

掺高炉矿渣超高性能海水海砂混凝土力学及水化性能研究

谭昭凯, 黄悦*, 张钱林, 张伟

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:以高炉矿渣(GGBS)取代部分水泥,海水和海砂全部取代淡水和石英砂开发一种可持续发展的超高性能海水海砂混凝土(UHPSSC),并通过力学试验、水化热测试、X射线衍射和扫描电镜分析天然海水对新型UHPSSC的力学性能、水化动力学行为、水化机理和微观结构发展情况的影响。结果表明,在海水的影响下,早期新型UHPSSC的抗压强度随着GGBS掺量的增加而增加。由于海水碱性环境对GGBS的活化作用以及GGBS具有较高的比表面积,新型UHPSSC的主放热峰时间提前,水化反应速度加快。此外,GGBS中富含的Al相可以与海水中的 Cl^- 反应生成更多的Friedel's盐,致密了新型UHPSSC的微观结构,且起到了固化 Cl^- 的作用。

关键词:超高性能海水海砂混凝土;高炉矿渣;力学性能;水化;微观结构

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2025)04-0031-08

Study on the mechanical and hydration properties of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete mixed with ground granulated blast-furnace slag

TAN Zhaokai, HUANG Yue*, ZHANG Qianlin, ZHANG Wei

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: This study developed a sustainable ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHPSSC) by partially replacing cement with ground granulated blast-furnace slag (GGBS), and by totally replacing fresh water and quartz sand with seawater and sea-sand. By taking mechanical test and hydration heat test, and by using X-ray diffraction and scanning electron microscope, this study investigated the effect of natural seawater on the mechanical properties, hydration kinetics, hydration mechanism and microstructure development of the new UHPSSC. The result indicated that under the effect of seawater, the compressive strength of the early new UHPSSC increased with the increase of GGBS content. Owing to the activation of GGBS in the alkaline seawater environment and the high specific surface area of GGBS, the main exothermic peak time of the new UHPSSC was advanced and the hydration reaction rate was accelerated. Furthermore, the Al phase abundant in GGBS can react with Cl^- in seawater to produce more Friedel's salt, which densified the micro-

收稿日期:2023-11-09

基金项目:山东省自然科学基金(ZR202102280030)

作者简介:谭昭凯(1996—),男,河南濮阳人。硕士,研究方向为超高性能混凝土。E-mail:1130992738@qq.com。

*通信作者:黄悦(1982—),男,河北唐山人。博士,教授,主要从事FRP结构加固、UHPC及固废材料等方面的研究。
E-mail:jeff.yue.huang@outlook.com。

structure of the new UHPSSC and played the role of solidifying Cl^- .

Key words: ultra-high-performance seawater sea-sand concrete; ground granulated blast-furnace slag; mechanical properties; hydration; microstructure

超高性能海水海砂混凝土(Ultra-High-Performance Seawater Sea-sand Concrete, UHPSSC)作为一种新型水泥基材料,近年来受到越来越多的关注。目前,关于UHPSSC的性能已经进行了大量的研究,其中TENG等^[1]首先提出了这一概念,并成功制备了28 d强度超过180 MPa的UHPSSC。研究发现,UHPSSC通常在早期表现出更高的强度,这主要是因为海水中的氯化物通过促进水泥颗粒的溶解而加速了水泥的水化进程^[2]。与超高性能混凝土(Ultra-High-Performance Concrete, UHPC)相似,UHPSSC由于其致密的微观结构也表现出优异的耐腐蚀性^[3]。LI等^[4]报道,UHPSSC中的钢纤维在暴露于海洋环境1年后并没有发生腐蚀现象。尽管如此,为了降低钢纤维被腐蚀的风险,其他研究人员使用合成或非腐蚀性纤维开发了UHPSSC,如超高分子量聚乙烯纤维^[5]和玄武岩棒^[6]。

虽然使用海水和海砂可以解决资源短缺的问题,但UHPSSC通常需要比普通混凝土更高的水泥使用量($900\sim 1200\text{ kg/m}^3$),这将导致该材料的高成本和高碳排放量,极大地限制了其广泛应用。许多研究使用传统的矿物外加剂,如:硅灰、高炉矿渣等作为辅助胶凝材料(Supplementary Cementitious Materials, SCMs),在不影响其性能的情况下部分替代UHPC中的水泥。硅灰是UHPC中常用的SCMs,它可以通过填充空隙来密实基体微观结构,并通过火山灰反应将弱氢氧化钙转化为强硅酸钙水合物^[7]。研究表明,硅灰在低水胶比(0.15)海水水泥浆体中表现出优异的力学性能和抗外离子腐蚀性能^[8],这为硅灰在UHPSSC中的应用提供了参考价值。高炉矿渣具有水力特性^[9],可与水反应,但其化学成分和玻璃体含量限制了其反应活性。然而,它的反应活性可以通过使用活化剂来激发^[10],例如石灰、波特兰水泥、碱等。当使用海水作为混凝土的拌和水时,海水的碱性环境和硫酸盐物质可作为活化剂提高高炉矿渣的反应活性^[2]。目前,许多研究已经对高炉矿渣在海水水泥浆中的水化机理展开了深刻的探讨,但在低水胶比海水海砂水泥浆中此研究还较少,因此,为了更好开发UHPSSC,了解高炉矿渣在低水胶比海水海砂水泥浆中的水化行为至关重要。

