

[补充信息]

## 粉煤灰地聚物混凝土性能与环境影响的综合评价

梁永宸<sup>1,2</sup>, 石宵爽<sup>1,2,✉</sup>, 张聪<sup>1,2</sup>, 张滔<sup>1,2</sup>, 王晓琪<sup>1,2</sup>

1 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065;

2 破坏力学与工程防灾减灾四川省重点实验室, 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065

[Supplementary Information]

## Comprehensive evaluation of the performance and environmental impact of fly ash geopolymer concrete

LIANG Yongchen<sup>1,2</sup>, SHI Xiaoshuang<sup>1,2,✉</sup>, ZHANG Cong<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoqi<sup>1,2</sup>

1 MOE Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2 Failure Mechanics and Eng. Disaster Prevention and Mitigation Key Lab. of Sichuan Province, College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China

### FA-GPC 环境效益计算结果

表 S1 FA-GPC 的环境影响计算结果

Table S1 Environmental impact calculation results of FA-GPC

粉煤灰地聚物混凝土的 CO <sub>2</sub> -eq 排放量/(kg·m <sup>-3</sup> )							
序号	C (生产阶段)	%	C (运输阶段)	%	C (制备阶段)	%	C (总)
1	197.26	73.84	27.58	10.32	42.3	15.83	267.13
2	213.84	74.88	29.42	10.30	42.3	14.81	285.56
3	208.08	73.95	31.02	11.02	42.3	15.03	281.39
4	236.62	77.12	27.89	9.09	42.3	13.79	306.81
5	226.77	75.97	29.44	9.86	42.3	14.17	298.51
6	245.85	76.96	31.31	9.80	42.3	13.24	319.46
7	275.42	79.62	28.20	8.15	42.3	12.23	345.92
8	267.58	78.78	29.77	8.76	42.3	12.45	339.65
9	256.29	77.69	31.30	9.49	42.3	12.82	329.89

粉煤灰地聚物混凝土的能源消耗/(Mj·m <sup>-3</sup> )							
序号	P (生产阶段)	%	P (运输阶段)	%	P (制备阶段)	%	P (总)
1	3752.77	90.58	389.54	9.40	0.66	0.016	4142.97
2	4050.58	90.68	415.82	9.31	0.66	0.015	4467.06
3	4086.07	90.31	437.69	9.67	0.66	0.015	4524.41
4	4252.99	91.48	395.43	8.51	0.66	0.014	4649.08
5	4240.57	91.04	416.48	8.94	0.66	0.014	4657.71
6	4567.61	91.14	443.26	8.84	0.66	0.013	5011.53
7	4746.72	92.19	401.20	7.79	0.66	0.013	5148.58

8	4757.85	91.83	422.65	8.16	0.66	0.013	5181.16
9	4728.37	91.41	443.42	8.57	0.66	0.013	5172.45

粉煤灰地聚物混凝土的 SO<sub>2</sub>-eq 排放量/(kg·m<sup>-3</sup>)

序号	A (生产阶段)	%	A (运输阶段)	%	A (制备阶段)	%	A (总)
1	2.103	89.97	0.210	8.98	0.024	1.04	2.337
2	2.403	90.62	0.224	8.46	0.024	0.92	2.652
3	2.281	89.76	0.236	9.28	0.024	0.96	2.541
4	2.627	91.69	0.214	7.46	0.024	0.85	2.865
5	2.428	90.69	0.225	8.40	0.024	0.91	2.677
6	2.775	91.32	0.239	7.87	0.024	0.80	3.039
7	3.140	92.85	0.217	6.43	0.024	0.72	3.382
8	2.979	92.17	0.229	7.08	0.024	0.75	3.232
9	2.753	91.25	0.240	7.94	0.024	0.81	3.016

## FA-GPC 基于 LCA 环境影响评价计算过程补充

1、通过层次分析法确定初始权重:

(1) 构造判断矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 计算各指标权重并做归一化处理:

$$\bar{W}_i = \sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 a_{ij}} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3) = (2.18, 0.87, 0.55);$$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^3 \bar{W}_i} = (W_1, W_2, W_3) = (0.594, 0.249, 0.157).$$

其中: W<sub>1</sub> 为全球变暖 (GWP) 所占权重, W<sub>2</sub> 为能源消耗 (PED) 所占权重, W<sub>3</sub> 为酸化 (AP) 所占权重。

(3) 进行一致性检验:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{(AW)_i}{W_i} = 3.054;$$

