

粉煤灰对早强型高延性水泥基复合材料早期力学性能影响

赵颂凯¹, 车佳玲¹, 丁 丽²

¹宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

²宁夏农垦建设集团有限公司, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年3月27日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

摘要

早强型高延性水泥基复合材料(SAC-ECC)具有早期强度高、且在拉伸荷载下呈现高延性的水泥基复合材料。为了降低材料成本,以粉煤灰掺量为变量,研究了1 d、3 d龄期SAC-ECC抗压强度和单轴拉伸性能的影响。结果表明:SAC-ECC的早期抗压强度随粉煤灰掺量的增加呈现逐渐减小的趋势,当粉煤灰掺量低于40%时,SAC-ECC 1 d和3 d抗压强度均可达到20 MPa~30 MPa;当粉煤灰掺量超过30%时SAC-ECC 1 d的极限延伸率大于1%,3 d抗拉强度相较于1 d有所下降但仍能表现出较好的延性。

关键词

硫铝酸盐水泥, ECC, 粉煤灰, 抗压强度, 单轴拉伸

Effect of Fly Ash on Early Mechanical Properties of Early Strength High Ductility Cement-Based Composites

Songkai Zhao¹, Jialing Che¹, Li Ding²

¹School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

²Ningxia Agricultural Reclamation Construction Co. LTD., Yinchuan Ningxia

Received: Mar. 27th, 2023; accepted: Apr. 22nd, 2023; published: Apr. 29th, 2023

Abstract

Early strength high ductility cement-based composite (SAC-ECC) is a cement-based composite with

high early strength and high ductility under tensile load. In order to reduce the material cost, the influence of fly ash content on the compressive strength and uniaxial tensile properties of SAC-ECC at 1 d and 3 d ages was studied. The results show that the early compressive strength of SAC-ECC decreases gradually with the increase of fly ash content. When the fly ash content is lower than 40%, the compressive strength of 1 d and 3 d of SAC-ECC can reach 20 MPa~30 MPa. When the fly ash content exceeds 30%, the ultimate elongation of SAC-ECC 1 d is greater than 1%. Compared with 1 d, the 3 d tensile strength decreases but still shows good ductility.

Keywords

Sulphate Aluminium Cement, ECC, Fly Ash, Compressive Strength, Uniaxial Elongation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为克服混凝土抗拉强度低、韧性差，裂缝展开难以控制等问题，美国密歇根大学的 Victor Li 教授经过系统设计研发了一种在拉伸和剪切荷载下呈现高延性的水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)。目前 ECC 材料已投入实际工程应用，但因其早期强度发展慢，无法应用到快速施工、应急抢修等工程。针对这一问题有学者用硫铝酸盐水泥(SAC)作为 ECC 材料的水泥基体制备出能够满足工程需要的早强高延性水泥基复合材料(SAC-ECC)，但材料成本过高，限制了 SAC-ECC 大范围的使用。

随着我国电力产业快速的发展，提高经济的同时排放的工业固废也给环境带来了危害，粉煤灰作为其中的主要固废如何妥善处理成为一个难题。粉煤灰颗粒较小表面圆滑加入水泥基体后起到类似于轴承作用能够提升基体的流动性，改善水泥砂浆的黏聚性，增强水泥延性[1]，所以常被用于制备 ECC 材料。王秋生等[2]通过研究不同粉煤灰掺量下 ECC 的受拉应变硬化性能，发现 ECC 的抗拉性能随粉煤灰掺量的增大而提高。蒋卓[3]、马保国[4] [5]等研究发现粉煤灰的加入能够缩短水泥的凝结时间，同时由于粉煤灰的稀释效应和低活性，随着粉煤灰掺量的增加水泥水化速率变慢，水泥基胶凝材料强度降低。

SAC-ECC 因早期水化速率快，纤维与水泥之间的黏结力大，导致 SAC-ECC 的抗拉性能低于 ECC [6]。为了提高 SAC-ECC 延性，本文以掺粉煤灰的 SAC-ECC 为研究对象，通过 1 d 和 3 d 龄期单轴受压和单轴受拉试验，分析粉煤灰对 SAC-ECC 早期性能的影响规律，为制备出早强型高延性水泥基复合材料及配合比的优化提供试验依据。

2. 试验

2.1. 试验原材料

试验水泥选用河北省唐山市北极熊水泥生产的快硬复合型 42.5 硫铝酸盐水泥(SAC·42.5)；粉煤灰(FA)选用宁夏灵武热电厂 I 级粉煤灰；硅灰(SF)选用河南远恒环保工程有限公司生产的硅灰，水泥、FA 和 SF 的化学成分见表 1；细集料选用粒径小于 0.315 mm 的腾格里沙漠砂；PVA 纤维力学性能见表 2；聚羧酸高性能减水剂，掺量为胶凝材料质量的 0.15%；酒石酸缓凝剂，掺量为胶凝材料质量的 0.015%；实验室自来水。

