

文章编号:1007-9629(2024)02-0167-07

含粗骨料超高性能混凝土的单轴受拉力学性能

李力剑^{1,2}, 刘素梅^{1,*}, 徐凡丁¹, 徐礼华¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室, 湖北 武汉 430056)

摘要:考虑粗骨料掺量、钢纤维掺量及长径比等因素,研究了含粗骨料超高性能混凝土(UHPC-CA)的单轴受拉力学性能,揭示了纤维增强的机理和粗骨料的作用机制.结果表明:随着粗骨料掺量的增加,UHPC-CA的单轴抗拉强度与变形性能均下降;钢纤维掺量增加、长径比增大对UHPC-CA的受拉力学性能有较大的提升作用;钢纤维与基体间具有良好的握裹力,在基体内出现裂缝后,主要依靠握裹作用承受拉应力;粗骨料的掺入削弱了钢纤维空间分布的均匀性,同时引入了薄弱的粗骨料-基体界面过渡区,对UHPC-CA的受拉性能产生了不利的影响.

关键词:超高性能混凝土;粗骨料;应力-应变关系;纤维增强机理

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.010

Uniaxial Tensile Behavior of Ultra-high Performance Concrete Containing Coarse Aggregate

LILijian^{1,2}, LIU Sumei^{1,*}, XU Fanding¹, XU Lihua¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: The uniaxial tensile behavior of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate(UHPC-CA) was experimentally studied. The coarse aggregate content, steel fiber content and aspect ratio were selected as the main variables. The acting mechanisms of steel fiber and coarse aggregate were revealed. The results show that the uniaxial tensile strength and deformation performance of UHPC-CA decrease with the increase in coarse aggregate content, while the increase in steel fiber content and aspect ratio has a great enhancement effect on the tensile properties of UHPC-CA. There is a good interfacial bonding strength between the steel fiber and matrix. After cracks occur in the matrix, the tensile stress is mainly borne by the bonding force. The incorporation of coarse aggregate weakens the uniformity of the spatial distribution of steel fibers, and introduces the weak coarse aggregate-matrix interfacial transition zones, which adversely affect the tensile properties of UHPC-CA.

Key words: ultra-high performance concrete; coarse aggregate; stress-strain relation; fiber-reinforced mechanism

超高性能混凝土(UHPC)具有优异的力学性能和耐久性,可以满足重大工程在极端环境下安全服役的需求^[1-3],自问世以来就不断被应用于桥梁、建筑、海洋基础设施等工程之中.传统的UHPC具有胶凝材料用量大、生产成本高等缺点,在工程中的应用

受到了一定的限制.在UHPC中掺入适量粗骨料(CA)不仅可以减少胶凝材料的用量^[4],降低工程造价,改善自收缩性能^[5],还可以提高UHPC的弹性模量和抗压强度^[6].因此,含粗骨料超高性能混凝土(UHPC-CA)具有更加广阔的应用前景.

收稿日期:2023-03-07; 修订日期:2023-04-10

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2020CFB793);国家自然科学基金资助项目(51978538)

第一作者:李力剑(1993—),男,河南洛阳人,江汉大学讲师,武汉大学博士生.E-mail: lilijian@whu.edu.cn

通讯作者:刘素梅(1972—),女,湖北汉川人,武汉大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: cdcyk0124@163.com

UHPC的单轴抗压强度与变形是其最基本的力学性能之一. 它既是研究UHPC破坏机理和强度理论的主要依据, 又直接影响UHPC构件的开裂、变形及耐久性. 迄今, 国内外学者考虑纤维掺量^[7]、粗骨料掺量^[8]和粒径^[9]等因素对UHPC-CA力学性能的影响并开展了较为丰富的研究工作, 但研究成果主要集中于其受压性能. 由于受拉试验的难度较大、试验数据的离散性较高, 目前对于UHPC-CA受拉力学性能的研究尚属起步阶段. Shi等^[10]考虑钢纤维掺量, 研究了UHPC-CA单轴受拉的应力-应变关系, 并建立了受拉本构方程. Liu等^[11]进一步研究了粗骨料掺量对UHPC-CA单轴受拉性能的影响. 由此可见, 现有研究并未对UHPC-CA的受拉破坏机理及钢纤维、粗骨料对其受拉力学性能的作用机制展开深入探讨.

