

粉煤灰-赤泥-钢渣微粉胶凝材料特性研究

丁 锋

(江苏省连云港市铁路事业发展中心, 江苏 连云港 222006)

摘 要: 为解决水泥成本高、能耗污染大等问题, 基于固废协同效应, 以粉煤灰(FA)、赤泥(RM)、钢渣微粉(USS)为原材料, 外掺水玻璃溶液为碱激发剂制备全固废胶凝材料(SWCM)。通过室内试验, 以单因素极差法分析SWCM工作力学及水稳性能变化规律, 并利用XRD、SEM微观试验分析SWCM水化反应机理。试验结果表明: SWCM凝结时间、抗折抗压强度及水稳性能均在RM:USS=1:4时最佳, 且工作力学性能可满足P.O42.5及以下硅酸盐水泥性能指标。SWCM生产成本仅为P.O42.5硅酸盐水泥的48.5%~55.4%。试件水化产物主要为水化硅铝酸钙(C-S-(A)-H)、钙矾石(Aft), 当试件龄期增长、选择合适的RM及USS掺量可使试件中C-S-(A)-H、Aft数量增多, 力学性能更为优良。通过对SWCM系统性研究, 对其用于实体工程做数据理论支撑。

关键词: 固废协同效应; 碱激发剂; 全固废胶凝材料; 水化反应机理

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0289-06

Study on Characteristics of Fly Ash - Red Mud - Ultrafine Steel Slag Powder Cementing Material

DING Feng

(Jiangsu Lianyungang Railway Development Center, Lianyungang 222006, China)

Abstract: In order to solve the problems of high cement cost, high energy consumption and pollution, and based on the synergistic effect of solid waste, the fly ash (FA), red mud (RM) and ultrafine steel slag powder (USS) are used as the raw materials, and the external water glass solution is used as the alkali activator to prepare the solid waste cementing material (SWCM). Through the laboratory tests, the variation of SWCM working mechanics and water stability performance is analyzed by the single-factor range method, and the hydration reaction mechanism of SWCM is analyzed by XRD and SEM microscopic tests. The test results show that the setting time, flexural and compressive strength and water stability of SWCM are the best when RM:USS = 1:4, and the working mechanical properties can meet the performance indexes of portland cement P. O42. 5 and below. The production cost of SWCM is only 48. 5 % ~ 55. 4 % of that of P. O42. 5 Portland cement. The hydration products of the specimen are mainly the calcium silicaluminate hydrate (C-S-(A)-H) and ettringite (Aft). When the age of the specimen increases, the number of C-S-(A)-H and Aft in the specimen can be increased by selecting the appropriate amount of RM and USS, and the mechanical properties are better. Through the systematic study of SWCM, it is used as the data theoretical support for entity engineering.

Keywords: synergistic effect of solid waste; alkali activator; solid waste cementing material; hydration reaction mechanism

0 引 言

目前,水泥是国内最常用的一种工程胶凝材料,其具有强度高、工作性能及耐久性能优良等优点^[1-2]。但制备水泥需消耗大量能源,而且会排放大量有害气体、粉尘,对自然环境也会有极大的破坏,消耗了大量的优质石灰石资源^[3]。因此,为降低在

水泥在工程的消耗量,现急需寻求一种可替代水泥的新型绿色胶凝材料^[4]。

在我国,火电、钢铁及铝冶炼等产生了大量的粉煤灰、赤泥、钢渣等固体废弃物^[5-6]。其中粉煤灰、钢渣的年排放量可达上亿吨,赤泥的排放量也居高不下,但工业固体废弃物的综合利用率不高^[7]。这些固体废弃物持续的生产、堆存占用了大量的土地等自然资源,而且其重金属浸出物会污染自然资源。因此,如何综合利用固体废物,降低其堆存量,已经成为目前的重点研究方向^[8]。

