



## 粉煤灰和烧结法赤泥制备地聚合物及其性能

刘诚, 周雨潇, 任浏祎, 杨思原, 包申旭

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室,  
湖北 武汉 430070)

**摘要:** 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。为实现粉煤灰和烧结法赤泥的综合利用, 本研究以粉煤灰为主要原料, 烧结法赤泥作为辅料, 氢氧化钠为碱激发剂协同制备地聚合物。结果表明, 地聚合物较佳制备条件为: 粉煤灰采取分级(细粒提取)的预处理方式, 分级粒径为 37  $\mu\text{m}$ , 细颗粒粉煤灰与烧结法赤泥质量比为 7:3 (g:g), 氢氧化钠的用量为前驱粉体的 15%, 此时地聚合物室温养护 28 d 的抗压强度可达 35.52 MPa, 满足中国《通用硅酸盐水泥》32.5R 矿渣硅酸盐水泥的强度标准。通过 XRF、XRD、ICP-OES 和 SEM-EDS 对不同预处理方式下的原料及其所制备的地聚合物进行分析测试表明: 相比于机械研磨, 分级预处理更能有效改善粉煤灰的反应性, 使更多活性硅铝组分参与地聚合反应; 烧结法赤泥的加入可以促进富钙铝硅酸盐凝胶的形成, 使地聚合物的微观结构致密化。本研究为粉煤灰和烧结法赤泥的综合利用提供了新的思路。

**关键词:** 陶瓷及复合材料; 粉煤灰; 烧结法赤泥; 综合利用; 地聚合物

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.019

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)05-0133-08

**引用格式:** 刘诚, 周雨潇, 任浏祎, 等. 粉煤灰和烧结法赤泥制备地聚合物及其性能[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 133-140.

LIU Cheng, ZHOU Yuxiao, REN Liuyi, et al. Preparation and properties of fly ash and sintering red mud-based geopolymers[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 133-140.

粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰, 是燃煤电厂排出的主要固体废弃物<sup>[1]</sup>。大量的粉煤灰如果不加处理, 就会产生扬尘, 污染大气; 若排入水系会造成河流淤塞, 而其中的有毒化学物质还会对人体和生物造成危害<sup>[2]</sup>。烧结法赤泥是指采用烧结法生产氧化铝过程排出的工业固体废弃物<sup>[3]</sup>。赤泥产生量受原矿品位、生产方法影响较大, 通常烧结法生产 1 t 氧化铝赤泥排放量要大于拜耳法。我国氧化铝企业主要采用露天筑坝堆存烧结法赤泥, 这种处置方式不仅需要占用大量土地, 还会对区域环境造成一定的影响<sup>[4]</sup>, 因此, 研究粉煤灰及赤泥等固废的综合利用可有效缓解资源衰竭的压力, 同时从根本上解决

固废堆存引发的环境问题。

粉煤灰中富含硅铝成分, 以粉煤灰为原料通过碱激发制备地聚合物是目前的研究热点, 地聚合物是 20 世纪 70 年代 Davidovits 开发的一种环保胶凝材料, 与普通硅酸盐水泥 (OPC) 相比, 它具有优越的机械性能, 强耐腐蚀性和耐高温性<sup>[5]</sup>。此外, 地聚合物的生产可以减少 80% 的二氧化碳排放, 从而使其成为 OPC 的可持续替代品<sup>[6]</sup>。然而, 粉煤灰中仍有大部分的硅铝存在于石英、莫来石等惰性矿物相中, 传统活化方式通常采用热活化、机械活化或碱热活化等将惰性矿物中高聚合态的 Si-O 结构和 Al-O 结构整体转变为高活性的硅酸盐、铝酸盐低聚合态单体<sup>[7]</sup>, 这一过程需消耗

收稿日期: 2023-12-07

作者简介: 刘诚 (1986-), 男, 研究员/博士生导师, 研究方向为矿物浮选界面化学, 浮选药剂, 非金属矿选矿, 固废综合利用。

大量能量和活化剂，且形成的凝胶结构界面键合作用较差，易形成孔隙和裂缝，导致胶凝材料性能劣化。此外，固化条件是影响粉煤灰基地聚合物抗压强度和微观结构发展的另一关键因素。高温下固化的粉煤灰基地聚合物在短期和长期测试中表现出优异的机械性能，而室温固化下粉煤灰基地聚合物的机械性能相对低劣，这限制了其在工程的应用前景<sup>[8]</sup>。

