

蒸养条件下超掺粉煤灰混凝土强度与机理研究

Study on Strength and Mechanism of Super blended Fly Ash Concrete under Steam curing Conditions

徐俊鹏¹, 赵天奇¹, 赵睿¹, 韩春¹, 梁鹏¹, 赵辉川¹, 张维国²

(1. 中国二十二冶集团有限公司, 唐山 064000;
2. 武夷学院 土木工程与建筑学院, 武夷山 354300)

摘要: 为了对高温蒸养条件下的大掺量工业固废混凝土性能变化有进一步的了解, 采用宏观试验、X 射线衍射 (XRD)、和扫描电子显微镜 (SEM) 相结合的方法对粉煤灰超量取代法制备的 C30 混凝土性能和增强机理进行了研究分析。结果表明: 粉煤灰超量单掺时, 在取代率为 20%, 超量系数为 1.6 时, 脱模强度达到最大 20.8 MPa, 在取代率为 25%, 超量系数为 1.4 时, 28 d 强度达到最大 42.8 MPa。在粉煤灰取代率和超量系数分别为 25% 和 1.6, 硅灰内掺 5% 时, 双掺硅灰和粉煤灰的成本及强度等综合性能达到最佳, 同时外加剂用量也仅为 1.3%。在微观定性与定量分析中, 双掺硅灰和粉煤灰的 CH 含量最少, 胶凝性水化产物 C-S-H 的衍射强度最好, 微观结构也更加致密。

关键词: 土木工程; 高温蒸养; 超量取代法; 宏观力学; 增强机理

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 01-0049-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.010

XU Junpeng¹, ZHAO Tianqi¹, ZHAO Rui¹, HAN Chun¹, LIANG Peng¹,
ZHAO Huichuan¹, ZHANG Weiguo²

(1. China MCC22 Group Co., Ltd., Tangshan 064000, China; 2. School of Civil
Engineering and Architecture, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: In order to further understand the performance changes of high content industrial solid waste concrete under high-temperature steam curing conditions. The study used a combination of macroscopic experiments, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) to investigate and analyze the properties and reinforcement mechanism of C30 concrete prepared by fly ash over substitution method. It was found that when fly ash was excessively added, the demolding strength reached a maximum of 20.8 MPa at a substitution rate of 20% and an excess coefficient of 1.6. At a substitution rate of 25% and an excess coefficient of 1.4, the maximum strength of 42.8 MPa was achieved at 28 days. When the substitution rate of fly ash is 25%, the excess coefficient is 1.6, and 5% of silica fume is added, the comprehensive performance of cost and strength of double blended silica fume and fly ash reaches the best, and the minimum amount of admixture is only 1.3%. In micro qualitative and quantitative analysis, the CH content of double doped silica fume and fly ash is the lowest, the diffraction intensity of cementitious hydration product C-S-H is the best, and the microstructure is also denser.

Key words: civil engineering; high temperature steam curing; excess substitution method; macromechanics; enhancement mechanism

0 引言

混凝土作为建筑领域快速发展的必备建材，随着“双碳”绿色理念的提出，其高性能低碳生态化的改性研究更是成为一种常态。从既有成果来看，固废等量取代水泥的单掺和混掺研究与应用已非常成熟^[1-2]。

粉煤灰作为性价比较高的一种活性矿物掺合料，更是在 C60 及以下普通混凝土的配比设计中成为降低生产成本的首选。张宏图等^[3]通过试验研究了粉煤灰和矿渣双掺对混凝土性能的影响，结果发现双掺 40%，比例 1:1 等量取代水泥可以制备性能优良的 C40 混凝土；Li 等^[4]以实际工程应用为背景研究了粉煤灰和矿渣粉对隧道注浆材料的影响，研究发现合理的粉煤灰掺量可以提高注浆料的初始稠度和流动性；Tran 等^[5]对多元固废下混凝土的强度和氯盐腐蚀进行了研究，结果发现双掺和三掺可以使混凝土具有更高的强度和极低的渗透性。

