

文章编号:1673-9469(2023)04-0060-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.009

## 粉煤灰掺量对 HDCC 力学及收缩性能的试验研究

马东<sup>1</sup>,王成生<sup>2</sup>,周建国<sup>3</sup>,田砾<sup>1\*</sup>,王鹏刚<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中交天津港湾工程设计院有限公司青岛分公司, 天津 300000;  
3. 山东路桥集团青岛分公司, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 由于高延性纤维增强水泥基复合材料(HDCC)收缩变形大和价格昂贵等问题,采用国产PVA纤维、粉煤灰等材料制备低收缩、低成本HDCC。采用微观试验和宏观试验进行分析,结果表明:随着粉煤灰掺量的增加,延迟了HDCC的水化反应,引起力学性能的降低,使纤维基体的界面微观力学参数发生改变,促进了纤维从基体中拔出,使延性和韧性显著提高,同时显著降低了收缩变形。

**关键词:** 粉煤灰;HDCC;纤维与基体界面性能;单轴拉伸性能;收缩

**中图分类号:** TU528

**文献标识码:** A

## Experimental Study on the Effect of Fly Ash Content on the Mechanical and Shrinkage Properties of HDCC

MA Dong<sup>1</sup>, WANG Chengsheng<sup>2</sup>, ZHOU Jianguo<sup>3</sup>, TIAN Li<sup>1\*</sup>, WANG Penggang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China; 2. Tianjin Port Engineering Design & Consulting Company Ltd. of CCCC, Tianjing 300000, China;  
3. Shandong Road and Bridge Group Co. Ltd., Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266033, China)

**Abstract:** Due to the large shrinkage deformation and high cost of high ductility fiber reinforced cementitious composites (HDCC), domestic materials such as PVA fibers and fly ash have been used to prepare HDCC with low shrinkage and low-cost. In this study, the micro and macro experiments on HDCC were conducted and analyzed. It is shown that the hydration reaction of HDCC is delayed with the increase of fly ash content, resulting in a decrease in the mechanical properties and a variation in the interface micro mechanical parameters of the fiber matrix. This promotes the extraction of fibers from the matrix, significantly improves the ductility and toughness, and reduces the shrinkage deformation.

**Key words:** fly ash; HDCC; fiber-matrix interface property; uniaxial tensile property; shrinkage

高延性纤维增强水泥基复合材料(HDCC)是Li基于微观力学、断裂力学和统计力学,通过调整纤维、基体和纤维-基体界面微观力学参数设计的一种纤维增强水泥基复合材料<sup>[1]</sup>,因其具有应变硬化和多缝开裂特点被广泛研究和应用,尤其应用于混凝土结构修复加固、桥梁连接板、抗震结构重要节点和机场跑道等方面<sup>[2-5]</sup>。粉煤灰作为一种常见的辅助胶凝材料<sup>[6]</sup>,已被广泛应用到HDCC中,通过粉煤灰取代水泥不仅可以提高HDCC材料的性能,还可以降低HDCC的生产成本。Wang

等<sup>[7]</sup>研究表明,大掺量粉煤灰(粉煤灰掺量为60%)可显著降低HDCC基体的强度,获得较高的拉伸应变。Yang等<sup>[8]</sup>研究了粉煤灰掺量占胶凝材料总量75%~85%的HDCC,结果表明,90d龄期HDCC仍能维持2%~3%的拉伸应变,且裂缝宽度显著减小。Zhu等<sup>[9-10]</sup>研究表明粉煤灰掺量为50%~80%能显著提高HDCC的抗弯性能和细化裂缝等。然而,上述相关研究采用的是进口高强度、高弹性模量的PVA纤维或者PE纤维,导致HDCC成本较高。我国是PVA纤维生产大国,

收稿日期:2023-05-04

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR202103020358);宁波市科技创新2025重大专项(2020Z035)

作者简介:马东(1994-),男,山东曹县人,硕士研究生,从事高延性纤维增强水泥基复合材料方面的研究。

\* 通讯作者:田砾(1972-),女,山东青岛人,博士,教授,从事混凝土结构耐久性方面的研究。

表 1 水泥和粉煤灰的化学组成(单位:%)

Tab. 1 Chemical composition of cement and fly ash (unit: %)

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
水泥	19.95	4.83	2.93	65.71	2.95	2.28	0.34	0.21	0.80
粉煤灰	47.41	36.83	6.71	6.27	0.35	0.22	1.53	0.17	0.51

