

粉煤灰增强废弃混凝土聚合物试验研究

陈武^{1,2}, 朱志铎^{1,2}

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189;

2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘要: 为了研究粉煤灰增强废弃混凝土聚合物的可行性及其微观结构特征, 以不同 NaOH 浓度配制碱激发剂激发不同混合比例的粉煤灰/废弃混凝土混合料合成地聚合物, 分析 NaOH 浓度、粉煤灰含量对地聚合物无侧限抗压强度的影响以及 Ca 成分的作用, 并采用 SEM/EDS、XRD 分析地聚合物微观结构、元素组成以及地聚合物反应前后物相变化。试验结果表明: 增大 NaOH 浓度、掺入粉煤灰可以显著改善废弃混凝土地聚合物强度, 达到 38.6 MPa; 废弃混凝土中 Ca 既生成 CSH 胶体, 又参与形成地聚合物胶体, 两者共存在粉煤灰/废弃混凝土地聚合物中, 促进地聚合物强度增长。

关键词: 粉煤灰; 废弃混凝土; 地聚合物; 无侧限抗压强度; 微观结构

中图分类号: TQ172

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)03-0189-06

Experimental Study of Fly Ash Enhanced Waste Concrete-based Geopolymer

CHEN Wu^{1,2}, ZHU Zhiduo^{1,2}

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: This paper analyzed the feasibility and microstructure of using fly ash to enhance waste concrete based geopolymer. The geopolymer is synthesized at different NaOH concentrations and fly ash content to investigate the effects of NaOH concentration, fly ash content, and Ca ingredient on the unconfined compressive strength. SEM/EDS and XRD are also performed to investigate the microstructure, elemental compositions and phase transformation of the geopolymer. The results indicate that increased NaOH concentration and addition of fly ash can improve the strength of the geopolymer, which could reach 38.6 MPa. The Ca ingredient in the waste concrete contributes to the formation of CSH gel and also participates in the formation of geopolymer gel, the two gels coexist in the fly ash/waste concrete-based geopolymer.

Keywords: fly ash; waste concrete; geopolymer; unconfined compressive strength; microstructure

基础设施建设与升级消耗大量新混凝土, 同时产生大量废弃混凝土。生产混凝土通常以普通硅酸盐水泥为胶凝材料, 砂、石为骨料, 而生产水泥消耗大量资源及能源, 还产生大量温室气体, 据统计, 生产 1 t 水泥需要消耗 1.5 t 原材料释放 1 t CO₂^[1]。由于逐渐增长的环境压力以及建筑材料的可持续发展要求, 建筑工业亟需一种新型绿色材料。

另一方面大量废弃混凝土的处置也是我们面临

的一项巨大挑战。我国绝大部分废弃混凝土都是采取堆放或填埋, 耗用大量土地资源。目前, 废弃混凝土的回收利用仍然局限在路面基层、非结构填料等低层次应用中, 且绝大部分仍需填埋处置。废弃混凝土经破碎形成再生骨料, 表面存有附着水泥浆/砂浆, 是再生骨料无法实现有效应用的原因。与天然骨料相比, 再生骨料表观密度低、吸水率大、压碎指标大、抗冲击性能低、耐磨性差, 所合成再生混凝土

的强度、耐久性都会劣化,因此,其在混凝土中的应用受到了限制。Juan 等^[2]和 Yanagibashi 等^[3]用加热磨耗、机械研磨等方法除去再生骨料表面附着砂浆,但是这些方法能耗高,额外产生一部分细骨料和细粉仍需处理。完全回收废弃混凝土需要一种可持续、环境友好型的方法。

地聚合物是近年来发展起来的一种新型水泥,以天然矿物或固体废物及人工硅铝化合物为原料,经碱激发剂激发合成的无定型态或半晶态聚合结构。地聚合物对比水泥具有多方面优良性能,是一种理想的可持续发展材料。富含硅铝质的原料都能用以制备地聚合物^[4],而且 Yip 等^[5]指出若原料含有钙成分,会同时形成地聚合物胶体和 CSH 胶体,有利于地聚合物力学性能发展。废弃混凝土中富含硅和钙,且含有一定量的铝,是一种合成地聚合物的潜在原料。如果以废弃混凝土细粉部分合成地聚合物胶凝材料,拌和再生骨料再生混凝土,废弃混凝土就可以完全回收利用。且再生骨料表面附着砂浆中的硅、铝、钙成分能参与到地聚合反应中,增强与周围浆体的粘结,提高再生混凝土的性能。Komnitsas 等^[6]已经利用废弃混凝土粉末合成地聚合物,并研究合成参数对其性能的影响,但他们指出废弃混凝土的地聚合物反应活性很有限,所合成地聚合物的强度只有 13 MPa。并且他们认为是废物混凝土中过高的 CaO 含量(65.42%)影响到地聚合物反应,因为 CaO 不仅消耗碱成分,还生成了易脆可溶的钙水碱($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。

