

赤泥基地聚物固化飞灰的试验研究

从军军^{1*}, 张胜军^{1,2}, 成岳¹, 吴辉勇^{1,3}, 向玲⁴, 谢振威¹

¹景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇

²江西墨塔科技股份有限公司, 江西 景德镇

³上饶师范学院化学与环境科学学院, 江西 上饶

⁴江西景江安全环保技术有限公司, 江西 景德镇

收稿日期: 2024年2月6日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年5月10日

摘要

在分析生活垃圾焚烧飞灰和赤泥物理化学性能的基础上, 利用赤泥、碱激活剂和垃圾焚烧飞灰制备地聚物。通过正交实验法得到最佳组分配方: 40% wt飞灰, 10% wt NaOH, 50% wt赤泥, 在水灰比为0.5、活化温度为800℃和60%湿度20℃恒温的条件下, 养护14天后的抗压强度可达1.6 MPa。赤泥固化飞灰后的地聚物渗滤液中的中重金属达到《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008)。制备的地聚物X射线衍射(XRD)分析得出含石英, 钙铝黄长石, 钙凡石, 赤铁矿和石灰石等。扫描电镜(SEM)表征分析为不完整的细小致密的孔洞状网络结构, 进一步验证地聚合物利用其类沸石结构可以把重金属包围在空腔内或被吸附而包容在聚合物中, 进而固化飞灰中的重金属。

关键词

地聚物, 赤泥, 飞灰, 重金属, 固化

Experimental Study on Polymer Solidification Fly Ash in Red Mud Base

Junjun Cong^{1*}, Shengjun Zhang^{1,2}, Yue Cheng¹, Huiyong Wu^{1,3}, Ling Xiang⁴, Zhenwei Xie¹

¹School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen Jiangxi

²Jiangxi Mortar Technology Co., Ltd., Jingdezhen Jiangxi

³School of Chemistry and Environmental Sciences, Shangrao Normal University, Shangrao Jiangxi

⁴Jiangxi Jingjiang Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jingdezhen Jiangxi

Received: Feb. 6th, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: May 10th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 从军军, 张胜军, 成岳, 吴辉勇, 向玲, 谢振威. 赤泥基地聚物固化飞灰的试验研究[J]. 世界生态学, 2024, 13(2): 120-128. DOI: 10.12677/ije.2024.132016

Abstract

Based on the analysis of the physical and chemical properties of domestic waste incineration fly ash and red mud, the paper uses red mud, alkali activator and garbage incineration fly ash to prepare ground polymers. The optimal group formula was obtained by orthogonal experimental method: 40% wt fly ash, 10% wt NaOH, 50% wt red mud, under the conditions of water ash ratio of 0.5, activation temperature of 800°C and 60% humidity of 20°C constant temperature, the compressive strength after 14 days of maintenance can reach 1.6 MPa. The medium and heavy metals in the ground polymer leachate after the solidification of the red mud meet the sanitary landfill standard of waste incineration fly ash (GB16889-2008). The prepared polymer X-ray diffraction (XRD) analysis yielded quartz—containing quartz, calcium-aluminum-yellow feldspar, calcium-vanite, hematite and limestone. Scanning electron microscopy (SEM) characterization and analysis of intact fine, dense, orophobic network structures further validates that the polymer can use its zeolite-like structure to enclose heavy metals in cavities or be adsorbed and encapsulated in polymers, thereby curing heavy metals in fly ash.