表 2 PVA 纤维物理力学性能指标

Tab. 2 Physical and mechanical properties of PVA fiber

极限抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限延伸率/%	直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1 300	30	9	39	12	13

2021 年我国 PVA 纤维产量高达 100 万吨。与进口纤维相比,国产 PVA 纤维强度和弹性模量均较低,但成本仅为进口纤维的 1/5。因此,许多研究者尝试采用国产 PVA 纤维制备 HDCC, 研究表明,采用国产 PVA 纤维同样制备出相对较好的拉伸性能和力学性能<sup>[11-14]</sup>的 HDCC。然而,对 HDCC 的微观机理方面的相关研究尚不完善,同时 HDCC 收缩显著高于普通水泥基材料的问题亟待解决。针对上述问题,本文采用国产 PVA 纤维和大掺量粉煤灰等材料制备低收缩 HDCC, 系统研究粉煤灰掺量对 HDCC 微结构、力学及收缩性能的影响。为低成本、低收缩 HDCC 制备与应用提供依据。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 原材料

采用 P. O 52.5 水泥和 I 级低钙粉煤灰,水泥和粉煤灰的化学组成见表 1。石英砂粒径为 80~120 目,减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水率为 30%。采用国产 PVA 纤维,其物理力学性能见表 2。

### 1.2 配合比

HDCC 配合比和基体净浆配合比见表 3 和表 4。其中,水胶比为 0.36,粉煤灰掺量分别为水泥掺量的 1.2 倍、1.5 倍和 2.2 倍,砂胶比为 0.36, PVA 纤维的体积掺量为 2%。

表 3 HDCC 配合比(单位:kg/m<sup>3</sup>)Tab. 3 Mix proportion of HDCC (unit: kg/m<sup>3</sup>)

编号	水泥	粉煤灰	纤维	减水剂	石英砂	水
FA1.2	568	682	26	1.15	450	450
FA1.5	500	750	26	1.15	450	450
FA2.2	391	859	26	1.15	450	450

表 4 HDCC 基体配合比(单位:kg/m<sup>3</sup>)Tab. 4 Mix proportion of matrix of HDCC (unit: kg/m<sup>3</sup>)

编号	水泥	粉煤灰	水
FA1.2	227	273	180
FA1.5	200	300	180
FA2.2	156	344	180

### 1.3 试验方法

采用 TAM air 八通道等温量热仪,测试不同样品的水化热。按照表 4 称量各种原材料,采用净浆搅拌机搅拌,用胶头滴管将样品装入安倍瓶中,然后将安倍瓶放入等温量热仪进行测试,测试环境温度(20±2)℃,相对湿度为 60%±5%。

采用 PQ001 型低场核磁共振分析仪测试试样的孔结构。按照表 3 准备试样,试样在混凝土标准养护室(温度(20±2)℃,相对湿度≥95%)养护至 14 和 56 d 后用小锤子轻轻敲碎,取 2~3 mm 的碎块进行饱水处理,然后将待测试样放入 LF-NMR 仪器的圆柱筒中,调整好仪器相关参数进行测试。

采用 FSF003 高精度纤维性能测试仪进行单纤维拔出试验,按照表 3 配合比,试样尺寸为 10 mm 的立方体,纤维一端埋入基体内部 1 mm,覆膜养护 1 d 后拆模,然后将试样放入混凝土标准养护室养护 7 d 后取出,待表面干燥后用 AB 树脂胶在纤维另一端进行纤维挂胶球处理<sup>[15]</sup>。待胶球强度达到待测强度进行试验,测试拉伸速率为 3  $\mu\text{m/s}$ 。

抗压、抗折强度试验参照 GB/T—17671《水泥胶砂强度检验方法》进行,试块成型 1 d 后拆模,然后放入标准养护室进行养护,之后分别测试 14、28、56 和 90 d 龄期的抗压和抗折强度。

单轴拉伸试验采用“哑铃型”试块进行拉伸性能的测试<sup>[16]</sup>。试件尺寸示意图和试验测试图如图 1 所示。试块成型后覆膜养护 1 d 后拆模、编号,将试块放入标准养护室养护 28 d,到待测龄期后取出试块,并擦干表面水分,采用电子拉伸试验机进行测试,采用外接引伸计(测量标距为 80 mm,