一致性指标 CI, 检验系数 CR 的计算公式如下:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - 3)}{(3 - 1)} = 0.027; RI = 0.520; CR = \frac{CI}{RI} = 0.052$$

由于 CI 较小, 接近于 0, 且 CR < 0.1, 表明 LCA 的判断矩阵通过一致性检。

2、根据粉煤灰地聚物混凝土的 LCA 数据 (GWP、PED、AP) 通过熵值法确定客观权重:

(1) 构造数据矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} 267.132 & 4142.973 & 2.337 \\ 285.561 & 4467.060 & 2.652 \\ 281.393 & 4524.414 & 2.541 \\ 306.806 & 4649.078 & 2.865 \\ 298.511 & 4657.710 & 2.677 \\ 319.458 & 5011.526 & 3.039 \\ 345.921 & 5148.577 & 3.382 \\ 339.654 & 5181.157 & 3.232 \\ 329.890 & 5172.447 & 3.016 \end{bmatrix}$$

(2) 对数据矩阵 A 进行标准化处理:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 1.001 & 1.001 & 1.001 \\ 0.767 & 0.689 & 0.700 \\ 0.820 & 0.634 & 0.805 \\ 0.497 & 0.514 & 0.496 \\ 0.603 & 0.505 & 0.676 \\ 0.337 & 0.164 & 0.320 \\ 0.001 & 0.032 & 0.001 \\ 0.081 & 0.001 & 0.144 \\ 0.204 & 0.009 & 0.351 \end{bmatrix}$$

(3) 计算第 j 个指标下第 i 个方案占该指标的比重  $p_{ij}$ :

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.232 & 0.282 & 0.222 \\ 0.178 & 0.194 & 0.155 \\ 0.190 & 0.179 & 0.179 \\ 0.115 & 0.145 & 0.110 \\ 0.140 & 0.142 & 0.150 \\ 0.078 & 0.046 & 0.073 \\ 0.000 & 0.009 & 0.000 \\ 0.019 & 0.000 & 0.032 \\ 0.047 & 0.003 & 0.078 \end{bmatrix}$$

(4) 计算各指标客观权重:

表 S2 FA-GPC 环境影响评价指标客观权重

Table S2 The objective weights of environmental impact index of FA-GPC

指标 j	GWP	PED	AP
权重 $w_j$	0.297	0.463	0.241

3、计算综合权重:

表 S3 FA-GPC 环境影响评价指标综合权重

Table S3 The comprehensive weights of each environmental impact index of FA-GPC

指标 j	GWP	PED	AP
权重 $W_j^{\text{总}}$	0.535	0.350	0.115

4、基于 LCA 结论对 FA-GPC 进行灰色聚类评估:

(1) 标准化处理各指标实测值:

表 S4 FA-GPC 环境影响评价指标实测值

Table S4 The measured value of fly ash GPC environmental impact assessment index

评价对象 (i)	评价指标 (j)		
	碳排放 (GWP)	能源消耗 (PED)	酸化 (AP)
1	1.000	1.000	1.000
2	0.766	0.688	0.699
3	0.819	0.633	0.804
4	0.496	0.513	0.495
5	0.602	0.504	0.675
6	0.336	0.163	0.328
7	0.000	0.031	0.000
8	0.080	0.000	0.143
9	0.203	0.008	0.350

(2) 将 FA-GPC 的环境影响划分为 4 个灰类  $s = \text{好}(k = 4)$ , 较好( $k = 3$ ), 一般( $k = 2$ ), 差( $k = 1$ )。

(3) 将各评价指标的数值范围划分为 4 个均匀的小区间, 即  $[0.000, 0.250]$ ,  $[0.250, 0.500]$ ,  $[0.500, 0.750]$ ,  $[0.750, 1.000]$  分别对应于差、一般、好、较好, 在每个区间数值越大代表性能越好。

(4) 计算灰类  $k$  的转折点  $\lambda_j^k$ :  $\lambda_j^1=0.200$ 、 $\lambda_j^2=0.375$ 、 $\lambda_j^3=0.625$ 、 $\lambda_j^4=0.800$ ;

(5) 计算各个聚类指标的可能度函数。

灰类 1: 构造下限测度可能度函数  $f_j^1[-, -, \lambda_j^1, \lambda_j^2]$ , 可能度函数计算公式如下:

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0, 0.375] \\ 1, & x \in [0, 0.200] \\ \frac{0.375-x}{0.175}, & x \in [0.200, 0.375] \end{cases} \quad (1)$$