基于此，本研究以粉煤灰为原料，烧结法赤泥为辅料以期制备性能优异的地质聚合物。首先，采用机械研磨和分级提高粉煤灰的反应活性，对不同预处理方式下的粉煤灰进行了激光粒度仪、X 射线荧光光谱仪、X 射线衍射仪和电感耦合等离子体发射光谱仪测试，分析不同预处理方式对粉煤灰反应活性的影响。然后，将烧结法赤泥作为添加剂以改善粉煤灰基地聚合物室温养护下的抗压强度，并研究烧结法赤泥掺量和碱激发剂用量对地聚合物力学性能的影响。对具有代表性地聚合物样品进行 X 射线衍射和扫描电子显微镜及能谱测试，分析烧结法赤泥对地聚合物水化产物和微观结构的影响。

## 1 实验

### 1.1 原料与试剂

实验采用的粉煤灰和烧结法赤泥分别来自河南省焦作市某火力发电厂和铝冶炼厂。粉煤灰和

烧结法赤泥主要化学成分见表 1，粉煤灰的主要化学成分为 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，含量分别为 50.84% 以及 25.93%，这表明粉煤灰是一种高硅铝组分原材料。烧结法赤泥的主要化学成分是 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等，其富含制备地聚合物的有效成分氧化钙、二氧化硅和氧化铝等，成分占总量 60% 以上。图 1 中 XRD 分析可知粉煤灰中主要物相为石英、莫来石、赤铁矿、方解石和大量的无定形玻璃相；烧结法赤泥中主要物相为方解石、硅酸二钙、钙钛矿、三水铝矿及少量非晶物质。图 2 以及表 2 中激光粒度仪分析可知未经预处理的粉煤灰粒度主要分布在 2.237 μm (D10) 和 104.069 μm (D90) 之间，颗粒粒度组成的中位径 (D50) 为 25.582 μm。磨细后的烧结法赤泥粒度主要分布在 1.269 μm (D10) 和 170.847 μm (D90) 之间，颗粒粒度组成的中位径 (D50) 为 13.567 μm。本次研究碱激发剂为分析纯氢氧化钠。

### 1.2 地聚合物的制备

将粉煤灰和烧结法赤泥在 80 °C 烘箱中烘干 24 h，对烘干后的粉煤灰进行不同方式的预处理。其中分级采用湿选法分选，分选后的粗细粉煤灰颗粒需要在 80 °C 烘箱中下烘干 24 h 才能进一步实验。将烧结法赤泥在振磨机中研磨 20 s，然后和预处理粉煤灰均匀混合得到前驱粉体；将前驱粉体、NaOH 溶液 (5 mol/L) 和水均匀搅拌 2 min 得到浆料，控制浆料的流动性为 120~130 mm；然

表 1 原料主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of raw materials

名称	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	其他	烧失量
粉煤灰	50.84	25.93	5.50	4.03	2.63	1.15	0.54	0.59	1.63	7.16
烧结法赤泥	18.43	7.36	7.04	36.46	1.22	2.77	2.05	2.56	1.68	20.43

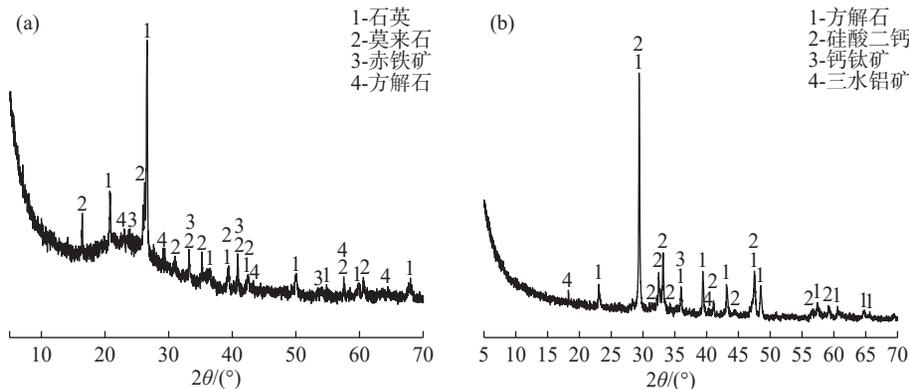


图 1 粉煤灰 (a) 与烧结法赤泥 (b) 的 XRD  
Fig.1 XRD of fly ash (a) and sintered red mud (b)

