

钢纤维掺量对 UHPC 轴拉性能的影响

周腾¹, 裴炳志², 黄政宇¹, 裴大军², 徐锐², 方志¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖北省交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:为明确钢纤维掺量对超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)材料轴拉性能的影响,对钢纤维体积掺量为0%~3%的4组共16个UHPC试件进行轴向拉伸全过程试验,获得不同纤维掺量下UHPC的轴拉应力—应变全曲线;分析钢纤维体积掺量对UHPC抗拉强度、变形性能、耗能能力和延性的影响。试验结果表明:①不掺纤维的UHPC轴拉试件表现出明显单缝开裂的脆性破坏特征,当纤维掺量增加到2%以上时,则表现出明显多缝开裂的延性破坏特征;②包括卸载曲线在内的UHPC轴拉应力—应变全曲线在初始加载、基体开裂、峰值点、极限点和卸载点等特征点间的曲线近似呈线性变化,极限点处卸载后再重新加载时,仍基本回到单调加载曲线的运行路径上;③随着钢纤维体积掺量的提高,UHPC材料的初裂应力和初裂应变稍有增加,峰值应力、峰值应变、极限应变、残余应变、耗能能力和延性显著提高。受拉与受压弹性模量相近,材料的塑性耗能能力基本由基体内纤维的塑性变形提供。

关键词:轴拉性能; 应力—应变曲线; 耗能能力; 延性; 应变硬化

中图分类号: U444

文献标志码: A

自超高性能混凝土问世以来,已越来越多地应用于各种工程建筑领域^[1]。由于钢纤维的加入,UHPC的抗拉性能,尤其是裂后抗拉性能得到了很大的提升,研究钢纤维对UHPC抗拉性能的影响具有重要的意义^[2-3]。

已有研究表明:钢纤维适量加入可以显著提高UHPC的抗拉强度和峰值应变。杨志慧^[4]对活性粉末混凝土轴拉性能的研究表明:钢纤维体积掺量为2%的试件,其抗拉强度和峰值应变较基体试件分别提高147%和107%;Hassan^[5]和杜任远^[6]对UHPC拉伸性能的研究均表明:UHPC中加入2%体积率的钢纤维后,抗拉强度是基体抗拉强度的近2倍;原海燕^[3]对活性粉末混凝土受拉应力—应变曲线的研究表明:随着钢纤维体积率的增加,试件的抗拉强度和峰值应变逐渐增加,且破坏形式从脆性转变为延性;王俊颜^[7]研究表明:钢纤维体积掺量的增加可以显著提高UHPC的应变硬化能力;Wille^[8]研究表明:掺入不同形状钢纤维UHPC试件的拉伸强度差异较小;宋焱^[9]研究了钢纤维种类对UHPC抗拉强度的影响,结果表明:相同纤维掺量下,短纤维的增强效果明显好于长纤维。

部分学者研究了纤维混掺对UHPC轴拉性能的影响。徐礼华^[10]研究结果表明:聚丙烯纤维的加入能使材料应力—应变曲线整体形状变得饱满;张哲等^[12]研究了平直和端钩混杂纤维对UHPC轴拉性能的影响,

结果显示:混合钢纤维可提高UHPC材料的可视初裂应变。

综上,目前国内外对UHPC轴拉性能的研究取得了较为丰硕的成果,但应力—应变关系鲜见包含极限应力处的卸载曲线,导致材料塑性耗能和延性等方面的研究较为缺乏。基于此,该文对UHPC轴拉试件进行轴向拉伸试验,获得含不同钢纤维掺量UHPC的轴拉应力—应变全曲线,以期明确钢纤维体积掺量对UHPC轴拉时延性和耗能的影响规律。

1 试验概况

1.1 试件设计

不同于其他力学性能试验,UHPC轴拉试验成功与否很大程度上取决于试件形状及试件尺寸^[8]。迄今国内外尚未形成UHPC材料轴拉试验的统一标准,所用试件的形状和尺寸不尽相同。试件形状主要有不开口柱体^[13]、开口柱体^[14]和狗骨形状^[15]三类。不开口柱体试件两端夹持和对中不易且难以保证在标距内破断;开口柱体试件的截面开口处存在应力集中,难以实现拉伸过程中的多缝开裂现象。狗骨形试件可克服柱体试件的不足^[16]。因此,该文采用图1所示的狗骨状试件,测量标距位于中部均匀段,长度为200 mm^[17]。

收稿日期:2022-05-29(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878262,51938012)

作者简介:周腾,男,硕士研究生。E-mail:729479685@qq.com

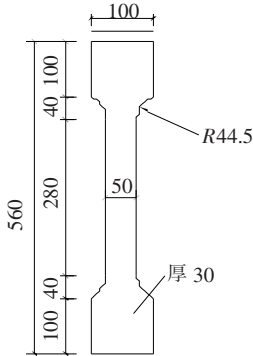


图 1 试件尺寸(单位:mm)