最大测量变形为 20 mm) 同步采集纵向变形, 加载方式按位移加载, 加载速率为 0.3 mm/min。

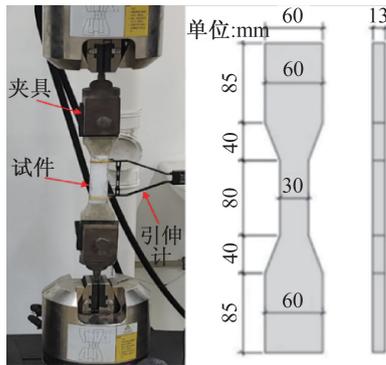


图 1 单轴拉伸试验和试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of uniaxial tensile tests and specimens

自收缩和干收缩试验按照规范 JCT/603—2004《水泥胶砂干缩试验方法》, 采用 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试件, 成型 24 h 后拆模。拆模后将自收缩试块放入恒温恒湿养护室(温度  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $60\% \pm 5\%$ ) 静置 4 h 后, 用铝箔纸将其全部密封, 分别进行编号、标记测试方向。干燥收缩试块成型后 24 h 后拆模, 然后将试块放入混凝土标准养护室养护至 28 d, 取出试块放入恒温恒湿养护室(静置 4 h 后, 沿两个长度方向用铝箔胶带密封, 只保留两个暴露面。使用标准杆调零后, 将试块放在水泥砂浆比长仪上进行测试, 测试结束后将试块放入恒温恒湿养护室。自收缩和干燥收缩试块分别以 1 和 28 d 的长度为初始长度, 分别测试不同龄期的试块长度, 通过计算得到试块收缩变形量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 粉煤灰掺量对 HDCC 净浆水化速率的影响

与硅酸盐水泥的水化过程相似, HDCC 净浆的水化反应同样包括初始期、诱导期、加速期、减速期和稳定期五个反应过程。从图 2 可知, 随着粉煤灰掺量的增加, HDCC 净浆的水化放热峰值和累计放热量均显著降低。从图 2(a) 可知, 随着粉煤灰掺量的增加, 初始期提前。产生上述的原因: 当 HDCC 的胶凝材料用量固定不变时, 随着粉煤灰掺量的增加减少了水泥用量, 而粉煤灰早期不参与水化反应, 相当于增大了 HDCC 的有效水胶比, 使更多的水参与水泥初始期的水化, 导致初始期提前。而诱导期、加速期、减速期和稳定期均出现明显的延迟现象。产生上述的原因: (1) 粉煤灰掺量增大了有效水胶比, 一方面降低了孔隙溶液的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度, 另一方面粉煤灰颗粒对  $\text{Ca}^{2+}$  有吸附作用, 因此,  $\text{Ca}^{2+}$  需要更长的时间达到过饱和, 导致诱导期延后<sup>[18]</sup>; (2) 随着粉煤灰掺量的增加导致水泥用量的减少, 使 HDCC 净浆体系水化反应生成的氢氧化钙(CH)和水化硅酸钙(C-S-H)明显减少, 进而导致水化过程延迟且放热峰显著降低。从上述分析可知, 随着粉煤灰掺量的增加, 显著降低和延迟了 HDCC 的水化放热速率, 从而引起 HDCC 净浆累计放热量的显著降低。

此外, 与普通硅酸盐水泥水化放热相比, 在加速期新增了一个放热峰, 产生的原因是与粉煤灰的矿物组成有关<sup>[17]</sup>。产生第二个放热峰的原因是由于粉煤灰中氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量较高, 水化反应生成的铝酸盐相与钙矾石反应形成单硫型水化硫