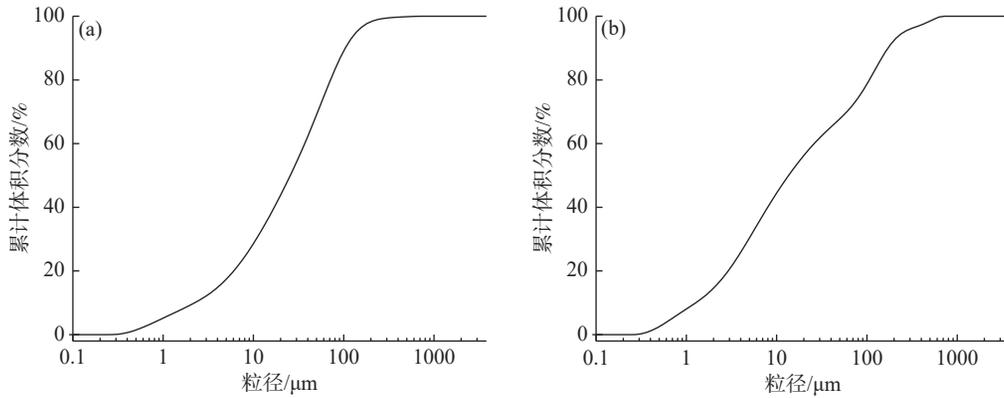


图2 粉煤灰 (a) 与烧结法赤泥 (b) 的粒径分布  
Fig.2 Particle size distribution of fly ash (a) and sintered red mud (b)

表2 粉煤灰和烧结法赤泥的粒度分布/ $\mu\text{m}$   
Table 2 Particle size distribution of fly ash and sintered red mud

名称	D10	D50	D90
粉煤灰	2.237	25.582	104.069
烧结法赤泥	1.269	13.567	170.847

后浇筑到  $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$  的聚四氟乙烯塑料模具中振动成型；再在室温下养护 24 h 脱模后，继续室温养护至规定龄期得到地聚合物产品。

### 1.3 碱浸实验

碱浸实验用于测定样品中活性 Si 和 Al 的含量，可以通过样品中溶解的 Si 和 Al 来评估。首先，将 1 g 样品加入到装有 40 mL NaOH 溶液 (5 mol/L) 的烧杯中，使用磁力搅拌器在室温下搅拌 3 h。然后，在搅烧杯中加入 15 mL HCl(37%)，搅拌 30 min 后将浸出液过滤。

### 1.4 表征与测试

采用 YES-100 型液压式压力实验机对养护至 3 d、7 d 和 28 d 的地聚合物产品进行抗压强度测试，每组抗压强度取 3 个试样的平均值。将破碎后的地聚合物样品在无水乙醇中浸泡 24 h 以终止地聚合物的水化反应，浸泡过后的地聚合物样品需要在烘箱中  $80\text{ }^\circ\text{C}$  下烘干 24 h 才能进行下一步的表征。采用激光粒度仪 (Mastersizer 2000 型) 对试样进行粒度分析；采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF, Zetium 型) 对试样进行化学成分分析。对浸出实验中的硅和铝离子的浓度则采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Prodigy 7 型) 进行元素的检测；采用 X 射线衍射仪 (XRD, D8 Advance 型) 对研究过程中的原料

及地聚合物样品的矿物相组成进行分析；使用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-IT300 型) 观察地聚合物产品的微观形貌，并通过能量色散光谱仪 (EDS) 对试样中的硅、铝、钙、钠和氧元素的分布及微区元素组成进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同预处理方式对地聚合物性能的影响

#### 2.1.1 抗压强度

采用单因素控制变量法，固定氢氧化钠用量为前驱粉体的 15%，探究机械研磨和分级 (细粒提取) 这两种预处理方式对粉煤灰基地聚合物抗压强度的影响。由图 3 可知，随着机械研磨时间的增长，粉煤灰基地聚合物抗压强度整体上呈先增后减的趋势。粉煤灰经机械研磨后粒径得到有效减小，比表面积增大，使得其反应接触面增加，表面特性得以明显改善<sup>[9]</sup>。当机械研磨时间为 1 min 时，地聚合物 28 d 抗压强度值达到极大值为 20.77 MPa，抗压强度较未处理粉煤灰提升 27%。当粉煤灰颗粒经过长时间研磨后，由于体系的颗粒太小，与碱性溶液反应时，生成的凝胶成分难以连接到团聚的颗粒，使其难以形成密集堆叠的微观结构<sup>[2]</sup>。

分级预处理的活性提升效果更显著，当分级粒径为  $37\text{ }\mu\text{m}$  时，细颗粒粉煤灰基地聚合物 28 d 抗压强度达到极大值 26.56 MPa。抗压强度较未处理粉煤灰提升 62%。这是由于分级预处理极大限度地分离了大量惰性矿物，得到活性更高的细颗粒粉煤灰。尽管大约 40% 的粗颗粒被分离出来，但它们仍可通过传统活化手段加以二次利用。本