考虑到废弃混凝土地聚合物强度不高,本研究主要考察利用粉煤灰(FA)增强废弃混凝土(WC)地聚合物的可行性。FA 是合成地聚合物的优质原料^[7],掺入 FA 来优化 WC 中的 Si、Al、Ca 成分含量。NaOH 溶液混合一定量水玻璃(SS)制备碱激发剂,SS 是多种低聚硅酸盐的混合溶液,可以在废弃混凝土中 Si、Al 成分溶出之前就通过缩聚生成多聚体地聚合物,有利于提高地聚合物性能。以不同 NaOH 浓度、FA 含量合成试样,通过无侧限抗压强度试验、扫描电镜/能量弥散 X 射线能谱分析(SEM/EDS)、X 射线衍射分析(XRD),研究废弃混凝土地聚合物的力学性能、微观结构及物相/元素组成。

1 实验部分

1.1 材料

实验材料包括 WC 粉末、FA、NaOH 分析纯、SS 及蒸馏水。WC 粉末由破碎粉磨测试过的水泥混凝

土试样得到,FA 由某南京电厂提供,其化学成分见表 1。WC 粉末主要由硅、钙成分组成,还有少量的铝、铁成分;而 FA 主要包含硅、铝成分以及少量的钙、铁成分。WC 粉末、FA 颗粒曲线见图 1,WC、FA 粒径小于 75 μm 的颗粒含量都接近 90%。WC、FA 的微观结构见图 2,WC 颗粒形状不规则而 FA 颗粒基本呈球状。

表 1 废弃混凝土和粉煤灰的化学成分 单位:%

材料	不同化学成分含量							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	LOI
WC	38.81	21.91	9.99	3.50	1.63	1.63	0.74	20.18
FA	54.85	6.21	24.48	4.85	1.13	0.89	0.61	3.61

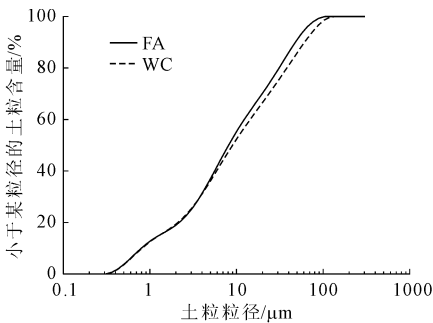


图 1 废弃混凝土粉末和粉煤灰粒径分布

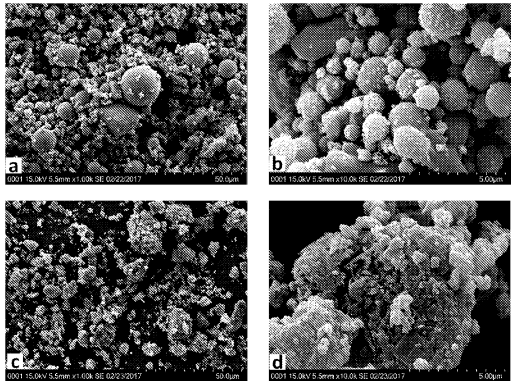


图 2 粉煤灰(a、b)和废弃混凝土粉末(c、d)SEM 图像

NaOH 分析纯溶于蒸馏水制备不同浓度 NaOH 溶液。SS 固含量 35.8% ($\text{SiO}_2 = 27.28\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 8.52\%$),比重 1.370~1.375,模数 3.1~3.4。

1.2 实验方法

WC 经颚式破碎机破碎后过 600 μm 筛,再经球磨机磨碎保证大部分颗粒过 75 μm 筛,获得的粉末与粉煤灰按一定质量比混合均匀作为地聚合物原料。碱激发剂采用 NaOH 和 SS 的混合溶液。首先 NaOH 分析纯溶于蒸馏水,至少搅拌 5 min 直至完全溶解,待冷却至室温后按一定质量比混合 SS,再搅拌 5 min,静置 30 min;然后将混合粉末加到水泥净