本研究的主要目的是开发一种由高炉矿渣(Ground Granulated Blast-furnace Slag, GGBS)部分取代水泥,海水和海砂全部取代淡水和石英砂的可持续发展的UHPSSC。采用试验探究天然海水对新型UHPSSC的力学性能、水化动力学行为、水化机理和微观结构发展情况的影响。通过力学性能试验研究了UHPSSC的强度发展规律;运用等温量热法研究了UHPSSC中的水化动力学行为;使用X射线衍射(XRD)分析UHPSSC的水化产物;使用扫描电镜(SEM)分析混凝土微观结构的发展。研究结果有望为高炉矿渣在UHPSSC的应用提供参考。

1 试验流程

1.1 原材料

本研究中使用的胶凝材料包括水泥、硅灰和高炉矿渣,其中,水泥为P·O52.5,高炉矿渣为S105。采用激光衍射粒度分析仪和X射线荧光(XRF)分别测定了胶凝材料的粒度分布和化学成分,结果汇总于图1和表1。其中,高炉矿渣的比表面积为 $2110\text{ m}^2/\text{kg}$,平均粒径为 $6.09\ \mu\text{m}$ 。海水和海砂均取自于青岛市黄岛地区海岸,海砂粒度分布和海水化学成分分别见图1和表2。海水中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量分别为16 000和2 400 mg/L。海砂粒径主要分布在 $100\sim 400\ \mu\text{m}$ 。本研究采用聚羧酸型高效减水

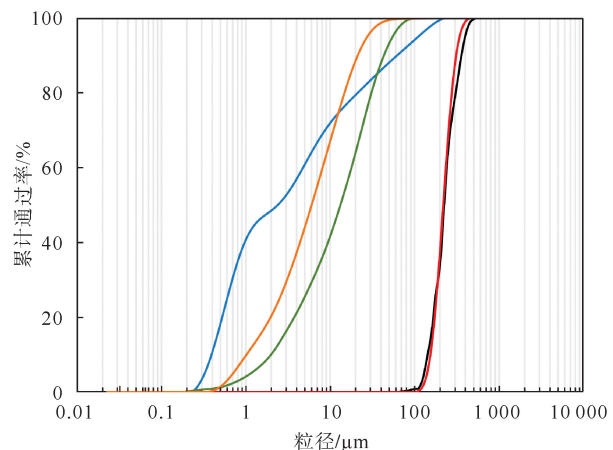


图1 原材料的粒度分布

— 硅灰; — 石英砂; — 水泥; — 海砂; — 高炉矿渣

剂,减水率大于30%。此外,为了提高混凝土的性能,本研究中使用了长度为13 mm、直径为0.2 mm的镀铜钢纤维。

表1 胶凝材料的氧化物组成

材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	%
水泥	64.67	17.33	5.52	3.67	3.11	0.27	1.06	2.94	
高炉矿渣	41.22	30.13	14.92	0.36	8.15	0.36	0.47	2.79	
硅灰	0.45	98.46	0.25	0.04	—	—	0.09	0.62	

表2 天然海水的化学成分

成分/(mg·L ⁻¹)					全部盐分含量/(mg·L ⁻¹)	pH
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺		
16 000	2 400	1 445	9 950	315	29 040	8.0

1.2 配合比设计

本试验共制备了5种不同配合比的试件,如表3所示。已有研究表明,超低水胶比(0.15)海水-水泥体系中硅灰的最佳掺量为10%^[8],因此,所有试件均掺入占胶凝材料质量分数为10%的硅灰。本试验还设计了2组对照组,分别为淡水组UHPC和海水组UHPSSC,以下分别简称为FQ和SS。在UHPSSC混合料中,分别用质量分数为10%、20%和30%的高炉矿渣取代水泥。以“SSG10”为例,“SS”代表超高性能海水海砂混凝土,“G”代表高炉矿渣,“10”代表高炉矿渣的取代率,因此,“SSG10”表示高炉矿渣取代率为10%的UHPSSC。各批次试件的水胶比均为0.18,试验龄期为3~56 d。

