

市政桥梁混杂纤维 UHPC 黏结特性及抗弯性能试验研究

刘 波¹, 周 政¹, 张 理², 于 琳³

(1. 西安市市政设施管理中心, 西安 710016; 2. 西安市东郊市政设施养护管理有限公司, 西安 710000;
3. 石家庄市排水管护中心, 石家庄 050000)

摘 要: 为提升市政桥梁超高性能混凝土 (UHPC) 的韧性, 借助室内试验的方法, 设计了 16 组不同钢-PVA 混杂纤维的 UHPC 配合比, 制备试件并开展中心拉拔试验与四点弯曲试验, 获取其黏结应力-滑移曲线与荷载-挠度曲线, 分析纤维的协同增强机理。结果表明: 混杂纤维能显著改善 UHPC 的界面性能与构件力学行为; 混杂纤维最优配比为 2.5% 钢纤维+1.5% PVA 纤维; 混杂纤维最优配比时, 黏结强度峰值为 42.7 MPa, 滑移峰值为 0.78 mm, 相比于素 UHPC 增幅分别达 49.8%、550%, 破坏模式转变为高延性破坏; 混杂纤维最优配比时, 试件极限抗弯承载力达到 119.9 kN, 相较于素 UHPC 提升 52.2%, 极限挠度达 24.8 mm, 为素 UHPC 梁的 4 倍, 耗能能力约为素 UHPC 梁的 3.8 倍。研究成果明确了钢-PVA 混杂纤维对 UHPC 综合性能的改善效应及最优纤维掺量范围, 可为该材料在桥梁关键受力部位的应用提供试验依据。

关键词: 超高性能混凝土; 混杂纤维; 黏结性能; 抗弯性能; PVA; 钢纤维

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0044-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.008

Experimental Study on Bonding Characteristics and Flexural Performance of Hybrid Fiber UHPC for Municipal Bridges

LIU Bo¹, ZHOU Zheng¹, ZHANG Li², YU Lin³

(1. Xi'an Municipal Facilities Management Center, Xi'an 710016, China;
2. Xi'an Dongjiao Municipal Facilities Maintenance and Management Co., Ltd., Xi'an 710000, China;
3. Shijiazhuang Drainage Pipeline Maintenance Center, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To enhance the toughness of ultra-high performance concrete (UHPC) for municipal bridges, 16 groups of UHPC mix proportions with different steel-PVA hybrid fibers were designed using indoor testing methods. Test specimens were prepared and subjected to center pull-out tests and four-point bending tests to obtain their bond stress-slip curves and load-deflection curves, and the synergistic reinforcement mechanism of the fibers was analyzed. The results showed that hybrid fibers significantly improved the interfacial properties and mechanical behavior of UHPC components. The optimal proportion of hybrid fibers was 2.5% steel fibers + 1.5% PVA fibers. At this optimal proportion, the peak bond strength reached 42.7 MPa and the peak slip was 0.78 mm, representing an increase of 49.8% and 550% respectively compared to plain UHPC. The failure mode transitioned to high ductility failure. At this optimal proportion of hybrid fibers, the ultimate flexural bearing capacity of the test

作者简介: 刘 波 (1979—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 桥梁检测与管理。

通信作者: 于 琳 (1980—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 土木工程。

收稿日期: 2026-01-07

specimens reached 119.9 kN, an increase of 52.2% compared to plain UHPC. The ultimate deflection reached 24.8 mm, which was four times that of plain UHPC beams, and the energy dissipation capacity was approximately 3.8 times that of plain UHPC beams. The research results clarified the improvement effect of steel-PVA hybrid fibers on the comprehensive performance of UHPC and the optimal fiber content range, providing experimental evidence for the application of this material in key load-bearing parts of bridges.

