

DOI:10.11918/202501035

超轻质工程水泥基复合材料的制备与力学性能

白玉磊¹, 刘建虎¹, 丁尧², 高盼³

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 成都大学 建筑与土木工程学院, 成都 610106)

摘要: 为解决超轻质工程水泥基复合材料 (ultra-lightweight engineered cementitious composites, ULECC) 存在的强度较低和材料成本较高的问题, 在微观力学设计理论的指导下, 开发出一种兼顾强度和经济性可持续的 ULECC。采用粉煤灰漂珠 (fly ash cenosphere, FAC) 和空心玻璃微珠 (hollow glass microsphere, HGM) 两种轻质填料, 加入纤维素丝 (cellulose filaments, CF) 进行纳米增强, 同时讨论水胶比的影响。共设计了 5 种配合比, 其中 3 种可被归为 ULECC。结果表明: 提出的 ULECC 仅添加 1% 的 PE 纤维即可实现密度低至 $1\ 296\ \text{kg/m}^3$, 强度达 $41.9\ \text{MPa}$, 拉应变达 10.28% ; 水胶比是影响 ULECC 力学性能的重要因素, 随着水胶比的减小, ULECC 抗压强度、初裂强度和抗拉强度均逐渐增大, 延性先减小后增大。SEM 微观结构表明, 掺入轻质填料会增大孔隙率, 降低基体断裂韧性, 使得延性显著上升。与传统工程水泥基复合材料 (ECC) 相比, ULECC 在不过多损伤强度的前提下, 提供了具有竞争力的变形能力, 大大提高了可持续性, 降低了材料成本。

关键词: 超轻质工程水泥基复合材料; 抗压强度; 拉伸性能; 微观分析; 纳米纤维

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)02-0061-09

Preparation and mechanical properties of ultra-lightweight engineered cementitious composites

BAI Yulei¹, LIU Jianhu¹, DING Yao², GAO Pan³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: To address the issues of low strength and high material costs associated with ultra-lightweight engineered cementitious composites (ULECC), a sustainable ULECC that balances strength and cost has been developed based on micro-mechanical design theory. Two types of lightweight fillers were used: fly ash cenospheres (FAC) and hollow glass microspheres (HGM), along with cellulose filaments (CF) for nano-enhancement. The influence of the water-binder ratio was also examined. A total of five different mix ratios were designed, three of which can be classified as ULECC. The results indicate that the proposed ULECC, with only 1% PE fiber addition, achieves a density as low as $1\ 296\ \text{kg/m}^3$, a strength of $41.9\ \text{MPa}$, and a tensile strain of 10.28% . The water-binder ratio is a key factor affecting ULECC's mechanical properties. As this ratio decreases, the compressive strength, initial cracking strength, and tensile strength of ULECC gradually increase, while ductility first decreases and then increases. Scanning electron microscopy (SEM) analysis shows that incorporating lightweight fillers increases porosity and reduces the matrix's fracture toughness, leading to a significant rise in ductility. Compared to traditional engineered cementitious composites (ECC), ULECC provides competitive deformation capability without excessive damage strength, which greatly improves sustainability and reduces material costs.

Keywords: ultra-lightweight engineered cementitious composites; compressive strength; tensile properties; microscopic analysis; nanofibers

工程水泥基复合材料 (ECC) 由于其独特的微观结构和纤维桥接效应^[1-3], 通常具有 3% 以上的极限抗拉应变和多重开裂特性^[4-7]。然而, 相同体积

的 ECC 成本几乎为普通混凝土的十倍^[8]。这源于掺入其中的有机纤维, 尽管其体积分数通常限制在 2% 以内, 但其仍占到了总成本的 60% ~ 80%^[9]。

收稿日期: 2025-01-14; 录用日期: 2025-02-24; 网络首发日期: 2025-04-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250421.1602.002>

基金项目: 北京市自然科学基金杰出青年基金 (JQ23036)

作者简介: 白玉磊 (1985—), 男, 博士, 教授, 博士生导师

通信作者: 高盼, panpan_988@163.com

因此,ECC 主要被作为耗能构件在混凝土结构中使用,如连梁和耗能支撑等^[10-12],以及作为修复与加固材料用于新建以及既有建筑中^[13-14]。随着超高层建筑、大跨度桥梁等自重敏感结构的发展,密度小于 1 400 kg/m³ 的超轻质工程水泥基复合材料 (ULECC) 具有更广泛的应用前景^[15-18],然而密度的降低往往以损伤其强度和延性为代价^[19]。过去 5 年中对 ULECC 的最新研究^[7,9,15-16,20-24] 结果表明,大多数样品的抗压强度低于 35 MPa,拉伸应变能力低于 6%。因此,本研究旨在开发一种兼顾强度、延性以及经济性的 ULECC。

粉煤灰漂珠 (FAC) 和空心玻璃微珠 (HGM) 常作为轻质填料用于降低 ECC 的密度^[15,25]。FAC 是热电厂燃煤的副产品,为表面光滑的空心球体结构,直径为 10 ~ 300 μm,密度为 400 ~ 900 kg/m³^[26],一般可作轻质骨料使用,且具有一定的火山灰活性,能够在一定程度上弥补由密度降低导致的基体力学性能的不足^[27-28]。Deng 等^[15] 采用 FAC 完全替代石英砂,使得 ECC 的密度由 1 740 kg/m³ 降到 1 260 kg/m³,下降 27.59%;延性由 1.34% 增大到 5.21%,增大了 288.81%;而抗压强度由 35.0 MPa 下降到 34.3 MPa,仅下降 2.00%。

HGM 是一种从废弃玻璃中提取的高性能轻质环保材料^[20],具有更小的粒径 (2 ~ 150 μm) 和更低的密度 (150 ~ 600 kg/m³),常用于替代胶凝材料^[29]。Wang 等^[20] 用不同类型的 HGM 替代 100% 粉煤灰 (FA) 使得 ECC 的密度从 1 872 kg/m³ 降低至 1 260 kg/m³,下降了 32.69%;而抗压强度由 46.4 MPa 下降到 8.2 MPa,下降幅度高达 82.33%。可见虽然 HGM 的掺入能有效降低 ECC 的密度,但会大幅降低其抗压强度。因此,可采用较小的 HGM 添加量,以期达到制得更加环保、可持续的 ULECC,而不至于损伤其抗压强度的目的。

