



建筑垃圾再生微粉砂浆的最优配合比设计

卢冰可, 张振营

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为提高建筑垃圾再生微粉的利用率及其再生微粉砂浆的物理性能及力学性能, 首先采用正交试验法, 分别添加不同掺量的再生微粉、纳米二氧化硅、可再分散乳胶粉及氢氧化钙碱性激发剂, 制备了 16 组再生微粉砂浆试样; 其次, 通过室内试验测定试样的物理性能及力学性能; 再次, 对试验结果进行极差分析、因素指标分析和方差分析; 最后, 综合考虑得出了再生微粉砂浆的最优配合比。结果表明: 当再生微粉取代率为 15.00%、纳米二氧化硅掺量为 2.00%、可再分散乳胶粉掺量为 2.00% 及氢氧化钙碱性激发剂掺量为 4.00% 时, 28 d 龄期的再生微粉砂浆试样强度指标符合相关强度标准要求。研究结果可为再生微粉的资源化利用及再生微粉砂浆的应用提供参考。

关键词: 建筑垃圾; 再生微粉; 再生微粉砂浆; 正交试验; 最优配合比

中图分类号: X799.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2025) 05-0361-16

引文格式: 卢冰可, 张振营. 建筑垃圾再生微粉砂浆的最优配合比设计[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(3): 361-376.

Reference Format: LU Bingke, ZHANG Zhenying. Design of the optimal mix ratio of recycled micro-powder mortar from construction waste [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(3): 361-376.

Design of the optimal mix ratio of recycled micro-powder mortar from construction waste

LU Bingke, ZHANG Zhenying

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To improve the utilization rate of recycled micro-powder of construction waste and the physical and mechanical properties of recycled micro-powder mortar, firstly, 16 groups of recycled micro-powder mortar samples with different contents of recycled micro-powder, nano-SiO₂, redispersible latex powder and Ca(OH)₂ alkaline activator were prepared by orthogonal test method. Secondly, the physical and mechanical properties of the samples were measured by laboratory tests. Thirdly, the test results were analyzed by range analysis, factor index analysis and variance analysis. Finally, the optimum mix ratio of recycled micro-powder mortar was obtained by comprehensive consideration. The results show that when the replacement rate of recycled powder is 15.00%, the content of nano-SiO₂ is 2.00%, the content of redispersible latex powder is 2.00% and the content of Ca(OH)₂ alkaline activator is 4.00%, the strength index of the recycled micro-powder mortar sample at 28 days of age meets the requirements of relevant strength standards. The research results can provide reference for the resource utilization of recycled micro-powder and the application of recycled micro-powder mortar.

Key words: construction waste; recycled powder; recycled micro-powder mortar; orthogonal test; optimal mix ratio

收稿日期: 2024-10-05 网络出版日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978625, 51678532)

作者简介: 卢冰可(2000—), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。

通信作者: 张振营, E-mail: zhangzhenyinga@163.com

0 引言

近40年来,随着我国经济的快速发展和城市化进程的加快,旧城改造不断加速,每年建筑垃圾产生量持续增长,2022年产量达到了35亿t^[1]。新建筑的施工垃圾和旧建筑的拆除垃圾,通常未经处理就被长期堆放或填埋,不仅占用了大量土地资源,还严重污染了环境,同时也不利于资源的回收利用,这使得建筑垃圾处理成为亟待解决的难题。目前对建筑垃圾的利用主要是处理加工成再生骨料,这方面的研究已较为成熟。然而建筑垃圾在破碎和筛分过程中,会产生再生微粉;关于再生微粉作为胶凝材料的应用研究还不够成熟^[2]。在传统的建筑砂浆中,水泥作为主要的胶凝材料,在制备砂浆时会产生大量碳排放,因此采用再生微粉取代水泥制备再生微粉砂浆,具有重要的环境保护意义。

大量研究表明,再生微粉具有一定的活性,有望用于砂浆的制备;然而掺入再生微粉会破坏砂浆的力学性能,极大限制了其在实际工程中的应用^[3-6]。高敏等^[7]研究发现:用再生微粉取代部分水泥制备再生微粉砂浆时,其稠度下降,28 d抗折、抗压强度呈先增加后降低的趋势;当掺量大于15.00%时,再生微粉砂浆28 d的抗折强度接近纯水泥砂浆28 d的抗折强度;当掺量大于20.00%时,28 d的抗压强度同样接近纯水泥砂浆28 d的抗压强度。Gao等^[8]的研究显示:随着再生微粉的掺入,再生微粉砂浆28 d抗折、抗压强度均有所下降;当掺量为10.00%时,28 d抗折、抗压强度分别为纯水泥砂浆的85.71%和78.42%。Li等^[9]的研究则发现,10.00%再生微粉掺量的再生微粉砂浆早期抗压强度高于纯水泥砂浆,28 d时的抗压强度接近纯水泥砂浆。由上述研究结果可知,适量的再生微粉可取代水泥制备再生微粉砂浆,但再生微粉本身活性较低,导致其掺量较小。为提高其活性和利用率,一些学者进行了相关的激发研究。康晓明等^[10]发现,氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)和九水偏硅酸钠($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)碱性激发剂均可提高再生微粉的活性,其中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的激发效果较好。赵桂云^[11]也通过在试件中加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 碱性激发剂,对再生微粉进行活性激发,结果表明再生微粉掺量在20.00%以内时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的激发效果优于 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 。

为了进一步改善再生微粉砂浆的性能,许多学者进行了大量研究,发现纳米二氧化硅(SiO_2)是一

种超细材料,其掺入可通过二次水化产生更多的C—S—H凝胶,填充微观结构中的孔隙,使结构更加致密,有助于再生微粉砂浆抗折、抗压强度的提高。王健等^[12]的研究显示,1.50%掺量的纳米 SiO_2 可使砂浆28 d抗压强度和抗折强度分别提高28.30%和47.60%。蒋豪丽等^[13]发现,在再生微粉砂浆中添加2.00%纳米 SiO_2 可有效填充砂浆内部孔隙,使再生微粉砂浆力学性能最优,可与基准组持平。龚建清等^[14]研究了纳米 SiO_2 和玻璃粉单掺、复掺的效果,发现纳米 SiO_2 可显著提高砂浆在各龄期的抗压、抗折强度。此外,可再分散乳胶粉具有广阔的发展前景,可与水泥随意调和,运输方便,储存稳定,也可用于改善砂浆的性能。侯云芬等^[15]研究表明,不同掺量的可再分散乳胶粉可显著提高砂浆的流动性,并改善了保水性和韧性。孟利娜等^[16]发现,提高可再分散乳胶粉掺量能够提高再生微粉砂浆的流动性,但抗压强度先增大后下降,而抗折强度持续上升。汪胜等^[17]的研究表明,随着可再分散乳胶粉掺量的增加,砂浆的流动性先增后减,在4.00%掺量时砂浆的流动性和抗折强度最佳,而抗压强度逐渐下降。上述研究表明,再生微粉、纳米 SiO_2 、可再分散乳胶粉及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂作为替代材料在经济性上可能暂时不及传统水泥,但其长远的潜在社会 and 环境保护效益值得关注。这些材料替代水泥制备再生微粉砂浆,不仅促进了建筑垃圾的资源化利用,还有助于减少制备过程中的碳排放,从而实现“双碳”目标。然而,关于这些材料联合使用对再生微粉砂浆性能影响的研究还相对有限。

本文采用正交试验法设计了16组再生微粉砂浆试样,研究了不同掺量再生微粉、纳米 SiO_2 、可再分散乳胶粉及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂对再生微粉砂浆物理性能和力学性能的影响。通过测试再生微粉砂浆的稠度、拆模密度、保水率及不同龄期抗折和抗压强度,对试验数据进行了极差分析、因素指标分析和方差分析,以评估各因素对性能指标的影响程度及其显著性,最终经综合考虑确定最优配合比。本文研究结果可为实际工程中再生微粉的资源化利用及再生微粉砂浆的应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

水泥:型号为M32.5,初凝的时间是180 min,终凝的时间是240 min,3 d抗压强度是15 MPa,28 d抗压强度是36 MPa,由浙江鼎峰科技有限公

司提供;再生细骨料:堆积密度为 1700 kg/m³,含水率为 0.20%,含泥量为 2.00%,细度模数为 2.8,由浙江鼎峰科技有限公司提供;再生微粉:平均粒径为 8 μm,主要化学成分为 60.00%的 SiO₂ 和 13.00%的 Al₂O₃,由浙江鼎峰科技有限公司提供;纳米 SiO₂:平均粒径为 20 nm,体积密度为 0.08 g/cm³,质量密度为 2.20~2.60 g/cm³,购自上海肴弋合金材料有限公司;可再分散乳胶粉:固体含量为 99.70%,灰分含量为 10.50%,堆积密度为 390 g/L,由浙江鼎峰科技有限公司提供;Ca(OH)₂ 碱性激发剂:Ca(OH)₂ 含量≥95.00%,呈白色粉末状,购自国药集团化学试剂有限公司;减水剂:聚羧酸高性能减水剂,购自山西飞科新材料科技有限公司;保水剂:羟丙基甲基纤维素保水剂,由浙江鼎峰科技有限公司提供;水:杭州地区自来水。