Keywords

Ground Polymer, Red Mud, Fly Ash, Heavy Metal, Curing

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来,随着人们生活水平的提高,城镇生活垃圾[1]数量也随之巨幅增加,垃圾处理量保持不断增长的趋势。导致飞灰量不断增加。飞灰是指在生活中垃圾焚烧的过程中,通过烟气净化系统或者热回收利用系统等收集、余留下来的产物,被《国家危险废物名录》规定为危废。飞灰主要含有二噁英、重金属和氯元素等物质[2],飞灰中的 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Hg 等元素[3],极易通过食物链转移到人体体内,危害人体健康。目前,中外常用的飞灰固化/稳定化技术包括水泥固化[4]、沥青固化[5]、化学药剂稳定法[6]和热处理等[7]。由于与上述方法相比,垃圾焚烧飞灰的二氧化碳排放量更低,耐久性更好,因此地聚合物技术已被用于飞灰的稳定化中。

此外,我国制铝业产量十分巨大,每年的氧化铝产量大约占全球总量的 1/3。赤泥是生产氧化铝的残渣[8],生产 1 t 的氧化铝顺带产出 1.0~2.0 t [9]的赤泥。自 1890 年至 1900 年,制铝行业兴起,至 2007 年,全球赤泥储备量已达 27 亿吨,并以每年 1.2 亿吨的速度持续增加,由于我国制铝行业的蓬勃发展,氧化铝的产量也逐年提高,赤泥废渣的产量也逐步提高。时至今日,我国的赤泥储备量早已达数十亿吨。对于工业废物赤泥的处置方式而言,国外方面,制铝工厂对于赤泥的处置方式大多是筑坝堆放或临海倾倒。国内赤泥的处置方式是露天筑坝堆放,国内处理方式不仅将本身的强碱性及赋存其内的游离态金属离子浸出到堆放处周边土地,更为重要的是造成地下水污染,占用大量的土地资源。当前,赤泥的资源化利用主要围绕在生产建筑材料,但作为建材材料,赤泥中重金属浸出造成的危害污染无非是将环境问题拖延十几年。因此寻找多方面途径消耗和利用赤泥显得十分必要。

本文在分析生活垃圾焚烧飞灰和赤泥物理化学性能的基础上,利用废物赤泥、碱激活剂和垃圾焚烧

飞灰制备地聚合物。通过正交实验法得到最佳组分配方。探究随着温度上升,碱性活化剂添量、水灰比的增大对合成的地聚合物强度的影响。制备出的地聚物 X 射线衍射(XRD)分析得出含石英,钙铝黄长石,钙凡石,赤铁矿和石灰石等。扫描电镜(SEM)表征分析为不完整的细小致密的孔洞状网络结构,进一步验证地聚合物利用其类沸石结构可以把重金属包围在空腔内或被吸附而包容在聚合体中。与制备好的地聚合物中重金属含量相比,飞灰浸出超标的铅、镉含量由 0.6、124 mg/L 降低至 0.2、54 mg/L,汞、砷、硒、铬、铜、铍、镍等含量均有所降低,达到《GB16889-2008》标准限值。为未来飞灰的无害化处理打下基础。

2. 实验部分

2.1. 原材料与仪器

赤泥:取自洛阳某地赤泥,需将赤泥进行预处理,制备成赤泥粉,赤泥粉过筛(100 目),加碱放置电炉进行高温活化煅烧;飞灰:取自江西某垃圾焚烧厂,为粉末状,无需过筛烘干等预处理;去离子水:实验室自制;氢氧化钠、乙酸溶液、纯水:均来自上海阿拉丁生化科技股份有限公司冷场发射扫描电子显微镜(JSM-6700F,日本电子);X 射线多晶体衍射仪(德国布鲁克);傅立叶红外光谱仪(Nicolet 5700,美国热电)。

SX3-4-10 型马弗炉;D8-ADVANCE 型 X-RAD 仪(德国 Bruker 公司);KYKY-1000B 型扫描电镜(中国科学院仪器中心);FA1004B 型电子天平;LHS-250SC 型恒温恒湿箱;DTG-60H 型差热-热重分析仪(日本岛津公司);Nicolet 5700 型傅立叶红外光谱仪美国热电;SHA-A/B 型水浴振荡器;ICP-MS7700 型等离子体质谱仪。

