

聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标正交试验研究*

The Experimental Study on the CMPI of Polymer Modified Cement Mortar by Orthogonal Design Method

徐洪涛¹, 李娜², 冯虎³

(1. 河南五方合创建筑设计有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 郑州工商学院, 河南 郑州 451400;
3. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标相比传统压折比可更加全面地反映复合材料改性后强度和韧性的改善。通过正交试验研究聚合物改性水泥砂浆的综合力学性能指标。考察水胶比、聚胶比、砂胶比及水泥矿硅比四个因素, 采用 $L_{16}(4^5)$ 正交进行试验。结果显示: 极差分析和方差分析结果表明各因素对聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标的影响显著程度次序不尽相同, 且无重复试验方差分析所对应因素显著程度低于重复试验; 重复试验的方差分析表明, 砂胶比和聚胶比是综合力学性能指标的显著影响因素。

关键词: 聚合物改性水泥砂浆; 综合力学性能指标; 压折比; 正交试验; 因素水平; 影响显著程度

中图分类号: TU502+.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2024)03-0006-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.002

XU Hongtao¹, LI Na², FENG Hu³

(1. He'nan FIVEWIN Architectural Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 451400, China;

3. Department of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Compared with the traditional index (compressive to flexural ratio), comprehensive mechanical performance index (CMPI) is more comprehensive response the strength and toughness improvements of modified composite material. CMPI of polymer modified cement mortar were studied based on the orthogonal experiment. Four factors as water - binder ratio, polymer - binder ratio, sand - binder ratio, cement - slag and silica afume ratio, and each factor had four level values. The experimental results ware conducted and studied according to the orthogonal table $L_{16}(4^5)$. The results of variance analysis and range analysis show that the significant effect degree of the four factors on the CMPI was not the same, and the significant effect degree concluded from the variance analysis of repeated test data was larger, compared with the separate tests. The variance analysis of repeated test shows that sand - binder ratio and polymer - binder ratio had a significant effect on the CMPI of polymer modified cement mortar.

Keywords: polymer modified cement mortar; comprehensive mechanical performance index (CMPI); compressive to flexuralratio; orthogonal experiment; factor level; the degree of influence

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51308504)。

作者简介: 徐洪涛 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 一级注册结构工程师, 研究方向: 建筑结构设计理论及方法应用研究。

收稿日期: 2023-01-30

0 引言

聚合物改性水泥砂浆这种功能性复合材料，因其可设计性强、应用场景广而被广泛应用，也是近年来应用研究的热点。盖广清等^[1]研究了可再分散乳胶粉的掺量、类型对聚合物水泥砂浆影响，表明随掺量增加，聚合物水泥砂浆抗压强度下降、抗折强度及压折比提高，韧性增加；袁鹏^[2]研究了不同类型的聚合物对水泥砂浆黏结性能的影响，表明乙烯醋酸乙酯对抗压强度有明显提高作用、而丁苯橡胶对黏结强度的提高作用最大；杨雪等^[3]研究了硅灰部分取代水泥对聚合物水泥砂浆力学性能影响，表明随着硅灰替代率的增加，聚合物水泥砂浆的抗压、抗折强度均呈现先上升后下降的趋势；王军伟等^[4]研究了 EVA 乳液掺量对水泥砂浆抗压强度的影响，表明 EVA 乳液延缓水泥水化，降低水泥砂浆抗压强度；安艳菲等^[5]研究了消泡剂和减缩剂对聚合物改性水泥砂浆干燥收缩率和质量损失率的影响；况栋梁等^[6]研究了 VAE 改性水泥砂浆微观结构及性能，表明抗折强度、界面黏结强度随 VAE 掺量的增加先增加后降低，VAE 可以提高水泥砂浆的柔韧性、界面黏结强度、改善水泥砂浆的保水能力、干缩率、抗碳化侵蚀能力，提高砂浆的密实程度；宋东方等^[7]研究了聚合物改性水泥基材料力学性能，表明所选择的聚合物对水泥砂浆抗折、抗压强度改性效果较差，对其韧性有一定的改善；黄展魏等^[8]对水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构进行了研究，表明水性环氧树脂可形成聚合物膜会延迟水泥水化，水性环氧树脂的加入会降低水泥砂浆的抗压强度，当聚灰比在 2% 范围以内，水性环氧树脂可以提高水泥砂浆的抗折强度。

