

# 钢纤维编织网增强超高性能混凝土力学性能

苏柳安<sup>1</sup>, 曹忠露<sup>1,2,3,4\*</sup>, 冯海暴<sup>1,3</sup>, 赵轩<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;  
3. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 4. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 为优化钢纤维编织网, 增强超高性能混凝土的抗压、抗弯及抗拉性能, 以高流动性超高性能混凝土(UHPC)为基质, 掺入体积掺量为 1.5% 镀铜微丝钢纤维, 通过调整钢纤维编织网铺设的层数、位置、网格大小、网丝直径、网编织类型, 系统探究其对 UHPC 力学性能的影响机制, 并分析裂缝形成与发展规律。结果表明: 增加钢纤维编织网铺设层数、采用 15 mm 网孔尺寸及 2.0 mm 直径的网丝均能显著提升 UHPC 抗压强度和抗弯性能。单层网片铺设于中间位置且采用平织工艺亦表现出更优异的力学性能。受拉区纤维根数的增加可提高试件的拉伸开裂应力和韧性。研究结果揭示了钢纤维编织网参数对 UHPC 力学性能的影响规律, 可为钢纤维编织网增强超高性能混凝土的性能提升及推广应用提供参考。

**关键词:** 超高性能混凝土; 钢纤维编织网; 抗压强度; 抗拉性能; 抗弯性能

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)05-0050-09

doi: 10.7640/zggwjs202505007

## Mechanical properties of steel textile-reinforced ultra-high performance concrete

SU Liu-an<sup>1</sup>, CAO Zhong-lu<sup>1,2,3,4\*</sup>, FENG Hai-bao<sup>1,3</sup>, ZHAO Xuan<sup>2</sup>

(1. Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300461, China; 4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Communications, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** To optimize the compressive, flexural, and tensile properties of ultra-high-performance concrete(UHPC)reinforced with steel textile. Using high-flowability UHPC as the matrix, 1.5% volume fraction of 12 mm copper-coated micro-wire steel fibers were incorporated. By adjusting the number of layers, position, textile size, wire diameter, and weaving type of the steel textile, the influence mechanism on the mechanical properties of UHPC was systematically explored, and the formation and development patterns of cracks were analyzed. The results indicate that increasing the number of steel textile layers, adopting a textile size of 15 mm, and using wires with a diameter of 2.0 mm can significantly enhance the compressive strength and flexural properties of UHPC. A single layer of textile placed in the middle and utilizing a plain weave technique also exhibited superior mechanical properties. An increase in the number of fibers in the tensile zone can improve tensile cracking stress and toughness. The findings reveal the influence patterns of steel textile parameters on the mechanical properties of UHPC, which can provide a reference for enhancing the performance and promoting the application of steel fiber textile-reinforced UHPC.

**Key words:** ultra-high-performance concrete; steel textile; compressive strength; tensile properties; flexural properties

收稿日期: 2024-11-26 修回日期: 2024-12-31

基金项目: 中交一航局揭榜挂帅项目(2022-YHJBGS-02); 中交一航局科技研发项目(2024-8-4、2024-8-7); 交通运输行业重点科技项目清单(2022-MS1-065); 中交集团青年创新项目(2023-ZJKJ-QNCX04)

作者简介: 苏柳安(1999—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为土木工程材料。

\* 通讯作者: 曹忠露, E-mail: caozhonglu@126.com

## 0 引言

随着时代的发展, 混凝土仍然是工程建设中应用最广泛的材料。众多研究是为了改善其固有的强度低、易开裂等弱点, 在混凝土中加入纤维成为一种惯用方法。研究表明, 纤维的掺量、长细比、分布取向对于原材料性能有着较为明显的增强。但因为自重和边壁的影响, 纤维在基体中很难均匀分布, 随着掺量和长细比系数增大, 会导致纤维在混凝土中出现结团现象, 从而使得纤维混凝土本身的潜力受到了约束<sup>[1]</sup>。

纤维编织网增强混凝土是一种将纤维以编织的形式加入到混凝土中来增强其力学性能的材料。通过编织技术使得纤维分布和取向有效地控制在混凝土基体中, 可以提高混凝土的强度、韧性和变形能力, 从而提升其承载能力和抗裂性能。与传统的纤维混凝土相比, 纤维编织网增强混凝土具有更好的增强效果和力学性能。它在桥梁、隧道、地铁、人防工程等重要工程领域广泛应用<sup>[2-3]</sup>。

纤维编织技术是连续纤维在空间或者平面上相互交织形成网状结构, 具有优异的界面性能和力学性能。一方面使纤维在混凝土中的分布取向得到有效控制, 另一方面使纤维在混凝土中的掺量得到有效增加。而超高性能混凝土与传统混凝土相比具有以下优点<sup>[4]</sup>: 1) 超高的抗压强度; 2) 优异的韧性和抗断裂性能; 3) 优异的耐久性; 4) 极低的渗透性。可以预期, 在 Textile Reinforced-Ultra-High Performance Concrete (TR-UHPC), 即织物增强超高性能混凝土<sup>[5-6]</sup>中使用连续的纤维织物来部分替代短钢纤维, 并相应地减少短纤维的使用比例时, 这种做法将能最大化纤维的增强效果。它将连续纤维织物与分散的短纤维的优势有机结合起来, 利用两者之间的协同增强和增韧机制, 进一步提升材料的力学性能。通过这种方式, 可以优化材料的强度和延性之间的平衡, 使其更加匹配。

