

钢渣粉对工程水泥基复合材料性能的影响研究

高建荣¹, 李文宇¹, 蒋 勇^{2*}

(1. 山西职业技术学院材料与化工系, 山西 太原 030000; 2. 绵阳职业技术学院材料工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘 要:工程水泥基复合材料(ECC)以其超高延性、应变硬化和优异的耐久性在结构修复与防护领域具有重要应用价值。为减少水泥用量并探索粉煤灰的替代材料,以超细钢渣粉(SSP)梯度取代粉煤灰制备聚乙烯醇纤维增强 ECC,系统研究 ECC 的力学性能、微观结构及水化特性的变化规律。结果表明:随着 SSP 取代率的增加,ECC 的抗折与抗压强度均呈现先升后降趋势,其中抗折强度提升较明显,在取代率为 50% 时较对照组提高 38.5%;单轴拉伸性能同样显著改善,75% 取代率下拉伸强度与极限应变分别提升 95.0% 和 131.3%,且多缝开裂行为更为明显。微观分析表明,SSP 的微填充效应与成核作用促进了水化产物的均匀生成,提升了基体密实度和纤维与基体界面黏结性能,从而改善了宏观力学表现和拉伸延性。XRD 和 TG-DSC 分析进一步证实,SSP 的引入提高了胶凝材料中氢氧化钙与化学结合水含量,优化了水化进程。研究为钢渣资源化利用和高性能 ECC 的制备提供了试验依据与技术参考。

关键词:钢渣粉;工程水泥基复合材料;抗折抗压强度;拉伸强度;拉伸延性;水化产物

中图分类号:TU528,TF09

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2026)04-0189-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Influence of steel slag powder on the properties of engineered cementitious composites

GAO Jianrong¹, LI Wenyu¹, JIANG Yong^{2*}

(1. Department of Materials and Environmental Engineering, Shanxi Polytechnic College, Taiyuan 030000, Shanxi, China;

2. School of Materials Engineering, Mianyan Polytechnic, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Engineered cementitious composites (ECC) hold significant application value in structural repair and protection due to their ultra-high ductility, strain-hardening behavior, and excellent durability. To reduce cement consumption and explore alternative materials to fly ash, this study employed ultra-fine steel slag powder (SSP) to progressively replace fly ash in the preparation of polyvinyl alcohol (PVA) fiber-reinforced ECC. The variations in the mechanical properties, microstructure, and hydration characteristics of ECC were systematically investigated. The results indicate that with an increasing SSP replacement ratio, both the flexural and compressive strengths of ECC exhibited an initial increase followed by a subsequent decrease. Notably, the improvement in flexural strength was more significant, with a 38.5% increase observed at a 50% replacement rate compared to the control group. The uniaxial tensile performance was also markedly enhanced; at a 75% replacement rate, the tensile strength and ultimate tensile strain increased by 95.0% and 131.3%, respectively, accompanied by more pronounced

收稿日期:2026-02-03; 修回日期:2026-04-01; 接受日期:2026-04-07

基金项目:山西省职业教育教学改革与实践研究项目:“三组长”制驱动产教融合实训基地共建模式的研究与实践。

作者简介:高建荣,1974 年出生,男,山西兴县人,硕士,主要研究方向为建筑材料及固废利用, E-mail: 260581266@qq.com;

*通信作者:蒋勇,1988 年出生,男,四川蓬安人,博士,主要研究方向为工业固废利用及新型建筑材料, E-mail: jiangyong7586@163.com。

multiple-cracking behavior. Microstructural analysis revealed that the micro-filling effect and nucleation role of SSP promoted the uniform formation of hydration products, thereby increasing matrix density and enhancing the fiber-matrix interfacial bond, which consequently improved the macroscopic mechanical performance and tensile ductility. XRD and TG-DSC analysis further confirmed that the incorporation of SSP increased the calcium hydroxide and chemically bound water content in the cementitious system, optimizing the hydration process. This study provides experimental evidence and technical references for the resource utilization of steel slag and the development of high-performance ECC.

Key words: steel slag powder; engineered cementitious composites; flexural and compressive strength; tensile strength; tensile ductility; hydration products

0 引言

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)是一种超高延性纤维增强水泥基材料。在纤维体积掺量不超过 2% 的情况下, ECC 的极限拉伸应变可以达到 3% 以上, 具有应变硬化特征, 其饱和状态的多缝开裂宽度小于 0.01 mm, 具备超高韧性、优良的耐久性和自愈合性等特点^[1-3]。由于这些优良的特性, ECC 在建筑结构的修补、加固和防护工程等领域展现出广阔的应用前景^[4-7]。

