

新型低碳超高韧性纤维混凝土研制与力学特性研究

蔡闽金^{1,2}, 朱海良³, 万洋³, 朱合华^{1,2}, 庄晓莹^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 上海隧道工程有限公司, 上海 200232)

摘要: 混凝土的绿色转型对国家实现双碳发展目标具有重要意义, 结合紧密堆积原理多级划分基体组分, 采用高掺量工业废料超细粉煤灰作为低碳节能新型混凝土的重要组成部分, 成功研制新型低碳超高韧性混凝土(LC-UHTC)。研究表明: LC-UHTC 极限拉伸应变达 6.38%, 拉伸强度达到 10.2 MPa, 拉伸强度较其他同类材料增比达 60% 以上; LC-UHTC 拉伸强度、拉伸韧性在应变各个阶段均表现优异, 在实际应用过程中具有更高的安全性能; LC-UHTC 的抗压强度达到 84.35 MPa, 高于其他同类材料 30%~86%; LC-UHTC 在环保、抗拉、增韧、抗压方面表现出了综合的性能优势, 可为新型混凝土的绿色转型提供参考价值。

关键词: 纤维混凝土; 绿色超高韧性; 应变硬化; 双碳目标; 绿色转型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Mechanical Properties of Green Ultra-High Toughness Fiber Concrete

CAI Minjin^{1,2}, ZHU Hailiang³, WAN Yang³, ZHU Hehua^{1,2}, ZHUANG Xiaoying^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: The green transformation of concrete is of great importance for China to achieve the dual carbon development goal, this paper, combining the principle of compact stacking with multi-level grain size of matrix components and using high dosing industrial waste ultra-fine fly ash as an important component, successfully develops a new low carbon ultrahigh toughness concrete (LC-UHTC). The results show that the ultimate tensile strain of LC-UHTC reached 6.38%, the tensile strength reaches 10.20 MPa, and the tensile strength increases by more than 60% compared with other similar materials.

The tensile strength and strain energy of LC-UHTC are excellent at all stages of strain, indicating that LC-UHTC has a higher safety performance in practical application. The compressive strength of LC-UHTC reaches 84.35 MPa, which is 30% - 86% higher than that of other similar materials. LC-UHTC shows comprehensive performance advantages in environmental protection, tension, toughness and compression, which can provide reference value for the green transformation of new concrete.

Keywords: fiber reinforced concrete; green ultra-high toughness; strain hardening; dual carbon goals; green transition

水泥作为基础设施的重要组成部分, 是多数土木工程建设不可或缺的材料。2021 年全球水泥产量达到了 43.1 亿 t, 中国水泥产量达到了 23.7 亿 t, 占全球水泥生产总量的 55%。据研究表明, 每生产一吨的水泥会产生几乎等量的二氧化碳^[1], 水泥工业产生的二氧化碳占据了全球二氧化碳总量的 5% 以上。2022 年我国将“碳中和”、“碳达峰”的双碳目标列入十四五规划发展目标, 力争 2030 年我国达到二氧化碳排放峰值, 争取 2060 年实现碳中和。我国是混凝土基础建设发展大国, 水泥作为混凝土的主体胶凝材料因其高强度与实用性是目前建设中使用最广泛、消耗量最大的材料, 因此实现混凝土中水泥材料的降碳减材对实现双碳目标具有重大意义。

传统混凝土在工程施工到结构维护的过程中, 需要经受外界持续的荷载作用, 包括由高温、蠕变、收缩等引起的体积改变, 由碱骨料反应、冻融循环等引起的材料力学特性老化。因混凝土自身抗拉强度低、脆性大, 结构在全寿命周期中承受前述可能作用的时候^[1], 难以避免会产生开裂的现象, 裂缝的产生

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 上海市科技创新行动(22JC1404100), 国家自然科学基金项目(52278411)

第一作者: 蔡闽金, 博士生, 主要研究方向为超高韧性混凝土材料。E-mail: minjincai@tongji.edu.cn

通信作者: 庄晓莹, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为计算岩石力学、土木工程先进材料等。

E-mail: xiaoyingzhuang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

会极大地影响结构的安全性及耐久性。

高延性混凝土是一种新型的混凝土材料,具有较普通混凝土高两个数量级的应变能力及更高的抗拉强度,可克服传统混凝土材料脆性大、抗拉强度不足的缺点,最早由密歇根大学的 Victor Li 教授提出^[2-4],命名为 ECC (engineered cementitious composite),后续不同学者对其特性展开了多方面的研究,并提出了不同的命名方式^[5-6]。ECC 研制过程中,首先需要对混凝土基体进行改良,结合新型的搅拌工艺,在新型混凝土基体中掺入纤维材料实现水泥基复合材料的综合性能提升。然而通常高强高延性水泥基复合材料中,水泥的用量占比较大^[7-8],较普通混凝土材料的水泥用量提升了一倍以上。虽然高延性混凝土性能上较普通混凝土在延性、抗裂性能上得到较大的提升,但水泥大量的使用使得二氧化碳的排放有增无减。

