

张延年,何明恒.碱固废协同激发胶凝材料强度与水化特性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):455-462.
DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240358

ZHANG Yannian, HE Mingheng. Strength and hydration characteristics of alkali solid waste synergistically stimulated cementitious materials[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(4): 455-462. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20240358

碱固废协同激发胶凝材料强度与水化特性研究

张延年, 何明恒*

(大连交通大学 交通工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 针对工业固废基胶凝材料力学性能不足、微观结构特征不明确等问题, 构建碱渣-电石渣-矿渣-硅灰四元胶凝材料体系, 采用宏观性能测试与微观表征相结合的方法, 评价不同配比下材料体系的力学性能, 揭示水化产物的形成机制和结构演变规律。研究表明: 当碱渣、电石渣、矿渣、硅灰的质量比为8:2:14:1时, 胶凝材料强度较高, 28 d强度达到38.24 MPa; 碱渣和电石渣可协同激发体系活性; 硅灰可作为增补材料提供硅铝成分, 对体系的强度增长具有积极作用; 材料主要水化产物为C-S-H和C-(A)-S-H。研究结论为低碳型水泥替代材料的应用提供参考。

关键词: 协同激发; 全固废胶凝材料; 固废; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0455-08

Strength and hydration characteristics of alkali solid waste synergistically stimulated cementitious materials

ZHANG Yannian, HE Mingheng*

(School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient mechanical properties and unclear microstructure characteristics of industrial solid waste-based cementitious materials, a quaternary cementitious material system of alkali slag-carbide slag-slag-silica fume was constructed. The mechanical properties of the material system under different ratios were evaluated by means of macroscopic performance test and microscopic characterization, and the formation mechanism and structural evolution of hydration products were revealed. The results show that when the mass ratio of alkali slag, carbide slag, slag and silica fume is 8:2:14:1, the strength of cementitious material is higher, and the strength of 28 d reaches 38.24 MPa. Alkaline slag and carbide slag can synergistically stimulate the activity of the system; the silica fume can be used as a supplementary material to provide silicon and aluminum components, which has a positive effect on the strength growth of the system. The main hydration products of the material are C-S-H and C-(A)-S-H. The research conclusions provide a reference for the application of low-carbon cement alternative materials.

Keywords: synergistic stimulate; all-solid-waste gelling materials; solid waste; compressive strength; microstructure

0 引言

工业固体废弃物的资源化利用已成为建筑材料研究领域的一个重要方向^[1-3]。传统水泥基胶凝材料的高能耗和高污染问题日益凸显^[4]。碱激发胶凝材料是以工业固废作为原料, 并通过碱激发反应生成的具有胶凝特性的产品, 不仅能够实现固

体废弃物的资源化利用, 而且能显著减少建筑材料行业的碳排放量^[5]。

近年来, 国内外学者在碱激发胶凝材料领域开展了系统的研究。工业固废如矿渣、电石渣、碱渣等含有丰富的硅铝酸盐成分, 具有潜在的胶凝活性。通过适当的激发手段, 可以表现出与传统水泥相当的力学性能, 同时具有更好的耐久

收稿日期: 2024-10-24 修回日期: 2024-12-14 接受日期: 2024-12-28 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52234004)

作者简介: 张延年(1976-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 主要从事大宗固废资源化方面的研究。E-mail: zyntiger@163.com

通信作者: 何明恒(1999-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事全固废胶凝材料水化特性方面的研究。E-mail: hemingheng@foxmail.com

性^[6-8]。在反应机理研究方面,崔孝伟等^[9]揭示了钢渣和矿渣在碱激发过程中的反应路径和产物演变规律,发现化学活化可以显著提高固废材料的反应活性。邓永锋等^[10]研究了不同激发体系对钢渣活性的影响规律,通过对比试验证明硅酸钠激发效果最佳,可显著提高固化土的早期强度。在材料体系方面,何俊等^[11]采用碱渣-矿渣-电石渣三元体系固化淤泥土,通过试验研究发现钙矾石和C-S-H凝胶的协同作用可显著提升材料强度,28 d抗压强度达到32.5 MPa以上。许雪艳等^[12]研究了电石渣替代水泥的可行性,结合碳化养护工艺,实现了二氧化碳的固化封存,使材料抗压强度提高了30%以上。在工程应用方面,张恩华^[13]开发了多种工业固废复合胶凝材料,并应用于实际道路工程中,验证了这类材料的技术可行性和经济合理性。余海燕等^[14]研究了碱渣-氯氧镁水泥体系的耐水改性,通过引入新型外加剂,显著改善了材料的耐久性能。

传统碱激发剂(如水玻璃)虽然激发效果显著,但其高昂的成本和强腐蚀性严重制约了工程应用。现有研究多集中于三元体系,对四元体系的反应机理、水化产物演变规律及微观结构形成机制缺乏系统研究。因此,本文以碱渣-电石渣作