收稿日期: 2024-10-29

作者简介: 丁锋(1997—),男,硕士,工程师,从事高速公路建设管理工作。

为解决上述问题,逐渐发展出碱激发固废地聚物这一胶凝材料^[9]。碱激发固废低聚物具有优良的工作力学性能及耐久性,可替换传统水泥胶凝材料,大大降低施工成本,具有很好的经济与环境效益^[10-11]。近年来许多学者开展了相关研究,万聪聪^[12]等研究了高性能地聚物混凝土的早期收缩性能,研究发现,硅灰掺量及水玻璃模数对高性能地聚物混凝土早期干燥收缩影响一致。在水玻璃模数范围内,水玻璃模数对高性能地聚物混凝土早期自收缩均为负面影响。黄华^[13]等考察了不同配合比对地聚物混凝土性能的影响,经研究后发现,增加养护龄期,可提高聚合反应进程。水玻璃模数降低促进了水化产物凝胶的生成,使其表现出较更高的力学性能。郭凌志^[14]等以煤矸石、粉煤灰制备煤基固废地聚物注浆材料,研究发现,以大掺量煤基固废制备的地聚物注浆材料,具有黏度低、流动性优良等特点,注浆材料的凝结时间、抗压强度及抗渗性能可满足工程需求。

综上所述,本文以粉煤灰(fly ash, FA)、赤泥(red mud, RM)、钢渣微粉(ultrafine steel slag powder, USS)为固废原材料,以水玻璃为碱激发剂,来制备SWCM。通过单因素极差分析不同RM、USS掺量对SWCM凝结时间、抗折抗压强度及水稳定性的影响,通过XRD衍射、SEM扫描电镜微观试验分析其水化反应机理。

1 试验原材料

1.1 原材料化学成分

本试验所用粉煤灰(fly ash, FA)来自南通润盛粉煤灰有限公司,主要成分为SiO₂、Al₂O₃,具备火山灰活性。赤泥(red mud, RM)为冶炼铝所产生的废渣,取自山西华圣铝业有限公司,主要化学成分为SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃及Na₂O,具有一定的碱活性。钢渣为冶炼钢铁废渣,取自山西美锦钢铁有限公司,试验所用为钢渣机械磨细后的钢渣微粉(ultrafine steel slag powder, USS),其主要化学成分为SiO₂、CaO及Fe₂O₃,成分与OPC相似,使得其具有一定的水化活性。碱激发剂采用市面上购买的1.6模数水玻璃溶液。试验所用拌和用水为普通自来水。通过XRF测得原材料的化学成分见表1。

表 1 原材料化学组成								
材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SO ₃
FA	53.21	33.15	3.42	3.21	1.53	0.52	0.25	3.33
RM	21.50	20.60	16.20	14.21	0.77	1.09	12.35	4.57
USS	16.78	5.63	49.37	11.56	—	5.31	—	2.57

1.2 粒度特性

通过激光粒度分析仪测得几种试验原材料的粒径特性,见表2。

表 2 原材料粒度参数、比表面积与密度					
样品	粒度参数/ μm			比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	表观密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀		
FA	8.04	31.31	99.27	162	2.24
RM	2.04	14.80	52.50	297	2.54
USS	1.58	9.41	39.57	551	2.83

由表2可知,FA、RM及USS比表面积分别为162、297及551 $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$,表观密度分别为2.24、2.54及2.83 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,原材料平均粒径由大到小分别为:FA>RM>USS。

综合上述分析可知,FA主要成分为SiO₂、Al₂O₃,在碱性环境中可发挥出良好的火山灰活性^[13]。RM与USS具有良好的水化活性,但活性较低,需通过碱激发剂进一步激发其活性^[6-7]。

2 试验方案设计

2.1 工作力学及水稳定性能试验方案

为分析碱激发剂下不同RM、USS比例对SWCM工作力学性能的影响,根据预实验结果及相关参考规范,将SWCM水固比设定为0.5,碱激发剂模数与浓度分别设为1.6、10%,按表3中胶凝材料配合比进行试验^[15]。