粉煤灰作为一种烧煤发电厂的工业废料^[9-10],主要成分为二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙等,均为水泥水化反应的重要成分。研究表明,采用工业废渣取代水泥质量的 80%,可减少 66% 的二氧化碳排放^[11]。以往多采用在混凝土中添加粉煤灰取代水泥的方式研制绿色高延性混凝土,不仅实现了工业废料的二次利用,节能减材,同时粉煤灰有利于提高新拌混凝土的流动性^[12],增强混凝土自密实程度,增强纤维和混凝土界面的粘合性。在混凝土强度方面,由于粉煤灰长期的二次水化特性可改善混凝土的微观结构,有利于混凝土强度的持续增强,对于结构的自修复特性有很好的促进作用。国内外学者对基于粉煤灰的绿色高延性混凝土进行了研究。Kan Lili^[13]研究了不同钙含量的高掺量粉煤灰对 ECC 力学特性的影响,结果表明钙的含量有利于提高混凝土的抗压强度,对拉伸性能影响不大;张志刚^[14]研究了不同温度与粉煤灰掺比量的 ECC 的力学性能;杨恩华^[15]研究了不同粉煤灰掺量下的 ECC 力学特性,研究表明高掺量的粉煤灰有利于改善微观结构特性并提高混凝土的延性,减少裂缝的宽度,从而提高开裂结构的自修复性能。

然而目前的 ECC 材料仍然存在各种问题,集中表现为强度及韧性不足,特别是粉煤灰质量占比达 50% 以上的时候,力学性能表现为抗压强度小于 30 MPa、抗拉强度低于 5 MPa,使得绿色高延性混凝土的使用范围受到较大的限制。另外一方面,粉煤灰表面结构致密,早期化学活性低,现阶段研制的粉煤灰绿色高延性混凝土常用的粉煤灰通常采用一级粉

煤灰,平均粒径在 35 μm 左右,而用于提升材料韧性的纤维直径通常在 20~40 μm ,考虑粒径组合形式、材料活性等综合方面,选用较一级粉煤灰更细的超细粉煤灰研制超高韧性纤维混凝土,存在进一步提升材料整体性能的可能性,而现有研究缺乏对超细粉煤灰 ECC 的研制。

因此,为了克服上述的不足,本文从细观力学角度结合材料微观特性及紧密堆积原理,采用超细粉体研制低碳型超高韧性 ECC 混凝土材料,实现了新型低碳 ECC 的高抗拉强度(大于 10 MPa)、高延伸率(大于 6%)、高抗压强度(大于 80 MPa),命名本研究的新型低碳超高韧性混凝土为 low carbon ultra-high-tough-concrete, LC-UHTC。

1 机理分析

研制高掺量粉煤灰的超高韧性混凝土,一方面需要提高基体开裂强度及断裂韧度,另外一方面需要提高纤维的桥接强度及桥接余能。只有基体断裂韧度和纤维桥接性能的同时提升,才可以促使混凝土实现强度、延性的提升。对于提高纤维桥接性能,通过前期对比,本研究选用高弹性模量、高抗拉强度的超高分子聚乙烯纤维,其表面的疏水性可降低纤维和基体界面之间的粘接力,而超高分子聚乙烯纤维高弹模、高抗拉强度则有利于纤维在基体摩擦滑移过程中保持较好的完整性,保证材料具有更好的拉伸性能^[16]。

UHPC 是一种超高抗压强度的新型混凝土材料,其抗压强度可达到 800 MPa 以上。UHPC 紧密堆积理论可用于设计超高强度韧性纤维混凝土,区别于普通混凝土的大粒径基体组分,UHPC 基体由一系列小粒径粉体组成,包含石英砂、硅灰等。从物理层面上,UHPC 通过较低水胶比下的不同粒径区间粉体组合形成最佳紧密堆积的形式,实现混凝土最小孔隙率。从化学层面上,基体中的超细粉体比表面积大,基体组分活性高,可极大地促进水化反应,最大化地促使硅酸盐 C-S-H 的形成^[17]。因此,本研究所发展的低碳超高韧性混凝土 LC-UHTC,结合 UHPC 的紧密堆积的理念,通过对高掺粉煤灰 ECC 的基体组分进行严格分级控制,形成各组分的紧密堆积状态,来实现高强度、高韧性的力学性能。此外,通过优化粒径分布和水胶比,本研究实现了更高的力学性能和耐久性,同时有效降低了碳足迹和环境影响,推动了绿色可持续发展的进程。

2 试验内容

本文开展了对绿色超高韧性纤维混凝土 LC-UHTC 拉伸性能、抗压性能、拉伸破坏模式的测试。试件破坏过程中,裂缝的全局演变过程及裂缝数量、宽度特性通过数字图像关联技术(digital image correlation method, DIC)进行采集。

