第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200179

多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为

张文华[1]，张仔祥[1]，刘鹏宇[1]，张云升[2,3]，张春晓[4]，佘 伟[2]

(1. 南京林业大学土木工程学院，南京 210037；2. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189；
3. 兰州理工大学土木工程学院，兰州 730050；4. 中国人民解放军军事科学院国防工程研究所，河南 洛阳 471023)

摘 要：提出纳米-微米-毫米多尺度纤维复合增强超高性能混凝土(UHPC)的思路，利用不同尺度的纤维抑制不同尺度缺陷，整体提升UHPC的力学性能。通过掺加纳米尺度的碳纳米管、微米尺度的碳酸钙晶须和毫米尺度的钢纤维，设计了7组不同纤维掺杂的UHPC试件，测试了UHPC的轴心抗拉和轴心抗压应力-应变曲线。结果表明：宏观尺度的毫米钢纤维决定了UHPC试件的初裂强度和初裂应变，微观尺度的微米纤维和纳米纤维对初裂强度和初裂应变影响不大；但碳酸钙晶须和碳纳米管的加入，改变了UHPC试件开裂后的拉伸行为，显著增强了其应变硬化能力。不同尺度纤维对UHPC轴心抗拉和抗压性能都表现出类似的规律：与钢纤维复掺时，碳酸钙晶须的效果优于碳纳米管的效果，且碳酸钙晶须和碳纳米管两者同时掺加效果最好。

关键词：超高性能混凝土；多尺度；纤维；碳酸钙晶须；碳纳米管
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1155–13
网络出版时间：2020–06–29



Uniaxial Tensile and Compressive Stress-Strain Behavior of Multi-scale Fiber-reinforced Ultra-high Performance Concrete

ZHANG Wenhua[1], *ZHANG Zixiang*[1], *LIU Pengyu*[1], *ZHANG Yunsheng*[2,3], *ZHANG Chunxiao*[4], *SHE Wei*[2]
(1. Department of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
4. National Defense Engineering Institute, Academy of Military Science of PLA, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: A nano-, micron-, and millimeter-sized multi-scale fiber composite reinforced ultra-high performance concrete (UHPC) was proposed. The mechanical properties of UHPC can be improved by suppressing the defects of different sizes with different fibers. Carbon nanotubes, micron-sized calcium carbonate whiskers, and millimeter-sized steel fibers were used to design 7 groups of UHPC specimens. The axial tensile and compressive stress-strain curves of UHPC were measured. The results show that the initial crack strength and strain of UHPC are determined by the millimeter-sized steel fiber in a macro-scale. However, micron- and nano-sized fibers have little effect on the initial crack strength and strain. The addition of calcium carbonate whiskers and carbon nanotubes changes the tensile behavior of UHPC specimens after cracking, thus enhancing the strain hardening capability. The tensile and compressive properties of UHPC with different sizes of fibers are similar. The addition of calcium carbonate whisker has a positive effect rather than that of carbon nanotube when mixing with steel fiber. The effect becomes optimum when adding calcium carbonate whiskers and carbon nanotubes.

Key words: ultra-high performance concrete; multi-scale;fiber; calcium carbonate whisker; carbon nanotubes

收稿日期：2020–03–16。　修订日期：2020–04–20。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51678309，51978339)；硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金资助；江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。
第一作者：张文华(1982—)，男，博士，副教授。

Received date: 2020–03–16.　**Revised date:** 2020–04–20.
First author: ZHANG Wenhua (1982–), male, Ph. D., Associate Professor.
E-mail: zhangwenhua2009@163.com

超高性能混凝土(UHPC)是一种抗压强度大于 150 MPa、抗拉强度大于 7 MPa 的新一代建筑材料[1–3]。UHPC 具有超高强、高韧和高耐腐蚀等优异性能，在高层建筑、大跨桥梁、军事防护工程、核电站安全壳等重大工程和核废料储存容器、海上石油平台、油气管道等极端严酷环境基础设施中具有广阔应用前景[2, 4–5]。短细纤维的加入，是 UHPC 获得超高力学性能的一个关键因素。然而，尽管目前 UHPC 抗压强度高达 150 MPa，仍未能摆脱传统混凝土拉压强度比值低的特征，即使掺加了大量的微细钢纤维，仍难达到抗压强度的 1/10[6–7]。因此，研究如何提升 UHPC 的抗拉性能，是进一步挖掘 UHPC 性能潜力的重要科研方向。

大量的研究表明，当仅掺加平直的短细钢纤维、掺量在 3%以下时，UHPC 的轴心抗拉强度约为 7~10 MPa。这是由于平直纤维与 UHPC 基体的黏结强度相对较低所造成。虽然可以通过进一步提高纤维掺量来提高抗拉强度，但会造成 UHPC 流动性降低、施工性能变差等问题。为了提高抗拉强度，研究人员提出了采用异型纤维以及异型纤维与短细平直纤维混合掺杂的方法[6, 8–10]。Seung Hun Park 等[6]利用端色钩型、扭曲型和光滑的短细平直纤维进行掺杂，制备出轴心抗拉强度达 18.6 MPa 的混凝土。Doo-Yeol Yoo 等[11]利用 30 mm 的异型长纤维和 13 mm 的平直短纤维混杂的方法，制备出轴心抗拉强度达 17 MPa 的 UHPC。随着纳米材料的出现，研究人员还采用纳米改性纤维表面的方法来提高抗拉强度和拉伸应变行为[12–13]。Shan He 等[13]将碳纳米管吸附于纤维表面，用以改善水泥基体与纤维的黏结强度，发现 UHPC 的轴心抗拉强度提高了 15%，应变能力提高了 20%。

上述文献为提高 UHPC 的抗拉性能提供了很好的学术思路。然而，分析文献不难发现，已有研究大部分都集中于宏观尺度纤维对 UHPC 的增强。UHPC 是一种多相的复合材料，UHPC 基体、纤维以及 UHPC 基体-纤维之间的界面过渡区(ITZ)三者同时影响着 UHPC 材料整体性能。若想提升 UHPC 的抗拉性能，必须同时从这 3 个方面着手。此外，UHPC 中存在着很多的孔隙和缺陷，主要包括纳米尺度下的水化硅酸凝胶(CSH)、微纳米尺度下的毛细孔以及毫米尺度下的宏观裂缝[14]。然而，目前常规使用的毫米级别的钢纤维，对于纳米尺度的缺陷基本起不到改善作用；同理，微纳米尺度的纤维对于毫米尺度的宏观裂缝的抑制作用也非常有限。每种尺度的纤维对于同尺度下的裂缝或者缺陷的抑制作用是最有效的。

基于上述分析，提出纳米-微米-毫米多尺度纤维复合增强 UHPC 的思想，通过不同尺度的纤维抑制不同尺度缺陷，整体提升 UHPC 的力学性能。通过掺加纳米尺度的碳纳米管(CNTs)、微米尺度的碳酸钙晶须(CCW)和毫米尺度的钢纤维(SF)，设计 7 个不同尺度纤维掺杂的 UHPC 试件，测试 UHPC 的轴心抗拉和轴心抗压应力应变曲线，获取开裂强度、开裂应变、轴心抗拉强度、抗拉韧性和抗压强度、弹性模量、临界应变、抗压韧性等重要物理参数，建立抗拉、抗压本构模型；最后结合 UHPC 内部各尺度纤维的微观电镜图片，深入分析多尺度纤维对于 UHPC 的增强机理。

1 实验

1.1 原材料

水泥为江南-小野田水泥公司生产的 PII 52.5 硅酸盐水泥，28 d 抗压强度为 56.7 MPa，密度为 3.08 g/cm^3，比表面积为 417 m^2/g。硅灰为上海埃肯公司生产，$w(SiO_2)$＞95%(质量分数)，密度为 2.01 g/cm^3；粉煤灰为一级粉煤灰，密度为 2.61g/cm^3。3 种胶凝材料的化学组成成分和物理性能如表 1 所示。石英砂采用 270、212、106、48 μm 4 种不同粒径进行混合形成连续级配，密度为 2.6 g/cm^3。

