

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.010

# 中温活化预处理对铁尾矿基地聚物的 强化机理研究

汤磊<sup>1,2</sup>, 詹欣源<sup>1,2</sup>, 岳正波<sup>1,2</sup>, 王进<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**铁尾矿在我国堆存量巨大, 占据大量土地的同时对环境也造成一定危害, 地聚物作为新型胶凝材料可以有效解决该问题。文章以马鞍山铁尾矿为原料, 通过正交试验得出铁尾矿基地聚物在水灰比为 0.26、模数为 1.8、碱当量为 0.08 的最佳配比下, 制备的铁尾矿基地聚物养护 28 d 抗压强度达到 18.7 MPa。以最佳配比为基础, 研究不同煅烧温度对铁尾矿制备地聚物的活化影响, 结果表明 700 °C 煅烧后得到的地聚物性能最好, 养护 28 d 后抗压强度可达到 26.9 MPa。通过傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)等分析可知, 经过 700 °C 中温活化后, 铁尾矿物相发生变化, 生成更多的活性硅铝元素, 在碱激发剂作用下比未煅烧铁尾矿生成更多的 C-(A)-S-H 和 N-A-S-H 凝胶产物, 并且 C-(A)-S-H 凝胶产物为主要产物, 地聚物抗压强度得到强化。

**关键词:**铁尾矿; 活化; 地聚物; 胶凝材料; 抗压强度

中图分类号: X753

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)03-0353-07

## Study on strengthening mechanism of iron tailings-based geopolymers by activation pretreatment at medium temperature

TANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHAN Xinyuan<sup>1,2</sup>, YUE Zhengbo<sup>1,2</sup>, WANG Jin<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Nanominerals and Pollution Control of Anhui Higher Education Institutes, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Iron tailings have a huge stock in China, occupying a large amount of land and causing harm to the environment. As a new cementing material, geopolymers can effectively solve this problem. In this study, geopolymers were prepared using iron tailings from Ma'anshan City as raw material. Through orthogonal experiment, it was found that the compressive strength of the geopolymers reached 18.7 MPa after 28 days of curing with the following optimum mixing ratio: water cement ratio of 0.26, modulus of 1.8, and alkali equivalent of 0.08. Based on the optimum ratio, the effect of different calcination temperatures on the activation of the geopolymers prepared from iron tailings was studied. The results showed that the geopolymers obtained after calcination at 700 °C had the best performance, and the compressive strength could reach 26.9 MPa after curing for 28 days. The samples were characterized by Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM). After activation at 700 °C, the phase of iron tailing mineral changed, and more active silicon and aluminum elements were generated. Under the action of

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-04-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52100139); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HGQA0267)

作者简介: 汤磊(1997—), 男, 安徽淮南人, 合肥工业大学硕士生;

岳正波(1980—), 男, 河南济源人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师;

王进(1978—), 女, 安徽淮南人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: sophiawj@hfut.edu.cn.

alkali activator, more C-(A)-S-H and N-A-S-H gel phases were generated than the uncalcined iron tailings, and C-(A)-S-H gel phase was the main products, and the compressive strength of the geopolymers was strengthened.

**Key words:** iron tailings; activation; geopolymer; cementing material; compressive strength

铁尾矿是铁矿石选矿过程中产生的工业固体废弃物,近年来随着我国经济的迅速发展,钢铁工业呈现出快速增长的趋势,对铁矿石需求的增加导致大量的铁尾矿产生<sup>[1]</sup>。目前我国已累计堆存超过  $50 \times 10^8$  t 铁尾矿,并且还在以每年  $6 \times 10^8$  t 的排放速度增加<sup>[2]</sup>。尾矿的综合利用率不高,主要以尾矿库的形式堆积在地表,占用大量土地,产生的扬尘、重金属、选矿药剂随雨水、大气迁移扩散,对经济、环境和安全产生重大危害<sup>[3-4]</sup>。因此铁尾矿的综合利用至关重要,国内外许多学者进行了大量研究。

