

文章编号: 1674-599X(2020)03-0008-06

## 碱激发剂对粉煤灰基地聚物性能影响研究

刘进琪<sup>1</sup>, 王世玉<sup>1</sup>, 彭晖<sup>1,2</sup>, 钟卿瑜<sup>1</sup>, 林福宽<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004;

2. 长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为研究碱激发剂与液固比对地聚物工作性能和力学性能的影响, 以粉煤灰为原料, 进行正交试验。试验结果表明: 粉煤灰基地聚物的工作性能随着地聚物液固比增大而增加, 但强度却随着液固比增大而减小。激发剂浓度增大, 不利于粉煤灰基地聚物良好的工作性能, 但有利于其强度增大。激发剂模数增大, 粉煤灰基地聚物的力学性能和工作性能呈下降趋势。本研究中粉煤灰基地聚物最大的强度能达到 61.35 MPa。

**关键词:** 地聚物; 粉煤灰; 激发剂性质; 液固比; 正交试验

中图分类号: U414 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002

### Study on the effect of alkali activator on the properties of fly ash-based geopolymer

LIU Jin-qi<sup>1</sup>, WANG Shi-yu<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>1,2</sup>, ZHONG Qin-yu<sup>1</sup>, LIN Fu-kuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To study the effect of activator properties and liquid-solid ratio on the working performance and mechanical properties of fly ash-based geopolymer, orthogonal test was performed. Test results show the working performance of fly ash-based geopolymer increases with the increase of liquid-solid ratio, however the strength decreases. The increase of activator concentration is not in favor of the performance of fly ash-based geopolymer but increases its strength. The mechanical properties and working properties of fly ash based polymers decrease with the increase of activator modulus. The strength of the fly ash-based geopolymer prepared in this research can be up to 61.35 MPa.

**Key words:** geopolymer; fly ash; activator properties; liquid-solid ratio; orthogonal test

地聚物具有硅铝活性成分, 碱激发条件下, 生成一种类似于水泥的胶凝材料<sup>[1]</sup>。与传统水泥材料相比, 地聚物具有原料来源广泛、强度高和耐腐蚀强等特点<sup>[2-4]</sup>。同时, 地聚物可利用偏高岭土<sup>[5]</sup>、粉煤灰<sup>[6]</sup>、矿渣<sup>[7]</sup>及煤矸石<sup>[8]</sup>等工业废弃物进行制备, 也提供了一条对废物循环利用的有效途径。由于地聚物制备工艺简单、低能耗、污染少及可回收再利用等特征。因此, 可满足土木工程可持续发展之路, 建设资源节约型和环境友好型社会的需要。

地聚物性能优越, 国内外学者对其进行了研究。为了制备较高性能的地聚物, 通常使用天然矿物, 再加工制备的高活性物质, 如: 偏高岭土原料。由于加工过程中, 需要消耗一定的能量, 且高岭土原料有限。因此, 不利于材料的可持续性, 对原材料的优化, 选择非常重要<sup>[9]</sup>。中国是火力发电大国, 每年产生的粉煤灰对环境造成巨大的影响。粉煤灰综合利用, 不仅有助于解决粉煤灰造成的环境污染, 也可变废为宝, 是资源循环利用的重要策略之

收稿日期: 2020-03-25

作者简介: 刘进琪(1995-), 男, 长沙理工大学硕士生。

一。Krivenko<sup>[10]</sup>等人指出,与粉煤灰相比,利用高岭土或偏高岭土合成地聚物,会产生更大的能量消耗,且具有更高的耐热性。对于偏高岭土地聚物,固液比、激发剂模数及浓度都会影响其力学性能。Gao<sup>[11]</sup>等人发现激发剂浓度的升高,偏高岭土地聚物力学强度增强。Lyu<sup>[12]</sup>等人认为地聚物的强度随着激发剂模数( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 摩尔比)的减小,而持续增大。Cheng<sup>[13]</sup>等人通过试验,发现液固比减小,能显著减小地聚物孔隙率,从而提升材料强度。地聚物的力学性能,与制备原材料有显著的关系。本研究以粉煤灰为原料,制备地聚物,拟研究原材料不同时,液固比、激发剂浓度及模数对粉煤灰地聚物的力学特性和工作性能的影响,以期为粉煤灰再利用提供借鉴。