表 3 SWCM 试验方案表						
编号	原材料配合比/%			外掺水玻璃		水固比
	FA	RM	USS	模数	浓度	
A ₁	50	0	50	1.6	10%	0.5
A ₂	50	10	40			
A ₃	50	20	30			
A ₄	50	30	20			
A ₅	50	40	10			
A ₆	50	50	0			

2.2 微观试验方案

为分析不同RM与USS掺量、养护龄期对胶凝材料水化反应的影响,采用A₂组3、7、28 d龄期试件及A₁、A₆组28 d龄期试件进行XRD衍射试验,同时采用A₂组3、28 d龄期试件进行SEM扫描电镜试验,详细微观试验方案见表4。

表 4 微观试验方案				
XRD 衍射			SEM 扫描电镜	
3 d	7 d	28 d	3 d	28 d
A ₂	A ₂	A ₁ 、A ₂ 、A ₆	A ₂	A ₂

3 试验方法

3.1 工作力学及水稳定性能试验

3.1.1 试验流程

根据预实验得出,浆液密度约为 1.5 g/cm^3 ,需要总质量约 $1\ 152\text{ g}$ 的浆液才能完全填充三联 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 模具。考虑到需与 P.O 42.5 硅酸盐水泥特性做对比,按照规范《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)规定将水固比定为 0.5(水质量与总固体物质质量之比)。同时考虑到试验损耗及胶凝材料凝结时间试验,每次需制备约 $1\ 400\text{ g}$ 浆液。具体步骤如下:

(1)根据表 3 中试验方案称取各种原材料,将原材料于盆中混合均匀。

(2)向盆中加入称量好的水与碱激发剂,用搅拌机搅拌 3min,制备为均匀浆液。

(3)取部分浆液用于凝结时间试验,其余浆液用于充填三联 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 试模,以制备 SWCM 试件进行抗折抗压强度及水稳定性试验。

3.1.2 凝结时间试验

浆液凝结时间试验参照规范《水泥标准稠度用水量,凝结时间,安定性检验方法》(GB/T 1346—2023),利用维卡仪测定。

3.1.3 抗折抗压强度试验

参照规范《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)中 T 0506—2005 试验方法把浆液制备为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 试件,放入标准养护室中养护至规定龄期后取出,测定试件抗折抗压强度。

3.1.4 水稳定性试验

参照规范《土壤固化外加剂》(CJT 486—2015)中进行胶凝材料试件水稳定性试验。试件到养护龄期后,测定其泡水 1 d 标准养护龄期无侧限抗压强度 F_1 ,同时测定标准养护龄期试块抗压强度 F_2 ,计算水稳系数: F_1/F_2 。

3.2 微观试验

3.2.1 微观试验试件制备

收集抗折抗压强度试验后的试件碎块,选取部分碎块浸泡在装有无水乙醇的密闭瓶子中以终止试件碎块水化。测试前,将碎块置于 60°C 恒温烘箱中烘至恒重,选取部分碎块用玛瑙研钵磨细过 0.075 mm 筛后进行 XRD 衍射试验。选取表面较为平整的边长 1 cm 、厚度为 2 mm 的片状试样进行 SEM 扫

描电镜试验。

3.2.2 XRD 衍射试验

采用 X 射线衍射仪对试件进行晶体矿物分析,扫描范围 2θ 为 $5^\circ\sim 80^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。

