

煤气化灰渣在水泥与熟石灰中的应用

贺俊玺¹, 肖睿², 聂庆科³, 黄宝山^{1,2}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 田纳西大学 土木与环境工程系, 诺克斯维尔 37996;

3. 河北建设勘察研究院有限公司, 石家庄 050227)

摘要: 对煤气化灰渣(CGFA)在普通硅酸盐水泥(OPC)和熟石灰中的潜在用途及再利用价值进行探讨, 包括与聚羧酸高效减水剂的相容性、熟石灰-CGFA 体系和 OPC-CGFA 体系的力学性能。基于 X 射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和扫描电镜(SEM)研究了 2 种体系的反应机理和反应产物。结果表明, CGFA 的反应性可以通过研磨显著提高, 而具有低火山灰反应性的未研磨 CGFA 可以部分替代混凝土中的天然河砂。熟石灰和 OPC 可以提供碱性环境以促进地质聚合反应的发生。2 种体系试样的 28 d 最大抗压强度分别达到 14.43 MPa(CGFA 质量分数 60.0%) 和 35.79 MPa(CGFA 质量分数 35.7%)。混合物特征峰的强度随着质量分数的增加而降低, 表明 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CGFA 提供的 SiO_2 发生反应, 形成 C—S—H。

关键词: 煤气化灰渣(CGFA); 普通硅酸盐水泥(OPC); 熟石灰; 替换作用

中图分类号: TU521.4

文献标志码: A

studied by using XRD, FTIR and SEM. It is found that the reactivity of CGFA in cementitious materials can be considerably enhanced by grinding while the as-received CGFA with low pozzolanic reactivity could be used as sand in concrete. The hydrated lime and OPC provide the alkaline environment to facilitate the dissolution of CGFA. The maximum 28 d compressive strength up to 14.43 MPa (60.0% CGFA) and 35.79 MPa (35.7% CGFA) can be obtained in hydrated lime-CGFA and OPC-CGFA systems, respectively. The intensity of Portlandite peaks decreases with the increase of CGFA mass fraction, indicating that $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacts with SiO_2 provided by CGFA to form C—S—H.

Keywords: coal gasification fly ash (CGFA); ordinary Portland cement (OPC); hydrated lime; substitution effect

Application of Coal Gasification Fly Ash in Ordinary Portland Cement and Hydrated Lime

HE Junxi¹, XIAO Rui², NIE Qingke³, HUANG Baoshan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Tennessee, Knoxville 37996, USA; 3. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China)

Abstract: In this study, the potential application of coal gasification fly ash (CGFA) in ordinary Portland cement (OPC) and hydrated lime is investigated including the compatibility of CGFA and WH-A polycarboxylate superplasticizer and the mechanical property of hydrated lime-CGFA and OPC-CGFA systems. Reaction mechanisms and reaction products of the two systems are

如今水泥基材料成为了使用最为广泛的建筑胶凝材料之一。然而, 在制备普通硅酸盐水泥(OPC)过程中会产生大量 CO_2 等温室气体, 严重污染了环境。此外, 生产 OPC 也会消耗大量能源。因此, 研究人员对 OPC 替代品进行了深入研究, 其中地质聚合物被认为是能够替代 OPC 的材料之一。Zhang 等^[1]指出, 基于地质聚合物建设的道路基层比 OPC 稳定碎石基层可有效减少 17.9% 的碳排放。McLellan 等^[2]采用澳大利亚当地的地质聚合混凝土, 可明显减少 44%~46% 的碳排放。Singh 等^[3]认为, 地质聚合物完全有能力替代一部分 OPC。Rios 等^[4]成功将低钙粉煤灰与硅酸钠和氢氧化钠配合, 用于道路土基的稳定与加固。Arulrajah 等^[5]将建筑垃圾碎砖、废旧混凝土骨料与地质聚合物混合, 混合物强度满足轻型交通路面基层的最低无侧限抗压强度。由此可见, 地质聚合物具有在道路工程中的应

收稿日期: 2023-02-25

第一作者: 贺俊玺, 博士生, 主要研究方向为道路工程。E-mail: hejunxi66@tongji.edu.cn

通信作者: 黄宝山, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: bhuang@utk.edu



论文
拓展
介绍

用前景。

煤气化灰渣(CGFA)是煤炭燃烧后产生的副产品,目前缺乏 CGFA 再利用的相关研究。Aineto 等^[6]将 CGFA 用作制陶黏土的外加剂。Xiao 等^[7]认为,配合碱使用的 CGFA 具有更好的机械性能与耐久性。He 等^[8]对 CGFA-OPC 体系进行了热力学模拟分析,CGFA 活性成分仅有 20% 左右,在体系中可充当填料。Font 等^[9]对 CGFA 里的稼元素进行再提取,稼元素的提取率可达 60%~86%。Zhang 等^[10]利用 CGFA 制备了一种树脂型除臭剂,除臭效果是常用沸石除臭剂的 3 倍,还可减少聚丙烯树脂中 50% 的有机挥发物质。Miao 等^[11]利用 CGFA 的吸附性,通过活化技术制备类活性炭物质,常温下 CO₂ 吸收可达 2.53 mmol·g⁻¹,在 2 min 内迅速恒定。鲍超等^[12]、顾彧彦等^[13]采用 CGFA 净化水中的 Pb²⁺、Cu²⁺、Cd²⁺ 等金属离子,吸附效果良好。王守飞^[14]将 CGFA 与发泡剂结合制备了泡沫陶瓷材料,具有较好的保温性、抗压强度以及热稳定性。CGFA 化学组成类似粉煤灰,故 CGFA 具备地质聚合物的相应反应条件。