上述文献从不同方面研究了外加剂、聚合物种类及掺量、硅灰取代率等对聚合物水泥砂浆性能的影响，表明聚合物水泥砂浆改性具有路径多、不确定性大、涉及面广、关联性强的特点。目前，对多种因素共同作用下聚合物水泥砂浆力学性能的研究很少，采用正交试验分析方法对聚合物改性水泥砂浆进行研究分析的也很少，鉴于此，采用正交试验方法研究掺入减缩剂、减水剂后，水胶比、聚胶比、砂胶比和水泥矿硅比四个因素（每个因素四个水

平），利用改进的压折比评定指标——综合力学性能指标 *CMPI*（Comprehensive Mechanical Performance Index）评价聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标影响显著程度，进而确定最佳配合比。

1 聚合物改性水泥砂浆评价指标的选择

评价体系的选择和评价指标的确定，对聚合物改性效果的科学评价非常重要。对聚合物改性水泥砂浆而言，常用压折比表示改性效果。压折比为无量纲比值，压折比降低表明改性后材料脆性降低，韧性增加。若改性后强度值有较大幅度的降低，此时仅凭压折比评判改性效果是不全面的。因为考察一种材料性能优劣，既要关注其韧性，还要兼顾其强度，而压折比不能反映改性后强度的变化。鉴于此，提出了一个在压折比基础上改进的评定指标——综合力学性能指标 *CMPI*（Comprehensive Mechanical Performance Index），以此来评价聚合物改性水泥砂浆的改性效果。

$$CMPI = \frac{f_b}{\frac{f_c}{f_b}} = f_b^2 / f_c \quad (1)$$

式中： f_c/f_b 为压折比， f_b 为抗折强度， f_c 为抗压强度。从式（1）可以看出，*CMPI* 更加突出地反映聚合物改性水泥砂浆的抗折强度，*CMPI* 和抗折强度量纲相同，既能体现压折比评定时的相对性，又能体现强度指标评定时的绝对性。

2 试验

2.1 原材料及性能参数

试验选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥；中粗河砂；拌合水为自来水；水泥砂浆改性用的制剂为固含量 50% 水性环氧树脂改性乳液；减缩剂为混凝土减缩专用醇醚类表面活性剂，性能参数见表 1；矿粉为 S95 级矿渣微粉，参数见表 2；硅灰为二氧化硅含量不小于 96% 的超细粉；减水剂为减水率约为 18.0% 的高效减水剂。

表 1 减缩剂参数

Table 1 The parameters of shrinkage reducing admixture

结构类型	活性成分	外观	pH 值	保质期
醇醚类	≥99%	白色固体	6 ± 2	1 年

材料科学

表 2 矿渣微粉参数

SO ₂ /%	MgO /%	Al ₂ O ₃ /%	CaO /%	比表面积 / (m ² · kg)	7 d 活性 指数/%
32.7	9.3	15.1	40.2	415	76

2.2 配合比设计

聚合物改性水泥砂浆因素水平配合比见表 3, 为典型的 L₁₆ (4⁵) 正交试验配比。表中的“胶”包括水泥、硅灰和矿渣质量的总和, 减缩剂用量为胶凝材料的 1.5%, 矿渣、硅灰质量比为 1:1, 通过添加减水剂使聚合物改性水泥砂浆的流动性保持在比较合理的区间范围内, 试验不考虑因素间的交互作用。

