

高延性水泥基复合材料(ECC)正交试验

吴倩倩¹, 蔡海兵^{1*}, 胡 时¹, 丁祖德²

¹安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南

²昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月19日; 发布日期: 2023年3月29日

摘 要

本文利用正交试验设计原理, 开展了9组高延性水泥基复合材料(ECC)的坍落度、立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度试验, 研究了硅灰、改性脱硫石膏、膨胀剂和减水剂四种因素对ECC物理、力学性能的影响, 并采用多元线性回归的方法, 建立了ECC的性能预测模型。试验结果表明: 最优组为硅灰掺量20%, 脱硫石膏掺量4%, 膨胀剂掺量6%, 减水剂掺量1.9%; 通过对正交试验的结果进行回归分析, 得出了ECC物理、力学性能预测模型, 模型精度较高。

关键词

正交试验, 高延性水泥基复合材料, 力学性能, 修复工程

Orthogonal Test of High Ductility Engineering Cementitious Composites (ECC)

Qianqian Wu¹, Haibing Cai^{1*}, Shi Hu¹, Zude Ding²

¹School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 19th, 2023; published: Mar. 29th, 2023

Abstract

In this paper, using the orthogonal experiment design principle, carry out 9 groups of high ductility Engineering Cementitious Composites (ECC) of the slump, cube compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength test, study the effect of silica fume, modified desulfurization gypsum, expansive agent and water reducing agent of four factors on the physical and mechanical properties of ECC, and adopt multiple linear regression method. The performance prediction model of ECC was established. The results show that the optimal group is silica fume content of 20%, desulfuri-

*通讯作者。

zation gypsum content of 4%, expansion agent content of 6%, and water reducing agent content of 1.9%. The ECC physical and mechanical properties prediction model is obtained by regression analysis of the orthogonal test results, and the model has high precision.

Keywords

Orthogonal Test, High Ductility Engineering Cementitious Composites, Mechanical Properties, Restoration Projects

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

针对普通混凝土材料脆性大、耐久性差等问题,近些年来许多学者为研制出能提升混凝土性能的新型材料做了大量研究。Li 等[1]成功研制出一种高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC),以水泥、砂、矿物掺合料等构成基体,2%体积掺量的乱向分布短纤维为增韧材料,其具备高韧性、高延性、优秀的抗拉性能和优异的裂缝控制能力。相对聚乙烯(PE)纤维来说,聚乙烯醇(PVA)纤维成本较低,与水泥基体化学粘结力较强。除此之外,PVA 的抗渗性[2]、抗冻性[3]和抗碳化[4]等性能都远高于普通混凝土,是目前 ECC 试验研究和实际工程应用最为广泛的增韧材料[5]。

传统 ECC 中的胶凝材料以造价高昂的水泥为主,在凝结硬化过程中的干燥收缩较大[6]。水泥生产过程排放大量二氧化碳会造成环境污染,因此国内外学者开始研究使用工业固废来代替水泥。荣传新等[7]研究表明,将普通脱硫石膏经高温煅烧后生成 β 型半水石膏,再将其与矿物、化学激发剂混合搅拌则形成改性脱硫石膏,以改性脱硫石膏替代水泥可以增强混凝土抗压强度和抗折强度;Ji 等[8]用粉煤灰部分替代水泥,发现替代率在 30%~40%之间时,对抗压和抗折强度的提升效果最好,通过实验发现,PVA 纤维和 ECC 基体的界面得到有效改善,实现了 ECC 材料的拉伸应变-硬化特性[9];Yu 等[10]用硅灰代替水泥,可以密实填充基体,从而起到减小孔隙率的作用,解决粉煤灰代替水泥后基体早期抗折强度低的问题,从而提高 ECC 基体强度。与此同时,石英砂资源有限,价格昂贵,以河砂代替传统 ECC 常用的石英砂,能明显降低成本[11]。