## 1 试验原材料

### 1.1 粉煤灰

粉煤灰(Fly Ash, 简称为FA)是煤炭燃烧后,排放后,未完全燃烧的灰分,其活性成分主要由 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 构成的玻璃体。本试验选取的粉煤灰是华东电力集团生产的I级粉煤灰(低钙),其细度为 $45\ \mu\text{m}$ ,筛余量为9.8%。其 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Ti}_2\text{O}$ 的质量分数,分别为42.18%、28.43%、3.76%、2.79%、1.31%、0.97%。

### 1.2 碱激发剂

传统水泥材料遇水发生水化反应,生成水泥石。尚善海<sup>[14]</sup>在研究水泥反应过程中,发现少量的 $\text{NaOH}$ 在水泥水化反应中,能够起催化效果,提出了“碱激活”概念。许多研究者发现除 $\text{NaOH}$ 外,其他碱金属氢氧化物、碳酸盐、硅酸盐及硅铝酸盐均具有相似的效果,因而扩充了碱激发剂的范围<sup>[15]</sup>。

地聚物通常选取 $\text{NaOH}$ 和水玻璃( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )溶液,配置碱激发剂。本试验选用水玻璃( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )溶液、固体氢氧化钠和去离子水,配置激发剂。水玻璃溶液采用河北省邢台市内丘力天化工有限公司生产,模数( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 摩尔比) $M=3.28$ 弱碱性液体硅酸钠。其中, $\text{SiO}_2$ 的质量分数为26.54%; $\text{NaO}$ 质量分数为8.35%;在 $20\ ^\circ\text{C}$ 下,测得密度为 $1.385\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。固体氢氧化钠为河南省郑州市清源化工产品有限公司生产的工业级片状氢氧化钠,纯度为99.5%。

碱激发剂配制应按照激发剂浓度和激发剂模数要求,计算出水玻璃、氢氧化钠和水的所需用量。在烧杯中,先称量氢氧化钠固体。再添加水玻璃至所需量。然后加入去离子水。最后用保鲜膜将烧杯口封住,防止搅拌过程中水蒸发丧失,使用磁力搅拌机搅拌,陈化 $4\sim 12\ \text{h}$ ,直至溶液澄清。本试验为了保证激发剂性质的稳定,陈化时间为 $12\ \text{h}$ 。

## 2 试验方案及配比设计

### 2.1 试验方案

利用水泥净浆流动度测量筒,测量地聚物浆体的流动性,衡量粉煤灰拌合物的工作性能。所采用的水泥净浆流动度测量筒为上口直径 $36\ \text{mm}$ ,下口直径 $60\ \text{mm}$ ,高 $60\ \text{mm}$ 的圆台型试模。

根据《混凝土外加剂匀质性试验方法(GB/T 8077—2012)》的要求,测量浆体流动性。在水平位置放置一块玻璃板,并将其和水泥净浆流动度测量筒的表面润湿。再将流动度筒放置在玻璃板中央。然后将拌合好的地聚物浆体,由上口迅速注入,直至填满整个流动度筒,用刮刀将上口刮平。最后将流动度筒迅速向上提起,同时开始计时,直至 $30\ \text{s}$ 后,用尺测量其扩展的最大直径 $d_{11}$ 和直径 $d_{12}$ (垂直于 $d_{11}$ ),取平均值 $d_1=(d_{11}+d_{12})/2$ 为净浆流动度。

地聚物浆体力学特性主要考虑材料的抗压强度和抗拉强度。抗拉强度是基体的开裂强度,也是复合材料设计准则中强度条件的重要参数。抗压强度是衡量材料强度的重要参数,可反映地聚物反应程度。采用SANS公司生产的SHT-4106微机控制电液伺服万能材料试验机,进行地聚物浆体的强度试验,抗压强度测试采用 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 的立方体试件,每组制作3个试件。因地聚物比普通混凝土的脆性大,抗拉强度小,不易直接测量。所以,采用劈裂试验,间接测量抗拉强度。