2.3 聚合物改性水泥砂浆制备及测试方法

聚合物改性水泥砂浆试块按照 DL/T 51262—2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》^[9] 进行制备试验。将搅拌均匀的浆料注入横断面为 40 mm × 40 mm, 长度为 160 mm 的槽形三联试模内, 在振动台上振动密实并抹平后放置到养护箱内, 龄期达到 28 d 后取出进行力学试验。聚合物改性水泥砂浆试块抗折试验时, 将每组 3 个棱柱体试块, 采用水泥砂浆试块抗折强度仪器进行, 加载模式为三点加载, 使试块折断; 聚合物改性水泥砂浆试块抗压试验是在前述抗折试验的基础上进行, 即对抗折试验时 3 个棱柱体试块折断形成的 6 个水泥砂浆试块再进行抗压强度的测试。

表 4 强度指标值

Table 4 The test results of strength

编号	抗折强度				抗压强度				综合力学 性能指标
	试件 1	试件 2	试件 3	平均值	试件 1	试件 2	试件 3	平均值	
1	12.40	12.36	11.09	11.95	68.91	67.17	68.28	68.12	2.10
2	10.98	11.53	10.85	11.12	54.38	54.47	52.54	53.80	2.30
3	10.34	12.30	10.83	11.16	58.54	59.16	52.28	56.66	2.20
4	11.53	11.90	10.40	11.28	61.88	57.41	61.41	60.23	2.11
5	11.93	10.49	9.95	10.79	60.13	58.75	59.16	59.35	1.96
6	12.50	11.03	11.32	11.62	78.13	78.28	79.22	78.54	1.72
7	11.32	9.56	8.74	9.87	57.51	56.32	52.94	55.59	1.75
8	8.40	8.17	8.00	8.19	45.38	47.72	48.13	47.08	1.42
9	8.95	8.93	9.38	9.09	61.41	60.10	61.50	61.00	1.35
10	12.40	11.75	11.10	11.75	62.50	62.50	62.50	62.50	2.21
11	10.75	10.65	9.96	10.45	63.44	61.88	58.75	61.36	1.78
12	10.57	10.90	10.10	10.52	74.63	66.10	57.32	66.02	1.68
13	10.70	10.00	11.06	10.59	48.91	48.38	50.41	49.23	2.28
14	9.50	8.80	9.38	9.23	51.94	55.32	54.91	54.06	1.57
15	11.11	10.87	10.72	10.90	65.78	65.32	64.69	65.26	1.82
16	10.45	9.79	9.82	10.02	64.54	61.38	60.32	62.08	1.62

表 3 正交试验因素水平表

Table 3 The schedule of the factor level of orthogonal test

编号	因素水平				
	水胶比 (A)	聚胶比 (B)	砂胶比 (C)	水泥矿硅比 (D)	空白列 (E)
1	(1) 0.25	(2) 0.05	(3) 2.0	(2) 0.8:0.2	(3)
2	(2) 0.27	(4) 0.15	(1) 1.0	(2) 0.8:0.2	(2)
3	(3) 0.29	(4) 0.15	(3) 2.0	(3) 0.7:0.3	(4)
4	(4) 0.31	(2) 0.05	(1) 1.0	(3) 0.7:0.3	(1)
5	(1) 0.25	(3) 0.10	(1) 1.0	(4) 0.6:0.4	(4)
6	(2) 0.27	(1) 0	(3) 2.0	(4) 0.6:0.4	(1)
7	(3) 0.29	(1) 0	(1) 1.0	(1) 1:0	(3)
8	(4) 0.31	(3) 0.10	(3) 2.0	(1) 1:0	(2)
9	(1) 0.25	(1) 0	(4) 2.5	(3) 0.7:0.3	(2)
10	(2) 0.27	(3) 0.10	(2) 1.5	(3) 0.7:0.3	(3)
11	(3) 0.29	(3) 0.10	(4) 2.5	(2) 0.8:0.2	(1)
12	(4) 0.31	(1) 0	(2) 1.5	(2) 0.8:0.2	(4)
13	(1) 0.25	(4) 0.15	(2) 1.5	(1) 1:0	(1)
14	(2) 0.27	(2) 0.05	(4) 2.5	(1) 1:0	(4)
15	(3) 0.29	(2) 0.05	(2) 1.5	(4) 0.6:0.4	(2)
16	(4) 0.31	(4) 0.15	(4) 2.5	(4) 0.6:0.4	(3)