Key words: UHPC; hybrid fibers; bond characteristics; flexural performance; PVA; steel fiber

0 引言

桥梁作为交通运输网络的重要节点,其服役安全性直接关乎区域交通畅通与公共安全^[1-2]。改善桥梁结构的强度和韧性是土木工程领域的重要研究课题。

目前,混杂纤维 UHPC 在桥梁接缝处理、梁端加固、桥面铺装、新型桥面板等方面取得了一定成果。郑宇炜^[3]以粉煤灰(FA)、钢纤维(SF)掺量为设计变量,开展全再生粗骨料混凝土力学强度、吸水率、氯离子渗透深度试验,发现双掺 FA、SF 具有协同效应,可提高力学强度并缓解 SF 对耐久性不利影响,推荐采用 15%FA+1.0%FS 的掺量组合;范小春等^[4]总结了 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 的黏结性能,经拉拔试验,明确多因素影响,结构有 3 种破坏形态,极限黏结强度随部分因素增大而增大,RTSF 掺量超 3%提升减弱,提出的本构模型吻合良好;周志威等^[5]总结了 UHPC 钢纤维混掺优化:为降成本,对比不同长度钢纤维混掺性能,热水养护优于标准养护,特定混掺方案综合性能达标,成本可降 600~700 元/m³;唐亮等^[6]通过双面剪切试验研究 UHPC/ECC 与普通混凝土界面抗剪性能,结果表明其黏结优异,凿毛、植筋和切槽处理可显著提升承载力并影响破坏模式;张阳玺等^[7]通过中心拔出试验探究了碳纤维织物与 UHPC 的黏结性能,发现黏结强度介于 1.42~9.45 MPa 之间,且随埋置深度增加而降低;崔祎菲等^[8]探讨了碱激发超高性能混凝土的制备及性能,发现提高水玻璃模数至 1.5,可使 28 d 抗压、抗折强度及纤维界面峰值荷载提升 4.3%~13.3%;邹花等^[9]利用磁场诱导实现钢纤维在 UHPC 中的定向排列,使弯曲强度与韧性最高提升约 125%、325%,且在相同强度下可减少纤维用量 50%以上,其中长度为 13 mm、掺量为 1.5%时效果最佳;韩宇晴等^[10]发现钢纤维掺量、类型及长径比对 UHPC 性能影响显著;朱永盛^[11]发现调控 UHPC

胶凝材料组成可改善工作性能,粉煤灰会略降低抗压强度,而复合微珠则能提升抗拉强度并优化微观结构,增强纤维黏结性;黄远等^[12]研究含粗骨料 UHPC 与钢筋的黏结性能表明,粗骨料通过互锁增强咬合力,但也会增加不均匀性;任亮等^[13]采用高强钢丝网增强 UHPC 加固桥墩可显著提升其延性。加固厚度与高度进行优化,来平衡刚度与延性,合理设计下位移延性系数可提高超 30%;王雄锋等^[14]研究显示,在钢纤维 UHPC 中混掺 PP/PVA 纤维可进一步提升抗弯强度,并改善裂缝抑制能力,但会降低弯曲韧性;袁龙泉等^[15]发现,增大钢筋直径与锚固长度,以及采用带肋钢筋,均可显著提升 UHPC-NSC 湿接缝界面的拉伸强度,并有效抑制裂缝扩展。

尽管现有研究已证实混杂纤维能够提升 UHPC 的宏观力学性能,然而在市政桥梁复杂受力环境下,混杂纤维在改善 UHPC 界面黏结性能及抗弯行为方面的作用机理仍缺乏系统性认知。为此,制备了钢-PVA 混杂纤维增强 UHPC 试件,通过开展系统的中心拉拔与四点弯曲试验,深入研究试件的钢筋抗拔黏结滑移规律以及梁体的弯曲性能,以揭示混杂纤维的协同工作机制,从而为该材料在桥梁工程中的安全、高效应用提供试验依据。

1 工程概况

某市政改扩建工程 K23+450~K23+680 段桥梁加固项目为双向四车道高速公路简支 T 形梁桥,设计荷载等级为公路-I 级,桥梁全长 230 m,跨径布置为 7 m×30 m,桥面净宽 24.5 m。桥梁上部结构采用预制 T 形梁,单梁截面尺寸为肋宽 20 cm、梁高 160 cm,翼板宽度 160 cm;下部结构采用柱式桥墩、重力式桥台,基础为钻孔灌注桩基础。

桥梁工程采用混杂纤维 UHPC 进行加固,混杂纤维 UHPC 混凝土 28 d 抗压强度 ≥ 120 MPa、抗弯强度 ≥ 20 MPa,弹性模量 ≥ 40 GPa、断裂能 ≥ 150 kJ/m²; 28 d