结合国内外研究成果,本文采用改性脱硫石膏、粉煤灰和硅灰组成 ECC 的胶凝材料体系,P·O 42.5 级水泥配置高强混凝土,用河砂来替代石英砂,以此来提高传统 ECC 的力学性能,实现工业废渣类材料再利用。本文所研制的 ECC 预计用于煤矿井壁修复[12],鉴于矿井缝隙较小,不同井壁混凝土强度要求不同,所以对 ECC 坍落度以及强度有一定要求。本文结合现有 ECC 研究成果,开展一系列力学性能试验,研制出适应于煤矿井壁修复的高强高韧性混凝土配合比,以期提供 ECC 在井壁修复领域的应用基础,为我国煤矿井壁修复提供重要帮助,为实现我国“绿色可持续煤矿”贡献一份力量。

2. 实验材料及方法

2.1. 原材料

试验中水泥采用安徽海螺公司生产的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;硅灰购于山东博肯硅材料有限公司;淮南平圩电厂生产的 I 级粉煤灰;上海每天节能环保科技公司生产的粒径约为 40 μm 的改性脱硫石膏;细骨料采用最大粒径为 0.5 mm 的细河砂;减水率为 25%~30%的聚羧酸高性能减水剂购于江苏苏博特公司;纤维采用日本可乐丽 12 mm PVA 纤维,纤维性能参数如表 1 所示;采用山西杰克科技有限公司

生产的 KC-2 混凝土膨胀剂；拌和用水为实验室自来水。

Table 1. Performance parameters of PVA fiber

表 1. PVA 纤维性能参数

密度/(kg/m ³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限延伸率/%	长度/mm	直径/ μm
1.3	1620	42.8	7	12	39

2.2. 试验设计

为研究胶凝材料 and 外加剂对 ECC 力学性能的影响，本试验选取的研究因素为硅灰掺量、改性脱硫石膏掺量、膨胀剂掺量和减水剂掺量，每个因素选取三个水平，制作四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交表[13] (见表 2)。试验指标为 ECC 坍落度、28 d 抗压强度、28 d 抗拉强度、28 d 抗折强度。根据李晓琴等[14]的实验研究，本次试验的水胶比取 0.25，砂胶比取 0.35，纤维体积比取 0.2。

Table 2. Orthogonal table of four factors and three levels

表 2. 四因素三水平正交表

水平	影响因素			
	硅灰掺量(A)/%	改性脱硫石膏掺量(B)/%	膨胀剂掺量(C)/%	减水剂掺量(D)/%
1	10	4	4	1.3
2	20	6	6	1.6
3	30	8	8	1.9

2.3. 试件制备和试验方法

2.3.1. 试件制备

具体步骤如下：首先将称好的胶凝材料和河砂加入 JJ-5 水泥砂浆搅拌机中干拌 2 min，然后将搅拌好的水和减水剂混合液倒入搅拌机中湿拌 3 min。将手工分散好的纤维均匀撒入拌和物中搅拌 10 min，以保证纤维能够在水泥基体中均匀分散。为使试件充分密实，分两次浇筑，每次在振动台上振捣 20 s 左右，抹平浇筑面。浇筑 24 h 后，拆除模具，将试件放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度为 95% 的恒温恒湿养护箱中，养护到试验所需的龄期[15]。

2.3.2. 试验方法

按照 GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》中的相关规定[16]开展物理力学性能试验。使用时代试金 WAW-1000 电液伺服万能试验机以 2.5 mm/min 的加载速率对 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件进行抗压强度试验；在 0.2 mm/min 的加载速率下对 400 mm × 70 mm × 16 mm 的试件进行抗拉强度试验，为了保证试件轴心受拉，在试件两端粘贴碳纤维布和 1 mm 厚的铝板加固；对 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试件以 0.5 mm/min 的加载速率进行抗折强度试验；坍落度试验测试方法，以坍落高度作为不同配合比 ECC 的流动性指标。每组配合比的每种尺寸制作三个试件，试验结果取三个试件的算术平均值。

3. 试验结果与分析

3.1. 试验现象

通过图 1(a)、图 1(b)对比观察出 ECC 立方体试件分别在 7 d 和 28 d 受压的破坏形态。ECC 的受压破

坏过程与普通混凝土有明显区别，破坏过程中纤维断裂声清晰，试件在压缩下仍能保持其完整性，表现出优良的延性。PVA 纤维的掺入控制了裂纹的扩展，ECC 的抗压强度和韧性得到提高。

