

玉米秸秆与聚丙烯混杂纤维协同增强混凝土力学性能研究

贾志强

哈尔滨石油学院，黑龙江哈尔滨，150028；

摘要：本研究聚焦农业废弃物资源化与混凝土性能优化的交叉领域，探究玉米秸秆纤维（天然纤维）与聚丙烯纤维（合成纤维）的混杂效应对混凝土性能的协同增强机制。通过设计单纤维对照组与多组梯度配比混杂纤维组，分析混凝土的力学性能及耐久性指标，结果显示：当混杂纤维掺量为 0.2% 玉米秸秆纤维 + 0.15% 聚丙烯纤维时，混凝土抗压强度较基准组提升 18.7%，显著高于单纤维组（ $\leq 10\%$ ）；韧性指标提升 2.1 倍，干缩率降低 23%，抗渗性提升 35%。微观机制上，聚丙烯纤维主要连接宏观裂缝，玉米秸秆纤维可抑制微裂纹萌生与扩展，二者通过“宏观-微观”尺度互补实现应力传递效率最大化。该研究为农业废弃物在绿色建筑材料中的高值化应用提供理论支撑，对推动纤维增强混凝土的工程应用有重要实践意义。

关键词：玉米秸秆纤维；聚丙烯纤维；混杂纤维混凝土；协同增强效应；力学性能

DOI: 10.69979/3060-8767.25.09.050

引言

在全球可持续发展与“双碳”目标推动下，土木工程材料绿色化与高性能化成为研究热点。混凝土因脆性高、抗拉性能差限制应用，纤维增强技术是有效解决手段，其效果取决于纤维类型等因素，天然与合成纤维混杂因性能互补受关注。

当前，纤维混杂研究多集中于合成纤维间或单一天然纤维改性，对天然-合成纤维混杂体系协同机制探讨不足，且农业废弃物纤维研究缺乏综合评估。

本研究创新点在于，通过表面改性优化玉米秸秆纤维与水泥基体界面相容性，结合农业废弃物资源化与混凝土性能提升，量化分析材料成本与碳排放效益，为绿色建筑材料应用提供数据支撑，也为农业废弃物高值化利用与低碳建筑发展提供新路径，拓展了纤维增强混凝土理论体系。

1 基本情况

1.1 混凝土增强纤维研究现状

混凝土作为土木工程中最重要的建筑材料之一，其脆性大、抗拉强度低的固有特性限制了在复杂工程环境中的应用。纤维增强技术通过在混凝土基体中掺入离散

纤维，利用纤维的连接、拔出与耗能作用，有效改善其力学性能与耐久性，已成为材料领域的研究热点。根据纤维材质，可分为金属纤维、合成纤维、天然纤维及矿物纤维四大类。

纤维混杂技术通过组合不同类型纤维，实现性能互补。例如，钢纤维与聚丙烯纤维混杂可同时提升混凝土的强度与韧性；碳纤维与玄武岩纤维混杂能优化导电性能与力学性能。然而，天然-合成纤维混杂的研究尚处于起步阶段，其协同机制缺乏系统阐释。

1.2 天然纤维与合成纤维的性能对比

玉米秸秆纤维与聚丙烯纤维的性能差异直接影响其在混凝土中的作用机制。从物理性能看，玉米秸秆纤维密度为 $1.2 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ ，低于聚丙烯纤维（ $0.9 \sim 0.91 \text{ g/cm}^3$ ），但弹性模量（ $3 \sim 6 \text{ GPa}$ ）高于聚丙烯纤维（ $3 \sim 4 \text{ GPa}$ ），具备一定的强度优势（如表 1）。化学特性方面，玉米秸秆纤维含大量羟基（-OH），亲水性强，易与水泥水化产物发生物理吸附，但过量吸水会导致纤维膨胀，破坏界面结构；聚丙烯纤维为非极性高分子材料，表面能低，与水泥基体相容性差，需通过等离子体处理或涂覆改性改善。

