

## 铁尾矿制备地质聚合物工艺条件

汪应玲<sup>1,2</sup>, 罗绍华<sup>2</sup>, 姜茂发<sup>1</sup>, 刘承军<sup>1</sup>, 邓明雪<sup>2</sup>, 赵鑫<sup>2</sup>

(1. 东北大学冶金学院, 东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819 2. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北 秦皇岛 006004)

**摘要:** 以铁尾矿为主要原料, 氢氧化钠和水玻璃混合液为碱激发剂, 制备地质聚合物凝胶材料。利用单因素试验和正交试验研究了固体原料的组分、物料液固比、激发剂的模数和浓度对地质聚合物抗压强度的影响, 并分析了各因素对地质聚合反应的作用机理。结果显示: 各因素影响铁尾矿地质聚合物抗压强度的主次顺序为: 物料液固比 > 激发剂浓度 > 激发剂模数 > 固体原料硅铝比; 当物料液固比  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.8$ 、激发剂浓度  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})=7$ 、激发剂模数  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=1.6$ 、固体原料硅铝比  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=3.2$  时, 试验制备的地质聚合物养护抗压强度最高, 养护 28 d 时达到 55.97 MPa。

**关键词:** 赤泥; 微波改性; Fe-Al 基絮凝剂

doi: 10.3969/j.issn.1000-6532.2019.05.026

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 05-0121-06

地质聚合物 (Geopolymer) 是一种以  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  和  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  为主要结构单元组成的具有非晶态或准晶态的无机凝胶材料。由于其特殊的三维网络结构, 它具有强度高、耐腐蚀、耐高温、耐久性强等优点, 广泛应用于建筑材料、有毒废料或核废料固封材料、多孔质吸附材料等领域<sup>[1-3]</sup>。随着钢铁工业的快速发展, 铁尾矿排放量逐年增加, 据统计目前我国铁尾矿累积排放量超过 90 亿 t, 综合利用率却不足 10%。大量堆存的铁尾矿不仅挤占耕地, 而且造成周边的环境污染。此外, 尾矿坝的建设和维护也增加钢铁企业的运营成本<sup>[4]</sup>。因此, 铁尾矿的资源化利用已经成为我国亟待解决的问题。利用富含 Si 和 Al 的铁尾矿制备地质聚合物, 不仅能有效缓解铁尾矿带来的生态问题, 而且对试现钢铁企业的可持续发展及节能减排有重要意义。

地质聚合物反应过程一般认为是硅铝质原料在强碱环境下溶解成单体, 然后大量的单体聚合

重构、缩聚形成网状结构的聚合物凝胶相。Hua Xu<sup>[5]</sup> 等采用 15 种天然铝硅酸盐矿物制备地质聚合物, 发现大多数铝硅酸盐矿物 (如石榴石、云母、长石、方钠石和辉沸石等) 均能溶于浓碱中, 形成不同强度的聚合材料。目前研究较多的是采用煅烧高岭石、粉煤灰和高炉渣为原料制备地质聚合物, 原料中的化学成分<sup>[6]</sup>、矿物组成<sup>[7-8]</sup>、激发剂种类和浓度<sup>[9-10]</sup>、养护条件<sup>[11]</sup> 等对地质聚合物的性能均有较大影响。由于试验条件、原料产地和工艺参数等的差异, 不同的研究者得出了不同的结论, 没有形成完整的体系研究和评价。力学性能是地质聚合物在很多行业应用的一个最基本的性能。本试验在前人研究的基础上, 以铁尾矿为主要原料制备地质聚合物, 研究固体原料的矿物组分、物料液固比、碱激发剂的模数和浓度对地质聚合物抗压强度的影响, 并分析了各因素的作用机理。

收稿日期: 2019-01-13; 改回日期: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51674068, 51874079); 河北省自然科学基金—钢铁联合研究基金 (E2018501091); 河北省“三三三人才工程”培养经费 (A2016005004); 中央高校基本科研业务项目 - 重点科技创新项目 (N172302001)。