由图 1(c)可以看出，ECC 试件在直接拉伸试验下的破坏形态，基体在达到初裂应变时，开始出现裂纹。随着碳纤维编织网与基体之间的滑移，裂纹开始传播，在达到峰值应力后，演变成一条纹路较宽的裂纹，这个过程表现出明显的多缝开裂特性。

通过图 1(d)分析 ECC 试件在四点弯曲试验中的破坏过程，ECC 试件在弯曲载荷作用下开裂，由于纤维的桥联作用，导致应力不断重新分布，同时伴随着新裂缝产生。直到试件达到极限应力时，纤维桥联作用开始失效，不再出现新的裂缝。现有裂缝开始缓慢扩展，其中第一条产生的裂缝宽度和深度迅速扩展，试件最终发生破坏。ECC 在整个过程中表现出优秀的应变硬化和多缝开裂特性。

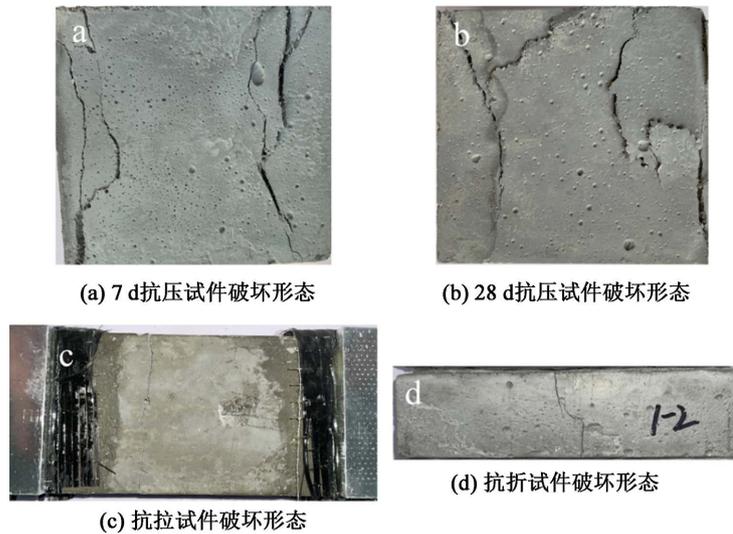


Figure 1. Failure forms of specimens under various mechanical properties tests
图 1. 试件在各种力学性能测试下的破坏形态

3.2. 试验结果极差分析

为研究实验因素(硅灰、改性脱硫石膏、膨胀剂和减水剂掺量)对试验指标(ECC 坍落度、立方体抗压强度、抗折强度和抗拉强度)的影响，借助 SPSS 数据分析软件，对表 3 试验数据进行极差分析，极差分析结果如表 4 所示。 K_{ij} 表示因素 j 所在列在对应 i 水平下的试验数据之和， $i = 1, 2, 3; j = A, B, C, D$ 。表中 K_{ij} 、 k_{ij} 、 R_j 之间的关系为：

$$k_{ij} = K_{ij} / 3$$

$$R_j = \max \{k_{1j}, k_{2j}, k_{3j}\} - \min \{k_{1j}, k_{2j}, k_{3j}\}$$

Table 3. Test results of ECC slump and strength
表 3. ECC 坍落度和强度试验结果

实验组	因素				坍落度/mm	抗压强度 f_{cu} /MPa		抗折强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
	A	B	C	D		7 d	28 d		
N-1	0.1	0.04	0.04	0.013	194	36.81	60.97	9.84	3.28
N-2	0.1	0.06	0.06	0.016	236	41.64	62.06	11.13	3.83

Continued

N-3	0.1	0.08	0.08	0.019	253	39.54	61.23	12.08	3.66
N-4	0.2	0.04	0.06	0.019	239	56.05	67.95	14.06	3.73
N-5	0.2	0.06	0.08	0.013	147	53.89	62.68	8.54	3.16
N-6	0.2	0.08	0.04	0.016	170	56.11	65.28	11.44	2.76
N-7	0.3	0.04	0.08	0.016	172	58.28	63.77	10.46	3.67
N-8	0.3	0.06	0.04	0.019	182	57.26	70.36	12.58	2.78
N-9	0.3	0.08	0.06	0.013	135	56.89	63.77	9.25	2.49