基于 OPC 与熟石灰 2 种材料,对 CGFA 进行再利用研究。以抗折与抗压强度为指标,探究 CGFA 地质聚合反应的有效性以及在 OPC、熟石灰以及天然河砂中的替代率。

1 材料与方法

1.1 材料

采用中国河北沧州正元化工有限公司生产的 CGFA。由于 CGFA 的粒度太大,无法直接使用,因此将其放入球磨机中研磨,直至粒度无变化为止。CGFA 的扫描电镜(SEM)图像如图 1 所示。CGFA 的物理和化学特性以及研磨前后粒度变化如表 1、2 所示。CGFA 化学成分由 X 射线荧光光谱(XRF)分析确定,结果如表 3 所示。表 3 中, w 表示质量分数。采用江西分宜县英歌矿业有限公司生产的熟石灰、山东诸城市九七建材有限公司生产的 42.5 级 OPC 与天然河砂(物理性质见表 4)以及山东东营区宏福建筑添加剂有限公司生产的聚羧酸高效减水剂(WHPS)。采用上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产的质量分数为 97% 的氢氧化钠片,NaOH 溶液由氢氧化钠片溶解在水中配制而成。

1.2 设备和特性

采用 SM500×500 水泥球磨机(电动机功率为

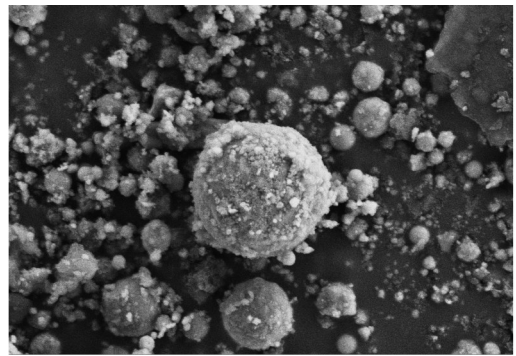


图1 CGFA的SEM图像
Fig.1 SEM image of CGFA

表1 CGFA的物理和化学特性

Tab.1 Physical and chemical characteristics of CGFA

颗粒密度/(g·cm ⁻³)	堆积密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%		烧失量/%	Cl ⁻ 含量/(g·kg ⁻¹)
		夏季	冬季		
2.542	1.041	20.2	25.1	1.53	0.579 1

表2 CGFA研磨前后粒度

Tab.2 Particle size of ground and unground CGFA

项目	粒度分布/%			中值直径/μm		
	≤20 μm	20~<100 μm	≥100 μm	D10	D50	D90
研磨前	25.21	23.96	50.83	3.7	104.6	392.1
研磨后	77.77	19.08	3.15	1.0	6.8	43.0

表3 CGFA的XRF分析结果

Tab.3 XRF analysis results of CGFA

w_{SiO_2}	w_{CaO}	$w_{Al_2O_3}$	$w_{Fe_2O_3}$	w_{MgO}	w_{Na_2O}	$w_{其他}$
45.65	21.24	17.52	7.46	2.36	1.63	4.14

表4 天然河砂物理性质

Tab.4 Physical properties of river sand

颗粒密度/(g·cm ⁻³)	堆积密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	D10/μm	D50/μm	D90/μm
2.568	1.307	3.25	11.76	234.71	569.72

1.5 kW,转速为 48 r·min⁻¹)对 CGFA 进行活化。JJ-5 型水泥砂浆自动搅拌机用于搅拌和制备 OPC 净浆、OPC 砂浆和二灰样品。采用 WDW-Y300D 型全自动抗压弯曲试验机(最大试验力 300 kN)对试样进行力学性能测试。采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪对 CGFA 在研磨前后的粒度分布进行测试。采用 Advance X 射线衍射仪(XRD)表征试样的微观结构。采用 Nicolet iS10 傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)表征试样的分子结构和化学键。采用 ZEISS Gemini SEM300 SEM 表征试样形貌。试样的制备方法和机械性能测试参考《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)。

1.3 试验设计

熟石灰与研磨前后的 CGFA 以不同比例混合,如表 5 所示,即熟石灰-CGFA 体系。以水溶液和不同浓度的碱溶液(3、6、9 mol·L⁻¹)为基础进行火山灰反应,探讨 CGFA 的活性。CGFA 具有较大的吸水率,采用水灰比 0.7,混合后将浆体浇注到尺寸为 160 mm×40 mm×40 mm 的模具中。24 h 后,将试样从模具中取出,并放入室温为(20±1) °C、相对湿度为(95±5)%的养护箱中养护。当达到规定的养护时间(7 d 和 28 d)时,根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)进行抗折强度和抗压强度试验。

