

高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究

Experimental Study on Mechanical Properties of High Content Fly Ash Concrete

张兴龙

(首都医科大学附属北京中医医院, 北京 100010)

摘要: 为研究高掺量粉煤灰混凝土力学性能, 制备了掺 40%、50%、60%、70% 不同比例粉煤灰及钢纤维 0.25%、0.50%、0.75%、1% (体积分数) 的混凝土试件, 并将其置于模拟环境条件中进行试验。通过测试试件的抗压强度、劈裂抗拉强度、干燥收缩率及微观结构, 分析高掺量粉煤灰混凝土的力学性能。结果表明: 当粉煤灰掺量在 40%~50% 时, 混凝土抗压强度下降最为明显; 当钢纤维体积分数掺量为 1% 时, 劈裂抗拉强度较未掺钢纤维混凝土增长 24.4%, 抗折强度达到最大值 6.2 MPa, 较原始强度提高了 29.2%; 混凝土的干燥收缩率随着粉煤灰掺量的增加呈现出先降低后升高的趋势, 当掺量增加至 70% 时, 收缩率较基准混凝土降低了 12.22%, 同时混凝土的孔隙率略有回升, 约为 8%; 适当比例的粉煤灰和钢纤维掺入能够显著提升混凝土的抗拉强度、抗折强度, 并优化其干燥收缩性能和孔隙结构, 增强混凝土的力学性和致密性。

关键词: 高掺量; 粉煤灰; 混凝土; 钢纤维; 力学性能

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0049-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.009

ZHANG Xinglong

(Beijing Hospital of Traditional Chinese Medicine, Capital Medical University, Beijing 100010, China)

Abstract: To study the mechanical properties of high content fly ash concrete, concrete specimens containing different proportions of fly ash (40%, 50%, 60%, 70%) and steel fibers (volume fractions of 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1%) were prepared and tested under simulated environmental conditions. Analyze the mechanical properties of high content fly ash concrete by testing the compressive strength, splitting tensile strength, drying shrinkage rate, and microstructure of the specimens. The results show that the compressive strength of concrete decreases most significantly when the fly ash content is between 40% and 50%; When the volume fraction of steel fibers increases to 1%, the splitting tensile strength has increased by 24.4% compared with that of the concrete without steel fibers, and the maximum flexural strength reaches 6.2 MPa, an increase of 29.2% compared to the original strength; The drying shrinkage rate of concrete shows a trend of first decreasing and then increasing with the increase of fly ash content. When the content increases to 70%, the shrinkage rate decreases by 12.22% compared to the benchmark concrete, and the porosity of the concrete slightly increases to about 8%. It can be concluded that the appropriate proportion of fly ash and steel fibers can significantly improve the tensile strength and flexural strength of concrete, optimize its drying shrinkage performance and pore structure, thereby enhancing the mechanical properties and compactness of concrete.

Key words: high admixture; fly ash; concrete; steel fiber; mechanical properties

0 引言

高性能混凝土因其高强度、高力学性和高可靠性,在桥梁、隧道、高层建筑及医院等公共建筑得到广泛应用。粉煤灰作为燃煤电厂废弃物,通过与混凝土融合,能有效降低水化热,优化孔隙结构,提高结构稳定性^[1-2],同时实现废弃物再利用,减轻环境污染,推动绿色建筑发展。高掺量粉煤灰混凝土作为一种新型高性能混凝土,能显著提升混凝土的力学性能^[3]。