Table 4. Range analysis results of ECC slump and strength
表 4. ECC 坍落度和强度的极差分析结果

考核指标	因素	K1j	K2j	K3j	k2j	k3j	Rj
坍落度/mm	A	683.00	556.00	489.00	185.33	163.00	64.67
	B	605.00	565.00	558.00	188.33	186.00	15.67
	C	546.00	610.00	572.00	203.33	190.67	8.67
	D	476.00	578.00	674.00	192.67	224.67	66.00
28 d 抗压强度 f_{cu} /MPa	A	184.26	195.91	197.90	65.30	65.97	4.55
	B	192.69	195.10	190.28	65.03	63.43	1.61
	C	196.61	193.78	187.68	64.59	62.56	2.98
	D	187.42	191.11	199.54	63.70	66.51	4.04
抗折强度/MPa	A	33.05	34.04	32.29	11.35	10.76	0.58
	B	34.36	32.25	32.77	10.75	10.92	0.70
	C	33.86	34.44	31.08	11.48	10.36	1.12
	D	27.63	33.03	38.72	11.01	12.91	3.70
抗拉强度/MPa	A	10.77	9.65	8.94	3.22	2.98	0.61
	B	10.68	9.77	8.91	3.26	2.97	0.59
	C	8.82	10.05	10.49	3.35	3.50	0.56
	D	8.93	10.26	10.17	3.42	3.39	0.44

试验指标受到实验因素的影响程度可以用 R_j 来反映。为了更加直观地显示各因素水平的变化对试验指标的作用,以各因素的水平变化为横坐标,以上述极差分析得到的各试验指标在不同水平下平均值为纵坐标,绘制水平与指标的曲线图,发现了如下规律:

由表 4 可知,各因素对 ECC 坍落度的影响程度为:减水剂掺量 > 硅灰掺量 > 改性脱硫石膏掺量 > 膨胀剂掺量;最佳组合为 $A_1B_1C_2D_3$ 。由图 2(a)可以看出,减水剂和硅灰掺量影响坍落度较显著,其中减水剂掺量从 1.3% 增加到 1.9%,坍落度提高了 41.6%,硅灰掺量从 10% 增加到 30%,坍落度降低了 28.4%;脱硫石膏掺量越大,坍落度越小;膨胀剂掺量对坍落度的影响呈波动状,极差为 8.67 mm 最小。

通过对表 4 的分析可以发现,各因素对 ECC 抗压强度的影响程度为:硅灰掺量 > 减水剂掺量 > 膨胀剂掺量 > 改性脱硫石膏掺量;最佳组合为 $A_3B_2C_1D_3$ 。由图 2(b)可知,硅灰掺量和减水剂掺量与抗压强度成正比,抗压强度最大可以达到 66.51 MPa;膨胀剂掺量与抗压强度成反比,抗压强度最小为 62.56