余丽武等^[6-7]以混凝土配比和施工质量等为切入点，对粉煤灰超量取代法进行了研究，结果发现在施工中采用低水胶比、高效减水剂、严控浇筑质量，可以满足实际施工的应用需求；此外，余丽武等^[8]也从宏观和微观两个维度对特定地区的 II 级粉煤灰超量取代技术进行了研究分析，发现掺粉煤灰混凝土 56 d 强度超过未掺粉煤灰混凝土的强度，但抗冻性和抗碳化能力有所降低；李述民等^[9]采用超量取代法，对 C20 和 C30 混凝土进行了研究，结果发现超量取代法在满足构件强度要求的同时，还能达到节约水泥用量的效果。

何智海等^[10-11]以强度为评定指标，对内掺粉煤灰混凝土的蒸养制度进行了研究，结果发现 2 h 预养 + 2 h 升温 + 8 h (60 ℃) 恒温 + 1 h 降温可以更好的促进材料早期水化，提高基体强度；何智海等^[12-13]在养护条件对比中研究发现较高的蒸养条件和恒温时间，有利于基体早期强度的发展，可以满足预制构件生产中的拆模和起吊要求；华学严等^[14]通过正交试验研究发现，预制构件的最佳养护制定为 4 h (25 ℃) 预养 + 3 h (40 ℃) 恒温；张垚等^[15]研究发现大掺量粉煤灰混凝土在 80 ℃ 的蒸养条件下比 60 ℃ 更能提高混凝土的早期强度；夏雨等^[16]通过水化热和 XRD 的

技术方法对不同掺量和热养条件下的粉煤灰和矿粉大体积混凝土强度进行了研究，结果发现掺矿物掺合料的混凝土强度与热养温度之间存在正相关，50 ℃ 时掺矿粉的混凝土早期强度要高于空白对照组。

随着对活性矿物掺合料研究的不断深入，刘超群等^[17]对粉煤灰等量取代下的 UHPC 流动性和力学性能进行了研究，结果发现 1:1 的灰砂比、25% 的矿物掺合料、0.18 的水胶比和 2% 的钢纤维掺量，UHPC 的性能最佳；周立红等^[18]则是基于层次分析法对不同掺合料影响下的 C150 混凝土各项性能进行了分析，指出粉煤灰的影响权重最大为 0.35，对应最佳掺量为 150 kg/m³，水泥权重最小为 0.17，对应最佳用量为 700 kg/m³。

综上所述，既有研究主要以固废材料的等量取代研究为主，超量取代也主要集中在混凝土普通养护研究中，对于高温蒸养条件下的预制混凝土研究还很少，可供参考的资料也较为有限。因此，采用宏观与微观分析相结合的方法对蒸养条件下的粉煤灰超量取代进行研究，旨在为大掺量固废混凝土研究提供更好的参考。

1 试验材料和方法

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥；机制砂细度模数 2.6，堆积密度 1 650 kg/m³；碎石颗粒级配为 5~20 mm 的连续级配，堆积密度为 1 530 kg/m³，针片状含量 <5%；粉煤灰（II 级）和硅灰两者的性能指标见表 1~2；减水剂采用减水率为 25% 的高效减水剂。

Table 1 II 级粉煤灰的化学成分表							
烧失量	含水量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	GaO	Cl ⁻	游离氧化钙
2.62	0.40	45.10	36.80	1.20	4.50	0.015	0.85

Table 2 硅灰的技术指标			
SiO ₂ /%	灼烧减量/%	比表面积/(m ² /g)	Cl ⁻ /%
92.3	3.42	19.1	0.07

1.2 试验配比与制作养护

1.2.1 试验配比

以表 3 试验配比为基准，依据试验规范，设计了 C30 粉煤灰超量取代法对应的试验配比，具体细节见

表 4。表 5 是在表 4 配比试验结果的基础上进行的粉煤灰和硅灰双掺配比。为了与实际生产施工所需的流动性相同，外加剂掺量视混凝土施工统一流动性进行添加。

表 3 基础试验配比 Table 3 Basic test ratio							
强度等级	基础配比/ (kg/m ³)					强度/MPa	
	水泥	砂	石	水	外加剂	脱模	28 d
C30	380	855	1 045	160	4.9	25.6	36.5

