

# 基于正交设计和灰色关联理论的混杂 纤维 ECC 优化设计

高英力<sup>1</sup>,裴甘鹏<sup>1</sup>,徐艺珅<sup>2</sup>,冷政<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学交通运输工程学院,湖南长沙 410114;2. 佛山市交通科技有限公司,广东佛山 528000;  
3. 中建西部建设湖南有限公司,湖南长沙 410004)

**摘要目的** 对混杂纤维工程用水泥基复合材料进行配合比优化设计,得到综合性能优越的混杂纤维 ECC 材料(HFRECC)。**方法** 采用正交试验研究水胶比、PVA 纤维、碳酸钙晶须(CW)以及改性 PP 纤维(MPP)体积分数等因素对流动度、立方抗压强度、抗折强度以及劈裂抗拉强度的影响,利用组合加权灰色关联理论确定各性能的权重,实现 HFRECC 配合比的优化设计。**结果** PVA 纤维体积分数为 1.0%,碳酸钙晶须体积分数为 0.8%,改性 PP 纤维体积分数为 0.6% 时, HFRECC 的综合性能最佳。抗压强度提高了 23%,抗折强度提高了 42.4%,劈裂抗拉强度提高了 34.4%,折压比提高了 17.8%,流动度提升了 28.6%。**结论** 组合加权-灰色关联分析方法可实现多目标性能需求的混杂纤维 ECC 配合比优化设计,适量 PVA 纤维、CW 及 MPP 纤维的混杂在一定程度上能提升 HFRECC 的性能。

**关键词** ECC 材料;混杂纤维;组合加权;灰色关联理论

中图分类号 TU528 文献标志码 A

## Optimization Design of Hybrid Fiber Reinforced ECC Based on Orthogonal and Grey Relational Theory

GAO Yingli<sup>1</sup>, PEI Ganpeng<sup>1</sup>, XU Yishen<sup>2</sup>, LEN Zheng<sup>3</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, 410114; 2. Foshan Highway & Bridge Construction Co. Ltd., Foshan, China, 528000; 3. China West Construction Hunan Group Co. Ltd., Changsha, China, 410004)

**Abstract:** The mixture ratio of the multi-fiber synergy modified ECC was optimized based on orthogonal design and the combined weighted-grey relational theory, and then the hybrid fiber reinforced engineered cementitious composites (HFRECC) with superior comprehensive

收稿日期:2020-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51978080);国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1833127);湖南省自然科学基金项目(2018JJ4016);湖南省教育厅科学研究重点项目(18A129)

作者简介:高英力(1977—),男,教授,博士,主要从事新型建筑材料和高性能功能路面材料方面研究。

performance was obtained. The orthogonal test method was used to study the effects of water-to-binder ratio, content of PVA, calcium carbonate whisker (CW) and modified PP (MPP) on HFRECC performance, including the fluidity, cube compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength. Based on weight of each performance determined by the combined weighted assignment, the optimum mixing proportion of HFRECC with the best comprehensive performance was obtained. The optimum mixing proportion with the superior comprehensive performance of HFRECC is that, the water-binder ratio of 0.31, 1.0% PVA fiber (volume fraction), 0.8% CW and 0.6% MPP. Compared with the control group, the cube compressive strength increased by 23%, the flexural strength increased by 42.4%, the split tensile strength increased by 34.4%, the compression ratio increased by 17.8%, and the fluidity increased by 28.6%. The combined weighted-grey relational can successfully optimize mix proportion of HFRECC to satisfy multi-purpose performance requirement. The mixing of PVA, CW and MPP can improve the propertie of HFRECC to some extent.