1.2 试件制备

采用的 UHPC 基体为商品干粉料,通过钢纤维的掺入得到所需的 UHPC。UHPC 的设计强度等级为 150 MPa,其配合比见表 1。钢纤维采用长径比为 13 mm/0.2 mm、抗拉强度为 2 850 MPa 的镀铜平直钢纤维。

表 1 UHPC 基体配合比(质量比)

水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	水
1	0.25	1.1	0.25	0.02	0.18

以钢纤维体积掺量(0、1%、2%、3%)为参数,设计制作了 4 组共 16 个试件,试件参数见表 2。为保证材料性能的一致性,相同纤维掺量的试件采用同一盘 UHPC 浇筑,以保证性能尽可能相同。所有试件均采用钢模成型且水平浇筑,为防止振捣对纤维分布的影响,所有试件均采用自流密实免振捣成型。成型后用薄膜覆盖表面,常温下静置 48 h 之后脱模,然后放入蒸气养护箱中缓慢升温至 90 ℃,养护 72 h 后缓慢降至室温进行试验^[18]。实测材料的基本力学性能如表 2 所示。

表 2 试件参数及材料力学性能

编号	体积掺量/%	抗压强度			受压弹模/GPa
		f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_c/f_{cu}	
DT-S0	0	144.2	113.5	0.79	47.9
DT-S1	1	151.9	136.1	0.90	48.2
DT-S2	2	165.5	139.0	0.84	48.7
DT-S3	3	177.5	155.9	0.88	49.0

注:试件编号中,DT 表示轴向拉伸测试,S 表示平直纤维,其后数字表示钢纤维体积掺量百分比。表中数据结果为该组试件的平均值(下同)。

1.3 测试方法

轴拉试验在 5 t 电子伺服万能试验机上进行。试件表面安装两个高精度位移传感器,测量标距内的伸

长量,借此获得标距范围内的平均应变。需要说明的是,每组 4 个试件中,2 个试件单调加载至破坏,另外 2 个试件在荷载降为峰值荷载的 85%处进行一次卸载,以期获得极限状态时试件的残余变形和塑性耗能能力,再重复加载至试件断裂。试验加载速率为 0.05 mm/min,卸载速率为 0.1 mm/min。

2 试验结果及分析

图 2 为各组试件实测的应力—应变全曲线。为了更大程度地显示开裂前期的曲线,该图仅绘制 6 000 $\mu\epsilon$ 前的曲线部分。DT-S0 试件组中因有一个试件在标距外破坏,因此只测得 3 个试件的曲线。

2.1 试验现象及破坏过程

试验出现了 3 种不同的破坏过程,分别对应无纤维试件、含 1%纤维的试件和含量大于 1%的试件。下面分别就这 3 种情况说明其破坏过程。

由图 2(a)可得:不掺纤维的 DT-S0 试件在受力前期,应力—变形曲线呈线性增长,达到开裂的同时荷载瞬间降为 0,伴随“嘣”的一声,试件断裂成上下两截,破断面较为平整,如图 3(a)所示。

由图 2(b)可得:1%纤维掺量的 DT-S1 试件在开裂前阶段与无纤维试件类似,应力—变形曲线近似呈线性增长;基体开裂时荷载突然降至峰值荷载的 85%左右,并伴随“嘣”的一声,试件迅速出现一条宽度约 0.5 mm 的裂缝,表现出明显的脆性破坏特征;基体开裂后,伴随钢纤维不断被拔出的“滋滋”声,裂缝稳步扩展直至试件最终破坏,此阶段表现出明显的延性破坏特征。最终的破坏形态如图 3(b)所示,可见断裂面较为平整,且整个加载过程中有且仅有一条裂缝。

由图 2(c)、(d)可得:纤维掺量大于 1%的 DT-S2 和 DT-S3 试件破坏过程相似,整个过程表现出明显的延性破坏特征。基体开裂后应力—变形曲线出现拐点,因开裂截面有足够的钢纤维予以桥接,使得开裂后变形增长的同时,荷载有所增长,且微裂缝数量变多;峰值荷载后,应变增长速度加快,宏观裂缝稳步扩展,并伴随钢纤维被拔出的“滋滋”声,最终形成一条主裂缝并在此处断裂,如图 3(c)、(d)所示。

2.2 应力—应变曲线特征

定义应力—应变曲线初始线性上升段的偏离点为基体开裂点,上升段与下降段的转折点为峰值点,峰值点后应力降为 85%峰值应力的点称为极限点,从极限点卸载至零后的点称为卸载点,相应的应变为残余应