材料科学

混杂纤维 UHPC 与普通混凝土界面黏结抗剪强度 ≥ 3.5 MPa、抗拉强度 ≥ 2.0 MPa；加固后主梁跨中抗弯承载力提升 $\geq 30\%$ 、挠度降低 $\geq 40\%$ ，满足公路-I 级荷载要求。

2 混杂纤维 UHPC 配合比设计

2.1 材料设计方案

UHPC 基体采用低水胶比与多组分胶凝体系，以实现基体的高强与高致密性，水胶比为 0.18，胶凝材料为水泥+硅灰。骨料选用级配良好的石英砂，以优化颗粒堆积密度。纤维选择高弹性模量、高强度的端钩型钢纤维以及中等弹性模量、高断裂延伸率、亲水性强的 PVA 纤维。具体见表 1，设计 16 组试验配合比，研究纤维对 UHPC 性能的单掺效果与混杂效应。其中，纤维掺量以体积分数表示。

表 1 试验 UHPC 配合比及纤维掺量表
Table 1 Mix proportions and fiber dosages of UHPC

组别编号	钢纤维掺量/%	PVA 纤维掺量/%	水胶比
H0			0.18
S1	0.5		0.18
S2	1.0		0.18
S3	1.5		0.18
S4	2.0		0.18
S5	2.5		0.18
P1		0.5	0.18
P2		1.0	0.18
P3		1.5	0.18
P4		2.0	0.18
P5		2.5	0.18
H1	0.5	0.5	0.18
H2	2.5	0.5	0.18
H3	2.5	1.5	0.18
H4	2.5	2.5	0.18
H5	0.5	2.5	0.18

2.2 试件制备与基本力学性能试验

所有 UHPC 拌合物采用行星式搅拌机分阶段投料搅拌，确保纤维均匀分散。试件浇筑后经 24 h 标准养护脱模，随后转入标准养护室（ 20 ± 2 °C，RH>95%）养护至 28 d。

测试各组材料的基本力学性能，包括立方体抗压强度 f_{cu} 、棱柱体轴心抗压强度 f_c 、劈裂抗拉强度 f_t 及静态弹性模量 E_c ，结果如图 1 所示。发现不同纤维掺量下 UHPC 力学性能差异明显，混杂纤维协同

增强优势更加显著。单掺钢纤维时，立方体抗压强度 f_{cu} 及棱柱体轴心抗压强度 f_c 随掺量增加呈增长趋势，掺量从 0.5% 增至 2.5% 时，立方体抗压强度 f_{cu} 从 154.22 MPa 提升至 161.05 MPa；单掺 PVA 纤维时，立方体抗压强度 f_{cu} 及棱柱体轴心抗压强度 f_c 均随掺量呈下降趋势，对应强度从 151.28 MPa 降至 143.89 MPa，原因为 PVA 纤维模量较低、会影响浆体流动性与包裹性，进而影响密实度；对于混杂纤维组，高强度依赖足够高的钢纤维掺量，但混杂纤维总掺量过高时，材料的基本力学性能会下降，导致强度回落，该组试件的 f_{cu} 、 f_c 强度峰值均为 H3 试件，因此存在最优混杂配合比，即 2.5% 钢纤维 + 1.5% PVA 纤维。

劈裂抗拉强度随单掺钢纤维掺量增加而增长，而单掺 PVA 纤维对劈裂抗拉强度的提升影响不大，但混杂纤维呈现明显的强度峰值，H3 组达 23.94 MPa 远超单掺组，该试件配比为最优混杂配比。

弹性模量变化平稳，参照组 H0 的弹性模量为 48.5 GPa，单掺钢纤维对照组的弹性模量增长较小，为 49.5 GPa，单掺 PVA 纤维对照组却明显降至 46.4 GPa，混杂纤维对照组中，高钢低 PVA 组合组弹性模量可 49.9 GPa。