本文考虑粗骨料掺量和钢纤维特征参数等因素, 通过单轴受拉试验研究了UHPC-CA的单轴抗拉强度与变形, 探讨了钢纤维增强的机理和粗骨料

的作用机制, 阐明了UHPC-CA单轴受拉破坏的机理, 研究成果可以为工程应用提供一定的支撑.

1 试验

1.1 原材料及配合比

原材料包括: P·O 52.5水泥、高炉矿粉、硅粉、粒径0.212~0.425 mm的石英砂、5.0~10.0 mm的玄武岩、聚羧酸系减水剂(减水率(质量分数)>35%)、镀铜平直钢纤维(抗拉强度2 750 MPa, 直径0.2 mm, 长度分别为6、12、16 mm).

根据文献[12-13], UHPC-CA单轴受拉试验选用 $\phi 75 \times 200$ mm的圆柱体试件, 主要考察因素为粗骨料掺量(体积分数, 0%、10%、20%、30%)、钢纤维掺量(体积分数, 0%、1%、2%、3%)和长径比(30、60、80), 共设置10组试件, 每组5个平行试件, 编号方式为A+粗骨料掺量+S+钢纤维掺量+R+钢纤维长径比. UHPC-CA的配合比见表1.

表1 UHPC-CA的配合比
Table 1 Mix proportions of UHPC-CA

Specimen	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							φ (steel fiber)/%
	Cement	Silica fume	Slag powder	Quartz sand	Water	Admixture	Basalt	
A00S0	829	104	104	1 265	166	33	0	0
A00S2R60	813	102	102	1 239	163	32	0	2
A10S2R60	730	91	91	1 113	146	29	265	2
A20S2R60	647	81	81	986	129	26	530	2
A30S2R60	564	70	70	860	113	23	795	2
A20S0	663	83	83	1 012	133	27	530	0
A20S1R60	655	82	82	999	131	26	530	1
A20S3R60	638	80	80	974	128	26	530	3
A20S2R30	647	81	81	986	129	26	530	2
A20S2R80	647	81	81	986	129	26	530	2

1.2 加载装置

UHPC-CA受拉试验在MTS-311.41加载系统上进行, 夹具由钢承台、钢环、连接套筒和球铰组成(见图1). 球铰包含球头碗和球头连杆2部分, 可以保证试件在加载过程中处于轴心受拉状态. 钢承台分为台座和台面, 台座留有直径为15 mm的小孔, 球头碗与钢承台通过连接套筒和栓钉连接. 试验前, 在钢承台下表面和钢环上表面均匀涂抹高强度结构胶, 将试件两端插入高度为25 mm、内径为77 mm的钢环中; 然后将钢环内侧和试件间的缝隙用结构胶填满, 用铁夹固定后移入烘箱中站立放置, 在55℃环境下烘烤8 h后取出并连接试验机进行试验. 试验采用位移控制加载模式, 加载速率为0.000 6 mm/s, 加

载的同时实时记录引伸计的位移读数, 采集频率5 Hz.

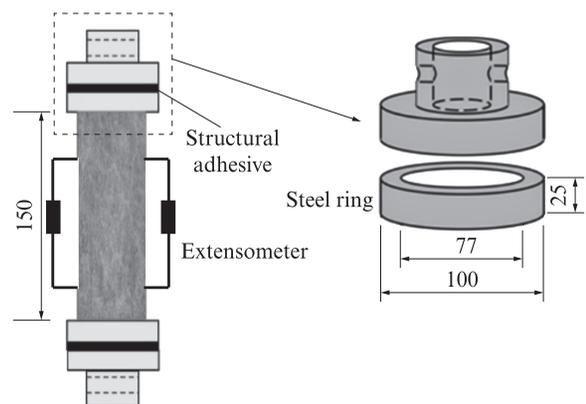


图1 夹具设计

Fig. 1 Fixture design(size: mm)

2 UHPC-CA的单轴受拉力学性能

2.1 破坏形态

图2为UHPC-CA试件的破坏形态.由图2可见:试件受拉破坏时有1条主裂缝,其方向与拉应力方向垂直;主裂缝周围延伸出若干次级裂缝,其方向不固定,宽度较小;不掺粗骨料试件A00S2R60的主裂缝近似为直线,随着粗骨料掺量的增加,主裂缝逐渐变为曲线,破坏断面为不规则曲面,平整度逐渐降低,表明粗骨料会影响基体内部微裂纹的扩展路径.