2.1 材料特性

结合第1节的理论分析,保证基体的密实度是低碳高韧性 ECC 研制核心要点之一,密实的基体和纤维之间可产生更高的界面摩擦力,提升材料拉伸性能。而根据最小用水量原理^[18]可知,固体粉末变成浆体的最小用水量体积和粉体颗粒之间的空隙体积近似相等,表明最低水胶比越小,则粉体颗粒之间越加密实。因此,可用最低水胶比对固定配比下的一级粉煤灰和超细粉煤灰的基体进行堆积密实度判定,初步确定超细粉煤灰配比的可行性。

本研究设定粉煤灰质量与水泥质量比为4:1,该固废取代水泥重度超过现有粉煤灰高延性混凝土的取代重度,为目前最高取代比重。水泥采用粒径尺寸为10~35 μm 的 PO52.5 水泥,石英砂采用0~100 μm 的粒径,砂胶比定为0.3。高性能聚羧酸减水剂掺和质量为胶凝材料质量的1.5%,在初期配置材料阶段,减水剂超额配置,促使最低用水量试验过程中,水作为唯一主导基体由粉末状态转变浆体的控制因素,

从而获取对应基体组分下的最低用水量。表1展示了用于最低用水量试验的初始配比参数表。

表1 初步配比参数表

Tab. 1 Proportioning parameters

水泥	粉煤灰	石英砂	高性能减水剂
0.2	0.8	0.3	0.015

首先将粉煤灰、水泥、石英砂、减水剂倒入搅拌机中,搅拌1 min后,逐步加水并快速搅拌,当拌合物从潮湿的固体变成平坦均匀的浆体时,停止加水,记录当下浆体的水胶比,作为该组分下的最低水胶比。通过测试,该配比下,一级粉煤灰和超细粉煤灰对应的最低水胶比分别为0.203、0.189。超细粉煤灰的最低水胶比低于一级粉煤灰6.9%,表明该配置下超细粉煤会具有较一级粉煤灰更加密实的堆积状态,初步确定了后续试验的可行性。上述确定了配比对应的粉煤灰类别以及最低水胶比后,可通过试验确定最佳减水剂量。首先,将超细粉煤灰、水泥、石英砂倒入搅拌机中,搅拌1 min后,加入最低用水量的水继续搅拌,并逐步添加减水剂的量,直至干料搅拌成平坦的浆体,则确定了最适量的减水剂掺量,最终配比见表2,PE纤维的参数见表3。

表2 配比参数表

Tab. 2 Proportioning parameters

水泥	超细粉煤灰	超细石英砂	水	高性能减水剂	PE纤维
0.2	0.8	0.3	0.189	0.012	0.01

表3 PE纤维的性能参数

Tab. 3 Performance parameters of PE fiber

直径/ μm	长度/mm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗拉强度/GPa	弹性模量/GPa	断裂延伸率
25	18	1	3	120	$\leq 3\%$

2.2 搅拌工艺

搅拌采用JJ-5型行星式搅拌机,搅拌速度分为两档位,低速档位自转(140 \pm 5) $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、公转(62 \pm 5) $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,高速档位自转(285 \pm 10) $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、公转(125 \pm 10) $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。搅拌过程首先将干料混合后,低速搅拌1 min,让不同干料不同成分充分且均匀地分散开,然后在搅拌桶中倒入减水剂和水,低速搅拌3 min,持续搅拌直到混合物成为液态,然后高速搅拌5 min,逐步加入纤维材料,充分地分散混凝土中的纤维。最后将新拌混凝土倒入模具中,在振动台上振捣,室温下混凝土试块在模具中水化1 d后脱模,在标准养护室养护28 d,再进行各项力学性能测试。

2.3 试件及加载设置

材料的拉伸应力应变全曲线通过哑铃型狗骨试件测试^[19],试件中间测试段的横截面面积较小,保证测试过程中间测试段最先达到拉伸强度极限值。在日本JSCE2008标准的狗骨试件尺寸基础上,模具缩短了两端哑铃的尺寸,以节省成型消耗的材料。拉伸试样个数为3。狗骨拉伸试件尺寸见图1。

单轴拉伸(图2)性能测试遵循日本规范^[19],通过10 t微机控制万能试验机固定位移控制速度1 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 开展。在试件的80 mm标准测试段的两端通过夹具固定两个位移计,用来测试标准测试段的拉伸应力应变全曲线。试验前,试件表面先通过黑白漆进行散斑处理,数码相机用于采集狗骨试件

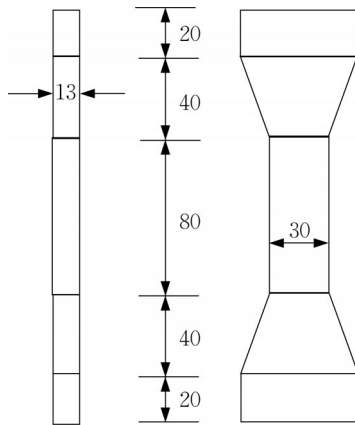


图 1 拉伸试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Dimensional drawing of tensile test piece (unit: mm)