MPa; 当脱硫石膏掺量超过 6%以后, 抗压强度开始降低。

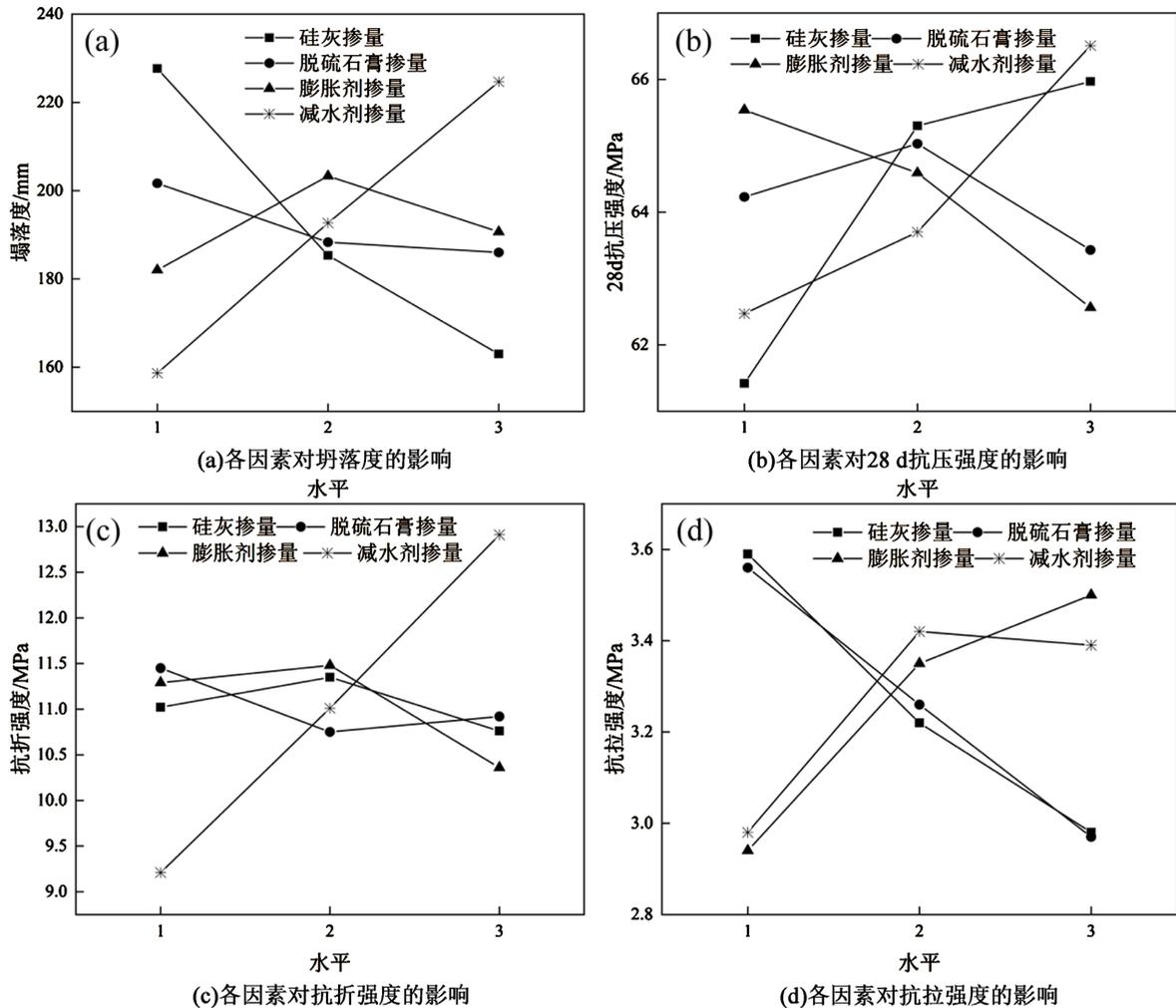


Figure 2. Influence of various factors on collapse, 28-day compressive strength, flexural strength and tensile strength
图 2. 各因素对塌落度、28 d 抗压强度、抗折强度、抗拉强度的影响

由表 4 可看出, 各因素对 ECC 抗折强度的影响程度为: 减水剂掺量 > 膨胀剂掺量 > 改性脱硫石膏掺量 > 硅灰掺量; 最佳组合为 $A_2B_1C_2D_3$ 。由图 2(c)可知, 减水剂掺量和抗折强度呈正相关, 减水剂掺量为 1.9%的三组抗折强度均达到 12 MPa 以上, 最大为 14.06 MPa; 当膨胀剂和脱硫石膏掺量超过 6%以后, 抗折强度出现两种不同的变化趋势, 膨胀剂使其强度减小, 脱硫石膏使其强度增大; 硅灰掺量对抗折强度影响最小, 极差为 0.58 MPa。