铁尾矿的化学成分主要以硅、铝、铁、钙和镁的氧化物为主,并伴有少量的磷、硫等,主要矿物成分包括石英、长石、辉石、方解石和闪石等<sup>[5-6]</sup>。由于矿石的来源和选矿工艺的不同,铁尾矿的成分差异较大,但都富含二氧化硅和氧化铝,矿物组成上与天然砂类似,因此为其在建筑行业上的使用创造了有利条件<sup>[7]</sup>。地聚物作为一种新型无机胶凝聚材料,由硅铝质原料在碱激发剂作用下缩聚形成,其具有的三维网状结构使其物理化学性质稳定,可以有效固化原料中的重金属元素<sup>[8]</sup>。因此,硅铝酸盐型尾矿砂能够作为地聚物的原料,为铁尾矿的广泛应用找到了出路<sup>[9-10]</sup>。

但是由于铁尾矿活性较低,而地聚物的性能又与原料的活性密切相关,需要利用物理、化学等方法对铁尾矿进行活化,以达到提高地聚物性能的目的<sup>[11]</sup>。文献[12]以铁尾矿为原料探究热活化效果,结果表明在  $700\text{ }^\circ\text{C}$  下煅烧 2 h,原料中的高岭石完全分解,此时原料胶凝性能最好,随着温度继续升高,方解石分解产生的 CaO 与原料中活性硅铝元素反应,降低了其胶凝活性;文献[13-15]研究机械活化铁尾矿与水泥浆混合前后矿物相的改变,发现活化尾矿掺入后与碱性物质发生水化反应,水化主要产物是钙矾石晶体和无定形的硅酸钙凝胶,实验证明机械活化后激发了铁尾矿的火山灰活性,具有潜在的胶凝性能;文献[16]以铁尾矿为主要原料,以偏高岭土为辅料制备地聚物,将铁尾矿预先与 NaOH 混合煅烧后发现,铁尾矿内部生成了更多的活性无定形物,胶凝活性得到显著提高。相比于单纯的机械活化仅改变

尾矿的粒径,中温煅烧可以诱导尾矿的结构和物相发生变化,对尾矿的活性提高更加有效。

本文以水玻璃作为碱激发剂,使用 NaOH 调节水玻璃模数,铁尾矿作为原料制备地聚物。通过对铁尾矿进行不同温度的煅烧活化,制备出性能较好的地聚物,并使用傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)等手段研究煅烧尾矿及地聚物的微观变化,探讨其活化机理及地聚物的形成机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

实验中所使用的铁尾矿是由马鞍山凹山选矿厂总尾矿浆烘干研磨而得。碱激发剂由模数 2.3 的硅酸钠溶液和氢氧化钠颗粒在实验室条件下按比例混合而成,碱激发剂调配后需冷却至室温后使用。将 5 g 水杨酸溶解到 40 mL 甲醇溶液中制备水杨酸/甲醇(SAM)萃取液;将盐酸与去离子水按体积比 1:20 混合得到 250 mL 盐酸(HCl)萃取液。

### 1.2 正交试验设计

根据前期试验结果,针对水灰比(A)、水玻璃模数(B)、碱当量(C)这 3 个因素,设计三因素三水平正交实验,以地聚物养护 28 d 龄期抗压强度作为判断依据进行优化研究。正交试验设计见表 1 所列。

表 1 正交试验设计

因素	A	B	C
1	0.26	1.4	0.04
2	0.26	1.6	0.06
3	0.26	1.8	0.08
4	0.30	1.4	0.06
5	0.30	1.6	0.08
6	0.30	1.8	0.04
7	0.34	1.4	0.08
8	0.34	1.6	0.04
9	0.34	1.8	0.06

### 1.3 试件制备

将铁尾矿置于  $60\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干,取出后研磨

过 200 目筛网。将原始铁尾矿与碱激发剂、去离子水按正交试验配合比混合,并用玻璃棒不断搅拌。将混合均匀的浆体注入 20 mm×20 mm×20 mm 钢制模具中,保鲜膜覆盖后把模具放在烘箱中 60 °C 养护 24 h,之后取出脱模,继续养护地聚物至规定龄期。

将相同质量的铁尾矿放在陶瓷坩埚中,分别放置在马弗炉中于 400、500、600、700、800 °C 下煅烧活化 1 h<sup>[17]</sup>,设置升温速率为 15 °C/min。待煅烧完成后,尾矿在马弗炉内自然降温至室温取出。将煅烧活化之后的铁尾矿按正交试验最佳配合比制备地聚物。