### 2.2 试验配比

为获取流动性最优的地聚物浆体,以液固比、激发剂模数及激发剂浓度3个指数为参考因素。本试验每个参数因素,分5个等级,其中,液固比(L/S)分别为 $0.5, 0.525, 0.55, 0.575, 0.6$ ,激发剂浓度为 $30\%, 32.5\%, 35\%, 37.5\%, 40\%$ ,激发剂模数为 $1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9$ 。采用正交试验的方法进行研究,选取 $L_{25}(5^6)$ 正交表进行试验,以粉煤灰为原材料,具体配比见表1。

表1 正交试验方案及结果

Table 1 Orthogonal test scheme and results

	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )						流动性/ mm	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	
	激发剂浓度/%	液固比	激发剂模数	粉煤灰	水玻璃	氢氧化钠				水
1	30.00	0.500	1.1	3 333.3	882.9	166.7	617.1	21.90	27.12	0.97
2	30.00	0.525	1.3	3 278.7	985.3	132.4	603.7	22.55	26.40	0.74
3	30.00	0.550	1.5	3 225.8	1 079.3	101.9	593.0	22.10	21.46	0.65
4	30.00	0.575	1.7	3 174.6	1 166.4	74.5	584.5	22.55	16.98	0.49
5	30.00	0.600	1.9	3 125.0	1 247.8	49.6	577.6	22.95	9.87	0.40
6	32.50	0.500	1.3	3 333.3	1 033.5	138.8	494.3	20.60	40.81	1.38
7	32.50	0.525	1.5	3 278.7	1 134.4	107.1	479.9	21.55	29.67	0.87
8	32.50	0.550	1.7	3 225.8	1 228.2	78.4	467.6	21.45	18.74	0.61
9	32.50	0.575	1.9	3 174.6	1 316.0	52.3	457.1	23.45	16.83	0.60
10	32.50	0.600	1.1	3 125.0	1 076.1	203.1	595.8	29.00	26.62	0.84
11	35.00	0.500	1.5	3 333.3	1 182.9	111.7	372.2	18.50	37.06	1.34
12	35.00	0.525	1.7	3 278.7	1 283.2	81.9	356.1	18.85	22.93	0.77
13	35.00	0.550	1.9	3 225.8	1 377.5	54.8	342.0	18.55	15.84	0.54
14	35.00	0.575	1.1	3 174.6	1 128.2	213.0	484.2	20.45	39.83	1.36
15	35.00	0.600	1.3	3 125.0	1 252.1	168.2	454.7	20.95	18.38	0.62
16	37.50	0.500	1.7	3 333.3	1 331.2	85.0	250.4	17.50	33.03	1.15
17	37.50	0.525	1.9	3 278.7	1 431.9	56.9	232.5	18.20	25.21	0.88
18	37.50	0.550	1.1	3 225.8	1 174.9	221.8	377.6	20.15	42.00	1.17
19	37.50	0.575	1.3	3 174.6	1 306.1	175.4	343.9	21.05	38.05	1.07
20	37.50	0.600	1.5	3 125.0	1 425.8	134.6	314.6	20.45	36.26	1.08
21	40.00	0.500	1.9	3 333.3	1 478.8	58.8	129.1	15.50	25.88	0.64
22	40.00	0.525	1.1	3 278.7	1 215.8	229.5	276.0	17.25	44.56	1.25
23	40.00	0.550	1.3	3 225.8	1 354.1	181.9	238.2	18.15	31.01	0.93
24	40.00	0.575	1.5	3 174.6	1 480.6	139.8	205.1	18.65	33.70	0.83
25	40.00	0.600	1.7	3 125.0	1 597.5	102.0	175.5	19.35	34.94	1.08

### 2.3 试件制备

粉煤灰地聚物的制备,称取所需粉煤灰,倒入JJ-5型水泥胶砂搅拌机,搅拌30 s。再将配置好的激发剂,倒入搅拌机中,低速搅拌5 min。然后取出部分浆体,用于新拌浆体流动性测试,剩下的倒入试模中,振荡3 min后,填实试模,并排出浆体中的气泡。最后将试模放入温度60℃、湿度90%的混凝土恒温恒湿养护箱中,进行养护,1 d后拆模。Kong<sup>[16-18]</sup>等人研究发现热养护结束后,粉煤灰基地聚物的强度不随着时间发生变化,且热养护粉煤灰地聚物的3 d抗压强度与传统水泥标养28 d的抗压强度相当。所以本试验中对试件进行高温养护3 d后,开展力学特性的试验。