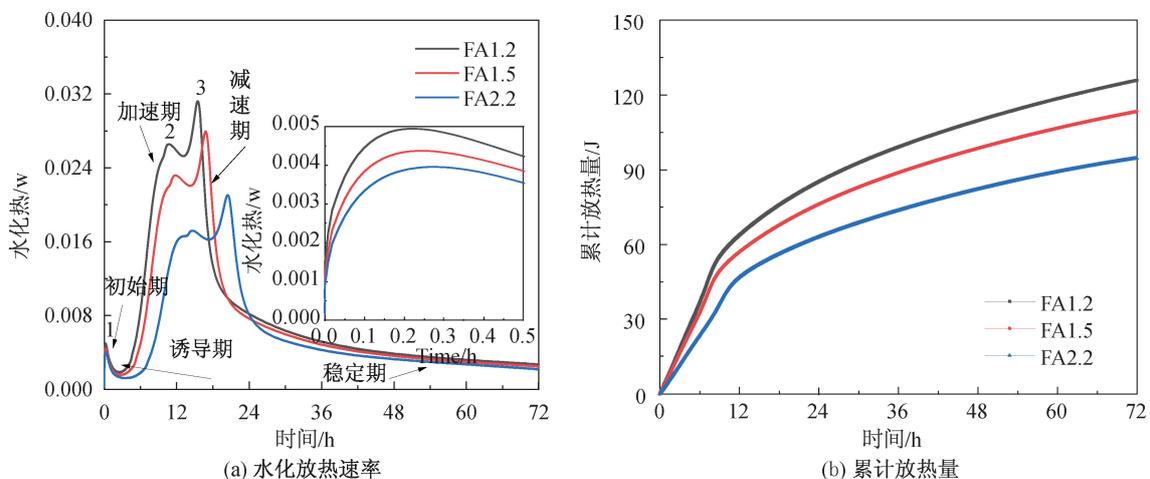


图 2 粉煤灰掺量对 HDCC 净浆水化放热速率和累计放热量的影响

Fig. 2 Effect of fly ash amount on the heat release rate of hydration and cumulative heat release of HDCC matrix

铝酸钙 (AFm) 有关,此过程放出一定的热量,造成加速期新放热峰的出现。

### 2.2 粉煤灰掺量对 PVA 纤维-基体界面微观力学参数的影响

图 3 和表 5 分别为单纤维拔出荷载-位移曲线和 PVA 纤维-基体界面微观力学参数。可以看出,粉煤灰掺量的增加引起拉伸荷载的降低,FA2.2 出现了明显的荷载陡降段,该现象表示 PVA 纤维与基体的脱粘现象。根据文献[19]中公式,计算出化学结合能  $G_d$ 、界面摩擦力  $\tau_0$  和滑移硬化系数  $\beta$ ,计算结果如表 5 所示。由于 FA1.2 基体强度高,产生较大的  $G_d$ ,导致纤维因较高的  $G_d$  发生断裂,使基体无法进入脱粘和滑移强化阶段。对于 FA1.5 和 FA2.2,随着粉煤灰掺量的增加,会显著降低纤维与基体之间的化学结合能  $G_d$ 、界面摩擦力  $\tau_0$ ,但滑移硬化系数  $\beta$  逐渐增大。这是因为粉煤灰掺量的增加,延迟了 HDCC 基体的水化放热速率,导致 HDCC 基体强度显著降低,未水化的球状粉煤灰颗粒在基体中起到填充和润滑作用。因此,这三个微观参数的改变会使纤维在基体中由纤维拔断变为纤维拔出<sup>[19]</sup>,这种变化对于提高 HDCC 的延性十分有利。

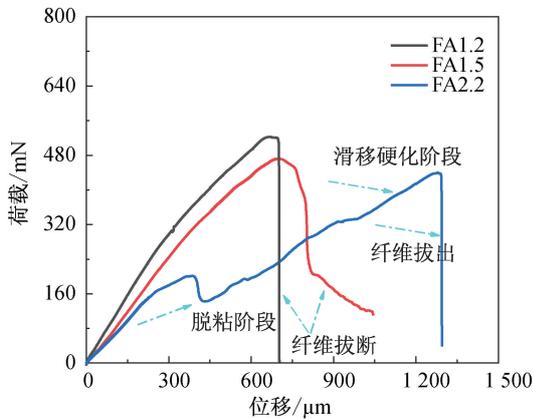


图 3 单纤维拔出试验曲线

Fig. 3 Single fiber pull-out test curve

表 5 PVA 纤维-基体界面微观参数

Tab. 5 Microscopic parameters of PVA fiber-matrix interface

编号	$G_d$ /J	$\tau_0$ /MPa	$\beta$
FA1.2	30.825	-	-
FA1.5	8.210	1.590	0.039
FA2.2	0.402	1.160	0.136