碳纳米管为多壁碳纳米管，肉眼可见为黑色粉末状，通过透射电镜放大 50 000 倍后观察，形状为蛇形；由于碳纳米管尺寸极小、表面能大，常规下的碳纳米管成团状并相互缠绕在一起，因此在使用前需要做特殊的表面处理和分散。碳酸钙晶须呈白色蓬松状固体粉末，显微镜下为针状单晶体，断口呈玻璃光泽，半透明状态。钢纤维采用光滑的平直型微细纤维，表面镀铜。3 种不同尺度的纤维物理力学性能如表 2 所示。

1.2 UHPC 配合比设计

超高性能混凝土的配合比设计分为两个部分。首先设计出最紧密堆积的基体，然后在此基础上加入适量的纤维。利用激光粒度仪测量水泥、粉煤灰、硅灰、石英砂的颗粒分布曲线，基于最紧密堆积理论[15–16]进行 UHPC 拟合试配，使得最终的粉体颗粒堆积曲线与无穷逼近理想的颗粒分布曲线，并结合流动性和强度试验，终获得合理的 UHPC 各组分的体积比，堆积曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出，真实堆积曲线很接近理想堆积曲线，表明堆积效果

表 1　胶凝材料的化学组成和物理性能

Table 1　Chemical composition and physical properties of binder

Material	Mass fraction/%							Specific surface area/ ($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Density/($kg \cdot cm^{-3}$)
	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	CaO	SO_3	LOI		
Cement	20.6	4.4	2.5	5.0	65.1	1.3	1.0	417	3.08
Silica fume	94.5	0.8	0.3	0.3	0.8	0.8	1.0	2 200	2.01
Fly ash	55.0	5.9	1.3	31.3	3.9	1.5	1.0	686	2.61

表 2　不同尺度纤维物理性能参数

Table 2　Physical properties parameters of different scales fibers

Fiber	Diameter/nm	Length/μm	Aspect ratio	Tensile strength/GPa	Elastic modulus/GPa	Density/($g \cdot cm^{-3}$)
CNTs	20–50	3–12	200–400	800.0	1 000	1.8
CCW	100–200	50–80	20–30	5.2	700	2.8
SF	180 000	13 000	50	3.0	210	7.8

CNTs are carbon nanotubes; CCW is calcium carbonate whiske; SF is steel fiber.

良好。不同胶凝材料和石英砂的体积比例如表 3 所示，在体积比的基础上，计算出具有最紧密堆积的 UHPC 配合比的每种材料质量如表 3。

计算好 UHPC 的基体配合比后，需要确定纤维的掺量。其中钢纤维和碳酸钙晶须采用体积掺量的方法，钢纤维分别掺加 0、1%、2%和 3%，分别表示为 SF0、SF1、SF2 和 SF3；通过大量的试验，确定碳酸钙晶须掺加为体积的 0.5%，同时掺加 3% 的钢纤维，表示为 SF3CCW0.5；碳纳米管采用质量比掺量的方法，掺量为水泥质量的 0.01%，表示为 SF3CNT0.01；最后一个双掺微纳米纤维和钢纤维的配合比表示为 SF3CCW0.5CNT0.01。

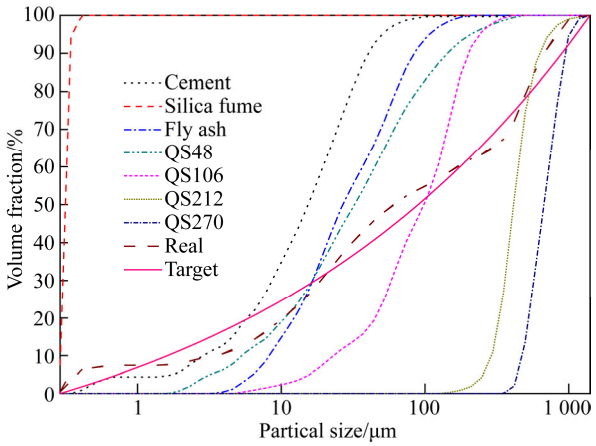
1.3　试件制备

1.3.1　碳纳米管的分散　　在掺入水泥基材料之前，对碳纳米管进行表面处理。

(1) 表面氧化处理：将称量好的碳纳米管放入 100 mL 过氧化氢溶液中浸泡 6 h 左右。在此期间，每隔 1 h 将盛有碳纳米管的容器放入超声分散仪中进行分散，每次持续 10 min。

(2) 分离与清洗：利用特制的真空抽滤装置，对氧化好的碳纳米管溶液进行过滤分离与清洗。使用蒸馏水对过滤后的碳纳米管清洗 4~5 次。

(3) 干燥：将清洗好的碳纳米管放入烧杯中，使用烘箱加热 105 ℃，烘干至恒重备用。



UHPC—Ultra-high performance concrete.

图 1　UHPC 的堆积曲线

Fig. 1　Accumulation curves of UHPC

表 3　UHPC 的配合比

Table 3　Mixture proportion of UHPC　　kg/m³

Sample No.	Cement	Water	FA	Silica fume	Quartz sand/μm				SF	CCW	CNTs
					270	212	106	48			
SF0	800	180	150	96	409	352	312	39	0		
SF1	800	180	150	96	409	352	312	39	78		
SF2	800	180	150	96	409	352	312	39	156		
SF3	800	180	150	96	409	352	312	39	234		
SF3CCW0.5	800	180	150	96	409	352	312	39	234	14	
SF3CNT0.01	800	180	150	96	409	352	312	39	234		0.08
SF3CCW0.5CNT0.01	800	180	150	96	409	352	312	39	234	14	0.08

1.3.2 UHPC 成型 UHPC 的制备过程如下：(1) 将石英砂与水泥、粉煤灰和硅灰等胶凝材料一起加入搅拌机中干搅 2 min；(2) 将分散好的碳纳米管溶液和碳酸钙晶须溶液，与 1/2 的水和减水剂均匀混合，形成碳纳米管–碳酸钙晶须–减水剂–水的混合液；(3) 将混合液倒入搅拌机中，搅拌 3 min，然再将另一半水–减水剂混合液倒入并继续搅拌 7 min；(4) 将钢纤维加入搅拌机，搅拌 2 min；(5) 将搅拌好的 UHPC 注入钢制模具，放置于振动台上振动密实，持续 10 s；(6) 将成型好的 UHPC 放置于室内养护 1 d 后拆模，然后在温度为 20 ℃、相对湿度为 90%的标准养护室中养护 28 d。

1.4 力学性能试验

1.4.1 轴心抗拉试验 UHPC 的单轴拉伸试验使用济南恒思盛大仪器有限公司的 UTM5305 型万能试验机进行。试件采用“狗骨头”形状试件，试件厚度为 50 mm；两端夹持段长为 135 mm，宽度 85 mm，中间受拉区段长为 180 mm，宽 50 mm。为了使得 UHPC 试件在拉伸过程中可以实现良好的对中，特制了具有万向头的套筒，可在拉伸的过程中自动调节。在试件的受拉区段，用夹具将两个 LVDT 固定在试件上，测量试件在受拉过程中的变形。单轴抗拉试验采用位移控制，加载速率为 0.04 mm/min。采用 TDS 动态应变采集仪同时采集荷载和应变数据，采样频率为 1 Hz。

1.4.2 轴心抗压试验 为了确保可以测试出 UHPC 轴心抗压应力–应变曲线的下降段，试验使用济南邦威仪器有限公司生产的 YAW-G3000 大刚度试验机进行。试件采用圆柱形试件，尺寸为 ϕ100 mm×200 mm。在试件中部，用夹具将 2 个 LVDT 固定在试件上，测量试件在受压过程中的变形。单轴抗压试验采用位移控制，加载速率为 0.05 mm/min。采用 TDS 动态应变采集仪同时采集荷载和应变数据，采样频率为 1 Hz。