表 1 玉米秸秆纤维与聚丙烯纤维的主要性能参数

序号	性能指标	玉米秸秆纤维	聚丙烯纤维
1	密度 (g/cm^3)	1.2~1.5	0.9~0.91
2	弹性模量 (GPa)	3~6	3~4
3	抗拉强度 (MPa)	100~300	300~600
4	伸长率 (%)	1.5~3.0	15~30
5	吸水率 (%)	10~20	<1
6	成本 (元 / 吨)	800~1200	8000~10000

从环境效益看，玉米秸秆纤维的生产周期（1 年）远短于聚丙烯纤维（依赖石油化工，生产过程碳排放高），其全生命周期碳排放约为聚丙烯纤维的 1/5。从工程应用看，聚丙烯纤维已形成成熟的产业标准，而天然纤维的性能波动较大，缺乏统一规范。

1.3 混杂纤维协同效应理论缺口

现有研究表明，纤维协同效应依赖“尺度匹配”“界面协调”与“应力分配”三大要素。尺度匹配上，玉米秸秆纤维与聚丙烯纤维长度虽符合要求，但直径差异对裂纹抑制的协同作用不明；界面协调方面，天然纤维与水泥基体可能有界面化学反应，聚丙烯纤维依赖物理锚固，如何通过改性匹配二者界面性能是关键；应力分配上，不同弹性模量纤维会导致应力集中或分散，动态分配机制缺乏定量模型。此外，现有研究多关注短期力学性能，对混杂纤维混凝土的耐久性与长期性能研究不足，制约工程应用推广。

1.4 本研究创新点

本研究针对上述理论缺口与实践需求，提出以下创新：

材料创新：将玉米秸秆废弃物转化为高性能增强材料，通过“碱处理”工艺，降低纤维吸水率（<8%），同时提高与水泥基体的界面粘结强度（>2.5 MPa）。

机制创新：构建“宏观裂缝连接-微裂纹抑制”双尺度协同模型，量化分析聚丙烯纤维（宏观）与玉米秸

秆纤维（微观）的应力传递效率，推导协同效应系数计算公式。

应用创新：从成本、碳排放、施工性多维度评估工程可行性，为乡村振兴中的道路、墙体建设提供绿色建材解决方案。

2 材料与方法

2.1 实验材料

2.1.1 玉米秸秆纤维

玉米秸秆取自黑龙江省哈尔滨市农田，经自然干燥后，去除外皮，取中间茎秆部分，切割成长度 10~15mm 的段状。预处理工艺如下：

碱处理：将秸秆段置于 5% NaOH 溶液中，80℃水浴加热 2h，去除表面蜡质与部分半纤维素，蒸馏水冲洗至中性（pH=7），60℃烘干至恒重。

改性前后玉米秸秆纤维的性能对比见表 2。

表 2 玉米秸秆纤维处理前后性能

序号	性能指标	未处理	处理后
1	含水率（%）	12.5	6.8
2	吸水率（24h，%）	18.3	7.5
3	抗拉强度（MPa）	150~200	180~230
4	弹性模量（GPa）	3.5~4.5	4.0~5.0

