

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.016

# 纤维改性粉煤灰基地聚物的强韧化机理研究

周新星<sup>1</sup>, 吴天军<sup>2</sup>

(1. 山西省交通科技研发有限公司 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030032; 2. 山西交科岩土工程有限公司, 山西 太原 030006)

**摘要:**为明确木质素纤维在循环流化床粉煤灰基地聚物(circulating fluidized bed fly ash based geopolymer, CFBG)中的强韧化机理,文章通过添加偏高岭土和少量的电石渣,借助电子式万能材料试验机、X射线衍射仪、场发射扫描电子显微镜、能谱仪、红外光谱、工业 CT 及分子模拟,对不同木质素纤维掺量(质量分数分别为 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)的地聚物进行力学特性、结构及微观形貌测试,分析不同木质素纤维掺量对 CFBG 强韧化机理的影响。结果表明:当木质素纤维掺量为 0.3%时,CFBG 抗折强度和断裂韧性达到最大值,分别为 18.6 MPa、9.6 MPa·m<sup>1/2</sup>;随着木质素纤维掺量增加,地聚物抗压强度和断裂韧性呈上升趋势;掺入木质素纤维可促进地聚物中莫来石晶相、类沸石晶相及 C-S-H 凝胶的生成,显著改变地聚物的结构;木质素纤维的掺入可降低地聚物表面孔隙,改变地聚物破坏形式,延长裂缝的扩展路径。研究结果可为促进工业固废高附加值资源化利用提供理论依据。

**关键词:**地聚物;粉煤灰;木质素纤维;偏高岭土;强韧化机理

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0104-07

## Study on strengthening and toughening mechanism of fiber modified fly ash based geopolymer

ZHOU Xinxing<sup>1</sup>, WU Tianjun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd, Taiyuan 030032, China; 2. Shanxi Jiaoke Geotechnical Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In order to clarify the strengthening and toughening mechanism of lignin fiber in circulating fluidized bed fly ash based geopolymer(CFBG), by adding metakaolin and a small amount of calcium carbide slag, with the help of electronic universal material testing machine, X-ray diffractometer, field emission scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, infrared spectroscopy, industrial computed tomography(CT) and molecular simulation, mechanical properties, structure and microscopic morphology of geopolymers with different lignin fiber content(0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) were tested. The influence of different lignin fiber content on the strengthening and toughening mechanism of CFBG was analyzed. It indicates that the flexural strength and fracture toughness of CFBG reach the maximum value when the lignin fiber content is 0.3%, which are 18.6 MPa and 9.6 MPa·m<sup>1/2</sup>, respectively. The compressive strength and fracture toughness of geopolymers show an upward trend with the increase of lignin fiber content. The incorporation of lignin fiber can promote the formation of mullite crystal phase, zeolite crystal phase and C-S-H gel in geopolymers, and significantly change the structure of geopolymers; and the incorporation of lignin fiber can

**收稿日期:**2021-03-24;**修回日期:**2022-09-08

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52008235);山西省科技成果转化引导专项基金资助项目(201804D131034);山西交通控股集团有限公司科技资助项目(19-JKKJ-55;20-JKKJ-43)和山西交通科学研究院集团有限公司科技创新发展资助项目(20-JKCF-10;22-JKCF-10)

**作者简介:**周新星(1990—),男,湖南祁阳人,山西省交通科技研发有限公司工程师。

reduce the surface porosity of geopolymers, changing the failure mode of geopolymers and extending the propagation path of cracks. The research results can provide theoretical basis for promoting the high value-added resource utilization of industrial solid waste.

**Key words:** geopolymer; fly ash; lignin fiber; metakaolin; strengthening and toughening mechanism

地聚物具有优异的力学性能和耐高温、耐腐蚀性能<sup>[1-3]</sup>。将粉煤灰、矿渣等工业固废应用在建筑材料,特别是地聚物中,不仅能降低工程造价,还能解决固废所带来的环境问题<sup>[4]</sup>。粉煤灰基地聚物是使用较广泛的地聚物之一。循环流化床粉煤灰是一种特殊的粉煤灰,其颗粒形貌不规则,结构疏松,利用程度和利用效率相对较低,由于循环流化床粉煤灰基地聚物(circulating fluidized bed fly ash based geopolymer, CFBG)断裂韧性差,进一步制约了 CFBG 的应用。对 CFBG 进行增强增韧,是解决 CFBG 抗折强度低、断裂韧性差的关键<sup>[5]</sup>。