灰类 2: 构造三角白化权函数 (适中测定白化权函数  $f_j^2[\lambda_j^{k-1}, \lambda_j^k, -, \lambda_j^{k+1}]$ ), 可能度函数计算公式如下:

$$f_j^2(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.200, 0.625] \\ \frac{x-0.625}{0.175}, & x \in [0.625, 0.800] \\ \frac{0.625-x}{0.250}, & x \in [0.375, 0.625] \end{cases} \quad (2)$$

$$f_j^3(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.375, 0.800] \\ \frac{x-0.375}{0.250}, & x \in [0.375, 0.625] \\ \frac{0.800-x}{0.175}, & x \in [0.625, 0.800] \end{cases} \quad (3)$$

灰类 4: 构造上限测度可能度函数  $f_j^4[\lambda_j^s, \lambda_j^{s-1}, -, -]$ , 可能度函数计算公式如下:

$$f_j^4(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.625, 1.000] \\ \frac{x-0.625}{0.175}, & x \in [0.625, 0.800] \\ 1, & x \in [0.800, 1.000] \end{cases} \quad (4)$$

(6) 确定 FA-GPC 的聚类系数和评价级别。

## FA-GPC 抗硫酸盐侵蚀性能评价计算过程

1、根据硫酸盐侵蚀的实验数据通过层次分析法确定初始权重：

(1) 构造判断矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ 3 & 1 & \frac{1}{2} \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 计算各指标权重并做归一化处理:

$$\bar{W}_i = \sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 a_{ij}} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3) = (0.437, 1.145, 2.000);$$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^3 \bar{W}_i} = (W_1, W_2, W_3) = (0.122, 0.320, 0.558).$$

其中： $W_1$  为质量变化率 ( $\Delta W$ ) 所占权重， $W_2$  为相对动弹性模量 ( $K_E$ ) 所占权重， $W_3$  为抗压耐蚀系数 ( $K_f$ ) 所占权重。

(3) 进行一致性检验:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} = 3.022;$$

一致性指标 CI，检验系数 CR 的计算公式如下：

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - 3)}{(3 - 1)} = 0.011; RI = 0.520; CR = \frac{CI}{RI} = 0.021$$

由于 CI 较小，接近于 0，且  $CR < 0.1$ ，表明 LCA 的判断矩阵通过一致性检验。

2、根据硫酸盐侵蚀各评价指标（质量变化率  $\Delta W$ 、相对动弹性模量  $K_E$ 、抗压耐蚀系数  $K_f$ ）实验数据通过熵值法确定客观权重：

(1) 构造数据矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} 0.020 & 95.823 & 0.925 \\ 0.502 & 98.441 & 0.932 \\ 0.237 & 98.466 & 0.943 \\ 0.041 & 97.339 & 0.952 \\ -0.039 & 97.621 & 0.977 \\ -0.337 & 95.897 & 0.946 \\ 0.491 & 96.941 & 0.913 \\ 0.301 & 94.705 & 0.939 \\ -0.139 & 96.211 & 0.957 \end{bmatrix}$$

(2) 数据矩阵 A 进行标准化处理:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.426 & 0.298 & 0.180 \\ 1.001 & 0.994 & 0.297 \\ 0.685 & 1.001 & 0.470 \\ 0.451 & 0.701 & 0.605 \\ 0.356 & 0.776 & 1.001 \\ 0.001 & 0.318 & 0.517 \\ 0.988 & 0.596 & 0.001 \\ 0.761 & 0.001 & 0.413 \\ 0.237 & 0.401 & 0.695 \end{bmatrix}$$

(3) 计算第 j 个指标下第 i 个方案占该指标的比重  $p_{ij}$ :

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.087 & 0.059 & 0.043 \\ 0.204 & 0.195 & 0.071 \\ 0.140 & 0.197 & 0.112 \\ 0.092 & 0.138 & 0.145 \\ 0.073 & 0.153 & 0.239 \\ 0.000 & 0.062 & 0.124 \\ 0.201 & 0.117 & 0.000 \\ 0.155 & 0.000 & 0.099 \\ 0.048 & 0.079 & 0.166 \end{bmatrix}$$

(4) 各指标客观权重:

表 S5 FA-GPC 抗硫酸盐侵蚀评价指标客观权重

Table S5 The objective weights of each sulfate resistance index of FA-GPC

指标 j	$\Delta W$	$K_E$	$K_f$
权重 $W_j$	0.338	0.321	0.341

### 3、计算综合权重

表 S6 FA-GPC 抗硫酸盐侵蚀评价指标综合权重

Table S6 The comprehensive weights of each sulfate resistance index of fly ash GPC