由于掺入轻质材料之后降低了基质的断裂韧性,根据微观设计理论^[30],这可促进 ULECC 的应变硬化^[19]。因此,可以尝试较低的纤维掺量来实现 ULECC 优异的延性。同时,掺入纤维素丝 (CF) 进一步优化 ULECC 的力学性能。CF 具有亲水性和纳米补强作用^[31-32],能在相对较低的质量分数下 (胶凝材料质量的 0.05% ~ 0.20%) 改善 ULECC 的性能。

水胶比是影响 ECC 性能的重要参数,通过改变 ECC 的孔隙率影响 ECC 的各项性能,包括强度、纤维分散以及纤维-基体界面黏结性能等。郭荣鑫等^[33] 发现适宜的水胶比可以使得 ECC 获得良好的纤维-基体界面性能,从而提高延性。过低或过高

的水胶比均不利于 ECC 力学性能的发挥。

基于以上背景,用 FAC 完全替代石英砂,用 HGM 替代 30% 粉煤灰制备 ULECC,仅添加体积掺量为 1% 的 PE 纤维来降低成本,添加 0.1% (胶凝材料质量分数) 的 CF 保证良好的力学性能,讨论适宜的水胶比,从而开发环保、经济兼具优异力学性能的 ULECC。研究了 ULECC 的密度、抗压强度、拉伸性能等力学性能,测试了基质的断裂韧性和纤维桥接能力。同时,基于扫描电子显微镜 (SEM) 从微观层面解释了增韧机制。

1 试 验

1.1 原材料和配合比

基体所需原材料包括 P·O52.5 普通硅酸盐水泥 (OPC)、一级粉煤灰 (FA)、硅灰 (SF)、石英砂、FAC、HGM、水、减水剂。其中,固体材料粒径分布见图 1。采用抗拉强度为 2 400 MPa、长径比为 750 的 PE 纤维作为增强材料,PE 纤维的物理参数见表 1。

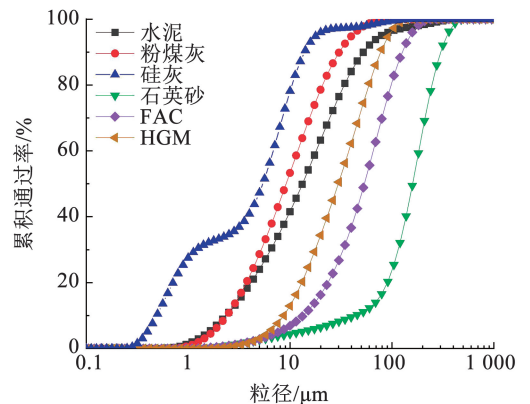


图 1 固体材料粒径分布

Fig. 1 Particle size distributions of solid component

表 1 PE 纤维物理参数

Tab. 1 Physical properties of PE fiber

直径/ μm	长度/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ (g·cm ⁻³)
24	18	2 400	100	0.97

共制备 5 种混合物,配合比如表 2 所示,其中, E0 为不加轻质填料的对照组。E1 用 FAC 完全替代石英砂,并且用 HGM 替代 30% 的粉煤灰。E2 在 E1 基础上加入质量分数为 0.1% 胶凝材料的 CF,以弥补轻质填料对强度的不利影响。为了讨论水胶比对 ECC 性能的影响,制备仅水胶比不同的混合物 E3 和 E4,水胶比分别为 0.23 和 0.21。

表 2 配合比
Tab. 2 Mix proportions

编号	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	石英砂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	FAC/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	HGM/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	PE 纤维/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	CF/ %	减水剂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比
E0	454.5	454.5	136.4	909.1	0	0	261.4	9.7	0	10	0.25
E1	454.5	318.2	136.4	0	290.9	12.4	227.3	9.7	0	10	0.25
E2	454.5	318.2	136.4	0	290.9	12.4	227.3	9.7	0.1	10	0.25
E3	454.5	318.2	136.4	0	290.9	12.4	209.1	9.7	0.1	30	0.23
E4	454.5	318.2	136.4	0	290.9	12.4	190.9	9.7	0.1	30	0.21

1.2 试件制备

首先,将固体材料全部倒入搅拌机,搅拌 2 ~ 3 min,确保混合均匀。将搅拌均匀的水和减水剂混合溶液(若有 CF,将 CF 加入溶液中并提前超声分散)分两次缓慢加入,继续搅拌 5 min 左右,直至干料搅拌至浆体状态。然后,加入 PE 纤维,边加边搅拌,直至纤维完全加入,再继续搅拌约 5 min。最后,将新拌混合物装入模具,移至振动台上振动 2 min。室内盖膜养护 24 h 后拆模,转移至标准养护室(温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$)养护至测试龄期。

1.3 测试方法

参考 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》,采用水泥胶砂流动度测定仪测定拌合物流动度。制作一系列尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的立方体试件,养护至测试龄期后,称取表面干燥状态下试件的重量进行密度测试。密度测试完成后,使用万能试验机进行立方体抗压强度试验,加载速率为 0.5 MPa/s 。另制作 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的棱柱体试件用于弹性模量测试。表 2 所列每种配比均测试 3 个立方体和 3 个棱柱体试件。

单轴拉伸试验采用日本土木工程学会 JSCE 推荐的狗骨型试件,试验加载设备采用 MTS LPS. 305 型电子万能试验机,拉伸试件尺寸和试验装置如图 2 所示。在 80 mm 标距段两侧对称布置量程为

25 mm 的位移传感器(LVDT),使用 TDS-540 静态数据采集仪同步采集拉伸荷载和标距段拉伸位移,以获得试件应力-应变关系。采用位移加载方式,加载速率为 0.5 mm/min ,每种配比测试 3 个试件。