注: 括号内数字为水平号, 括号外为水平值, 空白列对应方差分析时误差平方和。

3 试验结果及分析

3.1 直观分析

聚合物改性水泥砂浆抗折强度、抗压强度及综合力学性能指标见表 4。试块 8、9、14 组抗折强度相对较低, 试块 1、6、10 组抗折强度相对较高; 试块 8、13 组抗压强度相对较低, 试块 6、12 组抗压强度相对较高。

单指标正交试验极差分析步骤计算求解，可参考文献 [10]，限于文章篇幅，不再赘述。综合力学性能指标平均值 $\bar{y} = 1.87$ MPa，各因素各水平所对应的指标和、平均值及各因素对应的极差 R_j 计算结果见表 5 所示。

表 5 因素极差分析结果
Table 5 The results of range analysis

指标类型	水平	因素			
		水胶比 (A)	聚胶比 (B)	砂胶比 (C)	水泥矿硅比 (D)
指标和	1	7.69	6.50	8.13	7.03
	2	7.80	7.60	7.98	7.85
	3	7.55	7.38	7.44	7.87
	4	6.83	8.39	6.33	7.12
平均值	1	1.92	1.63	2.03	1.76
	2	1.95	1.90	2.00	1.96
	3	1.89	1.84	1.86	1.97
	4	1.71	2.10	1.58	1.78
	R_j	0.24	0.47	0.45	0.21

由表 5 可知，对聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标影响显著性大小顺序依次为：聚胶比 (B) > 砂胶比 (C) > 水胶比 (A) > 水泥矿硅比 (D)，其中，聚胶比 (B) 是影响综合力学性能指标的重要因素。对应最优因素水平搭配：水胶比为 0.27、聚胶比为 0.15、砂胶比为 1.00、水泥矿硅比为 0.7:0.3。所对应工程平均为 2.43 MPa (工程平均 = 试验结果总平均值 + 各因素水平效应值，因素水平效应值 = 试验结果总平均值 - 该因素水平所对应的试验值，其正负符号应根据求工程平均时有利于所考察的指标值取用)。

由表 3、表 4 可知，正交试验表中编号 2 (因素水平 A2B4C1D2) 的综合力学性能指标值为 2.3，最大，且由表 5 可知因素 D 水平 2 与水平 3 对应的指标平均值非常接近，分别为 1.96 和 1.97。为进一步验证上述分析结论的可靠性，对直观分析所得最优因素水平 A2B4C1D3 进行实配试验，相应聚合物改性水泥砂浆试验结果：抗压强度为 55.8 MPa、抗折强度为 11.8 MPa，对应综合力学性能指标值约为 2.51，这说明直观分析结论是可靠的。该对比试验表明，对于矿物掺合料这种比表面积大、活性高的材料，加入聚合物改性水泥砂浆后可加快水化进程，优化浆体内部结构，适量的掺合料可以改善聚合物改性水泥砂浆的性能，但当其掺量过多、水泥的取代率

过高时，在拌制过程中产生的气泡无法完全排出，则其负面作用便显现出来。

3.2 数据分析

3.2.1 无重复试验方差分析

无重复试验方差分析属于含有空白列的方差分析，表 6 为各因素及误差项的偏差平方和、方差估计值及自由度。由表 6 可知，因误差项平方和大于因素 A 和因素 D 的偏差平方和，因此，需将这两个因素对应的偏差平方和、自由度及方差估计值合并到误差项中，合并后的统计量计算结果见表 7。