2.2. 实验内容

2.2.1. 初步探究实验配方

正交实验可以同时考察几个影响因素。使用正交实验选取四个影响因素,每个因素选取三个水平。具体情况见表 1。采用 L9 (34)设计表格每个配方做 2 个 $4 \times 4 \times 4$ cm 的立方体试块,测其 14 天的抗压强度,记录下来。

Table1. The scheme of factors and levels

表 1. 因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
A 活化温度	700℃	750℃	800℃
B NaOH 掺量	5%	10%	15%
C 固化剂掺量	45%	52.5%	60%
D 水灰比	0.4	0.5	0.6

2.2.2. 实验过程

1) 制备固化剂:将足量赤泥研磨成粉末,过 40 目筛,将赤泥粉末分 3 组放入烘箱烘干 2 h,分别掺入 5 wt%、10 wt%、15 wt%的 NaOH 备用,随后根据正交表,将上述三组每组分三份共 9 组别放入电炉在 700℃、750℃、800℃的温度区间之间煅烧活化,冷却后得到 9 组固化剂;

2) 混合制备:将步骤(1)中制备的 9 组固化剂分别按照掺量为 45 wt%、52.5 wt%、60 wt%(占混合物

重量)的比例和飞灰混合后得到混合物,将所得混合物粉末按液固比 0.4、0.5、0.6 加水搅拌均匀得到净浆;

3) 固化成型:将步骤(2)中制备的净浆放入预先准备好的 $4 \times 4 \times 4$ cm 的钢制模具中,每组两个样品,共 9 组 18 个样。再将填充好的模具在自然条件下进行固化,固化时间 1~2 天;

4) 脱模养护:将固化成型的 18 份样品放入恒温恒湿箱养护,养护时长为 14 天,养护条件为 20℃和 60%湿度环境。通过上述四个步骤,探究不同煅烧活化温度、用碱量,水灰比三个关键因素对制备地聚合物的强度影响,设置正交实验,测试得到最优条件下低聚物的强度大小。

3. 结果与讨论

3.1. 赤泥飞灰矿物组成分析

Table 2. Chemical composition and mass percentage of red mud fly ash
表 2. 赤泥飞灰化学组成及其质量百分比

化学组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl
洛阳赤泥	21.12	21.49	16.84	12.14	0.54	1.74	8.25	0.18	1.42	/
景圣飞灰	22.46	10.93	4.53	26.56	3.45	2.17	3.79	3.91	2.98	3.85
化学组成	MnO	TiO ₂	SrO	ZnO	PbO	Cr ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	CuO	IL
赤泥	0.06	3.52	0.07	0.01	0.02	0.02	0.11	0.01	/	12.45
飞灰	0.12	0.96	0.05	/	0.09	0.07	0.02	/	0.18	12.84

由上表 2 可以看出飞灰化学组成主要为 SiO₂ 和 Al₂O₃, CaO 三者含量可达 60%左右;其次含有部分 CaO 和 Fe₂O₃, 还有少量的 TiO₂、P₂O₅、MgO、SO₃、K₂O、Na₂O。飞灰中 SiO₂, Al₂O₃ 和 CaO 是参与地质聚合反应的主要组分, SiO₂ 和 Al₂O₃ 在碱的作用下逐渐溶解形成[SiO₄]和[AlO₄]单体, 单体之间相互聚合生成水化硅铝酸钠(N-A-S-H), 水化硅酸钠(N-S-H)和水化铝酸钠(N-A-H)等无定形凝胶, 含钙活性组分在碱性条件下转化为水化硅酸钙(C-S-H), 水化铝酸钙(C-A-H)和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)无定形凝胶, 这些凝胶将未完全反应的惰性颗粒粘结, 最终脱水硬化形成致密结构的地聚物材料。在该过程中生成的凝胶越多, 样品的力学性能通常就越高[10]。一些研究人员指出, 高钙粉煤灰可以改善偏高岭土地聚合物的性能[11], 其与飞回性质相似, 这为探究本实验研究打下基础。