**Key words:** engineering cementitious composites; hybrid fibers; combined weighted; grey relational theory

混凝土被广泛地应用在桥梁、隧道等工程基础设施中,但混凝土材料具有易裂、延性差、拉伸强度不足等问题,严重影响结构的耐久性,已成为阻碍其发展的关键工程问题<sup>[1]</sup>。工程用水泥基复合材料(Engineering Cementitious Composite, ECC)是为了克服水泥基材料易裂、脆性大、变形差等而发展的多重稳态开裂材料<sup>[2-3]</sup>,其用低于2%体积掺量的高强度高弹性短纤维进行增延,极限拉应变可达到3%~5%,具有应变-硬化和稳态开裂特征<sup>[4]</sup>,展现出较好的耐久性和韧性。但是ECC的高成本限制了其在建筑工程中的大规模应用。为了得到一种价格低廉、性能优越的ECC材料,部分学者开始利用混杂纤维改性ECC材料<sup>[5-6]</sup>。Y. PAN等<sup>[7]</sup>利用玻璃纤维和聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)纤维混杂制备一种新型ECC机场道面材料,可以接受3万次冲击,大大延长了机场道路的服役时间。S. DEB等<sup>[8]</sup>将原纤化和单丝聚丙烯(Polypropylene, PP)纤维混杂制备了新的纤维组合ECC材料,其抗拉性能和延性得到提高,但弯曲性能提升不明显。Q. Zhang等<sup>[9-10]</sup>将PP纤维和丙烯酸乳胶结合制备了一种超轻型ECC,通过单丝拔出试验发现聚合物可以明显提升纤维和基

体的黏结性,其黏结能力相比常规ECC提升144%,能够更好地改善钢结构的耐火性及抗冲击能力。H. MA等<sup>[11]</sup>用碳酸钙晶须(Calcium Carbonate Whisker, CW)改性常规ECC,改性后的混杂纤维ECC材料较常规ECC材料抗压强度提升了23%,抗拉强度和拉应变分别提升了53%和114%。张聪等<sup>[12]</sup>通过对比钢-PVA纤维、钢-PVA-CW的力学性能,发现CW与其他纤维混杂能够提升抗拉强度和拉伸韧性。目前,混杂纤维基本聚焦于钢-PVA纤维、钢-PP纤维、玄武岩-PVA纤维,其改性是基于纤维本构关系的混杂,但是水泥基材料本身是多相态材料,内部结构复杂,其破坏过程是多层次的,纤维的加入应为多种纤维的混杂<sup>[13]</sup>。笔者在大纤维上选择了压痕处理的国产改性PP纤维(Modified Polypropylene, MPP),小纤维选取国产PVA纤维,微米级纤维选取国产碳酸钙晶须,同时为了解决PP纤维锚固力不足,选用乙烯-醋酸乙烯聚合物(EVA)进行改性,以获得一种性能优越的混杂纤维ECC材料。通过正交试验设计,探究水胶比、PVA纤维、CW及MPP纤维对HFRECC性能的影响。并在此基础上,以流动度、经时损失 $S_{30}$ 、立方体抗压强度、抗折强度、劈裂抗

拉强度作为优化指标,利用组合加权-灰色关联分析方法研究对 HFRECC 综合性能影响的最主要因素,从而得到综合性能最优的设计参数。

## 1 试验

### 1.1 原材料

#### (1) 基体材料

水泥:湖南南方水泥集团有限公司生产;粉煤灰:湖南岳阳电厂生产,比表面积  $430 \text{ m}^2/\text{kg}$ ;硅灰:比表面积  $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kg}$ ;石英砂:  $0.15 \sim 0.075 \text{ mm}$ ;减水剂采用聚羧

酸高效减水剂,减水率 40%,掺量为胶凝材料的 0.8%。

#### (2) 纤维及聚合物材料

PVA 纤维:上海影佳公司出产,表面经特殊处理,易于分散;MPP 纤维:山东省凯瑞达建材有限公司生产,表面经压痕处理;CW:海峰竺有限公司生产。各纤维的基本参数如表 1 所示。EVA 表观密度  $495 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,掺量为胶凝材料质量分数的 4%。由于 EVA 的加入,会引入大量气泡,故加入胶凝材料质量分数为 0.17% 的有机硅高效消泡剂。