图3为UHPC-CA试件的破坏断面.由图3可见:

(1)不掺钢纤维试件A20S0的破坏断面平整均匀;掺入钢纤维后,试件破坏断面的平整度较差,断面上有混凝土剥落的痕迹.这表明钢纤维有效抑制了宏观主裂缝的扩展,改变了其扩展方向,当纤维发生界面破坏而逐渐脱黏时,连带部分混凝土一同

脱落.

(2)过高的粗骨料掺量会对钢纤维的空间分布产生不利影响.当粗骨料掺量为30%时,试件破坏断面有大量裸露的钢纤维,且钢纤维的分布不均匀,边缘区域出现了钢纤维结团现象(图3(e)).

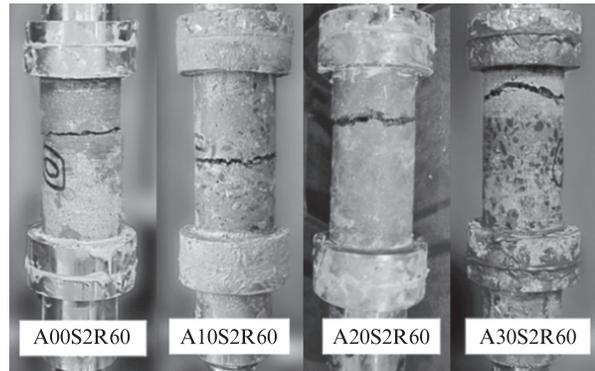


图2 UHPC-CA试件的破坏形态

Fig. 2 Failure patterns of UHPC-CA specimens

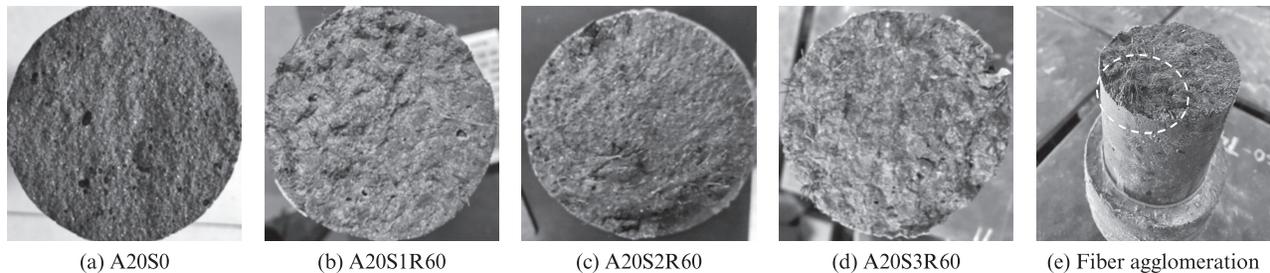


图3 UHPC-CA试件的破坏断面

Fig. 3 Failure surfaces of UHPC-CA specimens

2.2 应力-应变曲线

图4为UHPC-CA试件的单轴受拉应力-应变曲线.由图4可见:

(1)当粗骨料掺量从0%增加到30%时,试件的初裂强度、峰值强度、裂后残余强度和变形能力均有所下降,峰后应力突降幅度增大,这表明掺入粗骨料会增大UHPC的脆性.UHPC-CA试件在发生应力突降后仍具有较高的残余强度,可以继续受力.当粗骨料掺量达到30%时,试件的应力突降幅度超过50%.在曲线形态上,粗骨料掺量越小,曲线的应变硬化阶段形状越饱满,应变硬化阶段持续时间越长,这进一步证明粗骨料会削弱UHPC的延性.

(2)钢纤维对UHPC-CA试件单轴受拉应力-应变曲线的影响显著.未掺入钢纤维试件的单轴受拉应力-应变曲线在经过线弹性段后发生断裂破坏,应力陡降为0.而掺入钢纤维后,试件会在初裂点后保持非线性上升,表现出应变硬化行为.UHPC-CA的初裂强度、峰值强度、裂后残余强度和变形能力均随

着钢纤维掺量的增加而提升,应力突降值则逐渐减少.从曲线形态来看,随着纤维掺量的增加,UHPC-CA试件的单轴受拉应力-应变曲线在峰值强度前更为饱满,上升更平滑,应变硬化阶段更长,所包围的面积更大.以上分析表明钢纤维的增韧阻裂作用对UHPC-CA受拉力学性能的增益效果显著.