表面的二维散斑图片。后续测试过程中通过数字图像关联技术(digital image connection method, DICM),采集狗骨试件拉伸过程中的全场应变及裂缝变化过程,照片采集频率设置为 10 s 一张。



图 2 单轴拉伸装置

Fig. 2 Uniaxial stretching device

根据国内规范^[20],对于 50 mm×50 mm×50 mm 的立方块单轴抗压试验(图 3),采用 1 MPa·s⁻¹的荷载控制方式加载,抗压测试数量为 3 组,对抗压试件表面进行了散斑的处理,通过 DIC 技术采集抗压过程中的全局裂缝变化。照片的采集频率设置 10 s 一张。

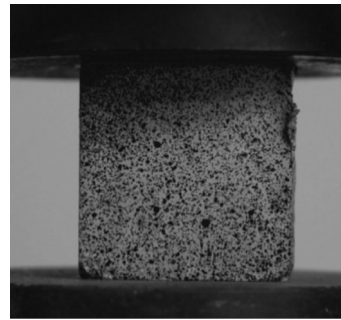


图 3 单轴抗压试验装置

Fig. 3 Uniaxial compression test device

3 结果分析

3.1 拉伸强度

表 4 展示了 LC-UHTC 的拉伸特性,LC-UHTC 的平均峰值应力在 10.2 MPa,变异系数 7.9%,平均初裂强度为 3.3 MPa,变异系数 4.2%,峰值应力与初裂应力的比值平均值达到 3.09,变异系数 4.5%。

表 4 LC-UHTC 的拉伸特性

Tab. 4 Tensile properties of LC-UHTC

	应力/MPa					峰值应力与初裂应力之比	
	初裂	$\epsilon=0.02$	$\epsilon=0.04$	$\epsilon=0.06$	峰值		
LC-UHTC	试件 1	3.11	6.12	7.88	8.71	9.18	2.95
	试件 2	3.40	8.05	9.34	10.07	10.28	3.03
	试件 3	3.40	8.04	9.66	11.12	11.14	3.28
	均值	3.30	7.40	8.96	9.97	10.20	3.09
	变异系数/%	4.2	12.3	8.7	9.9	7.9	4.5

为了更好地说明本文中研制的绿色超高韧性纤维混凝土 LC-UHTC 的性能优势,本文对比了以往不同类型的低碳(绿色)高延性混凝土材料^[13,21-22],同时组别编号采用原作者文章中的命名方式。编号 CRS 组为基于 PE(Polyethylene)纤维研究的 60% 粉煤灰掺量的 ECC^[21];编号 M1 组为基于 PVA 纤维研制的 80% 粉煤灰掺量的 ECC^[22];编号 A 为基于 PVA(Polyvinylalcohol)纤维研制的 70% 粉煤灰掺

量的 ECC^[13]。由于文献中多条应力-应变曲线重叠,图像截取的数据会与原数据有微小误差。本文研制的超高韧性纤维混凝土 LC-UHTC 与其他材料的拉伸应力应变曲线对比如图 4 所示,为了方便对比,统一了坐标轴数值范围,纵坐标抗拉强度范围为 0~12 MPa,横坐标应变范围为 0~0.12。