近年来相关学者对粉煤灰混凝土进行了大量的研究,取得了一些成果。翟思敏等^[4]通过湿法粉磨处理Ⅰ级粉煤灰,制备出不同取代率的再生混凝土,发现粉煤灰取代率为45%时,混凝土的抗压强度达到最大,且干缩率最低。孙堃隆^[5]在固定水胶比和总掺量条件下,通过调整矿粉与粉煤灰的掺配比例,结合温度养护,能够显著提升水工混凝土的强度和抗侵蚀能力。肖荣照等^[6]探讨了单掺粉煤灰、单掺矿粉及复掺对自密实混凝土硬化及耐久性能的影响,结果显示,掺入适量粉煤灰或矿粉可改善自密实混凝土的流动性,且对强度、自收缩和抗碳化性能有不同影响,其中复掺粉煤灰与矿粉在矿物掺量为40%时能平衡各项性能,解决泌水问题。王建峰^[7]分析了不同养护龄期及粉煤灰掺量对大坝混凝土各项性能的影响,指出抗压强度、抗拉强度与养护龄期正相关,而与粉煤灰掺量先正后反的关系。戚丹等^[8]采取粉煤灰与纳米二氧化硅复合掺入,提升混凝土试件的耐久性能。秦哲焕等^[9]制备了粉煤灰-矿粉超细复合型矿物掺合料,研究其在15%、25%、35%掺量下对混凝土力学性能和耐久性能的影响,结果显示,掺入HP-UA能提升混凝土多项性能,包括力学、抗收缩、抗水及氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀性。陈辉等^[10]通过在粉煤灰混凝土中添加石墨烯,发现0.05%质量分数的石墨烯能显著提高混凝土的力学性能、耐久性和耐磨性能,同时加速水化反应进程,优化混凝土结构致密性。许建华等^[11]研

究了不同掺量的Ⅱ级粉煤灰与S75级矿粉复合掺合料对核工程混凝土性能的影响,并与单掺和复掺Ⅰ级粉煤灰与S95级矿粉的混凝土进行了对比,结果发现,相同掺量下,复合掺合料混凝土的工作性、力学性能和耐久性均表现更优。孙培华等^[12]制备了不同混杂纤维掺量的粉煤灰轻骨料混凝土,结果发现当聚丙烯和纤维素纤维总体积掺量约为0.15%时,力学性能最佳。吴群威等^[13]制备了不同粉煤灰掺量的混杂纤维混凝土,分析了混凝土力学与耐久性能随粉煤灰掺量的变化规律,结果表明,掺入粉煤灰的混杂纤维混凝土的抗冻性能要略优于素混杂纤维混凝土。王志伟^[14]制备了不同纳米SiO₂掺量的粉煤灰陶粒混凝土试件,测试其力学与耐久性能,结果显示,随着纳米SiO₂掺量的增加,粉煤灰陶粒混凝土的力学性能呈现先增后减趋势,抗氯离子渗透性能和抗冻性能显著提升,且掺入1.5%~3.0%的纳米SiO₂在性价比上最优。

鉴于当前研究主要集中在混凝土耐久性测试方面,而对于混凝土力学性能的研究相对较少,因此,为了更全面地了解并评估高掺量粉煤灰混凝土的力学性能,制备掺有40%~70%粉煤灰和0.25%~1.00%钢纤维的混凝土试件,在模拟医院环境条件下进行了力学性能试验,通过测试抗压强度、劈裂抗拉强度、干燥收缩率以及观测微观结构来评估其力学性能。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试验用水泥为P·O 42.5,比表面积为35 m²/kg,技术性能指标见表1;粉煤灰含水率为0.18%,28 d活性指数为78.15%,具体化学成分见表2;选用粒径范围在5~20 mm之间的粗骨料以及细度模数为2.8的细骨料作为辅助骨料。二者的吸水率均在1.0%左右,且具有较低的破碎率,能够有效满足建筑对于混凝土力学性能要求;选用波纹型钢纤维作为增强材料,其具体性能参数见表3。

表1 水泥性能指标
Table 1 Performance indicators of cement

凝结时间 /min	抗压强度/MPa			抗折强度 /MPa	安定性	细度(筛余百分率)/%	烧失量 /%	三氧化硫 含量/%	氧化镁 含量/%	氯离子 含量/%
	3 d	7 d	28 d							
150~360	20.0	35.0	42.5	6.5	合格(无膨胀、无裂纹)	1.00	3.00	2.50	4.00	0.01

表 2 粉煤灰化学成分											
Table 2 Chemical composition of fly ash											/%
含水率	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量
0.18	52.34	26.87	8.12	4.56	1.98	1.23	0.89	1.1	0.76	0.34	4.52

表 3 波纹型钢纤维性能参数								
Table 3 Performance parameters of corrugated steel fiber								
长度 /mm	直径 /mm	长径 比	抗拉 强度 /MPa	弹性 模量 /GPa	断裂延 伸率/%	与混凝 土黏结 力/MPa	耐腐蚀 性/级	密度/ (g/cm ³)
30	0.5	60	1 000	200	5	2.5	A	7.8