表3 混凝土试件配合比

编号	配合比/(kg·m ⁻³)									水胶比
	水泥	硅灰	高炉矿渣	淡水	海水	石英砂	海砂	减水剂	钢纤维	
FQ	967	107	0	193	0	1074	0	22	157	0.18
SS	967	107	0	0	193	0	1074	22	157	0.18
SSG10	860	107	107	0	193	0	1074	22	157	0.18
SSG20	753	107	214	0	193	0	1074	22	157	0.18
SSG30	646	107	321	0	193	0	1074	22	157	0.18

1.3 试件制备

所有试件均按照以下程序制备:①将所需的胶凝材料和砂子放入行星搅拌机中搅拌3 min,使各材料充分混合;②将高效减水剂和水的混合溶液加入机器中搅拌1 min,使材料出现黏性;③将钢纤维缓慢加入混合物中搅拌3 min。

混合完成后,将新鲜混合物浇筑到尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的棱柱形模具中,然后在振动台上振动2 min。所有试件浇筑后立即用塑料薄膜覆盖模具,置于标准养护实验室(温度(20±2)℃、湿度>95%)养护24 h。待试件拆模后,再次将试件放置在实验室,直到测试龄期。

1.4 试验方法

1.4.1 力学性能测试

按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)^[11],分别在3、7、14、28和56 d测定所有种类混凝土40 mm×40 mm×160 mm试件的抗压和抗折强度。在试验机上以50 N/s加载速度进行跨度为100 mm的三点弯曲试验,直至试件失效。每组包含3个试件,每组的抗弯强度取3个试件抗弯强度的平均值。对弯曲试验得到的6个断裂试件进行压缩试验,加载速度为2400 N/s。试件抗压强度取6

个试件抗压强度的平均值。

1.4.2 水化热测试

为了研究高炉矿渣在 UHPSSC 中的水化放热情况,采用 TAM 空气量热计测量了试件前 72 h 的总放热量和放热率。本试验共选取 FQ、SS、SSG20 3 组试件进行检测。将大约 10 g 的新鲜膏状混合物密封在容器中,然后放入测试通道中进行水化热测试。

1.4.3 水化产物测试

采用 XRD 测试 FQ、SS、SSG20 试件在 3 和 28 d 的水化产物。XRD 仪器在 40 mA 和 45 kV 的条件下工作,测试范围 2θ 为 $5\sim 35^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$,步长为 0.02° 。

1.4.4 微观结构测试

采用 SEM 测试 FQ、SS、SSG20 试件在 3 和 28 d 的微观结构。先将试件加工成长 5 mm、宽 4 mm 的薄片,然后用异丙醇浸泡 7 d 以上,防止试件水化。测试前,在试件表面喷金,然后用高分辨率扫描电镜进行测试。

2 结果和分析

2.1 力学性能

由图 2 可知,在所有养护龄期内,SS 的抗压强度始终大于 FQ,这主要源于海水中的 Cl^- 可以与水泥浆体中的铝酸盐和铁氧体发生反应生成 Friedel's 盐,使水泥浆基体更加致密^[12]。此外,在水化早期(7 d 之前),海水的加入显著提高了 SS 的早期强度,这主要归因于海水中的 Cl^- 加速了水泥颗粒的溶解,促进更多的硅酸盐物质发生反应生成 C-S-H 凝胶。

从图 2 中还可以观察到,在 14 d 养护龄期内,掺有 GGBS 的 SSG 系列抗压强度随 GGBS 掺量的增加而增加。这源于海水的高碱度可以通过增强矿渣的早期反应活性,提高矿渣中的铝酸盐与 Cl^- 的反应速率;另一方面,海水中的 SO_4^{2-} 与水泥水化后形成的高碱性环境加速了矿渣的溶解,增强了矿渣的火山灰反应^[2]。随着养护时间的增加,在第 28 天,SSG20 的抗压强度超过了 SSG30。虽然海水会增强 GGBS 的火山灰反应,但高掺量的 GGBS 含有大量未反应的 SiO_2 ,这会造成碱硅反应^[13],导致 SSG30 强度不如 SSG20。

图 3 显示了不同养护龄期内各类型试件的抗折强度。在 28 d 养护龄期内,SS 与 FQ 的抗折强度相似,说明海水和海砂的加入对 SS 的抗折强度没有显著影响。然而,在养护后期(56 d),SS 的抗折强度由 28 d 的 22.0 MPa 下降到 19.9 MPa,这可能是由于海水加速 SS 水化反应的同时引起了水泥基体的自收缩或膨胀现象,导致混凝土内部产生裂缝^[14],对抗折强度产生不利影响。此外,在 SSG10—SSG30 中,SSG20 和 SSG30 在 56 d 内