表 1 纤维材料的性能参数

Table 1 Physical and mechanical properties of each fiber

纤维	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	长度/mm	直径/ $\mu\text{m}$	长径比	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
PVA	1.30	12	39	308	1 250	36
MPP	0.95	20	250	80	750	10
CW	2.80	0.03~0.04	0.5~1.2	25~80	3 000~6 000	410~680

### 1.2 试验方法

笔者采用胶砂比 0.36,  $m$ (水泥): $m$ (粉煤灰): $m$ (硅灰) = 0.3:0.6:0.1, 选取水胶比  $A$ 、PVA 体积分数  $B$ 、CW 体积分数  $C$  和 MPP 体积分数  $D$  为影响因素设计正交试验  $L_9(3^4)$ (见表 2)。

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal test scheme

编号	$A$	$B/\%$	$C\%$	$D\%$
1	0.31	0.8	0.8	0.4
2	0.31	0.9	0.9	0.5
3	0.31	1.0	1.0	0.6
4	0.33	0.8	0.9	0.6
5	0.33	0.9	1.0	0.4
6	0.33	1.0	0.8	0.5
7	0.35	0.8	1.0	0.5
8	0.35	0.9	0.8	0.6
9	0.35	1.0	0.9	0.4

参照国内外的 ECC 材料成型方式及其他纤维混凝土成型模式<sup>[14-15]</sup>,将砂石、胶材、

EVA、CW 及适量 PVA 纤维进行干拌 5 min,再加水、SP 减水剂和消泡剂搅拌 5 min,最后加入 MPP 纤维和剩余 PVA 纤维进行全拌 6 min。根据《水泥胶砂流动度检测方式》(GB/T 2419—2005)测新拌混合物流动度  $D_0$ ,同时进行流动度的经时损失试验,分别测试 10、30、60 min 后对应的流动度  $D_n$ ,计算对应的经时损失率  $S_n$ 。将按正交表制备的 HFRECC 试件在温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度为 95% 以上的标准养护室内养护,分别测试其抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度。

$$S_n = \frac{D_0 - D_n}{D_0} \quad (1)$$

### 1.3 基于正交试验的组合加权-灰色关联配合比优化设计

正交试验仅能得到单一性能最优的配合比,无法得到综合性能最佳的配合比;而利用灰色关联分析可得到综合性能最佳的配合比。但是不同指标在测试结果中的重要性不同,评价方法有两种:主观加权法和客观加权

法。主观加权法很难避免评估结果的主观任意性。客观加权法包括熵权法,均方差法和偏差法,客观加权法依赖样本,不能体现各指标自身价值的重要性。因此,笔者通过主观加权法和熵权法确定相关指标的权重,结合灰色关联分析对正交试验的结果进行评价,得到综合性能最优的配合比<sup>[16-17]</sup>。

### 1.3.1 指标标准化处理

为了消除数据值域和单位带来的影响,将各指标数据进行标准化处理。

对于值越小,效果越优的性能指标,即效益指标进行标准化处理:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - (y_i)_{\min}}{(y_i)_{\max} - (y_i)_{\min}} \quad (2)$$

对于值越大,效果越优的性能指标,即成本指标进行标准化处理:

$$r_{ij} = \frac{(y_i)_{\max} - y_{ij}}{(y_i)_{\max} - (y_i)_{\min}} \quad (3)$$

式中: $(y_i)_{\max}$ 为第*i*个指标的最大值; $(y_i)_{\min}$ 为第*i*个指标的最小值; $y_{ij}$ 为第*i*个评价对象的第*j*个指标值; $r_{ij}$ 为标准化后的指标值。