采用聚羧酸类减水剂，其固体成分占比 30%，pH 值在 7.0~8.5，减水剂掺量为混凝土总质量的 0.8%；设定粉煤灰掺量为 40%、50%、60%、70%，并掺入体积分数在 0.25%~1% 钢纤维作为增强材料。混凝土试件配合比见表 4。

表 4 试件配合比								
Table 4 Mix ratio of specimens								
试件 编号	粉煤灰 /%	钢纤维 /%	原材料/(kg/m ³)					
			水泥	粉煤灰	减水剂	钢纤维	碎石	砂
1	40	0.25	300	400	6.0	3.75	800	600
2	40	0.50	300	400	6.0	7.50	800	600
3	40	0.75	300	400	6.0	11.25	800	600
4	40	1	300	400	6.0	15.00	800	600
5	50	0.25	280	500	5.6	3.75	750	562.5
6	50	0.50	280	500	5.6	7.50	750	562.5
7	50	0.75	280	500	5.6	11.25	750	562.5
8	50	1	280	500	5.6	15.00	750	562.5
9	60	0.25	260	600	5.2	3.75	700	525
10	60	0.50	260	600	5.2	7.50	700	525
11	60	0.75	260	600	5.2	11.25	700	525
12	60	1	260	600	5.2	15.00	700	525
13	70	0.25	240	700	4.8	3.75	650	487.5
14	70	0.50	240	700	4.8	7.50	650	487.5
15	70	0.75	240	700	4.8	11.25	650	487.5
16	70	1	240	700	4.8	15.00	650	487.5

1.2 试件制备

按照配比将原材料置于 HJ-60 型混凝土搅拌机中，进行 2 min 的干拌处理。加入适量的水和减水剂，继续湿拌 3 min。在湿拌阶段，需缓慢掺入钢纤维，并保持搅拌 2 min 以确保均匀混合。之后，将充分拌和的混凝土倒入规格为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体模具内，随即放置在 ZT-50 型混凝土振动台上进行振动，直至混凝土密实。对试件表面进行精细刮抹，以达到平整效果。将试件置于设定温度为 20℃ 的养护箱中养护，待到龄期进行试验。

1.3 试验方法

(1) 基本力学性能测试 根据 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》，采用 WDW-300 型万能试验机对试件进行抗压强度、劈裂抗拉强度测试。

(2) 干燥收缩测试 将试件底面架空置于 GS-100 型干缩仪上，确保试件在干燥过程中能够自由收缩。按照预定的测试龄期（7、14、28、60 d）养护，在每个龄期结束时测量试件的当前长度。

(3) 微观分析测试 将试件切割为 10 mm×10 mm×5 mm 的混凝土试件，并进行 SEM 扫描。观察并记录混凝土中的微观结构特征。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

2.1.1 抗压强度

不同粉煤灰掺量不同龄期混凝土抗压强度变化如图 1 所示。在同一龄期条件下，粉煤灰掺量较低的试件呈现出更高的抗压能力。此外，随着龄期的不断延长，各粉煤灰掺量的混凝土抗压强度均呈现出不同程度的降低趋势。其中，当粉煤灰掺量为 40%、50% 时，混凝土试件抗压强度下降最为明显，28 d 抗压强度降幅为 8.5%；当粉煤灰掺量为 60%、70% 时，28 d 抗压强度降幅为 6.15%。

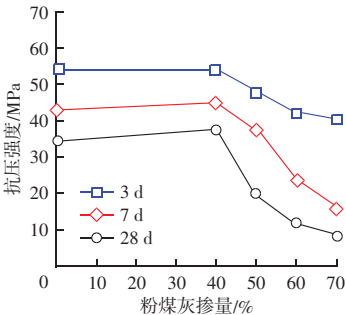


图 1 混凝土抗压强度变化
Fig. 1 Changes in compressive strength of concrete

2.1.2 劈裂抗拉强度与抗折强度

不同钢纤维体积分数下，混凝土试件的劈裂抗拉强度以及抗折强度变化情况见表 5。

材料科学

表 5 不同钢纤维体积分数下混凝土
劈裂抗拉强度与抗折强度变化情况

Table 5 Changes in splitting tensile strength and flexural strength of concrete under different volume fractions of steel fibers