作者简介: 汪应玲 (1982-), 女, 博士研究生, 主要从事尾矿资源综合利用研究。

通讯作者: 罗绍华 (1973-), 男, 教授, 主要从事锂离子电池材料及结构陶瓷材料研究。

# 1 材料与方 法

## 1.1 原料的活化及组成

主要原料铁尾矿取自河北承德柏泉铁矿。高岭土购自苏州中亿瓷土有限公司，用于调节固体原料 Si 和 Al 成分。为了提高原料活性<sup>[12-13]</sup>，铁尾矿研磨后过 74 μm 筛网，取筛下部分；高岭土经 800℃ 煅烧 2 h 后得偏高岭土。采用德国布鲁克 S8 TIGER 型 X 射线荧光光谱仪对原料进行了半定量的成分分析，丹东百特 BT-2003 激光粒度分析仪测试原料粒度分布，日本理学 SmartLab-9 型 X 射线衍射仪测试样品的物相，德国蔡司 SUPPA55 型场发射扫描电子显微镜观察样品表面的微观形貌。结果分别见表 1、图 1~3。

表 1 铁尾矿和偏高岭土的主要化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of iron tailings and metakaolin

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
46.93	14.35	9.316	8.621	7.377	2.061	3.45	2.875
54.87	35.90	2.300	1.203	0.170	0.263	0.08	1.275

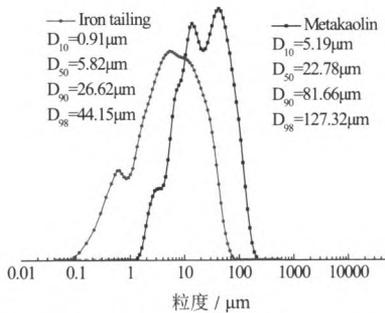


图 1 铁尾矿和偏高岭土的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of iron tailings and metakaolin

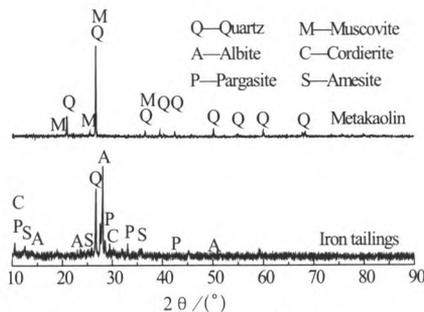


图 2 铁尾矿和偏高岭土的 XRD

Fig. 2 XRD patterns of iron tailings and metakaolin

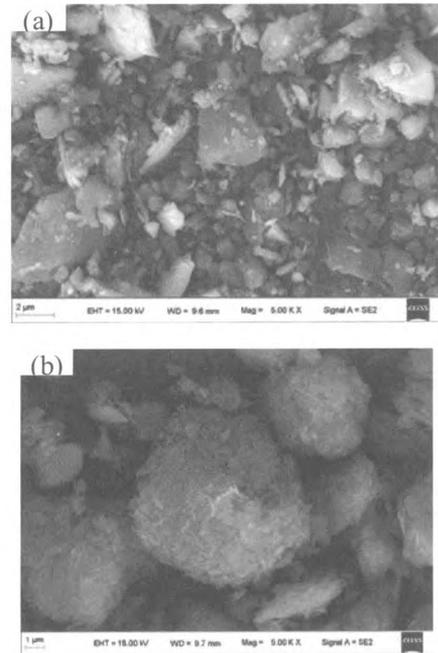


图 3 铁尾矿 (a) 和偏高岭土 (b) 的微观形貌

Fig. 3 SEM micrographs of iron tailings (a) and metakaolin (b)