关于短切分散纤维与纤维编织网协同增强复合材料性能研究, 郭旺<sup>[7]</sup>选用 PVA 短纤维与玻璃纤维格栅织物复合对混凝土进行多层次的增强增韧, 它的弯曲性能以及能量吸收能力得到极大的改善, 试件破坏的状态也变为有预兆的延性破坏。龙天伟<sup>[8]</sup>对 FRP 格栅增强 UHPC 拉伸性能研究, 通过改变格栅的层数来比对应力应变曲线, 结果发现 2 层 FRP 格栅应力-应变有两次刚度, 一次

是协同贡献、一次是 FRP 格栅单独贡献。对于 FRP 格栅增强 UHPC 管还进行环刚度(在侧向压力下, 抵抗变形能力)试验, 发现 FRP 格栅在 UHPC 压碎后承受荷载仍然继续上升。Barhum 等<sup>[9]</sup>将相同材料的束状短纤维和分散短纤维分别掺入到纤维编织网增强混凝土 (TRC) 薄板内, 分散短纤维使得 TRC 薄板开裂时裂缝增多, 束状短纤维使得其对于基体的黏结能力增强。Barhum 等<sup>[10]</sup>为提高 TRC 板的抗裂性能, 分别将玻璃纤维和碳纤维掺入 TRC 薄板测试其拉伸性能, 结果表明纤维体积含量为 1% 时, 能有效地提高薄板的初裂应力, 且相比较下碳纤维影响更大。Butler 等<sup>[11]</sup>把相同材质、不同长径比的纤维掺入 TRC 薄板中, 对其拉伸性能展开研究, 发现长径比越大增强效果越好, 掺量越多荷载传递性越强。Zhu 等<sup>[12]</sup>研究了不同配网率、短切纤维(碳纤维、玻璃纤维和钢纤维)体积掺量和织物预紧力对玄武岩纤维增强混凝土拉伸性能的影响, 阐述了不同短纤维和预紧力的增强机理, 并进行了数字图像相关分析, 得到了 TRC 全场应变和裂纹分布。其中, 短玻璃纤维、钢纤维和预紧力可以增加 TRC 直拉裂纹数量, 减小裂纹间距和宽度, 而短碳纤维的影响不明显。Du 等<sup>[13]</sup>研究了纤维织物配网率、短纤维体积掺量和纤维织物预紧力等对玄武岩织物增强混凝土拉伸性能的影响, 包括拉伸试件的初裂应力、直拉强度、裂缝形态和 TRC 直拉破坏机制等。李大为<sup>[14]</sup>通过拉拔试验, 分析了纤维表面处理方法, 纤维束埋长, PVA 纤维含量, 纬向纤维等因素对玻璃纤维网与 UHTCC 黏结性能的影响。表面用环氧树脂浸渍且粘砂处理, 此时拉拔力最大黏结性能最好; 在一定的埋长范围内, 随着 PVA 掺量、埋长深度增加拉拔力也相应提高; 纬向纤维束阻止了编织网整体的滑移也提高了黏结性能。翟梦超<sup>[15]</sup>在织物增强 UHPC (掺入短切钢纤维) 材料拉伸性能与纤维协同增强增韧机理研究中, 通过控制 3 个变量: 织物类别、布置织物的层数、基体中钢纤维的掺量, 并采用直拉试验发现 TR-UHPC 拉伸过程中总体可以分为 3 个阶段: 弹性阶段、多裂缝发展阶段、裂缝饱和和织物单独受拉至拉断阶段。要选用最合适的织物与 UHPC 变量的配比才能最大限度发挥其拉伸性能。赵俊伶<sup>[16]</sup>开展了纤维编织网增强 ECC 在常规环境以及冻融环境下的四点弯曲试验, 通过分析加载过程的破坏形态、

开裂荷载、极限荷载值、荷载挠度曲线,研究了编织网层数、编织网种类、编织网表面处理方式以及 PVA 掺量对纤维编织网增强 ECC 弯曲性能的影响。

针对以上研究结果,织物增强 UHPC 的性能在很大程度上取决于纤维织物与基体之间的黏结性能。如果黏结不牢固,将直接影响材料的整体力学性能。国内外的研究虽然在这方面取得了一定的进展,但仍需进一步优化纤维织物的规格类型和数量及分布,以提高两者之间的黏结强度。如何确保短切纤维在基体中的均匀分散也是一个技术难题。若纤维织物的均匀分散性难以保证,这可能导致材料的力学性能出现波动,甚至在某些区域出现缺陷。

因此,为了进一步探究钢纤维编织网铺设的层数、位置、网格大小、网丝直径、网编织类型对纤维编织网增强超高性能混凝土力学性能的影响,本文采用 12 mm 的镀铜微丝钢纤维、不同规格钢纤维网作为定向纤维编织物掺入到自配的超高性能混凝土基体中进行抗压试验、单轴直拉试验以及四点弯曲试验,揭示钢纤维编织网铺设的层数、位置、网孔尺寸、网丝直径、网编织类型等因素对纤维编织网增强 UHPC 力学性能的影响规律,为纤维编织网增强 UHPC 的性能提升和推广应用提供技术支撑。