表 6 方差分析结果
Table 6 The results of variance analysis

指标	水胶比 (A)	聚胶比 (B)	砂胶比 (C)	水泥矿硅比 (D)	误差 (E)	总偏差平方和
偏差平方和 S_i	0.14	0.45	0.50	0.16	0.14	1.40
自由度 f_i	3	3	3	3	3	15
方差估计值 P_i^2	0.05	0.15	0.17	0.05	0.05	0.47

表 7 显著性分析评价表
Table 7 The significance analysis table

因素	S_i	f_i	P_i^2	$F = P_j^2 / P_E^2$	$F_\alpha (3, 9)$		显著级别
					$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	
聚胶比 (B)	0.45	3	0.152	3.09	3.86	6.99	不显著
砂胶比 (C)	0.50	3	0.168	3.42	3.86	6.99	不显著
合并误差	0.44	9	0.049				

由表 6、表 7 可知，4 个因素对聚合物改性水泥砂浆的综合力学性能指标均不产生显著影响。

3.2.2 重复试验方差分析

重复是指各编号对应的聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标 (CMPI) 是由 3 个聚合物改性水泥砂浆试块测得，即相当于每个编号下聚合物改性水泥砂浆进行 3 次综合力学性能指标 (CMPI) 的重复测试。试验值见表 8。由表 8 中综合力学性能指标的合并值 Y_i 进行指标和、平均值的计算，见表 9。表 10 为各因素和第一误差项的自由度、偏差平方和及方差估计值。表 10 中数据结果表明，需要把因素 A 对应的自由度及偏差平方合并到第一类误差平方和中，即 $0.426 + 0.418 = 0.844$ ，自由度为 $3 + 3 = 6$ ；计算得第二类误差平方和 $S_{E2} = 1.77$ ，其自由度为 $16 \times (3 - 1) = 32$ ，所以总误差的平方和 $S_E = S_{E1} + S_{E2} = 0.844 + 1.77 = 2.611$ ，自由度为 $32 + 6 = 38$ 。其他相关量的求解及显著性比较见表 11。

材料科学

表 8 重复试验综合力学性能指标

Table 8 The CMPI test results of repeated test /MPa

编号	试件 1	试件 2	试件 3	力学指标和
1	2.22	2.28	1.80	6.30
2	2.21	2.45	2.24	6.91
3	1.83	2.56	2.24	6.62
4	2.15	2.47	1.76	6.39
5	2.37	1.86	1.68	5.92
6	2.01	1.54	1.62	5.18
7	2.24	1.61	1.44	5.30
8	1.55	1.41	1.33	4.29
9	1.31	1.32	1.43	4.07
10	2.46	2.21	1.97	6.63
11	1.82	1.83	1.69	5.35
12	1.50	1.80	1.78	5.08
13	2.33	2.08	2.43	6.85
14	1.73	1.41	1.60	4.75
15	1.87	1.82	1.78	5.47
16	1.70	1.55	1.60	4.85

表 9 指标和及其平均值

Table 9 The sum of digits and average values

指标类型	水平	因素				误差 (E1)
		水胶比 (A)	聚胶比 (B)	砂胶比 (C)	水泥矿硅比 (D)	
指标和	1	23.11	19.61	24.47	21.17	23.74
	2	23.46	22.88	24.02	23.63	20.72
	3	22.72	22.19	22.40	23.70	23.10
	4	20.60	25.20	19.01	21.41	22.35
平均值	1	1.94	1.65	2.03	1.77	1.99
	2	1.96	1.90	2.01	1.96	1.74
	3	1.90	1.84	1.86	1.97	1.91
	4	1.73	2.11	1.57	1.79	1.87

表 10 方差分析结果

Table 10 The results of variance analysis

指标	水胶比 (A)	聚胶比 (B)	砂胶比 (C)	水泥矿硅比 (D)	误差 (E1)
偏差平方和 S_i	0.418	1.333	1.541	0.478	0.426
自由度 f_i	3	3	3	3	3
方差估计值 P_i^2	0.138	0.446	0.513	0.161	0.141

