提出界面损伤的评价指标与防控准则。

参考文献

- [1] 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 ID: 117374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117374>

- [2] 吴杨. 混杂纤维混凝土力学性能与抗盐冻性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
- [3] 孙传武, 王学志, 辛明, 等. 玄武岩-纤维素混杂纤维混凝土抗冻性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(7): 65-69.
- [4] 邵伟华, 刘金亮, 吕志豪, 等. 接枝纳米二氧化硅改性稻草秸秆纤维混凝土力学性能试验研究[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2022 年工业建筑学术交流会议论文集(中册). 哈尔滨: 东北林业大学土木工程学院, 2022: 398-405.
- [5] 李圣彬, 李洪萍, 冯壮壮, 等. 改性秸秆纤维沥青胶浆路用性能研究[J]. 交通世界, 2024(Z2): 22-25.
- [6] 王晓勇. 玄武岩纤维对混凝土耐久性能的影响研究综述[J]. 四川水泥, 2025(3): 12-14, 21.
- [7] 孙天书, 周纯秀, 樊延超. 路用小麦秸秆纤维工艺与性能研究[C]//中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2024 世界交通运输大会(WTC2024)论文集(公路工程). 2024: 258-264.
- [8] 王林彬, 杨九林, 毛骥, 等. 纤维长度与纤维掺量对玄武岩纤维混凝土力学性能影响研究[J]. 广州建筑, 2025, 53(7): 74-78.
- [9] 安红山, 黑鑫, 吴继因, 等. 玄武岩纤维掺量对混凝土抗压强度的影响研究[J]. 材料导报, 2025, 39(S1): 249-251.
- [10] 何孝龙. 短切玄武岩纤维在混凝土中的应用效果及机理[J]. 浙江建筑, 2025, 42(4): 34-37.
- [11] 黎晓辉. 冻融循环作用下混掺纤维增强再生橡胶混凝土力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2024.
- [12] 于志龙, 张天福, 夏军礼, 等. 玄武岩纤维混凝土抗弯特性与韧性研究[J]. 天津建设科技, 2025, 35(4): 75-80.
- [13] Divyah, N., Thenmozhi, R., Neelamegam, M. and Prakash, R. (2020) Characterization and Behavior of Basalt Fiber-reinforced Lightweight Concrete. *Structural Concrete*, **22**, 422-430. <https://doi.org/10.1002/suco.201900390>
- [14] 杨彬, 丁斌. 低温环境下麦秸秆灰改性碳纤维混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(5): 49-52.
- [15] 段燕妮. 玄武岩-聚丙烯纤维增强高性能混凝土性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [16] 程云虹, 王宏伟, 王元. 纤维增强混凝土抗碳化性能的初步研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 792-795
- [17] 王志杰, 王奇, 孙长升, 等. 基于快速碳化试验的纤维喷射混凝土碳化深度预测研究[J]. 混凝土, 2014(2): 21-24.
- [18] 程米春. 钢-聚丙烯纤维粉末混凝土碳化试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(3): 97-101.
- [19] 辛明, 王学志, 佟欢. 纤维混凝土耐久性能研究综述[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 35-39.
- [20] 周兆环, 黄道斌. 玄武岩-聚丙烯纤维混凝土力学性能及抗盐侵蚀性能研究[J]. 盐科学与化工, 2025, 54(10): 40-44.
- [21] 范燕飞. 聚丙烯纤维与纤维素纤维混凝土的防裂抗渗性能[J]. 合成纤维, 2023, 52(12): 69-72.
- [22] 程云虹, 王宏伟, 王元. 纤维增强混凝土抗渗性试验研究[J]. 公路, 2010(7): 142-144.
- [23] 王彦硕, 赵文娟, 关启龙. 玄武岩纤维增强机制砂混凝土力学性能和抗渗性能研究[J]. 水利科技与经济, 2025, 31(4): 148-151.
- [24] 余彦锋. 玄武岩纤维混凝土力学性能及抗渗性研究[J]. 科学技术创新, 2021(25): 135-138.