表 5 熟石灰-CGFA 体系				
Tab.5 Hydrated lime-CGFA system				
试样编号	熟石灰-CGFA 体系		CGFA 研 磨状态	碱溶液浓 度/(mol· L ⁻¹)
	熟石灰质量 分数/%	CGFA 质量 分数/%		
SA-1N-0	75	25	×	0
SA-1-0			✓	0
SA-1-3			✓	3
SA-1-6			✓	6
SA-1-9			✓	9
SA-2N-0	60	40	×	0
SA-2-0			✓	0
SA-2-3			✓	3
SA-2-6			✓	6
SA-2-9			✓	9
SA-3N-0	50	50	×	0
SA-3-0			✓	0
SA-3-3			✓	3
SA-3-6			✓	6
SA-3-9			✓	9
SA-4N-0	40	60	×	0
SA-4-0			✓	0
SA-4-3			✓	3
SA-4-6			✓	6
SA-4-9			✓	9
SA-5N-0	25	75	×	0
SA-5-0			✓	0
SA-5-3			✓	3
SA-5-6			✓	6
SA-5-9			✓	9

注:×表示 CGFA 未研磨;✓表示 CGFA 已研磨。

研磨的 CGFA 和 OPC 在 0.5 的水灰比下以不同比例混合,如表 6 所示,即 OPC-CGFA 体系。对试样进行力学试验,以判断 CGFA 对 OPC 的有效替代率。制备参数、养护条件和试验方法与熟石灰-CGFA 体系相同。

将天然河砂、OPC 和 CGFA 按不同比例混合,形成砂浆,如表 7 所示。胶凝材料 OPC 与天然河砂的质量比为 1:3。

表 6 OPC-CGFA 体系(研磨)		
Tab.6 Hydrated lime-CGFA system(ground)		
试样编号	OPC-CGFA 体系	
	OPC 质量分数/%	CGFA 质量分数/%
CW-0	100.0	0
CW-1	72.9	27.1
CW-2	64.3	35.7
CW-3	54.5	45.5
CW-4	47.4	52.6
CW-5	44.4	55.6

表 7 天然河砂-CGFA 体系(未研磨)			
Tab.7 River sand-CGFA system(unground)			
试样编号	河砂质量分 数/%	CGFA 质量 分数/%	减水剂质量 分数/%
CJ/CA/CB-0-0	100	0	0
CJ/CA/CB-1-0	85	15	0
CJ/CA/CB-2-0	70	30	0
CJ/CA/CB-3-0	55	45	0
CJ/CA/CB-4-0	40	60	0
CJ/CA/CB-5-0	25	75	0
CJ/CA/CB-0-1.1	100	0	1.1
CJ/CA/CB-1-1.1	85	15	1.1
CJ/CA/CB-2-1.1	70	30	1.1
CJ/CA/CB-3-1.1	55	45	1.1
CJ/CA/CB-4-1.1	40	60	1.1
CJ/CA/CB-5-1.1	25	75	1.1
CJ/CA/CB-0-3.5	100	0	3.5
CJ/CA/CB-1-3.5	85	15	3.5
CJ/CA/CB-2-3.5	70	30	3.5
CJ/CA/CB-3-3.5	55	45	3.5
CJ/CA/CB-4-3.5	40	60	3.5
CJ/CA/CB-5-3.5	25	75	3.5

注:CJ/CA/CB-X-0 表示 CJ-X-0、CA-X-0、CB-X-0;CJ 表示净浆为 OPC;CA、CB 表示净浆为 OPC 与研磨 CGFA 混合物,质量分数分别参考 CW-1、CW-2。

2 结果与讨论

2.1 熟石灰-CGFA 体系

熟石灰-CGFA 试样在水和不同浓度碱溶液中反应,标准养护条件下养护后测量试样在 7、28 d 时的力学性能,如图 2 所示。

熟石灰和水或碱溶液混合难以成型,其强度可以忽略不计。因此,熟石灰仅提供 CGFA 进行地质聚合反应的条件,试样强度可以直接反映 CGFA 的反应程度。由图 2 可知,SA-1N-0 的力学强度低于 SA-1-0(其他试验组具有相似结果),说明研磨是一种有效的活化手段,能促进 CGFA 发生地质聚合反应。将碱溶液作为激发溶液时,随着研磨 CGFA 质量分数的增加,试样强度先增加后减小,说明水作为激发溶液产生的碱浓度不能完全满足 CGFA 发生地质聚合反应。因此,当对该体系添加额外的碱时,力