将表 4 得到的极差结果归纳发现, 各因素对 ECC 抗拉强度的影响程度为: 硅灰掺量 > 改性脱硫石膏掺量 > 膨胀剂掺量 > 减水剂掺量; 最佳组合为 $A_1B_1C_3D_2$ 。由图 2(d)可以看出, 硅灰和脱硫石膏掺量对抗拉强度的影响呈负相关, 硅灰和脱硫石膏掺量从 1 水平增加到 3 水平, 抗拉强度均降低了 17%; 膨胀剂掺量从 4%增加到 8%, 抗拉强度升高了 19%; 减水剂掺量对抗拉强度的影响甚微。

4. 试验结果的线性回归分析

利用统计软件 SPSS 对试验得到的数据进行多元线性回归分析, 假设因变量与多个自变量之间的线

性关系模型为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon$$

其中, y 为因变量(y_1 为坍落度; y_2 为 28 d 抗压强度; y_3 为抗折强度; y_4 为抗拉强度); x 为自变量(x_1 为硅灰掺量; x_2 为改性脱硫石膏掺量; x_3 为膨胀剂掺量; x_4 为减水剂掺量); β_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 为回归系数; ε 为随机误差项。根据 SPSS 的计算结果, 得到各因变量的方差分析表(表 5~表 8)和关于 β 的最小二乘估计。

Table 5. Variance analysis of Slump variance

表 5. 坍落度方差分析

平方和来源	平方和	自由度	均方	方差	显著性
源于回归	13,287.5	4	3321.875	15.809	0.010
源于残差	840.5	4	210.125		
总平方和	14128	8			

注: $\beta = [197.667, -32.333, -7.833, 4.333, 33.000]$, $y_1 = 197.667 - 32.333x_1 - 7.833x_2 + 4.333x_3 + 33x_4$ 。

Table 6. Variance analysis of compressive strength at 28 d

表 6. 28 d 抗压强度方差分析

平方和来源	平方和	自由度	均方	方差	显著性
源于回归	69.75	4	17.437	7.024	0.043
源于残差	9.93	4	2.483		
总平方和	79.68	8			

注: $\beta = [59.423, 2.273, -0.402, -1.488, 2.020]$, $y_2 = 59.423 + 2.273x_1 - 0.402x_2 - 1.488x_3 + 2.02x_4$ 。

Table 7. Variance analysis of flexural strength

表 7. 抗折强度方差分析

平方和来源	平方和	自由度	均方	方差	显著性
源于回归	22.304	4	5.576	13.368	0.014
源于残差	1.668	4	0.417		
总平方和	23.972	8			

注: $\beta = [9.056, -0.127, -0.265, -0.463, 1.848]$, $y_3 = 9.056 - 0.127x_1 - 0.265x_2 - 0.463x_3 + 1.848x_4$ 。

Table 8. Variance analysis of tensile strength

表 8. 抗拉强度方差分析

平方和来源	平方和	自由度	均方	方差	显著性
源于回归	1.801	4	0.450	11.535	0.018
源于残差	0.156	4	0.039		
总平方和	1.958	8			

注: $\beta = [3.492, -0.305, -0.295, 0.278, 0.207]$, $y_4 = 3.492 - 0.305x_1 - 0.295x_2 + 0.278x_3 + 0.207x_4$ 。

对多元回归方程进行显著性检验, 通过 F 检验方法来检测回归方程的整体显著性。坍落度、28 d 抗压强度、抗折强度、抗拉强度对应的显著性值依次分别为: 0.010、0.043、0.014、0.018, 均小于 0.05,

说明对自变量 x 整体的线性回归效果显著。通过对每个回归系数进行显著性检验, 得到每个因变量的显著影响因素: 坍落度的显著因子是减水剂和硅灰; 抗压强度的显著因子是硅灰和减水剂; 抗折强度的显著因子是减水剂; 抗拉强度的显著因子是硅灰、脱硫石膏和膨胀剂。结合以上极差分析得到最优组为 $A_2B_1C_2D_3$ 。

将效果不显著的影响因子删除, 以优化模型, 重新建立更为简单的回归方程, 得到各因变量新的回归方程如下: 坍落度 $y_1 = 190.667 - 32.333x_1 + 33x_4$; 抗压强度 $y_2 = 55.643 + 2.273x_1 + 2.02x_4$; 抗折强度 $y_3 = 7.346 + 1.848x_4$; 抗拉强度 $y_4 = 3.906 - 0.305x_1 - 0.295x_2 + 0.278x_3$ 。