## 1.4 测试方法

### 1.4.1 抗压强度的测试

测试前用砂纸将地聚物试块上下两面打磨平整,保证试块与万能试验机充分接触,测量试块尺寸,之后在万能试验机上加压测得最大加载压力,计算抗压强度,每次测试 3 个试块,取平均值作为最终抗压强度。

### 1.4.2 凝胶产物判断

将破碎后试块研磨过 200 目筛网,分别称取 1 g 粉末置于 SAM 溶液中磁力搅拌 1 h,在 HCl 溶液中磁力搅拌 3 h,再通过 0.45 μm 滤纸过滤得到残留固体,放置在干燥器中干燥至恒重,称量以计算粉末溶解质量。

### 1.4.3 表征方法

使用 MS2000 激光粒度分析仪测试铁尾矿粒度分布;使用 STA449F5 同步热分析仪测试尾矿在加热过程的质量和热量变化,测试范围 30~1 000 °C,升温速率 10 °C/min,测试气氛为空气;使用 Dandonghaoyuan DX-2700 X 射线衍射仪测试尾矿及地聚物的物相组成,扫描范围 5°~70°,步长 0.02,时间 0.01 s;使用 Nicolet FTIR 测试试样的表面官能团;使用 Regulus 8230 高分辨场发射 SEM 观察地聚物的微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 尾矿砂的物理化学性质

实验所用铁尾矿主要化学成分及其质量分数见表 2 所列。

表 2 铁尾矿主要化学成分及其质量分数 %

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO
w	44.66	14.68	13.59	11.45	3.66	2.47	2.26

由表 2 可知,该铁尾矿主要含有 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,硅铝比在 2.58 左右。

铁尾矿粒径分布如图 1 所示。从图 1 可看出,铁尾矿粒径都在 200 μm 以下,主要集中在 10~100 μm,75 μm 以下颗粒粒径占比超过 90%。

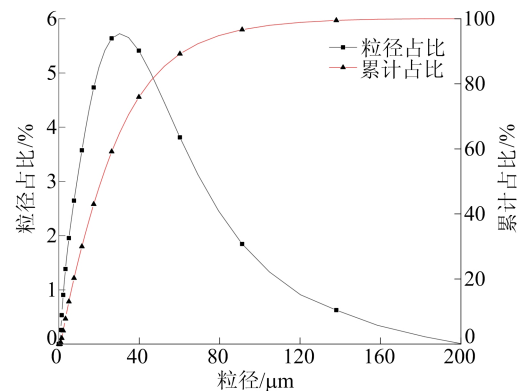


图 1 铁尾矿粒径分布

铁尾矿的热重-差热分析 (thermogravimetric-differential thermal analysis, TG-DTA) 如图 2 所示。从图 2 可以看出:铁尾矿在 400~800 °C 有明显的失重现象,超过 800 °C 后质量趋于稳定,整个加热过程中,铁尾矿的失重大约为 5%;在 400~600 °C 期间铁尾矿吸热伴随失重,可能是尾矿中的高岭石在受热状态下结构水迅速失去引起,造成铁尾矿质量减小,且逐渐转变为具有碱活性的非晶态结构<sup>[18]</sup>;在 600~800 °C 期间尾矿质量继续减小,并出现较小的吸热峰,可能是碳酸钙受热分解释放二氧化碳;在 958 °C 附近的放热峰对应高岭石的晶型转变,由非晶态转变为晶格稳定的莫来石相,说明较高温度反而会降低原料活性<sup>[19]</sup>。由此可知,设置铁尾矿煅烧活化温度为 400、500、600、700、800 °C 具有一定合理性。