### 2.3 粉煤灰掺量对 HDCC 孔结构分布的影响

粉煤灰掺量对 HDCC 孔径分布的影响如图 4

所示。从图 4(a) 和 (b) 可知,随着粉煤灰掺量的增加,波峰和孔隙累计体积都增大。随着养护龄期的增加,波峰和孔隙累计体积显著降低。在 14 d 龄期时,曲线第一个波峰对应的孔径(最可几孔径)随着粉煤灰掺量的增加右移(FA1.2、FA1.5;20.39 nm, FA2.2;25.85 nm)。而 56 d 的最可几孔径分别为(FA1.2、FA1.5;19.02 nm, FA2.2;21.85 nm)。这是因为粉煤灰掺量的增加,引起 HDCC 内部水化产物相对稀疏,使最可几孔径右移,而随着龄期的增加,最可几孔径左移,这是因为粉煤灰的二次水化反应,生成的水化产物填充了 HDCC 的内部孔隙。根据研究表明<sup>[20]</sup>,水泥基材料的孔结构可分为凝胶孔(<10 nm)、小毛细孔(10~50 nm)、大毛细孔(50~100 nm)以及有害孔(>100 nm)。此外,从图 4(b) 的孔隙累计体积曲线可计算出各种孔径的占比,如图 4(c) 所示。可知,随着粉煤灰掺量的增加,小毛细孔占比降低,有害孔占比增大。HDCC 的总孔隙率如表 6 所示。很明显,随着粉煤灰掺量的增大,HDCC 的总孔隙率变大。因此,粉煤灰的掺入显著改变了 HDCC 的内部孔隙结构,从而影响 HDCC 的力学和收缩变形性能。

### 2.4 粉煤灰掺量对 HDCC 单轴拉伸性能的影响

HDCC 单轴拉伸应力-应变曲线如图 5 所示。可知,所有配合比的极限拉伸应变均大于 0.5%,且极限拉伸应变随着粉煤灰掺量的增加而增大。根据 JC/T 2461—2018 的规定,极限拉伸应变超过 0.5% 且裂缝宽度不超过 200  $\mu\text{m}$ ,即为高延性纤维增强水泥基复合材料。与 FA1.2 相比,FA1.5 和 FA2.2 的极限拉伸应变分别提高了 89% 和 128.7%,但极限抗拉强度随粉煤灰掺量的增加而减小,分别降低了 14.6%、25.2%。HDCC 多缝开裂情况如图 6 所示。可知,随着粉煤灰掺量的增加,HDCC 多缝开裂和应变硬化特性更明显。从 2.2 节可知,粉煤灰掺量越大,对降低化学结合能  $G_d$  和界面摩擦力  $\tau_0$  越明显,基体中的纤维从纤维拔断变为纤维拔出,促进纤维-基体更好地发挥桥接作用,使 HDCC 的延性显著提高。

### 2.5 粉煤灰掺量对 HDCC 抗压强度和抗折强度的影响

HDCC 的抗折强度和抗压强度如图 7(a) 和 (b) 所示。养护 90 d 后,与 FA1.2 相比,FA1.5 和 FA2.2 的抗折强度和抗压强度分别降低了 8.8%、