制备 ECC 的原材料包括水泥、矿物掺合料、细集料、水和化学外加剂等, 为了保证 ECC 基体具有足够的均匀性, 同时为了降低基体断裂韧性以促进多缝开裂现象的发生, ECC 通常不使用粗集料^[8]。这种设计使得 ECC 中胶凝材料用量比普通混凝土更多, 为节省水泥用量、减少碳排放, 大掺量使用矿物掺合料是最常用的方法之一。在各种常见矿物掺合料中, 由于粉煤灰对 ECC 流变学、基体韧性以及纤维与基体之间的相互作用的积极效果, 被世界各地的研究人员广泛用于 ECC 的制备中。但粉煤灰也存在显著的局限性, 一是粉煤灰多集中在煤炭资源丰富的地区, 加之粉煤灰是生产水泥和混凝土的重要原料, 使得优质粉煤灰变成稀缺资源^[9]。二是粉煤灰反应活性较低, 火山灰反应过程缓慢, 尤其在掺量时, ECC 的力学性能和耐久性会受到显著影响, 所以寻找粉煤灰的替代材料是 ECC 的重要研究方向。

钢渣是在生铁炼钢过程中排放出来的工业废渣, 主要成分是 CaO、Fe₂O₃、SiO₂、MgO 和 MnO

等, CaO 的含量高达 38% ~ 48%, SiO₂ 含量范围为 11% ~ 20%, 矿物成分包含 C₃S、C₂S、RO 相等^[10]。将钢渣粉用作矿物掺合料具有填充效应、成核效应和火山灰活性^[11-12], 基于这些理化性质推测, 用钢渣粉替代粉煤灰制备 ECC 具有潜在可行性。因此, 采用超细钢渣粉梯度取代粉煤灰制备 PVA-ECC, 研究了抗折抗压强度、拉伸力学性能和水化特性。研究可以为拓宽钢渣的利用范围和开发新型 ECC 材料提供参考。

1 试验部分

1.1 原材料

使用的原材料主要有: 超细钢渣粉(SSP), 将块状钢渣破碎至粒径小于 5 mm, 取 4 kg 置于 500 mm×500 mm 的试验球磨机中粉磨 30 min, 得到粉状样品后再使用超细气流磨将样品粉磨至 D₉₀ 小于 9.38 μm(1600 目); P·O 42.5 R 水泥; I 级粉煤灰; 375.00 ~ 214.29 μm(40 ~ 70 目)石英砂; 90 级硅灰; 直径 40 μm、长度 12 mm 的聚乙烯醇纤维(PVA); 粉体聚羧酸减水剂(SPC)。胶凝材料的化学成分、比表面积和密度测试结果如表 1 所示, 激光粒度测试结果如图 1 所示。图 2 为 SSP 和粉煤灰的 SEM 图, 从图中可知, SSP 颗粒形状不规则, 细颗粒较多且有明显的团聚现象; 粉煤灰颗粒大小不一, 多为规则的球形颗粒。图 3 为 SSP 和粉煤灰的 XRD 测试结果, SSP 中存在较多的 FeO、C₃S、C₂S 和 RO 相; 而粉煤灰多为无定形物质, 同时存在较多的莫来石和少量磷酸铁。

表 1 胶凝材料化学成分、比表面积和密度测试结果
Table 1 Test results of chemical compositions, specific surface area and density of cementitious materials

Raw materials	Chemical component/%												Specific surface area(cm ² ·g ⁻¹)	Density(g·cm ⁻³)
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	MnO	ZnO	K ₂ O		
Fly ash	49.60	9.95	26.4	0.12	6.02	5.89	0.20	0.30	0.40			0.05	4 300	2.26
SSP	12.63	39.35	5.59	4.33	29.76	0.24	0.81	1.62		4.38	0.23		6 150	3.35
Cement	21.06	65.20	5.40	2.11	2.80	1.30	0.20	0.50	0.30			0.20	3 780	3.01
Silica fume	93.11	0.65	0.92	1.59	0.27	0.32			1.10			0.13	215 400	2.18

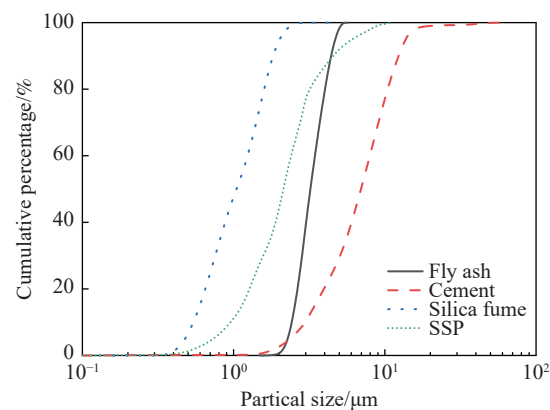


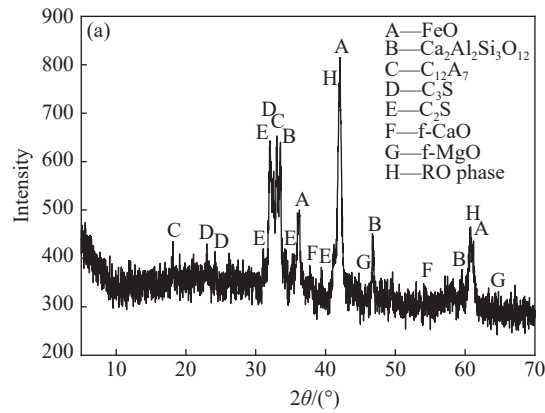
图 1 胶凝材料激光粒度测试结果

Fig. 1 Laser particle size test results of cementitious material

1.2 试验方法

1.2.1 ECC 配合比

根据前期研究,设计出 ECC 的基础配合比。由于 SSP 与粉煤灰的密度相差较大,因此用 SSP 等体积取代粉煤灰,取代率分别为 0、25%、50%、75%、100%,各组保持水胶比 0.3、砂胶比 0.243(质量比)不变,得到 ECC 的配合比如表 2 所示,其中 SPC 按胶凝材料总质量计算,PVA 按总体积的 2% 掺入。