地聚物强韧化常用方法是掺杂纤维<sup>[6]</sup>。文献<sup>[7]</sup>认为碳纤维、玻璃纤维的加入可显著提高地聚物韧性,使地聚物抗折能力与金属材料相当,其中碳纤维改性地聚物弯拉强度可达 245 MPa;文献<sup>[8]</sup>利用氧化石墨烯表面修饰聚酰亚胺纤维强韧化地聚物,发现当掺入聚酰亚胺纤维的质量分数为 1.2%时,地聚物压缩强度和抗折强度最佳,纤维在地聚物中主要通过桥接、断裂、拔出和剥离等行为来分散和消耗体系断裂能,从而增强体系断裂韧性;文献<sup>[9]</sup>采用棉花秸秆强韧化地聚物,结果发现掺入棉秆纤维能够减少地聚物的表面孔隙,改变地聚物的破坏形式;文献<sup>[10]</sup>总结分析纤维增强地聚物复合材料,认为纤维改性地聚物是增强地聚物断裂韧性的最佳方法;文献<sup>[11]</sup>对偏高岭土聚合物与植物纤维相容性进行初步研究,结果发现高岭土地聚物与植物纤维有很好的相容性,且地聚物与木质素纤维的相容性较非木质素纤维的相容性好;文献<sup>[12]</sup>利用纤维编织网增强砂浆复合材料对钢筋混凝土板进行加固,发现纤维编织网增强砂浆复合材料可显著提升钢筋混凝土板的受弯承载力和开裂后刚度,延缓裂缝发展;文献<sup>[13]</sup>利用剑麻-聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)混杂纤维改性地聚物,发现掺入纤维可大幅提升地聚物力学性能和抗硫酸盐侵蚀性能。已有相关研究<sup>[10]</sup>表明,植物纤维对地聚物的增强增韧具有独特的优势;木质素纤维作为植物纤维中的一种,具有良好的韧性、分散性和化学稳定性,吸水能力强,增稠抗裂性能优异。因此,可

选用木质素纤维增强增韧低抗折强度和断裂韧性的地聚物。

目前,针对木质素改性循环流化床粉煤灰基地聚物(lignin fiber circulating fluidized bed fly ash based geopolymer, FCFBG)的强韧化机理,相关研究很少。本文在地聚物中添加部分偏高岭土和少量电石渣以调控体系反应活性和 Ca、Si 比例,分析不同掺量的木质素纤维对 CFBG 抗压强度、抗折强度和断裂韧性的影响,借助分子模拟、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)、红外光谱研究 FCFBG 的结构强韧化机制,并结合场发射扫描电子显微镜、能谱仪、工业 CT 重现 FCFBG 强韧化过程中的微观形貌,揭示 FCFBG 的强韧化机理。

## 1 原材料和实验方法

### 1.1 原材料

循环流化床粉煤灰密度为 2.39 g/cm<sup>3</sup>,乙炔制备电石气产生的电石渣密度为 1.85 g/cm<sup>3</sup>;粉煤灰和电石渣过 0.075 mm 方孔筛,取筛余部分进行实验。偏高岭土粒径 1250 目,活性系数为 85.25%。碱激发剂选用氢氧化钠和硅酸钠溶液,其浓度分别为 10、1 mol/L,掺入质量分数(文中称为“掺量”)分别为 20%、30%。木质素纤维呈近粉末状,长度小于 1 mm,采用外掺法加入,掺量分别为 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%;灰分掺量为 12%。地聚物中主要原材料为粉煤灰、电石渣、偏高岭土,其掺量分别为 46%、8%、46%;发泡剂选用双氧水,掺量为 20%。