## 1 试验部分

### 1.1 原材料

超高性能混凝土:中交天津港湾工程研究院有限公司生产的 UHPC 干混料按 0.085 水料比,搅拌 8 min 后制得,其坍落扩展时间  $T_{500}=4$  s,扩展度  $\geq 880$  mm。

微丝钢纤维:恒沣栩翔金属新材料有限公司生产的直径 0.2 mm、长 12 mm 平直型镀铜微丝钢纤维。

钢纤维编织网:吴鑫筛网生产的不锈钢网,其规格类型见表 1。

表 1 钢纤维编织网规格类型

Table 1 Specification and types of steel textile

编号	网丝直径/mm	网孔尺寸/mm	网编织类型
S10D1	1(D1)	10(S10)	平织
S15D1	1(D1)	15(S15)	平织
S15D1	1(D1)	15(S15)	焊接
S15D1.5	1.5(D1.5)	15(S15)	平织
S15D2	2(D2)	15(S15)	平织
S25D1	1(D1)	25(S25)	平织

### 1.2 试验设计

本试验主要研究钢纤维编织网铺设的层数、位置、网孔尺寸、网丝直径、受拉区纤维根数、网编织类型对 UHPC 的抗弯、抗压、抗拉性能影响,对此设计表 2、表 3、表 4 三种试验参数。

表 2 抗弯性能试验设计

Table 2 Test design for flexural properties

试件编号	网孔尺寸/mm	网片数量/层	网片位置	微钢纤维掺量/%
S0N0L0D0	—(S0)	—(N0)	—(L0)	1.5
S10N1L2D1	10(S10)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L1D1	15(S15)	1(N1)	上 1/3(L1)	1.5
S25N1L2D1	25(S25)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1(焊接)	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1.5	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D2	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L3D1	15(S15)	1(N1)	下 1/3(L3)	1.5
S15N2L12D1	15(S15)	2(N2)	上 1/3、中 1/2(L12)	1.5
S15N2L13D1	15(S15)	2(N2)	上 1/3、下 1/3(L13)	1.5
S15N2L23D1	15(S15)	2(N2)	中 1/2、下 1/3(L23)	1.5
S15N3L123D1	15(S15)	3(N3)	上 1/3、中 1/2、下 1/3(L123)	1.5

注:1) 未标注均为平织工艺网片;2) 编号中 D 后面数字为网丝直径。

表 3 抗压性能试验设计  
Table 3 Test design for compressive properties

试件编号	网孔尺寸/mm	网片数量/层	网片位置	微钢纤维掺量/%
S0N0L0D0	—(S0)	—(N0)	—(L0)	1.5
S10N1L2D1	10(S10)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L1D1	15(S15)	1(N1)	上 1/3(L1)	1.5
S25N1L2D1	25(S25)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1(焊接)	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1.5	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D1.5(焊接)	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D2	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L2D2(焊接)	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N1L3D1	15(S15)	1(N1)	下 1/3(L3)	1.5
S15N2L12D1	15(S15)	2(N2)	上 1/3、中 1/2(L12)	1.5
S15N2L13D1	15(S15)	2(N2)	上 1/3、下 1/3(L13)	1.5
S15N2L23D1	15(S15)	2(N2)	中 1/2、下 1/3(L23)	1.5
S15N3L123D1	15(S15)	3(N3)	上 1/3、中 1/2、下 1/3(L123)	1.5
S15N1L2D1	15(S15)	1(N1)	中 1/2(L2)	1.5
S15N4L1234D1	15(S15)	4(N4)	间隔 20 mm(L1234)	1.5

注: 1)未标注均为平织工艺网片; 2) 编号中 D 后面数字为网丝直径。

表 4 抗拉性能试验设计  
Table 4 Test design for tensile properties

试件编号	网孔尺寸/mm	网丝直径/mm	受拉区纤维根数	微钢纤维掺量/%
S0D0G0	—(S0)	—(D0)	—(G0)	1.5
S10D1G5	10(S10)	1(D1)	5(G5)	1.5
S10D1G4	10(S10)	1(D1)	4(G4)	1.5
S10D1G3	10(S10)	1(D1)	3(G3)	1.5
S10D1.5G5	10(S10)	1(D1)	5(G5)	1.5
S5D1.5G3	5(S5)	1.5(D1.5)	3(G3)	1.5
S10D1.4G3	10(S10)	1.4(D1.4)	3(G3)	1.5
S15D1.4G3	15(S15)	1.4(D1.4)	3(G3)	1.5

本试验涉及抗压、抗弯、抗拉测试, 需使用 3 种模具: 100 mm 立方体模具测抗压, 测量段 50 mm×50 mm×150 mm 哑铃形模具测抗拉, 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体模具测抗弯。钢纤维编织网片也剪裁成模具规格尺寸, 且网片最顶端那根钢纤维做留长处理, 以便后续浇筑过程中的固定

操作。纤维网片布置示意图见图 1。浇筑时以铺设 1 层网片的试件为例, 首先在模具中浇入 20 mm 厚的 UHPC, 然后将裁剪好的网片按照预定位置垂直插入基体中, 留长的那根钢纤维搭接在模具上后, 用胶布粘贴固定, 再使用直径 0.75 mm 的绑扎铁丝穿绕过网片沿着模具边壁进行箍扎,