表 11 显著性分析评价表

Table 11 The significance analysis table

因素	S_i	f_i	P_i^2	$F = P_j^2 / P_E^2$	$\frac{F_\alpha(3, 38)}{\alpha=0.05 \alpha=0.01}$	显著级别
聚胶比 (B)	1.333	3	0.445	6.50	2.856 4.35	十分显著
砂胶比 (C)	1.541	3	0.514	7.50	2.856 4.35	十分显著
水泥矿硅比 (D)	0.478	3	0.160	2.33	2.856 4.35	不显著
总误差项	2.611	38	0.068			

由此可见,对聚合物改性水泥砂浆的综合力学性能指标而言,考察的 4 个因素中聚胶比和砂胶比是影响十分显著的因素,水胶比和矿物填料影响不显

著。4 个因素对聚合物改性水泥砂浆的综合力学性能指标影响的显著程序次序为:砂胶比 (C) > 聚胶比 (B) > 水泥矿硅比 (D) > 水胶比 (A),与无重复试验方差分析结果一致,而与直观分析结果不尽相同。

上述分析表明,聚胶比 (B) 及砂胶比 (C) 对聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标作用明显,合理的添加比例对改善聚合物改性水泥砂浆脆性、增强韧性,且同时兼顾其强度不降低或不过度降低十分有利。

4 结论

(1) 采用综合力学性能指标 (CMPI) 评判聚合物改性水泥砂浆改性后力学效果,相较于传统的压折比更为全面、合理。采用正交试验来研究聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标科学、高效且可靠。

(2) 在工程研究中,采用正交试验进行多因素、多水平分析研究时,分析模型往往影响考察因素对考察指标影响的显著与否及显著程度,有时会导致工程应用时因素水平选择的错误判断和错误选用,达不到最佳效果;采用重复试验方差分析模型对正交试验结果进行分析时,考察因素对试验指标影响的显著程度通常高于无重复试验相应结果。

(3) 极差分析表明,四个考察因素对聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标影响显著程度顺序及对应最佳水平搭配:聚胶比 0.15、砂胶比 1、水胶比 0.27、水泥矿硅比 0.7:0.3,对应工程平均为 2.43 MPa;重复试验方差分析表明聚胶比 (B) 和砂胶比 (C) 对聚合物改性水泥砂浆综合力学性能指标影响十分显著,其对应工程平均为 2.27 MPa。

参 考 文 献

- [1] 盖广清,王海建. 改性干粉型聚合物水泥砂浆试验研究 [J]. 吉林建筑大学学报, 2024, 41 (2): 21-25.
- [2] 袁鹏. 不同类型聚合物对水泥砂浆粘接性能的影响研究 [J]. 粘结, 2024, 51 (4): 37-40.
- [3] 杨雪,李康一,姜凯涵,等. 硅灰对聚合物水泥砂浆力学性能影响研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6 (10): 11-13.
- [4] 王军伟,李昊,李文秀,等. 聚灰比对聚合物砂浆性能影响研究 [J]. 高速铁路新材料, 2023, 2 (4): 30-33.
- [5] 安艳菲,范树景,杭法付. 消泡剂与减缩剂对聚合物改性水泥砂浆干燥收缩和质量损失的影响 [J]. 新 (下转第 44 页)