(a) SSP; (b) 粉煤灰

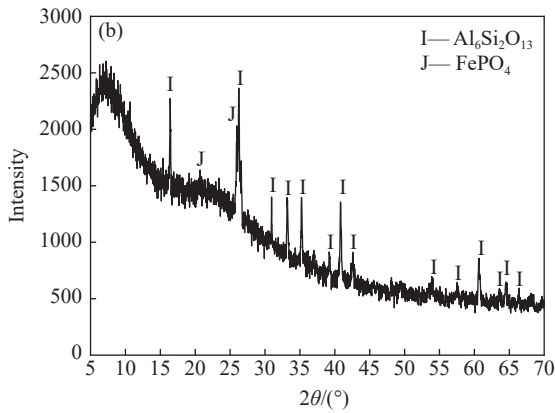


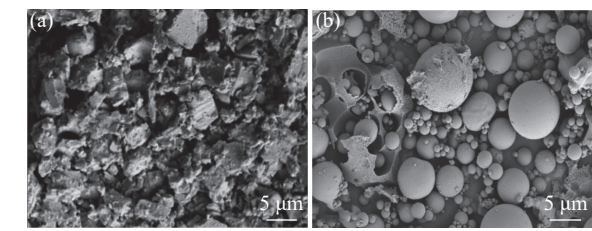
图 3 SSP 和粉煤灰的 XRD 图
Fig. 3 XRD patterns of SSP and fly ash

表 2 ECC 试验配比
Table 2 Mix proportion of ECC

Substitution rate of SSP/%	Cement	Fly ash	SSP	Silica fume	Water	Quartz sand	SPC/%	Volume fraction of PVA/%
0	1	1.180	0	0.04	0.666	0.539	0.045	2
25	1	0.885	0.437	0.04	0.709	0.574	0.045	2
50	1	0.590	0.875	0.04	0.752	0.609	0.045	2
75	1	0.295	1.312	0.04	0.794	0.643	0.045	2
100	1	0	1.749	0.04	0.837	0.678	0.045	2

1.2.3 力学性能测试方法

抗折和抗压强度的测试方法参照 GB/T 17671-2021, 每组测试 3 个试样, 使用的试样尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 抗折的加载速率为(50±10)



(a) SSP; (b) 粉煤灰
图 2 SSP 和粉煤灰的 SEM 图
Fig. 2 SEM images of SSP and fly ash

1.2.2 ECC 的制备及养护方法

将称量的粉体材料和石英砂置于满足标准 JC/T 681-2022《行星式水泥胶砂搅拌机》的水泥胶砂搅拌机中, 慢搅 30 s, 使干原料初步混合; 随后加入水, 慢搅 30 s, 再快搅 60 s, 得到均匀的浆体; 继续慢搅 1 min, 同时加入约 1/2 的 PVA 纤维, 随后快搅 30 s; 然后再继续慢搅 1 min, 同时加入剩余的 PVA 纤维; 最后快搅至第 10 min, 使纤维充分分散。搅拌完成后将 ECC 倒入模具中, 经充分振捣填充密实后, 刮平表面, 带模置于温度 20 ℃±1 ℃、相对湿度大于 90% 的标准养护箱中进行养护。养护 24 h 后, 拆模, 继续将样品标准养护至 28 d, 进行性能测试。

N/s, 抗压的加载速率是(2.4±0.2) kN/s。用于单轴拉伸测试样品的尺寸如图 4 所示, 拉伸加载速率为 0.5 mm/min, 每组测试 4 个样品, 并筛除偏差最大的 1 个测试结果。

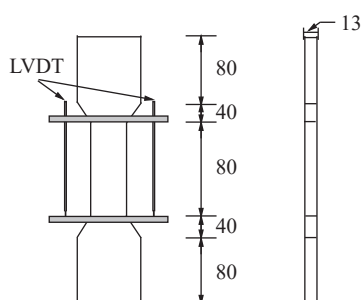


图4 单轴拉伸样品的尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions of the uniaxial tensile specimens

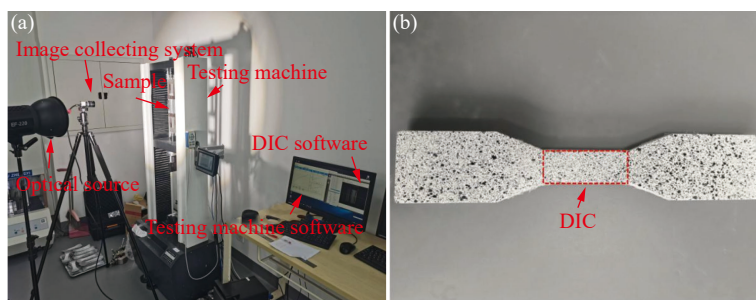
1.2.4 DIC 测试方法

在测试拉伸性能时,利用数字图像相关技术(DIC)设备采集样品颈部的图像,获取样品的变形云图,从而观察样品的变形状况,测试系统参照图5(a)。测试前首先在样品待观察面均匀喷涂一层白色底漆,待其干燥后,再用黑色漆均匀喷上一层