表 4 粉煤灰超量取代法详细试验配比 Table 4 Detailed experimental mix proportion of fly ash excess substitution method / (kg/m ³)						
编号	水泥	粉煤灰	砂	石	水	
1#	304	106.4	818.4	1 045	160	
2#	304	114.0	809.2	1 045	160	
3#	304	121.6	800.1	1 045	160	
4#	285	133.0	809.2	1 045	160	
5#	285	142.5	797.8	1 045	160	
6#	285	152.0	786.3	1 045	160	

备注：1#、2#和3#粉煤灰取代水泥率 20%，超量系数分别为 1.4、1.5 和 1.6；4#、5#和6#粉煤灰取代水泥率 25%，超量系数分别为 1.4、1.5 和 1.6。

表 5 双掺粉煤灰和硅灰各组分详细试验配比 Table 5 Detailed experimental ratio of each component of double blended fly ash and silica fume / (kg/m ³)						
编号	水泥	粉煤灰	硅灰	砂	石	水
3#-1	288.8	121.6	15.2	800.1	1 045	160
6#-1	270.7	152.0	14.3	786.3	1 045	160

备注：3#-1 粉煤灰取代水泥率 20%，超量系数为 1.6，硅灰取代水泥率为 5%；6#-1 粉煤灰取代水泥率 25%，超量系数为 1.6，硅灰取代水泥率为 5%。

1.2.2 样本制作与养护

将称量好的水泥、粉煤灰、粗细集料放入型号为 HJW-60 型强制式单卧轴混凝土搅拌机中搅拌 30 s，使各种材料充分混合；随后将水和外加剂依次加入搅拌机搅拌 120 s 出料；混凝土坍落度测试完成后，装入 100 mm × 100 mm × 100 mm 试模振捣成型，随后做好表面抹平处理。

试验采用蒸汽养护与标准养护相结合的方式。蒸汽养护分静养、升温、恒温 and 降温 4 个阶段，整个过程在立式养护窑中完成，升温 and 降温速度不超 20 ℃/h，恒温养护 6 h，温度不超 60 ℃。蒸养结束后，出窑、脱模、编号放入标准养护室养护至对应试验龄期。

1.3 试验方法

1.3.1 力学试验

力学性能按照 GB/T 50081—2019 《混凝土力学

性能试验方法标准》进行，加载速度为 0.5 MPa/s，每组试验结果取 3 个试件的平均值。

1.3.2 X 射线衍射分析 (XRD)

试验取脱模和 28 d 压碎试件的内部，将其浸泡在无水乙醇中，试验时在 40 ℃烘箱中烘至恒重，最后研磨并经过孔径为 0.075 mm 的标准筛。扫描广角为 2°~80°，电压 40 kV，电流 40 mA。

1.3.3 扫描电镜 (SEM)