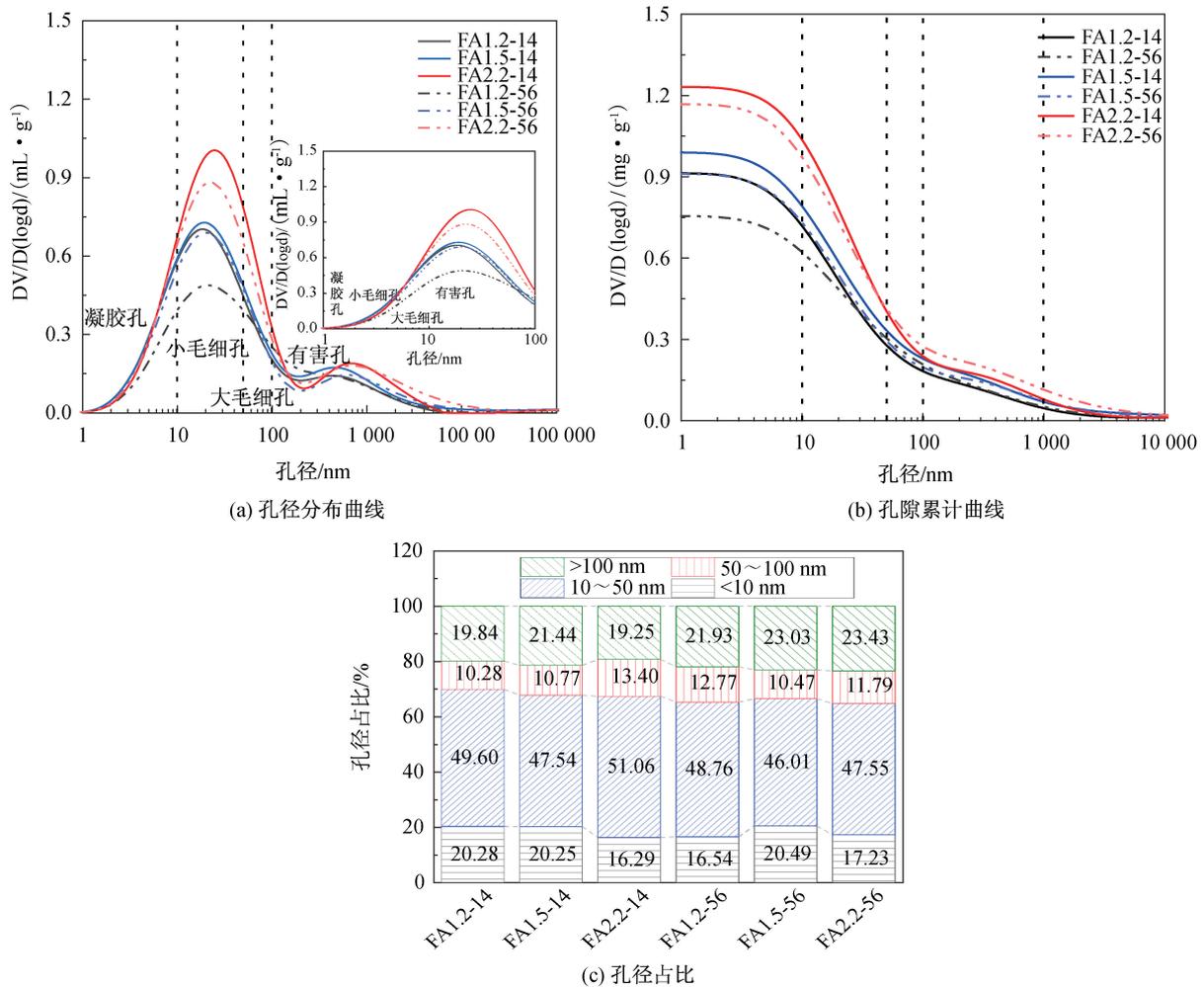


图4 粉煤灰掺量对HDCC孔径分布的影响

Fig. 4 Effect of fly-ash amount on the pore distribution of HDCC

表6 HDCC孔隙率  
Tab. 6 Porosity of HDCC

编号	14 d	56 d
FA1.2	8.70%	7.76%
FA1.5	10.37%	10.24%
FA2.2	13.87%	12.53%

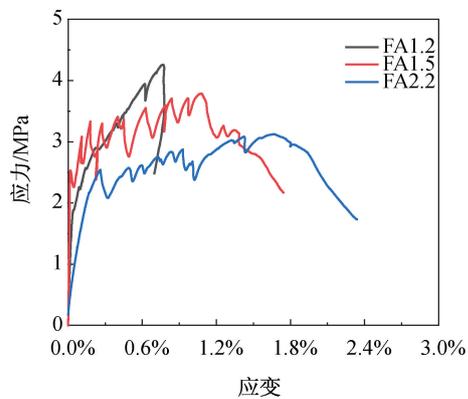


图5 HDCC单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Uniaxial tensile stress-strain curve of HDCC



图6 不同粉煤灰掺量HDCC的多缝开裂情况

Fig. 6 Multiple cracking of HDCC with different fly-ash dosages

16.5%和9.6%、36%。产生上述的原因如下：  
(1) 粉煤灰的反应活性较低，使HDCC内部反应生成的水化产物减少。  
(2) 从表6可知，粉煤灰的掺入增大了HDCC的总孔隙率，导致抗压、抗折强度的显著降低。与28d强度相比，三组配合比在90d龄期的抗折强度和抗压强度分别增加了14.6%、13.4%、7%和13.9%、20.2%、27.2%。这是由于养护龄期的增加，未水化的水泥颗粒的继