### 1.3.2 确定权重

#### (1) 客观加权法 - 熵权法

客观赋权法认为,当各项性能指标之间的差异比较大时则认为该项性能指标对综合性能的影响比较大,因此该项性能指标所分配的权重也应该更多。

熵权法的基本思路是根据指标变异性的来大小来确定客观权重,计算指标变异性即信息熵 $e_j$ ;根据得到的信息熵,计算得到客观权重 $\omega_{ij}$ 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \ln \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (4)$$

$$\omega_{ij} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (5)$$

式中: $e_j$ 为指标*j*的信息熵; $\omega_{ij}$ 为第*j*个指标的权重。

#### (2) 主观加权法

主观加权法 $\omega_{2j}$ 通过主观判断来确定权

重,考虑各指标在目标中的重要性进行主观分配权重。

#### (3) 组合加权法

结合主观权重和客观权重计算综合权重 $\omega_j$ 。这样既能避免仅考虑客观权重的片面性,又能够考虑主观与客观权重相比的重要性。

$$\omega_j = \frac{\omega_{1j}\omega_{2j}}{\sum_{j=1}^m \omega_{1j}\omega_{2j}} \quad (6)$$

### 1.3.3 组合加权灰色关联法

对各指标赋予相应的综合权重,然后计算出最终的灰色相关度。

$$d_{ij} = \frac{\min_i \min_j |r_{0j} - r_{ij}| - \rho \max_i \max_j |r_{0j} - r_{ij}|}{|r_{0j} - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |r_{0j} - r_{ij}|} \quad (7)$$

$$g_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}\omega_j \quad (8)$$

式中: $d_{ij}$ 为第*i*个评价对象的第*j*个指标值的灰色关联系数; $r_{0j}$ 为第*j*个指标最优值; $\rho$ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$ ,通常 $\rho$ 取0.5。

## 2 结果与分析

不同配比的 HFRECC 流动度、立方体抗压强度 $f_{cu}$ 、抗折强度 $f_{cr}$ 和劈裂抗拉强度 $f_{ts}$ 如表3所示。为探究不同因素对 HFRECC 性能的影响程度,利用 SPSS 软件对正交试验的结果进行极差和方差分析,其结果如表4、表5所示。

表3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test

试验 编号	流动度/ mm	$f_{cu}$ / MPa	$f_{cr}$ / MPa	$f_{ts}$ / MPa	折压比
1	241	40.2	10.98	4.32	0.273 1
2	226	43.6	11.16	4.62	0.256 0
3	238	47.8	13.23	5.03	0.276 8
4	231	45.5	11.13	4.41	0.244 6
5	221	42.8	11.28	4.78	0.263 6
6	225	41.9	13.46	4.87	0.328 4
7	232	43.2	10.88	4.62	0.251 9
8	233	45.3	11.06	4.53	0.244 1
9	227	42.8	12.99	4.76	0.303 5

表4 试验结果极差分析

Table 4 Range analysis of the test results

指标	影响因素	K1	K2	K3	R
流动度	A	235.0	225.7	230.7	9.3
	B	234.7	226.7	230.0	8.0
	C	233.0	228.0	230.3	5.0
	D	229.7	227.7	234.0	6.3
抗压强度	A	43.87	43.40	43.78	0.467
	B	42.97	43.90	44.17	1.200
	C	42.47	43.97	44.60	2.133
	D	41.93	42.90	46.20	4.267
抗折强度	A	11.79	12.06	11.64	0.413
	B	11.00	12.17	13.33	2.330
	C	11.93	11.76	11.80	0.173
	D	11.75	11.93	11.81	0.183
劈裂抗拉强度	A	4.657	4.687	4.637	0.050
	B	4.450	4.643	4.887	0.437
	C	4.573	4.697	4.810	0.237
	D	4.620	4.703	4.657	0.083
折压比	A	0.269	0.279	0.266	0.012
	B	0.256	0.255	0.303	0.048
	C	0.282	0.268	0.264	0.018
	D	0.280	0.279	0.255	0.025