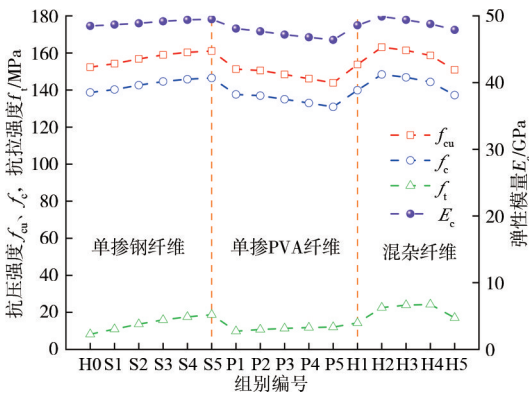


图 1 UHPC 基本力学性能
Fig. 1 Basic mechanical properties of UHPC

2.3 黏结性能试验

采用标准化的中心拉拔试验进行测定钢筋与混杂纤维 UHPC 之间的黏结性能。拉拔试件为 100 mm×100 mm×200 mm 的棱柱体。中心预埋一根 HRB400 级钢筋，其公称直径 d_b 为 16 mm。为获得标准化的黏结应力并避免端部挤压效应，设定锚固长度 l_a 为

$5d_b$, 即 80 mm。钢筋非锚固段采用内径 20 mm、壁厚 2 mm 的硬质 PVC 套管进行隔离, 套管与钢筋间的间隙以及试件浇筑端均采用高强度环氧树脂进行密封, 确保荷载仅通过设定的锚固段传递。每种配合比成型 3 个平行试件, 取试验结果平均值, 以减小试验离散性。

试验设备为数字闭环控制系统的电液伺服万能试验机, 采用位移控制模式进行加载, 以获取黏结应力-滑移曲线的峰值后软化行为, 加载速率设定为 0.2 mm/min, 直至试件完全破坏。荷载 P 由试验机内置的 ± 50 kN 量程、精度 0.5% FS 的力传感器实时采集。钢筋加载端的滑移量 s 通过一个量程为 ± 10 mm、精度 0.1% FS 的高精度线性可变差动变压器 LVDT 进行测量, 该 LVDT 通过磁性表座固定于独立支架上, 其测头与钢筋端部经打磨的平面垂直接触。全部试验在室温 (20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 环境下进行。

2.4 抗弯性能试验

采用四点弯曲试验研究梁式构件的抗弯性能与裂缝发展规律。弯曲梁试件设计为矩形截面, 尺寸为 $b \times h \times L$ 为 100 mm $\times$ 150 mm $\times$ 1 200 mm, 净跨为 1 100 mm。为确保发生典型的受弯破坏, 并充分揭示 UHPC 基体与纤维的贡献度, 在梁底受拉区和梁顶受压区域配置 5 根直径为 12 mm 的 HRB400 级纵向钢筋, 腰筋为 3 根直径为 8 mm 的 HRB400 级纵向钢筋, 箍筋为直径 8 mm 的 HPB300 钢筋, 间距为 200 mm。所有试件均与材料性能测试试件同批浇筑、同等条件标准养护至 28 d, 每组配合比制作 3 根梁, 取试验结果平均值。

试验在微机控制电液伺服结构试验系统上进行。加载装置采用刚性分配梁实现两点加载, 形成跨中纯弯段, 长度为 300 mm。加载制度采用力-位移混合控制, 首先以力控制方式加载至预估开裂荷载的 80%, 以平稳接近初裂状态; 随后切换为位移控制, 以 0.1 mm/min 的恒定速率连续加载, 直至梁的承载力下降至峰值荷载的 80% 以下, 以获取完整的荷载-挠度全过程曲线。在梁跨中底部及两个加载点正下方, 分别安装 LVDT, 实时测量挠度。在纯弯段内的两根受拉钢筋表面, 对称粘贴电阻应变片, 监测钢筋应力从弹性到屈服阶段的发展历程。

3 混杂纤维 UHPC 黏结特性试验结果分析

3.1 黏结应力-滑移曲线

由图 2 可知, 所有曲线均呈现 4 个特征阶段, 分别为弹性阶段、内裂滑移阶段、劈裂软化阶段和摩擦滑移阶段。

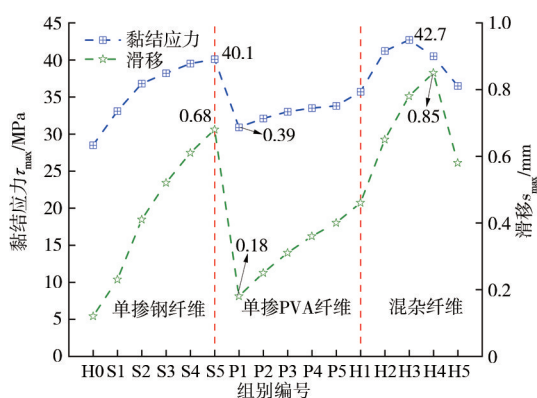


图 2 不同对照组平均黏结应力-滑移曲线

Fig. 2 Average bond stress-slip curves for different mix groups

弹性阶段滑移量增加极小, 应力基本为线性增长, 其中弹性阶段终点应力以 H3 组 27.1 MPa 最优, 远高于 H0 组素 UHPC 的 18.2 MPa, 这是因为混杂纤维改变了混凝土基体的微观结构, 强化钢筋与混凝土界面锚固性能, 提升了弹性阶段承载能力。

