

基于工程需求的多元胶凝体系混凝土强度调控与配比优化研究

李维维 王鑫 蒋东林 曾祥胜

浙江蓝创谷信息技术有限公司

摘要: 本文针对不同胶凝体系下的混凝土强度进行了系统研究。通过验证以 52.5 级水泥掺入不同比例粉煤灰替代 42.5 级水泥的等效性,探讨了不同外加剂及不同胶凝材料体系对混凝土强度的影响。研究表明,在水泥-粉煤灰胶凝体系中,当粉煤灰掺量为 24% 时,是兼顾工作性能与经济性的最佳生产参考掺量;在水泥-粉煤灰-矿粉复合胶凝体系中,当粉煤灰掺量为 42%~43%、矿粉掺量为 24%~28%、水胶比控制在 0.27~0.28 范围内时,混凝土强度处于理想区间。

关键词: 粉煤灰; 矿粉; 胶砂强度; 抗压强度

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.03.020

引言

混凝土的性能直接影响到工程结构的安全性、耐久性和经济性,是现代土木工程中应用最广泛的建筑材料。粉煤灰作为火力发电产生的主要工业固体废弃物,年排放量巨大,大量堆存不仅占用土地资源,还会对周边环境造成污染^[1]。因此,推动粉煤灰的科学资源化利用,实现循环经济发展与生态环境保护,已成为土木工程领域的重要研究方向。

有研究表明粉煤灰可以改善混凝土拌合物的黏聚性以及流动性,有利于提高混凝土施工过程中的工作性,对混凝土凝结时间同样具有延长作用^[2]。王辉等人研究了粉煤灰掺量对高性能自密实混凝土抗压强度的发展影响,随着粉煤灰掺量的增加,3 d/28 d 强度比值随粉煤灰掺量的增加变化不大,7 d/28 d 强度比值随粉煤灰掺量的增加有所减小,90 d/28 d 强度比值随粉煤灰掺量的增加而增加。这表明粉煤灰对自密实混凝土早期强度影响较小,对后期强度提升作用较大^[3]。在激发剂研究方面,单掺熟石灰或单掺硫酸钠等质量取代粉煤灰可提高粉煤灰混凝土 7 d、28 d、56 d 龄期的抗压强度,复掺熟石灰与硫酸钠对粉煤灰混凝土早期及后期抗压强度影响较为明显,可达到最佳激发效果^[4]。

本研究围绕多种胶凝材料作为水泥掺合料进行配比优化设计,验证 52.5 级水泥掺 24% 粉煤灰的胶砂强度与 42.5 级水泥胶砂强度的等效性,探究不同类型外加剂和多种胶凝材料对混凝土强度的影响,确定混

凝土的最优配合比。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

本次试验使用水泥采用某水泥厂生产的硅酸盐水泥 P·O 52.5 以及 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,电厂提供粉煤灰,根据相关标准选择聚羧酸系减水剂(减水率 25%~40%),砂子使用经破碎处理的镍铁砂,石子为商品骨料,粒径 5~20 mm。实验采用烘箱、胶砂搅拌机、胶砂震实台、0.9 mm 筛、电子秤(0.1 g)、量水仪、40*40*160 试模、恒温恒湿养护箱、养护水槽、抗压抗折测试机等工具及设备。具体测试方法参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》。

试验材料化学组成见表 1。

表 1 试验材料化学组成 (%)

原料成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
FMH	17.98	34.39	19.81	15.64	7.63	1.06
52.5	62.93	19.56	3.96	5.57	3.70	1.84
42.5	63.16	20.55	4.19	3.44	0.85	2.73

1.2 实验设计

本研究采用单因素实验设计,探究 52.5 级水泥与粉煤灰按比例复合替代 42.5 级水泥达到 C35 混凝土强度的可行性,确定粉煤灰的最佳掺量,实现混凝土性能与经济性的协同优化。为考察粉煤灰掺量对胶凝材料体系性能的影响,设计了 13 组胶砂试块对比试验(见表 2)。通过控制变量法,固定水胶比为 0.54,标准砂用量为 1350 g,调整 52.5 级水泥及粉煤灰的比

例以探究 0%~36% 粉煤灰掺量对胶砂强度的作用规律。试验组中，编号 1—11 为 52.5 级水泥与粉煤灰的复合体系，编号 12 为 42.5 级水泥的基准组。通过对基准组与复合体系的对比分析，综合评价替代方案的可行性。