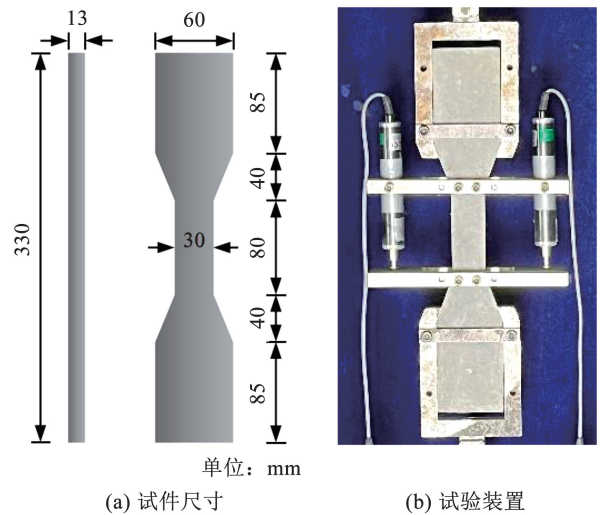


图 2 单轴拉伸试验

Fig. 2 Uniaxial tensile test

单裂纹拉伸试验在预先削弱的狗骨型试件上进行,切口断面尺寸和试验装置如图 3 所示。在预制切口两侧分别布置电子引伸计。加载方式为位移加载,加载速率为 0.2 mm/min 。每种配比测试 3 个试件。

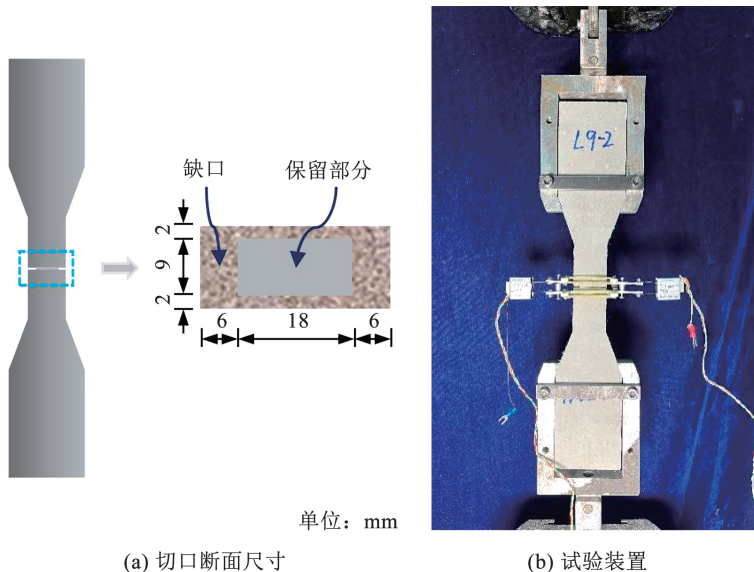


图 3 单裂纹拉伸试验

Fig. 3 Single-crack tension test

在无纤维基体梁上进行三点弯曲试验,试验装置和试件尺寸如图 4 所示。采用位移加载,加载速

率为 1 mm/min。试验前在梁跨中截面预制宽度为 1 mm、深度为 12 mm 的缺口。每组测试 3 个试件。

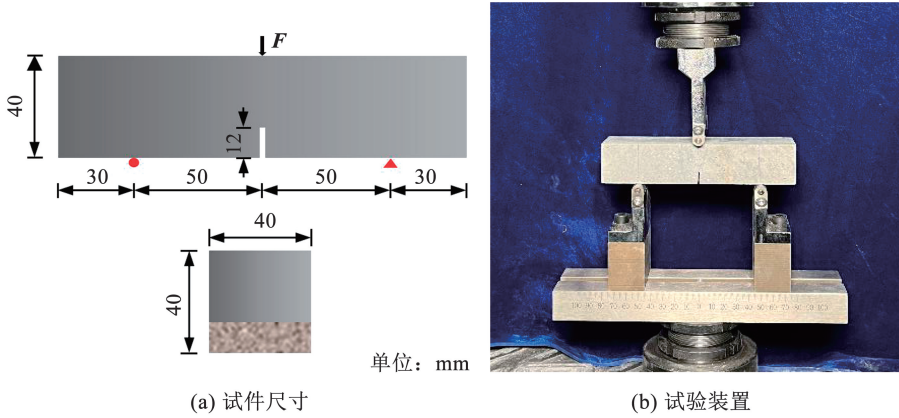


图 4 三点弯曲试验

Fig. 4 Three-point bending test

2 试验结果与分析

2.1 流动度

图 5 展示了试验测得的不同拌合物的流动度。对比 E0 和 E1 的流动度可以看出,在相同水胶比条件下,加入轻质填料后 ECC 的流动度显著降低,由 215 mm 降至 190 mm,下降幅度为 11.6%。其原因在于:1)砂的密度显著高于 FAC,重力作用使 ECC 更易流动,同时砂的比表面积较小,需水量较低,黏滞阻力相对较小,E0 的流动性更好;2)用 HGM 替代 30% FA 后,在水胶比不变的情况下,混合物中可用于润滑骨料的水分减少,导致颗粒间移动受限,进而降低了流动性^[34];3)FAC 具有一定的吸水性,且在搅拌过程中极易被搅碎^[35-36],破碎后的 FAC 吸水性进一步增强,从而导致拌合物流动性进一步降低。

5.3%。E1 与 E2 的结果表明,CF 对新拌浆体流动度的影响较小。这可能是由于较高的水胶比及适量的减水剂在一定程度上抵消了 CF 对流动性的负面影响。

2.2 密度和抗压强度

各配比拌合物的抗压强度和密度如图 6 所示。对比 E0 和 E1 可以看出,轻质填料显著降低了 ECC 的抗压强度和密度。拌合物的密度从 1 992 kg/m³ 降至 1 296 kg/m³,下降了 35%,属于 ULECC;抗压强度从 69.1 MPa 降至 39.2 MPa,下降了 43.3%。对比 E2、E3 和 E4 的结果可知,拌合物的抗压强度和密度均随水胶比的降低而增大。当水胶比从 0.25 降至 0.23 和 0.21 时,抗压强度分别为 43.7 MPa 和 47.1 MPa,增大了 4.3% 和 12.4%;密度分别为 1 400 kg/m³ 和 1 520 kg/m³,增大了 8% 和 17.3%。这是因为水胶比降低后,胶凝材料占比增大,水分减少,使得硬化后的 ECC 内部孔隙减少,基体结构更加致密^[33]。