在 XRD 取样的同时，进行 SEM 测试样品的取样。试验样品观察面尽量平整，长宽不超 1 cm，厚度不超 0.5 cm，方便后续的烘干、镀金与精确观测处理。

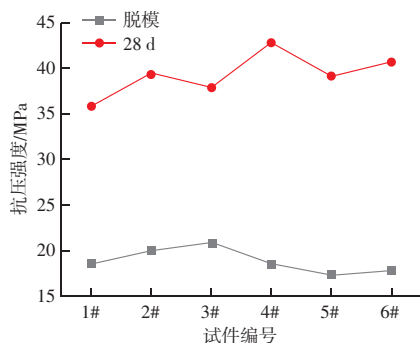
2 试验结果与分析

2.1 力学强度

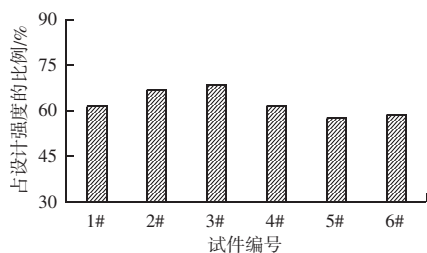
由图 1 (a) 可知，随着粉煤灰取代水泥率的增加，试件脱模抗压强度呈明显降低趋势，28 d 抗压强度却反向增长。在同一粉煤灰取代率下，1#~3#的脱模抗压强度随超量系数的增加逐渐增加，最大值为 20.8 MPa，但仍小于基础试件抗压强度 25.6 MPa，28 d 抗压强度呈先上升后降低的发展趋势，在超量系数为 1.5 时，达到最大值 39.4 MPa。4#~6#的脱模抗压强度与 28 d 抗压强度发展趋势相同，均呈先降低后增大的发展趋势，且抗压强度明显高于 1#~3#试验组，大于 C30 设计强度。从超量取代法的这个发展趋势来看，大掺量粉煤灰对预制混凝土的脱模抗压强度影响较大，对后期强度则有很好的促进作用。这是因为活性较低的粉煤灰前期“火山灰反应”不显著，后期随着水泥水化产物 Ga(OH)₂ 浓度的增大与碱性激发，粉煤灰中活性 SiO₂ 和 Al₂O₃ 与之反应程度也随之增强，再加上多余未水化的粉煤灰进一步填充了内部孔隙，使基体结构更加致密，强度更高。

为了满足预制构件生产的快速脱模与吊装，脱模抗压强度不应小于设计强度的 50%，吊运强度不应小于设计强度的 75%。从图 1 (b) 的试验结果来看，随着粉煤灰取代水泥率和超量系数的增大，1#~6#试验组的脱模抗压强度占设计强度的比例也越来越小，最大占比也仅为设计强度的 69%。说明粉煤灰超量取代法可以满足预制混凝土构件快速脱模要求，但并不适合脱模后的多次或长距离的吊装转运工作，这一情况在薄壁及大跨度预制结构中尤为关键。

材料科学



(a) 粉煤灰单掺强度

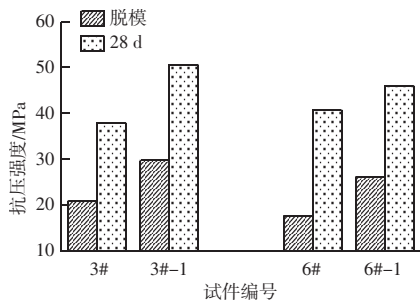


(b) 脱模抗压强度占设计强度的比例

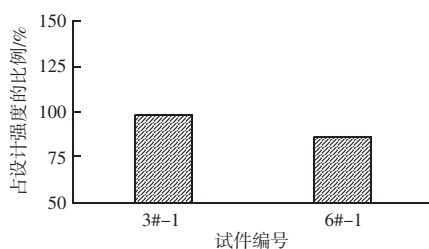
图1 粉煤灰超量取代法单掺抗压强度

Fig. 1 Excess substitution method of fly ash for compressive strength of single admixture

大掺量粉煤灰的加入不仅可以节约水泥和细集料,还可以改善混凝土的工作性、减少水化热、提高基体的耐久性,由图1可知,粉煤灰超量取代水泥并不适合预制构件早期强度要求。因此为了改善混凝土早强缺陷问题,选用3#和6#两组试验,采用硅灰等量取代5%水泥,结果如图2所示。3#-1和6#-1的脱模抗压强度分别为29.6、26.2 MPa,远超3#和6#脱模抗压强度,脱模抗压强度占比分别为99%和87%,远超设计强度的75%,满足预制构件的脱模和吊运要求。此外,3#-1和6#-1试验组28 d强度为50.7和46.2 MPa,分别为设计强度的1.69和1.54倍。但从设计、施工和成本等角度综合考虑,6#-1为粉煤灰超量取代法预制构件的最佳配比。



(a) 双掺强度



(b) 脱模抗压强度占设计强度的比例

图2 粉煤灰与硅灰双掺抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of fly ash and silica fume dual admixture

2.2 外加剂用量

由图3可知,在保证新拌混凝土工作性大致相同的情况下,1#~6#试验组外加剂掺量随粉煤灰取代率的增加整体呈先增加后降低的发展趋势变化。其中,4#试验组外加剂掺量最大,为胶凝材料用量的2.5%,6#试验组外加剂掺量最小,仅为胶凝材料用量的1.6%。相较于单掺粉煤灰,双掺粉煤灰和硅灰的3#-1和6#-1两组试件的外加剂掺量相对较少,说明适量硅灰的加入有利于混凝土流动性的提升。再结合图2的强度试验结果,6#-1的试验配比更加合理。