研究中经分级预处理分离出来的粗颗粒粉煤灰既可作为混凝土等建材骨料，也可通过机械活化和碱热活化协同处置后作为“类水泥”的一体化前驱粉体使用。

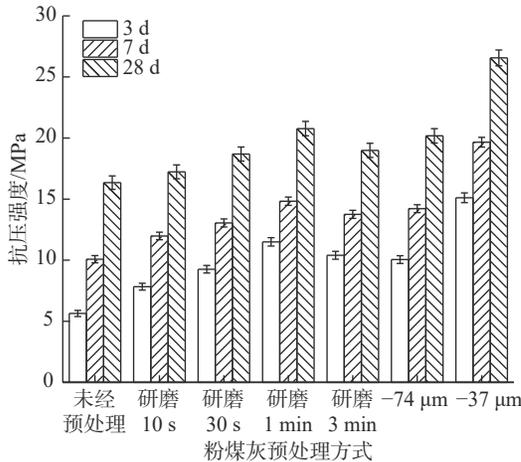


图3 粉煤灰预处理方式对地聚合物抗压强度的影响  
Fig.3 Effect of fly ash pretreatment method on compressive strength of geopolymer

### 2.1.2 粉煤灰反应活性

对具有代表性的原料样品进行激光粒度仪、XRF、XRD 分析和碱浸实验，以进一步探究预处理方式对粉煤灰反应活性的影响<sup>[10]</sup>。测试结果显示粗、细和未经预处理的粉煤灰颗粒在化学成分（表3）、石英衍射峰强度和硅铝浸出量上均存在显著差异。这是由于粉煤灰不同粒径间反应活性差异显著，较小的粉煤灰颗粒具有高度玻璃化的成分，粉煤灰在形成过程中小颗粒比大颗粒淬火得更快<sup>[11]</sup>。

测试结果还表明，机械研磨可以提升粉煤灰

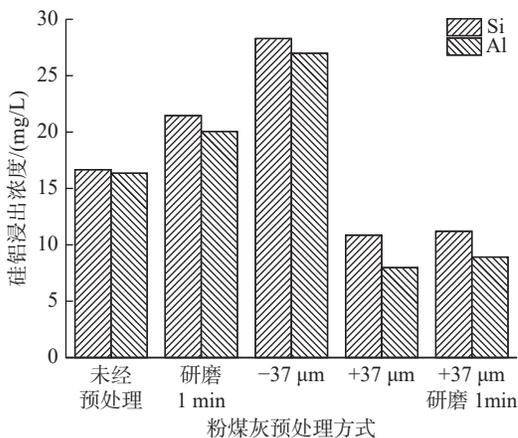


图4 粉煤灰在不同预处理方式下的硅铝浸出量  
Fig.4 Silicon aluminum leaching amount of fly ash at different pretreatment methods

的活性（图4），因为机械研磨后粉煤灰粒径减小，比表面积增大，反应接触面增加，表面特性得以明显改善。但是活性提升不够显著是由于机械研磨的过程导致了石英峰的增强（图5）。因此，机械研磨较佳条件下的粉煤灰与分级后粒径-37 μm 的粉煤灰具有相近的粒径分布（图6），但机械研磨的活性提升效果远不如分级（图4）。这说明减小粒径并不能显著提高粉煤灰基地聚合物抗压强度，粉煤灰颗粒本身的活性才是决定性

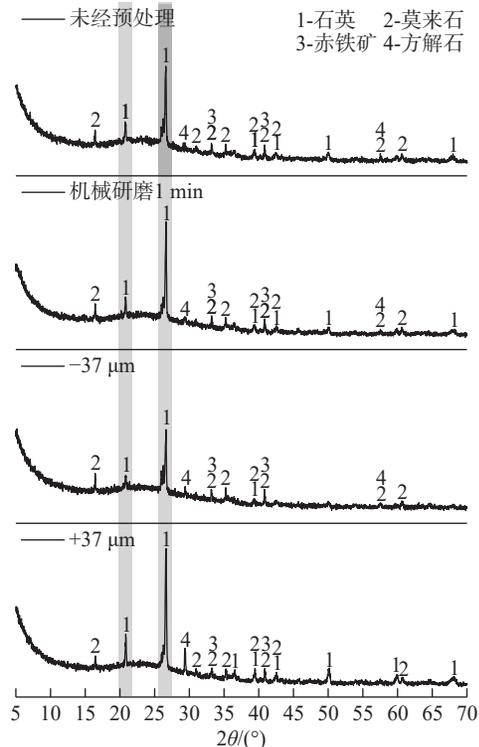


图5 粉煤灰在不同预处理方式下的 XRD  
Fig.5 XRD of fly ash at different pretreatment methods

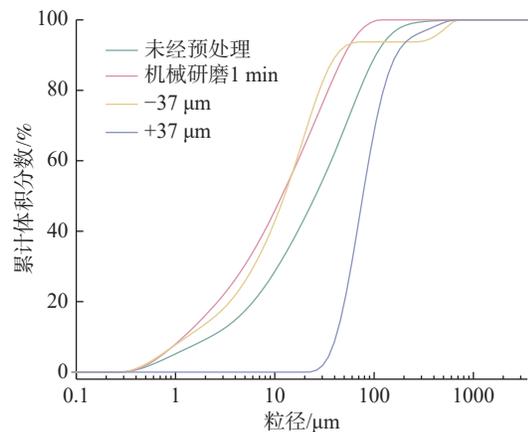


图6 粉煤灰在不同预处理方式下的粒径分布  
Fig.6 Particle size distribution of fly ash at different pretreatment methods