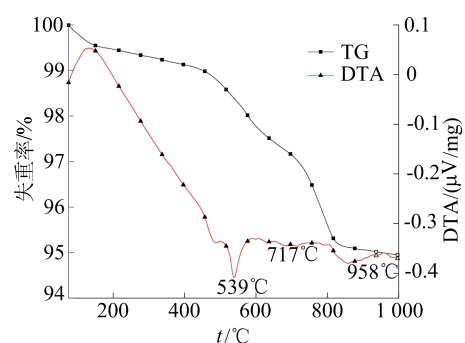


图 2 铁尾矿 TG-DTA 曲线

### 2.2 尾矿砂基地聚物正交试验结果

按照正交试验设计表进行试验后,各地聚物

养护 28 d 龄期抗压强度见表 3 所列,极差分析见表 4 所列。由表 4 可知,3 个因素对于抗压强度的影响顺序从大到小依次为 A、B、C,最优组合为  $A_1B_3C_3$ 。结果表明,水灰比对于地聚物抗压强度的影响最大,水的添加不仅会影响固液混合和反应体系硅铝离子的迁移,还会改变地聚物的孔隙结构。为确保地聚物的长期性能,以 28 d 抗压强度作为核心指标,确定最优配比方案为  $A_1B_3C_3$ ,即水灰比为 0.26,水玻璃模数为 1.8,碱当量为 0.08。经过验证,最优配比的 28 d 抗压强度为 18.7 MPa。

表 3 正交试验结果

编号	A	B	C	抗压强度/MPa
1	0.26	1.4	0.04	15.84
2	0.26	1.6	0.06	13.30
3	0.26	1.8	0.08	18.70
4	0.30	1.4	0.06	11.91
5	0.30	1.6	0.08	13.70
6	0.30	1.8	0.04	14.60
7	0.34	1.4	0.08	8.77
8	0.34	1.6	0.04	6.41
9	0.34	1.8	0.06	10.39

表 4 正交试验极差分析

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	R	优选方案
A	15.95	13.40	8.52	7.43	$A_1B_3C_3$
B	12.17	11.14	14.56	3.42	
C	12.28	11.86	13.72	1.86	

### 2.3 中温煅烧活化对铁尾矿地聚物影响

本文以不同温度煅烧活化得到的铁尾矿为原料,制备的地聚物 3、7、28 d 抗压强度如图 3 所示。

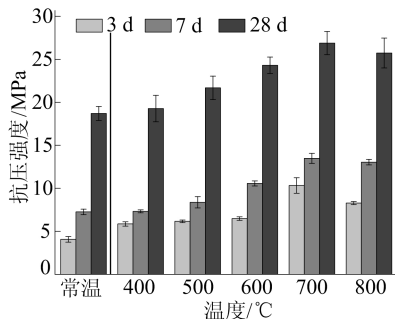


图 3 地聚物 3、7、28 d 抗压强度

从图 3 可以看出,地聚物的抗压强度与铁尾矿的煅烧温度有着密切关系。随着煅烧温度的升高,地聚物的强度呈现先上升后下降的规律。铁

尾矿经过煅烧活化后制备的地聚物与原铁尾矿地聚物相比抗压强度均有不同程度的提高。当煅烧温度为 700 °C 时,地聚物的抗压强度最高,表明此温度下铁尾矿经过煅烧产生了更多的活性硅铝元素。在 28 d 时,700 °C 煅烧铁尾矿制备的地聚物抗压强度可以达到 25 MPa 以上,可以应用于建筑行业的某些场景。

### 2.4 铁尾矿砂中温活化机制

#### 2.4.1 FTIR 分析

将原铁尾矿、原铁尾矿地聚物、700 °C 煅烧铁尾矿、700 °C 煅烧铁尾矿地聚物分别以 W0、G0、W700、G700 表示。原铁尾矿、活化铁尾矿及其地聚物 FTIR 图谱如图 4 所示。