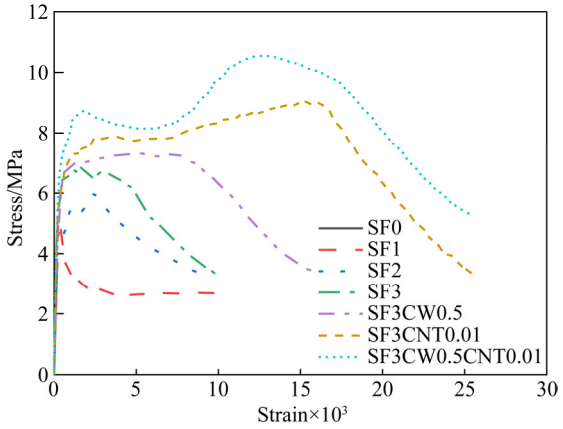
1.5 微观试验

将力学性能破坏后的试件中取 1 cm 宽度左右的混凝土试块。将试块浸泡于无水乙醇中，浸泡 3 d。将试件从乙醇中取出，放置于烧杯中放 60 ℃的烘箱中烘干 48 h 至干燥，用封口袋密封保存。在电镜试验开始前，对试块进行喷金处理，使试件表面镀金，增加导电性能，随后开始 2 种电镜试验。利用 Quanta 2000 环境扫描电镜观察钢纤维和碳酸钙晶须在 UHPC 中的分布情况；利用 JSM-7600F 场发射电镜观察碳纳米管在钢纤维表面和水泥基体中的分散情况。

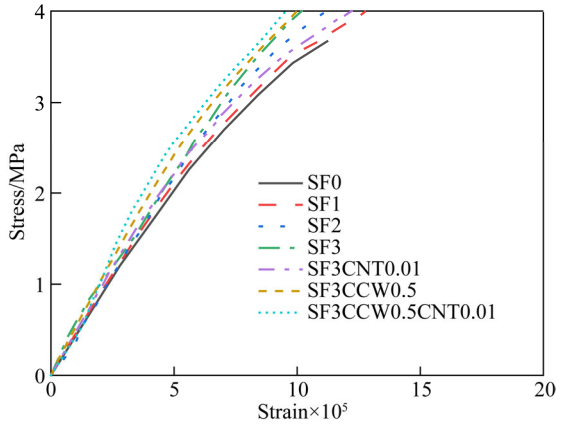
2 结果与讨论

2.1 轴心抗拉试验

2.1.1 轴心抗拉应力-应变曲线 图 2a 为 7 个不同 UHPC 配合比试件的轴心抗拉应力-应变曲线，为了清楚观察到弹性阶段各配合比的曲线，将曲线局部放大，如图 2b 所示。从图 2 可以看出，不同尺度纤维的使用，对于 UHPC 的轴心抗拉性能产生了显著的影响。对于没有掺加任何纤维的 SF0 试件，曲线只有上升段，没有下降段，即经历弹性阶段后试件直接断裂，属于脆性破坏。仅掺加钢纤维的 SF1、SF2 和 SF3 试件破坏过程分为两种形态，仅掺加 1%钢纤维掺量的 SF1，第 1 个阶段为弹性阶段，在应力达到峰值后，进入第 2 阶段，应变增加，应力快速下降，曲线呈逐渐下降趋势，直至试件断裂，属于应变软化破坏。至于 SF2 和 SF3 两个配合比，由于钢纤维掺量的增加，应力达到峰值后，还有一个开裂纤维拔出的过程，在此过程中抗拉强度还有微弱的提升，表现出了一定的应变硬化的现象。对于复合掺



(a) Full view of stress-strain curves



(b) Local amplification of stress-strain curves

图 2 轴心抗拉应力–应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves

加了 3 种不同尺度纤维 SF3CCW0.5、SF3CNT0.01 和 SF3CCW0.5CNT0.01，试件的破坏可以分为 3 个阶段。第 1 阶段为弹性阶段；当超过初裂强度后，进入第 2 个阶段，该阶段内应力逐渐增加的同时，应变也在增加；直至达到峰值应力后，进入第 3 个阶段，应力下降，应变持续增大，直至试件破坏。因此，掺加了多尺度纤维的试件破坏属于应变硬化破坏。由此可以看出，掺加微米尺度的碳酸钙晶须和纳米尺度的碳纳米管，增强了 UHPC 试件的轴拉破坏过程中的应变硬化的效应，使得试件的变形能力增强。

从图 2 还可以获得 UHPC 试件在初裂阶段的初裂荷载和初裂应变、后裂阶段的裂后强度和应变能力值。对于只有应变软化阶段的 SF0、SF1、SF2、SF3，初裂荷载即为轴心抗拉强度。对于 SF3CNT0.01、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01，裂后强度为轴心抗拉强度。将轴心抗拉应力-应变曲线下方包裹的面积作为材料拉伸韧性的评价指标，所有轴心抗拉试验的结果归纳于表 4 中。

2.1.2　初裂阶段　　分析表 4 中试件的初裂强度和初裂应变数据，可以得出两点重要的规律：(1) 对于仅掺加毫米级钢纤维的 UHPC 试件(SF0、SF1、SF2 和 SF3)，随着钢纤维掺量的增加，初裂强度和初裂应变都明显增加，与 SF0 相比，SF1、SF2 和 SF3 的初裂应变分别提高了 21%、89%和 132%。SF2 的初裂强度低于 SF1，主要是由于试验的数据波动所造成的。每个配合比有 3 个试块进行平行试验，取应力峰值为中间值那个配合比的曲线为最终结果。由于混凝土试件的波动性，在均匀性方面有偏差，造成了 SF2 的初裂强度值低于 SF1 的值。

(2) 对于掺加不同的碳酸钙晶须或者碳纳米管的 UHPC 试件 (SF3CNT0.01、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01)，无论是微米级或纳米级纤维的单掺和复掺，其初裂强度和初裂应变都没有太大的变化，与 SF3 试件的值非常接近。因此，从上述分析可以得出一个重要结论，宏观尺度的毫米级钢纤维决定了 UHPC 试件的初裂强度和初裂应变，但微观尺度的微米级纤维和纳米级纤维对初裂强度和初裂强度影响不大。主要是由于在 UHPC 受拉力过程中，随着内部应力的增加，水泥基体达到极限抗拉应力后引起开裂，然而由于微米级的碳酸钙晶须和纳米级的碳纳米管的尺度太小，并且这两种尺度的纤维掺量较低，因此在 UHPC 的宏观抗拉能力上难以发挥出作用。然而毫米级的钢纤维尺度大，并且掺量高达 3%，能与水泥基材料在宏观抗裂能力上发挥重要的作用，因此初裂能力能得到显著的提高。

2.1.3　后裂阶段　　从表 4 数据和图 2 的轴心抗拉应力应变曲线可以看出，微米级的碳酸钙晶须和纳米级的碳纳米管的加入，显著增强了 UHPC 试件开裂以后应变硬化拉伸行为。比较掺加有微纳米尺度纤维的 SF3CNT0.01、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 试件，发现单掺微纳米纤维时，碳酸钙晶须的效果优于碳纳米管的效果，并且当碳酸钙晶须和碳纳米管两者复掺时效果最好。与 SF3 配合比相比，SF3CNT0.01、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 的后裂强度即轴心抗拉强度分别提高了 17%、41%和 65%。除了使后裂强度提高外，微纳米纤维的加入，使得应变硬化阶段明显延长，显著提高了材料的耗能能力。从 UHPC 韧性指标可以看出，与 SF3 试样相比，SF3CNT0.01、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 的韧性指标分别提高了 77%、242%和 303%。这一结果与 Shan He 等[11]的研究类似。