1.2 正交试验设计

为减少试验工作量,采用正交试验法设计试验,确定再生微粉取代率(A 因素)、纳米 SiO₂ 掺量(B 因素)、可再分散乳胶粉掺量(C 因素)、Ca(OH)₂ 碱性激发剂掺量(D 因素)等 4 个考察因素,每个因素取 4 个水平,采用正交表 L₁₆(4⁵)。试验因素及水平

见表 1,正交试验配合比组合设计见表 2。这些掺量的选择主要根据前人的研究结果。杨新宸睿等^[18]发现,掺入 5.00%、10.00%、15.00%再生微粉砂浆的抗压强度与零掺量的再生微粉砂浆相近甚至更高。王健等^[12]采用掺量为 0.50%、1.00%、1.50%、2.00%的纳米 SiO₂ 改良砂浆,发现砂浆的抗折、抗压强度均高于基准组并在 1.50%达到最大值。孟丽娜等^[16]分别掺入 2.00%、4.00%、6.00%、8.00%的可再分散乳胶粉,再生微粉砂浆的抗折强度随掺量增加而增加,而抗压强度则在 4.00%达到最大值后降低。刘栋等^[19]采用 1.00%~3.50%掺量(增量为 0.50%)的 Ca(OH)₂ 碱性激发剂制备再生微粉砂浆,其强度在掺量为 2.50%时最佳;而刘润清等^[20]认为其强度在 6.00%掺量的 Ca(OH)₂ 碱性激发剂时最佳。考虑到正交试验需要控制增量一致,故本试验采用 0、2.00%、4.00%、6.00%的 Ca(OH)₂ 碱性激发剂掺量。设计砂浆抗压强度等级为 M10,通过掺加再生微粉、纳米 SiO₂、可再分散乳胶粉、Ca(OH)₂ 碱性激发剂对再生微粉砂浆进行改性。采用水胶比 0.58,胶砂比 0.35,具体配合比见表 3。

表 1 试验因素水平表

水平	因素			
	A:再生微粉取代率/%	B:纳米 SiO ₂ 掺量/%	C:可再分散乳胶粉掺量/%	D:Ca(OH) ₂ 碱性激发剂掺量/%
1	0.00	0.50	2.00	0.00
2	5.00	1.00	4.00	2.00
3	10.00	1.50	6.00	4.00
4	15.00	2.00	8.00	6.00

注:再生微粉取代率、纳米 SiO₂ 掺量、可再分散乳胶粉掺量、Ca(OH)₂ 碱性激发剂掺量均为其占水泥的质量百分数。

表 2 正交试验组合设计表

组别	组合	因素			
		A:再生微粉取代率/%	B:纳米 SiO ₂ 掺量/%	C:可再分散乳胶粉掺量/%	D:Ca(OH) ₂ 碱性激发剂掺量/%
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	0.00	0.50	2.00	0.00
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	0.00	1.00	4.00	2.00
3	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	0.00	1.50	6.00	4.00
4	A ₁ B ₄ C ₄ D ₄	0.00	2.00	8.00	6.00
5	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	5.00	0.50	4.00	4.00
6	A ₂ B ₂ C ₁ D ₄	5.00	1.00	2.00	6.00
7	A ₂ B ₃ C ₄ D ₁	5.00	1.50	8.00	0.00
8	A ₂ B ₄ C ₃ D ₂	5.00	2.00	6.00	2.00
9	A ₃ B ₁ C ₃ D ₄	10.00	0.50	6.00	6.00
10	A ₃ B ₂ C ₄ D ₃	10.00	1.00	8.00	4.00
11	A ₃ B ₃ C ₁ D ₂	10.00	1.50	2.00	2.00
12	A ₃ B ₄ C ₂ D ₁	10.00	2.00	4.00	0.00
13	A ₄ B ₁ C ₄ D ₂	15.00	0.50	8.00	2.00
14	A ₄ B ₂ C ₃ D ₁	15.00	1.00	6.00	0.00
15	A ₄ B ₃ C ₂ D ₄	15.00	1.50	4.00	6.00
16	A ₄ B ₄ C ₁ D ₃	15.00	2.00	2.00	4.00

表 3 再生微粉砂浆材料配比表

组别	水泥	再生细骨料	减水剂	保水剂	再生微粉	纳米 SiO ₂	可再分散乳胶粉	Ca(OH) ₂ 碱性激发剂	水
1	614.25				270.00	3.15	12.60	0	
2	585.90				270.00	6.30	25.20	12.60	
3	557.55				270.00	9.45	37.80	25.20	
4	529.20				270.00	12.60	50.40	37.80	
5	544.95				301.50	3.15	25.20	25.20	
6	541.80				301.50	6.30	12.60	37.80	
7	538.65				301.50	9.45	50.40	0	
8	535.50	2570.00	1.80	0.90	301.50	12.60	37.80	12.60	525.00
9	488.25				333.00	3.15	37.80	37.80	
10	485.10				333.00	6.30	50.40	25.20	
11	532.35				333.00	9.45	12.60	12.60	
12	529.20				333.00	12.60	25.20	0	
13	469.35				364.50	3.15	50.40	12.60	
14	491.40				364.50	6.30	37.80	0	
15	463.05				364.50	9.45	25.20	37.80	
16	485.10				364.50	12.60	12.60	25.20	

1.3 试样制备及试验方法

试样制备及试验方法严格按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)和《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021),制备了 16 组 40 mm×40 mm×160 mm 的试样,

每组 12 块;在制备试样的同时测试砂浆的稠度、保水率;室温下养护 1 d 后脱模,测试试样的拆模密度;测定各组试样龄期达到 3、7、14、28 d 时的抗折和抗压强度。砂浆试样及试验仪器照片如图 1 所示。



图 1 砂浆试样及试验仪器照片

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

本文试验测定了 16 组砂浆试样的稠度、拆模密度、保水率及 3、7、14、28 d 龄期的抗折强度和抗压强度,试验结果如表 4 所示。由表 4 可直观看出,试样的稠度最小值为 54.00 mm,最大值为 109.00 mm,可根据实际需要增加或减少用水量;第 16 组试样的拆模密度最大,说明其内部结构与其他组相比更致密;所有试样的保水率均在 90.00% 以上,表明保水性较好,有助于抑制早期干燥收缩,降低开裂风险;试样的抗折、抗压强度均随着龄期的增加而增大,符合砂浆的标准强度发展规律。

2.2 极差分析

根据正交试验法,以稠度为例,对表 4 的数据进行处理,如表 5 所示,其中: K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别对应 4 组因素下砂浆试验值在 4 个不同水平的和; \bar{K}_1 、 \bar{K}_2 、 \bar{K}_3 、 \bar{K}_4 分别对应 4 个不同水平因素下 4 个试验值的算术平均值,值越大其水平对指标的影响越大; R 表示极差,值越大该因素对指标的影响越大^[21]。

由表 5 可以发现,对 A 因素进行了 4 组水平试验,即 4 种不同水平的再生微粉取代率(A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4),而 B、C、D 因素每个水平只出现一次。如果各因素之间没有交互作用,则不会影响试验指标。因此,对于 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 ,其试验条件完全相同。

表 4 各组性能试验结果

组别	抗折强度/MPa				抗压强度/MPa				稠度 /mm	拆模密度 /(g•cm ⁻³)	保水率/%
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d			
1	0.50	1.70	2.10	2.60	1.60	4.90	6.70	8.80	98.00	1.83	92.66
2	0.50	1.40	2.00	2.30	1.40	4.20	6.10	8.60	85.00	1.80	98.43
3	0.50	1.40	1.90	2.70	1.30	3.90	5.80	8.30	84.00	1.77	99.08
4	0.50	1.30	1.80	2.50	1.60	3.90	5.50	7.50	79.00	1.79	99.54
5	0.50	1.30	1.90	2.30	1.40	4.00	5.90	7.30	85.00	1.81	96.02
6	0.70	1.90	2.40	2.70	2.10	6.00	7.10	9.40	67.00	1.88	98.94
7	0.40	0.90	1.30	1.60	0.80	2.00	3.90	4.40	100.00	1.67	92.17
8	0.60	1.30	1.60	2.20	1.30	3.70	5.00	6.50	90.00	1.68	97.38
9	0.50	1.10	1.40	2.00	1.20	3.10	4.30	5.90	93.00	1.78	97.93
10	0.60	1.00	1.70	2.00	1.30	2.60	4.70	5.80	96.00	1.71	98.38
11	0.90	1.60	2.40	2.70	2.30	5.30	7.60	9.60	63.00	1.83	99.45
12	0.70	1.20	1.90	2.10	1.70	3.30	5.40	7.00	88.00	1.60	96.83
13	0.50	0.80	1.50	1.60	1.00	2.20	3.90	4.50	92.00	1.69	93.83
14	0.60	1.00	1.50	1.70	1.10	2.20	3.90	5.00	109.00	1.65	91.76
15	0.70	1.60	2.40	2.80	2.10	5.10	6.40	8.50	60.00	1.87	98.82
16	0.80	2.00	3.00	3.30	2.40	6.40	9.30	11.30	54.00	1.93	99.58