赤泥的化学成分主要 Na₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃、SiO₂、TiO₂ 及 CaO, 各组分含量大小取决于铝土矿品位及生产工艺, 赤泥碱性较强, pH 为 9.7~12.8 [12], Na₂O 含量是衡量赤泥碱性强弱的重要指标, 其含量一般在 2.5%~9.5%之间, 可通过碱性物质的溶解作用释放大量碱性离子, 致使赤泥体系 pH 升高。铝和硅溶解在高碱性环境中, 易形成铝硅酸钠凝胶, 将飞灰和红泥粘结在一起, 作为胶结基质[13]。地聚合物的生产需要铝硅酸盐前驱体材料和碱性试剂[14], 故赤泥成分是合成地聚物的合适原料。

3.2. 赤泥、飞灰 XRD 分析

3.2.1. 赤泥 XRD 分析

根据图 1 可以看出, 分析可知赤泥中成分复杂, 包含多种矿物成分。其中有些矿物质含量较低, 征峰不明显, XRD 主要是照射晶体, 由图可以得到的有 5 种明显特征峰, 石英、钙铝黄长石、钙矾石、赤铁矿、石灰石, 晶相主要为衍射角(2θ), 25°~30°有 1 个衍射峰强度最高范围最广为石英, 在 28°~30°存在石灰石的衍射峰, 30°~38°时有多个赤铁矿的衍射峰, 所以为主晶相。30°~35°范围内存在钠铝黄长石, 由

赤泥中 Al_2O_3 、 Na_2O 、 SiO_2 合成，在 $40^\circ\sim 45^\circ$ 存在钙矾石衍射峰，这些矿物晶体为低聚物产生类沸石结构提供了结构性基础。

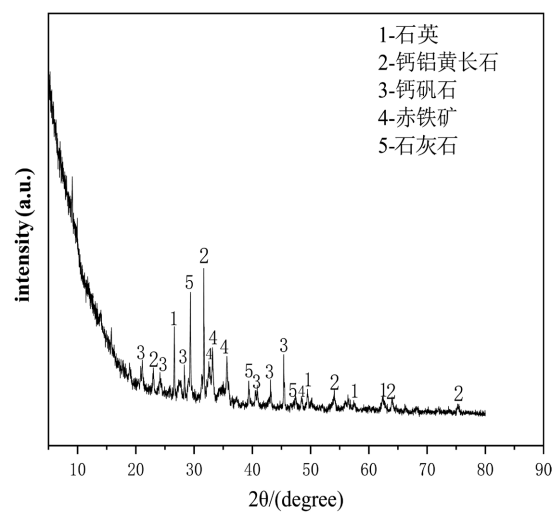


Figure 1. Red mud XRD analysis
图 1. 赤泥 XRD 分析

3.2.2. 飞灰 XRD 分析

用 XRD 对飞灰样品进行物相组成分析，结果如图 2。从图中可以看出飞灰中有 5 种特征峰，Ca、Si 元素主要以氧化物和硅酸盐形式赋存。其中石英的特征峰最明显，这说明石英含量较多，且是主晶相，还出现了镁铝硅酸盐、莫来石和高岭石。Cl 元素主要以 KCl、NaCl 无机盐形式存在于飞灰中但特征峰不明显，未能从图中表现。