浆搅拌锅中,缓慢加入碱激发剂,搅拌 5 min,保证硅、铝、钙充分溶解。将均匀的净浆体装入 20 mm × 20 mm × 20 mm 模具中,振动成型,密封后放入烘箱中高温养护 24 h 后脱模,放在密封袋中室温继续养护 6 d,得到固体试样。测定试样的无侧限抗压强度。具体实验方案见表 2。

FA 掺量取 0%、25%、50%、75%、100% (FA 占混合粉料的质量百分数);NaOH 溶液按 10 mol/L、14 mol/L、18 mol/L 配制;SS 与 NaOH 溶液按质量比 SS/N 取 1.5 混合配制碱激发剂;液体激发剂与固体

粉末质量比 L/S 取 0.4;养护温度取 70℃。

无侧限抗压强度试验通过 CBR-2 型承载比试验仪以恒定 1.27 mm/min 加载测定试样无侧限抗压强度,每组 3 个样,测试前试样表面抛光处理保证平整。

SEM/EDS 通过 HITACHI SU3500 型扫描电镜研究试样的微观结构形态及元素组成,采用强度试验破坏试样,保证破坏面完整无污染。XRD 通过 PANALYTICAL XPert PRO MRD/XL 型衍射仪研究原料物相组成、地聚合反应前后材料物相变化。

表 2 粉煤灰/废弃混凝土合成地聚合物实验方案

标本名称	FA/%	NaOH 浓度 /(mol · L ⁻¹)	SS/N 质量比	L/S 质量比	Si/Al 摩尔比值	Ca/Si 摩尔比值	Na/Al 摩尔比值	Na/Si 摩尔比值	UCS test	XRD	SEM/EDS
WC	0	—	—	—	3.30	0.60	—	—	—	✓	✓
FA	100	—	—	—	1.90	0.12	—	—	—	✓	✓
10-0-1.5	0	10	1.5	0.40	3.86	0.52	0.96	0.25	✓	—	—
10-25-1.5	25	10	1.5	0.40	3.08	0.39	0.70	0.23	✓	—	—
10-50-1.5	50	10	1.5	0.40	2.63	0.28	0.56	0.21	✓	—	—
10-75-1.5	75	10	1.5	0.40	2.34	0.19	0.46	0.20	✓	—	—
10-100-1.5	100	10	1.5	0.40	2.13	0.11	0.39	0.18	✓	—	—
14-0-1.5	0	14	1.5	0.40	3.86	0.52	1.13	0.29	✓	—	—
14-25-1.5	25	14	1.5	0.40	3.08	0.39	0.83	0.27	✓	—	—
14-50-1.5	50	14	1.5	0.40	2.63	0.28	0.66	0.25	✓	—	—
14-75-1.5	75	14	1.5	0.40	2.34	0.19	0.54	0.23	✓	✓	✓
14-100-1.5	100	14	1.5	0.40	2.13	0.11	0.46	0.22	✓	✓	✓
18-0-1.5	0	18	1.5	0.40	3.86	0.52	1.31	0.34	✓	—	—
18-25-1.5	25	18	1.5	0.40	3.08	0.39	0.96	0.31	✓	—	—
18-50-1.5	50	18	1.5	0.40	2.63	0.28	0.76	0.29	✓	—	—
18-75-1.5	75	18	1.5	0.40	2.34	0.19	0.63	0.27	✓	—	—
18-100-1.5	100	18	1.5	0.40	2.13	0.11	0.54	0.25	✓	—	—

注:10-0-1.5 表示制备试样时 NaOH = 10 mol/L,0% FA 和 SS/N = 1.5。

2 结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

本研究主要探讨 NaOH 浓度和 FA 含量对合成粉煤灰/废弃混凝土地聚合物无侧限抗压强度 (UCS) 的影响以及 Ca 成分的作用。图 3 是 NaOH 浓度为 10 mol/L、14 mol/L、18 mol/L,SS/N 质量比为 1.5 且 L/S 质量比为 0.4 时,不同 FA 掺量试样 7 d 龄期试样 UCS 的变化情况。