图 1 表明，铁尾矿的粒径主要分布在 1~25 μm 之间，-10 μm 颗粒占 50% 以上。偏高岭的粒径略大一些，尺寸分布类似。由图 2 可知偏高岭土中主要物相为石英和白云母，铁尾矿中除了石英相外，还含有富钙钠长石 (Na,Ca)Al(Si,Al)<sub>3</sub>O<sub>8</sub>、堇青石 Mg<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>Si<sub>5</sub>O<sub>18</sub>，绿泥石 (Mg<sub>5</sub>Al)(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub> 和复杂的闪石相 (Na,K)Ca<sub>2</sub>(Mg,Fe)<sub>4</sub>Al(Si<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>)O<sub>23</sub> 等硅酸盐类矿物。图 3 显示铁尾矿的微观形貌为不规则的片状或大小不一颗粒结构，偏高岭土主要为层片状结构，表层分布少量管状结构为埃洛石矿物<sup>[14]</sup>。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 地质聚合物的制备方法和抗压强度测试

将铁尾矿放入烘干箱中干燥至恒重，与偏高岭土混合成固体原料。碱激发剂由分析纯 NaOH、工业水玻璃（模数约 2.6，浓度 53.74%）和去离子水按比例混合组成。将碱激发剂倒入固体原料中，搅拌成浆料，注入 20mm×20mm×20mm 钢制模具中，然后放在振动台振动 5 min 除气。在密闭容

器中 80℃ 固化 24 h 后脱模，之后常温自然养护。分别在 1、7、14 和 28 d 利用万能试验机测试其抗压强度，加载速度为 0.5 N/min。抗压强度取 6 个试样结果的平均值，精确至 0.01 MPa。

### 1.2.2 单因素试验与正交试验

为确定各因素的取值范围，分别对固体原料的硅铝比  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、物料混合液固比  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、激发剂的模数  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  和激发剂浓度  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})$  进行单因素试验，研究各因素对铁尾矿地质聚合物抗压强度的影响趋势。以单因素试验确定的工艺参数值作为正交试验  $L_9(3^4)$  各因素水平的中值，以养护 28 d 的地质聚合物抗压强度为指标，进一步优化铁尾矿制备地质聚合物的工艺条件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 激发剂模数 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$ 对抗压强度的影响

激发剂在地质聚合物形成过程中扮演着重要的角色，不仅溶解出固体原料中的 Si 和 Al 原子形成地质聚合物的前驱体，而且提供金属阳离子  $M^+$  平衡地质聚合物结构的电负性 [15]。激发剂的模数可改变体系中可溶性硅酸盐的含量，影响 Si 和 Al 原子的溶解速度及聚合反应过程中的凝胶化程度，从而影响地质聚合物的性能和结构。固定  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=3.5$ 、 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.8$  和  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})=10$ 。不同  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  的地质聚合物抗压强度见图 4 所示。

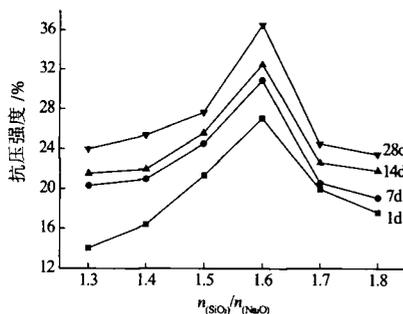


图 4  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  对地质聚合物抗压强度的影响  
Fig. 4 Compressive strength of geopolymer samples with various  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$

由图可知，各养护期试样的抗压强度随碱激发剂模数增加呈先增大后减小的趋势。 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=1.6$ ，地质聚合物的强度最大。当激发剂模数较小时，激发剂中 NaOH 含量较高，强碱性溶液条件下溶解的 Al 和 Si 的配合物主要以  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 、 $(\text{OH})_2\text{SiO}_2^{2-}$ 、 $(\text{OH})\text{SiO}_3^{3-}$  和其他硅酸盐低聚物离子团的形式存在，其含量通常低于  $[\text{AlO}_4]$  发生缩聚反应所需的浓度 [16]，强度较低。随着  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$  的增加，激发剂中的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  含量增加，提供的可溶性  $\text{SiO}_3^{2-}$  促进  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  与较大硅酸盐低聚物之间的缩聚反应，形成紧密的富 Si 凝胶 [17]，强度增加。模数过高时，过多的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  以  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  形式残存 [18]，阻碍体系水分的蒸发和结构的形成，易在试样内部形成不稳定的结构，强度反而下降。另外残存的结晶水，需较长时间才能全部或部分失去，因此后期强度增加缓慢。