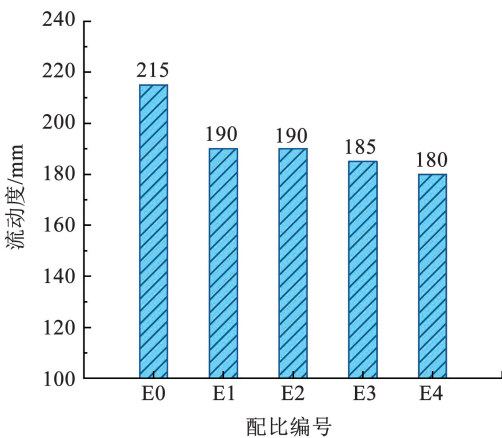


图 5 流动度
Fig. 5 Flow rate

对比 E2、E3 和 E4 的试验结果可以看出,随着水胶比的降低,即使增加了减水剂的用量,ECC 的流动性仍逐渐下降。相较于水胶比 0.25,当水胶比为 0.23 和 0.21 时,流动度分别下降了 2.6% 和

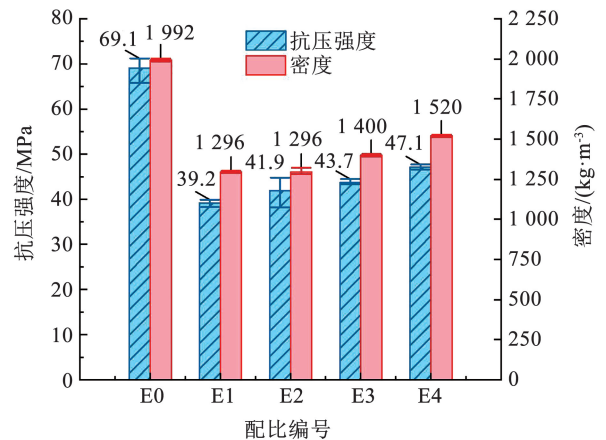


图 6 抗压强度和密度

Fig. 6 Compressive strength and densities

加入CF后,E2的抗压强度为41.9 MPa,E1的抗压强度为39.2 MPa,而两者的密度基本相同,均为1 296 kg/m³,表明CF能在不显著增大拌合物密度的同时提高拌合物的抗压强度。这是因为CF纤维能够增强材料的微观结构,促进水泥水化,提高材料密实度^[32]。

近5年ULECC的最新研究^[7,9,15-16,20-24]与本研究的抗压强度对比结果如图7所示,可以看出,本研究开发的ULECC能够在降低密度的同时保留具有竞争力的抗压强度。

2.3 拉伸性能

标准养护28 d后,各配比试件的拉伸应力-应变曲线如图8所示,所有配比均表现出显著的应变硬化行为,应变均在3%以上。从图8中提取各试件的拉伸参数,包括初裂强度(σ_c)、极限拉伸强度

(σ_u)和极限拉伸应变(ε_u)(参考文献[37]),结果如表3所示。

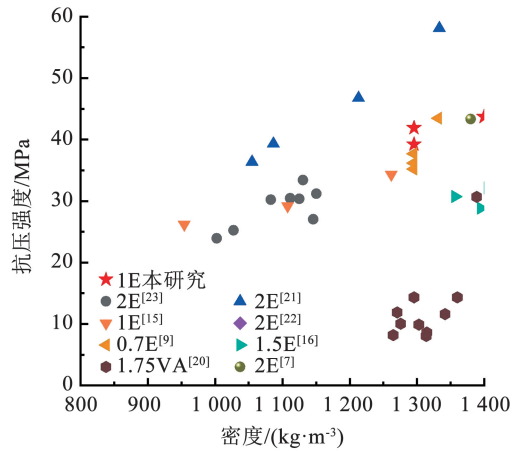


图7 ULECC密度与抗压强度关系统计

Fig. 7 Statistical relationship between density and compressive strength of ULECC