### 1.2 实验方法

CFBG 断裂韧性采用三点弯曲切口梁试验方法;抗压强度依据文献<sup>[14]</sup>进行测试;抗折强度依据文献<sup>[14]</sup>,采用电子式万能材料试验机进行测试,试验结果取每组 3 个试件的平均值。地聚物晶体结构特性采用 XRD 进行测试,测试角度范围为 5°~55°,步进速率为 2(°)/min。地聚物微观形貌和纤维分布均采用场发射扫描电子显微镜进行测试,测试条件为:管电压 35 kV,电流 10 mA。用扫描电子显微镜自带的能谱仪进行微区扫描,扫描尺寸为 2 μm×2 μm。采用 Nicolet

iS5 傅里叶变换红外光谱仪测试纤维强韧化地聚物过程中的官能团变化,测试波数范围为  $4\ 000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 。采用 GE Vtomex 工业 CT 测试选定地聚物强韧化(水化)过程中内部结构及微观形貌的变化,测试电压为 150 kV,电流为  $220\ \mu\text{A}$ 。

### 1.3 分子模拟

分子模拟过程中木质素纤维采用  $\text{C}_{312}\text{H}_{55}\text{O}_{89}$  替代。地聚物采用水化硅酸钙(C-S-H)凝胶模型,以 Tobermorite 晶体为基础,通过改变木质素纤维的掺量研究 FCFBG 的强韧化机理。将构建好的分子模型进行几何优化,并对几何优化后的模型采用正则系综 NVT 进行动力学模拟,模拟步长为 1 fs,模拟总耗时 100 ps,评价地聚物的动力学模拟过程、径向分布函数及基本结构参数的变化。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 木质素掺量对地聚物力学特性的影响

FCFBG 的力学特性参数取值见表 1 所列。

表 1 FCFBG 的力学特性参数取值

样品编号	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	断裂韧性/ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
1# (0)	12.5	7.2	4.2
2# (0.1%)	18.2	10.5	6.3
3# (0.2%)	22.0	13.8	7.2
4# (0.3%)	30.5	18.6	9.6
5# (0.4%)	28.8	17.2	8.2
6# (0.5%)	26.4	16.9	7.8

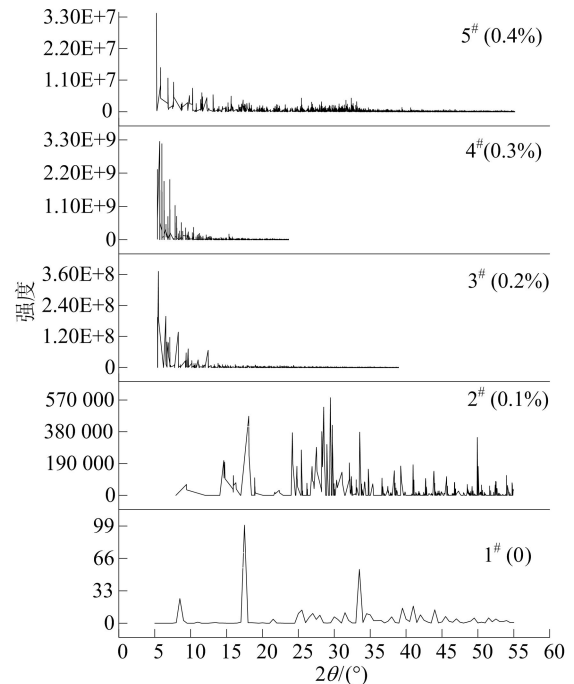
注:括号中数值为木质素纤维掺量,下文同。

随着纤维掺量增加,FCFBG 抗压强度先增加后降低,当纤维掺量为 0.3% 时,FCFBG 抗压强度达到最大值(30.5 MPa);该结果表明,木质素纤维可增加地聚物的抗压强度,提升地聚物的力学特性。未经纤维改性的 CFBG 抗折强度为 7.2 MPa,添加 0.1% 木质素纤维时,FCFBG 抗折强度达到 10.5 MPa,且随着木质素掺量增加,地聚物抗折强度先增加后降低,当木质素纤维掺量达到 0.3% 时,FCFBG 抗折强度达到最大值 18.6 MPa;该结果表明,微量的木质素纤维即可实现地聚物的增强效果,因此,木质素纤维可显著提高地聚物的抗折强度。随着木质素纤维掺量增加,地聚物断裂韧性先增强、后降低;该结果表明,木质素纤维不仅可以增强地聚物的抗压强度和抗折强度,还可以增强地聚物的断裂韧性。