为复合激发剂,通过优化矿渣-硅灰二元前驱体的配比,构建四元全固废胶凝材料新体系。通过系统的抗压强度测试评价材料的宏观性能;借助SEM、XRD、FTIR等技术,从微观层面揭示水化产物的形成机制和结构演变规律,阐释碱固废协同激发的作用机理。开发抗压强度较高、性能稳定的新型胶凝材料,为工业固废的高值化利用和低碳建材的创新提供理论依据和技术支撑。

1 试验材料

试验用碱渣来自河北唐山三友化工集团,主体呈灰白色,颗粒表面粗糙,以团粒、粉粒为主,结构松散。电石渣来自山西阳泉某场,主体呈深灰色,在一些胶凝体系中,电石渣是水化反应的主要驱动力^[15]。硅灰是铁合金在冶炼硅铁和工业硅(金属硅)时的副产物,整个过程需要用除尘环保设备进行回收。试验所使用的硅灰主体呈灰色,主要化学成分为Al和Si,分别占总量的68.2%和21.54%,其他元素含量较少。使用前需烘干处理。矿渣是矿石经过选矿或冶炼后的残余物。试验所使用的矿渣为S105矿渣粉,主体呈白色,矿渣主要提供活性二氧化硅和铝,使用前需烘干并过筛。粒径分布见图1。材料的化学成分见表1。

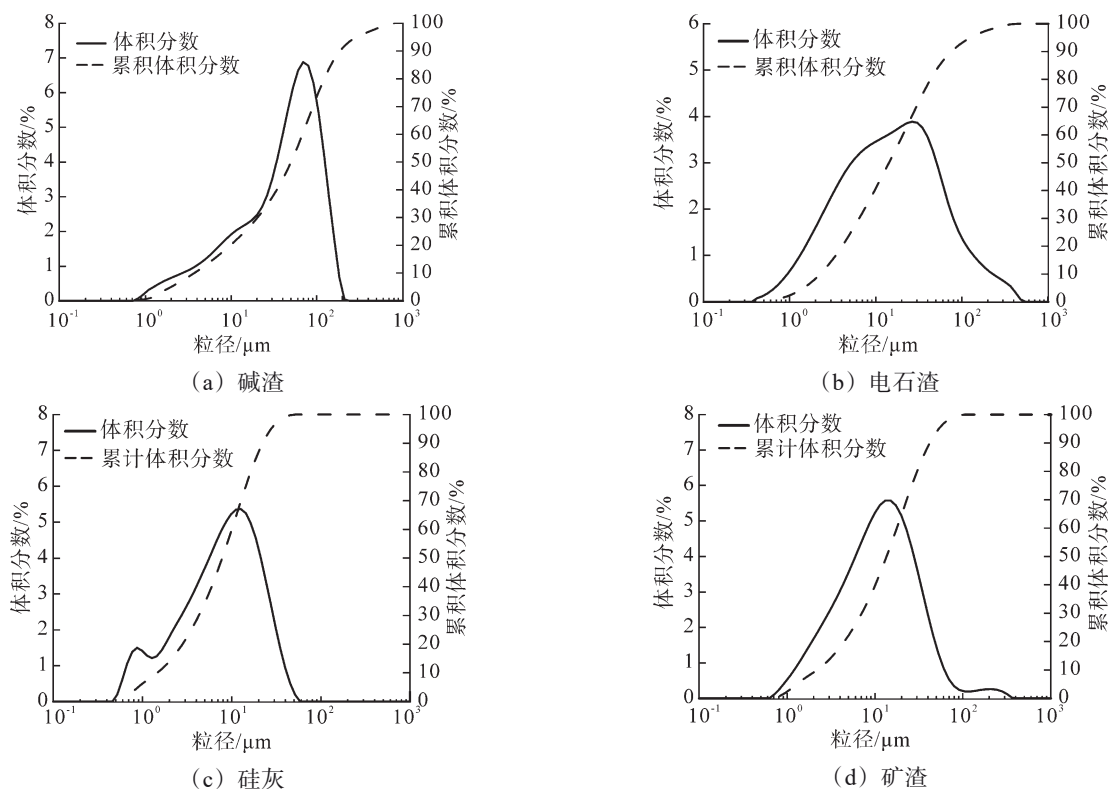


图1 材料的粒径分布

Fig.1 particle size distribution of materials

表 1 材料的化学成分
Tab.1 chemical composition of materials

材料	质量分数/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl ⁻
碱渣	8.72	3.04	1.14	51.22	0.05	7.08		1.97		7.91	18.87
电石渣	2.41	1.29	0.52	94.74	0.01	0.06	0.04	0.06	0.09	0.78	
矿渣	26.64	13.12	0.03	52.43	0.02	5.71	0.41	0.09	1.47	0.08	
硅灰	21.54	68.20	2.20	0.66	0.24		0.14		6.09	0.93	