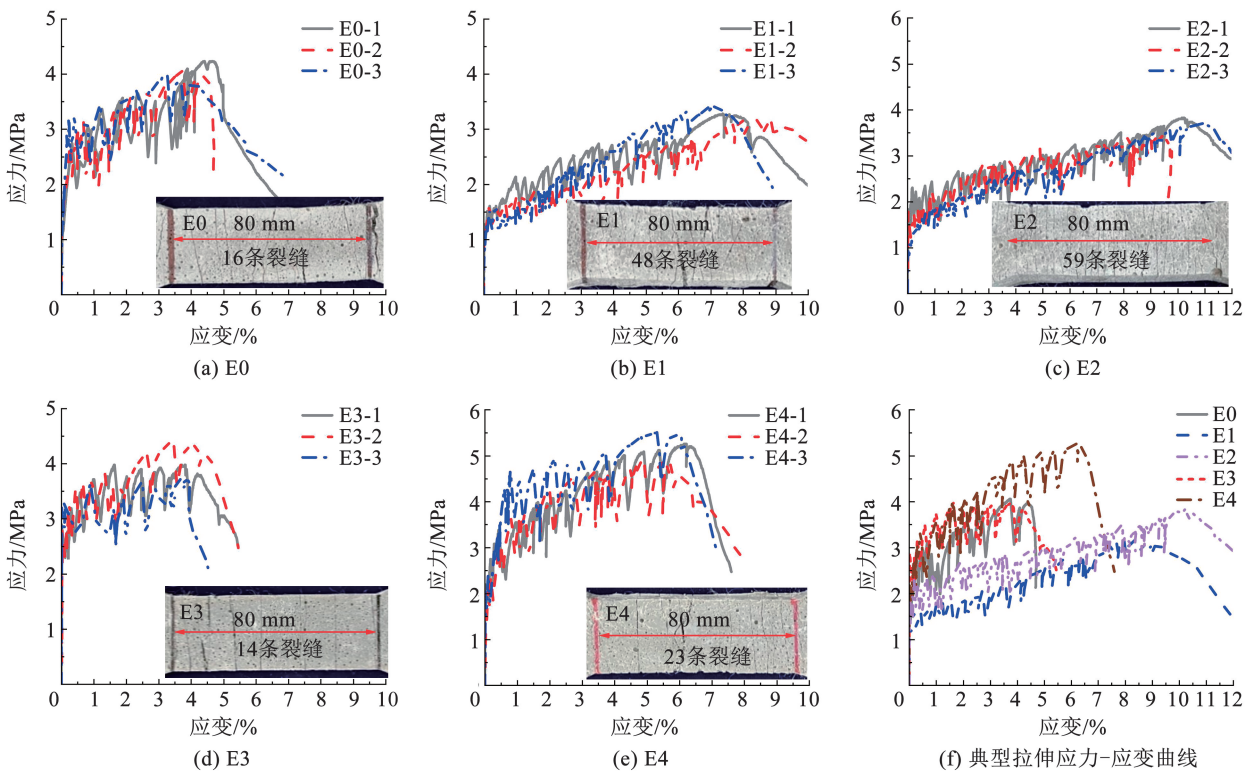


图8 不同混合物的拉伸应力-应变曲线

Fig. 8 Tensile stress-strain curves of different mixtures

表3 ECC拉伸参数

Tab.3 Tensile parameters of ECC

编号	σ_c /MPa	σ_u /MPa	ε_u /%
E0	1.60 ± 0.04	4.10 ± 0.14	3.77 ± 0.66
E1	1.26 ± 0.01	3.30 ± 0.13	7.77 ± 0.67
E2	1.39 ± 0.44	3.65 ± 0.17	10.28 ± 0.67
E3	1.57 ± 0.83	4.07 ± 0.34	3.65 ± 0.18
E4	2.13 ± 0.07	5.21 ± 0.31	5.57 ± 0.66

由图8和表3可以看出,E2展现出最优的应变能力,其极限拉伸应变达10.28%。E4则表现出最高的拉伸强度,达5.21 MPa。使用轻质填料后,ECC的初裂强度和极限拉伸强度呈下降趋势,但其延展性显著提升。极限应变从3.77%提升到7.77%,增长了106.10%;初裂强度由1.60 MPa降至1.26 MPa,降低了21.25%;极限拉伸强度从4.10 MPa降至3.30 MPa,降低了19.51%;拉伸段裂

缝数由 16 条增至 48 条。轻质填料的加入导致基体断裂韧性降低,材料更容易产生裂缝,从而提高了 ECC 的应变硬化性能^[16]。

由于 CF 的桥接作用能有效控制裂缝的扩展,吸收更多的应变能,提高材料的延性^[32],加入 CF 的 E2 表现出最好的延性,与 E1 相比,裂缝数从 48 条增至 59 条,应变从 7.77% 增至 10.28%。E1 和 E2 的 PE 纤维掺量虽仅为 1%,却达到了先前研究中纤维掺量为 2% 的混合物的延性水平,如图 9 所示。随着水胶比的降低,LECC 的初裂强度和极限强度逐渐增加,极限应变则先降低后升高,但整体呈下降趋势。

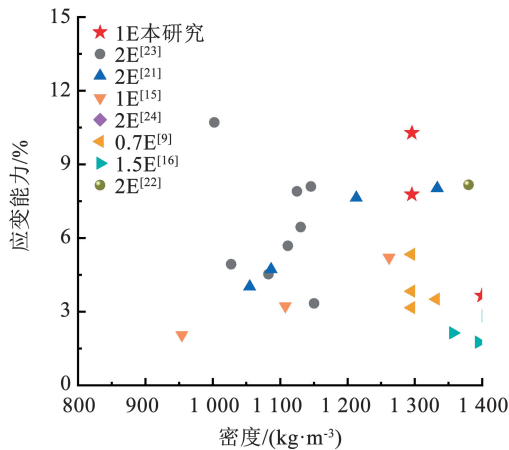


图 9 ULECC 密度与应变能力关系统计

Fig. 9 Statistical relationship between density and strain capacity of ULECC

2.4 应变硬化指数分析

根据 ECC 设计理论,ECC 要具有应变硬化特征,必须同时满足两个准则,即

1) 能量准则:

$$J'_b \equiv \sigma_0 \delta_0 - \int \sigma_0 \sigma(\delta) d\delta \geq J_{tip} \quad (1)$$

2) 强度准则:

$$\sigma_0 \geq \sigma_c \quad (2)$$

式中: J_{tip} 为裂纹尖端断裂韧性,可由 K_m^2/E_m 计算得出, K_m 和 E_m 分别为基体断裂韧性和弹性模量; $\sigma(\delta)$ 为纤维桥接应力-裂纹开口宽度曲线,可由单裂纹拉伸试验获得; J'_b 为互补余能; σ_c 和 σ_0 分别为初裂强度和最大纤维桥接应力; δ_0 为 $\sigma(\delta)$ 曲线上与 σ_0 对应的裂纹开口宽度。

表 4 和表 5 列出了无纤维缺口梁三点弯曲试验和单裂纹拉伸试验的结果。对比 E0 和 E1 可知,相同水胶比下,随着轻质填料质量分数的增加, K_m 和 J_{tip} 分别降低了 39.76% 和 24.72%。轻质填料的引入增大了材料的孔隙率,削弱了基体韧性。由于 CF 的桥接作用,E2 加入 CF 纤维后 K_m 和 J_{tip} 均显著提

高。比较 E2、E3 和 E4 可知,随着水胶比的降低,基体更加密实,内部缺陷更少,导致 K_m 和 J_{tip} 整体呈上升趋势。

表 4 三点弯曲试验结果

Tab. 4 Results of three point bending test

编号	m/g	F_Q/N	E_m/GPa	$K_m/(MPa \cdot m^{1/2})$	$J_{tip}/(J \cdot m^{-2})$
E0	513	683	30.4	0.327	3.52
E1	332	411	14.6	0.197	2.65
E2	332	481	14.6	0.230	3.64
E3	358	501	16.0	0.240	3.61
E4	389	568	17.7	0.271	4.14

表 5 单裂纹拉伸试验结果

Tab. 5 Results of single crack tensile test

编号	σ_0/MPa	δ_0/mm	$J'_b/(J \cdot m^{-2})$	P_S	P_E
E0	5.62 ± 0.16	0.62 ± 0.05	900 ± 60	3.52 ± 0.19	256 ± 17
E1	3.90 ± 0.06	0.65 ± 0.19	576 ± 59	3.10 ± 0.07	217 ± 22
E2	5.15 ± 0.15	0.76 ± 0.19	922 ± 285	4.16 ± 1.42	254 ± 78
E3	5.08 ± 0.20	0.67 ± 0.03	925 ± 64	3.24 ± 0.13	256 ± 18
E4	6.44 ± 0.11	0.65 ± 0.05	$1\ 045 \pm 50$	3.02 ± 0.05	259 ± 19