细密的散斑,以便 DIC 识别微小应变,喷涂散斑后的样品见图5(b)。在拉伸测试过程中,将图像采集频率设定为每秒 10 张照片,测试结束后,大约采集 2 000 ~ 5 000 张照片。最后使用配套软件,根据采集的照片生成应变云图。

1.2.5 SEM-EDS 测试方法

为了对硬化胶凝材料的微观结构开展分析,按制备 ECC 相同的方法制备 20 mm×20 mm×20 mm 的水泥净浆(不掺石英砂和 PVA 纤维),将净浆样品置于和 ECC 相同的环境中养护,养护 28 d 后将净浆敲碎,取中间碎块用于 SEM-EDS 测试,仪器为 Zeiss Gemini 300。使用相同的仪器对 ECC 拉伸样品的断面进行分析,以观察纤维的受拉损伤状态;另外,对纤维与基体的结合处开展 SEM-EDS 分析,以研究纤维与基体的结合情况。



(a) DIC 测试系统; (b) 喷涂散斑后的样品

图5 DIC 测试系统和喷涂散斑后的样品

Fig. 5 DIC testing system and sprayed spot sample

1.2.6 XRD 测试方法

将养护 28 d 的 ECC 净浆样品敲碎,并研磨成粉,进行 XRD 测试,测试设备选用 X'Pert PRO MPD X 射线衍射仪,采用 Cu-K α 射线,并设定 2θ 扫描范围为 $5^\circ \sim 70^\circ$,扫描速率为 $10^\circ/\text{min}$ 。

1.2.7 TG-DSC 测试方法

将养护 28 d 的 ECC 净浆样品敲碎,并研磨成粉状,用于 TG-DSC 分析。采用 NETZSCH STA 449 F3 同步热分析仪进行 TG-DSC 测试,升温速率为 $15^\circ\text{C}/\text{min}$,测试过程采用氮气保持,测试温度范围为 $40 \sim 1\,000^\circ\text{C}$ 。

2 研究结果与讨论

2.1 抗折抗压强度

各试验组的抗折抗压强度测试结果如图6所示,随着 SSP 取代率的增大,各组的抗折抗压强度呈现出先上升后下降的趋势。但各组的抗压强度变化幅度不大,介于 $23.7 \sim 26.6\text{ MPa}$; 当取代率为

25% 时,抗压强度最高达到 26.6 MPa ,比 SSP 掺量为 0 的对照组提高了 1.9 MPa 。相比之下,掺有 SSP 的试验组抗折强度比对照组有明显提升,当 SSP 取代粉煤灰的比例达到 50% 时,抗折强度提升了 38.5%,提升幅度最大。当 SSP 的取代率达到 100% 时,抗折强度仍然高于对照组。