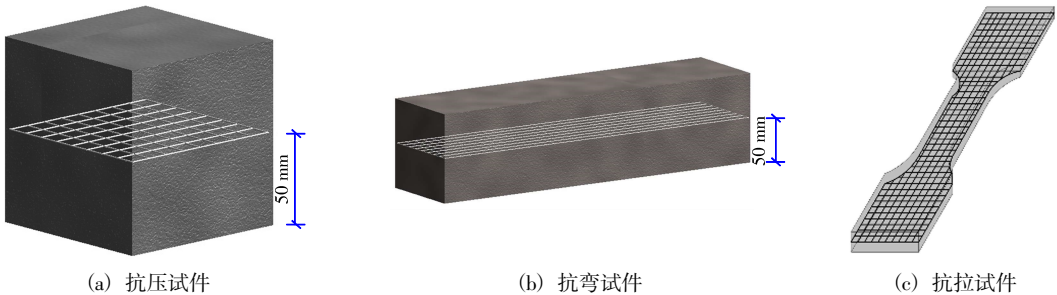


图 1 纤维网片布置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of steel textile layout

使得网片不会轻易晃动,最后再浇入剩余 80 mm 厚的 UHPC。浇筑过程中所有操作均由 2 人完成,一人负责 UHPC 倒入模具,另一人负责固定网片。浇筑完毕后进行轻微振捣,将表面抹平。经过 24 h 脱模后,将试件放在温度为 $(20\pm 3)$ ℃以及相对湿度为 90%以上的潮湿空气中养护 28 d,每种工况 3 个待测试件。

### 1.3 测试方法

立方体试件进行抗压强度试验,压力试验机采用位移加载控制,设置加载速度为 0.2 mm/min。待试件破坏后停止加载,试验数据由压力试验机系统自动采集,根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[17]</sup>规定的方法测得的立方体试件抗压强度值。

棱柱体试件采用 600 kN 的万能试验机对试件进行四点弯曲试验。荷载  $P$  由试验机自动采集,跨中挠度由位移计读取,两者数据同步采集。加载由位移控制,速率 0.5 mm/min,当荷载过峰值后出现明显的下降或者下降至峰值荷载的 80%时,停止加载。

哑铃形试件采用 100 kN 的万能试验机对试件进行拉伸试验,位移控制加载,位移通过外加位移计记录,加载速率控制为 0.2 mm/min。其中混凝土两端均采用混凝土哑铃形单轴拉伸试验夹具,当荷载过峰值后出现明显的下降或者下降至峰值荷载的 80%时,停止加载。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钢纤维编织网对抗压强度的影响

改变钢纤维编织网铺设的层数、网孔尺寸、位置、网丝直径、网编织类型对 UHPC 抗压强度的影响,试验结果见表 5。表 5 中立方体试件抗压强度随钢纤维编织网片铺设层数的增加而显著增强,呈现递增趋势。具体而言,每增加一层网片,抗压强度均有所提升,但增幅逐渐趋于稳定。铺设 2 层较 1 层增幅为 5.11%,而后续增幅分别为 2.73%和 3.33%。这一现象表明,随着铺设层数的增加,纤维在试件内的分布更加密集且均匀,形成了更为有效的增强网络。同时,下层纤维与试件底部的距离缩短,使得在抗压强度试验加载时,更多纤维能够参与到承载过程中,有效分散了应力集中,延缓了裂纹的萌生与扩展。因此,铺设层数的增加不仅提升了试件的直接承载力,还通过改善其内部应力状态,实现了抗压强度的

持续增强。

表 5 钢纤维编织网规格类型、网片数量及分布位置对 UHPC 抗压强度的影响

Table 5 Influence of steel fiber woven mesh specifications, mesh quantity, and distribution positions on the compressive strength of UHPC

试件编号	抗压强度/MPa
S0N0L0D0-1.5%	128.9
S15N1L2D1-1.5%	138.9
S15N1L2D1(焊接)-1.5%	139.7
S15N1L2D1.5-1.5%	145.7
S15N1L2D1.5(焊接)-1.5%	141.2
S15N1L2D2-1.5%	147.9
S15N1L2D2(焊接)-1.5%	142.9
S15N1L1D1-1.5%	130.5
S15N1L3D1-1.5%	135.2
S10N1L2D1-1.5%	135.7
S25N1L2D1-1.5%	126.2
S15N2L12D1-1.5%	146.3
S15N2L13D1-1.5%	145.4
S15N1L23D1-1.5%	146.0
S15N3L123D1-1.5%	150.1
S15N4L1234D1-1.5%	155.2