(3)当纤维长径比为30时,UHPC-CA试件仍能表现出不同于未掺钢纤维试件的延性破坏特征.随着钢纤维长径比的增大,UHPC-CA试件的初裂强度、峰值强度、裂后残余强度和变形能力均有所提升.这是由于钢纤维长径比越大,纤维脱黏和拔出过程越长,纤维的增韧作用越显著.

2.3 抗拉强度

图5为UHPC-CA试件的初裂强度.图6为UHPC-CA试件的峰值强度.由图5、6可见:

(1)与不掺粗骨料的试件相比,当粗骨料掺量从10%增加到30%时,UHPC-CA试件的初裂强度分别减小了8.0%、9.4%、20.0%,峰值强度分别减小了

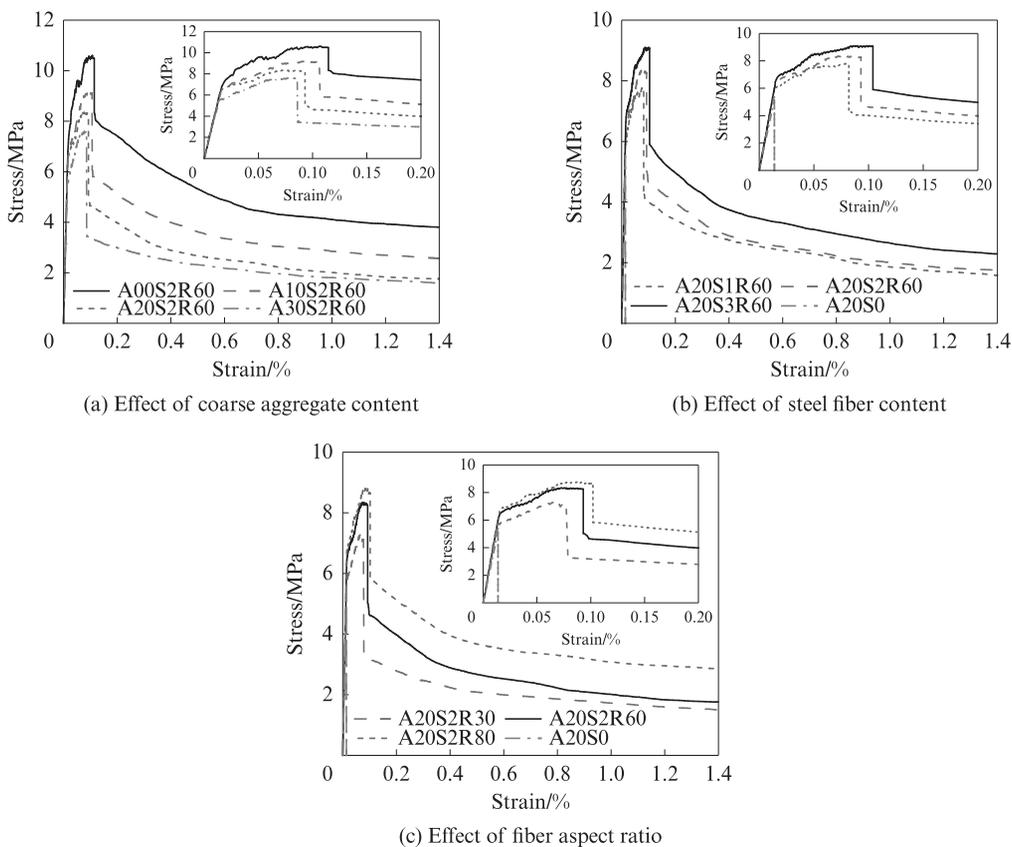


图4 UHPC-CA 试件的单轴受拉应力-应变曲线
Fig. 4 Uniaxial tensile stress-strain curves of UHPC-CA specimen