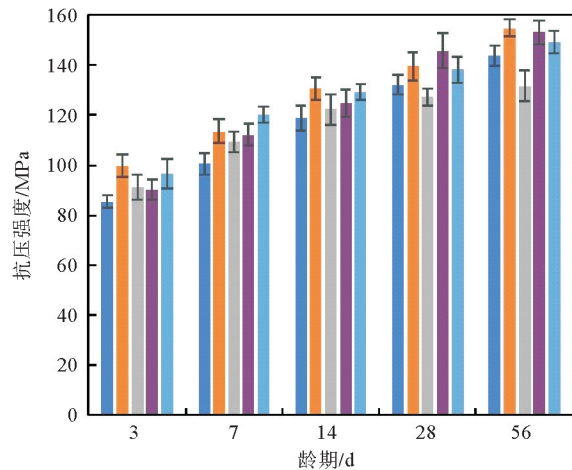


图 2 不同种类试件的抗压强度

■ FQ; ■ SS; ■ SSG10; ■ SSG20; ■ SSG30

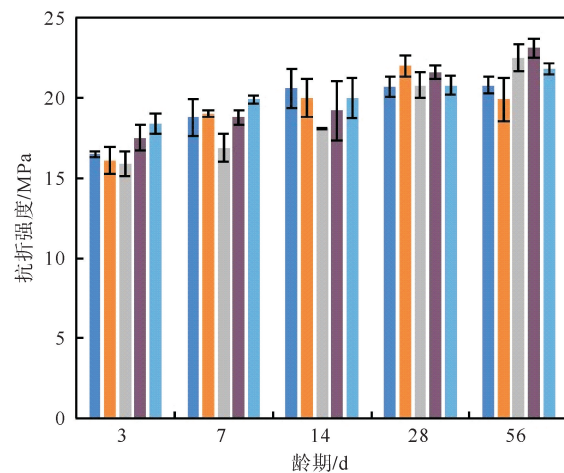


图 3 不同种类试件的抗折强度

■ FQ; ■ SS; ■ SSG10; ■ SSG20; ■ SSG30

的抗折强度始终接近或大于 SS 的抗折强度,这是因为高掺量的 GGBS 可以更好地细化混凝土的内部结构,减少裂缝的产生。

2.2 水化热分析

鉴于 SSG20 的力学性能表现最佳,分别测试了 FQ、SS 和 SSG20 的水化放热情况,各试件在 72 h 内的放热结果如图 4 所示。其中,计算的热值是以每克水泥释放的热量进行归一化处理。从图 4(a)可以观察到在 0~0.5 h 有很明显的放热峰,该峰的峰值主要与石膏相和铝酸三钙(C_3A)的溶解、钙矾石(AFt)的形成有关^[15]。大约 3 h 后,反应进入水化诱导期,此阶段各试件表现出较低的放热速率,这主要是水泥溶解速度极慢引起的^[16]。而 SSG20 的诱导期持续时间相对于 SS 显著缩短,这得益于 GGBS 的高比表面积可以为水合物的形成提供更多的成核位点^[17],导致水泥颗粒溶解速度增快。