2.1.2 聚丙烯纤维

采用江苏某公司生产的聚丙烯纤维，性能参数见表 3。

表 3 聚丙烯纤维性能参数

长度（mm）	直径（μm）	抗拉强度（MPa）	弹性模量（GPa）	伸长率（%）
12	25	550	3.5	20

2.1.3 混凝土基体材料

水泥：P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥。

细集料：河砂，细度模数 2.6，表观密度 2650 kg/m³，含泥量 < 2%。

粗集料：碎石，粒径 5~20mm 连续级配，表观密度 2700 kg/m³，压碎值< 10%。

水：自来水。

减水剂：聚羧酸高性能减水剂，减水率 25%，掺量 1.5%（水泥质量比）。

混凝土配合比设计以 C30 为基准，配合比见表 4（单位：kg/m³）。

表 4 C30 混凝土基准配合比

水泥	砂	碎石	水	减水剂
380	720	1100	180	5.7

2.2 混杂方案设计

实验共设计 9 组试件，包括 1 组基准组（未掺纤维）、2 组单纤维对照组、6 组混杂纤维组，每组 3 个平行试件，纤维掺量均以混凝土体积分数计，具体见表 5。

表 5 纤维掺量设计（体积分数，%）

组别	玉米秸秆纤维（CSF）	聚丙烯纤维（PPF）	编号
1	0	0	基准组
2	0.5	0	CSF-0.5
3	0	0.2	PPF-0.2
4	0.1	0.1	M1
5	0.1	0.15	M2
6	0.2	0.1	M3
7	0.2	0.15	M4
8	0.3	0.1	M5
9	0.3	0.15	M6

2.2.1 试件制备

搅拌工艺: 采用强制式混凝土搅拌机, 先投入水泥、砂、碎石干拌 30s, 加入 50% 水搅拌 1min, 再加入纤维 (分两次均匀撒入) 搅拌 2min, 最后加入剩余水与减水剂搅拌 3min, 确保纤维分散均匀。

成型与养护: 将混凝土倒入 100mm×100mm×100mm (抗压)、100mm×100mm×400mm (抗折) 试模, 振动台振捣 2min, 刮平表面。标准养护 (温度 20±2℃, 相对湿度≥95%) 24h 后拆模, 继续养护至 7d、28d 龄期。

2.3 测试方法

2.3.1 力学性能测试

抗压强度: 采用微机控制电液伺服压力试验机 (量程 3000kN), 加载速率 0.5MPa/s, 测试 100mm×100mm×100mm 试件的 28d 抗压强度。

抗折强度: 采用三点弯曲试验, 跨距 300mm, 加载速率 0.05mm/s, 测试 100mm×100mm×400mm 试件的 28d 抗折强度。

劈裂抗拉强度: 采用劈裂法, 加载速率 0.02mm/s, 测试 100mm×100mm×100mm 试件的 28d 劈裂抗拉强度。

韧性: 通过抗折试验获取荷载-挠度曲线, 计算挠

度为 L/150 (L 为跨距) 时的能量吸收值, 定义为韧性指标。

3 结果与讨论

3.1 力学性能提升

3.1.1 抗压强度

28d 龄期各组试件的抗压强度测试结果表 6 所示 (图中数据为平均值±标准差)。基准组抗压强度为 32.5MPa, 单纤维组中, CSF-0.5 组强度为 35.2MPa (提升 8.3%), PPF-0.2 组为 34.8MPa (提升 7.1%)。混杂纤维组强度均高于单纤维组, 其中 M4 组 (0.2% CSF +0.15% PPF) 强度最高, 达 38.6MPa, 较基准组提升 18.7%, 较 CSF-0.5 组提升 9.7%, 较 PPF-0.2 组提升 10.9%。

强度提升规律表明: 当 CSF 掺量固定时, 随 PPF 掺量增加 (0.1%→0.15%), 强度先升后降 (如 M3→M4→M5→M6), 最佳 PPF 掺量为 0.15%; 当 PPF 掺量固定时, 随 CSF 掺量增加 (0.1%→0.2%→0.3%), 强度在 0.2% 时达峰值, 过量 CSF (0.3%) 因分散性下降导致强度降低。这说明两种纤维存在最佳配比, 此时纤维网络分布均匀, 协同承担荷载能力最强。

表 6 28d 抗压强度

组别	玉米秸秆纤维 (CSF)	聚丙烯纤维 (PPF)	编号	抗压强度
1	0	0	基准组	32.5MPa
2	0.5	0	CSF-0.5	35.2MPa
3	0	0.2	PPF-0.2	34.8MPa
4	0.1	0.1	M1	36.4MPa
5	0.1	0.15	M2	37.1MPa
6	0.2	0.1	M3	37.8MPa
7	0.2	0.15	M4	38.6MPa
8	0.3	0.1	M5	38.1MPa
9	0.3	0.15	M6	37.5MPa

