

引用格式:卿双全,李传习.基于正交试验的高强高延性混凝土力学性能[J].工业建筑,2025,55(5):280-291. QING Shuangquan, LI Chuanxi. Mechanical Properties of HS-HDC Based on Orthogonal Tests [J]. Industrial Construction, 2025, 55(5): 280-291 (in Chinese). DOI: 10.3724/j.gybzG24040506

基于正交试验的高强高延性混凝土力学性能^{*}

卿双全¹ 李传习^{1,2}

(1. 长沙理工大学土木与环境工程学院,长沙 410114;2. 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 南宁 530004)

摘 要 为了配制低碳经济型高强高延性混凝土(HS-HDC),设计了煤矸石粉、硅灰、PVA纤维、水胶比、砂胶比5因素4水平的16组正交试验,开展单轴压缩、四点弯曲和扫描电镜三种试验,探索各因素对HS-HDC的力学性能影响及其微观作用机理。试验结果表明:单轴压缩破坏试件整体性良好,当聚乙烯醇纤维(PVA纤维)体积掺量不小于1.0%时,破坏试件表面裂缝呈竖向分布,且PVA纤维掺量越高,试件表面裂缝宽度越小,煤矸石粉和水胶比对抗压强度具有显著性影响,贡献率分别为44.83%、33.56%;四点弯曲试件有单裂缝和多裂缝两种破坏形式,是典型的三阶段破坏模式,各因素中仅PVA纤维对弯曲强度具有显著性影响,贡献率为66.10%;H5配合比(煤矸石0.6、硅灰0.14、PVA纤维1.7%、水胶比0.3、砂胶比0.5)的综合力学性能最佳,其立方体抗压强度为69.0 MPa,弯曲强度为19.7 MPa,等效弯曲韧性为108.9 kJ/m³,拉伸应变能力为1.05%;水泥和纤维是影响隐含能和隐含碳最关键的两个组分,采用固体废弃物替代部分水泥是降低碳排放的有效方法。

关键词 正交试验;煤矸石粉;高延性混凝土;隐含碳;隐含能

Mechanical Properties of HS-HDC Based on Orthogonal Tests

QING Shuangquan¹ LI Chuanxi^{1,2}

(1. College of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-Cycle Safety for Composite Structures, Nanning 530004, China)

Abstract: To prepare a low-carbon and cost-effective high-strength and high-ductility concrete (HS-HDC), the paper designed 16 groups of orthogonal tests with 5 factors and 4 levels of coal gangue powder, silica fume, PVA fibers, water-binder ratio, and sand-binder ratio, three tests of uniaxial compression, four-point bending, and electron microscope scanning were carried out to explore the influence of each factor on the mechanical properties of HS-HDC and its microscopic mechanism. The test results showed that the integrity of the uniaxial compression failure specimen was good. When the fiber volume content was not less than 1.0%, the surface cracks of the failure specimen were vertically distributed, and the higher the fiber content, the smaller the surface crack width of the specimen. The coal gangue powder and water-binder ratio significantly affected the compressive strength, with contribution rates of 44.83% and 33.56%, respectively. The four-point bending specimen exhibited two failure forms: single crack and multiple cracks, demonstrating a typical three-stage failure mode. Only PVA fibers had a significant effect on the bending strength, with a contribution rate of 66.10%. The comprehensive mechanical properties of the H5 mixture ratio (coal gangue powder 0.6, silica fume 0.14, PVA fibers 1.7%, water-binder ratio 0.3, sand-binder ratio 0.5) were the best. The cubic

^{*} 广西科技重大专项项目(AA23073017);湖南省研究生科研创新项目(CX20210764)。

第一作者:卿双全,博士研究生,主要从事高延性水泥基复合材料(ECC)设计理论与制备、工程断裂力学、机器学习等方面研究。

电子信箱:Doc_Qing@stu.csust.edu.cn

收稿日期:2024-04-05

compressive strength was 69.0 MPa, the flexural strength was 19.7 MPa, the equivalent flexural toughness was 108.9 kJ/m³, and the tensile strain capacity was 1.05%. Cement and fibers were the two most critical components that affected embodied energy and embodied carbon. Using solid waste to replace part of cement was a very effective way to reduce carbon emissions.

Keywords: orthogonal test; coal gangue powder; high-ductility concrete; embodied carbon; embodied energy

0 引言

ECC (engineered cementitious composites) 是一种高性能水泥基复合材料,具有明显的拉伸应变硬化和多裂缝特性^[1]。在国际上应变硬化水泥基复合材料 (SHCC)^[2]、超高韧性水泥基复合材料 (UHTCC)^[3]、超高性能纤维增强水泥基复合材料 (UHPFRCC)^[4] 其实均指代 ECC 材料。高延性混凝土 (HDC) 是我国研究人员基于 ECC 材料发展而来的一种延性混凝土,与 ECC 材料不同的是 HDC 材料更关注材料的弯曲性能,而对拉伸性能的要求相对更低^[5]。

HDC 材料拥有很好的弯曲性能,因此该材料可应用于高耗能结构(或构件)以及老旧混凝土或砌体结构的加固。廖桥等^[6]通过喷射法建造了一座足尺超高延性混凝土 (UHDC) 无筋拱,开展了静载试验和钢球撞击试验,发现 UHDC 无筋拱集中破坏现象不明显,主要呈整体受弯破坏形态,冲击区域有大量微细裂缝形成,具有较高承载力和抗冲击能力。张伟等^[7]采用高延性混凝土 (HDC) 对空心砌块砌体墙进行加固, HDC 加固层可限制墙面的开裂,改善墙体的破坏形态,提高其承载力和变形能力。张华鹏^[8]将高延性混凝土应用于隧道衬砌加固中,发现聚乙烯醇 (PVA) 纤维-ECC 复合加固方法在增强结构的承载力、变形能力以及抵抗裂纹开展等方面优于传统的加固方法与加固材料。邓明科等^[9]研究了纤维织物和 HDC 联合加固钢筋混凝土短柱的抗剪性能,可显著提高其抗剪承载力,加固后混凝土柱的变形、承载力和耗能能力都明显提高。Emara 等^[10]将 ECC 和 CFRP 布联合加固钢筋混凝土梁,探索其剪切性能的强化效果,试验结果显示加固后梁的剪切能力从 61.1% 提高到 160.1%。同样的, Liu 等^[11]采用 ECC 和 CFRP 联合加固钢筋混凝土梁,但其研究对象是弯曲行为,与对照组梁相比较, CFRP-ECC 加固梁的开裂荷载、屈服荷载以及极限荷载分别提高了 23%~31%、4%~6% 和 5%~10%。

这些研究中大都采用日本可乐丽公司生产的 PVA 纤维^[12-14],该纤维价格昂贵,高达 220~250 元/kg,而国产 PVA 纤维价格仅 50~100 元/kg,可见高昂的进口纤维成本限制了 HDC 大范围的应用。