2.1.1 NaOH 浓度的影响

NaOH 在地聚合反应中的作用可以归纳为两点:溶解 Si、Al 单体;Na⁺ 作为 Al 单体的平衡电子参与形成地聚合物结构,如反应式(1)、式(2)^[8]。如图 2 所示,UCS 随着 NaOH 浓度提高而增大,可解释

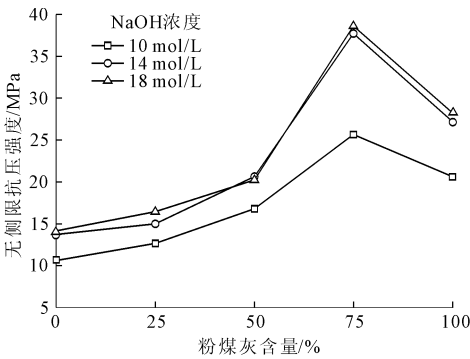
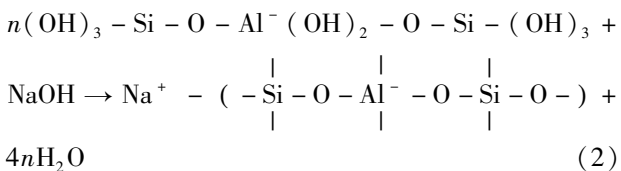
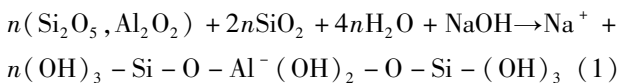


图 3 不同 FA 掺量试样 7 d 龄期无侧限抗压强度

为高浓度 NaOH 有助于固粉颗粒表面析出更多 Si、Al 成分,增大液相中 Si、Al 成分浓度促进地聚合反应。当 NaOH 浓度超过 14 mol/L 时,UCS 不再增

大,是由于过量的 Na^+ 会抑制 Si、Al 单体继续溶解^[9]。 Na^+ 在反应中作为 Si、Al 的激发剂或溶解剂,初始 Na/Al 摩尔比值、Na/Si 摩尔比值的选取十分重要。本研究中 Na/Al 摩尔比值和 Na/Si 摩尔比值的范围分别在 0.39 ~ 1.31 和 0.34 ~ 0.18 之间(见表 2)。最大 Na/Al 摩尔比值和 Na/Si 摩尔比值对应 18-0-1.5 试样,但是 UCS 值不是最高,可见还有其他因素影响地聚合反应,比如 Si/Al 摩尔比值、Ca/Si 摩尔比值也是非常重要的因素,后续章节再分析。但是对比 10 mol/L 和 14 mol/L 两批试样,在 Si/Al 摩尔比值和 Ca/Si 摩尔比值保持一致的情况下,高浓度 NaOH 更容易使 Si、Al 溶解,所合成试样的 UCS 更大。另外,在溶解过程中, Na^+ 可作为四配位 Al^{3+} 造成的过剩负电荷的平衡电荷,使体系处于平衡稳定状态,故 Na^+ 的含量将直接关系到地聚合反应能否发生、反应速度以及地聚合物能否稳定存在。本研究中用一定量 SS 混合 NaOH 溶液作为碱激发剂,是由于在含钙地聚合反应系统中,SS 具有缓凝作用^[10],能抑制硅酸钙在高碱度环境下的溶解反应,避免因 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀快速形成而影响 Si、Al 单体的充分析出。此外,SS 也会加快地聚合反应, Si、Al 从硅铝酸盐材料中水解出来后,分别形成 Si-OH 和 Al-OH 单体,进而发生聚合反应,若碱溶液中包含可溶性硅酸盐,那么水解过程就提前完成,地聚合反应也提前进行。



2.1.2 初始 Si/Al 摩尔比值的影响

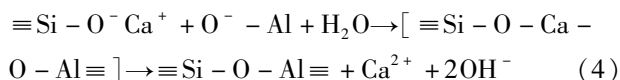
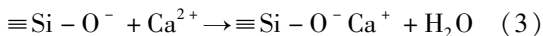
如反应式(1)、式(2)所示, Si、Al 含量在地聚合反应中也极其重要,这也是许多学者大量研究 Si/Al 摩尔比值对地聚合反应影响的原因。Duxson 等^[11]指出在偏高领土地聚合反应中,当 Si/Al 摩尔比值为 1.9 时,所合成试样的抗压强度最大。Cheng 等^[12]在研究偏高领土地/矿渣混合粉末地聚合反应中得到最优 Si/Al 摩尔比值为 1.58 ~ 1.73。Xu 等^[13]利用高岭土和粉煤灰合成地聚合物,在 Si/Al 摩尔比值为 2 时试样强度最大。最优 Si/Al 摩尔比值随着地聚合反应原材料的改变而变化。