由表 1 可以看出,碱渣的化学成分主要为 CaO 与氯化物,还有少量的 SO₃,其中氯化物主要以 CaCl₂、NaCl 形式存在,绝干后的氯离子质量分数达到了 18.87%。电石渣化学成分主要为 CaO 且含量最高,达到了 94.74%。矿渣的主要化学成分为 CaO、SiO₂和 Al₂O₃,硅灰的主要化学成分为 Al₂O₃和 SiO₂,以及少量的 TiO₂,硅灰与矿渣的 SiO₂含量相近。

由图 1 可以看出,4 种材料的粒径集中在 10~100 μm,硅灰的中值最小,碱渣的粒径偏大,在预处理时需要进行球磨处理。更小的粒径可以带来更高的化学活性。试验采用 P·O 42.5 水泥为强度对照组,其主要化学成分为 CaO 和 SiO₂。试验中使用聚羧酸系高性能减水剂为减少拌合用水量的体系外加剂。

2 样品制备及表征

试验采用钙系激发方法,以硅灰增补铝相成分。材料体系总质量为 450 g,固定碱固废:前驱体的质量比例为 4:6。共开展 23 组实验,材料配比见表 2。试验 A 组探究不同养护环境对材料各项性能的影响,分为 A1 组和 A2 组。A1 组的养护条件为室温,28 d 平均温度为 20 ℃,平均相对湿度为 56%。A2 组在温度为 20 ℃、相对湿度为 95% 的恒温恒湿环境中养护。B 组分为 5 组试验,探究不同减水剂含量对全固废胶凝材料各项性能的影响,在材料配比保持不变的情况下,固定水胶比(质量比)为 0.35,分别添加 0 g、2.25 g、3.8 g、4 g、5.2 g 减水剂。C 组探究水胶比的影响,在材料配比保持不变的情况下,固定减水剂添加量为 4.5 g,水胶比分别为 0.3、0.32、0.35、0.38、0.4。D 组研究硅灰占比对强度的影响,保持碱激发剂材料配比和水胶比不变,添加 4.5 g 减水剂,硅灰质量分别占总质量的 2%、6%、8%、10%、12%、14%。E 组改变碱渣电石渣的配比,探究 2 种不同的碱固废材料间是否存在协同效应。A 组到 E 组的试验属于平行关系,采用控制变量法,每次只研究 1 种变量的影响,同时为避免重复试验,A2 组的配比多次参与到不同组的强度讨论中。

(1) 预处理

4 种原材料在烘干箱中经 48 h、110 ℃ 的烘干

处理,含水率(质量分数)低于 1%。电石渣和碱渣多为团块状,质地较粗。烘干后,用颚式破碎机破碎 2~3 次,将结团结块的材料破碎为小颗粒。使用多功能粉碎机粉碎小颗粒材料 3~5 min,粉碎时前后晃动使材料充分粉碎。粉碎后的材料通过振筛机进行 1 min 振动过筛,筛网孔径为 0.025 mm。已过筛材料使用球磨机以转速 300 r/min 研磨 15 min。模具选用 40 mm×40 mm×40 mm 三联试模。模具底部小孔塞入锥形橡胶塞,防止净浆渗漏。模具内刷脱模试剂。

表 2 材料配比
Tab.2 material ratio

编号	质量/g					
	电石渣	碱渣	矿渣	硅灰	水	减水剂
A1	108	72	252	18	157.5	4.5
A2	108	72	252	18	157.5	4.5
B3	108	72	252	18	157.5	0
B4	108	72	252	18	157.5	2.25
B5	108	72	252	18	157.5	3.8
B6	108	72	252	18	157.5	4.0
B7	108	72	252	18	157.5	5.2
C8	108	72	252	18	135.0	4.5
C9	108	72	252	18	144.0	4.5
C10	108	72	252	18	171.0	4.5
C11	108	72	252	18	180.0	4.5
D12	108	72	261	9	157.5	4.5
D13	108	72	243	27	157.5	4.5
D14	108	72	234	36	157.5	4.5
D15	108	72	225	45	157.5	4.5
D16	108	72	216	54	157.5	4.5
D17	108	72	207	63	157.5	4.5
E18	36	144	252	18	157.5	4.5
E19	54	126	252	18	157.5	4.5
E20	72	108	252	18	157.5	4.5
E21	90	90	252	18	157.5	4.5
E22	126	54	252	18	157.5	4.5
E23	144	36	252	18	157.5	4.5

(2) 制样

根据表 2 配比称取原料、水及外加剂,置于水泥净浆搅拌机中慢转 120 s,暂停 15 s,快转 120 s,

使材料搅拌均匀。依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)^[16]中的成型方法,将得到的净浆装入三联试模,于振实台上振动成型,覆上保鲜膜,静置 24 h 脱模,在温度为(20±1)℃,相对湿度为 95% 的标准养护箱中养护。