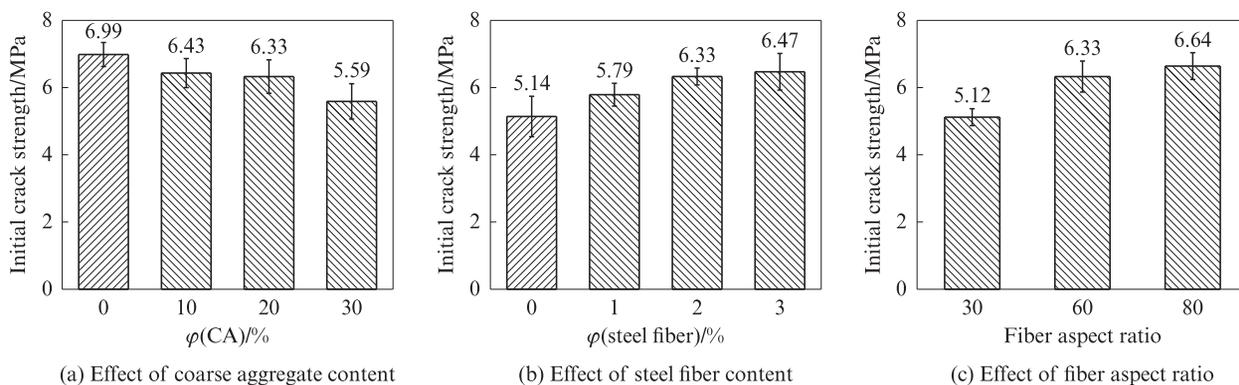


图5 UHPC-CA 试件的初裂强度
Fig. 5 Initial crack strength of UHPC-CA specimen

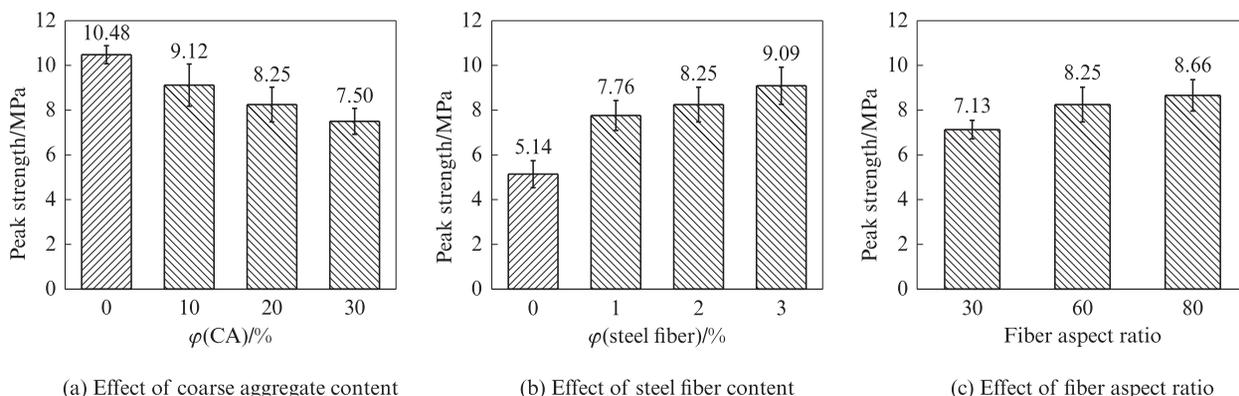


图6 UHPC-CA 试件的峰值强度
Fig. 6 Peak strength of UHPC-CA specimen

13.0%、21.3%、28.4%。这表明粗骨料掺量对峰值强度的影响大于对初裂强度的影响,当粗骨料掺量大于20%时,UHPC-CA试件的初裂强度减小显著。

(2)当钢纤维掺量由0%提高到3%时,UHPC-CA试件的初裂强度分别提高了12.6%、23.2%、25.9%,峰值强度分别提高了51.0%、60.5%、76.8%。通过对比可以发现,钢纤维对UHPC-CA强度的影响程度大于粗骨料,且对峰值强度的增益效果明显高于对初裂强度的增益效果。当钢纤维掺量由2%增加到3%时,UHPC-CA试件的强度增大不显著,这表明掺量过高反而不利于纤维充分发挥其增强作用。因此,UHPC-CA中钢纤维的最优掺量在2%左右。