表5 试验结果方差分析

Table 5 Variance analysis of the test results

指标	影响因素	偏平方差和	自由度	均方差和	F值	显著性水平 $\alpha$
流动度	A	261.778	2	130.889	6.606	0.011
	B	210.111	2	105.056	4.026	0.026
	C	85.444	2	42.722	1.326	0.313
	D	119.111	2	59.556	1.848	0.213
抗压强度	A	8.058	2	4.029	2.014	0.189
	B	12.818	2	6.409	3.204	0.089
	C	24.391	2	12.196	6.098	0.021
	D	38.218	2	14.109	7.054	0.014
抗折强度	A	0.390	2	0.195	1.882	0.031
	B	5.879	2	2.939	27.235	0.001
	C	0.230	2	0.115	1.039	0.793
	D	0.231	2	0.117	1.005	0.806
劈裂抗拉强度	A	0.103	2	0.052	2.002	0.547
	B	0.703	2	0.352	14.155	0.012
	C	0.723	2	0.362	11.328	0.032
	D	0.070	2	0.35	2.770	0.659
折压比	A	0.000 1	2	0.000 1	2.825	0.112
	B	0.002 2	2	0.001 1	18.975	0.001
	C	0.001 4	2	0.000 7	12.478	0.011
	D	0.001 8	2	0.000 9	15.442	0.008

## 2.1 流动度

从表3可知,不同配比的 HFRECC 流动度均大于 220 mm,3 种纤维的混杂提高了流

动性。从表4极差分析结果可知,影响 HFRECC 流动度的因素大小依次为 A、B、D、C,最佳组合为  $A_1B_1D_3C_1$ 。随着因素水平的

提升,流动度均呈先降后升的趋势,其中因素  $A$ 、 $B$  随水平提升流动度变化明显,说明水胶比和 PVA 纤维体积分数是影响 HFRECC 流动度的主要因素。从表 5 可知,水胶比和 PVA 体积分数是流动性的显著性影响因素,与极差分析一致。拌合物经时损失如图 1 所示。在 0 ~ 30 min, HFRECC 流动度的经时损失率仅为 1% ~ 4%, 60 min 经时损失率为 8% ~ 15%,  $S_{60}$  为  $S_{10}$  的 4 ~ 15 倍,但  $S_{30}$  仅为  $S_{10}$  的 1 ~ 3 倍。建议 HFRECC 拌和到施工时间保持在 30 min 为宜,不宜超过 1 h。

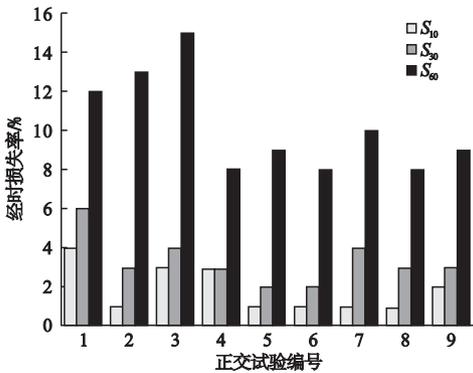


图 1 拌合物经时损失率

Fig. 1 Rate of fluidity loss over time

## 2.2 立方体抗压强度

由表 4 可知, HFRECC 试件立方体抗压强度影响因素的主次顺序依次为  $D$ 、 $C$ 、 $B$ 、 $A$ , 最优配比为  $D_3C_3B_3A_1$ 。  $A$  从 0.31 增加至 0.33,  $f_{cu}$  降低 1.1%; 从 0.31 增加至 0.35,  $f_{cu}$  降低 0.2%, 说明水胶比对抗压强度的影响并不明显。  $B$  从 0.8% 增加至 0.9%,  $f_{cu}$  提高 2.2%; 从 0.8% 增加至 1.0%,  $f_{cu}$  仅提高 2.8%。  $C$  从 0.8% 增加至 0.9%,  $f_{cu}$  提高 3.5%; 从 0.8% 增加至 1.0%,  $f_{cu}$  提高 5.0%。  $D$  从 0.4% 增加至 0.5%,  $f_{cu}$  提高 2.3%; 从 0.4% 增加至 0.6%,  $f_{cu}$  提高 10.2%。随着 MPP、CW 及 PVA 掺量的增加, HFRECC 的抗压强度有所提高, 且因素  $C$ 、 $D$  是其抗压强度的主要影响因素。由表 5 可知, 因素  $C$  和  $D$  的显著性水平小于 0.05, 因此 CW 体积分数和 MPP 纤维体积分数是 HFRECC 抗压强