Table 1. Chemical composition of fast-hard sulphoaluminate cement (%)**表 1.** 原材料的化学组成(%)

化学成分	LOSS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂
SAC-42.5	0.3	9.8	28.53	3.05	42.51	2.61	9.34	1.23
FA	2.8	38.5	23.6	7.49	6.12	3.66	2.13	2.14
SF	2.6	96.76	0.31	0.07	0.1	0.11	0.00	0.00

Table 2. Physical and mechanical properties of PVA fiber**表 2.** PVA 纤维物理力学性能指标

Diameter/ μm	Length/mm	Density/(kg/m^3)	Tensile Strength/MPa	Elastic modulus/GPa
40	12	1289	1600	40

2.2. 配合比设计

试验制备 SAC-ECC 水胶比为 0.25, 砂胶比为 0.48, 硅灰掺量为 5%, PVA 纤维体积掺量为 2%, 以粉煤灰掺量为主要变量设计配合比, 各试验组粉煤灰掺量见表 3。

Table 3. Fly ash content of SAC-ECC (%)**表 3.** SAC-ECC 粉煤灰掺量(%)

Groups	FA0	FA2	FA3	FA4	FA5
Fly ash	0	20	30	40	50

2.3. 试件的制备与测试

2.3.1. 试件制备

制备硫铝酸盐水泥基复合材料时, 先将沙漠砂倒入搅拌机中, 再将水泥、粉煤灰、硅灰等胶凝材料倒入混合搅拌 120 s, 随后将缓凝剂、减水剂与水混合后倒入搅拌 120 s, 待水泥浆体不粘结不成块时, 向搅拌机中放入纤维, 搅拌完成后置入试模中, 在振动台振捣成型。试件成型 4 h 后将试件取出放入温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度 95% 以上的标准养护室中养护。

2.3.2. 试件测试

试件的测试参照《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》(JCT2461-2018) [7] 进行, 对试件的抗压强度和单轴拉伸性能的测定分别使用 100 t 和 10 t 微机控制电液伺服万能试验机测定。试验设计 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 立方体试块测定 SAC-ECC 的抗压强度, 各龄期制备 3 个试块, 加载方式采用应力加载, 加载速度为 $0.5\text{ MPa}/\text{s}$, 当数据采集仪的荷载停止增长, 开始下降即试件发生破坏, 停止加载。设计 $330\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 哑铃型试件测定 SAC-ECC 的单轴拉伸性能, 各龄期制备 6 个试块, 加载方式采用位移加载, 加载速度为 $0.3\text{ mm}/\text{min}$, 使用标距 50 mm, 变形量 25 mm 的引伸计测量试件受拉过程中应变的变化过程, 当应力 - 应变曲线出现较长下降段且不在上升时, 试件发生破坏停止加载, 哑铃形试件尺寸及试验装置如图 1 所示。

抗压强度, 抗拉强度, 极限拉伸率均取每组测得数据算术平均值作为该组试件的数据。试件的极限拉伸率按下式计算:

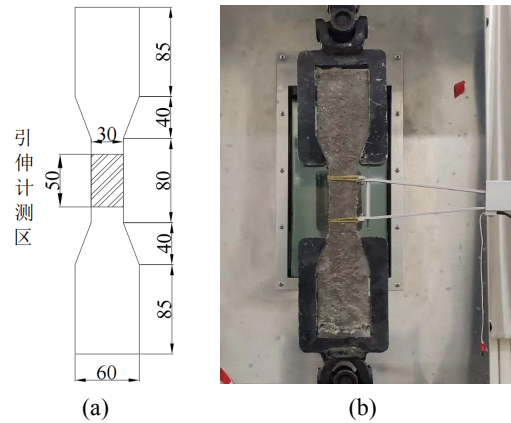


Figure 1. Specimen size and test device. (a) Dumbbell specimen size; (b) Uniaxial tensile test device
图 1. 试件尺寸及试验装置。(a) 哑铃型试件尺寸；(b) 单轴拉伸试验装置

$$\varepsilon_{tu} = \frac{l_{tu} - l_0}{L_{tg}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： ε_{tu} ——极限延伸率，%； l_{tu} ——最大拉力时引伸计读数，mm； l_0 ——加载前引伸计读数，mm； L_{tg} ——引伸计测量标距，mm。