(3) 测试

参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[17]进行流动度测试。采用 pH 测试仪测定净浆的 pH 值。3 d、7 d、28 d 养护后,采用 DYE-3000 压力试验机,依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)进行抗压强度试验,消除误差后,取三次测试的平均值作为结果。将养护至规定龄期的试件破碎后在无水乙醇中浸泡 7 d 终止水化,取出在真空干燥箱中 110℃ 烘干至恒重,然后研磨至粉末状。采用荷兰帕纳科 Empyrean-X 射线衍射仪对原材料及水化产物矿物相成分进行表征,测试参数如下:铜靶,扫描范围为 $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$ (2θ 为衍射角),扫描速度为 $5^{\circ}/\text{min}$ 。采用美国珀金埃尔默傅里叶变换红外光谱仪,利用水化产物粉体,对不同波长的红外辐射的吸收特性进行化学组成分析,测试模式为吸光度,波数范围为 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。采用德国蔡司 SUPRA 55 场发射扫描电镜对原材料硬化浆体进行微观形貌分析。

3 结果与讨论

3.1 力学性能

A 组试件的抗压强度见表 3。在养护初期,A1 组试件强度略高于 A2 组试件强度。但随着时间的推移,A2 组试件强度稳定上升,在 28 d 时达到 29.91 MPa,比室温养护组 28 d 强度高出 26.8%。说明高湿度环境能提供充足的水来参与前驱体材料的溶解过程,利于晚期强度的发展。B 组、C 组及 A2 组的 pH 值见表 4,可见减水剂对浆体 pH 值影响甚微。

表 3 A 组抗压强度

Tab.3 group A compressive strength

编号	养护环境	pH 值	流动度/cm	抗压强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
A1	室温	12.08	256	27.13	22.89	23.58
A2	养护箱	11.69	281	26.69	22.17	29.91

表 4 B 组、C 组及 A2 组的 pH 值

Tab. 4 pH value of group B, group C and A2

编号	pH 值	编号	pH 值
B3	11.9	B7	12
B4	11.74	C8	12.35
B5	11.89	C9	12.19
B6	11.93	C10	11.59
A2	12.08	C11	11.74

B 组试件抗压强度见图 2 (a)。随着减水剂的增加,试件整体的抗压强度均呈先增大再减小的趋势,因为减水剂的减水作用增加了浆体的流动性和密实度,减少了材料间的空隙,并且可以防止应力集中,同时聚羧酸系减水剂可以作为水化晶体的成核位点,也能提升材料的机械性能。但同时减水剂对浆体具有缓凝作用,过多的减水剂会导致终凝时间大幅增加,影响强度的发展,所以强度曲线先增后减。相较于其他试验组,掺入 4 g 减水剂的试件在 28 d 龄期的强度提升效果最为显著。

C 组试件抗压强度见图 2 (b)。随着水胶比增大,所有试件的抗压强度均减小,在水胶比为 0.32 和 0.35 时,下降幅度最大。当水胶比达到或超过 0.38 时,强度下降的趋势趋于平缓。这是因为水胶比的提高会增加净浆的流动性,降低净浆的稠度,并延长凝结时间,不利于强度的增长。此外,碱-矿渣基材料的反应过程包括溶解、定向迁移和缩聚,最终形成非晶态的硅铝凝胶^[10,18]。由表 4 可知,过多的水分会降低体系的碱度,从而导致矿渣无法完全溶解,其松散的结构会对强度的发展产生不利影响。对比 B 组、C 组可知,控制其他因素不变,水胶比为 0.3,添加 4 g 减水剂时,强度提升效果最好。

D 组试件抗压强度见图 3 (a)。随着矿渣含量的减少和硅灰含量增加,试件抗压强度总体呈先增后减的趋势,3 d、7 d 及 28 d 的试件皆在硅灰含量为 8% 时强度达到最大,说明材料的强度发展趋势十分稳定。相比于矿渣,硅灰具有更低的活性和更窄的粒径分布,适量的硅灰在材料内部起到孔隙填充作用,过量则导致钙硅比下降(矿渣含量降低,硅灰主要化学成分为 Al 和 Si),水化反应不能生成足够的 C-S-H 凝胶以支撑试件结构,强度表现下降。矿渣与硅灰的质量比为 4 : 1 时,强度提升效果最佳。

E 组试件抗压强度见图 3 (b)。当碱渣与电石渣质量比分别为 4 : 1 和 3 : 7 时,28 d 试件强度出现 2 个峰值: 38.24 MPa 与 36.40 MPa。第一个峰值过后进一步提高电石渣的含量,试件强度先降低再升高。这是由于碱渣与电石渣在水化过程中只有一方作为主要驱动力,另一方起到辅助作用,相比于电石渣,碱渣具有更高的活性,所以强度最大值首先出现在碱渣占比更多的情况下。在总比例不变的情况下,随着电石渣比例的增多,碱渣含量降低,体系的活性开始下降,强度降低;当碱渣的比例降低至碱渣的活性不足以作为水化过程中的主要驱动力时,电石渣开始起到主导作用,此时强度再次回升,E22 组出现第二个峰值。可见碱渣电石渣间存在协同激发作用。

抗压强度测试得到的最佳方案如下:在温度为 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为95%的养护环境中,控制水胶比为0.3,减水剂添加量为4 g,碱渣、电石