3.2.3 SEM 扫描电镜试验

采用扫描电镜仪对试件进行表面微观结构测试。测试前,在试件上溅射喷金以提高扫描图像的质量。

4 试验结果分析

4.1 工作力学试验结果分析

4.1.1 凝结时间分析

图 1 为胶凝材料凝结时间与配合比的关系图。

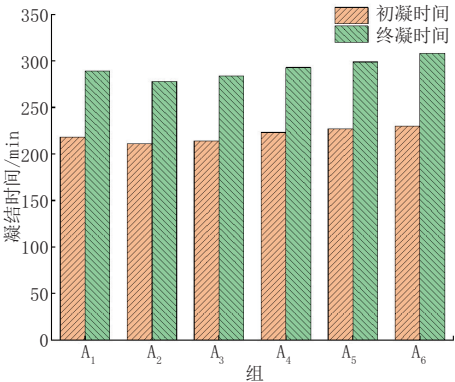


图 1 凝结时间试验结果(单位:min)

由图 1 可知,SWCM 凝结时间随 USS 掺量减少,呈先减少后增长的趋势,随 RM 掺量增加呈先减少后增长的趋势。这说明掺量比 $\text{RM}:\text{USS}=1:4$ 时,SWCM 体系中水化反应速率最快,浆液凝结最为迅速。这是由于 RM 粒径大于 USS,溶于水后呈弱碱性,掺加少量的 RM 可加大浆液碱度,增加活性成分含量,可与 FA、USS 协同加快浆液中水化反应速率^[17]。随 RM 掺量增加,USS 掺量减少,SWCM 中活性物质数量减少,FA、RM 与 USS 间协同效果降低,水化反应会逐渐减慢,凝结时间增长。

各组 SWCM 浆液初凝时间均在 211~230 min、终凝时间均在 278~308 min 之间,符合规范《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)中对 P.O 42.5 硅酸盐水泥初凝时间不小于 45 min、终凝时间不大于 600 min 的要求。由此可知,通过调整 SWCM 原材料配合比,其凝结时间可以满足规范《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)对 P.O 42.5 硅酸盐水泥的要求。

4.1.2 抗折抗压强度分析

图 2 为 SWCM 各组试件 3、7、28 d 抗折抗压强度与原材料关系图。

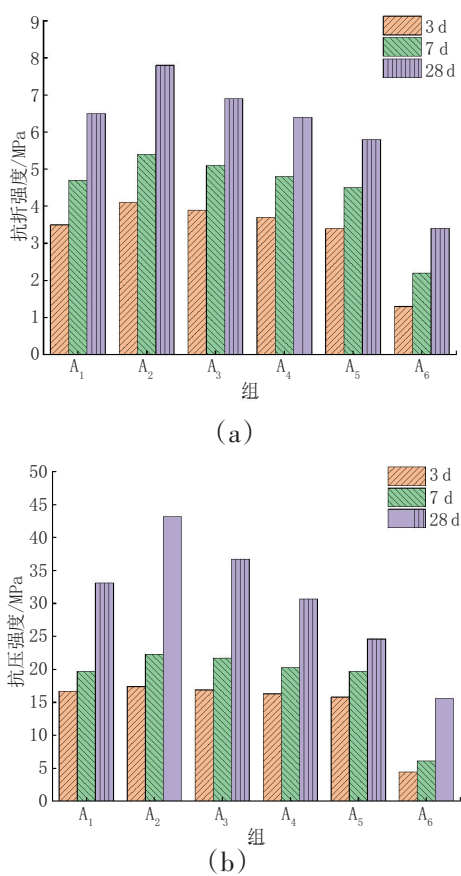


图2 抗折抗压强度试验结果(单位:MPa)

由图2可得,SWCM试件3、7、28 d抗折抗压强度变化规律基本一致,随龄期增长而增大,这是由于随养护龄期增长,试件内部水化反应不断进行,试件内部水化产物增多,试件内部结构变得更加密实,强度随之增加。试件强度随USS掺量减小或RM掺量增加而呈现先增大后降低的趋势,在掺量比RM:USS=1:4时各龄期试件抗折抗压强度达到最高。这说明在SWCM材料体系中,固废原材料化学成分具有互补作用,在各固废原材料掺量达到最佳比例时,可相互激发原材料活性,加快水化反应,增加试件强度^[18]。