3. 试验结果与分析

3.1. 抗压性能

图 2 为不同粉煤灰掺量下 SAC-ECC 的抗压强度。由图 2 可知在不同粉煤灰掺量下 SAC-ECC 的抗压强度随着龄期的增长呈现增长趋势，随粉煤灰掺量的增长呈现下降趋势。当粉煤灰掺量为 20% 时，其抗压强度随龄期增长提升幅度较大，3 d 抗压强度较 1 d 提升了 32.3%；随着粉煤灰掺量的增多，SAC-ECC 抗压强度随龄期增长提升的越不明显，当粉煤灰掺量达到 50% 时，3 d 抗压强度较 1 d 仅提升了 9.9%，且与空白组对比 1 d、3 d 抗压强度分别下降了 60% 和 61%。这是因为粉煤灰的掺入使得 SAC-ECC 中各矿物含量相对减少，从而导致 SAC 早期水化产物减少[8]，使 SAC-ECC 早期抗压强度下降。此外，粉煤灰的活性较低，结构为球形各颗粒间较为紧密，在 SAC 早期水化过程中主要起到填充压实作用，使得 SAC 早期水化速度下降[3]，从而也会导致 SAC-ECC 早期抗压强度降低。

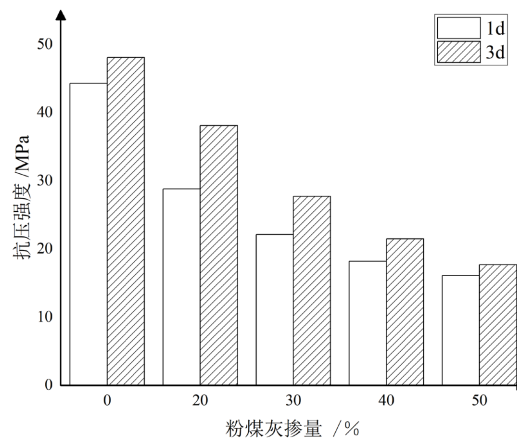


Figure 2. Compressive strength of SAC-ECC under different fly ash content
图 2. 不同粉煤灰掺量下 SAC-ECC 抗压强度

3.2. 单轴拉伸性能

图 3 和表 4 分别为 SAC-ECC 单轴受拉应力 - 应变曲线和特征参数。由图 3 和表 4 可以看出:

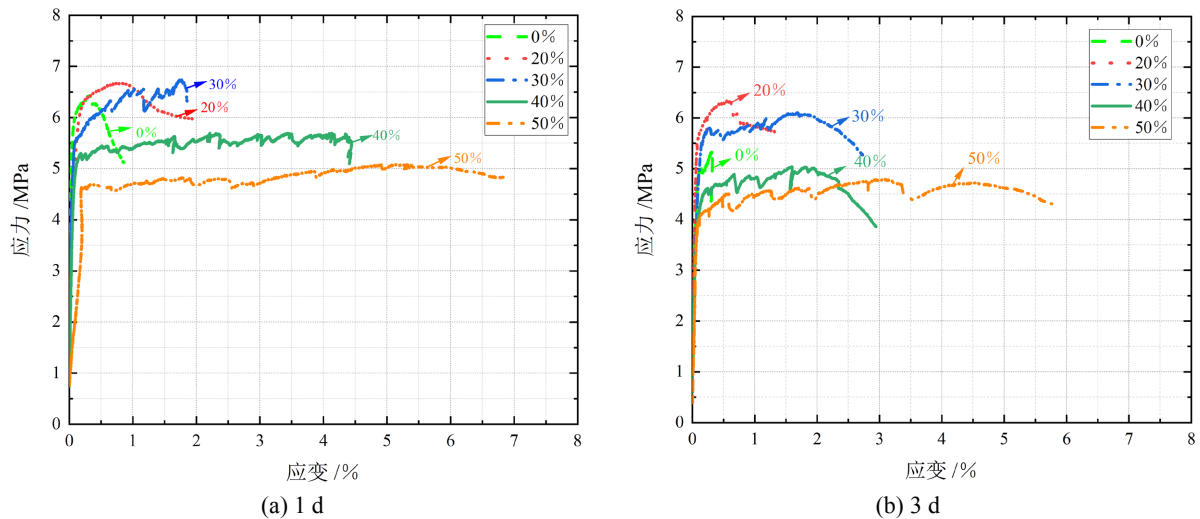


Figure 3. Uniaxial tensile stress-strain curves of SAC-ECC under different fly ash contents

图 3. 不同粉煤灰掺量下 SAC-ECC 单轴拉伸应力 - 应变曲线图

Table 4. Ultimate tensile strength and ultimate tensile strain of mix ratio in each group at different ages

表 4. 不同龄期下各组配合比极限抗拉强度和极限拉应变

Groups	Tensile Strength/MPa		Ultimate tensile ratio/%	
	1 d	3 d	1 d	3 d
AF0	6.23	5.32	0.22	0.21
AF2	6.53	6.12	0.86	0.54
AF3	6.26	5.73	1.79	0.91
AF4	5.82	4.8	2.23	1.35
AF5	4.78	4.66	4.12	3.18