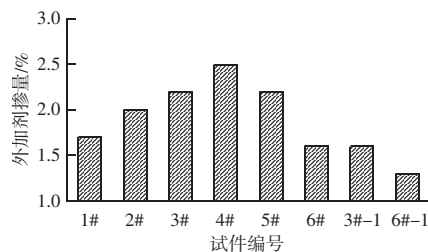


图3 外加剂掺量

Fig. 3 Additive dosage

3 增强机理分析

由前述试验结果看到,28 d抗压强度均达到甚至远超设计强度30 MPa,而前期脱模抗压强度区别较大,因此在增强机理分析中,主要以1 d脱模抗压强度展开微观层面上的定性分析与定量分析。

3.1 SEM定性分析

从1 d蒸养的水化产物SEM形貌图4整体来看,(a)~(d)硬化胶体中还存在大量孔隙,结构整体较为疏松。图(a)和图(c)所示单掺粉煤灰的混凝土水化产物以纤维状I型C-S-H和针状AFt为主,多存在于硬化浆体孔隙或依附在水泥颗粒表面。此外,在图(c)中依稀还可以看到呈立方片状的

CH 晶体, 再结合试验配比与强度分析来看, 粉煤灰取代率为 20%, 水泥用量较多的 3# 配比要比取代率为 25%, 水泥用量较少的 6# 配比二次水化反应更充分, 粉煤灰消耗 CH, 转化成 C-S-H 凝胶的效率要更高。因此 3# 的早期脱模抗压强度要高于 6# 的早期强度。与图 (a) 3# 和图 (c) 6# 相比, 双掺粉煤灰和硅灰的图 (a) 3#-1 和图 (c) 6#-1 中水化产物多以无定型的 C-S-H 凝胶存在, 整体微观结构也更致密, 相应的宏观力学强度比单掺粉煤灰的强度更高。说明双掺粉煤灰和硅灰的协同增强效应要比单掺粉煤灰的作用更强, 更有利于预制构件的生产制备。