度的显著性影响因素, 结果与极差分析一致。

## 2.3 抗折强度

从表 4 可知, HFRECC 抗折强度影响因素的主次顺序依次为  $B$ 、 $A$ 、 $D$ 、 $C$ , 仅从抗折强度考虑, 最优组合为  $B_3A_2C_1D_2$ 。  $A$  从 0.31 增加至 0.33,  $f_{cf}$  增加 2.3%;  $A$  从 0.31 增加至 0.35,  $f_{cf}$  降低 1.2%, 说明不能仅从降低水胶比来提升抗折强度。  $B$  从 0.8% 增加至 0.9%,  $f_{cf}$  提高 10.6%; 从 0.8% 增加至 1.0%,  $f_{cf}$  提高 21.2%。  $C$  从 0.8% 增加至 0.9%,  $f_{cf}$  降低 1.4%; 从 0.8% 增加至 1.0%,  $f_{cf}$  降低 1.1%, 说明 CW 的掺入会影响抗折强度, CW 不宜过量。  $D$  从 0.4% 增加至 0.5%,  $f_{cf}$  提高 1.5%; 从 0.4% 增加至 0.6%,  $f_{cf}$  提高 0.5%。从抗折试验可知 PVA 纤维对试件抗弯起主要作用, 其他纤维的加入起到协同增韧作用。 PVA 纤维体积分数对 HFRECC 抗折强度的影响程度远大于水胶比、MPP 纤维体积分数及 CW 体积分数, 其中后二者对抗折强度影响程度相近。由表 5 可知,  $A$  的显著性水平小于 0.05,  $B$  的显著性水平小于 0.01, 结果表明 PVA 纤维体积分数是 HFRECC 抗折强度的极显著因素, 水胶比是 HFRECC 抗折强度的显著因素。

## 2.4 劈裂抗拉强度

由表 4 可知, 各因素对 HFRECC 劈裂抗拉强度的影响程度从大到小依次为  $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $A$ , 最优组合为  $B_3C_3D_2A_2$ 。  $B$  从 0.8% 增加至 0.9%,  $f_{ts}$  提高 4.3%; 从 0.8% 增加至 1.0%,  $f_{ts}$  提高 9.8%。  $C$  从 0.8% 增加至 0.9%,  $f_{ts}$  提高 2.7%; 从 0.8% 增加至 1.0%,  $f_{ts}$  提高 5.2%。  $D$  从 0.4% 增加至 0.5%,  $f_{ts}$  提高 1.8%; 从 0.4% 增加至 0.6%,  $f_{ts}$  提高 0.8%。  $A$  从 0.31 增加至 0.33,  $f_{ts}$  提高 0.9%; 从 0.31 增加至 0.35,  $f_{ts}$  降低 0.4%。 PVA 纤维体积分数对 HFRECC 劈裂抗拉强度的影响程度与抗折强度相近。从表 5 中劈裂抗拉强度方差分析可知, PVA 纤维体积分数和 CW 体积分数为 HFRECC 劈裂抗拉强

度的显著性影响因素。

## 2.5 折压比

由表4可知,4个因素对折压比的影响程度从大到小依次为B、D、C、A,仅从折压比考虑,较优组合为 $B_3D_1C_1A_2$ 。从表5中HFRECC折压比的方差分析可知,PVA纤维体积分数、CW体积分数和MPP纤维体积分数是折压比的显著性影响因素,PVA纤维体积分数对折压比贡献远大于CW体积分数和MPP纤维体积分数。

## 3 基于正交试验的组合加权-灰色关联配合比优化设计

以流动度、经时损失 $S_{30}$ 、立方体抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度作为优化指标,通过组合加权-灰色关联法对正交试验的结果进行处理,获得最佳的配合比设计参数。