学强度可以显著提高。随着碱浓度的持续增加,试样的力学性能逐渐降低,这表明过量的碱会对该体系的强度和地质聚合产物产生负面影响。

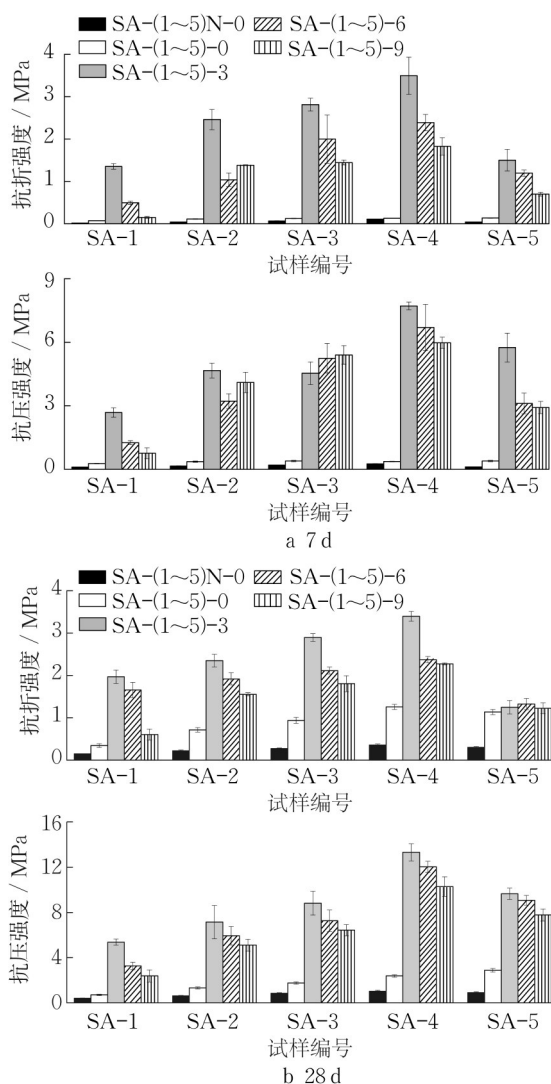


图2 熟石灰-CGFA体系的力学性能

Fig.2 Mechanical property of hydrated lime-CGFA system

由图2可见,SA-4-3具有较高的力学性能,28 d抗折强度与抗压强度分别为3.50、14.43 MPa。因此,该体系最佳配比为熟石灰质量分数40%、CGFA质量分数60%。

2.2 OPC-CGFA体系

OPC-CGFA试样与水反应。标准养护条件下养护后测量试样在7、28 d时的力学特性,如图3所示。

由图3可知,随着CGFA质量分数的增加,试样力学性能逐渐变差。养护后CW-1与CW-2力学强度均大于CW-0的90%,表明OPC与水的水化反应为CGFA提供了发生地质聚合反应的条件,因此强

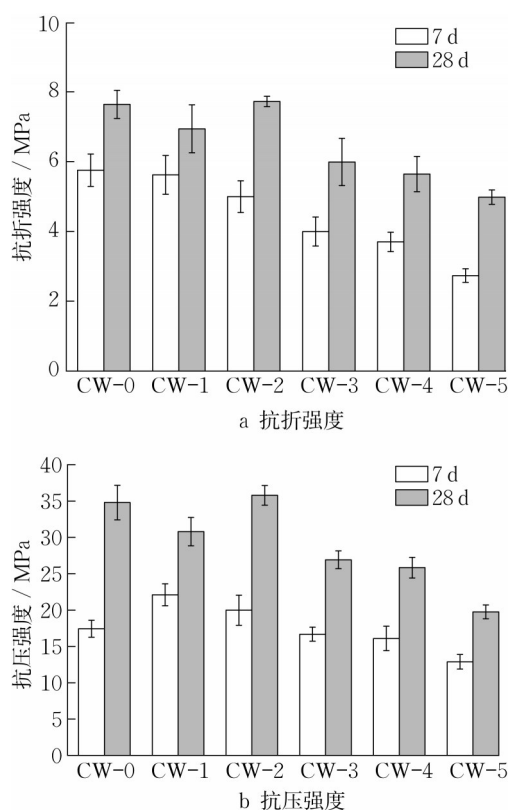


图3 OPC-CGFA体系的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of OPC-CGFA system

度没有显著降低。CW-3、CW-4、CW-5强度迅速降低,说明研磨CGFA活性不足以与OPC匹配,但地质聚合反应产物可替代部分水化产物。CGFA由活性部分和惰性部分组成,活性部分参与地质聚合反应,惰性部分不参与任何反应。

由图3可见,CW-1与CW-2的力学性能可满足CGFA替代部分OPC的使用要求。因此,将CW-1与CW-2作为胶凝材料,进行后续CGFA替代天然河砂的研究。

2.3 天然河砂-CGFA体系

CGFA具有较强的吸水性,在拌和过程中需要较多的水,考虑使用减水剂以减小水灰比。因此,有必要探究减水剂与该体系或CGFA的相容性,结果如图4、5所示。

由图4可知,体系的流动性随减水剂质量分数的增加而增加。当减水剂质量分数达到饱和时,减水剂体系的流动性几乎没有影响。体系中的CGFA质量分数越高,减水剂的饱和质量分数越大,表明CGFA对减水剂质量分数的影响远大于OPC。