水泥行业碳排放量巨大,仅次于钢铁行业^[15]。煤矸石是一种与煤层伴生的含碳量较低的岩石,是我国的一种大宗固体废弃物,而且大部分煤矸石都采用简单堆放处理,利用率低^[16],只有少部分用作粗骨料配制混凝土^[17-20]。与普通碎石相比,煤矸石的堆积密度和表观密度更小,且压碎值大,因此煤矸石部分替代碎石粗骨料混凝土会增加抗压强度,但过量掺加煤矸石粗骨料混凝土抗压强度会明显下降^[17-18]。受煤矸石粗骨料吸返水特性影响,煤矸石混凝土干燥收缩发展存在滞后现象,且煤矸石粗骨料吸水率越高,其混凝土干燥收缩发展越慢,试件达到收缩稳定的龄期也越长^[19]。不同矿源的煤矸石混凝土的压缩应力-应变曲线大致相似,但随着煤矸石取代碎石骨料率的增加,煤矸石混凝土的延性变差^[20]。综上,煤矸石作为混凝土粗骨料有一个最佳替代比例,过量就会导致力学性能快速下降,且难以完全避免煤矸石骨料的吸水性导致的混凝土力学性能的恶化。但高延性混凝土设计理论指出^[1],低的基体断裂韧性有利于开裂,且煤矸石具有一定吸水性,反而有利于提高 HDC 的黏聚性能。基于此,低活性的磨细煤矸石粉作为辅助胶凝材料替代部分水泥配制低碳 HDC 具有可行性。

隐含能 (EE) 和隐含碳 (EC) 是建筑物生命周期分析的两个重要指标,也是评价低碳混凝土的重要参数^[21]。EE 和 EC 指标已经用于评价普通混凝土或混凝土结构的低碳性能^[22-23],因此可借鉴该方法评估本文研发的 HDC 材料的低碳性能。

本文为降低 HDC 成本和碳排放,采用物理磨细煤矸石粉代替部分水泥配制 HDC,并采用成本更低的国产 PVA 纤维,基于 5 因素 4 水平的 16 组正交试验,通过评价 HDC 力学性能(抗压强度、弯曲强度、

等效弯曲韧性、拉伸应变能力)以及EE、EC指标,根据这些指标综合评估获得最优的HDC配合比。

1 试验部分

1.1 原材料

拟配制HS-HDC的原材料包括普通硅酸盐水泥PO52.5(OPC,产地山东诸城)、煤矸石粉(CGP,未煅烧直接物理研磨,莫氏硬度为2,吸水率4%,产地河北石家庄)、硅灰(SF,产地湖北武汉)、石英砂(S,粒径70~110目,产地湖南长沙)、聚羧酸高效减水剂(PSCP,减水率>35%,产地江苏苏州)、PVA纤维(产地江苏南京)、试验用水。胶凝材料的粒径采用激光粒度仪测试,具体参数见表1。胶凝材料的化学组分由X射线荧光光谱(XRF)分析获得,见表2。PVA纤维为苏博特公司生产的RQS®-Ⅱ型号,PVA纤维物理和机械参数见表3。其中, D_f 表示纤维直径; L_f 表示纤维长度; σ_{fu} 表示纤维抗拉强度; E_f 表示纤维弹性模量; $\Delta L/L$ 表示纤维伸长率; ρ_f 表示纤维密度。

表1 胶凝材料粒径分布

Table 1 Particle size distribution of cementitious materials

材料	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	表面积 $A_{ss}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
OPC	6.0	23.3	54.2	0.436
CGP	2.1	10.1	44.4	1.12
SF	0.07	0.16	0.36	22.7

D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 表示样品的累计粒度分布数达到10%、50%、90%时所对应的粒径。

表2 水泥和煤矸石粉化学组分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of cement and coal gangue powder (mass fraction) %

材料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
OPC	17.05	4.85	4.30	66.37	2.5	3.03	0.21	0.66
CGP	59.92	21.83	6.13	4.37	1.41	0.19	0.78	3.52
SF	95.26	0.75	0.95	0.78	0.85	0.3	—	—

表3 PVA纤维的物理和机械特性

Table 3 Physical and mechanical properties of PVA fibers

$D_f/\mu\text{m}$	L_f/mm	σ_{fu}/MPa	E_f/GPa	$\frac{\Delta L}{L}/\%$	$\rho_f/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
31	12	1400	35.6	7~8	1.3

1.2 试验设计

设置煤矸石粉、硅灰、PVA纤维、水胶比(W/B)、砂胶比(S/B)5因素4水平设计正交试验。水泥使用量取1.0,相应地将煤矸石粉水平设置为0.4、

0.6、0.8、1.0,硅灰水平设置为0.14、0.16、0.18、0.2,PVA纤维水平设置为0.5%、1.0%、1.4%、1.7%;水胶比水平设置为0.18、0.22、0.26、0.30,砂胶比水平设置为0.3、0.5、0.7、0.9。其具体配合比见表4。本正交试验忽略了因素之间的交互作用。

表4 HS-HDC配合比(质量分数)

Table 4 Mixture proportions of HS-HDC (mass fraction)

试验组	CGP	SF	PVA纤维/%	W/B	S/B	PSCP
H1	0.4	0.14	1.0	0.18	0.3	0.034
H2	0.4	0.16	1.4	0.22	0.5	0.037
H3	0.4	0.18	1.7	0.26	0.7	0.040
H4	0.4	0.20	0.5	0.30	0.9	0.043
H5	0.6	0.14	1.7	0.30	0.5	0.022
H6	0.6	0.16	0.5	0.26	0.3	0.024
H7	0.6	0.18	1.0	0.22	0.9	0.020
H8	0.6	0.20	1.4	0.18	0.7	0.024
H9	0.8	0.14	0.5	0.22	0.7	0.022
H10	0.8	0.16	1.7	0.18	0.9	0.028
H11	0.8	0.18	1.4	0.30	0.3	0.022
H12	0.8	0.20	1.0	0.26	0.5	0.024
H13	1.0	0.14	1.4	0.26	0.9	0.022
H14	1.0	0.16	1.0	0.30	0.7	0.020
H15	1.0	0.18	0.5	0.18	0.5	0.024
H16	1.0	0.20	1.7	0.22	0.3	0.026

1.3 试件制作与养护

采用60 L容量卧式振动搅拌机搅拌。首先,将所有粉料(包括减水剂)全部投入搅拌机进行干拌,时间为2 min;然后,加入全部水进行搅拌,时间为2 min,保证分散成均匀浆体;最后,手工缓慢加入PVA纤维,边加边搅拌,时间为5 min,全部加完后继续搅拌1 min,直至PVA纤维完全分散均匀后停止搅拌。搅拌完成后,将新拌HS-HDC分层浇筑入模,并在振动台上振捣30 s。试件振捣完毕后抹平表面并加盖塑料薄膜保水,室温养护36 h后拆模,拆模后放入标准养护室[(20±2)℃,相对湿度90%以上],养护28 d,然后拿出晾干待试验。