内裂与滑移阶段起点的黏结应力范围为 215 ~ 315 MPa, H3 组在该区间的黏结应力为 16.6 ~ 24.9 MPa, 这是因为混杂纤维可有效约束钢筋混凝土界面当中微裂缝的产生, 延缓混凝土内部裂缝的发展。

在劈裂软化阶段, 随着荷载的持续增加并达到峰值, H3 组黏结应力峰值达到 42.7 MPa, 显著高于 H0 组素 UHPC 的 28.5 MPa, 提高比例为 49.8%, 分析原因可知钢-PVA 混杂纤维协同工作, 可桥接界面裂缝, 增强机械咬合力与化学黏结力; H4 组因总掺量过高导致工作性能下降, 产生界面缺陷, 峰值应力下降至 36.2 MPa。

摩擦滑移阶段峰值后应力下降并趋于稳定, 残余应力平台值 τ_{res} 以 H3 组 23.2 MPa 最高, H0 组素 UHPC 仅 0.9 MPa, 纤维通过摩擦与牵拉作用维持残余黏结性能, 保障协同工作能力。

综上所述可知, 钢-PVA 混杂纤维显著提升界面

材料科学

黏结性能,但总掺量过高时因工作性能下降导致其力学性能下降。H3 试件得到的黏结应力最大,该组配合比为最优混杂配合比,即 2.5% 钢纤维+1.5% PVA 纤维。

3.2 黏结强度与特征滑移量分析

由图 3 可知,所有纤维增强组均优于基准组 H0 的 28.5 MPa。单掺钢纤维(S 系列)的提升效果最为直接且显著,随掺量增加, τ_{max} 从 33.1 MPa 提升至 40.1 MPa,提升幅度达 16.1%~40.7%,这是因为钢纤维强大的宏观裂缝桥接能力。单掺 PVA 纤维(P 系列)提升幅度相对有限,在 8.4%至 18.6%之间,其主要作用是抑制微裂缝发展,对峰值强度的贡献存在上限。而混杂纤维(H 系列)展现出显著的协同增强效应。尤其是 H2 组与 H3 组, τ_{max} 分别达到 41.2、42.7 MPa,提升幅度为 44.6%、49.8%,不仅远超单掺 PVA 纤维组,也明显高于同钢纤维掺量的单掺组。值得注意的是,当 PVA 纤维掺量过高时(如 H4 组), τ_{max} 出现下降现象,表明过量的低模量纤维可能对界面区的整体刚度和钢纤维锚固产生轻微不利影响。

H0 组的素 UHPC 破坏迅速, s_{max} 来不及发展,仅为 0.12 mm。掺入纤维后, s_{max} 大幅增加,其中钢纤维对增大滑移量的贡献比较突出, S5 组峰值滑移 s_{max} 达 0.68 mm。混杂纤维组在兼顾高强度的同时,也实现了优秀的变形能力, H3 组和 H4 组的 s_{max} 分别达到 0.78、0.85mm,较 H0 组增大了 550%、608%,这意味着大大延长了黏结失效的过程,提供了充分的安全预警。