图2中A₁₋₃组试件28d龄期抗折强度均大于规范《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)中对P.O 42.5硅酸盐水泥抗折强度6.5 MPa的要求,且A2组试件28 d龄期抗压强度为43.2 MPa,大于规范《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)中对P.O 42.5硅酸盐水泥28 d龄期抗压强度为42.5 MPa的要求。说明通过调整SWCM原材料配合比,其抗折抗压强度可以满足规范《通用硅酸盐水泥》(GB175—2023)中对P.O 42.5硅酸盐水泥及以下等级水泥的强度要求。

4.1.3 水稳定性分析

图3为SWCM试件水稳定性与配合比的关系图。

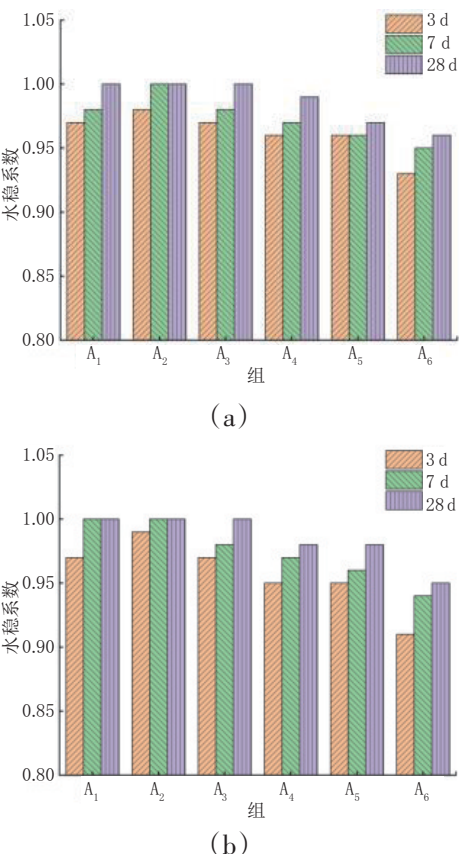


图3 水稳定性试验结果

由图3可知,各组试件水稳系数保持在0.91~1之间,SWCM整体水稳定性良好。其中可明显看出,试件水稳定性变化规律与4.1.2中抗折抗压强度变化规律基本相似,说明试件强度大小是影响试件水稳定性的关键因素。这是因为,随试件强度增大,试件内部结构愈发致密,孔隙减少,水对试件内部的侵蚀效果大大降低^[19-20]。

4.1.4 成本分析

综合上述分析可知,当FA、RM、USS掺量分别为50%、10%、40%,水玻璃碱激发剂模数为1.6、掺量为10%,水固比为0.5时工作力学性能最优,满足P.O 42.5普通硅酸盐水泥的性能指标要求。结合工业固废原材料成本(见表5),给出SWCM与P.O 42.5普通硅酸盐水泥成本对比(见表6)。由表6可知,SWCM生产成本仅为P.O 42.5普通硅酸盐水泥的48.5%~55.4%。因此,若采用SWCM部分或全部替代传统水泥材料用于工程施工,不仅可使FA、RM、USS工业固废产生了良好的经济价值,也降低了工业固废堆存量,具有良好的经济和社会效益。