1.4 测试设备与方法

立方体抗压试验:依据JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》^[24],由于HS-HDC没有粗骨料,因此采用砂浆抗压强度测试方法。抗压试验采用液压万能试验机,最大试验力为2000 kN。共测试3个70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm立方体试件的抗压强度,采用力控制的连续而均匀

加载,加载速度为 0.4 MPa/s,当试件接近破坏开始迅速变形时,停止调整试验机油门,直至试件破坏,然后记录破坏荷载。以 3 个试件的算数平均值作为该组试件的抗压强度,结果精确至 0.1 MPa。当 3 个试件的最大或最小值与中间值的差超过中间值的 15% 时,以中间值为该组试件的抗压强度。当两个测试值与中间值的差值均超过中间值的 15% 时,该组试验结果无效。立方体抗压试验装置和试件尺寸如图 1 所示。

四点弯曲试验:依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[25]和 CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法》^[26]设计试件和试验过程。四点弯曲试验采用专用压力机,最大试验力为 3000 kN。四点弯曲试验一共测试 3 个 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体梁,采用位移控制加载,加载速率为 0.5 mm/min。对应记录荷载和跨中位移



图 2 四点弯曲试验装置和试件尺寸 mm
Fig. 2 Four-point bending test device and specimen size

电镜扫描试验:采用捷克 TESCAN MIRA LMS 电镜,放大倍率为 50~2000,加速电压为 10 keV,仅对综合性能最佳的试验组的四点弯曲试验断裂面进行电镜扫描观察,测试试件数为 1,并未对其他试验组开展微观特征观察分析。

2 结果与讨论

2.1 抗压与弯曲强度

表 5 给出了所有试验组抗压和弯曲强度值,其中 CS 表示抗压强度,FS 表示弯曲强度,CV 表示变异系数(标准差与均值的比值)。CS、FS 均为 3 个试件的平均值,表中强度值采用均值±标准差的形式表示。可知:抗压强度的变异系数都在 10% 以内,大部分在 7% 以内,弯曲强度的变异系数基本上在 5% 以内,H11 和 H16 超过了 10%,总体上抗压强度与弯曲强度变异系数均在工程可接受范围内。

2.2 抗压失效模式与抗压强度正交分析

图 3 是立方体压缩失效模式。图 3(a)~(d)对应

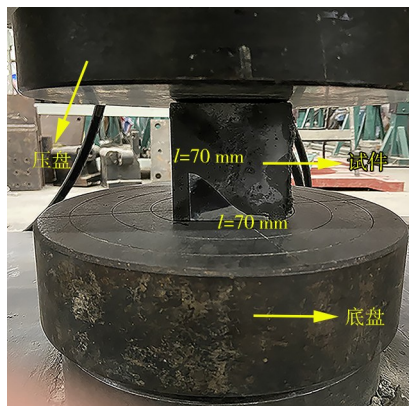
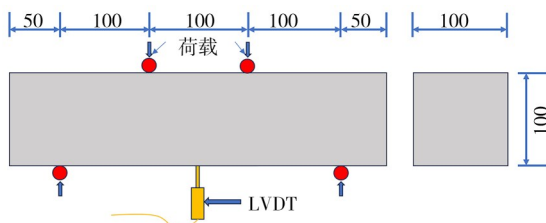


图 1 立方体抗压试验装置和试件尺寸
Fig. 1 Cube compression test device and specimen size

值,其中跨中位移采用千分表记录,精度为 0.001 mm(精确度足够)。试验加载到试件断裂或试件承载能力降到峰值荷载 50% 时即可停止加载。四点弯曲测试装置和试件尺寸如图 2 所示。



的 PVA 纤维掺量分别为 0.5%,1.0%,1.4%,1.7%。可知:所有试验组均未出现大块剥落,试件整体性好,主要原因是大量 PVA 纤维的“桥连作用”限制了混凝土大块体剥落;PVA 纤维掺量只有 0.5% 的 H9 试验组试件破坏后残余裂缝宽度最大,但依然没有混凝土大块体剥落;当纤维体积掺量不小于 1.0% 时,试件破坏后残余裂缝宽度明显变小,且基本上呈竖向分布,纤维掺量越大,裂缝宽度越小,试件整体性越好。与高强混凝土单轴压缩的爆炸式粉碎失效模式^[27]以及普通纤维混凝土单轴压缩的大块剥落失效模式^[28]相比,HS-HDC 的压缩性能表现更为优越。

表 6 和表 7 是抗压强度的极差和方差分析结果,其中 K_n 表示第 n 个水平之和, k_n 是 K_n 的均值。在方差分析时,若某因素的离差平方和项不超过最大离差平方和的 10% 时,此因素池化为误差项,离差平方和计算见式(1)^[29-30]:

表 5 HS-HDC 抗压与弯曲强度
Table 5 Compressive and flexural strengths of HS-HDC

试验组	CS/MPa	CV/%	FS/MPa	CV/%	试验组	CS/MPa	CV/%	FS/MPa	CV/%
H1	77.7±2.7	3.5	17.6±0.5	2.6	H9	64.9±5.2	8.0	15.5±0.2	1.4
H2	77.9±2.3	2.9	17.8±0.4	2.3	H10	73.3±2.1	2.9	21.2±0.2	8.5
H3	70.8±4.5	6.3	19.7±0.6	2.9	H11	55.3±3.6	6.6	18.7±2.9	15.3
H4	68.7±4.6	6.7	14.1±0.6	4.1	H12	68.1±2.7	4.0	16.5±0.5	2.8
H5	69.0±3.9	5.7	19.7±0.9	4.4	H13	56.1±3.3	6.0	17.2±0.2	1.4
H6	78.1±6.6	8.5	13.4±0.4	2.8	H14	49.9±2.3	4.6	15.0±0.8	5.6
H7	70.7±6.0	8.5	17.8±0.6	3.3	H15	66.5±3.6	5.4	13.7±0.1	0.6
H8	83.6±5.8	7.0	18.5±0.9	5.0	H16	70.0±2.0	2.9	19.7±2.3	11.6