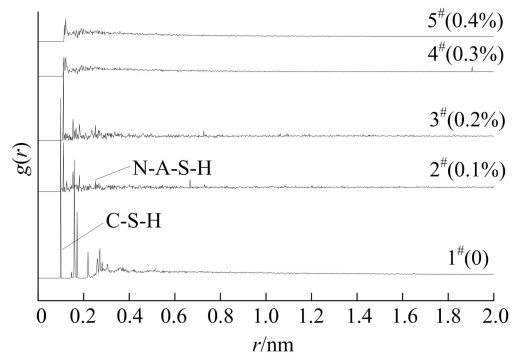
### 2.2 木质素纤维对地聚物结构的影响

FCFBG 的结构特征如图 1 所示。

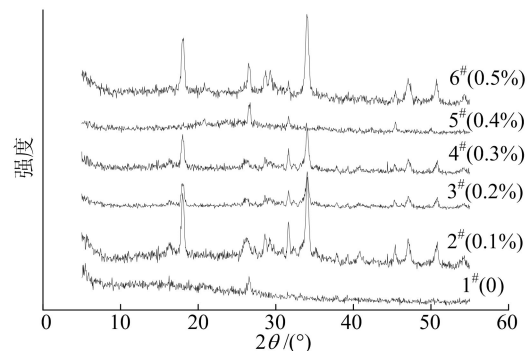
通过模拟 XRD 分析木质素纤维对地聚物晶体结构的影响。从图 1a 可以看出:地聚物的主要结晶相为石英、莫来石和类沸石晶体结构;随着木质素掺量增加,地聚物晶体衍射数据发生微弱变化,晶体结构特征峰宽化,其原因是木质素纤维加入后,增大了地聚物晶体间隔距离,导致晶面间距增大,峰形宽化。



(a) 模拟XRD衍射图谱



(b) 径向分布函数



(c) XRD衍射图谱

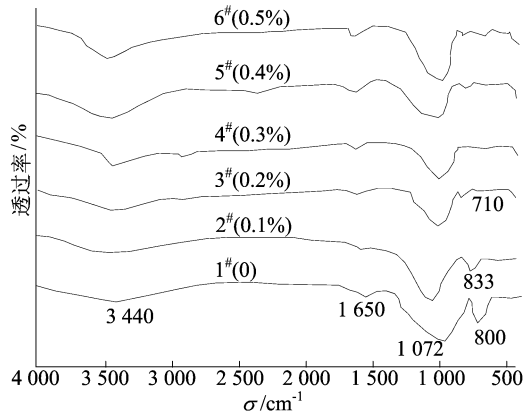


图 1 FCFBG 的结构特征

由图 1b 可知:FCFBG 的径向分布函数整体往右迁移(向大截断半径方向移动);随着木质素纤维掺量增加,地聚物结构发生显著变化,特别是 C-S-H 结构,该结果表明,木质素纤维可改变地聚物的微观结构,特别是水化产物 C-S-H 的结构。

从图 1b 图形趋势看,随着木质素纤维掺量增加,地聚物体系的径向分布函数值  $g(r)$  增大,特征峰高度增加;由此可知,随着木质素纤维掺量增加,体系内部同一距离范围内找到另一个粒子的几率增大,地聚物分子间距离降低,分子间作用力增强,木质素纤维可显著提高地聚物内部分子间作用力,增强增韧地聚物。地聚物结构的主要特点是原子或分子存在一定范围的短程有序、长程无序。木质素纤维改性地聚物的结构特性可用平均距离进行评价;平均距离即径向分布函数第一特征峰位置,是指材料结构首次出现有序结构的位置距离。与平均距离相关的 2 个概念是平均位移和有序畴边界。平均位移是指径向分布函数第 1 个半峰全宽度的 42.4%;有序畴边界是径向分布函数在 0.10 nm 处的值,通常规定用  $g(r) = 1.02$  处的半径  $r$  值为有序畴尺寸。经过计算发现,地聚物的平均距离均大于 0.10 nm,且随着木质素纤维掺量增加,地聚物平均距离增加;该结果表明,加入木质素纤维会改变地聚物径向分布函数的平均距离,降低地聚物结构的平均距离(有序程度),增加地聚物体系的无序程度。木质素纤维改性地聚物的平均位移数据显示,加入木质素纤维可降低地聚物的平均位移,增加地聚物分子内部的结合力,强化地聚物的力学性能。