表 4　UHPC 轴心抗拉力学性能

Table 4　Tensile property of UHPC

Mix No.	Crack strength/MPa		Crack strain×10^6		Tensile strength/ MPa	Toughness index/ ($N·\mu m·mm^{-3}$)
	Initial cracking stage	Post cracking stage	Initial cracking stage	Post cracking stage		
SF0	3.7		190		3.7	0.4
SF1	5.0		230		5.0	30.1
SF2	4.8	6.0	360	2 400	6.0	48.9
SF3	6.4	6.9	440	4 000	6.9	54.2
SF3CNT0.01	6.5	7.5	440	7 500	7.5	96.2
SF3CCW0.5	6.5	9.0	450	16 100	9.0	185.3
SF3CCW0.5CNT0.01	7.1	10.5	460	17 400	10.54	218.3

从上述的数据可以看出，掺加了微纳米尺度纤维，对于 UHPC 试件开裂以后的拉伸和为影响十分显著。此阶段为钢纤维在 UHPC 基体内往外滑移的过程，微纳米尺度纤维掺加以后，均匀分布在基体内，在钢纤维-水泥基体界面过度区有也大量的分布，因此微纳米纤维附着于钢纤维的表面，显著加大了与水泥基体的粘结，提高了粘结力，在滑移过程中可阻止钢纤维向往的滑移。Shan He 等[11]将纳米纤维对 UHPC 抗拉性能的增强作用归因于碳纳米管通过填充纳米孔和桥接纳米裂纹来强化界面过渡区，从而产生更致密的微观结构和更高的抗纤维拔出的抗裂性。由于碳纳米钙晶须的尺度要大于碳纳米管的尺度，对阻止钢纤维滑移的效果更好，因此 SF3CCW0.5 试件的抗拉伸能力优于 SF3CNT0.01。当微米尺度纤维与纳米尺度纤维复合时，能在钢纤维表面形成不同尺度纤维的缠绕，实现了非常好的抗拉增强效果。

图 3 为 UHPC 试件破坏后的形态。从图 3 可以看出，SF0 试件由于内部没有钢纤维，在拉伸过程中呈现出脆性的断裂，断口平整光滑。其他的试件由于有钢纤维的“桥接作用”，断口不整齐。由于所用的钢纤维是表面光滑和短细钢纤维，与 UHPC 的基体没有足够的粘结，因此没有形成试件的多缝开裂状态，仅形成了单缝开裂状态。同样，掺加微纳米纤维的试件也没有表现出多缝开裂，这一现象的原因解释如下：

与仅掺加钢纤维的 SF1、SF2、SF3 试样相比，掺加了碳纳米管和碳酸钙晶须以及两者复掺的配合比 SF3CNT0.01、SF3CW0.5、SF3CW0.5CNT0.01 在破坏形态上有细微的差别。仅掺加钢纤维的试件在拉伸过程中，拉应力超过纤维的黏结力时，纤维将滑移拔出，黏结力越来越小，造成 SF1 的应力应变曲线快速下降，最后单缝断裂破坏；SF2 和 SF3 试样，由于纤维掺量比较高，试件中部形成裂缝后，在纤维的滑移过程中拉伸强度有微弱提升，表现了微弱的应变硬化现象。由于纤维含量更高，虽然没有形成多缝开裂，但断裂口表现出了更多的锯齿状形态。SF3CNT0.01、SF3CW0.5、SF3CW0.5CNT0.01 试件，由于碳纳米管和碳酸钙晶须附着于钢纤维表面，当钢纤维应力超过黏结力时产生滑移，这时候碳纳米管和碳酸钙晶的存在显著提高了锚固力；在滑移过程中由于微纲米纤维在界面过渡区的错动，使得抗滑移能力进一步提高，虽然最后没有表现出明显的多缝开裂现象，但表现出了应变硬化的现象。



(a) SF0 (b) SF1 (c) SF2 (d) SF3 (e) SFCNT0.01 (f) SFCW0.5 (g) SF3CCW0.5CNT0.01

图 3 UHPC 轴心抗拉破坏模
Fig. 3 Tensile failure mode of UHPC

2.1.4 轴心抗拉本构关系 基于 UHPC 轴心抗拉试验可以发现，掺加微纳米纤维的 UHPC 表现出了 3 个破坏阶段的特征，线弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段，如图 4 所示。目前对于 UHPC 轴心抗拉的模型较为有限，并且由于普通的钢纤维掺加后，UHPC 仅有弹性阶段和软化阶段，模型大部分为两阶段模型。因此，需要借鉴于超高韧性水泥基材料抗拉模型方面的研究成果，张永兴等[17–19]在前人的

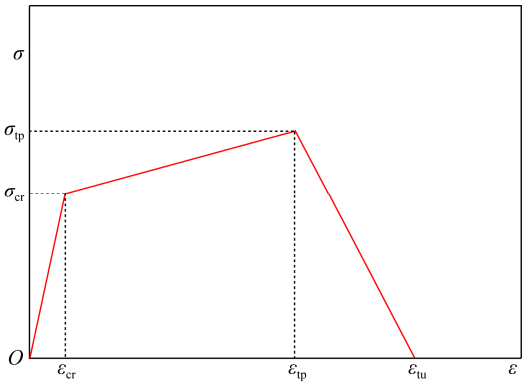


图 4　UHPC 受拉破坏的 3 个阶段

Fig. 4　Three stages of tensile failure of UHPC

2 阶段模型基础上，利用能量方法，建立了超高韧性水泥基材料 3 阶段模型，非常适合于数值分析方法；Han 等[20]提出了直线式的三阶段模型，该模型表达简单，适用于工程应用。因此，利用 Han 等的方法对 UHPC 的轴心抗拉应力应变行为进行表征，曲线的表达式如式(1)所示。

$$\sigma=\begin{cases}E_0\varepsilon & 0\leqslant\varepsilon<\varepsilon_{cr}\\ \sigma_{cr}+(\sigma_{tp}+\sigma_{cr})\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{tp}-\varepsilon_{cr}} & \varepsilon_{cr}\leqslant\varepsilon<\varepsilon_{tp}\\ \sigma_{tp}-\sigma_{tp}\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tu}-\varepsilon_{tp}} & \varepsilon_{t\ p}\leqslant\varepsilon<\varepsilon_{tu}\end{cases}\quad(1)$$

式中：σ 为试件的拉应力；ε 为试件的拉应变；E_0 为轴心抗拉弹性模量，取 40%开裂荷载处所对应的割线模量；σ_{cr} 为开裂应力；ε_{cr} 为开裂应变；σ_{tp} 为峰值应力；ε_{tp} 为峰值应变；ε_{tu} 为极限应变。基于图 5 的 UHPC 轴心抗拉应力–应变曲线，结合上述 3 阶段轴心抗拉模型，可以获得模型中的关键点的参数如表 5 所示。

表 5　UHPC 轴心抗拉本构模型参数

Table 5　Parameter of UHPC tensile model

Mix No.	E_0/GPa	σ_{cr}/MPa	ε_{cr}	σ_{tp}/MPa	ε_{tp}	ε_{tu}
SF0	38.4	3.7	0.000 19			
SF1	39.3	5.0	0.000 23			
SF2	41.6	4.8	0.000 36	6.0	0.002 4	0.008 74
SF3	43.1	6.4	0.000 44	6.9	0.004 0	0.010 09
SF3CNT0.001	44.2	6.5	0.000 44	7.5	0.007 5	0.015 70
SF3CW0.5	47.1	6.5	0.000 45	9.0	0.016 1	0.025 38
SF3CW0.5CNT0.001	47.4	7.1	0.000 46	10.5	0.017 4	0.025 62

E_0 is elastic modulus; σ_{cr} is cracking stress; ε_{cr} is cracking strain; σ_{tp} is peak stress; ε_{tp} is peak strain; ε_{tu} is ultimate strain.