表 5 总结了不同类型的混凝土与不同高掺量粉煤灰的 ECC 拉伸性能参数,不同组材料性能差异较

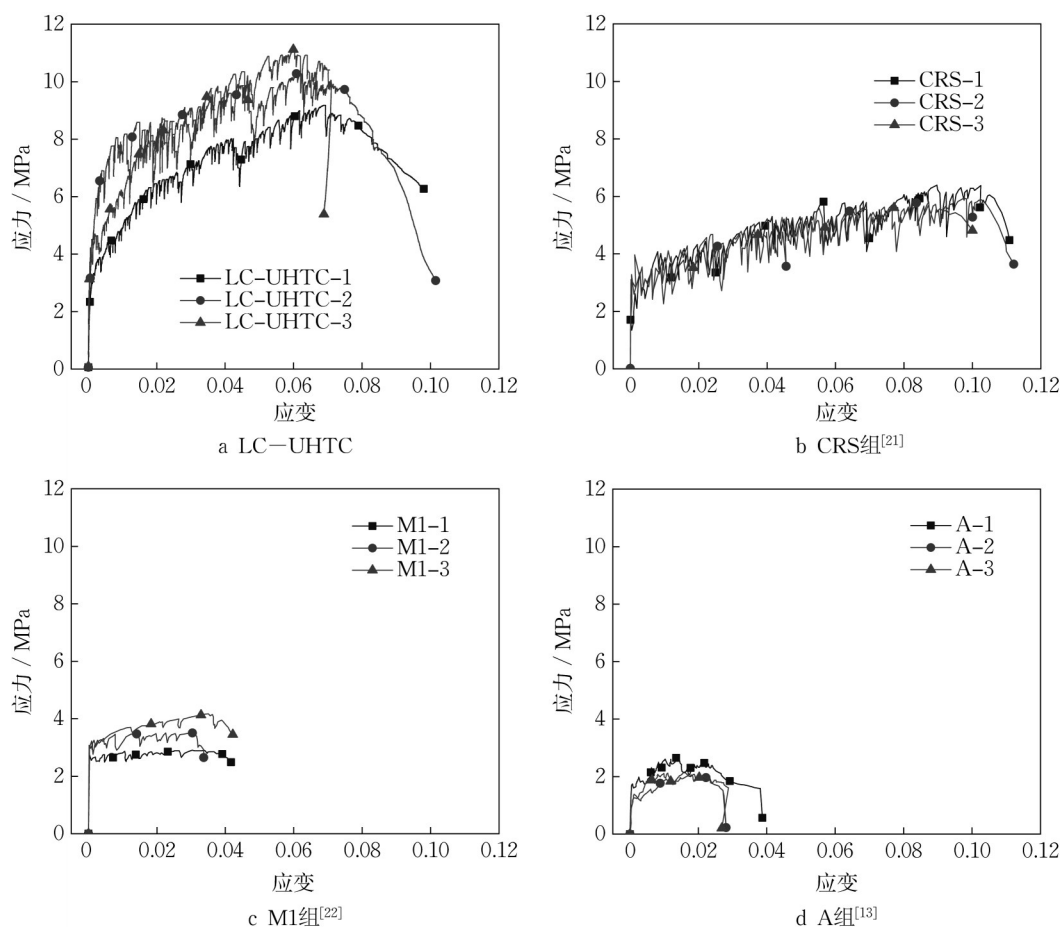


图4 拉伸应力应变图

Fig. 4 Diagram of tensile stress-strain

大。其中基于PE纤维的ECC较PVA纤维ECC具有明显的更高的拉伸应变和极限拉伸强度。基于PE纤维材料的绿色高延性混凝土的拉伸应变高于PVA纤维一倍以上。通常基体中粉煤灰掺量的提高会带来纤维和基体之间的界面摩擦力的减弱,然而由于本文采用了粒径更加细小的粉煤灰且在级配方面采用多级调整,促使基体的各个组分更加紧密地堆积,有利于减少最低水胶比,从而减少基体内部的空隙,从纤维受力角度减少纤维局部的应力集中状况,防止纤维由于局部应力过高而发生断裂,最大限度地增强纤维的桥连性能。因此,LC-UHTC即使在粉煤灰掺量达到80%的时候,基体的抗拉强度依旧达到了比较高的水准10.2 MPa,分别高于CRS

组69.44%,高于M1组100%,高于A组339.66%。注意到,LC-UHTC的粉煤灰占比高于CRS组,但是强度反而更高,侧面地说明紧密堆积的基体状态对于提高纤维桥接性能有较大帮助。LC-UHTC的拉伸应变6.38%低于CRS组10.12%,低于CRS组百分比36.93%,这是由于CRS组在基体中引入了粗河沙,增加了基体的缺陷,促使该组具有较大的极限拉伸应变。对于建筑材料在工程中的实际应用而言,需要考虑一定的材料安全性能储备,即材料在达到极限承载力之前的各个应变阶段拥有更高的承载性能至关重要。表6列出了LC-UHTC在各个应变阶段相比较于其他材料的力学参数。

表5 拉伸性能参数对比

Tab. 5 Comparison of tensile property parameters

编号	初裂/MPa	变异系数/%	极限拉伸强度/MPa	变异系数/%	极限拉伸应变/%	变异系数/%
LC-UHTC	3.3	4.20	10.2	7.90	6.38	0.39
CRS ^[21]	3.24	1.23	6.02	3.32	10.12	9.49
M1 ^[22]	3.6	13.89	5.1	3.53	3.67	16.35
A ^[16]	1.02	14.00	2.32	12.07	3.12	16.67

表6 各个应变阶段材料应力对比

Tab. 6 Comparison of material stress at each strain stage

应变	应力/MPa			
	LC-UHTC	CRS	M1	A
0.02	7.40	4.16	3.29	2.07
0.04	8.96	4.70		
0.06	9.97	5.07		
0.08		5.59		

当试件处于0.02应变阶段的时候,LC-UHTC的拉伸应力强度高于CRS组78%、高于M1组125%、高于A组258%。在材料初期变形阶段具有较高的应力强度值,大大提高了材料的适用范围,也提高了材料使用时的安全性。PVA纤维对应的高粉煤灰掺量组峰值应变变能力不超过4%,因为PVA纤维界面和混凝土基体之间具有较高的粘接强度^[8],当拉伸试件开裂之后,界面的高粘接性能会阻碍PVA纤维和基体之间的相对滑移,不利于提高整体拉伸试件的变形能力。对于4%与6%应变阶段,LC-UHTC的拉伸应力高于CRS组91%和97%,可见LC-UHTC在峰值应变之前的各个阶段,都具有较高的强度优势。