从图 1c 可以看出,FCFBG 出现氧化硅、硅铝酸盐、微量的偏高岭土特征峰,且偏高岭土主要以无定形相为主,氧化硅主要以石英相存在,硅铝酸盐主要以莫来石相、类沸石相存在,由此可知,偏

高岭土参与了地聚物的聚合缩聚反应。随着木质素纤维的掺入,地聚物中莫来石晶相特征峰衍射强度增加,同时出现类沸石晶体结构特征峰;该结果表明,掺入木质素纤维可促进地聚物中莫来石晶相和类沸石晶体的生成,提高地聚物的力学强度。但是随着木质素纤维掺量增加,地聚物晶体结构衍射谱图无显著变化。

采用内标法对地聚物的主要结晶相进行定量分析,以相关晶相卡片作为内标,假定其为纯净的晶体,不含杂质,卡片特征峰围成的面积总和定义为 1,用测试晶相特征峰面积除以内标物质特征峰面积即可得到相应晶相质量分数。其中石英以 PDF 卡片号 46-1045 为内标依据,莫来石以 PDF 卡片号 41-1486 为内标依据,类沸石以 PDF 卡片号 43-144 为内标依据。FCFBG 晶相的质量分数分析结果见表 2 所列。由表 2 可知,随着木质素纤维的加入,地聚物石英晶相质量分数逐渐减小,莫来石晶相和类沸石晶相质量分数逐渐增加。因此,增加木质素纤维有助于 FCFBG 体系中莫来石和类沸石晶相的生成,同时也会促进石英晶相的转变。

表 2 FCFBG 晶相的质量分数分析结果 %

样品编号	石英	莫来石	类沸石
1#(0)	25.2	3.2	1.8
2#(0.1%)	21.5	5.2	2.5
3#(0.2%)	20.8	6.8	3.2
4#(0.3%)	19.6	8.2	3.6
5#(0.4%)	18.5	8.3	4.8
6#(0.5%)	17.9	8.5	6.2

从图 1d 可以看出:随着木质素纤维掺量增加,地聚物在 3440  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰增强,说明地聚物水化产物中的 Si—O—Al、Si—O—Si 骨架结构增多,C-S-H 凝胶占比增加,体系强度提高、韧性增大;1072  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰向低波数方向平移,发生红移,造成地聚物中的 Si—O 键部分被 Al—O 取代,形成新的结构更为稳定的化合物;800  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰消失,说明循环流化床和偏高岭土中的 Al 六配位体也参与了地聚物的水化反应;而地聚物中新出现的 710、833  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰分别对应 Si—OH 和 Al—O—Si 键的弯曲振动,这进一步印证了新化合物的生成。

### 2.3 木质素纤维对地聚物微观形貌的影响

FCFBG 的动力学模拟过程如图 2 所示。FCFBG 分子模型经过动力学模拟后,其体系稳定

性提高,体系自由能降低,分子间结构排列更加致密,呈现良好的力学特性。FCFBG 的动力学过程是一个动态过程,包括硅铝酸地聚物结构的变化、木质素的插入、木质素纤维改性地聚物结构的稳定性调整 3 个步骤。在 FCFBG 动力学模拟过程中会存在部分离子的析出和少量分子结构的微调整,但是不影响 FCFBG 整体结构和特性的改变,因此,本文不作考虑。掺入木质素纤维可减少 CFBG 表面孔隙,改变 CFBG 破坏形式,延长裂缝的扩展路径。

素纤维改性地聚物中含有大量结晶的类沸石结构和莫来石相,因而可显著改善地聚物整体力学特性。当木质素纤维掺量达到一定量时,木质素纤维可通过类沸石相和莫来石相的生成显著强化地聚物的微观形貌。