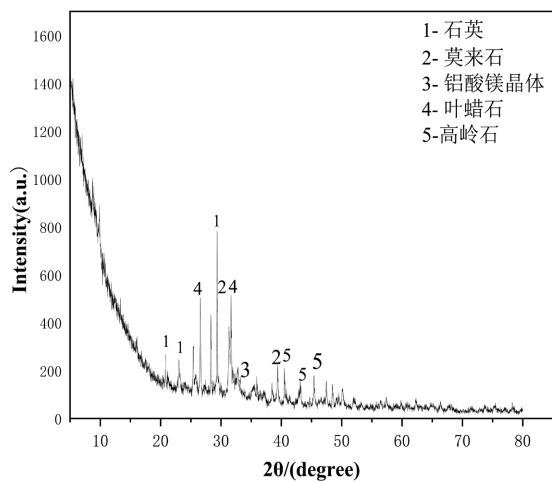


Figure 2. Fly ash XRD analysis
图 2. 飞灰 XRD 分析

3.3. 正交实验结果分析

实验采用的是 4 因素 3 水平正交表，一共做了 9 个配方，而每个配方做了 2 个试块，取 14 天的抗压强度(MPa)作为考核指标。具体结果见表 3。

Table 3. Results of the $L_8(2^7)$ orthogonal experiments
表 3. $L_8(2^7)$ 正交实验结果

实验号	因素				载荷(Fc/KN)
	活化温度℃	用碱量 wt%	固化剂掺量 wt%	水灰比	
	A	B	C	D	
1	1 (700)	1 (5)	1 (45)	1 (0.4)	1.2
2	1	2 (10)	2 (52.5)	2 (0.5)	0.8
3	1	3 (15)	3 (60)	3 (0.6)	1.6
4	2 (750)	1	2	3	0.9
5	2	2	3	1	0.9
6	2	3	1	2	2.1
7	3 (800)	1	3	2	2.6
8	3	2	1	3	1
9	3	3	2	1	0.9
K_1	3.6	4.7	4.3	3.0	
K_2	3.9	2.7	2.6	5.5	
K_3	4.5	7.4	5.1	3.5	
\bar{K}_1	1.2	1.6	1.4	1.0	
\bar{K}_2	1.3	0.9	0.9	1.8	
\bar{K}_3	1.5	2.5	1.7	1.2	
R	0.3	1.6	0.8	0.8	