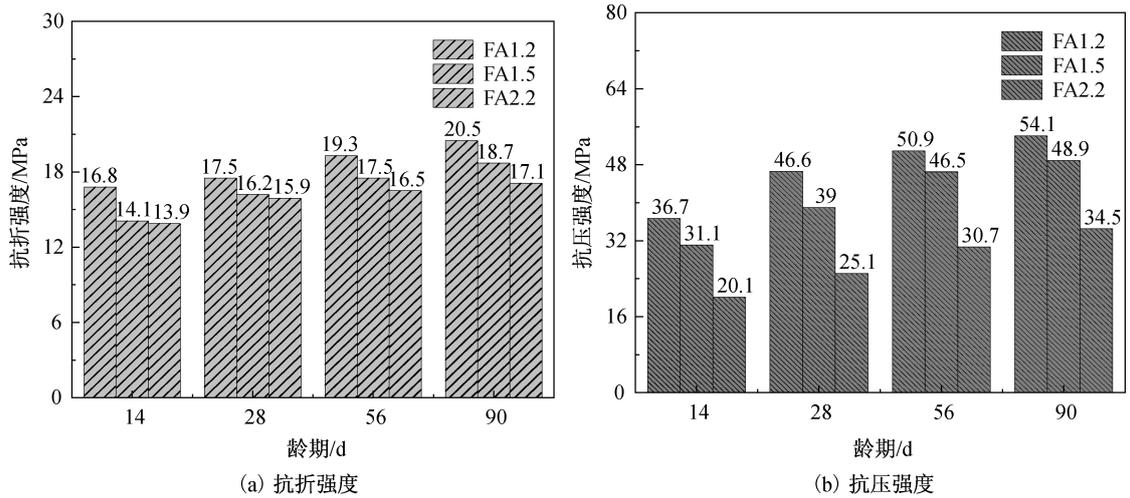


图 7 HDCC 的抗折和抗压强度

Fig. 7 Flexural and compressive strengths of HDCC

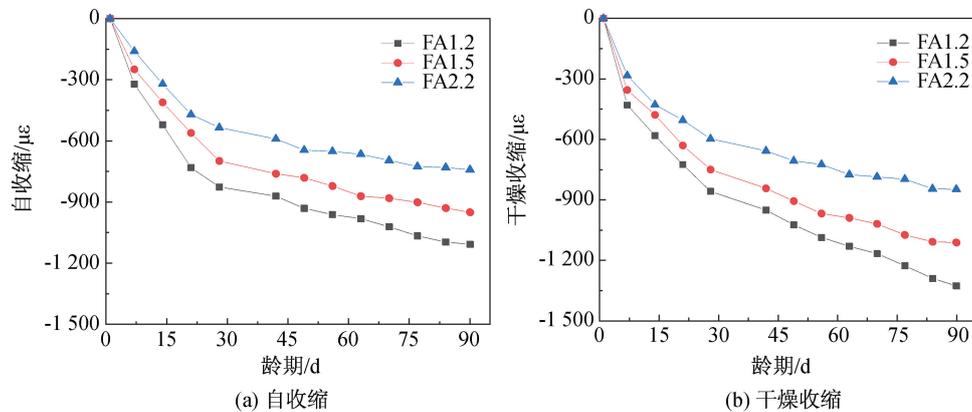


图 8 粉煤灰掺量对 HDCC 收缩变形的影响

Fig. 8 Effect of fly ash amount on shrinkage deformation of HDCC

续水化和粉煤灰中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与孔溶液中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生二次火山灰反应<sup>[21]</sup>,生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)填充 HDCC 内部孔隙。

### 2.6 粉煤灰掺量对 HDCC 自收缩和干燥收缩的影响

图 8 为粉煤灰掺量对 HDCC 收缩变形的影响。可以看出,28 d 自收缩变形发展较快,且自收缩变形随龄期的增加而增大,90 d 后趋于稳定,与 FA1.2 相比,FA1.5 和 FA2.2 在 90 d 龄期自收缩分别降低了 14.2% 和 30%。可见,随着粉煤灰的掺入可显著降低 HDCC 的自收缩变形。产生上述的原因如下:(1)从 2.1 节可知,粉煤灰掺量对 HDCC 净浆体系早期的水化有延迟作用,HDCC 内部水分消耗量减少。由 Kelvin 方程可知,较高的相对湿度可降低 HDCC 自收缩驱动力。(2)从图 5 (c) 可知,粉煤灰掺入减少了小毛细孔(10 ~

