

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.015

纤维长度对UHPC轴拉性能的影响试验研究

袁明,韩怀志,颜东煌*,黄练,曾晓军

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了研究钢纤维长度对UHPC轴拉性能的影响,选择相同直径不同长度直圆形纤维掺入UHPC中,通过对UHPC力学性能、受拉变形和裂后强度的分析,得到纤维长度对UHPC轴拉性能的影响规律,对纤维长度的阻裂增韧效果做出评价,明确纤维长度影响UHPC轴拉性能的原因。研究表明:UHPC的轴拉性能随掺入纤维长度的增加而增加,20 mm长度纤维比6 mm长度纤维对UHPC峰值应力的提升作用增加了57.76%,UHPC裂后强度随纤维长度的增加而增加,当裂缝宽度一致时,纤维长度为20 mm时UHPC的应力最大,纤维长度为6 mm时UHPC应力最小。掺入20 mm长度纤维的UHPC在应变强化段变形量最大,纤维长度为13 mm时UHPC则在应力软化段变形最大。UHPC流动性随纤维长度的增加而降低。纤维长度对UHPC轴拉性能的影响是通过改变纤维与基体接触面的大小而改变的,越长的纤维与基体接触面越大,纤维与基体的黏结力也更大。

关键词:桥梁工程;超高性能混凝土(UHPC);轴拉性能;轴向拉伸;钢纤维长度

中图分类号:U444

文献标志码:A

0 引言

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)出现已有30多年的历史,一经问世便受到国内外学者广泛的关注。UHPC是在传统水泥基材料上改进而来的新型材料^[1]。在放弃传统水泥中的粗大骨料,选用优化过的粒径级配以减小材料中的空隙率。添加高效减水剂起到降低水胶比的效果,将部分水泥用硅灰取代提高凝胶材料的水化效果,并降低水化热^[2-3],掺入钢纤维以提高UHPC的力学性能^[4-6]。随着对UHPC配合比设计、力学性能、稳定性和耐久性等方面的深入研究,UHPC的材料特性逐渐被人们熟知,并应用于工程实践。

相关研究发现,UHPC与普通混凝土相比有着更高的抗拉强度,为了探究其抗拉强度优于普通混凝土的原因,对UHPC的轴拉性能做了全面的研究。从最基本的轴拉强度开始,对UHPC受拉开裂的整个过程,钢纤维发挥的作用和UHPC裂后强度等方

面进行了充分的研究^[7-9]。张哲等^[10]研究了不同纤维类型对UHPC初裂强度的影响,试验结果表明:不同的纤维掺量对UHPC可视初裂有着明显的影响;邵旭东等^[7]研究了有无钢纤维和不同长度纤维对UHPC轴拉性能的影响,研究表明:纤维的掺入对UHPC开裂后的强度有明显提升,且不同类型和长度的纤维对UHPC轴拉性能的提升效果不同,在一定范围内,随着纤维长度的增加,UHPC的轴拉性能获得了提升;宋焱^[11]研究了亚短纤维、短纤维和超短纤维对UHPC轴拉性能的影响和开裂过程中发挥的作用,试验反映出长的纤维对UHPC轴拉性能的提升效果很好,对开裂后的裂缝发展有很好的抑制作用,纤维越短抑制作用越小;Li等^[12]研究了相同直径不同长度钢纤维对UHPC轴拉性能的影响,认为随着纤维长度从6 mm、12 mm、16 mm增加至20 mm,UHPC的受拉变形能力得到了提升,试验结果表明:更长的纤维(16 mm、20 mm)可以有效地增加UHPC在应变硬化段的应变率和裂后应力。通过以上研究发现,影响UHPC轴拉性能的因素包括钢纤维的类

收稿日期:2022-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078054,51878073,52278141);湖南省交通科技项目(编号:201932);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2021jj30730);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20200832,CX20190650)

作者简介:袁明,男,博士,副教授.E-mail:mingyuan@csust.edu.cn

*通信作者:颜东煌,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:yandonghuang@126.com

型、长度和掺量等。

基于此,本文主要研究纤维长度对UHPC的轴拉性能的影响。选择单轴直接拉伸试验可以排除材料抗压性能和抗剪性能对抗拉性能的影响,直接观测UHPC在受拉过程中的表现^[13-16]。对UHPC的初裂强度、峰值强度、受拉变形和裂后应力做出评价,并结合扫描电镜对纤维长度影响UHPC轴拉性能的原理进行分析。