表 2 胶砂试块配比

编号	粉煤灰	42.5 水泥	52.5 水泥	水 (g)	标准砂 (g)
1	8%	0	92%	225	1350
2	10%	0	90%	225	1350
3	12%	0	88%	225	1350
4	14%	0	84%	225	1350
5	18%	0	82%	225	1350
6	21%	0	79%	225	1350
7	24%	0	76%	225	1350
8	27%	0	73%	225	1350
9	30%	0	70%	225	1350
10	33%	0	67%	225	1350
11	36%	0	64%	225	1350
12	0	100%	0	225	1350

在胶砂试验的基础上，进一步开展了 5 组混凝土配合比试验（见表 3），以验证 52.5 级水泥 - 粉煤灰体系在实际混凝土中的应用效果。综合考虑水胶比、外加剂类型及掺量等关键因素，分析不同水泥类型与外加剂对混凝土抗压强度的影响。编号 1 及编号 2 为 42.5 级水泥基准组，分别采用泵送剂和减水剂；编号 3 至编号 5 为 52.5 级水泥 - 粉煤灰复合体系，通过调整水胶比与外加剂类型，优化混凝土的配合比设计。

本研究结果表明，粉煤灰掺量的变化对混凝土的力学性能具有较大影响，同时能为现有生产体系带来一定的经济效益。随着粉煤灰掺量的增加，混凝土的抗压强度呈现出先增大再小幅度减小的规律。为粉煤

灰在混凝土生产应用提供了数据支持。在保障生产质量的情况下进一步降低成本，在水泥熟料中掺入粉煤灰的基础上，进一步设计了矿粉复合掺加的混凝土配方，表 2 中编号 1 为实际工程生产配方，作为基准对照组，编号 2、3、4 为设计配方对照组，具体配合比如表 4 所示。

2 结果与讨论

2.1 粉煤灰掺量对胶砂试块抗压强度的影响

为深入探究粉煤灰掺量对胶砂试块抗压强度的影响，采用单因素对比实验开展本次研究。对照组胶凝材料仅使用 42.5 级硅酸盐水泥，实验组则选用 52.5 级硅酸盐水泥，分别掺入 14%、24%、27%、30% 和 36% 五个不同比例的粉煤灰。所有试件均严格按照《水泥胶砂强度检验方法》（GB/T 17671-2021）标准制备，研究 3、7 d 和 28 d 龄期的抗压强度发展规律。

14% 的粉煤灰掺量在所有的实验组中表现最佳，3 d、7 d 和 28 d 抗压强度均显著高于对照组，其中 28 d 强度达到 52.6 MPa，较基准组提升 17.9%。当掺量为 24%~30% 时胶砂试块的 28 d 强度与对照组相当，粉煤灰掺量继续提高至 36%，胶砂强度开始略有下降。实验结果表明粉煤灰掺量增加会导致试件早期强度有所降低，但随着水化反应的持续进行，不同掺量试件间的强度差距逐步缩小，24% 掺量情况下试件强度仍能保持较高水平。

从强度发展机理来看，早期龄期（3 d）粉煤灰主要发挥物理稀释效应和微集料填充作用^[5]。由于火山灰反应需要在碱性环境中进行且反应速率相对较慢，在水泥水化初期，粉煤灰颗粒尚未充分参与化学反应，其主要作用是稀释水泥熟料含量并填充体系孔隙^[6]。不过，52.5 级水泥的高水化活性在低掺量

表 3 混凝土配比

编号	粉煤灰	42.5 水泥	52.5 水泥	商品大石	商品小石	镍铁砂	水	泵送剂	减水剂
#6-1	36%	64%	0	600	495	895	140	6	0
#6-2	36%	64%	0	600	495	895	163	0	6
#6-3	24%	0	76%	600	495	895	128	5	0
#6-4	24%	0	76%	600	495	895	115	6	0
#6-5	24%	0	76%	600	495	895	133	0	6

表 4 混凝土配比

编号	42.5 水泥	52.5 水泥	粉煤灰	矿粉	铬铁大石	铬铁小石	镍铁砂	外加剂	水胶比
1	45%	-	35%	20%	410	630	960	4	30%
2	-	33%	43%	24%	410	630	960	4	27%
3	-	33%	41%	27%	410	630	960	4	27%
4	-	28%	43%	28%	410	630	960	4	27%