## 3 试验结果分析

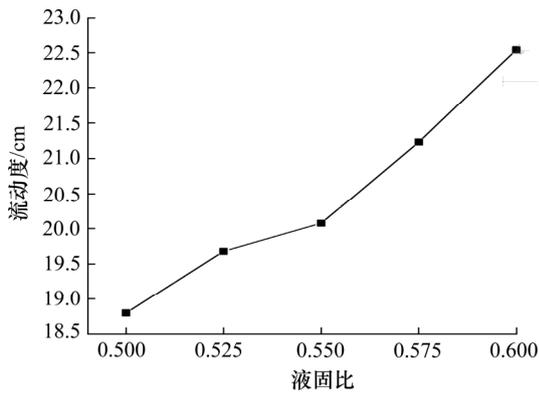
### 3.1 不同因素对浆体流动性的影响

不同因素对浆体流动性的试验结果如图1所示。从图1(a)可以看出,液固比对浆体流动性影响

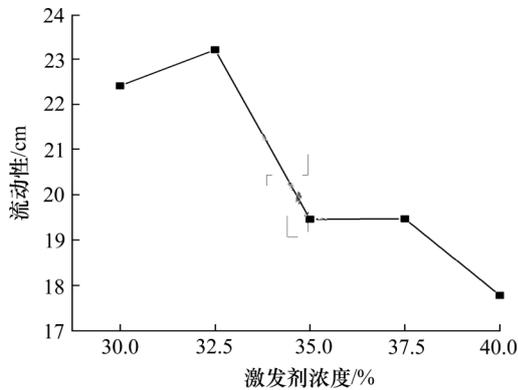
显著,液固比的增加,浆体流动性显著增加。根据Glukhovskiy<sup>[19]</sup>等人建立的地质聚合反应模型,流动性随着液固比增大而增加。这是因为液相成分含量,尤其是水含量的增加,粉煤灰中硅铝相的溶出过程减缓,体系中硅铝离子团不能达到饱和状态,从而使得凝胶不易生成或生成较少,从而保持较高的流动性。

从图1(b)可以看出,激发剂浓度的增大,会显著降低浆体的流动性。因为激发剂随着浓度增加变粘稠,与水玻璃的理化性质是一致的。提升激发剂浓度可通过添加NaOH固体来实现的。NaOH的添加,会使得激发剂的碱性提升,加快了固态硅铝相成分的溶解。同时,水的含量减小,体系中的离子团迅速达到饱和状态,大量凝胶生成,并进行结构重组,从而导致浆体的流动性下降。

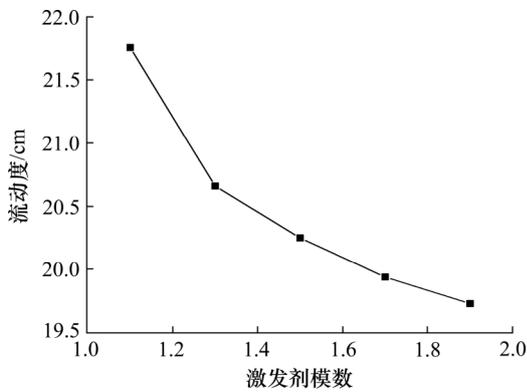
从图1(c)可以看出,浆体流动性随着激发剂模数的增加而降低。SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O的摩尔比增加,激发剂中所含有的硅酸离子更多,能迅速与溶解出来的硅铝相成分形成硅酸盐、硅铝酸盐等离子团,加快