1 试验方案

1.1 原材料

采用南方P.O52.5普通硅酸盐水泥,其3 d和28 d抗压强度分别为33.9 MPa和65.8 MPa,主要参数如表1所示。选用SiO₂含量92.13%的超细硅灰,平均粒径0.1 μm,比表面积为20 m²/g,烧失量为1.8%。采用粒径0.12~0.63 mm精致水洗石英砂。采用减水效率大于30%的聚羧酸高性能减水剂,正常状态下为黄白色粉末状颗粒。采用普通自来水。采用不同长度直径为0.2 mm的直圆镀铜钢纤维,相关参数如表2所示。

表1 南方P.O52.5水泥主要参数

细度/ μm	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	烧失量/ %	初凝时间/ min	终凝时间/ min
80	341	2.18	155	207

表2 钢纤维主要参数

编号	纤维长度/mm	直径/mm	长径比	抗拉强度/MPa
S.06	6	0.2	30	≥2 000
S.13	13	0.2	65	≥2 000
S.20	20	0.2	100	≥2 000

1.2 试验设计

本试验研究的是UHPC的基本力学性能之一——轴拉性能。选用的UHPC配合比根据最大密度堆积理论,最优粒径级配得出^[17],如表3所示,表中各材料数值为该材料掺量与水泥掺量的比值。

表3 UHPC基准配合比

水泥	硅灰	石英砂	水	高性能减水剂
1	0.25	1.375	0.212 5	0.012 5

目前测量UHPC抗拉性能的试验方法主要包

括:劈裂试验、弯曲试验、八字模试验和直接拉伸试验。综合考虑不同试验方法的优劣,本次试验选用直接拉伸试验。由于目前单轴直接拉伸试验没有统一的标准,且UHPC试件难以有效地固定在试验仪器上进行试验^[18-19]。参考前人的研究,设计了本次试验的夹持装置,以保证试验的进行。在直接拉伸试验中,试件尺寸对试验成功率有较大的影响,目前还没有统一的标准,根据前人的研究^[20-21],设计了本次试验采用的狗骨形试件尺寸(图1),试件厚度为100 mm。设计了3组试验,共9个试件。各组编号如表4所示。试验变量为钢纤维长度,分别为6 mm、13 mm和20 mm长的直圆钢纤维,直径均相同。为了方便记录,每组单轴拉伸试验命名规则:“DT-纤维编号”,纤维编号在表2中已标出。

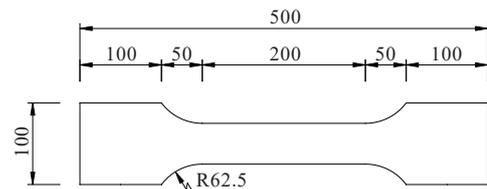


图1 试验试件尺寸(单位:mm)

表4 试验组参数设置

试验组编号	纤维类型	纤维长度/mm	厚度/mm	钢纤维掺量/%
DT-S.06	直圆形	6	100	2
DT-S.13	直圆形	13	100	2
DT-S.20	直圆形	20	100	2

1.3 试件制备及试验方法

依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)^[22]进行试件制作。首先将石英砂放入搅拌机搅拌1.5 min,之后加入水泥和硅灰搅拌1.5 min,待材料充分混合后,将混合好的水和减水剂放入搅拌机,再搅拌5 min,UHPC浆体充分混合好后,通过分散装置将钢纤维掺入UHPC浆体,再搅拌3 min使钢纤维在UHPC内随机分散开,此时获得了制备好的UHPC浆体,快速将UHPC浆体注入试件模具中成型、振捣、静置24 h后拆模,进行高温蒸养。蒸养时间为48 h,在这个过程中要保证升温速度小于12 °C/h,升温至95 °C后保持温度不变[(95±5) °C]。且蒸养完成后的降温不超过14 °C/h,直到试件温度与环境温度相差不超过15 °C,然后进行单轴拉伸测

试。先给所有试件粘贴应变片,同时在 370 型 MTS 试验机上安装拉伸辅助装置,然后将狗骨形试件安装在 MTS 试验机上进行轴拉试验(图 2),拉伸速率为 0.1 mm/min。单轴拉伸试验采用 MTS Landmark 370 液压伺服测试系统、东华 DH3816N 静态应力测试分析系统、东华直线位移传感器 5G103。