图 10 给出了不同混合物通过单裂纹拉伸试验得到的纤维桥接应力-裂纹开口宽度曲线。提取各曲线的最大纤维桥接强度(σ_0)、裂纹开口宽度(δ_0)和纤维桥接互补能(J'_b),列于表 5。再根据公式来计算应变硬化指数 P (如图 11 所示)。 P 可以定量表征 ECC 应变硬化的潜力,表达式如下:

$$P_E = J'_b/J_{tip} \quad (3)$$

$$P_S = \sigma_0/\sigma_c \quad (4)$$

式中: P_E 为能量应变硬化指数, P_S 为强度应变硬化指数。

水胶比相同情况下,掺入轻质填料会导致 σ_0 和 J'_b 均降低,这是因为轻质填料会削弱纤维的桥接性能。加入 CF 后, σ_0 和 J'_b 显著提升,原因是 CF 可以增强纤维和基体之间的黏结。水胶比降低后,密实的基体增大了纤维与基质之间的摩擦作用,导致 σ_0 和 J'_b 逐渐增大。

所有混合物的 $P_S \geq 1.2$ 以及 $P_E \geq 3.0$,表明所有配合比的混合物均实现了应变硬化。其中,E0 的 P_E 值最小,这是因为 E0 未添加轻质填料导致基体强度高。致密的基体增加了纤维与基体之间的界面黏结强度,导致纤维在拉伸过程中大量断裂。用 FAC 替代所有砂子以及用 HGM 替代 30% FA 之后, P_E 增大,而 P_S 降低。由于 CF 的桥接作用,E2 的 P_E 和 P_S 均大幅提高,分别提高了 17.97% 和 34.08%。当水胶比从 0.25 减小到 0.21 时, P_S 减小,而 P_E 变化不大,说明水胶比为 0.25 时,基质韧性和纤维桥接能力达到了较好的平衡。