(a) 液固比



(b) 激发剂浓度



(c) 激发剂模数

图 1 不同因素对浆体流动性的影响

Fig. 1 Influence of different factors on the fluidity of matrix

了液相中离子团饱和度, 进一步推进了体系中凝胶的生成和空间网状结构的重组, 降低浆体的流动性。

依据《混凝土外加剂匀质性试验方法(GB/T 8077—2012)》的推荐测得 P.O 42.5 水泥净浆在水胶比为 0.3, 流动度 20 cm 的用量。从表 1 可以看出, 在激发剂浓度较低时, 地聚物浆体能够满足这 20 cm 以上的流动性。当激发剂浓度增高时, 增大液固比或降低激发剂的模数, 也可助浆体流动性的提升。

表 2 流动性正交分析表

指数	激发剂浓度/%	液固比	激发剂模数
K <sub>1</sub>	22.41	18.80	21.75
K <sub>2</sub>	23.21	19.68	20.66
K <sub>3</sub>	19.46	20.08	20.25
K <sub>4</sub>	19.47	21.23	19.94
K <sub>5</sub>	17.78	22.54	19.73
R	5.43	3.74	2.02

注: K<sub>i</sub> 为各类影响因子; R 为极差。

通过对试验结果进行正交试验的极差分析, 结果见表 2。由表 2 可知, 本试验所选取的三因素中, 激发剂浓度对于地聚物流动性的影响是最为重要(极差 5.43), 其次是液固比(极差 3.74), 影响最小的是激发剂模数(极差 2.02)。三因素的最优水平组合是 2-5-1, 即激发剂浓度为 32.5%, 液固比为 0.6, 激发剂模数为 1.1 的组合, 此时流动性达到 22.36。

### 3.2 不同因素对地聚物强度的影响

粉煤灰地聚物高温养护 3 d 后, 开始进行轴心压缩和劈裂抗拉强度试验, 强度结果见表 1。三因素对于地聚物强度的影响趋势如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出, 液固比增加, 地聚物强度呈先下降后上升趋势。但正交试验中没有考虑三因素间的相关影响, 当液固比为 0.575 时, 由于激发剂浓度的影响和体系中水含量的增加, 因此地聚物强度和液固比增大。根据 Glukhovskiy<sup>[19]</sup>等人提出的地聚物反应模型, 水在地聚物的反应过程中, 在前期作为反应物参与反应, 溶解固态硅铝相成分, 而在后期凝胶重组为稳定的空间网状结构时, 体系脱水, 造成材料孔隙率上升, 强度降低。

从图 2(b)可以看出, 激发剂浓度的上升, 粉煤灰地聚物强度先增大后减小。因为浓度的提升, 不仅增加了激发剂的碱性, 加快了固态硅铝成分的溶解。同时, 也使得体系中溶解出来的硅铝相成分更容易与金属阳离子结合, 从而迅速达到饱和, 形成凝胶, 增加材料的强度。当激发剂浓度增加到一定值后, 粉煤灰中硅铝相未完全溶解, 生成的凝胶将未溶解的硅铝相包裹起来, 阻止激发剂与内部硅铝相发生反应, 体系的反应程度降低, 从而地聚物强度下降。