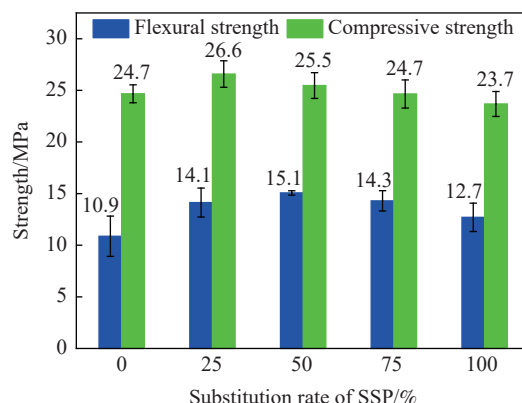


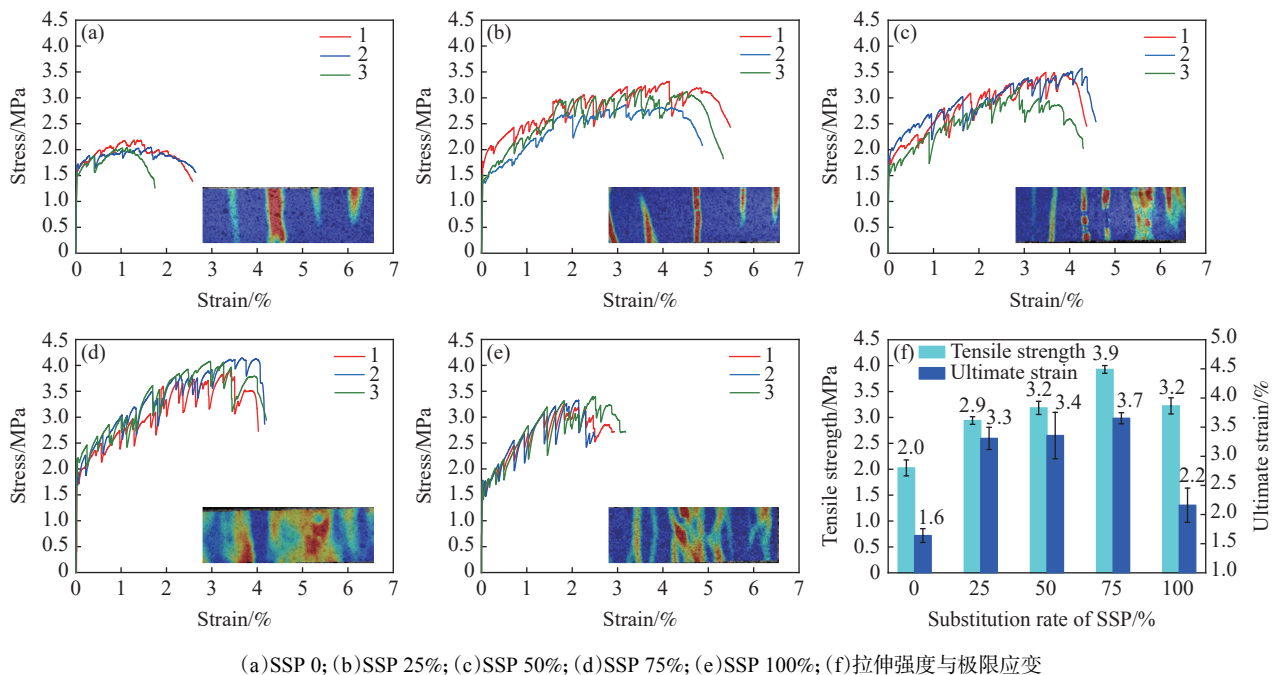
图6 ECC 的抗折抗压强度测试结果

Fig. 6 Test results of the flexural and compressive strength of ECC

2.2 拉伸力学性能

图7为ECC的单轴拉伸测试结果,从应力-应变曲线(图7(a)~(e))可知,各组在弹性变形后均表现出应变硬化现象。SSP取代粉煤灰的比例为0时(图7(a)),硬化阶段的曲线较平缓,拉伸强度在2.0 MPa左右,极限应变约1.6%;相比于对照组,SSP取代率为25%、50%和75%的三组(图7(b)~(d)),拉伸强度和延性显著增大,拉伸曲线上产生更多的“锯齿”状,表明多缝开裂现象更加显著;当取代率达到100%时拉伸强度和延性有下降趋势

(图7(e))。对比各组的DIC图可以发现,用SSP取代粉煤灰后,样品在受到拉伸应力时变形区域变得更加均匀,这与超细粉体的使用提升了基体的均匀性有关。根据拉伸强度和极限应变的测试结果(图7(f))可知,二者的测试值随着SSP取代率的增大而先上升后下降,最佳取代率为75%,此时拉伸强度和极限延伸率分别比对照组提高95.0%和131.3%。当SSP 100%取代粉煤灰时,ECC的拉伸强度和拉伸延性虽有下降,但仍然高于对照组。



(a)SSP 0%; (b)SSP 25%; (c)SSP 50%; (d)SSP 75%; (e)SSP 100%; (f)拉伸强度与极限应变

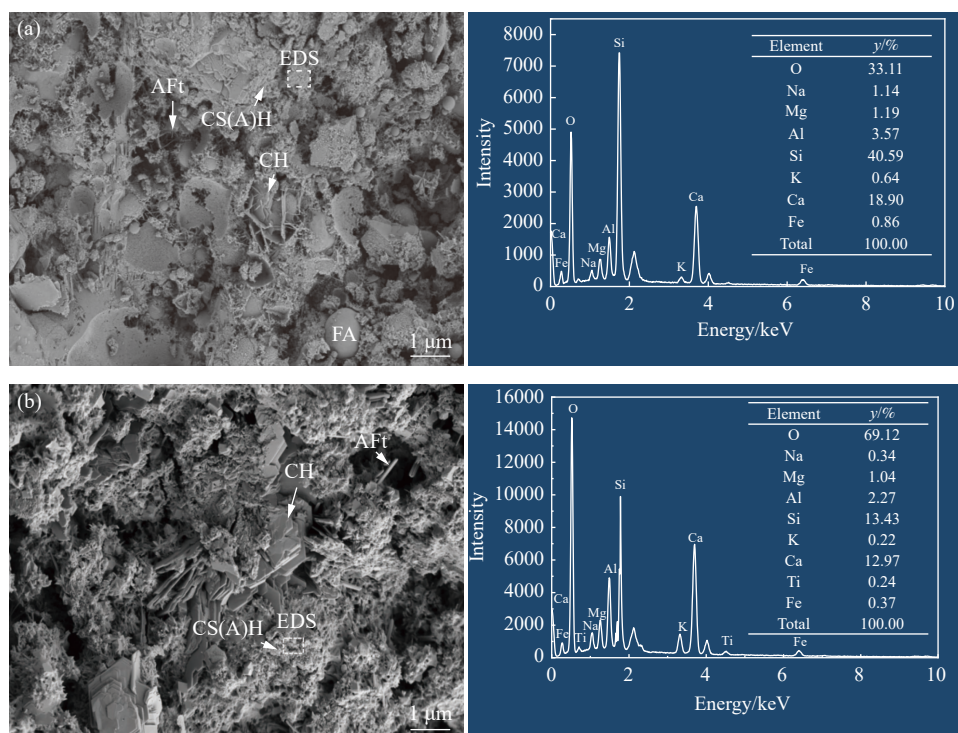
图7 ECC的单轴拉伸测试结果
Fig. 7 Uniaxial tensile test results of ECC