由图5可知,随着水灰比的增加,减水剂的饱和质量分数逐渐降低。当水灰比达到一定阈值时,减水剂饱和质量分数不再减少,即可获得减水剂的最

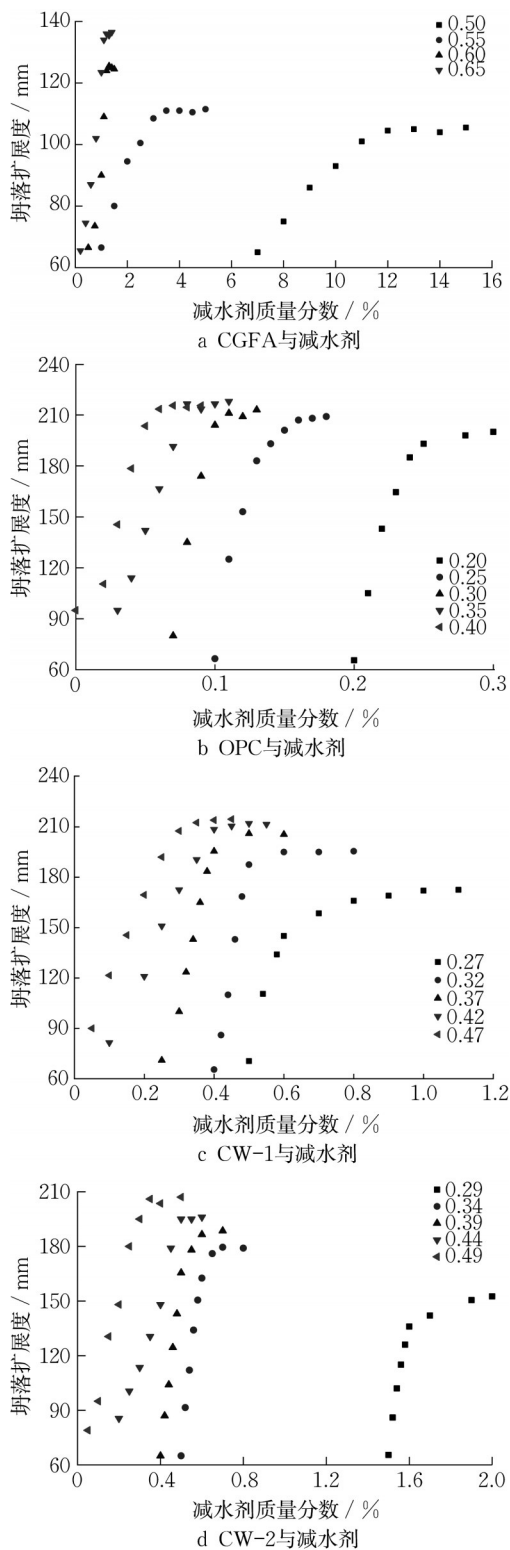


图4 减水剂与CGFA、OPC以及OPC-CGFA体系在不同水灰比下的相容性试验结果

Fig.4 Compatibility test results of CGFA, OPC, OPC-CGFA mixed with water reducer under different water-cement ratios

小饱和和质量分数。聚羧酸减水剂掺量过高时,会对胶凝材料的水化作用产生负面影响^[15]。减水剂的流

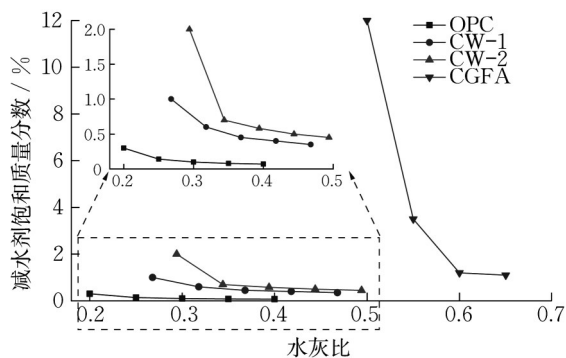


图5 减水剂饱和和质量分数与水灰比的关系

Fig.5 Relationship between saturated mass fraction of water reducer and water-cement ratio

线型结构分子吸附在OPC颗粒表面,使OPC颗粒不能与水完全反应,从而延迟初始固化时间,改善流动性^[16]。如果延迟时间过高,产生碱环境的浓度和时间会更长,就会对CGFA的地质聚合反应产生负面影响。因此,上述讨论减水剂的最小饱和和质量分数是有必要的。

综上,在天然河砂-CGFA体系中,减水剂质量分数设计为0%(不添加)、1.1%(适量)、3.5%(过量),水灰比设计为0.70、0.55、0.48,标准养护条件下养护后测试试样力学性能,如图6所示。

由图6可知,随着CGFA的质量分数逐渐增加,试样的力学强度逐渐减小。在CJ体系中,CJ-1-0强度略高于CJ-0-0。部分CGFA发生的地质聚合反应导致了额外的强度,这是天然河砂不具有的性质。此外,CJ-2-0强度也不低于CJ-0-0强度的90%。在CA与CB体系中,CA-1-0强度仍然超过CA-0-0强度的90%,而CB-1-0强度低于CB-0-0的90%。随着替代天然河砂质量分数超过15%,CB-2-0、CB-3-0、CB-4-0、CB-5-0强度急剧下降,下降幅度显著高于CJ体系,这是由体系中CGFA质量分数不断累积导致的。减水剂的添加可以改善CGFA质量分数增加的负面影响。然而,CA-1-1.1强度大于CA-1-3.5,其他试验组具有相似结果,说明过量的减水剂会产生更严重的负面效果,导致试样强度降低。