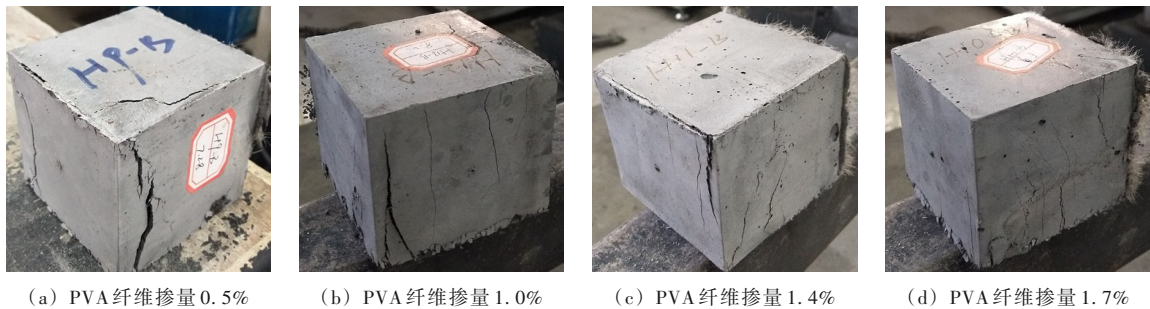


图 3 抗压失效模式
Fig. 3 Compressive failure modes

$$SS = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^q K_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (1a)$$
$$V = SS/f \quad (1b)$$
$$SS' = SS - Error \quad (1c)$$
$$P = SS'/T_i \quad (1d)$$

式中: V 为方差; SS' 为纯离差平方和; P 为贡献率; x_i 为正交试验结果; n 为正交试验次数; g 为正交试验次数 n 与因素水平数 q 的比值; f 为自由度; T_i 为所有因素的 SS 之和; $Error$ 为方差。

显著性水平判别规则如下^[29]: $F > F_{0.01}$, 视为非常显著, 用 ** 表示; $F_{0.05} < F < F_{0.01}$, 视为显著, 用 * 表示; $F < F_{0.05}$, 视为不显著 (保证 95% 的置信区间)。

表 6 是抗压强度极差分析结果。各因素对抗压强度的影响程度排序为煤矸石粉 > 水胶比 > 硅灰 > PVA 纤维 > 砂胶比。同时, 结合表 7 方差分析结果进行分析 (只考虑具有显著意义的因素, 即煤矸石粉和水胶比)。随着煤矸石粉掺量的增大, 抗压强度先小幅度提高, 由于煤矸石粉粒径比水泥小 (表 1), 一定掺量的煤矸石可起填充作用使得基体更加密实, 提高抗压强度, 但随着煤矸石粉掺量过大, 由于煤矸石粉水化活性远低于水泥^[16], 导致 C-S-H 水化产物减少, 相应的抗压强度也会降低; 随着水胶比的增大, 立方体抗压强度持续下

降, 原因在于水胶比增大, 混凝土中自由水增多, 导致混凝土内部孔隙率增大, 从而引起抗压强度降低^[31]。

由表 7 方差分析结果可知: 砂胶比可以池化为误差项。经分析, 只有煤矸石粉和水胶比两个因素对抗压强度的影响具有显著性意义, 贡献率分别为 44.83%、33.56%, 而硅灰和 PVA 纤维对抗压强度的影响很小, 贡献率仅 6.02%、0.06%, 均小于误差影响贡献 15.53%, 因此可以忽略硅灰和 PVA 纤维对抗压强度的影响, 类似地, 文献 [32] 中也发现 PVA 纤维对抗压强度的影响较小。

表 6 抗压强度极差分析
Table 6 Range analysis of compression strengths

因素	CGP	SF	PVA 纤维	W/B	S/B
K_1	295.2	267.6	266.4	301.2	281.2
K_2	301.6	279.2	272.8	283.6	281.6
K_3	261.6	263.2	283.2	273.2	269.2
K_4	242.4	290.4	278.4	242.8	268.8
k_1	73.8	66.9	66.6	75.3	70.3
k_2	75.4	69.8	68.2	70.9	70.4
k_3	65.4	65.8	70.8	68.3	67.3
k_4	60.6	72.6	69.6	60.7	67.2
范围	14.8	6.8	4.2	14.6	3.2

表 7 抗压强度方差分析
Table 7 Variance analysis of compression strengths

因素	离差平方和 SS	自由度 <i>f</i>	方差 <i>V</i>	<i>F</i> 值	显著性水平	纯离差平方和 SS'	影响贡献率 <i>P</i> /%
CGP	584.173	3	194.724	15.43	*	546.310	44.83
SF	111.223	3	37.074	2.94	—	73.360	6.02
PVA 纤维	38.533	3	12.844	1.02	—	0.670	0.06
W/B	446.848	3	148.949	11.80	*	408.985	33.56
S/B#	(37.863)	(3)	—	—	—	—	—
误差	37.863	3	12.621	—	—	—	15.53
合计	1218.64	15	—	—	—	—	100

$F_{0.05}(3,3)=9.28$; $F_{0.01}(3,3)=29.46$; #表示池化因素;()内数值为池化因素的相应数值。

2.3 弯曲失效模式与弯曲强度正交分析

图 4 是试件四点弯曲试验的两种典型失效模式。一种是单裂缝失效(如 H13),弯曲初裂发生后不会再产生新的裂缝,该初裂缝宽度会持续增大,不断有纤维拔出或断裂,并伴随着“吱吱声”,最后桥接纤维无法再继续承受增加的外荷载,导致试件破坏[图 3(a)];另一种是多裂缝失效(如 H5),弯曲初裂发生后跨中挠度会继续增加,外荷载也会继续增加,不断有新的裂缝产生,最后其中

某一条裂缝发展成主裂缝,然后出现类似于单裂缝一样的破坏形态[图 3(b)]。在本文的配合比中,只有 H5 和 H10 出现了明显的多裂缝破坏形态,可以发现纤维掺量至少要达到 1.7% 及以上,HS-HDC 才有可能出现多裂缝。而这两组配合比的水胶比、砂胶比和煤矸石粉对多裂缝的影响并没有明显的规律,后期可以开展以纤维掺量为主要变量的试验研究,继续探索纤维掺量变化对多裂缝状态的影响规律。

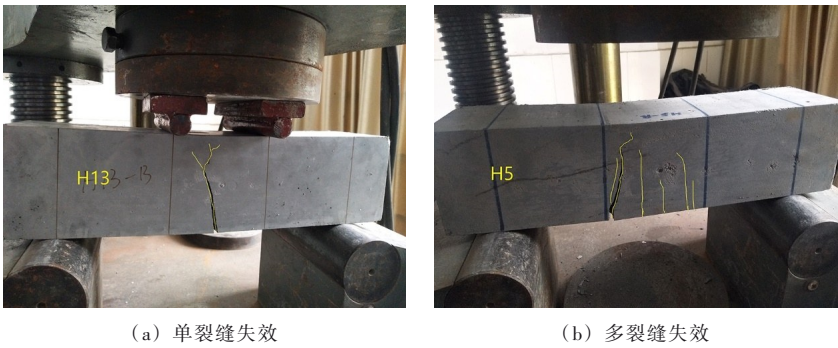


图 4 弯曲试验典型失效模式
Fig. 4 Typical failure modes in bending tests

表 8 是弯曲强度极差分析结果,各因素影响显著程度排序为 PVA 纤维>煤矸石粉>水胶比>砂胶比>硅灰。本文只分析有显著意义的因素对目标值的影响规律。表 9 的方差分析结果表明:只有 PVA 纤维对弯曲强度具有显著影响意义,随着 PVA 纤维掺量增加,弯曲强度单调递增。在本研究的配合比范围中,PVA 纤维掺量不超过 1.7% 时,纤维的分散效果较好。随着 PVA 纤维掺量增大,更强的纤维“桥连作用”对微裂缝的限制作用越强,弯曲强度也就越大。