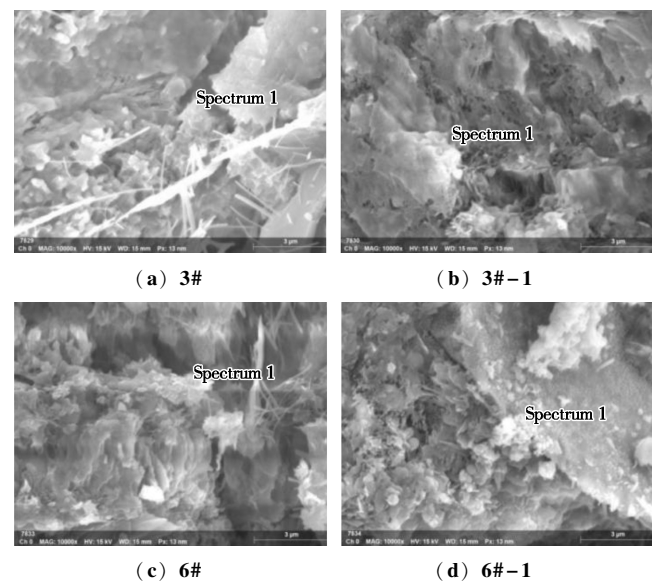


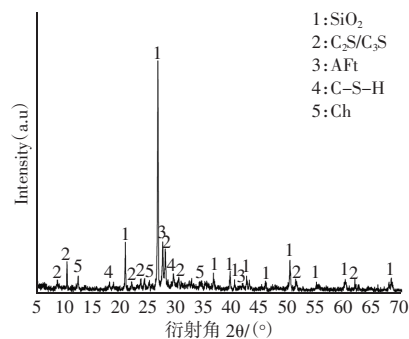
图 4 1 d 水化产物定性分析的 SEM 图

Fig. 4 SEM image of qualitative analysis of 1day hydration products

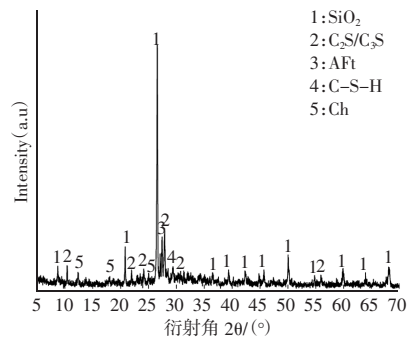
3.2 XRD 定量分析

从图 5 化学成分 XRD 检测图谱分析来看, 单掺粉煤灰和双掺粉煤灰与硅灰的胶凝体系水化产物衍射峰值变化大致相同, 但水化产物数量各异。从图 (a) ~ 图 (d) 整体来看, SiO_2 晶体的衍射峰最高最明显, 这主要与水泥、粉煤灰和硅灰所含主要化学成分有关。在纵向对比中, 结合图 5 和表 6 的具体数据来看, 图 (a) 3# 中 C_2S 、 C_3S 的衍射峰高度和 CH 的含量及衍射峰高度均小于图 (c) 6#, 而 SiO_2 含量和 C-S-H 衍射峰出现的次数均大于图 (c) 6#, 说明水泥的初期水化和粉煤灰的二次水化促进了更多有益 C-S-H 胶体的生成, 因此 3# 的宏观强度要比 6# 强度高。图 (a) 3# 中 AFt 衍射峰高于图 (c) 6#, 这一现象从图 4 中也可以得到体现。更多的针状 AFt

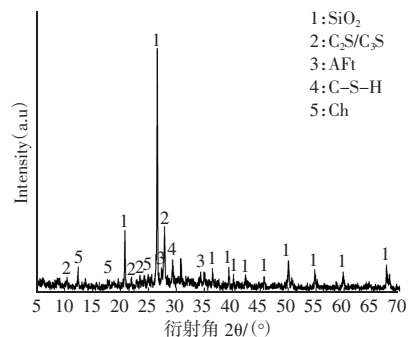
晶体刺破水泥颗粒表面已生成的水化物薄膜, 使水化反应进一步发生和强度的提升。



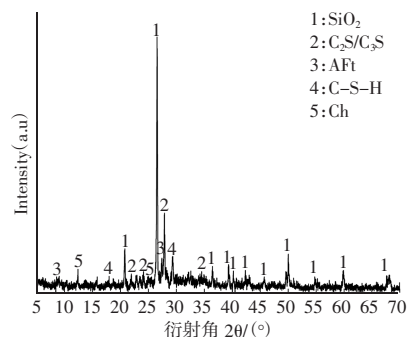
(a) 3#



(b) 3#-1



(c) 6#



(d) 6#-1

图 5 1 d 化学成分 XRD 检测图谱

Fig. 5 1day chemical composition XRD detection pattern

材料科学

表 6 1 d 龄期下的 SiO₂ 和 Ca (OH)₂ 含量
Table 6 SiO₂ and Ca (OH)₂ content at 1 day age /%

化学成分	3#	3#-1	6#	6#-1
SiO ₂	48.7	46.4	40.9	50.4
Ca (OH) ₂	4.0	3.7	10.1	3.5

在横向对比中，双掺硅灰和粉煤灰的 3#-1 和 6#-1 的 CH 含量分别为 3.7% 和 3.5%，均小于单掺粉煤灰 3# 和 6# 的 4.0% 和 10.1%，图（b）3#-1 和图（d）6#-1 中 C-S-H 衍射峰出现的次数与高度要高于图（a）3# 和图（c）6#。说明硅灰和粉煤灰的协同增强效应进一步促进了自身与 CH 的化合反应，生成具有胶凝性的水化产物 C-S-H，使宏观强度大幅提升。

4 结论

通过宏观力学试验和微观定性定量分析相结合的方法，对蒸养条件下粉煤灰超量取代法制备的 C30 混凝土特性和增强机理进行研究，得出以下结论：

（1）在强度试验中，试件脱模抗压强度随粉煤灰取代率的增加呈明显降低趋势，在取代率为 20%，超量系数为 1.6 时抗压强度最大，但仍小于基础试件的抗压强度。与脱模抗压强度相比，28 d 抗压强度成反向增长趋势，在取代率为 25%，超量系数为 1.4 时强度达到最大，大于基础试件抗压强度。