从图 2(c)可以看出, 激发剂模数的增加, 地聚物强度呈下降趋势。由于激发剂模数增加, 所需添加的 NaOH 量减小。因此, 激发剂碱性降低, 不利

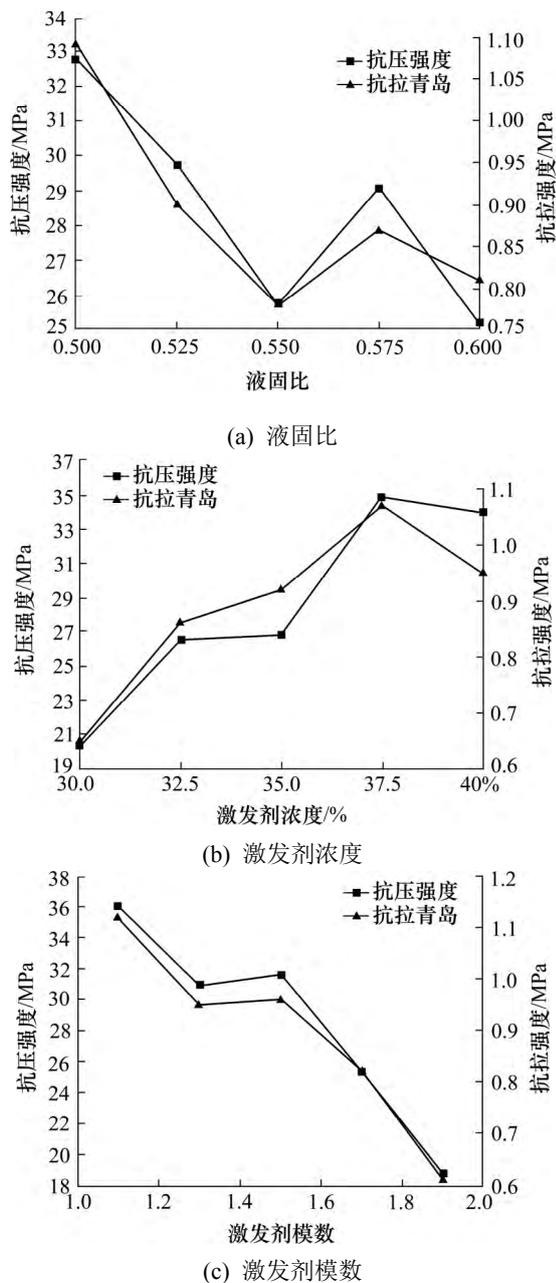


图2 不同因素对基体强度的影响

Fig. 2 Influence of different factors on the strength of matrix

于固态硅铝相的溶解,降低了体系反应的量,从而造成强度下降。地聚物抗拉强度与抗压强度随着各因素的变化,趋势基本一致,但是地聚物抗拉强度低,只有抗压强度的2%~4%,体现了地聚物比混凝土有更大的脆性。

从表3中可以看出,三因素中,对地聚物强度影响最大的是激发剂模数(极差R分别为17.300和0.506)。表明:激发剂模数提供较高的碱性,促使原材料中硅铝相的充分溶解,有利于材料强度的提高。其次是激发剂浓度(极差R分别为14.544和0.420)。表明:浓度的提升不仅能够增强体系的碱

性,还提供了大量的硅,有利于地聚物在最终反应过程中,形成更加稳定的空间网状结构。最小的是液固比(极差R仅为7.566和0.316)。

三因素最优的组合是激发剂浓度37.5%,液固比0.5,激发剂模数1.1,以该组合制作试件,抗压强度高达61.35 MPa,抗拉强度达到2.06 MPa。

表3 地聚物强度正交分析表

Table 3 Orthogonal analysis of geopolymer strength

指数	抗压强度			抗拉强度		
	激发剂浓度	液固比	激发剂模数	激发剂浓度	液固比	激发剂模数
K <sub>1</sub>	20.366	32.780	36.026	0.650	1.096	1.118
K <sub>2</sub>	26.534	29.754	30.930	0.860	0.902	0.948
K <sub>3</sub>	26.808	25.810	31.630	0.926	0.780	0.954
K <sub>4</sub>	34.910	29.078	25.324	1.070	0.870	0.820
K <sub>5</sub>	34.018	25.214	18.726	0.946	0.804	0.612
R	14.544	7.566	17.300	0.420	0.316	0.506

## 4 结论

选取对于偏高岭土地聚物强度有明显影响的液固比、激发剂浓度和激发剂模数3个指数。研究其对地聚物流动性和力学强度的影响,探索不同原料的影响规律是否具有普遍性。通过水泥净浆流动度筒、轴心压缩试验及劈裂抗拉强度试验,得到的结论为:

1) 液固比最能直接影响地聚物的工作性能。液固比上升,地聚物流动性显著增加。激发剂模数上升,降低地聚物浆体流动性。而激发剂浓度上升,则有助于凝胶的形成和重组,降低浆体的流动性。本试验中,当激发剂浓度为32.5%、液固比0.6、激发剂模数为1.1时,浆体流动性最好。

2) 激发剂模数对于地聚物强度的影响最大。激发剂模数上升,能提升地聚物强度。激发剂浓度升高,提高了碱性,增加材料强度。液固比增加,体系水分增多,导致材料中生成更多的孔,从而降低材料的强度。这与液固比、激发剂浓度及模数对偏高岭土地聚物强度的影响一致。本试验中,当激发剂浓度为37.5%、液固比为0.5及激发剂模数为1.1时,粉煤灰地聚物强度最大。