由表 9 可知:砂胶比的离差平方和小于 PVA 纤

表 8 弯曲强度极差分析
Table 8 Range analysis of flexural strengths

因素	CGP	SF	PVA 纤维	W/B	S/B
K_1	69.2	70.0	66.8	71.2	69.6
K_2	69.6	67.6	72.0	70.8	67.6
K_3	72.0	70.0	80.4	66.8	68.8
K_4	65.6	68.8	56.8	67.6	70.4
k_1	17.3	17.5	16.7	17.8	17.4
k_2	17.4	16.9	18.0	17.7	16.9
k_3	18.0	17.5	20.1	16.7	17.2
k_4	16.4	17.2	14.2	16.9	17.6
范围	1.6	0.6	5.9	1.1	0.7

维的 10%,因此砂胶比池化为误差项。经分析,仅 PVA 纤维对弯曲强度具有显著性影响,影响贡献率为 66.10%,而煤矸石粉、硅灰和水胶比影响贡献率

分别为 6.65%、3.22% 和 5.38%,均小于误差影响贡献 18.65%,可忽略这三个组分对弯曲强度的影响。

表 9 弯曲强度方差分析
Table 9 Variance analysis of flexural strengths

因素	离差平方和 SS	自由度 <i>f</i>	方差 <i>V</i>	<i>F</i> 值	显著性水平	纯离差平方和 SS'	影响贡献率 <i>P</i> / %
CGP	11.943	3	3.981	2.781	—	7.648	6.65
SF	8.003	3	2.667	1.863	—	3.708	3.22
PVA 纤维	80.308	3	26.769	18.698	*	76.013	66.10
W/B	10.483	3	3.494	2.441	—	6.188	5.38
S/B	(4.295)	(3)	1.431	1.000	—	—	—
误差	4.295	3	—	—	—	—	18.65
合计	115.032	15	—	—	—	—	100

2.4 典型的弯曲失效模型

图 5 是典型的 HS-HDC 跨中荷载与挠度曲线。

可知:所有试验组均具有伪挠曲硬化现象(pseudo deflection-hardening)。

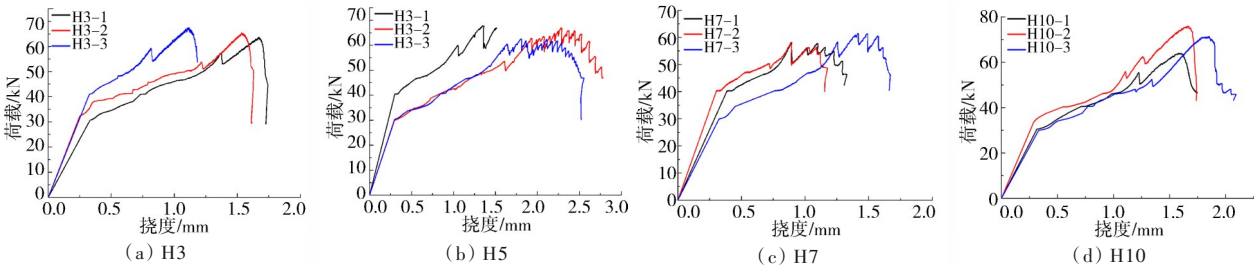


图 5 跨中荷载-挠度曲线
Fig. 5 Load-deflection curves at midspan

弯曲失效过程可以总结为典型的三个阶段,详见图 6。

段,达到峰值荷载之后,某一条裂缝持续扩展,承载能力不断下降,挠度继续增加,直到试件失效。

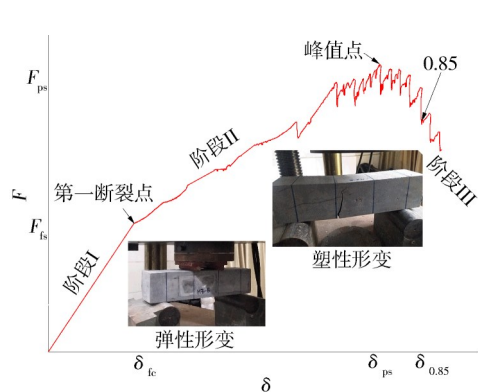


图 6 弯曲试验典型失效模式
Fig. 6 Typical failure modes in bending tests

阶段 I 为线弹性变形阶段,荷载与挠度基本呈线性关系,此时基体还未出现宏观裂缝;阶段 II 为挠曲硬化阶段,该阶段起始点即为初裂点^[33],随着挠度的增加,荷载缓慢增大,不断产生微裂缝或微裂缝不断扩展,出现明显的弹塑性变形;阶段 III 为挠曲软化阶

依据图 6 的弯曲失效模型可以定义如下弯曲参数:初裂荷载(F_{ic})和初裂挠度(δ_{ic})、峰值强度(F_{ps})和峰值挠度(δ_{ps})以及等效弯曲韧性(W_e^u),其中, F_{ic} 和 δ_{ic} 的确定方法可以参考美国标准 ASTM C1018-97^[33],荷载-挠度曲线由线性转变为非线性的转折点定义为初裂点,而 F_{ps} 和 δ_{ps} 分别对应曲线的最大荷载和相应的挠度。

等效弯曲韧性评价方法依据 DBJ 61/T 112—2016《高延性混凝土应用技术规程》,试件等效弯曲韧性可按式(2)计算,同时规程中定义:I 类高延性混凝土 28 d 养护期的等效弯曲韧性不低于 40 kJ/m³,II 类高延性混凝土不低于 30 kJ/m³^[5]。

$$W_e^u = \frac{\Omega_u}{bh^2} \tag{2}$$

式中: W_e^u 为等效弯曲韧性,kJ/m³; Ω_u 为跨中挠度 δ_u 时荷载-挠度曲线下的面积,N·mm; δ_u 为荷载下降至峰值荷载的 u 倍时对应的挠度值,mm,此处 u 取 0.85,