渣、矿渣、硅灰的质量比为8:2:14:1,此时试件28 d抗压强度达到最大值38.24 MPa。

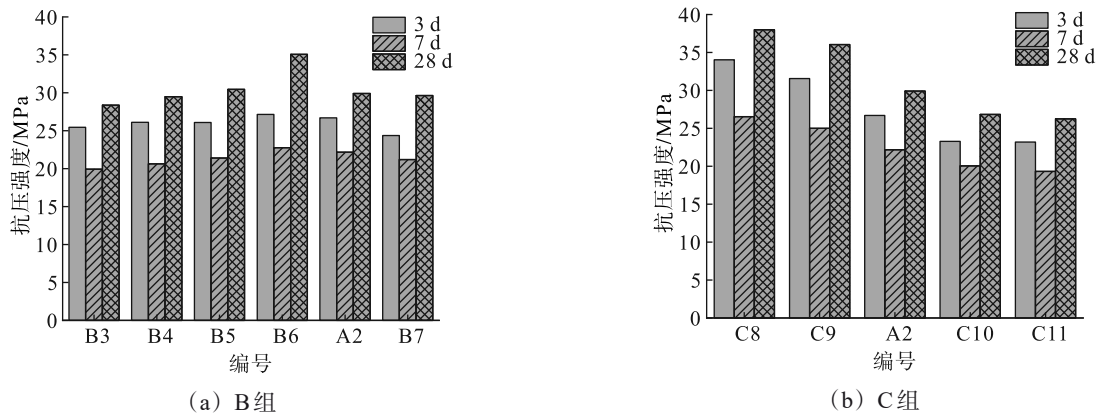


图2 B组、C组抗压强度

Fig.2 group B, group C compressive strength

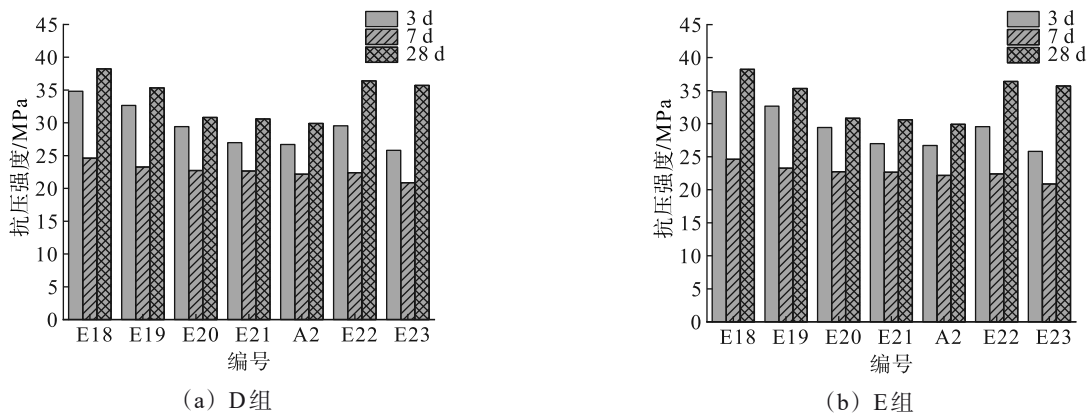


图3 D、E组抗压强度

Fig.3 group D, group E compressive strength

3.2 微观机制

(1) SEM分析

对28 d龄期E18组和E23组试件水化产物粉体进行电镜扫描试验,观察固废胶凝材料水化产物形态,结果见图4、图5。由图4可以看出,E18组材料水化28 d时,水化产物形成了排布紧密的网状、絮状结构。由于碱渣、电石渣中含有大量的CaO,在掺入之后,水化反应早期,体系的pH值和 Ca^{2+} 浓度迅速提升,在碱性环境的激发作用下,矿渣中硅(铝)氧四面体发生解离,溶出部分可溶硅(铝),与体系中的 Ca^{2+} 形成水化硅铝酸钙(C-(A)-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等水化产物。硅灰的化学成分与矿渣相近,且硅灰中含有更多的Al,会生成更多的水化铝酸钙(C-A-H),但C-A-H属于水化过程中的中间产物,在后期一般会转化为更稳定的AFt^[19]。随着水化产物的逐渐形成,矿渣表面与溶

液之间偏铝酸根溶解平衡被不断打破,促进铝氧四面体从矿渣玻璃体表面迁移出来,破坏了硅氧四面体与铝连接,使矿渣玻璃体表面的硅(铝)氧四面体聚合度快速下降,剩余的硅(铝)氧四面体的活性再次被激发。同时,发生解离的矿渣等材料溶出低聚硅酸根离子和铝酸根离子,可吸收一定量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,再次生成C-S-H凝胶等水化产物^[20]。主要水化产物氢氧化钙(C-H)晶体,与水化硅铝酸钙(C-(A)-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)和水化硅酸钙(C-S-H)等网状、蜂巢状凝胶形成的凝胶-晶体网络结构,填充于各种颗粒之间,联结材料各部分,使结构更加牢固,强度得以稳定提升。