材料科学

- [4] 胡骏. 论刚性防水 [J]. 中国建筑防水, 2020 (7): 1-7, 13.
- [5] 颜敬, 王树峰, 贺红星, 等. 武汉滨江核心区地下空间环路工程设计与施工技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (7): 44-48.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 国家标准第 1 号修改单: GB/T 23439-2017/XG1-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [7] PAN P Y, ZHENG F, PENG J, et al. Relationship between delayed ettringite formation and delayed expansion in massive shrinkage-compensating concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26 (6): 977-981.
- [8] 阎培渝, 韩建国, 曹丰泽, 等. 补偿收缩混凝土性能的影响因素与质量控制 [J]. 施工技术, 2018, 47 (16): 97-99.
- [9] 徐菊, 王林, 侯维红. 外掺氧化镁膨胀剂对水泥净浆流变特性及胶砂强度的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (6): 15-19.
- [10] MEHTA P K. Magnesium oxide additive for producing selfstress in mass concrete [C]. 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris: Vol. III, 1980: 6-9
- [11] 宋蕴桥, 丁帅, 郑文才, 等. 氧化镁膨胀剂对大体积混凝土裂缝控制与应用 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (7): 783-785. DOI: 10.13731/j.jzjs.2024.07.0783.
- [12] 曹丰泽, 高玉亭, 张慧杰, 等. MgO 膨胀剂在大体积混凝土结构中的抗裂效果研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (8): 24-27. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.08.024.04.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准: GB50496-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [14] 杨和礼. 原材料对基础大体积混凝土裂缝的影响与控制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

(上接第 10 页)

型建筑材料, 2024, 51 (2): 83-86.

- [6] 况栋梁, 龙景潭, 张阳, 等. VAE 改性水泥砂浆微观结构及性能研究 [J]. 应用化工, 2020, 49 (9): 2182-2186.
- [7] 宋东方, 刘富强, 罗闯旦, 等. 聚合物改性水泥基材料力学性能研究 [J]. 中国科技论文, 2019, 14 (12): 1311-1316.
- [8] 黄展魏, 陈伟, 李秋, 等. 水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2530-2535.
- [9] 买淑芳, 吴怀国, 汪毅. 聚合物改性水泥砂浆试验规程: DL/T 51262-2001 [S]. 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001.
- [10] 全国化工系统高校数学协作组. 工程数学: 概率统计 [M]. 河南科学技术出版社, 1992.

(上接第 19 页)

具有提升作用, 主要与其形成的空间骨架结构和桥接作用有关, 合适的纤维掺量和长度才会形成稳定支撑骨架。

(5) 氢氧化钠掺量与水胶比主要影响胶状聚合物的形成, 分布均匀、充足的胶状聚合物可有效连接水泥基体和钢纤维, 增强双掺混凝土的抗压强度。

参 考 文 献

- [1] 吴丽萍, 王军. 铁尾矿粉-硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响 [J]. 矿产综合利用, 2023 (2): 184-190.
- [2] 张海军, 李涛, 秦广冲. 铁尾矿砂对混凝土强度及抗硫酸盐冻融的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (2): 76-81.
- [3] 万金侠, 孙博一. 铁尾矿粉沥青混凝土胶浆-集料粘附性和 TG-DSC 实验研究 [J]. 矿产综合利用, 2022 (6): 66-72.
- [4] 史波, 何旺. 铁尾矿砂超高性能混凝土的冻融循环耐久性分析 [J]. 金属矿山, 2022 (12): 65-69.
- [5] 吴瑞东. 石英岩型铁尾矿微粉及废石对水泥基材料的性能影响及机理 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [6] 雷翔宇. 铁尾矿砂混凝土梁高温后受弯性能研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
- [7] 姚鹏飞. 复合石灰石粉-尾矿混合砂混凝土力学性能与微观机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [8] 王康. 高强复合矿物掺合料-尾矿机制砂混凝土基本性能与梁力学性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [9] 孙雪伟, 张万磊, 仲建军, 等. 钢纤维增强混凝土性能及微观结构研究 [J]. 路基工程, 2023 (2): 85-89.
- [10] 郁浩安. 中高强复合粉煤灰-矿渣-尾矿混合砂混凝土基本性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [11] 刘益良, 李祥涛, 黄兴鹏, 等. 纤维增强铁尾矿砂水泥基充填材料实验研究 [J]. 北华航天工业学院学报, 2023, 33 (2): 10-12.