见图 5(b); b 、 h 分别为试件的截面宽度和高度, mm。

表 10 给出了所有试验组的弯曲特性参数, 用均值±标准差的形式表示。可知: H3、H5、H10、H16 峰值强度 F_{ps} 最大, 均超过了 10 MPa, 原因在于 4 个配合比的纤维掺量均为 1.7%, 纤维掺量与 F_{ps} 值具有强正相关性。峰值挠度 δ_{ps} 、等效弯曲韧性 W_e^u 亦是如此, 与纤维掺量有最直接关系。所有试验组的等效弯曲韧性值均大于 40 kJ/m³, 满足 I 类高延性混凝土标准, 其中 1.7% 纤维掺量的 H5 试验组等效弯曲韧性值最大, 达到 108.9 kJ/m³, 与文献[34]中 2% 掺量国产 PVA 纤维试验组比较, H5 等效弯曲韧性增加了 22.6%, 说明掺入固体废弃物煤矸石粉也能成功配制出 HS-HDC, 这为煤矸石的利用提供了新途径。

表 10 弯曲特性参数
Table 10 Parameter of flexural properties

试验组	F_{fc}/MPa	δ_{fc}/mm	F_{ps}/MPa	δ_{ps}/mm	$W_e^u/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varepsilon_u/\%$
H1	30.2±0.4	0.51±0.29	58.7±1.3	1.66±0.27	53.0±7.2	0.52±0.01
H2	37.6±5.1	0.94±0.26	59.4±1.1	1.59±0.27	56.1±1.1	0.63±0.10
H3	36.6±4.4	0.37±0.22	65.3±1.7	1.47±0.30	64.3±9.1	0.77±0.13
H4	34.2±4.6	0.77±0.08	46.8±1.5	1.42±0.36	38.8±11.4	0.24±0.09
H5	38.3±5.8	0.97±0.29	65.7±2.3	2.38±0.22	108.9±15.9	1.05±0.22
H6	31.0±0.6	0.37±0.04	45.1±0.9	0.78±0.04	42.1±1.5	0.11±0.00
H7	38.3±2.7	0.92±0.26	59.2±1.6	1.63±0.05	65.6±1.5	0.41±0.09
H8	34.0±4.8	0.68±0.15	61.5±2.5	1.81±0.28	67.7±7.8	0.64±0.09
H9	37.3±2.8	0.57±0.03	51.7±0.6	1.33±0.26	44.3±9.0	0.28±0.06
H10	35.6±4.2	0.97±0.24	70.2±5.0	2.20±0.04	84.2±4.7	0.91±0.06
H11	35.1±0.6	0.56±0.07	60.1±7.7	1.72±0.19	71.0±11.7	0.69±0.07
H12	36.0±0.7	0.71±0.22	54.9±1.4	1.78±0.25	69.3±11.9	0.55±0.05
H13	37.4±7.1	0.92±0.51	57.1±0.7	1.90±0.24	69.4±3.8	0.65±0.12
H14	32.8±2.8	0.39±0.07	49.8±2.2	1.56±0.19	60.3±5.5	0.53±0.05
H15	33.4±5.0	0.82±0.22	45.2±0.3	1.46±0.14	40.6±6.5	0.26±0.09
H16	41.3±4.3	1.25±0.45	61.4±6.2	2.23±0.12	82.1±5.0	0.84±0.12

2.5 拉伸应变能力

轴向拉伸试验是评价 HS-HDC 力学性能最直观的方式。然而在实际工程应用中, 由于单轴拉伸试验装置较复杂, 而且拉伸过程中易出现偏心问题, 因此也可采用四点弯曲试验来预估 HS-HDC 拉伸应变能力, 文献[35-36]均给出了根据四点弯曲试验结果反推轴向拉伸的拉伸应变能力计算公式, 见式(3):

$$\varepsilon_u = \frac{1}{s} \frac{kh}{l_0^2} f \quad (3)$$

式中: ε_u 为拉伸应变能力; s 为与荷载形式、支承条件等有关的系数, 取 1/8; k 为跨中截面的受拉区高度

与构件截面高度 h 的比值, 由四点弯曲试验裂缝沿构件高度方向的扩展深度进行估算, 根据四点弯曲试验试件的实际破坏情况, 按 PVA 纤维掺量 0.5%、1.0%、1.4%、1.7% 分别取值 0.3、0.4、0.5、0.6; f 为跨中峰值荷载所对应的挠度, mm, 即 δ_{ps} 。拉伸应变能力预估值 ε_u 见表 10 最后一列, 除了 H4、H6、H9、H15, 所有配合比都能满足日本土木工程学会指南中的最低规定: 不低于 0.5%^[41], H5 配合比拉伸应变能力最大, 达到了 1.05%。

2.6 隐含能和隐含碳

表 11 给出了本文涉及所有原材料单位质量的 EE 和 EC 值^[21,37-39]。可知: 单位质量 EE 最高的 3 种材料分别是 PVA 纤维、钢纤维以及聚羧酸高效减水剂, 单位质量的 EC 最高的 3 种材料分别是钢纤维、聚羧酸高效减水剂以及 PVA 纤维。需要说明的是, 对于通过物理研磨获得的煤矸石粉, 因为其单位质量 EE 和 EC 值暂未找到实测值, 本文假定其与磨细石灰石粉的取值相同。

表 11 原材料的隐含能和隐含碳
Table 11 Embodied energy and embodied carbon of raw materials

材料	隐含能/(MJ·kg ⁻¹)	隐含碳/(kg CO ₂ eq·kg ⁻¹)
水泥(OPC)	5.5	0.93
飞灰(FA)	0.1	0.008
煤矸石粉(CGP)	0.62	0.032
粒状高炉矿渣(GGBS)	1.6	0.083
石英砂(SS)	0.067	0.023
水(W)	0.01	0.001
硅粉(SF)	1.6	0.083
聚羧酸减水剂(PSCP)	42.67	1.84
PVA 纤维(PVF)	101	1.71
钢纤维(STF)	56.7	6.15
碎石(CR)	0.083	0.0048
人工砂(MS)	0.081	0.0048

表 12 为 C60 和 FRC60^[40]、M45^[41]、HVFA-ECC (FA/C=2.8)^[42]、超高性能混凝土 UHPFRC^[43]、H5 共 6 组不同种类混凝土材料的配合比。图 7 是单位体积(1 m³)混凝土的 EE 和 EC 计算值, UHPFRC 最高, EE 达到 15777.8 MJ/m³, EC 达到 1890.9 kg/m³, C60 最低, EE 和 EC 分别仅为 2436.7 MJ/m³、357.9 kg/m³, 这两个配合比的 EE 和 EC 值相差近 6 倍。本文中 H5 的 EE 和 EC 分别为 6723.3 MJ/m³ 和 706.0 kg/m³, EE 比 UHPFRC 减少了 57.4%, EC 比 UHPFRC 减

少了 62.7%,抗压强度下降了 52.7%。同为高性能混凝土,UHPFRC 的碳排放和能源消耗远比 M45、HVFA-ECC 以及 H5 要高。HVFA-ECC 采用了大量粉煤灰替代水泥(FA/C=2.8),H5 与 HVFA-ECC 相比,EE 和 EC 分别增加了 41.3% 和 16.9%,但是 HVFA-ECC 的 28 d 标准养护抗压强度只有 35.3 MPa,比 H5 下降了 48.8%,限制了 HVFA-ECC