3.2 拉伸韧性

通过应力应变曲线积分的形式获取材料性能的拉伸应变能,反映材料吸收能量的能力。应变能计算示意图见图5,不同材料的应变-应变能曲线见图6。

基于PE纤维研制的LC-UHTC组、CRS组的材料拉伸韧性明显优于基于PVA纤维而研制的M1组和A组。PE纤维对拉伸应变的提升能力是PVA纤维的5倍左右。而LC-UHTC组的拉伸应变能随着拉应变增加而增加的斜率近乎是CRS组1.5倍左右。LC-UHTC组的拉应变能峰值比CRS组的高19.06%。LC-UHTC的峰值应变能达到503.19 kN·m,变异系数4.33%,是初裂应变能的450倍,表

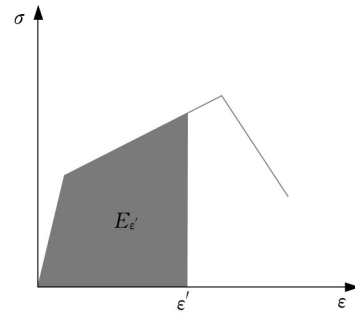


图5 应变能计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of strain energy calculation

明基体组份的紧密堆积使得材料具有较好的应变硬化特性。不同应变条件下,各组的拉应变能,见图6。不同应变阶段的拉伸韧性表汇总见表7。

0.02应变阶段LC-UHTC组的拉伸应变能比CRS组、M1组分别多72.25%、88.61%,然而这个应变阶段应变能波动较大,变异系数达到了19%;0.04应变阶段LC-UHTC组拉伸应变能比CRS组多81%,变异系数减少到14%;峰值应变阶段LC-UHTC组拉伸应变能比CRS组、M1组、A组多19.06%、363.14%、1952.52%,此时变异系数最小为4%。总体上看,LC-UHTC在各个应变阶段具有较高的拉伸应变能,表现出优异的高韧性特性,而材料在各个应变阶段应变能波动情况较其他材料明显。超细粉体一方面增加了基体和纤维的界面粘合力从而提高了材料拉伸韧性,另外一方面,高强的基体对纤维的分散程度更加敏感,从而使材料表现出更大的韧性波动。

3.3 裂缝破坏模式

图7展示了拉伸裂缝发展模式,由于不同截面的孔隙、纤维分散程度、基体粒径分布形式是有差异的,因此不同截面开裂的强度也不一样。拉应变从0增加到2%过程中拉伸应力的增幅较大均超过1MPa,特别是应变从0增加到1%时,拉伸应力的增幅达到了4.92MPa,应变2%增加到7%过程中,每

表7 LC-UHTC的拉伸应变能

Tab. 7 Summary of LC-UHTC tensile strain energy

	应变能/kJ			平均值/kJ	变异系数/%
	试件1	试件2	试件3		
初裂	1.13	1.23	1.01	1.12	9.66
ε=0.02	122.18	143.96	97.10	121.08	19.37
ε=0.04	297.24	316.00	237.44	283.56	14.47
ε=0.06	503.44	503.90	397.69	468.34	13.06
峰值应变	505.53	523.71	480.32	503.19	4.33
峰值应变能与初裂应变能之比	448.66	426.53	475.00	450.06	5.39