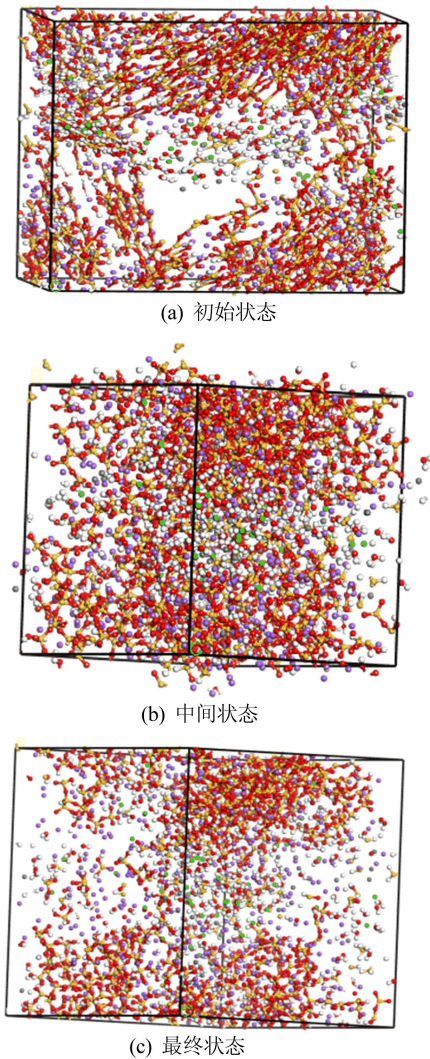
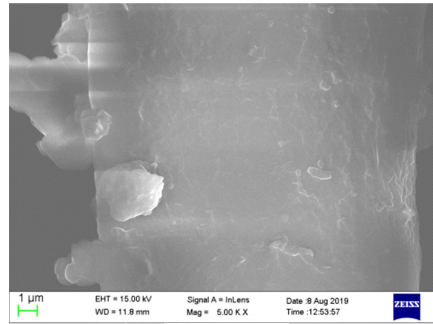


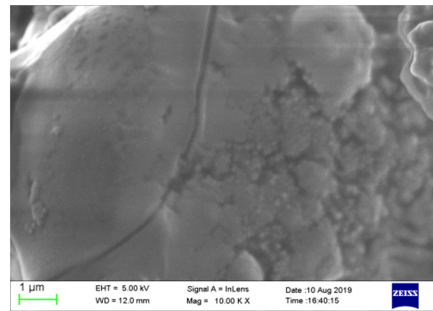
图 2 FCFBG 的动力学模拟过程

地聚物的扫描电子显微形貌如图 3 所示。由于实验选用的木质素纤维半径小、长度短,地聚物微观形貌中无法清晰地观测到纤维形貌。

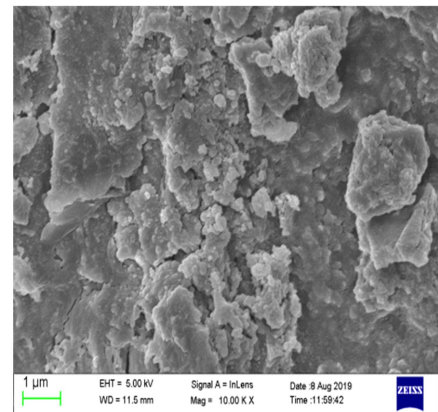
从图 3 可以看出,随着木质素纤维掺量增加,地聚物微观形貌致密度增加,地聚物表面毛刺显得更为明显,因此,木质素可提高地聚物表面平整度和表面形貌。从图 3c、图 3d 可以看出,木质



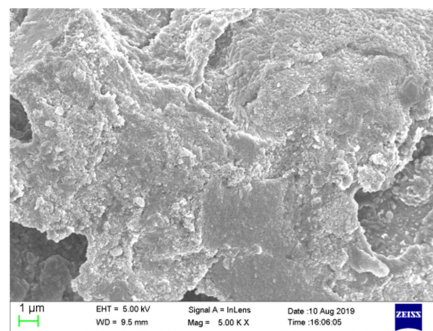
(a) CFBG



(b) 木质素纤维掺量 0.1% 时 FCFBG



(c) 木质素纤维掺量 0.2% 时 FCFBG



(d) 木质素纤维掺量 0.3% 时 FCFBG

图 3 地聚物的扫描电子显微形貌

为进一步量化分析不同木质素纤维掺量对地聚物微观形貌的影响,借助能谱仪评价地聚物材料微区元素,结果见表 3~表 6 所列。由表 3~表 6 可知,地聚物中主要含有 C、O、Na、Al、Si、Ca、Fe 等元素,其中 Ca、Fe 元素质量比较小,不超过 2%,其他元素质量比较大。由于 Fe 元素的存在,地聚物均具有磁性。随着木质素纤维掺量增加,地聚物 O、Si、Fe 元素质量比大致呈增加趋势,C 元素质量比逐渐减小;由此可知,木质素纤维可增强体系磁性,增加硅铝酸盐化合物(地聚物力学强度的主要提供者)含量,降低地聚物碳酸盐化合物的含量。因此,木质素纤维会显著改变地聚物微区元素质量比和元素分布,增强地聚物的磁性,提高地聚物力学强度。