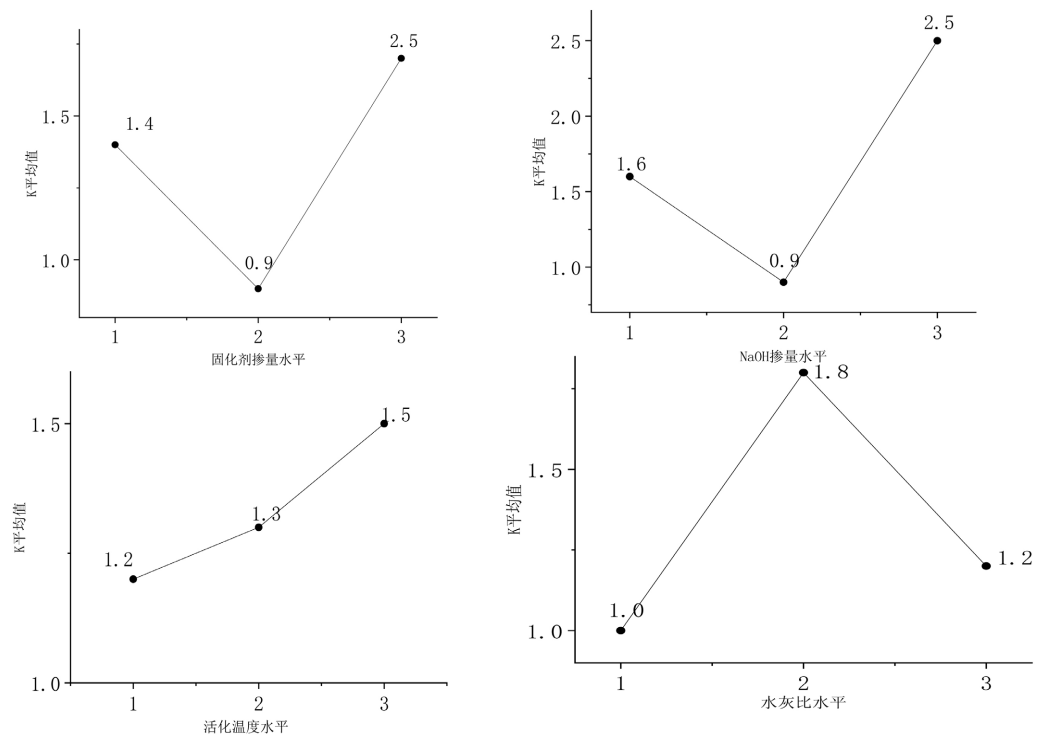


Figure 3. The picture of every factor level on intensity of geopolymeric cement
图 3. 各因素水平对土聚水泥强度的影响图

由于试块受压面积 A 是固定的, 根据抗压强度计算公式 $R_c = F_c/A$, 载荷大小间接代表了抗压强度大小。各因素水平对土聚水泥强度的影响结果见图 3。

从图 3 中可以看出: 温度为 700°C 时, 试块的抗压强度较低, 随着温度的增加, 水泥试条的抗压强度呈上升趋势。当温度上升到 800°C 时, 试块的抗压强度最大。试块的抗压强度随着氢氧化钠含量的增加而减小。这是因为如果氢氧化钠的含量过高, 部分氢氧化钠在水中不能溶解, 碱含量超过溶解度, 直接作用于固化剂和飞灰, 导致反应不充分。而水灰比的情况和氢氧化钠的刚好相反, 地聚物试块的强度是随着水的含量的增加而增大的。当水灰比增大到 0.5 时, 强度达到最大, 之后强度随水的增加而减少, 得到水灰比应控制在 0.5。当水灰比低于 0.5 时, 试块粘接性能差, 易开裂, 固化反应不充分。当水灰比超过 0.5 时, 水的增加使得试块干燥收缩增大, 易开裂, 同时试块净浆不浓稠, 难以成型。

由上分析结果和结合表 3, 可以得出本实验的最佳配方为 A3B2C3D2, 即温度为 800°C , 氢氧化钠占 10%, 固化剂掺量占 60%, 水灰比为 0.5。

3.4. 赤泥 - 飞灰地聚物合成机理

地聚合物是由硅铝酸盐通过溶解 - 缩聚反应碱活化得到的无机粘合剂无论是通过外加激发剂制备的碱激发地聚物还是直接与水反应形成的一步法地聚物, 其地聚物反应都是复杂的多相过程, 包括一系列溶解 - 聚合反应, 铝硅酸盐原料首先溶解形成硅氧和铝氧单体, 然后重新聚合形成铝硅酸盐凝胶, 类似于通过水热处理固体前驱物合成沸石的过程, 但地聚物反应产物的晶体化程度较低。根据 J. Davidovist [14] 的碱激发偏高岭土制备地聚物的机理模型, 高温煅烧赤泥等活性材料在高碱溶液中溶解, 形成类似有机高分子单体的硅氧四面体和铝氧四面体, 这些低聚物在激发剂作用下发生缩聚作用, 形成网状结构的无机高聚物, 同时排出多余水, 并迅速硬化。

3.5. 样品的浸出毒性

由表 4 结果可知, 飞灰未固化时的重金属浸出液浓度中铅镉浓度超标, 未达到国家标准(GB16889-2008)。本次浸出实验中所有重金属浸出液浓度指标均低于 GB16889-2008 标准限值, 相比于未固化飞灰的重金属浸出液浓度下降, 合格达标。这说明低聚物固化飞灰中的重金属的固化效果良好。

Table 4. Fly ash and best sample leaching toxicity test results (unit: mg/L)
表 4. 飞灰和最佳样浸出毒性检测结果(单位: mg/L)