WC 中的硅含量相对较高,随着粉煤灰的掺入

趋于优化。Si/Al 摩尔比值在 2.13 ~ 3.86 之间变动,在 Si/Al 摩尔比值为 2.34 时 UCS 达到最大值。本研究中的最优初始 Si/Al 较上述几位学者的结论稍偏大,主要是因为合成地聚合物材料的原材料不一样。其他学者的研究多基于偏高领土地聚合物,偏高领土地聚合反应活性相对较高的一种材料,地聚合物最终 Si/Al 摩尔比值与初始 Si/Al 摩尔比值接近,如果原材料中包含相当量无反应活性的成分,那么最终 Si/Al 摩尔比值与初始 Si/Al 摩尔比值会相差很大。Klabprasit 等^[14]指出稻壳焚烧灰合成地聚合物的最优初始 Si/Al 摩尔比值为 8,远大于本研究的结果。

2.1.3 Ca 的作用

Ca 在地聚合反应体系中的作用目前有两种解释,一种是 Ca^{2+} 作为平衡电荷参与地聚合物结构的形成,步骤见式(3)、式(4)^[15]。



另一种解释, Ca 形成 CSH 胶体与地聚合物胶体共存在体系中^[6]。两种胶体的存在促进了地聚合物强度的发展。

在 FA/WC 地聚合反应系统中,当 FA 掺量达到 75%,试样 UCS 达到最大值;即在 FA/WC 地聚合反应体系中 WC 最优含量为 25%,所合成试样的 UCS 大于仅有 FA(0% WC)合成的地聚合物试样,这也证实了 Ca 成分在地聚合反应体系中的积极作用。

但是, Pacheco - Toorgal 等^[10]指出地聚合反应体系中应该严格控制 Ca 含量,原因是高碱度环境下 Ca 容易溶出形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀,增加反应体系的黏度而不利于地聚合反应进行。如果通过增大体系含水率改善工作性,又会因为水分蒸发增加地聚合物胶体结构的孔隙, UCS 下降。Komnitsas 等^[6]也指出 CaO 含量过高会消耗碱成分影响到地聚合反应,还会生成了易脆可溶的钙水碱($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)影响地聚合物强度发展。如图 2 所示, WC 含量超过 25% (FA 掺量低于 75%) 时,试样 UCS 急剧下降,超过 50% (FA 掺量低于 50%) 后, UCS 已低于 20 MPa。本研究中最大 UCS 值对应的最优 Ca/Si 为 0.19,图 4 比较了其他学者关于最优 Ca/Si 摩尔比值与初始 Si/Al 摩尔比值对应关系的结论,最优 Ca/Si 摩尔比值大致随着初始 Si/Al 摩尔比值的变大而增大。

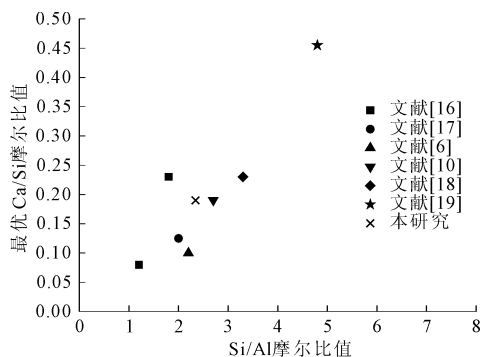


图4 最优 Ca/Si 摩尔比值与 Si/Al 摩尔比值的对应关系

2.2 微观结构分析

2.2.1 XRD 分析

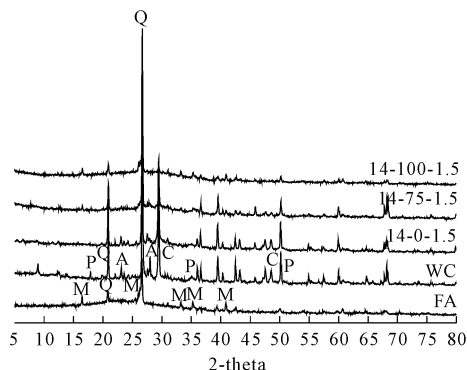
图5为WC粉末、FA,以及NaOH为14 mol/L、SS/N质量比为1.5、L/S质量比为0.4时三种地聚合物试样(0% FA、75% FA、100% FA)XRD图谱。