图 2 试验装置

1.4 轴拉性能评价指标

为了衡量钢纤维长度对 UHPC 轴拉性能的影响,选择 UHPC 轴拉应力、名义应变等作为评价 UHPC 轴拉性能的指标。其中,UHPC 轴拉应力可以反映 UHPC 材料在受拉状态下对应的承载能力,计算如式(1)所示:

$$\sigma = \frac{F_N}{S} \quad (1)$$

式中: σ 为轴拉应力; F_N 为轴向拉力; S 为轴向受力面积。

名义应变计算公式如式(2)所示:

$$\epsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

式中: ϵ_n 为名义应变; Δl 为测量长度的变形量; l_0 为初始测量长度,本次试验初始长度为 15 cm;通过初裂应力 σ_c 、初裂应变 ϵ_c 、峰值应力 σ_{pc} 和峰值应变 ϵ_{pc} 对试件的轴拉性能进行评价,认为最大抗拉强度为峰值应力 σ_{pc} 。

为反映 UHPC 抵抗变形的能力,采用断裂能作为评价指标,计算公式如式(3)所示:

$$G_f = \frac{W}{A} \quad (3)$$

式中: G_f 为断裂能; W 为力-位移曲线面积; A 为断裂韧带面积。由于对试验结束阶段的判定依据为施加的荷载小于施加峰值荷载的 80%,因此选择 3 000 $\mu\epsilon$ 以内的断裂能作为评价 UHPC 抵抗变形的依据。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果分析

不同长度钢纤维 UHPC 轴拉试验结果见表 5。

表 5 不同长度钢纤维 UHPC 轴拉试验结果

试验组编号	初裂应力/ MPa	初裂应变/ $\mu\epsilon$	峰值应力/ MPa	峰值应变/ $\mu\epsilon$	弹性模量/ GPa	断裂能/ ($N \cdot mm^{-1}$)	扩展度/ mm
DT-S.06	5.18	195.26	5.35	1 283	41.48	1.77	683
DT-S.13	6.88	226.85	7.29	1 533	42.93	2.49	619
DT-S.20	7.54	239.45	8.44	2 153	46.22	2.74	543

由表 5 可知:掺入不同长度钢纤维的 UHPC 的力学性能是不同的。掺入 20 mm 长度纤维的 UHPC 初裂应力和峰值应力最大,分别达到了 7.54 MPa 和 8.44 MPa,与掺入 6 mm 和 13 mm 长度纤维的 UHPC 相比,其初裂应力分别提高了 45.56% 和 9.59%,峰值应力分别提高了 57.76% 和 15.78%;掺入 20 mm 长度纤维的 UHPC 的峰值应变和弹性模量最大,分别为 2 153 $\mu\epsilon$ 、46.22 GPa,与掺入 6 mm 和 13 mm 长度纤维的 UHPC 相比,峰值应变分别提高了 67.81% 和 40.44%,弹性模量分别提高了 11.43% 和 7.66%;在

能量的吸收方面,掺入 20 mm 长度纤维的 UHPC 也是最好的,其断裂能为 2.74 N/mm,与掺入 6 mm 和 13 mm 长度纤维的 UHPC 相比分别提高了 54.80% 和 10.04%。这些增幅反映出 20 mm 长度钢纤维对 UHPC 的抗拉力学性能的提升效果最好,13 mm 纤维次之,6 mm 纤维效果最差,而且掺入 20 mm 纤维的 UHPC 在受拉开裂时对能量的吸收也是最好的。但在 UHPC 的扩展度方面则表现出相反趋势,掺入 6 mm、13 mm、20 mm 纤维的 UHPC 扩展度分别达到了 683 mm、619 mm、543 mm,可以看出随着纤维长

度的增加,UHPC的扩展度最大下降了20.5%。造成这样的原因可能是随着纤维长度的增加,纤维与纤维间会形成网状结构,这种结构不利于纤维在UHPC的流动性。

2.2 应力-应变曲线分析

掺入不同长度的直圆纤维对UHPC的应力-应变曲线的影响结果如图3所示。

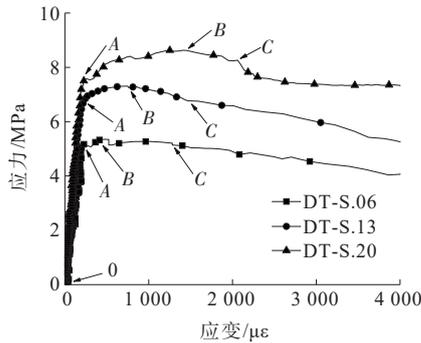


图3 不同试件组的受拉应力-应变曲线

由图3可知:直圆纤维长度的不同改变了UHPC的受拉应力-应变曲线的形状,但没有改变其在拉伸过程中的受力阶段,其应力-应变曲线可分为弹性(OA)、应变硬化(AB)和应力软化(BC)3个阶段。