50 nm) 范围的孔径比例,而 HDCC 的自收缩变形主要与小毛细孔有关,小毛细孔径的减少是 HDCC 自收缩变形减小的另外一个原因。

HDCC 干燥收缩曲线如图 8 (b) 所示。与 FA1.2 相比,FA1.5 和 FA2.2 在 90 d 干燥收缩分别降低了 16.2% 和 36.1%。可见,随着粉煤灰掺量的增加,HDCC 的干燥收缩变形显著减小。这是因为:(1)未水化的粉煤灰颗粒作为细集料,抑制了 HDCC 的干燥收缩变形。(2)由于外界湿度保持恒定,而 HDCC 内部水分向外扩散,毛细孔弯液面半径逐渐减小<sup>[22]</sup>,引起干燥收缩。因此,随着粉煤灰掺量增加,水化产物的减少,导致干燥收缩因毛细失水而降低。

### 3 结论

1) 粉煤灰掺量的增加引起水泥用量的减少,增大了体系的有效水胶比,促进初始期水泥颗粒

的水化。而水泥用量的减少,导致体系更快地完成水化,使稳定期提前。此外,由于粉煤灰颗粒的稀释和吸附作用,使  $\text{Ca}^{2+}$  浓度过饱和的时间延长,反应生成物延迟了诱导期、加速期和减速期。

2)粉煤灰掺量的增加,降低了基体的强度,引起微观力学参数的改变,促使基体中的纤维由拔断转为拔出,进而提高了 HDCC 延性和韧性。

3)粉煤灰掺量的增加,增加了 HDCC 的总孔隙率,导致了抗压、抗折强度和极限抗拉强度的降低。而小毛细孔径占比降低和内部相对湿度高引起自收缩显著降低,干燥收缩降低是未水化的粉煤灰颗粒的微集料效应和水化产物减少毛细失水降低引起的。

### 参考文献:

- [1] 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): 531-536.
- [2] 卜良桃, 万长胜, 尹鹏. PVA-ECC 加固 RC 足尺梁受弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 5-10.
- [3] LEPECH M D, LI V C. Application of ECC for Bridge Deck Link Slabs[J]. Materials and Structures, 2009, 42(9): 1185-1195.
- [4] 刘桐, 陈娟, 刘友忠. 基于水泥基复合材料连接的装配式框架节点抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 84-88.
- [5] 袁朝庆, 代晓辉, 章桀, 等. 水泥基复合材料双钢板组合剪力墙最佳 ECC 高度研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(03): 37-45.
- [6] 乔思皓, 薛婉文, 吴绍奇. 粉煤灰掺量对 ECC 力学性能及纤维破坏形态的影响[J]. 混凝土, 2022(8): 82-86.
- [7] WANG S, LI V C. Engineered Cementitious Composites with High-volume Fly Ash[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3): 233-241.
- [8] YANG E H, YANG Y, 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.
- [9] ZHU Y, YANG Y Z, GAO X J, et al. Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites with High Volume Fly Ash[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2009, 24(S1): 166-170.
- [10] ZHANG Z, 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: 17-23.
- [11] 郭丽萍, 陈波, 孙伟. 膨胀剂对高延性水泥基复合材料力学及变形性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(11): 1609-1613.
- [12] 郭丽萍, 陈波, 孙伟. 修补用高延性水泥基复合材料性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 169-174.
- [13] 马辉. ECC 机场道面加铺层的材料及结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [14] ZHAO J, YAN C, LIU S, et al. Effect of Expansive Agent and Curing Condition on the Properties of Low-cost Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 268(11): 121-169.
- [15] 雷东移. 生态纳米超高强超高延性水泥基复合材料设计与关键性能[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [16] WU H, YU J, DU Y, et al. Mechanical Performance of MgO-doped Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115: 103857.
- [17] BULLARD J W, JENNINGS H M, LIVINGSTON R A, et al. Mechanisms of Cement Hydration[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1208-1223.
- [18] 李虹燕, 丁铸, 邢锋, 等. 粉煤灰、矿渣对水泥水化热的影响[J]. 混凝土, 2008(10): 54-57.
- [19] YANG E H, YANG Y, LI V C. Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness[J]. American Concrete Institute Materials Journal, 2007, 104(6): 620-628.
- [20] ALIGIZAKI K K. Pore Structure of Cement-based Materials: Testing, Interpretation and Requirements[M]. Taylor and Francis: CRC Press, 2005.
- [21] SHOJI D, HE Z, ZHANG D, et al. The Greening of Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126701.
- [22] ŞAHMARARAN M, LACHEMI M, HOSSAIN K A, et al. Internal Curing of Engineered Cementitious Composites for Prevention of Early Age Autogenous Shrinkage Cracking[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(10): 893-901.

(责任编辑 周雪梅)