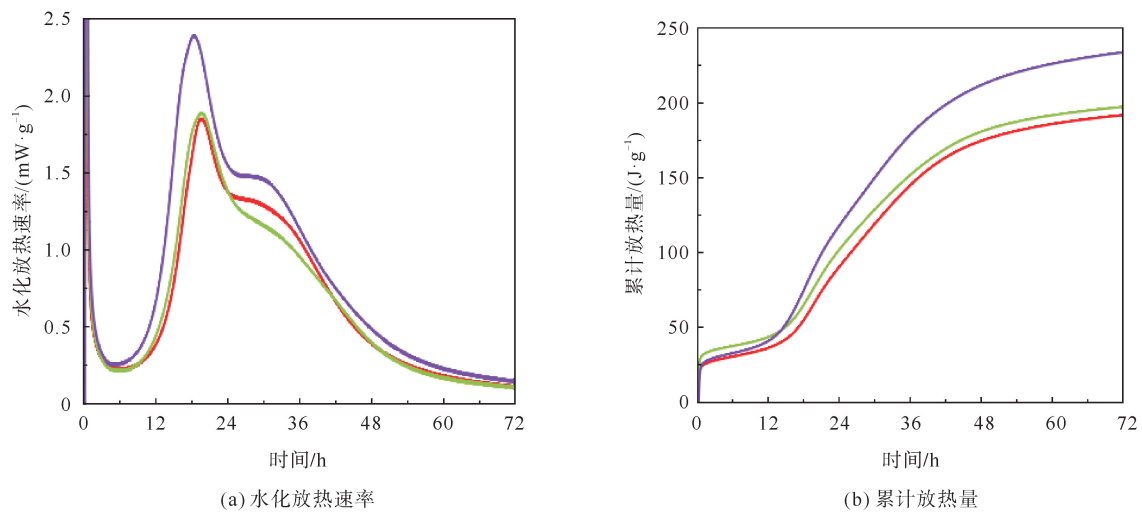


图4 FQ、SS和SSG20在前72 h的水化放热情况

— FQ; — SS; — SSG20

在 12~20 h 的时间内,水化开始进入加速期,此阶段主要与硅酸三钙(C_3S)的水化相关。从图 4(a)可以观察到 SS 加速期的放热速率和主峰峰值都高于 FQ,这得益于海水中的 Cl^- 可以扩散到 C-S-H 凝胶的钝化层,导致水泥颗粒的溶解^[2],使更多的 C_3S 发生水化反应。但是,在此阶段 SS 的放热速率并没有显著高于 FQ,海水对 C_3S 的促进作用似乎并不是那么明显,这是由于低水胶比(0.18)环境导致化学离子活性较低^[18]。此外,SSG20 到达主峰的时间比 SS 缩短了 1.3 h 左右,且峰值强度比 SS 高 26.5%,这与 LI 等^[2]的研究结果相反,可能是因为本试验中使用的 GGBS 活性较高,另一方面海水提供的碱性环境对 GGBS 起到了很好的活化作用^[2],这两种因素使得 GGBS 中富含的 Al 相与 $Ca(OH)_2$ 和 Cl^- 快速反应生成更多的 Friedel's 盐,加速了 C_3S 的水化反应。

在主峰过后放热速率开始下降,6 h 之后甚至更晚出现肩峰放热现象,从图 4(a)可以观察到 FQ 的肩峰出现时间大约在 30 h,此阶段主要与 C_3A 和铝铁四钙(C_4AF)水化相关,前期 AFt 的形成消耗了过多的石膏,造成 SO_4^{2-} 浓度过低,AFt 与 C_3A 开始反应生成单硫型铝酸盐(AFm)^[19]。从图 4 还可以观察到,由于海水的加入,此阶段 SS 的肩峰放热速率始终低于 FQ,这是因为受 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子价态和分子大小的影响, Cl^- 的迁移率高于 SO_4^{2-} ,海水中的 Cl^- 优先 SO_4^{2-} 与 C_3A 反应生成 Friedel's 盐^[20],导致 AFm 的生成量减少,SS 的放热速率降低。此外,SSG20 的肩峰放热速率明显高于 SS,这得益于 GGBS 多余的 Al 相可以与 AFt 反应生成 AFm,导致 SSG20 放热速率的上升。

图 4(b)描述了 FQ、SS 和 SSG20 的累计放热情况。从图中可以观察到,SS 的累计放热量始终大于 FQ,这说明海水的加入促进了水泥颗粒的水化,增加了 SS 的总释热量。另外,由于海水对 GGBS 的活化作用以及 GGBS 具有的较高的比表面积,GGBS 对促进水泥颗粒的水化作用更为明显,导致 SSG20 在所有试件中累计放热量最高。

2.3 XRD 分析

图5为FQ、SS、SSG20在3和28d的XRD衍射图谱。检测到的水化产物包括钙矾石、Friedel's盐、钠长石、透长石、石英、碳酸镁、水镁石、水滑石和波特兰石。在3d时,FQ中AFt的峰强度高于含有海水的试件,而Friedel's盐的峰强度低于含有海水的试件,这是因为海水中 Cl^- 会优先 SO_4^{2-} 与 C_3A 发生反应生成Friedel's盐^[20],由此可推断海水的使用阻碍了AFt的形成,促进了Friedel's盐的形成。在28d时,含有海水的试件AFt峰强度显著提高,这是因为随着水化反应的进行,更多的C-S-H凝胶物理吸附了 Cl^- ,导致海水对AFt的阻碍作用减弱。此外,SSG20的Friedel's盐峰强度高于SS,这是因为GGBS中高含量的Al相通过与 Cl^- 发生反应,生成了更多的Friedel's盐。