指标 j	$\Delta W$	$K_E$	$K_f$
权重 $W_j^{\text{总}}$	0.123	0.307	0.569

### 4、基于硫酸盐侵蚀各指标对 FA-GPC 进行灰色聚类评估:

(1) 标准化处理各指标实测值:

表 S7 FA-GPC 抗硫酸盐侵蚀评价指标实测值

Table S7 The measured value of FA-GPC sulfate resistance index

评价对象 (i)	评价指标 (j)		
	$\Delta W$ (质量变化率)	$K_E$ (相对动弹性模量)	$K_f$ (抗压耐蚀系数)

1	0.425	0.297	0.179
2	1.000	0.993	0.296
3	0.684	1.000	0.469
4	0.450	0.700	0.604
5	0.355	0.775	1.000
6	0.000	0.317	0.516
7	0.987	0.595	0.000
8	0.760	0.000	0.412
9	0.236	0.400	0.694

(2) 将 FA-GPC 的抗硫酸盐侵蚀性能划分为 4 个灰类  $s = \text{好}(k = 4)$ , 较好( $k = 3$ ), 一般( $k = 2$ ), 差( $k = 1$ )。

(3) 将各评价指标的数值范围划分为 4 个均匀的小区间, 即 $[0.000,0.250]$ ,  $[0.250,0.500]$ ,  $[0.500,0.750]$ ,  $[0.750,1.000]$ 分别对应于差、一般、好、较好, 在每个区间数值越大代表性能越好。

(4) 计算灰类  $k$  的转折点 $\lambda_j^k$ :  $\lambda_1^1=0.200$ 、 $\lambda_2^2=0.375$ 、 $\lambda_3^3=0.625$ 、 $\lambda_4^4=0.800$ 。

(5) 计算各个聚类指标的可能度函数。

(6) 确定 FA-GPC 的聚类系数和评价级别。

### 粉煤灰粒度测试报告

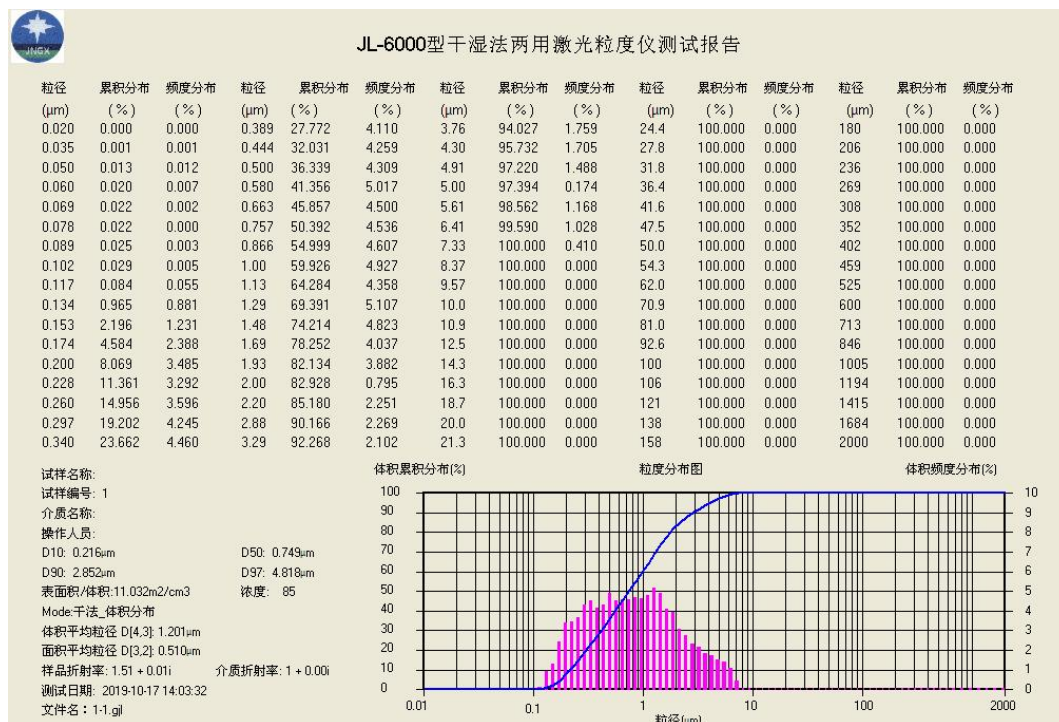


图 S1 粉煤灰粒度测试报告

Fig.S1 The particle size information of fly ash