项目	汞	砷	硒	六价铬	镉	钡
飞灰	8×10^{-3}	9×10^{-4}	5.2×10^{-3}	0.02	124	5.2
最佳样	2.9×10^{-3}	5.1×10^{-4}	8.2×10^{-4}	0.006	54	2.4
GB16889-2008 标准限值	0.05	0.3	0.1	1.5	100	25
项目	铬	铜	铍	镍	铅	
飞灰	2.5	25.4	0.009	0.4	0.6	
最佳样	1.0	10.2	0.001	0.1	0.2	
GB16889-2008 标准限值	4.5	40	0.02	0.5	0.25	

3.6. 地聚物样品 XRD 和 SEM 表征分析

用 XRD 对最佳样地聚物试块进行物相组成分析, 结果如图 4。从图中可以看出地聚物中有 5 种特征峰, Ca、Si 元素主要以钙铝黄长石和石英形式赋存。其中石英的特征峰最明显且范围最为宽泛, 这说明

石英含量较多，且是主晶相，还出现了钙凡石、赤铁矿和石灰石。其中 3 种新矿物的出现说明赤泥飞灰中的相关矿物参与了固化重金属中的相关反应，验证了赤泥飞灰参与了地聚物生成类沸石结构。

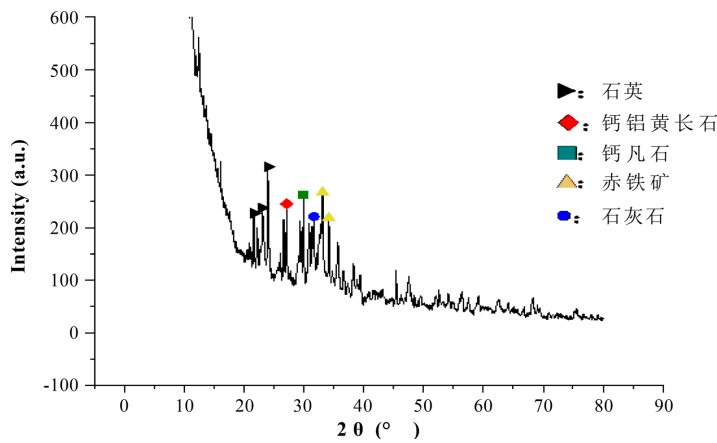


Figure 4. XRD analysis of the optimal plot polymer
图 4. 最佳样地聚物试块 XRD 分析

从最佳样品(第 7 组)的电镜扫描照片(图 5)，我们可以看出，地聚物终产物为结晶不完整的孔洞状网络结构。产物的晶体结构非常细小致密，大概为 2 微米左右。细小的网状硅铝酸盐晶体结构可以固封重金属离子，使得地聚物比飞灰或赤泥本身浸出率小得多。

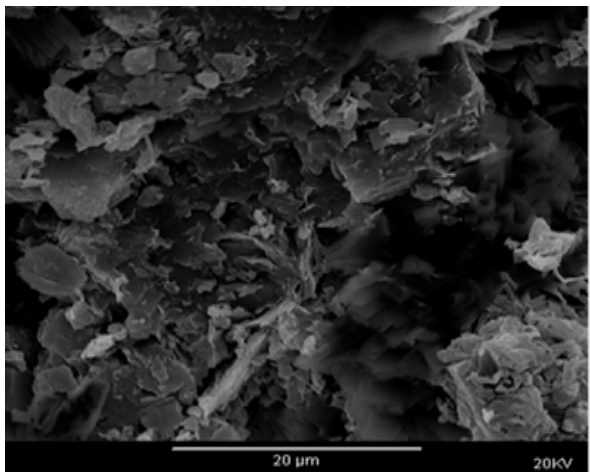


Figure 5. Best sample electron microscope scan photos
图 5. 最佳样电镜扫描照片

4. 结论

1) 通过正交实验法得到最佳组分配方：40% wt 飞灰，10% wt NaOH，50% wt 赤泥，在水灰比为 0.5、活化温度为 800℃和 60%湿度 20℃恒温的条件下，养护 14 天后的抗压强度可达 1.6 Mpa。赤泥固化飞灰后的地聚物渗滤液中的中重金属浓度均达到垃圾焚烧飞灰卫生填埋标准(GB16889-2008)。