的应用。H5 与 M45 相比较,EE 增加了 9.2%,EC 增加了 16.9%,抗压强度增加了 6.2%,更重要的是 H5 采用的国产 PVA 纤维,材料成本造价显著低于 M45。需要指出的是:文献中的几个配合比没有进行弯曲强度测试,因此未做弯曲强度的 EE 和 EC 对比。

表 12 文献中的配合比
Table 12 Mix proportions in the literature

试件	OPC	FA	SF	GGBS	CGP	SS	CR	MS	W	PSCP	STF	PVF
C60 ^[40]	360	108	0	50	0	0	1040	694	148	5.2	0	0
FRC60 ^[40]	360	80	0	80	0	0	1089	672	148	5.2	40	0
M45 ^[41]	571	685	0	0	0	456	0	0	332	6.8	0	26
HVFA-ECC ^[42]	324	906	0	0	0	456	0	0	320	5.3	0	26
UHPFRC ^[43]	875	0	44	0	0	1273	0	0	202	46	156	0
H5	664	0	93	0	388	578	0	0	345	14.6	0	22

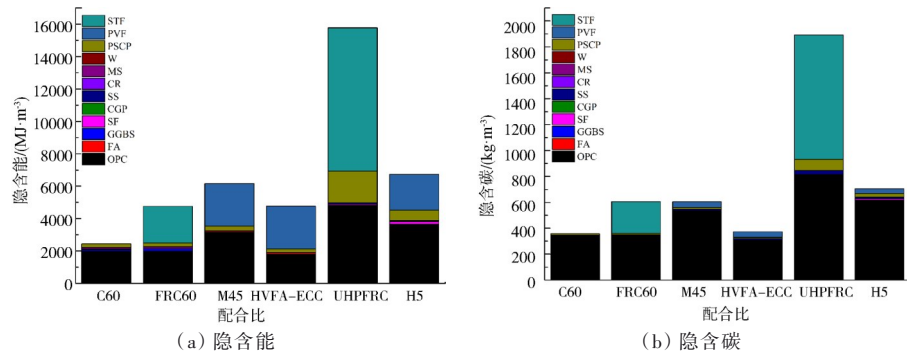


图 7 每立方混凝土的隐含能和隐含碳
Fig. 7 Embodied energy and embodied carbon per cubic meter of concrete

分析图 7 中反映的 H5 试件的 EE 和 EC,其中,水泥分别占比 54.6%、87.8%,PVA 纤维分别占比 33.2%、5.4%,由此可见,水泥和纤维是影响 EE 和 EC 最关键的两个组分。因此,采用固体废弃物作为辅助胶凝材料部分或全部替代水泥来降低 EE 和 EC 将是非常有效的方法。另一种途径是在不影响纤维增强混凝土力学性能的前提下,尽量保证良好的纤维分散效果,从而减少纤维用量。

2.7 微观结构

图 8 给出 H5 弯曲试验断面的电镜扫描微观结构。图 8(a)是断面基体的孔隙结构,这些孔隙结构是新拌合物在搅拌过程中引入的气泡,大量宏观孔结构的存在会降低抗压强度,也有可能降低开裂强度^[44];图 8(b)中的纤维根部与基体接口处混凝土

出现剥落且伴有微裂缝,且纤维表面出现严重划伤损伤,说明 PVA 纤维在拔出过程中,与基体之间发生了强烈的相互作用,导致纤维表面严重受损,且表面残留有较多基体附着物;试件破坏后断面纤维的主要失效模式是拔出和断裂两种形式,如图 8(c)所示,图中基体表面还分布着有很多纤维拔出后留下的孔洞;从图 8(d)发现纤维表面附着有一层基体,印证了图 8(b)的现象和推测,亲水性 PVA 纤维与基体化学黏结强度很大,文献[42]中也有同样的发现。

综合抗压强度、弯曲强度、等效弯曲韧性和拉伸应变能力 4 个力学指标,H5 和 H10 表现最好,其抗压强度大于 60 MPa,弯曲强度大于 19 MPa,等效弯曲韧性大于 80 kJ/m³,拉伸应变能力大于 0.9%,

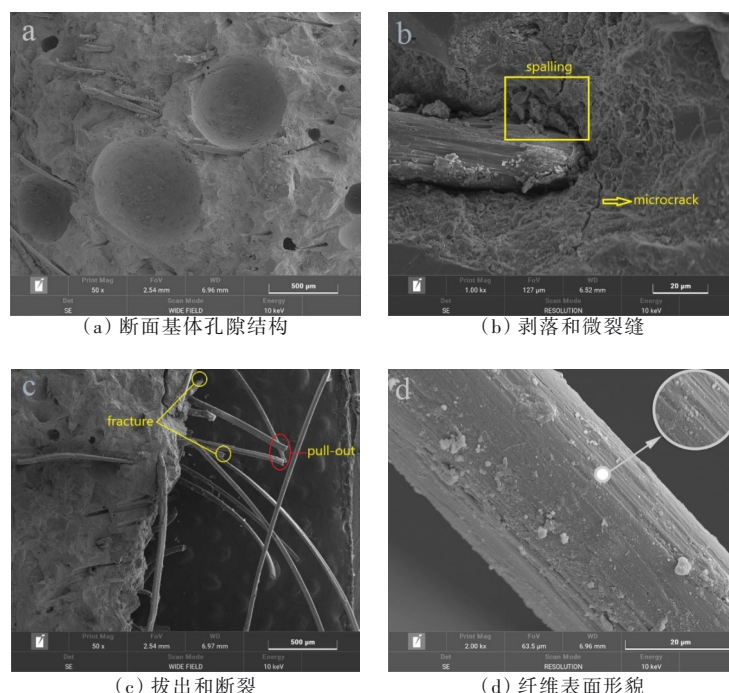


图8 H5的电镜扫描微观结构

Fig. 8 Microstructures of H5 based on SEM

且四点弯曲试验均表现为多裂缝挠曲失效。根据综合力学性能指标,并结合隐含碳和隐含能指标可知,H5配合比的综合性能最佳。

3 结 论

对掺煤矸石粉高强高延性混凝土开展正交试验,探索了各因素对各试验组的抗压强度、弯曲强度、弯曲韧性以及拉伸应变能力4个力学指标的影响规律,获得了综合性能最佳的配合比。主要研究结论如下:

1)HS-HDC受压破坏试件整体性较好,当纤维体积掺量不小于1.0%时,失效模式均为竖向微裂缝破坏,纤维掺量越高,裂缝宽度越小。各因素对抗压强度影响程度排序为煤矸石粉>水胶比>硅灰>PVA纤维>砂胶比,其中煤矸石粉与水胶比对抗压强度具有显著性影响,贡献率分别为44.83%和33.56%。