表3 粉煤灰在不同预处理方式下的化学成分/%  
Table 3 Chemical composition of fly ash at different pretreatment methods

预处理方式	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	其他	烧失量
未经预处理	50.84	25.93	5.50	4.03	2.63	1.15	0.88	0.59	7.16	1.29
研磨1 min	52.85	24.98	4.56	3.76	2.26	1.09	0.94	0.63	7.85	1.08
-37 μm	52.00	28.04	5.32	3.39	2.36	1.25	0.97	0.64	5.06	0.97
+37 μm	51.67	22.92	5.32	4.67	2.38	1.16	0.87	0.61	9.16	1.24

因素。此外，对粗颗粒粉煤灰进行机械研磨后，硅铝浸出量几乎没有提升（图4）。

以上现象归因于机械研磨过程不仅对高活性的细颗粒粉煤灰几乎没有增益效果，而且对粗颗粒粉煤灰的活性提升不明显。而且，研磨过程中粗颗粒粉煤灰的破碎还会释放出杂质，进而消耗用于碱激发反应的碱性试剂。该过程降低了高活性细颗粒粉煤灰与碱碰撞的概率，导致地聚合物产品性能劣化<sup>[12]</sup>。

## 2.2 烧结法赤泥和碱用量对地聚合物性能的影响

### 2.2.1 烧结法赤泥对地聚合物力学性能的影响

固定氢氧化钠用量为前驱粉体的15%，采取分级的预处理方式得到粒径-37 μm的细颗粒粉煤灰，分别用10%、20%、30%、40%、50%和60%的烧结法赤泥置换细颗粒粉煤灰，探究烧结法赤泥对粉煤灰基地聚合物力学性能的影响。由图7可知，随着烧结法赤泥掺量的增加，粉煤灰基地聚合物抗压强度整体上呈先增后减的趋势。随着烧结法赤泥掺量由0提高至30%，地聚合物28 d抗压强度由26.56 MPa增长至35.52 MPa。这是因为烧结法赤泥中富含的活性钙源在水化过程

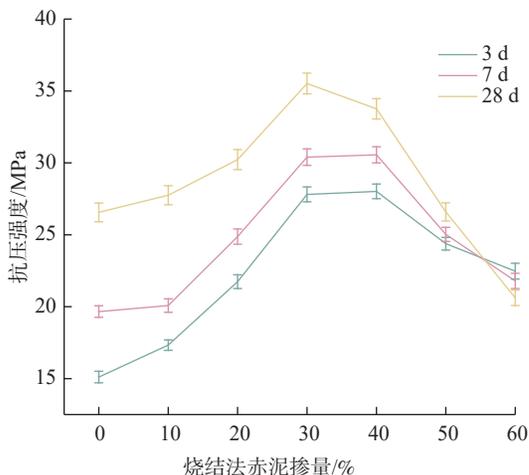


图7 烧结法赤泥对粉煤灰基地聚合物抗压强度的影响  
Fig.7 Effect of sintered red mud on the compressive strength of fly ash-based polymers

大量放热，加速了粉煤灰中硅铝组分的溶出。此外，Ca<sup>2+</sup>的引入诱导了富钙硅铝酸盐凝胶的形成，可为其他复杂凝胶的沉淀提供成核位点，多种凝胶相的交织有利于增强地聚合物的力学性能<sup>[13]</sup>。但随着烧结法赤泥掺量的继续增加，地聚合物的抗压强度逐渐下降。上述现象可能是由于，大量的水化热使得浆体快速凝固，使得地聚合物的不良孔结构增多且难以形成致密的微观结构。同时由于原料无法提供足够的活性硅铝组分，不能继续生成复杂凝胶相，因此当烧结法赤泥的掺量超出30%时，地聚合物抗压强度出现了下降。