（2）从设计、施工和成本等角度综合考虑，在粉煤灰取代率和超量系数分别为 25% 和 1.6，硅灰内掺 5% 时，双掺配比下的粉煤灰超量取代配比脱模抗压强度和 28 d 抗压强度达到最大，其数值高于粉煤灰单掺和基础试验的抗压强度。

（3）在混凝土工作性相同的情况下，随着粉煤灰取代水泥率的增加，外加剂掺量整体呈先增加后降低的发展趋势变化，单掺时在粉煤灰取代率为 25%，超量系数为 1.6 时，外加剂用量最少为 1.6%，双掺粉煤灰和硅灰两组试件的外加剂掺量相对较少，说明硅灰的加入会在很大程度上改善新拌混凝土的流动性。

（4）在微观定性分析中，双掺硅灰和粉煤灰试件的水化效果与基体致密性要优于单掺粉煤灰试件，在定量分析中，双掺硅灰和粉煤灰的 CH 含量为 3.5% 左右，小于单掺粉煤灰的 CH 含量，同时水化

产物 C-S-H 的 X 衍射强度也最好。

参 考 文 献

[1] 董振平, 张成中, 孙广帅, 等. 掺合料混凝土早期强度的试验研究 [J]. 混凝土, 2017 (10): 83-89.

[2] 戴健, 蔡一平, 黄根民, 等. 一般环境 C30 高性能混凝土配合比优化设计与应用 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 54-60.

[3] 张宏图, 张强, 蔡志远, 等. 粉煤灰和矿渣粉对混凝土性能的影响研究 [J]. 试验研究, 2023 (7): 53-56.

[4] LI J, LIU Y, LI S, et al. Experimental investigation of synchronous grouting material prepared with different mineral admixtures [J]. Materials, 2022, 15 (3): 1260.

[5] TRAN Q, GHOSH P. Influence of pumice on mechanical properties and durability of high performance concrete [J]. Constr. Bulid. Mater. 2020, 249: 118741.

[6] 余丽武, 吴志平, 程国若. 超掺粉煤灰混凝土的工程应用研究 [J]. 南昌航空工业学院学报 (自然科学版), 2004, 18 (3): 105-110.

[7] 余丽武, 吴志平, 向东德. 大掺量粉煤灰高性能混凝土的工程应用 [J]. 南昌大学学报 (工科版), 2005, 27 (3): 48-51.

[8] 余丽武, 吴志平, 吴志强. II 级灰对配制大掺量粉煤灰混凝土的性能影响 [J]. 工业建筑, 2009, 39 (4): 110-113.

[9] 李述民, 吴良如, 林金涛. 超量取代法的优点 [J]. 粉煤灰综合利用, 1998 (1): 56.

[10] 何智海, 刘宝举, 程智清. 蒸汽养护条件下水泥-粉煤灰复合胶凝材料的水化性能研究 [J]. 混凝土, 2005 (12): 67-70.

[11] 何智海, 刘宝举. 蒸养条件对水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2007 (3): 12-14.

[12] 何智海, 刘运华, 刘江红. 蒸养制度对粉煤灰混凝土强度的影响 [J]. 混凝土, 2007 (12): 4-6.

[13] 苏扬, 徐志辉, 丑纪能, 等. 蒸养制度对预制构件混凝土早期强度的影响研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019 (3): 48-50.

[14] 华学严, 张立, 刘光辉, 等. 蒸汽养护参数对混凝土脱模强度与度时积的影响 [J]. 施工技术, 2020, 49 (21): 61-63.

[15] 张垚, 邹广强, 胡益彰, 等. 蒸养温度对单掺粉煤灰和矿渣蒸养混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2022 (11): 32-40.

[16] 夏雨, 高妮, 王永维, 等. 热养护对大体积混凝土不同活性矿物掺合料早期水化性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 6-12.

[17] 刘超群, 朱泽文, 代力, 等. 粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 11-15.

[18] 周立红, 侯鑫鑫, 王硕. 基于层次分析法分析的 C150 超高性能混凝土综合性能评价 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 35-39.