#### 2.1.2 物料液固比 $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对抗压强度的影响

在  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=1.6$ 、 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=3.5$  和  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})=10$  条件下， $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  对地质聚合物抗压强度的影响见图 5。

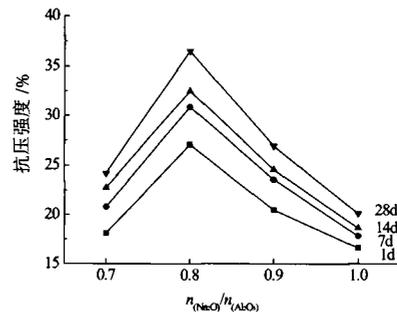


图 5  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  对地质聚合物抗压强度的影响  
Fig. 5 Compressive strength of geopolymer samples with various  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$

当  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  较小时，混合得到的浆料较干，不易成型，因此仅考虑物料液固比  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7 \sim 1.0$  对抗压强度的影响。由图可知，地质聚合物的抗压强度随  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的增加呈先增加后减小的趋势。地质聚合物体系中  $\text{Na}^+$  的存在提供了反应所需要的碱性环境，当 Na<sub>2</sub>O 含量增加时，固体原料颗粒周围 OH<sup>-</sup> 的浓度增大，对原

材料中的 Si-O 键和 Al-O 键破坏作用增强，同时 Na<sup>+</sup> 可平衡地质聚合物结构 Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> 的电负性，从而使得试样的强度提高。但是过量的碱激发剂一方面使得反应体系中 OH<sup>-</sup> 的浓度过大，早期快速生成的硅铝酸盐沉淀包裹未溶解固体颗粒，阻碍 Si 和 Al 的进一步溶解，另一方面过量的 Na<sup>+</sup> 随水分的浸出迁移到试样的表面，吸收空气中的 CO<sub>2</sub>，生产 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 产生泛碱现象，对试样强度产生不利的影响<sup>[19]</sup>。因此，本研究中选择物料液固比 n(Na<sub>2</sub>O)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=0.8 作为其较优条件。

2.1.3 原料硅铝比 n(Na<sub>2</sub>O)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 对抗压强度的影响

当 n(Na<sub>2</sub>O)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=1.6、n(Na<sub>2</sub>O)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=0.8 和 n(H<sub>2</sub>O)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=10 时，固体原料中不同 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 对地质聚合物抗压强度的影响见图 6 所示。

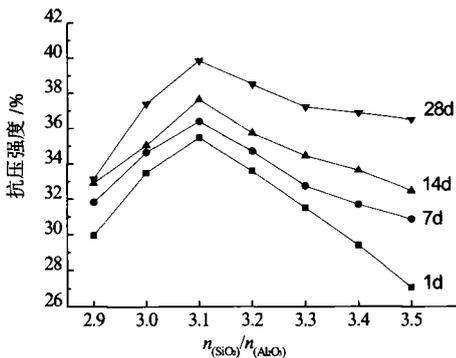


图 6 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 对试样抗压强度的影响

Fig. 6 Compressive strength of geopolymer samples with various n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