1) SAC-ECC 单轴受拉应力 - 应变曲线在弹性阶段均呈线性增长。

2) 粉煤灰掺量为 0% 和 20% 的试件在达到极限强度后应力迅速下降, 试件 1 d 和 3 d 的极限延伸率均小于 1%, 仅产生一条主裂缝随即发生破坏。

3) 粉煤灰掺量 30%、40%、50% 时, 曲线弹性阶段结束后应力上下波动次数明显增多, 试件 1 d 的极限延伸率均大于 1%, 且当粉煤灰掺量为 50% 时试件 1 d 的极限延伸率达到 4.12%, 此时 SAC-ECC 受拉试件裂缝产生多且裂缝宽度小。这是由于粉煤灰的颗粒较为均匀且表面呈光滑球状, 粉煤灰的加入能够更好的改善基体的流动性使纤维分散均匀, 提升纤维在基体中的“桥连”作用, 使纤维的破坏状态由“拔断”转变为“拔出”更好的提升极限拉应变的性能[9] [10]。

4) SAC-ECC 试件 3 d 龄期的抗拉强度平均值略低于 1 d 龄期。因为硫铝酸盐水泥自身具有微膨胀性, 早期水化反应较为迅速, 而粉煤灰活性低早期主要起到填充作用, 使试件内部结构愈发密实, 此时抗拉强度较高, 随着龄期的增长水化反应继续进行, 仍有钙矾石(AFt)不断的生成, 使材料内部发生膨胀, 出现裂缝不利于抗拉强度的发展[11] [12]。

4. 结论

本文研究了 5 组不同粉煤灰掺量下 SAC-ECC 早期的力学性能, 得出如下结论:

1) 粉煤灰的引入使材料的水化产物减少且由于粉煤灰的低活性, 使试件早期的抗压强度呈现出下降趋势, 在 1 d 下降幅度最为明显。当粉煤灰掺入量为 50% 时, 试件 1 d 和 3 d 的抗压强度下降幅度最大分别为 60% 和 61%。

2) 粉煤灰颗粒较小且表面圆滑, 加入材料后能够提升纤维在基体中的“桥连”作用, 改变纤维受拉破坏状态, 当粉煤灰掺量超过 30% 时试件 1 d 的极限延伸率大于 1%, 在受拉过程中表现出稳定的裂缝开裂和应变-硬化特征, 3 d 的抗拉强度相较于 1 d 有所下降, 但仍能表现出较好的延性。

3) 粉煤灰掺量超过 30% 时试件 1 d 的极限延伸率大于 1%, 在受拉过程中表现出稳定的裂缝开裂和应变-硬化特征, 3 d 的抗拉强度相较于 1 d 有所下降, 但仍能表现出较好的延性。

基金项目

宁夏农垦建设有限公司技术开发合同“低碳、环保型系列建筑材料的研究与开发”(技术合同登记号: 2022640101000054)。

参考文献

- [1] Yang, E.H., Yang, Y. and Li, V.C. (2007) Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness. *ACI Materials Journal*, **104**, 620-628. <https://doi.org/10.14359/18966>
- [2] 王秋生, 温唯, 罗昊, 易勇. 粉煤灰掺量对 PVA-ECC 应变硬化性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(4): 321-327.
- [3] 蒋卓, 雷学文, 廖宜顺, 廖国胜. 粉煤灰对硫铝酸盐水泥水化历程的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4088-4092+4103.
- [4] 马保国, 韩磊, 李海南, 谭洪波, 王允栋. 硫铝酸盐水泥基胶凝材料的改性研究[J]. 功能材料, 2015, 46(5): 5062-5066.
- [5] 马保国, 韩磊, 朱艳超, 田振. 掺合料对硫铝酸盐水泥性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(9): 19-21+50.
- [6] 张俊杰. 硫铝酸盐水泥基 ECC 的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [7] JC/T 2461-2018, 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法[Z]. 2018.
- [8] 何锐, 郑欣欣, 王渊, 等. 硫铝酸盐水泥性能特点与改性技术研究现状[J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1495-1501.
- [9] 李国友, 霍亮, 张涛, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料的直接拉伸性能[J]. 材料导报, 2013, 27(S1): 298-301.
- [10] 乔思皓, 薛婉文, 吴绍奇, 等. 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+91.
- [11] Li, V.C. and Leung, C.K.Y. (1992) Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, **118**, 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))
- [12] Tetsushi, K. and Li, V.C. (1998) Multiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Concrete Research and Technology*, **9**, 19-33. https://doi.org/10.3151/crt1990.9.2_19