在弹性阶段(OA),应变随应力近似等比例增长。此时不同长度的直圆纤维对微裂纹的开展与产生有一定的抑制作用,在该阶段20 mm长的纤维增韧效果最好,当UHPC的微应变达到239.45 $\mu\epsilon$ 时微裂纹开始发展,6 mm长的纤维增韧效果较差,在微应变为195.26 $\mu\epsilon$ 就发生了初裂,13 mm纤维的增韧效果则介于两种纤维之间。掺入不同长度钢纤维的UHPC的初裂应变相差最多为44.19 $\mu\epsilon$,可以认为3种不同长度的纤维在弹性阶段发挥的作用均不大,可能是弹性阶段主要承受外荷载的是UHPC基体,其开裂应变主要与UHPC基体的强度有关。

在UHPC的应变硬化段(AB),随着微裂纹开始产生和发展,钢纤维通过与UHPC基体间的黏结力发挥桥接作用,逐渐承担起UHPC因开裂失去的承载力。在此阶段,20 mm长度纤维对UHPC轴拉性能的提升也是最好的,掺入20 mm纤维的试件因受拉变形产生的应变为1 082.38 $\mu\epsilon$ (图4),与掺入13 mm和6 mm长度纤维的UHPC在此阶段产生的变形

相比,分别提高了131.99%和229.22%。13 mm长度纤维在此阶段发挥的效果则介于两者之间,6 mm长度纤维的效果最差。掺入20 mm长度纤维的UHPC在应变硬化段可以有更多变形的原因是更长的纤维在被拉出的过程中有更多的作用长度,因此20 mm长度纤维的强化效果最好,其次为13 mm、6 mm长度纤维。

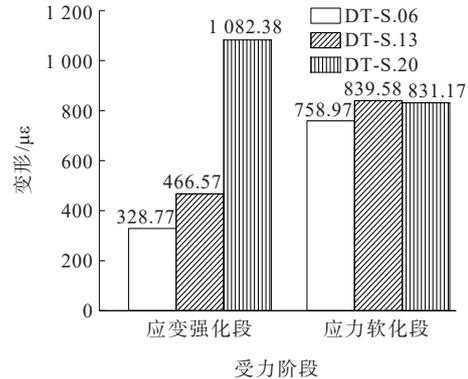


图4 UHPC不同阶段受拉变形

在应力软化段(BC),随着裂纹的不断扩展,钢纤维逐渐退出工作,UHPC试件的应力开始下降。在该阶段,13 mm和20 mm长度纤维发挥的增韧效果相近,掺入13 mm长度纤维的试件因受拉变形产生的应变最大,为839.58 $\mu\epsilon$,比掺入20 mm和6 mm长度纤维的UHPC的变形分别提高了1.01%和10.62%(图4)。由此可认为在该阶段13 mm和20 mm长度纤维对UHPC轴拉变形的提升作用接近,13 mm长度纤维在该阶段表现最好。

对20 mm长的纤维断裂面进行观察发现,断裂面处的纤维基本沿受拉方向排列分布,如图5所示。分析原因可能是20 mm长度纤维更长,随着纤维的拔出,纤维因拔出产生的变形也更多,导致UHPC拔出断面处20 mm长度纤维的朝向更多地沿受拉方向分布。

2.3 纤维长度对UHPC裂后应力的影响

已有研究表明,UHPC中裂缝宽度小于0.05 mm对UHPC的结构耐久性几乎没有影响^[23],因此选择裂缝宽度为0.05 mm作为可视裂缝特征点。为了研究纤维长度对UHPC裂后强度和受拉变形的影响,在其应力-应变曲线上分别取1 000 $\mu\epsilon$ 、2 000 $\mu\epsilon$ 和3 000 $\mu\epsilon$ 处作为特征点,依次绘制出其对应的应力值,如图6所示。