表 5 再生微粉砂浆稠度极差分析

组别	因素				空白列	稠度/mm
	A:再生微粉取代率	B:纳米 SiO ₂ 掺量	C:可再分散乳胶粉掺量	D:Ca(OH) ₂ 碱性激发剂掺量		
1	1	1	1	1	1	98.00
2	1	2	2	2	2	85.00
3	1	3	3	3	3	84.00
4	1	4	4	4	4	79.00
5	2	1	2	3	4	85.00
6	2	2	1	4	3	67.00
7	2	3	4	1	2	100.00
8	2	4	3	2	1	90.00
9	3	1	3	4	2	93.00
10	3	2	4	3	1	96.00
11	3	3	1	2	4	63.00
12	3	4	2	1	3	88.00
13	4	1	4	2	3	92.00
14	4	2	3	1	4	109.00
15	4	3	2	4	1	60.00
16	4	4	1	3	2	54.00
K ₁	346.00	368.00	282.00	395.00	344.00	
K ₂	342.00	357.00	318.00	330.00	332.00	
K ₃	340.00	307.00	376.00	319.00	331.00	
K ₄	315.00	311.00	367.00	299.00	336.00	
\bar{K}_1	86.50	92.00	70.50	98.75	86.00	
\bar{K}_2	85.50	89.25	79.50	82.50	83.00	
\bar{K}_3	85.00	76.75	94.00	79.75	82.75	
\bar{K}_4	78.75	77.75	91.75	74.75	84.00	
R	7.75	15.25	23.50	24.00	3.25	
最优水平	A ₁	B ₁	C ₃	D ₁		
主次顺序	DCBA					

如果 A 因素对测试指标没有影响,那么由 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 结果得出的 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 应该相等,但实际计算发现并不相等,说明 A 因素的水平变化会对测试指标产生影响。A 列的算术平均值 \bar{K} 可以反映 A 因素对试验指标的影响程度。

通过 A 列中 $\bar{K}_1 > \bar{K}_2 > \bar{K}_3 > \bar{K}_4$,可以得出 A_1 是 A 因素中的最优水平。类似地,B、C、D 因素的最优水平分别为 B_1 、 C_3 和 D_1 。由表 5 可知,根据 4 个因素的 R,可以判断四个因素对试验指标影响的主次顺序为 DCBA。

再生微粉砂浆的稠度越高,越有利于建筑施工中的使用,但由于试验中有部分再生微粉砂浆的稠度实测值超出标准允许范围,因此得出的稠度最优配合比 $A_1B_1C_3D_1$ 仅作为参考。

2.3 因素指标分析

再生微粉砂浆的稠度、拆模密度、保水率和 3、7、14、28 d 抗折强度及抗压强度将根据正交试验及极差分析结果绘制趋势图,直观显示各因素对试验指标的影响。

2.3.1 稠 度

图 2 显示了 16 组试样的稠度试验结果。从图 2 中可以看出,大部分组的稠度在 50.00 mm 到 90.00 mm 之间,第 16 组的稠度最小,为 54.00 mm,第 14 组的稠度最大,为 109.00 mm。

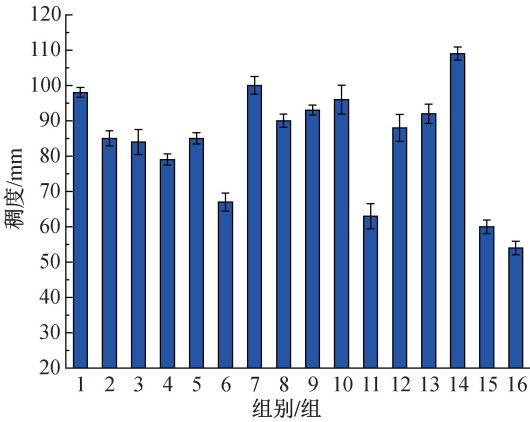


图 2 不同因素水平下各组砂浆的稠度

图 3 为各因素、水平与砂浆稠度的关系曲线。其中,各因素的极差如图 3(a)所示,从图中可以发现,影响稠度的主要因素是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量(D)和可再分散乳胶粉掺量(C),影响顺序为: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量(D)、可再分散乳胶粉掺量(C)、纳米 SiO_2 掺量(B)、再生微粉取代率(A)。

图 3(b)为砂浆稠度的各因素水平 \bar{K} ,从图中可以发现,稠度在 $A_1B_1C_3D_1$ 达到最大值。当

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 0 增加到 2.00%,稠度下降 16.50%;当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 2.00% 增加到 4.00%,稠度下降 3.30%;当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 4.00% 增加到 6.00%,稠度下降 6.30%。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂促进水泥水化反应,然而过量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂可能导致过度的水化反应,产生过多的水化产物,如沉淀物和凝胶体。这些产物的积累增加了再生微粉砂浆的黏性,引起颗粒聚集,从而减少了颗粒间的间隙,并阻碍了颗粒的相对滑动,最终导致再生微粉砂浆的稠度降低。Ringu 等^[22] 也发现,随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂的掺入,砂浆为达工作性能所需的减水剂增加,说明砂浆实际的稠度下降。因此,随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量的增加,再生微粉砂浆的稠度呈现出下降趋势。

当可再分散乳胶粉掺量从 2.00% 增加到 4.00%时,稠度上升 12.80%;当可再分散乳胶粉掺量从 4.00% 增加到 6.00%时,稠度上升 18.20%;当可再分散乳胶粉掺量从 6.00% 增加到 8.00%时,稠度下降 2.40%。可再分散乳胶粉在与水接触后可以很快地再分散成乳液,形成具有黏性的纤维膜包裹水泥颗粒,产生一定的减水效果^[21],从而提高了再生微粉砂浆的稠度。但当掺量超过 6.00%时,可再分散乳胶粉在水中形成的纤维膜可能达到了饱和,出现了“黏性过强”的情况,阻碍了颗粒间的滑动,造成稠度下降。因此,稠度随着可再分散乳胶粉掺量的增加呈上升趋势,当掺量超过 6.00%时,稠度减小。侯云芬等^[15] 也发现,可再分散乳胶粉溶于水后分散,不与水泥团聚,且其具有引气作用,稠度增加,但由于可再分散乳胶粉会形成纤维膜包覆层,过量的可再分散乳胶粉将导致稠度下降,其试验结果也符合这一趋势。聂宗浩等^[23] 也得出了同样的结论,发现稠度随可再分散乳胶粉掺量的增加呈先增加后减小的趋势,由于可再分散乳胶粉掺量较小时会引入气泡,增加了稠度,而过量的可再分散乳胶粉会消耗更多自由水,稠度减小。

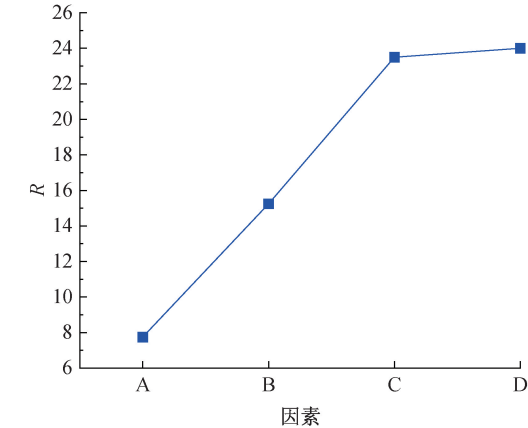
2.3.2 拆模密度

图 4 显示了 16 组试样的拆模密度试验结果。从图 4 中可以看出,拆模密度在不同组别之间波动不大,整体上较为稳定。第 12 组的拆模密度最小,为 1.60 g/cm³,第 16 组的拆模密度最大,为 1.93 g/cm³。

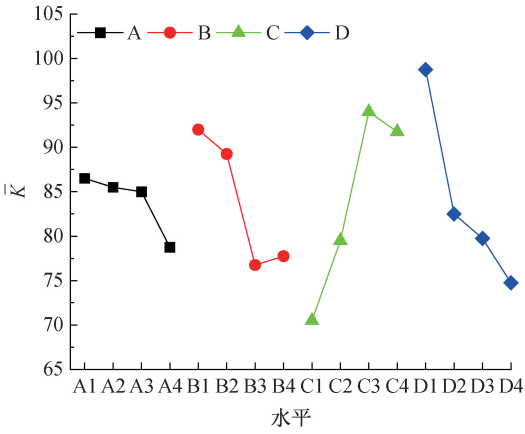
图 5 为各因素、水平与砂浆拆模密度的关系曲线。其中,各因素的极差如图 5(a)所示,从图中可以发现,影响拆模密度的主要因素是可再分散乳胶

粉掺量(C)和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量(D),影响顺序为:可再分散乳胶粉掺量(C)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性