从图 6 中可以看出，养护期越长，试样的抗压强度越大。各养护期内试样抗压强度变化趋势相同，均随固体原料中 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 增加呈先增大后减小的趋势，且具有明显的早强性。当 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 较小时，原料中偏高岭土含量相对较大，且煅烧后偏高岭土中活性的 Si 和 Al 含量比铁尾矿多，为聚合反应过程提供更多的 [SiO<sub>4</sub>] 和 [AlO<sub>4</sub>]，形成更好的三维网状结构，早期强度较高。理论上 Si-O-Si 键的强度高于 Al-O-Si 和 Al-O-Al 键<sup>[20]</sup>，且随原料中铁尾矿含量增加，钙含量增加，在聚合反应过程中易形成 C-S-H 和 N-A-S-H 凝胶，与地质聚合物结构相互填充，形成致密度更高的结构<sup>[21]</sup>。因此，试样的抗压强度随 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的增

加而增大。当 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=3.1 时，试样的抗压强度最大，n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 继续增加时，抗压强度反而降低。这是由于 Al 在碱性溶液中比 Si 更容易溶出，n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 摩尔比增加使得地质聚合物反应速率减小，聚合反应程度降低，试样的抗压强度下降。

2.1.4 激发剂浓度 n(H<sub>2</sub>O)/n(Na<sub>2</sub>O) 对抗压强度的影响

在 n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=3.1、n(SiO<sub>2</sub>)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=1.6 和 n(Na<sub>2</sub>O)/n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=0.8 的条件下，碱激发剂浓度 n(H<sub>2</sub>O)/n(Na<sub>2</sub>O) 对地质聚合物抗压强度的影响见图 7。

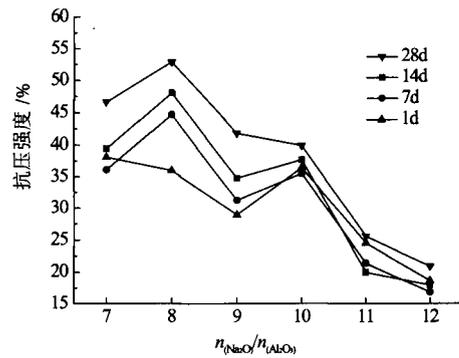


图 7 n(H<sub>2</sub>O)/n(Na<sub>2</sub>O) 对地质聚合物抗压强度的影响

Fig. 7 Compressive strength of geopolymer samples with various n(H<sub>2</sub>O)/n(Na<sub>2</sub>O)

由图 7 可见，在聚合反应初期，试样的抗压强度变化无明显趋势，直到反应 28 d 天后，试样的抗压强度随 n(H<sub>2</sub>O)/n(Na<sub>2</sub>O) 的增加呈先增大后减小的趋势。这可能跟测试时试样反应速率和形成结构有关，原料中一些颗粒反应活性较低，需一定的时间才能相互作用<sup>[8]</sup>。地质聚合物反应前期需足够的水提供原料充足反应的环境，后期则需脱水促进缩聚反应的进行，因此水过量，反应剩余的游离水填充在试样内部，随着地质聚合反应的不断进行，水分蒸发后在地质聚合物试样内部形成一定数量的孔隙导致地质聚合物的密实性降低，从而使强度下降<sup>[22]</sup>。当 n(H<sub>2</sub>O)/n(Na<sub>2</sub>O) ≤ 9 时，抗压强度呈递增趋势，因为随着水含量的增加，地质聚合物浆料的流动性增强，有利于硅铝原材料的溶解以及 Si<sup>4+</sup> 和 Al<sup>3+</sup> 化合物的水解作用<sup>[23]</sup>。因此水在铝硅酸盐的溶解、可溶性离子的传输、及 Al<sup>3+</sup> 和 Si<sup>4+</sup> 的水解和不同铝硅酸盐羟基物离子的缩聚反应过程中起媒介作用。导致地质聚合物的密实

性降低，从而使强度下降<sup>[22]</sup>。当  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O}) \leq 8$  时，抗压强度呈递增趋势，因为随着水含量的增加，地质聚合物浆料的流动性增强，有利于硅铝原材料的溶解以及  $\text{Si}^{4+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  化合物的水解作用<sup>[23]</sup>。因此水在铝硅酸盐的溶解、可溶性离子的传输、及  $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Si}^{4+}$  的水解和不同铝硅酸盐羟基物离子的缩聚反应过程中起媒介作用。