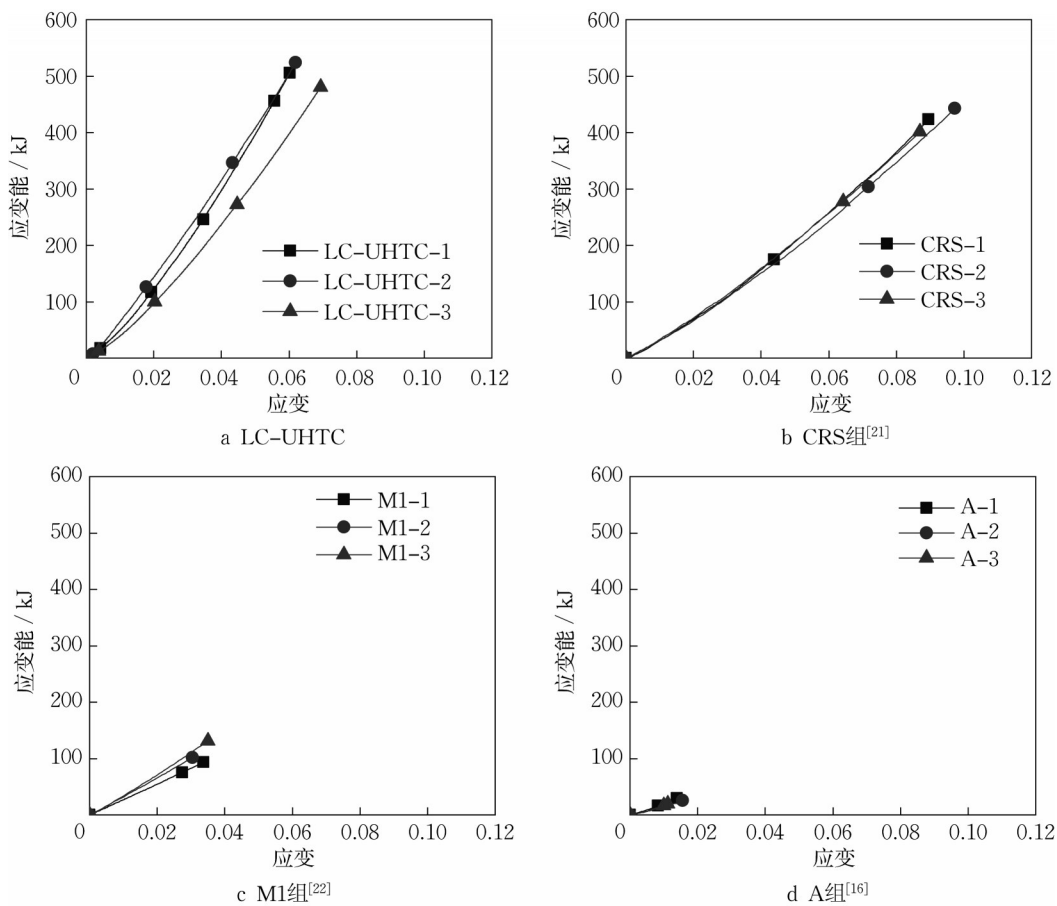


图6 不同材料拉伸应变-拉伸应变能曲线示意图

Fig. 6 Schematic diagram of tensile strain-tensile strain energy of different materials

增加1%的应变,应力的增幅均不超过1 MPa,反映出LC-UHTC具有相对稳定的应变硬化的能力。每一次基体开裂对应的荷载值不同且开裂截面位置不同,表明了不同截面存在不同的基体断裂强度,即反映了基体强度的变异性,基体开裂强度从3~10 MPa不等。

图8展示了UHTC狗骨试件的裂缝形式,在所有截面中,不同裂缝的起裂形式有差异,有些是单独成为一条裂缝,有些则是基于主裂缝而产生的伴随裂缝。裂缝之间的平均间距为2~2.5 mm左右,拉伸试件裂缝的平均数量为44条,其中最多为54条,平均裂缝的残余宽度仅为80 μm ,较小的裂缝宽度有助于提高混凝土结构的自修复性能。

3.4 抗压强度

图9展示了抗压强度及抗压试件的裂缝。LC-UHTC立方体抗压强度84.35 MPa,变异系数0.9%,相比于CRS组、M1组、A组,LC-UHTC的立方体抗压强度分别提高了30%、82%、86%。LC-UHTC表现出优异的抗压性能。

立方体试件破坏的时候在试件表面产生了多种

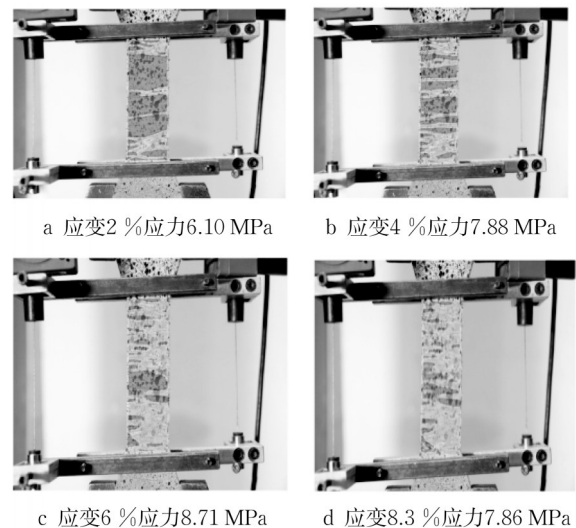


图7 裂缝发展

Fig. 7 Crack development

形式裂缝,多数裂缝为斜裂缝,试件表面产生和最大主应力方向呈一定角度的斜裂缝,裂缝开裂之后试件并没有崩出碎片,破坏的试块依旧保持较好的完整性,没有彻底地失去承载能力。纤维的桥连能力

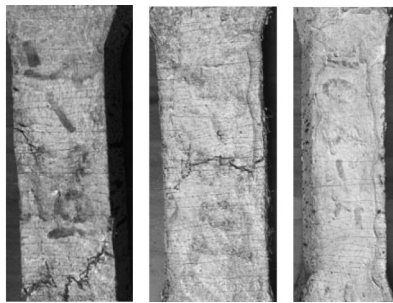
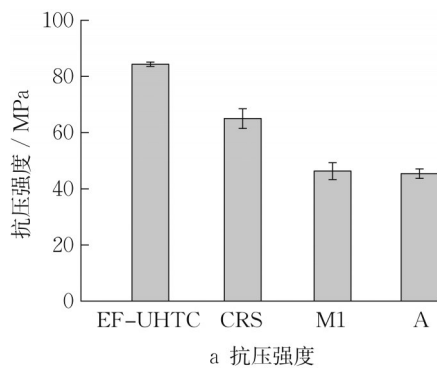
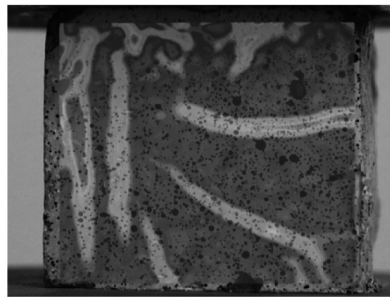