注:编号中 S 后面数字为网孔尺寸;N 后面数字为网片数量;L 后面数字为网片位置;D 后面数字为网丝直径;1.5%为微钢纤维的体积掺量。

研究不同网孔尺寸下立方体试件的抗压强度对比,表 5 中试验结果显示,当钢纤维编织网网孔尺寸为 15 mm 时(试件编号 S15N1L2D1-1.5%),试件的抗压强度达到最高值 138.9 MPa,显著优于其他尺寸。网孔尺寸为 10 mm 的试件(S10N1L2D1-1.5%)抗压强度为 135.7 MPa,而网孔尺寸为 25 mm 的试件(S25N1L2D1-1.5%)则表现出最低的抗压强度,仅为 126.2 MPa。这一结果表明,钢纤维编织网网孔尺寸为 15 mm 时,对立方体试件的抗压强度增强效果最为显著。随着网孔尺寸的增大,纤维网片与基体材料的接触面积相对减小,导致纤维与基体间的摩阻力降低,进而影响了纤维的增强效果。进而当网孔尺寸过于紧密时,镀铜微丝钢纤维在网格中的穿插受到限制,易发生纤维结团现象,这不仅减少了纤维的有效数量,还可能导致应力集中,降低了试件的整体力学性能。本研究中,采用的是 12 mm 的微丝钢纤维,所以 15 mm 网孔尺寸应为提升立方体试件抗压强度的最佳选择。

在铺设单层网片的试验中,网片位置对抗压强度具有显著影响。观察表 5 中抗压强度值,当网片置于试件正中位置时,抗压强度达到最高值 138.9 MPa,表明该位置能够最大限度地发挥网片的增强作用。相比之下,将网片置于距上表面 33 cm 处时,抗压强度降低至 130.5 MPa,降幅达 6%,而将网片置于距下表面 33 cm 处时,尽管降幅较小(2.7%),但仍显示出位置对性能的影响,可能是由于上部混凝土受压坏后,下部网片尚未充分参与受压过程。因此,在单层网片铺设时,将网片置于试件正中间是增强抗压强度的优选方案。进一步分析置入 2 层网片的数据,可以看出在铺设 2 层网片的情况下,网片之间的位置关系对抗压强度的影响并不显著。这是由于 2 层网片在受力过程中能够相互协同,共同抑制裂缝的发展,从而保持了较为稳定的抗压强度。此现象表明,在多层网片铺设中,网片间的协同作用更为重要,而具体的位置关系则不是决定性因素。

研究钢纤维编织网网丝直径对超高性能混凝土抗压性能的影响,分析 3 种不同网片网丝直径(1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm)所浇筑的立方体试件的抗压强度(见表 5)进行对比。3 种工况的试验编号分别为:S15N1L2D1-1.5%、S15N1L2D1.5-1.5%、S15N1L2D2-1.5%。立方体试件抗压强度随着网丝直径的增大总体呈现上升趋势。直径 2.0 mm 时抗压强度最大为 147.9 MPa,当网丝直径降到 1.5 mm 时,抗压强度是 145.7 MPa,降幅为 1.48%,网丝直径降到 1.0 mm,抗压强度最低仅为 138.9 MPa,降幅为 6.09%。这是由于网丝直径的下降,使得网片的受压能力也随之降低,在基体受到破坏时,细纤维比粗纤维会更容易被压弯压断,最终导致整体混凝土的抗压强度也会降低。

研究不同编织工艺对立方体试件抗压性能的影响,表 5 中抗压强度显示,铺设平织工艺网片的立方体试件抗压强度略高于焊接工艺,采用平织工艺编织的钢纤维编织网片在试件受压时均表现出更为优异的抗压性能。这一现象可归因于平织工艺独特的结构特性,该工艺以单股纤维丝为基础进行穿插编织,形成的网片结构合理且牢固,即使部分纤维丝发生断裂,整体网片也能保持较好的完整性,不易崩散。相比之下,焊接工艺则是通过电焊将 2 根纤维丝连接而成,虽然也能形成一定的网状结构,但在整体性和稳定性方面却

逊色于平织工艺。因此,平织工艺的钢纤维编织网能够更充分地发挥其性能优势,与基体材料形成良好的协同作用,共同提升试件的抗压强度。

2.2 钢纤维编织网对抗拉强度的影响

改变钢纤维编织网网孔尺寸、网丝直径、受拉区纤维根数对 UHPC 的抗拉强度影响,试验结果见表 6,拉伸应力-应变曲线见图 2。

表 6 钢纤维编织网规格类型对 UHPC 抗拉性能的影响  
Table 6 Influence of steel textile specifications on the tensile properties of UHPC

试件编号	开裂应力/ MPa	开裂 应变/%	极限应力/ MPa	极限 应变/%
S0D0G0-1.5%	6.78	0.78	7.72	0.98
S10D1G3-1.5%	7.02	0.81	8.56	1.02
S10D1G4-1.5%	8.55	1.08	9.51	1.17
S10D1G5-1.5%	8.68	1.22	10.19	1.50
S10D1.5G5-1.5%	8.97	2.01	10.23	2.45
S5D1.5G3-1.5%	8.29	1.61	9.21	1.73
S10D1.5G3-1.5%	7.38	1.51	9.22	1.71
S15D1.5G3-1.5%	8.64	1.44	10.17	1.56