表5 原材料成本

类别	FA	RM	USS	水玻璃
出厂价/(元·t ⁻¹)	40	20	55	1 500

表 6 SWCM 与 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥成本

类别	SWCM	P.O 42.5 普通硅酸盐水泥
出厂价/(元·t ⁻¹)	194	350~400

4.2 微观试验分析

4.2.1 XRD 分析

图 4 为胶凝材料 A₂ 组 3、7、28 d 龄期试件及 A₁、A₆ 组 28 d 龄期试件 XRD 图谱。

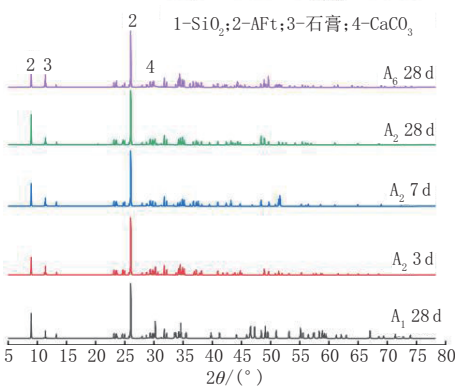


图 4 XRD 试验结果

由图 4 可知:

A₂ 组 28 d 龄期试件的钙矾石峰高于 3、7 d 龄期试件,石膏峰均小于 3、7 d 龄期试件。这说明随养护龄期增长,水化反应不断进行,石膏(CaSO₄)被消耗生成水化产物 AFt,水化产物 AFt 数量增多,使试件致密程度增加,强度也随之增加^[20]。

对比 A₁、A₂、A₆ 组 28 d 龄期试件 XRD 图谱可知,随 USS 掺量减少或 RM 掺量增加,钙矾石峰呈先增高后降低的趋势,而石膏峰变化与之相反。这是因为少量 RM 可提高试件碱度,加快 USS 水化反应的进行^[6]。且 RM 粒径较小,与各个原材料的接触面积较大,离子交换反应更加频繁,从而水化产物 AFt 生成量增多^[19]。但随 RM 掺量增加,USS 掺量随之减少,使得全固废注浆材料体系中活性矿物 C₂S、C₃S 含量减少,水化反应减弱,这也与 4.1.2 中抗折抗压强度变化规律一致^[21]。

根据以往研究可知,固废原材料体系中含有大量的活性 SiO₂、Al₂O₃、CaO,特别是 USS 含有高活性 C₂S、C₃S 等矿物成分。这些化学物质在碱性溶液环境中会生成大量 C-S-(A)-H。但由于 C-S-(A)-H 为非晶态物质,故无法在 XRD 图谱中显现出明显的衍射峰^[22]。

4.2.2 SEM 试验结果分析

图 5 为 A₂ 组 3、28 d 龄期试件及 A₆ 组 28 d 龄期试件 5 000 倍 SEM 图。由图 5 可知,随试件中水化产物

主要为絮凝状的 C-S-(A)-H 及针棒状的 AFt,与 4.2.2 中 XRD 试验分析结果一致。

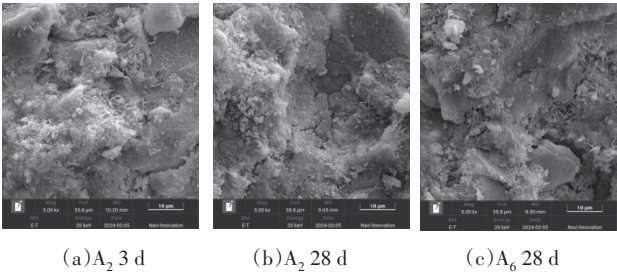


图 5 试件 5 000 倍 SEM 图

对比 A₂ 组 3、28 d 龄期试件可知,随试件养护龄期增加,试件内部水化反应进程加快,生成的水化产物 C-S-(A)-H、AFt 增多,二者互相搭接、粘结原材料颗粒,使得试件结构致密,空隙减少。对比 A₂、A₆ 组 28 d 龄期试件可明显看出,A₂ 组试件表面孔隙远少于 A₆ 组试件,A₆ 组试件表面水化产物裸露,而 A₂ 组试件表面结构更为致密。这是因为 USS 中含有 C₂S、C₃S 等活性矿物,在碱激发剂及 RM 中碱性化学成分的作用下,可快速进行水化反应;同时也可加快 FA 的溶解水化,从而使体系中生成更多的水化产物 C-S-(A)-H、AFt^[22]。然随 RM 掺量增多,USS 掺量减少,体系中 C₂S、C₃S 等活性矿物会减少,使整体水化反应进程减缓,水化产物 C-S-(A)-H、AFt 也随之减少^[19]。