激发剂掺量(D)、再生微粉取代率(A)、纳米 SiO_2 掺量(B)。



(a) 砂浆稠度的各因素极差



(b) 砂浆稠度的各因素水平 \bar{K}

图 3 各因素、水平与砂浆稠度的关系曲线

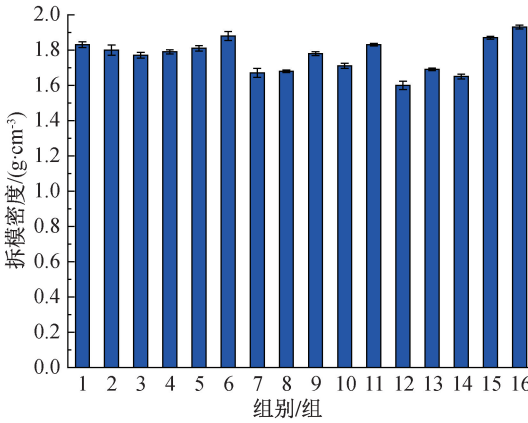
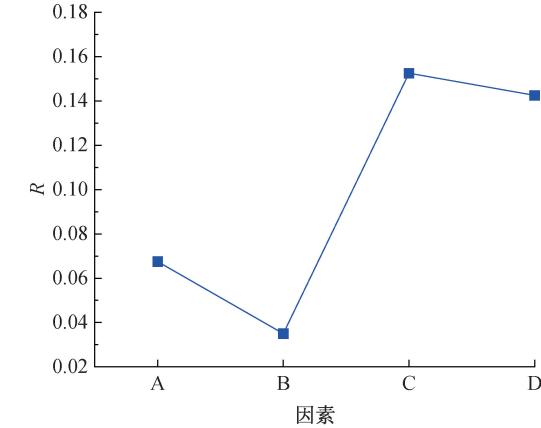


图 4 不同因素水平下各组砂浆的拆模密度

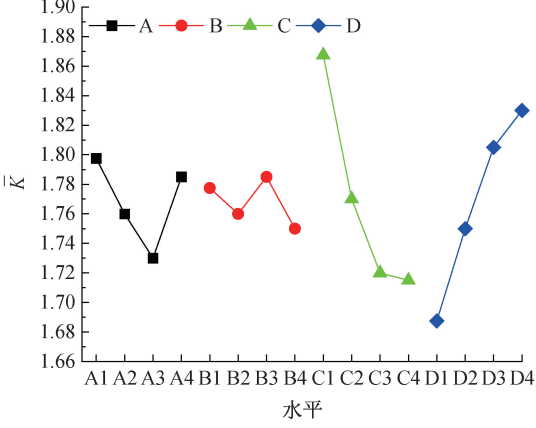
图 5(b)为砂浆拆模密度的各因素水平 \bar{K} ，从图中可以发现， $A_1B_3C_1D_4$ 为拆模密度的最优配合比。当可再分散乳胶粉掺量从 2.00% 增加到 4.00% 时，拆模密度下降 5.20%；当可再分散乳胶粉掺量从 4.00% 增加到 6.00% 时，拆模密度下降 2.80%；当可再分散乳胶粉掺量从 6.00% 增加到

8.00% 时，拆模密度下降 0.30%。由于可再分散乳胶粉具有一定的引气作用^[24]，导致再生微粉砂浆在拌合过程中引入了大量气泡。在固定体积的条件下，这些气泡占据了再生微粉砂浆的一部分空间，从而降低了其密实度。因此，随着可再分散乳胶粉掺量的增加，再生微粉砂浆的拆模密度也随之减小。

当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 0 增加到 2.00%，拆模密度上升 3.70%；当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 2.00% 增加到 4.00%，拆模密度上升 3.10%；当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 4.00% 增加到 6.00%，拆模密度上升 1.40%。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂的掺入能够显著促进水泥的水化反应，优化了再生微粉砂浆的微观结构。这种优化增强了再生细骨料与水泥之间的结合力，从而降低了孔隙率并提高了再生微粉砂浆的密实度。因此，随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量的增加，再生微粉砂浆的拆模密度也随之提高。



(a) 砂浆拆模密度的各因素极差



(b) 砂浆拆模密度的各因素水平 \bar{K}

图 5 各因素、水平与砂浆拆模密度的关系曲线

2.3.3 保水率

图 6 显示了 16 组试样的保水率试验结果。从图 6 中可以看出,各组的保水率均大于 90.00%,第 14 组的保水率最小,为 91.76%,第 16 组的保水率最大,为 99.58%。

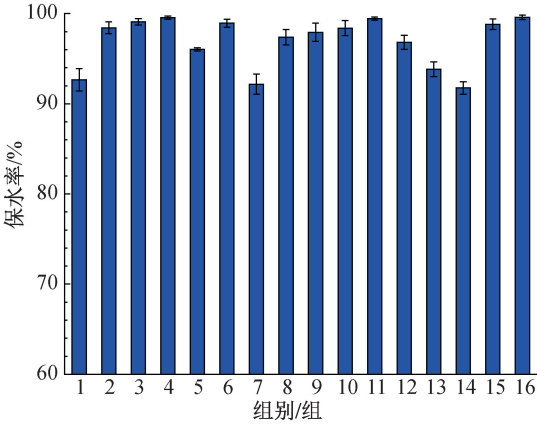
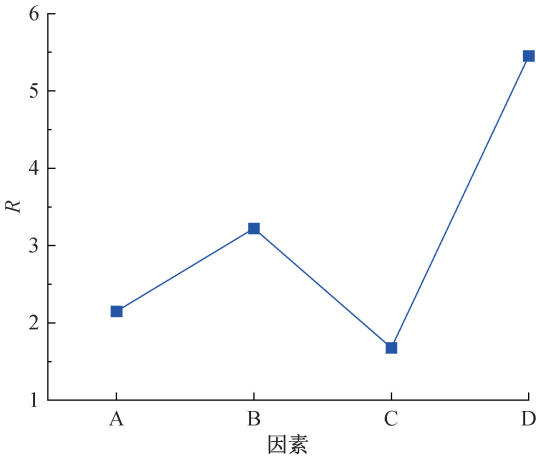
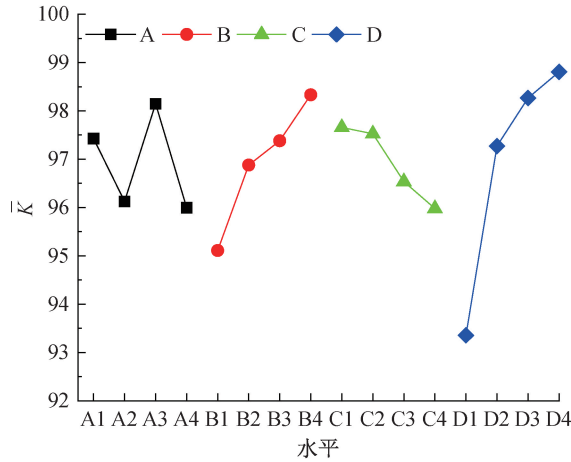


图 6 不同因素水平下各组砂浆的保水率

图 7 为各因素、水平与砂浆保水率的关系曲线。其中,各因素的极差如图 7(a)所示,从图中可以发现,影响保水率的主要因素是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量(D)和纳米 SiO_2 掺量(B),影响顺序为: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量(D)、纳米 SiO_2 掺量(B)、再生微粉取代率(A)、可再分散乳胶粉掺量(C)。



(a) 砂浆保水率的各因素极差



(b) 砂浆保水率的各因素水平 \bar{K}

图 7 各因素、水平与砂浆保水率的关系曲线

2.3.4 抗折强度

图 8 显示了 16 组试样不同龄期抗折强度的试验结果。从图 8 中可以看出,随着龄期的增加,抗折强度逐渐增加。

图 9 为各因素、水平与砂浆抗折强度的关系曲线。其中,各因素的极差如图 7(a)所示,从图中可以

图 7(b)为砂浆保水率的各因素水平 \bar{K} ,从图中可以发现, $A_3B_4C_1D_4$ 为保水率的最优配合比。当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 0 增加到 2.00%,保水率上升 4.20%;当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 2.00%增加到 4.00%,保水率上升 1.00%;当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量从 4.00%增加到 6.00%,保水率上升 0.60%。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂的掺入促进水泥的水化反应,从而形成了更多的水化产物。这些产物能够有效填充再生微粉砂浆中颗粒间的空隙,降低孔隙率,并使再生微粉砂浆结构更加密实。由于结构的密实度提高,减少了水分的渗透和蒸发速率,因此,随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量的增加,再生微粉砂浆的保水率得到了提升。

当纳米 SiO_2 掺量从 0.50%增加到 1.00%时,保水率上升 1.90%;当纳米 SiO_2 掺量从 1.00%增加到 1.50%时,保水率上升 0.50%;当纳米 SiO_2 掺量从 1.50%增加到 2.00%时,保水率上升 1.00%。纳米 SiO_2 的掺入能够有效填充再生微粉砂浆中的微孔和微裂缝,不仅促进了水泥的水化反应,还降低了整体的孔隙率,从而增强了再生微粉砂浆结构的密实度和稳定性。由于结构的优化减少了水分的流失,因此,随着纳米 SiO_2 掺量的增加,再生微粉砂浆的保水率得到了显著提升。