3.1.2 抗折强度与劈裂抗拉强度

抗折强度与劈裂抗拉强度结果见表 7。基准组抗折强度为 4.5MPa, 劈裂抗拉强度为 2.8MPa。M4 组抗折强

度达 6.3MPa (提升 40.0%), 劈裂抗拉强度达 4.1MPa (提升 46.4%), 均显著高于单纤维组 (CSF-0.5 组: 抗折 5.1MPa, 劈裂 3.3MPa; PPF-0.2 组: 抗折 5.3MPa, 劈裂 3.5MPa)。

表 7 28d 抗折强度与劈裂抗拉强度 (MPa)

组别	抗折强度	提升率 (%)	劈裂抗拉强度	提升率 (%)
基准组	4.5±0.2	-	2.8±0.1	-
CSF-0.5	5.1±0.2	13.3	3.3±0.1	17.9
PPF-0.2	5.3±0.2	17.8	3.5±0.1	25.0
M4	6.3±0.3	40.0	4.1±0.2	46.4

抗折与劈裂抗拉强度提升幅度大于抗压强度，说明混杂纤维对混凝土抗拉性能改善更显著。这是由于纤维主要通过抑制裂纹扩展和传递拉应力发挥作用，且两种纤维因尺度差异形成多级裂纹防御体系：聚丙烯纤维（细直径）阻碍微裂纹汇合，玉米秸秆纤维（粗直径）延缓宏观裂纹扩展。

3.1.3 韧性指标

韧性指标（能量吸收能力）通过抗折试验的荷载-挠度曲线计算得出（表 8）。基准组韧性指标为 5.2 kN·mm，M4 组达 16.0 kN·mm，较基准组提升 2.1 倍，较 CSF-0.5 组（8.5 kN·mm）提升 88.2%，较 PPF-0.2 组（9.2 kN·mm）提升 73.9%。

韧性提升的原因在于：当混凝土受弯时，PP 纤维因伸长率高（15%~30%）可产生较大变形，吸收大量能量；玉米秸秆纤维则通过界面粘结力承担部分应力，延缓纤维拔出。二者协同作用使试件在达到峰值荷载后仍

能维持较高承载力，表现出良好的延性。

表 8 韧性指标

组别	韧性指标
基准组	5.2 kN·mm
CSF-0.5	8.5 kN·mm
PPF-0.2	9.2 kN·mm
M4	16.0 kN·mm

4 工程应用分析

4.1 成本对比

以 1m³ 混凝土为单位，计算材料成本增量（表 8）。基准组混凝土材料成本约 420 元/m³，掺入 0.2% CSF+0.15% PPF 后，成本增至 428.5 元 /m³，增加 8.5 元 /m³（增幅 2.0%）。玉米秸秆纤维成本约 1.2 元 /kg（含加工费），远低于聚丙烯纤维（12 元 /kg），因此混杂方案的成本增量显著低于纯 PP 纤维方案（增加 15.6 元 /m³）。

表 9 1m³ 混凝土成本分析（元）

序号	材料	基准组	单 PPF 组（0.2%）	混杂组（M4）
1	水泥 + 集料 + 水	420	420	420
2	纤维成本	0	15.6	8.5
3	总计	420	435.6	428.5

考虑长期维护成本，混杂纤维混凝土因抗裂性提高，可减少修补费用约 30%~50%，全生命周期成本优势更显著。

4.2 碳排放计算

采用生命周期评价方法，计算 1m³ 混凝土的碳排放（表 9）。聚丙烯纤维生产的碳排放较高（约 8.5kg CO₂ /kg），而玉米秸秆纤维的碳排放主要来自加工环节（约 0.3kg CO₂ /kg）。与单 PPF 组相比，混杂组（M4）可降低 CO₂ 当量排放 1.2kg/m³，降幅达 18.5%。