4.2.3 水化机理分析

SWCM 体系中各种原材料与水接触时,其水化反应速度及相互结合方式皆不相同^[20-22]。具体水化反应过程如下。

(1)在水玻璃碱激发剂作用下,浆液碱度提高。USS 中 C₂S、C₃S 等活性矿物成分与水快速结合发生水化反应,生成 C-S-H 与 Ca(OH)₂。

(2)同时 FA 与 RM 中 SiO₂、Al₂O₃ 溶出 [SiO₄]⁴⁻ 和 [AlO₄]⁵⁻,CaO、Na₂O 生成 Ca(OH)₂、Na⁺,进一步提高浆液碱度。[SiO₄]⁴⁻ 和 [AlO₄]⁵⁻ 在碱性浆液可生成 C-S-(A)-H,Ca(OH)₂ 与体系中 SO₃、[SiO₄]⁴⁻ 结合生成 AFt。

5 结 论

为探究 SWCM 特性变化规律,先分析了各原材料的化学矿物成分、粒径分布,再研究 SWCM 工作力学及水稳定性能变化规律,同时分析了其水化反应微观作用机理。得到以下结论。

(1)SWCM 凝结时间随 USS 掺量降低或 RM 掺量

增加而呈先降低后增加的变化趋势,SWCM试件抗折抗压强度随USS掺量降低或RM掺量增加而呈先增加后降低的变化趋势。SWCM的水稳定性均优良。

(2)在FA、RM、USS掺量分别为50%、10%、40%时,SWCM的工作力学性能最优,与P.O 42.5硅酸盐水泥工作力学性能相近,且SWCM生产成本低于P.O 42.5硅酸盐水泥。通过调整SWCM配合比,其工作力学性能能满足规范对P.O 42.5及以下等级硅酸盐水泥规定的性能指标要求。

(3)综合分析可知,胶凝材料水化产物主要为C-S-(A)-H和AFt,选择适当的RM、USS掺量、提高试件养护龄期均可加快SWCM水化反应进程,生成更多的C-S-(A)-H和AFt,增加试件内部结构密实度,提高其力学及稳定性能。

本文仅对FA、RM、USS做了单因素配合比研究,对于SWCM中三种原材料在不同水平下工作力学及微观特性变化规律的研究还有待进行。且本文固定了碱激发剂的浓度与模数,没有分析不同浓度与模数的碱激发剂对SWCM特性的影响,这些研究还有待进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 王学川,王小明,刘晓,等.聚羧酸减水剂改性水化硅酸钙晶核对水泥水化进程的影响[J].硅酸盐学报,2023,51(8):1979-1986.
- [2] 徐阳晨,邢国华,赵嘉华.碱矿渣水泥基材料的干燥收缩及减缩技术研究进展[J].材料导报,2023,37(7):85-95.
- [3] Zeng B, Han W, Jia S, et al. Effects of a novel amide-alcohol bearing admixture on the hydration, microstructure and strength of Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 435: 136910.
- [4] 慕宗宇,王菲,杨玉飞,等.水泥标号对飞灰中重金属固化机理影响[J].环境工程学报,2023,17(6):1987-1996.
- [5] 唐先习,李昊杰,李明泽,等.地聚物固化黄土力学性能及边坡稳定性研究[J/OL].湖南大学学报(自然科学版),1-12.
- [6] 刘晓凤,董晓强,李加时,等.赤泥改性生物炭修复铅污染土性能研究[J].土木工程学报,2023,56(增刊2):104-114.
- [7] 王剑锋,常磊,王艳,等.钢渣胶凝活性与体积稳定性优化研究现状[J].材料导报,2023,37(11):119-127.