发现,影响砂浆 3、7、14、28 d 抗折强度的主要因素是可再分散乳胶粉掺量(C)。在 3 d 龄期时,各因素对再生微粉砂浆抗折强度的影响区别较小, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量的影响最小;在 7、14、28 d 龄期时,可再分散乳胶粉掺量对再生微粉砂浆抗折强度的影响最大,且随着掺量的增加,抗折强度逐渐减小。

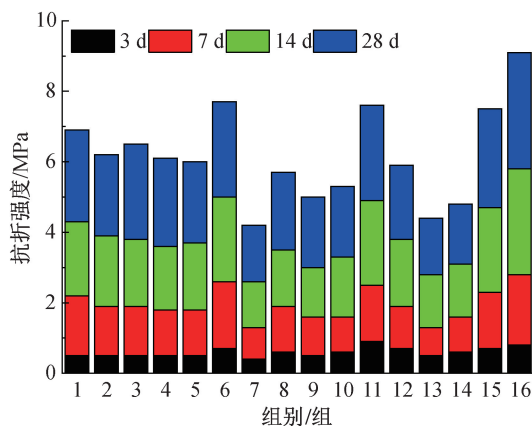
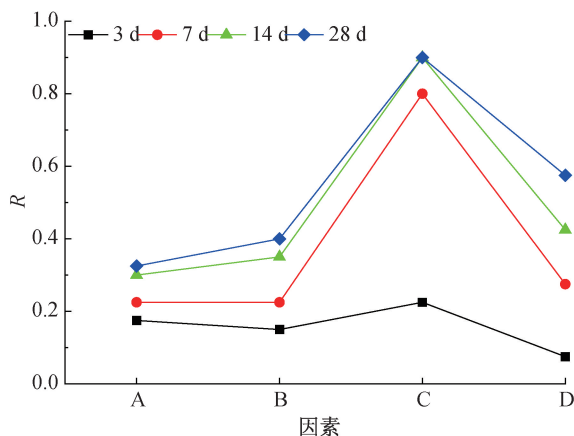


图 8 不同因素水平下各组砂浆不同龄期的抗折强度

图 9(b)为砂浆抗折强度的各因素水平 \bar{K} , 从图中可以发现, $A_3B_4C_1D_2$ 为 3 d 抗折强度的最优配合比, $A_1B_4C_1D_4$ 为 7 d 抗折强度的最优配合比,



(a) 砂浆抗折强度的各因素极差

$A_4B_4C_1D_3$ 为 14 d 抗折强度的最优配合比, $A_1B_4C_1D_3$ 为 28 d 抗折强度的最优配合比。当可再分散乳胶粉掺量从 2.00% 增加到 4.00% 时, 抗折强度 3 d 下降 17.20%, 7 d 下降 23.60%, 14 d 下降 17.20%, 28 d 下降 15.90%; 当可再分散乳胶粉掺量从 4.00% 增加到 6.00% 时, 抗折强度 3 d 下降 8.30%, 7 d 下降 12.70%, 14 d 下降 22.00%, 28 d 下降 9.50%; 当可再分散乳胶粉掺量从 6.00% 增加到 8.00% 时, 抗折强度 3 d 下降 9.10%, 7 d 下降 16.70%, 14 d 下降 1.60%, 28 d 下降 10.50%。掺入可再分散乳胶粉会导致再生微粉砂浆的总孔隙率及其平均孔径增加, 且增加的孔多为开口孔^[25]。这种孔结构的变化导致再生微粉砂浆硬化后的内部结构变得疏松, 进而降低了其抗折强度。

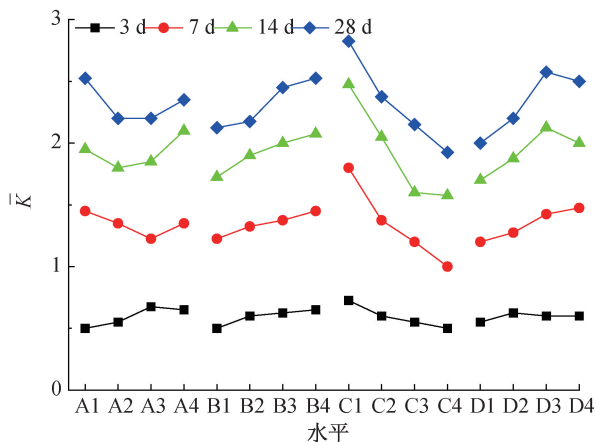
(b) 砂浆抗折强度的各因素水平 \bar{K}

图 9 各因素、水平与砂浆抗折强度的关系曲线

2.3.5 抗压强度

图 10 显示了 16 组试样不同龄期抗压强度的试验结果。从图 10 中可以看出, 随着龄期的增加, 抗压强度逐渐增加。

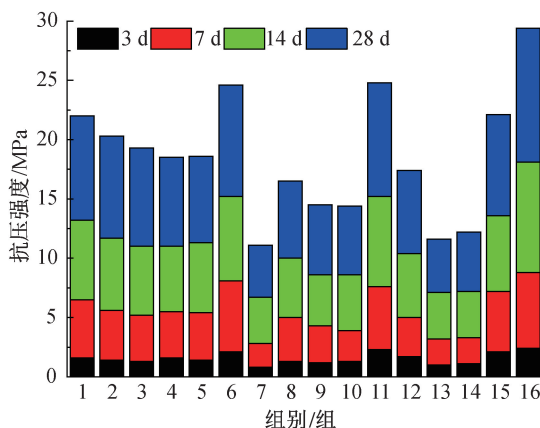


图 10 不同因素水平下各组砂浆不同龄期的抗压强度

图 11 为各因素、水平与砂浆抗压强度的关系曲线。其中, 各因素的极差如图 11(a) 所示, 从图中可以发现, 影响砂浆 3、7、14、28 d 抗压强度的主要因素是可再分散乳胶粉掺量(C)。在 3 d 龄期时, 各因素对再生微粉砂浆抗压强度的影响区别较小, 再生微粉取代率的影响最小; 在 7、14、28 d 龄期时, 可再分散乳胶粉掺量对再生微粉砂浆抗压强度的影响最大, 且随着掺量的增加, 抗压强度逐渐减小, 这与大多数学者的研究结论一致。

图 11(b)为砂浆抗压强度的各因素水平 \bar{K} , 从图中可以发现, $A_4B_4C_1D_4$ 为 3 d 抗压强度的最优配合比, $A_1B_4C_1D_4$ 为 7 d 抗压强度的最优配合比, $A_1B_4C_1D_3$ 为 14 d 及 28 d 抗压强度的最优配合比。当可再分散乳胶粉掺量从 2.00% 增加到 4.00% 时, 抗压强度 3 d 下降 21.40%, 7 d 下降 26.50%, 14 d 下降 22.50%, 28 d 下降 19.70%; 当可再分散乳胶

粉掺量从 4.00% 增加到 6.00% 时,抗压强度 3 d 下降 25.80%,7 d 下降 22.30%,14 d 下降 20.20%,28 d 下降 18.20%;当可再分散乳胶粉掺量从 6.00% 增加到 8.00% 时,抗压强度 3 d 下降 4.10%,7 d 下降 17.10%,14 d 下降 5.30%,28 d 下降 13.60%。由于可再分散乳胶粉具有柔性和引气特性,会增加再生微粉砂浆的总孔隙率。然而,过量的可再分散乳胶粉掺入可能会导致其在再生微粉

砂浆中分散不均匀,进而阻碍水泥的正常水化反应。这种不均匀分布使得颗粒间无法有效填充,降低了再生微粉砂浆的密实度,从而对再生微粉砂浆的抗压强度造成损害。王志华^[26]也指出,随着可再分散乳胶粉掺量的增加,在砂浆表面和内部会形成致密的薄膜,导致水分无法和砂浆内部未水化的水泥反应,破坏了砂浆的整体结构,因此砂浆的抗压强度逐渐减小。

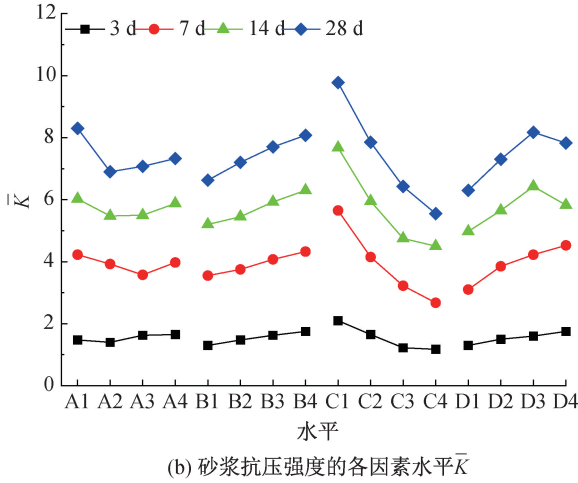
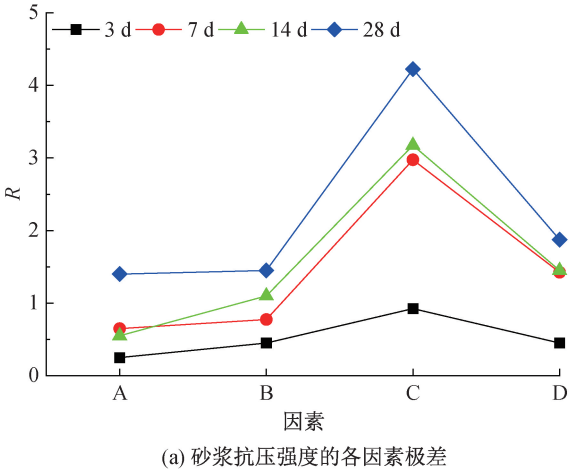