(3)UHPC-CA试件的初裂强度和峰值强度均随着钢纤维长径比的增大而提高。当长径比由30增大至60、80时,UHPC-CA试件的初裂强度分别提高了23.6%、29.7%,峰值强度分别提高了15.7%、21.5%。与纤维掺量相比,长径比对UHPC-CA强度的影响较小。

3 机理分析

为了探讨钢纤维增强的机理和粗骨料的作用机制,采用场发射扫描电子显微镜(SEM)观测未加载试件切面和破坏试件断裂面的微观形貌。观测前,试样在60℃恒温环境下干燥48h并进行喷金处理,以增强其导电性。

3.1 纤维增强机理

图7为UHPC-CA的SEM照片。由图7可见:

(1)UHPC基体的孔洞较少,无明显缺陷,基体与钢纤维接触紧密,这表明基体与钢纤维间的握裹作用良好(图7(a))。

(2)钢纤维表面包裹着一层混凝土薄层(图7(b)),该薄层在试件浇筑成型时固结于钢纤维表面。

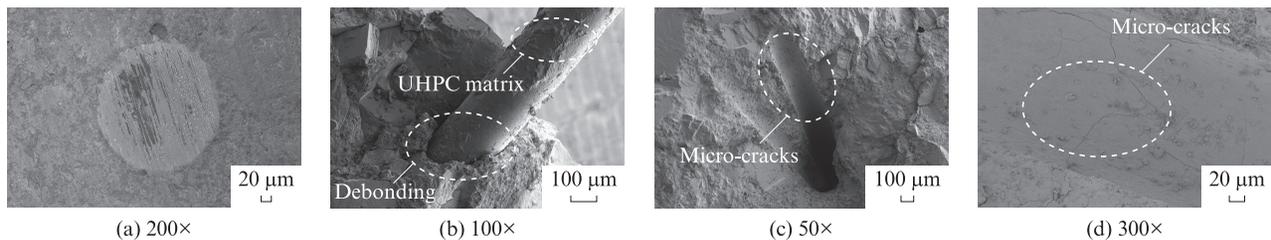


图7 UHPC-CA的SEM照片
Fig. 7 SEM images of UHPC-CA

3.2 粗骨料与钢纤维的相互作用机制

为研究粗骨料与钢纤维的相互作用机制,对粗骨料掺量为0%和30%的立方体试件进行切割、打磨、抛光,获得试件断面中钢纤维的分布情况,结果

当拉应力大于握裹力后,钢纤维开始滑移并最终被拔出,混凝土薄层也随钢纤维一同脱离基体。这表明良好的握裹作用是钢纤维抗拉强度得以充分发挥的前提,可有效抑制裂缝的扩展,提高UHPC-CA的抗拉强度,属于钢纤维的正效应。钢纤维发生滑移后,在其与基体接触处出现了明显的缝隙,表明钢纤维与基体的接触面属于材料的薄弱面^[14],微小裂缝削弱了UHPC基体对钢纤维的握裹作用,属于负效应。特别是钢纤维掺量增加到一定值后,这种负效应会愈加明显,因此需要根据工程实践,综合考虑钢纤维的正、负效应。钢纤维在基体内的分布方向具有随机性。当钢纤维纵向分布时,其分布方向与受力方向一致,此时纤维有效长度较大,其与基体间的握裹力较大。当钢纤维横向分布时,纤维无法直接承受轴向拉力,对UHPC-CA抗拉强度提高作用较弱。

(3)2根相邻纵向分布钢纤维拔出后留下的孔道内有许多混凝土脱落体和微裂纹(图7(c)),而凹槽内裂纹较少。这说明纵向钢纤维拔出时的应力较大,并带离了部分基体,造成其周围出现了较多的微裂纹,而横向钢纤维在拔出前承担的拉应力较小,引起的微裂纹也较小,表明横向钢纤维的握裹作用较弱。当钢纤维相距较近时,薄弱面叠加效应导致了该处的混凝土应力集中现象更显著,因此钢纤维分布的均匀性也是影响纤维增强效果的因素之一。

(4)纤维拔出后的孔道放大后可以看到孔道内布满了划痕和微裂纹(图7(d)),这是纤维在被拔出过程中与基体摩擦产生的。孔道旁的基体中几乎观察不到明显的裂纹,这表明裂纹出现后试件主要依靠钢纤维与基体间的握裹作用承受拉应力,混凝土基体承受的拉应力较小。