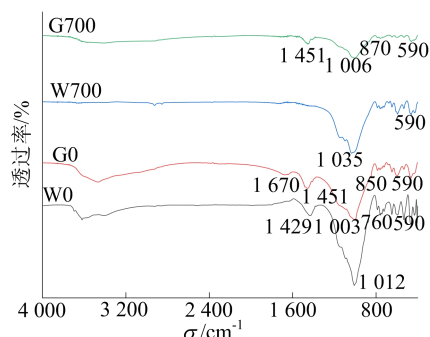


图 4 原铁尾矿、活化铁尾矿及其地聚物 FTIR 谱图

由图 4 可知:W0、G0 在  $3\ 000\sim\ 3\ 600\ \text{cm}^{-1}$  有一个较大的伸缩振动,表明含有羟基,可能是物质中存在结合水;W0 在  $1\ 4429\ \text{cm}^{-1}$  的吸收峰与碳酸根的 O—C—O 键的拉伸振动有关<sup>[20]</sup>,而 W700 与 W0 相比, $3\ 000\sim\ 3\ 600\ \text{cm}^{-1}$  的伸缩振动消失,并且  $1\ 429\ \text{cm}^{-1}$  峰消失,说明铁尾矿中的结合水经高温煅烧挥发,碳酸钙受热分解,碳酸根转化为  $\text{CO}_2$  逸出。在  $953\sim\ 1\ 068\ \text{cm}^{-1}$  对应的是 T—O—Si 的不对称伸缩振动<sup>[21]</sup>,W700 与 G700 相比,峰由  $1\ 035\ \text{cm}^{-1}$  向  $1\ 006\ \text{cm}^{-1}$  发生了偏移;W0 与 G0 相比,峰由  $1\ 012\ \text{cm}^{-1}$  向  $1\ 003\ \text{cm}^{-1}$  发生了偏移,这是由于 Al 原子的能量要小于 Si 原子的能量,反应体系中 Al 原子的增多促使振动峰波数降低<sup>[22]</sup>。G0 在  $1\ 451, 850\ \text{cm}^{-1}$  处,G700 在  $1\ 451, 870\ \text{cm}^{-1}$  处出现了 C—(A)—S—H 凝胶的特征峰,说明地聚物在养护期间发生了水化反应<sup>[23]</sup>。

#### 2.4.2 XRD 分析

原铁尾矿、活化铁尾矿及其地聚物 XRD 图谱如图 5 所示。由图 5 可知,W700 与 W0 相比,衍射峰强度明显有不同程度的降低,说明经过煅

烧活化后铁尾矿的活性提高,更多的物质溶解参与反应,这与 28 d 抗压强度的结果相一致。W0 中物相主要是钙钠长石、石英、高岭石、方解石、赤铁矿和磁铁矿。在 700 °C 下煅烧 1 h 后,可以看出方解石和高岭石的衍射峰已经消失,说明方解石在此温度下完全分解,并且高岭石转变为高活性的无定型结构;部分石英相的衍射峰消失,说明此温度下石英可能发生了晶型转变。将 W0 与 G0、W700 与 G700 分别对比,发现钙钠长石物相的衍射峰强度减弱较多,有部分衍射峰消失,结合 FTIR 分析可知,可能是钙钠长石在碱激发剂的作用下逐渐溶解参与了地质聚合反应,后期形成大量活性硅铝单体,硅铝单体通过缩聚作用最终形成 C-(A)-S-H 凝胶相;地聚物中仍然存在石英相,但衍射峰进一步减少,可能是未完全反应的石英可以作为骨料充填在地聚物孔隙中,增强地聚