2.2　轴心抗压试验

2.2.1　轴心抗压应力应变曲线　　图 5 为 7 组 UHPC 试件的轴心抗压应力–应变曲线。从图 5 可以看出，除了不掺加纤维的 SF0 试件之外，其他 6 组试件的应力–应变曲线的形状大致相似，都可以分为上升段和下降段。在上升段，应力–应变曲线基本为直线，即随着应力增加，应变线性增加，到达应力峰值点，该应力即为轴心抗压强度值，此点对应的应变为峰值应变。当应力超过应力峰值后，试件出现裂缝，没有纤维的 SF0 试件出现突然性的破坏，因此没有下降段。其他配合比由于不同纤维的“桥接”作用，而出现延性破坏，即进入应力–应变曲线的下降段。在下降段处，随着钢纤维掺量的增加，下降段曲线变得平缓，表明脆性由于纤维的增加而得到改善。对于掺加微纳米尺度纤维的试件，下降段更为平缓，应力–应变曲线的显得更饱满。基于 UHPC 的轴心抗压应力–应变曲线，可得到的峰值应力、峰值应变、弹性模量和韧性指数等重要数据，并归纳于表 6 中。

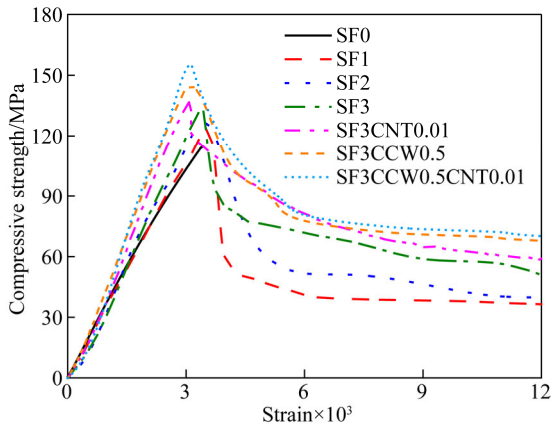


图 5　UHPC 轴心抗压应力–应变曲线

Fig. 5　Uniaxial compressive stress-strain curves of UHPC

表 6　UHPC 单轴抗压力学性能参数

Table 6　Uniaxial compression performance parameters of UHPCs

Mix No.	Compressive strength/MPa	Critical strain×10^5	Elastic modulus/GPa	Toughnes index
SF0	114.0	339	35.8	0.205 6
SF1	123.2	349	36.9	0.591 6
SF2	126.3	346	38.1	0.693 9
SF3	133.5	338	39.5	0.794 2
SF3CNT0.01	137.3	311	45.3	0.895 5
SF3CCW0.5	144.1	309	49.0	0.955 8
SF3CCW0.5CNT0.01	155.3	311	49.9	0.985 4

2.2.2 轴心抗压强度 从表 6 可以看出，不同纤维的加入对 UHPC 的轴心强度有较为明显的提升作用。与 SF0 相比，掺加单一钢纤维的 SF1、SF2 和 SF3 的抗压强度分别提升了 8%、11%和 17%；与单掺钢纤维的 SF3 相比，掺加了微纳米纤维的 SF3CNT0.001、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 轴心抗压强度分别提高了 3%、8%和 16%。这一数据表明出的规律与抗拉性能规律类似，碳酸钙晶须对抗压的增强效果优于碳纳米管，并且当两者复掺时，效果最优。然而，与轴心抗拉强度增加了 17%、41%和 65%相比，微纳米纤维对于抗压强度的增强较少。这一结果与 Weina Meng 等[12]的研究类似，他们发现掺加碳纳米管会让 UHPC 的抗压强度有小幅提升约 5~8 MPa；Myungjun Jung 等[21]也发现，掺加适量的碳纳米管会让 UHPC 的强度提升 5.5%。

碳酸钙晶须、碳纳米管这 2 种微纳米纤维对于 UHPC 的增强作用，可归因于以下两个方面。一个是这两种纤维尺寸非常小，在 UHPC 基体内部能起到非常好的“填充效应”，增加内部的密实度；二是由于碳酸钙晶须和碳纳米管都是属于纤维状材料，长径比非常大，在 UHPC 内部能起到“桥接作用”，改善 CSH 凝胶及其与石英粒径的界面过渡区强度，提高力学性能。上述两个原因导致两种纤维对 UHPC 轴心抗压强度的提升。由于碳酸钙晶须的掺量要大于碳纳米管，并且前者的纤维尺度也大于后者，因此在试验中碳酸钙晶须表现出了更好的效果。此外，当 2 种微纳米尺度的纤维进行复掺后，两种纤维分别在微米和纳米尺度下发挥作用，更好地改善了 UHPC 基体内部以及多种界面过渡区的性能，使得 UHPC 性能得到最好的提升。

2.2.3 临界应变 从表 6 可以看出：SF0、SF1、SF2、SF3 试件的临界应变值比较接近，均在 0.0033 附近波动；与前面 4 个配合比相比，掺加了碳酸钙晶须和碳纳米管的配合比，临界应变值有小幅度的降低，在 0.0031 附近波动。临界应变值的降低，是由于 UHPC 基体在掺加碳酸钙晶须和碳纳米管后，微细的纤维均匀地分布在基体内部，填充了基体内部的孔隙，大大提高了基体的密实度，使得试件的弹性模量增加，应力应变曲线变得陡峭，从而使得临界应变值减小。

2.2.4 弹性模量 试验荷载为轴心抗压强度的 30%~60%之间时，应力–应变具有良好的线性关系。取应力–应变曲线上 40%的应力峰值处的点的割线模量，作为 UHPC 的弹性模量。7 个试件的弹性模量如表 6 所示，从表 6 可以看出，对于掺加单一钢纤维的 SF1、SF2 和 SF3 试件，与 SF0 相比，弹性模量分别提高了 3%、6%和 10%，表明钢纤维的加入，可以提高 UHPC 试件的弹性模量。同时，对于掺加微纳米纤维的试件，弹性模量也有不同程度的提高。与 SF3 相比，SF3CNT0.001、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 弹性模量分别提高了 14%、24%和 26%。与抗压强度的规律类似，碳酸钙晶须的效果优于碳纳米管，两者同时复掺的效果最好。微纳米纤维对于弹性模量的提高，主要归因于微纳米材料的“填充效应”。碳酸钙晶须和碳纳米管的强度和弹性模量都非常高，掺入 UHPC 后除了可以填充基体内部的孔隙外，还能提高整体材料的抗变形能力，使得弹性模量提高。

2.2.5 抗压韧性 通过对应力–应变曲线所包裹的面积进行积分，可得到不同配合比 UHPC 试件的轴心抗压韧性指标，如表 6 所示。与不掺加钢纤维的 SF0 相比，SF1、SF2 和 SF3 的韧性指标提高了 188%、238%和 286%。可以看出，毫米级钢纤维的加入，对 UHPC 的韧性有显著的提高。与 SF3 相比，掺加微纳米纤维的 SF3CNT0.001、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 韧性指标分别提高了 13%、20%和 24%。这说明掺加微纳米纤维对于轴心抗压韧性指数也起到增强的作用。

2.2.6 轴心抗压破坏模式 图 6 为 UHPC 试件在轴心抗压破坏以后的形态。从图 6 可以看出，试件呈现出了圆锥形破坏和劈裂破坏 2 种形式。SF0 不掺加钢纤维的试件，破坏形态呈现圆锥形的脆性破坏。当 UHPC 钢纤维掺加只有 1%时，SF1 试件呈现出的破裂现象与 SF0 类似，这是因为 1%的钢纤维掺量还不足以完全控制整个试件基体的开裂情况。当钢纤维掺量不断上升，达到 3%时，UHPC 试件呈现劈裂破坏模式。