经时损失 $S_{30}$ 是成本指标,初始值由式(3)处理,而其他4个指标是效益指标,初始值由式(2)处理。并根据式(4)和式(5),计算出5个指标的客观权重。

$$W_{ij} = [0.1457 \quad 0.1364 \quad 0.1309 \quad 0.3804 \quad 0.2066]$$

工作性能与力学性能同等重要,工作性能由两个指标代表,力学性能由3个指标代表,这5个指标的主观权重设置结果为

$$W_{zj} = [0.2500 \quad 0.2500 \quad 0.1667 \quad 0.1667 \quad 0.1666]$$

根据式(6),流动度、经时损失 $S_{30}$ 、立方体抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度的组合权重计算结果为

$$W_j = [0.1915 \quad 0.1793 \quad 0.1147 \quad 0.3334 \quad 0.1811]$$

根据式(7)和式(8),计算出不同测试方

表6 最优组合R组及对照组L的工作性能及力学性能

Table 6 Work performance and mechanical properties of optimal mixtures of R and control group L

编号	流动度/mm	$S_{10}/\%$	$S_{30}/\%$	$S_{60}/\%$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_{ct}/\text{MPa}$	$f_{ts}/\text{MPa}$	折压比
R	238	1	3	7	48.2	13.76	5.23	0.281
L	185	5	8	12	39.8	9.52	3.89	0.239

案的灰色相关度。灰色关联度随各因素变化而变化的趋势如图2所示。各因素关联度分别为 HFRECC 综合性能最佳的组合为水胶比 0.31, PVA 体积分数 1.0%, CW 分数 0.8%, MPP 体积分数 0.6%。

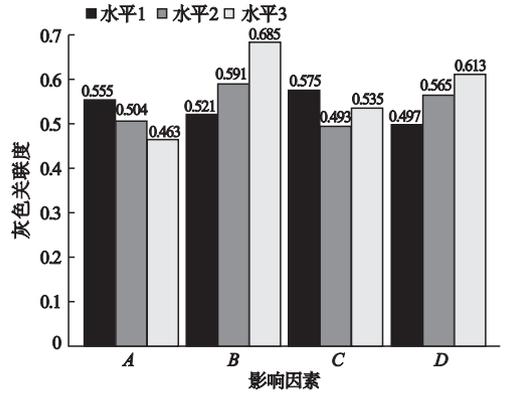


图2 基于灰色关联分析的参数优化

Fig. 2 Optimization of mix proportion parameters based on grey relational analysis

由组合加权-灰色关联分析得到最优配比不在正交试验组中,故按最优配比重重新制作试件R,测其工作性能及力学性能。同时为了验证试验的可行性按照日本可乐丽公司推荐 ECC 配方设置了试验组L,其胶砂比 0.36,水胶比 0.31,  $m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}) = 0.5:0.5$ ,日本 PVA 掺量为 2%,R 组和对照组 L 的结果如表 6 所示。在此配合比下,流动度为 238 mm,仅次于最大组(241 mm),经时损失 $S_{30}$ 为 3%,相较于基准组 L,最优配比 R 的力学性能有很大提高,抗压强度提高了 23%,抗折强度提高了 42.4%,劈裂抗拉强度提高了 34.4%,折压比提高了 17.8%,流动度提升了 28.6%,抗折强度及劈裂抗拉强度的大幅度增长说明改性后的 ECC 变形能力有了较好的改善。

## 4 结 论

(1) 进行混杂纤维 ECC 的正交试验,不同配比拌合物流动度均大于 220 mm,远高于基准组,拌合物的流动性有较好地改善。且 HFRECC 拌和到施工时间保持在 30 min 为宜,不宜超过 1 h。

(2) PVA 纤维体积分数分别是 HFRECC 流动度和抗折强度、劈裂抗拉强度的显著性影响因素,CW 体积分数分别是抗压强度、劈裂抗拉强度的显著性影响因素,MPP 纤维体积分数是抗压强度的极显著影响因素,综合分析其工作性能,3 种纤维混杂对 HFRECC 强度的影响表现正混杂效应。