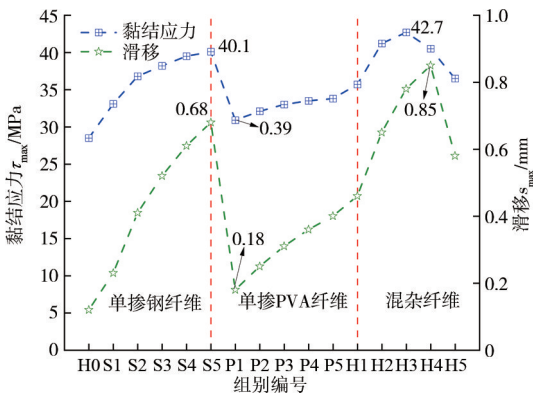


图 3 黏结性能试验结果
Fig. 3 Test results of bond performance

3.3 纤维混杂效应

混杂纤维通过多尺度协同机制提升 UHPC 黏结性能。微观上,高延性 PVA 纤维能均匀分散,有效抑制微裂纹产生与发展,提高界面过渡区的致密性与初始刚度。在细观与宏观层面,钢纤维模量高、强度大,当界面裂缝扩展形成宏观裂纹时,钢纤维能提供强大的桥联应力,阻碍裂缝进一步张开和贯通,从而大幅提升峰值黏结应力及峰值后的残余应力。同时,钢纤维的存在改变了裂缝尖端的应力场,使破坏模式从脆性劈裂转向更具延性的混合破坏。

PVA 纤维主要控制微小裂缝的损伤,为钢纤维发挥作用创造了更好的基体条件;钢纤维桥接宏观裂缝,维持应力,二者协同保障界面在大滑移下的承载力,保护了 PVA 纤维不被过早拉断或拔出,使得黏结界面在经历较大滑移后仍能保持较高的应力水平。试验表明, H3 组(2.5% 钢纤维与 1.5% PVA 纤维)的协同效应最为显著,为最优配合比试件。

4 混杂纤维 UHPC 梁抗弯性能试验

4.1 荷载-挠度曲线

由图 4 可知,纤维的引入从根本上改善了梁的抗弯性能,所有曲线均呈现 3 个特征阶段,分别为弹性上升阶段、开裂硬化阶段、软化阶段。

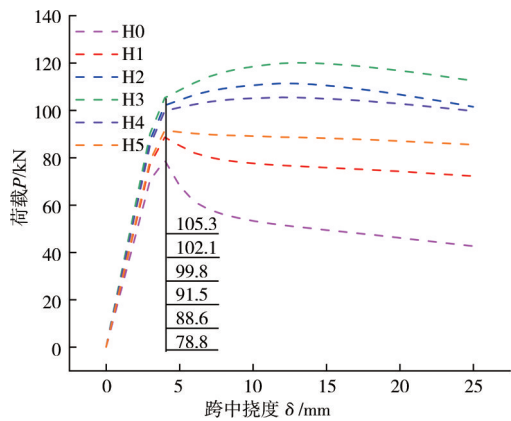


图 4 不同纤维配比 UHPC 梁荷载-挠度曲线
Fig. 4 Load-deflection curves of UHPC beams with different fiber mixes

在弹性上升阶段 ($\delta < 4$ mm),所有纤维组的初始刚度均有提升,混杂纤维组 H2、H3 的荷载值 P 较 H0 组高出约 30%,分析原因为 PVA 纤维对微裂纹的抑制效应,保持了截面有效惯性矩。

材料科学

进入开裂硬化阶段后, H0 组的素 UHPC 梁承担的荷载 P 在 δ 为 4 mm 时达到峰值 78.8 kN 后迅速软化。而所有混杂纤维梁开裂后荷载仍持续增长。其中, 混杂纤维组 H3 的硬化行为最显著, 其极限荷载 P_u 在 δ 为 12 mm 时达到 119.9 kN, 相较于 H0 极限荷载 P_u 的 78.8 kN 提升 52.2%, 且硬化平台段 (δ 从 5~12 mm) 的荷载增幅较为平缓, 表现出优异的裂缝控制与应力重分布能力。分析原因可知, PVA 纤维形成的密集网络阻止了裂缝的局部化与快速扩展, 使得更多钢纤维得以有效桥接并参与承力。

在软化阶段 ($\delta > 12$ mm), 混杂纤维梁的荷载下降速率远低于 H0。当 δ 达到 25 mm 时, H3 组仍保持 112.5 kN 的承载力, 为峰值荷载的 93.8%, 而 H0 组仅剩峰值的 54.1%。这表明混杂纤维桥联作用提供了极高的裂后残余强度与变形能力。

不同纤维配比 UHPC 梁耗能对比如图 5 所示。从能量耗散看, H3 组 P - δ 曲线下面积约为 H0 组的 3.8 倍, 充分体现了其卓越的延性与抗震韧性。综上, 混杂纤维通过多尺度协同阻裂与桥联, 实现了 UHPC 梁承载力、变形能力与耗能性能的全面提升。