### 2.2.2 碱用量对地聚合物力学性能的影响

固定烧结法赤泥的掺量为30%，采取分级的预处理方式得到粒径-37 μm的细颗粒粉煤灰，探究氢氧化钠用量对粉煤灰基地聚合物抗压强度的影响。由图8可知，随着氢氧化钠用量的增加，地聚合物抗压强度总体上呈先增后降的趋势。当氢氧化钠用量为5%时，地聚合物抗压强度很低，28 d抗压强度值仅为6.23 MPa，因为在聚合反应前期未活化的粉煤灰无法提供充足的活性硅铝组分，导致凝胶产物聚合程度低，凝胶数量少，地聚合物抗压强度低。当氢氧化钠用量逐渐增加

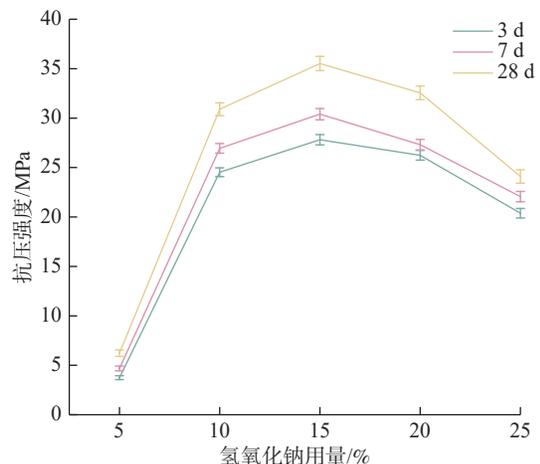


图8 氢氧化钠对粉煤灰基地聚合物抗压强度的影响  
Fig.8 Effect of sodium hydroxide on compressive strength of fly ash-based polymers

时，加速了粉煤灰中硅铝组分的溶解，促进了地聚合物反应，显著提高地聚合物的抗压强度，当氢氧化钠用量为 15% 时，地聚合物 28 d 抗压强度值达到极大值为 35.52 MPa。但是当氢氧化钠用量超出 15% 时，金属离子  $\text{Na}^+$  增多，使得地聚合物表面逐渐产生“泛霜”现象，降低了地聚合物试样的抗压强度<sup>[14]</sup>。

### 2.2.3 矿物相组成分析

较佳赤泥掺量条件下地聚合物试样的 XRD 分析见图 9。相比于原料，地聚合物中石英和莫来石的特征衍射峰明显减弱，表明这两种矿物相在地聚合过程中部分溶解并参与到了地聚合反应过程中。大量研究表明地聚合物的 XRD 图谱中在  $2\theta=20\sim 35^\circ$  处的驼峰与地聚合物中无定型硅铝酸盐凝胶的形成有关<sup>[15]</sup>。除此之外，样品中 C-S-H 凝胶的形成表明烧结法赤泥中的富钙相参与了地聚合反应。其原因是： $\text{Ca}^{2+}$  引入可以为复合体系的凝胶相提供非均相的成核中心，增加固体颗粒与可溶性硅酸盐溶液碰撞概率，从而加速 Si 和 Al 的溶解。

### 2.2.4 微观结构分析

图 10 是不同烧结法赤泥掺量下地聚合物试样横截面的 SEM 图。其中地聚合物 M1 的烧结法赤泥掺量为 30%，地聚合物 M2 的烧结法赤泥掺量为 60%。从图 10 中不难发现，M1 中的孔洞较少，整个基体被水化产物包裹，形成了结构致密

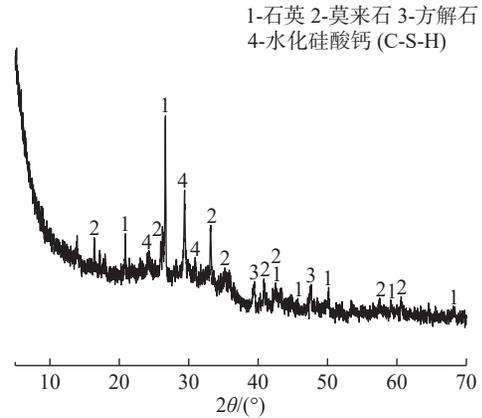


图 9 较佳赤泥掺量条件下地聚合物的 XRD  
Fig.9 XRD of geopolymer at optimum red mud doping condition

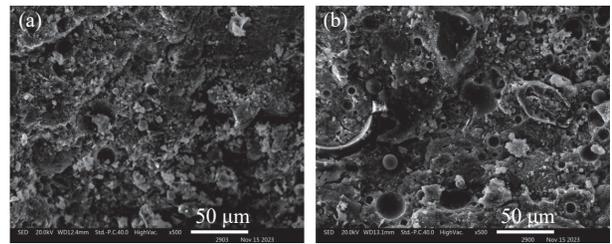


图 10 地聚合物样品 M1(a) 和 M2(b) 的 SEM  
Fig.10 SEM of geopolymer samples M1 (a) and M2 (b)