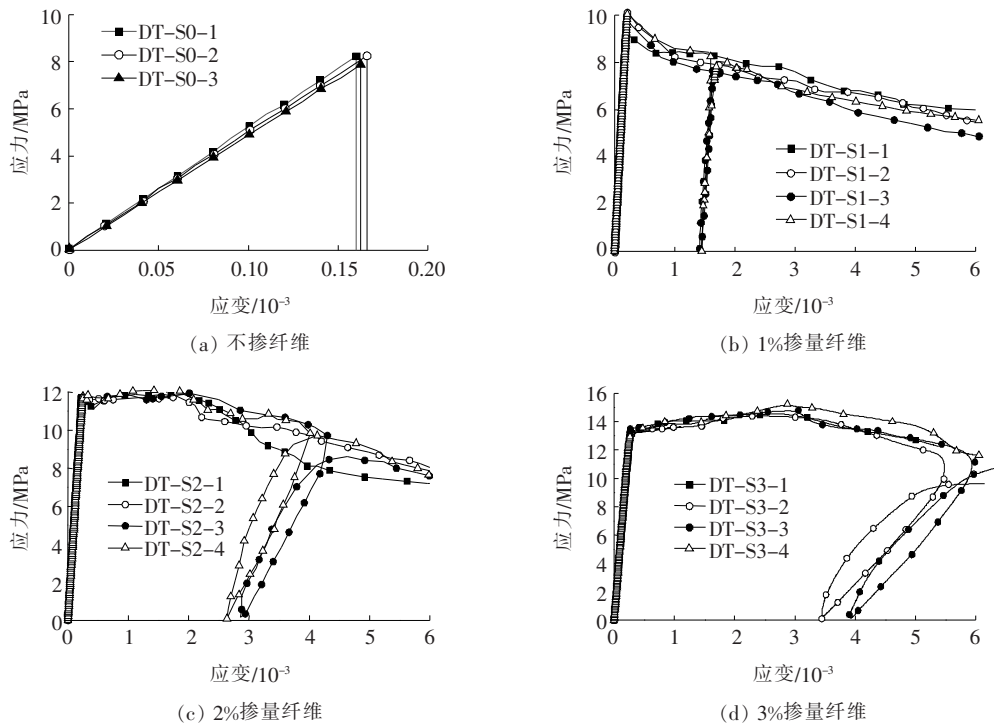


图 2 各组试件实测应力—应变关系曲线

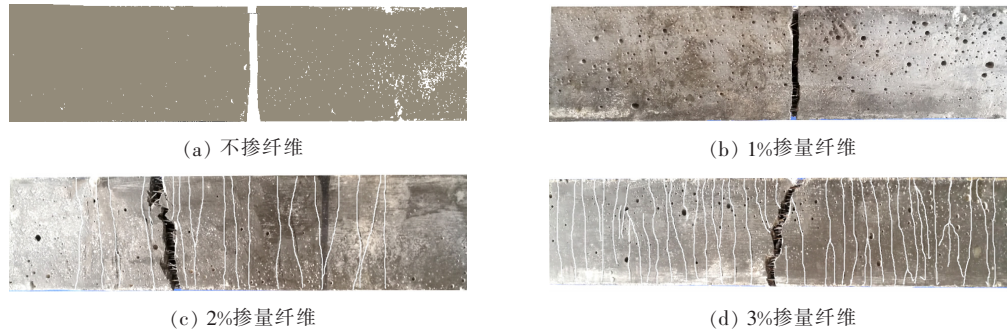


图 3 轴拉试件破坏形态

变,卸载曲线的斜率称为卸载模量,曲线在极限点卸载后可得到相应的卸载模量及相应此时材料的塑性耗能能力(曲线与横坐标所包围的面积)。由图 2 可见:初始加载、基体开裂、峰值点、极限点和卸载点等特征点

间的曲线近似呈线性变化,极限点处卸载后再重新加载时,仍基本回到单调加载曲线的运行路径上。

基于应力—应变关系曲线得到的各试件曲线的特征参数如表 3 所示。

表 3 应力—应变曲线特征参数

试件编号	$\sigma_e /$ MPa	$\epsilon_e /$ 10^{-6}	$\sigma_p /$ MPa	$\epsilon_p /$ 10^{-6}	$\epsilon_u /$ 10^{-6}	$E_c /$ GPa	$\epsilon_r /$ 10^{-6}	$G /$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	μ
DT-S0	8.08	167	8.08	167	167	48.00	167	0.67	1.0
DT-S1	9.82	202	9.82	202	1 613	48.64	1 431	12.59	8.0
DT-S2	11.61	234	12.02	1 883	3 906	48.25	2 750	39.54	16.7
DT-S3	13.18	268	14.76	2 842	5 190	49.16	3 683	66.14	19.4