2.3 微观形貌表征

图8展示了SSP取代率为0与100%的硬化净浆样品的SEM-EDS分析结果。在图8(a)(0取代率)中,可见纤维状钙矾石(Aft)、片状氢氧化钙(CH)以及无定形水化硅(铝)酸钙(C-S(A)-H)等水化产物,同时存在大量球形粉煤灰颗粒。观察面上亦可见由粉煤灰颗粒脱落后形成的孔隙,表明粉煤灰与基体结合较弱。相比之下,图8(b)(100%取代率)同样可见Aft、CH及C-S(A)-H等水化产物,但CH晶体发育的更大且更多,整体结构更为致密,这与SSP颗粒的微填充效应密切相关。进一步对比EDS分析数据发现,在SSP取代率为0的试样中,C-S(A)-H的O/Si比和Ca/Si比均低于100%取代率试样,这一结果表明,掺SSP的试样中生成的C-S(A)-H具有较低的聚合度。其原因在于,超细SSP颗粒在基体中分散并发挥成核诱导效应,为水化产

物的形成提供了更多活性位点,促使C-S(A)-H在基体中广泛生成,从而降低了水化产物的整体聚合度。尽管此类多位点诱导效应会降低水化产物的聚合程度,但却更有利于水化反应的均匀进行,从而提高基体的密实性,进而对材料的宏观力学性能产生积极影响。

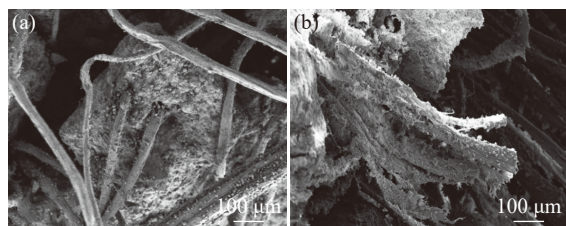
当ECC样品受拉伸时,其中的纤维受到基体摩擦力的作用通常会受到损伤,纤维与基体的粘结力越强,纤维受损越明显。图9为ECC样品拉伸断裂面的SEM图。观察发现,在SSP取代率为0的样品中(图9(a)),纤维表面光滑,且保存较完整,而在SSP取代率为100%的样品中(图9(b)),纤维的表面受损较为明显,有较多水化产物附着。这一现象从侧面证实SSP取代粉煤灰后显著提升了基体与纤维的粘结力,这对提升ECC的力学性能有积极的作用。



(a) SSP 0; (b) SSP 100%

图 8 ECC 净浆样品的 SEM-EDS 测试结果

Fig. 8 SEM-EDS of the ECC paste samples



(a) SSP 0; (b) SSP 100%

图 9 ECC 样品断裂面的 SEM 图

Fig. 9 SEM images of the fracture surfaces of the ECC samples

2.4 水化产物分析

各组硬化净浆的 XRD 测试结果如图 10 所示。图 10(a)中可观察到 AFt、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 等水化产物, 另可观察到未完全反应的 $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ 和 SiO_2 。AFt 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是水泥水化的主要晶体产物, 而水化生成的 C-S(A)-H 通常呈无定形状, 所在图谱中未产生明显的衍射峰。 CaCO_3 来自 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碳化反应。图 10(b)是 2θ 为 $15^\circ \sim 20^\circ$ 的局部放大图, 可明显看出随着 SSP 取代粉煤灰比例的增大, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰先增强后减弱, 掺 SSP 组的衍射峰均明显强于未掺 SSP 的对照组, 侧面反映 SSP 取代粉煤灰后硬化浆体中水化产物增多。SSP 中存在 C_3S 、 C_2S 等成分, 经粉磨后, 这些物质被暴露出来, 可以发生水化反应; 超细的 SSP 颗粒能起到“晶核”和“微集料”的作用, 诱导生成更多水化产物, 并改善基体密实度;

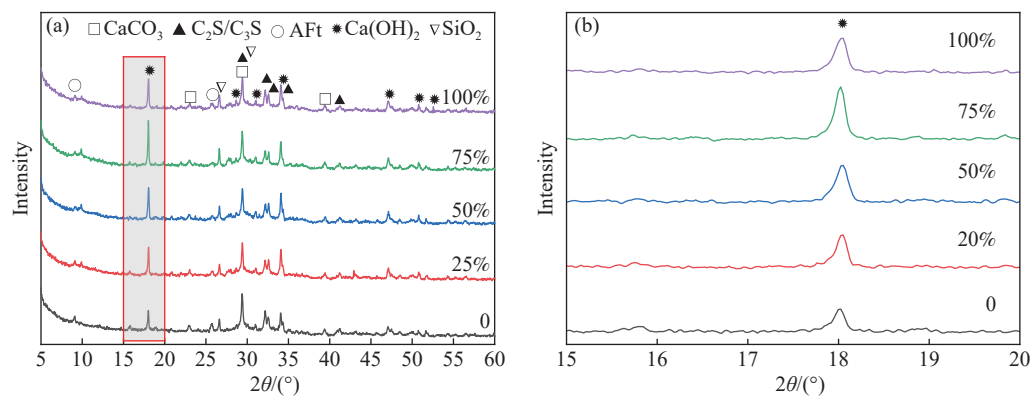
并且与粉煤灰相似, SSP 具有一定的火山灰效应, 能促进“二次水化”反应的进行^[11-14]。在多重作用下, SSP 能促进胶凝体系中生成更多的水化产物。