的凝胶整体；而 M2 中有大量的孔洞，并且凝胶产物分布不均匀。造成上述结果的原因是富钙相的进一步增加虽然可以加速地聚合反应，然而提供 Si 相和 Al 相的细颗粒粉煤灰将显著减少，从而导致生成的硅铝凝胶相减少，难以形成致密的微观结构。图 11 是地聚合物样品 M1 的 EDS 结果。可

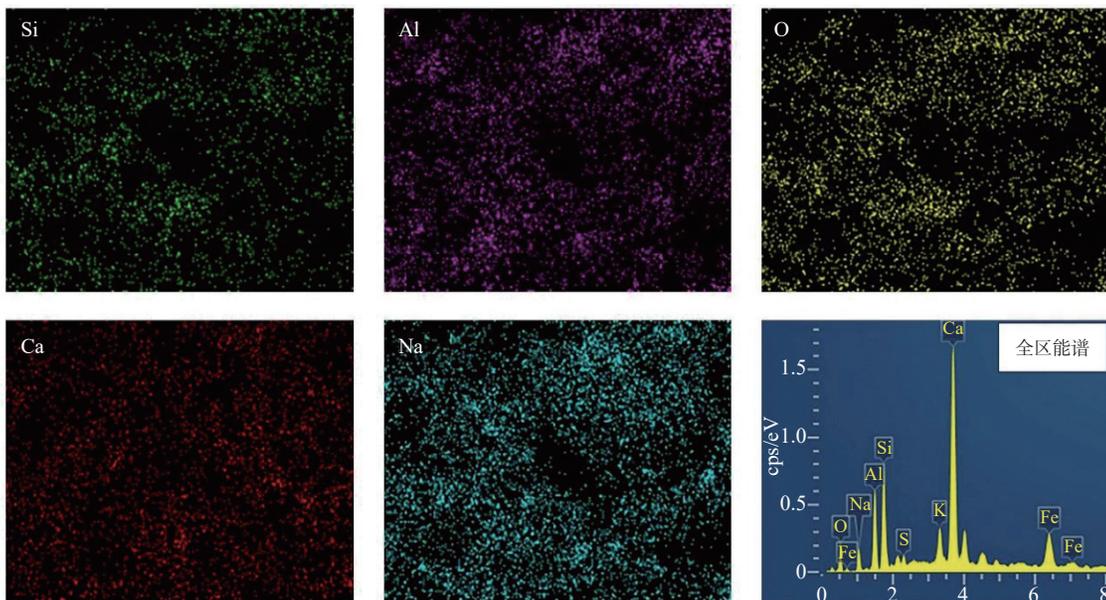


图 11 地聚合物样品 M1 的 EDS  
Fig.11 EDS of geopolymer sample M1

以观察到, 富含 Ca、Na、Si 和 Al 元素的地质聚合物凝胶均匀地分布在样品的基体中, 表明地聚合物中形成了大量的富钙硅铝酸盐凝胶, 它是碱活化高钙材料的主要水化产物。EDS 的分析结果与 XRD 分析结果相吻合, 烧结法赤泥中的含钙化合物在碱性条件下溶出形成  $\text{Ca}^{2+}$ , 随后与粉煤灰中在碱性条件下溶出的  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  和  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  反应形成 C-S-H 凝胶和其他富钙硅铝酸盐凝胶<sup>[6]</sup>。

### 3 结 论

(1) 粉煤灰采取分级(细粒萃取)的预处理方式, 分级粒径为 37  $\mu\text{m}$ , 细颗粒粉煤灰与烧结法赤泥的质量比为 7:3, 氢氧化钠的用量为前驱粉体的 15%, 此时地聚合物 28 d 的抗压强度值为 35.52 MPa, 可达到《通用硅酸盐水泥》(GB—175/2007)中 32.5R 矿渣硅酸盐水泥的强度标准。

(2) 激光粒度仪、XRF、XRD 和 ICP 的分析结果表明, 机械研磨和分级(细粒提取)均可改善粉煤灰的反应活性。相比于机械研磨, 分级预处理能够实现高活性粉煤灰颗粒的富集, 使更多的活性硅铝组分参与到地聚合反应过程中, 是一种更为有效的原料预处理手段。