- [8] 黄文博,李金惠,曾现来.固体废物无害化精准定量评估及科学启示:以典型工业废物为例[J].科学通报,2022,67(7):685-696.
- [9] 李召峰,陈经棚,杨磊,等.石粉对赤泥基注浆材料的影响机制[J].工程科学学报,2021,43(6):768-777.
- [10] 葛洁雅,朱红光,李宗徽,等.煤矸石粗骨料-地聚物混凝土的力学与耐久性能研究[J].材料导报,2021,35(增刊2):218-223.
- [11] 张阳,田绍强,马涛,等.固废基地聚物稳定碎石力学性能和干燥收缩特性研究[J].中国公路学报,2023,36(12):120-130.
- [12] 万聪聪,姜天华.高性能地聚物混凝土早期收缩特性[J].复合材料学报,2024,41(2):952-964.
- [13] 黄华,郭梦雪,张伟,等.粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(3):74-84.
- [14] 郭凌志,周梅,王丽娟,等.煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J].建筑材料学报,2022,25(10):1092-1100.
- [15] Zhang Y, Liu H W, Liu H M. Setting time and mechanical properties of chemical admixtures modified FA/GGBS-based engineered geopolymer composites[J]. Construction and Building Materials, 2024(431):136473.
- [16] 原元,赵人达,占玉林,等.粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的抗碳化性能[J].西南交通大学学报,2021,56(6):1275-1282.
- [17] Yang Q, Zhang N, Han L, et al. Preparation and characterization of premixed fluidized solidified soil with municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Construction and Building Materials, 2024(442):137541-137541.
- [18] Yao C, Hu G, Chen Q, et al. Prediction on the freeze-thaw resistance of a one-part geopolymer stabilized soil by using deep learning method[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03530-e03530.
- [19] Hamed E, Demiröz A. Optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2024(441):137488-137488.
- [20] He J, Long S, Zhu Y, et al. Strength Development and Erosive Deterioration of Solidified Soil Exposed to Salty Soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024 (prepublish): 1-12.
- [21] Wang X, Xue Y. Preparation and Immobilization Mechanism of Red Mud/Steel Slag-Based Geopolymers for Solidifying/Stabilizing Pb-Contaminated Soil[J]. Materials, 2024, 17(13):3353-3353.
- [22] Wu H, Liu X, Wang C, et al. Micro-properties and mechanical behavior of high-ductility engineered geopolymer composites (EGC) with recycled concrete and paste powder as green precursor[J]. Cement and Concrete Composites, 2024(152):105672-105672.

(上接第288页)

- 承振信号特征提取[J].振动与冲击,2018,37(3):129-135,152.
- [13] 杨华,陈云良,徐永,等.基于VMD-HHT方法的水电机组启动过渡过程振动信号分析研究[J].工程科学与技术,2017,49(2):92-99.
- [14] 于晓东,潘罗平,安学利.基于VMD和排列熵的水轮机压力脉动信号去噪算法[J].水力发电学报,2017,36(8):78-85.
- [15] 边杰,陈亚农,徐友良,等.基于CEEMDAN排列熵和LS-SVM的滚动轴承状态分类[J].北京工业大学学报,2018,44(10):1267-1274.

- [16] 张建伟,侯颖,赵瑜,等.排列熵算法在水工结构损伤诊断中的应用[J].振动、测试与诊断,2018,38(2):234-239.
- [17] 周涛涛,朱显明,彭伟才,等.基于CEEMD和排列熵的故障数据小波阈值降噪方法[J].振动与冲击,2015,34(23):207-211.
- [18] 张淑清,贾健,高敏,等.混沌时间序列重构相空间参数选取研究[J].物理学报,2010,59(3):1576-1582.
- [19] 耿泽.基于车桥耦合分析的桥梁动力参数精细化识别方法研究[D].西安:长安大学,2016.