表 3 CFBG 能谱分析结果 %

元素	质量比	原子数比
C	47.26	57.56
O	35.92	32.85
Na	7.28	4.63
Al	3.59	1.95
Si	5.48	2.85
Ca	0.39	0.14
Fe	0.07	0.02

表 4 木质素纤维掺量 0.1% 时 FCFBG 能谱分析结果 %

元素	质量比	原子数比
C	35.55	45.68
O	44.28	42.71
Na	6.72	4.51
Al	3.41	1.95
Si	8.02	4.41
Ca	1.75	0.67
Fe	0.26	0.07

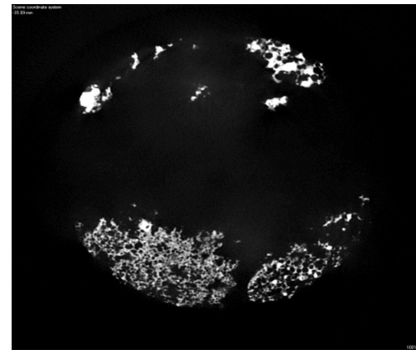
表 5 木质素纤维掺量 0.2% 时 FCFBG 能谱分析结果 %

元素	质量比	原子数比
C	19.42	27.43
O	50.91	53.99
Na	3.62	2.67
Al	11.67	7.34
Si	13.87	8.38
Ca	0.21	0.09
Fe	0.30	0.09

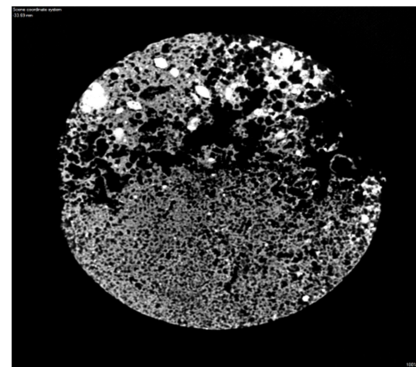
表 6 木质素纤维掺量 0.3% 时 FCFBG 能谱分析结果 %

元素	质量比	原子数比
C	18.21	26.72
O	38.43	42.33
Na	26.70	20.47
Al	5.68	3.71
Si	10.39	6.52
Ca	0.48	0.21
Fe	0.10	0.03

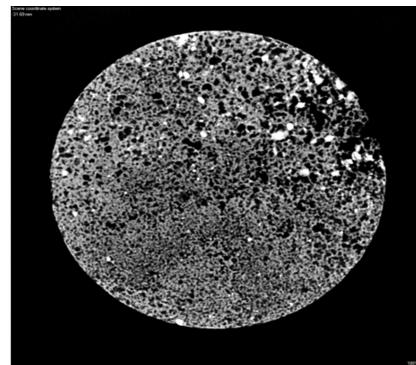
地聚物 CT 扫描显微形貌如图 4 所示。



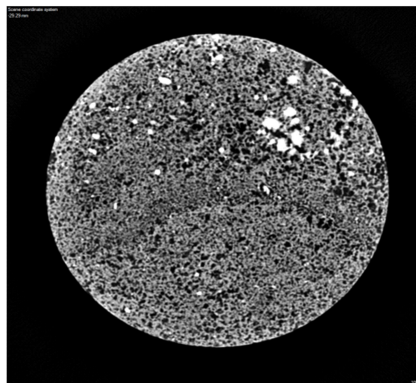
(a) CFBG



(b) 木质素纤维掺量 0.1% 时 FCFBG



(c) 木质素纤维掺量 0.2% 时 FCFBG



(d) 木质素纤维掺量 0.3% 时 FCFBG

图 4 地聚物 CT 扫描显微形貌

地聚物水化过程中内部结构及微观形貌的变化显示,随着水化的进行,地聚物孔隙由大变小,

水化产物 C-S-H 凝胶占比不断增加,体系力学强度增大,达到增强增韧的目的。

由于地聚物制备过程中加入了发泡剂,其内部富含孔隙,且多为不完全连通孔隙;发光泛白部分为未完全反应的原材料(电石渣),电石渣是地聚物强韧化过程中最不容易发生水化反应的材料。由图 4 可知,随着水化进程的持续,地聚物内部孔隙逐渐变小变细,强度和韧性不断提高。