2)HS-HDC弯曲破坏有单裂缝和多裂缝两种破坏模式,弯曲失效模型可以分为线弹性、挠曲硬化和挠曲软化三个阶段。各因素对弯曲强度影响程度排序为PVA纤维>煤矸石粉>水胶比>砂胶比>硅灰,仅PVA纤维对弯曲强度具有显著性影响,贡献率为66.10%。

3)与UHPFRC相比较,H5的EE和EC分别降低了57.4%和62.7%,抗压强度下降了52.7%。与M45相比较,H5的EE和EC分别增加了9.2%和16.9%,但抗压强度也增加了6.2%。与HVFA-ECC相比较,H5的EE和EC分别增加了41.3%和16.9%,抗压强度增加了95.5%。

4)掺入煤矸石粉固体废弃物能够成功配制HS-HDC,结合EE和EC指标可知,H5配合比的综合性能最佳,其中抗压强度为69 MPa,弯曲强度为19.7 MPa,等效弯曲韧性为108.9 kJ/m³,拉伸应变能力为1.05%。

参 考 文 献

- [1] LI V C, WANG S X, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (ECC) [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [2] WU R X, ZHAO T J, TIAN L, et al. Influence of silica fume and thermal damage on uniaxial tension performance of PVC-SHCC [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 357-360: 977-981.
- [3] ZHANG X F, XU S L. Ductility evaluation of reinforced UHTCC structural members [J]. Advanced Materials Research, 2010, 150-151: 229-234.
- [4] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC) [S]. Tokyo: JSCE, 2008.
- [5] 陕西省住房和城乡建设厅. 高延性混凝土应用技术规程:

- DBJ 61/T 112—2016 [S]. 西安:陕西省建筑标准设计办公室, 2016.
- [6] 廖桥,余江滔,黄永强,等. 超高延性混凝土无筋拱静力和抗冲击性能研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(24):21-28.
- [7] 张伟,贺晶晶,胡炜,等. 高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能试验及承载力研究[J]. 工程力学, 2024, 41:1-13.
- [8] 张华鹏. 高延性混凝土(ECC)力学性能与加固隧道研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.
- [9] 邓明科,雷恒,张雨顺,等. 纤维织物增强高延性混凝土加固RC短柱抗剪性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1):79-89.
- [10] EMARA M, SALEM M A, MOHAMED H A, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using engineered cementitious composites and carbon fiber-reinforced polymer sheets[J]. *Fibers*, 2023, 11(11). DOI:10.3390/fib11110098.
- [11] LIU D, QIN F, DI J, et al. Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and ECC [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19, e02270.
- [12] 寇佳亮,樊明艳,孙国兴,等. 高延性混凝土加固震损老旧砌体抗震性能试验及恢复力模型研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(7):106-115,125.
- [13] 赵丹丹. HDC加固混凝土短柱小偏心受压损伤性能试验研究及数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2023.
- [14] 宋诗飞,邓明科,张阳玺. 纤维网格-高延性混凝土加固预制空心板抗弯性能试验研究[J/OL]. 工程力学, 2023:1-13 [2023-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20231019.1418.003.html>.
- [15] 郭晓璐,李寅雪,袁淑婷. 水泥生命周期评价及其低环境负荷研究进展[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):660-669.
- [16] 李化建. 煤矸石的综合利用[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [17] 牛晓燕,王海,安明磊,等. 煤矸石粗骨料对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2023(1):68-72.
- [18] 杨彪,姚贤华,何双华,等. 煤矸石粗骨料混凝土力学及耐久性能的研究进展[J]. 工业建筑, 2023, 53(1): 212-222.
- [19] 白国良,刘瀚卿,王建文,等. 基于骨料特性差异的煤矸石混凝土干燥收缩模型[J]. 土木工程学报, 2023, 56(11):27-42.
- [20] 刘瀚卿,白国良,王建文,等. 煤矸石混凝土单轴受压应力-应变曲线试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7):236-245.
- [21] SYMONS K. Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE). A BSRIA Guide [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2011, 164 (EN4): 206. DOI: 10.1680/ENER.2011.164.4.206.
- [22] KUA H W, MAGHIMAI M. Steel-versus-concrete debate revisited: global warming potential and embodied energy analyses based on attributional and consequential life cycle perspectives [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21 (1): 82-100.
- [23] SAZEDJ S, MORAIS A J, JALALI S. Comparison of embodied energy and carbon dioxide emissions of brick and concrete based on functional units [J]. *Physical Review*, 2002, 65 (7): 133-136.
- [24] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG 3420—2020[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [26] 中国工程建设协会. 纤维混凝土试验方法:CECS 13:2009 [S]. 北京:中国计划出版社,2009.
- [27] 张继旺,黄满峰,苏仕参,等. 高强珊瑚混凝土(HSCC)单轴受压性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(7): 2275-2282,2291.
- [28] 魏慧,吴涛,杨雪,等. 纤维增韧轻骨料混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究 [J]. 工程力学, 2019, 36(7): 126-135,173.
- [29] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55.
- [30] YANG E H, SAHMARAN M, YANG Y Z, et al. Rheological control in production of engineered cementitious composites [J]. *ACI Materials Journal*, 2009, 106(4):357-366.
- [31] 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, 210:188-197.
- [32] 王冲,高淑玲. 基于正交试验设计的PVA-ECC基体组分对其力学性能影响的显著性水平研究[J]. 混凝土, 2018(11): 52-55.
- [33] COMMITTEE A. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading) : ASTM C1018-97 [S]. West Conshohocken: ASTM International,1997.
- [34] 伍勇华,于浩,邓明科,等. 高延性混凝土弯曲性能的尺寸效应[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4):1167-1173.
- [35] 徐世焯,蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J]. 水利学报, 2009, 40(9):1055-1063.
- [36] LI V C. Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure [M]. Berlin: Springer, 2019.
- [37] CHOI W C, YUN H D, KANG J W, et al. Development of recycled strain-hardening cement-based composite (SHCC) for sustainable infrastructures [J]. *Composites Part B*, 2012, 43 (2):627-635.
- [38] YU J, WU H L, LEUNG C K Y. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength engineered cementitious composites (ECC) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262:343-354.
- [39] KEOLEIAN G A, KENDALL A, DETTLING J E, et al. Life cycle modeling of concrete bridge design: comparison of engineered cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2012, 11 (1):51-60.

- [40] 苏慈,田晓霞,曾田胜. C60 高性能钢纤维混凝土制备和应用[J]. 混凝土,2009,11(4):120-122.
- [41] WANG S, LI V C. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(3): 233-241.
- [42] YANG E H, YANG Y Z, LI V C. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(6):620-628.
- [43] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56:29-39.
- [44] ZHANG Z G, YANG F, LIU J C, et al. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash[J]. Cement and Concrete Research, 2020,137:1-15.