见图8。为了使图像更加清晰、直观,对其进行了灰度化处理,只保留钢纤维,图中的白色亮点即为切割抛光后的钢纤维。

从图8中可以看出:不掺粗骨料UHPC基体内

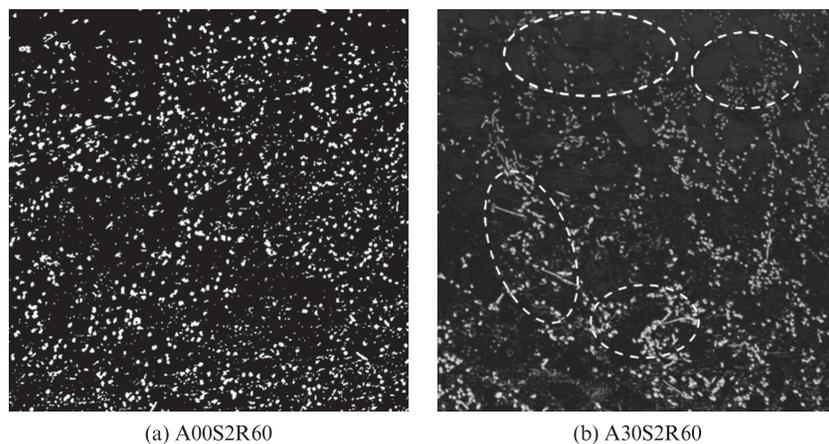


图8 粗骨料对钢纤维分布的影响
Fig. 8 Effect of coarse aggregates on distribution of steel fibers

钢纤维的分布较为均匀;UHPC-CA中钢纤维分布的均匀性明显下降,钢纤维聚集在粗骨料周围,呈包围式分布,出现了纤维结团的现象,表明粗骨料对钢纤维的空间分布具有明显的阻隔作用,使纤维的增韧、增强作用削弱.从图8(b)中还观察到一些横向分布的钢纤维,表明粗骨料的掺入会减小钢纤维沿受力方向分布的概率^[15].

粗骨料形状不规则,表面粗糙,且有微小孔洞,其与胶凝材料间的黏结性能相对较差,与基体间形成了薄弱的界面过渡区.随着粗骨料掺量的增加,薄弱区域增多.此外,粗骨料具有较强的吸水性,在搅拌过程中会吸附周围拌和物的部分自由水,导致此处水胶比的减小,造成粗骨料周围基体水化不充分,形成薄弱区.

3.3 受拉破坏机理

综合考虑试验现象及微观形貌观测结果,总结UHPC-CA单轴受拉破坏的机理如下:当荷载较小时,粗骨料、钢纤维和基体共同受力,应力和应变较小,钢纤维的桥接作用尚不明显,为内部缺陷发展阶段.随着拉应力的增加,粗骨料附近过渡区的微裂纹开始扩展,由于粗骨料附近聚集的钢纤维方向通常与粗骨料表面平行,也与薄弱区微裂纹的发展方向平行,此处的钢纤维无法抑制裂纹的发展.当裂纹进入基体以后,开裂部位的应力开始由钢纤维承担,随着变形的增大,裂纹越来越宽,形成了宏观主裂缝,由于钢纤维的弹性模量远高于基体,其阻裂作用也表现得愈加明显^[16].该阶段裂纹的扩展速率较小,表现出一定的延性.当应力增加到最大值之后,混凝土内部的微裂纹不断发展,并与宏观裂缝连接贯通,裂缝发展迅速,裂缝最大宽度处的钢纤维出现滑移,部分甚至拔出,导致应力出现突降,表现出一定的脆性.当应力突降到一定值后,应变增长速率变大,钢纤维

的桥接作用更显著,使得应力下降速度开始变缓.当宏观裂缝贯穿基体时,拉应力完全由裂缝间残存的钢纤维承担直至试件破坏.

4 结论

(1)随着粗骨料掺量的增加,UHPC-CA的单轴受拉力学性能退化,初裂强度、峰值强度、裂后残余强度和变形能力下降.当粗骨料掺量大于20%时,UHPC-CA试件的抗拉强度和变形能力退化显著.