总之,以不低于CJ-0-0强度的90%为标准,CGFA可分别替代CJ、CA、CB体系中30%、30%、15%的天然河砂。

2.4 XRD分析

熟石灰-CGFA体系、OPC-CGFA体系反应产物的XRD测试结果如图7所示。

由图7可知,在熟石灰-CGFA体系中,将SA-4-0分别与SA-4-3、SA-4-6、SA-4-9对比,没有明

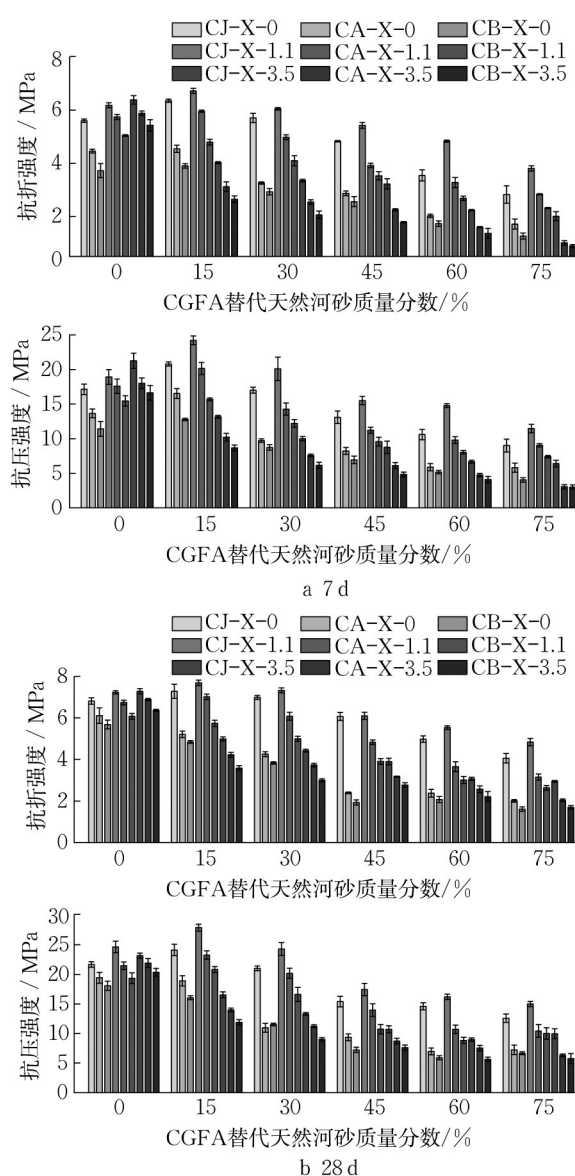
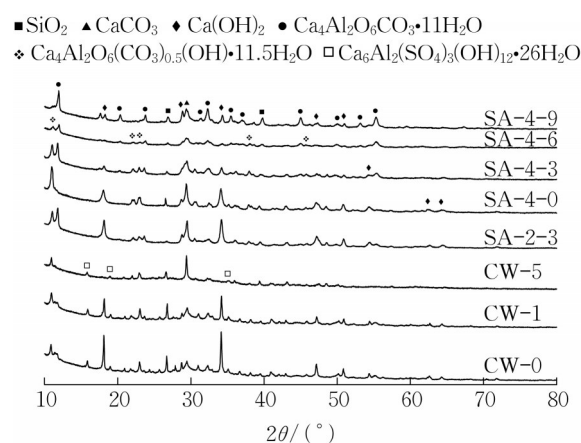


图 6 天然河砂-CGFA体系力学性能

Fig.6 Mechanical property of river sand-CGFA system

显的 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ 衍射峰,表明熟石灰和水反应不能完全满足 CGFA 进行地质聚合反应的需求。此外,在 SA-4-0、SA-4-3 和 SA-4-6 中均具有 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH}) \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ 的衍射峰,但在 SA-4-9 中不明显。这表明过高的碱浓度反而会损伤地质聚合反应产物。在 SA-2-3 中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰的半峰全宽显著小于 SA-4-3,这意味着 CGFA 质量分数越高 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶相越差。

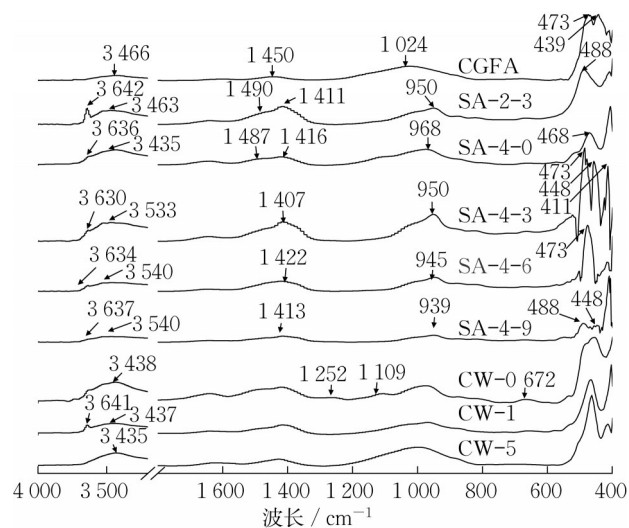
在 OPC-CGFA 体系中, CW-0 和 CW-1 明显含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰,但 CW-5 中没有该衍射峰。据此认为,当 CGFA 质量分数较高时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 已在该体系中与 CGFA 完全反应,从而在 CW-5 中未显示其特征峰。这进一步验证了 OPC 的水化反应可以

图 7 熟石灰-CGFA体系、OPC-CGFA体系 XRD 测试结果
Fig.7 XRD test results of hydrated lime-CGFA system and OPC-CGFA system

提供碱环境,使 CGFA 发生地质聚合反应。

2.5 FTIR 分析

熟石灰-CGFA 体系、OPC-CGFA 体系反应产物的 FTIR 测试结果如图 8 所示。

图 8 熟石灰-CGFA体系、OPC-CGFA体系 FTIR 测试结果
Fig.8 FTIR test results of hydrated lime-CGFA system and OPC-CGFA system

由图 8 可知,在熟石灰-CGFA 体系中,熟石灰可以在 3462 cm^{-1} 处引入更多的一 OH 基团 ($\text{Ca}-\text{OH}$)。对比 SA-2-3、SA-4-3,随着 CGFA 质量分数的增加, Si-OH 的 O-H 拉伸振动逐渐减小,表明无机元素与 Si-O 键的结合更为明显,这解释了试样强度增加的原因。对比 SA-4-3、SA-4-6、SA-4-9,随着溶液碱浓度的增加, $-\text{CH}_3$ 在 1400 cm^{-1} 处和 Si-O 在 1000 cm^{-1} 处的特征峰强度降低,这意味着产物的骨