相较于图4、图5中可以观察到部分絮状结构(C-S-H)、方块状结构(C-H)及分布散乱的针棒状结构(AFt)。图5(a)中,在1 μm 倍数下,左下角有明显球形。硅灰小球的出现说明过量的硅

灰未全部参与溶解,仍有部分硅灰仅在结构中起填充作用。钙矾石(AFt)数量的增多会在水化后期产生体积膨胀,破坏试件原有结构。大量片状氢氧化钙

晶体(C-H)的存在也反映出材料二次水化反应不彻底,未能生成更多的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶。宏观表现为E23组28 d试件的抗压强度低于E18组。

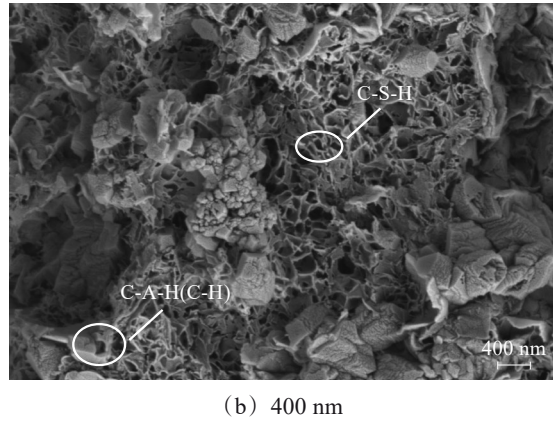
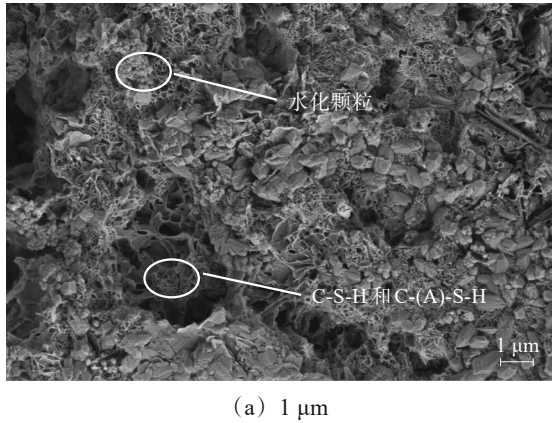


图4 E18组微观形貌

Fig.4 microscopic morphology of E18 group

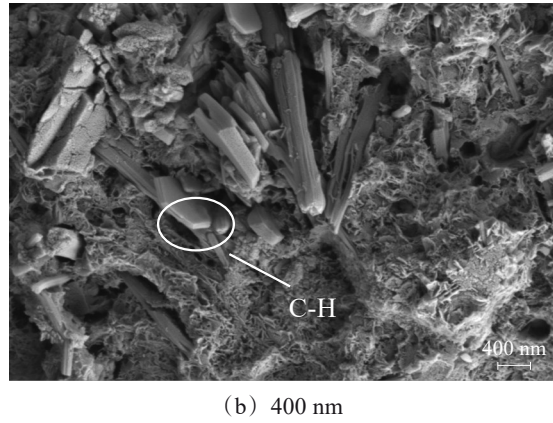
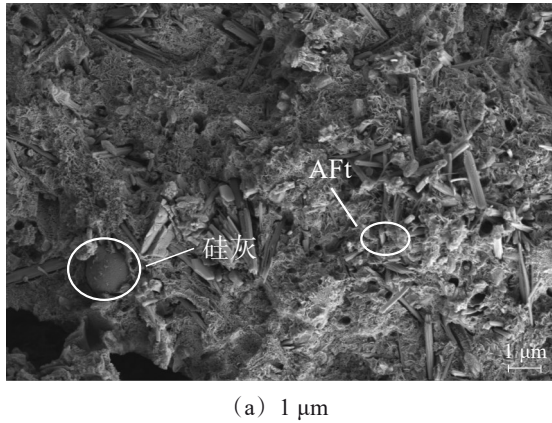