钢纤维体积 分数/%	劈裂抗拉强度		抗折强度	
	强度/MPa	增长幅度/%	强度/MPa	增长幅度/%
	35.2		4.8	
0.25	37.6	6.8	5.1	6.3
0.50	39.1	11.1	5.4	12.5
0.75	40.5	15.1	5.7	18.8
1.00	43.8	24.4	6.2	29.2

从表 5 中可以看出，在劈裂抗拉强度方面，随着钢纤维体积分数的增加，混凝土劈裂抗拉强度呈现出明显的上升趋势。当钢纤维从未掺至掺入 1% 时，劈裂抗拉强度从 35.2 MPa 增长至 43.8 MPa，增长幅度高达 24.4%。在钢纤维掺量介于 0.50% 至 1% 的区间内，劈裂抗拉强度的增长尤为显著，从 39.1 MPa 提升至 43.8 MPa，增加了 4.7 MPa。这一数据充分证明了掺入钢纤维显著提高混凝土劈裂抗拉强度。

在抗折强度方面，随着钢纤维体积分数的增加，混凝土抗折强度同样呈现出上升趋势。当钢纤维掺量达到 1% 时，抗折强度达到最大值 6.2 MPa，相较于未掺钢纤维的混凝土，其抗折强度提高了 29.2%。然而，值得注意的是，在钢纤维掺量较低（0.25%~0.75%）时，虽然抗折强度也有所增加，但增长幅度相对较小，从 5.1 MPa 提高至 5.7 MPa，仅增长了 0.6 MPa。这表明在钢纤维掺量较低的情况下，其对混凝土抗折强度的提升作用相对有限。但随着钢纤维掺量的进一步增加，其对混凝土抗折强度的提升效果逐渐变得显著。

2.2 干燥收缩

不同粉煤灰掺量混凝土干燥收缩率如图 2 所示。随着粉煤灰掺量的增加，粉煤灰混凝土干燥收缩表现出先减后增的趋势。当粉煤灰掺量为 40% 时，相较于基准组，其干燥收缩率下降了 11.11%，表明掺入适当的粉煤灰能够抑制混凝土的干燥收缩。当粉煤灰掺量为 50% 和 60% 时，干燥收缩率分别降低了 15.56% 和 18.89%；当掺量为 70% 时，干燥收缩率出现回升，其下降速度变慢，相较于基准组降低了 12.22%。这一现象可能是粉煤灰掺量过大减缓了混凝土的水化反应速率，导致水化产物生成量不足，无法充分填充混凝土内部的孔隙结构。

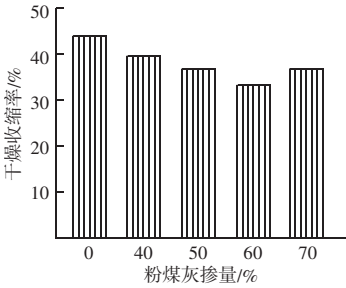


图 2 混凝土干燥收缩率
Fig. 2 Drying shrinkage of concrete

2.3 微观分析

不同粉煤灰掺量混凝土的 SEM 扫描结果如图 3 所示。在 500 倍放大倍数下，40% 粉煤灰掺量的混凝土孔隙数量明显减少，孔隙率降到约 9%，孔隙形态更加规则，且孔隙间的连通性减弱；60% 粉煤灰掺量，混凝土孔隙率稳定在约 7% 左右；当粉煤灰掺量增加至 70% 时，混凝土孔隙率略有回升，约为 8%。这可能是由于过高的粉煤灰掺量导致混凝土内部水化反应不充分，孔隙结构略有恶化。