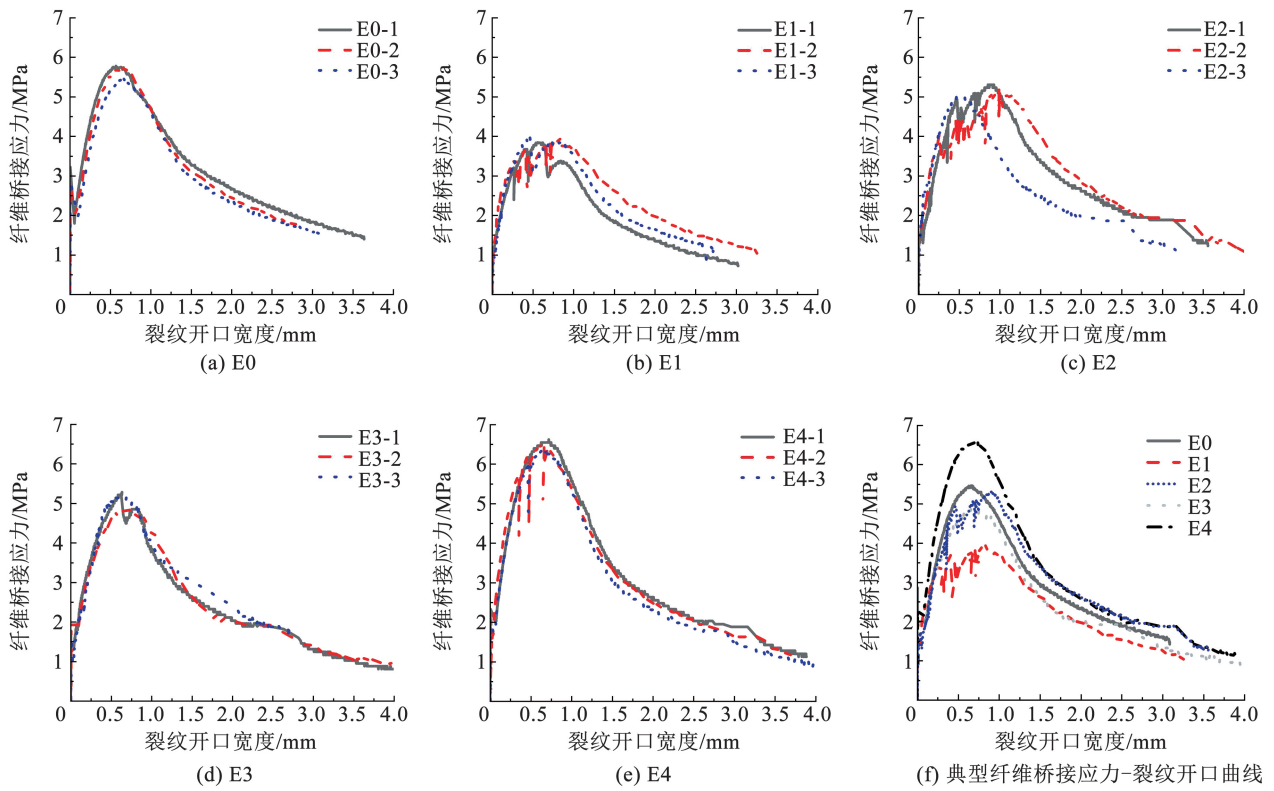


图 10 不同混合物的纤维桥接应力-裂纹开口曲线

Fig. 10 Fiber bridging stress-crack opening curves of different mixtures

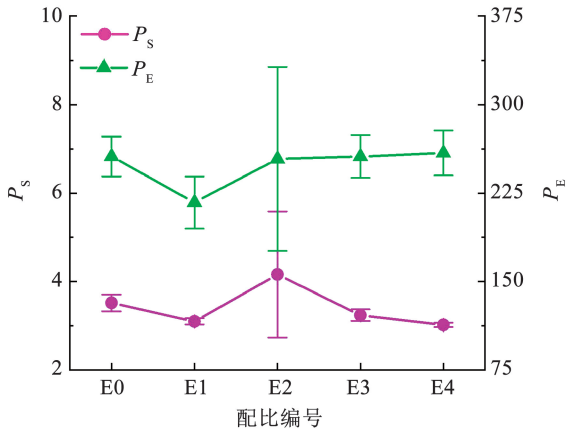


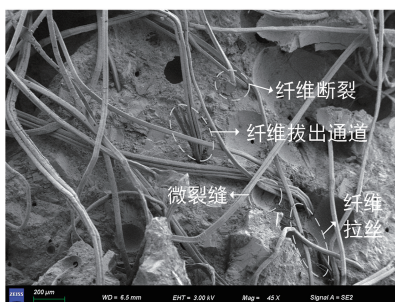
图 11 应变硬化指数

Fig. 11 Pseudo-strain hardening indices

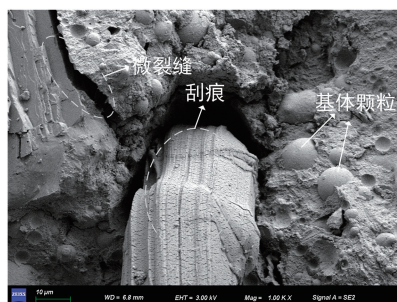
2.5 微观分析

单轴拉伸试验后,对 E0、E1、E2 试样断截面进

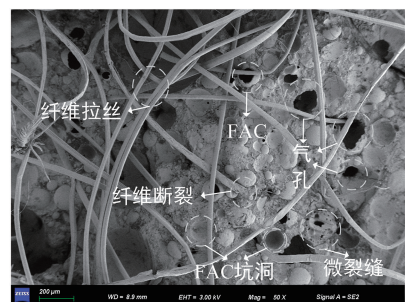
行 SEM 分析。如图 12(a)和(b)所示,E0 基体结构密实,仅有少量微小气孔,没有观察到明显裂缝,致密的基体使得纤维与基体间存在较强的黏结力,纤维在拉伸过程中出现大量断裂。与 E0 相比,由于轻质填料的掺入,能够清晰地观察到 E1 基体中存在大量气孔。此外,在 E1 基体表面观察到大量完整或破碎的 FAC 及其脱离坑洞,表明 FAC 与周围基体之间的结合较弱,这都导致纤维与基体间的黏结强度较低,PE 纤维易从基体中拔出,如图 12(c)和(d)所示。而从图 12(e)和(f)可以看出,与 E1 相比,加入 CF 后的 E2 基体表面气孔更少,基体结构更加密实,并且 E2 的纤维表面与 E1 相比更加粗糙,存在更多的划痕与基体碎屑,表明 CF 的加入导致纤维和基质之间的黏结性能提高,有利于提高试件的变形能力。



(a) E0 (×45倍)



(b) E0 (×1 000倍)



(c) E1 (×50倍)

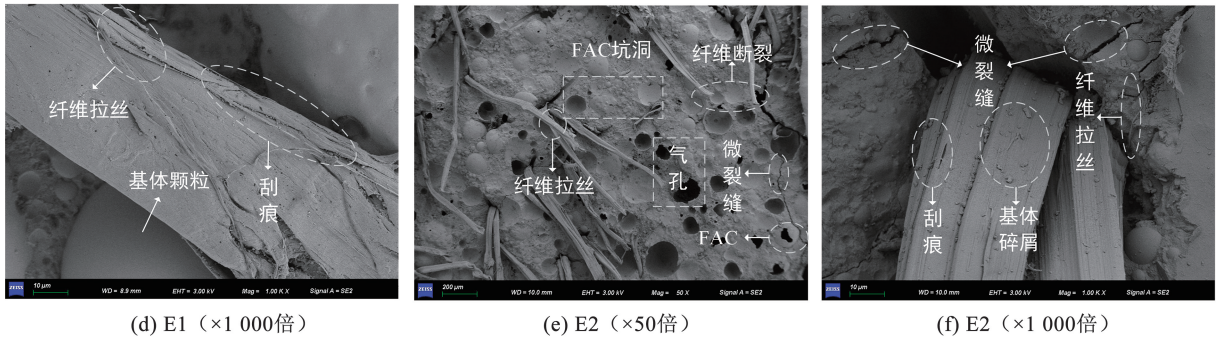


图 12 E0、E1 和 E2 的 SEM 图

Fig. 12 SEM images of E0, E1 and E2

3 结 论

1) 在 1% 的低纤维掺量下,用 FAC 替代所有石英砂,同时用 HGM 替代 30% FA 后,ECC 密度下降了 35%,延性提高了 106.10%。所有配比均表现出应变硬化现象,应变均大于 3%。其中,E2 应变能力最高,达 10.28%,密度低至 $1\ 296\ \text{kg}/\text{m}^3$,其在提高结构抗震性能、作为结构的修复加固材料方面具有较好的应用前景。

2) 加入 0.1% 掺量的 CF 后,ULECC 的密度并无明显变化,但强度和应变能力明显增强。与 E1 相比,E2 的初裂强度和极限强度分别增大了 16.81% 和 10.61%,应变能力从 7.77% 增至 10.28%,提升了 32.3%。SEM 结果显示,CF 的存在改善了 E2 的纤维-基体界面黏结性能,纤维的桥联作用得到了充分发挥,进而明显增强了延性。

3) 当水胶比从 0.25 降至 0.21 时,混合物的密度从 $1\ 296\ \text{kg}/\text{m}^3$ 增长至 $1\ 520\ \text{kg}/\text{m}^3$,增长了 17.28%,同时,基体断裂韧性、抗压强度和抗拉强度均有增强,而应变能力整体呈下降趋势。

参考文献

[1] 王玉清,孙亮,刘曙光,等. 不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维/水泥复合材料徐变性能试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 205
WANG Yuqing, SUN Liang, LIU Shuguang, et al. Experimental study on creep performance of polyvinyl alcohol fiber/engineered cementitious composite with different fiber contents [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 205. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20190425.002

[2] AHMED S F U, MIHASHI H. A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites (SHFRCC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(5): 365. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.014

[3] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531
LI V C. Progress and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531

[4] DING Yao, YU Kequan, LI Mi. A review on high-strength

engineered cementitious composites (HS-ECC): design, mechanical property and structural application [J]. Structures, 2022, 35: 903. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.10.036

[5] DING Yao, YU Jiangtao, YU Kequan, et al. Basic mechanical properties of ultra-high ductility cementitious composites: from 40 MPa to 120 MPa [J]. Composite Structures, 2018, 185: 634. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.034