(14%)时能够有效弥补这种稀释效应带来的强度损失。随着龄期的延长,水泥水化产生的氢氧化钙为粉煤灰的火山灰反应提供了充足的碱性环境,粉煤灰中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 与氢氧化钙发生二次水化反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)凝胶。这些二次水化产物不断填充胶凝体系中的孔隙,优化了微观结构,从而使得后期强度持续增长。

综合实验结果与机理分析可以得出以下重要结论:在14%~30%的掺量范围内,52.5级水泥掺加粉煤灰的胶砂试块28d抗压强度能够达到或超过42.5级水泥对照组水平。其中,14%为最佳掺量,各龄期强度均表现出显著优势;24%~30%掺量具有较好的技术经济性,可在实际工程中推广应用;36%高掺量虽然28d强度与对照组相当,但早期强度降低明显,工程应用时需采取相应的早期强度保障措施。

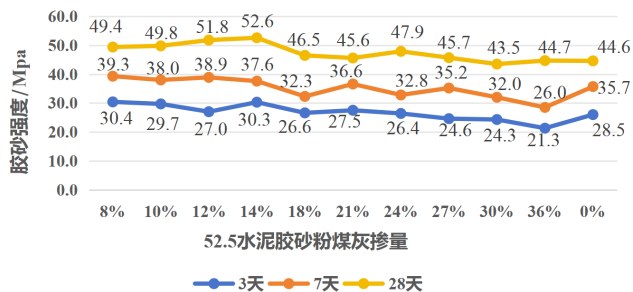


图1 胶砂试块抗压强度

2.2 水泥-粉煤灰复合胶凝材料体系优化及其对混凝土抗压强度的影响

综合考虑实际工程应用需求及经济因素,本研究选取粉煤灰掺量24%作为混凝土配方优化方向,在此条件下对外加剂种类、掺量及原生产配方等因素开展对比研究,系统分析各因素对混凝土力学性能的影响规律。

抗压强度试验数据显示搅拌站原配方28d抗压强度最高,达到63.7 MPa。#6-3配方早期强度较其他组别低但后期强度增长较为明显,#6-4配方减水效果最佳,3d强度达到34.4 MPa,对照组#6-4和#6-5的早强和后期强度发展较好,28d抗压强度分别为55.6 MPa和54.9 MPa。说明外加剂类型及用水量变化均会对混凝土强度发展产生一定的影响。

试验过程中发现,采用泵送剂的配方具有较好的可泵性,拌合物粘聚性和保水性表现稳定,采用减水剂的配方流动性有所提高但出现了轻微的泌水现象,实际应用时需结合施工条件进一步验证配方的适用性。从强度来看,配方#6-4和#6-5均超出C35强度且有

较多富裕,证明通过外加剂复配能够兼顾混凝土性能和经济性。综合考虑胶凝材料有效成分以及配方稳定性,拟选用#6-4作为后续工程应用的优选方案。

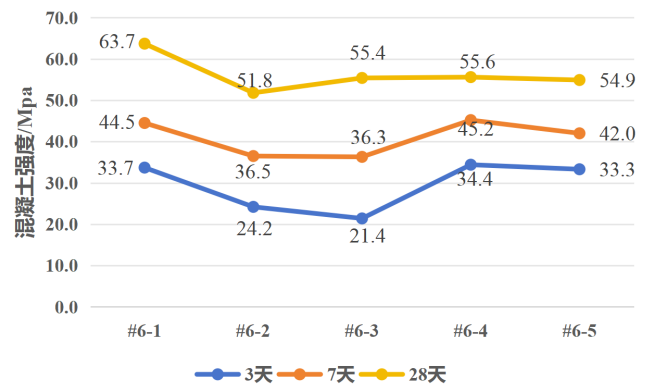


图2 二组分混凝土抗压强度

2.3 水泥-粉煤灰-矿粉复合胶凝材料体系优化及其对混凝土抗压强度的影响

混凝土抗压强度试验依据GB/T 50081-2019标准进行,测试了3d、7d及28d龄期的强度。图3的结果表明,所有配方的强度均随龄期增长,但发展规律不同。3d强度以编号3配方最高,达43.7 MPa,较37.1 MPa的基准组高出17.8%。7d时基准组强度为60.9 MPa,保持较高的强度水平。至28d龄期,优化配方组强度实现反超,其中编号4配方达到78.5 MPa,编号2为77.2 MPa,均高于基准组的75.3 MPa,表明复合胶凝体系后期发展潜力良好。