WC粉末主要为晶相材料,包括钙长石($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$)、CSH($(\text{CaO})_x\text{SiO}_2(\text{H}_2\text{O})_y$)、氢氧化钙石($\text{Ca}(\text{OH})_2$)石英(SiO_2),钙长石和石英来自原混凝土的粉碎骨料,CSH胶体和氢氧化钙石是水泥的水化产物。此外,在 2θ 为 $25^\circ \sim 40^\circ$ 区域存在很弱的无定形态。FA以半晶态和无定型物相为主,也有少量石英和莫来石($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$),XRD图谱上有一个扩散的驼峰,中心位于 22° 。

100% FA和75% FA试样的XRD图谱比较相似,除了个别强度较弱的波峰。扩散驼峰的区域稍有扩大($20^\circ \sim 40^\circ$),中心移向也更大的角度(30°),意味着有新的无定形态材料生成,就是地聚合物胶体。与FA的XRD图谱比较,晶相物质峰值减弱,表明部分晶相材料溶解。对于75% FA试样,从XRD图谱上没有观察到新的晶相成分,可理解为晶态CSH不是或不主要是本研究地聚合反应体系的产物,这与Ren等^[20]的结论一致,在高碱度环境下不容易形成CSH胶体,但是无定型态CSH可能是一种次级产物,在后面章节中我们会给出分析。

0% FA地聚合物试样XRD图谱中氢氧化钙石特征峰消失,表明WC粉末中的氢氧化钙石经地聚合反应后完全溶解,但是无定形态 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 仍可能是产物中的一部分^[6]。WC中的CSH胶体只有部分溶解,在碱溶液中的反应活性不如氢氧化钙石。本研究中没有观察到Komnitsas等^[6]指出影响地聚合物强度发展的钙水碱。可能的原因有两点:其一,他们所用的WC粉末的CaO含量(65.42%)远高于本研究

使用的WC粉末(21.91%),在碳化作用下更容易形成钙水碱;其二,本研究中WG/N质量比值取1.5,大于他们研究中所取的值(约为1),碱溶液中可溶性硅酸盐的存在会抑制硅酸钙的水解,限制了反应相中Ca含量的增长。



注:M: 莫来石, A: 钙长石, P: 氢氧化钙石, Q: 石英, C: CSH

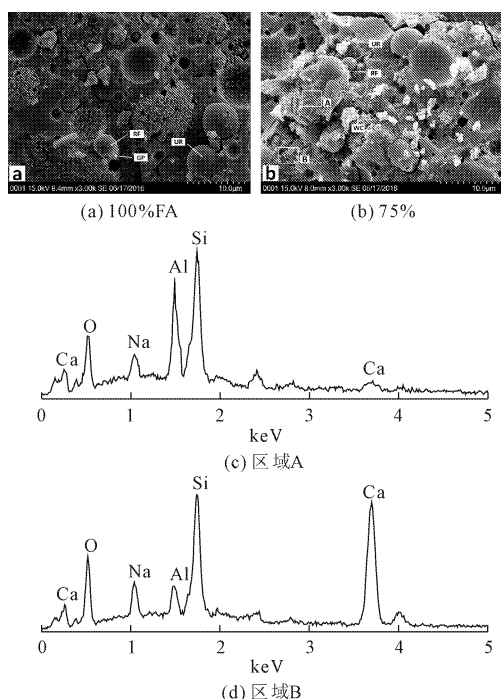
图5 WC、FA和地聚合物试样XRD图谱

2.2.2 SEM/EDS 分析

图6为NaOH浓度为14 mol/L、SS/N质量比为1.5、L/S质量比为0.4时,100% FA和75% FA地聚合物试样的SEM/EDS分析。图6(a)为100% FA试样SEM图片,图中包含反应和未反应的粉煤灰颗粒以及生成的地聚合物胶体包裹在颗粒表面;图6(b)为75% FA试样SEM图片,除图6(a)中的物相外,还包括部分反应的WC颗粒,以及两种不同形态的胶体A、B。经EDS分析,区域A主要成分为Si、Al、Na,以及少量的Ca(2.01 wt%),区域B中主要包括Si、Ca、Na,以及少量的Al(2.54 wt%)。