图 3 为 ECC 各物理、力学性能的预测值与实测值对比图, 由图 3 可以看出, 大部分实测值大于预测值, 说明建立的模型拟合效果较好, 预测结果比较合理可靠, 可以为工程假设提供一定的参考价值。并且可得出各因素预测值与实测值的比值平均数分别为 1.0008、1.00002、1.00003、0.99997; 比值方差分别为: 0.0049、0.0007、0.0034、0.0044。

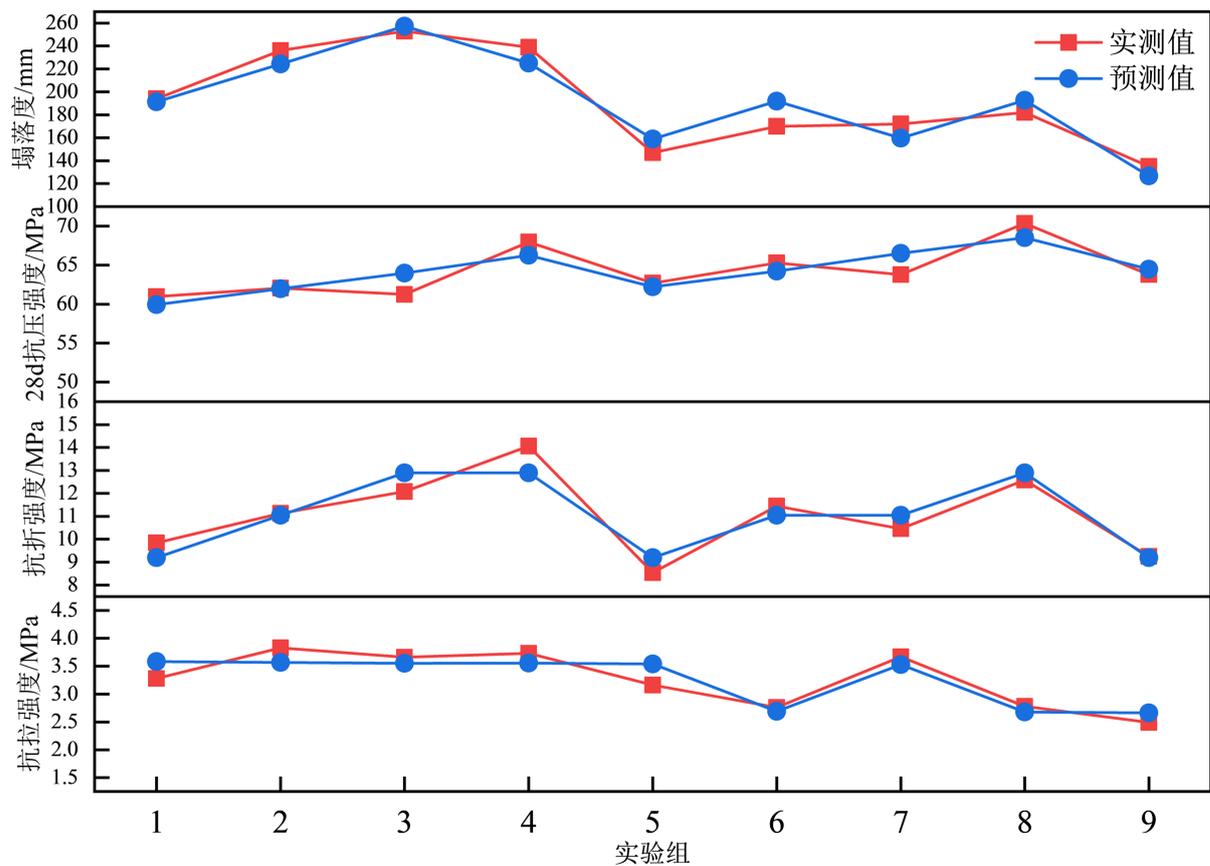


Figure 3. Comparison of the predicted value and measured value of ECC strength

图 3. ECC 强度预测值与实测值对比

5. 结论

1) ECC 的坍落度随减水剂掺量的增大而显著增大, 硅灰和改性脱硫石膏掺量会导致坍落度降低; 抗压强度随硅灰和减水剂掺量的增大而增大, 但膨胀剂掺量则会降低抗压强度; 抗折强度随减水剂掺量增加而显著增大, 膨胀剂、改性脱硫石膏掺量对抗折强度无明显影响; 抗拉强度随硅灰和改性脱硫石膏掺量的增加而降低, 膨胀剂和减水剂掺量则相反。