水泥强度等级对混凝土强度发展的影响具有阶段性特征。早期龄期下,采用42.5级水泥的基准组强度较高,这与其较快的水化反应速率有关,随着龄期增长,52.5级水泥配方的强度增幅更为明显。粉煤灰掺量在35%~43%范围内时,随着掺量增加,早期强度呈下降趋势,但后期强度增长有所改善。当掺量达到42%~43%时,28d抗压强度均高于基准组。矿粉掺量为20%~34%时,适当提高掺量有利于早期强度发展,但当掺量增加至34%时,后期强度增长受到一定影响,其中24%~28%掺量区间表现出较好的综合强度发展特征。在本试验条件下,水胶比由0.30降至0.27后,混凝土强度明显提高,但工作性能有所降低,因此实际应用中需结合工作性要求进行综合考虑。

综上所述,建议采用52.5级水泥,控制粉煤灰掺量42%~43%、矿粉掺量24%~28%、水胶比0.27~0.28,以实现混凝土强度的均衡发展。该三元复合体系能协同发挥水泥与矿粉的早期水化作用及粉煤灰的后期火山灰效应,从而在力学性能与工作性能之间取得良好

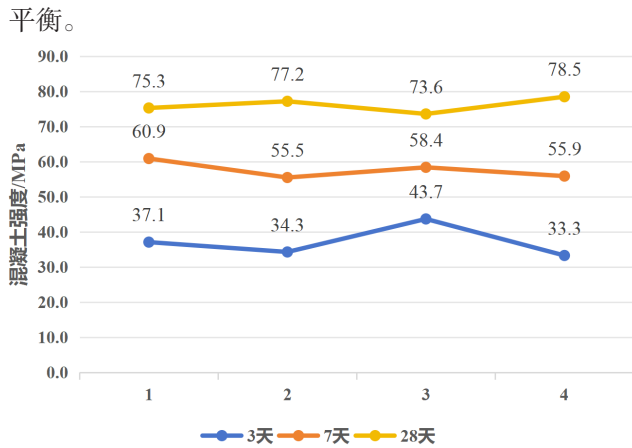


图3 三组分混凝土抗压强度

3 结论

本研究对不同胶凝材料体系的力学性能进行了分析。胶砂试验结果表明,粉煤灰掺量为14%时强度提升效果最为明显,28 d抗压强度较对照组提高约17.9%。当掺量为24%~30%时,28 d强度基本保持稳定,并具有一定成本优势,掺量增至36%后,早期强度明显下降。总体来看,适量掺加粉煤灰不会对后期强度产生明显不利影响,其后期活性能够在一定程度上弥补早期强度损失。在此基础上,通过对外加剂用量进行调整,在保证强度满足要求的前提下,实现降低生产成本的目的,并在一定程度上改善了拌合物的工作性能。

引入矿粉后形成复合胶凝材料体系。试验结果表明,当粉煤灰掺量为42%~43%、矿粉掺量为

24%~28%、水胶比为0.27~0.28时,混凝土表现出较好的后期强度发展能力。在该配比条件下,水泥和矿粉对早期强度形成起主要作用,粉煤灰则在后期持续参与反应,对强度增长具有一定贡献。综合试验结果可知,通过调整粉煤灰、矿粉及水泥的配合比例,可在保证力学性能的基础上兼顾工作性能和材料成本。其中,粉煤灰掺量42%~43%、矿粉掺量24%~28%的复合胶凝材料体系表现出较好的综合性能。

参考文献:

- [1] 崔红梅,柯灵非,阚连宝,等.粉煤灰合成沸石应用于污水土地处理系统[J].科学技术与工程,2011,11(25):6242-6244.
- [2] 傅园园.不同粉煤灰掺量对混凝土性能的影响试验[J].广东建材,2025,41(6):36-39.
- [3] 王辉,刘旭辉,蔡升宇,等.粉煤灰掺量对高性能自密实混凝土抗压强度发展影响分析[J].硅酸盐通报,2021,40(5):1573-1578.
- [4] 颜文华.激发剂影响大掺量粉煤灰混凝土抗压强度的试验研究[J].粉煤灰,2015,27(3):1-3.
- [5] 王武锁,王欢,宋心,等.超细粉煤灰对混凝土水化热及物理力学性能的影响[J].混凝土世界,2023(1):33-36.
- [6] 蒙强,邵俐,施倩芸.粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J].上海理工大学学报,2017,39(5):490-496.