图5 E23组微观形貌图

Fig.5 microscopic morphology of E23 group

(2) XRD 分析

为明确样品中产生的矿物种类,探究材料配比对水化产物生成的影响,对B6、C8、D13、E18、E23组试件进行XRD分析,结果见图6。

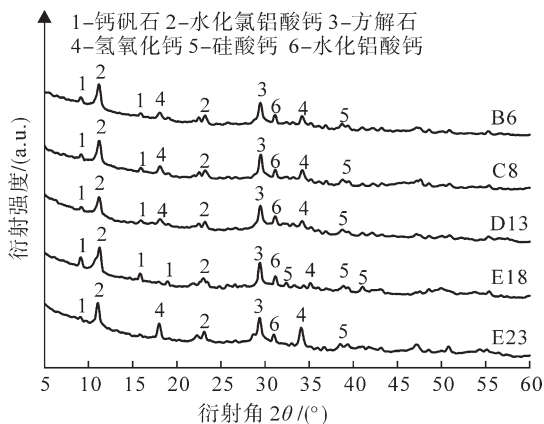


图6 XRD图谱

Fig.6 XRD graph

衍射角为 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时,试件的XRD图谱均出现明显宽峰形态。在XRD图谱中,无定型或半无定型的水化产物不能显示出明显的衍射峰,只会出现宽(驼)峰以表示生成了胶凝材料。因此由图6可知,5组样品均产生的凝胶且产生矿物种类基本没有变化,钙矾石、硅酸钙、方解石、铝酸钙等衍射峰的出现验证了SEM结果中对产物的判断。对比E18组与E23组的谱线,E18组钙矾石的波峰更高,衍射峰的“凸包”现象也更加明显,说明E18组的掺量更能促进水化产物钙矾石和C-S-H凝胶的生成。E23组在衍射角为 18° 时出现了新的氢氧化钙衍射峰,结合图8中观察到的C-H晶体,证明E23组确实存在大量未充分反应的氢氧化钙,导致C-S-H等凝胶生成量不高,E23组试件的抗压强度也低于E18组。

(3) FTIR 分析

为进一步探究全固废材料水化过程中的凝胶

生成情况,同时验证XRD试验结果,对XRD分析中的5组试件进行FTIR分析,结果见图7。

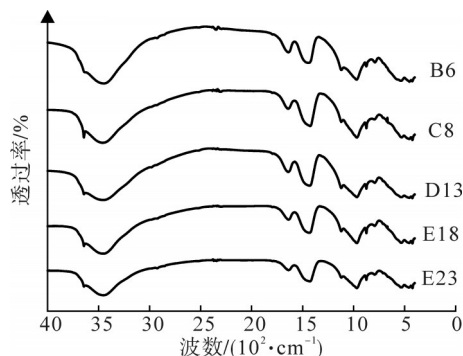


图7 FTIR谱图

Fig.7 FTIR spectra

由图7可知,5组试件主要有4个较大的特征吸收峰,且有相似的吸收谱带,但形状及透过率略有不同,说明不同组的水化产物种类未发生明显变化。在 950 cm^{-1} 附近出现了特征峰,一般认为存在C-(A)-S-H凝胶^[2-3]。在 $3\,442\sim 3\,462\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,642\sim 1\,654\text{ cm}^{-1}$ 内的特征吸收谱带,通常认为与羟基官能团(H-O键)的拉伸和弯曲振动有关,可理解为自由水结合水内部具有内振动吸收特征,两处特征峰可用来反映水化过程中的自由水和化学结合水的含量,而化学结合水主要存在于水化产物如C-S-H、C-(A)-S-H凝胶中。E18组特征吸收峰比E23组高,说明试件中有更多的化学结合水,即有更多的水化产物,与XRD分析与SEM下的结果相符,宏观表现为E23组样品抗压强度低于E18组。在 $1\,450\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征吸收峰代表了 CO_3^{2-} 中C-O键的不对称拉伸振动,而 $798\sim 875\text{ cm}^{-1}$ 内出现的小峰则可归因于碳酸根离子中C-O键的弯曲振动^[2,21]。C-O键的拉伸和弯曲振动说明了水化产物中存在碳酸盐,对应XRD图谱中的方解石衍射峰,说明在试件制备过程中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及碱金属氢氧化物存在不可避免的碳化。吸收带在 $967\sim 968\text{ cm}^{-1}$ 内的波动与Si-O-Si(Si-O-Al)不对称拉伸振动有关,也反映水化产物C-S-H等凝胶的生成。对比E23组和E18组,随着龄期的变化,E18组Si-O-Si(Si-O-Al)对应的特征峰更窄,并向低波数偏移,这表明碱金属阳离子(M)在反应过程中促进了Si-O-Si键的断裂,并形成了Si-O-M键或Si与非桥氧(NBO)的连接结构,同时 Ca^{2+} 的存在使凝胶的结构及成分发生变化,形成C-S-H和C-(A)-S-H凝胶共存的状态^[22],与图4对E18组水化产物的判断一致。此外,波数的降低还表明在水化过程有更多的Al参与反应,更多位于C-S-H四面体点位的Si

被Al代替,导致Si-O键减少,Al-O键增多,生产更多的C-(A)-S-H。

4 结论

本文研究碱固废协同激发情况下,材料配比、养护环境、水胶比等因素对全固废胶凝材料力学性能、水化产物的影响,得出以下结论。

(1) 适量的硅灰对材料的强度增长具有积极作用。高碱度环境下硅灰可以填补材料的空隙,并和矿渣一起参与溶解、定向迁移与缩聚,形成不定型硅铝凝胶,补充更多的硅铝相成分,发挥多重作用,硅灰的最佳掺量为2%。

(2) 在最优配比试件的水化产物中,C-S-H凝胶和C-(A)-S-H等凝胶(孔隙填充和颗粒胶结)紧密排列、交织并相互黏附,与C-H形成凝胶-晶体网络结构。网状凝胶充斥在各种颗粒之间,联结材料各个部分,使结构更加牢固,强度得以稳定提升。