图 11 各因素、水平与砂浆抗压强度的关系曲线

2.3.6 各因素指标分析

综合分析结果表明,增加再生微粉取代率会导致再生微粉砂浆稠度降低,拆模密度先下降后增加,而保水率变化无明显规律。3 d 的再生微粉砂浆抗折和抗压强度未受明显影响,但随着龄期延长至 7、14、28 d,其强度先降低后增加。这一现象的主要原因是再生微粉颗粒小,吸水率高,导致再生微粉砂浆稠度降低。一开始随着再生微粉增加,水泥减少,水泥水化产物减少,导致拆模密度下降;而后,由于再生微粉的颗粒较小,填充了再生微粉砂浆中较大的空隙,从而提高了拆模密度。尽管再生微粉活性较低,取代水泥会导致强度下降,但适量掺入再生微粉能细化孔隙结构,其成分可能与水泥成分发生反应,生成新的胶凝体,从而改善了再生微粉砂浆的力学性能。

纳米 SiO₂ 掺量的增加,导致再生微粉砂浆的稠度呈下降趋势,拆模密度变化无明显规律,保水率增加,且不同龄期的再生微粉砂浆抗折和抗压强度均有所提高。纳米 SiO₂ 具有火山灰活性和填充效应,能与水泥水化产物发生二次水化反应,生成 C—S—H 凝胶,从而会填充微孔和微裂缝,降低孔隙率,提高再生微粉砂浆结构的密实度,减少水分流失;其表面张力和成团效应使其在再生微粉砂浆中通过成核效

应促进水泥水化反应^[27],导致再生微粉砂浆的稠度降低,保水率和强度提高。

随着可再分散乳胶粉掺量的增加,再生微粉砂浆的稠度呈上升趋势,拆模密度和保水率却降低,且不同龄期的再生微粉砂浆抗折和抗压强度均有所下降。可再分散乳胶粉与水接触后会再分散成乳液,增加再生微粉砂浆稠度,但由于其对水的需求较大,导致保水率降低。此外,可再分散乳胶粉具有一定的引气作用,增加了再生微粉砂浆的总孔隙率;过量掺入可能会导致分散不均,降低再生微粉砂浆的密实度,进而影响其抗折和抗压强度。

Ca(OH)₂ 碱性激发剂掺量的增加,导致再生微粉砂浆的稠度降低,拆模密度和保水率增加,且不同龄期的再生微粉砂浆抗折、抗压强度总体呈增大趋势;但在 14 d 和 28 d 时,当 Ca(OH)₂ 碱性激发剂掺量超过 4.00%,抗折、抗压强度有所下降。过量的 Ca(OH)₂ 可能导致过度反应,生成大量水化产物,阻碍颗粒滑动,降低砂浆稠度。Ca(OH)₂ 碱性激发剂促进了水泥水化反应,优化了再生微粉砂浆的微观结构,降低了孔隙率,提高了拆模密度;同时,还减少了水分的渗透和蒸发速率,增加了保水率。Ca(OH)₂ 碱性激发剂体系中液相碱度的提高会促使再生微粉中 SiO₂、Al₂O₃ 的键位断裂,提高再生

微粉的早期水化反应速率^[28],加速了凝结硬化过程,生成硅酸盐水化产物,改善了孔隙结构,提高了早期强度。然而,过量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂可能在再生微粉砂浆表面形成液膜,阻碍水泥颗粒结合,导致抗折、抗压强度下降;还可能引发碱骨料反应^[29],导致再生微粉砂浆膨胀开裂。

2.4 方差分析

由于极差分析法不能估计试验过程和试验结果确定中的误差,不能区分改变试验条件引起的数据波动和误差引起的数据波动,为了进一步确认不同因素对各指标的影响,计算了各因素的贡献率^[30]。表 6—表 16 显示了再生微粉砂浆稠度、拆模密度、保水率及 3、7、14、28 d 抗折强度和抗压强度的方差

分析及因素与误差的贡献率。

再生微粉砂浆的稠度方差分析及因素与误差的贡献率见表 6。由表 6 可知,可再分散乳胶粉掺量和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量对再生微粉砂浆稠度有显著影响,而再生微粉取代率对其无显著影响。可再分散乳胶粉掺量是影响再生微粉砂浆稠度的主要因素,其均方占总偏差平方和的比例,即因素贡献率为 13.24%,是误差贡献率的 55.38 倍,表明在稠度的变化中,可再分散乳胶粉的作用是显著的,适当掺入可再分散乳胶粉可以有效改善砂浆的工作性能,从而提升施工的便利性和效果;其他因素的贡献率均大于误差的贡献率,其中再生微粉取代率贡献率最小,对稠度无显著影响。

表 6 稠度方差分析及因素与误差的贡献率						
因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	F	显著性
A	148.18	3	49.39	1.35	5.65	ns
B	732.68	3	244.22	6.69	27.97	*
C	1450.18	3	483.39	13.24	55.37	**
D	1293.68	3	431.22	11.81	49.40	**
误差	26.18	3	8.72	0.24		
总和	3650.93	15				

注:F 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;* 表示显著性,**表示高度显著性。

再生微粉砂浆的拆模密度方差分析及因素与误差的贡献率见表 7。由表 7 可知,4 个因素对砂浆的拆模密度均无显著影响。其中,可再分散乳胶粉掺

量对再生微粉砂浆拆模密度的影响最大,其因素贡献率为 15.49%,是误差贡献率的 8.15 倍;纳米掺量的贡献率小于误差的贡献率,因此可以认为不重要。

表 7 拆模密度方差分析及因素与误差的贡献率						
因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	F	显著性
A	0.011	3	0.004	2.75	1.448	ns
B	0.003	3	0.001	0.79	0.416	ns
C	0.060	3	0.020	15.49	8.152	ns
D	0.048	3	0.016	12.40	6.523	ns
误差	0.007	3	0.002	1.90		
总和	0.129	15				

注:F 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性。

再生微粉砂浆的保水率方差分析及因素与误差的贡献率见表 8。由表 8 可知, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量是影响再生微粉砂浆保水率的主要因素且最显著。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量对再生微粉砂浆保水率影响最大,其因素贡献率为 20.92%,是误差

贡献率的 132.10 倍,表明 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂可显著改善砂浆的保水率,能够有效提高砂浆的工作性及抗干缩性,有助于降低裂缝的产生;其他因素的贡献率均大于误差的贡献率,其中可再分散乳胶粉掺量贡献率最小。

表 8 保水率方差分析及因素与误差的贡献率						
因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	F	显著性
A	12.97	3	4.32	3.73	23.53	*
B	21.93	3	7.31	6.30	39.79	**
C	7.75	3	2.58	2.23	14.07	*
D	72.82	3	24.27	20.92	132.10	***
误差	0.55	3	0.18	0.16		
总和	116.04	15				

注:F 表示因素贡献率/误差贡献率;* 表示显著性,**表示高度显著性,***表示极高度显著性。

不同龄期再生微粉砂浆的抗折、抗压强度方差分析及因素与误差的贡献率见表 9—表 16。由表 9—表 16 可知,可再分散乳胶粉掺量是影响再生微粉砂浆 3、7、14、28 d 抗折及抗压强度的主要因素且最显著。可再分散乳胶粉掺量对再生微粉砂浆 3、7、14、28 d 抗折及抗压强度的影响最大,其因素贡献率分别为 13.84%、25.50%、23.72%、

17.25%、22.30%、24.83%、25.07%、23.31%,分别是误差贡献率的 9.42、63.63、437、48.05、42.52、150.48、102.14、291.89 倍;其他因素的贡献率也均大于误差的贡献率。对于再生微粉砂浆 3 d 和 7 d 的抗折强度只有可再分散乳胶粉掺量有显著性影响;对于再生微粉砂浆的抗压强度,各因素影响随着龄期的增加逐渐显著。

表 9 3 d 抗折强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.082	3	0.027	10.13	6.895	ns
B	0.052	3	0.017	6.42	4.368	ns
C	0.112	3	0.037	13.84	9.421	*
D	0.012	3	0.004	1.47	1.000	ns
误差	0.012	3	0.004	1.47		
总和	0.269	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;* 表示显著性。

表 10 7 d 抗折强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.102	3	0.034	1.87	4.657	ns
B	0.107	3	0.036	1.96	4.886	ns
C	1.392	3	0.464	25.50	63.629	**
D	0.197	3	0.066	3.61	9.000	ns
误差	0.022	3	0.007	0.40		
总和	1.819	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;**表示高度显著性。