2) 实验制备的地聚物 X 射线衍射(XRD)分析得出含石英，钙铝黄长石，钙凡石，赤铁矿和石灰石等。扫描电镜(SEM)表征分析为细小致密的孔洞状网络结构，进一步验证地聚合物利用其类沸石结构可以把重金属包围在空腔内或被吸附而包容在聚合物中的化学机理，进而固化飞灰中的重金属。

3) 水泥固化飞灰由于其原料易得、制作简单和价格便宜等原因被广泛应用。但是传统的水泥固化技术也有很多不足之处。如固化体空隙率较大,被固化的危险废物可能会被浸出,环境造成二次污染。给后续处置带来困难。再者是成本高,为了降低重金属浸出毒性,通常会加入添加剂,因此处理费用增加。本实验利用赤泥基地聚物固化飞灰,得到的固化体结构致密孔隙率小,无需添加添加剂,达到了节约资源与绿色环保的目的。

参考文献

- [1] 郭梦茹, 张冰如, 席佳锐, 张博喧. 垃圾分类前后焚烧飞灰的理化性质及重金属污染特性[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 843-850.
- [2] Xu, Z., Liang, Z., Shao, H., *et al.* (2023) Heavy Metal Stabilization in MSWI Fly Ash Using an Additive-Assisted Microwave Hydrothermal Method. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **117**, 352-360. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.10.023>
- [3] Zhao, X.Y., Yang, J.Y., Ning, N. and Yang, Z.S. (2022) Chemical Stabilization of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 40384-40402. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19649-2>
- [4] Yang, Z.Z., Ji, R., Liu, L.L., *et al.* (2018) Recycling of Municipal Solid Waste Incineration by-Product for Cement Composites Preparation. *Construction and Building Materials*, **162**, 794-801. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.081>
- [5] Bie, R., Chen, P., Song, X., *et al.* (2016) Characteristics of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash with Cement Solidification Treatment. *Journal of the Energy Institute*, **89**, 704-712. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.04.006>
- [6] Luo, W. and Li, Y. (2018) Experimental Study on the Stabilization of Heavy Metals in Fly Ash Incineration by Organic Chelating Agent. *Sichuan Environment*, **37**, 19-24.
- [7] Andreola, F., Barbieri, L., Lancellotti, I., *et al.* (2016) Recycling of Industrial Wastes in Ceramic Manufacturing: State of Art and Glass Case Studies. *Ceramics International*, **42**, 13333-13338. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>
- [8] Luo, Z., Hao, Y., Mu, Y., *et al.* (2022) Solidification/Stabilization of Red Mud with Natural Radionuclides in Granular Blast Furnace Slag Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, **316**, Article 125916. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125916>
- [9] 赖兰萍, 周李蕾, 韩磊, 罗仙平. 赤泥综合回收与利用现状及进展[J]. 四川有色金属, 2008(3): 43-48.
- [10] 孙浩, 马志斌, 路广军, 等. 粉煤灰碱激发制备地质聚合物研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023(11): 140-153.
- [11] Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. (2007) Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement & Concrete Composites*, **22**, 224-229. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>
- [12] Nie, Q., Hu, W., Huang, B., Shu, X. and He, Q. (2019) Synergistic Utilization of Redmud for Flue-Gas Desulfurization and Fly Ash-Based Geopolymer Preparation. *Journal of Hazardous Materials*, **369**, 503-511. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.059>
- [13] Davidovits, J. (1989) Geopolymers and Geopolymeric Materials. *Journal of Thermal Analysis*, **35**, 429-441. <https://doi.org/10.1007/BF01904446>
- [14] Favier, A., Habert, G., Roussel, N., *et al.* (2015) A Multinuclear Static NMR Study of Geopolymerisation. *Cement & Concrete Research*, **75**, 104-109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.003>