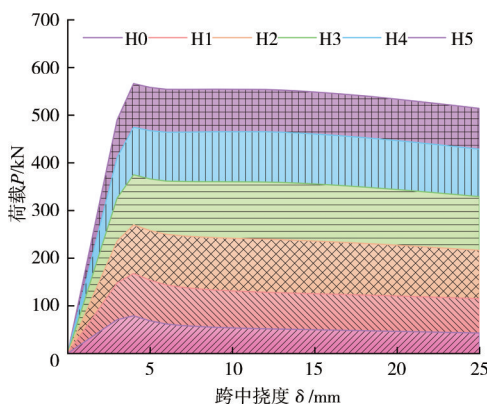


图 5 不同纤维配比 UHPC 梁耗能对比
Fig. 5 Energy dissipation comparison of UHPC beams with different fiber mixes

4.2 特征参数分析

由图 6 可知, 纤维的掺入均提高了梁的初始开裂荷载 P_{cr} 。单掺 PVA 纤维对提升初始开裂荷载 P_{cr} 效果较为平缓, P5 组较 H0 组仅提升 9.4%, 主要作用为抑制微裂纹的产生发展。

单掺钢纤维与混杂纤维的提升更为显著, 其中 H3 组的初始开裂荷载 P_{cr} 达 90.3 kN, 较 H0 提升 28.1%, 表明钢纤维在提升初始开裂抗力中起主导作用, 并与 PVA 纤维产生协同。

所有纤维组均显著提升了极限荷载 P_u , 并使其荷载-挠度曲线在开裂后呈现持续增长的硬化阶段。单掺钢纤维组 (S 系列) 的 P_u 提升与掺量呈正相关, S5 组达 111.8 kN, 相较于 H0 组提升 41.9%。混杂纤维组展现出更强的增强潜力, 其值高于任何单掺组, 且硬化平台段更为平缓持久, 最优配合比试件极限挠度为 24.8 mm, 为素 UHPC 试件的 4 倍, 验证了纤维在宏观与细观尺度的协同承载机制。

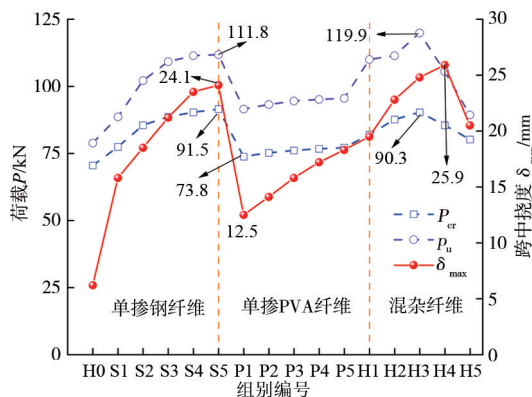


图 6 抗弯性能试验结果
Fig. 6 Test results of flexural performance

5 结论

通过系统室内试验, 研究钢-PVA 混杂纤维对 UHPC 黏结与抗弯性能的协同增强机制, 得到以下结论:

(1) 综合基本力学性能试验、中心拉拔试验与四点弯曲试验, UHPC 混杂纤维的最优掺量为 2.5% 钢纤维与 1.5% PVA 纤维;

(2) 混杂纤维有效改善了 UHPC 界面黏结性能; 最优配比试件黏结强度达 42.7 MPa, 较素 UHPC 提升 49.8%; 峰值滑移量增至 0.78 mm, 提升 550%。破坏模式由脆性劈裂转变为高延性纤维拔出破坏。

(2) 混杂纤维有助于增强 UHPC 梁弯曲性能。最优配比试件极限承载力为 119.9 kN, 提升 52.2%; 极限挠度达 24.8 mm, 为素 UHPC 梁的 4 倍, 耗能能力约为素 UHPC 梁的 3.8 倍。

参考文献

- [1] 朱丽. 梁体损伤对桥梁结构受力性能影响分析 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2020, 19 (3): 67-75.