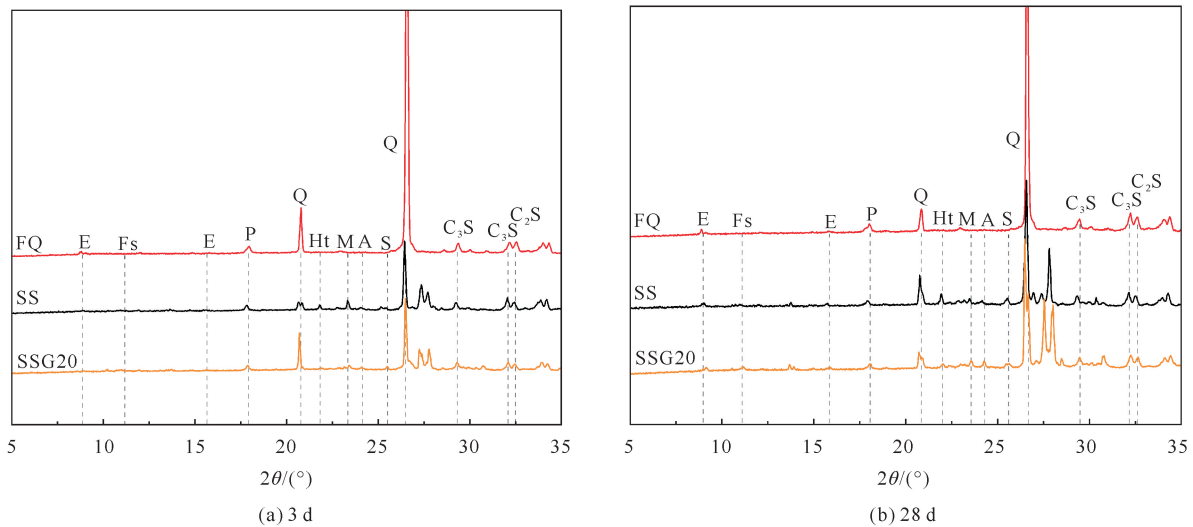
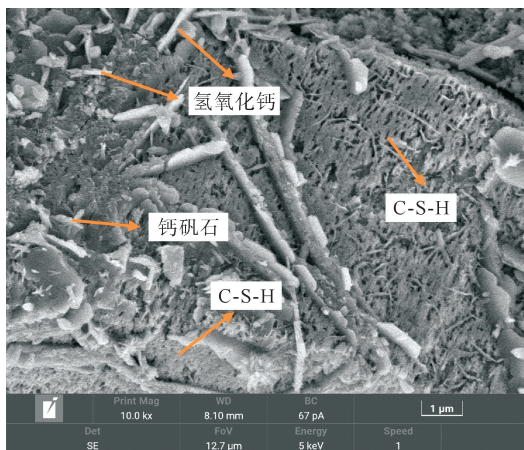


图5 FQ、SS和SSG20的XRD衍射图谱

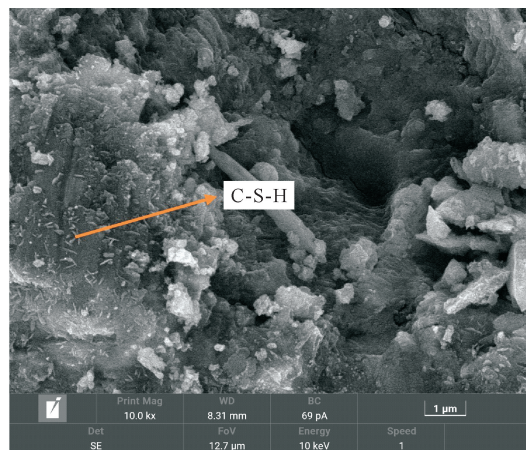
E—钙矾石; Fs—Friedel's盐; A—钠长石; S—透长石; Q—石英; M—碳酸镁; B—水镁石; Ht—水滑石; P—波特兰石

2.4 SEM 分析

采用SEM观察了FQ、SS、SSG20在3和28d的微观结构,如图6所示。在3d时,对比图6(a)和(c)可以观察到FQ表面布满了箔片状的C-S-H凝胶,而SS表面大量长板状的Friedel's盐相互交错生长在C-S-H凝胶中间,这证明了海水的加入可以促进Friedel's盐的生成。此外,FQ表面较光滑,而SS表面较粗糙且新形成的水化产物充斥在Friedel's盐周围,这可能是由于海水可以显著促进水泥颗粒的溶解^[15]。此外,从图6(e)中可以观察到SSG20表面较SS表面光滑且Friedel's盐的形态发生了变化,这说明GGBS的加入可以对SS的微观结构产生影响。