对于掺加了微纳米纤维的 SFCNT0.01、SFCW0.5、SF3CCW0.5CNT0.01 试件，破坏模式与 SF3 试件相似，也为劈裂破坏。因此，微纳米纤维的加入，对于 UHPC 试件的破坏模式，并没有太明显的影响。这主要是由于微纳米纤维的尺度非常小，在破坏过程中难以影响到宏观的破坏现象；此外，还与微纳米纤维的掺量过低有关。



(a) SF0　(b) SF1　(c) SF2　(d) SF3



(e) SFCNT0.01　(f) SFCW0.5　(g) SF3CCW0.5CNT0.01

图 6　UHPC 抗压破坏形态

Fig. 6　Compressive failure mode of UHPC

2.2.7　轴心抗压本构关系　　UHPC 的应力应变曲线能反映材料在受压时的力学性能，是结构分析和承载力计算的必要条件。采用式(2)和式(3)分别作为 UHPC 曲线上升段和下降段的本构模型[22]：

$$\text{上升段：}\frac{\sigma}{f_{\mathrm{c}}'}=\frac{A\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}{1+(A-2)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)}\quad(\varepsilon\leqslant\varepsilon_0)\qquad(2)$$

$$\text{下降段：}\frac{\sigma}{f_{\mathrm{c}}'}=\frac{A\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}{B\times\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)_C+1-B}\quad(\varepsilon>\varepsilon_0)\qquad(3)$$

其中：σ 和 ε 分别为应力和应变；f_{c}' 和 ε_0 分别为峰值应力和峰值应变；A、B、C 为待定系数。拟合所得 A、B、C 的值如表 7 所示，UHPC 轴心抗压本构模型方程与试验结果的比较如图 7 所示。从表 7 中结果和曲线的比较可以看出，本构模型和试验结果之间有很好的相关性，模拟准确。由于数据断较为有限，回归公式及其参数可供掺加 3%以下的钢纤维 UHPC 研究做参考。

表 7　UHPC 应力-应变曲线拟合参数

Table 7　Stress-strain curves fitting parameters of UHPCs

Sample No.	Ascending part A	Descending part		R^2
		B	C	
SF0	1.083 95	1.000 00	1.000 00	0.998 80
SF1	1.021 61	0.000 20	0.00165	0.971 58
SF2	1.022 86	0.288 17	1.0936 8	0.979 83
SF3	0.975 07	0.477 59	1.232 50	0.977 07
SF3CNT0.01	1.001 84	0.561 13	1.266 76	0.987 52
SF3CCW0.5	1.035 15	0.375 18	0.993 04	0.989 45
SF3CCW0.5CNT0.01	0.991 74	0.341 49	0.961 65	0.982 84

2.3　多尺度纤维增强微观机理

图 8 为 UHPC 试件破坏后观察到的钢纤维的表面状态。从图 8a 可以看出，单掺钢纤维时，拔出后钢纤维表面仍保持较为光洁，表明钢纤维与基体之间的粘结较弱，钢纤维较容易从基体中拔出。图 8b 为掺加碳纳米管的微观照片，可以看出，掺加碳纳米管后，拔出后的钢纤维表面变得粗糙，碳纳米管已深入到水化产物内部，在钢纤维和水化产物之间起到“桥接作用”，增加了纤维与基体之间界面过渡

区的强度。图 8c 为掺加碳酸钙晶须的微观照片，与图 8a 和图 8b 相比，碳酸钙晶须的加入，显著地提高了钢纤维表面的粗糙程度，可以明显地看到碳酸钙晶须大量粘附于钢纤维表面，并且碳酸钙晶须显乱向的分布。图 8d 为复合掺加碳酸钙晶须和碳纳米管的微观照片，同样可以看到钢纤维的表面也非常粗糙，大量碳酸钙晶须和碳纳米管相互交叉缠绕在一起，乱向分布于钢纤维和基本之间，极大地提高了两者间的界面过渡区强度，增加了黏结强度，显著地提高了钢纤维的抗滑移能力和耗能能力。

图 9 为微纳米尺度纤维在 UHPC 基体中的电镜照片。从图 9a 可以看出，掺加的碳纳米管已嵌入水化产物之间，在水化硅酸钙胶凝(CSH)中呈乱向分布，当 CSH 凝胶受力开裂时，碳纳米管纤维贯穿于裂缝之间，在 CSH 凝胶尺度的裂缝中起到桥接作用。图 9b 为掺加碳酸钙晶须后的 UHPC 基体，大量的针棒状的碳酸钙晶须乱向地分布于水泥基体中，并且嵌固于水泥水化产物之间，当基体受力开裂时，碳酸钙晶须纤维贯穿于裂缝之间，起到增强基体的作用。

当微纳米尺度纤维同时掺加时，微纳米尺度纤维的分布如图 9c 所示。两种纤维都嵌固于水化产物之间，基于力学性能试验数据和微观电镜照片，可得纳米-微米-毫米多尺度纤维增强 UHPC 的机理如下。对于 UHPC 基体的增加机理，当纳米-微米-毫米 3 种尺度的纤维同时掺加于 UHPC 时，纳米尺度

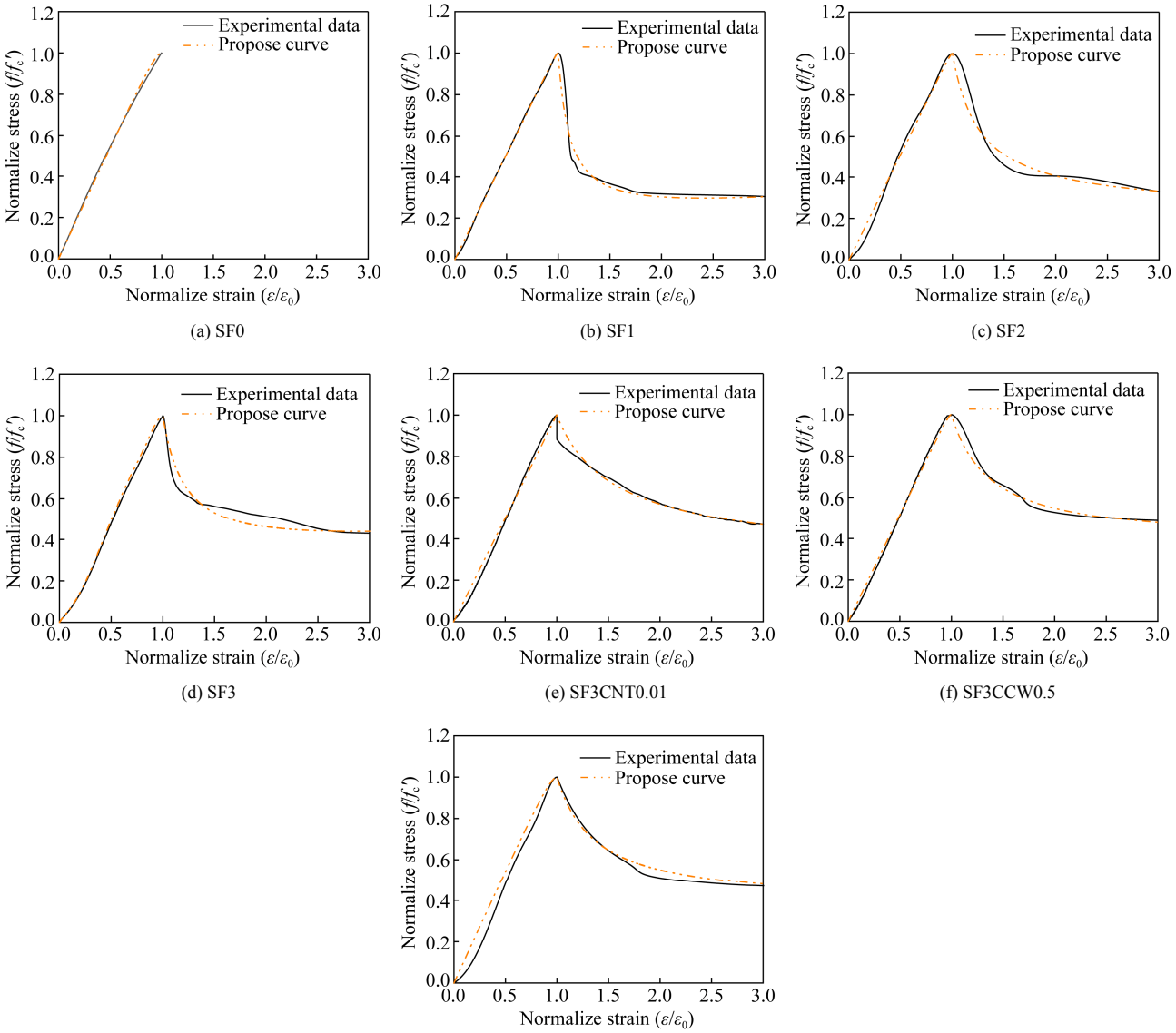
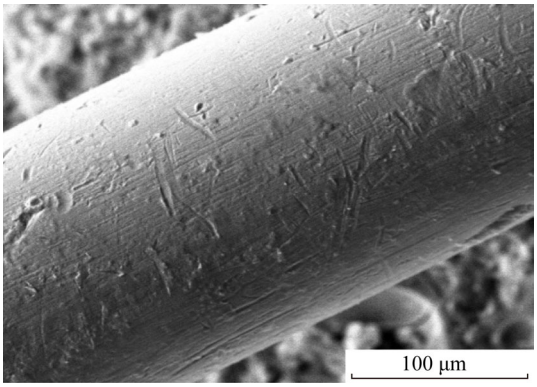
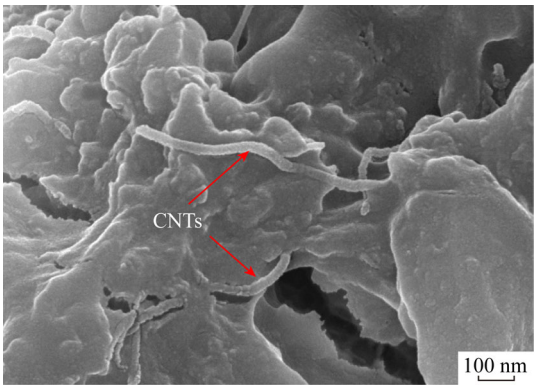