此外,地聚物水化过程工业 CT 结果也很好地印证了上述分子模拟的结果。因此,可利用分子动力学模拟研究 FCFBG 强韧化过程中的结构变化、微观形貌变化及水化。

综上所述,FCFBG 强韧化机理主要包括 4 个阶段:① 溶剂阶段,铝硅酸盐原料中的 Si—O 键和 Al—O 键在碱激发剂的作用下发生断裂,并释放出硅铝四面体,溶剂贯穿于地聚物整个反应过程,且控制着整个反应的进行;② 扩散,溶出的硅铝四面体单体扩散到反应体系中;③ 缩聚,硅氧四面体和铝氧四面体通过聚合可形成不定形的一 Si—O—Al—O—结构或者生成沸石晶核;④ 硬化,发生脱水反应,形成具有力学强度的地聚物硬化体。地聚物 4 个阶段的反应是同时进行的,只是不同反应时间内起主导作用的阶段不同。

### 3 结 论

(1) 木质素纤维可改善地聚物的抗压强度、抗折强度和断裂韧性,提高地聚物的综合力学性能。

(2) 掺入木质素纤维可促进地聚物中莫来石晶相、类沸石晶体、C-S-H 凝胶的生成,提高地聚物力学强度相(类沸石和莫来石)的质量分数。

(3) 随着木质素纤维掺量增加,地聚物微观形貌致密度增加,地聚物表面毛刺更为明显,地聚物结构发生显著变化,特别是 C-S-H 结构。加入木质素纤维会改变地聚物径向分布函数的平均距离,降低地聚物结构的有序程度,增加地聚物分子内部的结合力,强化地聚物的力学性能。

### [参 考 文 献]

- [1] ZHOU X X, SHEN J M. Micromorphology and microstructure of coal fly ash and furnace bottom slag based lightweight geopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118168-1-118168-10.
- [2] 杨咏三, 詹炳根, 张悦. 氧化钙对偏高岭土基泡沫地聚物结构与性能的影响[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(8): 1102-1108.
- [3] 杨富花, 石膏爽, 栾晨晨, 等. 聚甲醛纤维增强地聚物再生混凝土的力学性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(5): 52-56, 70.
- [4] 杜雯, 张朝阳, 孔祥明, 等. 粉煤灰和粉煤灰水泥石的汞释放规律[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(8): 1116-1122.
- [5] DAVIDOVITS J, HUAMAN L, DAVIDOVITS R. Ancient organo-mineral geopolymer in South-American Monuments; organic matter in andesite stone; SEM and petrographic evidence [J]. *Ceramics International*, 2019, 45: 7385-7389.
- [6] 杨世玉, 赵人达, 曾宪帅, 等. 用自然纤维增强地聚物材料: 综述[J]. *材料导报*, 2021, 35(7): 7107-7113.
- [7] 简家成, 刘峥, 杨宏斌, 等. 地聚物凝胶材料制备及应用研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2014(3): 18-22.
- [8] 安颖丽. 氧化石墨烯表面修饰聚酰亚胺纤维增强地质聚合物复合材料的制备与研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [9] 赵欣, 周博宇, 赵献辉, 等. 棉花秸秆增强地聚物韧性的影响因素研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(12): 3758-3763.
- [10] RANJBAR N, ZHANG M Z. Fiber reinforced geopolymer composites: a review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107: 103498.
- [11] TAN J L, LU W L, HUANG Y T, et al. Preliminary study on compatibility of metakaolin-based geopolymer paste with plant fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 772-775.
- [12] 李梦圆. 纤维编织网增强地聚物砂浆加固钢筋混凝土板的常温 and 高温力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [13] 樊晋源, 姜屹, 王利民, 等. 剑麻-PVA 混杂纤维增强地聚物抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(5): 1430-1437, 1443.
- [14] 中国建筑材料联合会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 12-13.

(责任编辑 张淑艳)