2) ECC 坍落度的显著性因素是减水剂和硅灰; ECC 抗压强度的显著性因素是硅灰和减水剂; ECC 抗折强度的显著性因素是减水剂; ECC 抗拉强度的显著性因素是硅灰、脱硫石膏和膨胀剂。综合考虑的最佳组合为: 硅灰掺量 20%, 脱硫石膏掺量 4%, 膨胀剂掺量 6%, 减水剂掺量 1.9%。

3) 通过对试验结果的多元线性回归分析, 得到可以预测 ECC 配合比试验结果且整体显著的物理、力学性能回归方程, 并根据试验结果建立了精度满足工程需求的预测模型, 有一定的实际工程参考意义。

参考文献

- [1] Li, V.C. (2012) Tailoring ECC for Special Attributes: A Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **6**, 135-144. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0018-8>
- [2] 郭嘉欢, 王伯昕, 张添奇, 等. 纤维编织网增强混凝土抗渗性能研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(9): 1354-1360.
- [3] 曹景, 杜虎, 张启志. 纤维对高性能混凝土抗冻性能的试验分析[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(4): 52-54.
- [4] 徐强, 李锋, 乐勇, 等. 大掺量掺合料对海工混凝土耐久性的影响及工程实证[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(12): 1-3, 10.
- [5] Meng, D., Chi, K.L. and Zhang, Y.X. (2022) Structural Behavior of Reinforced Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) Beams under Static and Fatigue Loadings. In: Zhang, Y.X. and Yu, K.Q., Eds., *Advances in Engineered Cementitious Composites: Materials, Structures, and Numerical Modeling*, Elsevier, Amsterdam, 161-208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85149-7.00012-4>
- [6] 唐华瑞. 内部相对湿度对含氧化镁混凝土收缩变形的影响[J]. 混凝土, 2022(6): 85-88.
- [7] 施鑫, 荣传新, 王彬, 等. 改性脱硫石膏基混凝土物理力学性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 288-293.
- [8] Ji, J., Zhang, S., Jiang, L., et al. (2020) Feasibility of Developing Engineered Cementitious Composite with High Volumes of Fly Ash Using Cost-Effective PVA Fiber. *Journal of Testing and Evaluation*, **48**, Article ID: 20170596. <https://doi.org/10.1520/JTE20170596>
- [9] 李艳, 梁兴文, 刘泽军. 高性能生态型建筑材料 PVA-ECC 的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(4): 97-102.
- [10] Yu, Z., Zhang, Z., Yang, Y., et al. (2014) Measurement and Correlation of Ductility and Compressive Strength for Engineered Cementitious Composites (ECC) Produced by Binary and Ternary Systems of Binder Materials: Fly Ash, Slag, Silica Fume and Cement. *Construction & Building Materials*, **68**, 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.080>
- [11] 丁庆军, 彭程康琰, 胡俊, 等. 细集料对超高性能混凝土的性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 488-494.
- [12] 张振虎. 基于冻结壁保护下的立井井筒修复技术研究及应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(7): 79-81.
- [13] 王玄静. 正交试验设计的应用及分析[J]. 兰州文理学院学报: 自然科学版, 2016, 30(1): 17-22.
- [14] 杜茜, 李晓琴, 陶毅, 等. UDEM-ACE 方法及其在水泥基材料配合比设计中的应用[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2411-2416.
- [15] 胡春红, 高艳娥, 丁万聪. 超高韧性水泥基复合材料受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 128-132+154.
- [16] 戎君明, 陆建雯, 等. GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2007.