注:编号中 S 后面数字为网孔尺寸;D 后面数字为网丝直径;G 后面数字为受拉截面纤维网纵向纤维根数;1.5%为微钢纤维的体积掺量。

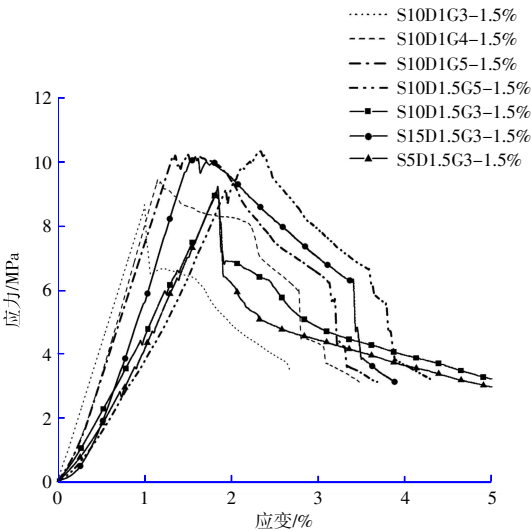


图 2 钢纤维编织网规格类型对 UHPC 抗拉应力-应变的影响

Fig. 2 Influence of steel textile specifications on the tensile stress-strain curve of UHPC

图 2 展示了钢纤维编织网片在不同网丝直径(1 mm、1.5 mm)条件下的拉伸应力-应变曲线。在试验中,控制了除网丝直径以外的所有变量。首



先,观察到当网丝直径从 1 mm 增加到 1.5 mm 时,试件拉伸开裂应力从 8.68 MPa 提升至 8.97 MPa。网丝直径 1 mm 的极限拉伸应力为 10.19 MPa,网丝直径 1.5 mm 的极限拉伸应力为 10.23 MPa。这主要是因为较粗的纤维具有更大的表面积和更强的界面黏结能力,能够更好地与基体材料结合,从而在初始加载阶段更有效地抵抗裂缝的形成。最为显著的变化是极限拉应变的增加,提高了约 63.3%。这一现象可以归因于较粗纤维在材料中的“桥接”作用。在拉伸过程中,较粗纤维能够更有效地分散和传递应力,减缓应力集中现象,从而延缓了材料的宏观失效过程。

改变钢纤维编织网网孔尺寸后观察图 2 的拉伸应力-应变图。相较于网孔尺寸为 5 mm 和 10 mm 的试件,网孔尺寸为 15 mm 的试件展现出更高的抗拉强度为 10.17 MPa,对比分别提升了约 10.4%和 10.3%。特别是在第 2 阶段应变硬化阶段,其应力下降的幅度也更为平缓。这表明,掺入网孔尺寸为 15 mm 的钢纤维编织网对 UHPC 的抗拉强度有明显的提升效果。这一现象的原因在于掺入基体中的微丝钢纤维长度为 12 mm,在浇筑混凝土的过程中,钢纤维能够有效地穿插在 15 mm 的网孔之间,与编织网形成桥接耦合,过于紧密的编织网网孔会导致掺入的微丝钢纤维出现结团,使得试件拉伸性能有所限制。因此选择合适的网孔尺寸和微丝钢纤维长度能使微丝钢纤维在 UHPC 基体中均匀分布,促进钢纤维和编织网更好的协同受力,进而使 UHPC 的力学性能得到提升。

改变钢纤维编织网受拉区纤维根数后,观察试件的拉伸应力-应变关系,见图 2。从整体趋势来看,随着受拉纤维根数的增加,试件的拉伸开裂应力、拉伸极限应力以及极限拉应变都呈现逐渐增加的规律。这一趋势在试件 S10D1G3-1.5%、S10D1G4-1.5%和 S10D1G5-1.5%上均得到了明显地体现。表 6 中以试件 S10D1G3-1.5%作为基准,其极限拉伸应力相对较低,为 8.56 MPa。而当受拉纤维根数增加至 4 根时,可以观察到极限拉伸应力为 9.51 MPa,提升 11.1%,进一步增加受拉纤维根数至 5 根,极限拉伸应力为 10.19 MPa,与试件 S10D1G3-1.5%相比增加了约 19.1%,这表明增加纤维根数对试件的拉伸性能有积极影响。这些受拉区纤维在试件受力时能够更有效地吸收和

传递能量。此外,增加的受拉区纤维根数还使得试件极限拉伸应变的增幅从 1.02%至 1.17%再至 1.50%,提升试件的韧性,可见增加受拉区纤维根数对于拉伸试验中试件裂缝的抑制和发展也有积极作用。

### 2.3 钢纤维编织网对抗弯强度的影响

改变钢纤维编织网铺设的层数、位置、网孔尺寸、网丝直径、网编织类型对 UHPC 的抗弯强度影响,试验结果见表 7。当镀铜微丝钢纤维的体积掺量固定在 1.5%时,网孔尺寸对试件的弯曲荷载-跨中挠度曲线产生了明显的影响,具体见图 3。网孔尺寸为 10 mm 和 25 mm 的试件抗弯开裂荷载为 56.824 kN 和 57.219 kN,而网孔尺寸为 15 mm 的试件开裂荷载为 61.688 kN,相比提升约 8.5%和 7.8%。试件开裂后,其荷载的提升趋势也显得相对迅速。且网孔尺寸为 15 mm 的试件其极限抗弯荷载对比 10 mm 以及 25 mm 提高约 8.6%和 7.8%,其屈服段荷载下降更加趋于平缓,明显优于其余两种工况。是由于长度为 12 mm 镀铜微丝钢纤维,能在 15 mm 的网孔尺寸中穿插分散,不易纤维结团。若网孔尺寸过大,网片与基体摩擦阻力的降低,也会影响整体的抗弯强度。