架结构、稳定性降低^[17]。此外,在高浓度碱环境下,400~470 cm^{-1} 范围内的吸收峰更简单,表明产物表面的Si—O、Al—O、Ca—O键被破坏,这也阐释了强度随碱浓度增加而降低的原因。

在OPC-CGFA体系中,CW-0的特征峰与CW-1、CW-5的特征峰不同之处在于,当加入CGFA后,3 641 cm^{-1} 处的O—H吸收峰更为明显^[18-19],这表明CGFA的加入可以改善试样的和易性,并延迟OPC固化的作用。1 252 cm^{-1} 处硅酸盐特征峰、673 cm^{-1} 处Si—O特征峰的消失,揭示了CGFA质量分数越高、试样力学性能越差的原因。

2.6 SEM分析

熟石灰-CGFA体系、OPC-CGFA体系反应产物的SEM图像,如图9、10所示。

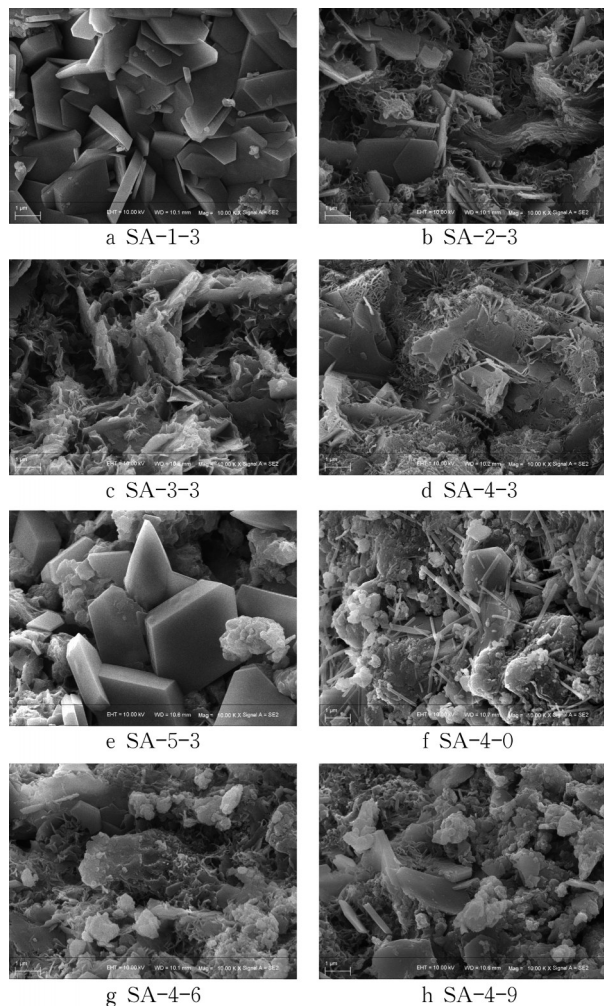


图9 熟石灰-CGFA体系SEM图像

Fig.9 SEM image of hydrated lime-CGFA system

由图9a可见,SA-1-3中CGFA质量分数较小,发生地质聚合反应的程度也较小,在图中没有明显观测到地质聚合反应产物,因此其强度较低。随着

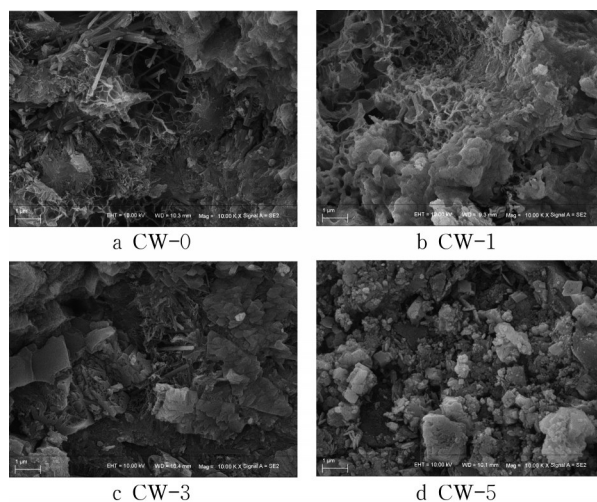


图10 OPC-CGFA体系SEM图像

Fig.10 SEM image of OPC-CGFA system

CGFA质量分数的增加,体系中具有活性的部分随之增多,在图9c、d中可明显观察到具有网状结构的地质聚合反应产物。如图9e所示,当体系中CGFA占据主体时,熟石灰占比减小,产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度较低,地质聚合反应程度下降,所以其网状结构逐渐消失,导致试样强度迅速降低。对比SA-4-0、SA-4-3、SA-4-6、SA-4-9,随着碱浓度的升高,网状结构逐渐模糊、断裂,宏观上体现出力学性能降低。由图10可见,在OPC-CGFA体系中,随着CGFA质量分数的增加网状结构显著减少。同时,部分CGFA表面有网状粗糙结构,部分表面却比较光滑,说明CGFA并不是都具有活性,而是活性与惰性的结合。