图 7 UHPC 单轴抗压曲线应力–应变本构方程拟合

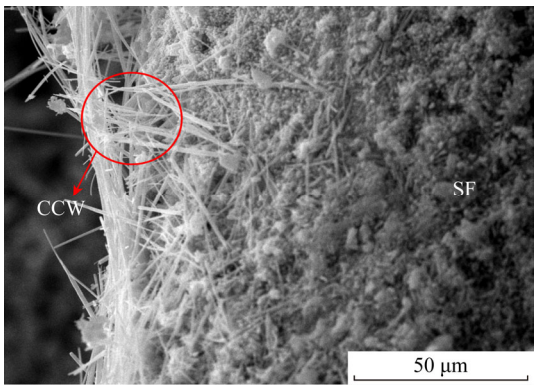
Fig. 7 Fitting of stress-strain constitutive equation of UHPC



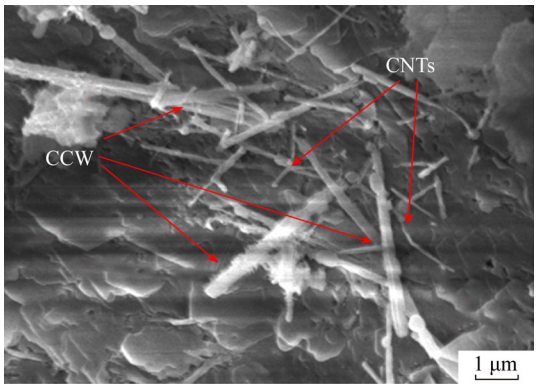
(a) SF3



(b) SF3CNT0.01



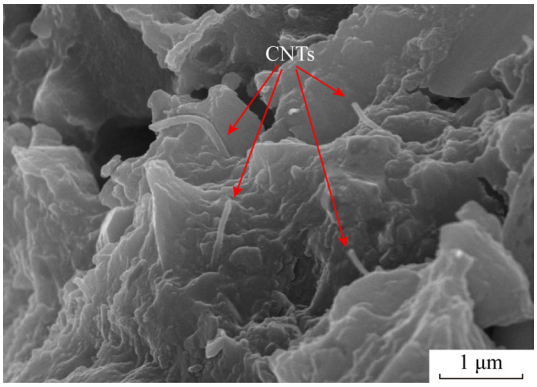
(c) SF3CCW0.5



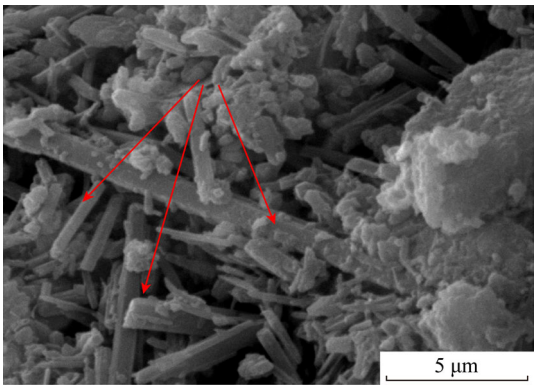
(d) SF3CCW0.5CNT0.01

图 8　UHPC 基体与纤维界面过渡区的电镜照片

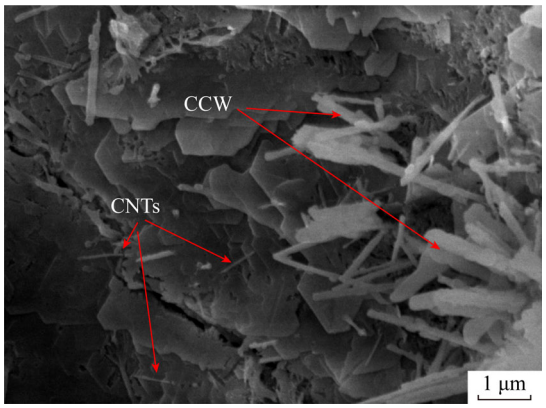
Fig. 8　SEM images of ITZ between UHPC matrix and fiber



(a) Matrix of SF3CNT0.01



(b) Matrix of SF3CCW0.05



(c) Matrix of SF3CCW0.5CNT0.01

图 9　微纳米尺度纤维对 UHPC 基体的增强作用

Fig. 9　Enhancement of micro nano fiber on UHPC matrix

的碳纳米管、微米尺度的碳酸钙晶、毫米尺度的钢纤维分别在 CSH 凝胶、毛细孔的裂纹、宏观裂纹尺度的缺陷起抑制作用，能在基体中不同尺度上发挥增强作用，如图 10 所示。然而多尺度纤维增强作用最显著的，是对钢纤维与 UHPC 基体界面过渡区的增强作用。当 3 种尺度纤维同时掺加时，将以毫米级的钢纤维为中心，形成不同尺度的相互缠绕。毫米尺度的钢纤维桥接于基体的宏观裂缝之间，碳酸钙晶须吸附缠绕于钢纤维的表面，纳米级的碳纳米