区域A的胶体形态与图6(a)中地聚合物胶体形态相近,属于地聚合物胶体。区域B的胶体应该是一种CSH胶体。根据反应体系中Ca浓度的不同,火山灰反应和地聚合反应都能生成不同种类的CSH胶体。水泥水化产生的CSH胶体的Ca/Si摩尔比值在1.5~1.7之间,但是地聚合反应生成的CSH胶体中,Ca/Si摩尔比值更低。Yip等^[5]指出碱激发偏高岭土和矿渣混合物生成的CSH胶体的Ca/Si摩尔比值约为1;而Ahmari等^[15]通过偏高岭土/矿渣地聚合反应得到的CSH胶体的Ca/Si摩尔比值更低,小于0.7,本研究中产生的CSH胶体的Ca/Si摩尔比值为0.9,在两者之间。

75% FA试样的UCS最大,可理解为胶体A和胶体B共同形成的结果。两种胶体共存在粉煤灰/废弃混凝土地聚合物中,填充在未反应颗粒和生成物相之间的空隙,使地聚合物获得最大的强度。



注:UR 为未反应粉煤灰颗粒,RF 为反应粉煤灰颗粒,GP 为地聚合物

图 6 地聚合物试样 SEM/EDS 分析

3 结 论

(1) 研究利用粉煤灰增强废弃混凝土聚合物的可行性。试验表明掺入粉煤灰能显著提高地聚合物的强度,当粉煤灰掺量达到 75% 时,试样 UCS 达到最大值。

(2) 增大 NaOH 浓度,有助于硅铝质原料溶解,提高地聚合物强度;当 NaOH 浓度超过 14 mol/L 时,会抑制地聚合反应,地聚合物强度也不再提高。

(3) Ca 成分有助于提高地聚合物的强度,但必须限制在一定含量内,超过这个限值地聚合物强度会显著降低。

(4) 通过 XRD、SEM/EDS 分析,Ca 成分在地聚合反应中,既生成 CSH 胶体,又参与形成地聚合物胶体,两者共存在粉煤灰/废弃混凝土聚合物中促进地聚合物强度增长。

参考文献:

- [1] 蒋霞,李绍鹏,李曦. 废弃混凝土试块的再利用研究[J]. 商品混凝土,2017(4):33-35.
- [2] Juan M S, Gutierrez P A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2009,23:872-877.
- [3] Yanagibashi K, Inoue K, Seko S. A study on cyclic use

of aggregate for structural concrete [C]//Infrastructure and Transport. The 2005 World Sustainable Building Conference/Action for Sustainability, SB05. Tokyo: Japanese Ministry of Land, 2005:2585-2592.

- [4] 刘瑞平,王慧,郭飞. 粉煤灰-偏高岭土地质聚合物发泡材料的制备与表征[J]. 矿业科学学报, 2019,4(1):66-71.
- [5] Yip C K, van Deventer J S J. Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder [J]. Journal of Materials Science, 2003,38(18):3851-3860.
- [6] Komnitsas K, Zaharaki D, Vlachos A. Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers [J]. Advanced Powder Technology, 2015,26(2):368-376.
- [7] Kou S C, Poon C S, Chan D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007,19(9):409-417.
- [8] Chen W, Zhu Z. Synthesis and characterization of metakaolin modified waste concrete-based geopolymer [C]//Proceedings of The 2nd International Symposium on Asia Urban Geo-Engineering. Singapore: Springer Series in Geomechanics and Geoenvironmental Engineering, 2018:530-544.
- [9] Ren X, Zhang L. Experimental study of geopolymer concrete produced from waste concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019,31(7):04019114.
- [10] Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S. Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder [J]. Construction and Building Materials, 2008,22:1201-1211.
- [11] Duxson P, Provis J L, Lukey G C. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties [J]. Colloids and Surfaces A, 2005,269(1/3):47-58.
- [12] Cheng T W, Chiu J P. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag [J]. Miner Engineering, 2005,16(3):205-210.
- [13] Xu H, Jaarsveld J G S. The effect of source materials on geopolymerization [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003,42(8):1689-1706.
- [14] Klabprisit T, Jaturapitakkul C, Songpirivakij S. Influence of Si/Al ratio on compressive strength rice husk-bark ash and fly ash-based geopolymer properties paste [C]//International Conference on the Role of Universities in Hands - On Education. Thailand, 2009:445-451.