(3) 通过组合加权 - 灰色关联度分析,解决了多因素多水平正交试验确定最优参数时主观性大的问题,实现对混杂纤维 ECC 的配合比综合优化设计。

## 参考文献

- [1] 肖忠明,郭俊萍,宋立春,等. 混合材对水泥浆体脆性的影响及其机理的研究[J]. 水泥, 2011(8):15-17.  
(XIAO Zhongming, GUO Junping, SONG Lichun, et al. Effect of admixture on brittleness of cement paste and its mechanism [J]. Cement, 2011(8):15-17.)
- [2] JIN Q, LI V C. Structural and durability assessment of ECC/concrete dual-layer system for tall wind turbine towers [J]. Engineering structures, 2019, 196:338-345.
- [3] JIN Q, LI V C. Development of lightweight engineered cementitious composite for durability enhancement of tall concrete wind towers [J]. Cement and concrete composites, 2019, 96:87-94.
- [4] MA H, QIAN S Z, ZHANG Z G, et al. Tailoring engineered cementitious composites with local ingredients [J]. Construction and building materials, 2015, 101:584-595.
- [5] ZHANG D, YU J, WU H, et al. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile engineered cementitious composites (ECC) [J]. Composites part b-engineering, 2020, 184:1-20.
- [6] VALERIA C, ALESSANDRO N. Mechanical characterization of engineered cement-based composites prepared with hybrid fibres and expansive agent [J]. Composites part b-engineering, 2016, 98:389-396.
- [7] PAN Y, WU C, CHENG X, et al. Impact fatigue behaviour of GFRP mesh reinforced engineered cementitious composites for runway

pavement [J]. Construction and building materials, 2020, 230:1-13.

- [8] DEB S, MITRA N, MAJUMDER S B, et al. Improvement in tensile and flexural ductility with the addition of different types of polypropylene fibers in cementitious composites [J]. Construction and building materials, 2018, 180:405-411.
- [9] ZHANG Q, LI V C. Micromechanics of an ultra lightweight engineered cementitious composite containing polymeric latex admixture [J]. Strain-hardening cement-based composites, 2018, 15:70-78.
- [10] ZHANG Q, LI V C. Development of durable spray-applied fire-resistive engineered cementitious composites (SFR-ECC) [J]. Cement and concrete composites, 2015, 60:10-16.
- [11] MA H, CAI J, LIN Z, et al. CaCO<sub>3</sub> whisker modified engineered cementitious composite with local ingredients [J]. Construction and building materials, 2017, 151:1-8.
- [12] 张聪,夏超凡,袁振,等. 高温作用对混杂纤维增强高延性水泥基复合材料拉伸性能的影响 [J]. 功能材料, 2020, 51(2):2007-2013.  
(ZHANG Cong, XIA Chaofan, YUAN Zhen, et al. Effect of high temperature on the tensile properties of hybrid fiber reinforced high ductility cementitious composites [J]. Journal of functional materials, 2020, 51(2):2007-2013.)
- [13] CAO M L, XIE C P, LI L, KHAN M. The relationship between reinforcing index and flexural parameters of new hybrid fiber reinforced slab [J]. Computers concrete, 2018, 22(5):481-492.
- [14] ZHOU J, QIAN S Z, YE G, et al. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence [J]. Cement and concrete composites, 2012, 34:342-348.
- [15] BURAK F, KAMILE T F, RAVI R, et al. Influence of matrix flow ability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC [J]. Composites part b-engineering, 2014, 60:359-370.
- [16] 张绍武,吕安安,赵志刚,等. 装配式夹芯保温板拉结件性能指标评价体系研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2):255-262.  
(ZHANG Shaowu, Lü Anan, ZHAO Zhiguang, et al. Assembling evaluation index of tensile strength of assembled sandwich insulation board department of research [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2):255-262.)
- [17] JANGRA K K, SHARMA N, KHANNA R, MATTA D. An experimental investigation and optimization of friction stir welding process for AA6082 T6 (cryogenic treated and untreated) using an integrated approach of Taguchi, grey relational analysis and entropy method [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part L: journal of materials; design and applications, 2015, 230(2):454-469.

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)