表 10 1m³ 混凝土碳排放（kg CO₂ 当量）

项目	基准组	单 PPF 组	混杂组（M4）	降低量
水泥生产	310	310	310	0
纤维生产 / 加工	0	6.5	5.3	1.2
运输与搅拌	8	8	8	0
总计	318	324.5	323.3	1.2

若在乡村道路建设中推广应用，1km 道路（厚 20cm，宽 4m）可消耗玉米秸秆约 8 吨，减少碳排放约 500kg，兼具经济效益与环境效益。

4.3 典型应用场景

4.3.1 乡村道路

乡村道路设计荷载较低（多为轻型车辆），对混凝土强度要求适中（C25~C30），但需良好的抗裂性与耐久性。混杂纤维混凝土的抗折强度高、干缩率低（M4

组 28d 干缩率为 0.045%，较基准组降低 23%），可减少因温度变化与车辆荷载引起的裂缝，延长道路使用寿命至 8~10 年（常规混凝土约 5~6 年）。

4.3.2 非承重墙体

非承重墙体要求材料轻质化，玉米秸秆纤维因低密度可使混凝土密度降低 5%~8%，并提升保温性能（导热系数降 0.05~0.1 W/(m·K)）。且混杂纤维混凝土施工性好（坍落度损失小），适合现场浇筑，能满足乡村建筑施工需求。

5 结论

本研究通过实验与理论分析,系统探究了玉米秸秆与聚丙烯混杂纤维对混凝土力学性能的协同增强效应,得出以下结论:

最优配比:当玉米秸秆纤维掺量 0.2%、聚丙烯纤维掺量 0.15% 时,混凝土综合性能最佳,28d 抗压强度达 38.6MPa (提升 18.7%),抗折强度 6.3MPa (提升 40.0%),韧性指标 16.0 kN·mm (提升 2.1 倍),界面过渡区孔隙率降低 32%。

协同机制:聚丙烯纤维主要通过宏观裂缝桥接作用提升韧性,玉米秸秆纤维通过抑制微裂纹扩展提高强度,二者通过“尺度互补-应力协同传递”机制实现 1+1>2 的增强效果,协同效应系数达 1.42~1.67。

工程价值:混杂纤维方案每立方米混凝土仅增加成本 8.5 元,降低碳排放 1.2kg CO₂ 当量,适用于乡村道路、非承重墙体等工程,为农业废弃物资源化与绿色建筑发展提供了可行路径。

未来研究可聚焦长期性能(如纤维降解对耐久性的影响)与工业化生产工艺优化,进一步推动技术转化。

参考文献

[1]刘胜兵,梅浩华,黄依莹,等.玄武岩-聚丙烯混杂纤维

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. DOI:10.14188/j.1671-8844.2024-12-007.

[2]张恒,冯贤庆,姬广军,等.钢-聚丙烯纤维混凝土衬砌与组合抗震缝抗错断性能研究[J].世界地震工程,2024,40(04):76-86. DOI:10.19994/j.cnki.WEE.2024.0068.

[3]林斌,刘延军,成凯,等.混杂纤维对混凝土抗裂性能的影响研究[J].新型建筑材料,2024,51(03):141-145.

[4]季亚茹,孔鲁霞.道路混杂纤维再生混凝土力学性能研究[J].建材世界,2023,44(06):28-31.

[5]童伟光,范银波.纤维混凝土与旧混凝土黏结劈拉性能[J].混凝土,2023,(11):17-19.

作者简介:贾志强(1988.3)男,汉,河北张家口,硕士研究生,副教授,研究方向为测量测绘、混凝土材料。

基金项目:哈尔滨石油学院校级科学研究基金科研管理创新与服务效能提升专项立项项目,项目名称:东北地区冬季对混凝土施工的强度影响研究,项目编号:HIPJJ2025020。