注:表中 σ_e 、 ϵ_e 分别为初裂应力、初裂应变; σ_p 、 ϵ_p 分别为峰值应力、峰值应变; ϵ_u 和 ϵ_r 分别为极限应变、卸载残余应变; E_c 为抗拉弹性模量; G 为极限点处试件吸收的塑性能量; μ 为延性系数, $\mu = \epsilon_u / \epsilon_e$ 。

由表3可见:

(1) 随钢纤维体积掺量的提高,UHPC材料的初裂应力和初裂应变稍有增加,峰值应力、峰值应变、极限应变、残余应变和耗能能力显著提高;抗拉弹性模量受纤维掺量的影响较小,且与表2所列相应的抗压弹性模量相近,表明开裂前的弹性受力阶段,纤维对基体的加强作用极为有限。

(2) 随钢纤维体积掺量的提高,UHPC材料的初裂应力和初裂应变稍有增加。钢纤维体积掺量为1%、2%和3%试件的初裂应力分别比无纤维试件提高21.5%、43.6%和63.1%;初裂应变分别比无纤维试件提高21.0%、40.1%和60.5%。钢纤维含量对初裂强度和初裂应变的影响是由于钢纤维对基体产生的约束效应所致。

(3) 随钢纤维体积掺量的提高,UHPC材料的峰值应力和峰值应变显著提高。钢纤维体积掺量为1%、2%和3%的试件,其峰值强度分别比无纤维试件提高21.5%、48.7%和82.7%。由于钢纤维的加入,UHPC轴拉试件逐渐由应变软化变为应变强化,使得峰值强度的增加幅度较初裂强度大。钢纤维体积掺量为1%、2%和3%的试件,其峰值应变分别比无纤维试件提高21%、1 028%和1 602%,可见钢纤维体积掺量的增加可以显著改善UHPC的塑性变形能力。

(4) 钢纤维体积掺量对极限应变和残余应变的影响与对峰值应变的影响规律相似。钢纤维体积掺量为2%和3%的试件,其极限应变分别比含1%纤维试件提高142.2%和221.8%,残余应变分别比含1%纤维试件提高92.2%和157.4%。

(5) 钢纤维体积掺量为2%和3%的试件,其耗能能力分别比纤维含量为1%的试件大214%和425%;无纤维试件的耗能能力仅为钢纤维体积掺量1%~3%试件的1%~5%,可见UHPC轴拉时的耗能能力几乎全部由钢纤维的变形提供。

(6) 延性系数随着钢纤维掺量的增加而增加。钢纤维体积掺量为2%和3%试件的延性系数分别比含1%纤维试件增加109%和142.5%,纤维掺量的增加可以显著提升材料的延性。

3 结论

以钢纤维体积掺量为参数,对UHPC进行了轴拉性能试验研究,得到以下结论:

(1) 不掺纤维的UHPC轴拉试件表现出明显的

单缝脆性破坏特征,当纤维掺量增加到2%以上时,则表现出明显的多缝延性破坏特征。

(2) 包括卸载曲线在内的UHPC轴拉应力—应变全曲线在初始加载、基体开裂、峰值点、极限点和卸载点等特征点间的曲线近似呈线性变化,极限点处卸载后再重新加载时,仍基本回到单调加载曲线的运行路径上。

(3) 随钢纤维体积掺量的增加,UHPC材料的初裂应力和初裂应变稍有增加,峰值应力、峰值应变、极限应变、残余应变、耗能能力和延性显著提高。受拉与受压弹性模量相近,材料的塑性耗能能力基本上是由基体内纤维的塑性变形提供。

参考文献:

- [1] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1—24.
- [2] FEHLING E,SCHMIDT M,WALRAVEN J,et al. Ultra-High Performance Concrete: Fundamental-Design-Example[M]. Wilhelm Ernst & Sohn,Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße,2014.
- [3] 原海燕,安明喆,贾方方,等.活性粉末混凝土轴拉性能试验研究[J].工程力学,2011,28(S1):141—144.
- [4] 杨志慧.不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究[D].北京:北京交通大学,2006.
- [5] HASSAN A M T,JONES S W,MAHMUD G H,et al. Experimental Test Methods to Determine the Uniaxial Tensile and Compressive Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)[J]. Construction and Building Materials,2012,37:874—882.
- [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,2016,30(S2):483—486,520.
- [7] 王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等. UHPC的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):165—169.
- [8] WILLE K,EL-TAWIL S,NAAMAN A E. Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) under Direct Tensile Loading[J]. Cement and Concrete Composites,2014,48:53—66.
- [9] 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.
- [10] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等.钢—聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力—应变关系研究[J].土木工程学报,2014,47(7):35—45.