## 参考文献(References):

[1] Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new

- materials[J]. *Therm Anal*, 1991, 37(8): 1633–1656.
- [2] Winnefeld F, Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements-experimental findings and thermodynamic modeling[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(8): 1239–1247.
- [3] Pelletier L, Winnefeld F, Lothenbach B. The ternary system portland cement-calcium sulfoaluminate clinker-anhydrite: Hydration mechanism and mortar properties[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(7): 497–507.
- [4] Yunsheng Z, WEI S. Synthesis and heavy metal immobilization behavior of slag based geopolymer[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(12): 206–213.
- [5] Duxson P, Lukey G C, Deventer R J V. Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1: Physical evolution[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(s52/53/54): 5541–5555.
- [6] Liu Z, Shao N N, Wang D M, et al. Fabrication and properties of foam geopolymer using circulating fluidized bed combustion fly ash[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy & Materials*, 2014, 21(1): 89–94.
- [7] Zhang Y J, Wang Y C, Xu D L, et al. Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(24–25): 6574–6580.
- [8] 陶莹, 顾路, 谭天禹, 等. 煤矸石在地质聚合物制备中的应用[J]. *辽宁科技学院学报*, 2016, 18(3): 13–15. (TAO Ying, GU Lu, TAN Tian-yu, et al. Utilization of coal gangue on the field of preparing geopolymer[J]. *Journal of Liaoning Institute of Science and Technology*, 2016, 18(3): 13–15. (in Chinese))
- [9] 朱晓敏. 粉煤灰地聚合物材料研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2005. (ZHU Xiao-ming. Study on fly ash geopolymer materials[D]. Nanchang: Nanchang University, 2005. (in Chinese))
- [10] Krivenko P V, Yu G, Kovalchuk. Heat-resistant fly ash based geocements[A]. *Proceed. Intern. Conf-geopolymers [C]*. Melbourne Australia: Geopolymer Institute, 2002: 165–173.
- [11] Gao K, Lin K L, Wang D Y. Effects  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano- $\text{SiO}_2$  metakaolin-based geopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2014(53): 503–510.
- [12] Lyu S J, Wang T T, Cheng T W, et al. Main factors affecting mechanical characteristics of geopolymer revealed by experimental design and associated statistical analysis[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 43(complete): 589–597.
- [13] Cheng H, Lin K L, Cui R, et al. Effect of solid-to-liquid ratios on the properties of waste catalyst-metakaolin based geopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2015(88): 157–162.
- [14] 尚善海, 韩邦青. 地聚合物水泥的研究进展[J]. *科技经济市场*, 2006(11): 50–51. (SHANG Shan-hai, HAN Bang-qing. Research progress of geopolymer cement [J]. *Science & Technology Economy Market*, 2006(11): 50–51. (in Chinese))
- [15] 张书政, 龚克成. 地聚合物[J]. *材料科学与工程学报*, 2003, 21(3): 430–436. (ZHANG Shu-zheng, GONG Ke-cheng. Geopolymers[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2003, 21(3): 430–436. (in Chinese))
- [16] Kong D L, Sanjayan J G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(2): 334–339.
- [17] 陈赞, 李婵, 李晶晶. 高速公路沥青路面施工机械碳排放测算模型[J]. *公路工程*, 2019, 44(1): 140–144. (CHEN Yun, LI Chan, LI Jing-jing. The carbon emission calculating model of the asphalt pavement construction machineries of highway[J]. *Highway Engineering* 2019, 44(1): 140–144. (in Chinese))
- [18] 刘平, 刘国涛. 基质沥青添加反应型活性橡胶改善性能的研究[J]. *交通科学与工程*, 2018, 34(4): 1–5. (LIU Ping, LIU Guo-tao. Research on improving the performance of the activated rubber with the addition of the matrix asphalt[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2018, 34(4): 1–5. (in Chinese))
- [19] Glukhovskiy V D. Soil silicates. Their properties technology and manufacturing and fields of application [D]. Kiev: Civil Engineering Institute, 1965.