图8 UHTC狗骨试件细小裂缝示意图

Fig. 8 Fine cracks in UHTC dog bone specimens



a 抗压强度



b 受压破坏破坏裂缝

图9 抗压强度及裂缝示意图

Fig. 9 Schematic diagram of compressive strength and crack development

使得材料从受压脆性破坏转变为延性破坏。

4 结语

本文紧密围绕国家双碳发展目标,结合紧密堆积原理,采用高掺量工业废料超细粉煤灰作为低碳节能新型高性能混凝土的重要组成部分,成功研制新型低碳超高韧性混凝土LC-UHTC,其力学特性如下:

(1)LC-UHTC的极限拉伸应变6.38%,拉伸强度达到10.20 MPa,比其他绿色高延性材料的拉伸强度增加比重达60%~330%。峰值应力与初裂应力的比值达3.09,试件受拉过程中,产生饱和细密的

裂缝,表现出良好的应变硬化性能。

(2)LC-UHTC拉伸强度和拉伸韧性在应变各个阶段均表现优异,在0.02应变阶段拉伸强度就高于其他材料78%~258%,拉伸韧性高于其他材料72.25%~88.61%,表明LC-UHTC在实际应用过程中在初期变形阶段具有更高的安全性能。

(3)LC-UHTC的立方体抗压强度达到84.35 MPa,抗压强度高于其他绿色高延性混凝土抗压强度30%~86%,试件在受压破坏过程中,依旧保持整体结构的相对完整,不发生脆性压坏的现象。

(4)LC-UHTC在环保、抗拉、抗压等方面表现出了综合的性能优势,可为新型混凝土的绿色转型提供参考价值。

作者贡献声明:

蔡闽金:试验的设计者,试验研究的执行人,完成数据分析以及论文初稿写作与修改。

朱海良:指导试验设计、数据分析。

万洋:指导试验设计、数据分析。

朱合华:参与试验研究和试验结果分析,参与论文修改。

庄晓莹:项目的构思者,试验研究顾问,试验结果分析与论文修改。

参考文献:

- [1] WANG S, LI V, Engineered cementitious composites with high-volume fly ash [J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104(3):233.
- [2] LI V. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215.
- [3] LI V, LEUNG C, Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246.
- [4] LI V. ECC-tailored composites through micromechanical modeling [J]. *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, 1998, 2: 64.
- [5] LI V, WU C, WANG S, *et al.* Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. *Materials Journal*, 2002, 99(5): 463.
- [6] YU K Q, YU J T, DAI J, *et al.* Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 217.
- [7] YU K Q, WANG Y C, YU J T, *et al.* A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 410.
- [8] ZHANG Z G, YUVARAJ A, DI J, *et al.* Matrix design of

- light weight, high strength, high ductility ECC [J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 188.
- [9] MAHMOODI S, SADEGHIAN P. Self-healing of engineered cementitious composites under reversed and sustained loading conditions[J]. Structural Concrete, 2022, 23(4): 2450.
- [10] LI Y J, ZHOU S Q, YIN J, *et al.* The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar, and concrete [C]// Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. Beijing: [s.n.], 2004: 339-345.
- [11] VARGAS J, HALOG A. Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 948.
- [12] ŞAHMARAN M, LI V. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(11): 33.
- [13] KAN L L, SHI R X, ZHU J. Effect of fineness and calcium content of fly ash on the mechanical properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 476.
- [14] ZHANG Z G, QIAN S, MA H. Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 17.
- [15] YANG E H, YANG Y, LI V. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(6): 620.
- [16] YU J, DONG F, YE J. Experimental study on the size effect of ultra-high ductile cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117963.
- [17] YU K Q, ZHU H, HOU M, *et al.* Self-healing of PE-fiber reinforced lightweight high-strength engineered cementitious composite[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123: 104209.
- [18] LARRARD F D. Concrete mixture proportioning: A scientific approach[M]. London, England: CRC Press, 1999.
- [19] YOKOTA H, ROKUGO K, SAKATA N. JSCE recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks[C/CD]//High performance fiber reinforced cement composites. Tokyo, Japan: Springer, 2008.
- [20] CECS. Standard test methods for fiber reinforced concrete [C]// Standard Test Methods for Fiber Reinforced Concrete. Beijing: Engineering and Construction Society, 2009:44-48.
- [21] GUAN X, LI Y Z, LIU T A, *et al.* An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 461.
- [22] 张志刚, 赵林, 张沛, 等. 亚高温下不同粉煤灰掺量高延性混凝土的力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 831.
- ZhANG Zhigang, ZHAO Lin, ZHANG Pei, *et al.* Mechanical properties of high ductility concrete with different fly ash content under sub-high temperature [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(5): 831.