表 11 14 d 抗折强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.210	3	0.070	2.28	42.000	**
B	0.275	3	0.092	2.99	55.000	**
C	2.185	3	0.728	23.72	437.000	***
D	0.395	3	0.132	4.29	79.000	**
误差	0.005	3	0.002	0.05		
总和	3.070	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;**表示高度显著性,***表示极高度显著性。

表 12 28 d 抗折强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.287	3	0.096	2.79	7.780	ns
B	0.472	3	0.157	4.59	12.797	*
C	1.772	3	0.591	17.25	48.051	**
D	0.857	3	0.286	8.34	23.237	*
误差	0.037	3	0.012	0.36		
总和	3.424	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;* 表示显著性,**表示高度显著性。

表 13 3 d 抗压强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.173	3	0.058	1.72	3.286	ns
B	0.453	3	0.151	4.52	8.619	ns
C	2.232	3	0.744	22.30	42.524	**
D	0.427	3	0.142	4.27	8.143	ns
误差	0.052	3	0.017	0.52		
总和	3.337	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;**表示高度显著性。

表 14 7 d 抗压强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.860	3	0.287	1.05	6.370	ns
B	1.415	3	0.472	1.73	10.481	*
C	20.315	3	6.772	24.83	150.481	***
D	4.545	3	1.515	5.56	33.667	**
误差	0.135	3	0.045	0.17		
总和	27.270	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;* 表示显著性,**表示高度显著性,***表示极高度显著性。

表 15 14 d 抗压强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	0.902	3	0.301	0.90	3.653	ns
B	2.887	3	0.962	2.87	11.694	*
C	25.217	3	8.406	25.07	102.144	**
D	4.272	3	1.424	4.25	17.304	*
误差	0.247	3	0.082	0.25		
总和	33.524	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;ns 表示无显著性;* 表示显著性,**表示高度显著性。

表 16 28 d 抗压强度方差分析及因素与误差的贡献率

因素	偏差平方和	自由度	均方	贡献率/%	<i>F</i>	显著性
A	4.685	3	1.562	2.67	33.464	**
B	4.745	3	1.582	2.71	33.893	**
C	40.865	3	13.622	23.31	291.893	***
D	8.005	3	2.668	4.57	57.179	**
误差	0.14	3	0.047	0.08		
总和	58.440	15				

注:*F* 表示因素贡献率/误差贡献率;**表示高度显著性,***表示极高度显著性。

方差分析和极差分析是两种不同的统计方法,因此可能会得出不同的主要影响因素,这通常是由于它们侧重于不同的方面导致。方差分析关注因素对试验结果的整体影响,即因素在均值上是否具有显著差异,极差分析更关注不同水平对试验结果的差异性影响。本文中,方差分析与极差分析得出的结果略有不同但大体一致,在实际应用中,可以综合考虑这两种方法的结果,以全面评估各因素的重要性。

3 最优配合比

根据因素指标分析,将各因素的主次顺序和最优配合比列于表 17 中。

表 17 各因素的主次影响及最优配合比

试验指标	主次顺序	最优配合比
稠度	DCBA	A ₁ B ₁ C ₃ D ₁
拆模密度	CDAB	A ₁ B ₃ C ₁ D ₄
保水率	DBAC	A ₃ B ₄ C ₁ D ₄
3 d 抗折强度	CABD	A ₃ B ₄ C ₁ D ₂
7 d 抗折强度	CDAB	A ₁ B ₄ C ₁ D ₄
14 d 抗折强度	CDBA	A ₄ B ₄ C ₁ D ₃
28 d 抗折强度	CDBA	A ₁ B ₄ C ₁ D ₃
3 d 抗压强度	CBDA	A ₄ B ₄ C ₁ D ₄
7 d 抗压强度	CDBA	A ₁ B ₄ C ₁ D ₄
14 d 抗压强度	CDBA	A ₁ B ₄ C ₁ D ₃
28 d 抗压强度	CDBA	A ₁ B ₄ C ₁ D ₃

从表 17 可以看出,B 因素(纳米 SiO₂ 掺量)的最优水平为 B₄,C 因素(可再分散乳胶粉掺量)的最优水平为 C₁;而 A 因素(再生微粉取代率)和 D 因素(Ca(OH)₂ 碱激发剂掺量)则需要综合考虑对试验指标的主次影响顺序来确定最优水平,由于抗折、抗压强度是再生微粉砂浆最主要的指标,因此对其进行定量分析确定最优水平,最终得到试验的最优配合比。

对于 A 因素:当选择 A₁ 时,3 d 抗折强度比 A₃、A₄ 分别低 25.93%、23.10%(不利);7 d 抗折强度比 A₃、A₄ 分别高 18.37%、7.40%(有利);14 d 抗折强度比 A₃、A₄ 分别高 5.41%(有利)和低 7.10%(不利);28 d 抗折强度比 A₃、A₄ 分别高 14.77%、7.40%(有利);3 d 抗压强度比 A₃、A₄ 分别低 9.23%、10.61%(不利);7 d 抗压强度比 A₃、A₄ 分别高 18.18%、6.29%(有利);14 d 抗压强度比 A₃、A₄ 分别高 9.55%、2.55%(有利);28 d 抗压强度比 A₃、A₄ 分别高 17.31%、13.31%(有利)。

当选择 A₃ 时,3 d 抗折强度比 A₁、A₄ 分别高 35.00%、3.85%(有利);7 d 抗折强度比 A₁、A₄ 分别低 15.50%、9.26%(不利);14 d 抗折强度比 A₁、A₄ 分别低 5.10%、11.90%(不利);28 d 抗折强度比 A₁、A₄ 分别低 12.90%、6.38%(不利);3 d 抗压强度比 A₁、A₄ 分别高 10.20%(有利)和低 1.52%(不利);7 d 抗压强度比 A₁、A₄ 分别低 15.40%、10.06%(不利);14 d 抗压强度比 A₁、A₄ 分别低 8.70%、6.38%(不利);28 d 抗压强度比 A₁、A₄ 分别低 14.80%、3.41%(不利)。

当选择 A₄ 时,3 d 抗折强度比 A₁、A₃ 分别高 30.00%(有利)和低 3.70%(不利);7 d 抗折强度比 A₁、A₃ 分别低 6.90%(不利)和高 10.20%(有利);14 d 抗折强度比 A₁、A₃ 分别高 7.69%、13.51%(有利);28 d 抗压强度比 A₁、A₃ 分别低 6.93%(不利)和高 6.82%(有利);3 d 抗压强度比 A₁、A₃ 分别高 11.86%、1.54%(有利);7 d 抗压强度比 A₁、A₃ 分别低 5.92%(不利)和高 11.19%(有利);14 d 抗压强度比 A₁、A₃ 分别低 2.49%(不利)和高 6.82%(有利);28 d 抗压强度比 A₁、A₃ 分别低 11.75%(不利)和高 3.53%(有利)。

综上所述,显然 A₄ 是更好的选择,详见表 18。

表 18 A 因素综合平衡			
A 因素水平	有利/%	不利/%	综合/%
A ₁	120.59	75.98	44.61
A ₃	49.02	121.30	-72.28
A ₄	103.17	37.68	65.49

对于 D 因素:当选择 D₂ 时,3 d 抗折强度比 D₃、D₄ 分别高 4.17%、4.20%(有利);7 d 抗折强度比 D₃、D₄ 分别低 10.53%、13.60%(不利);14 d 抗折强度比 D₃、D₄ 分别低 11.76%、6.3%(不利);28 d 抗折强度比 D₃、D₄ 分别低 14.56%、12.00%(不利);3 d 抗压强度比 D₃、D₄ 分别低 6.25%、14.30%(不利);7 d 抗压强度比 D₃、D₄ 分别低 8.88%、14.90%(不利);14 d 抗压强度比 D₃、D₄ 分别低 12.06%、3.00%(不利);28 d 抗压强度比 D₃、D₄ 分别低 10.70%、6.70%(不利)。

当选择 D₃ 时,3 d 抗折强度比 D₂ 低 4.00%(不利),与 D₄ 一致;7 d 抗折强度比 D₂、D₄ 分别高 11.80%(有利)和低 3.39%(不利);14 d 抗折强度比 D₂、D₄ 分别高 13.30%、6.25%(有利);28 d 抗折强度比 D₂、D₄ 分别高 17.00%、3.00%(有利);3 d 抗压强度比 D₂、D₄ 分别高 6.70%(有利)和低 8.57%(不利);7 d 抗压强度比 D₂、D₄ 分别高 9.70%(有利)和低 6.63%(不利);14 d 抗压强度比 D₂、D₄ 分别高 13.70%、10.30%(有利);28 d 抗压强度比 D₂、D₄ 分别高 12.00%、4.47%(有利)。

当选择 D₄ 时,3 d 抗折强度比 D₂ 低 4.00%(不利),与 D₃ 一致;7 d 抗折强度比 D₂、D₃ 分别高 15.69%、3.51%(有利);14 d 抗折强度比 D₂、D₃ 分别高 6.67%(有利)和低 5.88%(不利);28 d 抗折强度比 D₂、D₃ 分别高 13.64%(有利)和低 2.91%(不利);3 d 抗压强度比 D₂、D₃ 分别高 16.67%、9.38%(有利);7 d 抗压强度比 D₂、D₃ 分别高 17.53%、7.10%(有利);14 d 抗压强度比 D₂、D₃ 分别高 3.10%(有利)和低 9.34%(不利);28 d 抗压强度比 D₂、D₃ 分别高 7.19%(有利)和低 4.28%(不利)。