管缠绕于碳酸钙晶须周围，微纳米尺度的纤维在钢纤维和基体之间起到明显的递度增强作用。

不同尺度纤维在钢纤维与 UHPC 基体的界面过渡区上发生的吸附与缠绕，显著地提高了钢纤维与水泥基体之间的黏结力。然而，由于碳纳米管和碳酸钙晶须的尺度太小，在宏观尺度上难以发挥作用，因此对于 UHPC 试件的初裂强度并没有明显的提高效果。当 UHPC 内部的钢纤维进入滑移阶段后，这些微纳米纤维发挥了重要的作用。掺加单一钢纤维的 UHPC 试件，由于平直的钢纤维与基体的粘结力较弱，ITZ 强度较低，发生的是应变软化现象。相比较而言，掺加的微纳米纤维大量缠绕分布于界面过渡区中，增强了 ITZ 的强度和韧性，在钢纤维拉拔滑移的过程中，显著增加了摩擦力，导致出现了应变硬化的现象。在钢纤维的滑移过程中，拉力还得到了进一步的提升，显著提高了韧性和耗能能力。因此，多尺度纤维掺杂的方法可以明显地增强 UHPC 抗拉伸性能。

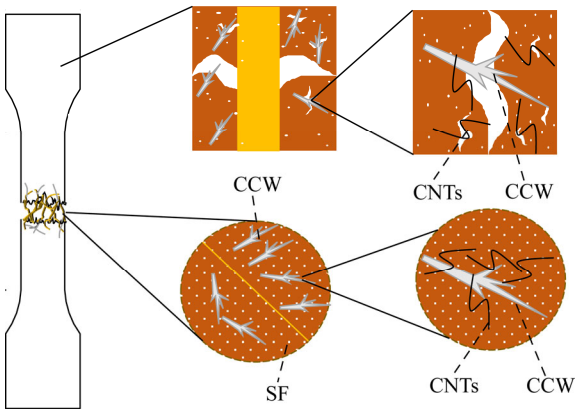


图 10 多尺度纤维对 UHPC 增强机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the enhancement mechanism of multi-scale fiber on UHPC

3 结论

1) 宏观尺度的毫米级钢纤维决定了 UHPC 试件的初裂强度和初裂应变，随着钢纤维掺量的增加，初裂强度和初裂应变都明显增加；但微观尺度的微米级纤维和纳米级纤维对初裂强度和初裂强度影响不大。

2) 微米级的碳酸钙晶须和纳米级的碳纳米管的加入，改变了 UHPC 试件开裂以后的拉伸行为，显著地了应变硬化行为。单掺微纳米纤维时，碳酸钙晶须的效果优于碳纳米管的效果，并且当碳酸钙晶须和碳纳米管两者复掺时效果最好。与 SF3 相比，SF3CNT0.01、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 的后裂强度即轴心抗拉强度分别提高了 17%、41%和 65%，韧性指标分别提高了 77%、242%和 303%。

3) 碳酸钙晶须对 UHPC 抗压的增强效果优于碳纳米管，并且当两者复掺时，效果最优。然而，微纳米纤维对于抗压强度的增强程度小于对轴心抗拉强度的增强。

4) 掺加微纳米纤维后，临界应变值有微弱的降低；掺加微纳米纤维弹性模量和抗压韧性指标有不同程度的提高，与 SF3 相比，SF3CNT0.001、SF3CCW0.5 和 SF3CCW0.5CNT0.01 弹性模量分别提高了 14%、24%和 26%，韧性指标分别提高了 13%、20%和 24%。

5) 当纳米、微米、毫米 3 种尺度的纤维同时掺加时，将以毫米级的钢纤维为中心，形成不同尺度的相互缠绕。毫米尺度的钢纤维桥接于基体的宏观裂缝之间，碳酸钙晶须吸附缠绕于钢纤维的表面，纳米级的碳纳米管缠绕于碳酸钙晶须周围，微纳米尺度的纤维在钢纤维和基体之间起到明显的递度增强作用，提升 UHPC 的抗拉性能。

参考文献:

[1] 张文华, 张云升, 陈振宇. 超高性能混凝土抗缩比钻地弹侵彻试验及数值仿真[J]. 工程力学, 2018(7): 167–175.
ZHANG Wenhua, ZHANG Yunsheng, CHEN Zhenyu. Eng Mech (in Chinese), 2018(7): 167–175.

[2] 张云升, 张文华, 陈振宇. 综论超高性能混凝土: 设计制备·微观结构·力学与耐久性·工程应用[J]. 材料导报, 2017(23): 1–16.
ZHANG Yunsheng, ZHANG Wenhua, CHEN Zhenyu. Mater Rep (in Chinese), 2017(23): 1–16.

[3] 张文华, 刘鹏宇, 吕毓静. 超高性能混凝土动态力学性能研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3257–3271.
ZHANG Wenhua, LIU Pengyu, LYU Yujing. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(19): 3257–3271.

[4] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741–751.

[5] WANG D, SHI C, WU Z, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Constr Build Mater, 2015, 96: 368–377.

[6] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(2): 172-184.

[7] SHAIKH F U A, LUHAR S, AREL H, et al. Performance evaluation of Ultrahigh performance fibre reinforced concrete – A review[J]. Constr Build Mater, 2020, 232: 117152.

[8] CHUN B, YOO D. Hybrid effect of macro and micro steel fibers on the pullout and tensile behaviors of ultra-high-performance concrete[J]. Composites Part B: Engineering. 2019, 162: 344-360.

[9] ABDALLAH S, REES D W A, GHAFFAR S H, et al. Understanding the effects of hooked-end steel fibre geometry on the uniaxial tensile

behaviour of self-compacting concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 178: 484–494.

[10] YOO D, KIM S, KIM J, et al. An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with various steel fibers[J]. Constr Build Mater, 2019, 206: 46–61.

[11] HE S, QIU J, LI J, et al. Strain hardening ultra-high performance concrete (SHUHPC) incorporating CNF-coated polyethylene fibers[J]. Cem Concr Res, 2017, 98: 50–60.

[12] MENG W, KHAYAT K H. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers[J]. Composites Part B, 2016, 107: 113–122.

[13] HE S, QIU J, LI J, et al. Strain hardening ultra-high performance concrete (SHUHPC) incorporating CNF-coated polyethylene fibers[J]. Cem Concr Res, 2017, 98: 50–60.

[14] RAHIMI-AGHDAM S, BAŽANT Z P, ABDOLHOSSEINI QOMI M J. Cement hydration from hours to centuries controlled by diffusion through barrier shells of C-S-H[J]. J Mech Phys Solids, 2017, 99: 211–224.

[15] HÜSKEN G, BROUWERS H J H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(10): 1246–1259.

[16] MEHDIPOUR I, KHAYAT K H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste[J]. Cem Concr Compos, 2017, 78: 120–131.

[17] ZHANG Y, PENG H, LV W. Evaluation of strain-hardening cementitious composites for RC seismic strengthening[J]. Proceed Instit Civil Eng-Struct Build, 2017, 170(8): 570–580.

[18] ZHANG Y, UEDA N, NAKAMURA H, et al. Behavior investigation of reinforced concrete members with flexural strengthening using strain-hardening cementitious composite[J]. ACI Struct J, 2017, 114(2): 417–426.

[19] ZHANG Y, PENG H, LV W. Shear stress transfer model for evaluating the fracture behaviour of SHCCs for RC shear strengthening[J]. Mag Concr Res, 2018, 70(10): 512–518.

[20] HAN T, FEENSTRA P H, BILLINGTON S L. Simulation of Highly Ductile Fiber-Reinforced Cement Based Composite Components Under Cyclic Loading[J]. ACI Struct J, 2003, 6(100): 749–754.

[21] JUNG M, LEE Y, HONG S, et al. Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE)[J]. Cem Concr Res, 2020, 131: 106017.

[22] 管品武, 涂雅筝, 张普, 等. 超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1295–1305.
GUAN Pinwu, TU Yazheng, ZHANG Pu, et al. Act Mater Compos Sin (in Chinese), 2019, 36(5): 1295–1305.