[6] YU Kequan, DING Yao, LIU Jiepeng, et al. Energy dissipation characteristics of all-grade polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106: 103459. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103459

[7] ZHANG Zhigang, YUVARAJ A, DI Jin, et al. Matrix design of light weight, high strength, high ductility ECC [J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.159

[8] SUI Lili, ZHONG Qianli, YU Kequan, et al. Flexural fatigue properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) reinforced by polymer fibers [J]. Polymers, 2018, 10(8): 892. DOI: 10.3390/polym10080892

[9] HUANG Zhenyu, LIANG Tingting, HUANG Bo, et al. Ultra-lightweight high ductility cement composite incorporated with low PE fiber and rubber powder [J]. Construction and Building Materials, 2021, 312: 125430. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125430

[10] KAMAL A, KUNIEDA M, UEDA N, et al. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 863. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.08.003

[11] WEI Jiaying, WU Chang, CHEN Yixin, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams with high strength strain-hardening cementitious composites (HS-SHCC) [J]. Materials and Structures, 2020, 53: 1. DOI: 10.1617/s11527-020-01537-1

[12] QIN Fengjiang, ZHANG Zhigang, YIN Zhiwei, et al. Use of high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) to enhance the flexural performance of reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101746. DOI: 10.1016/j.job.2020.101746

[13] 徐世焯,周斌,李庆华,等. 喷射超高韧性水泥基复合材料的力学性能研究[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 619
XU Shilang, ZHOU Bin, LI Qinghua, et al. Mechanical performance of sprayable ultra high toughness cementitious composites [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 619. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20141164

[14] CHEN Yixin, YU Jing, LEUNG C K Y. Use of high strength strain-

- hardening cementitious composites for flexural repair of concrete structures with significant steel corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 325. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.009
- [15] DENG Boyu, LI Lingzhi, TAN Di, et al. Sustainable and cost-effective ultra-lightweight engineered cementitious composite: design and material characterization [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 136: 104895. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104895
- [16] FU Chaoshu, GUO Rongxin, LIN Zhiwei, et al. Effect of nanosilica and silica fume on the mechanical properties and microstructure of lightweight engineered cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 298: 123788. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123788
- [17] DIXIT A, PANG S D, KANG S H, et al. Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 102: 185. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023
- [18] ZHENG Jing, LI Xiaozhen, ZHANG Xiaobang, et al. Structure-borne noise of fully enclosed sound barriers composed of engineered cementitious composites on high-speed railway bridges [J]. *Applied Acoustics*, 2022, 192: 108705. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108705
- [19] 宋文彬. 轻质高延性水泥基复合材料力学性能及其加固梁常温及高温性能试验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022
- SONG Wenbin. Mechanical properties of lightweight and high ductility cementitious composites and their experimental study on the normal and high temperature properties of reinforced Beams [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022
- [20] WANG Lining, ASLANI F, HAJIRASOULIHA I, et al. Ultra-lightweight engineered cementitious composite using waste recycled hollow glass microspheres [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119331. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119331
- [21] RAN Hongyu, ELCHALAKANI M, LIU Huiyuan, et al. Development and characteristics of multifunctional ultra-lightweight engineered cementitious composites incorporating cenospheres and PE fibre [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 140: 105084. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105084
- [22] ZHOU Yingwu, XI Bin, SUI Lili, et al. Development of high strain-hardening lightweight engineered cementitious composites; design and performance [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 103370. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103370
- [23] RAN Hongyu, ELCHALAKANI M, HU Zhiheng, et al. Self-sensing ultra-lightweight engineered cementitious composites (ECC) with carbon fibres [J]. *Measurement*, 2024, 237: 115215. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115215
- [24] ZHOU Yingwu, GONG Guoqiang, XI Bin, et al. Sustainable lightweight engineered cementitious composites using limestone calcined clay cement (LC3) [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 243: 110183. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110183
- [25] AL-GEMEEL A N, ZHUGE Y, YOUSSEF O. Use of hollow glass microspheres and hybrid fibres to improve the mechanical properties of engineered cementitious composite [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 171: 858. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.172
- [26] WU Yunpeng, WANG Junyan, MONTEIRO P J M, et al. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 87: 100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.004
- [27] 付朝书. 轻质工程水泥基复合材料的高活性掺料增强机制及纺织网格增强体系研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022
- FU Chaoshu. Reinforcing mechanism of highly active admixtures and textile reinforcement system of lightweight engineered cementitious composites [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022
- [28] HANIF A, LU Zeyu, DIAO Su, et al. Properties investigation of fiber reinforced cement-based composites incorporating cenosphere fillers [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.093
- [29] ASLANI F, WANG Lining. Development of strain-hardening lightweight engineered cementitious composites using hollow glass microspheres [J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(2): 673. DOI: 10.1002/suco.201900096
- [30] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC): a review of the material and its applications [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215. DOI: 10.3151/jact.1.215
- [31] HISSEINE O A, SOLIMAN N A, TOLNAI B, et al. Nano-engineered ultra-high performance concrete for controlled autogenous shrinkage using nanocellulose [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 137: 106217. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106217
- [32] HISSEINE O A, WILSON W, SORELLI L, et al. Nanocellulose for improved concrete performance: a macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 84. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.042
- [33] 郭荣鑫, 师成洁, 马倩敏, 等. 材料组分对 UHTCC 力学性能的影响研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(3): 822
- GUO Rongxin, SHI Chengjie, MA Qianmin, et al. Effect of material composition on the mechanical properties of UHTCC [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(3): 822. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.03.039
- [34] MEDDAH M S. Use of waste window glass as substitute of natural sand in concrete production [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. London: IOP Publishing, 2019: 032011
- [35] 王莎. 空心微珠轻质水泥基复合材料性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
- WANG Sha. Research on properties of cenospheres lightweight cement-based composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [36] DANISH A, MOSABERPANAH M A, TULADHAR R, et al. Effect of cenospheres on the engineering properties of lightweight cementitious composites: a comprehensive review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 49: 104016. DOI: 10.1016/j.job.2022.104016
- [37] 中国中材国际工程股份有限公司. 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461—2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018
- Sinoma International Engineering Co., Ltd. Standard test method for the mechanical properties of ductile fiber reinforced cementitious composites: JC/T 2461—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2018