物的性能<sup>[24]</sup>。

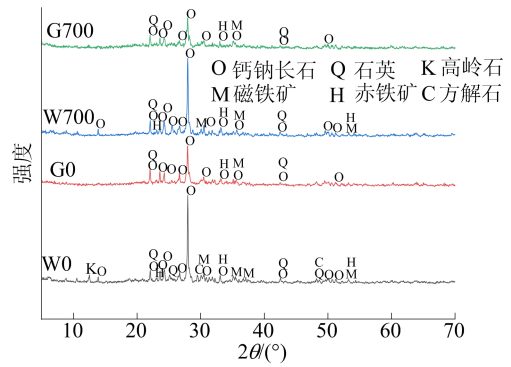


图 5 原铁尾矿、活化铁尾矿及其地聚物 XRD 图谱

### 2.4.3 SEM 分析

使用 SEM 对不同养护时间下 G700 的微观形貌进行分析,结果如图 6 所示。

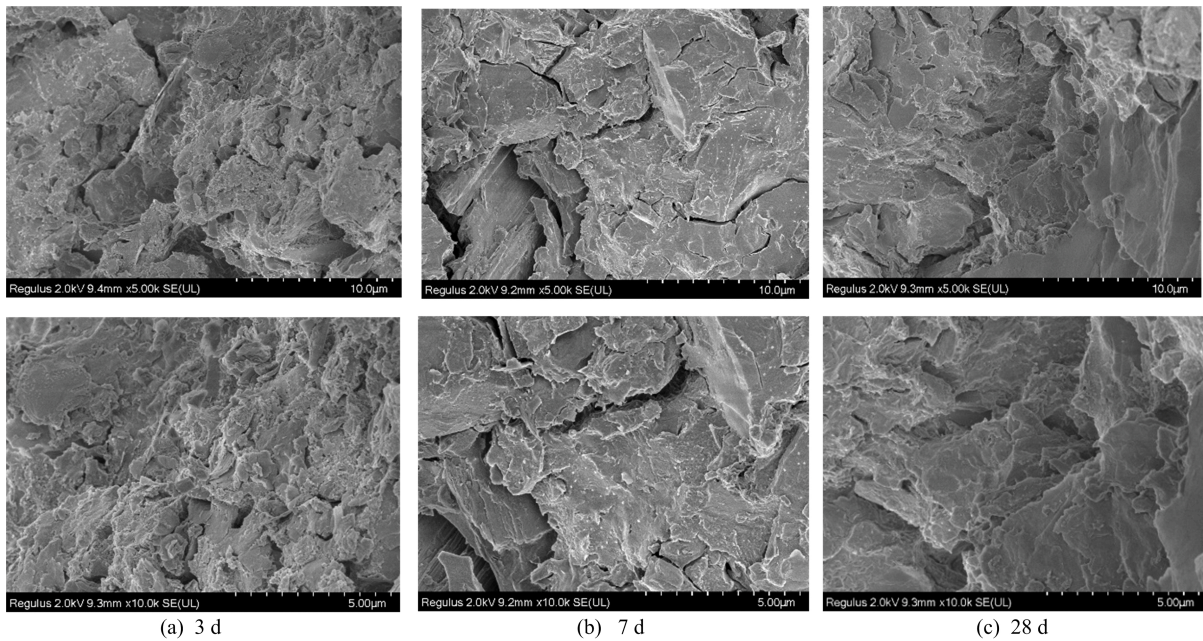


图 6 不同养护时间下活化铁尾矿地聚物 SEM 图

从图 6 可以看出:地聚物养护 3 d 时,内部结构较为粗糙,而且还存在一些细小的颗粒状物质,这些物质是未完全参加地质聚合反应的铁尾矿砂,同时可以看到内部已有一定的凝胶态物质存在,这是地质聚合过程生成的 C-(A)-S-H 凝胶相,但结构中仍然有着较大的孔隙,导致此时的地聚物强度较低;当地聚物养护至 7 d 时,其内部结构较为规整,颗粒进一步溶解并填充到地聚物间隙,相比于 3 d 时孔隙结构减少,地聚物抗压强度得到提高;地聚物继续养护到 28 d 时,地质聚合反应程度明显提升,28 d 的地聚物微观形貌中孔

隙率更小,结构之间被胶凝产物充分占据,形成了均匀致密的地质聚合结构。

### 2.4.4 凝胶产物定性定量分析

本研究通过分别对 G0 和 G700 进行 SAM 和 HCl 溶解处理来判断地质聚合反应过程中产生的凝胶产物类型和质量分数。经过 SAM 处理后溶解的物质表明,地聚物中存在 C-(A)-S-H 凝胶相,HCl 处理后溶解的物质表明地聚物中存在 C-(A)-S-H、N-A-S-H 凝胶相和碳酸盐相<sup>[25]</sup>。凝胶产物质量分数如图 7 所示。

从图 7 可以看出,G700 与 G0 相比,在 SAM

提取和 HCl 提取时溶解的质量均有不同程度的增加,这是由于经过煅烧处理后铁尾矿内存在的碳酸钙受热分解,同时体系内的活性硅铝元素增多,生成了更多的 C-(A)-S-H 凝胶相。而且因为铁尾矿内的钙质量分数要远高于钠质量分数,所以 HCl 溶解的质量分数比 SAM 溶解质量分数仅多 5% 左右,这部分包括了溶解的 N-A-S-H 凝胶相和碳酸盐相<sup>[26]</sup>。SAM 溶解和 HCl 溶解的物质说明了在铁尾矿地质聚合反应过程中同时生成了 C-(A)-S-H 凝胶产物和 N-A-S-H 凝胶产物,并且在地聚物中 C-(A)-S-H 凝胶产物占据主要地位。