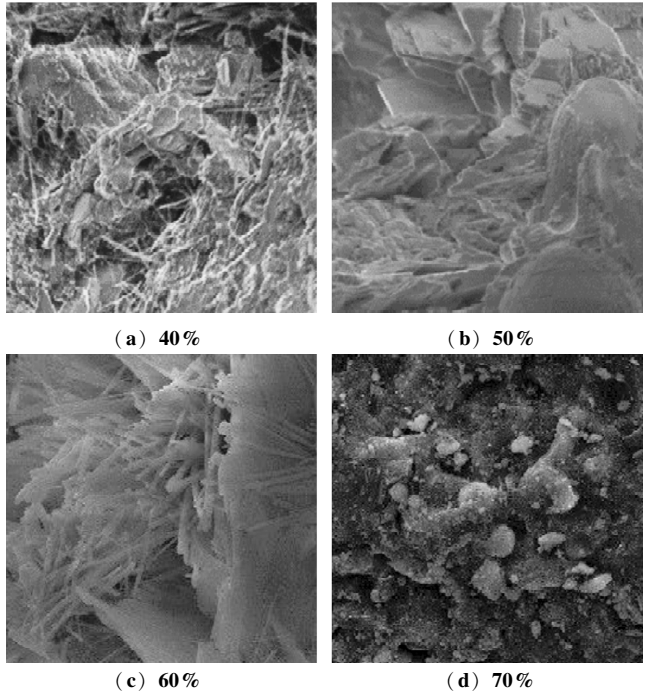


图 3 不同粉煤灰掺量混凝土 SEM 扫描结果
Fig. 3 SEM scanning results of concretes with different fly-ash contents

3 结论

通过对不同掺量粉煤灰混凝土力学性能进行测试，得到以下主要结论：

(1) 高掺量粉煤灰混凝土的抗压强度随粉煤灰

比例的提升而呈现下降趋势，特别是在 40%~50% 掺量区间内，强度降幅最大。

(2) 通过添加钢纤维，混凝土劈裂抗拉强度和抗折强度均得到显著提升。当钢纤维掺量达到 1.00% 时，劈裂抗拉强度增长了 24.4%，抗折强度达到 6.2 MPa，相比未掺钢纤维的混凝土，强度提高了 29.2%。

(3) 粉煤灰的掺入对混凝土干燥收缩性能具有显著影响。在适量掺量（不超过 60%）下，混凝土的干燥收缩率得到明显降低。

(4) 粉煤灰的掺入在一定程度上改善了混凝土的孔隙结构，降低了孔隙率，从而提升了混凝土的致密性。然而，过高的粉煤灰掺量可能导致孔隙率回升，因此，在追求高性能混凝土时，需要平衡粉煤灰掺量与孔隙结构之间的关系。

参 考 文 献

- [1] 秦慧敏. 粉煤灰-矿粉复合再生混凝土力学性能及耐久性能试验研究[J]. 江西建材, 2024 (9): 33-35.
- [2] 吴亚敏, 段君峰, 张莉, 等. 多壁碳纳米管对粉煤灰混凝土的力学和耐久性能的影响[J]. 功能材料, 2024, 55 (9): 9229-9236.
- [3] 张丹. 侵蚀性二氧化碳作用下粉煤灰混凝土的力学与耐久性能分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 88-92.
- [4] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55 (4): 4121-4126.
- [5] 孙壁隆. 大体积水工混凝土抗压强度及耐久性能影响研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52 (3): 41-43.
- [6] 肖荣照. 粉煤灰、矿粉对自密实混凝土硬化性能及耐久性能的影响[J]. 江苏建材, 2023 (5): 38-41.
- [7] 王建峰. 粉煤灰对大坝混凝土力学性能试验及耐久性研究[J]. 广东建材, 2023, 39 (10): 18-19, 73.
- [8] 戚丹, 马琳, 赵珍. 复掺粉煤灰和纳米二氧化硅对混凝土耐久性的影响[J]. 化学与粘合, 2023, 45 (5): 427-431.
- [9] 秦哲焕, 周志刚, 朱国军, 等. 粉煤灰-矿粉超细复合型矿物掺合料对混凝土耐久性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 66-69, 79.
- [10] 陈辉, 陈芳芳. 石墨烯增韧粉煤灰混凝土的制备及耐久性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54 (5): 5198-5203.
- [11] 许建华, 杜国伟, 刘向坤, 等. 粉煤灰-矿粉复合掺合料对核工程混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023 (7): 90-94.
- [12] 孙培华, 许天航. 混杂纤维粉煤灰轻骨料混凝土力学与耐久性能试验研究[J]. 化学与粘合, 2023, 45 (2): 101-104, 123.
- [13] 吴群威, 赵娣. 粉煤灰对混杂纤维混凝土力学与耐久性能的影响分析[J]. 当代化工, 2023, 52 (2): 273-276.
- [14] 王志伟. 纳米 SiO₂ 对粉煤灰陶粒混凝土的力学与耐久性能的影响分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 32-35, 116.

E-mail: fmhzhly@163.com