可以通过 TG-DSC 定量分析硬化浆体中的水化产物。对硬化后的净浆进行取样分析, 结果如图 11 所示。在 $50 \sim 400^\circ\text{C}$ 是 C-S(A)-H 和 AFt 的脱水区间, 氢氧化钙分解发生在 $400 \sim 500^\circ\text{C}$, $500 \sim 760^\circ\text{C}$ 发生的主要反应是 C-S(A)-H 和 AFt 的二次脱水, $760 \sim 950^\circ\text{C}$ 是碳酸盐的分解区间^[15-17]。四个温度区间的失重率分别记为 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 。氢氧化钙的质量含量(M_1)和水化产物化学结合水的质量含量(M_2)可以用式(1)和式(2)进行计算^[18]。

$$M_1 = \left(\frac{T_2}{18} + \frac{T_4}{44} \right) \times 74 \quad (1)$$

$$M_2 = T_1 + T_2 + T_3 + \frac{T_4}{44} \times 18 \quad (2)$$

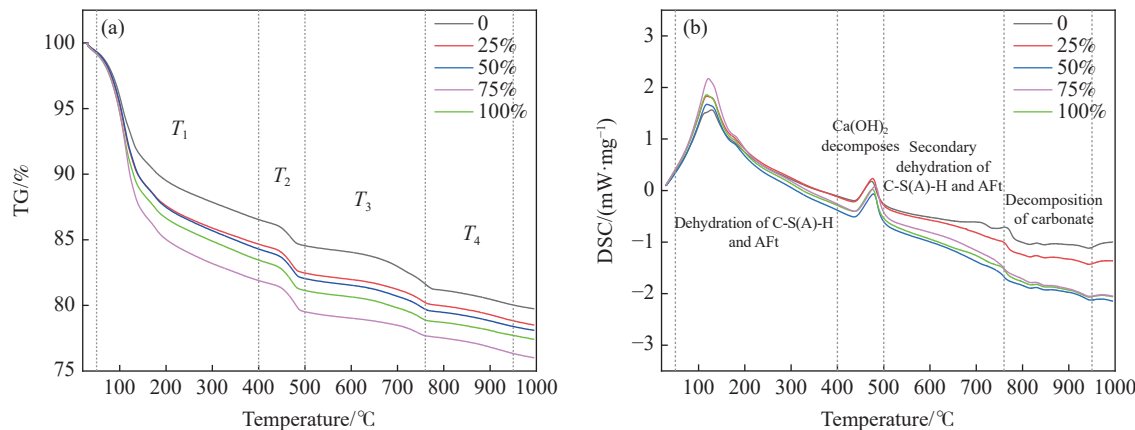
计算出氢氧化钙和化学结合水含量见表 3。分析结果可知, 随着 SSP 取代粉煤灰比例的增加, 氢氧化钙和化学结合水含量呈现出先增大后减小的趋势, 当取代率为 75% 时, 生成的氢氧化钙和化学结合水含量最高, 即使 SSP 100% 取代粉煤后, M_1 和 M_2 值仍高于对照组。说明掺 SSP 的基体中 C-S(A)-H、AFt、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物的生成量增多, 这显然有助于提升 ECC 的力学性能。



(a)完整图; (b)局部图

图 10 XRD 测试结果

Fig. 10 XRD analysis



(a) TG; (b) DSC

图 11 TG-DSC 分析结果

Fig. 11 Results of TG-DSC analysis

表 3 氢氧化钙和化学结合水统计结果

Table 3 Statistical results of calcium hydroxide and chemically bound water

Substitution rate of SSP/%	Weight loss rate of cementitious material/%				M_1 /%	M_2 /%
	T_1	T_2	T_3	T_4		
0	12.795	1.995	2.923	1.672	11.014	18.397
25	14.587	2.197	2.262	1.458	11.483	19.642
50	14.997	2.252	2.345	1.378	11.574	20.158
75	17.287	2.387	1.824	1.437	12.229	22.085
100	15.689	2.322	2.252	1.241	11.633	20.771

3 结论

通过将超细钢渣粉以不同体积取代率替代粉煤灰制备 PVA-ECC, 系统评价了其对 ECC 力学性能、微观结构与水化特性的影响, 主要结论如下:

1) 适量 SSP 的掺入可明显改善 ECC 的力学性能。抗折强度在 SSP 取代率为 50% 时达到峰值,

较对照组提高 38.5%。单轴拉伸试验表明, SSP 的加入增强了材料的应变硬化效应与多缝开裂特征, 75% 取代率下拉伸强度与极限应变分别提升 95.0% 与 131.3%。即使 SSP 完全取代粉煤灰, 其抗折与拉伸性能仍优于对照组, 说明 SSP 具有作为粉煤灰替代材料的可行性。

2) SEM-EDS 分析表明, SSP 颗粒形状不规则且细颗粒较多, 在基体中发挥微填充效应, 使结构更为致密。与粉煤灰相比, SSP 颗粒与基体结合更紧密, 减少了界面孔隙。SSP 的加入显著增强了 PVA 纤维与基体的粘结力, 这有助于应力传递与裂缝控制, 从而提升 ECC 的拉伸强度和延性。

3) XRD 和 TG-DSC 分析表明, 随着 SSP 取代率的提高, 水化产物中氢氧化钙与化学结合水含量呈先增后减趋势, 在 75% 取代率时达到最高。SSP 中 C_3S 、 C_2S 等活性成分及其超细颗粒的成核效应, 促进了 C-S(A)-H 等水化产物的生成, 虽降低了水化产物的聚合度, 但有利于水化反应均匀进行, 从而提升基体密实度与力学性能。

参考文献

- [1] Li V. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications[J]. Journal of advanced concrete technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [2] Barbhuiya S, Das B B, Adak D. Advances and perspectives in engineered cementitious composites: a comprehensive review[J]. Magazine of Concrete Research, 2024, 76(20): 1165-1184.
- [3] 陈宇, 宋学伟, 吴佳梁. 抗收缩 ECC 单轴拉压力学性能及损伤本构模型[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(9): 3137-3148.
Chen Yu, Song Xuewei, Wu Jialiang. Uniaxial tensile and compressive mechanical properties of shrinkage-resistant ECC and damage constitutive model[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(9): 3137-3148.
- [4] 高云飞, 鱼江婷, 尤卓, 等. ECC/FRP-ECC 复合材料力学性能及应用研究进展[J]. 混凝土, 2025(5): 174-179, 187.
Gao Yunfei, Yu Jiangting, You Zhuo, et al. Research progress on mechanical properties and applications of ECC and FRP reinforced ECC[J]. Concrete, 2025(5): 174-179, 187.
- [5] Zhang Zhigang, Liu Dawei, Jamal A, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with ECC and FRP grid reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 446: 137964.
- [6] Noora A S, Mohammed M K. Strengthening fire damaged light weight high strength reinforced concrete beams through BFRP grid and ECC jackets[J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2024, 9(2): 120.
- [7] 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.
Zhang Huapeng. Research on mechanical properties of highly ductility concrete (ECC) and reinforced[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [8] Zhou Jian, Qian Shunzhi, Sierra Beltran M G, et al. Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag[J]. Materials and structures, 2010, 43(6): 803-814.
- [9] 徐硕, 杨金林, 马少健. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3): 104-111.
Xu Shuo, Yang Jinlin, Ma Shaojian. Research progress in the comprehensive utilization of fly ash[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(3): 104-111.
- [10] Guo Jianlong, Bao Yanping, Wang Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste management, 2018, 78: 318-330.
- [11] 庞浪. 超细钢渣-水泥复合胶凝材料的反应机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
Pang Lang. Study on the reaction mechanism of superfine steel slag-cement composite cementitious material[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [12] 高志扬, 王圣文, 吕兴栋, 等. 钢渣粉-水泥复合体系水化热及动力学研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(12): 138-142.
Gao Zhiyang, Wang Shengwen, Lü Xingdong, et al. Heat evolution and hydration kinetics of steel slag powder-cement composite binder[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(12): 138-142.
- [13] Piao R, Kim S J, Na Y K, et al. Optimization of cement replacement with steel slag powder in ultra-high-performance concrete: Microstructural evolution and mechanical performance[J]. Construction and Building Materials, 2025, 492: 142862.
- [14] 汪杰, 梁月华. 电炉钢渣-粉煤灰复合掺合料水泥胶砂性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(5): 123-128.
Wangjie, Liang Yuehua. Study on the effect of electric furnace steel slag-fly ash compound admixture on the properties of cement mortar[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(5): 123-128.
- [15] Pavlik Z, Trnik A, Kulovana T, et al. DSC and TG analysis of a blended binder based on waste ceramic powder and portland cement[J]. International Journal of Thermophysics, 2016, 37(3): 32.
- [16] 陈文怡, 涂浩. TG-DSC 技术在水泥研究中的应用[J]. 分析仪器, 2012(2): 55-58.
Chen Wenyi, Tu Hao. Application of TG-DSC technique in the study of cement[J]. Analytical Instrumentation, 2012(2): 55-58.
- [17] Vedalakshmi R, Raj A S, Srinivasan S, et al. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique[J]. Thermochimica Acta, 2003, 407(1-2): 49-60.
- [18] 刘超群, 朱泽文, 张友华, 等. 活化煤矸石水泥水化机理与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10): 3660-3670.
Liu Chaoqun, Zhu Zewen, Zhang Youhua, et al. Hydration mechanism and properties of activated coal gangue cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(10): 3660-3670.