### 2.2 正交试验

在单因素试验结果的基础上，正交试验设计见表2，结果和极差分析见表3。

表2 正交试验因素水平  
Table 2 Level and factors of orthogonal test

水平	因素			
	A $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$	B $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$	C $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$	D $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})$
1	3.0	1.5	0.7	7
2	3.1	1.6	0.8	8
3	3.2	1.7	0.9	9

表3 正交试验结果及极差分析  
Table 3 Results and range analysis of orthogonal test

No.	A	B	C	D	抗压强度 /MPa
1	3.0	1.5	0.7	7	44.02
2	3.0	1.6	0.8	8	51.88
3	3.0	1.7	0.9	9	16.53
4	3.1	1.5	0.8	9	43.56
5	3.1	1.6	0.9	7	48.16
6	3.1	1.7	0.7	8	29.65
7	3.2	1.5	0.9	8	39.07
8	3.2	1.6	0.7	9	40.68
9	3.2	1.7	0.8	7	53.17
K <sub>1</sub>	112.43	126.65	114.35	145.34	
K <sub>2</sub>	121.37	140.71	148.61	120.60	
K <sub>3</sub>	132.91	99.35	103.76	100.77	
k <sub>1</sub>	37.48	42.22	38.12	48.45	
k <sub>2</sub>	40.46	46.90	49.54	40.20	
k <sub>3</sub>	44.30	33.12	34.59	33.59	
R	6.83	13.79	14.95	14.86	

由表3可知，各因素影响地质聚合物抗压强度的主次顺序为：物料液固比  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) >$  激发剂浓度  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O}) >$  激发剂模数  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O}) >$  固体原料硅铝比  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 。各因素的优化组合为  $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_2\text{D}_1$ ，即  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=3.2$ ， $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=1.6$ ， $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.8$ ， $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})=7$ 。此组合不在正交试验表列中，因此对  $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_2\text{D}_1$  组合进行了验证试验，得到的试样养护28 d后抗压强度为55.97 MPa。因

此，各因素的最优组合为  $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_2\text{D}_1$ 。

### 3 结论

(1) 采用单因素控制变量试验法，分别在  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=1.3 \sim 1.5$ ， $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7 \sim 1.0$ ， $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=2.8 \sim 3.4$  和  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})=7 \sim 12$  范围内研究了不同养护期的地质聚合物抗压强度变化，结果发现养护期越长，抗压强度越大，28 d时各单因素变量对抗压强度的影响均呈先增加后减小的趋势。

(2) 采用正交试验方法，研究了铁尾矿制备地质聚合物工艺中影响抗压强度的因素，其主要顺序为：物料液固比  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3) >$  激发剂浓度  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O}) >$  激发剂模数  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O}) >$  固体原料硅铝比  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 。

(3) 铁尾矿制备地质聚合物的最佳工艺条件为： $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=3.2$ ， $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})=1.6$ ， $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.8$  和  $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})=7$ 。此条件下制备的地质聚合物养护28 d后的抗压强度为55.97 MPa。

### 参考文献：

[1] Kuranchie FA, Shukla SK, Habibi D. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2016, 30(2):92-114.  
 [2] Phair J W, Deventer J S J V, Smith J D. Effect of Al source and alkali activation on Pb and Cu immobilization in fly-ash based “geopolymers” [J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(3):423-434.  
 [3] 邱瑞芳, 程芳琴, 刘红宇, 等. 地质聚合物多孔材料的制备及吸附性能研究 [C]// 中国硅酸盐学会固废分会成立大会固废处理与生态环境材料学术交流会. 2015.  
 [4] 张杰西, 赵斌, 房彬. 我国铁尾矿排放现状及综合利用研究 [J]. 再生资源与循环经济, 2015, 8(9):29-32.  
 [5] Hua Xu, J.S.J. Van Deventer. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals [J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 59(3):247-266.  
 [6] Jaarsveld J G S V, Deventer J S J V, Lukey G C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 89(1):63-73.  
 [7] Zhang Y, Wei S, Li Z. Composition design and

- microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement [J]. *Applied Clay Science*, 2010, 47(3):271-275.
- [8] Heah C Y, Kamarudin H, Bakri A M M A, et al. Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35(10):912-922.
- [9] Soutsos M, Boyle A P, Vinai R, et al. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 110:355-368.
- [10] N. Marjanović, M. Komljenović, Z. Baščarević, et al. Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(1):1421-1435.
- [11] Memon F A, Nuruddin F, Demie S, et al. Effect of Curing Conditions on Strength of Fly ash-based Self-Compacting Geopolymer Concrete[J]. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 2011, 5(8):342-345.
- [12] Wang P Z, Rudert V, Trettin R. Effect of Fineness and Particle Size Distribution of Granulated Blast-Furnace Slag on the Hydraulic Reactivity in Cement Systems[J]. *Advances in Cement Research*, 2005, 17(4):161-167.
- [13] 崔潮. 偏高岭土地质聚合物的研发与应用 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- [14] Zhang Z, Wang H, Provis J L, et al. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide [J]. *Thermochemica Acta*, 2012, 539(13):23-33.
- [15] Morsy M S, Alsayed S H, Al-Salloum Y, et al. Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39 (6):4333-4339.
- [16] 李海宏. 地质聚合物的制备及机理研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2007.
- [17] Ph-Ngernkham T, Maegawa A, Mishima N, et al. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 91:1-8.
- [18] 胡芳芳, 张一敏, 陈铁军, 等. 激发剂对石煤提钒尾渣地聚合物性能与微观结构的影响 [J]. *非金属矿*, 2014(2):1-4.
- [19] Meftah M, Oueslati W, Chorfi N, et al. Intrinsic parameters involved in the synthesis of metakaolin based geopolymer: Microstructure analysis [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688:946-956.
- [20] Duxson P, Provis J L, Lukey G C, et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties [J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2005, 269(1):47-58.
- [21] Al-Majidi M H, Lampropoulos A, Cundy A, et al. Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 120:198-211.
- [22] Zuhua Z, Xiao Y, Huajun Z, et al. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer [J]. *Applied Clay Science*, 2009, 43(2):218-223.
- [23] Hanjitsuwan S, Hunpratub S, Thongbai P, et al. Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2014, 45(1):9-14.

## Process Conditions for Geopolymer from Iron Tailings

Wang Yingling<sup>1,2</sup>, Luo Shaohua<sup>2</sup>, Jiang Maofa<sup>1</sup>, Liu Chengjun<sup>1</sup>, Deng Mingxue<sup>2</sup>, Zhao Xin<sup>2</sup>

(1.School of Metallurgy, Northeastern University, Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallurgical Mineral(Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China; 2.School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei, China)

**Abstract:** The geopolymer cementitious material was prepared by using iron tailings as the main raw materials, and the mixture of sodium hydroxide and water glass as alkali activator. The effects of composition, liquid-solid ratio, modulus and concentration of the alkali activator on the compressive strength of geopolymers were studied by orthogonal tests and single factor tests. The mechanism of various factors on geopolymerization was analyzed. The results showed that the primary and secondary order of the factors affecting compressive strength were liquid solid ratio>modulus of the alkali activator>activator concentration>solid materials silicon-aluminum ratio. The highest compressive strength reached 55.97 MPa when it was cured for 28 days, which was achieved at  $n_{(SiO_2)}/n_{(Al_2O_3)} = 3.2$ ,  $(SiO_2)/n_{(Na_2O)} = 1.6$ ,  $n_{(Na_2O)}/n_{(Al_2O_3)} = 0.8$  and  $n_{(H_2O)}/n_{(Na_2O)} = 7$ .

**Keywords:** Iron tailings; Geopolymer; Compressive strength; Process conditions