表 7 钢纤维编织网规格类型、网片数量及分布位置对 UHPC 抗弯性能的影响

Table 7 Influence of steel textile specifications, textile quantity and distribution positions on the flexural properties of UHPC

试件编号	$P_c$ /kN	$f_c$ /mm	$P_u$ /kN	$f_u$ /mm
SON0L0D0-1.5%	51.451	1.683	62.516	2.173
S10N1L2D1-1.5%(平织)	56.824	1.813	66.852	2.187
S15N1L2D1-1.5%(平织)	61.688	1.507	72.575	2.489
S25N1L2D1-1.5%(平织)	57.219	1.821	67.317	1.872
S15N1L2D1.5-1.5%(平织)	63.596	1.497	78.513	2.314
S15N1L2D2-1.5%(平织)	68.996	1.974	81.172	2.862
S15N1L1D1-1.5%(平织)	59.673	1.592	70.023	2.519
S15N1L3D1-1.5%(平织)	58.500	1.891	68.823	2.784
S15N2L12D1-1.5%(平织)	65.718	1.613	77.315	1.803
S15N2L13D1-1.5%(平织)	69.063	2.127	81.251	2.324
S15N2L23D1-1.5%(平织)	67.278	1.639	79.151	2.195
S15N2L123D1-1.5%(平织)	77.328	1.953	90.974	2.951
S15N1L2D1-1.5%(焊接)	53.141	1.422	62.519	1.892

注: 编号中 S 后面数字为网孔尺寸; N 后面数字为网片数量; L 后面数字为网片位置; D 后面数字为网丝直径; 1.5%为微钢纤维的体积掺量;  $P_c$ 、 $f_c$  分别为开裂荷载及其相应挠度;  $P_u$ 、 $f_u$  分别为极限荷载及其相应挠度。

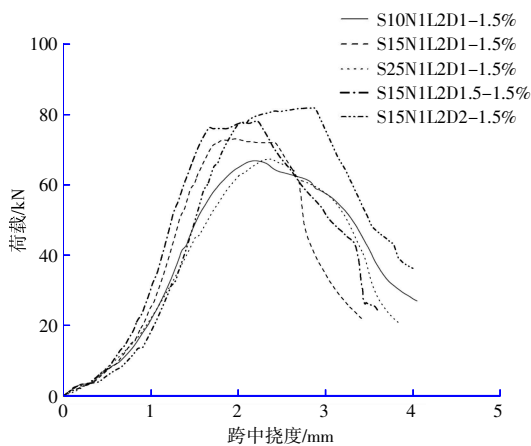


图3 钢纤维编织网规格类型对 UHPC 抗弯荷载-跨中挠度的影响

Fig. 3 Influence of steel textile specifications on the flexural load-mid-span deflection curve of UHPC

图3中也显示了在保持其他变量不变的情况下,仅改变网丝直径(分别为1 mm、1.5 mm和2 mm)对试件力学性能的影响。网丝直径为2 mm的试件,其极限抗弯荷载与其对应的跨中挠度为81.172 kN和2.862 mm,直径为1.5 mm和1 mm的试件,其极限抗弯荷载与其对应挠度下降至78.513 kN、2.314 mm以及72.575 kN、2.489 mm。这一现象的原因可以归结为网丝直径的变化对材料自身抗弯和极限变形能力的直接影响。随着网丝直径的增粗,其材料自身的抗弯和极限变形能力增强。

在不同位置铺设一层网片对试件性能的影响。抗弯荷载-跨中挠度曲线如图4所示,当网片铺设于试件正中间(L2位置,即距离上下表面各约50 mm处)时,上下部混凝土的荷载传递更为均匀,受力状态得到优化。

铺设2层网片,网片之间的位置关系对抗弯强度的影响,具体见表7。对比L12、L13、L23三种位置关系,当网片铺设于L13时,上下层网片形成“套箍”效应、减少薄弱环节,此时极限抗弯荷载数值最大。

2种不同编织工艺下的抗弯荷载-挠度曲线(见图4),揭示了它们对试件性能的影响。2种编织工艺在网片制作上有所不同,它们所增强的试件的极限抗弯荷载强度与对应的跨中挠度(见表7)也有很大区别。采用焊接工艺的试件,其极限抗弯荷载与跨中挠度为62.519 kN和1.892 mm,而采用编织工艺的试件极限抗弯荷载与跨中挠度

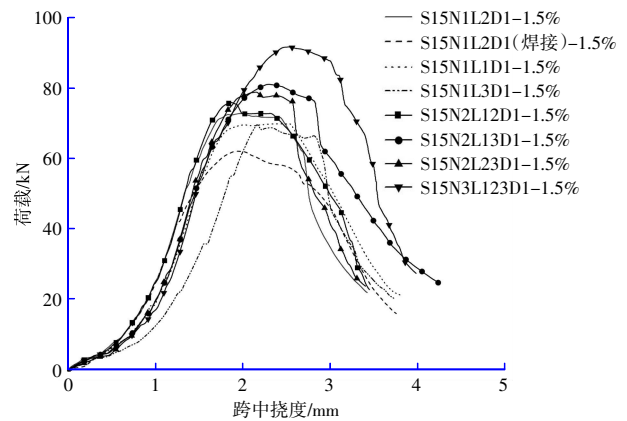


图4 网片数量及分布位置对 UHPC 抗弯荷载-跨中挠度的影响

Fig. 4 Influence of the magnitude and distribution position of textile sheets on the flexural load-mid-span deflection curve of UHPC