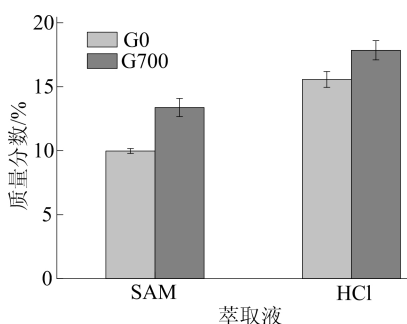


图 7 凝胶产物质量分数

### 3 结 论

对铁尾矿进行煅烧有效提高了铁尾矿的活性,使制备的地聚物抗压性能显著提高。700 °C 下煅烧得到的铁尾矿活性最好,制备的地聚物养护至 28 d 时抗压强度达到了 26.9 MPa。通过 FTIR、XRD、SEM 等分析可知,地聚物在养护过程中同时形成了 C-(A)-S-H 凝胶产物和 N-A-S-H 凝胶产物,并且 C-(A)-S-H 作为主要凝胶产物,有利于地聚物抗压强度的提高;随着养护时间的增加,水化凝胶产物逐渐增多,占据地聚物内部孔隙,使得结构更加致密。

### [参 考 文 献]

[1] 李玉凤,包景岭,张锦瑞. 铁尾矿资源开发利用现状分析[J]. 中国矿业,2015,24(11):77-81,121.  
 [2] HAN F, LI L, SONG S, et al. Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder[J]. Powder Technology, 2017, 315:322-331.  
 [3] ZHANG N, TANG B, LIU X. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 288:123022.

[4] YANG L, QIU J, JIANG H, et al. Use of cemented superfine unclassified tailings backfill for control of subsidence[J]. Minerals, 2017, 7(11):216.  
 [5] ZHAO J, NI K, SU Y, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286:122968.  
 [6] CHENG Y, HUANG F, QI S, et al. Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242:118147.  
 [7] SONG S, ZHANG N, YUAN J, et al. New attempt to produce red mud-iron tailing based alkali-activated mortar: performance and microstructural characteristics[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43:103222.  
 [8] DUXSON P, FERNANDEZ-JIMENEZ A, PROVIS J L, et al. Geopolymer technology: the current state of the art[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(9):2917-2933.  
 [9] 王梦婵,张惠灵,陈永亮,等. 利用低硅铁尾矿制备地质聚合物的研究[J]. 中国矿业,2019,28(8):170-176.  
 [10] TIAN X, XU W, SONG S, et al. Effects of curing temperature on the compressive strength and microstructure of copper tailing-based geopolymers[J]. Chemosphere, 2020, 253:126754.  
 [11] ZHANG X, ZHANG S, HUI L, et al. Disposal of mine tailings via geopolymerization[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284:124756.  
 [12] 易忠来,孙恒虎,李宇. 热活化对铁尾矿胶凝活性的影响[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(12):5-7,34.  
 [13] YAO G, CUI T, ZHANG J, et al. Effects of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of quartz[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(11):4500-4509.  
 [14] YAO G, WANG Q, SU Y, et al. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings[J]. Minerals Engineering, 2020, 145:106068.  
 [15] YAO G, WANG Q, WANG Z, et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement[J]. Powder Technology, 2020, 360:863-871.  
 [16] 姜玉凤,吴璐,刘宇. 铁尾矿在地聚物制备中的利用研究[J]. 新型建筑材料,2019,46(9):57-60.  
 [17] 高金锋,高伦,安子博,等. 铁矿尾矿的活化及蒸养砖的制备[J]. 武汉工程大学学报,2016,38(2):158-162.  
 [18] DE-MAGALHAES L F, FRANCA S, OLIVEIRA M D, et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274:123260.  
 [19] 简家成,刘峥,赖丽燕,等. 高岭土煅烧活化过程研究[J]. 中国粉体技术,2015,21(1):52-57.  
 [20] GHANI U, HUSSAIN S, NOOR-UL A, et al. Role of calcination on geopolymerization of lateritic clay by alkali treatment[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2021, 25(3):101198.