(a) 3 d FQ



(b) 28 d FQ

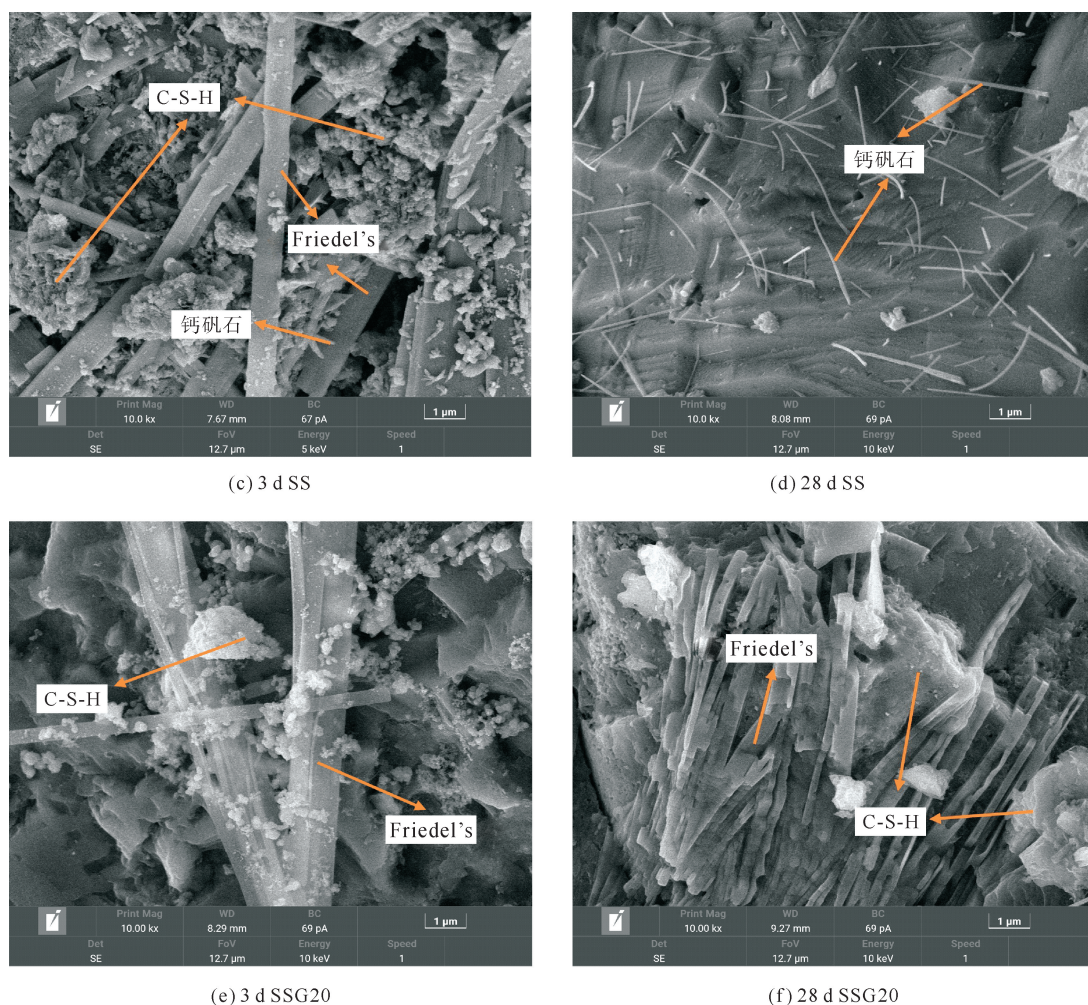


图 6 FQ、SS 和 SSG20 的 SEM 图

在 28 d 时,对比图 6(b)和(d)可以观察到 FQ 表面含有纤维状的 C-S-H 凝胶,而 SS 表面大量针状的钙矾石相互交错生长在基体表面,这可以为基体之间的连接起到很好的桥接作用。此外,SS 的微观结构整体呈现出比 FQ 更致密的布局,这得益于海水中的 Cl^- 能够使 C-S-H 凝胶由纤维状转变为致密状^[21],这是 SS 在 28 d 抗压强度大于 FQ 的主要原因。与 SS 相比,SSG20 表面含有大量 Friedel's 盐,这证实了在海水的作用下,GGBS 可以固化大量的 Cl^- 并生成 Friedel's 盐。此外,SSG20 覆盖有大量的 C-S-H 凝胶,这是因为海水的碱性环境对 GGBS 起到活化作用,促使 GGBS 中更多的 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,并生成额外的 C-S-H 凝胶。

3 结论

本文的主要目的是研发一种环保型的超高性能海水海砂混凝土(UHPSSC)。利用海水和海砂全部取代淡水和石英砂,高炉矿渣部分取代水泥,为节约资源和固废利用提供借鉴。通过力学性能试验、水化热测试、XRD 和 SEM 分析新型 UHPSSC 的力学性能、水化机理和微观结构。基于上述试验,可以得到以下结论:

1) 海水的加入显著提高了海水组 UHPSSC(SS)的早期抗压强度,这源于海水加速了水泥颗粒的溶解,促进更多 C-S-H 凝胶的生成;在前 14 d 内,掺有高炉矿渣(GGBS)的 SSG 组抗压强度随 GGBS 掺量的增加而增加,这得益于海水提供的碱性环境和 SO_3^{2-} 增加了高炉矿渣的反应活性。

2) 高炉矿渣取代率为 20% 的 UHPSSC(SSG20)前 72 h 的累计放热量显著高于 SS,SSG20 到达主放热速率峰的时间较 SS 提前且峰值强度比 SS 高 26.5%,这归因于海水对 GGBS 的活化作用以及 GGBS 具

有的较高的比表面积,使得 GGBS 对水泥颗粒的促进水化作用更为明显。

3) 通过 XRD 和 SEM 分析可以得出,与 SS 相比,SSG20 可以生成更多的 Friedel's 盐,这是因为海水中的 Cl^- 与 GGBS 中的 Al 相发生反应,生成了更多的 Friedel's 盐,这也说明 GGBS 可以起到固化 Cl^- 的作用。

参考文献(References):

- [1] TENG J G, XIANG Y, YU T, et al. Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(14): 3100-3120.
- [2] LI H, FARZADNIA N, SHI C. The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 185: 508-518.
- [3] SUN X, LI T Y, SHI F Y, et al. Sulphate corrosion mechanism of ultra-high-performance concrete (UHPC) prepared with seawater and sea sand[J]. *Polymers*, 2022, 14(5): 971.
- [4] LI T Y, LIU X Y, ZHANG Y M, et al. Preparation of sea water sea sand high performance concrete (SHPC) and serving performance study in marine environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119114.
- [5] YU T, CHEN J F, XIAO J Z, et al. Effect of fiber content on mechanical performance and cracking characteristics of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHP-SSC)[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(6): 1182-1195.
- [6] JIANG K D, WANG X, CHEN Z Y, et al. Effect of constituent content on mechanical behaviors of ultra-high performance seawater sea-sand concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 351: 128952.
- [7] REDA M, SHRIVE N, GILLOTT J. Microstructural investigation of innovative UHPC[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): 323-329.
- [8] ZHANG Y Y, CHANG J, ZHAO Q X, et al. Effect of dosage of silica fume on the macro-performance and micro/nanostructure of seawater Portland cement pastes prepared with an ultra-low water-to-binder ratio[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 133: 104700.
- [9] REGOURD M, THOMASSIN J, BAILLIF P, et al. Blast-furnace slag hydration; Surface analysis[J]. *Cement and Concrete Research*, 1983, 13(4): 549-556.
- [10] RAMEZANIANPOUR A A. *Cement replacement materials*[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [11] GB/T 17671—2021, 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S].
GB/T 17671—2021, Test method of cement mortar strength(ISO method)[S].
- [12] LIU J, AN R, JIANG Z L, et al. Effects of w/b ratio, fly ash, limestone calcined clay, seawater and sea-sand on workability, mechanical properties, drying shrinkage behavior and micro-structural characteristics of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126333.
- [13] AHMAD J, KONTOLEON K J, MAJDI A, et al. A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production[J]. *Sustainability*, 2022, 14: 8783.
- [14] GHAFARI E, GHAFARI S A, COSTA H, et al. Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127: 43-48.
- [15] WANG J J, LIU E G, LI L. Multiscale investigations on hydration mechanisms in seawater OPC paste[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 891-903.
- [16] LI P R, LI W G, YU T, et al. Investigation on early-age hydration, mechanical properties and microstructure of seawater sea sand cement mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118776.
- [17] LAWRENCE P, CYR M, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(12): 1939-1947.
- [18] ZHAO Y F, HU X, SHI C J, et al. A review on seawater sea-sand concrete; Mixture proportion, hydration, microstructure and properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 295 (6): 123602.
- [19] BLACK L, BREEN C, YARWOOD J, et al. Hydration of tricalcium aluminate (C_3A) in the presence and absence of gypsum—studied by Raman spectroscopy and X-ray diffraction[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2006, 16(13): 1263-1272.
- [20] LU J X, SHEN P L, ZHANG Y Y, et al. Early-age and microstructural properties of glass powder blended cement paste: Improvement by seawater[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 122: 104165.
- [21] SURYAVANSHI K A, SCANTLEBURY D J, LYON B S. Pore size distribution of OPC & SRPC mortars in presence of chlorides[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(5): 980-988.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)