(下转第 55 页)

的地聚合物混凝土可抵抗 150 次冻融循环, 具有较好的抗冻能力。

参 考 文 献

- [1] 景宏君, 郭美蓉, 单俊伟, 等. 硅灰改性全煤矸石粗骨料混凝土力学性能和微观结构研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2018-2027.
- [2] 伊倩, 古军, 陈卫杰, 等. 煤矸石细骨料改性处理对砂浆性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (6): 2193-2200.
- [3] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1-5.
- [4] 方屹, 杨浪, 饶峰, 等. 煤矸石的地质聚合反应资源化利用研究进展 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (12): 206-213.
- [5] 王建华, 赖益梁, 刘刚, 等. 煤矸石粉制备混凝土用复合掺合料的性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 18-21, 51.
- [6] 阎杰, 单豆豆, 邢国斌, 等. 活化煤矸石粉作为矿物掺合料对煤矸石混凝土性能的影响 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (3): 266-273.
- [7] 阎杰, 邢国斌, 左军鹏, 等. 活化煤矸石粉对煤矸石混凝土性能的影响 [J]. 森林工程, 2023, 39 (5): 190-196.
- [8] 程飞虎, 夏举佩. 复合激发剂对煤矸石胶凝材料性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2024, 52 (11): 186-191.
- [9] 葛洁雅, 朱红光, 李宗徽, 等. 煤矸石粗骨料-地聚合物混凝土的力学与耐久性能研究 [J]. 材料导报, 2021, 35 (增刊 2): 218-223.
- [10] 张卫清, 梅璟昕, 柴军, 等. 全煤矸石基地质聚合物固体制备及力学性能 [J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42 (3): 673-683.
- [11] 张卫清, 柴军, 冯秀娟, 等. 煤矸石基地质聚合物的制备及微观结构 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50 (3): 539-547.
- [12] 陈彦文, 范博雯, 赵明宇, 等. 煤矸石基地聚合物的制备与性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2023, 39 (3): 538-544.
- [13] 黄学满, 饶吉来, 杜凯. 煤矸石基地质聚合物的制备与性能优化研究 [J]. 矿业安全与环保, 2023, 50 (6): 92-97, 103.
- [14] 陈琦琦, 张大明, 任凤玉. 干粉激发煤矸石基地聚合物混凝土配合比优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (8): 125-129.
- [15] 李亚东. 碱激发煤矸石-粉煤灰地聚合物混凝土力学性能和抗碳化性能研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- (上接第 49 页)
- [2] 刘超群, 朱泽文, 代力, 等. 粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 11-15.
- [3] 郑宇炜. 粉煤灰-钢纤维增强全再生粗骨料混凝土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 49-54.
- [4] 范小春, 郭浩宇, 张澳, 等. BFRP 筋与混杂钢纤维超高性能混凝土黏结性能分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (5): 154-161.
- [5] 周志威, 王杰, 余中华, 等. 不同长度钢纤维混掺对 UHPC 性能影响试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 30-34.
- [6] 唐亮, 甘迈, 乔浩玥, 等. UHPC/ECC 加固普通混凝土结构界面抗剪承载力试验研究 [J]. 桥梁建设, 2025, 55 (6): 58-65.
- [7] 张阳玺, 张帅, 李彤, 等. 碳纤维织物与 UHPC 黏结性能试验及理论研究 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46 (11): 262-274.
- [8] 崔祎菲, 艾威侠, 张益聪, 等. 超高性能碱激发混凝土基体与钢纤维的界面黏结性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (10): 3573-3586.
- [9] 邹花, 李水长, 劳家坤, 等. 纤维定向分布对 UHPC 弯曲性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (12): 4359-4367.
- [10] 韩宇晴, 秦拥军, 梁芮, 等. 钢纤维特征对 UHPC 力学性能影响及其机理研究 [J]. 混凝土, 2025 (7): 81-86, 94.
- [11] 朱永盛. 胶凝材料组成对 UHPC 工作性与力学性能影响研究 [J]. 材料导报, 2025, 39 (增刊 2): 219-222.
- [12] 黄远, 吴仁迪. 含粗骨料超高性能混凝土与钢筋黏结性能研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2025, 52 (3): 170-179.
- [13] 任亮, 王家毫, 赵丁正, 等. 高强钢丝网增强 UHPC 加固混凝土桥墩抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46 (12): 201-212.
- [14] 王雄锋, 陈波, 张晓闯, 等. 纤维混掺超高性能混凝土弯曲性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (11): 64-69.
- [15] 袁龙泉, 胡泽育, 丁溢骏, 等. 钢筋参数对 UHPC-NSC 界面黏结性能影响研究 [J]. 混凝土, 2025 (2): 58-63.