图 5 20 mm 长度纤维 UHPC 断面图

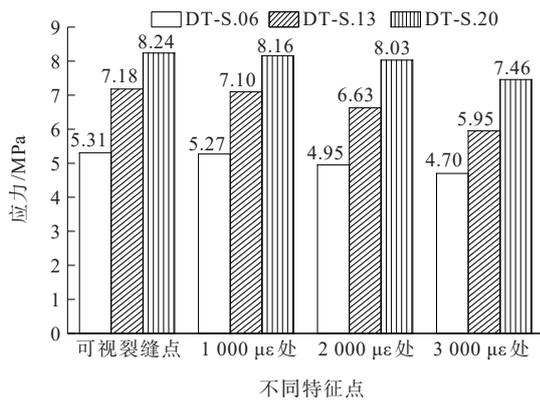


图 6 不同长度纤维 UHPC 的特征点处应力值

由图 6 可知:

(1) 在可视裂缝点处,DT-S.20 组的应力值比 DT-S.06 和 DT-S.13 组分别高出 55.18% 和 14.76%。表明在裂缝宽度为 0.05 mm 时,20 mm 长度纤维对 UHPC 抗拉能力的提升作用优于其他两种纤维。可视裂缝点应力仍未超过峰值应力,说明裂缝宽度为 0.05 mm 时,纤维桥接作用提供的力仍大于 UHPC 因开裂损失的力。随着 UHPC 继续受拉开裂,裂缝开始增大,因纤维开始被拔出而不能提供桥接作用,UHPC 开始进入应力软化段。

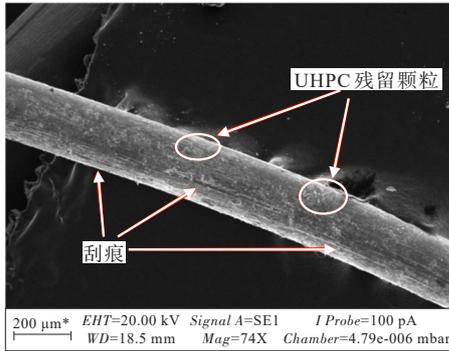
(2) 在 1 000 $\mu\epsilon$ 处,DT-S.20 组的应力值比 DT-S.06 和 DT-S.13 组分别高出 54.84% 和 14.93%;在 2 000 $\mu\epsilon$ 处,DT-S.20 组的应力值比 DT-S.06 和 DT-S.13 组分别高出 62.22% 和 21.12%;在 3 000 $\mu\epsilon$ 处,DT-S.20 组的应力值比 DT-S.06 和 DT-S.13 组分别高出 58.72% 和 25.38%。这些特征点处应力的变化表明 20 mm 长度纤维对 UHPC 的裂后强度的增强效果优于 13 mm 和 6 mm 长度纤维,13 mm 长度纤维优于 6 mm 长度纤维。钢纤维增强 UHPC 裂后强度是通过阻止裂缝扩展来实现的,而纤维要抑制裂缝

的扩展与纤维弹性模量、界面黏结强度和自身抗拉强度有关^[24]。在本次试验中,采用的纤维类型相同,改变的只是纤维长度,故纤维弹性模量和纤维自身抗拉强度基本相同,影响 UHPC 裂后强度的因素为界面黏结强度。DT-S.20 组的裂后强度明显优于其他两组,因此可以认为 20 mm 长度纤维与 UHPC 间的黏结强度最好,其次是 13 mm 和 6 mm 长度纤维。

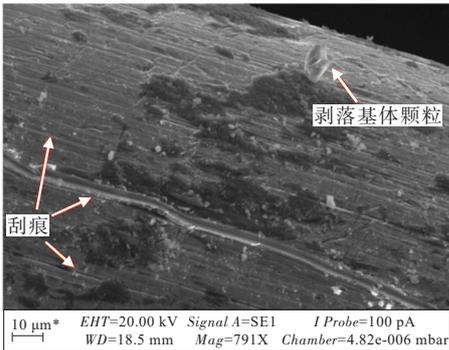
2.4 纤维长度对 UHPC 轴拉性能的影响机理分析

通过扫描电镜(SEM)对轴拉试验后的试件进行观察分析。在拔出纤维上观察到残留的 UHPC 基体颗粒,纤维表面存在沿长度方向密且深的刮痕,如图 7 所示。观察纤维与 UHPC 之间形成的隧洞,发现隧洞内沿长度方向有清晰的划痕,隧洞内分布着许多基体小颗粒,如图 8 所示。这种破坏模式为纤维表面划痕破坏,由于基体和界面过渡区都较强,纤维拔出时界面产生的剪切力不足以破坏基体和界面过渡区,划痕是纤维与基体相对滑动时摩擦力将纤维表面划破,在纤维表面和隧洞纵向上形成的^[25]。表明纤维在被拔出过程中,纤维与 UHPC 的摩擦也会增加纤维拔出的荷载,因为随着隧洞长度的增长,纤维与基体磨损颗粒之间的楔形效应发生率增加了,从而提高了纤维的拔出荷载。