提升至72.575 kN和2.489 mm。焊接工艺的试件在达到极限荷载时并未表现出明显的屈服强度,荷载随之稳步降低。相比之下,平织工艺的试件则展现出较长的屈服阶段,表现出更好的延性和韧性。平织工艺由于其合理且牢靠的结构设计,使得纤维束之间能够紧密搭接,彼此支撑,不易发生崩断。这种分散应力的方式使得试件在承受极限荷载时能够有更多的纤维束共同分担应力,从而延缓了试件的破坏过程,展现出较长的屈服阶段。而焊接工艺虽然形成了一个整体结构,但一旦某个局部的纤维束发生断裂,这种断裂可能会迅速扩展,导致整个结构的崩坏。所以平织工艺由于其独特的纤维束搭接方式和应力分散机制,使得试件在达到极限抗弯荷载时能够表现出更长的屈服阶段和更好的延性。

### 3 结语

1) 钢纤维编织网的铺设能优化超高性能混凝土的力学性能,单层网片试验组与空白组对比,抗压强度提升约7.2%,抗拉强度提升约10.8%,抗弯强度提升约16.1%。

2) 随着钢纤维编织网铺设层数的增加,超高性能混凝土的弯曲强度和韧性增强效果明显,极限抗弯荷载及其相应挠度指数显著提高。随着铺设网片层数越多,增幅也趋于平稳。

3) 铺设单层网片用于增强超高性能混凝土力学性能,网片置于UHPC正中位置最为适宜。铺设双层网片时,其抗压强度受网片位置影响较小,将网片分散布置于UHPC的上下层,能有效



提升其抗弯强度。

4) 改变钢纤维编织网的网孔尺寸、网丝直径、网编织类型, 对其抗压、抗拉和抗弯强度呈现不同程度的影响, 采用网孔尺寸 15 mm, 网丝直径 2 mm, 且平织工艺的钢纤维编织网, 能较大程度提高超高性能混凝土的拉伸应力、极限抗弯荷载以及韧性。

#### 参考文献:

- [1] 吴中伟. 纤维增强: 水泥基材料的未来[J]. 混凝土与水泥制品, 1999(1): 5-6.  
WU Zhong-wei. Fiber reinforcement: The future of cement-based materials [J]. China Concrete and Cement Products, 1999(1): 5-6.
- [2] 艾珊霞, 尹世平, 徐世烺. 纤维编织网增强混凝土的研究进展及应用[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 27-40.  
AI Shan-xia, YIN Shi-ping, XU Shi-lang. A review on the development of research and application of textile reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 27-40.
- [3] 刘赛, 朱德举, 李安令. 织物增强混凝土的研究与应用进展[J]. 建筑科学与工程报, 2017, 34(5): 134-146.  
LIU Sai, ZHU De-ju, LI An-ling. Research and application progress of textile reinforced concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 134-146.
- [4] 王德辉. 超高强混凝土的硬化过程[D]. 湖南: 湖南大学, 2015.  
WANG De-hui. Hardening of ultra-high strength concrete[D]. Hunan: Hunan University, 2015.
- [5] HABEL K, VIVIANI M, DENARIÉ E, et al. Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete(UHPFRC)[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(7): 1362-1370.
- [6] REDA M M, SHRIVE N G, GILLOTT J E. Microstructural investigation of innovative UHPC[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(3): 323-329.
- [7] 郭旺. 短纤维与织物复合增强混凝土弯曲性能试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.  
GUO Wang. Experimental study on flexural behavior of composite reinforced concrete with short fiber and textile[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.
- [8] 龙天伟. 复材格栅增强超高性能混凝土管柱轴压性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.  
LONG Tian-wei. FRP grid reinforced ultra high performance concrete(UHPC) composite tubes and columns under axial compression [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [9] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete[J]. Materials and Structures, 2013, 46(4): 557-572.
- [10] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 92: 56-71.
- [11] BUTLER M, HEMPEL R, SCHIEKEL M. The influence of short glass fibres on the working capacity of textile reinforced concrete [C]//CTRC' 2006 -1st International RILEM conference on textile reinforced concrete. Bagnex, France: RILEM Publications SARL, 2006: 45-54.
- [12] ZHU D, LIU S, YAO Y, et al. Effects of short fiber and pre-tension on the tensile behavior of basalt textile reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 96: 33-45.
- [13] DU Y, ZHANG M, ZHOU F, et al. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 88-100.
- [14] 李大为. 玻璃纤维编织网与超高韧性水泥基复合材料粘结性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
LI Da-wei. Study on bond property between glass textile and ultra-high toughness cementitious composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [15] 翟梦超. 织物增强 UHPC 材料力学性能及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.  
ZHAI Meng-chao. Research on mechanical properties of textile reinforced UHPC and application[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [16] 赵俊伶. 纤维编织网增强 ECC 基本力学性能与冻融性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.  
ZHAO Jun-ling. Study on basic mechanical properties and freezing-thawing properties of textile reinforced ECC[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [17] GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].  
GB/T 50081—2019, Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S].