(3) 适量烧结法赤泥的掺入可诱导富钙硅铝酸盐凝胶的形成, 致密化了地聚合物的微观结构, 从而改善了地聚合物在室温下的力学性能。

### 参考文献:

[1] 聂铁苗, 夏淼, 刘攀攀, 等. 粉煤灰基矿物聚合材料研究进展[J]. 矿产综合利用, 2022(4):123-128.  
NIE Y M, XIA M, LIU P P, et al. Research progress on fly ash based geopolymer[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(4):123-128.  
[2] XU X Q, BAO S X, ZHANG Y M, et al. Role of particle fineness and reactive silicon-aluminum ratio in mechanical properties and microstructure of geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 313 (2021) 125483.  
[3] 秦磊, 包申旭, 张一敏, 等. 页岩提钒尾渣-赤泥混合煅烧制备地聚合物研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(4):51-56.  
QIN L, BAO S X, ZHANG Y M, et al. Preparation of geopolymer from vanadium tailings and red mud by mixed calcination[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2020(4):51-56.  
[4] WANG S H, JIN H X, DENG Y, et al. Comprehensive

utilization status of red mud in China: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125136.  
[5] LAHOTI M, WIJAYA S F, TAN K H, et al. Tailoring sodium-based fly ash geopolymers with variegated thermal performance[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 107:103507.  
[6] 郑戈弋, 周海林, 黄青叶, 等. 燃煤渣花岗岩粉基地聚合物的制备[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(9):133-139.  
ZHENG G Y, ZHOU H L, HUANG Q Y, et al. Preparation and performance characterization of granite powder-burnt cinder-based geopolymer[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2022(9):133-139.  
[7] NATH S K, KUMAR S. Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117294.  
[8] HUANG L X, LI C L, WANG H B, et al. Research progress on comprehensive utilization of red mud[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021(1):12-21.  
[9] 梁晓杰, 常钧, 吴昊泽. 钢渣粉粒度对复合胶凝材料水化性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(3):180-186.  
LIANG X J, CHANG J, WU H Z. Effect of particle size of steel slag powder on hydration performance of composite cementitious material[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):180-186.  
[10] 聂铁苗, 陈阳, 翟培鑫, 等. 粉煤灰中非晶相含量定量分析研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(1):121-126+132.  
NIE Y M, CHEN Y, ZHAI P X, et al. Research progress of quantitative determination of the amorphous phase in fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(1):121-126+132.  
[11] RICKARD W D A, WILLIAMS R, TEMUJIN J, et al. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications[J]. Materials Science and Engineering, 2011, 528: 3390-3397.  
[12] RIESSEN A V, CHEN-TAN. Beneficiation of Collie fly ash for synthesis of geopolymer: Part 1 - Beneficiation[J]. Fuel, 106 (2013) 569-575.  
[13] 李建伟, 杨久俊, 王晓, 等. 烧结法赤泥资源特性分析[J]. 无机盐工业, 2013, 45(3):42-44.  
LI J W, YANG J J, WANG X, et al. Research on resource characteristics of red mud from sintering process[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2013, 45(3):42-44.

[14] LEE W, DEVENTER J V. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 577-584.

[15] DEVENTER J S, PROVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products[J]. Journal of Hazardous

Materials, 2007, 139: 506-513.

[16] 徐贤庆, 包申旭, 张一敏, 等. 页岩提钒尾渣基地聚合物的制备及其性能[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(11):3668-3676.

XU X Q, BAO S X, ZHANG Y M, et al. Preparation and performance of polymer based on shale vanadium extraction tailings[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11):3668-3676.

## Preparation and Properties of Fly Ash and Sintering Red Mud-based Geopolymers

LIU Cheng, ZHOU Yuxiao, REN Liuyi, YANG Siyuan, BAO Shenxu

(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources of Ministry of Education, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** This is an article in the field of inorganic non-metallic materials. To achieve comprehensive utilization of fly ash and sintering red mud, this study uses fly ash as the main raw material, sintering red mud as an auxiliary material, and sodium hydroxide as an alkaline activator to synergistically prepare geopolymer. The results showed that the optimal preparation conditions for geopolymer were as follows: fly ash was pretreated with a classification pretreatment (extraction of fine fraction), with a graded particle size of 37 μm. The mass ratio of fine-grained fly ash to sintering red mud is 7:3 (g:g), and the dosage of NaOH accounts for 15% of the mass of the precursor powder. The compressive strength of the geopolymer prepared at these conditions reached 35.52 MPa after curing at room temperature for 28 d, meeting the strength standard of 32.5R slag portland cement in the Common Portland Cement of China. The raw materials and geopolymers prepared at different pretreatment methods were analyzed and tested using XRF, XRD, ICP-OES, and SEM-EDS. The test results showed that compared to mechanical grinding, classification pretreatment can effectively improve the reactivity of fly ash, allowing more active silicon and aluminum components to participate in geopolymerization reactions. The addition of sintering red mud can promote the formation of calcium-rich aluminosilicate gel and densify the microstructure of geopolymers. This study provides new insights into the comprehensive utilization of fly ash and sintering red mud.

**Keywords:** Ceramics and composites; Fly ash; Sintering red mud; Comprehensive utilization; Geopolymer



欢迎投稿 欢迎订阅