在图 9 中,纤维与 UHPC 基体间紧密黏结,间隙不超过 10 μm ,在纤维的周围,存在微裂缝。当 UHPC 因受拉变形时,这些微裂缝便会受拉开裂,当裂缝扩展至纤维隧洞时,因裂缝两端纤维仍与基体紧密黏结,纤维开始发挥抑制裂缝开展的作用。纤维在 UHPC 中的拔出失效不能是整根纤维被拔出,而是纤维一部分从 UHPC 基体中被拔出。不同长度的钢纤维在被拔出时拔出端的长度会有所不同,已有研究表明,纤维埋深对界面黏结性能存在影响,随着埋深从 5 mm、10 mm 增加至 15 mm,直径 0.2 mm 钢纤维的极限拔出荷载和拉拔功有较大程度的增加,与相关研究结果基本相同^[26-27],随着钢纤维在 UHPC 内的埋深增加,纤维与 UHPC 的接触面增大,纤维与 UHPC 间的黏结力增大。UHPC 内不同长度纤维被拔出时,被拔出的长度可以认为是纤维在基体内的埋深。随着掺入纤维长度的增加,纤维被拔出时拔出的纤维段也会更长,纤维与基体的接触面增加,纤维与基体间的黏结力也更大。本次试验中,随着纤维长度从 6 mm 增加至 13 mm 和 20 mm,对应



(a) 钢纤维上 UHPC 基体颗粒



(b) 钢纤维局部放大

图7 断裂处纤维 SEM 图

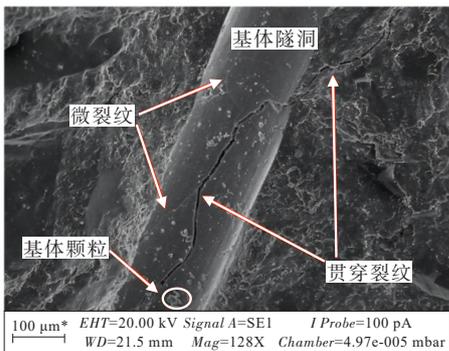


图8 钢纤维隧洞 SEM 图

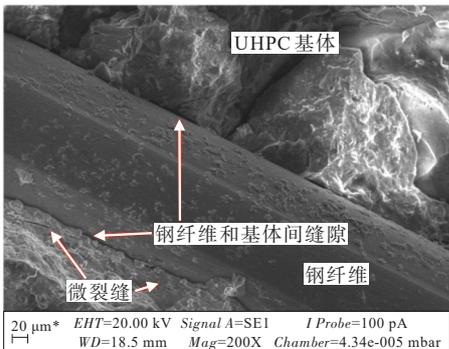


图9 钢纤维与 UHPC 结合处 SEM 图

UHPC的峰值应力有所增长,在特征点处掺入20 mm长度纤维的UHPC对应的应力也更大。UHPC抗拉应力的增大是每根纤维与UHPC间的黏结力增大后,最终在宏观力学性能上的表现。

3 结论

本文开展相同纤维掺量下不同长度纤维UHPC的轴拉试验,从抗拉强度、受拉变形和开裂后应力和变形等方面,研究钢纤维长度对UHPC轴拉性能的影响,得出以下主要结论:

(1) UHPC的力学性能随掺入纤维长度的增加而增加。掺入20 mm长度直圆纤维UHPC的峰值应力比掺入6 mm和13 mm长度纤维分别增加了57.76%和15.78%。纤维长度对UHPC流动性影响从小到大依次是:6 mm、13 mm和20 mm。

(2) UHPC的受拉应力-应变曲线有3个明显的受力过程,分别为弹性阶段、应变硬化段和应力软化段。UHPC基体主要参与弹性阶段,主要由UHPC基体性能决定,纤维长度的影响主要在UHPC的应变硬化段和应力软化段。掺入20 mm长度纤维UHPC在应变强化段变形量最大,13 mm长度纤维则在应力软化段变形最大。