(3) 碱渣与电石渣在协同作用下,能够有效激发四元全固废胶凝材料的活性,并促进其溶解性。在强度达到最优时,碱渣作为主要的活性激发剂,碱渣、电石渣的最优质量比为4:1。

参考文献(References):

- [1] SHANG Y Z, CUI Z L, ZHANG Y N. Experimental study on the synergistic solidification of soft soil with ceramic powder-slag-phosphorus slag[J]. Sustainability, 2023, 15(21): 15474.
- [2] ZHANG X K, WANG W L, ZHANG Y N, et al. Research on hydration characteristics of OSR-GGBFS-FA alkali-activated materials[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134321.
- [3] SONG W L, ZHU Z D, PU S Y, et al. Efficient use of steel slag in alkali-activated fly ash-steel slag-ground granulated blast furnace slag ternary blends[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119814.
- [4] HUSEIEN G F, TAHIR M M, MIRZA J, et al. Effects of POFA replaced with FA on durability properties of GBFS included alkali activated mortars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 174-186.
- [5] FOŘT J, VEJMEĽKOVÁ E, KOŇÁKOVÁ D, et al. Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: functional and environmental aspects[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 714-725.
- [6] DING Y, DAI J G, SHI C J. Mechanical properties of alkali-activated concrete: a state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 68-79.
- [7] 张延年,王众新,李志军,等.复合掺合料对混凝土的改性试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(6):1100-1107.
ZHANG Yannian, WANG Zhongxin, LI Zhijun, et al. Experiment

- on modification of concrete with compound admixture[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2023, 39(6): 1100-1107.
- [8] 张延年, 刘柏男, 顾晓薇, 等. 铁尾矿多元掺合料机械活化机理[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(1): 95-101.
- ZHANG Yannian, LIU Bonan, GU Xiaowei, et al. Mechanical activation mechanism of multi-component iron tailings admixture[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44(1): 95-101.
- [9] 崔孝炜, 倪文, 狄燕清. 钢渣矿渣基固废胶凝材料的化学活化[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 1411-1417.
- CUI Xiaowei, NI Wen, DI Yanqing. Chemical activation of cementitious materials with all solid waste based of steel slag and blast furnace slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4): 1411-1417.
- [10] 邓永锋, 赵余, 刘倩雯, 等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 11-20.
- DENG Yongfeng, ZHAO Yu, LIU Qianwen, et al. Na_2SiO_4 - and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 11-20.
- [11] 何俊, 吕晓龙, 朱元军. 养护温度对碱渣-矿渣-电石渣固化淤泥强度性质的影响机制[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 58-65.
- HE Jun, LYU Xiaolong, ZHU Yuanjun. Influencing mechanism of curing temperature on strength properties of silt solidified with soda residue, ground granulated blast furnace slag and carbide slag[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 58-65.
- [12] 许雪艳, 贾英杰. 利用电石渣替代水泥开发固废胶凝材料[J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(1): 123-128, 136.
- XU Xueyan, JIA Yingjie. Development of cementing material with carbide slag instead of cement[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2024, 42(1): 123-128, 136.
- [13] 张恩华. 工业固废复合胶凝材料制备及其在道路工程中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2022: 41-46.
- [14] 余海燕, 郝之瀚, 胡林童. 碱渣-氯氧镁水泥的耐水改性[J]. 天津城建大学学报, 2022, 28(6): 403-407.
- YU Haiyan, HAO Zhihan, HU Lintong. Water resistance modification of alkali slag-magnesium oxychloride cement[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2022, 28(6): 403-407.
- [15] CHU C F, ZHAN M H, FENG Q, et al. Expansive soil modified by iron tailing sand and calcium carbide slag as subgrade material[J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 25(9): 10393-10410.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 5-8.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 7-10.
- [18] ZONG Y L, GONG J T, ZHANG J L, et al. Research status of soda residue in the field of environmental pollution control[J]. RSC Advances, 2023, 13(41): 28975-28983.
- [19] 隋莉莉, 黄健胜, 李伟文, 等. 水化硫铝酸钙和水化铝酸钙对内掺、外掺氯离子的固结机理及能力[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1311-1322.
- SUI Lili, HUANG Jiansheng, LI Weiwen, et al. Binding mechanism and capacity for AFm and C_3AH_6 on premixed and ingress chlorides[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(5): 1311-1322.
- [20] XU X Y, LIN X J, PAN X X, et al. Influence of silica fume on the setting time and mechanical properties of a new magnesium phosphate cement[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117544.
- [21] XIA M, MUHAMMAD F, ZENG L H, et al. Solidification/stabilization of lead-zinc smelting slag in composite based geopolymer[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 1206-1215.
- [22] NADEEM M, UL HAQ E, AHMED F, et al. Effect of microwave curing on the construction properties of natural soil based geopolymer foam[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 117074.