- [21] 陈治坤. 偏高岭土基地质聚合物的中温固化性能及常温固化机理[D]. 长沙:长沙理工大学,2016.
- [22] JIAO X,ZHANG Y,CHEN T. Thermal stability of a silica-rich vanadium tailing based geopolymer[J]. Construction and Building Materials,2013,38:43-47.
- [23] 孔凡龙,刘泽,张俱嘉,等. 矿渣-粉煤灰基地质聚合物性能与微观结构的研究[J]. 电子显微学报,2016,35(3):229-234.
- [24] LEE N K,LEE H K. Reactivity and reaction products of alkali-activated, fly ash/slag paste[J]. Construction and Building Materials,2015,81:303-312.
- [25] MALDONADO-ALAMEDA A,GIRO-PALOMA J,ANDREOLA F, et al. Weathered bottom ash from municipal solid waste incineration; alkaline activation for sustainable binders[J]. Construction and Building Materials,2022,327:126983.
- [26] PULIGILLA S,MONDAL P. Co-existence of aluminosilicate and calcium silicate gel characterized through selective dissolution and FTIR spectral subtraction[J]. Cement and Concrete Research,2015,70:39-49.

(责任编辑 吴亮)

(上接第334页)

## [参 考 文 献]

- [1] LIU Y X,ZENG Z W,LIU X, et al. A novel load balancing and low response delay framework for edge-cloud network based on SDN [J]. IEEE Internet of Things Journal,2020,7(7):5922-5933.
- [2] 张文杰,魏振春,徐俊逸,等. 移动边缘计算中的低能耗任务卸载决策算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(6):770-776.
- [3] SALEEM U,LIU Y,JANGSHER S, et al. Latency minimization for D2D-enabled partial computation offloading in Mobile Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(4):4472-4486.
- [4] SAHNI Y,CAO J N,YANG L, et al. Multi-hop multi-task partial computation offloading in collaborative edge computing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,2021,32(5):1133-1145.
- [5] YAN J,BI S Z,ZHANG Y J, et al. Optimal task offloading and resource allocation in Mobile-Edge Computing with inter-user task dependency[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2020,19(1):235-250.
- [6] DING Y,LIU C B,ZHOU X, et al. A code-oriented partitioning computation offloading strategy for multiple users and multiple Mobile Edge Computing servers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2020,16(7):4800-4810.
- [7] CHEN M G,GUO S T,LIU K, et al. Robust computation offloading and resource scheduling in cloudlet-based Mobile Cloud Computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2021,20(5):2025-2040.
- [8] ZHANG H X,YANG Y J,SHANG B D, et al. Joint resource allocation and multi-part collaborative task offloading in MEC systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2022,71(8):8877-8890.
- [9] CHAI R,LIN J L,CHEN M L, et al. Task execution cost minimization-based joint computation offloading and resource allocation for cellular D2D MEC systems[J]. IEEE Systems Journal,2019,13(4):4110-4121.
- [10] WANG X,HAN Y B,SHI H T, et al. Joagt: latency-oriented joint optimization of computation offloading and resource allocation in D2D-assisted MEC system[J]. IEEE Wireless Communications Letters,2022,11(9):1780-1784.
- [11] ZHAO G M,XU H L,ZHAO Y M, et al. Offloading tasks with dependency and service caching in Mobile Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,2021,32(11):2777-2792.
- [12] ZHONG X X,WANG X H,YANG T T, et al. Potam: a parallel optimal task allocation mechanism for large-scale delay sensitive Mobile Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Communications,2022,70(4):2499-2517.
- [13] ABBAS N,FAWAZ W,SHARAFEDDINE S, et al. SVM-based task admission control and computation offloading using Lyapunov optimization in heterogeneous MEC network [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2022,19(3):3121-3135.
- [14] XIE J D,JIA Y J,WEN W L, et al. Dynamic D2D multihop offloading in multi-access edge computing from the perspective of learning theory in games[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2023,20(1):305-318.
- [15] LV X Y,DU H W,YE Q. TBTOA: a DAG-based task offloading scheme for Mobile Edge Computing[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Communications. [S. l.]:IEEE,2022:4607-4612.

(责任编辑 李凯)