(2)钢纤维掺量的增加对UHPC-CA抗拉强度有较大的提升作用,其中对峰值强度的提升效果明显高于初裂强度.钢纤维的掺入显著提高了UHPC-CA的受拉韧性,应力-应变曲线的饱满程度提高、峰后应力突降值减少、应变硬化阶段延长.当钢纤维掺量从2%增加到3%时,UHPC-CA强度、变形的提升幅度明显下降.钢纤维长径比对UHPC-CA的影响小于钢纤维掺量,其中长径比为60的钢纤维对UHPC-CA强度、变形的提升幅度最为显著.

(3)钢纤维与UHPC基体间具有良好的握裹力,其在基体中可以被视作“次增强筋”,在UHPC-CA基体内出现裂缝后,主要依靠与基体间的握裹作用承受拉应力.粗骨料的掺入削弱了纤维空间分布的均匀性、减小了其有效长度,并在基体内引入了薄弱面,导致基体内部的缺陷增多,削弱了UHPC-CA的受拉力学性能.

参考文献:

- [1] 王秋维,史庆轩,陶毅,等.活性粉末混凝土抗压力学性能及指标取值[J].建筑材料学报,2020,23(6):1381-1389.
WANG Qiwei, SHI Qingxuan, TAO Yi, et al. Compressive mechanical properties and indexes of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1381-1389. (in

- Chinese)
- [2] 王龙, 池寅, 徐礼华, 等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):781-788.
WANG Long, CHI Yin, XU Lihua, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):781-788. (in Chinese)
- [3] 王晓飞, 王阳平. 钢纤维活性粉末混凝土力学特性[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6):941-945.
WANG Xiaofei, WANG Yangping. Mechanical properties of RPC with different steel fiber volume contents[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6):941-945. (in Chinese)
- [4] LI L J, XU L H, HUANG L, et al. Compressive fatigue behaviors of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 128: 104425.
- [5] YOO D, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73:267-280.
- [6] OUYANG X, SHI C J, WU Z M, et al. Experimental investigation and prediction of elastic modulus of ultra-high performance concrete (UHPC) based on its composition[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 138:106241.
- [7] WU F H, XU L H, CHI Y, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite: The effect of coarse aggregate [J]. Composite Structures, 2020, 236:111810.
- [8] DENG F Q, XU L H, CHI Y, et al. Effect of steel-polypropylene hybrid fiber and coarse aggregate inclusion on the stress-strain behavior of ultra-high performance concrete under uniaxial compression[J]. Composite Structures, 2020, 252:112685.
- [9] ARORA A, ALMUJADDIDI A, KIANMOFRAD F, et al. Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104:103346.
- [10] SHI Z C, SU Q T, KAVOURA F, et al. Uniaxial tensile response and tensile constitutive model of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate(CA-UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 136:104878.
- [11] LIU J Z, HAN F Y, CUI G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 310-318.
- [12] LI L J, XU L H, ZENG Y Q, et al. Understanding the role of coarse aggregate on tensile fatigue behaviors of ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 139:105069.
- [13] 李力剑, 徐礼华, 池寅, 等. 含粗骨料超高性能混凝土单轴受压疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):381-388.
LI Lijian, XU Lihua, CHI Yin, et al. Fatigue performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate under uniaxial cyclic compression [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):381-388. (in Chinese)
- [14] 吴泽媚. 超高性能混凝土中纤维与基体界面粘结性能多尺度研究[D]. 长沙:湖南大学, 2017.
WU Zemei. Multi-investigation on fiber-matrix interfacial bond properties in ultra-high performance concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [15] 程俊. 含粗骨料超高性能混凝土弯曲疲劳性能研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
CHENG Jun. Study on flexural fatigue performance of ultra high performance concrete with coarse aggregate [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [16] 尹从儒. 单轴循环受拉下超高性能混凝土损伤本构关系研究[D]. 武汉:武汉大学, 2021.
YIN Congru. Study on the damage constitutive model of ultra-high performance concrete under cyclic tension [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 166 页)

- management planning-A case study[J]. Waste Management, 2007, 27(3):327-336.
- [ 14 ] KUMAR S, MUCSI G, KRISTÁLY F, et al. Mechanical activation of fly ash and its influence on micro and nano-structural behaviour of resulting geopolymers [J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(3):805-813.