综上所述,D₃ 比 D₂、D₄ 更有利,详见表 19。

表 19 D 因素综合平衡			
D 因素水平	有利/%	不利/%	综合/%
D ₂	8.33	145.47	-137.14
D ₃	108.28	22.59	85.69
D ₄	100.46	26.41	74.05

综上所述,为了确保再生微粉砂浆的强度,最终将再生微粉砂浆的最优配合比确定为 A₄B₄C₁D₃,即再生微粉取代率为 15.00%,纳米 SiO₂ 掺量为 2.00%,可再分散乳胶粉掺量 2.00%,Ca(OH)₂ 碱性激发剂掺量为 4.00%。

4 结 论

本文采用正交试验法,制备了不同掺量再生微粉、纳米 SiO_2 、可再分散乳胶粉和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂的 16 组再生微粉砂浆试样,测定其稠度、保水率、拆模密度和不同龄期的抗折和抗压强度,并对试验数据进行极差分析、因素指标分析和方差分析,经综合考虑确定最优配合比。主要结论如下:

a) 最优配合比为再生微粉取代率为 15.00%, 纳米 SiO_2 掺量为 2.00%,可再分散乳胶粉掺量为 2.00%, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量为 4.00%,此时抗压强度在 14 d 接近 10 MPa(即 M10 砂浆强度标准),28 d 抗压强度达 11.3 MPa,符合强度标准。

b) 极差分析结果表明, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量是影响稠度的最主要因素,可再分散乳胶粉掺量的影响次之;可再分散乳胶粉掺量是影响拆模密度的最主要因素, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量的影响次之; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量是影响保水率的最主要因素,纳米 SiO_2 掺量的影响次之;可再分散乳胶粉掺量是影响各龄期抗折、抗压强度的最主要因素。

c) 方差分析结果表明,对稠度影响最显著的是可再分散乳胶粉掺量和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量;对拆模密度均无显著影响;对保水率影响最显著的是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂掺量;对各龄期抗折及抗压强度影响最显著的是可再分散乳胶粉掺量。

d) 可再分散乳胶粉对再生微粉砂浆强度具有一定的劣化作用,随着可再分散乳胶粉掺量的增加,再生微粉砂浆的抗折和抗压强度均下降;相对地,掺入适量的纳米 SiO_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂可以提升再生微粉砂浆的抗折及抗压强度。

本文的再生微粉砂浆制备采用 4 种材料取代水泥,其性能在一定程度上得到改善,在利用建筑垃圾再生微粉的同时,减少了水泥用量和碳排放,研究结果可为再生微粉的资源化利用提供参考,也为再生微粉砂浆的实际应用奠定基础,具有环境效益。未来可对其耐久性能进行系统研究,以全面验证其在多样化环境条件下的性能表现,并进一步探索其在实际工程中的潜在应用。此外,对于不同等级的再生微粉砂浆,可以通过调整水泥型号、水胶比及胶砂比,还可以参考本文的最优配合比以满足不同等级强度标准。对于高于 M10 等级的再生微粉砂浆,可以采用更高等级的水泥(如 P·O 42.5)及更适合的外加剂等。

参考文献:

- [1] 詹良通,郭淇萌,吴林波,等. 城市工程渣土消纳处置及资源化利用途径探讨:以温州市为例[J]. 环境卫生工程,2021,29(2):1-9.
- [2] 邢晓飞,苏彩丽. 再生微粉对砂浆性能的影响研究[J]. 砖瓦,2023(5):16-18.
- [3] 董云,张国瀛,李伟华,等. 城市垃圾焚烧底渣再生微粉强度特性的实验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):174-180.
- [4] Chen X, Li Y, Kang X, et al. Study on recycled concrete powders as mineral admixture in recycled concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 330(2): 022113.
- [5] Ayzenshtadt A M, Drozdyuk T A, Danilov V E, et al. Surface activity of concrete waste powders[J]. Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal, 2021, 13(2): 108-116.
- [6] Li S, Gao J, Li Q, et al. Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 120976.
- [7] 高敏,郭启龙,杜磊,等. 再生微粉对干混砂浆性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(8):2851-2859.
- [8] Gao Y, Cui X, Lu N, et al. Effect of recycled powders on the mechanical properties and durability of fully recycled fiber-reinforced mortar[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103574.
- [9] Li Z, Bian Y, Zhao J, et al. Recycled concrete fine powder (RFP) as cement partial replacement: Influences on the physical properties, hydration characteristics, and microstructure of blended cement[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105326.
- [10] 康晓明,李滢,樊耀虎. 不同激发方式对再生微粉性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(4):1135-1139.
- [11] 赵桂云. 混凝土再生微粉基本性能及其活化技术[D]. 徐州:中国矿业大学,2014:35-51.
- [12] 王健,马强,于剑桥,等. 纳米 SiO_2 改性聚合物水泥砂浆力学性能及干缩性能研究[J]. 混凝土,2022(12):131-135.
- [13] 蒋豪丽,刘小艳,刘力,等. 纳米二氧化硅改性再生微粉砂浆性能的研究[J]. 混凝土,2023(2):142-145.
- [14] 龚建清,郭丽,杨倩,等. 复掺纳米 SiO_2 和玻璃粉对水泥砂浆性能的影响研究[J]. 公路工程,2023,48(4):121-126.
- [15] 侯云芬,张莹,黄天勇. 可再分散乳胶粉对干混砂浆性能的影响[J]. 北京建筑大学学报,2021,37(4):1-8.
- [16] 孟利娜,梁灿丰,陈林. 再生微粉-可再分散乳胶粉复合水泥砂浆力学性能研究[J]. 混凝土,2023(2):129-130.
- [17] 汪胜,郭玉林,谭洪波,等. 不同养护方式下可再分散乳胶粉改性砂浆的性能[J]. 混凝土与水泥制品,2017(1):26-30.
- [18] 杨新宸睿,侯永利,吕东朔,等. 再生微粉和矿渣粉对再生砂浆强度及抗冻性的影响[J]. 建筑科学,2023,39(5):180-186.
- [19] 刘栋,张鹏宇,刘彤,等. 建筑垃圾中再生微粉材性表征及潜

在活性的激发[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2635-2641.

[20] 刘润清, 宋海, 杨元全, 等. 激发剂对再生混凝土微粉砂浆水化性能的影响[J]. 混凝土, 2023(12): 212-216.

[21] Yuan C, Cai Y, Gu Q, et al. Research on modified high-performance cement mortar of prefabricated buildings based on orthogonal Test [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022, 16(1): 50.

[22] Ringu A J P, Andreas E, Antoni A, et al. The impact of calcium hydroxide addition on HVFA mortar and concrete properties[J]. E3S Web of Conferences, 2023, 429: 05032.

[23] 聂宗浩, 岳雪涛, 夏芙蓉, 等. 可再分散乳胶粉对石膏基自流平砂浆性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(1): 70-73.

[24] 王小燕, 叶武平, 曹力强. 可再分散乳胶粉对钢结构界面砂浆的性能影响和机理分析[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(6): 1999-2004.

[25] Hong S, Kim W K. Properties of VA/E/MMA terpolymer powder-modified mortars[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1129: 169-176.

[26] 王志华. 可再分散乳胶粉对保温砂浆性能的影响[J]. 江西建材, 2023(10): 31-33.

[27] 鲍玖文, 张洪锐, 方晓龙, 等. 纳米二氧化硅改性再生粗骨料混凝土性能的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 2045-2053.

[28] Shi C, Day R L. Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends[J]. Advances in Cement Research, 1999, 11(4): 189-196.

[29] 石莹, 杨善顺, 连亚明. 废弃混凝土再生微粉研究现状[J]. 砖瓦, 2017(4): 47-51.

[30] 张学兵, 匡成钢, 方志, 等. 钢纤维粉煤灰再生混凝土强度正交试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 677-684.

团队介绍

张振营教授团队专注于建筑垃圾处理与资源化利用研究,致力于解决建筑垃圾占用土地资源、再生材料强度不高及资源化利用程度普遍较低等难题。团队在国家自然科学基金、浙江省科技厅重大研发项目及浙江省科技厅新产品试制计划等项目的资助下,经过 20 余年的科技攻关,提出了建筑垃圾再生骨料砌筑砂浆、物理复合微生物技术强化技术及其制备方法,揭示了建筑垃圾再生材料采用物理复合微生物技术的强化机理,研发了建筑垃圾分选破碎、废弃混凝土制砂及砂浆恒温烘干等系列成套仪器设备,制定了水淋法砌筑墙体抗渗性能现场检测与评定标准。团队发表学术论文 100 余篇,授权专利及软件著作权 30 余件,编制国家标准 1 部,形成系列工程产品 9 种,获省部级科学技术奖励 8 项,并已成功应用于 60 多项工程项目中,取得了显著的社会、环境和经济效益。

(责任编辑:康 锋)