综上,通过微观XRD、FTIR、SEM测试进一步阐述了CGFA在2种体系下宏观力学性能变化的原因与机理。

3 结论

(1) 在熟石灰-CGFA体系中,质量分数60%的CGFA和质量分数40%的熟石灰在3 mol·L⁻¹NaOH溶液中产生的强度最高,28 d抗压强度为14.43 MPa。CGFA可通过简单的机械研磨提高其活性。适当的碱浓度有助于地质聚合反应,而过高的碱浓度会损害产物的力学性能。

(2) 较高的减水剂掺量会影响体系中OPC的水化反应,减少体系中碱环境的浓度,使CGFA的地质聚合反应并不充分,从而削弱试样的力学强度。减水剂质量分数达饱和后,减水剂对这些体系的流动性几乎没有影响。CGFA对减水剂质量分数的影响

远大于 OPC。

(3) 在 OPC-CGFA 体系中,研磨后的 CGFA 可以替代部分 OPC,但其活性明显弱于 OPC,在同等质量替换的情况下,只能替换部分活性,可替代原有体系中质量分数 10%~30% 的 OPC。OPC 的水化作用可以提供碱环境,使 CGFA 发生地质聚合反应,该体系试样最大抗压强度为 35.79 MPa。

(4) 未研磨的 CGFA 可有效替代天然河砂,质量分数最高可达 30%,最大抗压强度为 24.12 MPa。

作者贡献声明:

贺俊玺:研究构思,实验参与,数据分析,论文撰写。

肖 睿:论文修改,数据分析。

聂庆科:学术指导,项目支持。

黄宝山:研究构思,学术指导,论文修改,项目支持。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, GONG H, JIANG X, *et al.* Environmental impact assessment of pavement road bases with reuse and recycling strategies: a comparative study on geopolymer stabilized macadam and conventional alternatives [J]. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 2021, 93: 102749.
- [2] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, *et al.* Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(9): 1080.
- [3] SINGH S, SHARMA S K, AKBAR M A. Developing zero carbon emission pavements with geopolymer concrete: a comprehensive review [J]. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 110: 103436.
- [4] RIOS S, RAMOS C, FONSECA A V D, *et al.* Colombian soil stabilized with geopolymers for low cost roads [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143:1392.
- [5] ARULRAJAH A, PERERA S, WONG Y C, *et al.* Stabilization of PET plastic-demolition waste blends using fly ash and slag-based geopolymers in light traffic road bases/subbases [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 284: 122809.
- [6] AINETO M, ACOSTA A, IGLESIAS I. The role of a coal gasification fly ash as clay additive in building ceramic [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(16): 3783.
- [7] XIAO R, NIE Q, HE J, *et al.* Utilizing lowly-reactive coal gasification fly ash (CGFA) to stabilize aggregate bases [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370(10): 133320.
- [8] HE J, XIAO R, NIE Q, *et al.* High-volume coal gasification fly ash-cement systems: experimental and thermodynamic investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 337: 131082.
- [9] FONT O, QUEROL X, JUAN R, *et al.* Recovery of gallium and vanadium from gasification fly ash [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3): 413.
- [10] ZHANG J, ZUO J, AI W, *et al.* Preparation of a new high-efficiency resin deodorant from coal gasification fine slag and its application in the removal of volatile organic compounds in polypropylene composites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121347.
- [11] MIAO Z, GUO Z, QIU G, *et al.* Synthesis of activated carbon from high-ash coal gasification fine slag and their application to CO₂ capture [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 50: 101585.
- [12] 鲍超, 凌琪, 伍昌年, 等. 改性煤气化灰渣吸附重金属离子的研究[J]. *应用化工*, 2016, 45(4): 4.
BAO Chao, LING Qi, WU Changnian, *et al.* Adsorption of heavy metal ions by modified coal gasification slag [J]. *Applied Chemical Industry*, 2016, 45(4): 4.
- [13] 顾晓彦, 乔秀臣. 煤气化细渣制备碳硅复合材料吸附去除水中 Pb²⁺ [J]. *化工环保*, 2019, 39(1): 7.
GU Yuyan, QIAO Xiuchen. Adsorption of Pb²⁺ from water by carbon-silica composite prepared from coal gasification fine slag [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2019, 39(1): 7.
- [14] 王守飞. 粉煤气化灰渣制备泡沫陶瓷保温建筑材料[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
WANG Shoufei. Foamed ceramic insulation building materials were prepared from gasification ash and slag [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [15] 陈晓东, 唐新德, 张翠珍, 等. 缓释型聚羧酸减水剂的研究进展 [J]. *材料导报*, 2022(S2): 1.
CHEN Xiaodong, TANG Xinde, ZHANG Cuizhen, *et al.* Progress on controlled-release polycarboxylate superplasticizers [J]. *Materials Reports*, 2022(S2): 1.
- [16] XUN W, WU C, LI J, *et al.* Effect of functional polycarboxylic acid superplasticizers on mechanical and rheological properties of cement paste and mortar [J]. *Applied Science*, 2020, 10(16): 5418.
- [17] JIANG X, XIAO R, ZHANG M, *et al.* A laboratory investigation of steel to fly ash-based geopolymer paste bonding behavior after exposure to elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119267.
- [18] ZHANG Z, WANG H, PROVIS J L. Quantitative study of the reactivity of fly ash in geopolymerization by FTIR [J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2012, 1(4): 154.
- [19] JIANG X, XIAO R, BAI Y, *et al.* Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130778.