(3) 在可视裂缝点,掺入20 mm长度纤维UHPC的应力为8.24 MPa,与掺入6 mm和13 mm长度纤维UHPC相比增加了55.18%和14.76%。掺入20 mm长度纤维UHPC在各个应变特征点处的应力也是最大的,其次是13 mm和6 mm长度纤维。

(4) 随纤维长度的增大,纤维与基体的接触面积增大,使得钢纤维与UHPC之间的黏结力也增大,因此UHPC抗拉应力也增大。

参考文献:

- [1] 陈宝春,黄卿维,王远洋,等.中国第一座超高性能混凝土(UHPC)拱桥的设计与施工[J].中外公路,2016,36(1): 67-71.
- [2] 刘娟红,宋少民.活性粉末混凝土:配制、性能与微结构[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [3] 袁明,梁恩,颜东煌,等.配合比参数影响钢纤维-基体界面黏结性能的试验[J].长安大学学报(自然科学版),

- 2020,40(6):57-66.
- [4] 王秋维,王志伟,陶毅,等.配合比及养护制度对活性粉末混凝土强度影响的试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(3):382-387.
- [5] 赵一鹤,孙振平,穆帆远,等.钢纤维对UHPC拉伸性能及其拔出行为的影响[J].建筑材料学报,2021,24(2):276-282.
- [6] 杜任远,陈宝春,沈秀将.不同方法测试的超高性能混凝土抗拉强度[J].材料导报(纳米与新材料专辑),2016(2):483-486,520.
- [7] 邵旭东,李芳园,邱明红,等.钢纤维特性对UHPC轴拉性能与弯拉性能的影响及对比研究[J].中国公路学报,2020,33(4):51-64.
- [8] 刘琼伟.UHPC轴拉性能及弯拉-轴拉换算关系研究[D].长沙:湖南大学,2021.
- [9] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents[J]. Materials and Structures, 2011, 44(3):583-598.
- [10] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50-58.
- [11] 宋焱.级配纤维超高性能混凝土抗拉性能研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- [12] LI V C, WU H C, MAALEJ M, et al. Tensile behavior of cement-based composites with random discontinuous steel fibers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(1):74-78.
- [13] 高绪明.钢纤维对超高性能混凝土性能影响的研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [14] 周腾,裴炳志,黄政宇,等.钢纤维掺量对UHPC轴拉性能的影响[J].中外公路,2022,42(5):120-124.
- [15] 苏家战,林毅焱,陈宝春,等.不同形状钢纤维对UHPC受拉性能影响的试验研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2020,41(3):246-251,261.
- [16] ROY M, HOLLMANN C, WILLE K. Influence of fiber volume fraction and fiber orientation on the uniaxial tensile behavior of rebar-reinforced ultra-high performance concrete[J]. Fibers, 2019, 7(7):67.
- [17] 袁明,贺文杰,颜东煌,等.超高性能混凝土配合比优化研究[J].中外公路,2019,39(6):169-173.
- [18] 赵辛玮,肖汝诚,孙斌,等.常温养护型超高性能混凝土组合桥面板收缩性能研究[J].中外公路,2020,40(3):100-108.
- [19] ASTM. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C496[S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2004.
- [20] AFNOR N F. National addition to eurocode 2-design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fibre reinforced concrete(UHPFRC)[S]. Paris: French Standard Institute, 2016.
- [21] 杨简,陈宝春,沈秀将,等.UHPC单轴拉伸试验狗骨试件优化设计[J].工程力学,2018,35(10):37-46,55.
- [22] 中国建筑材料科学研究院有限公司,厦门艾思欧标准砂有限公司,安徽海螺水泥股份有限公司,等.水泥胶砂强度检验方法:GB/T 17671—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [23] RAFIEE A. Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete [M]. Kassel: Kassel University, 2012.
- [24] 李艺,赵文.混杂纤维混凝土阻裂增韧及耐久性能[M].北京:科学出版社,2012.
- [25] 戚家南.基于界面粘结性能多尺度分析的UHPC梁计算方法与试验研究[D].南京:东南大学,2018.
- [26] 韦炳灯.钢纤维与活性粉末混凝土基体界面粘结性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.
- [27] DENG F Q, DING X X, CHI Y, et al. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling[J]. Composite Structures, 2018, 206: 693-712.